

ICS 75.200 ; 77.040.20

E 16 ; N 70

**SY**

中华人民共和国石油天然气行业标准

**P**

**SY/T 4109—2020**

代替 SY/T 4109—2013

---

# 石油天然气钢质管道无损检测

**Nondestructive testing standard of oil and gas steel pipeline**

2020-10-23 发布

2021-02-01 实施

---

国家能源局 发布

中华人民共和国石油天然气行业标准

## 石油天然气钢质管道无损检测

Nondestructive testing standard of oil and gas steel pipeline

SY/T 4109—2020

主编部门：中国石油天然气集团有限公司

批准部门：国家能源局

石油工业出版社

2020 北京

国家能源局

# 公 告

2020年 第5号

国家能源局批准《水电工程生态流量实时监测系统技术规范》等502项能源行业标准（附件1）、《Series Parameters for Horizontal Hydraulic Hoist (Cylinder)》等35项能源行业标准英文版（附件2），现予以发布。

- 附件：1. 行业标准目录（节选）  
2. 行业标准英文版目录（略）

国家能源局  
2020年10月23日

## 附件

## 行业标准目录（节选）

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
126	SY/T 0033—2020	油气田变配电设计规范	SY/T 0033—2009		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
127	SY/T 0043—2020	石油天然气工程管道和设备涂色规范	SY/T 0043—2006		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
128	SY/T 0086—2020	阴极保护管道的电绝缘标准	SY/T 0086—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
129	SY/T 0087.2—2020	钢质管道及储罐腐蚀评价标准 第2部分：埋地钢质管道内腐蚀直接评价	SY/T 0087.2—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
130	SY/T 0604—2020	工厂焊接液体储罐规范	SY/T 0604—2005		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
131	SY/T 4089—2020	滩海石油工程电气设计规范	SY/T 4089—1995		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
132	SY/T 4109—2020	石油天然气钢质管道无损检测	SY/T 4109—2013		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
133	SY/T 4113.7—2020	管道防腐层性能试验方法 第7部分：厚度测试	SY/T 0066—1999 SY/T 4107—2005		石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
134	SY/T 4113.8—2020	管道防腐层性能试验方 法 第8部分：耐磨性 能测试	SY/T 0065—2000		石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
135	SY/T 4113.9—2020	管道防腐层性能试验方 法 第9部分：耐液体 介质浸泡	SY/T 0039—2013		石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
136	SY/T 4122—2020	油田注水工程施工技术 规范	SY/T 4122—2012		石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
137	SY/T 4124—2020	油气输送管道工程竣工 验收规范	SY/T 4124—2013		石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
138	SY/T 5030—2020	石油天然气钻采设备 柴 油机	SY/T 5030—2013		石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
139	SY/T 5053.2—2020	石油天然气钻采设备 钻 井口控制设备及分流 设备控制系统	SY/T 5053.2—2007		石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
140	SY/T 5061—2020	钻井液用石灰石粉	SY/T 5061—1993		石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
141	SY/T 5066—2020	石油天然气钻采设备地层测试器	SY/T 5066—2008		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
142	SY/T 5139—2020	石油天然气钻采设备立放架车	SY/T 5139—2008		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
143	SY/T 5158—2020	石油勘探成像测井系统通用技术条件	SY/T 5158—2008		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
144	SY/T 5166—2020	石油抽油机井测试仪	SY/T 5166—2007		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
145	SY/T 5171—2020	陆上石油物探测量规范	SY/T 5171—2011		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
146	SY/T 5198—2020	钻具螺纹脂	SY/T 5198—1996		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
147	SY/T 5226—2020	石油天然气钻采设备抽油机节能拖动装置	SY/T 5226—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
148	SY/T 5340—2020	砾石充填防砂方法	SY/T 5340—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
149	SY/T 5360—2020	裸眼井单井测井数据处理流程	SY/T 5360—2004		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
150	SY/T 5363—2020	含油气层系划分	SY/T 5363—1997		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
151	SY/T 5373—2020	钻井井下工具与作业用图形符号	SY/T 5373—2009		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
152	SY/T 5525—2020	石油天然气钻采设备旋转钻井设备—上部和下部方钻杆旋塞阀	SY/T 5525—2009		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
153	SY/T 5660—2020	钻井液用包被絮凝剂聚丙烯酰胺类	SY/T 5660—1995		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
154	SY/T 5673—2020	油田用防垢剂通用技术条件	SY/T 5673—1993		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
155	SY/T 5727—2020	井下作业安全规程	SY 5727—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
156	SY/T 5748—2020	岩石气体突破压力测定方法	SY/T 5748—2013		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
157	SY/T 5796—2020	油田用絮凝剂评价方法	SY/T 5796—1993		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
158	SY/T 5820—2020	天然源电磁法采集技术规范	SY/T 5820—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
159	SY/T 5846—2020	套管补贴工艺作法	SY/T 5846—2011		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
160	SY/T 5862—2020	驱油用聚合物技术要求	SY/T 5862—2008		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
161	SY/T 5974—2020	钻井井场设备作业安全技术规程	SY 5974—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
162	SY/T 5980—2020	探井试油设计规范	SY/T 5980—2009		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
163	SY/T 5984—2020	油(气)田容器、管道和装卸设施接地装置安全规范	SY 5984—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
164	SY/T 5985—2020	液化石油气充装厂(站)安全规程	SY 5985—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
165	SY/T 6028—2020	探井地质实验分析项目及取样要求	SY/T 6028—1994		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
166	SY/T 6069—2020	油气管道仪表及自动化系统运行技术规范	SY/T 6069—2011		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
167	SY/T 6106—2020	气田开发方案编制技术要求	SY/T 6106—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
168	SY/T 6107—2020	油藏热物性参数的测定方法	SY/T 6107—2010		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
169	SY/T 6177—2020	气田开发方案及调整方案经济评价技术要求	SY/T 6177—2009		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
170	SY/T 6186—2020	石油天然气管道安全规范	SY 6186—2007		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
171	SY/T 6306—2020	钢质原油储罐运行安全规范	SY 6306—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
172	SY/T 6367—2020	石油天然气钻采设备钻井设备的检验、维护、修理和再制造	SY/T 6367—2009		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
173	SY/T 6415—2020	油气井录井资料质量评定规范	SY/T 6415—2010		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
174	SY/T 6450—2020	气举阀测试、调定和修理推荐作法	SY/T 6450—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
175	SY/T 6489—2020	水平井测井资料处理与解释规范	SY/T 6489—2000		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
176	SY/T 6492—2020	声速测井仪核实技术规范	SY/T 6492—2000 SY/T 5880.4—1995		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
177	SY/T 6536—2020	钢质储罐、容器内壁阴极保护技术规范	SY/T 6536—2012 SY/T 0047—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
178	SY/T 6586—2020	石油天然气钻采设备钻机现场安装及检验	SY/T 6586—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
179	SY/T 6600—2020	石油天然气钻采设备 承荷探测电缆	SY/T 6600—2004		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
180	SY/T 6608—2020	海洋石油作业人员安全培训要求	SY 6608—2013		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
181	SY/T 6662.2—2020	石油天然气工业用非金属复合管 第2部分：柔性复合高压输送管	SY/T 6662.2—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
182	SY/T 6714—2020	油气管道基于风险的检测方法	SY/T 6714—2008		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
183	SY/T 6727—2020	石油天然气钻采设备液压盘式刹车	SY/T 6727—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
184	SY/T 6732—2020	陆上多波多分量地震资料处理技术规程	SY/T 6732—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
185	SY/T 6773—2020	海上结构热机械控制轧(TMCP)钢板规范	SY/T 6773—2010		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
186	SY/T 6788—2020	水溶性油田化学剂环境保护技术评价方法	SY/T 6788—2010		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
187	SY/T 6797—2020	注水井分层流量实时测调仪	SY/T 6797—2010		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
188	SY/T 6827—2020	油气管道安全预警系统技术规范	SY/T 6827—2011		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
189	SY/T 6852—2020	油田采出水生物处理工程设计规范	SY/T 6852—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
190	SY/T 6859—2020	油气输送管道风险评价导则	SY/T 6859—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
191	SY/T 6864—2020	钻井液黏度计校准方法	SY/T 6978—2014 SY/T 6864—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
192	SY/T 6871—2020	石油天然气钻采设备 钻井液固相控制设备安装、使用、维护和保养	SY/T 6871—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
193	SY/T 6885—2020	油气田及管道工程雷电防护设计规范	SY/T 6885—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
194	SY/T 6890—2020	流量计运行维护规程	SY/T 6890.1—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
195	SY/T 6891.2—2020	油气管道风险评价方法第2部分：定量评价法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
196	SY/T 6900—2020	Sercel 400 系列地震数据采集系统检验项目及技术指标	SY/T 6900—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
197	SY/T 6915.4—2020	石油天然气钻采设备偏心工作筒流量控制系统第4部分：偏心工作筒及相关设备操作规程		ISO 17078-4: 2010, MOD	石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
198	SY/T 6919—2020	石油天然气钻采设备钻机和修井机涂装规范	SY/T 6919—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
199	SY/T 6940—2020	页岩含气量测定方法	SY/T 6940—2013		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
200	SY/T 6954—2020	原油氧化动力学参数测定方法	SY/T 6954—2013		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
201	SY/T 6994—2020	页岩气测井资料处理与解释规范	SY/T 6994—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
202	SY/T 7002—2020	储层地球物理预测技术规范	SY/T 7002—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
203	SY/T 7015—2020	石油天然气钻采设备固井压裂柱塞泵	SY/T 7015—2014		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
204	SY/T 7410.2—2020	岩石三维孔隙结构测定方法 第2部分：聚焦离子束切片法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
205	SY/T 7464—2020	耐腐蚀合金双金属复合管焊接及无损检测技术标准			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
206	SY/T 7465—2020	陆上石油开采区土壤环境调查技术指南			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
207	SY/T 7466—2020	陆上石油天然气开采水基钻井废弃物处理处置及资源化利用技术规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
208	SY/T 7467—2020	钻井液环保性能评价技术规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
209	SY/T 7468—2020	油气生产物联网系统技术规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
210	SY/T 7469—2020	砂岩溶蚀模拟实验方法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
211	SY/T 7470—2020	原油中金刚烷类化合物的定量分析方法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
212	SY/T 7471—2020	近地表油气指示微生物检测方法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
213	SY/T 7472—2020	油气管道完整性管理等级评估规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
214	SY/T 7473—2020	油气输送管道通信系统设计规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
215	SY/T 7474—2020	油气田空氮站设计规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
216	SY/T 7475—2020	石油天然气建设工程施工质量验收规范 地下水封石洞油库工程			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
217	SY/T 7476—2020	油气输送管道地质灾害防治工程施工规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
218	SY/T 7477—2020	埋地钢管道机械化补口技术规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
219	SY/T 7479—2020	石油工程监督劳动定额			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
220	SY/T 7480—2020	对船加注液化天然气作业安全检查			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
221	SY/T 7481—2020	非常规油气开采含油污泥处理处置技术规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
222	SY/T 7482—2020	非常规油气开采污染控制技术规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
223	SY/T 7483—2020	用在线气相色谱法测定天然气中硫化物含量			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
224	SY/T 7484—2020	天然气 烃露点的测定 冷却镜面自动检测法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
225	SY/T 7485—2020	岩石物理频谱激电测试技术规程			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
226	SY/T 7486—2020	地下水封洞库工程物探规程			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
227	SY/T 7487—2020	海洋高温高压井钻井作业要求			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
228	SY/T 7488—2020	海洋丛式井组防碰及碰后处理要求			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
229	SY/T 7489—2020	连通井钻井技术要求			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
230	SY/T 7490—2020	平行水平井钻井作业规程			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
231	SY/T 7491.1—2020	油气藏岩石力学性质测试技术规范 第1部分：砾岩			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
232	SY/T 7492—2020	抽油机井示功图法产量计算技术规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
233	SY/T 7493—2020	浅海油井压裂设计、施工规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
234	SY/T 7494—2020	油气田用起泡剂实验评价方法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
235	SY/T 7495—2020	连续油管的维护与检测			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
236	SY/T 7496—2020	套管磨损试验方法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
237	SY/T 7497—2020	OBNEM 海洋电磁采集站			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
238	SY/T 7498—2020	随钻测控井下仪器一体化平台技术规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
239	SY/T 7499—2020	海上离心泵在线监测系统设计与安装推荐作法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
240	SY/T 7552—2020	天然气贸易计量用流量计选用指南			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
241	SY/T 7600—2020	外浮顶油罐雷电流分流分路安全技术规范			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
242	SY/T 7601.1—2020	石油天然气工业能源审计 第1部分：油气生产			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
243	SY/T 7602—2020	液化天然气码头卸料臂检修规程			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
244	SY/T 7603—2020	石油天然气钻采设备井口安全控制系统			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
245	SY/T 7604—2020	石油天然气钻采设备 井设备使用及维护			石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
246	SY/T 7605—2020	石油天然气钻采设备 海洋立管全尺寸疲劳试验 方法			石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
247	SY/T 7606—2020	石油天然气钻采设备 钢和合金钢螺栓连接			石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
248	SY/T 7607—2020	带微型热导的气相色谱 法快速测定天然气中 硫化氢、四氢噻吩			石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
249	SY/T 7608—2020	地下水封洞库水幕给水 技术规范			石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
250	SY/T 7609—2020	砂岩油藏化学复合驱开 发方案设计技术规范			石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01
251	SY/T 7610—2020	石油天然气钻采设备 高压管汇的在线检测与监 测技术规范			石油工业 出版社	2020-10-23	2021-02-01

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
252	SY/T 7611—2020	海底管道土相互作用的推荐作法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
253	SY/T 7612—2020	水下设备性能鉴定标准化流程文件推荐做法			石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
254	SY/T 10010—2020	非分类区域和I级1类及2类区域的固定及浮式海上石油设施的电气系统设计、安装与维护推荐作法	SY/T 10010—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
255	SY/T 10023.1—2020	海上油(气)田开发项目经济评价方法 第1部分：自营油(气)田	SY/T 10023.1—2012		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01
256	SY/T 10034—2020	敞开式海上生产平台防火与消防的推荐作法	SY/T 10034—2000		石油工业出版社	2020-10-23	2021-02-01

# 前 言

根据国家能源局综合司《关于下达 2019 年能源领域行业标准制（修）订计划及英文版翻译出版计划的通知》（国能综通科技〔2019〕58 号）的规定，本规范编写组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外先进标准，结合科研成果和实验结果，并在广泛征求意见的基础上，修订本规范。

本规范共分 10 章和 14 个附录，主要技术内容是：总则、术语、基本规定、射线检测、X 射线数字成像检测、X 射线计算机辅助成像检测、超声检测、相控阵超声检测、磁粉检测和渗透检测。

本规范修订的主要技术内容是：

1 对适用的检测范围进行了调整，射线检测和 X 射线数字成像检测将不锈钢纳入检测范围中，超声检测取消了不适用于法兰、弯头焊接接头检测的规定。

2 调整了正文结构，在一般规定中增加了对检测设备和器材进行检定、校准或核查的要求，对检测场所和环境的要求，对无损检测质量管理和安全防护的要求，以及对有关无损检测档案的要求。

3 提出了射线底片数字化的指标要求。

4 修订了射线胶片的分类方法，增加了钢管标准抗拉强度下限值大于或等于 540MPa 的高强度材料宜选用 C4 类或更高级别的胶片，透照厚度大于 40mm 时，可选用 C5 类胶片的相关规定。

5 调整了 X 射线检测透照厚度的计算方法，将焊缝余高从透照厚度计算中剔除。

6 调整了对观片灯的最大亮度的要求，规定最大亮度应能

满足观察黑度 4.5 的底片。

7 增加了对黑度计测量光孔直径的要求，将测量光孔的直径规定为 0.5mm。

8 调整了 X 射线检测中直径 100mm ~ 400mm 管道的透照次数的要求，规定按照  $K$  值不大于 1.2 计算透照次数。

9 调整了射线检测曝光量的相关规定，取消了中心透照可以放宽曝光量的规定，增加了使用高频射线机时可以适当放宽曝光量的内容。

10 增加了双胶片透照技术要求，规定透照厚度大于或等于 60mm 可以采用双胶片透照技术。对双胶片的透照布置和双胶片的黑度及评定方法做了规定。

11 调整了单胶片透照时底片黑度范围，下限为 2.0，上限为 4.5。增加了双胶片透照的黑度要求：双胶片透照双底片评定时黑度下限为 2.7，上限为 4.5；双胶片透照单底片评定时黑度下限为 1.3，上限为 4.5。允许在观片灯亮度满足要求时对黑度更大的底片进行评定。

12 对像质计灵敏度指数进行了调整，对部分透照厚度像质计灵敏度值提高了要求。

13 调整了射线检测缺欠验收标准，增加了缺欠长度方向和宽度方向相关性的要求，调整了缺欠验收尺寸，调整了未熔合、未焊透及条形缺欠的验收尺寸。

14 增加了不锈钢对接接头中的根部未熔合、根部未焊透应评为 IV 级的要求。

15 X 射线数字成像检测增加了有关探测器坏像素的要求。

16 X 射线数字成像检测增加了对不同透照厚度下的归一化信噪比的要求。

17 增加了 X 射线计算机辅助成像检测方法和质量评定标准。

18 明确了超声检测中法兰、弯头等焊接接头的检测要求。

19 取消了 SRB 试块及其相关要求，并取消了根部未焊透与 SRB 试块检测结果进行比较的要求。

20 调整了超声检测质量评定缺欠验收尺寸。

21 增加了相控阵超声检测方法和质量评定标准。

本规范由国家能源局负责管理，由石油工程建设专业标准化委员会负责日常管理，由徐州东方工程检测有限责任公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请寄送徐州东方工程检测有限责任公司（地址：江苏省徐州市泉山区三环南路 19 号东方检测公司，邮编：221008），以供今后修订时参考。

本规范主编单位：徐州东方工程检测有限责任公司

本规范参编单位：中国石油天然气管道第二工程有限公司

中国石油集团工程技术研究院有限公司

郑州华龙工程检测有限公司

大庆油田三维工程检测有限责任公司

河北中跃检验检测技术有限公司

中国石油天然气管道科学研究院有限公司

松原市卓越检测工程有限公司

本规范主要起草人员：曹 健 陶学刚 常 亮 于麟川

王 飞 南 宇 李 健 康 军

刘永振 周广言 饶立军 张宏亮

陈 凯 赵军伟 李 强 尹 俊

冯春华 曹万才 梁海滨 刘全利

李 真 王一博 李 明 杨明明

本规范主要审查人员：李献军 李艳华 李增材 张东浩

张 彦 李小龙 霍祥华 张振永

韩相勇 齐丽华 刘觉非 于 洋

贾占鹏 畅 翔 龚 华 王鹏宇

庞鑫峰 肖 飞

# 目 次

1	总则	1
2	术语	2
3	基本规定	9
3.1	一般规定	9
3.2	无损检测人员	9
3.3	检测设备与器材	10
3.4	无损检测工艺文件	11
3.5	检测场所和环境	12
3.6	无损检测质量管理	12
3.7	无损检测安全防护	13
3.8	无损检测档案	14
4	射线检测	16
4.1	一般规定	16
4.2	射线胶片	16
4.3	增感屏	16
4.4	像质计	17
4.5	观片灯	17
4.6	黑度计	18
4.7	检测标识	18
4.8	表面状态	18
4.9	透照布置	19
4.10	透照几何条件	20
4.11	透照次数	20
4.12	像质计的放置和识别	21
4.13	曝光参数	21

4.14	无用射线和散射线的屏蔽	23
4.15	胶片处理	24
4.16	评片规定	24
4.17	底片质量	24
4.18	质量评定	25
4.19	检测记录和报告	32
5	X射线数字成像检测	33
5.1	一般规定	33
5.2	检测系统	33
5.3	系统分辨率	35
5.4	线型像质计	35
5.5	透照方式	36
5.6	透照几何条件	38
5.7	一次透照长度	41
5.8	表面状态	41
5.9	线型像质计的放置和识别	41
5.10	检测标识	42
5.11	曝光参数	42
5.12	图像分辨率的测定	43
5.13	图像质量	43
5.14	缺陷的识别和测量	44
5.15	工艺验证	45
5.16	质量评定	45
5.17	数据存储	46
5.18	检测记录和报告	46
6	X射线计算机辅助成像检测	47
6.1	一般规定	47
6.2	检测系统	47
6.3	系统空间分辨率	49
6.4	表面状态	49

6.5	透照布置	49
6.6	透照几何条件	50
6.7	曝光参数	51
6.8	无用射线和散射线的屏蔽	52
6.9	图像分辨率的测定	52
6.10	图像分辨率	53
6.11	图像质量	53
6.12	数据存储	54
6.13	质量评定	55
6.14	检测记录和报告	55
7	超声检测	56
7.1	超声检测设备	56
7.2	超声探头	56
7.3	超声试块	57
7.4	耦合剂	58
7.5	距离—幅度曲线	58
7.6	系统校准和复核	59
7.7	检测准备	60
7.8	现场检测	60
7.9	质量评定	62
7.10	检测记录和报告	63
8	相控阵超声检测	64
8.1	一般规定	64
8.2	检测设备	64
8.3	试块	67
8.4	耦合剂	68
8.5	检测设置	69
8.6	检测工艺验证	74
8.7	现场检测	74
8.8	扫查数据质量	75

8.9	缺欠的测量	76
8.10	质量评定	76
8.11	检测记录和报告	78
9	磁粉检测	79
9.1	一般规定	79
9.2	磁粉检测设备	79
9.3	标准试片	79
9.4	辅助器材	81
9.5	磁粉、载体及磁悬液	81
9.6	校验	82
9.7	检测范围	83
9.8	检测准备	83
9.9	检测技术规定	83
9.10	复验	85
9.11	质量评定	85
9.12	检测记录和报告	86
10	渗透检测	87
10.1	一般规定	87
10.2	检测材料	87
10.3	试块	87
10.4	检测灵敏度	89
10.5	安全防护	89
10.6	检测范围	90
10.7	表面规定	90
10.8	检测技术规定	90
10.9	复验	92
10.10	质量评定	93
10.11	检测记录和报告	94
附录 A	胶片系统特性指标	95
附录 B	黑度计(光学密度计)核查方法	96

附录 C	环向对接焊接接头透照次数确定方法	97
附录 D	检测报告格式	99
附录 E	双线型像质计	114
附录 F	射线数字成像检测系统分辨率测定	116
附录 G	平面成像最少透照次数的确定方法	119
附录 H	X 射线计算机辅助成像检测系统空间分辨率的测定	123
附录 I	SGB 试块的型式和规格	126
附录 J	表面声能损失差的测定	128
附录 K	A 型脉冲反射式超声探伤系统工作性能测试方法	129
附录 L	相控阵探头晶片灵敏度差异与有效性测试	134
附录 M	SGB-PA 试块型式和规格	135
附录 N	非标准温度下的检测规范的确认	137
标准用词说明		138
引用标准名录		139
附：条文说明		140
参考文献		199

# Contents

1	General	1
2	Terms	2
3	Basic principle	9
3.1	General requirement	9
3.2	NDT personnel	9
3.3	NDT equipment	10
3.4	NDT procedure specification	11
3.5	NDT place and environment	12
3.6	NDT quality management	12
3.7	NDT safety protection	13
3.8	NDT files	14
4	Radiographic testing	16
4.1	General provisions	16
4.2	Radiographic film	16
4.3	Intensifying screen	16
4.4	Image quality indicator	17
4.5	Film illuminator	17
4.6	Densitometer	18
4.7	Marking	18
4.8	Surface condition	18
4.9	Transillumination arrangements	19
4.10	Transillumination geometric condition	20
4.11	Transillumination frequency	20
4.12	Placement and identification of image quality indicator	21
4.13	Exposure parameter	21

4.14	Reduction of useless radiation and scattered radiation .....	23
4.15	Film processing .....	24
4.16	Requirement of film evaluation .....	24
4.17	Radiograph quality .....	24
4.18	Quality assessment .....	25
4.19	Inspection records and reports .....	32
5	Digital radiographic testing technique .....	33
5.1	General provisions .....	33
5.2	Test system .....	33
5.3	System resolution .....	35
5.4	Wire type IQI .....	35
5.5	Transillumination mode .....	36
5.6	Transillumination geometric condition .....	38
5.7	Length of one-time exposure .....	41
5.8	Surface state .....	41
5.9	Placement and identification of IQI .....	41
5.10	Marking .....	42
5.11	Exposure parameter .....	42
5.12	Image resolution ratio determination .....	43
5.13	Image quality .....	43
5.14	Identification and measurement of defects .....	44
5.15	Process verification .....	45
5.16	Quality assessment .....	45
5.17	Data storage .....	46
5.18	Inspection records and reports .....	46
6	X-ray Computer aided imaging testing .....	47
6.1	General provisions .....	47
6.2	Test system .....	47
6.3	System resolution .....	49
6.4	Surface state .....	49

6.5	Transillumination arrangements	49
6.6	Transillumination geometric condition	50
6.7	Exposure parameter	51
6.8	Reduction of useless radiation and scattered radiation	52
6.9	Image resolution ratio determination	52
6.10	Image resolution ratio	53
6.11	Image quality	53
6.12	Data storage	54
6.13	Quality assessment	55
6.14	Inspection records and reports	55
7	Ultrasonic testing	56
7.1	Equipment	56
7.2	Probe	56
7.3	Block	57
7.4	Couplant	58
7.5	Distance-amplitude correction (DAC) curve	58
7.6	System confirmation and review	59
7.7	Test preparation	60
7.8	Field inspection	60
7.9	Quality assessment	62
7.10	Inspection records and reports	63
8	Phased array ultrasonic testing	64
8.1	General provisions	64
8.2	Equipment	64
8.3	Block	67
8.4	Couplant	68
8.5	Detection settings	69
8.6	Process verification	74
8.7	Field testing	74
8.8	Scan data quality	75



Appendix B	Periodic verification method for densitometer	96
Appendix C	Recommended number of exposures which give an acceptable testing of a circumferential butt weld	97
Appendix D	Test report format	99
Appendix E	Duplex wire image quality indicator	114
Appendix F	Test method and identification method for system resolution DR	116
Appendix G	Method for determining the minimum number of exposure times for planar imaging	119
Appendix H	Determination of spatial resolution of X-ray computer aided imaging system	123
Appendix I	Type and size of block for ultrasonic testing	126
Appendix J	Test method for surface acoustic energy loss	128
Appendix K	Test method for system performance of A-mode ultrasonic testing using pulse echo technique	129
Appendix L	Sensitivity difference and effectiveness test of phased array probe chips	134
Appendix M	Type and specification of SGB-PA test block	135
Appendix N	Test method verification under non-standard temperature	137
	Explanation of wording in this code	138
	List of quoted standards	139
	Addition ; Explanation of provisions	140
	References	199



# 1 总 则

1.1 为了统一石油天然气钢质管道无损检测的技术规定，确无损检测质量，制定本规范。

1.2 本规范适用于石油天然气长输、集输及其站场的钢质管焊接接头的射线检测、X 射线数字成像检测、计算机辅助成射线检测、超声检测、相控阵超声检测、磁粉检测和渗透检及评定。

1 射线检测适用于壁厚为 2mm ~ 50mm、材料为低碳钢、合金钢，以及不锈钢的管道环向对接接头 X 射线、 $\gamma$  射线检及评定。

2 X 射线数字成像检测及 X 射线计算机辅助成像检测适用壁厚为 2mm ~ 50mm、材料为低碳钢、低合金钢及不锈钢的首环向对接接头的 X 射线成像检测及评定。

3 超声检测适用于壁厚为 5mm ~ 50mm，管道直径大于等于 57mm 的低碳钢、低合金钢等金属材料的管道环向对接头超声波检测与评定。

4 相控阵超声检测适用于壁厚为 5mm ~ 50mm，管道直径于或等于 20mm，材料为低碳钢、低合金钢的管道对接接头超皮检测及评定。弯头与直管、带颈法兰与直管、回弯头与直管又单侧具有直边的对接接头及角接头可参照本方法进行检测。

5 磁粉检测适用于铁磁性材料的管道焊接接头表面、近表缺欠的检测及评定。

6 渗透检测适用于金属材料的管道焊接接头表面开口缺欠检测及评定。

1.3 石油天然气钢质管道无损检测除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术 语

### 2.0.1 透照厚度 penetrated thickness (K)

射线照射方向上材料的公称厚度。多层透照时，透照厚度为通过的各层材料公称厚度之和。

### 2.0.2 透照厚度比 ratio of max and min penetrated thickness (K)

一次透照长度范围内射线束穿过母材的最大厚度与最小厚度之比。

### 2.0.3 小径管 small diameter tube

公称直径小于或等于 100mm 的管子。

### 2.0.4 缺欠 imperfection

按本规范规定的检测方法检出的金属不连续、不致密或接不良的现象。

### 2.0.5 缺陷 defect

按本规范检测出的不可接受的缺欠。

### 2.0.6 圆形缺欠 round imperfection (RI)

长宽比小于或等于 3 的气孔、夹渣和其他夹杂物等缺欠。可以是圆形、椭圆形、锥形或带有尾巴等不规则形状。

### 2.0.7 条形缺欠 strip-type imperfection (STI)

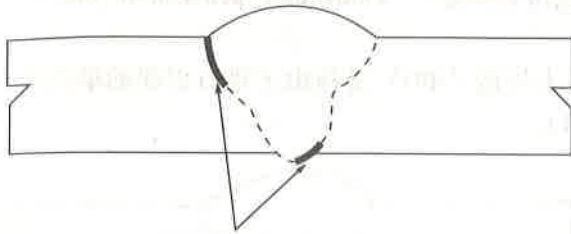
长宽比大于 3 的气孔、夹渣和其他夹杂物等缺欠。

### 2.0.8 表面未熔合 incomplete fusion (IF)

熔焊金属与母材之间未能完全熔化结合且延续到表面的开口缺欠，包括外表面未熔合和根部未熔合（图 2.0.8）。

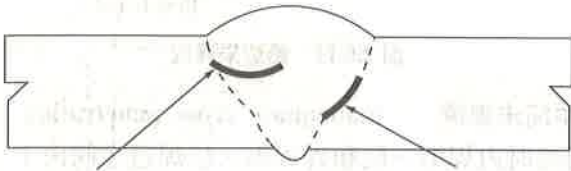
### 2.0.9 夹层未熔合 incomplete fusion due to cold lap (IL)

熔焊金属之间（层间未熔合）或熔焊金属与母材之间（未熔合）未能完全熔化结合，但不延续到表面的缺欠（图 2.0.



在连接表面处未熔合

图 2.0.8 表面未熔合



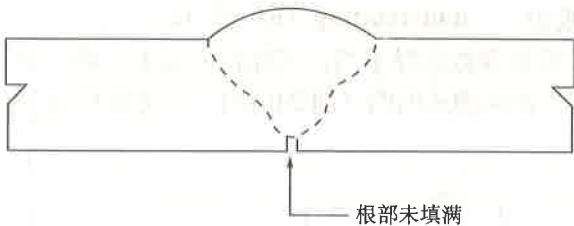
焊道间的冷夹层

焊道与母材间的冷夹层

图 2.0.9 夹层未熔合

### 2.0.10 根部未焊透 inadequate penetration without high-low (IP)

母材根部钝边金属未熔化或未完全熔化，焊缝金属没有进入接头根部或根部未完全熔透形成的缺欠（图 2.0.10）。



根部未填满

图 2.0.10 根部未焊透

注：在根部的一边未填满或两边未填满。

### 2.0.11 错边未焊透 inadequate penetration due to high-low (IPD)

错边未焊透 (IPD) 是指由于错口引起的单边根部未焊透 (图 2.0.11)。

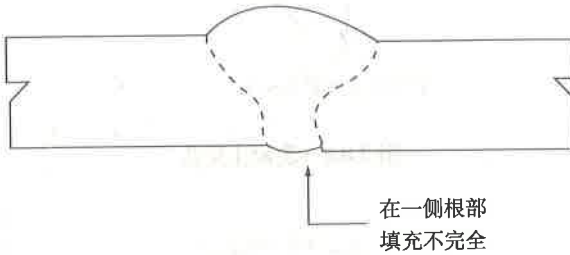


图 2.0.11 错边未焊透

### 2.0.12 中间未焊透 inadequate cross penetration (ICP)

双面焊时内焊第一层和外焊第一层焊道之间由于未完全焊透引起的内部缺欠 (图 2.0.12)。

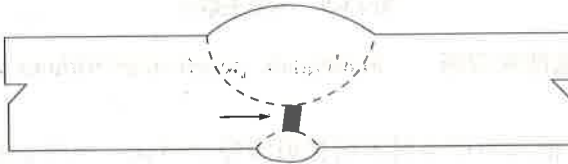


图 2.0.12 中间未焊透

### 2.0.13 咬边 undercutting (EU & IU)

由于焊接参数选择不当, 或操作方法不正确, 沿焊趾的母材部位产生的沟槽或凹陷 (图 2.0.13), 分为外咬边 (EU) 和内咬边 (IU)。

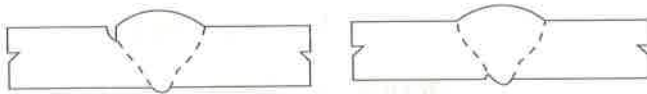
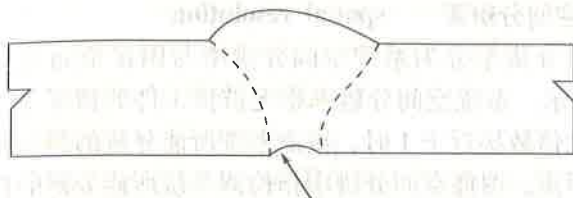


图 2.0.13 外咬边和内咬边

## 2.0.14 根部内凹 internal concavity (IC)

焊缝边缘已良好熔合和焊透，但焊缝内表面焊道中部比管壁表面稍低形成的凹陷（图 2.0.14）。



根焊道两边已熔合，但中间略低于管内表面

图 2.0.14 根部内凹

## 2.0.15 烧穿 burn-through (BT)

熔焊时熔化金属自焊缝背面流出，部分根焊道被熔穿，形成穿孔的现象（图 2.0.15）。

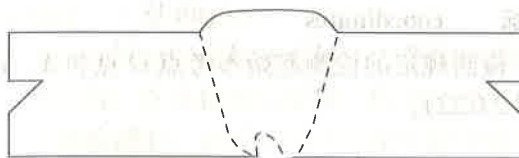


图 2.0.15 烧穿示意图

## 2.0.16 X 射线数字成像检测 digital radiographic testing (DR)

一种通过数字探测器采集穿过被检工件的 X 射线，将其转换成数字灰度图像，并采用计算机进行评定的检测技术。

## 2.0.17 X 射线计算机辅助成像检测 X-ray computed radiographic testing (CR)

一种采用成像板采集穿过被检工件的 X 射线，通过专用激光扫描仪将成像板上的信息转换成数字灰度图像，并利用计算机进行评定的检测技术。

## 2.0.18 坏像素 bad pixel

在暗场图像中出现比相邻像素灰度值过高或过低的白点或

黑点。

### 2.0.19 窗宽窗位 window width and level

显示的灰度值的范围及该范围中心灰度值的位置。

### 2.0.20 空间分辨率 spatial resolution

空间分辨率分为系统空间分辨率与图像空间分辨率，用 lp/mm 表示。系统空间分辨率指无被检工件的情况下，当透照几何放大倍数接近于 1 时，检测系统所能分辨的两个相邻细节的最小距离。图像空间分辨率指检测系统所能分辨的被检工件图像中两个相邻细节间的最小距离。

### 2.0.21 相控阵超声检测 phased-array ultrasonic testing (PAUT)

根据设定的延迟法则激发相控阵阵列探头各独立压电晶片（阵元），合成声束并实现声束的移动、偏转和聚焦等功能，再按一定的延迟法则接收超声信号并以图像的方式显示被检对象内部状态的超声检测技术。

### 2.0.22 坐标 coordinates

相控阵检测规定的检测起始参考点  $O$  点和  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  坐标的含义（图 2.0.22）。

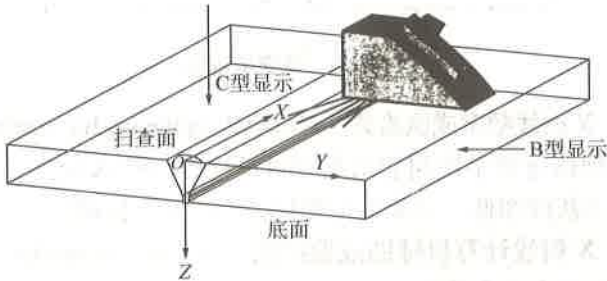


图 2.0.22 相控阵检测坐标示意图

$O$ —设定的检测起始参考点， $X$ —沿焊缝长度方向的坐标，

$Y$ —扫查面上沿焊缝宽度方向的坐标， $Z$ —垂直于扫查面沿焊缝厚度方向的坐标。

### 2.0.23 线扫描 linear electronic scanning (E-scan)

采用不同的阵元和相同延迟法则得到的声束，在确定范围

内沿相控阵探头长度方向扫描被检焊缝，以实现类似常规手动超声波检测探头前后移动的检测效果，也称作 E 扫描。线扫描包括直入射线扫描和斜入射线扫描两种。

#### **2.0.24 扇扫描 sectorial electronic scanning (S-scan)**

采用同一组晶片和不同延迟法则得到的声束，在确定角度范围内扫描被检件，也称作 S 扫描。

#### **2.0.25 C 型显示 C-display**

工件平面投影图显示，即俯视图，图像中横坐标表示平行线扫描移动的距离，纵坐标表示扫描的宽度。焊缝检测时，C 扫描显示表示检测区域在  $X-O-Y$  平面的投影（图 2.0.22）。

#### **2.0.26 B 型显示 B-display**

工件侧面投影图显示，即侧视图，图像中横坐标表示平行线扫描移动的距离，纵坐标表示深度。焊缝检测时，B 扫描显示表示检测区域在  $X-O-Z$  平面的投影（图 2.0.22）。

#### **2.0.27 S 型显示 S-display**

由扇扫描声束组成的扇形图像显示，图像中横坐标表示离开探头前沿的位置，纵坐标表示深度，沿扇面弧线方向的坐标表示角度。焊缝检测时，S 型显示的是探头前方焊缝的横截面信息。

#### **2.0.28 模拟试块 verification test block**

与被检测焊接接头型式相同或相近，带有人工反射体或焊接缺欠用于验证 PAUT 工艺有效性的试块。

#### **2.0.29 校准试块 calibration block**

超声相控阵检测中，按一定规则设计的用于 TCG 修正、角度修正，以及检测灵敏度调试和校准的加工有长横孔、反射圆弧等人工反射体的试块。

#### **2.0.30 相关显示 relevant indication**

磁粉检测、渗透检测中由缺欠引起的显示通称为相关显示。

#### **2.0.31 非相关显示 non-relevant indication**

磁粉检测时由磁路截面突变及材料磁导率差异等原因产

生的漏磁场吸附磁粉形成的磁痕显示，或是由于加工工艺、零件结构、外形或机械损伤等所引起的磁痕显示，通称为非相关显示。

### 2.0.32 伪显示 false indication

磁粉检测时不是由漏磁场吸附磁粉形成的磁痕显示，也叫假显示。

## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 应根据被检产品的材质、制造方法、工作介质、使用条件和失效模式，对可能产生的缺欠种类、形状、部位和取向，综合考虑射线、X射线数字成像、X射线计算机辅助成像、超声、相控阵超声、磁粉、渗透等检测方法的特点和局限性，选择适宜的无损检测方法。

**3.1.2** 射线检测、X射线数字成像检测、X射线计算机辅助成像检测、超声检测、相控阵超声检测宜用于管道对接接头内部缺欠的检测。磁粉检测宜用于焊接接头表面及近表面缺欠的检测。渗透检测宜用于焊接接头表面开口缺欠的检测。

**3.1.3** 管道对接接头内部的面状缺欠，宜采用超声检测、相控阵超声检测。管道对接接头内部的体积状缺欠及薄壁管对接接头，宜采用射线检测、X射线数字成像检测或X射线计算机辅助成像检测。

**3.1.4** 检测铁磁性材料表面及近表面缺欠时，宜采用磁粉检测。

**3.1.5** 当采用两种或两种以上的检测方法对同一焊接接头或焊接接头的同一部位进行检测时，应符合相应的检测标准。如采用同种检测方法、不同检测工艺对焊接接头的同一部位进行检测，当检测结果不一致时，应以评定危险度大的结果为准。

### 3.2 无损检测人员

**3.2.1** 从事无损检测的人员应取得国家或行业有关部门颁发或认可的并与其工作相适应的资格证书。

**3.2.2** 无损检测人员资格级别分为Ⅲ（高）级、Ⅱ（中）级和

I（初）级。取得不同无损检测方法各资格级别的人员，只应从事与该方法和该资格级别相应的无损检测工作，并应负相应的责任。当某种检测方法只有Ⅱ（中）级和Ⅰ（初）级资格证书时，Ⅱ（中）级人员可以履行Ⅲ（高）级人员的责任。

### **3.2.3 检测人员还应符合下列规定：**

1 使用射线装置的人员上岗前应接受辐射安全知识培训，并取得相应的辐射安全培训证书。

2 从事射线底片和数字图像评定的人员未经矫正或经矫正的近（距）视力和远（距）视力不应低于 5.0（小数记录值为 1.0），测试方法应符合现行国家标准《标准对数视力表》GB/T 11533 的规定。从事检测评定的检测人员应每年检查一次视力。

3 从事相控阵、磁粉和渗透检测的工作人员不应有色盲。

## **3.3 检测设备与器材**

**3.3.1** 检测设备和主要器材应具有产品质量合格证明文件。

**3.3.2** 检测设备和器材应符合其相应的产品标准规定，且其性能指标应符合本规范相关检测方法部分的规定。

**3.3.3** 检测设备和检测灵敏度相关的器材应定期进行检定、校准或核查，检定、校准或核查的选择和实施应符合下列规定：

1 凡列入国家强制检定目录应进行强制检定管理的无损检测设备和灵敏度相关器材，应定期送有资格的法定计量检定机构或授权计量检定机构进行检定。

2 未列入国家强制检定目录、可进行量值溯源的无损检测设备和灵敏度相关器材，应定期进行校准。校准可选择中国合格评定国家认可委员会认可的校准机构进行，也可由检测单位自行开展内部校准，自行开展内部校准的检测单位应具备本规范各章节规定的校准能力。

3 对于未列入国家强制检定目录且无法进行量值溯源的无损检测设备和灵敏度相关器材，应定期进行核查，以证实其性

能指标符合本规范相应章节的有关规定，核查可由检测单位自行开展。

**3.3.4** 在检定、校准或核查周期内的无损检测设备和灵敏度相关的器材，应按本规范相关章节的规定进行运行核查，运行核查的项目、周期和性能指标应在检测单位的工艺规程中予以规定。

### 3.4 无损检测工艺文件

**3.4.1** 检测单位实施检测前应编制无损检测工艺文件，无损检测工艺文件包括工艺规程和操作指导书。

**3.4.2** 无损检测工艺规程应按相关技术文件和本规范编制，符合石油天然气有关安全、环保、防护等相关法规、标准的规定。

**3.4.3** 工艺规程应明确具体检测方法相关因素的具体范围或规定，如相关因素的变化超出规定时，应修订或重新编制工艺规程。工艺规程应包括下列内容：

- 1 工艺规程版本号及编号。
- 2 适用范围。
- 3 依据的法规、标准或其他技术文件。
- 4 检测人员资格规定。
- 5 检测设备和器材，以及检定、校准或核查的规定。
- 6 工艺规程涉及的相关因素项目及其范围。
- 7 不同检测对象的检测技术和检测工艺选择，以及对操作指导书的规定。
- 8 检测时机、检测前的准备规定、检测标记、检测后处理等检测实施规定。
- 9 检测结果的评定和质量分级。
- 10 检测记录的规定。
- 11 检测报告的规定。
- 12 编制人及级别、审核人及级别和批准人。
- 13 编制日期。

**3.4.4** 应根据工艺规程结合具体检测对象编制操作指导书。操作指导书宜采用表、卡的形式，应完整、明确和具体，并应有编制和审核人员签字。操作指导书应包含下列内容：

- 1 操作指导书编号。
- 2 依据的工艺规程及其版本号、编号。
- 3 执行标准、检测时机、检测比例、合格级别和检测前的表面准备等检测技术规定。
- 4 检测对象名称、规格尺寸、材质、检测范围等检测对象的具体参数。
- 5 检测设备和器材的类别、规格型号、性能指标。
- 6 检测工艺参数。
- 7 检测程序。
- 8 检测示意图。
- 9 检测记录的规定。
- 10 工艺验证和灵敏度复核规定。
- 11 编制人及级别和审核人及级别。
- 12 编制日期。

### **3.5 检测场所和环境**

**3.5.1** 电源、照明、风速、温度和湿度等设施和环境条件不应影响无损检测的有效实施。

**3.5.2** 若检测场所和环境对检测质量有影响时，应采取有效的控制措施，同时监测和记录环境条件。当环境条件危及检测结果时，应停止检测。

### **3.6 无损检测质量管理**

**3.6.1** 检测单位应建立无损检测质量管理制度，实施无损检测质量管理。

**3.6.2** 无损检测质量管理应包括下列内容：

- 1 无损检测人员。
- 2 无损检测设备器材。
- 3 无损检测工艺文件。
- 4 无损检测场所和环境。
- 5 无损检测过程控制。
- 6 无损检测资料和档案。

### 3.7 无损检测安全防护

**3.7.1** 检测单位应建立安全管理制度，实施无损检测安全防护。

**3.7.2** 放射卫生防护应符合现行国家标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》GB 18871、《工业 X 射线探伤放射防护要求》GBZ 117、《工业  $\gamma$  射线探伤放射防护标准》GBZ 132 的有关规定。

**3.7.3** 现场进行 X 射线检测时，应按现行国家标准《工业 X 射线探伤放射卫生防护标准》GBZ 117 的规定划定控制区和监督区，并应设置警告标志。

**3.7.4** 现场进行  $\gamma$  射线检测时，应按现行国家标准《工业  $\gamma$  射线探伤卫生防护标准》GBZ 132 的规定划定控制区和监督区，并应设置警告标志。检测时，应围绕控制区边界测定辐射水平。

**3.7.5** 现场检测时，检测工作人员应佩戴个人剂量计、携带射线报警仪，进行  $\gamma$  射线检测时应配备辐射监测仪，并按现行国家标准《职业性外照射个人监测规范》GBZ 128 的规定进行个人监测。

**3.7.6** 除放射卫生防护外还应重点关注下列因素：

- 1 对电磁辐射和有毒有害材料采取防护措施。
- 2 在封闭和受限空间内进行操作时，应针对有毒有害气体，以及管沟塌方、山体滑坡等采取防护措施。
- 3 高空操作时应对人员和检测设备器材坠落采取防护措施。
- 4 在寒冷、高温等极端环境下进行操作时，应采取防冻伤、防中暑等保护措施。

5 在油气管道运行场所或其他易燃易爆场所实施检测时，应遵守相关安全规定，并采取气体检测等防护措施。

### 3.8 无损检测档案

**3.8.1** 检测单位应建立完整的无损检测档案，至少应包含下列内容：

- 1 无损检测委托单或检测指令。
- 2 无损检测工艺文件。
- 3 无损检测记录。
- 4 无损检测报告。
- 5 射线底片和检测数字图像及数据。

**3.8.2** 无损检测记录应包括下列内容：

- 1 记录编号。
- 2 依据的操作指导书名称或编号。
- 3 执行标准和合格级别。
- 4 检测对象名称、编号、规格尺寸、材质、外观状态、检测部位、检测比例及检测时机。
- 5 检测设备和器材的名称、规格型号和编号。
- 6 检测工艺参数。
- 7 检测示意图。
- 8 原始检测数据。
- 9 检测数据的评定结果。
- 10 检测人员、评定人员、审核人员及级别。
- 11 检测日期。

**3.8.3** 检测记录应真实、准确、完整、有效，并有相应责任人员签名认可。

**3.8.4** 检测报告应包含下列内容：

- 1 报告编号。
- 2 执行标准和合格级别。

3 检测对象名称、编号、规格尺寸、材质、检测部位、检测比例和检测时机。

4 检测设备和器材的名称和规格型号。

5 检测工艺参数。

6 检测部位示意图。

7 检测结果和检测结论。

8 编制人、审核人及级别。

9 编制日期及检测专用章。

**3.8.5** 检测记录、报告、底片或扫查图像等检测资料应按规定存档，保存期不应少于7年。

**3.8.6** 当对射线检测底片数字化时，应符合下列规定：

1 数字图像分辨率不应低于300dpi。

2 A/D转换位数不应小于12bit。

3 数字图像灵敏度不应低于胶片应识别灵敏度。

4 图像储存应采用无损检测数字成像与通信标准（DICOM）规定的格式。

## 4 射线检测

### 4.1 一般规定

4.1.1 除 X 射线无法穿透或空间受限外，应选用 X 射线检测。

4.1.2 检测时机应符合设计文件和相关规定。

### 4.2 射线胶片

4.2.1 射线胶片系统应按现行国家标准《无损检测 工业射线照相胶片 第 1 部分：工业射线照相胶片系统的分类》GB/T 19348.1 的规定划分为 C1、C2、C3、C4、C5 和 C6 类。C1 类为最高类别，C6 类为最低类别。胶片系统的特性指标宜按照本规范附录 A 的规定执行。

4.2.2 在符合灵敏度规定的情况下，X 射线检测应选用 C5 类或更高类别的胶片，钢管标准抗拉强度下限值大于或等于 540MPa 的高强度材料宜选用 C4 类或更高类别的胶片，透照厚度大于 40mm 时，可选用 C5 类胶片。 $\gamma$  射线应选用 C4 类或更高类别的胶片。胶片制造商应对所生产的胶片进行系统性能测试并提供类别和参数。胶片的本底灰雾度不应大于 0.3。使用进口胶片时，应保证其类别与本规范规定的类别相对应。

### 4.3 增感屏

4.3.1 射线检测时可使用铅质增感屏或不使用增感屏。增感屏的选用应符合表 4.3.1 的规定。

4.3.2 在透照过程中，应保证胶片和增感屏紧密接触。

表 4.3.1 增感屏的选用

射线种类	增感屏材料	前屏厚度 (mm)	后屏厚度 (mm)	中屏厚度 (mm)
≤ 400kV X 射线	铅	0.03 ~ 0.10	0.03 ~ 0.10	2×0.03 ~ 2×0.10
Ir192、Se75	铅	0.10 ~ 0.20	0.10 ~ 0.20	2×0.10

注：双胶片透照技术应增加使用中屏。

## 4.4 像 质 计

4.4.1 应采用钢质线型金属丝像质计测定底片影像质量，其型号和规格应符合现行行业标准《无损检测 线型像质计通用规范》JB/T 7902 的规定。小径管可选用通用线型像质计，也可选用现行行业标准《无损检测 线型像质计通用规范》JB/T 7902—2015 附录 A 规定的专用等径钢质金属丝像质计。

4.4.2 可根据透照厚度选用像质计，选用的像质计型号应保证其最细金属丝的丝号高于或等于按本规范规定应达到的灵敏度丝号。透照厚度的计算应符合表 4.4.2 的规定。

表 4.4.2 透照厚度的确定

母材厚度	焊缝余高	透照厚度 (mm)	
		单层透照	双层透照 (含双壁单影)
$T$	无	$T$	$T \times 2$
$T$	单面	$T$	$T \times 2$
$T$	双面	$T$	$T \times 2$

注：焊缝两侧母材厚度不同时，以较薄侧计。

## 4.5 观 片 灯

4.5.1 观片灯的主要性能指标应符合现行国家标准《无损检测 工业射线照相观片灯 最低要求》GB/T 19802 的有关规定。

4.5.2 观片灯的亮度应能符合观察黑度为 4.5 的底片的规定，且

亮度可调节。对不需要观察或透光量过强的部分宜采用遮光板以屏蔽强光。

## 4.6 黑度计

**4.6.1** 黑度计的测量光孔直径宜小于或等于 0.5mm，黑度计可测的最大黑度不应小于 4.5，测量值的误差不应超过  $\pm 0.05$ 。

**4.6.2** 黑度计应采用标准黑度片进行核查，至少每六个月核查一次。核查方法宜按本规范附录 B 的规定进行。

**4.6.3** 标准黑度片应至少每两年送有资格的法定计量检定机构或授权计量检定机构进行校准。

## 4.7 检测标识

**4.7.1** 透照部位的标记应包括定位标记和识别标记。标记宜由适当尺寸的铅（或其他适宜的重金属）制数字、拼音字母和符号等构成。

**4.7.2** 焊接接头透照定位标记包括搭接标记（↑或数字）和中心标记（↕）。当搭接标记用英文字母或数字表示时，可不用中心标记。小径管透照时，可只用中心标记。工件表面的定位标记宜沿介质流动方向从平焊位置顺时针用油质记号笔画定。

**4.7.3** 识别标记至少应包括工程编号、桩号（线位号）、焊接接头编号、施工单位代号、壁厚、透照日期等。对小径管透照时，底片上至少应有工程编号、焊接接头编号、部位编号和透照日期。返修部位还应有返修标记  $R_1, R_2, \dots$ （脚码表示返修次数）。

**4.7.4** 定位标记和识别标记均应在底片适当位置显示，离焊接接头边缘应至少 5mm。搭接标记应放于胶片侧。

## 4.8 表面状态

**4.8.1** 焊接接头的表面不规则状态不应影响检测的实施及检测结果的评定，否则应做适当的修磨。

4.8.2 焊接接头内表面的铁水、药皮及飞溅等物体焊接完成后应进行清除，其残留物不应影响缺陷评定。

## 4.9 透照布置

4.9.1 按射线源、工件和胶片之间的相互位置，管道环缝主要采用中心透照法、双壁单影透照法和双壁双影透照法几种方式(图 4.9.1)。应优先采用中心透照方式，当中心透照方式不可行时，方可采用双壁透照方式。透照时射线束中心应垂直指向透照区中心，需要时也可选用有利于发现缺陷的方向透照。

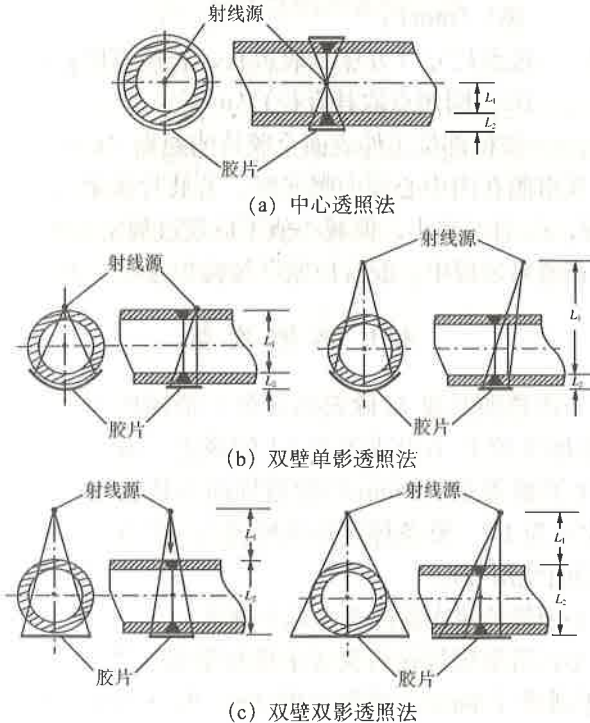


图 4.9.1 透照方式示意图

$L_1$ —射线源至透照部位工件表面的距离； $L_2$ —透照部位工件表面至胶片的距离

**4.9.2** 可采用单胶片或双胶片透照布置。采用双胶片透照技术时透照厚度不应小于 60mm，且应使用两张分类等级相同的胶片。

**4.9.3** 中心透照时可采用一张或多张胶片，单张胶片的长度不宜超过 2m。

## 4.10 透照几何条件

**4.10.1** 射线源至被检部位工件表面的距离应按下式计算：

$$L_1 \geq 10dL_2^{2/3} \quad (4.10.1)$$

式中  $L_1$ ——射线源至被检部位工件表面的距离（或称透照距离）（mm）；

$d$ ——焦点尺寸（方焦点取边长，长焦点取长短边之和的 1/2，圆焦点取其直径）（mm）；

$L_2$ ——被检部位工件表面至胶片的距离（mm）。

**4.10.2** 采用源在内中心周向曝光时，若底片质量符合黑度和灵敏度规定， $L_1$  值可减小，但减小值不应超过规定值的 50%。

**4.10.3** 在透照过程中，胶片应紧贴被检焊接接头表面。

## 4.11 透照次数

**4.11.1** 一次透照长度  $L_3$  除符合几何不清晰度的规定外，还应符合透照厚度比  $K$  小于或等于 1.1 的规定。对于公称直径大于 100mm 小于或等于 400mm 的管道环向焊接接头，透照厚度比  $K$  值最大可为 1.2。整条焊接接头所需的透照次数宜按照本规范附录 C 的曲线图确定。

**4.11.2** 小径管透照次数应符合以下规定：

1 小径管对接焊接接头应采用双壁双影透照布置，当壁厚 ( $T$ ) 小于或等于 8mm，焊缝宽度 ( $g$ ) 小于或等于  $D_0/4$  ( $D_0$  为管道外径) 时，应采用倾斜透照方式椭圆成像。椭圆成像时焊缝投影内侧间距宜为 3mm ~ 10mm，最大间距不应超过 15mm。当不符合上述条件或椭圆成像有困难时可做垂直透照。

2 采用倾斜透照椭圆成像时,当  $T/D_0$  小于或等于 0.12 时,应至少相隔  $90^\circ$  透照 2 次。当  $T/D_0$  大于 0.12 时,应至少相隔  $120^\circ$  或  $60^\circ$  透照 3 次。垂直透照重叠成像时,应相隔  $120^\circ$  或  $60^\circ$  透照 3 次。

3 当采用倾斜透照椭圆成像时,底片上被检测区黑度符合本规范第 4.17.1 条规定的为有效评定区,相邻底片的有效评定区的重叠应保证覆盖被检测区的整个体积范围,如最少曝光次数不能满足 100% 覆盖时,则应增加曝光次数。

**4.11.3** 每次透照时胶片对相邻区域的覆盖不宜少于 30mm。

## 4.12 像质计的放置和识别

**4.12.1** 像质计的放置应符合下列规定:

1 双壁单影透照时,像质计可放置在焊接接头被检部位胶片侧表面的一端、被检区长度的  $1/4$  位置,金属丝应垂直横跨焊缝,细丝置于外侧。

2 环向对接接头作中心周向曝光时,可在胶片侧至少均匀布置 4 个像质计。若采用多张胶片一次透照时,应保证每张胶片处均放置有像质计,像质计间隔距离可适当调整,但应保证焊缝 6 点位放置有像质计。

3 双壁单影透照或中心周向曝光时,若像质计置于源侧时应附加“S”标记以示区别。

4 对小径管焊接接头进行双壁双影透照时,像质计应放置于射线源侧被检焊缝有效透照区中心部位。

**4.12.2** 像质计的识别应符合下列规定:

1 在底片黑度均匀部位能清晰地看到长度不小于 10mm 的连续像质计金属丝影像时,则认为该丝是可识别的。

2 专用像质计应能识别不少于两根金属丝。

## 4.13 曝光参数

**4.13.1** X 射线照相相应尽量选用较低的管电压。透照不同厚度焊

接头时，允许使用的最高管电压应控制在图 4.13.1 规定的范围内。透照截面厚度变化大的工件时，可采用超过图 4.13.1 规定的 X 射线管电压，但管电压增加量最高不应超过 50kV。

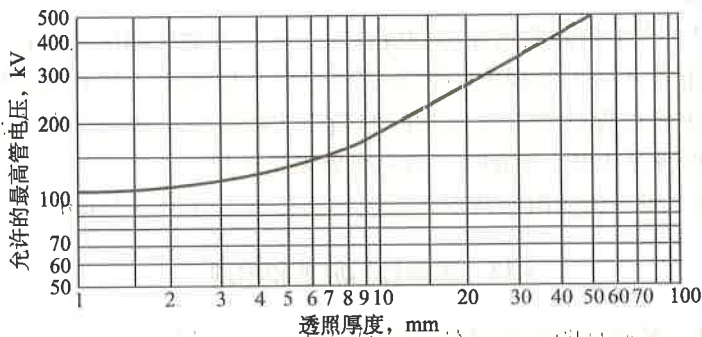


图 4.13.1 透照厚度和允许使用的最高管电压

4.13.2  $\gamma$  射线源的透照厚度范围应符合表 4.13.2 的规定。

表 4.13.2  $\gamma$  射线源的透照厚度范围

$\gamma$ 射线源		透照厚度 (mm)
名称	平均能量 (MeV)	
Se75	0.206	$\geq 10 \sim 40$
Ir192	0.35	$\geq 20 \sim 100$

注：中心透照时，在保证像质计灵敏度符合本规范规定的前提下，允许最小透照厚度取表中下限值的 1/2。

4.13.3 曝光量应符合下列规定：

1 采用 X 射线源透照时，当焦距为 700mm 时，曝光量不宜小于 15mA·min。当焦距改变时可按曝光因子公式对曝光量进行换算。

2 采用  $\gamma$  射线源透照时，曝光时间不应少于输送源往返所需时间的 10 倍。

3 小径管对接焊接接头采用椭圆成像或重叠成像方式透

照，宜采用较高的管电压并适当降低曝光量。由于结构等原因只能透照一次时，应选择较高的管电压，曝光量可控制在 $7.5\text{mA}\cdot\text{min}$ 以内，管子内壁轮廓应清晰地显现在底片上。

4 采用高频恒压X射线机时曝光量可适当减少，但应保证像质质量和透照灵敏度符合本规范规定。

**4.13.4** 可采用工艺试验方法或利用曝光曲线确定曝光参数。

**4.13.5** 工艺试验方法应符合下列规定：

1 射线能量和曝光量的选择应符合本规范第4.13.1条、第4.13.2条和第4.13.3条的规定。

2 工艺试验所采用的透照布置，暗室处理条件，以及胶片、增感屏、射线装置等器材应与实际检测相同。

3 工艺试验的灵敏度、黑度等参数应符合本规范的规定。

4 应记录并保存工艺试验的结果，并应保存相关射线底片。

**4.13.6** 曝光曲线制作应符合下列规定：

1 应根据设备、胶片和增感屏、暗室处理条件等制作曝光曲线，并以此选择曝光规范。

2 制作曝光曲线所采用的胶片、增感屏、焦距、射线能量等条件，以及底片应达到的灵敏度、黑度等参数均应符合本规范的规定。

3 对使用中的曝光曲线，每年应至少核查一次。射线设备更换重要部件或大修理后，应及时对曝光曲线进行核查或重新制作。

## 4.14 无用射线和散射线的屏蔽

**4.14.1** 应采用金属增感屏、铅板等适当措施，屏蔽散射线和无用射线，限制照射场范围。

**4.14.2** 对初次制订的检测工艺，或使用中检测工艺的条件、环境发生改变时，应进行背散射防护检查。为检查背散射，可在暗盒背面贴附“B”铅字标记，“B”铅字的高度宜为13mm，厚度宜为1.6mm，并按检测工艺的规定进行透照和暗室处理。若在底片上出现黑度小于周围背景的“B”影像，说明背散射防护

不够，应采取有效措施防护背散射。若底片上不出现“B”字影像或出现黑度大于周围背景黑度的“B”字影像，则说明背散射防护符合规定。

#### 4.15 胶片处理

4.15.1 胶片处理宜按胶片使用说明书的规定进行。

4.15.2 宜采用自动冲洗方式处理，也可采用手工冲洗方式处理。

#### 4.16 评片规定

4.16.1 底片评定宜在专用评片室进行。评片室应整洁、安静，温度应适宜，光线应暗且柔和，室内照明用光不得在底片上产生反射。

4.16.2 评片人员在评片前应经历一定的暗适应时间。从阳光下进入评片的暗适应时间宜为 5min ~ 10min。从一般的室内进入评片的暗适应时间不宜少于 30s。

4.16.3 底片评定范围的宽度应至少为焊缝本身及焊缝两侧各不小于 5mm 的热影响区。

4.16.4 底片评定时，评定范围内的亮度应符合下列规定：

1 当底片评定范围内的黑度  $D$  小于或等于 2.5 时，透过底片评定范围内的亮度不应低于  $30\text{cd/m}^2$ 。

2 当底片评定范围内的黑度  $D$  大于 2.5 时，透过底片评定范围内的亮度不应低于  $10\text{cd/m}^2$ 。

#### 4.17 底片质量

4.17.1 底片黑度应采用黑度计（光学密度计）进行测量。底片评定范围内的黑度  $D$  应符合表 4.17.1 的规定。

4.17.2 底片评定范围内的黑度限值允许提高，但观片灯应经过校验，观片灯亮度应保证在底片最高黑度评定范围内透过的亮度能够符合本规范第 4.16.4 条的规定。

表 4.17.1 底片的黑度范围

透照技术	评定方法	黑度 $D$	备注
单胶片透照技术	单底片评定	2.0 ~ 4.5	单底片黑度
双胶片透照技术	双底片评定	2.7 ~ 4.5	双底片叠加黑度
双胶片透照技术	单底片评定	1.3 ~ 4.5	单底片黑度

4.17.3 用 X 射线采用单胶片透照技术透照小径管或截面厚度变化大的工件时，底片评定范围内的黑度允许降低至 1.5。

4.17.4 底片上的像质计和检测标记应齐全，位置应正确，且不应掩盖被检焊缝及热影响区的影像。

4.17.5 像质计置于胶片侧时，底片上像质计灵敏度应至少符合表 4.17.5 的规定。像质计置于射线源侧时，应通过对比实验确定像质计灵敏度。

表 4.17.5 像质计灵敏度

透照厚度 (mm)	规定达到的像质丝号	线直径 (mm)	透照厚度 (mm)	规定达到的像质丝号	线直径 (mm)
2.0	17	0.080	> 22 ~ 38	11	0.320
> 2.0 ~ 3.5	16	0.100	> 38 ~ 48	10	0.400
> 3.5 ~ 5	15	0.125	> 48 ~ 60	9	0.500
> 5 ~ 10	14	0.160	> 60 ~ 85	8	0.630
> 10 ~ 15	13	0.200	> 85 ~ 100	7	0.800
> 15 ~ 22	12	0.250	—	—	—

4.17.6 底片评定范围内不应有妨碍缺欠影像识别的水迹、划痕、斑纹等伪缺陷影像。

## 4.18 质量评定

4.18.1 对接接头内的缺欠可分为圆形缺欠、条形缺欠、裂纹、

未熔合、未焊透、内凹、咬边、烧穿。

**4.18.2** 平行于焊缝分布的两个或两个以上的条形缺欠、未熔合及未焊透缺欠，当其横向间距  $h$  小于或等于 3mm 时，认为该两缺欠处于同一条直线上（图 4.18.2-1）。平行且重叠分布的两个缺欠（图 4.18.2-2），不作为一个缺欠评定，但应计入累计长度。

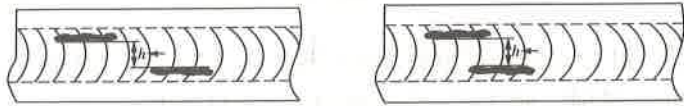


图 4.18.2-1 平行分布缺陷示意图 图 4.18.2-2 重叠分布的缺陷示意图

**4.18.3** 对接接头应分为 I、II、III 和 IV 等四个等级，具体内容应符合下列规定：

- 1 I 级对接接头内不应存在裂纹、未熔合、未焊透、条形缺欠、烧穿、内凹和内咬边。
- 2 II、III 级对接接头内不应存在裂纹、外表面未熔合。
- 3 对接接头中缺欠超过 III 级者为 IV 级。
- 4 固定连头焊接接头中的根部未熔合、根部未焊透应评为 IV 级。
- 5 焊口返修部位的未熔合、未焊透应评为 IV 级。
- 6 不锈钢对接接头中的根部未熔合、根部未焊透应评为 IV 级。

**4.18.4** 圆形气孔和圆形夹渣（含夹杂）等圆形缺欠的评定应符合下列规定：

- 1 圆形缺欠用圆形缺欠评定区进行评定，评定区域的大小应符合表 4.18.4-1 的规定。评定区框线的长边应与焊缝平行，框线内应包含最严重区域的主要缺欠，与框线外切的缺欠不应计入评定区，相割的缺欠应计入评定区。
- 2 圆形缺欠应符合表 4.18.4-2 的规定，换算成点数。
- 3 不计点数的圆形缺欠应符合表 4.18.4-3 的规定。

表 4.18.4-1 缺欠评定区

母材厚度 $T$ (mm)	$\leq 25$	$> 25 \sim 50$
评定区尺寸 (mm $\times$ mm)	$10 \times 10$	$10 \times 20$

表 4.18.4-2 缺欠点数换算表

缺欠长 (mm)	$\leq 1$	$> 1 \sim 2$	$> 2 \sim 3$	$> 3 \sim 4$	$> 4 \sim 6$	$> 6 \sim 8$	$> 8$
点数	1	2	3	6	10	15	25

表 4.18.3-3 不计点数的缺欠尺寸

母材厚度 $T$ (mm)	缺欠长径
$\leq 25$	$\leq 0.5$
$> 25 \sim 50$	$\leq 0.7$

4 圆形缺欠应按表 4.18.3-4 的规定进行质量分级。

表 4.18.3-4 圆形缺欠的质量分级

评定区 (mm $\times$ mm)		$10 \times 10$			$10 \times 20$
母材厚度 (mm)		$2 \sim 5$	$> 5 \sim 15$	$> 15 \sim 25$	$> 25 \sim 50$
等级	I	1	2	3	4
	II	3	6	9	12
	III	6	12	18	24
	IV	缺欠点数大于Ⅲ级者			

5 由于材质或结构等影响,进行返修可能会产生不利后果的对接接头,各级别的圆形缺欠点数可放宽一至二点。

6 I级对接接头和母材厚度小于或等于5mm的II级对接

接头内，不计点数的圆形缺欠在评定区内多于 10 个时，焊接接头质量应降低一个级别。

7 圆形缺欠长径大于  $T/2$  时，应评为 IV 级。

8 底片上黑度较大的缺欠，如确认为柱孔或针孔时，应评为 IV 级。

**4.18.5 条形缺欠的质量分级应符合表 4.18.5-1 和表 4.18.5-2 的规定。**

**表 4.18.5-1 条形缺欠质量分级**

质量级别	缺欠宽度 (mm)	单个缺欠长度 (mm)	缺欠累计长度
II	≤ 2	≤ 2T 且最大不超过 25	任何连续 300mm 的焊接接头长度内，其累计长度不应超过 50mm
III		≤ 3T 且最大不超过 50	任何连续 300mm 的焊接接头长度内，其累计长度不应超过 50mm
IV	大于 III 级者或缺欠影像黑度超过相邻较薄侧母材黑度者		

注：1 当两个或两个以上的缺欠处于同一直线上且相邻缺欠的间距小于或等于较小缺欠的长度时，应作为一个缺欠处理，间距不计入缺欠长度。

2 缺欠影像中任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时，即应认为缺欠的影像黑度大于相邻较薄侧母材影像黑度。

**表 4.18.5-2 小径管条形缺欠质量分级**

质量级别	缺欠宽度 (mm)	单个缺欠长度 (mm)	缺欠累计长度
II	≤ 2	≤ T 且最大不超过 12.5	小于或等于 8%L
III		≤ 2T 且最大不超过 25	小于或等于 15%L
IV	大于 III 级者或缺欠影像黑度超过相邻较薄侧母材黑度者		

注：1 当两个或两个以上的缺欠处于同一直线上且相邻缺欠的间距小于或等于较小缺欠的长度时，应作为一个缺欠处理，间距不计入缺欠长度。

2 缺欠影像中任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时，即应认为缺欠的影像黑度大于相邻较薄侧母材影像黑度。

3 L 为被检管道焊接接头长度 (mm)。

4.18.6 夹层未熔合和中间未焊透的质量分级应符合表 4.18.6-1 和表 4.18.6-2 的规定。

表 4.18.6-1 夹层未熔合和中间未焊透质量分级

质量级别	缺欠宽度 (mm)	单个缺欠长度 (mm)	缺欠累计长度
II	≤ 2	≤ 2T 且最大不超过 25	任何连续 300mm 的焊接接头长度内, 其累计长度不应超过 50mm
III		≤ 3T 且最大不超过 50	任何连续 300mm 的焊接接头长度内, 其累计长度不应超过 50mm
IV	大于 III 级者或缺欠的影像黑度超过相邻较薄侧母材影像黑度者		

- 注: 1 当两个或两个以上的缺欠处于同一直线上且相邻缺欠的间距小于或等于较小缺欠的长度时, 应作为一个缺欠处理, 间距不计入缺陷长度。  
 2 缺欠影像中任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时, 即应认为缺欠的影像黑度大于相邻较薄侧母材影像黑度。

表 4.18.6-2 小径管夹层未熔合质量分级

质量级别	缺欠宽度 (mm)	单个缺欠长度 (mm)	缺欠累计长度
II	≤ 2	≤ T 且最大不超过 12.5	小于或等于 8%L
III		≤ 2T 且最大不超过 25	小于或等于 15%L
IV	大于 III 级者或缺欠影像黑度超过相邻较薄侧母材黑度者		

- 注: 1 当两个或两个以上的缺欠处于同一直线上且相邻缺欠的间距小于或等于较小缺欠的长度时, 应作为一个缺欠处理, 间距不计入缺陷长度。  
 2 缺欠影像中任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时, 即应认为缺欠的影像黑度大于相邻较薄侧母材影像黑度。  
 3 L 为被检管道焊接接头长度 (mm)。

4.18.7 根部未熔合和根部未焊透的质量分级应符合表 4.18.7 的规定。

4.18.8 内凹的影像黑度小于或等于较薄侧母材黑度时, 长度不计, 应评为 II 级。内凹的影像黑度大于较薄侧母材黑度时应按表 4.18.8-1 和表 4.18.8-2 评定。

**表 4.18.7 根部未熔合和根部未焊透的质量分级**

质量级别	单个缺欠长度 (mm)	缺欠累计长度
II	$\leq T$ 且不大于 12.5	任何连续 300mm 的焊接接头长度内, 其累计长度不应超过 25mm
III	$\leq 2T$ 且不大于 25	任何连续 300mm 的焊接接头长度内, 其累计长度不应超过 50mm
IV	大于 III 级者或缺欠的射线影像黑度超过相邻较薄侧母材黑度者	

- 注: 1 当两个或两个以上的缺欠处于同一直线上且缺欠的间距小于或等于小缺欠的长度时, 应作为一个缺欠处理, 间距不计入缺陷长度。  
 2 缺欠影像中任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时, 即应认为缺欠影像黑度大于较薄侧母材黑度。  
 3 错边未焊透按根部未焊透评定。

**表 4.18.8-1 内凹的质量分级**

质量级别	单个缺欠长度 (mm)	缺欠累计总长度
II	$\leq 25$	任何连续 300mm 的焊接接头长度内, 其累计长度应超过 25mm
III	$\leq 50$	任何连续 300mm 的焊接接头长度内, 其累计长度应超过 50mm
IV	大于 III 级者	

注: 缺欠影像任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时, 即应认为缺欠的影像黑度大于较薄侧母材黑度。

**表 4.18.8-2 小径管内凹的质量分级**

质量级别	连续或断续内凹累计长度
II	$\leq 15\%L$ 且不应超过 25mm
III	$\leq 20\%L$ 且不应超过 35mm
IV	大于 III 级者

- 注: 1 缺欠影像中任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时, 即应认为缺欠影像黑度大于较薄侧母材黑度。  
 2  $L$  为被检管道焊接接头长度 (mm)。

**4.18.9** 烧穿的影像黑度小于或等于较薄侧母材黑度时，长度不计，应评为Ⅱ级。烧穿的影像黑度大于较薄侧母材黑度时应按表 4.18.9-1 和表 4.18.9-2 进行评定。

**表 4.18.9-1 烧穿的质量分级**

质量级别	单个缺欠长度 (mm)	缺欠累计长度
Ⅱ	$\leq T$ 且 $\leq 6$	任何连续 300mm 的焊接接头长度内，其累计长度不应超 13mm
Ⅲ	$\leq 13$	任何连续 300mm 的焊接接头长度内，其累计长度不应超 25mm
Ⅳ	大于Ⅲ级者	

- 注：1 缺欠影像中任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时，应认为缺欠的影像黑度大于较薄侧母材黑度。  
 2 根部弧坑按照烧穿评定。

**表 4.18.9-2 小径管对接接头烧穿的质量分级**

质量级别	缺欠长度 (mm)
Ⅱ	$\leq T$ 且 $\leq 6$
Ⅲ	$\leq 9$
Ⅳ	大于Ⅲ级者或任意尺寸的缺欠多于 1 个

注：缺欠影像任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时，即应认为烧穿的影像黑度大于较薄侧母材黑度。

**4.18.10** 内咬边的质量分级应符合表 4.18.10-1 和表 4.18.10-2 的规定。

**4.18.11** 在任何连续 300mm 的焊接接头长度中，位于同一条直线上的未熔合、未焊透和条形缺欠，当其间距小于或等于较小缺欠的长度时应按一个缺欠进行评定。Ⅱ级对接接头内单个缺欠的长度不应超过 25mm，累计缺欠的长度不应超过周长的 10% 且不大于 50mm。Ⅲ级对接接头单个缺欠的长度不应超过 50mm，累计缺欠的长度不应超过周长的 15% 且不大于 75mm。

表 4.18.10-1 内咬边的质量分级

质量级别	缺欠黑度	单个缺欠长度 (mm)	缺欠累计长度
II	小于较薄侧母材黑度	$\leq 50$	任何连续 300mm 焊接接头长度内, 其累计长度不应超过 50mm
	大于或等于较薄侧母材黑度	$\leq 25$	
III	小于较薄侧母材黑度	$\leq 75$	任何连续 300mm 焊接接头长度内, 其累计长度不应超过 75mm
	大于或等于较薄侧母材黑度	$\leq 50$	
IV	大于 III 级者		

注: 缺欠影像任意部位的黑度大于较薄侧母材黑度时, 即应认为烧穿的影像黑度大于较薄侧母材黑度。

表 4.18.10-2 小径管内咬边的质量分级

质量级别	连续或断续内咬边长度
II	$\leq 10\%L$ 且不应超过 25mm
III	$\leq 15\%L$
IV	大于 III 级者或缺欠影像黑度超过较薄侧母材黑度者

注:  $L$  为被检管道焊接接头长度 (mm)。

## 4.19 检测记录和报告

4.19.1 检测记录和报告除应符合本规范第 3.8 节的规定的的内容外, 还应包括下列内容:

- 1 被检管线情况 (工程编号、规格、材质、焊口编号等)。
- 2 检测条件及工艺 (仪器、胶片、增感方式、像质计、透照方式、检测标准等)。

4.19.2 检测报告格式可采用本规范附录 D 规定的格式。

## 5 X 射线数字成像检测

### 5.1 一般规定

5.1.1 应采用 X 射线进行检测。

5.1.2 检测时机应符合设计文件和相关规定。

### 5.2 检测系统

5.2.1 射线数字成像检测系统应由 X 射线机、探测器、计算机、系统软件与检测工装组成。

5.2.2 射线数字成像检测系统应具备性能测试报告与出厂检验合格证。

5.2.3 X 射线机性能应符合检测质量规定，有效焦点尺寸不应大于 3mm。

5.2.4 探测器应采用面阵列探测器或线阵列探测器，且应符合下列规定：

1 可接收射线能量范围应符合检测工艺规定。

2 有效像素尺寸不应大于 200 $\mu\text{m}$ 。

3 动态范围不应小于 2000 : 1。

4 A/D 转换位数不应小于 12bit。

5 面阵列探测器 3 $\times$ 3 像素区域中，相邻坏像素不应超过 3 个，成行（成列）坏像素不应超过 3 个，且不得位于距离中心位置 200 像素以内，成像区域内坏像素不超过总像素的 1%，线阵列探测器中，相邻的坏像素不应超过 2 个。

6 探测器系统供应商应提供出厂坏像素表和坏像素校正方法，探测器使用前应按照具体的图像校正方法对探测器进行校正。

7 探测器系统性能指标如坏像素、对比灵敏度、分辨率、信噪比、线性范围、厚度宽容度、残影等，其测试条件及测试方法按现行国家标准《无损检测 X 射线数字成像检测 系统特性》GB/T 35394 的规定执行。

8 探测器系统质量合格证中应给出探测器类型、像素尺寸、成像面积、射线能量适用范围、填充因子、采集帧频等技术参数。

**5.2.5** 计算机的最低配置应符合相关系统部件对性能的规定；用于图像评定的显示器应符合下列规定：

- 1 亮度不应低于  $250\text{cd/m}^2$ 。
- 2 对比度不应低于  $250:1$ 。
- 3 灰度等级不应小于 8bit。
- 4 分辨率不应小于  $1024 \times 768$ 。
- 5 在每平方毫米的单位面积上至少应显示  $(4 \times 4)$  个像素点。
- 6 不应存在可辨识的几何失真。
- 7 不应存在可辨识的闪烁现象。

**5.2.6** 系统软件应符合下列规定：

- 1 应具有坏像素及探测器响应不一致的校正功能。
- 2 应具有图像采集、图像显示、图像存储功能。
- 3 应具有多帧平均、图像显示的窗宽窗位调整、亮度/对比度调整、直方图调整、区域灰度平均值与标准差测量功能。
- 4 宜具有滤波、微分法及直方图均衡化功能。
- 5 应具有至少 4 倍的放大功能。
- 6 应具有几何尺寸标定与测量、缺陷标注功能。
- 7 宜能根据评定结果自动生成检测报告。

**5.2.7** 检测工装应符合下列规定：

- 1 应根据被检工件与透照方式的规定选择具有合适承载能力和机械自由度的检测工装。
- 2 在探测器进行图像采集时，应保证其与被检工件之间无相对运动。

**5.2.8** 图像存储应符合下列规定：

1 图像存储应采用无损检测数字成像与通信标准 (DICONDE) 规定的格式, 检测软件应具备 DICONDE 存储格式的功能。

2 图像文件中描述字段的信息应至少包含被检工件信息、透照工艺参数、图像评定信息、检测设备信息、工程信息、检测人员信息等, 并应具有不可更改性。

3 焊接接头的影像数据应来源于同一透照工艺, 多张图像时应保存为单一数据文件。

**5.2.9** 应对探测器性能进行校准和运行核查。校准和运行核查应符合下列规定：

1 每年应对探测器系统性能中的线性范围、信噪比、厚度宽容度、对比灵敏度、系统分辨率等进行 1 次校准并记录。

2 每 3 个月应对探测器坏像素进行 1 次核查并记录。

### **5.3 系统分辨率**

**5.3.1** 系统分辨率指标应大于或等于 2.5lp/mm。系统分辨率应采用双线型像质计进行测定。双线型像质计规格型号及制作方法应符合本规范附录 E 的规定, 系统分辨率的测定方法应符合本规范附录 F 的规定。

**5.3.2** 系统确定或改变后应测定系统分辨率。系统正常使用条件下, 应至少每 3 个月进行一次系统分辨率测定。系统停止使用达 30d 并重新启用时, 应进行系统分辨率测定。

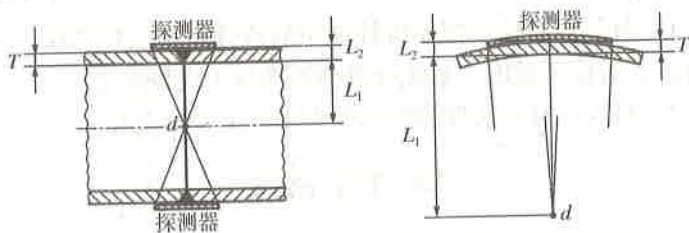
### **5.4 线型像质计**

**5.4.1** 采用线型像质计测定图像灵敏度, 其材质、规格型号及选用应符合本规范第 4.4 节的规定。

**5.4.2** 应根据透照厚度选用像质计, 选用的像质计型号应保证其最细金属丝的丝号高于或等于本规范规定的灵敏度丝号。透照厚度的计算应符合本规范表 4.4.2 的规定。

## 5.5 透照方式

5.5.1 按 X 射线机、被检工件和探测器之间的相互位置与成像面形状，管道焊接接头透照方式包括中心透照曲面成像（图 5.5.1-1）、中心透照平面成像（图 5.5.1-2）、双壁单影透照曲面成像（图 5.5.1-3）、双壁单影透照平面成像（图 5.5.1-4）及双壁双影透照平面成像（图 5.5.1-5）。宜采用中心透照方式，因工件结构影响或受几何条件限制时，可采用双壁透照方式。透照时射线束中心应垂直指向透照区中心，需要时也可选择用有利于发现缺欠的方向透照。

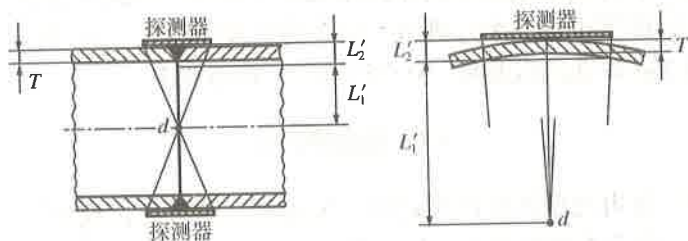


5.5.1-1 中心透照曲面成像

$d$ —有效焦点尺寸； $T$ —公称厚度；

$L_1$ —沿中心射线束方向，X 射线机焦点到透照部位源侧表面的距离；

$L_2$ —沿中心射线束方向，透照部位源侧表面到探测器接收面的距离

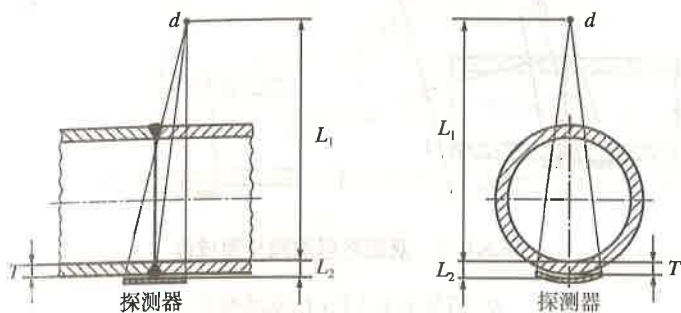


5.5.1-2 中心透照平面成像

$d$ —有效焦点尺寸； $T$ —公称厚度；

$L'_1$ —X 射线机焦点到透照部位边缘源侧表面连线的垂直距离；

$L'_2$ —透照部位边缘源侧表面连线与探测器接收面的垂直距离

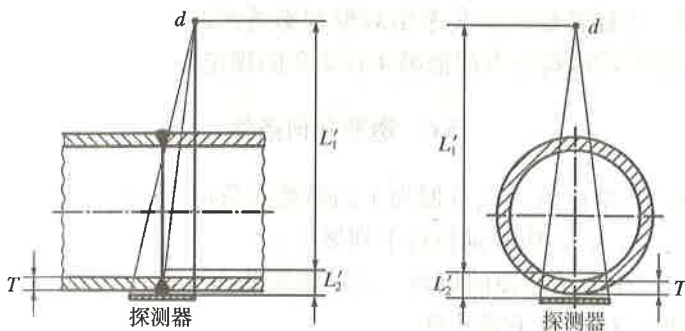


5.5.1-3 双壁单影透照曲面成像

$d$ —有效焦点尺寸， $T$ —公称厚度，

$L_1$ —沿中心射线束方向，X射线机焦点到透照部位源侧表面的距离，

$L_2$ —沿中心射线束方向，透照部位源侧表面到探测器接收面的距离

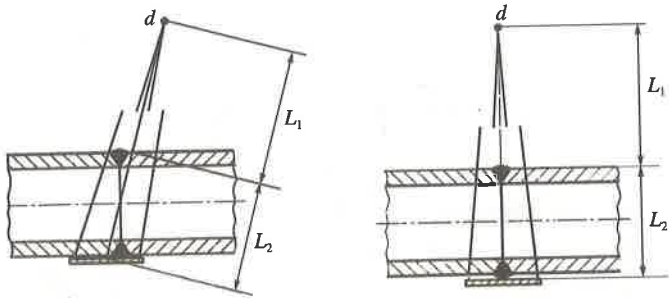


5.5.1-4 双壁单影透照平面成像

$d$ —有效焦点尺寸， $T$ —公称厚度，

$L'_1$ —X射线机焦点到透照部位边缘源侧表面连线的垂直距离，

$L'_2$ —透照部位边缘源侧表面连线与探测器接收面的垂直距离



5.5.1-5 双壁双影透照平面成像

$D$ —有效焦点尺寸； $T$ —公称厚度；

$L_1$ —沿中心射线束方向，X射线机焦点到透照部位源侧表面的距离；

$L_2$ —沿中心射线束方向，透照部位源侧表面到探测器接收面的距离

**5.5.2** 采用双壁单影法透照方式时，射线束中心与焊接接头中心线所在垂直平面的夹角宜控制在 $6^\circ$ 以内。当射线机侧焊缝图像不影响探测器侧焊缝图像评定时，可垂直于焊接接头表面透照。

**5.5.3** 小径管焊接接头采用双壁双影透照时，其透照几何条件和透照次数应符合本规范第4.11.2条的规定。

## 5.6 透照几何条件

**5.6.1** 在采用放大比近似为1的透照布置时，透照几何条件 $L_1$ 与 $L_2$ 、 $L'_1$ 与 $L'_2$ 应分别符合下列规定：

1 中心透照曲面成像、双壁单影曲面成像、双壁双影平面成像时， $L_1$ 应按下式计算：

$$L_1 \geq 10dL_2^{2/3} \quad (5.6.1-1)$$

式中  $L_1$ ——沿射线束中心方向，X射线机焦点到透照部位源侧表面的距离（mm）；

$L_2$ ——沿射线束中心方向，透照部位源侧表面到探测器接收面的距离（mm）；

$d$ ——射线源焦点尺寸 (mm)。

2 中心透照及双壁单影投照平面成像时,  $L'_1$  应按下列式计算。采用 X 射线机中心透照时, 当图像质量符合规定时  $L'_1$  可适当减小, 但减小值不应超过规定值的 50%。

$$L'_1 \geq 10dL'_2T^{-1/3} \quad (5.6.1-2)$$

式中  $L'_1$ ——X 射线机焦点到有效透照部位端点源侧表面连线的垂直距离 (mm);  
 $L'_2$ ——有效透照部位端点源侧表面连线与探测器接收面的垂直距离 (mm);  
 $T$ ——公称壁厚 (mm)。

**5.6.2** 应根据一次透照长度范围内几何放大比的最大值与最小值及固有不清晰度分别计算出对应两个位置的图像总不清晰度。图像总不清晰度应小于或等于表 5.6.2 中规定的值, 无法符合时, 可通过增加  $L_1$  或  $L'_1$  以降低几何不清晰度, 或增加  $L_2$  或  $L'_2$  以提高几何放大比, 使图像总不清晰度符合表 5.6.2 的规定, 若仍无法符合时, 应更换更小焦点尺寸的 X 射线机或更小像素尺寸的探测器。图像总不清晰度应按下列式计算:

$$U_{im} = \frac{\sqrt[3]{[d(M-1)]^3 + U_c^3}}{M} \quad (5.6.2)$$

式中  $U_{im}$ ——图像总不清晰度 (mm);  
 $M$ ——几何放大比;  
 $U_c$ ——固有不清晰度, 应通过系统分辨率测试确定, 其值为可识别线径的 2 倍 (mm)。

**5.6.3** 几何放大比最大值不应超过最小值的 1.25 倍。最大值与最小值的计算应符合下列规定:

1 中心透照、双壁单影透照曲面成像, 双壁双影透照平面成像时, 放大比最大值应按下列式计算:

表 5.6.2 图像分辨率和不清晰度

透照厚度 (mm)	应识别丝号	线径和间距 (mm)	分辨率 (lp/mm)	不清晰度 (mm)
≥ 2 ~ 5	D10	0.10	5	0.20
> 5 ~ 10	D9	0.13	3.846	0.26
> 10 ~ 25	D8	0.16	3.125	0.32
> 25 ~ 55	D7	0.20	2.5	0.40
> 55 ~ 100	D6	0.25	2	0.50

注：双壁单影透照时，用壁厚代替透照厚度进行选择。对于小径管双壁双影检测时，用管径代替透照厚度。

$$M_{\max} = 1 + \frac{L_2}{L_1} \quad (5.6.3-1)$$

式中  $M_{\max}$ ——放大比最大值；

$L_1$ ——沿射线束中心方向，X 射线机焦点到透照部位源侧表面的距离 (mm)；

$L_2$ ——沿射线束中心方向，透照部位源侧表面到探测器接收面的距离 (mm)。

2 中心透照、双壁单影透照平面成像时，放大比最大值应按下式计算：

$$M_{\max} = 1 + \frac{L'_2}{L'_1} \quad (5.6.3-2)$$

式中  $M_{\max}$ ——放大比最大值；

$L'_1$ ——X 射线机焦点到有效透照部位端点源侧表面连线的垂直距离 (mm)；

$L'_2$ ——有效透照部位端点源侧表面连线与探测器接收面的垂直距离 (mm)。

3 放大比最小值应按下式进行计算：

$$M_{\min} = 1 + \frac{L_2 - T}{L_1 + T} \quad (5.6.3-3)$$

式中  $M_{\min}$ ——放大比最小值；  
 $L_1$ ——沿射线束中心方向，X 射线机焦点到透照部位源侧表面的距离 (mm)；  
 $L_2$ ——沿射线束中心方向，透照部位源侧表面到探测器接收面的距离 (mm)；  
 $T$ ——公称壁厚 (mm)。

## 5.7 一次透照长度

**5.7.1** 采用双壁单影透照时，透照厚度比  $K$  值不应大于 1.1。透照厚度比规定的最少透照次数应符合本规范附录 C 的规定。

**5.7.2** 采用中心透照或双壁单影透照平面成像时，一次透照长度范围内图像总不清晰度应符合本规范表 5.6.2 的规定。

**5.7.3** 采用中心透照或双壁单影透照平面成像时，整条焊接接头所允许的最少透照次数宜符合本规范附录 G 的规定。

## 5.8 表面状态

**5.8.1** 焊缝及热影响区的表面不规则状态不应影响检测的实施及检测结果的评定，否则应做适当的修磨。

**5.8.2** 焊缝内表面的铁水、药皮及飞溅等物体焊接完成后应进行清除，其残留物不应影响缺欠评定。

## 5.9 线型像质计的放置和识别

**5.9.1** 线型像质计的放置应符合下列规定：

1 中心透照或双壁单影透照时，在工艺条件不变的情况下，整条焊接接头应至少均匀布置 4 个线型像质计。像质计宜放置在被检焊接接头部位探测器侧表面的一端、被检区长度的 1/4 位置附近，金属丝应垂直横跨焊缝，细丝置于外侧。像质计置于源侧时应附加“S”标记以示区别。

2 对小径管焊接接头进行双壁双影透照时，像质计应放置

于射线源侧被检焊接接头有效透照区中心部位。

**5.9.2** 在图像灰度均匀区域内能清晰地看到长度不小于 10mm 的连续像质计金属丝影像时，则认为该丝是可识别的。专用等径线型像质计应至少能识别两根金属丝。

## 5.10 检测标识

**5.10.1** 透照部位的标记应包括定位标记和识别标记。标记宜由适当尺寸的铅（或其他适宜的重金属）制数字、拼音字母和符号等构成。

**5.10.2** 定位标记包括搭接标记（↑或数字）和中心标记（↑→）。当搭接标记用英文字母或数字表示时，可不用中心标记。小径管透照时，可只用中心标记。工件表面的定位标记，宜沿介质流动方向从平焊位置顺时针用油质记号笔画定。

**5.10.3** 识别标记至少应包括工程编号、桩号（线位号）、焊接接头编号、施工单位代号、壁厚、透照日期等。对小径管透照时，图像上至少应有工程编号、焊接接头编号、部位编号和透照日期。返修部位还应有返修标记  $R_1, R_2, \dots$ （脚码表示返修次数）。

**5.10.4** 定位标记和识别标记均应在图像上适当位置显示，离焊缝边缘应至少 5mm。搭接标记应放于探测器侧。

**5.10.5** 识别标记可用计算机录入作为原始数据保存。

## 5.11 曝光参数

**5.11.1** 射线数字成像检测宜选用较低的管电压，其最高管电压不宜超过本规范图 4.13.1 的规定。

**5.11.2** 可通过调整管电流大小、探测器积分时间与图像叠加帧数来控制曝光量。曝光量的选择应符合下列规定：

1 图像有效评定区域内的灰度值应控制在整个灰度范围的 20% ~ 80%。

2 宜通过工艺试验选择合适的曝光量。

**5.11.3** 减少散射线和无用射线可采用滤波板、准直器（光阑）与遮蔽等措施。

## 5.12 图像分辨率的测定

**5.12.1** 确定工艺条件或工艺条件改变时，应采用和检测相同的工艺条件使用双线型像质计测定图像分辨率，测试结果应不低于本规范表 5.6.2 规定的值。

**5.12.2** 每道焊接接头至少采用双线型像质计测量一次图像分辨率。

**5.12.3** 双线型像质计应置于探测器侧被检焊接接头有效透照区域 1/4 或中心位置附近，应靠近焊缝并与探测器的行或列成  $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$  摆放。

## 5.13 图像质量

**5.13.1** 应在光线柔和的环境下进行图像评定。显示器屏幕应清洁，无明显的光线反射。

**5.13.2** 图像评定区域的宽度应为焊缝本身加上焊缝两侧各不小于 5mm 热影响区。

**5.13.3** 分段透照时，图像两侧搭接区域不应小于 10mm。

**5.13.4** 图像有效评定区域内的灰度值应控制在整个灰度范围的 20% ~ 80%。

**5.13.5** 图像分辨率应不低于本规范表 5.6.2 规定的值。

**5.13.6** 图像有效评定区域内不应存在干扰缺欠图像识别的伪缺陷影像。

**5.13.7** 图像上定位标记和识别标记影像应显示完整、位置正确且图像信息记录完整无误。

**5.13.8** 像质计置于探测器侧时图像像质计灵敏度应达到本规范表 4.17.5 规定的值，置于射线源侧时应根据对比试验确定。

5.13.9 可通过正像或负像的方式显示图像。

5.13.10 图像归一化信噪比应符合下列规定：

1 归一化信噪比 ( $SNR_n$ ) 应按下列式计算：

$$SNR_n = SNR_m \times \frac{88.6}{P} \quad (5.13.10)$$

式中  $P$ ——探测器像素尺寸 ( $\mu\text{m}$ )，  
 $SNR_m$ ——测量信噪比。

2 应在热影响区或接近热影响区的厚度均匀的母材区，取面积不小于 20 像素  $\times$  55 像素的矩形兴趣区域，计算此区域的均值和标准差，按照信噪比定义得到测量信噪比  $SNR_m$ 。

3 归一化信噪比值应符合表 5.13.10 的规定。

表 5.13.10 归一化信噪比值

管电压范围 (kV)	透照厚度 (mm)	归一化信噪比
$\geq 50 \sim 150$		$\geq 160$
$\geq 150 \sim 250$		$\geq 140$
$\geq 250 \sim 350$	$\leq 50$	$\geq 140$
	$> 50$	$\geq 100$

## 5.14 缺陷的识别和测量

5.14.1 可利用计算机图像处理功能提高缺陷识别能力，但评定时所采用的窗宽窗位与消噪、图像增强，以及其他滤波等数字图像处理功能应有相关文档记录，并将评定图像与原始图像一同保存，不得修改原始图像。

5.14.2 图像测量前应对图像几何尺寸进行标定。标定可采用阶梯试块或已知尺寸的试件，通过采集阶梯试块或试件的 X 射线数字图像计算出几何尺寸因子。几何尺寸因子宜按下式计算：

$$\delta = L/N_1 \quad (5.14.2)$$

式中  $\delta$ ——几何尺寸因子；  
 $L$ ——标定用试件的尺寸；  
 $N_1$ ——由计算机测量标定试块或试件图像尺寸得到的像素个数。

**5.14.3** 缺欠的测量应在图像尺寸标定完成后进行，可采用系统软件按照下式进行测量：

$$S = \delta N_2 \quad (5.14.3)$$

式中  $S$ ——几何尺寸 (mm)；  
 $\delta$ ——几何尺寸因子；  
 $N_2$ ——由计算机测量缺欠图像尺寸得到的像素个数。

**5.14.4** 图像评定过程中，对缺欠位置、大小等内容，可用文字在图像上标注，标注后的图像应与原始图像一起另行保存，并同原始图像保存位置一致，以备核查。

## 5.15 工艺验证

**5.15.1** 检测工艺首次使用时应进行工艺验证，工艺验证可采用对被检测焊接接头进行透照试验的方式进行。

**5.15.2** 工艺验证时射线能量和曝光量的选择应符合本规范第 5.11 节的规定。

**5.15.3** 工艺试验所采用的透照布置、射线装置应与实际检测相同。

**5.15.4** 工艺验证结果中的灰度、图像分辨率、灵敏度，以及归一化信噪比等参数应符合本规范第 5.13.4 条、第 5.13.5 条、第 5.13.8 条和第 5.13.10 条的规定。

## 5.16 质量评定

**5.16.1** 焊接接头的质量评定应符合本规范第 4.18 节的规定。

**5.16.2** 焊接接头质量评定时图像中的黑度由灰度代替。

## **5.17 数据存储**

**5.17.1** 原始图像及信息、评定后图像及信息应存储在硬盘等数字存储介质中，并进行备份。

**5.17.2** 应采取防磁、防潮、防尘、防震、防挤压、防划伤等措施防止损伤储存检测图像的存储介质。

## **5.18 检测记录和报告**

**5.18.1** 检测记录和报告除应符合本规范第 3.8 节的规定的內容外，还应包括下列内容：

- 1 被检管线情况（工程编号、规格、材质、焊口编号等）。
- 2 检测条件及工艺（仪器、探测器型号、像素尺寸、曝光参数、像质计灵敏度、信噪比、透照方式、灰度范围、检测标准等）。

**5.18.2** 检测报告格式宜采用本规范附录 D 规定的格式。

## 6 X射线计算机辅助成像检测

### 6.1 一般规定

6.1.1 应采用 X 射线进行检测。

6.1.2 检测时机应符合设计文件和相关规定。

### 6.2 检测系统

6.2.1 检测系统应按现行国家标准《无损检测 计算机射线照相系统的分类》GB/T 21355 的规定划分。检测系统的特性指标应符合下列规定：

- 1 应采用 IP  $s/Y$  类检测系统。
- 2 可以兼容各种型号和规格的成像板。
- 3 扫描精度不低于  $100\mu\text{m}$ ，扫描精度调整具有 5 个以上调整级别。
- 4 A/D 转换位数不应小于 16bit。
- 5 激光功率具备 5 个以上调整级别。
- 6 光电采集器件具有 10 个以上可调整级别。
- 7 可扫描多种尺寸及规格影像板。
- 8 应具有为适应野外环境的防尘、防风沙及方便运输的抗震等设计。
- 9 图像几何畸变应小于  $\pm 2\%$ 。
- 10 图像在同一水平线上，中心区域和边远背景灰度变化不应超过  $\pm 10\%$ 。

6.2.2 使用的检测系统应具备性能测试报告与出厂检验合格证。根据检测对象和技术规定选择适用的检测系统，测试方法可参考现行国家标准《无损检测 计算机射线照相系统的长期稳定

性与鉴定方法》GB/T 21356 的规定进行。

**6.2.3** 射线源的有效焦点尺寸不应大于 3mm。

**6.2.4** 专用激光扫描仪应符合下列规定：

- 1 应具有扫描和擦除功能。
- 2 扫描激光功率应符合信号采集的规定。
- 3 光电倍增管电压或增益、扫描分辨率应可调。

**6.2.5** 显示器应符合下列规定：

- 1 亮度不应低于  $250\text{cd/m}^2$ 。
- 2 对比度不应低于 250 : 1。
- 3 灰度等级不应小于 8bit。
- 4 分辨率不应小于  $1024 \times 768$ 。
- 5 像素尺寸应小于 0.3mm。
- 6 不应存在可辨识的几何失真。
- 7 不应存在可辨识的闪烁现象。

**6.2.6** 成像板的质量合格证中至少包括成像板的类型和规格、动态范围、激发响应时间、化学成分等主要性能参数。

**6.2.7** 应根据使用管电压按照表 6.2.7 的规定选择合适的金属屏。

**表 6.2.7 金属屏的选用**

X 射线种类	前屏厚度 (mm)	后屏厚度 (mm)
$\leq 100\text{kV}$	$\leq 0.03$ (Pb) 或不使用	$\leq 0.03$ (Pb) 或不使用
$> 100\text{kV} \sim 400\text{kV}$	0.02 ~ 0.20 (Pb)	0.02 ~ 0.20 (Pb) 或不使用

注：1 在透照过程中，应保证成像板和金属屏紧密接触，在背散射强烈时，可使用后屏。

2 允许使用铁质增感屏代替铅质增感屏，其厚度应为铅质增感屏的 3 倍。

**6.2.8** 采用线型像质计测定图像灵敏度，其材质、规格型号及选用应符合本规范第 4.4 节的规定。其放置和识别应符合本规范第 4.12 节的规定。

**6.2.9** 采用双线型像质计测定图像分辨率。双线型像质计规格型号及制作方法应符合本规范附录 E 的规定。

**6.2.10** 系统专用软件应具备下列功能：

- 1 测量功能，包括灰度测量、空间分辨率测量、信噪比测量、几何尺寸测量等。
- 2 调整功能，包括灰度变换、对比度调节、图像缩放等。
- 3 标记功能。

### **6.3 系统空间分辨率**

**6.3.1** 系统空间分辨率指标应大于或等于 2.5lp/mm。系统空间分辨率应采用双线型像质计进行测定。系统分辨率的测定方法应符合本规范附录 H 的规定。

**6.3.2** 系统确定或改变后应测定系统分辨率。系统正常使用条件下，应每 3 个月进行一次系统分辨率测定。系统停止使用达 30d 并重新启用时，应进行系统分辨率测定。

### **6.4 表面状态**

**6.4.1** 焊缝及热影响区的表面不规则状态在底片上的影像不应影响评定，否则应做适当的修整。

**6.4.2** 焊接接头内表面的铁水、药皮及飞溅等物体焊接完成后应进行清除，其残留物不应影响评定。

### **6.5 透照布置**

**6.5.1** 按射线源、工件和成像板之间的相互位置，管道环缝主要采用中心透照、双壁单影透照和双壁双影透照几种方式（图 6.5.1）。

**6.5.2** 应优先采用中心透照方式，当中心透照方式不可行时，方可采用双壁透照方式。透照时射线束中心应垂直指向透照区中心，需要时也可选用有利于发现缺欠的方向透照。

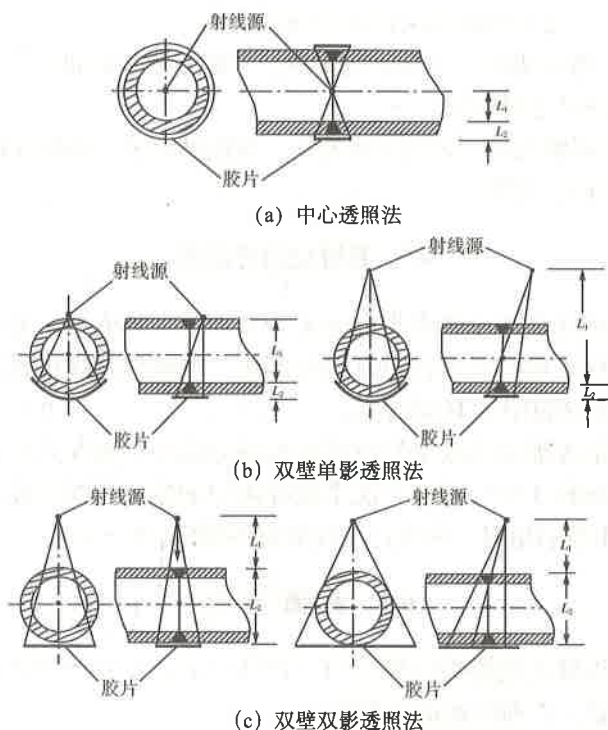


图 6.5.1 透照方式示意图

$L_1$ —射线源至透照部位工件表面的距离； $L_2$ —透照部位工件表面至成像板的距离

## 6.6 透照几何条件

6.6.1 射线源至被检部位工件表面的距离应按下式计算：

$$L_1 \geq 10dL_2^{2/3} \quad (6.6.1)$$

式中  $L_1$ ——源至被检部位工件表面的距离（或称透照距离）（mm）；

$d$ ——焦点尺寸（方焦点取边长，长焦点取长短边之和的1/2，圆焦点取其直径）（mm）；

$L_2$ ——被检部位工件表面至成像板的距离（mm）。

**6.6.2** 采用源在内中心周向曝光时，如成像质量符合灰度、信噪比和灵敏度规定， $L_1$  值可减小，但减小值不应超过规定值的 50%。

**6.6.3** 在透照过程中，成像板应紧贴被检焊缝表面。

## 6.7 曝光参数

**6.7.1** X 射线照相应尽量选用较低的管电压。透照不同厚度焊接接头时，允许使用的最高管电压应控制在规定的范围内（图 6.7.1）。透照截面厚度变化大的工件时，可采用超过图 6.7.1 规定的 X 射线管电压，但管电压增量不应超过 50kV。

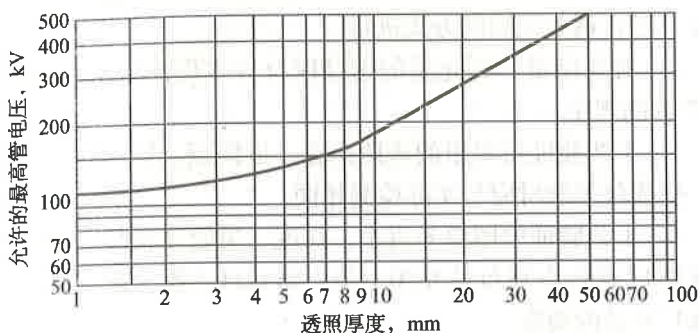


图 6.7.1 透照厚度和允许使用的最高管电压

**6.7.2** 曝光量应符合下列规定：

1 采用 X 射线源透照时，当焦距为 700mm 时，曝光量不宜小于  $10\text{mA} \cdot \text{min}$ 。当焦距改变时可按曝光因子公式对曝光量进行换算。

2 小径管对接焊接接头采用椭圆成像或重叠成像方式透照，宜采用较高的管电压并适当降低曝光量。由于结构等原因只能透照一次时，应选择较高的管电压，曝光量不宜低于  $5\text{mA} \cdot \text{min}$ ，管子内壁轮廓应清晰地显现在图像上。

**6.7.3** 可采用曝光曲线或工艺试验方法确定曝光参数。

**6.7.4** 制作曝光曲线时应符合下列规定：

1 应根据设备、成像板和金属屏、扫描条件等制作或选用合适的曝光曲线,并以此选择曝光规范。

2 制作曝光曲线所采用的成像板、金属屏、焦距、射线能量等条件,以及图像应达到的灵敏度、灰度等参数均应符合本规范的规定。

3 对使用中的曝光曲线,每年应至少校验一次。射线设备更换重要部件或大修理后应及时对曝光曲线进行校验或重新制作。

#### 6.7.5 工艺验证应符合下列规定:

1 工艺首次使用时应进行工艺验证,工艺验证可采用对被检工件进行透照试验的方式进行。

2 射线能量和曝光量的选择应符合本规范第 6.7.1 条和第 6.7.2 条的规定。

3 工艺验证所采用的透照布置,成像板、增感屏、射线装置、扫描仪等器材应与实际检测相同。

4 工艺验证中图像分辨率、灰度、灵敏度和归一化信噪比等参数应符合本规范第 6.10.1 条、第 6.11.2 条、第 6.11.6 条和第 6.11.8 条的规定。

### 6.8 无用射线和散射线的屏蔽

6.8.1 无用射线和散射线的屏蔽应符合本规范第 4.14 节的规定。

6.8.2 小径管透照时宜使用钢质或铜质滤光板。

### 6.9 图像分辨率的测定

6.9.1 确定工艺条件或工艺条件改变时,应采用和检测相同的工艺条件使用双线型像质计测定图像分辨率,测试结果应符合本规范第 6.10.1 条的规定。

6.9.2 分辨率测定时,双线型像质计的摆放应符合下列规定:

1 双线型像质计应分别置于被检焊接接头有效透照区域成像板侧焊缝附近,并与焊缝中心线成  $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。

2 若双线型像质计无法放置在规定的位罝,应采用相同厚度的对比试件代替被检工件进行测定。

## 6.10 图像分辨率

6.10.1 扫描步进的设定值应保证图像最低空间分辨率符合表 6.10.1 的规定。双壁单影透照时,用壁厚代替透照厚度进行选择。对于小径管双壁双影检测时,用管径代替透照厚度。

表 6.10.1 图像分辨率

透照厚度 (mm)	应识别丝号	线径和间距 (mm)	分辨率 (lp/mm)	不清晰度 (mm)
$\geq 2 \sim 5$	D10	0.10	5	0.20
$> 5 \sim 10$	D9	0.13	3.846	0.26
$> 10 \sim 25$	D8	0.16	3.125	0.32
$> 25 \sim 55$	D7	0.20	2.5	0.40
$> 55 \sim 100$	D6	0.25	2	0.50

6.10.2 激光功率和光电采集器件电压参数的设定应保证检测工件图像有效区域灰度范围在整体灰度的 20% ~ 80% 范围内。

## 6.11 图像质量

6.11.1 图像评定范围的宽度应至少为焊缝本身及焊缝两侧各不小于 5mm 的热影响区。

6.11.2 图像有效评定区域内的灰度值应控制在整个灰度范围的 20% ~ 80%。

6.11.3 图像有效评定区域内不应存在干扰缺欠图像识别的伪缺陷影像。

6.11.4 图像上定位标记和识别标记影像应显示完整、位置正确且图像信息记录完整无误。

**6.11.5** 像质计在图像灰度均匀部位能清晰地看到长度不小于10mm的连续金属丝影像时,则认为该丝是可识别的。专用像质计应能识别不少于两根金属丝。

**6.11.6** 像质计置于成像板侧时图像像质计灵敏度应符合本规范表4.17.5的规定,置于射线源侧时应根据对比试验确定。

**6.11.7** 应采用双线型像质计测量其图像分辨率,在验证符合规定后,进行检测时可不放置双线型像质计。当图像分辨率达不到规定时,可通过提高图像灵敏度补偿图像分辨率,补偿不应超过1个等级。

**6.11.8** 数字图像的归一化信噪比应符合表6.11.8的规定。

表 6.11.8 归一化信噪比值

管电压范围 (kV)	透照厚度 (mm)	归一化信噪比 $SNR_n$
$\geq 50 \sim 150$		$\geq 95$
$\geq 150 \sim 250$		$\geq 85$
$\geq 250 \sim 450$	$\leq 50$	$\geq 85$
	$> 50$	$\geq 70$

注:1 若在热影响区或母材区域测量  $SNR_n$ ,则表中数值应乘以1.4,除非焊缝无余高且焊缝根部与母材齐平。

2 应在热影响区或接近热影响区的厚度均匀的母材区,取面积不小于  $(20 \times 55)$  像素的矩形兴趣区域,计算此区域的均值和标准差,按照信噪比定义得到测量信噪比  $SNR_m$ 。

**6.11.9** 图像评定过程中,对缺欠位置、大小等内容,宜用文字在图像上标注,评定图像如采用计算机图像处理功能,处理功能应有相关文档记录,评定图像应与原始图像一起另行保存,并同原始图像保存位置一致,以备核查。

## 6.12 数据存储

**6.12.1** 图像应采用未经压缩的图像格式,并保存原始图像数据,其原始图像应具有加密不可更改性。当采用数字图像处理

使对比灵敏度符合规定时，处理后的图像应进行标识，与原始数字图像一起保存。原始图像及信息、评定后图像及信息应存储在硬盘等数字存储介质中。

**6.12.2** 保存检测图像并进行备份，相应的检测原始记录和检测报告也应一同保存。保存期限不得少于7年。

**6.12.3** 应采取防磁、防潮、防尘、防震、防挤压、防划伤等措施防止损伤储存检测图像的存储介质。

### 6.13 质量评定

**6.13.1** 焊接接头的质量评定应符合本规范第4.18节的规定。

**6.13.2** 焊接接头质量评定时图像中的黑度由灰度代替。

### 6.14 检测记录和报告

**6.14.1** 检测记录和报告除应符合本规范第3.8节的规定内容外，还应包括下列内容：

- 1 被检管线情况（工程编号、规格、材质、焊口编号等）。
- 2 检测条件及工艺（仪器、成像板型号、扫描仪型号、扫描仪参数、曝光参数、像质计灵敏度、信噪比、透照方式、灰度范围、检测标准等）。

**6.14.2** 检测报告格式可采用本规范附录D规定的格式。

## 7 超声检测

### 7.1 超声检测设备

**7.1.1** 宜采用数字式 A 型脉冲反射式探伤仪，其工作频率范围应为 1MHz ~ 10MHz。

**7.1.2** 仪器至少应在荧光屏满刻度的 80% 范围内呈线性显示。探伤仪应具有 80dB 以上的连续可调增益，步进级每挡小于或等于 2dB，其精度为任意相邻 12dB 误差在  $\pm 1$ dB 以内，最大累计误差不应超过 1dB。水平线性误差不应大于 1%，垂直线性误差不应大于 5%。其余性能指标应符合现行行业标准《A 型脉冲反射式超声波探伤仪 通用技术条件》JB/T 10061 规定。

**7.1.3** 超声探伤仪和探头的系统性能应符合下列规定：

- 1 在达到所检工件最大检测声程处，其有效灵敏度余量不应小于 10dB。
- 2 仪器和探头的组合频率与公称频率误差不应大于  $\pm 10\%$ 。
- 3 斜探头的远场分辨力不应小于 6dB。
- 4 仪器和探头的系统性能应按现行行业标准《无损检测 A 型脉冲反射式超声检测系统工作性能测试方法》JB/T 9214 和《超声探伤用探头性能测试方法》JB/T 10062 的规定进行测试。

### 7.2 超声探头

**7.2.1** 探头的标称频率应为 2.0MHz ~ 5.0MHz。

**7.2.2** 单斜探头主声束垂直方向不应有明显的双峰，声束轴线水平偏离角不应大于  $2^\circ$ 。

**7.2.3** 采用横波斜探头检测时，探头  $K$  值（折射角）及前沿的

选择应符合表 7.2.3 的规定。检测根部缺欠时，不宜使用折射角为  $60^\circ$  的探头。

表 7.2.3 探头  $K$  值（折射角）及前沿的选择

管壁厚度 (mm)	探头 $K$ 值 (折射角)	探头前沿 (mm)	
		管径 $\leq 500$ mm	管径 $> 500$ mm
5 ~ 8	3.0 ~ 2.5 ( $71.5^\circ \sim 68.2^\circ$ )	$\leq 6$	$\leq 8$
$> 8 \sim 14$	2.5 ~ 2.0 ( $68.2^\circ \sim 63.5^\circ$ )	$\leq 8$	$\leq 10$
$> 14 \sim 50$	2.0 ~ 1.0 ( $63.5^\circ \sim 45^\circ$ )	—	—

**7.2.4** 法兰、弯头及其他只能单面单侧扫查的焊接接头应采用两种或两种以上不同折射角的探头进行检测，探头之间折射角度相差不宜小于  $10^\circ$ 。

**7.2.5** 检测管壁厚度 5mm ~ 14mm 的焊接接头，宜采用频率为 5MHz，晶片面积不大于  $96\text{mm}^2$  的探头。检测管壁厚度大于 14mm ~ 50mm 的焊接接头，宜采用频率为 2.5MHz，晶片面积不大于  $169\text{mm}^2$  的探头。

**7.2.6** 探头与探伤仪应有良好的匹配性能，在扫查灵敏度的条件下，探头的始脉冲宽度应小于或等于 2.5mm。

**7.2.7** 检测外径为 57mm ~ 140mm 的焊接接头时，探头的接触面应与管子外表面紧密接触，其边缘与管子外表面的间隙不应大于 0.5mm。

### 7.3 超声试块

**7.3.1** 检测仪器和探头的系统性能测试、灵敏度校准宜采用 SGB 试块，其形状和尺寸应符合本规范附录 I 的规定。

**7.3.2** 仪器和探头的系统性能测试也可采用其他与 SGB 功能相同、材质相近的试块，灵敏度校准也可采用其他与 SGB 试块材质相同、曲率符合规定、反射体直径相同的试块。

## 7.4 耦 合 剂

**7.4.1** 耦合剂应具有良好的透声性和适宜的流动性，不应对人体和材料有损害，同时应便于清理。

**7.4.2** 在试块上调节仪器和在现场检测对接接头时，宜采用相同的耦合剂。

## 7.5 距离—波幅曲线

**7.5.1** 应选择与实际管道曲率相对应的 SGB 试块制作距离波幅曲线，扫描时基线比例应依据工件的厚度和所选探头的角度来确定。

**7.5.2** 制作距离—波幅曲线的实测点不应少于三点。该曲线族图由评定线 (EL)、定量线 (SL) 和判废线 (RL) 组成。评定线与定量线之间 (包括评定线) 为 I 区，定量线与判废线之间 (包括定量线) 为 II 区，判废线及以上区域为 III 区 (图 7.5.2)。

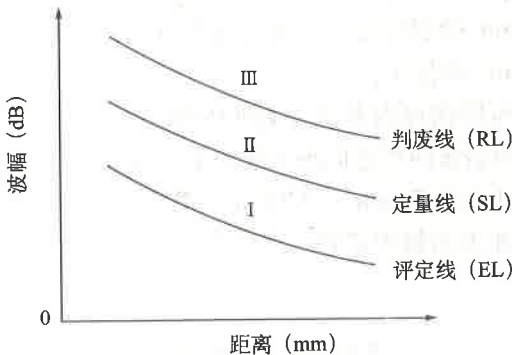


图 7.5.2 距离—波幅曲线

**7.5.3** 工件表面耦合引起的声能损失应与试块相同，否则应进行表面声能损失差测定，并应根据测定结果进行补偿。在一跨距声程内最大传输损失差小于或等于 2dB 时可不进行补偿。工件表面声能损失差的测定应符合本规范附录 J 的规定。

**7.5.4** 在整个检测范围内，曲线应处于荧光屏满幅度的 20% 以上，否则应采用分段绘制的方法。

**7.5.5** 距离一波幅曲线灵敏度应符合表 7.5.5 的规定。

表 7.5.5 距离一波幅曲线的灵敏度

管壁厚度 (mm)	评定线 (EL)	定量线 (SL)	判废线 (RL)
5 ~ 50	$\phi 2 \times 20-14\text{dB}$	$\phi 2 \times 20-8\text{dB}$	$\phi 2 \times 20-2\text{dB}$

## 7.6 系统校准和复核

**7.6.1** 校准应在 SGB 标准试块上进行，校准中应使探头主声束垂直对准反射体，以获得稳定的和最大的反射信号。

**7.6.2** 在仪器开始使用时，应按本规范附录 K 的规定测定仪器的水平线性和垂直线性等指标。在使用过程中，每隔六个月至少应对仪器的水平线性和垂直线性进行一次测定。

**7.6.3** 新探头使用前至少应按本规范附录 K 的有关规定测定前沿距离、 $K (\tan\beta)$  值、主声束偏离、灵敏度余量和分辨力等主要参数，并应符合检测规定。

**7.6.4** 使用过程中，每个工作日均应按本规范附录 K 的规定测定探头前沿距离、 $K (\tan\beta)$  值和主声束偏离。

**7.6.5** 每次检测前及检测结束后均应对扫描量程、检测灵敏度进行复核，有下述情况之一时应对其进行重新核查：

- 1 校准后的探头、耦合剂和仪器调节旋钮发生改变。
- 2 检测人员怀疑灵敏度有变化时。
- 3 连续工作 4h 以上。

**7.6.6** 对扫描量程进行复核时，如距离一波幅曲线上任意一点在扫描线上的偏移超过扫描读数的 10%，则应对扫描量程重新调整，并应对上一次复核以来所有的检测部位重新进行检测。

**7.6.7** 对检测灵敏度的复核不应少于三点，如距离波幅曲线上任何一点回波幅度下降 2dB，则应对上一次复核以来所有的检

测部位进行复检。如曲线上任何一点回波幅度上升超过 2dB, 则应对上一次以来所有的记录信号进行重新评定。

## 7.7 检测准备

**7.7.1** 检测前应了解被检管道的材质、壁厚、曲率、组对状况、坡口型式、焊接方法、焊缝余高、焊缝宽度等情况。

**7.7.2** 探头移动区应清除飞溅、锈蚀、油污及其他外部杂质, 制管焊缝应修磨齐平。

**7.7.3** 探头移动区的确定应符合下列规定:

1 采用一次反射法检测时, 探头移动区不应小于  $1.25P$ ,  $P$  应按下式计算:

$$P=2K \cdot T \quad (7.7.3)$$

式中  $P$ ——跨距 (mm);

$T$ ——板厚 (mm);

$K$ ——声束在工件中的折射角  $\beta$  的正切值 ( $\tan\beta$ )。

2 采用直射法检测时, 探头移动区不应小于  $0.75P$ 。

## 7.8 现场检测

**7.8.1** 应采用单面双侧直射法和反射波法检测。检测仅有单侧直边的焊接接头时, 可采取单面单侧检测, 但应采用两种及以上角度的探头进行扫查。

**7.8.2** 扫查灵敏度不应低于评定线灵敏度。

**7.8.3** 扫查速度不应大于 150mm/s, 当采用自动报警装置扫查时不受此限制。在平行扫查方向上, 每个探头的扫查路径应重叠, 其范围至少为探头 (压电晶片) 垂直于扫查方向尺寸的 10%。

**7.8.4** 为探测纵向缺欠, 探头应垂直焊缝中心线做矩形或锯齿形扫查, 探头前后移动范围应保证能扫查到全部焊缝截面及热影响区, 在保持探头垂直焊缝做前后移动的同时, 应做  $10^\circ \sim 15^\circ$  的左右扫查。为观察缺陷动态波形和区分缺陷信号或伪缺陷信

号，确定缺陷的位置、方向和形状，可采用前后、左右、转角、环绕等四种探头基本扫查方式。

**7.8.5** 需要检测横向缺欠时，应将波幅曲线灵敏度均提高 6dB。检测时，可在焊接接头两侧边缘使探头与焊接接头中心线成  $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$  做两个方向的斜平行扫查。

**7.8.6** 检测区的宽度应为焊缝本身加上焊缝两侧各不小于 5mm 的热影响区。

**7.8.7** 对反射波幅位于或超过定量线的缺欠及判定为根部未焊透的缺欠，应确定其位置、最大反射波所在区域和缺欠指示长度。

**7.8.8** 缺欠位置测定应以获得缺欠最大反射波的位置为准，根据相应的探头位置和反射波在荧光屏上的位置确定，以焊缝周向分度点为起点，沿介质流出方向投影，顺时针进行标记。深度标记应以缺欠最大反射波深度值表示。

**7.8.9** 测定缺欠的最大反射波幅时，应将探头移至缺欠出现最大反射波信号的位置，测定波幅大小，并应确定它在距离一波幅曲线中的区域。

**7.8.10** 应根据缺欠最大反射波幅确定缺欠指示长度。缺欠最大反射波幅以  $SL \pm \Delta \text{dB}$  的方式表示， $\Delta$  为缺欠最大反射波幅与  $SL$  的分贝差。缺欠最大波幅的测量应符合下列规定：

1 当缺欠反射波只有一个高点，且位于 II 区或 II 区以上时，应将波幅降低到荧光屏满刻度的 80% 后，用 6dB 法测其指示长度。

2 当缺欠反射波峰值起伏变化，有多个高点，且位于 II 区或 II 区以上时，应使波幅降低到荧光屏满刻度的 80%，用端点 6dB 法测其指示长度。

3 当缺欠反射波峰位于 I 区，如认为有必要记录时，应将探头左右移动，使波峰降到评定线，以此测定缺欠的指示长度。

**7.8.11** 超过评定线的信号应首先判定其是否具有裂纹等危害性缺欠的性质，如有怀疑时，应采取改变探头  $K$  值、观察动态波

型并结合工件结构特征判定，如对波型不能判定时，应辅以其他检测方法综合判定。

## 7.9 质量评定

**7.9.1** 缺欠回波只有一个高点且指示长度小于 10mm 时，应按 5mm 计。

**7.9.2** 相邻两缺欠在一直线上，且其间距小于较小的缺欠长度时，应作为一个缺欠处理，以两缺欠长度之和作为其指示长度（不考虑间距）。

**7.9.3** 反射波幅位于定量线下的非裂纹缺欠可不进行评定，位于定量线或定量线以上的缺欠应进行评定。

**7.9.4** 应根据缺欠的性质和数量，将对接接头分为下列四个等级，即 I 级、II 级、III 级和 IV 级，具体内容应符合下列规定：

- 1 缺欠的反射波幅位于定量线下的非危害性缺欠均评为 I 级。
- 2 缺欠信号具有裂纹特征的，应评为 IV 级。
- 3 外表面未熔合缺欠评为 IV 级。

4 最大反射波幅位于 III 区的缺欠，无论指示长度如何，均评为 IV 级。

5 最大反射波位于 II 区的缺欠应根据缺欠的指示长度，按表 7.9.4 的规定评定。

表 7.9.4 质量分级

评定等级	表面缺欠指示长度	埋藏缺欠指示长度
I	不允许	不允许
II	$\leq T$ 且 $\leq 12.5\text{mm}$ ，300mm 范围内累计不大于 25mm	$\leq 2T$ 且 $\leq 25\text{mm}$ ，300mm 范围内累计不大于 50mm
III	$\leq 2T$ 且 $\leq 20\text{mm}$ ，300mm 范围内累计不大于 30mm	$\leq 2T$ 且 $\leq 30\text{mm}$ ，300mm 范围内累计不大于 75mm
IV	大于 III 级者	

## 7.10 检测记录和报告

**7.10.1** 检测记录和报告除应符合本规范第 3.8.4 条的规定的內容外，还应包括下列內容：

- 1 被检管线情况（工程编号、规格、材质、焊口编号等）。
- 2 检测条件及工艺（仪器、探头、扫查方式、仪器调节参数、检测标准等）。
- 3 检测缺欠內容及评定结果。

**7.10.2** 检测报告格式可采用本规范附录 D 规定的格式。

## 8 相控阵超声检测

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 当被检测焊接接头母材公称厚度大于或等于 8mm 且结构允许时应增加 TOFD 辅助检测。

**8.1.2** TOFD 仅用于缺欠辅助定性及缺欠高度测量。

### 8.2 检测设备

**8.2.1** 相控阵检测设备应包括相控阵仪器（主机）、探头、软件、扫查装置和附件，相控阵检测设备、探头应具有性能指标说明文件。

**8.2.2** 相控阵仪器基本性能应符合下列规定：

1 相控阵仪器应为电脑控制的含有多个独立的脉冲发射 / 接收通道的脉冲反射型仪器，其放大器的增益调节步进不应大于 1dB。

2 相控阵仪器应符合焊缝双侧同时扫查，检测壁厚 8mm 及以上的接头时设备应具备 TOFD 检测功能。

3 -3dB 带宽下限不高于 1MHz，上限不低于 15MHz。

4 采样频率不应小于探头中心频率的 5 倍。

5 A/D 转换位数不应小于 10bit。

6 仪器的水平线性误差不应大于 1%，垂直线性误差不应大于 5%。

7 所有激励通道的发射脉冲电压应具有一致性，最大偏移量不应大于设置值的 5%。

8 各通道的发射脉冲延迟精度不应大于 5ns。

**8.2.3** 相控阵软件应符合下列规定：

1 仪器应有 A、B、C、S 显示功能和 TOFD 视图功能，且具有在扫描图像上对缺欠定位、定量及分析功能。

2 能够存储、调出扫描图像，并能将存储的检测数据拷贝到外部存储空间中。

3 仪器软件应具有聚焦法则计算功能、角度增益校准功能，以及 TCG 校准功能。

4 仪器的数据采集和扫查装置的移动同步，扫查步进值应可调，其最小值不应大于 0.5mm。

5 仪器应能存储和分辨各 A 扫描信号之间相对位置的信息。

6 离线分析软件应能查看检测的相关设置参数。

**8.2.4** 相控阵探头应符合现行行业标准《无损检测 超声相控阵探头通用技术条件》JB/T 11731 并符合下列规定：

1 相控阵探头应由不少于 8 个晶片组成阵列，探头可加装用以辅助声束偏转的楔块或延迟块。

2 探头实测中心频率与标称频率间的误差不应大于 10%。

3 探头 -6dB 频带宽度不小于 60%。

4 同一相控阵探头晶片间灵敏度最大差值不应大于 4dB，其均匀性应符合均方差不大于 1dB。探头晶片的灵敏度差异及有效性测试可参照本规范附录 L。

5 选用相控阵探头时，激发孔径范围内不宜有坏晶片。若坏晶片不可避免，则在确保检测灵敏度符合规定的前提下，激发孔径范围内坏晶片数量不能超出孔径范围内激发总数的 20%，且不应有连续坏晶片。

6 相控阵探头应与检测面紧密接触，探头楔块与被检工件接触面间隙不应大于 0.5mm，如果间隙大于 0.5mm，应采用曲面楔块或对楔块进行修磨，修磨时应重新测量楔块几何尺寸，同时考虑对声束的影响。

**8.2.5** TOFD 检测宜采用专用 TOFD 探头，TOFD 探头性能应符合下列规定：

1 探头应符合其相应的产品标准规定，具有产品质量合格

证明文件。

2 探头产品质量合格证中至少应给出中心频率、电阻抗或静电容、相对脉冲回波灵敏度和频带相对宽度等主要性能参数。

3 宜采用两个分离的宽带窄脉冲纵波斜入射探头，一发一收相对放置组成探头对，固定于扫查装置上。探头的性能指标应符合表 8.2.5-1 的规定，测试方法可采用现行国家标准《无损检测 超声检测设备的性能与检验 第 2 部分：探头》GB/T 27664.2 的规定。

表 8.2.5-1 TOFD 探头性能指标规定

序号	性能	指标规定
1	中心频率	实测值与标称值的偏差在标称值的 10% 以内
2	相对脉冲回波灵敏度	实测值与标称值的偏差在 3dB 以内
3	电阻抗或静电容	实测值与标称值的偏差在标称值的 20% 以内
4	直通波持续时间	直通波按峰值下降 20dB 测量的持续时间不应超过两个脉冲周期
5	频带相对宽度	不小于 80%

4 TOFD 探头的参数选用宜符合表 8.2.5-2 的规定。

表 8.2.5-2 TOFD 探头参数表

焊缝母材厚度 (mm)	标称频率 (MHz)	入射角度 $\alpha$ (°)	晶片直径 (mm)
8 ~ 15	15 ~ 7	70 ~ 60	2 ~ 4
15 ~ 35	10 ~ 5	70 ~ 60	2 ~ 6
35 ~ 50	5 ~ 3	70 ~ 60	3 ~ 6

### 8.2.6 扫查装置应符合下列规定：

1 探头夹持部分在扫查时应能保证声束与焊缝长度方向夹角不变，并可安装位置编码器。

2 导向部分应能在扫查时保证探头运动轨迹与拟扫查轨迹

一致。

3 驱动部分可采用自动或手动。

### 8.2.7 仪器与探头的组合性能应符合以下规定：

1 新购置的相控阵仪器或探头、维修或更换主要部件的仪器或探头，以及检测人员有怀疑时，应进行仪器与探头的组合性能测试。

2 任意连续调整 20dB 时衰减器累积误差不大于 1.7dB。任意连续调整 60dB 时，衰减器累积误差不大于 3dB。

3 采用频率为 5MHz 的相控阵探头，扇扫成像横向分辨力和纵向分辨力不大于 2mm。

4 采用频率为 5MHz 的相控阵探头，扇扫角度范围测量偏差一般不超过  $\pm 3^\circ$ ，扇扫角度分辨力不大于  $2.5^\circ$ 。

### 8.2.8 检测设备和器材的校准、核查和检查应符合下列规定：

1 每年应对相控阵设备和探头组合性能中的水平线性、垂直线性进行一次校准，校准结果应符合本规范第 5.2 节的规定。

2 每隔 6 个月应对相控阵设备和探头组合性能中的水平线性、垂直线性进行一次核查并记录，核查结果应符合本规范第 8.2.4 条的规定。

3 探头首次使用前应测定和记录探头晶片灵敏度差值及有效性，测定结果应符合本规范第 8.2.4 条的规定。

4 使用过程中每个月应对校准试块和模拟试块的表面腐蚀与机械损伤进行一次检查，试块表面不应有影响扫查的腐蚀和机械损伤。

## 8.3 试 块

8.3.1 相控阵试块包括校准试块和模拟试块。

8.3.2 宜采用 SGB-PA 校准试块测试仪器和探头的系统性能，调试检测灵敏度。试块的型式、规格尺寸应符合本规范附录 M 的规定，其长横孔直径为 2mm。仪器和探头的系统性能测试也可采用其他与 SGB-PA 功能相同、材质相近的试块，灵敏度校

准也可采用其他与 SGB-PA 试块材质相同、曲率符合规定及反射体直径相同的试块。

**8.3.3** 应采用模拟试块进行工艺验证。模拟试块的材质宜为被检测管道的一段，也可采用声学性能相同或相近的材料。试块表面状态应与现场焊缝母材的状态接近，焊接坡口型式与实际检测焊缝应相同或相近，坡口角度相差不应大于  $5^{\circ}$ 。

**8.3.4** 模拟试块的厚度应为管道厚度的  $0.9 \sim 1.3$  倍且两者间最大差值不大于  $5\text{mm}$ 。模拟试块的曲率应为管道曲率的  $0.9 \sim 1.5$  倍，当管道直径小于  $159\text{mm}$  时，模拟试块的曲率应为管道曲率的  $0.9 \sim 1.1$  倍。当管道直径大于  $500\text{mm}$  时可不考虑曲率的影响。

**8.3.5** 模拟试块中的反射体应包括机械加工的人工反射体和焊接缺欠，反射体和人工缺欠的布局应覆盖工件厚度。焊接缺欠和人工反射体的设置应符合下列规定：

1 应在焊缝上下表面设置矩形槽，矩形槽的位置距离坡口边缘不应小于  $5\text{mm}$ ，矩形槽长度不宜小于  $10\text{mm}$ ，深度为  $1\text{mm}$ ，宽度为  $1\text{mm}$ 。

2 宜在上游和下游坡口面上分别设置坡口未熔合，深度宜为  $1/3T$  和  $2/3T$ ，长度不宜小于  $10\text{mm}$ ，高度为  $2 \sim 3\text{mm}$ 。当壁厚小于或等于  $15\text{mm}$  时可在  $1/2T$  处设置一个坡口未熔合。

3 宜沿焊缝中心线设置  $\phi 2$  长横孔或条渣，长度不应小于  $20\text{mm}$ ，深度为  $1/2T$ 。

4 应在焊缝根部中心设置矩形槽，槽宽  $2\text{mm}$ ，深度  $1.5\text{mm}$ ，长度不宜小于  $10\text{mm}$ 。

## 8.4 耦 合 剂

**8.4.1** 耦合剂应具有良好的透声性和适宜的流动性，对材料无腐蚀，符合健康环保规定，并应便于清理。

**8.4.2** 宜采用水作为耦合剂，在工作环境温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  时，可采用乙醇水溶液或类似介质。

8.4.3 实际检测采用的耦合剂应与检测系统设置和校准时的耦合剂相同。

## 8.5 检测设置

8.5.1 相控阵探头的布置应符合下列规定：

1 宜采用扇形扫描对焊缝进行覆盖，探头平行于焊缝移动作沿线扫查。

2 探头步进偏移距离  $S$  值的选择应确保声束对检测区域充分覆盖，同时兼顾检测灵敏度。

3 探头步进偏移距离  $S$  值可按下式计算：

$$S = 2T \cdot \operatorname{tg} \alpha + \left( W_{\text{HAZ}} + \frac{W}{2} - L_0 \right) \quad (8.5.1)$$

式中  $S$ ——步进偏移距离 (mm)；

$\alpha$ —— $S$  扫描时为最小偏转角度，E 扫描时为偏转角度；

$T$ ——工件厚度 (mm)；

$W_{\text{HAZ}}$ ——单侧热影响区宽度 (mm)；

$W$ ——焊缝宽度 (mm)；

$L_0$ ——探头入射点到探头前沿距离 (mm)。

8.5.2 激发孔径设置应符合下列规定：

1 无论选择何种扫描方式，可偏转方向上的激发孔径长度  $L$  与晶片宽度  $a$  之比应符合下式的规定：

$$0.2 \leq (L/a) \leq 5 \quad (8.5.2)$$

式中  $L$ ——激发孔径长度 (mm)；

$a$ ——晶片宽度 (mm)。

2 晶片数要根据被检件厚度选择，单次激发的晶片数不应低于 8。与工件厚度有关的相控阵探头参数选择可按表 8.5.2 的规定确定。如激发孔径不能符合规定时，应选择较大的激发孔径。

表 8.5.2 相控阵探头参数

最大检测厚度 (mm)	频率 (MHz)	晶片间隙 (mm)	激发孔径尺寸 (mm)
$5 \leq T < 15$	15 ~ 5	0.8 ~ 0.3	5 ~ 10
$15 \leq T \leq 50$	10 ~ 4	1.0 ~ 0.5	8 ~ 25

**8.5.3** 扫查方式选择和设置应符合下列规定：

1. 电子扫描方式包括线扫描和扇扫描，机械扫查方式包括沿线扫查、锯齿形扫查和斜向扫查。

2. 应采用扇扫描沿线扫查或线扫描沿线扫查作为焊接接头的基本检测方式，对特定缺欠进行检测时也可采用锯齿形或斜向扫查的方式。

3. 对检测区域应进行两次或两次以上的覆盖，并尽可能使其中两次覆盖的声束来自大致相互垂直的两个方向。若因条件限制不能实现，则允许来自一个方向，但两次覆盖的声束夹角不得小于  $10^\circ$ 。

**8.5.4** 扇扫描设置和校准应符合下列规定：

1. 横波斜声束扇扫描角度范围不应超出  $35^\circ \sim 75^\circ$  并在楔块制造商推荐的角度范围内使用。特殊情况下，确需要应用超出该角度范围的声束检测时，应通过试验验证其灵敏度。

2. 当工件壁厚较小时，不宜采用过小角度声束，以免底面一次反射波进入楔块产生干扰。

3. 扇扫描角度步进最大值不应超过  $1^\circ$ 。

4. 应对扇扫描检测范围内每一个角度的声束进行角度增益修正（ACG 修正）。ACG 修正可采用 SGB-PA 系列试块及 CSK-I A 等其他带有圆弧的等效试块，将所有角度的声束波幅调至满屏高度的  $80\% \pm 5\%$  即完成修正。

5. 角度修正完成后应对所有声束的声程进行时间增益修正（TCG 修正）。TCG 修正宜采用 SGB-PA 系列试块及 CSK-II A 试块等其他  $\phi 2\text{mm}$  的横通孔试块，修正时应将所有声束的

校准波幅调至满屏高度的  $80\% \pm 5\%$ 。

#### 8.5.5 线扫描设置和校准应符合下列规定：

1 使用线形扫描检测时，应保证对检测区域全覆盖，激发孔径移动的步进设置一般为 1 个晶片。

2 应对因孔径位置引起的灵敏度差异进行 TCG 修正，修正的声程范围应包含检测拟使用的声程范围。

3 TCG 修正可采用 SGB-PA 系列试块及 CSK-II A 等其他  $\phi 2\text{mm}$  的等效长横孔试块。修正时应将所有校准波幅调至满屏高度的  $80\% \pm 5\%$ 。

4 修正过程应控制噪声信号，经最大补偿的声束对最大声程处  $\phi 2\text{mm}$  长横孔回波的信噪比不应小于 12dB。

#### 8.5.6 PAUT 聚焦深度的设置应符合下列规定：

1 焊缝初始扫查时聚焦深度应避免设置在近场区内。

2 检测声程范围小于或等于 50mm 时，聚焦深度宜设置在最大探测声程处。

3 检测声程范围大于 50mm 时，聚焦深度宜选择检测声程范围的中间值，也可选择其他适当深度。

4 在对缺欠进行精确定量时，或对特定区域检测需要获得更高的灵敏度和分辨率时，可将焦点设置在该区域。

#### 8.5.7 PAUT 灵敏度设置和校准应符合下列规定：

1 应采用 TCG 曲线设置检测灵敏度，TCG 曲线可采用 SGB-PA 或其他等效试块中的  $\phi 2\text{mm}$  长横孔进行制作。TCG 曲线制作和 TCG 修正应采用同一块试块。

2 曲线制作不应少于 3 点。

3 用一次反射法时，最深校准孔深度应大于或等于  $2.2T$ 。用直射法时，最深孔深度应大于或等于  $1.3T$ 。

4 将不同深度的  $\phi 2\text{mm}$  长横孔回波高度设置为满屏高度的  $80\% \pm 5\%$ ，再增加 2dB 作为检测灵敏度。

5 焊缝母材的表面耦合损失和材质衰减与试块不相同时应进行传输损失补偿。在所采用的最大声程内最大传输损失差小

于或等于 2dB 时可不进行补偿。

6 校准过程应控制噪声信号，经最大补偿的声束对最大声程处  $\phi$  2mm 长横孔回波的信噪比不应小于 12dB。

**8.5.8** 检测不等厚焊口时，宜按照焊缝两侧的壁厚分别对相对应的探头进行扫查设置，应保证扫查范围覆盖整个被检测区域。

**8.5.9** TOFD 设置和校准应符合下列规定：

1 应采用一组对称的探头检测；探头中心间距宜设置为使该探头组的主声束交点位于  $2/3$  壁厚深度处。

2 检测工件底面的探头声束与底面检测区域边界处法线间的夹角不应小于  $40^\circ$ 。

3 TOFD 检测通道信号平均化处理次数宜设定为 1；噪声较大时设定值不应大于 16。

4 数字化频率不应小于所选探头最高标称频率的 6 倍。

5 A 扫时间窗口的起始位置不应小于直通波到达接收探头前  $1\mu\text{s}$ ，A 扫时间窗口的终止位置不应小于工件底面回波后  $1\mu\text{s}$ ，必要时可设置在一次波形转换波后不小于  $1\mu\text{s}$  的范围。

6 TOFD 校准宜在待检工件上进行，应将直通波波幅调至满屏高度的 40% ~ 90% 作为检测灵敏度。

7 直通波与底面反射波时间间隔所反映的厚度应校准为工件厚度。

**8.5.10** 宜设置耦合通道监视耦合状况。耦合监视通道的设置应符合下列规定：

1 采用沿线扫查时应设置耦合监视通道。

2 可在被检焊缝母材或与被检焊缝母材特征相同的试块上设置和调试耦合监视通道。

3 可采用  $0^\circ$  波束垂直入射到母材或试块底面，将最大波幅调整到满屏高的 80%（误差为  $\pm 5\%$ ），再增加 6dB ~ 10dB 作为耦合监视通道的灵敏度。

4 耦合监视通道闸门电平应设置为满屏高度的 40%。

**8.5.11** 扫查步进值的设置应符合表 8.5.11 的规定。

表 8.5.11 扫查步进值的设置

工件厚度 $T$ (mm)	扫查步进最大值 $\Delta X_{\max}$ (mm)
$T \leq 20$	1.0
$20 < T \leq 50$	2.0

**8.5.12** 检测前应对位置传感器进行校准。校准时扫查装置移动的最小距离是 500mm，校准后显示距离与实际位移的误差应小于 1%。

**8.5.13** 在下列情况下应采用与初始检测设置时相同的对比试块对检测系统进行复核，复核的内容包括灵敏度、声程和扫描角度：

- 1 检测过程中检测设备更换探头及探头线、超声发射接收模块、楔块、放大器等主要部件。
- 2 检测人员有疑问时。
- 3 连续工作 4h。
- 4 检测结束。

**8.5.14** 若复核时发现初始设置和校准的参数偏离，应按表 8.5.14 的规定执行。

表 8.5.14 检测参数偏离和纠正

参数		偏离值	规定的措施
灵敏度 偏离	1	$\leq 3\text{dB}$	不需要采取措施，必要时可通过软件纠正
	2	$> 3\text{dB}$ ，当低于初始设置值时	应重新设置，并重新检测上次校准以来所检测的焊缝
	3	$> 3\text{dB}$ ，当高于初始设置值时	评定时应考虑偏离值的影响，必要时可通过软件纠正
声程 偏离	1	$\leq 1\text{mm}$	不需要采取措施
	2	$> 1\text{mm}$	可采用软件进行纠正，但应保证扫查覆盖范围符合规定，否则应重新设置，并重新检测上次校准以来所检测的焊缝
角度 偏离	1	$\leq 1^\circ$	不需要采取措施
	2	$> 1^\circ$	应对上次校准以来所检测的位置进行修正

## 8.6 检测工艺验证

8.6.1 应在模拟试块上对检测工艺进行验证，验证时机包括：

- 1 工艺首次应用时。
- 2 设备重要部件维修或更换时。
- 3 对工艺或设备状态有怀疑时。

8.6.2 验证结果应符合下列规定：

1 得到的检测图像应能清晰显示模拟试块中所有的模拟缺陷。

2 检测范围应能覆盖整个检测区域。

8.6.3 验证结果不符合本规范第 8.6.2 条规定的应调整工艺后重新进行验证。

## 8.7 现场检测

8.7.1 现场检测宜采用带导向装置的机械扫查。

8.7.2 检测区域应符合下列规定：

1 检测区域宽度应是焊缝加上焊缝熔合线两侧各不小于 5mm 的范围。

2 若对已发现缺欠的部位进行复检或检测已确定的重点部位，检测区域可缩减至相应部位。

8.7.3 扫查面应符合下列规定：

1 探头移动区应清除飞溅、锈蚀、油污及其他外部杂质，制管焊缝应修磨齐平。

2 检测前应在工件扫查面上予以标记，标记内容应包括扫查起始点和扫查方向。

3 探头移动区域的宽度应根据检测设备、坡口型式及被检焊接接头的厚度等确定，探头移动区的范围宜为焊接接头两侧各大于或等于 150mm 区域。

8.7.4 对比试块与被检焊缝的表面温差应控制在  $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 。

8.7.5 探头应对称分布于焊缝两侧，相对于焊缝中心线的位置

误差不宜大于  $\pm 1\text{mm}$ 。只有单侧直边的焊缝可采用单个探头在焊缝一侧进行检测。

**8.7.6** 扫查时应保证扫查速度小于或等于最大扫查速度  $v_{\max}$ ，同时保证耦合效果并符合数据采集的规定。最大扫查速度  $v_{\max}$  应按下式计算：

$$v_{\max} = \frac{PRF}{N \cdot A} \Delta x \quad (8.7.6)$$

式中  $v_{\max}$ ——最大扫查速度 (mm/s)；  
 $PRF$ ——激发探头的脉冲重复频率 (Hz)；  
 $\Delta x$ ——设置的扫查增量值 (mm)；  
 $N$ ——设置的信号平均次数；  
 $A$ ——做 S 扫描时，角度范围内所包含的 A 扫个数 (如  $35^\circ \sim 75^\circ$  的 S 扫描，角度步进为  $1^\circ$ ，则  $A=41$ )。

**8.7.7** 扫查停止位置应越过起始位置至少 20mm。若需对焊缝在长度方向进行分段扫查，则各段扫查区的重叠范围至少为 20mm。

**8.7.8** 扫查过程中应保持稳定的耦合，有耦合监控规定的应开启此功能，若怀疑耦合不好，应重新扫查该段区域。

## 8.8 扫查数据质量

**8.8.1** 评定前应对扫查数据的质量进行评估。

**8.8.2** 扫查数据质量应符合如下规定：

- 1 采集的数据量应覆盖所检测的焊缝长度。
- 2 扫查图应覆盖整个检测区域。
- 3 数据丢失量不应超过扫查的 5%，且不应出现相邻数据连续丢失。

4 扫查图像中耦合不良长度不得超过整个扫查长度的 5%，单个耦合不良长度不得超过 5mm。若数据无效，应纠正后重新进行扫查。

**8.8.3** 探头前沿至焊缝中心线的偏移距离不大于 1mm。当大于 1mm 时，软件具备步进偏移调整功能时可采用软件进行调整，但应保证检测范围覆盖整个焊接接头，否则应重新扫查。

**8.8.4** 制管焊缝影响部位及扫查面状态无法满足要求的部位，其 TOFD 直通波的高度允许降低，但最低值不应小于 20%。

## 8.9 缺欠的测量

**8.9.1** 应结合 B 型显示、扇扫描、A 扫描及 TOFD 等显示对缺欠的位置、波幅、长度、高度和深度进行测量。

**8.9.2** 缺欠最高波幅的确定应符合下列规定：

1 扇扫描时应以不同角度 A 扫描中缺欠的最高回波波幅作为该缺欠的波幅。

2 线形扫描时应以不同孔径组合中缺欠最高回波波幅作为该缺欠的波幅。

**8.9.3** 缺欠长度的测量应符合下列规定：

1 当缺欠反射波只有一个高点且高点波幅未超过系统记录波高上限时，应以该波幅为基准采用 -6dB 法进行测长。

2 当缺欠反射波只有一个高点且高点波幅超过系统记录波高上限时，应以系统记录波高上限为基准采用 -6dB 法进行测长。

3 当缺欠反射波峰值起伏变化有多个高点且大于或等于 40% 时，应采用端点 6dB 法测其指示长度。

**8.9.4** 缺欠高度的测量应采用 TOFD 通道，当 TOFD 通道无法测量时应采用回波高度对缺欠进行评定。

## 8.10 质量评定

**8.10.1** 应结合相控阵技术和 TOFD 技术估判缺欠性质。

**8.10.2** 缺欠分为点状缺欠、线状缺欠和密集缺欠三类，其分类应符合下列规定：

1 除裂纹、表面未熔合外，指示长度小于或等于 10mm 且只有一个回波高点的缺欠显示应评定为点状缺欠。

2 指示长度大于 10mm 或指示长度虽然小于或等于 10mm 但回波有多个高点的缺欠显示应评定为线状缺欠。线状缺欠包括表面线状缺欠和埋藏线状缺欠。

3 在焊接接头横截面中存在 3 个及以上点状缺欠的可评定为密集缺欠。

**8.10.3** 最大回波幅值低于满屏高度 20% 的非裂纹缺欠可不予记录。

**8.10.4** 相邻两个线状缺欠在一条直线上，且其间距小于较小的缺欠长度时，应作为一个缺欠处理，以两缺欠长度之和作为其指示长度，不考虑间距。

**8.10.5** 焊接接头质量分为四个等级，并应符合下列规定：

1 缺欠的反射波幅低于 40% 的非裂纹缺欠应评为Ⅰ级。

2 缺欠信号具有裂纹特征的缺欠应评为Ⅳ级。

3 外表面未熔合缺欠应评为Ⅳ级。

4 最大反射波幅大于或等于 80% 的线状缺欠，无论指示长度如何，应评为Ⅳ级。

5 固定连头焊口的根部未熔合、根部未焊透应评为Ⅳ级。

6 点状缺欠应按缺欠指示高度进行分级，指示高度小于或等于  $1/3T$  且不大于 3mm 时应评为Ⅱ级，指示高度小于或等于  $1/2T$  且不大于 4mm 时应评为Ⅲ级，大于Ⅲ者应评为Ⅳ级。

7 点状缺欠按回波高度进行评定时，回波高度大于 80% 者应评为Ⅳ级。

8 密集缺欠的指示长度小于或等于 13mm 时应评为Ⅱ级，大于 13mm 时应评为Ⅳ级。

9 最高反射波大于或等于 40% 且小于 80% 的线状缺欠应根据缺欠的指示长度和指示高度，按表 8.10.5 的规定评定。

**8.10.6** 两个或两个以上的线状缺欠，其深度方向间距小于 6mm 或在深度方向存在重叠时应按埋藏线状缺欠累计评定。

表 8.10.5 缺欠质量分级

评定等级	表面线状缺欠		埋藏线状缺欠	
	指示长度	指示高度	指示长度	指示高度
I	不允许		不允许	
II	$\leq T$ 且 $\leq 12.5\text{mm}$ , 300mm 范围内累计 $\leq 25\text{mm}$	$\leq 1/3T$ 且 $\leq 3\text{mm}$	$\leq 2T$ 且 $\leq 25\text{mm}$ , 300mm 范围内累 计 $\leq 50\text{mm}$	$\leq 1/3T$ 且 $\leq 3\text{mm}$
III	$\leq 2T$ 且 $\leq 25\text{mm}$ , 300mm 范围内累计 $\leq 50\text{mm}$	$\leq 1/3T$ 且 $\leq 4\text{mm}$	$\leq 2T$ 且 $\leq 50\text{mm}$ , 300mm 范围内累 计 $\leq 75\text{mm}$	$\leq 1/2T$ 且 $\leq 4\text{mm}$
IV	大于 III 级者			

## 8.11 检测记录和报告

8.11.1 检测记录和报告除应符合本规范第 3.8 节的规定的的内容外，还应包括下列内容：

- 1 被检管线情况（工程编号、规格、材质、焊口编号等）。
- 2 检测条件及工艺（仪器、探头、楔块、耦合剂、扫查装置、扫查方式、步进偏移、扫查步进、检测角度、检测标准等）。
- 3 检测缺欠内容及评定结果。

8.11.2 检测报告格式参见本规范附录 D 的规定。

## 9 磁粉检测

### 9.1 一般规定

- 9.1.1 采用电磁轭、湿法、连续磁化技术进行检测。
- 9.1.2 检测时机应符合设计文件和相关规定。

### 9.2 磁粉检测设备

- 9.2.1 磁粉检测设备应符合现行行业标准《无损检测仪器 磁粉探伤机》JB/T 8290 的规定。
- 9.2.2 当使用磁轭最大间距时，交流电磁轭至少应有 45N 的提升力，直流电磁轭至少应有 177N 的提升力，交叉磁轭至少应有 118N 的提升力（磁极与试件表面间隙应为 0.5mm）。
- 9.2.3 当采用荧光磁粉检测时，使用的黑光灯在工件表面的黑光辐照度应大于或等于  $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，黑光的波长范围应为 320nm ~ 400nm，中心波长约为 365nm。黑光源应符合现行国家标准《无损检测 渗透检测和磁粉检测 观察条件》GB/T 5097 的规定。

### 9.3 标准试片

- 9.3.1 标准试片用于检验磁粉检测设备、磁粉和磁悬液的综合性能，了解被检工件表面有效磁场强度和方向、有效检测区及磁化方法是否正确。
- 9.3.2 标准试片分为 A<sub>1</sub> 型标准试片和 C 型标准试片。A<sub>1</sub> 型和 C 型标准试片应符合现行国家标准《无损检测 磁粉检测用试片》GB/T 23907 的规定。
- 9.3.3 A<sub>1</sub> 型标准试片（图 9.3.3）几何尺寸、型号及槽深应符合

表 9.3.3 的规定。宜选用 A<sub>1</sub>-30/100 型标准试片。

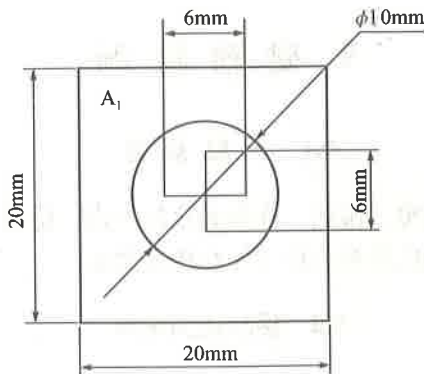


图 9.3.3 A<sub>1</sub> 型标准试片

表 9.3.3 A<sub>1</sub> 型标准试片型号及槽深

型号规格	试片厚度 (μm)	人工缺陷槽深 (μm)
A <sub>1</sub> -7/50	50	7
A <sub>1</sub> -15/50		15
A <sub>1</sub> -30/50		30
A <sub>1</sub> -15/100	100	15
A <sub>1</sub> -30/100		30
A <sub>1</sub> -60/100		60

9.3.4 C 型标准试片 (图 9.3.4) 几何尺寸、型号及槽深应符合表 9.3.4 的规定。本规范宜选用 C-15/50 标准试片。

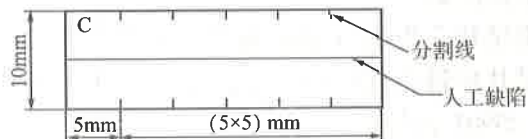


图 9.3.4 C 型标准试片几何尺寸

表 9.3.4 C 型标准试片

型号规格	试片厚度 ( $\mu\text{m}$ )	人工缺欠深度 ( $\mu\text{m}$ )
C-8/50	50	8
C-15/50		15

### 9.3.5 标准试片应按下列方法使用：

使用标准试片时，应将试片无人工缺欠的面朝外。为使试片与被检面接触良好，可用透明胶带将其平整粘贴在被检面上，并注意胶带不应覆盖试片上的人工缺欠。

2 标准试片表面有锈蚀、折痕或磁特性发生改变时不应继续使用。试片使用后应用溶剂清洗干净，再用干净的脱脂棉或纸擦去溶剂，不应用手触摸试片表面。干燥后应再涂上防锈油，并保存在干燥的环境中。

3 检测焊缝坡口等狭小部位时，若 A<sub>1</sub> 型标准试片使用不便，可选用 C 型标准试片。

## 9.4 辅助器材

### 9.4.1 磁粉检测应具备有下列辅助器材：

- 1 磁悬液浓度沉淀管。
- 2 2~10 倍放大镜。
- 3 白光照射度计。
- 4 黑光灯。
- 5 黑光辐照计。
- 6 磁场强度计。
- 7 毫特斯拉计。

## 9.5 磁粉、载体及磁悬液

9.5.1 磁粉应具有高导磁率、低矫顽力和低剩磁，并应与被检工件表面颜色有较高的对比度。磁粉粒度和性能的其他规定应

符合现行行业标准《无损检测 磁粉检测用材料》JB/T 6063 的规定。

**9.5.2** 湿法应采用水或低黏度油基载体作为分散媒介。若以水为载体时，应加入适当的防锈剂和表面活性剂，必要时可添加消泡剂。油基载体的运动黏度在 38℃ 时应小于或等于 3.0mm<sup>2</sup>/s，使用温度下应小于或等于 5.0mm<sup>2</sup>/s，闪点不应低于 94℃，且应无荧光、无异味。

**9.5.3** 磁悬液应符合下列规定：

1 磁悬液浓度应根据磁粉种类、粒度、施加方法和被检工件表面状态等因素来确定。磁悬液浓度范围应符合表 9.5.3 的规定。测定前应对磁悬液进行充分搅拌。磁悬液也可采用磁膏配制，用磁膏配置磁悬液时其浓度应符合磁膏的使用说明书。

表 9.5.3 磁悬液浓度

磁粉类型	配置浓度 (g/L)	沉淀浓度 (mL/100mL)
非荧光磁粉	10 ~ 25	1.2 ~ 2.4
荧光磁粉	0.5 ~ 3.0	0.1 ~ 0.4

2 磁悬液浓度的测定方法：测定前应将磁悬液充分搅拌，搅拌时间不应少于 30min，再将 100mL 磁悬液注入磁悬液浓度沉淀管中，静止沉淀 30min 后，观察试管底部沉淀物的体积。

3 荧光磁悬液配制后宜在 24h 内用完。

## 9.6 校 验

**9.6.1** 电磁轭的提升力应半年校准一次，设备受到损坏或进行重大修理后应重新校准。如设备停止使用达到或超过一年，应在使用前校验。

**9.6.2** 磁粉检测用辅助仪表，如黑光辐照计、照度计、磁场强度计、毫特斯拉计等，应至少每年校验一次。

**9.6.3** 新配制的磁悬液浓度应符合本规范表 9.5.3 的规定，循环使用的磁悬液，每天开始工作前应进行磁悬液浓度测定。

**9.6.4** 检测前，应进行磁悬液润湿性能检验。将磁悬液施加在被检工件表面上，如磁悬液的液膜是均匀连续的，则磁悬液的润湿性能合格。如液膜被断开，则磁悬液的润湿性能不合格。

## 9.7 检测范围

**9.7.1** 焊接接头的检测范围应为焊缝宽度及两侧各 0.5 倍的母材厚度区域。

**9.7.2** 焊接卡具痕迹的检测范围应为焊接卡具痕迹及四周各向外延伸 5mm。

## 9.8 检测准备

**9.8.1** 磁粉检测应配备防触电及防紫外线影响的防护用品，严禁使用不带滤波片的黑光灯，应避免黑光灯直接照射人眼睛。

**9.8.2** 每天检测工作开始前，应采用标准试片检验磁粉检测设备、磁粉和磁悬液的综合性能（系统灵敏度）。

**9.8.3** 被检焊接接头两侧各 100mm 范围内不应有油脂、锈蚀、涂层、氧化皮、飞溅或其他粘附磁粉的物质，表面的不规则状态不应影响检测结果的评定，否则应做适当的修磨。

## 9.9 检测技术规定

**9.9.1** 磁粉检测应按下列基本步骤和顺序进行：

- 1 预处理。
- 2 磁化。
- 3 施加磁悬液。
- 4 观察并记录磁痕。
- 5 评定缺欠。
- 6 后处理。

**9.9.2** 电磁轭检测的提升力应符合本规范第 9.2.2 条的规定。磁轭间距应控制在 75mm ~ 200mm，检测的有效区域为两极连线两侧各 50mm 的范围，有效检测范围应是标准试片人工缺欠能清晰显示磁痕的区域。磁化区域每次应至少有 15mm 的重叠。

**9.9.3** 采用磁轭法磁化工件时，其磁化电流应根据标准试片实测结果来选择，如果采用固定式磁轭磁化工件时，应根据标准试片实测结果来校验灵敏度是否符合规定。

**9.9.4** 受检工件的每一受检区域至少应进行两次磁化，磁力线方向应相互垂直。当使用交叉磁轭磁化装置时，四个磁极端面与检测面之间应尽量贴合，最大间隙不应大于 1.5mm，检测速度不宜大于 4m/min。

**9.9.5** 磁悬液的施加应符合下列规定：

- 1 磁悬液浓度应符合本规范第 9.5.3 条的规定。
- 2 受检表面应先被磁悬液良好湿润后，方可施加磁悬液。
- 3 磁悬液可采用喷、浇方法施加，不可采用刷涂法。无论采用哪种方法，均不应使检测面上磁悬液的流速过快。
- 4 磁悬液应在通电时间内施加完毕，通电时间宜为 1s ~ 3s。为保证磁化效果应至少反复磁化两次，停施磁悬液至少 1s 后方可停止磁化。已形成的磁痕不应被流动着的磁悬液所破坏。

**9.9.6** 缺陷磁痕观察应在磁痕形成后立即进行，并应符合下列规定：

- 1 非荧光磁粉检测时，磁痕观察应在可见光下进行，工件受检表面处可见光照度不应小于 1000lx。当现场采用便携式设备检测时，由于条件所限无法符合时，可见光照度可适当降低，但不应低于 500lx。荧光磁粉检测时，黑光灯的辐照度和波长应符合本规范第 9.2.3 条的规定，磁痕观察应在较暗的环境里进行，其可见光照度不应大于 20lx。

- 2 当辨认细小缺欠磁痕时，应用 2 ~ 10 倍放大镜进行观察。

## 9.10 复 验

9.10.1 当出现下列情况之一时, 应进行复验:

- 1 检测结束时经标准试片验证, 检测灵敏度不符合规定。
- 2 发现检测过程中操作方法有误。
- 3 对检测结果有争议。
- 4 有其他需要。

9.10.2 复验应按本规范第 9.9 节的规定进行。

## 9.11 质量评定

9.11.1 磁痕显示分为相关显示、非相关显示和伪显示三类。非相关显示和伪显示不应进行评定。

9.11.2 相关显示的评定应符合下列规定:

1 长度与宽度之比大于 3 的缺欠磁痕, 应按线性缺欠处理。长度与宽度之比小于或等于 3 的缺欠磁痕, 应按圆形缺欠处理。

2 在一直线两侧各 2mm 的宽度范围内, 若两个或两个以上线形缺欠磁痕显示间距小于或等于 2mm, 两缺欠之间夹角不超过  $30^\circ$ , 且该直线通过某一条缺欠的中心线时, 应按一条缺欠处理, 其长度为各个缺欠磁痕长度之和加间距。

3 在同一直线上存在四个以上直径大于 1.5mm 且间距小于 1.5mm 的圆形显示, 应按链状圆形显示处理。

4 长度小于 0.5mm 的缺欠磁痕显示可不计。

9.11.3 相关显示的记录, 应符合下列规定:

1 所有需评定的相关显示的尺寸、数量和产生部位均应记录, 并应绘制示意图。评定为缺陷的相关显示应在受检表面相应部位用油质笔做出明显标记。

2 磁痕的永久性记录可采用照相法 (应附带标尺)、胶带法及其他适当的方法。

9.11.4 被检表面存在下列任一相关显示时应评定为缺陷:

- 1 任何裂纹显示。
- 2 链状圆形显示。
- 3 任何长度大于 2.5mm 的线性缺欠显示。
- 4 单个圆形显示的尺寸大于相邻较薄侧管壁厚度的 1/2。
- 5 工作压力小于或等于 4.0MPa 的管道，单个圆形显示大于 5mm 或在 150mm × 25mm 的评定区域内缺欠磁痕长度的总和大于 12mm 或线性缺欠磁痕长度的总和大于 9mm。
- 6 工作压力大于 4.0MPa 的管道，单个圆形显示大于 4mm 或在 150mm × 25mm 的评定区域内缺欠磁痕长度的总和大于 9mm 或线性缺欠磁痕长度的总和大于 6mm。

## 9.12 检测记录和报告

**9.12.1** 检测记录和报告除应符合本规范第 3.8 节的规定的內容外，还应包括下列內容：

- 1 被检管线情况（工程名称、焊接接头编号、受检部位、材质、管径、壁厚、检测标准等）。
- 2 检测条件及工艺 [表面状态及检测时机、磁粉种类及磁悬液浓度、施加磁粉的方法、磁极间距、检测灵敏度校验及试片名称、缺欠记录及工件草图（或示意图）等]。
- 3 检测缺欠内容及评定结果。

**9.12.2** 检测报告可采用本规范附录 D 规定的格式。

## 10 渗透检测

### 10.1 一般规定

**10.1.1** 本章采用溶剂去除型着色渗透、快干式显像的渗透检测方法。

**10.1.2** 检测时机应符合设计文件和相关规定。

### 10.2 检测材料

**10.2.1** 渗透检测剂（下列简称检测剂）应包括渗透剂、清洗剂 and 显像剂。

**10.2.2** 渗透检测剂必须标明生产日期和有效期，要附带产品合格证和使用说明书。

**10.2.3** 检测剂应采用经国家有关部门鉴定过的产品，不同型号、不同类型的产品不应混合使用。

**10.2.4** 当发现有下列情况之一时，检测剂应停止使用：

- 1 渗透剂有明显的变色，喷涂后难以清洗。
- 2 显像剂不能在受检工件表面上均匀附着、显像性能不良。
- 3 喷罐式渗透检测剂的喷罐表面有锈蚀，喷罐出现泄漏。

**10.2.5** 渗透检测剂必须具有良好的检测性能，对工件无腐蚀，对人体基本无毒害作用。

**10.2.6** 检测剂应置于阴暗凉爽的地方。

**10.2.7** 渗透检测中所使用的棉布、棉纱或吸湿纸应清洁、干燥和无绒毛。

### 10.3 试块

**10.3.1** 试块分为 A 型试块（铝合金淬火裂纹参考试块）和 B

型试块（镀铬辐射裂纹参考试块）。

### 10.3.2 A 型试块主要用于：

1 确定检测工艺规范，并对用于非标准温度下的渗透检测方法做出鉴定。

2 鉴别检测剂的性能。在正常使用情况下，检验渗透检测剂是否符合检测规定，比较两种渗透检测剂性能的优劣。

10.3.3 B 型试块主要用于检验渗透检测剂的系统灵敏度及操作工艺的正确性。

10.3.4 A 型试块采用现行行业标准《无损检测 渗透试块通用规范》JB/T 6064 中规定的铝合金试块，试块应由同一试块剖成具有相同大小的两部分组成，并应打上相同的序号，分别标以 A、B 记号，A、B 区试块上均应具有细密相对称的裂纹图形。A 型试块（图 10.3.4）的规格和制造规定应符合现行行业标准《无损检测 渗透试块通用规范》JB/T 6064 的相关规定。

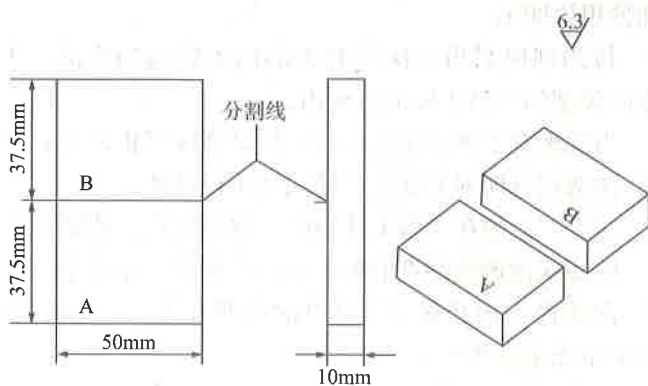


图 10.3.4 A 型试块

10.3.5 B 型试块采用现行行业标准《无损检测 渗透试块通用规范》JB/T 6064 中规定的三点式 B 型试块（图 10.3.5），材料为 1Cr18Ni9Ti 或类似的不锈钢板材，尺寸规格及其他规定应符合现行行业标准《无损检测 渗透试块通用规范》JB/T 6064 的规定。

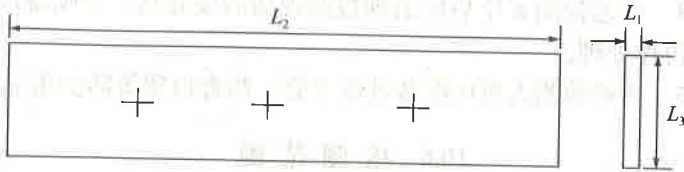


图 10.3.5 B 型试块

$L_1$ —试块厚度, (3 ~ 4) mm ;  $L_2$ —试块长度, (100 ~ 130) mm ;

$L_3$ —试块厚度, (30 ~ 40) mm

**10.3.6** 发现试块有堵塞或灵敏度下降的情况时, 必须及时清理或更换。

**10.3.7** 试块使用后应及时进行清洗。先用丙酮仔细地反复擦洗试块, 干净后再放入装有丙酮和无水酒精混合液 (体积混合比为 1 : 1) 的密闭容器中保存, 也可用其他等效方法保存。

## 10.4 检测灵敏度

**10.4.1** 灵敏度应分为三个等级, 1 级为低灵敏度, 2 级为中灵敏度, 3 级为高灵敏度。

**10.4.2** 不同灵敏度等级在镀铬试块上可显示的裂纹区位数应按本规范表 10.4.2 的规定。

表 10.4.2 灵敏度等级

灵敏度等级	可显示的裂纹区位数
1 级	1 ~ 2
2 级	2 ~ 3
3 级	3

## 10.5 安全防护

**10.5.1** 渗透检测现场应通风, 并应远离火源、热源。

**10.5.2** 在狭窄通风不良的环境中渗透检测时, 应有人在旁监护且一次连续工作时间不宜超过 40min。

**10.5.3** 喷罐式检测剂的储存温度不应超过 50℃。

**10.5.4** 渗透检测完毕后应清理检测现场的废弃物。空喷罐应泄压后再作处理。

**10.5.5** 渗透检测人员应配备乳胶手套、防毒口罩等防护用品。

## 10.6 检测范围

**10.6.1** 焊接接头的检测范围应为焊缝宽度及两侧各 0.5 倍的母材厚度区域，且最大不大于 20mm。

**10.6.2** 焊接卡具痕迹的检测范围应为焊接卡具痕迹及四周各向外延伸 5mm。

## 10.7 表面规定

**10.7.1** 外观检查合格后方可进行渗透检测。

**10.7.2** 被检表面应符合下列规定：

- 1 被检表面不应有影响渗透检测的锈蚀、氧化皮、焊接飞溅、毛刺、铁屑及各种防护层。
- 2 焊接接头成形较好时，可在焊接接头自然状态下做渗透检测。焊接接头波纹影响渗透检测时，应进行处理。
- 3 被检测母材表面的粗糙度  $Ra$  应小于或等于  $12.5\mu\text{m}$ 。
- 4 局部检测时，准备工作范围应从检测部位四周向外扩展 25mm。

## 10.8 检测技术规定

**10.8.1** 渗透检测应按下列基本步骤进行：

- 1 表面预清洗。
- 2 施加渗透剂。
- 3 去除多余的渗透剂。
- 4 干燥。
- 5 施加显像剂。
- 6 观察及评定。

## 7 后处理。

**10.8.2** 使用新的渗透检测剂、改变或更换渗透检测剂类型或操作规程时，实施检测前应用镀铬试块检验渗透检测剂的系统灵敏度及操作工艺的正确性。

**10.8.3** 正常检测时，应每周用镀铬试块检验渗透检测剂的系统灵敏度及操作工艺的正确性。检测前、检测过程中或检测结束前认为必要时可随时检验。

**10.8.4** 照度计应按相关规定定期校验。

**10.8.5** 表面预清洗应符合下列规定：

1 应对被检焊接接头两侧各不小于 25mm 的范围进行预清洗。

2 清洗时，应用清洗剂或其他有效方法清除表面的污垢。

3 清洗后，检测面上遗留的溶剂和水分等必须干燥，且应保证在施加渗透剂前不被污染。

**10.8.6** 施加渗透剂应符合下列规定：

1 渗透剂应以喷涂方法施加到受检表面，受检区域应完全被渗透剂覆盖，并在整个渗透时间内保持润湿状态。

2 当工件温度为  $10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$  时，渗透时间不应少于 10min。

3 当工件温度低于  $10^{\circ}\text{C}$  或高于  $50^{\circ}\text{C}$  时，应按本规范附录 N 的规定对操作方法进行鉴定。

**10.8.7** 去除多余的渗透剂应符合下列规定：

1 溶剂去除型渗透剂应用清洗剂去除。除特别难清洗的地方外，宜先用干燥、洁净不脱毛的布依次擦拭，直至大部分多余渗透剂被去除后，再用蘸有清洗剂的干净不脱毛的布或纸进行擦拭，直至将被检面上多余的渗透剂全部擦净。去除多余的渗透剂时不应往复擦拭，不应用清洗剂直接在被检面上冲洗。

2 在清洗操作过程中应防止过清洗或清洗不足。

**10.8.8** 干燥处理应符合下列规定：

1 施加溶剂悬浮显像剂时，检测面应在施加前进行干燥。

2 当采用溶剂去除多余渗透剂时，应自然干燥。

3 干燥时间通常为 5min ~ 10min。

#### 10.8.9 施加显像剂应符合下列规定：

1 应采用喷涂法施加显像剂，显像剂应覆盖整个被检表面，形成均匀的薄膜。

2 施加显像剂之前，显像剂应摇匀，以保持显像剂的悬浮状态。

3 喷施显像剂时，喷嘴离被检表面距离宜为 300mm ~ 400mm，喷洒方向与被检表面夹角应为  $30^{\circ}$  ~  $40^{\circ}$ ，不应往复喷洒。

4 显像时间不应少于 7min。

#### 10.8.10 观察应符合下列规定：

1 应在自然光或白光灯下观察迹痕显示，受检区域的可见光照射度应大于或等于 500lx。

2 观察迹痕显示应在显像剂施加后 7min ~ 60min 内完成。如显示迹痕的大小不发生变化，也可超过上述时间。

3 辨认细小显示时可用 2 ~ 10 倍放大镜进行观察，必要时重新进行处理和渗透检测。

#### 10.8.11 后处理应符合下列规定：

渗透检测后，工件上残留的渗透剂或显像剂应清除干净。

## 10.9 复 验

#### 10.9.1 当出现下列情况之一时，应进行复验：

1 检测结束时经试块验证，检测灵敏度不符合规定。

2 检测过程中操作方法有误或技术条件改变时。

3 不能确定显示迹痕是否为缺欠迹痕。

4 对检测结果有争议。

5 有其他需要。

#### 10.9.2 复验应符合本规范第 10.8 节的规定。

## 10.10 质量评定

**10.10.1** 渗透显示分为相关显示和非相关显示。非相关显示可不进行记录和评定。

**10.10.2** 相关显示的分类应符合下列规定：

- 1 长度小于 0.5mm 的迹痕显示可不进行评定。
- 2 评定相关显示时，应以显示迹痕的尺寸为准。
- 3 长度与宽度之比大于 3 的相关显示，应按线性缺欠处理。长度与宽度之比小于或等于 3 的相关显示，应按圆形缺欠处理。
- 4 在同一直线上存在四个以上直径大于 1.5mm 且间距小于 1.5mm 的圆形显示时，应按链状圆形显示处理。

5 在一直线两侧各 2mm 的宽度范围内，若存在两个或两个以上线形缺欠磁痕显示且间距小于或等于 2mm，两缺欠之间夹角不超过  $30^\circ$ ，且该直线通过某一条缺欠的中心线时，应按一条缺欠处理，其长度为各个缺欠磁痕长度之和加间距。

**10.10.3** 应记录缺欠的位置、性质、分类、数量和长度，缺欠迹痕的记录应采用绘制示意图的方式，必要时也可采用照相的方式。

**10.10.4** 被检表面存在下列任一相关显示应判为缺陷：

- 1 任何裂纹显示。
- 2 链状圆形显示。
- 3 任何长度大于 2.5mm 的线性缺欠显示。
- 4 单个圆形显示的尺寸大于相邻较薄侧管壁厚度的 1/2。
- 5 工作压力小于或等于 4.0MPa 的管道，单个圆形显示大于 5mm 或在  $150\text{mm} \times 25\text{mm}$  评定区域内缺欠迹痕长度的总和大于 12mm 或线性缺欠迹痕长度的总和大于 9mm。
- 6 工作压力大于 4.0MPa 的管道，单个圆形显示大于 4mm 或在  $150\text{mm} \times 25\text{mm}$  评定区域内缺欠迹痕长度的总和大于 9mm 或线性缺欠迹痕长度的总和大于 6mm。

## 10.11 检测记录和报告

**10.11.1** 检测记录和报告除应符合本规范第 3.8 节的规定外，还应包括下列内容：

1 被检管线情况（工程名称、焊接接头编号、受检部位、材质、管径、壁厚、检测标准等）。

2 检测条件及工艺 [表面状态和检测时机、检测剂（渗透剂、清洗剂、显像剂）的牌号、型号、试块型号、检测方法、检测条件（包括环境温度、渗透时间和显像时间）、采用标准名称等]。

3 检测缺欠内容及评定结果。

**10.11.2** 检测报告可采用本规范附录 D 规定的格式。

## 附录 A 胶片系统特性指标

**A.0.1** 工业射线胶片系统的主要特性指标应符合表 A.0.1 的规定。

表 A.0.1 胶片系统的主要特性指标

胶片系统类别	梯度最小值 ( $G$ ) <sub>min</sub>		颗粒度 最大值 ( $\sigma_D$ ) <sub>max</sub>	(梯度 / 颗粒度) 最小值 ( $G/\sigma_D$ ) <sub>min</sub>
	$D=2.0$	$D=4.0$	$D=2.0$	$D=2.0$
C1	4.5	7.5	0.018	300
C2	4.3	7.4	0.020	230
C3	4.1	6.8	0.023	180
C4	4.1	6.8	0.028	150
C5	3.8	6.4	0.032	120
C6	3.5	5.0	0.039	100

注：表中的黑度  $D$  均指不包括灰雾度的净黑度。

## 附录 B 黑度计（光学密度计）核查方法

**B.0.1** 黑度计可按照生产厂家推荐的方法或按本规范 B.0.2 规定的方法核查。

**B.0.2** 黑度计的核查步骤应符合下列规定：

- 1 接通黑度计外电源和测量开关，预热 10min 左右。
- 2 用标准黑度片（密度片）的零黑度点（区）校准黑度计零点，校准后顺次测量黑度片上不同黑度的各点的黑度，记录测量值。
- 3 按规定循环测量三次。
- 4 计算出各点测量值的平均值，以平均值与黑度片该点的黑度值之差作为黑度计的测量误差。
- 5 对黑度不大于 4.5 的各点的测量误差均不应超过  $\pm 0.05$ ，否则黑度计应校准、修理或报废。

## 附录 C 环向对接焊接接头透照次数确定方法

**C.0.1** 对外径  $D$  大于 400mm 的环向对接焊接接头进行双壁单影法 100% 检测时, 所需的最少透照次数应符合图 C.0.1-1 的规定。对外径  $D$  大于 100mm、小于或等于 400mm 的环向对接焊接接头进行双壁单影法 100% 检测时, 所需的最少透照次数应符合图 C.0.1-2 的规定。

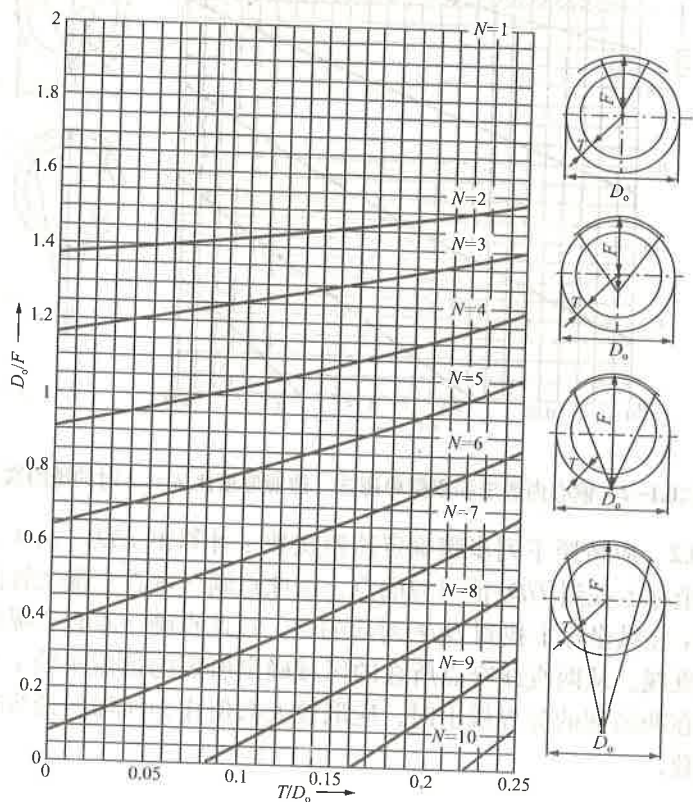


图 C.0.1-1 偏心内透法和双壁单影法, 透照厚度比  $K=1.1$  时的透照次数图

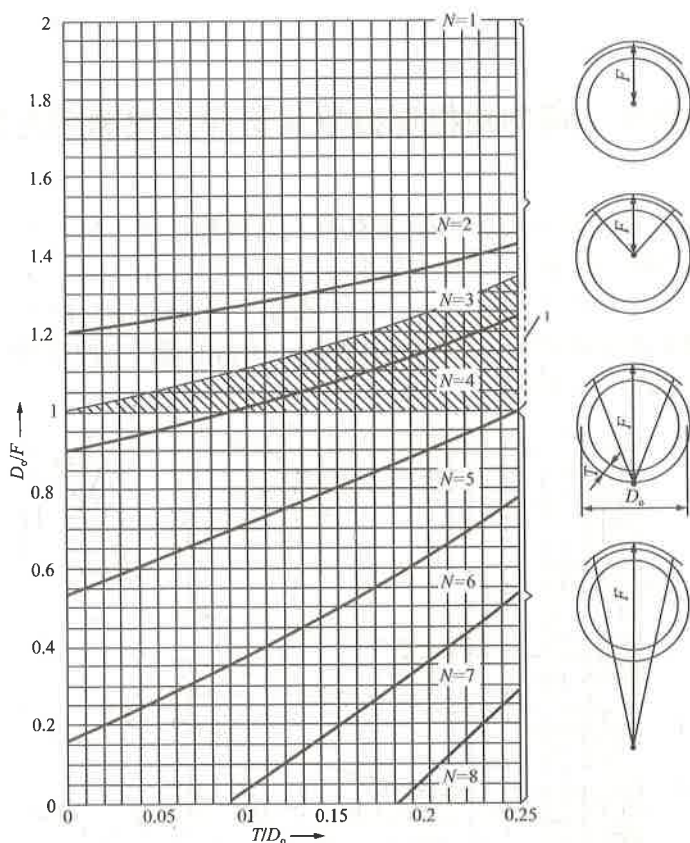


图 C.0.1-2 偏心内透法和双壁单影法，透照厚度比  $K=1.2$  时的透照次数

**C.0.2** 应按照下列步骤确定透照次数：计算出  $T/D_0$ 、 $D_0/F$ ，在横坐标上找到  $T/D_0$  值对应的点，过此点画一垂直于横坐标的垂线；在纵坐标上找到  $D_0/F$  对应的点，过此点画一垂直于纵坐标的直线。从两直线交点所在的区域确定所需的透照次数；当交点在两区域的分界线上时，应取较大数值作为所需的最少透照次数。

## 附录 D 检测报告格式

**D.0.1** 管道焊缝射线检测报告宜符合表 D.0.1-1 和表 D.0.1-2 的格式。

**表 D.0.1-1 管道焊缝射线检测报告**

单位工程名称					工程编号		
报告编号	共 页 第 页			施工单位			
检测日期				桩号 / 线位号			
规格	mm			材质			
焊接方法	坡口型式			设备型号			
源的种类	<input type="checkbox"/> X 射线 <input type="checkbox"/> Ir192 <input type="checkbox"/> Se75			焦点尺寸	mm		
胶片牌号				铅增感屏	前屏: mm ; 后屏: mm		
胶片规格	mm			显影剂型号 / 配方			
胶片处理	<input type="checkbox"/> 自动 <input type="checkbox"/> 手工			显影时间	min		
像质计型号				显影温度	℃		
像质计位置	<input type="checkbox"/> 源侧 <input type="checkbox"/> 胶片侧		要求像质指数			管电压	kV
管电流	mA		源强	Ci			

续表 D.0.1-1

焦距	mm		曝光时间	min	
透照方式	<input type="checkbox"/> 单壁单影内透法 <input type="checkbox"/> 双壁单影法 <input type="checkbox"/> 双壁双影法				
检测标准		合格级别		底片黑度范围	
检测数量	道口	返修数量	道口	一次合格率	%
检测部位示意图					
结论：					
评定人员： 级别： 年 月 日	审核人员： 级别： 年 月 日	检测单位（盖章） 年 月 日		监理（签字）： 年 月 日	

表 D.0.1-2 管道焊缝射线检测报告 (附页)

单位工程名称					工程编号			
报告编号		共 页 第 页			施工单位			
检测日期					桩号 / 线位号			
序号	焊缝编号	规格尺寸 (mm)	一次透照长度 (mm)	像质指数	黑度 $D$	缺欠位置、性质及长度 (mm)	评定级别	
评定人员： 级别： 年 月 日		审核人员： 级别： 年 月 日			监理 (签字)： 级别： 年 月 日			

D.0.2 管道焊缝 X 射线数字成像检测报告应符合表 D.0.2-1 和表 D.0.2-2 的格式。

表 D.0.2-1 管道焊缝 X 射线数字成像检测报告

单位工程名称				工程编号	
报告编号		共 页 第 页		施工单位	
检测日期			桩号/线位号		
规格	mm		材质		
焊接方法		坡口型式		设备型号	
探测器型号			像素尺寸	mm	
探测器规格			探测器位数		
X 射线机型号		焦点尺寸	mm	滤波板	
管电压	kV	管电流	mA	曝光时间	min
焦距	mm	透照长度	mm	尺寸标定	
线型 像质计型号		线型 像质计指数		线型 像质计位置	<input type="checkbox"/> 源侧 <input type="checkbox"/> 探测器侧
双线型 像质计型号		双线型 像质计指数		双线型 像质计位置	<input type="checkbox"/> 源侧 <input type="checkbox"/> 中心 <input type="checkbox"/> 探测器侧 <input type="checkbox"/> 边缘
透照方式	<input type="checkbox"/> 单壁单影内透法 <input type="checkbox"/> 双壁单影法 <input type="checkbox"/> 双壁双影法				
放大倍数		灰度值范围		特殊图像处理	
检测标准		合格级别		归一化信噪比	
检测数量	道口	返修数量	道口	一次合格率	%
检测部位示意图					
结论：					
评定人员： 级别： 年 月 日	审核人员： 级别： 年 月 日	检测单位（盖章） 年 月 日		监理（签字）： 年 月 日	



**D.0.3 管道焊缝 X 射线计算机辅助成像检测报告**宜符合表 D.0.3-1 和表 D.0.3-2 的格式。

**表 D.0.3-1 管道焊缝 X 射线计算机辅助成像检测**

单位工程名称				工程编号	
报告编号		共 页 第 页		承包单位	
检测日期				桩号 / 线位号	
工件名称		规格		材质	
坡口型式		焊接工艺		热处理状态	
扫描仪型号		软件版本		制造商	
IP 板型号		扫描精度		A/D 转换位数	
射线机型号		焦点尺寸		固有滤波	
管电压		管电流		曝光时间	
几何条件		透照长度		尺寸标定	
检测时机		检测比例		附加滤波	
线型 像质计型号		线型 像质计指数		线型 像质计位置	<input type="checkbox"/> 源侧 <input type="checkbox"/> 探测器侧
双线型 像质计型号		双线型 像质计丝号		双线型 像质计位置	<input type="checkbox"/> 源侧 <input type="checkbox"/> 中心 <input type="checkbox"/> 探测器侧 <input type="checkbox"/> 边缘
透照方式	<input type="checkbox"/> 中心透照 <input type="checkbox"/> 双壁单影透照 <input type="checkbox"/> 双壁双影倾斜透照 <input type="checkbox"/> 双壁双影垂直透照				
灰度值范围		窗宽窗位		特殊图像处理	
检测标准		合格级别		归一化信噪比	
检测数量	道口	返修数量	道口	一次合格率	%
检测部位示意图					
结论：					
评定人员： 级别：	审核人员： 级别：	检测单位（盖章）		监理（签字）：	
年 月 日	年 月 日	年 月 日		年 月 日	

表 D.0.3-2 管道焊缝 X 射线计算机辅助成像检测 (附页)

单位工程名称							工程编号		
报告编号		共 页 第 页			承包单位				
检测日期							桩号 / 线位号		
序号	焊接接头编号	焊工号	像质指数	缺陷类型	缺陷定量	缺陷位置	评定级别	备注	
评定人员： 级别： 年 月 日			审核人员： 级别： 年 月 日			监理 (签字)： 年 月 日			

**D.0.4** 管道焊缝超声检测报告宜符合表 D.0.4-1 和表 D.0.4-2 的格式。

**表 D.0.4-1 管道焊缝超声检测报告**

单位工程名称				工程编号	
报告编号		共 页 第 页		施工单位	
检测日期			桩号 / 线位号		
规格	mm		材质		
板厚	mm		坡口型式		
焊接方法			检测部位		
表面状态			检测时间		
检测标准			合格级别		
设备型号			检测面		
探头型号	频率： MHz；晶片尺寸： mm，K 值： ；前沿距离： mm				
试块类型		扫查方式		扫描比例	
扫查灵敏度	$\phi 2\text{mm}-\text{dB}$	表面补偿		dB	检测方法
耦合剂	<input type="checkbox"/> 洗涤剂 <input type="checkbox"/> 浆糊 <input type="checkbox"/> 机油 <input type="checkbox"/> 甘油				
检测数量	道口	返修数量	道口	一次合格率	%
检测部位示意图					
结论：					
检测人员： 级别：	审核人员： 级别：		检测单位（盖章）	监理（签字）：	
年 月 日	年 月 日		年 月 日	年 月 日	



**D.0.5** 管道焊缝相控阵超声检测报告宜符合表 D.0.5-1 和表 D.0.5-2 的格式。

**表 D.0.5-1 管道焊缝相控阵超声检测报告**

单位工程名称				工程编号		
报告编号		共 页 第 页	施工单位			
检测日期				桩号		
规格	mm			材质		
坡口型式				表面状态		
焊接方法				检测标准		
合格级别				检测区域		
设备型号				试块类型		
相控阵探头型号		相控阵楔块型号		晶片间距		
TOFD探头型号		TOFD楔块型号		扫描方式	<input type="checkbox"/> 直射 <input type="checkbox"/> 一次反射	
实测声速		激发晶片数		起始晶片		
扫描类型	<input type="checkbox"/> S扫 <input type="checkbox"/> E扫	扫描步进		灵敏度校准	<input type="checkbox"/> TCG <input type="checkbox"/> ACG	
角度范围		角度步进		检测温度		
检测灵敏度						
耦合剂	<input type="checkbox"/> 水 <input type="checkbox"/> 乙醇 <input type="checkbox"/> 防冻液					
检测数量	道口	返修数量	道口	一次合格率	%	
示意图：						
结论：						
检测人： 级别：	审核人： 级别：	检测单位 (盖章)		监理(签字)：		
年 月 日	年 月 日	年 月 日		年 月 日		



**D.0.6** 管道焊缝磁粉检测报告宜符合表 D.0.6-1 和表 D.0.6-2 的格式。

**表 D.0.6-1 磁粉检测报告**

单位工程名称				工程编号		
报告编号			共 页 第 页	施工单位		
检测日期				桩号 / 线位号		
规格	mm		材质			
受检部位				检测时机		
表面状态				检测标准		
仪器型号				黑光灯型号		
磁极间距	mm		提升力	N		
通电时间	s		灵敏度试片			
磁化电流	A		磁粉施加方法			
磁粉	型号:	浓度: mL/100m	<input type="checkbox"/> 荧光 <input type="checkbox"/> 非荧光 <input type="checkbox"/> 湿法 (水悬液)			
检测数量	道口	返修数量	道口	一次合格率	%	
检测部位示意图						
结论:						
检测人员: 级别:	审核人员: 级别:	检测单位 (盖章)		监理 (签字):		
年 月 日	年 月 日	年 月 日		年 月 日		

表 D.0.6-2 磁粉检测报告 (附页)

单位工程名称					工程编号		
报告编号		共 页 第 页			施工单位		
检测日期					桩号 / 线位号		
序号	焊缝编号	检测长度 (mm)	缺欠记录			评定结果	备注
			位置 (mm)	缺欠类型	长度 (mm)		
检测人员： 级别： 年 月 日		审核人员： 级别： 年 月 日			监理（签字）： 年 月 日		

**D.0.7 管道焊缝渗透检测报告**宜符合表 D.0.7-1 和表 D.0.7-2 的格式。

**表 D.0.7-1 渗透检测报告**

单位工程名称			工程编号		
报告编号			共 页 第 页		
施工单位			检测日期		
桩号 / 线位号			规格		
工件温度	℃		受检部位		
检测时机			表面状态		
检测标准			试块		
清洗剂		渗透剂		显像剂	
渗透剂施加方法			显像剂施加方法		
渗透时间	min		显像时间	min	
检测数量	道口	返修数量	道口	一次合格率	%
检测部位示意图					
结论：					
检测人员： 级 别：	审核人员： 级 别：	检测单位（盖章）		监理（签字）：	
年 月 日	年 月 日	年 月 日		年 月 日	

表 D.0.7-2 渗透检测报告 (附页)

单位工程名称				工程编号			
报告编号		共 页 第 页		施工单位			
检测日期				桩号 / 线位号			
序号	焊缝编号	检测长度 (mm)	缺欠记录			评定结果	备注
			位置 (mm)	缺欠类型	长度 (mm)		
检测人员： 级别： 年 月 日		审核人员： 级别： 年 月 日		监理（签字）： 年 月 日			

## 附录 E 双线型像质计

**E.0.1** 应采用双线型像质计测定射线数字成像检测系统的空间分辨率。

**E.0.2** 双线型像质计由放置于刚性透明塑料盒中的 13 个线对组成，每个线对包含两条圆形截面的线。D1 ~ D3 号丝采用钨制作，其他采用铂制作。双线型像质计样式和尺寸应符合图 E.0.2 的规定，线对编号对应的空间分辨率和线径应符合表 E.0.2 的规定。

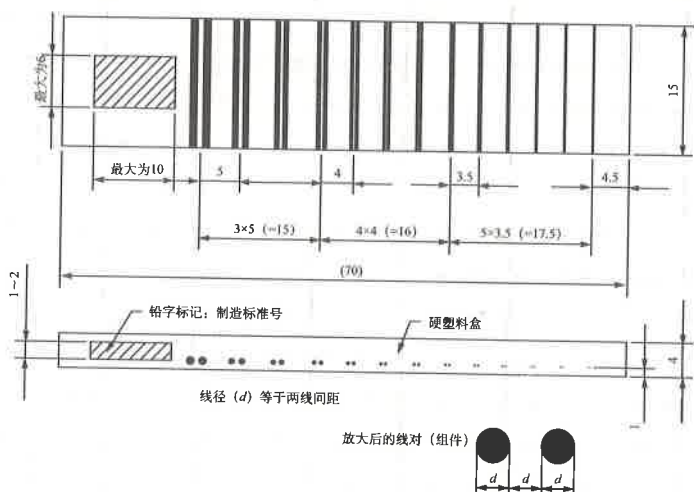


图 E.0.2 双线型像质计

**.0.3** 双线型像质计应有用铅字标识的制造标准号。

**.0.4** 对每个双线型像质计，制造商都应提供其合格证明书。

表 E.0.2 线对编号对应的空间分辨率和线径

线对编号	对应的空间分辨率 (lp/mm)	线径和间距 (mm)	线径和间距的误差 (mm)
D13	10	0.050	±0.005
D12	7.7	0.063	
D11	6.25	0.080	
D10	5	0.100	
D9	3.85	0.130	
D8	3.125	0.160	±0.01
D7	2.5	0.200	
D6	2	0.250	
D5	1.56	0.320	
D4	1.25	0.400	
D3	1.00	0.500	±0.02
D2	0.794	0.630	
D1	0.625	0.800	

注：D 代表双线。

## 附录 F 射线数字成像检测系统分辨率测定

### F.1 测定方法

- F.1.1** 应采用双线型像质计对系统分辨率进行测定。
- F.1.2** 应将双线型像质计紧贴在探测器输入屏表面中心区域，与探测器的行或列成  $2^\circ \sim 5^\circ$  角放置。
- F.1.3** 射线机焦点至探测器接收面的距离不应小于  $(1000 \pm 50)$  mm，并应保证垂直透照。
- F.1.4** 射线机管电压值的选择应符合下列规定：
- 1 透照厚度  $W$  小于或等于 20mm，则采用 1mm Cu 滤波，管电压为 160kV。
  - 2 透照厚度  $W$  大于 20mm，则采用 2mm Cu 滤波，管电压为 220kV。
- F.1.5** 应在探测器校正的基础上对双线型像质计进行透照，并选择合适的曝光量使获得的双线型像质计图像灰度值在整个灰度范围的 50% ~ 80%，且具有较高的信噪比。

### F.2 识别方法

- F.2.1** 双线型像质计的灰度值测量和识别应在图像上灰度均匀的区域内进行。
- F.2.2** 对图像测量时可采用多帧叠加降噪及窗宽窗位调整，不得采用锐化等其他数字图像处理方法。双线型像质计透照图像和图像灰度值测量如图 F.2.2-1 和图 F.2.2-2 所示)。



图 F.2.2-1 双线型像质计透照图像

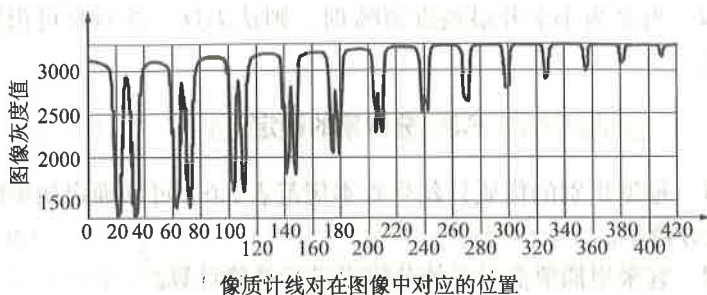


图 F.2.2-2 双线型像质计图像灰度值测量

**F.2.3** 应按图 F.2.3 的规定测量双线型像质计灰度平均值 (测量区域宽度不应少于 21 个像素), 双线型像质计线对的可识别率  $R$  应按下式计算:

$$\dot{R} = \frac{A+B-2C}{A+B} \times 100\% \quad (\text{F.2.3})$$

式中  $R$ ——双线型像质计线对的可识别率;

$A$ ——双线中一条线对应各像素的最小灰度的平均值;

$B$ ——双线中另一条线对应各像素的最小灰度的平均值;

$C$ ——双线之间各像素最高灰度值的平均值。

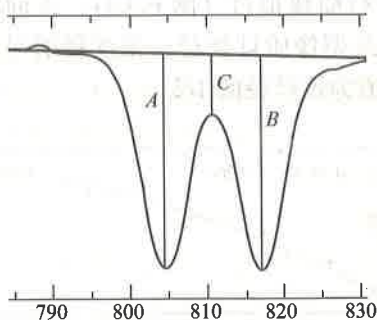


图 F.2.3 双线型像质计可识别率

$A$ ——双线中一条线对应各像素的最小灰度的平均值;

$B$ ——双线中另一条线对应各像素的最小灰度的平均值;

$C$ ——双线之间各像素最高灰度值的平均值

**F.2.4** 当  $R$  为小于并最接近 20% 时，则认为这一线对是可识别线对。

### F.3 分辨率的确定

**F.3.1** 根据识别的像质计丝号查本规范表 5.6.2 可以确定初步的系统分辨率。

**F.3.2** 宜采用插值法对系统分辨率进行精确计算。

**F.3.3** 按照本规范第 F.2.3 条的方法计算出可识别率在 20% 左右的邻近所有线对的可识别率 (图 F.3.3)。

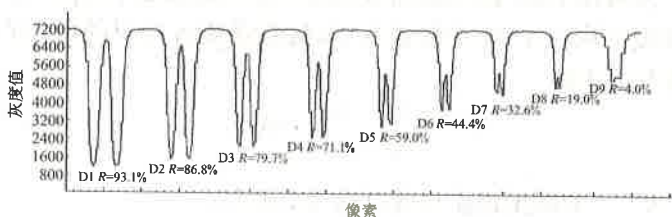


图 F.3.3 线对的可识别率  $R$  的计算

**F.3.4** 采用二阶多项式将双线型像质计丝径与计算出的对应的可识别率  $R$  进行曲线拟合 (图 F.3.4)。查询图中可识别率为 20% 所对应的双线型像质计丝径，该丝径所对应的分辨率即为系统分辨率，其值为该丝径的 1/2。

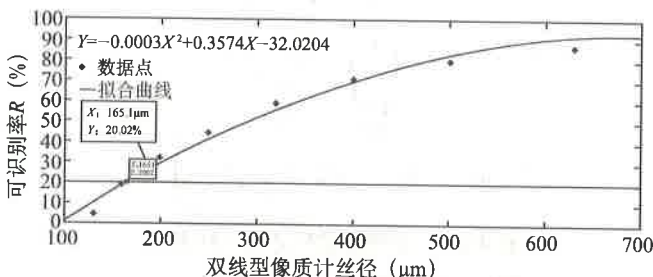


图 F.3.4 线对的可识别率  $R$  的多项式拟合图

## 附录 G 平面成像最少透照次数的确定方法

**G.0.1** 对外径  $D_0$  大于 100mm 的环向对接焊接接头, 采用中心透照或双壁单影法进行平面成像检测, 所需的最少透照次数应符合下列规定:

1  $K$  应小于或等于 1.1。

2 图像不清晰度  $U_{im}$  符合本规范表 5.6.2 的规定。

**G.0.2** 应根据检测系统最佳几何放大比计算所能获得的最小图像总不清晰度, 最佳几何放大比应按下式计算, 其对应的图像总不清晰度应按本规范式 (5.6.2) 计算。通过与被检工件所规定的图像总不清晰度对比, 可判断该检测系统是否符合检测技术规定。若不符合规定, 应更换更小焦点尺寸 X 射线机或更小像素尺寸探测器。

$$M_{opt}=1+(U_c/d)^{3/2} \quad (G.0.2)$$

式中  $M_{opt}$ ——最佳几何放大比;

$U_c$ ——系统固有不清晰度, 等于 2 倍的探测器像素尺寸, 也可按本规范附录 F 测定 (mm);

$d$ ——焦点尺寸 (mm)。

**G.0.3** 在检测系统符合检测技术规定下, 宜采用计算机程序根据本规范式 (5.6.2) 绘制几何放大比  $M$  大于或等于 1 时, 图像不清晰度  $U_{im}$  与几何放大比  $M$  的函数关系图, 通过查询该图来确定几何放大比  $M$  允许的取值范围  $[M_{pmin}, M_{pmax}]$ 。函数关系图 (图 G.0.3) 中,  $M_{pmin}$  与  $M_{pmax}$  为图虚线与曲线的交点, 虚线对应值为被检工件图像总不清晰度规定。

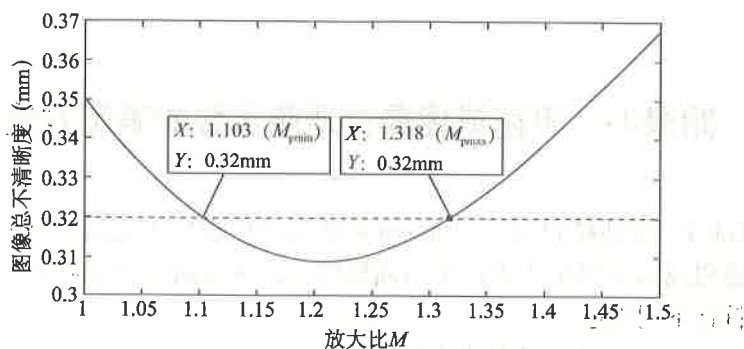


图 G.0.3 函数关系图示例

**G.0.4** 采用中心透照平面成像几何布置 (图 G.0.4) 时, 可按下列步骤确定最少透照次数:

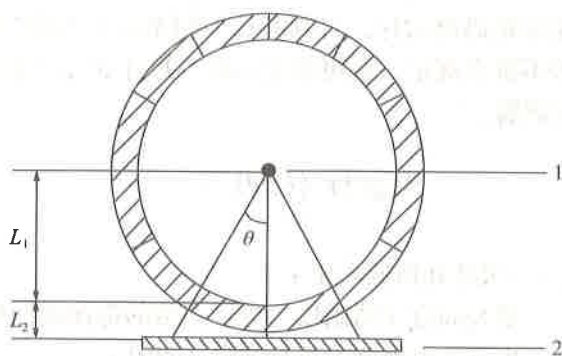


图 G.0.4 中心透照平面成像几何布置

1—X 射线机焦点 (位于管道中心); 2—探测器;  $\theta$ —半检测角

1 应选择合适的  $L_2$  使实际几何放大比最小值大于或等于最小允许值, 即  $M_{\min} \geq M_{p\min}$ ,  $M_{\min}$  按本规范式 (5.6.3-3) 计算。

2 最大允许的半检测角  $\theta$  应按下列式计算:

$$\theta = \arccos \frac{r + L_2}{r \cdot M_{p\max}} \quad (\text{G.0.4})$$

式中  $M_{pmax}$ ——几何放大比最大允许值；

$r$ ——管道内半径 (mm)；

$L_2$ ——沿中心射线束方向，透照部位源侧表面到探测器接收面的距离 (mm)；

$\theta$ ——半检测角。

3 最少透照次数  $N$  应取大于或等于  $180/\theta$  的最小整数值。

**G.0.5** 采用双壁单影透照平面成像时，透照布置如图 G.0.5 所示，可按下列步骤确定最少透照次数：

1 应选择  $L_1$  与  $L_2$  使实际几何放大比最小值大于或等于最小允许值，即  $M_{min} \geq M_{pmin}$ ， $M_{min}$  按本规范式 (5.6.3-3) 计算。

2 最大允许的内半检测角  $\beta$  应符合下式规定：

$$\frac{L_1 + L_2}{L_1 + r \cdot \cos\beta - r} = M_{pmax} \quad (\text{G.0.5-1})$$

式中  $M_{pmax}$ ——几何放大比最大允许值；

$r$ ——钢管内半径 (mm)；

$L_1$ ——沿中心射线束方向，X 射线机焦点到透照部位源侧表面的距离 (mm)；

$L_2$ ——沿中心射线束方向，透照部位源侧表面到探测器接收面的距离 (mm)；

$\beta$ ——内半检测角。

3 最大允许的半检测角  $\theta$  应符合下式规定：

$$\frac{R \cdot \sin\theta}{L_1 + R \cdot \cos\theta - r} = \frac{r \cdot \sin\beta}{L_1 + r \cdot \cos\beta - r} \quad (\text{G.0.5-2})$$

式中  $r$ ——钢管内半径 (mm)；

$R$ ——钢管外半径， $R=r+T$  (mm)， $T$  为母材厚度；

$L_1$ ——沿中心射线束方向，X 射线机焦点到透照部位源侧表面的距离 (mm)；

$\theta$ ——半检测角。

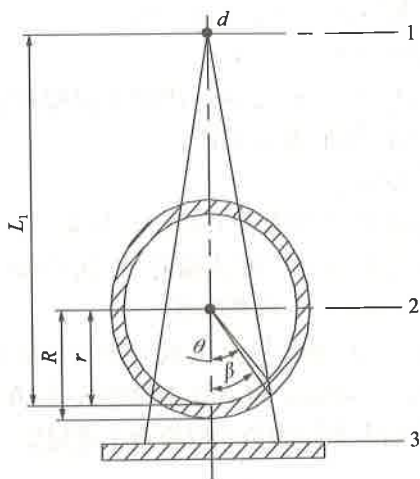


图 G.0.5 双壁单影透照平面成像几何布置

1—X 射线机焦点位置；2—管道中心位置；3—探测器；

$\theta$ —半检测角； $\beta$ —内半检测角

4 最少透照次数  $N$  应取大于或等于  $180/\theta$  的最小整数值。

5 将  $N$  与按本规范附录 C 所查得的最少透照次数值相比较，取较大值作为双壁单影透照平面成像法最终的最少透照次数。

## 附录 H X 射线计算机辅助成像检测系统空间分辨率的测定

### H.1 双线型像质计的放置

**H.1.1** 空间分辨率应当在垂直和平行于激光扫描的两个方向上测量，将其中的较大值作为空间分辨率  $SR_b$  值。

**H.1.2** 双线型像质计应与像素行或列呈  $2^\circ \sim 5^\circ$  的倾角，以避免混叠的影响（图 H.1.2）。



图 H.1.2 数字图像中双线型像质计的图像

### H.2 空间分辨率测试条件

**H.2.1** 将双线型像质计直接放置在 IP 上，射线源到成像板的距离应为  $1000\text{mm} \pm 50\text{mm}$ 。检测参数应符合下列规定：

1 透照厚度小于或等于  $20\text{mm}$  的钢焊接接头时，管电压  $160\text{kV}$ ，采用  $1\text{mm}$  Cu 前置滤波器。

2 透照厚度大于  $20\text{mm}$  的钢焊接接头时，管电压  $220\text{kV}$ ，采用  $2\text{mm}$  Cu 前置滤波器。

**H.2.2** 数字图像的平均灰度应大于最大灰度的  $50\%$ 。对于像素尺寸大于或等于  $80\mu\text{m}$  的标准系统， $SNR$  应大于  $100$ 。对于像素

尺寸小于  $80\mu\text{m}$  的高分辨率系统,  $\text{SNR}$  应大于 70。

### H.3 数字图像分辨率测试条件

**H.3.1** 将双线型像质计放在被检工件射线源侧表面, 透照条件与实际检测条件一致, 数字图像的归一化信噪比规定参见本规范表 6.11.8。

**H.3.2** 使用双线型像质计可确定数字图像的固有不清晰度  $u_i$ , 按下式计算出系统的空间分辨率  $\text{SRb}$  :

$$\text{SRb} = u_i / 2 \quad (\text{H.3.2})$$

**H.3.3** 若肉眼不能明确地分辨出第一组不清晰的线对, 可采用 20% 下沉法, 应使用不少于 21 行像素叠加平均, 如图 H.3.3-1 和图 H.3.3-2 所示, 按下式计算出下沉小于 20% 的第一个线对, 如图 H.3.3-3 所示。数字图像中第一组达到下沉值与两波峰值之比小于 20% 的线对, 即为双线型像质计的测试结果, 如图 H.3.3-2 所示的 D8。

$$\text{dip}(\%) = 100 \times (A + B - 2C) / (A + B) \quad (\text{H.3.3})$$

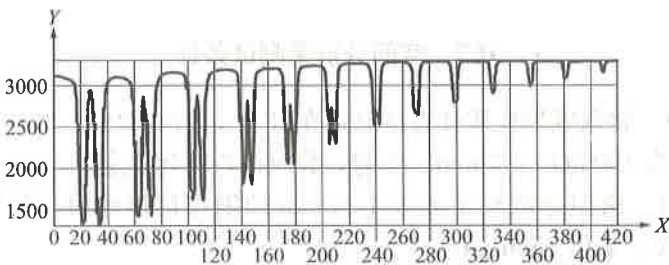


图 H.3.3-1 双线型像质计轮廓 (不少于 21 次测量平均得到)

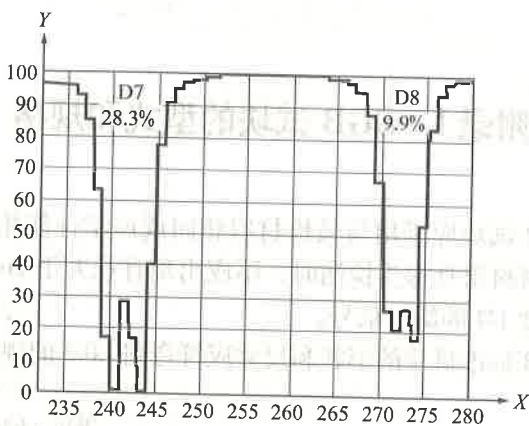


图 H.3.3-2 线对 D7 和 D8 的放大轮廓图

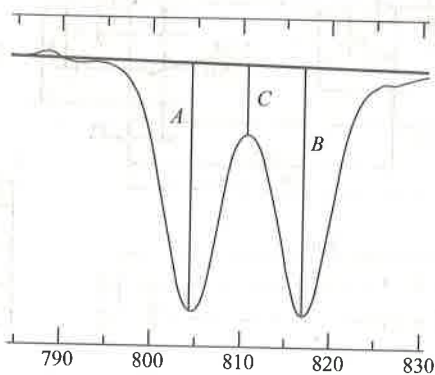


图 H.3.3-3 下沉值计算图表 (%)

## 附录 I SGB 试块的型式和规格

**I.0.1** SGB 试块应采用与被检材料相同或声学性能相近的钢材制成。其材料用直探头检测时，不应出现直径大于 2mm 的平底孔回波幅度 1/4 的缺欠信号。

**I.0.2** SGB 标准试块的形状和尺寸应符合图 I.0.2 的规定。

单位：mm

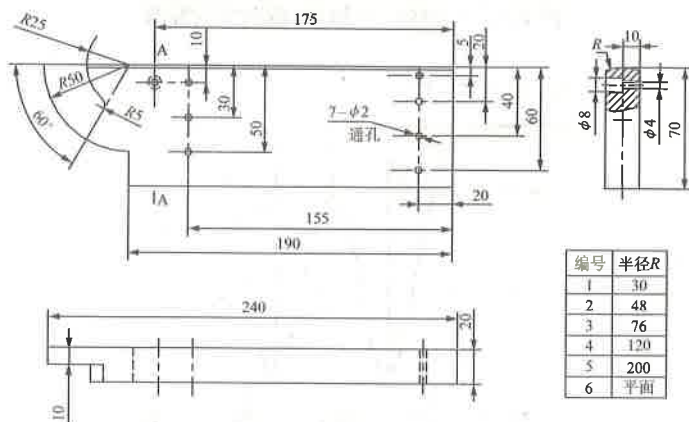


图 I.0.2 SGB 标准试块形状与尺寸

**I.0.3** SGB 标准试块表面粗糙度  $R_a$  应小于或等于 3.2，试块制作尺寸误差应小于 0.1mm，圆弧角度误差小于  $0.5^\circ$ 。

**I.0.4** 根据不同曲率的被检管件，制作 SGB 试块。每种 SGB 试块的适用管径范围应符合表 I.0.4 的规定。

表 I.0.4 SGB 试块适用范围表

编号	弧面半径 (mm)	适用管外径范围 $\phi$ (mm)
SGB-1	30	57 ~ 89
SGB-2	48	> 89 ~ 140
SGB-3	76	> 140 ~ 210
SGB-4	120	> 210 ~ 360
SGB-5	200	> 360 ~ 500
SGB-6	平面	> 500

## 附录 J 表面声能损失差的测定

**J.0.1** 应制作与工件同材质、同曲率、同壁厚且表面粗糙度与 SGB 试块曲面部分粗糙度相同的曲面试块。

**J.0.2** 应用两个同型号的探头置于曲面试块的凸表面上，做一发一收探测，探头间距约为实际检验时探头至焊接接头截面中心距离的两倍（图 J.0.2）。找到接收波的最大波幅，调节衰减器，使波高为满刻度的 60%。

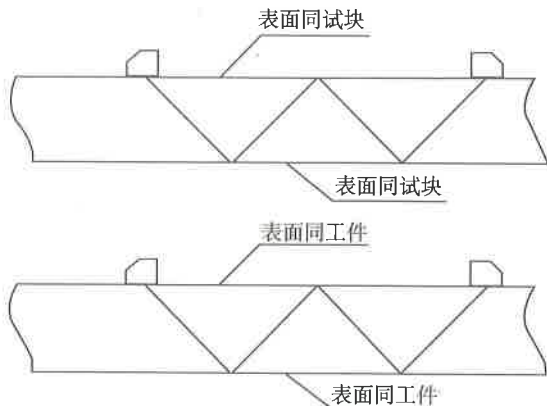


图 J.0.2 表面声能损失差的测定

**J.0.3** 保证灵敏度不变的情况，应用同样的方法使斜探头置于工件上，不通过焊接接头做一发一收探测，仅调节衰减器，使波高仍为满刻度的 60%。衰减器的两次读数差，即为表面声能损失差。

# 附录 K A 型脉冲反射式超声探伤系统工作性能测试方法

## K.1 测试用设备与试块

- 1.1 检测用超声波仪。
- 1.2 SGB 系列试块。
- 1.3 检测用探头及一个直探头。

## K.2 垂直线性测试方法

- 2.1 调节超声波设备抑制为 0，增益保留 30dB 的余量。
- 2.2 将直探头透过耦合剂置于 SGB（或其他试块）上，对准 mm 厚度底面，并用压块恒定压力。
- 2.3 调节仪器使试块上某次底波位于示波屏的中间，并达到幅 100%，但不饱和，作为“0” dB。
- 2.4 调节增益，每次降低 2dB，每次调节后用满刻度的百直记下回波幅度，一直继续到降低值为 26dB，测量精度为 %。测试值与波高理论值之差为偏差值，取最大正偏差  $d(+)$  最大负偏差  $d(-)$  的绝对值之和为垂直线性误差  $\Delta d$ （以百直计），偏差值  $\Delta d$  应按下式计算：

$$\Delta d = |d(+)| + |d(-)| \quad (\text{K.2.4})$$

## K.3 水平线性测试方法

- 1 将探头压在 SGB 试块上，对准 20mm 厚度的大平底。中适当的耦合剂，以保持稳定的声耦合。

**K.3.2** 调节声程按钮，使示波屏上出现五次底波  $B_1$  与  $B_5$ ，且使  $B_1$  对准 2.0， $B_5$  对准 10.0（图 K.3.2）。

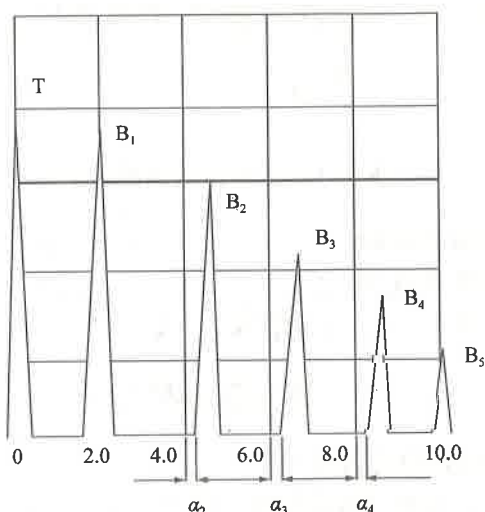


图 K.3.2 水平线性测试

**K.3.3** 观察和记录  $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  与水平刻度值 4.0、6.0、8.0 的偏差值  $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 。

**K.3.4** 水平线性误差应按下式计算：

$$\Delta L = \frac{|\alpha_{\max}|}{0.8b} \times 100\% \quad (\text{K.3.4})$$

式中  $\alpha_{\max}$ —— $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$  中最大者；  
 $b$ ——示波屏水平满刻度值。

#### K.4 斜探头入射点及前沿距离的测定

**K.4.1** 采用 SGB 试块上  $R25$  和  $R50$  圆弧测定斜探头入射点和前沿距离。

**K.4.2** 将探头置于 SGB 基准试块的位置 1（图 K.4.2），前后移

动探头，向  $R25$ ， $R50$  圆弧发射超声波，直到这两个面的回波幅度最大。此时与 SGB 试块侧面圆弧中心线对应的探头位置为探头入射点，入射点到探头前端的距离为前沿距离。用刻度尺测出前沿距离，读数应精确到  $0.5\text{mm}$ 。

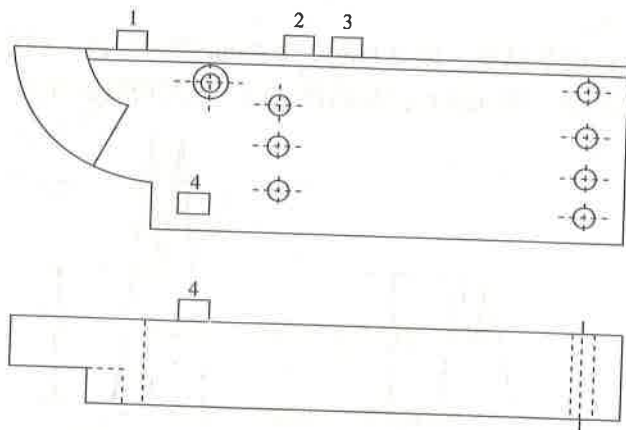


图 K.4.2 斜探头参数测定示意图

### K.5 斜探头折射角的测定

**K.5.1** 如本规范图 K.4.2 所示，将探头置于 SGB 基准试块的位置 3，前后移动探头，观察深度为  $30\text{mm}$  的  $\phi 2\text{mm}$  横通孔回波为最高，固定探头位置，测出入射点到  $\phi 2\text{mm}$  孔中心的水平距离  $L$ 。

**K.5.2** 折射角  $\beta$  应按下式计算：

$$\beta = \arctan\left(\frac{L}{h}\right) \quad (\text{K.5.2})$$

式中  $L$ ——入射点到  $\phi 2\text{mm}$  孔中心的水平距离 (mm)；  
 $h$ —— $\phi 2\text{mm}$  孔中心与探测面的垂直距离 (mm)；  
 $\beta$ ——斜探头折射角 ( $^{\circ}$ )。

## K.6 仪器与斜探头分辨力的测定

**K.6.1** 如本规范图 K.4.2 所示，将探头置于 SGB 基本试块的位置 2 上，前后移动探头，适当调整增益，使  $\phi 8\text{mm}$ ， $\phi 4\text{mm}$  两孔反射波高  $h$  相同，均为满幅度的 30% ~ 40%，记下此时的增益读数  $D_1$ 。

**K.6.2** 再调节增益，使  $\phi 8\text{mm}$ ， $\phi 4\text{mm}$  两反射波之间的波谷上升到图 K.6.2 所示的原波峰高度，记下此时增益读数  $D_2$ 。

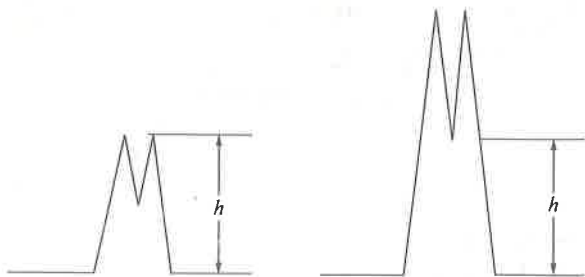


图 K.6.2 斜探头分辨力测定时荧光屏上的波形

**K.6.3** 增益的两次读数差  $D_2 - D_1$  (dB) 为仪器和探头组合分辨力。

## K.7 斜探头主声束偏离角的测定

**K.7.1** 按本规范图 K.4.2 将探头置于 SGB 基准试块的位置 4，探测试块上对应的棱边。

**K.7.2** 前后、左右移动探头，使所测棱边反射波达到最大值，固定探头，沿探头侧面在试块上划一条直线。

**K.7.3** 用量角器测量出上述直线与试块所测棱边法线的夹角  $\theta$ ，即主声束偏离角。

## K.8 斜探头主声束双峰的测定

**K.8.1** 在 SGB 试块上，将探头置于本规范图 K.4.2 的 2 或 3 的

位置，探测  $\phi 2\text{mm} \times 20\text{mm}$  横通孔，保持主声束与试块侧面平行，使横通孔反射波达到最高值，并在其位置附近前后移动探头，观察动态波形变化情况。当荧光屏上出现图 K.8.1 (a) 所示波形时，表明探头无双峰。当荧光屏上出现图 K.8.1 (b) 所示波形时，说明该探头具有双峰。

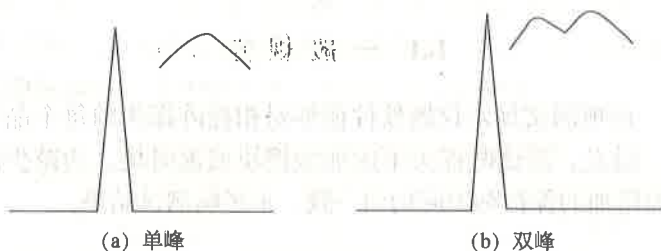


图 K.8.1 斜探头双峰测定示意图

### K.9 灵敏度余量的测定

**K.9.1** 抑制调至“0”，连接探头并悬空，调节增益，使电噪声电平降至 10%，此时的增益值为  $N_1$ 。

**K.9.2** 将探头置于 SGB 试块本规范图 K.4.2 的 1 位置，记下 R50 圆弧面的第一次反射波高为 50% 时的增益值  $N_2$ 。则仪器与斜探头的灵敏度余量应按下列公式计算：

$$N = N_2 - N_1 \quad (\text{K.9.2})$$

式中  $N$ ——灵敏度余量 (dB)；  
 $N_1$ ——电噪声降至 10% 时的增益值 (dB)；  
 $N_2$ ——R50 圆弧面反射波高为 50% 时的增益值 (dB)。

## 附录 L 相控阵探头晶片灵敏度差异 与有效性测试

### L.1 一般规定

**L.1.1** 该项测试规定仪器软件能够对相控阵探头的每个晶片进行逐一激发。测试时探头不应加装楔块或延时块。为减少晶片磨损而附加的保护贴膜应均匀一致，不影响测试结果。

### L.2 测试方法

**L.2.1** 将相控阵探头均匀稳定地耦合在 CSK-Ⅱ A-1 试块 40mm 厚度（或等效试块）表面，单独激发第一个晶片，得到 40mm 大平底回波。

**L.2.2** 调节增益值使 40mm 的底面回波达到 80% 满屏高度，记录此时的增益值。

**L.2.3** 单独激发下一个晶片，并重复本规范第 L.2.2 条，直至最后一个晶片。

**L.2.4** 未见底面回波信号或得到回波信号的信噪比小于 12dB 时，该晶片被认定为坏晶片。

**L.2.5** 若测试结果各晶片记录的最大与最小增益值之差大于或等于 4dB，应在确认耦合一致性及稳定性后，重复本规范第 L.2.1 条至第 L.2.3 条对测试结果进行复核。

## 附录 M SGB-PA 试块型式和规格

M.0.1 SGB-PA 试块分为 SGB-PA-A 系列试块和 SGB-PA-B 系列试块，分别适用于不同的管径范围。SGB-PA 试块的适用管径范围应符合表 M.0.1-1、表 M.0.1-2 的规定。

表 M.0.1-1 SGB-PA-A 试块适用范围表

编号	曲率半径 (mm)	适用管外径范围 (mm)
SGB-PA-A-1	12	20 ~ 27
SGB-PA-A-2	15	27 ~ 32
SGB-PA-A-3	18	32 ~ 40
SGB-PA-A-4	22	40 ~ 48
SGB-PA-A-5	26	48 ~ 57
SGB-PA-A-6	32	57 ~ 72
SGB-PA-A-7	40	72 ~ 90
SGB-PA-A-8	50	90 ~ 110

表 M.0.1-2 SGB-PA-B 试块适用范围表

编号	曲率半径 (mm)	适用管外径范围 (mm)
SGB-PA-B-1	60	110 ~ 132
SGB-PA-B-2	72	132 ~ 159
SGB-PA-B-3	84	159 ~ 219
SGB-PA-B-4	136	219 ~ 323
SGB-PA-B-5	203	323 ~ 508
SGB-PA-B-6	平面	508 ~ 平面

**M.0.2** SGB-PA 试块应采用与被检材料相同或声学性能相近的钢材制成，其材料用直探头检测时，不应出现大于直径 2mm 的平底孔回波幅度 1/4 的缺欠信号。

**M.0.3** SGB-PA 试块的形状和尺寸见图 M.0.3-1 和图 M.0.3-2 的规定。

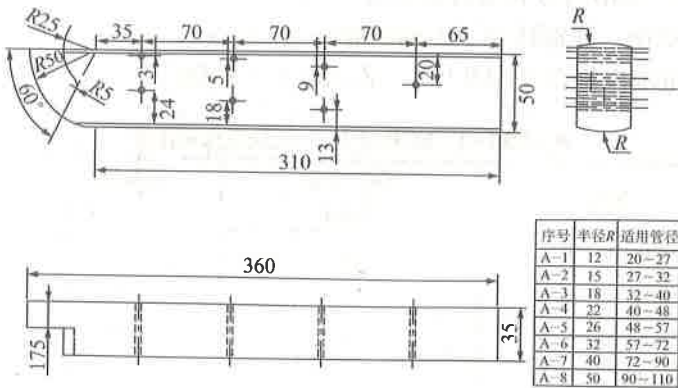


图 M.0.3-1 SGB-PA-A 试块形状与尺寸 (mm)

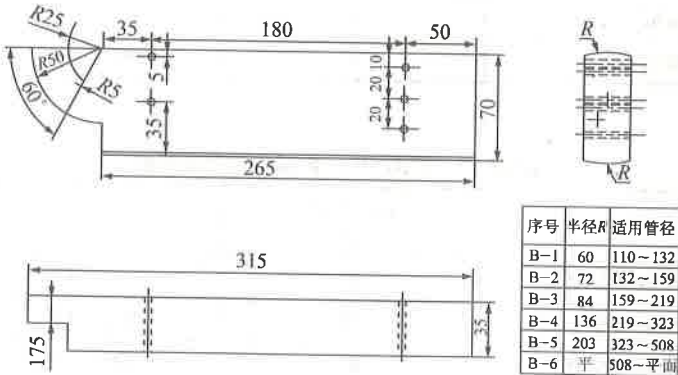


图 M.0.3-2 SGB-PA-B 试块形状与尺寸 (mm)

**M.0.4** SGB-PA 对比试块表面粗糙度  $R_a$  应小于或等于 3.2，试块制作尺寸误差应小于 0.1mm，圆弧角度误差小于 0.5°。

## 附录 N 非标准温度下的检测规范的确认

**N.0.1** 应采用铝合金试块确认非标准温度下的渗透检测规范。

**N.0.2** 当工件温度低于 10℃ 时，应按如下方法确认渗透检测规范：

将试块和检测剂都降到某一预定温度范围的下限，将拟采用的低温检测规范用于 B 区。在 A 区用标准温度规范进行检测，比较 A、B 两区的裂纹显示迹痕。如果显示迹痕基本上相同，则 B 区的检测参数即为该温度范围的检测规范。

**N.0.3** 当工件温度高于 50℃ 时，应按如下方法确认渗透检测规范：

如果拟采用的检测温度高于 50℃，则须将试块 B 和检测剂加热到某一预定温度范围的上限，并在整个检测过程中温度保持在这一范围，将拟采用的高温检测规范用于 B 区。在 A 区用标准温度规范进行检测，比较 A、B 两区的裂纹显示迹痕。如果显示迹痕基本上相同，则 B 区的检测参数即为该温度范围的检测规范。

## 标准用词说明

1 为了便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 本规范中指明应按其他有关标准、规范执行的写法为“应符合……规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 《无损检测 渗透检测和磁粉检测 观察条件》GB/T 5097
- 《标准对数视力表》GB/T 11533
- 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》GB 18871
- 《无损检测 工业射线照相胶片 第1部分：工业射线照相胶片系统的分类》GB/T 19348.1
- 《无损检测 工业射线照相观片灯 最低要求》GB/T 19802
- 《无损检测 计算机射线照相系统的分类》GB/T 21355
- 《无损检测 计算机射线照相系统的长期稳定性与鉴定方法》GB/T 21356
- 《无损检测 磁粉检测用试片》GB/T 23907
- 《无损检测 超声检测设备的性能与检验 第2部分：探头》GB/T 27664.2
- 《无损检测 X射线数字成像检测 系统特性》GB/T 35394
- 《工业X射线探伤放射防护要求》GBZ 117
- 《职业性外照射个人监测规范》GBZ 128
- 《工业 $\gamma$ 射线探伤防护标准》GBZ 132
- 《无损检测 磁粉检测用材料》JB/T 6063
- 《无损检测 渗透试块通用规范》JB/T 6064
- 《无损检测 线型像质计通用规范》JB/T 7902—2015
- 《无损检测仪器 磁粉探伤机》JB/T 8290
- 《无损检测 A型脉冲反射式超声检测系统工作性能测试方法》JB/T 9214
- 《A型脉冲反射式超声波探伤仪 通用技术条件》JB/T 10061
- 《超声探伤用探头性能测试方法》JB/T 10062
- 《无损检测 超声相控阵探头通用技术条件》JB/T 11731

中华人民共和国石油天然气行业标准

# 石油天然气钢质管道无损检测

SY/T 4109—2020

条文说明

## 修 订 说 明

《石油天然气钢质管道无损检测》SY/T 4109—2020，经国家能源局 2020 年 10 月 23 日以第 5 号公告批准发布，2021 年 2 月 1 日起实施。

本规范在《石油天然气钢质管道无损检测》SY/T 4109—2013 的基础上修订而成，上一版的主编单位是徐州东方工程检测有限责任公司，主要起草人员是：曹健、徐进、熊二剑、向前、陈非非、景文学、常兰川、梁海滨、南宇、王婷、付文利、程军。

本规范修订过程中，编制组进行了广泛的调查研究，广泛查阅和收集了相关的检测标准和法律法规，总结了近几年石油天然气钢质管道工程无损检测的实践经验，并开展了有关黑度计、缺欠容限等课题研究，开展了对标工作，结合国外先进标准的有关内容，对 2013 年版规范中不妥当和适用性较差的内容进行了修订和完善，增加了 X 射线计算机辅助成像检测、相控阵超声检测两种检测方法，调整了部分内容的顺序。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，本规范编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明，对条文规定的目的、依据及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

# 目 次

总则 .....	145
术语 .....	146
基本规定 .....	148
3.1 一般规定 .....	148
3.2 无损检测人员 .....	149
3.3 检测设备与器材 .....	149
3.4 无损检测工艺文件 .....	150
3.5 检测场所和环境 .....	151
3.6 无损检测质量管理 .....	151
3.7 无损检测安全防护 .....	151
3.8 无损检测档案 .....	151
射线检测 .....	152
4.1 一般规定 .....	152
4.2 射线胶片 .....	152
4.3 增感屏 .....	152
4.4 像质计 .....	153
4.5 观片灯 .....	153
4.6 黑度计 .....	153
4.7 检测标识 .....	154
4.8 表面状态 .....	154
4.9 透照布置 .....	155
4.10 透照几何条件 .....	155
4.11 透照次数 .....	156
4.12 像质计的放置和识别 .....	157
4.13 曝光参数 .....	157

4.14	无用射线和散射线的屏蔽 .....	158
4.15	胶片处理 .....	158
4.16	评片规定 .....	158
4.17	底片质量 .....	158
4.18	质量评定 .....	159
5	X 射线数字成像检测 .....	163
5.1	一般规定 .....	163
5.2	检测系统 .....	163
5.3	系统分辨率 .....	166
5.4	线型像质计 .....	166
5.5	透照方式 .....	166
5.6	透照几何条件 .....	167
5.7	一次透照长度 .....	169
5.8	表面状态 .....	169
5.9	线型像质计的放置和识别 .....	169
5.10	检测标识 .....	170
5.11	曝光参数 .....	170
5.12	图像分辨率的测定 .....	171
5.13	图像质量 .....	171
5.14	缺陷的识别和测量 .....	171
5.15	工艺验证 .....	172
5.16	质量评定 .....	172
5.17	数据存储 .....	172
5.18	检测记录和报告 .....	173
6	X 射线计算机辅助成像检测 .....	174
6.1	一般规定 .....	174
6.2	检测系统 .....	174
6.3	系统空间分辨率 .....	176
6.4	表面状态 .....	176
6.5	透照布置 .....	177

6.6	透照几何条件	177
6.7	曝光参数	177
6.8	无用射线和散射线的屏蔽	177
6.9	图像分辨率的测定	178
6.10	图像分辨率	178
6.11	图像质量	179
6.12	数据存储	180
6.13	质量评定	181
6.14	检测记录和报告	181
7	超声检测	182
7.1	超声检测设备	182
7.2	超声探头	182
7.3	超声试块	183
7.4	耦合剂	183
7.5	距离—波幅曲线	183
7.6	系统校准和复核	184
7.7	检测准备	184
7.8	现场检测	185
7.9	质量评定	187
8	相控阵超声检测	190
8.1	一般规定	190
8.2	检测设备	190
8.3	试块	191
8.5	检测设置	192
8.6	检测工艺验证	193
8.7	现场检测	193
8.8	扫查数据质量	194
8.9	缺欠的测量	194
8.10	质量评定	195
9	磁粉检测	197
10	渗透检测	198

## 1 总 则

1.0.1 本条规定了制定本规范的目的。

1.0.2 本条规定了本规范的适用范围。输送介质为石油、天然气，硫化氢含量大于或等于 5%（体积分数）的高含硫化氢天然气不在适用范围中。本规范在 2013 年版规范的基础上增加了 X 射线计算机辅助成像检测和相控阵超声检测两种检测方法。本规范明确了各种检测方法的适用范围。射线检测（RT）、X 射线数字成像检测（DR）、X 射线计算机辅助成像检测（CR）的适用范围除低碳钢和低合金钢外，扩展到了奥氏体不锈钢。

X 射线数字成像检测删除了不适用于静态成像检测的规定，只要图像质量指标符合本规范要求，无论是静态还是动态均可用于检测。

本规范调整了超声检测的适用范围，把弯头与直管、带颈法兰与直管、回弯头与直管对接接头的检测也纳入适用范围。

## 2 术 语

本章根据管道焊接和检测的特点，以及新增加的检测方法的需要，在 2013 年版规范的基础上增加并调整了部分定义：

(1) 调整了“透照厚度”的定义，2013 年版规范透照厚度包含余高，本规范规定透照厚度为公称厚度之和，不包含焊缝余高，提高了要求。

(2) 增加了“X 射线计算机辅助成像检测、相控阵超声检测”两个定义，明确了两种检测方法的特点。

(3) 对“小径管”的定义进行了调整，小径管的范围由小于或等于 89mm 调整为小于或等于 100mm，与国内其他标准一致。对“窗宽窗位”进行了调整，更加明确和清晰。

(4) “B 型显示”的定义可能与其他标准不同。因不同的检测系统对 B 扫描的定义不同，目前很难做到统一。本规范 B 型显示指焊缝的纵截面侧视图，也有标准把焊缝的纵截面侧视图称为 D 扫描，把焊缝的横截面视图（正视图）称为 B 扫描。只要相控阵检测具备纵截面侧视图和横截面正视图，尽管可能名称与本规范规定的不同，也视为符合本规范的要求。

本规范所用的术语和定义是结合管道焊接和检测的特点而制定的，可能会与其他标准有出入，采用本规范时应以本规范的规定为准。

为使检测时缺欠记录更加简便，占用记录容量更小，记录缺欠时也可以采用表 1 所列的缩略语来代表缺欠。

表 1 缺欠英文缩略语

序号	缺欠名称	英文名称	缩略语
1	气孔	Porosity	P
2	密集气孔	Cluster Porosity	CP
3	条形气孔	Stripy Porosity	SP
4	夹渣	Slag Inclusions	SI
5	条形夹渣	Stripy Slag	SS
6	圆形缺欠	Round Imperfection	RI
7	条形缺欠	Strip-Type Imperfection	STI
8	表面未熔合	Incomplete Fusion	IF
9	夹层未熔合	Incomplete Fusion Due to Cold Lap	IFD
10	根部未焊透	Inadequate Penetration without High-low	IP
11	错边未焊透	Inadequate Penetration Due to High-low	IPD
12	中间未焊透	Inadequate Cross Penetration	ICP
13	外咬边、内咬边	Undercutting	EU & IU
14	根部内凹	Internal Concavity	IC
15	烧穿	Burn-Through	BT
16	根部弧坑	Internal Crater	ICR

## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

3.1.1 ~ 3.1.4 这四条明确了各种检测方法适用的缺欠类型，从技术角度为检测方法的选择提供指导，可根据需要检测的缺欠类型选择合适的检测方法，具体的检测方法选择应根据设计文件的规定。射线检测（包括X射线数字成像检测和X射线计算机辅助成像检测）、超声检测（包括相控阵超声检测）、磁粉和渗透检测等方法都有各自的特点和针对性，应根据具体情况选用。

射线检测具有定性、定量准确，检测结果直观，有据可查，可存档等特点，主要用于石油天然气钢质管道中薄壁管对接接头内部缺欠的检测，对于体积状缺欠（如气孔、夹渣、未焊透等）检出率高。但对于厚壁管道对接接头中的面状缺欠，该方法受缺陷角度影响，相对于超声检测检出率较低。X射线数字成像检测、X射线计算机辅助成像检测的基本原理与传统射线检测相同，所适用的对象也和传统射线检测一样，但由于其需要的曝光量更小，对于大壁厚的管道比传统射线检测具有明显的优势，能够解决传统射线无法检测的大口径、大壁厚焊口的检测，因此更适合于大壁厚大管径的焊口。其次，射线数字成像检测可以实现现场实时出具检测结果，且检测结果数字化，因此检测结果的阅读和保存都非常方便，对提高焊接质量有非常大的帮助。因此，该方法适用于对焊接质量要求较高、焊接速度要求较快的管道工程。

超声检测主要用于石油天然气钢质管道中厚壁管对接接头内部面状缺欠（如裂纹、未熔合等）的检测。传统超声检测定性难度大，受主观因素影响严重，但相控阵超声检测从技术

角度大大改善了超声检测主观性强的弱点，在缺欠定性方面也有改观。

**3.1.5** 当使用同一种检测方法、不同的检测工艺时，可能会产生不同的检测结果，如射线检测时采用不同的透照方向或透照方式，超声波检测采用不同  $K$  值的探头时，所检测出的缺欠的数量或尺寸都有可能不同，此时应以缺欠评定最严重的检测结果为最终结果。

## 3.2 无损检测人员

**3.2.1** 本条规定了检测人员应取得与所从事的工作相适应的资格证书，持有不同级别证书的检测人员只能从事与证书级别相适应的工作。长输管道属于压力管道的范畴，按特种设备安全法有关规定，检测人员应取得特种设备检验检测人员资格证书。国家或行业尚未开展资格取证工作的检测方法，至少应取得与该方法同类的基础检测方法的同等级别的资格证书（如超声类的检测方法应取得 UT 资格证），并应参加该方法在理论、实操等方面的系统培训。该系统培训可以是国际权威机构的取证培训，也可以是行业或业主认可的国内机构的取证培训。

**3.2.2** 国内部分检测资格证书最高级别只有 II 级，比如 TOFD 证书的最高级别即为 II 级。虽然目前国家市场监督管理总局还未对 PAUT 开展取证工作，但根据取证习惯，很有可能在一定期限内最高只有 II 级，因此只能由 II 级人员来履行 III 级人员的责任。

**3.2.3** 本条规定从事射线检测（包括射线数字成像检测、X 射线计算机辅助成像检测）的人员应进行辐射安全培训，确保从事射线检测的人员掌握射线辐射和防护的相关知识。由于从事相控阵超声检测、磁粉和渗透检测的人员需要根据颜色进行结果评定，因此不能为色盲。

## 3.3 检测设备与器材

**3.3.1, 3.3.2** 规定的检测设备主要包括射线机、CR 成像和扫描

系统、DR 成像系统、超声检测仪、相控阵检测仪与磁粉探伤机等用于管道上的与检测质量直接相关的设备。主要器材包括黑度计、观片灯、像质计、超声探头、相控阵探头与试块等与检测质量相关的设施和材料。

**3.3.3** 大部分检测设备和器材都不属于强制检定的计量器具。《中华人民共和国强制检定的工作计量器具明细目录》（[1987]量局法字第 188 号）<sup>①</sup>规定凡用于贸易结算、安全防护、医疗卫生、环境监测的均实行强制检定。在《中华人民共和国强制检定的工作计量器具明细目录》（[1987]量局法字第 188 号）中与无损检测工作相关的只有“电离辐射防护仪”类的器材，也即射线报警器、数字计量仪等用于现场辐射监控的器材。其他均不需要强制检定。

未列入国家强制检定目录、可进行量值溯源的无损检测设备和与检测灵敏度相关的器材，如 X 射线机、超声检测仪（包括相控阵超声检测仪）、密度片等虽然不需要检定，但应该定期进行校准。校准可选择中国合格评定国家认可委员会认可的校准机构进行，也可由检测单位自行开展内部校准。自行开展内部校准的，检测单位应具备本规范相关章节规定的校准用的仪器或设施，以及人员和校准程序。校准的结果可以采用校准记录或校准报告的形式。校准记录或校准报告要附上校准用计量器具的质量合格证明资料，需要检定的还需要附上检定资料。

**3.3.4** 本规范相关章节对检测设备和器材的运行有相应的规定，按规定开展核查即可。

### 3.4 无损检测工艺文件

本节对检测工艺文件的编制进行了规定，在 2013 年版规

---

<sup>①</sup> 该目录于 1999 年、2001 年、2002 年进行过几次调整。详见国家质技监局 [1999] 第 15 号文、国家质检总局量 [2001] 第 162 号文、国家质检总局发 [2002] 第 386 号文。

范的基础上将“工艺卡”修改为“操作指导书”。“操作指导书”是检测工艺规程的具体执行文件，它依据检测工艺规程的规定编制，其参数规定得更具体，执行性和适用性更强。工艺规程和操作指导书的编制除按照本节规定的内容外，还要符合本规范相关章节的具体规定。

### 3.5 检测场所和环境

本节对检测场所和环境提出了规定。对于影响人身健康和检测工作质量的环境条件，应该在检测工艺规程中列出并采取防护措施。在本规范相关章节中对具体环境条件和场所有详细规定。

### 3.6 无损检测质量管理

本节为新增内容，对无损检测质量管理提出了规定。

### 3.7 无损检测安全防护

本节为新增内容，对无损检测安全防护做出了规定，并将2013年版规范第4章射线检测安全防护的内容调整过来，作为一节统一进行编写。

### 3.8 无损检测档案

**3.8.1 ~ 3.8.5** 本节对无损检测记录、报告、底片及扫查图像等资料提出了基本规定。本规范规定检测记录、检测报告和射线底片、扫查图像的保存期至少7年，过了保存年限后，若用户没有转交规定或要求，检测单位可以自行决定处理。

**3.8.6** 本规范并未对射线底片是否数字化做出规定，仅提供了底片数字化时的指标要求，是否需要数字化应根据各方需求决定。

## 4 射线检测

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 本条为新增条款。长输管道通常为薄壁和中等壁厚，在此范围内 X 射线的检测效果要好于  $\gamma$  射线，且辐射防护容易控制。因此，只要条件允许应尽可能采用 X 射线检测。

**4.1.2** 本条为新增条款。鉴于材料的材质和焊接工艺无法预知，故本规范规定射线检测的时机按照设计文件执行。

### 4.2 射线胶片

**4.2.1** 现行国家标准《无损检测 工业射线照相胶片 第 1 部分：工业射线照相胶片系统的分类》GB/T 19384.1—2014 对胶片分类重新进行了调整，原来的 T1、T2、T3、T4 四个类别重新划分为 C1、C2、C3、C4、C5 和 C6 六个类别，与国际标准化组织标准《无损检测 工业射线照相胶片 第 1 部分：工业射线照相胶片系统的分类》ISO 11699-1：2008 相一致。本规范因此对胶片分类也相应进行了调整，与现行国家标准《无损检测 工业射线照相胶片 第 1 部分：工业射线照相胶片系统的分类》GB/T 19384.1—2014 一致。

**4.2.2** 本条规定了胶片的选用原则和胶片的本底灰雾度。本规范规定，标准抗拉强度下限值大于或等于 540MPa 的高强钢应尽量采用 C4 类的胶片。需要注意的是，与 C5 类胶片相比，采用 C4 类胶片曝光时间增加很多，会导致检测降效严重，应考虑检测资源的配备问题。

### 4.3 增感屏

**4.3.1** 本条对增感屏选用进行了规定。在进行射线检测时是否

使用增感屏可以根据情况选择。

**4.3.2** 在透照过程中胶片与增感屏应相互贴紧。实验证明，若增感屏与胶片之间有 0.1mm 间隙，黑度差下降 25%；若间隙为 0.4mm，则黑度差下降 50%。因此，应尽可能贴紧。

## 4.4 像 质 计

**4.4.1** 本条对像质计材质进行了相关规定，修订了小径管专用像质计的相关内容。规定小径管透照时既可以选择专用型像质计，又可以选用通用像质计，方便了像质计的使用。实践证明，受位置偶然性的影响，使用通用像质计往往更难达到与专用型像质计相同的灵敏度显示。

**4.4.2** 2013 年版规范中，透照厚度包括余高。本规范对透照厚度进行了调整，只包括母材本身厚度，去掉了余高，实际上提高了对灵敏度的规定。本规范删除了像质计型号选用的相关内容，不再推荐像质计型号对应的厚度范围，而是规定选用的像质计型号应保证其最细金属丝的丝号高于或等于按本规范规定应达到的灵敏度丝号。

## 4.5 观 片 灯

**4.5.2** 观片灯的亮度是重要指标。观片灯使用前或者亮度部件维修后，可采用亮度计对观片灯的亮度进行测量，测量的结果可参照本规范第 4.16.4 条的规定。

## 4.6 黑 度 计

**4.6.1** 本条在 2013 年版规范的基础上增加了对黑度计测量光孔直径的要求。要求光孔直径小于或等于 0.5mm，主要是因为黑度是缺欠评定时的一个重要指标。光孔越小，测量值越接近实际值；光孔直径过大，黑度测量准确度下降，无法反映缺欠的真实黑度，会影响缺欠评定结果。

**4.6.2** 本条对黑度计提出了校验规定，规定至少每六个月用标准密度片校验一次，并提供了校验方法。实际应用中根据工作量的大小以更短的时间间隔校验，如三个月或一个月进行校验，在怀疑黑度计不准确时应随时进行校验。校验要填写校验记录，并随黑度计一起存放。

**4.6.3** 由于标准黑度片比较关键，且标准黑度片的校准需要专用设备，因此本规范规定应送到有资格的机构进行校准，不提倡自校。

## 4.7 检测标识

本节规定了焊接接头检测透照标记的组成和摆放方法，包括定位标记和识别标记两部分。这些标记均要投影到底片上，在底片上的排列应有一定的规律性，距离焊缝应有一定距离，不能掩盖焊缝热影响区，并要完整、正确、有序。

## 4.8 表面状态

**4.8.1** 按照正常的焊接检测工序，焊接单位在提交检测申请或委托前，应对焊接接头进行外观检查，外观检查合格后才可提交申请或委托。检测单位在接到检测申请或委托（有时是监理指令）后，就应视为焊接接头外观已经检查合格，可以实施检测。但由于焊接单位只是对外观尺寸、外观缺欠进行测量和检查，像表面凹槽、焊瘤、飞溅及不规则焊纹等依然会影响到射线底片的评定结果，因此，无损检测人员还应就影响底片评定的表面凹槽、焊瘤、飞溅及不规则焊纹等进行目视检查，必要时记录下来，作为底片评定时参考。

**4.8.2** 本条为新增条款。连头焊口的仰脸部位内表面容易存在铁水、药皮及飞溅等物体，常常会掩盖缺欠，无法反映焊接接头的真实质量，因此本规范规定焊接完成后应及时清除这些物体。

## 4.9 透照布置

**4.9.1** 本条规定了管道焊口射线检测的几种透照方式。管道检测的主要透照方式包括中心透照法、双壁单影透照法和双壁双影透照法三种。应该优先选用中心透照法，双壁单影透照法主要适用于死口、连头及无法采用中心透照的焊接接头检测。一般焊接接头应采用射线束中心垂直指向焊接接头中心的透照角度，尤其是采用管道爬行器检测时，应将爬行器定位偏差控制在合理的范围内，焊接接头在底片上的投影应能清晰显示四条焊趾线的影像。但在实际检测中，由于焊接接头坡口型式的影响，中心垂直透照未必是最好选择。对一些坡口较大的接头，双壁单影偏置透照可能更容易发现坡口未熔合等缺陷。因此具体情况要具体对待，视缺欠检测需要确定。

**4.9.2** 本规范允许采用单胶片或双胶片透照布置，2013年版规范未做规定。允许采用双胶片透照的目的是解决大壁厚和大壁厚差焊接接头透照困难的问题。对于大壁厚焊接接头，当采用单胶片无法获得符合规定的黑度和灵敏度时，可采用双胶片法进行透照。

**4.9.3** 本条对单张胶片的长度提出了建议。胶片过长容易出现折痕、划伤，所以不宜过长。一般情况下，直径660mm以下的管道中心透照时可使用一张胶片，大于660mm的可采用两张及以上的胶片。

## 4.10 透照几何条件

**4.10.1** 本条规定了射线源至被检部位工件表面的距离。当射线机和透照工件已定的情况下，控制 $L_1$ 就控制了几何不清晰度值 $U_g$ 。 $L_1$ 值越大，底片的 $U_g$ 值就越小，检测灵敏度越高，因此透照时应保证 $L_1$ 值不能低于本规范的规定。检测管径较小的管道焊口时，应尽量选用焦点尺寸小的射线机，才能更好地控制几何不清晰度，管道爬行器更是如此。 $L_1$ 值与现行国家标准《焊

缝无损检测 射线检测 第1部分：X和伽马射线的胶片技术》GB/T 3323.1—2019、现行行业标准《承压设备无损检测》NB/T 47013 等标准中规定的 AB 级相同。

**4.10.2** 由于中心透照法比双壁单影透照法有更好的灵敏度和更佳的横向裂纹检出角，应尽量选择中心透照。但中心透照小管径焊口时  $L_1$  值不容易满足要求，因此本规范规定在保证灵敏度和底片质量符合本规范规定的前提下，可以使几何不清晰度适当降低， $L_1$  值可以减小，但减小值不得超过规定值的 50%，以充分发挥中心透照法的优点。该规定与欧洲标准《焊缝的无损检验 焊接接头的 X 光照相检验》EN1435 和现行行业标准《承压设备无损检测》NB/T 47013 是一致的。

**4.10.3** 在透照过程中，胶片与焊接接头表面距离过大或张贴得较松散，容易导致投影放大和虚化，降低影像灵敏度。

## 4.11 透照次数

**4.11.1** 本条在 2013 年版规范的基础上调整了直径 100mm ~ 400mm 管道焊接接头的透照次数规定，透照厚度比可采用 1.2，与现行行业标准《承压设备无损检测 第 2 部分：射线检测》NB/T 47013.2 相一致。2013 年版规范规定，直径小于或等于 250mm 的管道透照次数最少可为 4 次，本规范规定有所提高。

**4.11.2** 本条规定了小径管的成像方式和相关规定。可以椭圆成像时应尽可能采用椭圆成像，有困难时可采用垂直透照。本规范规定的透照次数均为最低规定，制订检测工艺时应考虑管径和壁厚对缺欠检出范围的影响，适当的增加透照次数。

**4.11.3** 管道射线检测定位标记和搭接标记一般放在胶片侧。当壁厚较大时，内壁的投影会超出搭接标记，必须保证有足够的透照覆盖长度才能保证不漏检。管道壁厚一般在 30mm 以下，因此 30mm 长的覆盖能够保证内壁投影在底片上。对于壁厚较小的管道，如果需要也可适当减小覆盖长度，但应满足透照需要。

## 4.12 像质计的放置和识别

**4.12.1** 本条规定了像质计放置的具体要求。由于结构原因，管道环焊缝检测时，像质计很难放于源侧，只能都放置于胶片侧，因此本规范明确了双壁单影透照和中心透照时像质计可放置在胶片侧。考虑到实际工作及简化工序的原则，规定像质计置于胶片侧时可不放字母“F”，因此放在源侧成为了极少出现的情况，因此规定像质计放置在源侧时应贴放字母“S”，以示区别。

**4.12.2** 底片黑度均匀部位既可以是母材部位，也可以是焊缝部位，只要能清晰地识别长度不小于 10mm 的像质计影像即认为可识别。

## 4.13 曝光参数

**4.13.1** 本条对透照管电压做出了规定。

**4.13.2** 本条规定了管道检测常用的  $\gamma$  射线源允许的最小透照厚度。中心透照时，允许最小透照厚度可以降低 1/2。

**4.13.3** 本条对曝光量做出了规定。与 2013 年版规范相比，本规范删除了“中心透照时，X 射线照相的曝光量可以适当减少，但应保证像质质量和透照灵敏度符合本规范规定”，增加了“采用高频恒压 X 射线机时曝光量可适当减少，但应保证像质质量和透照灵敏度符合本规范规定”。这是由于高频射线机的射线转换效率远远大于普通射线机，用“mA·min”来规定曝光量已不太合适。

**4.13.4** 曝光曲线是选择曝光参数的参照，但并不是必备的工具。对于管道检测来说，由于检测对象的规格型号比较单一，用工艺试验的方法更容易获得合适的曝光参数。有时用曝光曲线选择的曝光参数后，由于洗片条件的不同，在实际使用时还要通过试验方法确定具体的曝光参数。因此，本规范对是否制作曝光曲线不做硬性规定，更推荐用工艺试验的方法来确定曝光参数。

#### 4.14 无用射线和散射线的屏蔽

本节规定了散射线的屏蔽和背散射的防护规定。背部散射线屏蔽可采用增加后屏厚度或在暗袋后加铅板的办法来实现。小径管因散射线引起“边蚀”效应较严重，可在工件透照部位的地面上加铅板或在 X 射线机头上加准直器，以减少“边蚀”效应。

#### 4.15 胶片处理

本节从解决大批量胶片处理符合实际检测需要的角度出发，推荐采用自动洗片机处理胶片的方式。此外，自动洗片机对长胶片更有优势，手工冲洗反而非常困难。自动洗片机冲洗的底片，长时间存放后有时会出现对比度低、清晰度差、发黄变质及产生伪像等问题，因此，应制订严格的底片冲洗工艺和底片保存措施。

#### 4.16 评片规定

本节对底片评定做了规定。本规范从提高评片准确性、提高缺陷检出率的角度，规定了各种黑度条件下透过底片的亮度。

#### 4.17 底片质量

**4.17.1** 本条规定了底片评定范围的黑度值，与 2013 年版规范相比增加了双胶片透照技术的黑度规定，并将 X 射线和  $\gamma$  射线的底片黑度进行了统一，单胶片透照的黑度范围调整到 2.0 ~ 4.5，提高了底片黑度值。

**4.17.2** 按照底片黑度越大灵敏度越高的理论，本规范允许黑度大于本规范表 4.17.1 规定的黑度上限，但对观片灯提出了相应的规定，要求检测单位应提供证据证明，观片灯的亮度能达到本规范第 4.16.4 条的规定。

**4.17.3** 小径管和壁厚差变化大的焊口要考虑厚度宽容度，本规范允许底片黑度下限降低到 1.5。

**4.17.5** 由于管道检测像质计一般只能放在胶片侧，因此本规范直接规定了像质计放置于胶片侧时的灵敏度指数。像质计置于射线源侧时可以采取内外放置像质计进行对比试验，确定与胶片侧灵敏度相等的源侧的像质计指数。本规范对像质计灵敏度指标进行了调整，与 2013 年版规范相比要求更严格。

## 4.18 质量评定

本规范对缺欠质量评定进行了较大的调整。历年管道焊接接头失效案例表明，返修是导致管道泄漏的一个主要因素，一次焊接中存在一定尺寸缺欠的焊接接头反倒是很少出现失效的情况。本规范修订前和修订中开展了有代表性的 CTOD 实验。实验也证明，缺欠的长度不是构成管道失效的主要因素，管道焊接接头中能够允许的缺欠（未熔合）长度根据其高度的不同可以达到 100mm ~ 300mm。此外，通过国内外相关标准的对标工作也发现，国外有关长输管道的焊接和检测标准如 *Welding of pipelines and related facilities API Std 1104*、*Submarine pipeline systems DNV OS F101* 等标准均允许较大尺寸的缺欠存在，比国内管道标准允许更长的缺欠尺寸。本规范修订时结合了国内西气东输、西气东输二线、陕京二线、陕京三线及中亚输气管道等系列工程实践经验，参考了 *Welding of pipelines and related facilities API Std 1104* 和 *Submarine pipeline systems DNV OS F101*，对不同种类的缺欠的长度进行了调整。

**4.18.1** 圆形缺欠包括圆形气孔、夹渣及金属夹杂，条形缺欠包括条形气孔、夹渣及金属夹杂。

**4.18.2** 本条为新增条款。对处于同一条直线上的缺欠给出了定义。对于两个平行且重叠（包括部分重叠）分布的条形或线性

缺欠不合并为一个缺欠处理，而是各自单独评定，再累计评定。

**4.18.3** 本规范将缺欠分为四个等级，在 2013 年版规范基础上增加了固定连头焊口根部未熔合和根部未焊透评为 IV 级、焊口返修部位的未熔合和未焊透评为 IV 级的规定。未焊透和未熔合引起的返修，焊口返修部位的未熔合或未焊透应清除干净，其他缺陷引起的返修不应该出现新的未熔合或未焊透。对于不锈钢焊缝，根部未熔合和根部未焊透也应评为 IV 级。

**4.18.4** 圆形缺欠的分组仍采用以点数来分级的方式，主要内容与 2013 年版规范保持一致，但对单个圆形缺欠（气孔和夹渣）的最大允许长径调整为  $T/2$ ，原来的  $T/3$  过严，导致薄壁焊缝出现了大量不必要的返修。

返修容易对焊口的整体性能造成破坏，形成质量薄弱部位，易引起管道泄漏等质量事故的发生，因此应尽可能减少焊口返修。对于连头焊口、穿跨越焊口，以及 X70 和 X80 高强度焊口，在整体焊接质量比较可靠的情况下，应尽可能减少返修。此外，对于站场中的法兰、弯头、阀门等连接焊口，返修后容易出现裂纹，而且一旦返修割口后会出现对口困难，以及法兰、弯头或阀门报废等情况，造成工程长时间停工。因此，上述情况的焊口在评定气孔缺欠时允许放宽 2 点，避免不必要的返修。此外，对于气孔的测量，不同的人可能会存在细微差别，导致换算点数也存在差别，对于这样的情况，不能要求太过苛刻。

管道焊接很少出现柱孔或针孔。对于针孔和柱孔的确认应结合气孔的黑度、形状及焊接工艺等综合评定，不能轻易定性为柱孔或针孔，必要时可以改变透照角度进行验证。

**4.18.5** 本规范将条形气孔和条形夹渣统一为条形缺欠进行评定。缺欠评定有三个要素：缺欠的宽度、长度和高度（黑度）。本规范将三个要素作为一种并列关系对缺欠进行评定，任何一个因素超过规定即认为缺欠超过规定。对于缺欠长度的规定与 2013 年版规范不同，除了单个和累计评定外，还考虑了缺陷的相关性。当两个或两个以上的缺欠处于同一直线上、且相邻缺

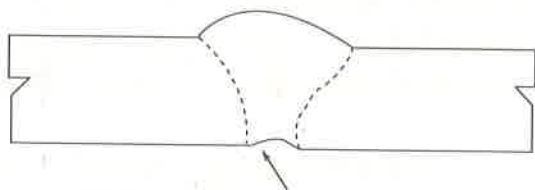
欠的间距小于或等于较小缺欠的长度时，应作为一个缺欠评定。但需要注意的是缺欠的间距不计入缺欠长度。本规范规定黑度超过较薄侧母材黑度的条状气孔直接评为IV级，并且缺欠任意一点的黑度超标即认为整个缺欠黑度超标。

**4.18.6** 夹层未熔合与中间未焊透均属于埋藏型缺欠，本规范对两种缺欠的验收尺寸进行了统一，对长度进行了调整，同时又将长度与管道壁厚相关联。

**4.18.7** 本规范将根部未熔合、根部未焊透缺欠与夹层未熔合区别开，根部未熔合各级别允许的长度要小于夹层未熔合。错边未焊透属于根部未焊透的一种类型，本规范不再将错边未焊透作为单独的一类进行评定。

**4.18.8** 内凹相对于咬边和烧穿，其与母材的过度比较圆滑，不容易造成应力集中，因此对内凹的评定首先看深度，也即是黑度，黑度不超过较薄侧母材的不需要评定。但对于黑度测量大于较薄侧母材的，任何一点测量超出的整个内凹的长度都需要计算在内。

有些烧穿的影像容易和内凹混淆，应从形成机理上加以区分。*Welding of pipelines and related facilities* API Std 1104 对根部内凹的定义为：完成的焊缝边缘已良好熔合和焊透，但焊缝表面焊道中部比管壁表面稍低，形成的凹陷即为内凹，如图1所示。该凹陷的尺寸定义为管壁表面的轴向延伸线和该焊道表面最低点之间的垂直距离。



根焊道两边已熔合，但中间略低于管内表面

图1 根部内凹

**4.18.9** 本条对烧穿的评定标准与2013年版规范保持一致，与 *Welding of pipelines and related facilities* API Std 1104 有关烧穿的规定基本一致。烧穿为体积性缺欠，黑度是不均匀的，本规范规定测量烧穿黑度时只要有任意一点的黑度超过较薄侧母材黑度，就认为烧穿的黑度大于较薄侧母材黑度，就应该进行评定。相对于内凹，弧坑更容易引起应力集中，其危害类似于烧穿，因此应该按照烧穿来评定。

**4.18.10** 本规范取消了“内咬边黑度小于或等于较薄侧母材黑度时，长度不计，应评为Ⅱ级”的规定，调整为按长度进行评定。对于黑度超过较薄侧母材的咬边各级别允许长度更短。

## 5 X射线数字成像检测

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 本条为新增条款，规定了本规范只允许采用X射线源检测，不允许使用其他射线源。

**5.1.2** 本条为新增条款，规定了X射线数字成像检测的时机。

### 5.2 检测系统

**5.2.1** 本条规定了射线数字成像检测系统的基本组成部分。射线数字成像检测系统以数字探测器为核心，包括硬件与软件两大部分，其中X射线机、探测器、计算机、系统软件是主要部件。在石油天然气管道环向焊接接头检测中，检测工装能够固定或支撑X射线机、探测器等硬件设施，保证透照几何条件，确保成像质量。同时，具有旋转、平移等机械运动自由度的检测工装可提高检测效率、降低劳动强度。因此本条将检测工装也作为一个完整射线数字成像检测系统的基本组成。

**5.2.2** 系统性能测试报告与出厂检验合格证是判定检测系统是否符合检测规定的重要依据。其中，性能测试报告可由三种途径提供：系统制造商提供，用户自行测试及约请第三方测试。性能测试报告的主要内容包括各组成部分的基本性能测试与成像质量测试。前者可按相应标准或行业通用方法进行测试，后者主要是依据本规范中有关图像质量的规定针对具体被检对象进行测试。

**5.2.3** X射线机的选择主要考虑其管电压范围、管电流范围及有效焦点尺寸3个主要参数。被检工件材质与厚度决定了最低管电压，而图像灵敏度规定又决定了最高管电压。在相同曝光

量规定下，较大的管电流可以缩短曝光时间，提高检测效率。

X射线机有效焦点尺寸直接影响了图像总不清晰度，本条根据图像总不清晰度的相关规定及实际透照中几何条件的限制对其允许的最大值做出规定。有效焦点尺寸并不等同实际焦点尺寸，其大小可按 *Non-destructive testing—Characteristics of focal spot in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing* EN 12543 规定方法测定。当焦点在平面两个方向上尺寸不一致时，可取平均值代替；但在计算图像几何不清晰度时，推荐以两个方向上的尺寸分别计算。此外，与工频射线机相比，高频恒电位射线机具有射线能量更稳定、辐射剂量更大、单色性更高及体积更小的优势。射线数字成像系统单帧曝光时间非常短，一般不足 1s，射线束的质量极大程度影响了成像质量，直接决定了检测系统所能获得的最高信噪比，因此应尽可能使用高频恒电位射线机。

**5.2.4** 本条增加了对探测器系统性能指标的规定。动态范围与灰度等级反映了探测器对厚度的分辨能力与透照厚度范围，在检测细小缺陷时应选用高动态范围探测器，在透照厚度变化较大时应选用高灰度等级的探测器。本条参考国内相关资料对探测器的动态范围与灰度等级的最低规定做出规定。由于结构原因，探测器均具有响应不一致的特性，并存在坏像素，故应该按照探测器制造厂商提供的校正方法与校正时机对探测器进行校正。坏像素是衡量探测器性能的一个重要指标，在《数字探测器阵列品质鉴定特性的标准实施规程》ASTM E2597 中对坏像素的形式、测量方法均做出了描述。探测器坏像素的数量与形式直接影响了细小缺陷图像的可信度，提高图像信噪比可以提高坏像素区域内细小缺陷的可信度。但值得注意的是，在图像评定区域内一般不允许出现集群核心坏像素（邻近 8 个像素中不足 5 个完好像素的集群坏像素）。不同射线能量下坏像素分布不同。随着使用时间增长，坏像素数量也会增加，特别是在非正常使用条件下更是会加快坏像素的增加速度。因此，应严格遵照制造商规定的使用条件，并定期进行坏像素统计与校正，

时刻掌握坏像素的分布情况。

**5.2.5** 计算机的配置应符合相关部件对性能的规定。对于显示器而言，其性能决定了图像的显示效果，直接影响评定人员对图像的观察和识别。其中，高亮度可提高人眼灰度辨识能力，高对比度可呈现更多灰度层次，高分辨率可显示更多图像区域，小像素可增加图像细腻程度，高灰度等级可显示更多的图像细节。本条参照《利用数字探测器阵列进行射线照相学检查的标准实施规程》ASTM E2698 对显示器基本性能的最低规定做出规定。

**5.2.6** 系统软件是射线数字成像检测系统的核心单元，是保证检测准确性和安全性的重要因素。其中，第 1 款是探测器应用基础，熟练掌握探测器校正时机与方法是获得高质量图像的关键步骤。对于已校正的坏像素，软件最好具备使其能在图像上直接标注的功能，以便于确定是否影响图像评定，但并不强制。第 2 款是能够符合工程应用最小功能集的概述。其余部分对图像处理、分析及报告生成与打印做出强制或非强制的规定。

**5.2.7** 对于面阵列探测器而言，大部分采用连续分段透照的方式，使用合适的检测工装可有效解决探测器与 X 射线机固定的问题，且能够大幅度提高检测效率。通常情况下，检测工装具有旋转的能力，对于自动化的检测工装其运动精度应保证图像搭接区域长度，同时要求检测工装有较高的稳定性。本条并未强调必须使用自动化检测工装，具有旋转、平移等功能的简易手动检测工装依然适用。对于线阵列探测器而言，要完成整个对接头的检测必须配以合适的运动扫描工装，且其运动速度应与采集速度相匹配，且保持较高的稳定性，否则图像无法反应被检工件真实的长宽比例，虽然可以通过软件校正，但仍然会影响图像的分辨率。

**5.2.8** 目前，不同制造厂商生产的射线数字成像系统最终获取的图像储存格式不同，加密方式也不同，这对于检测数据的交换与存储是不利的。为此，建立一种通用的数据存储格式，完

善图像信息记录是必要的。国际上数字图像储存格式推荐使用《无损检测数字和传输标准实施规程》ASTM E2339，本规范也推荐使用该标准的图像格式进行储存，并按行业工程质量监督的规定规范图像信息记录，但须保证其不可更改性。对于基于DICOM/DICONDE的储存与传输等应用，制造商应按规定提供符合性声明。

**5.2.9** 本条为新增加条款，规定了探测器系统性能校准和运行核查的规定。

### 5.3 系统分辨率

本节规定了检测系统分辨率的最低要求及其测定方法与周期。系统分辨率是影响成像质量的关键因素，其值主要由探测器自身性能与实际像素尺寸决定，并与探测器校正质量、运行环境条件与射线质量相关，因此需要定期对系统空间分辨率进行测定以确定其是否符合检测规定。推荐将系统分辨率测定图像作为参考图像与相应检测图像同步存储，并在检测报告中记录该值（或有效像素尺寸）。

### 5.4 线型像质计

本节规定了采用线型像质计来测定图像灵敏度。射线数字成像检测的最终效果是得到不低于传统射线检测灵敏度的图像，因此本节规定采用与本规范第4.4节相同的像质计和方法来测定图像灵敏度。

### 5.5 透照方式

本节规定了射线数字成像可采用的几种透照方式。应根据被检工件特点、技术条件及环境规定选择适宜的透照方式。由于单壁透照方式的灵敏度要明显高于双壁透照方式，因此在可能情况下应尽量选用单壁透照方式，在单壁透照不能实施时可

采用双壁透照方式。目前按 X 射线机、被检工件和探测器三者的相互位置及成像面形状来区分，典型的透照方式包括中心透照平面成像（一般采用面阵探测器）、中心透照曲面成像（线阵探测器）、双壁单影透照平面成像（一般采用面阵探测器）、双壁单影透照曲面成像（线阵探测器）、双壁双影透照平面成像五种（一般采用面阵探测器）。透照时射线束中心一般应垂直指向透照区中心，必要时也可选用有利于发现缺陷的方向透照。在采用双壁单影透照法时，为保证纵向裂纹检出率而限制了射线束中心与环焊缝中心线所在垂直平面的夹角，应保证这个夹角尽可能小，特别是在射线机侧焊缝图像不影响探测器侧焊缝图像评定时，可垂直于环焊缝表面透照。对于小径管，其透照几何条件与透照次数由于其透照方式与胶片检测相同，所以采用与本规范第 4.11.2 条相同的规定。

## 5.6 透照几何条件

**5.6.1** 本条基于本规范第 5.5 节所示透照布置，明确了  $L_1$  与  $L_2$ 、 $L'_1$  与  $L'_2$  和焦点尺寸之间的关系。射线数字成像检测包括几何放大比近似为 1 的透照技术与几何放大透照技术，两者对几何条件的控制方式不同。几何放大比近似为 1 的透照技术（即将探测器尽可能贴近被检工件表面的检测方式）是通过控制几何不清晰度来控制最终的图像不清晰度。由于胶片几乎能够紧贴被检工件，所以根据胶片照相中对  $L_1$  的限制条件（即  $L_1 \geq 10dL_2^{2/3}$ ）

可知，其几何不清晰度  $U_g \leq \frac{\sqrt[3]{L_2}}{10} \approx \frac{\sqrt[3]{T}}{10}$ 。

对于中心透照与双壁单影透照曲面成像，以及双壁双影透照平面成像，透照布置与胶片检测相同，所以对  $L_1$  的限制条件仍然为  $L_1 \geq 10dL_2^{2/3}$ ，但由于探测器无法像胶片一样紧贴，所以应通过提高  $L_1$  来弥补几何不清晰度的不足。对于中心透照与双壁单影透照平面成像，由于探测器沿焊缝两侧远离被检工件表面，使得几何不

清晰度增加（两侧边缘具有最大几何不清晰度），所以应使一

次透照长度范围内几何不清晰度均符合  $U_g \leq \frac{\sqrt[3]{L_2}}{10} \approx \frac{\sqrt[3]{L}}{10}$ ，即

有  $L_1' \geq 10dL_2'T^{-1/3}$ 。在上述限制条件下，虽然射线数字成像与胶片照相的几何不清晰度相近，但由于数字探测器的有效像素尺寸远大于胶片银粒子团的尺寸，所以其总的图像不清晰度依然无法达到胶片照相的水平。为此，可以通过增加曝光量提高信噪比以弥补图像总不清晰度的不足，也可以进一步提高对几何

透照条件的规定以使图像总的模糊度  $U_{im} \leq \frac{\sqrt[3]{T}}{10}$ ，此时应符合

$L_1 \geq \frac{d \cdot L_2}{\sqrt[3]{T/10^3 - U_c^3}}$  或  $L_1' \geq \frac{d \cdot L_2'}{\sqrt[3]{T/10^3 - U_c^3}}$ （显然， $U_c < \frac{\sqrt[3]{T}}{10}$  应成立）。

与 2013 年版规范相比，本条放宽了中心透照时对 X 射线机焦点到透照部位源侧表面的距离的规定，以便于中小管径 DR 检测的实施。

**5.6.2** 本条规定了图像不清晰度的计算方法及应达到的值，该值来源于《焊缝的无损检测 放射线检测 第 2 部分：带数字探测器的 X 射线和  $\gamma$  射线技术》ISO 17636-2 中 A 级检测技术下的图像分辨率规定。在确定了检测系统和拟采用的透照布置后应计算图像总不清晰度，图像不清晰度符合规定后才认为该透照布置是可以采用的。根据本规范式 (5.6.2) 可知，图像总不清晰度随放大比的增加而减小，到达最佳放大比时图像总不清晰度达到最小值，之后随放大比的增加而增大。所以，只需要计算一次透照长度内几何放大比最小与最大处的图像总不清晰度即可确定是否符合规定。在图像总不清晰度不符合规定的情况下，可以通过采用几何放大透照技术来弥补，对于该方式下几何条件的控制是通过直接计算一次透照长度内图像总不清晰度范围来实现的。根据本规范式 (5.6.2) 可知，对于确定的

系统（即有效像素尺寸与有效焦点尺寸确定），可以获得的最小总的不清晰度已确定，若该值仍不符合检测规定，则只能更换更小像素的探测器或更小焦点尺寸的射线机。

**5.6.3** 本条规定了不同透照方式下几何放大比最小值与最大值，并给出了相应计算公式。同时，本条对几何放大比最大值与最小值的比值做出限制，这实际上间接限定了图像的几何畸变量。

## 5.7 一次透照长度

**5.7.1** 透照厚度比是限制一次透照长度的一个因素，主要是为了控制横向裂纹检出率。因为  $K$  值的大小仅与被检工件的焊接接头横截面与射线束夹角有关，与成像面形状无关，所以本条采用与胶片照相检测相同的规定。

**5.7.2, 5.7.3** 在采用中心透照平面成像或双壁单影平面成像时，一次透照长度不仅要考虑透照厚度差的规定还应考虑图像总不清晰度的规定。为了便于检测人员计算一次透照长度，本规范附录 G 列出了平面成像最少透照次数的计算和确定方法，供检测人员参考。

## 5.8 表面状态

本节的规定与本规范第 4.8 节相同。

## 5.9 线型像质计的放置和识别

与射线胶片法不同的是，X 射线数字成像检测除双壁双影小径管检测外，基本都是分段透照，且在每次成像位置都放置像质计不易操作，也没必要，因此不要求每段透照都放置像质计。其次像质计很难准确地放到被检区  $1/4$  位置，因此放置在  $1/4$  附近即可。此外，对于中心透照与双壁单影透照方式，在连续成像时可减少像质计数量，不需要每张都放置，通常保证整条环向焊接接头等间距放置 4 只即可。

## 5.10 检测标识

**5.10.1 ~ 5.10.5** 检测标识的内容与作用与射线胶片法照相技术中的内容与作用相同。对于检测标识的规定，其基本原则与本规范第 4.7 节相同。此外，对于识别标识可采用计算机录入的方式，但应具有不可更改性。

## 5.11 曝光参数

**5.11.1** 本条规定射线数字成像检测应选用较低管电压，以保证细小缺陷检出率，并采用传统胶片照相的经验数值，限制了其能使用的最高管电压范围。

**5.11.2** 曝光量定义为管电流、探测器积分时间与叠加帧数三者的乘积，而图像的灰度值只与管电流与探测器积分时间相关，而与叠加帧数无关。本条规定通过调整管电流与探测器积分时间来控制图像灰度值范围，目的是使图像评定区域位于噪声较小的线性响应空间。叠加帧数虽不影响图像灰度值，但随着叠加帧数的增加，图像信噪比与其平方根成正比，所以提高叠加帧数可检出更小尺寸的缺陷。然而，当叠加帧数达到一定数值后，其影响趋于平缓，同时探测器自身性能与校正程序限制了信噪比的最大值，叠加帧数提高反而会大幅度降低工作效率；所以叠加帧数也不是越高越好。本条并未直接规定曝光量的最低规定，其原因是受不同校正程序的影响，即使是同一个检测设备，曝光量与信噪比之间也没有必然的对应关系，曝光量的选择应满足图像信噪比和灰度的要求。由于长输管道的规格比较单一，本规范推荐采用工艺试验的方法选择合适的曝光量，不规定制作曝光曲线。

**5.11.3** 控制散射线的主要技术措施是：遮蔽、滤波与光阑。遮蔽可采用适当厚度的铅板遮蔽工件非透照区，减少来自非透照区域散射线。滤波可采用适当厚度的某种金属材料平板，放置在射线束通路上，吸收长波射线。光阑可采用铅、钨等吸收系

数强的材料制作，限定射线束夹角，减少散射线。

## 5.12 图像分辨率的测定

**5.12.1 ~ 5.12.3** 根据可检出的最小缺陷尺寸可知，图像分辨率直接影响了可检出的细小缺陷尺寸，所以测定图像分辨率以确保其达到本规范第 5.6.2 条的规定是保证图像质量的关键。图像分辨率的测定不需要在每个被检工件上进行，只需要在确定工艺条件或工艺条件改变时进行。图像分辨率的测定图像应作为参考图像与相应检测图像同步保存，并记录该测定值。双线型像质计的摆放位置应处于一次透照长度范围内图像分辨率最低的位置，即中心位置或端点位置。由于探测器结构原因，双线型像质计与探测器的行或列成  $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$  会提高测量的准确性，如采用平行放置测量值可能会降低。

## 5.13 图像质量

本节规定了图像的质量。与 2013 年版规范相比，明确了不同透照厚度的归一化信噪比的值。本规范强调了归一化信噪比的测定位置应该在厚度均匀的母材区域，对于不等厚焊口，由于厚壁侧的壁厚是渐变的，对归一化信噪比的测定有影响，因此应该在厚度均匀的薄壁侧测定。

## 5.14 缺陷的识别和测量

**5.14.1** 本规范允许采用增强、滤波等方法对缺欠进行评定，但应该记录所采用的方法，原始图像必须保存，不允许修改。

**5.14.2** 由于计算机是通过测量像素点的个数来间接测量长度，而单个像素代表的实际长度不仅与探测器像素尺寸有关，还与几何放大比有关，所以需要几何尺寸进行标定，几何尺寸标定的实际意义就是将工件射线数字图像的尺寸与工件实际尺寸进行对比，确定出放大系数，由计算机根据放大系数将图像显

示尺寸与实际工件尺寸对应起来。几何尺寸的标定可以采用阶梯试块，也可用图像上已知尺寸的标记物（如像质计、铅字等）进行测定。

### 5.15 工艺验证

本节规定了工艺验证的相关要求。检测工艺制订完毕后，应进行试检测形式的工艺验证。工艺验证的灵敏度、灰度、分辨率、信噪比及几何标定等参数符合本规范的规定后，才可开始正式检测，否则应调整工艺重新进行工艺验证。

### 5.16 质量评定

X射线数字成像检测与传统的射线胶片照相法检测都属于射线透照成像检测，具有相同的基本原理，其主要区别是成像器件不同，但获得的客观检测结果和评定方式基本相同，检测结果的质量分级评定仍然可以按照传统射线胶片法进行。因此本规范规定按照本规范第4.18节的规定对射线数字成像的检测结果进行质量评定。

### 5.17 数据存储

本节规定了所需存储的数据与存储介质的类型与规定。其中，原始数据包括原始检测图像与检测信息。原始检测图像为探测器采集完成后，仅经过响应不一致与坏像素校正及多帧平均降噪处理后的全分辨率图像。原始图像应采用无损压缩或不压缩的格式储存，以避免图像上细节信息丢失。数据的存储应采用数据冗余方式，包括重复储存、多方存储及冗余编码等多种方式，并制订合理的备份策略以确保数据长期存储的安全性。同时应注意对相关校正、工艺试验及几何尺寸标定时产生的数据的存储。



## 6 X射线计算机辅助成像检测

### 6.1 一般规定

**6.1.1** CR系统从理论上可以广泛使用包括X射线机、Ir192、Co60、粒子加速器等各类现有胶片系统使用的射线源，但目前看X射线的检测效果要好于 $\gamma$ 射线，所以本条规定CR系统应选用X射线，不允许使用其他射线源。

**6.1.2** 本条对检测时机进行了规定。要求按照设计文件和相关规定执行。

### 6.2 检测系统

**6.2.1** 本条规定了计算机辅助成像射线检测系统的基本组成。射线数字成像检测系统以扫描仪和IP为核心，包括硬件与软件两大部分。其中X射线机、专用扫描仪、IP、计算机、系统软件是必不可少的。《无损检测 工业计算机X线摄影储磷成像板—第1部分：系统分类》EN 14784-1：2005中IP系统分类代号为IP  $s/Y$ ，其中 $s$ 代表IP类别， $Y$ 值为系统基本空间分辨率，单位为微米( $\mu\text{m}$ )，其值越低代表系统级别越高。例如IP 2/140表示：EN2类IP，该IP系统最低 $SNR_n$ 为117，系统基本空间分辨率为140 $\mu\text{m}$ （表2）。

表2 IP的分类

EN 14784-1：2005	ASTM E2446-05	最低归一化信噪比 $SNR_n$
IP 1/Y	IP- 特级 /Y	130
IP 2/Y	—	117
IP 3/Y	—	78
IP 4/Y	IP- I /Y	65
IP 5/Y	IP- II /Y	52
IP 6/Y	IP- III /Y	43

**6.2.2** 系统性能测试报告与出厂检验合格证是判定该检测系统是否符合检测规定的重要依据，其中，性能测试报告可由三种途径提供：系统制造商提供、用户自行测试及约请第三方测试。性能测试报告的主要内容包括各组成部分的基本性能测试与成像质量测试。前者可按相应标准或行业通用方法进行测试，后者主要是依据本规范图像质量规定针对具体被检对象进行测试。

**6.2.3** X射线机的选择主要考虑其管电压范围、管电流范围及有效焦点尺寸3个主要参数。被检工件材质与厚度决定了最低管电压而图像灵敏度规定又决定了最高管电压。在相同曝光量规定下，较大的管电流可以缩短曝光时间，提高检测效率。X射线机有效焦点尺寸直接影响了图像总不清晰度，本条根据图像总不清晰度的相关规定及实际透照中几何条件的限制对其允许的最大值做出规定。有效焦点尺寸计算参照相关标准，当焦点在平面两个方向上尺寸不一致时，可取平均值代替。

**6.2.4** 专用激光扫描仪用于完成IP采集的射线成像潜影的提取和数字信号的转换，并负责将提取图像后的IP还原到可重新使用的初始状态，因此还要具有IP擦除功能。一般来说专用扫描仪都是由激光发射器、透镜系统、IP传动系统、光电转换器件、模数转换电路及影像擦除系统几部分组成。数字图像的质量和扫描仪中激光器件、扫描传动系统及光电转换设备都有直接关系，而通过调整这些设备的参数可以调整所获得的图像的信噪比，进而获得所需要的合格的数字图像。

**6.2.5** 计算机的配置应符合相关部件对性能的规定。对于显示器而言，其性能决定了图像的显示效果，直接影响评定人员对图像的观察和识别。其中，高亮度可提高人眼灰度辨识能力，高对比度可呈现更多灰度层次，高分辨率可显示更多图像区域，小像素可增加图像细腻程度，高灰度等级可显示更多的图像细节。

**6.2.6** IP是获得射线图像最为重要的中间介质，其性能决定了系统后期所能获得的图像的相关性能，例如几何不清晰度和信噪比等。因此要根据检测规定选用合适的IP。IP组成结构类似

胶片，其感光速度和荧光材料颗粒直径相关，颗粒约细，涂覆厚度越大，所需的感光时间越长，获得的图像噪声越低，图像清晰度越高。颗粒度越大则所需感光时间越短，噪声则会较大，图像空间分辨率较低。涂覆层的厚度则会影响IP的动态范围，涂覆层越薄的IP其所能吸收的最大能量越少，动态范围相对就会较少。

**6.2.7** 由于IP所用感光材料的特点，其对可见光不敏感，对低能射线（例如散射线）更加敏感，因此需要用金属屏对散射线进行屏蔽。

**6.2.8** 计算机辅助成像射线检测所使用的线型像质计同胶片照相完全相同，因此只需参考胶片照相规定即可。

**6.2.9** 数字图像空间分辨率的测定需要使用双线型像质计，所用的规格型号及规定同X射线数字成像检测规定相同。

**6.2.10** 系统软件是射线数字成像检测系统的核心单元，是保证检测准确性和安全性的重要因素，其中，第1款是为了符合标准对于数字图像规定而必须具备的基本功能，其他部分是对图像处理、分析做出强制或非强制的规定。

### 6.3 系统空间分辨率

本节规定了检测系统分辨率的最低要求及系统分辨率的测定方法与周期。系统分辨率是影响成像质量的关键因素，其值主要由扫描仪、IP自身性能与实际像素尺寸决定，并与扫描仪校正质量、运行环境条件与射线质量相关。因此，需要定期对系统空间分辨率进行测定以确定其是否符合检测规定。推荐将系统分辨率测定图像作为参考图像与相应检测图像同步存储，并在检测报告中记录该值（或有效像素尺寸）。

### 6.4 表面状态

本节规定与胶片照相相同，参见胶片照相部分。

## 6.5 透照布置

本节规定与胶片照相相同，除删除了双胶片技术外，其他参见胶片照相部分。

## 6.6 透照几何条件

本节规定与胶片照相相同，参见胶片照相部分。

## 6.7 曝光参数

**6.7.1** 本条规定 X 射线数字成像检测应选用较低管电压，以保证细小缺陷检出率，并采用传统胶片照相的经验数值，限制了其能使用的最高管电压范围。

**6.7.2** 本条是计算机辅助成像射线检测与胶片照相不同的部分。本条规定的曝光量小于胶片照相，是由于 IP 成像所需射线能量小于胶片成像所需能量，因此曝光量可以减少。通过大量对比实验，只要在焦距 700mm 时曝光量达到  $10\text{mA} \cdot \text{min}$ ，图像灰度、对比灵敏度就完全可以达到标准规定，而曝光量低于该值时，则需要通过调整扫描仪相关参数，才能获得合格的图像。如果操作人员经验不足，参数设置不合适，很有可能获得不合格图像。因此，为了减少人为经验因素的影响，建议在无特殊情况时尽量保证曝光量。

**6.7.3, 6.7.4** 计算机辅助成像射线检测中曝光曲线的意义在于掌握曝光参数对成像质量影响的规律，确定曝光参数的范围，指导工艺试验，因此在该技术应用初期制作曝光曲线是必要的。曝光曲线的制作方法与胶片照相技术中曝光曲线的制作方法相似，具体参见 X 射线数字成像检测的曝光曲线制作方法。

## 6.8 无用射线和散射线的屏蔽

**6.8.2** 在进行小径管透照时，由于边蚀效应对 IP 影响更大，因此为了进一步降低散射线影响，可以对射线机的射出射线束进

行进一步质量优化，通过在射线机出线口加装滤波板，屏蔽无用射线，提高出束质量，降低散射线对于数字图像的影响。

## 6.9 图像分辨率的测定

**6.9.1** 测定图像分辨率以确保其达到本规范第 5.6.2 条的规定是保证图像质量的关键。图像分辨率的测定不需要在每个被检工件上进行，只需要在确定工艺条件或工艺条件改变时进行。图像分辨率的测定图像应作为参考图像与相应检测图像同步保存，并在记录该测定值。

**6.9.2** 双线型像质计的摆放位置应处于一次透照长度范围内图像分辨率最低的位置，即中心位置或端点位置。由于扫描仪成像分为行扫描和列扫描两个方向，扫描速度不同，为提高测量的准确性，双线型像质计应与 IP 的行或列成  $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ，推荐分别采用与行成  $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$  和与列成  $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$  测量图像两个垂直方向的分辨率，当双线型像质计与 IP 的行与列成  $45^{\circ}$  放置时，图像分辨率约下降一半。通常情况下，应置于被检工件的源侧。由可检出的最小缺陷尺寸公式可知，降低图像分辨率并同时提高图像信噪比可以获得相同的效果。因此本条规定可以采用增加图像灵敏度的措施来补偿图像分辨率，即提高线型像质计 1 个丝号，同时降低双线型像质计 1 个丝号，但补偿不得超过 1 个丝号。

## 6.10 图像分辨率

**6.10.1** 扫描仪的扫描步进决定了图像像素的最小尺寸，因此其最小步进的选择不能低于需要达到的图像最低空间分辨率，否则扫描完成的图像的空间分辨率将不能达到标准规定。也就是其步进的最大值不能超过本规范表 6.10.1 的规定。双壁单影透照时，对比灵敏度需要查看的是双壁厚度，也就是透照厚度，而空间几何不清晰度需要查看的是单壁厚度，也就是单壁厚度

允许出现的最小厚度，因此此时应选择单壁厚度替代透照厚度查表。而在小径管双壁双影检测时，由于小径管厚度远大于透照厚度，而对空间几何不清晰度影响最大的是工件表面（源侧）到 IP 距离，而非小径管的壁厚，因此此时需要用管径代替透照厚度选择查表。

**6.10.2** 激光功率决定了扫描对 IP 采集潜影的激发程度，激光功率过小将导致 IP 激发不足，导致图像灰度过低，而随着激光功率的增大，激光光斑面积也会增加，虽然增加了 IP 潜影的激发，但是同时会带来图像噪声的增加，因此需要选择合适的激光功率，即要保证潜影激发量足够同时不能带来过高的噪声。光电采集器件是进行光信号采集的重要器件，其对光十分敏感，因此光噪声对其效果影响极大。光电采集器件的参数决定了信号采集和放大的程度，如果值设置过低，则信号采集和放大都会随之降低，在 IP 潜影激发足够的情况下，低数值的光电采集设备能够产生较高信噪比的数字图像。但是如果 IP 潜影能量不足或激发不足则会造成有效信号的丢失，而光电采集设备数值过高虽可采集照射能量不足或激发不足的 IP 图像，但是形成的图像信噪比相对会低一些。因此光电采集器件参数的设置要根据拍摄条件和激发条件来进行合适的设置，要保证得到的图像的灰度值和对对比度能够符合标准规定。

## 6.11 图像质量

**6.11.1** 焊缝影像的评定范围为焊缝加两侧的热影响区。焊缝热影响区与母材厚度和焊接工艺有关，应根据具体情况确定。本规范规定最低不应低于 5mm。

**6.11.2** 图像灰度范围应在整个灰度范围的 20% ~ 80% 之间，实际检测过程中，为获得更高的图像质量，最低灰度值尽量达到整个灰度范围的 40%。

**6.11.3** 本条规定图像有效评定区域内不应存在干扰缺陷图像识别的伪像。该伪像包括其他物体的遮挡、IP 上有异物及污渍遮

挡等因素造成的不属于焊缝及母材的图像。

**6.11.4** 图像上定位和识别标记影像应显示完整、位置正确且图像信息记录完整无误。对于识别标记采用计算机录入时，也将必要的信息显示于图像之上。

**6.11.5** 本条规定了检测灵敏度的判定标准，与射线检测（胶片法）和 X 射线数字成像检测要求相同。

**6.11.7** 在实际工作中，针对一种检测对象和工艺，经工艺验证数字图像分辨率达到规定后，严格按照工艺文件进行拍摄，可以保证其图像空间分辨率与工艺试验相同，进行检测时可不放置双线型像质计。如数字图像分辨率达不到规定，可以采用提高对比灵敏度进行补偿。

**6.11.8** 归一化信噪比可利用专用软件中的计算工具获得。为了保证获得的数据相对准确，可以采集多点数值后取平均值，采集区域应为评定区域。

**6.11.9** 图像评定时对缺欠类型、位置与大小可直接在图像上标注，并将该图作为评定图像保存，也可以将对应的文字描述与质量等级作为图像信息记录于文件描述字段中，对此不做强制规定。但如果评定过程中进行了图像处理，则必须记录所做的图像处理功能，处理后的图像与原始图像保存在同一个位置，方便核查。

## 6.12 数据存储

本节规定了所需存储的数据与存储介质的类型与规定。其中原始数据指原始检测图像与检测信息。原始检测图像为扫描仪扫描后用软件系统形成的未做任何图像处理的全分辨率图像，应采用无损压缩或不压缩的格式储存，以避免图像细节信息丢失。原始图像应经过加密处理保存，防止被第三方软件打开并进行无痕修改。数据的存储应采用数据冗余方式，包括重复储存，多方存储及冗余编码等多种方式，并制订合理的备份策略以确保数据长期存储的安全性。同时应注意对相关校正、工艺

试验及几何尺寸标定时产生的数据的存储。

## 6.13 质量评定

**6.13.1** 射线数字成像检测与传统的射线胶片照相法检测都属于射线透照成像检测，具有相同的基本原理，其主要区别是成像器件的不同，但获得的客观检测结果和评定方式是基本相同的，对检测结果的质量分级评定仍然可以按照传统射线胶片法进行，因此本规范规定按照本规范第 4.18 节的规定对射线数字成像的检测结果进行质量分级。

**6.13.2** 由于数字图像没有黑度这个参数，因此用灰度值替代黑度。

## 6.14 检测记录和报告

检测报告主要包括工程信息、工件信息、检测设备信息、透照工艺参数、图像评定、人员信息等几个方面的内容，可由计算机自动生成。检测报告应由相应责任人员签字确定并与检测数据同步保存。

## 7 超声检测

### 7.1 超声检测设备

**7.1.1, 7.1.2** 本条规定了超声检测设备的性能指标。推荐采用数字超声检测仪，随着工程量的增大及对检测结果准确度规定的提高，模拟式超声设备无论从效率上还是在检测准确度上都无法满足实际工作的需要，而数字式超声检测设备无论从效率、功能还是技术指标上都有明显的优势。

**7.1.3** 本条规定了超声仪器和探头组合的系统性能规定。

(1) 仪器和探头的组合灵敏度是用检测工件最大声程处有效灵敏度余量不小于 10dB 来表示的。灵敏度余量是指仪器最大输出时（增益、发射强度最大，衰减和抑制为 0），使规定反射体回波达基准高所需提高的增益总量（对模拟超声仪应为衰减的衰减总量）。灵敏度余量大，说明仪器与探头的灵敏度高。灵敏度余量与仪器和探头的综合性能有关，因此又叫仪器与探头的综合灵敏度。

(2) 在荧光屏上区分距离不同的相邻两缺欠的能力称为分辨力。能区分的两缺欠的距离越小，分辨力就越高。分辨力是仪器和探头的综合性能，它有区分连续和断续、密集和分散、单个和多个的本领。分辨力与脉冲宽度有关，脉冲宽度小，发射强度低，分辨力高。

### 7.2 超声探头

**7.2.3** 与 2013 年版规范相比，本条调整了探头前沿选择的管径范围，由原来的 600mm 为界调整为 500mm。规定了探头  $K$  值的选择范围。由于  $60^\circ$  的声束对直角的反射回波较低，易导致

未焊透等缺欠的漏检，本规范不建议检测根部缺欠时使用折射角为  $60^\circ$  的探头。

**7.2.4** 本条为新增条款，规定了对只能单面扫查的焊接接头的探头选择要求。2013 年版规范不允许对只能单面扫查的焊接接头进行检测。

**7.2.7** 小径管探头的接触面应该尽量与管子外表面紧密接触，其边缘与管子外表面的间隙不大于  $0.5\text{mm}$ 。可以通过在管子表面上铺上细砂纸沿轴向轻轻研磨制得，研磨后的探头入射点和  $K$  值应重新测定。

### 7.3 超声试块

本规范删除了 SRB 试块，不再要求根部未焊透与 SRB 试块做比较。此外，出于降低成本、方便现场操作的原因，本规范对于校准试块未限制必须用 SGB 系列试块，也允许采用其他材质、曲率、功能和灵敏度相同的试块，如 CSK-I A 和 CSK-II A 试块，以及本规范第 8 章规定的 SGB-PAUT 试块等均可使用，尽量减少不必要的试块制作费用。

### 7.4 耦合剂

在试块上调节仪器的耦合剂和在现场检测使用的耦合剂尽量为同一种，以保证相同的耦合效果。

### 7.5 距离一波幅曲线

**7.5.1** 选择与实际管道曲率相对应的 SGB 试块制作距离波幅曲线，扫描时基线比例应依据工件厚度和所选探头角度来确定。

**7.5.2** 对于数字超声检测设备来说，距离波幅曲线的制作可以直接在仪器上进行，简单易行，使用方便。

**7.5.3** 超声检测灵敏度不仅受试块和工件表面状态的影响，也与检测人员操作手法相关，力道不同灵敏度不同，因此灵敏度

在一定范围内波动属于正常现象。

**7.5.4** 当距离—波幅曲线处于荧光屏满刻度的 20% 下列时，由于波幅比较低，观察不清，容易漏检。为了防止漏检，必须提高检测灵敏度。因而本条规定在整个检测范围内，曲线应处于荧光屏满刻度的 20% 以上。

## 7.6 系统校准和复核

**7.6.1 ~ 7.6.6** 本节对超声检测系统（包括仪器、探头、设备与探头的组合）的校准和复核提出了明确规定。为了便于本规范使用者开展系统校准和复核工作，本规范将现行行业标准《无损检测 A 型脉冲反射式超声检测系统工作性能测试方法》JB/T 9214 和《超声探伤用探头性能测试方法》JB/T 10062 中对仪器、探头校准和复核的规定直接以附录的型式给出了具体的规定和方法，检测人员只需按照本规范附录中的规定进行操作即可，无须再去查询其他的标准。

**7.6.7** 检测灵敏度复核时，若回波幅度上升超过 2dB 时，则应对上次复核以后的检测结果重新进行评定，评定时要考虑上升分贝 (dB) 数对评定结果的影响，若有缺陷存在时，可剔除灵敏度超过部分的影响。

## 7.7 检测准备

**7.7.2** 探头移动区表面处理应达到的的基本要求是：

(1) 探头在移动区内应能自由移动，从而对对接接头的受检截面做充分扫查。

(2) 探头在移动过程中，不易受到工件表面的磨损，有利于保护探头。

(3) 探头与工件之间有良好的接触，以保证缺欠的检出。

所以，在探头移动区内应清除飞溅、锈蚀及其他附着物，表面无凹坑，且使表面平整、光滑。其表面粗糙度不超过

6.3 $\mu\text{m}$ ，与机制表面相当。

**7.7.3** 本条规定了探头移动区的宽度。探头移动区的宽度应至少符合一次反射法检测时探头前后移动的需要，对于薄壁管可能还会用到二次反射波进行扫查。管道两端预留的管段一般在150mm以上，完全能够符合扫查需要，因此重点是对移动区的清理。

## 7.8 现场检测

**7.8.1** 本条规定了超声扫查的基本方式。“单面双侧”指的是管道外壁被检焊接接头的两侧检测面。在对油气管道焊接接头做超声波检测时，应该分别在焊接接头的两侧各做一次扫查。对于法兰、阀门、回弯头等只有单侧直边的焊接接头允许单面单侧检测，但应按本规范规定采用两种 $K$ 值的探头扫查。

**7.8.2** 检测灵敏度是指经过表面耦合损失修正及其他传输损失修正（如底面反射声能损失修正）后的灵敏度。对于数字超声仪，扫查灵敏度可以直接使用定量线灵敏度，扫查时只要适当的提高增益即可。但对于模拟超声设备需要使用不低于评定线的灵敏度，尤其是当采用直射波、一次反射波或二次反射波对焊接接头进行分段探测时，则应以该段范围内的评定线相应波高作为扫查灵敏度。

**7.8.3** 本条规定了超声检测的扫查速度，并规定每次扫查之间有一定的重叠，重叠部位应从探头压电晶片起始的位置算起，宽度为“探头（压电晶片）垂直于扫查方向尺寸的10%”。

**7.8.4** 本条规定了扫查方式。对于波高低于评定线的反射波信号，可以不予考虑。这是因为这些小信号往往是由小气孔、小夹渣等非危害性小缺欠反射产生的。

对于坡口未熔合、裂纹类平面状缺欠，当声束与缺欠平面大致平行时，回波信号可能很小，也不超过评定线，但是当声束从另一个方向入射，与缺欠平面大致垂直时，回波信号就会

很高。对于这种缺欠信号就应认真分析、评定。

在对管道焊接接头做超声检测时，还应观察管道焊口错边情况。同一厚度和管径的管道对接时，由于管子椭圆度的原因可能会导致焊口存在错边，错边会产生反射信号，因此扫查时应仔细观察，避免误判。

为了探测纵向缺欠，本规范规定了两种扫查方法：锯齿形扫查和矩形扫查。这是对焊接接头进行初步扫查的一般方法。锯齿形扫查适合于直径较大的管道，例如直径大于  $\phi 219\text{mm}$  的管道。对于直径较小的管道，宜采用矩形扫查法。

**7.8.5** 管道焊接中很少出现横向缺欠，只有在焊条失效，焊接过程中焊接接头受到局部加热和冷却，使晶间组织不均而引起膨胀，导致焊接接头和母材连接处产生强大热应力时才有可能出现。因此一般焊接接头不强制要求进行横向缺欠检测，只有在设计文件有明确规定时，或所使用的管材或焊材可能产生横向缺欠时需要进行横向缺欠的扫查。此外，探测横向缺欠时要求探头与焊缝方向平行或成一定角度扫查。在小直径管道上做这种扫查时，耦合效果差，声束传播路径也较为复杂，因此小径管横向缺欠的检测不易实施。

**7.8.7** 本条规定了缺欠最高波幅达到定量线及以上时应在报告上予以记载。缺欠记录的内容包括最高缺欠波幅值，缺欠在焊接接头中的位置，以及缺欠指示长度。

**7.8.8** 本条对缺欠位置确定和标记提出了规定。在标记缺欠位置时通用的做法是在管道环向焊接接头的最上端零点位置（管道圆周的水平部位中心）作为起始零点，面对介质流动的方向顺时针从小到大进行定位和标记。

**7.8.9** 在缺欠的多个部位可能都有比较强烈的反射波（即有多个高点），此时应寻找最高反射波，依此来判断缺欠的在波幅曲线图上所处的区域，并记录最高反射波的位置、波幅、水平位置和深度位置等数据。

**7.8.10** 圆形缺欠一般只有一个反射波高点，而条形缺欠可能有

多个反射波高点，本规范规定对只有一个反射波高点的缺欠采用 6dB 法测其指示长度，而对于有多个高点的缺欠则使用端点 dB 法测量指示长度，两者是有区别的。

**7.8.11** 本规范对超过评定线但处在距离波幅曲线 I 区的反射信号不进行评定，但在怀疑该信号可能是裂纹缺欠时则应加以关注，并采取使用不同  $K$  值探头、改变扫查面等方式判断其是否为裂纹缺欠，必要时可以采用射线检测辅助判断。

## 7.9 质量评定

**7.9.1** 超声检测对缺欠存在放大现象，点状缺欠可能会产生远大于本身直径或长度的测量尺寸，对于指示长度小于 10mm 的指示按 5mm 计算有利于减少不必要的返修。

**7.9.2** 本条为新增条款，规定位于同一直线上的两个缺欠评定时应考虑相关性。同一直线的定义可参考本规范第 4.18.2 条的规定。

**7.9.4** 本规范将缺欠的质量分级与射线检测的质量分级进行了统一，参考了 *Welding of pipelines and related facilities* API Std 1104 的规定，同时结合了国内工程中的经验，调整了表面缺欠的允许长度。对焊接接头的质量分级首先应判断缺欠的性质，被判定为裂纹类危害性缺欠的应评为 IV 级；其次根据反射波幅度，幅度达到波幅曲线 III 区的应判为 IV 级；最后对反射波幅位于 II 区的缺欠根据长度进行级别划分。

对于反射信号是否具有裂纹特征，可以结合如下裂纹类缺欠的动态波形特征进行判断：

(1) 裂纹类缺欠的回波动态波型 a：

探头在各个不同的位置检测缺欠时，荧光屏上均呈一个参差不齐的回波。探头移动时，回波幅度显示很不规则的起伏态 ( $\pm 6\text{dB}$ )。图 2 表示声束接近垂直入射，由裂纹类缺欠所产生的波形。

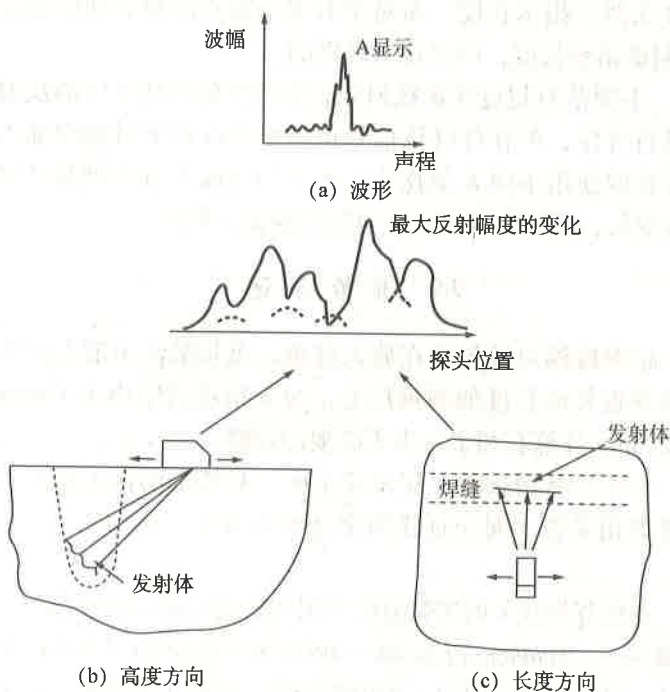


图 2 接近垂直入射时裂纹类缺欠的回波动态波形

(2) 裂纹类缺欠的回波动态波型 b :

探头在各个不同的位置检测缺欠时，荧光屏上显示脉冲包络呈钟形的一系列连续信号（有很多小波峰）。探头移动时，每个小波峰也在脉冲包络中移动，波幅由零逐渐升到最大值，然后波幅又下降到零，信号波幅起伏较大（ $\pm 6\text{dB}$ ）。图 3 表示声束倾斜入射时，由裂纹类缺欠所产生的动态波形。

对于判定为未焊透缺欠的反射波，当波幅达到Ⅲ区时直接评为Ⅳ级，当波幅位于Ⅲ区以下时，按本规范表 7.9.4 进行评定。

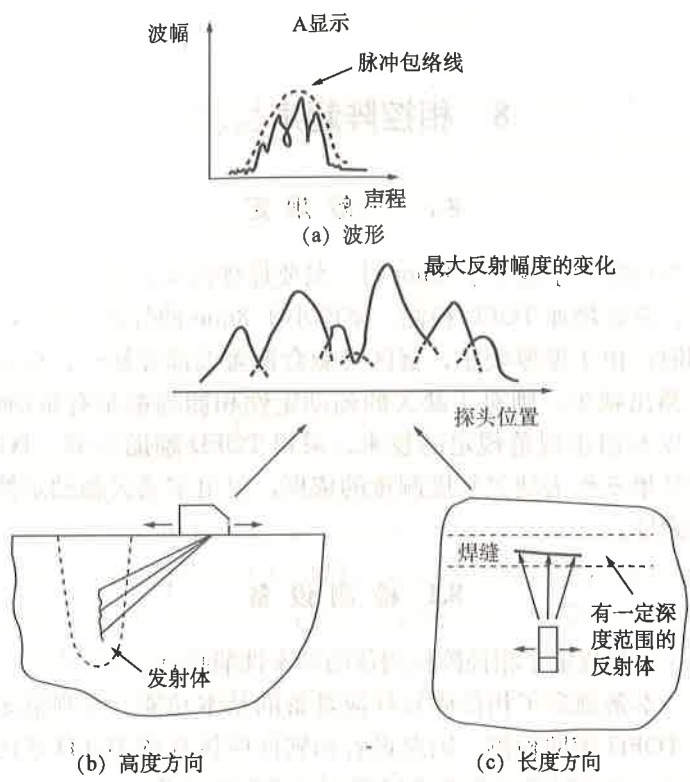


图3 倾斜入射时裂纹类缺欠的回波动态波形

## 8 相控阵超声检测

### 8.1 一般规定

当壁厚大于或等于 8mm 时，只要焊接接头具备双面扫查的条件，应该增加 TOFD 检测，壁厚小于 8mm 的焊缝采用 TOFD 检测时，由于壁厚较小，盲区可能会覆盖大部分缺欠，但只要能检测出缺欠，则对于缺欠的辅助定性和测高都是有帮助的。也可以参照本规范规定的技术，采用 TOFD 辅助检测。TOFD 检测结果不作为缺欠长度测量的依据，仅用于缺欠辅助定性和高度测量。

### 8.2 检测设备

**8.2.2** 本条规定了相控阵检测仪的基本性能指标。

**8.2.3** 本条规定了相控阵软件应具备的基本功能。本规范规定采用 TOFD 辅助检测，因此设备和软件应该具备 TOFD 视图显示功能，检测时 TOFD 和 PAUT 尽可能同步实施。

**8.2.4** 相控阵探头是 PAUT 检测的重要保证，因此探头的性能和指标要符合一定的规定，应该定期对探头的性能进行测试。相控阵探头应与检测面紧密接触，探头楔块与被检工件接触面间隙不应大于 0.5mm，这个间隙是指楔块与被检工件间最大的间隙。因此检测时应选择合适尺寸的楔块，或者对楔块进行研磨，使其曲率与管道曲率保持一致。

**8.2.5** TOFD 检测应尽可能采用专用的窄脉冲宽频带 TOFD 探头，频率合适时也可采用相控阵探头做 TOFD 检测。

**8.2.6** 实践证明，采用带轨道（导轨）的自动扫查装置得到的扫查图效果要明显好于不带轨道的手动扫查装置，更加容易控

制探头与焊缝中心线的偏移，耦合效果也较好，因此应尽可能采用带轨道的自动扫查装置。

**8.2.8** 超声检测设备和探头可由使用单位自己校准，但应具备相应的校准设施，并且制订校准程序。但 PAUT 设备比较复杂，对于水平线性和垂直线性的校准推荐送到有能力的机构进行，也可由设备生产厂商实施。

## 8.3 试 块

**8.3.1** 相控阵检测常用的试块包括校准试块和模拟试块。校准试块包含设备和探头性能测试及灵敏度校准功能；模拟试块带有焊缝和人工反射体或焊接缺欠，用于工艺验证。

**8.3.2** 本规范提供了相控阵检测专用的校准试块（含测试和对比试块功能）SGB-PA 试块，其型式与 SGB 试块相同，在尺寸上有差异，也可代替 SGB 试块。对于仪器的校准和性能测试，本规范未强制规定必须采用某种类型的试块，只要是功能相同、材质相近的试块均可使用，灵敏度校准也可采用其他与 SGB-PA 试块材质相同、曲率符合规定的  $\phi 2\text{mm}$  长横孔试块。

**8.3.3** 本条对模拟试块的作用、材质、表面状态及坡口型式进行了规定。模拟试块的坡口型式应该为同一种类型，角度允许存在  $5^\circ$  的差异。

**8.3.4** 模拟试块的厚度允许一定的覆盖范围，试块与管道壁厚两者间最大差值不大于  $5\text{mm}$ ，实际使用中应尽可能使用等壁厚试块，或者用厚壁试块覆盖薄壁管道。

**8.3.5** 模拟试块的反射体的设置主要考虑两方面因素：一是能够验证检测范围，包括厚度范围和焊接接头宽度范围；二是对主要缺欠的检出能力。因此，设计试块时反射体的布局应覆盖焊接接头厚度的上中下三层，宽度方向应覆盖热影响区。本规范中规定的反射体是基本数量，实际应用时可根据需要增加反射体或缺欠，也可附加一些用于其他功能验证的反射体，比如平底孔或者长横孔等。对于长横孔和条渣的设置，能设置长横

孔时应首先设置长横孔，受壁厚和曲率影响无法加工长横孔时可设置条渣。

## 8.5 检测设置

**8.5.1** 具备双侧扫查的焊接接头相控阵探头尽可能对称设置，便于缺欠的评定。

**8.5.2** 激发孔径可以简单理解为每次激发的晶片数量，本规范从小壁厚焊缝考虑，要求单次激发的晶片数不少于8个，实际应用时根据壁厚不同尽可能用较大的晶片数。

**8.5.3** 扫查方式包括两个方面，一个是电子扫描方式，包括扇扫描和线扫描。另一个是机械运动（探头移动）的方式，包括沿线扫查和锯齿形扫查。管道 PAUT 检测一般采用扇扫描 + 沿线扫查或者线扫描 + 沿线扫查的方式。工艺验证是衡量检测工艺是否到达预期效果的主要方式，如果工艺验证无法达到预期效果，可以采用扇扫描 + 线扫描 + 沿线扫查的组合扫查方式。

**8.5.4** 扇扫描的校准和设置包括三个方面，角度修正（ACG 修正）、声程修正（TCG 修正）和灵敏度调试。角度修正通常采用半圆弧进行，将所有角度的声束回波高度均调整到等量高（一般为 80%）即完成修正。声程修正一般选择一定深度的长横孔，将不同声束对长横孔的回波调整到等量高度（一般为 80%），即完成声程修正。灵敏度调试一般采用 TCG 曲线的方式，将不同深度长横孔的回波高度均调整到等量高度（一般为 80%），作为扫查灵敏度。

**8.5.5** 线扫描设置和校准包括声程修正和灵敏度调试，不需要进行角度修正。本规范未限定扇扫描及线扫描的校准和设置必须采用某种试块，允许采用材质相同或相近，功能和灵敏度相同的等效试块。

**8.5.7** 本条规定了 PAUT 灵敏度设置和校准，以及表面耦合的补偿。灵敏度设置可采用 SGB-PA 试块，也可采用其他材质相同，曲率相同的  $\phi 2\text{mm}$  长横孔试块。TCG 曲线可以设置一条线

的方式，将不同深度  $\phi 2\text{mm}$  长横孔的回波高度调整到 80% 波高（误差为  $\pm 5\%$ ），再增加 2dB 作为检测灵敏度。调整后实际相当于  $\phi 2\text{mm}+2\text{dB}$  的灵敏度。

**8.5.8** 检测不等厚焊口时应保证扫查范围覆盖整个焊接接头，包括厚壁侧焊接接头，因此可按照两侧的壁厚分别设置，也可以均按照厚壁侧进行设置。

**8.5.9** 本条规定了 TOFD 通道的设置和校准规定。TOFD 的主要作用是用来辅助 PAUT 定性，以及缺欠自身高度的测量，因此本规范对 TOFD 的技术规定不是十分详细。TOFD 技术中有关评定方法、缺欠测量方法等可参考现行行业标准《承压设备无损检测 第 10 部分：衍射时差法超声检测》NB/T 47013.10 的有关规定。

**8.5.10** 本条规定了耦合监视通道的设置要求，规定可以采用零度垂直入射波束来监视耦合效果，耦合监视阈值设置为 40% 波高。除耦合监视通道外，还可以通过 C 扫描和 B 扫描观察耦合效果。

**8.5.14** 对于灵敏度、声程的偏离，如果软件具备纠正功能，本规范允许采用软件进行纠正，以充分利用软件的功能，减少返工；若软件不具备相应的功能，则应调整后重新检测。

## 8.6 检测工艺验证

检测工艺验证是检验检测工艺及其执行正确性的重要环节，本规范要求模拟试块上进行验证。验证结果符合本规范规定的，认为检测工艺可行，否则应修改工艺重新进行工艺验证。

## 8.7 现场检测

**8.7.1** 导向装置一般指轨道等能保证扫查装置沿直线行走的装置。导向装置能保证探头距焊接接头中心线的距离不发生较大的偏移，因此应尽可能采用导向装置。

**8.7.5** 对于只有单侧直边的焊缝只能采用单个探头在焊缝一侧进行扫查，按照本规范第 8.5.3 条的要求还应该采用一次角度差别较大的扫查。对于 PAUT 检测，可以采取增加一次线扫描的方式，采用一次波补充扫查；或者增加一次扇扫描方式，采用一次波补充扫查。

## 8.8 扫查数据质量

**8.8.2** 扫查数据质量是保证完整、正确检测出缺欠的基本条件。数据质量指标主要包括焊缝长度的完整性、检测区域的覆盖、数据丢失及耦合不良等，不符合本规范规定时应重新设置和检测。本规范规定单个耦合不良长度不得超过 5mm，主要考虑标准将点状缺欠最小值规定为 5mm。为防止最小点状缺欠漏检，将允许的最大单个耦合不良的长度规定为最大 5mm。

**8.8.3** 当探头距焊缝中心线的距离偏移大于 1mm 时，软件具备步进偏移调整功能时，可采用软件进行调整，但应保证检测范围覆盖整个焊接接头，否则应重新扫查。

**8.8.4** 制管焊缝部位或者扫查面状态较差的部位，尽管经过打磨修正仍然会对扫查图质量造成不良影响，尤其是 TOFD 扫查时往往会降低直通波的幅度。本规范从实际情况出发，允许特殊情况下相应焊缝部位 TOFD 直通波的幅度可以降低。

## 8.9 缺欠的测量

**8.9.1** 本条规定了缺欠测量和记录的几个指标，包括纵向位置、回波幅度、缺欠自身高度及长度等。

**8.9.2** 本条规定了缺欠最大回波高度的测量方法。扇扫描时，找到缺欠中不同角度的 A 扫描最高回波作为该缺欠的波幅。线形扫描时，找到不同声束中缺欠最高回波波幅作为该缺欠的波幅。

**8.9.3** 采用端点 6dB 法测量缺欠长度时，对于连续缺欠，两个

端点之间的长度均应计算为缺欠的长度，对于端点之间有断开的缺欠按累计长度计算和评定。

**8.9.4** 采用 TOFD 辅助检测时，缺欠高度采用 TOFD 通道测量。未采用 TOFD 辅助检测，或 TOFD 上未对应发现缺欠，或虽然发现但无法测量时，不再测量缺欠高度，可按照波幅高度对缺欠进行评判。本规范未采用 PAUT 测量缺欠高度，是因为 PAUT 对缺欠高度测量值比实际值要高出很多，常常会导致较小高度的缺欠因测量高度超标而返修。

## 8.10 质量评定

**8.10.1** 首先应结合相控阵技术和 TOFD 技术对缺欠进行定性，定性内容包括缺欠的性质（种类）、缺欠的形状（条形缺欠或点状缺欠），再根据缺欠性质开展下一步评定工作。

**8.10.2** 本规范规定，指示长度小于或等于 10mm 的、只有一个最高回波的缺欠，评定为点状缺欠，点状缺欠不需要测量长度。长度大于 10mm 的非裂纹性缺欠评定为线状缺欠，线状缺欠需要测量长度、高度及最高回波。

**8.10.3** 最大回波幅值低于满屏高度 20% 的非危害性缺欠可不予记录，但如果回波低于 20% 的缺欠通过 B 扫描、A 扫描和 TOFD 通道判断有裂纹的特征时应记录和评定。

**8.10.4** 相邻两个线状缺欠在一条直线上时，且其间距小于较小的缺欠长度时，应作为一个缺欠处理，以两缺欠长度之和作为其指示长度（不考虑间距），当有第三个缺欠时应与相邻的缺欠进行比较，不与前两缺欠之和比较。

**8.10.5** 本规范规定了缺欠的分级，其中点状缺欠通过高度进行分级，高度大于  $1/2T$  或 3mm 的直接评为 IV 级，否则评为 II 级，无法测高时按照回波幅度进行评定，回波幅度超过 80% 的直接评为 IV 级。线状缺欠分为内表面缺欠和埋藏缺欠，通过回波高度、自身高度和长度三个指标进行评定，其允许的尺寸水平与

射线检测标准相当。

**8.10.6** 在焊缝 300mm 范围内，两个及两个以上的线状缺欠；在焊缝深度方向上的间距（以缺欠的最近距离计算）小于 6mm 时，应对这些缺欠累计评定。出现表面缺欠和埋藏缺欠累计评定时，按照埋藏缺欠各级别的允许累计长度进行级别评定。

（注：在射线检测中，对埋藏缺欠的评定，应按 GB 11345 中关于埋藏缺欠评定的规定进行。）

（注：在射线检测中，对表面缺欠的评定，应按 GB 11345 中关于表面缺欠评定的规定进行。）

### 8.11 缺陷的修复

8.11.1 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

8.11.2 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

8.11.3 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

8.11.4 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

8.11.5 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

8.11.6 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

8.11.7 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

8.11.8 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

8.11.9 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

8.11.10 凡在射线检测中发现的缺陷，应根据缺陷的性质、大小、位置、数量、分布等情况，按照 GB 11345 中关于缺陷修复的规定进行修复。

## 9 磁粉检测

本章内容和指标与 2013 年版规范保持一致。

## 10 渗透检测

本章内容与 2013 年版规范保持一致。

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 3323.1—2019 焊缝无损检测 射线检测 第1部分：X和伽马射线的胶片技术
- [2] NB/T 47013 承压设备无损检测
- [3] ISO 17636-2 焊缝的无损检测 放射线检验 第2部分：带数字探测器的X射线和 $\gamma$ 射线技术
- [4] API Std 1104 *Welding of pipelines and related facilities*
- [5] ASTM E2597 数字探测器阵列品质鉴定特性的标准实施规程
- [6] ASTM E2698 利用数字探测器阵列进行射线照相学检查的标准实施规程
- [7] ASTM E2339 无损检测数字和传输标准实施规程
- [8] EN 12543 *Non-destructive testing—Characteristics of focal spot in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing*
- [9] EN 14784-1 ; 2005 无损检测 工业计算机X射线摄影储磷成像板 第1部分：系统分类

中华人民共和国  
石油天然气行业标准  
石油天然气钢质管道无损检测  
SY/T 4109—2020

\*

石油工业出版社出版  
(北京安定门外安华里二区一号楼)  
北京中石油彩色印刷有限责任公司排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

850×1168 毫米 32 开本 7.375 印张 223 千字 印 1—1000  
2021 年 1 月北京第 1 版 2021 年 1 月北京第 1 次印刷  
书号：155021·8196 定价：106.00 元  
版权专有 不得翻印