

ICS 77.040.20

H 26

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 47013.11—2015

承压设备无损检测 第 11 部分：X 射线数字成像检测

Nondestructive testing of pressure equipments—
Part 11: Standard practice for X-ray digital radiography

2015-04-02 发布

2015-09-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	404
1 范围	405
2 规范性引用文件	405
3 术语和定义	405
4 一般要求	407
5 检测方法	409
6 图像质量及评定	413
7 检测结果评定和质量分级（验收）	418
8 图像保存与存储	419
9 检测记录和报告	419
附录 A（规范性附录） 系统分辨率核查方法	420
附录 B（资料性附录） 典型透照方式	421
附录 C（规范性附录） 双线型像质计的识别	425
附录 D（规范性附录） 归一化信噪比测试方法	426
附录 E（资料性附录） 检测报告格式	427

前 言

本标准 NB/T 47013《承压设备无损检测》分为以下 13 个部分：

- 第 1 部分：通用要求；
- 第 2 部分：射线检测；
- 第 3 部分：超声检测；
- 第 4 部分：磁粉检测；
- 第 5 部分：渗透检测；
- 第 6 部分：涡流检测；
- 第 7 部分：目视检测；
- 第 8 部分：泄漏检测；
- 第 9 部分：声发射检测；
- 第 10 部分：衍射时差法超声检测；
- 第 11 部分：X 射线数字成像检测；
- 第 12 部分：漏磁检测；
- 第 13 部分：脉冲涡流检测。

本部分为 NB/T 47013 的第 11 部分：X 射线数字成像检测。

本部分按 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本部分起草单位：中国特种设备检测研究院、广东盈泉钢制品有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、国家质量监督检验检疫总局特种设备安全监察局、中北大学、北京航空航天大学、四川瑞迪射线数字影像技术有限责任公司、国家 X 射线数字化成像仪器中心、四川川锅锅炉有限责任公司、北京嘉盛国安科技有限公司，成都华宇检测科技有限公司。

本部分主要起草人：梁丽红、林树青、丁克勤、曾祥照、强天鹏、郑晖、陈光、王笑梅、修长征、韩焱、傅健、向前、陈浩、颜春松、帅家盛、唐良明。

本部分为首次制定。

承压设备无损检测

第 11 部分：X 射线数字成像检测

1 范围

1.1 NB/T 47013 的本部分规定了承压设备金属材料受压元件的熔化焊焊接接头的 X 射线数字成像检测技术和质量分级要求。

1.2 本部分适用于承压设备受压元件的制造、安装、在用检测中的焊接接头的 X 射线数字成像检测。用于制作焊接接头的金属材料包括钢、铜及铜合金、铝及铝合金、钛及钛合金、镍及镍合金。

1.3 本部分适用的成像器件为数字探测器；适用的 X 射线机最高管电压不超过 600kV。

1.4 承压设备的有关支承件和结构件的焊接接头的 X 射线数字成像检测，可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- | | |
|--------------|---------------------------------------|
| GB 18871 | 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 |
| GB/T 23901.1 | 无损检测 射线照相底片像质 第 1 部分：线型像质计 像质指数的测定 |
| GB/T 23901.5 | 无损检测 射线照相底片像质 第 5 部分：双线型像质计 图像不清晰度的测定 |
| GB/T 23903 | 射线图像分辨力测试计 |
| GBZ 117 | 工业 X 射线探伤放射卫生防护标准 |
| NB/T 47013.1 | 承压设备无损检测 第 1 部分：通用要求 |
| NB/T 47013.2 | 承压设备无损检测 第 2 部分：射线检测 |

3 术语和定义

NB/T 47013.1 界定的以及下列术语和定义适用于本部分。

3.1

像素 pixel

X 射线数字图像的基本组成单元。X 射线数字图像都是由点组成的，组成图像的每一个点称为像素。

3.2

图像灵敏度 image sensitivity

检测系统所能发现的被检工件图像中最小细节的能力。

3.3

分辨率 resolution ratio

单位长度上可分辨两个相邻细节间最小距离的能力，用 lp/mm 表示。

3.4

分辨力 resolution

两个相邻细节间最小距离的分辨能力。

3.5

系统分辨率 system resolution ratio

在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单位长度上两个相邻细节间最小距离的能力。反映了检测系统本身的特性，也称为系统基本空间分辨率。

3.6

图像分辨率 image resolution ratio

检测系统所能分辨的被检工件图像中单位长度上两个相邻细节间最小距离的能力，也称为图像空间分辨率。

3.7

数字探测器 digital detector

把X射线光子转换成数字信号电子装置，以下简称为探测器。

3.8

灰度等级 gray level

对X射线数字成像系统获得的黑白图像明暗程度的定量描述，它由系统A/D转换器（模/数转换器）的位数决定。A/D转换器的位数越高，灰度等级越高。例如，A/D转换器为12bit时，采集的灰度等级为 $2^{12}=4096$ 。

3.9

暗场图像 dark image

在无X射线透照情况下输出的图像，也称为暗电流图像。

3.10

动态范围 dynamic range

在线性输出范围内，X射线数字成像系统最大灰度值与暗场图像标准差的比值。

3.11

响应不一致性 non-uniform responsivity

探测器固有的特性，在均匀透照均质工件或空屏的条件下，由于探测器对X射线响应的不一致，致使输出图像亮度呈现非均匀性的条纹。

3.12

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。亦指校正后的图像，其输出值远离图像均值的异常点。坏像素的存在形式有：单点、两个相邻点和多个相邻点、几行或几列。

3.13

信噪比 signal noise ratio

图像感兴趣区域的信号平均值与信号标准差之比。

3.14

静态成像 static imaging

检测系统与被检工件无相对连续运动时的X射线数字成像，成像结果为单幅图像。

3.15

连续成像 **dynamic imaging**

检测系统与被检工件在相对连续运动状态下的 X 射线数字成像，成像结果为序列图像。

3.16

极限分辨率 **limiting resolution**

在无物理（几何）放大的条件下，检测系统的最大分辨率。

3.17

数字图像处理 **digital image processing**

提高 X 射线数字图像的对比度、分辨率和细节识别能力的数字变换方法。

3.18

非平面工件 **non planar object**

本部分中描述的除平面工件外的其他工件。

4 一般要求

4.1 检测人员

4.1.1 从事 X 射线数字成像检测的人员，上岗前应进行辐射安全知识培训，并取得《放射工作人员证》。

4.1.2 从事 X 射线数字成像检测的人员，应取得特种设备无损检测 X 射线数字成像检测专项资格，方可进行相应项目的检测工作。

4.1.3 检测人员应了解与 X 射线数字成像技术相关的计算机知识、数字图像处理知识，掌握相应的计算机基本操作方法。

4.2 检测系统

4.2.1 X 射线机

4.2.1.1 应根据被检工件的厚度、材质和焦距大小，选择 X 射线机的能量范围。

4.2.1.2 焦点的选择应与所采用的探测器相匹配。

4.2.2 探测器系统

4.2.2.1 包含面阵列探测器、线阵列探测器及其配件等。

4.2.2.2 动态范围应不小于 2 000 : 1。

4.2.2.3 A/D 转换位数不小于 12bit。

4.2.2.4 探测器供应商应提供探测器的坏像素表和坏像素校正方法。

4.2.2.5 应按照具体的探测器系统规定的图像校正方法，对探测器进行校正。

4.2.3 计算机系统

计算机系统的基本配置依据采用的 X 射线数字成像部件对性能和速度的要求而确定。宜配备不低于 512MB 容量的内存，不低于 40GB 的硬盘，高亮度高分辨率显示器以及刻录机、网卡等。

显示器应满足如下最低要求：

- a) 亮度不低于 250cd/m²；
- b) 灰度等级不小于 8bit；
- c) 图像显示分辨率不低于 1 024 × 768；
- d) 显示器像素点距不高于 0.3mm。

4.2.4 系统软件要求

4.2.4.1 系统软件是 X 射线数字成像系统的核心单元，完成图像采集、图像处理、缺陷几何尺寸测量、缺陷标注、图像存储、辅助评定和检测报告打印及其它辅助功能，是保证检测准确性和安全性的重要因素。

4.2.4.2 应包含叠加降噪、改变窗宽窗位和对比度增强等基本数字图像处理功能。

4.2.4.3 应包括信噪比测量、缺陷标记、尺寸测量、尺寸标定功能。

4.2.4.4 宜具有不小于 4 倍的放大功能。

4.2.4.5 应具备采集图像的相关信息的浏览和查找功能。

4.2.4.6 可根据评定结果生成检测报告。

4.2.4.7 应存储原始图像，观察、评定时允许进行相关处理。

4.2.4.8 对原始图像采用滤波等图像处理时，应经合同双方协商同意，并有相关文档记录。

4.2.4.9 其他特殊要求应由合同双方协商确定。

4.2.5 检测工装

4.2.5.1 应根据被检工件进行设计，并满足检测要求。

4.2.5.2 应根据被检工件的重量，选择检测工装的承载能力。

4.2.5.3 宜有平移、旋转、速度连续可调等功能，并保证较高运转精度和稳定性。

4.2.5.4 检测工装的运动应与探测器的数据采集同步。

4.2.5.5 对于在用设备的检测，应根据现场的环境和检测工况，合理固定检测仪器和设备。

4.2.6 检测系统验收与核查

4.2.6.1 应提供检测系统性能测试证明文件。在第一次使用前应进行检测系统性能验收，验收合格后方可使用。

4.2.6.2 在如下情况下应进行核查，核查主要指测试系统分辨率，核查方法按附录 A 执行：

a) 检测系统有改变时；

b) 正常使用条件下，每 3 个月应至少核查一次；

c) 在系统停止使用一个月后重新使用时。

4.3 检测技术等级

本部分规定的 X 射线检测技术等级分为：AB 级——中灵敏度技术；B 级——高灵敏度技术。

4.4 检测工艺文件

4.4.1 检测工艺文件包括工艺规程和操作指导书。

4.4.2 工艺规程的内容除满足 NB/T 47013.1 的要求外，还应规定表 1 中所列相关因素的具体范围或要求；如相关因素的变化超出规定时，应重新编制或修订工艺规程。

表 1 工艺规程涉及的相关因素

序号	相关因素
1	被检测工件的类型、规格（形状、尺寸、壁厚和材质）
2	依据的法规、标准
3	检测设备器材以及校准、核查、运行核查或检查的要求
4	检测工艺（透照方式、透照参数、几何参数、运动参数等）
5	检测技术
6	工艺试验报告
7	缺陷评定与质量分级

4.4.3 应根据工艺规程的内容以及被检工件的检测要求编制操作指导书，其内容除满足 NB/T 47013.1 的要求外，至少还应包括：

- a) 检测技术等级；
- b) 检测设备器材（包括：X 射线机（规格）、探测器（规格）、滤波板、像质计、标记、检测工装、计算机、显示器、系统软件等）；
- c) 检测工艺参数（包括：管电压、曝光量、透照几何参数、滤波板材质与厚度、检测设备与检测区域的相对位置、被检工件运动形式和速度、透照方式等）；
- d) 检测标识规定；
- e) 检测操作程序；
- f) 检测记录；
- g) 图像评定（包括：灰度、信噪比、图像分辨率、图像灵敏度、标记等）；
- h) 检测质量的评级。

4.4.4 操作指导书的工艺验证

4.4.4.1 操作指导书在首次应用前应进行工艺验证。

4.4.4.2 验证的方式可以采用像质计、模拟试块或实际检测对象进行。

4.4.4.3 验证可通过专门的透照试验进行，或以产品的第一批图像作为验证依据。在这两种情况下，作为依据的验证图像均应做出标识。

4.5 安全要求

4.5.1 检测环境应满足系统运行对环境（温度、湿度、接地、电磁辐射、振动等）的要求。

4.5.2 X 射线辐射防护条件应符合 GB 18871 和 GBZ 117 的有关规定。

4.5.3 现场进行 X 射线数字成像检测时，应按 GBZ 117 的规定划定控制区和管理区，设置警告标志，检测人员应佩戴个人剂量计，并携带剂量报警仪。

5 检测方法

5.1 透照方式

5.1.1 应根据被检工件结构特点和技术条件的要求选择适宜的透照方式。优先选择单壁透照方式，在单壁透照不能实施时才允许采用双壁透照方式。典型的透照方式参见附录 B。

5.1.2 采用连续成像方式采集图像时，应保证被检工件的运动速度与图像采集帧频相匹配，同时应保证 X 射线主射束垂直（或对准）透照被检工件并到达探测器的有效成像区域。

5.1.3 采用静态成像方式采集图像时，图像采集的重叠区域长度应不小于 10mm。

5.1.4 小径管采用双壁双影透照布置，当同时满足下列条件时应采用倾斜透照方式椭圆成像：

- a) T （壁厚） $\leq 8\text{mm}$ ；
- b) g （焊缝宽度） $\leq D_0/4$ 。

其中， D_0 ——管子外径。

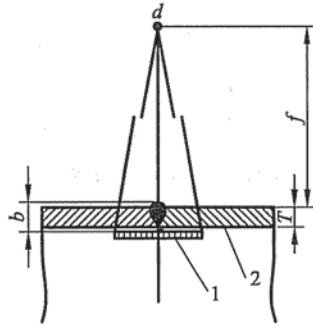
应控制图像的开口宽度（上下焊缝投影最大间距）在 1 倍焊缝宽度左右。不满足上述条件或椭圆成像有困难时，可采用垂直透照方式重叠成像。

5.2 成像几何参数的选择

5.2.1 所选用的 X 射线机至被检工件表面的距离 f 应满足下述要求：

- a) AB 级射线数字成像检测技术： $f \geq 10d \cdot b^{2/3}$ ；
- b) B 级射线数字成像检测技术： $f \geq 15d \cdot b^{2/3}$ 。

图 1 为成像几何透照示意图，有效焦点尺寸 d 按 NB/T 47013.2 相关规定计算。 b 为被检工件表面到探测器的距离。



说明：
1——探测器；
2——被检工件。

图 1 成像几何透照示意图

5.2.2 采用 X 射线机在内中心透照方式，当图像质量符合 6.1.4.1 和 6.1.4.2 的要求时， f 值可以减小，但减小值不应超过规定值的 50%。

5.2.3 采用 X 射线机在内单壁透照方式，当图像质量符合 6.1.4.1 和 6.1.4.2 的要求时， f 值可以减小，但减小值不应超过规定值的 20%。

5.2.4 透照几何参数的估算

理论上，对于给定的检测系统，可由式 (1) 计算最佳放大倍数。

$$M_0 = 1 + \left(\frac{U_c}{d} \right)^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

M_0 ——最佳放大倍数；

d ——焦点尺寸；

U_c ——探测器固有不清晰度（约等于探测器像素大小的 2 倍）。

式 (2) 给出了图像分辨率与透照几何参数之间的关系，对于给定的检测系统和被检工件，可结合实际检测工况，基于式 (2) 选择系统宜采用的透照几何参数。

$$U_r = \frac{1}{M} \sqrt[3]{U_g^3 + U_c^3} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{(d(M-1))^3 + U_c^3} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

M ——放大倍数[计算见式 (3)]；

U_g ——几何不清晰度；

U_r ——应达到的图像分辨力（约等于应分辨的双丝丝径的 2 倍）。

$$M = \frac{F}{f} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

F ——X 射线机至探测器的距离；

f ——X射线机至被检工件表面的距离。

5.3 透照方向

透照时 X 射线束中心应垂直指向透照区中心，必要时可选用有利于发现缺陷的方向透照。

5.4 非平面工件透照次数的确定

5.4.1 小径管环向焊接接头 100%静态成像的透照次数。

5.4.1.1 采用倾斜透照椭圆成像时：

- a) 当 $T/D_o \leq 0.12$ ，相隔 90° 透照 2 次；
- b) 当 $T/D_o > 0.12$ ，相隔 120° 或 60° 透照 3 次。

5.4.1.2 垂直透照重叠成像时，一般应相隔 120° 或 60° 透照 3 次。

5.4.2 由于结构原因不能进行多次透照时，可采用椭圆成像或重叠成像方式透照一次。鉴于透照一次不能实现焊缝全长的 100%检测，此时应采取有效措施扩大缺陷可检出范围，并保证图像评定范围内灰度、信噪比、灵敏度和分辨率满足要求。

5.4.3 对于曲面外径大于 100mm，且小于探测器有效成像尺寸的被检工件，在满足表 2 透照厚度比 K 值规定的前提下，一次透照有效长度不大于被检工件内径，且图像灰度值应满足 6.2.3 的要求。

表 2 不同检测技术等级允许的透照厚度比

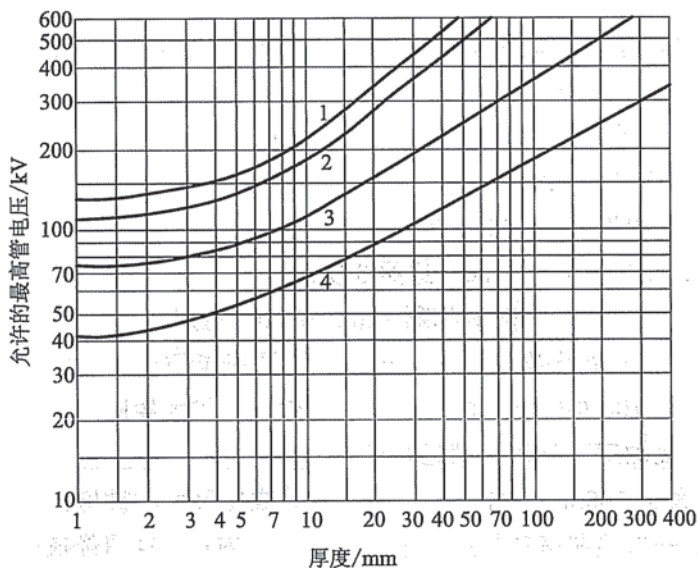
检测技术等级	透照厚度比 K
AB 级	1.2
B 级	1.1

5.5 透照参数的选择

实际检测时应根据采用的 X 射线数字成像系统和被检工件的特点，选择适当的 X 射线能量、曝光量等参数，以满足检测要求。

5.5.1 X 射线能量

应尽量选用较低的管电压。在采用较高管电压时，应保证适当的曝光量。图 2 规定了不同材料、不同透照厚度允许采用的最高管电压。对于不等厚工件在保证图像质量符合本部分的要求下，管电压可适当高于图 2 限定值。



说明:

- 1——铜及铜合金、镍及镍合金；
- 2——钢；
- 3——钛及钛合金；
- 4——铝及铝合金。

图 2 不同透照厚度允许的 X 射线最高透照管电压

5.5.2 曝光量

5.5.2.1 曝光量等于有效曝光时间和管电流的乘积，用 mA·s 表示。

5.5.2.2 可通过增加曝光量提高信噪比、提高图像质量。

5.5.2.3 在满足图像质量、检测速度和检测效率要求前提下，可选择较低的曝光量。

5.5.2.4 在实际检测时，应按照检测速度、检测设备和检测质量的要求，通过协调影响曝光量的参数来选择合适的曝光量。

- a) 面阵列探测器可通过合理选择采集帧频、图像叠加幅数和管电流来控制曝光量；
- b) 线阵列探测器可通过合理选择曝光时间和管电流来控制曝光量。

5.6 标记

5.6.1 透照部位的标记由识别和定位标记组成。

5.6.2 识别标记一般包括产品编号、焊接接头编号、部位编号和透照日期。返修后的透照还应有返修标记，扩大检测比例的透照应有扩大检测标记。识别标记可由计算机写入。

5.6.3 定位标记一般包括中心标记“ \ast ”和搭接标记“ \uparrow ”。中心标记指示透照部位区段的中心位置和分段编号的方向。搭接标记是透照分段标记，一般由适当尺寸的铅制或其他适宜的重金属制数字、拼音字母和符号等构成。当铅制搭接标记用数字或字母表示时，可省去中心标记。

5.6.4 对于连续成像检测，在检测的起始位置做定位标记“ \ast ”，其中“ \rightarrow ”指向检测方向，可利用数字或字母表示分段标记。对环焊缝检测可按顺时针方向用记号笔进行标识；对直焊缝可按左到右方式进行标识，同时应与图像标记匹配。

5.6.5 标记一般应放置在距焊缝边缘至少 5mm 以外的部位，还应符合 NB/T 47013.2 中有关标记的

规定。所有标记的影像不应重叠，且不应有干扰有效评定范围内的影像。

5.7 无用 X 射线和散射线屏蔽

应采用滤波板、准直器（光阑）、铅箔、铅板等适当措施，减少散射线和无用 X 射线。

6 图像质量及评定

6.1 图像质量

6.1.1 一般要求

6.1.1.1 应同时保证图像灵敏度和图像分辨率的要求。

6.1.1.2 测定图像质量的像质计分为线型像质计和双线型像质计。

6.1.1.3 图像灵敏度采用线型像质计进行测定，线型像质计的型号和规格应符合 GB/T 23901.1 的规定。

6.1.1.4 图像分辨率采用双线型像质计进行测定，双线型像质计的型号和规格应符合 GB/T 23901.5 的规定。

6.1.1.5 图像质量验证应在每一种焊接接头的第一次透照时进行或在此之前专门进行工艺验证。验证图像质量的透照布置应摆放线型和双线型两种像质计。

6.1.2 线型像质计

6.1.2.1 线型像质计的放置原则

6.1.2.1.1 单壁单影或双壁双影透照时，放置在 X 射线机侧；

6.1.2.1.2 双壁单影透照时，放置在探测器侧。

6.1.2.1.3 当线型像质计放置在探测器侧时，应在适当位置放置铅字“F”作为标记，“F”标记的图像应与像质计的标记同时出现在图像上，且应在检测报告中注明。

6.1.2.2 线型像质计的使用

6.1.2.2.1 线型像质计的金属丝材料应与被检工件的材料相同或相近。在满足图像灵敏度要求的前提下，低密度线型像质计可用于高密度材料的检测。

6.1.2.2.2 线型像质计的材料、材料代码和不同材料线型像质计适用的范围应符合表 3 的规定。

表 3 不同材料线型像质计适用范围

线型像质计材料代号	Fe (钢)	Ni (镍)	Ti (钛)	Al (铝)	Cu (铜)
线型像质计材料	碳素钢	镍-铬合金	工业纯钛	工业纯铝	3号纯铜
适用的材料范围	钢	镍、镍合金	钛、钛合金	铝、铝合金	铜、铜合金

6.1.2.2.3 线型像质计一般应放置在焊接接头的一端，在被检测区长度的 1/4 左右位置，金属丝应横跨焊缝，细丝置于外侧。当一张图像上同时透照同规格同类型的多条焊接接头时，线型像质计应放置在透照区最边缘的焊缝处。

6.1.2.2.4 原则上每张图像上都应有线型像质计的影像。在透照参数和被检工件不变的情况下（如一条焊缝的连续成像），可只在第一幅图像中放置线型像质计。

6.1.2.2.5 小径管可选用通用线型像质计或专用线型像质计，金属丝应横跨焊缝放置。

6.1.2.3 线型像质计的识别

在图像灰度均匀部位（一般是邻近焊缝的母材区）能够清晰地看到长度不小于 10mm 的连续的像质计丝影像时，则该丝认为是可识别的。专用线型像质计至少应能识别两根金属丝。

6.1.3 双线型像质计

6.1.3.1 双线型像质计应放置在探测器侧。

6.1.3.2 双线型像质计的使用

6.1.3.2.1 双线型像质计应放置在被检测区长度的 1/4 左右位置的母材上,金属丝与图像(或探测器)的行或列成较小的夹角(如 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$),且细丝置于外侧。

6.1.3.2.2 原则上每张图像上都应有双线型像质计的影像。在透照参数和检测对象不变的情况下(如一条焊缝的连续成像),可只在第一幅图像中放置双线型像质计,细丝置于外侧。

6.1.3.2.3 若双线型像质计无法放置在规定的位置,应采用表 4 和表 5 中的最小厚度的对比试件代替被检工件,但其图像分辨率不得低于表中的值。

表 4 AB 级像质应达到的图像分辨率

公称厚度 (T) 或透照厚度 (W) 范围/mm	图像分辨率/(lp/mm)	丝号	丝径/mm
> 2 ~ 3.5	6.25	D11	0.08
> 3.5 ~ 5	5.00	D10	0.10
> 5 ~ 10	3.85	D9	0.13
> 10 ~ 25	3.125	D8	0.16
> 25 ~ 55	2.50	D7	0.20
> 55 ~ 150	2.00	D6	0.25
> 150 ~ 250	1.56	D5	0.32
> 250	1.25	D4	0.40

注:对于双壁单影透照方式,应取公称厚度 T 。

表 5 B 级像质应达到的图像分辨率

公称厚度 (T) 或透照厚度 (W) 范围/mm	图像分辨率/(lp/mm)	丝号	丝径/mm
> 2 ~ 4	10.00	D13	0.05
> 4 ~ 8	7.70	D12	0.063
> 8 ~ 12	6.25	D11	0.08
> 12 ~ 40	5.00	D10	0.10
> 40 ~ 120	3.85	D9	0.13
> 120 ~ 200	3.125	D8	0.16
> 200	2.50	D7	0.20

注:对于双壁单影透照方式,应取公称厚度 T 。

6.1.3.3 双线型像质计的识别

双线型像质计的识别方法见附录 C。

6.1.4 图像质量的要求

6.1.4.1 图像灵敏度

按照检测技术等级的要求及采用的透照方式，图像灵敏度应分别符合表 6~8 的规定。对于管子-管板密封焊角焊缝图像灵敏度的要求应按照 NB/T 47013.2 的相关内容执行，强度焊角焊缝的图像灵敏度在采用合适的工艺参数和有效补偿措施的前提下，可参照密封焊的要求执行。

6.1.4.2 图像分辨率

按照检测技术等级的要求，图像分辨率分别满足表 4 和表 5 的规定。

6.1.4.3 补偿原则

如果图像分辨率达不到表 4 或表 5 的规定，可通过提高信噪比来提高图像灵敏度，以补偿由于不清晰度达不到要求而引起的对比度灵敏度降低，信噪比应高于 6.2.4 的要求。例如：对于某一检测系统，检测厚度为 10mm 的工件，要求达到 B 级像质，如果图像质量不能同时达到 W14 和 D11，则达到 W15 和 D10 可提供等效的检测灵敏度。补偿最大不超过 2 个丝号。

6.1.4.4 对于某一检测系统，若给定几何条件和管电压，可通过增加曝光量提高信噪比。

表 6 图像灵敏度值——单壁透照、像质计置于 X 射线机侧

应识别丝号 (丝径/mm)	公称厚度 T /mm	
	AB 级	B 级
W19 (0.050)	—	≤ 1.5
W18 (0.063)	≤ 1.2	$> 1.5 \sim 2.5$
W17 (0.080)	$> 1.2 \sim 2.0$	$> 2.5 \sim 4.0$
W16 (0.100)	$> 2.0 \sim 3.5$	$> 4.0 \sim 6.0$
W15 (0.125)	$> 3.5 \sim 5.0$	$> 6.0 \sim 8.0$
W14 (0.160)	$> 5.0 \sim 7.0$	$> 8.0 \sim 12$
W13 (0.20)	$> 7.0 \sim 10$	$> 12 \sim 20$
W12 (0.25)	$> 10 \sim 15$	$> 20 \sim 30$
W11 (0.32)	$> 15 \sim 25$	$> 30 \sim 35$
W10 (0.40)	$> 25 \sim 32$	$> 35 \sim 45$
W9 (0.50)	$> 32 \sim 40$	$> 45 \sim 65$
W8 (0.63)	$> 40 \sim 55$	$> 65 \sim 120$
W7 (0.80)	$> 55 \sim 85$	$> 120 \sim 200$
W6 (1.00)	$> 85 \sim 150$	$> 200 \sim 350$
W5 (1.25)	$> 150 \sim 250$	> 350
W4 (1.60)	$> 250 \sim 350$	—
W3 (2.00)	> 350	—

注：管或支管外径 ≤ 120 mm 时，管座角焊缝的图像灵敏度值可降低一个等级。

表7 图像灵敏度值——双壁双影透照、像质计置于X射线机侧

应识别丝号(丝径/mm)	透照厚度 W /mm	
	AB级	B级
W19(0.050)	—	≤ 1.5
W18(0.063)	≤ 1.2	$> 1.5 \sim 2.5$
W17(0.080)	$\leq 1.2 \sim 2.0$	$> 2.5 \sim 4.0$
W16(0.100)	$> 2.0 \sim 3.5$	$> 4.0 \sim 6.0$
W15(0.125)	$> 3.5 \sim 5.0$	$> 6.0 \sim 8.0$
W14(0.160)	$> 5.0 \sim 7.0$	$> 8.0 \sim 15$
W13(0.20)	$> 7.0 \sim 12$	$> 15 \sim 25$
W12(0.25)	$> 12 \sim 18$	$> 25 \sim 38$
W11(0.32)	$> 18 \sim 30$	$> 38 \sim 45$
W10(0.40)	$> 30 \sim 40$	$> 45 \sim 55$
W9(0.50)	$> 40 \sim 50$	$> 55 \sim 70$
W8(0.63)	$> 50 \sim 69$	$> 70 \sim 100$
W7(0.80)	$> 60 \sim 85$	$> 100 \sim 170$
W6(1.00)	$> 85 \sim 120$	$> 170 \sim 250$
W5(1.25)	$> 120 \sim 220$	> 250
W4(1.60)	$> 220 \sim 380$	—
W3(2.00)	> 380	—

表8 图像灵敏度值——双壁单影或双壁双影透照、像质计置于探测器侧

应识别丝号(丝径/mm)	透照厚度 W /mm	
	AB级	B级
W19(0.050)	—	≤ 1.5
W18(0.063)	≤ 1.2	$> 1.5 \sim 2.5$
W17(0.080)	$> 1.2 \sim 2.0$	$> 2.5 \sim 4.0$
W16(0.100)	$> 2.0 \sim 3.5$	$> 4.0 \sim 6.0$
W15(0.125)	$> 3.5 \sim 5.0$	$> 6.0 \sim 12$
W14(0.160)	$> 5.0 \sim 10$	$> 12 \sim 18$
W13(0.20)	$> 10 \sim 15$	$> 18 \sim 30$
W12(0.25)	$> 15 \sim 22$	$> 30 \sim 45$
W11(0.32)	$> 22 \sim 38$	$> 45 \sim 55$
W10(0.40)	$> 38 \sim 48$	$> 55 \sim 70$
W9(0.50)	$> 48 \sim 60$	$> 70 \sim 100$

表 8 (续)

应识别丝号 (丝径/mm)	透照厚度 W /mm	
	AB 级	B 级
W8 (0.63)	> 60 ~ 85	> 100 ~ 180
W7 (0.80)	> 85 ~ 125	> 180 ~ 300
W6 (1.00)	> 125 ~ 225	> 300
W5 (1.25)	> 225 ~ 375	—
W4 (1.60)	> 375	—

6.2 图像评定

6.2.1 一般要求

6.2.1.1 图像质量满足规定的要求后,方可进行被检工件质量的等级评定。

6.2.1.2 可通过正像或负像的方式显示。

6.2.1.3 应在光线柔和的环境下观察图像,显示器屏幕应清洁、无明显的光线反射。

6.2.1.4 图像有效评定区域内不应存在干扰缺陷图像识别的伪像。

6.2.2 系统软件要求

系统软件应满足 4.2.4 的要求。

6.2.3 图像灰度范围要求

6.2.3.1 图像有效评定区域内的灰度值应按照相应技术等级控制。具体规定如下:

a) AB 级图像的灰度值应控制在满量程的 20% ~ 80%;

b) B 级图像的灰度值应控制在满量程的 40% ~ 80%。

6.2.3.2 可通过测量图像灰度直方图等方法确定图像灰度分布范围。

6.2.4 信噪比要求

6.2.4.1 应满足表 9 和表 10 对归一化信噪比的最低要求。

6.2.4.2 归一化信噪比测试方法见附录 D。

表 9 归一化信噪比最低要求 (钢、铜、镍、钛及其合金)

管电压范围/kV	透照厚度/mm	归一化信噪比	
		AB 级	B 级
< 50	—	140	210
≥ 50 ~ 150		100	170
≥ 150 ~ 250		100	140
≥ 250 ~ 350	≤ 50	100	140
	> 50	100	100
≥ 350 ~ 600	≤ 50	100	140
	> 50	100	100

表 10 归一化信噪比最低要求（铝及其合金）

管电压范围/kV	归一化信噪比	
	AB 级	B 级
< 150	100	170
≥150 ~ 250	100	140
≥250 ~ 500	100	140

6.2.5 图像存储

6.2.5.1 存储格式宜按照 DICONDE 格式执行。

6.2.5.2 单位代码、工件编号、焊缝编号、透照规格、检测人员代码、识别标记等信息应写入图像文件的描述字段中，这些信息应具备不可更改性。

6.2.5.3 焊缝编号应与图像编号相对应。

6.2.6 缺陷的识别与评定

6.2.6.1 缺陷的识别可采用人工识别或计算机辅助识别方法。

6.2.6.2 缺陷的评定可采用人工评定或计算机辅助评定方法。

6.2.6.3 人工识别可通过系统软件工具对图像进行线性拉伸来改变图像显示的灰度范围，达到人眼识别的最佳效果。

6.2.7 缺陷几何尺寸的测量

应通过系统软件对缺陷的几何尺寸进行测量，测量公式可参考式（4）：

$$S = \delta \times N_s \dots\dots\dots (4)$$

式中：

S ——几何尺寸；

δ ——几何尺寸因子；

N_s ——由计算机测量缺陷图像尺寸得到的像素个数。

在缺陷测量前，可结合实际检测要求，在实际检测条件下，采集已知尺寸试件的 X 射线数字图像对其几何尺寸进行标定，几何尺寸因子的计算参见式（5）：

$$\delta = L/N_i \dots\dots\dots (5)$$

式中：

δ ——几何尺寸因子（mm/pixel）；

L ——标定所用试件的尺寸（mm）；

N_i ——由计算机测量标定用试件图像尺寸得到的像素个数。

6.2.8 缺陷深度的测量

缺陷深度的测量可采用模拟试件，得到不同深度(厚度)与图像灰度的变化规律，由系统软件计算实现。

7 检测结果评定和质量分级（验收）

7.1 承压设备焊接接头焊缝 X 射线数字成像检测的结果评定和质量分级按照 NB/T 47013.2 的规定

执行。

7.2 管子-管板角焊缝的缺陷评定及质量验收按照 NB/T 47013.2 执行。

8 图像保存与存储

8.1 图像保存

8.1.1 图像应存储在硬盘等数字存储介质中，并在只读光盘中存档。

8.1.2 检测图像应备份不少于两份，相应的原始记录和检测报告也应同期保存。

8.1.3 图像保存不少于 8 年，在有效保存期内，图像数据不得丢失和更改。

8.2 存储环境

保存检测图像的光盘或硬盘等数字存储介质应防磁、防潮、防尘、防积压、防划伤。

9 检测记录和报告

9.1 应按照现场操作的实际情况详细记录检测过程的有关信息和数据。X 射线数字成像检测记录除符合 NB/T 47013.1 的规定外，还至少应包括下列内容：

- a) 制造单位、检测单位或委托单位；
- b) 被检工件：坡口型式、焊接方法；
- c) 使用的检测工艺文件编号；
- d) 检测设备：射线机有效焦点尺寸；
- e) 检测规范：检测技术等级、透照布置、像质计、滤波板、射线能量、曝光量或透照时间、射线机与探测器的相对关系、透照几何参数、软件处理方式和条件等；
- f) 图像评定：灰度值、信噪比、图像灵敏度、图像分辨率、缺陷位置和性质；
- g) 检测工艺文件验证情况；
- h) 检测结果及质量分级；
- i) 审核人员及其技术资格；
- j) 其他需要说明或记录的事项。

9.2 应依据检测记录出具检测报告，报告格式见附录 E。X 射线数字成像检测报告除符合 NB/T 47013.1 的规定外，还至少应包括下列内容：

- a) 制造单位、检测单位或委托单位；
- b) 被检工件：坡口型式、焊接方法；
- c) 使用的检测工艺文件编号；
- d) 检测设备：射线机有效焦点尺寸；
- e) 检测规范：检测技术等级、透照布置、滤波板（类型、数量和厚度）、像质计、射线能量、曝光量或透照时间、射线机与探测器的相对关系、透照几何参数、软件处理方式和条件等；
- f) 图像评定：灰度值、信噪比、图像灵敏度、图像分辨率、缺陷位置和性质。

附 录 A
(规范性附录)
系统分辨率核查方法

A.1 系统分辨率核查应采用分辨率测试卡(平行排列型式、扇形排列型式)或双线型像质计,选择分辨率测试卡时,测试卡的最大线对数应大于系统规定的性能指标。

A.2 分辨率测试卡样式见 GB/T 23903。

A.3 双线型像质计样式见 GB/T 23901.5。

A.4 分辨率测试卡和双线型像质计均应有测试或鉴定证书。

A.5 核查方法

A.5.1 将分辨率测试卡或双线型像质计紧贴在探测器输入屏表面中心区域,金属丝应与探测器的行或列成 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 放置,按如下工艺条件进行透照,并在计算机上成像:

- a) X 射线管焦点至探测器输入屏表面的距离为 $1\ 000 \pm 50\text{mm}$ 。
- b) 不同材料的曝光参数:
 - 1) 对于轻合金材料:管电压 90kV, 1mm 铝滤波板;
 - 2) 对于钢、铜、镍及其合金材料:厚度 $\leq 20\text{mm}$ 时,管电压 160kV, 1mm 铜滤波板;
 - 3) 对于钢、铜、镍及其合金材料:厚度 $> 20\text{mm}$ 时,管电压 220kV, 2mm 铜滤波板。
- c) 灰度值不小于最大灰度值的 50%。
- d) 信噪比:像素值 $\geq 80\mu\text{m}$ 时, $\text{SNR}_n \geq 140$; 像素值 $< 80\mu\text{m}$ 时, $\text{SNR}_n \geq 100$ 。

A.5.2 系统分辨率的识别方法参见附录 C。

附录 B
(资料性附录)
典型透照方式

B.1 对接焊缝典型透照方式

图 B.1 ~ B.6 给出了常用的对接焊缝典型透照方式示意图,可供透照布置时参考。图中 d 表示 X 射线机有效焦点尺寸, F 表示射线机到探测器的距离, b 表示被检工件至探测器的距离, f 表示 X 射线机至被检工件的距离, T 表示公称厚度, D_0 表示管子外径, 1 表示探测器, 2 表示被检工件。

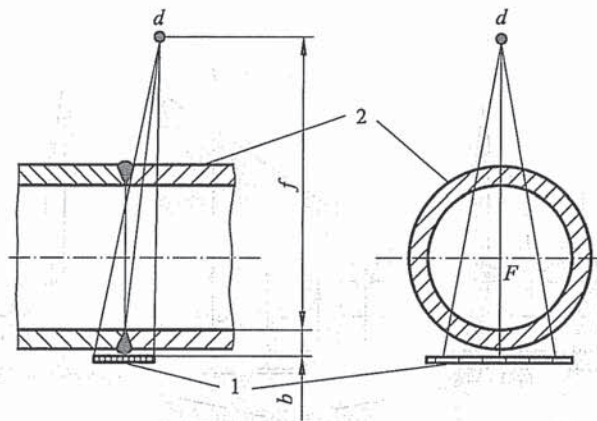


图 B.1 环焊缝 X 射线机在外双壁单影透照方式 (1)

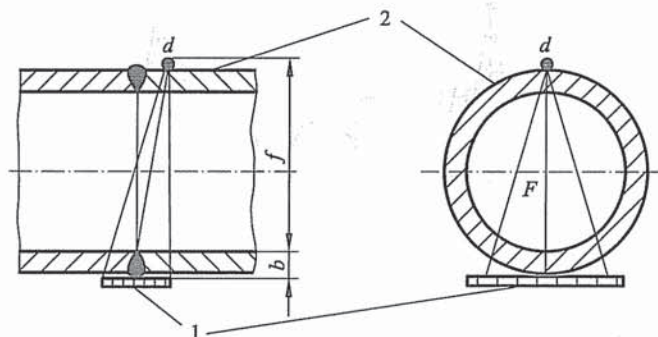


图 B.2 环焊缝 X 射线机在外双壁单影透照方式 (2)

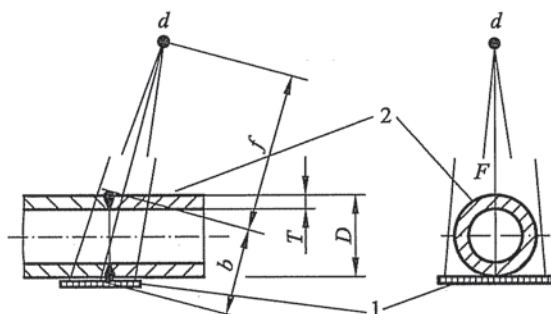


图 B.3 小径管环焊缝倾斜透照方式(椭圆成像)

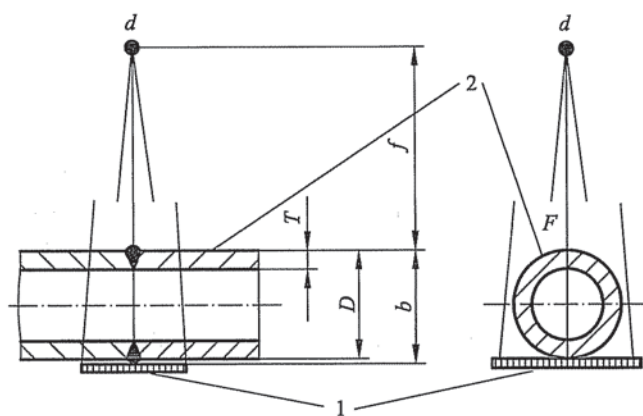


图 B.4 小径管环焊缝垂直透照方式

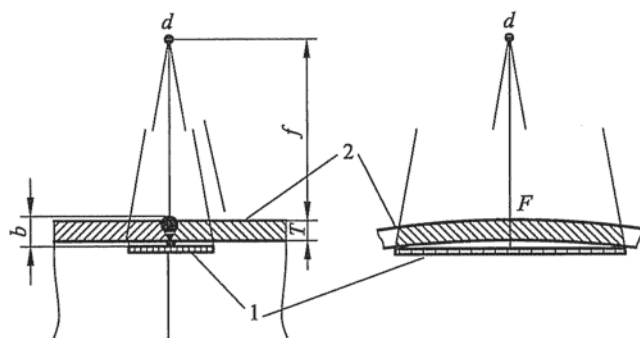


图 B.5 纵、环缝 X 射线机在外单壁透照方式

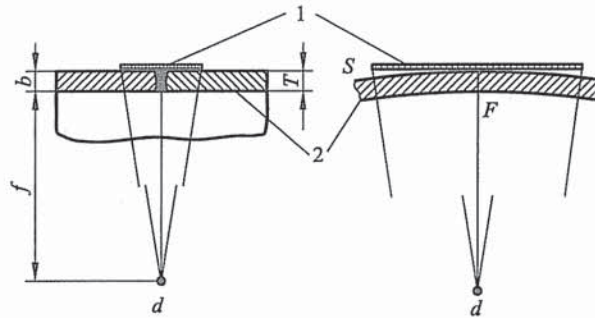


图 B.6 纵、环缝 X 射线机在内单壁透照方式

B.2 管座角焊缝典型透照方式

图 B.7~B.9 给出了常用的管座角焊缝典型透照方式示意图，图中 d 表示 X 射线机有效焦点尺寸， T 表示公称厚度， b 表示被检工件至探测器的距离，1 表示探测器，2 表示被检工件，可供透照布置时参考。

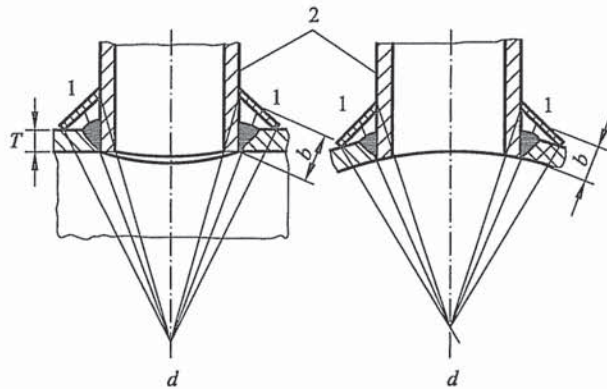


图 B.7 插入式接管角焊缝单壁 X 射线机在内中心透照方式

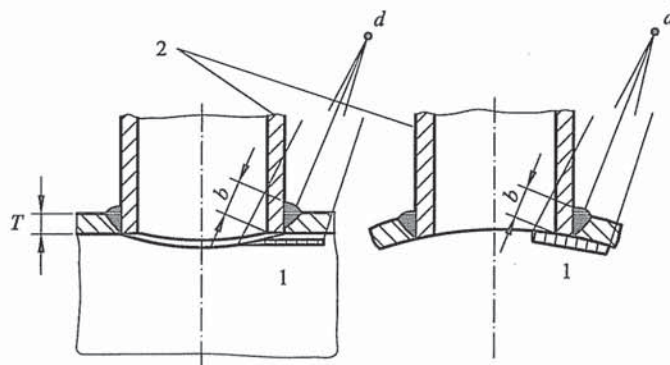


图 B.8 插入式接管角焊缝 X 射线机在外单壁透照方式

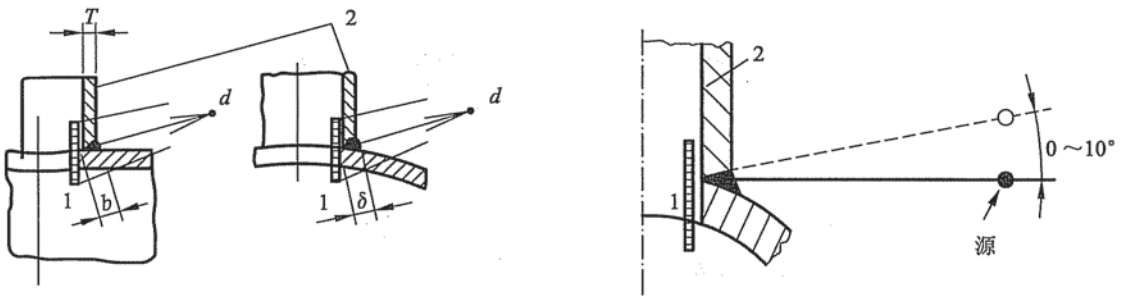


图 B.9 安放式接管角焊缝 X 射线机在外单壁透照方式

附 录 C
(规范性附录)
双线型像质计的识别

C.1 双线型像质计的布置

双线型像质计的放置应与图像(或探测器)的行或列成较小的夹角(如 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$)。

C.2 双线型像质计可识别率的测量方法

C.2.1 双线型像质计的识别和测量应在图像上灰度均匀的区域内进行,应使用不少于21行像素叠加平均。

C.2.2 按照图C.1所示,在能够清晰地分辨最细线对的影像处,按式(C.1)计算丝的可识别率 R 。

$$R = (\Delta GV / BGV) \times 100\% \quad \text{..... (C.1)}$$

式中:

ΔGV ——可分辨的最细线对的灰度差;

BGV ——背景灰度。

C.2.3 本部分要求满足 $R > 20\%$,即满足边缘分离大于20%的要求,则这一线对可识别。

C.2.4 双线型像质计图像中第一组不大于20%的线对,即为表4和表5要求的最小分辨率。

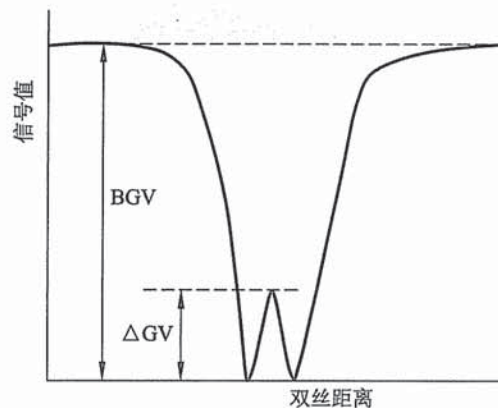


图 C.1 双线型像质计可识别率图示

附录 D
(规范性附录)
归一化信噪比测试方法

D.1 归一化信噪比计算

归一化信噪比 SNR_n 由式 (D.1) 计算得到:

$$SNR_n = SNR_m \times \frac{88.6}{P} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

P ——探测器像素大小 (μm);

SNR_m ——测量信噪比。

D.2 测量信噪比

应在热影响区或接近热影响区的母材区, 取面积不小于 50 像素×50 像素的矩形感兴趣区域, 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 。

附 录 E
(资料性附录)
检测报告格式

X 射线数字成像检测报告

报告编号：

产品名称		产品类别	
编 号		规 格	
执行标准		材 质	
检测比例		检测时机	
质量等级		验收等级	
焊接方法		焊缝长度	
焊缝编号			
成像条件	射线机设备型号：		探测器类型：
	焦点尺寸：	mm	像素尺寸： mm
	焦距：	mm	探测器规格：
	管电压：	kV	滤波板：
	管电流：	mA	线型像质计型号：
	曝光时间：	s	双线型像质计型号：
	透照方式：		像质指数：W /D
	放大倍数：		灰度值：
	图像存储格式：		信噪比：
软件处理方式和条件			
成像数量	总计：___幅 其中：一次返修___ / ___幅，二次返修___ / ___幅，三次返修___ / ___幅		
评定结果	I 级___幅，II 级___幅， III 级___ / ___幅，IV 级___ / ___幅		
透照日期	缺陷类型	缺陷尺寸/mm	评定结果 标记编号
备 注	检测示意图		
检测人员：	年 月 日	评定人员：	年 月 日(检验专用章)

