

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 47013.14—2016

承压设备无损检测 第 14 部分：X 射线计算机辅助成像检测

**Nondestructive testing of pressure equipments —
Part 14: X-ray computed radiographic testing**

2016-08-16 发布

2016-12-01 实施



国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般要求	3
5 检测工艺及其选择	6
6 检测结果评定和质量分级	16
7 检测记录和报告	16
附录 A (资料性附录) 最小灰度值测试方法	17
附录 B (规范性附录) 空间分辨率的测定	18
附录 C (规范性附录) 归一化信噪比的测定	20

前 言

本标准 NB/T 47013《承压设备无损检测》分为以下 14 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；
- 第 14 部分：X 射线计算机辅助成像检测。

本部分为 NB/T 47013 的第 14 部分：X 射线计算机辅助成像检测。

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、江苏省特种设备安全监督检验研究院、中广核工程有限公司、立信染整机械（深圳）有限公司、上海冠域检测科技有限公司、德华材料检测有限公司、艾默生过程控制流量技术有限公司、北京航星机器制造有限公司、通用电气检测控制技术（上海）有限公司、约克（无锡）空调冷冻设备有限公司、广东省特种设备检测院、北京合聚信达科技有限公司。

本部分主要起草人：林树青、梁丽红、强天鹏、朱从斌、李亚军、郑凯、王笑梅、韩向文、徐恽立、黄庆华、王广坤、刘森玉、华晓峰、李绪丰、李黎。

本部分为首次发布。

承压设备无损检测

第 14 部分：X 射线计算机辅助成像检测

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采用 450kV 以下 X 射线计算机辅助成像检测（以下简称“CR 检测”）技术和质量分级要求。

1.2 本部分适用于钢、铜及铜合金、铝及铝合金、钛及钛合金、镍及镍合金材料熔化焊焊接接头的 CR 检测。焊接接头的型式为板或管的对接接头对接焊缝（以下简称“对接焊缝”）。

1.3 承压设备其他材料、支承件和结构件的焊接接头的 CR 检测，可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于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 11533	标准对数视力表
GB/T 12604.2	无损检测 术语 射线照相检测
GB 18871	电离辐射防护及辐射源安全基本标准
GB/T 21356	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 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
GBZ 117	工业 X 射线探伤放射卫生防护标准
JB/T 5075	无损检测射线照相检测用金属增感屏
JB/T 7902	射线照相用线型像质计
NB/T 47013.1	承压设备无损检测 第 1 部分：通用要求
NB/T 47013.2—2015	承压设备无损检测 第 2 部分：射线检测

3 术语和定义

GB/T 12604.2、NB/T 47013.1 和 NB/T 47013.2 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

成像板 IP imaging plate

一种涂有光致激发磷光晶体的柔性板，曝光后能以潜影形式储存信息，可以代替胶片用于射线照相检测。

3.2

X 射线计算机辅助成像系统 CRS X-ray computed radiography system

由 IP、专用激光扫描仪、计算机硬件和专用软件等组成，能将 IP 上的信息转换成数字图像的系统，简称“CR 系统”。

3.3

被检工件至 IP 距离 b object-to-IP distance

沿射线束中心线方向上测量的被检工件表面（射线源侧）至 IP 之间的距离。

3.4

射线源至 IP 距离 F source-to-IP distance

沿射线束中心线方向上测量的射线源至 IP 之间的距离，即焦距。

3.5

射线源至被检工件距离 f source-to-object distance

沿射线束中心线方向上测量的射线源至被检工件表面（射线源侧）之间的距离。

3.6

对比灵敏度 CS contrast sensitivity

由透照厚度差造成数字图像灰度差所表征的灵敏度，一般用线型像质计的线径或线径编号表示。

3.7

IP 的结构噪声 structure noise of IP

由感光层和 IP 表面的结构不均匀导致的数字图像的固有噪声。

3.8

灰度等级 GL grey level

对黑白数字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

像素 pixel

X 射线数字图像的基本组成单元。X 射线数字图像由点组成，组成图像的点称为像素。

3.10

灰度值 GV grey value

表征数字图像中像素明暗程度的数值。

3.11

线性灰度值 GV_{lin} linearized grey value

与 IP 的曝光量成正比的灰度值。

3.12

CR 系统的基本空间分辨率 SR_b basic spatial resolution of a CR system

在无被检工件情况下，按照标准测试条件获得的、单位长度上 CR 系统数字图像所能显示的最小细节的能力，简称“CR 系统分辨率”。

3.13

数字图像的空间分辨率 SR_b^i spatial resolution of a digital image

在有被检工件情况下，按照实际检测条件得到的、单位长度上数字图像所能显示的最小细节的能力，简称“数字图像分辨率”。

3.14

信噪比 SNR signal-to-noise ratio

在数字图像中，选定区域的灰度平均值与标准差的比值。

3.15

归一化信噪比 SNR_N **normalized signal-to-noise ratio**

基于 CR 系统分辨率 SR_b ，经归一化处理后的信噪比。

3.16

一次透照长度 L_{eff} **effective length of a single exposure**

符合标准规定的单次曝光有效检测长度。

3.17

扫描分辨率 **scanning resolution**

由扫描决定的数字图像的像素几何尺寸，它取决于激光扫描仪扫描 IP 的行间距，以及激光点扫描行走速度与模数转换器工作频率之比。

3.18

数字图像处理 **digital image processing**

通过计算机对数字图像进行处理的方法和技术。CR 数字图像常用的处理方法包括放大、缩小、灰度变换、对比度变换等。

4 一般要求

4.1 检测人员

4.1.1 从事 CR 检测的人员应满足 NB/T 47013.1 的有关规定。

4.1.2 CR 检测人员应在上岗前接受辐射安全知识、专门的 CR 理论和实际操作培训，并取得相应的资格。

4.1.3 CR 检测人员未经矫正或经矫正的近（距）视力和远（距）视力应不低于 5.0（小数记录值为 1.0），测试方法应符合 GB 11533 的规定。从事数字图像评定的人员应每年接受一次视力检查。

4.2 检测设备和器材

4.2.1 射线源

应选择焦点尺寸、管电压范围和额定功率等满足检测对象和技术要求的 X 射线机。

4.2.2 CR 系统

应根据检测对象和技术要求选择适用的 CR 系统。系统性能测试条件及测试方法按 GB/T 21356 的规定执行。系统至少应满足以下性能指标：

- a) 图像几何畸变应小于 $\pm 2\%$ ；
- b) 扫描仪和 IP 板之间不应存在抖动、滑动，或抖动低于系统噪声水平；
- c) 图像同一水平线上，中心区域与边缘背景灰度变化应不超过 $\pm 10\%$ ；
- d) 其他性能指标包括：信噪比、激光束功能、阴影、影像擦除、伪影等。

4.2.2.1 成像板（IP）

IP 的质量合格证中至少应包括 IP 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。用户应按制造商推荐的温度和湿度条件予以使用和保存，并避免不必要的照射。对厚度较小的被检工件应选择感光速度较慢的 IP，对厚度较大的被检工件可选择感光速度较快的 IP。

4.2.2.2 扫描仪

激光扫描仪的质量合格证中至少应包括规格、扫描尺寸、输入电压、扫描分辨率、激光束焦点尺寸、扫描步进速度等主要性能参数，且其功能和性能至少满足以下要求：

- a) 扫描仪应具有扫描和擦除功能，擦除后残留潜影灰度值不得高于系统最大灰度的 5%；
- b) 扫描激光功率应满足信号采集的要求；
- c) 扫描仪的光电倍增管电压或增益、扫描分辨率应可调；
- d) 激光束应无颤动，且不存在伪影和扫描线丢失现象。

4.2.2.3 显示器

应满足以下最低要求：

- a) 最低亮度 250cd/m²；
- b) 显示器至少 256 灰度级；
- c) 可显示的最低光强比 1 : 250；
- d) 显示至少 1M 像素，像素尺寸小于 0.3mm。

4.2.2.4 系统专用软件

应至少包括如下功能：

- a) 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；
- b) 调整功能：包括灰度变换、对比度调节、图像缩放等；
- c) 标记功能。

4.2.3 像质计

4.2.3.1 线型像质计

- a) 线型像质计用于测定数字图像的对比灵敏度，包括通用线型像质计和等径线型像质计两种，其型号和规格应符合 JB/T 7902 的规定；
- b) 线型像质计的材料代号、材料和不同材料的线型像质计适用的被检工件材料范围可按表 1 的规定执行，线型像质计材料的吸收系数应尽可能接近或等同于被检材料的吸收系数，任何情况下不能高于被检材料的吸收系数。

表 1 不同材料的线型像质计适用的材料范围

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

4.2.3.2 双线型像质计

- a) 双线型像质计用于测量 CR 系统分辨率和数字图像分辨率；
- b) 双线型像质计的型号和规格应符合 GB/T 23901.5 的要求。

4.2.4 检测设备器材的功能及性能应符合上述要求，且应提供相应的证明文件。

4.2.5 校准或运行核查

4.2.5.1 每年至少对 CR 系统性能中的几何畸变、抖动、均匀性、激光束功能、阴影、伪影等进行 1 次校准或核查，并记录。

4.2.5.2 每年至少应对使用中的曝光曲线进行 1 次核查。当射线机重要部件更换或经过修理后，应重新制作曝光曲线。

4.2.5.3 运行核查

存在如下情况应进行 CR 系统核查并记录，核查方法可参照 GB/T 21356：

- a) 系统改变时（包括各部件的维修、更换、软件升级等）；

- b) 在系统停止使用 3 个月以上, 重新使用时;
- c) 正常使用条件下, 用户可根据产品说明书和使用频率, 在工艺文件中规定核查频次, 并按规定实施核查。

4.3 检测技术等级

4.3.1 CR 检测技术分为三级: A 级——低灵敏度技术; AB 级——中灵敏度技术; B 级——高灵敏度技术。

4.3.2 CR 检测技术等级选择应符合相关法规、标准和设计技术文件的要求, 同时还应满足合同双方商定的其他技术要求。对承压设备对接焊缝, 一般推荐采用 AB 级检测技术进行检测。对重要设备和结构的, 以及以特殊材料和特殊焊接工艺制作的对接焊缝, 可采用 B 级检测技术进行检测。

4.3.3 当某些检测条件不能满足 AB 级(或 B 级)检测技术的要求时, 经合同双方商定, 在采取有效补偿措施(例如增加曝光量或选用信噪比更高的系统等)的前提下, 若数字图像质量达到了 AB 级(或 B 级)检测技术的规定, 则可认为按 AB 级(或 B 级)检测技术进行了检测。

4.3.4 如果检测中射线源至被检工件表面的距离 f 不满足 5.7 的要求, 则 4.3.3 规定不适用。

4.3.5 在用承压设备 CR 检测中, 检测的某些条件不能满足 AB 级检测技术的要求时, 经合同双方商定, 在采取有效补偿措施(例如增加曝光量或选用信噪比更高的系统等)前提下可采用 A 级检测技术进行检测, 但应同时采用其他无损检测方法进行补充检测。

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 工艺规程除满足 NB/T 47013.1 的要求外, 还应规定下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:

- a) 适用的结构、材料类别及厚度;
- b) 射线源能量范围及焦点尺寸;
- c) 检测技术等级;
- d) 透照方式;
- e) IP 种类及型号;
- f) 线型像质计和双线型像质计型号;
- g) 金属屏种类及厚度;
- h) 扫描仪型号及参数设置;
- i) 数字图像显示器。

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写操作指导书, 其内容除满足 NB/T 47013.1 的要求外, 至少还应包括:

- a) 检测设备器材: 射线源(焦点尺寸)、IP、金属屏(种类和厚度)、像质计(种类和型号)、背散射屏蔽铅板、标记、扫描仪和观察设备等;
- b) 检测技术与工艺: 采用的检测技术等级、透照方式(射线源与被检工件以及 IP 之间的相对位置)、参数选择(射线源、IP、曝光条件)、像质计与标记的类型和放置等;
- c) 扫描仪参数;
- d) 图像处理技术;
- e) 数字图像质量要求: 分辨率、对比灵敏度、归一化信噪比、标记等;
- f) 验收标准;
- g) 操作指导书的验证要求。

4.4.4 首次使用的操作指导书应进行工艺验证, 以验证数字图像质量是否能达到标准规定的要求。

验证可通过专门的透照试验进行或以产品的第一批数字图像作为验证依据，验证数字图像应做出标识。

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 辐射防护应符合 GB 18871 和 GBZ 117 的有关规定。

4.5.3 现场进行 CR 检测前，应按 GBZ 117 的规定为其划定辐射控制区和管理区、设置警告标志。检测工作人员应佩戴个人剂量计，并携带剂量报警仪。

5 检测工艺及其选择

5.1 检测时机

5.1.1 检测时机应满足相关法规、标准和设计技术文件的要求，同时还应满足合同双方商定的其他技术要求。

5.1.2 除非另有规定，CR 检测应在焊接完成后进行，对有延迟裂纹倾向的材料，至少应在焊接完成 24h 后进行 CR 检测。

5.2 检测区

5.2.1 检测区宽度应满足相关法规、标准和设计技术文件的要求，同时还应满足合同双方商定的其他技术要求，检测区包括焊缝金属及相对于焊缝边缘至少为 5mm 的相邻母材区域。

5.2.2 对于电渣焊对接焊缝，其检测区宽度应由合同双方商定或通过实际测量热影响区确定。

5.3 表面要求

在 CR 检测之前，对接焊缝的表面应经目视检测合格。表面的不规则状态在数字图像上的影像不得掩盖或干扰缺陷影像，否则应对表面作适当修整。

5.4 射线能量

5.4.1 在保证穿透力的前提下，CR 检测宜选用较低的管电压。在采用较高管电压时，应保证适当的曝光量。图 1 规定了不同材料、不同透照厚度允许采用的最高 X 射线管电压。

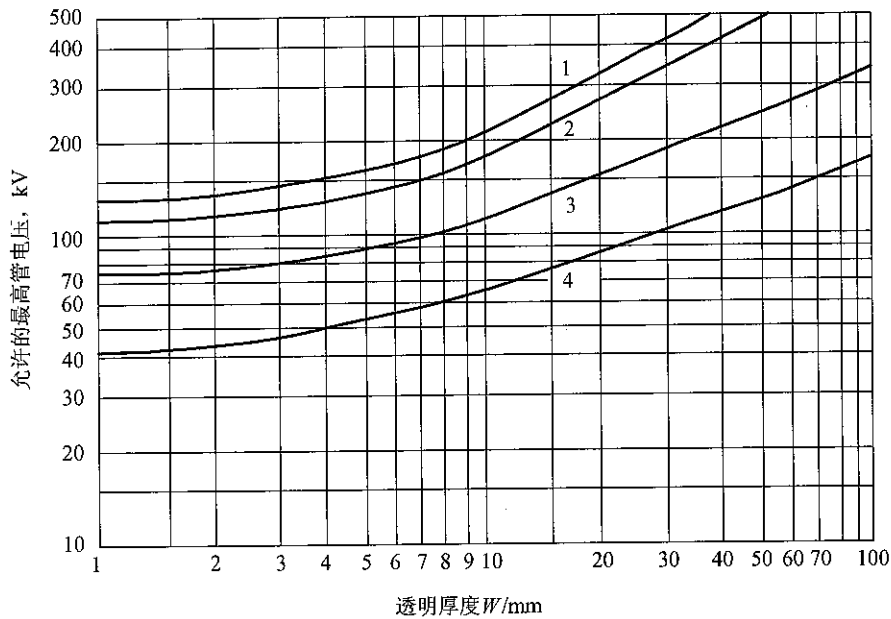
5.4.2 对截面厚度变化大的承压设备，在保证数字图像质量满足 5.16 要求的前提下，允许采用超过图 1 规定的 X 射线管电压。但对钢、铜及铜合金、镍及镍合金材料，管电压增量应不超过 50kV；对钛及钛合金材料，管电压增量应不超过 40kV；对铝及铝合金材料，管电压增量应不超过 30kV。

5.4.3 按照 B 级检测技术检测时，宜选用结构噪声较低的 IP。如选用结构噪声较高的 IP，采用的最高 X 射线管电压宜比图 1 所示值低 20%。

5.5 IP 和金属屏

5.5.1 应根据被检工件材质、透照厚度和管电压选择合适的 IP 和金属屏。表 2 和表 3 分别给出了常用金属材料 CR 检测时前金属屏的材料和厚度选择要求，金属屏应符合 JB/T 5075 的要求。

5.5.2 当使用金属屏时，IP 涂层面和前屏之间应当良好接触；IP 背面可使用铅屏，当被检工件较薄时，使用钢或铜屏能取得更好的效果。



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 1 不同透照厚度允许的最高 X 射线管电压

表 2 前金属屏的材料和厚度——钢、铜及铜合金、镍及镍合金

射线能量	前金属屏的类型和厚度/mm
管电压 ≤ 50kV	无
50kV < 管电压 ≤ 250kV	≤ 0.1 (Pb)
250kV < 管电压 ≤ 450kV	≤ 0.3 (Pb)

注：铅屏可完全或部分由 Fe 或 Cu 屏代替，厚度为铅屏的 3 倍。

表 3 前金属屏的材料和厚度——铝及铝合金、钛及钛合金

射线能量	前金属屏的类型和厚度/mm
管电压 ≤ 150kV	≤ 0.03 (Pb)
150kV < 管电压 ≤ 450kV	≤ 0.2 (Pb)

注：可在被检工件与 IP 暗盒之间使用 0.1mm 铅质滤光板，暗盒内使用 0.1mm 铅金属屏，替代 0.2mm 铅金属屏。

5.6 透照布置

5.6.1 透照方式

应根据被检工件特点和技术条件的要求选择适宜的透照方式。在可实施的情况下，应优先选用单壁透照方式。只当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 NB/T 47013.2—2015 附录 E。

5.6.2 透照方向

透照时射线束中心一般应垂直指向透照区中心，并与工件表面法线重合，需要时也可选用有利于发现缺陷的方向透照。

5.6.3 一次透照长度

5.6.3.1 一次透照长度通过透照厚度比 K 进行控制。不同检测技术等级和不同类型对接焊缝的 K 值应符合表 4 的规定。通过 K 值确定的整条环向对接焊缝所需的透照次数可参照 NB/T 47013.2—2015 附录 F 的曲线图确定。

5.6.3.2 采用射线源在内偏心透照 ($F < D_0/2$) 时,透照次数参照 NB/T 47013.2—2015 附录 F 的公式进行计算。

5.6.3.3 椭圆形封头、碟形封头小 r 区的焊缝,小径管以及其他曲率连续变化的焊缝可不采用以 K 值确定一次透照长度的方法,但数字图像质量应满足 5.16 的要求。

表 4 允许的透照厚度比 K

检测技术等级	A 级、AB 级	B 级
纵向对接焊缝	$K \leq 1.03$	$K \leq 1.01$
环向对接焊缝	$K \leq 1.1^a$	$K \leq 1.06$
^a 对 $100\text{mm} < D_0 \leq 400\text{mm}$ 的环向对接焊接接头(包括曲率相同的曲面焊接接头),A 级、AB 级允许采用 $K \leq 1.2$ 。		

5.6.4 有效评定区

5.6.4.1 焊缝进行全部射线检测时,采取的曝光次数和有效评定区的重叠应能保证检测到被检测区的整个体积范围。

5.6.4.2 如果采用暗盒直接搭接透照的方式,也应保证整个有效评定区数字图像质量满足 5.16 的要求。

5.6.5 小径管双壁双影透照

小径管环向对接焊缝可采用双壁双影透照布置。

5.6.5.1 透照布置

同时满足下列两条件时,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) $\leq D_0/4$ 。

椭圆成像时,应控制影像的开口宽度(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。

5.6.5.2 透照次数

小径管环向对接焊缝 100%检测的透照次数:采用倾斜透照椭圆成像时,当 $T/D_0 \leq 0.12$ 时,相隔 90° 透照 2 次;当 $T/D_0 > 0.12$ 时,相隔 120° 或 60° 透照 3 次。垂直透照重叠成像时,一般应相隔 120° 或 60° 透照 3 次。

按照上述规定进行多次透照时,相邻数字图像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%覆盖要求,则应增加曝光次数。

5.6.5.3 特殊情况

由于结构原因不能按 5.6.5.2 规定的间隔角度进行多次透照,经合同双方商定,可不再强制执行 5.6.5.2 规定的透照间隔角度,但应采取措施尽量扩大缺陷可检出范围,同时应保证在评定范围内图像质量满足本部分要求,并在检测报告中对有关情况说明。

5.6.5.4 局部检测

不要求 100%检测的小径管环向焊接接头的透照次数由合同双方商定。

5.7 射线源至被检工件表面的最小距离

5.7.1 所选用的射线源至被检工件表面的距离 f 应满足如下要求：

- a) A 级检测技术： $f \geq 7.5d \cdot b^{2/3}$ ；
- b) AB 级检测技术： $f \geq 10d \cdot b^{2/3}$ ；
- c) B 级检测技术： $f \geq 15d \cdot b^{2/3}$ 。

图 2 是 A 级和 B 级检测技术确定 f 的诺模图，图 3 是 AB 级检测技术确定 f 的诺模图。有效焦点尺寸 d 按 NB/T 47013.2—2015 附录 G 的规定计算。

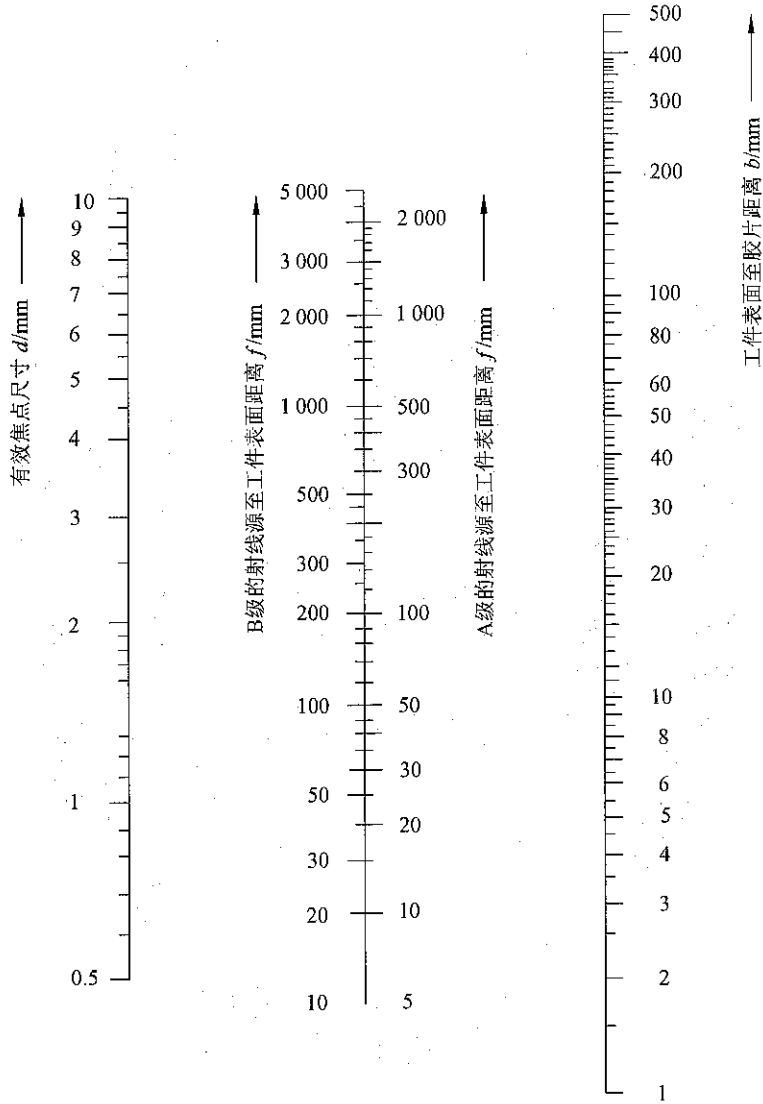


图 2 A 级和 B 级射线检测技术确定焦点至被检工件表面距离的诺模图

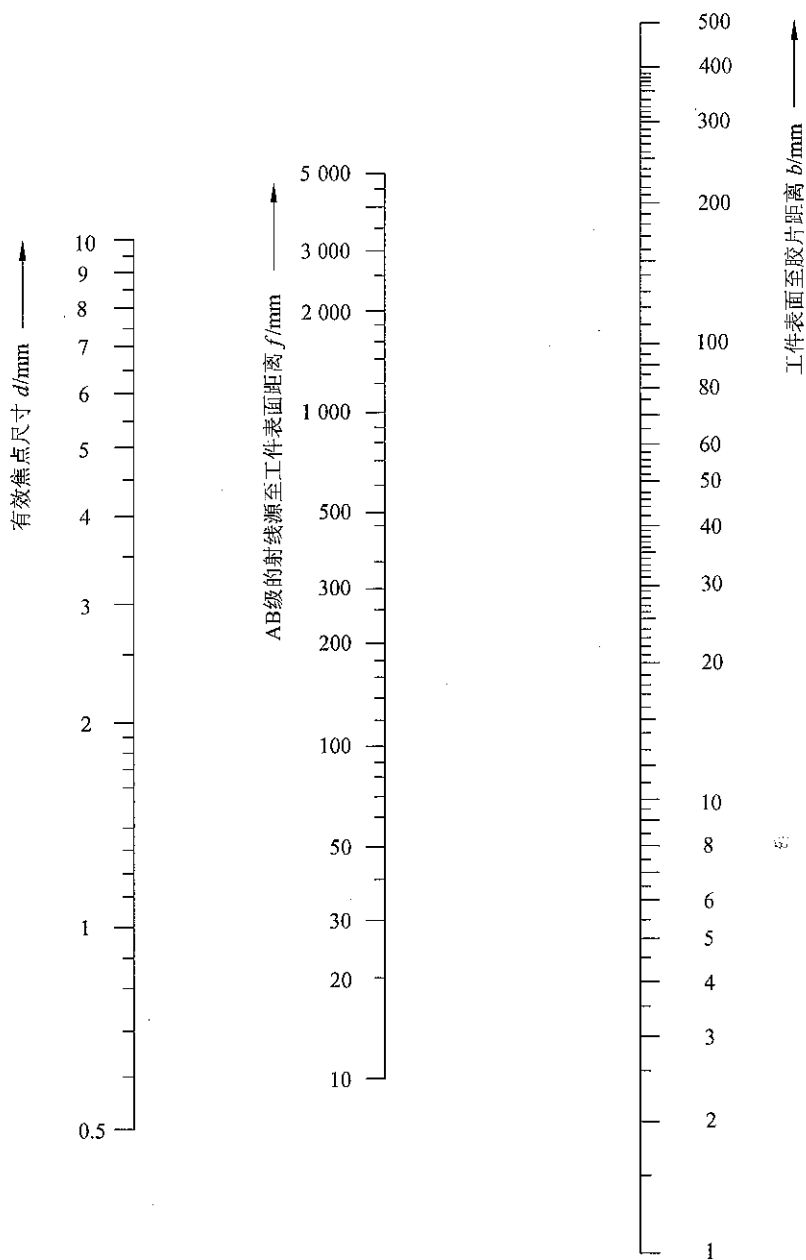


图3 AB级射线检测技术确定焦点至被检工件表面距离的诺模图

5.7.2 采用射线源在被检工件内中心透照方式周向曝光时，只要得到的数字图像质量符合 5.16 的要求， f 值可以减小，但减小值应不超过规定值的 50%。

5.7.3 采用射线源在被检工件内偏心透照方式周向曝光时，只要得到的数字图像质量符合 5.16 的要求， f 值可以减小，但减小值应不超过规定值的 20%。

5.7.4 如果相关规范、标准、设计技术文件或合同双方商定规定了允许的几何不清晰度 (U_g) 最大值，实际透照时，几何不清晰度 (U_g) 值应按照 NB/T 47013.2—2015 附录 H 进行计算。

5.8 IP 与被检工件之间的距离

曝光期间 IP 应紧贴被检工件，除非有特殊规定或透照布置能使被检区域得到更好的数字图像。

5.9 曝光量

曝光量应保证数字图像的归一化信噪比达到标准规定,可按照附录 A 的规定通过最小灰度值试验确定合适的曝光量。

5.10 无用射线和散射线屏蔽

5.10.1 宜采用金属屏、周边遮挡铅板、准直器等适当措施,屏蔽散射线和无用射线,限制照射场范围。

5.10.2 对初次制定的检测工艺,以及在使用中检测条件、环境发生改变时,应进行背散射防护检查。

检查背散射防护的方法是在暗盒背面贴附“B”铅字标记,一般 B 铅字的高度为 13mm、厚度为 1.6mm,按检测工艺的规定进行透照和扫描处理。若在数字图像上(负片)出现灰度低于周围背景灰度的“B”字影像,则说明背散射防护不够,应增大背散射防护铅板的厚度。若数字图像上(负片)不出现“B”字影像或出现灰度高于周围背景灰度的“B”字影像,则说明背散射防护符合要求。

在背散射轻微或后金属屏足以屏蔽背散射线的环境下,可不使用背散射防护铅板或金属屏。

5.11 线型像质计的使用

5.11.1 线型像质计放置原则

线型像质计一般应放置在焊接接头的一端(在被检区长度的约 1/4 位置),金属线应横跨焊缝,细线置于外侧,当一张 IP 上同时透照多条焊接接头时,线型像质计应放置在透照区最边缘的焊缝处。线型像质计放置还应满足以下规定:

- 单壁透照规定像质计放置在射线源侧。双壁单影透照规定像质计放置在 IP 侧。双壁双影透照像质计可放置在射线源侧,也可放置在 IP 侧;
- 单壁透照中,如果像质计无法放置在射线源侧,允许放置在 IP 侧;
- 单壁透照中像质计放置在 IP 侧时,应进行对比试验。对比试验方法是在射线源侧和 IP 侧各放一个像质计,用与被检工件相同的条件透照,测定出像质计放置在射线源侧和 IP 侧的灵敏度差异,以此修正对比灵敏度的规定,以保证实际透照的数字图像灵敏度符合要求;
- 当像质计放置在 IP 侧时,应在像质计上适当位置放置铅字“F”作为标记,F 标记的影像应与像质计的标记同时出现在数字图像上,且应在检测报告中注明。

5.11.2 线型像质计数量

原则上每张数字图像上都应有像质计的影像。当一次曝光完成多张 IP 成像时,使用的像质计数量允许减少,但应符合以下要求:

- 环形对接焊接接头采用射线源置于中心周向曝光时,至少在圆周上等间隔地放置 3 个像质计;
- 一次曝光连续排列多张 IP 时,至少在第一张、中间一张和最后一张 IP 处各放置一个像质计。

5.11.3 小径管对接焊缝使用的线型像质计和放置要求

小径管使用通用线型和专用等径线型像质计时,金属线应垂直焊缝且应横跨焊缝放置。

5.11.4 不等厚或不同种类材料之间对接焊缝

如果焊接接头的几何形状允许,厚度不同或材料类型不同的部位应分别采用与被检工件厚度或类型相匹配的线型像质计,并分别放置在焊接接头相对应部位。

5.11.5 线型像质计影像识别

使用线型像质计时,数字图像上能被识别的最细线的编号即为对比灵敏度值。当数字图像灰度均匀部位(一般是邻近焊缝的母材金属区)能够清晰地看到长度不小于 10mm 的连续金属线影像时,则认为该线是可识别的。专用等径线型像质计至少应能识别两根金属线。

5.12 双线型像质计的使用

5.12.1 双线型像质计放置方法见附录 B。

5.12.2 对每一种检测对象和工艺，应采用双线型像质计测量其数字图像分辨率，在验证符合要求后，进行检测时可不放置双线型像质计。

5.12.3 测定数字图像分辨率时，双线型像质计应放在被检工件的射线源侧表面且“b”值较大部位；当对接焊缝的材料类型不同时，应放置于衰减系数最大的材料的射线源侧表面。

5.12.4 对于小径管双壁双影检测，确定其最低空间分辨率或应识别线号时可使用管径代替壁厚。

5.13 标记

5.13.1 透照部位的标记由识别标记和定位标记组成。标记一般由适当尺寸的铅（或其他适宜的重金属）制数字、拼音字母和符号等构成。数字图像标记应能清晰显示且不至于对数字图像的评定带来影响，标记的材料和厚度应根据被检工件的厚度来选择，应能保证标记影像不模糊。

5.13.2 识别标记一般包括：产品编号、焊缝编号、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。

5.13.3 定位标记一般包括中心标记、搭接标记、检测区标记等。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，一般用十字箭头“ \uparrow ”表示。搭接标记是连续检测时的透照分段标记，可用符号“ \uparrow ”或其他能显示搭接情况的方法（如数字等）表示。检测区标记采取的方式能够清晰标识检测区范围即可。

5.13.4 当焊缝内外余高均磨平，从数字图像上不能确定检测区位置和宽度时，应采用适当的定位标记（如采用铅质窄条）进行标识。

5.13.5 定位标记应放在被检工件上，其摆放应符合 NB/T 47013.2—2015 附录 J 的规定。所有标记的影像不应重叠，且应不干扰有效评定范围内的影像。当由于结构原因或难于实施时，应放置于射线源侧的定位标记需要放置于 IP 侧时，检测记录和报告应标注实际的评定范围。

5.13.6 识别标记允许放置于射线源侧或 IP 侧，所有标记的影像不应重叠，且应不干扰有效评定范围内的影像。

5.13.7 为了能精确地辨别数字图像位置，以被检工件上永久标识或部位作为参考点；当因材料性质和使用条件而不能进行永久标识时，应采用其他方法（如布片图）确定数字图像位置。

5.14 扫描仪参数选择

5.14.1 扫描仪光电倍增管电压或增益的选择应与曝光量匹配，使数字图像灰度值处于适当范围（10%~80%）。

5.14.2 扫描分辨率的选择应保证数字图像分辨率达到标准规定的要求，且应与 IP 特性匹配。

5.15 数字图像评定环境要求

数字图像评定应在专用的评定室内进行，评定室应整洁、温湿度适宜、光线柔和。

5.16 数字图像质量要求

数字图像上的标记影像应显示完整、位置正确。数字图像评定范围内不应存在干扰缺陷识别的划痕、压痕、折痕、脱膜、异物粘附以及金属屏缺陷等造成的伪缺陷影像。数字图像的对比灵敏度、分辨率和归一化信噪比应满足 5.16.1~5.16.3 的要求。

5.16.1 对比灵敏度

单壁透照、线型像质计置于射线源侧时应符合表 5 的规定；双壁双影透照、线型像质计置于射线源侧时应符合表 6 的规定；双壁单影或双壁双影透照、线型像质计置于 IP 侧时应符合表 7 的规定。

当原始数字图像对比灵敏度较低时，允许采用数字图像处理方法提高数字图像的对比灵敏度。如果处理后的数字图像的对比灵敏度能够满足标准要求，则该数字图像被认为是合格的。

表5 对比灵敏度值——单壁透照、线型像质计置于射线源侧

应识别线号 (线径/mm)	公称厚度 (T) 范围/mm		
	A 级	AB 级	B 级
19 (0.050)	—	—	≤1.5
18 (0.063)	—	≤ 1.2	> 1.5 ~ 2.5
17 (0.080)	≤1.2	> 1.2 ~ 2.0	> 2.5 ~ 4.0
16 (0.100)	≤1.2 ~ 2.0	> 2.0 ~ 3.5	> 4.0 ~ 6.0
15 (0.125)	> 2.0 ~ 3.5	> 3.5 ~ 5.0	> 6.0 ~ 8.0
14 (0.160)	> 3.5 ~ 5.0	> 5.0 ~ 7.0	> 8.0 ~ 12
13 (0.20)	> 5.0 ~ 7.0	> 7.0 ~ 10	> 12 ~ 20
12 (0.25)	> 7.0 ~ 10	> 10 ~ 15	> 20 ~ 30
11 (0.32)	> 10 ~ 15	> 15 ~ 25	> 30 ~ 35
10 (0.40)	> 15 ~ 25	> 25 ~ 32	> 35 ~ 45
9 (0.50)	> 25 ~ 32	> 32 ~ 40	> 45 ~ 65
8 (0.63)	> 32 ~ 40	> 40 ~ 55	> 65 ~ 100
7 (0.80)	> 40 ~ 55	> 55 ~ 85	—
6 (1.00)	> 55 ~ 85	> 85 ~ 100	—
5 (1.25)	> 85 ~ 100	—	—

表6 对比灵敏度值——双壁双影透照、线型像质计置于射线源侧

应识别线号 (线径/mm)	透照厚度 (W) 范围/mm		
	A 级	AB 级	B 级
19 (0.050)	—	—	≤1.5
18 (0.063)	—	≤ 1.2	> 1.5 ~ 2.5
17 (0.080)	≤ 1.2	≤1.2 ~ 2.0	> 2.5 ~ 4.0
16 (0.100)	≤1.2 ~ 2.0	> 2.0 ~ 3.5	> 4.0 ~ 6.0
15 (0.125)	> 2.0 ~ 3.5	> 3.5 ~ 5.0	> 6.0 ~ 8.0
14 (0.160)	> 3.5 ~ 5.0	> 5.0 ~ 7.0	> 8.0 ~ 15
13 (0.20)	> 5.0 ~ 7.0	> 7.0 ~ 12	> 15 ~ 25
12 (0.25)	> 7.0 ~ 12	> 12 ~ 18	> 25 ~ 38
11 (0.32)	> 12 ~ 18	> 18 ~ 30	> 38 ~ 45
10 (0.40)	> 18 ~ 30	> 30 ~ 40	> 45 ~ 55
9 (0.50)	> 30 ~ 40	> 40 ~ 50	> 55 ~ 70
8 (0.63)	> 40 ~ 50	> 50 ~ 60	> 70 ~ 100
7 (0.80)	> 50 ~ 60	> 60 ~ 85	—
6 (1.00)	> 60 ~ 85	> 85 ~ 100	—
5 (1.25)	> 85 ~ 100	—	—

表7 对比灵敏度值——双壁单影或双壁双影透照、线型像质计置于IP侧

应识别线号 (线径/mm)	透照厚度 (W) 范围/mm		
	A 级	AB 级	B 级
19 (0.050)	—	—	≤ 1.5
18 (0.063)	—	≤ 1.2	$> 1.5 \sim 2.5$
17 (0.080)	≤ 1.2	$> 1.2 \sim 2.0$	$> 2.5 \sim 4.0$
16 (0.100)	$> 1.2 \sim 2.0$	$> 2.0 \sim 3.5$	$> 4.0 \sim 6.0$
15 (0.125)	$> 2.0 \sim 3.5$	$> 3.5 \sim 5.0$	$> 6.0 \sim 12$
14 (0.160)	$> 3.5 \sim 5.0$	$> 5.0 \sim 10$	$> 12 \sim 18$
13 (0.20)	$> 5.0 \sim 10$	$> 10 \sim 15$	$> 18 \sim 30$
12 (0.25)	$> 10 \sim 15$	$> 15 \sim 22$	$> 30 \sim 45$
11 (0.32)	$> 15 \sim 22$	$> 22 \sim 38$	$> 45 \sim 55$
10 (0.40)	$> 22 \sim 38$	$> 38 \sim 48$	$> 55 \sim 70$
9 (0.50)	$> 38 \sim 48$	$> 48 \sim 60$	$> 70 \sim 100$
8 (0.63)	$> 48 \sim 60$	$> 60 \sim 85$	—
7 (0.80)	$> 60 \sim 85$	$> 85 \sim 100$	—
6 (1.00)	$> 85 \sim 100$	—	—

5.16.2 分辨率

5.16.2.1 检测技术等级为 A 级、AB 级时, 数字图像分辨率应符合表 8 的规定; 检测技术等级为 B 级时, 数字图像分辨率应符合表 9 的规定, 使用双线条像质计测量数字图像分辨率的方法见附录 B。

表8 A 级、AB 级检测技术应达到的最低空间分辨率

公称厚度 (T) 或透照厚度 (W) 范围/mm	应识别线号 (线径/mm)	应达到的最低空间分辨率/mm
≤ 1.0	D13 (0.10)	0.05
$> 1.0 \sim 1.5$	D12 (0.125)	0.063
$> 1.5 \sim 2$	D11 (0.16)	0.08
$> 2 \sim 5$	D10 (0.20)	0.10
$> 5 \sim 10$	D9 (0.26)	0.13
$> 10 \sim 25$	D8 (0.32)	0.16
$> 25 \sim 55$	D7 (0.40)	0.20
$> 55 \sim 100$	D6 (0.50)	0.25

注: 对于双壁单影透照方式, 应取公称厚度 T 。

表9 B 级检测技术应达到的最低空间分辨率

公称厚度 (T) 或透照厚度 (W) 范围/mm	应识别线号 (线径/mm)	应达到的最低空间分辨率/mm
≤ 1.5	D13+ (0.08)	0.04
$> 1.5 \sim 4$	D13 (0.10)	0.05
$> 4 \sim 8$	D12 (0.125)	0.063
$> 8 \sim 12$	D11 (0.16)	0.08
$> 12 \sim 40$	D10 (0.20)	0.10
$> 40 \sim 100$	D9 (0.26)	0.13

注: 对于双壁单影透照方式, 应取公称厚度 T 。

5.16.2.2 如果数字图像分辨率达不到表 8 或表 9 的规定,可通过提高数字图像对比灵敏度来补偿数字图像分辨率的不足,这种补偿只允许 1 个等级,即当灵敏度提高 1 个等级时,允许分辨率降低 1 个等级。

5.16.3 归一化信噪比

数字图像的归一化信噪比应满足表 10 和表 11 的要求,归一化信噪比的测量和计算见附录 C。

使用 CR 检测厚度不均匀的试件时,允许采用最小灰度值代替最小 SNR_N ,等价于最小 SNR_N 的最小灰度值的测定见附录 A。

表 10 允许的最小 SNR_N ——钢、铜及铜合金、镍及镍合金

射线能量	透照材料厚度 W/mm	最小 SNR_N		
		A 级	AB 级	B 级
管电压 $\leq 50kV$	—	100	120	150
$50kV < \text{管电压} \leq 150kV$		70	95	120
$150kV < \text{管电压} \leq 250kV$		70	85	100
$250kV < \text{管电压} \leq 350kV$	≤ 50	70	85	100
	> 50	70	70	70
$350kV < \text{管电压} \leq 450kV$	≤ 50	70	85	100
	> 50	70	70	70

注: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。

表 11 允许的最小 SNR_N ——铝及铝合金、钛及钛合金

射线能量	最小 SNR_N		
	A 级	AB 级	B 级
管电压 $\leq 150kV$	70	95	120
$150kV < \text{管电压} \leq 250kV$	70	85	100
$250kV < \text{管电压} \leq 450kV$	70	85	100

注: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。

5.17 数字图像处理

5.17.1 在观察和评定时允许使用缩放、灰度变换、对比度变换等数字图像处理手段。各种数字图像处理手段使用应适度,应有利于数字图像质量的优化和观察评定。

5.17.2 当采用数字图像处理提高像质计金属线影像识别度时,应保证所有评定区域均采用相同的处理手段。

5.18 数字图像存储

5.18.1 应保存 CR 系统输出的原始数字图像。

5.18.2 当采用数字图像处理使对比灵敏度满足要求时,处理后的图像应进行标识,与原始数字图像一起保存。

5.19 图像尺寸测量

为保证缺陷几何尺寸测量的准确性,应采用已知尺寸的试件对图像尺寸测量进行标定,当系统及透照参数改变时,应重新进行标定。

6 检测结果评定和质量分级

承压设备熔化焊焊接接头、承压设备管子及压力管道熔化焊环向焊接接头射线检测结果评定和质量分级参照 NB/T 47013.2 执行。

7 检测记录和报告

7.1 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。CR 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) 委托单位或制造单位；
- b) 被检工件：名称、检测部位、焊缝坡口型式、焊接方法；
- c) 检测设备器材：射线源（焦点尺寸）、IP、金属屏（类型、数量和厚度）、像质计（种类和型号）、滤光板、背散射屏蔽铅板、扫描和观察设备；
- d) 操作指导书工艺验证情况（必要时）；
- e) 检测工艺参数：检测技术等级、透照方式、透照参数（ F 、 f 、 b 、管电压、管电流、曝光时间）、扫描参数；
- f) 数字图像质量：对比灵敏度、分辨率、归一化信噪比、灰度值（需要时）、缺陷位置和性质；
- g) 透照布置示意图；
- h) 检测结果及质量分级；
- i) 编制、审核人员及其资格；
- j) 其他需要说明或记录的事项。

7.2 应依据检测记录出具检测报告。CR 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) 委托单位或制造单位；
- b) 被检工件：名称、检测部位、焊缝坡口型式、焊接方法；
- c) 检测设备器材：射线源（种类，焦点尺寸）、IP、金属屏（类型、数量和厚度）、像质计（种类和型号）、扫描和观察设备；
- d) 检测工艺参数：检测技术等级、透照方式、透照参数（ F 、 f 、 b 、管电压、管电流、曝光时间）、扫描参数；
- e) 数字图像质量：对比灵敏度、分辨率、归一化信噪比、灰度值（需要时）、缺陷位置和性质；
- f) 透照布置示意图；
- g) 检测结果及质量分级；
- h) 编制、审核人员及其资格；
- i) 检测单位。

附录 A
(资料性附录)
最小灰度值测试方法

A.1 最小灰度值测试原则

使用 CR 检测厚度不均匀的试件时,可以采用最小灰度值代替最小 SNR_N 。灰度和 SNR_N 之间的关系适用于特定的设置,包括扫描类型、扫描参数和相同品牌、型号的 IP。任何扫描参数(像素尺寸、扫描速度、光电倍增管的电压或增益)的改变,均要求重新测试与要求的 SNR_N 等价的最小灰度值。

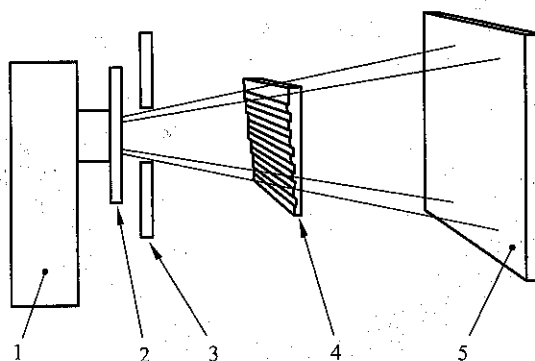
A.2 最小灰度值测试方法

A.2.1 线性灰度是正确测量 SNR_N 和等价灰度的前提,这意味着扫描 IP 上给定区域的灰度应直接与曝光量成正比(无偏移),这种线性灰度应由制造商软件提供支持。

A.2.2 最小灰度可按照附录 B 中 B.2.1 的曝光条件进行测定或由检测单位根据具体的透照情况确定。

A.2.3 与表 10、表 11 规定的最小 SNR_N 等价的最小灰度值测定步骤如下:

- a) 按照图 A.1 透照阶梯试块,阶梯试块应完全覆盖 IP;
- b) 测量每一阶梯的平均灰度和 SNR_N ;
- c) 绘制以平均灰度为变量的 SNR_N 函数曲线;
- d) 确定表 10、表 11 规定的最小 SNR_N 对应的等价最小灰度值。



说明:

- | | |
|----------|------------|
| 1—X 射线管; | 4—铜阶阶梯试块; |
| 2—铜滤板; | 5—暗盒中的 IP。 |
| 3—准直器; | |

图 A.1 测定等价于最小 SNR_N 的最小灰度值的透照布置示意图

A.2.4 除上述方法外,也可采用对 IP 以不同曝光量逐次曝光的方法,曝光条件与 A.2.2 的条件保持一致。

附 录 B
(规范性附录)
空间分辨率的测定

B.1 双线型像质计的放置

B.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。

B.1.2 双线型像质计应与像素行或列成约 $2^\circ \sim 5^\circ$ 的倾角，以避免混叠的影响，见图 B.1a)。

B.2 空间分辨率测量条件

B.2.1 CR 系统分辨率 (SR_b) 的测量可使用下列相应的曝光条件：

将双线型像质计直接放置在 IP 上，射线源到 IP 的距离应为 $(1\ 000 \pm 50)$ mm。

a) 轻合金检测：

- 管电压 90kV；
- 1mm Al 前置滤波板。

b) 透照厚度小于或等于 20mm 的钢和铜合金检测：

- 管电压 160kV；
- 1mm Cu 前置滤波板。

c) 透照厚度大于 20mm 的钢和铜合金检测：

- 管电压 220kV；
- 2mm Cu 前置滤波板。

B.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，SNR 应大于 70。

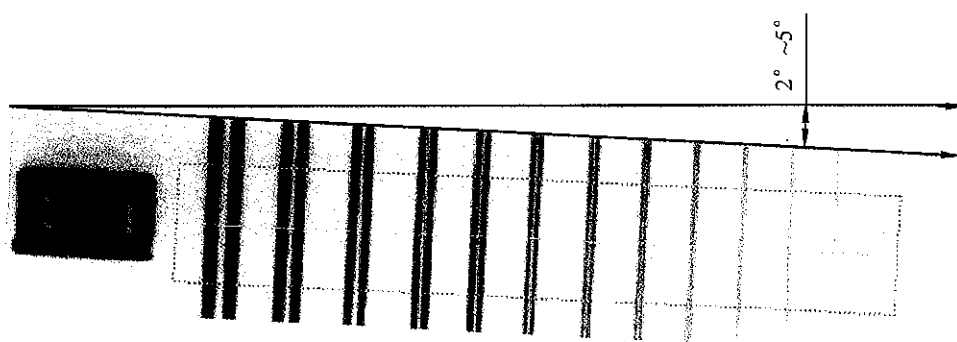
B.2.3 数字图像分辨率测量条件

将双线型像质计放在被检工件表面（射线源侧），透照条件与实际检测条件一致，数字图像的归一化信噪比要求参见表 10、表 11。

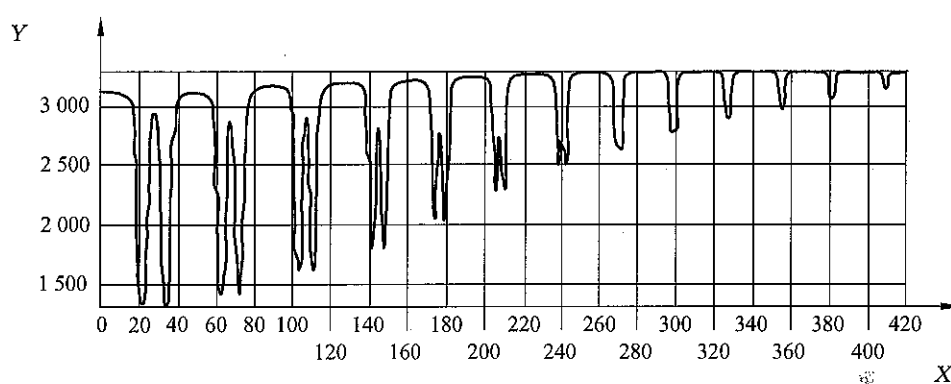
B.3 空间分辨率的确定

若肉眼不能明确地分辨出第一组不清晰的线对，可使用以下所述 20%下沉法：应使用不少于 21 行像素叠加平均，见图 B.1 b) 和 c)，根据式 (B.1) 计算找出下沉小于 20% 的第一个线对，见图 B.1d)。数字图像中第一组达到下沉值与两波峰值（见图 B.1) 之比小于 20% 的线对，即为双线型像质计的测试结果，如图 B.1 c) 所示的 D8。

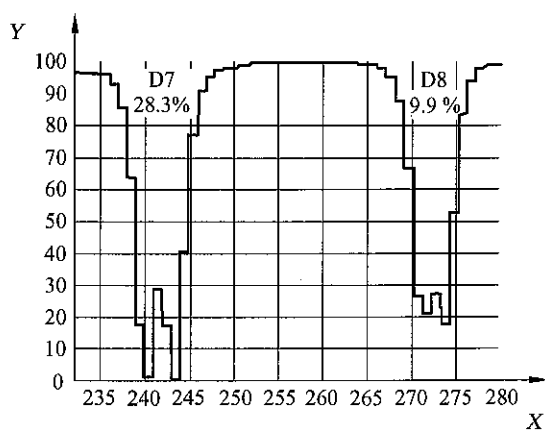
$$\text{dip} = 100 \times (A + B - 2C) / (A + B) \dots\dots\dots (B.1)$$



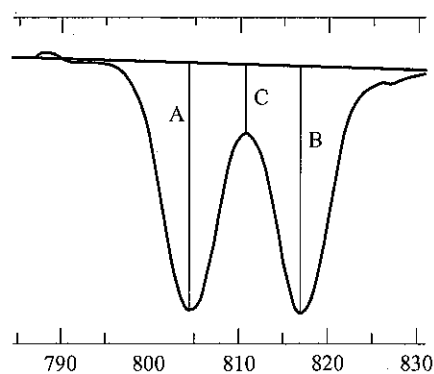
a) 数字图像中双线型像质计的图像



b) 双线型像质计轮廓 (不少于 21 次测量平均得到)



c) 线对 D7 和 D8 的放大轮廓图



d) 下沉值计算图表 (百分比)

图 B.1 空间分辨率测定示意图

附录 C
(规范性附录)
归一化信噪比的测定

C.1 选定不小于 20×55 的像素窗口，使用平均灰度值与线性灰度标准差的商确定测量信噪比 (SNR_m)。

C.2 归一化信噪比 SNR_N 通过式 (C.1) 计算得到：

$$SNR_N = SNR_m \times \frac{C}{SR_b} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：C——归一化系数，等于 88.6μm。

C.3 进行归一化信噪比测量所需要的 CR 系统分辨率值 (SR_b) 按照附录 B 测定。

C.4 不同 CR 系统的 SR_b 值，以及 SNR_m 值与 SNR_N 值的对应关系见表 C.1。

表 C.1 CR 系统分辨率 SR_b、实测 SNR_m 与归一化信噪比 SNR_N 对照表

系统参数	高清晰系统			标准系统					
	13+	13	12	11	10	9	8	7	6
空间分辨率 SR _b	40 μm	50 μm	63 μm	80 μm	100 μm	130 μm	160 μm	200 μm	250 μm
归一化的 SNR _N	要求达到的最小 SNR _m 值								
180	80	100	130	160	205	265	325	405	510
120	55	70	85	110	135	180	220	270	340
100	45	60	70	90	115	150	185	225	285
70	35	40	50	65	80	100	130	160	200

C.5 如果扫描参数 (例如扫描分辨率、IP 等) 改变，则应重新测量 CR 系统分辨率 (SR_b)。