

ICS 25.160.01
CCS J 33



团 体 标 准

T/CWAN 0115—2025

钛及钛合金薄壁型材焊缝X射线数字成像检测

X-ray digital radiography of titanium and titanium alloy thin-walled profile welded seam

2025-03-31发布

2025-04-01 实施

中国焊接协会发布

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.....	2
5 检测系统.....	3
6 检测方法.....	3
7 图像质量.....	6
8图像评定.....	7
9质量分级.....	8
10 检测报告及资料保存.....	9
附录A（规范性）系统分辨率核查方法.....	10
附录B（规范性）双线型像质计的识别.....	11
附录C（规范性）归一化信噪比测试方法.....	12

前 言

本文件按照GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：洛阳船舶材料研究所（中国船舶集团有限公司第七二五研究所）、中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、哈工大郑州研究院、江南造船（集团）有限责任公司、河南省科学院材料研究所、龙门实验室、洛阳双瑞精铸钛业有限公司、中国船舶集团有限公司第七〇一研究所、重庆科技大学、北京博清科技有限公司、南昌航空大学、重庆三峡学院、北部湾大学。

本文件主要起草人：廖志谦、王海登、吕逸帆、孙鹏远、宋鸿玉、穆晨光、张智柏、倪伸伸、边传新、雷小伟、崔永杰、刘甲、余巍、胡伟民、刘希林、高福洋、马照伟、路全彬、武鹏博、常云峰、于华、林三宝、吴浩然、李渤渤、郝健、袁飞、尹立孟、陈玉华、姜丽红、王善林、冯伟、黎泉、张龙、沈黎、秦建、冯消冰、曹浩、郑敏、夏国峰、李海龙、方乃文、李云月、孙钦荣、陈绍鑫。

钛及钛合金薄壁型材焊缝X射线数字成像检测

1范围

本文件规定了钛及钛合金薄壁型材焊缝X射线数字成像检测的术语和定义、一般要求、检测系统、检测方法、图像质量、图像评定、质量分级、检测报告及资料保存等内容。

本文件适用于厚度2mm~10mm的T型和L型熔化焊焊缝的检测。

2规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中、注日期的引用文件、仅该日期对应的版本适用于本文件；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 12604.11 无损检测 术语 X射线数字成像检测

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

GBZ 117 工业X射线探伤放射卫生防护标准

3 术语和定义

GB/T 12604.11界定的及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

薄壁型材焊缝 thin-walled profile welds

通过焊接工艺制造的壁厚2mm~10mm型材中的T型或L型焊缝。

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

单位长度上分辨两个相邻细节间最小距离的能力，单位为线对每毫米（lp/mm）。

3.4

系统分辨率 system resolution ratio

单位长度上数字成像系统分辨两个相邻细节间最小距离的能力，也称为系统基本空间分辨率，单位为线对每毫米（lp/mm）。

3.5

图像分辨率 image resolution ratio

检测系统分辨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，单位为线对每毫米（lp/mm）。

3.6

数字探测器 digital detector

把X射线光子转换成数字信号电子装置，简称探测器。

3.7

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。

3.8

静态成像 static imaging

检测系统与被检测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。

3.9

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。

3.10

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。也指校正后的图像，其输出值远离图像均值的异常点，通常呈单点、相邻多点的形式出现。

3.11

工件厚度 t thickness

被检型材焊缝所在板材的公称厚度。

3.12

透照厚度 W penetrated thickness

型材焊缝透照时，中心射线束所穿过的材料厚度，应考虑焊缝余高和射线束倾斜影响。

3.13

圆形缺陷 round flaw

长宽比不大于3的气孔、夹渣和夹钨等缺陷。

3.14

条形缺陷 round flaw

长宽比大于3的气孔、夹渣和夹钨等缺陷。

4 一般要求

4.1 检测人员

4.1.1 检测人员应了解X射线数字成像技术原理、与其相关的计算机知识和数字图像处理知识，并掌握相应的计算机基本操作方法。

4.1.2 检测人员上岗前应进行辐射安全与防护知识培训和考核，取得相应的证书或成绩单。4.1.3 检测人员应取得与其工作相适应的检测资格证书，且应了解钛及钛合金型材的焊接工艺及常见类型缺陷等相关知识。

4.1.4 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，且应每年检查一次。

4.2 检测时机

4.2.1 钛及钛合金型材焊缝应在外观检查合格后进行X射线数字成像检测，不应存在飞溅、凹坑等可能干扰缺陷评定的外观缺陷或异物。

4.2.2 对于需进行校型处理的型材，宜在校型后进行X射线数字成像检测。

4.3 安全环保

4.3.1 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。

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

4.3.3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监督区，设置警告标志，检测人员应佩戴个人剂量计，并携带辐射报警仪。

5 检测系统

5.1 X射线机

5.1.1 X射线机的可调能量范围应能满足检件的透照需求。

5.1.2 推荐采用高频X射线机，且焦点尺寸的选择应与所采用的探测器相匹配。

5.2 探测器系统

5.2.1 探测器系统包含面阵列探测器及其配件。

5.2.2 动态范围应不小于2000:1。

5.2.3 A/D转换位数应不小于12bit。

5.2.4探测器的供应商应提供探测器的坏像素表和坏像素校正方法。成像区域内坏像素不超过总像素的1%。

5.2.5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。

5.3 计算机系统

5.3.1 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8GB容量的内存，不低于500GB的硬盘和必要的数据传输接口。

5.3.2显示器的亮度应不低于250cd/m²，灰度等级不小于8bit，图像显示分辨率不低于1024×768，像素点距不高于0.3mm。

5.4 系统软件

5.4.1 系统软件应具备图像采集、叠加降噪、对比增强、缺陷几何尺寸测量、缺陷标注、图像存储、辅助评定和其他辅助功能。

5.4.2系统软件宜具有不小于4倍的放大功能。

5.4.3系统软件应存储原始图像，观察、评定时允许进行相关处理。

5.4.4采用机械装置辅助检测时，系统软件应具备检测路径设置功能，与探测器数据采集进行联动。

5.5 检测系统验收与核查

5.5.1 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。

5.5.2每3个月至少对探测器坏像素进行1次核查，并记录和校正。

5.5.3在如下情况应进行系统分辨率核查，核查方法按附录A执行：

- a) 检测系统有变时；
- 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1个月后重新使用时。

6 检测方法

6.1 透照方式

6.1.1 T型和L型焊缝的透照见图1和图2所示，应保证主射线束指向被检焊缝区域中心部位，且尽可能选择有利于缺陷检出的夹角透照。

6.1.2射线束应保证对焊接接头体积的全覆盖，T型接头在必要时可在焊缝两侧各透照1次。

6.1.3若不使用几何放大透照技术，则数字探测器应尽可能放置在靠近工件的位置。

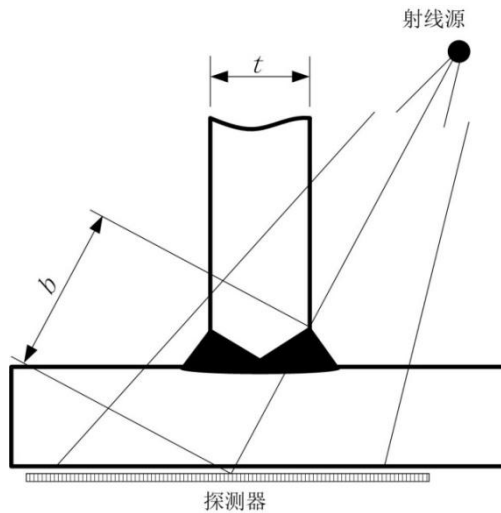


图1 T型焊缝透照示意图

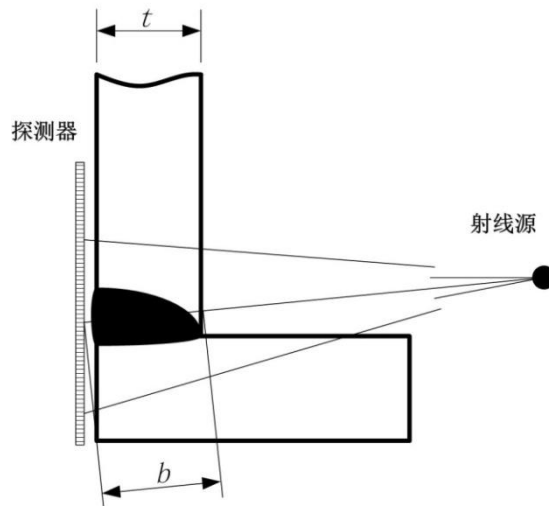


图2 L型焊缝透照示意图

6.2 成像参数的选择

6.2.1 透照焦距

透照焦距为射线源至焊缝表面距离 f 与焊缝表面至探测器距离 b 之和。所选用的射线源至焊缝表面的距离 f 应满足公式(1)的要求,也可利用图3给出的诺模图确定。

$$f \geq 10d \cdot b^{2/3} \quad (1)$$

式中:

f —沿射线束中心测定的射线源与焊缝受检部位射线源侧表面之间的距离,单位为毫米(mm);

d —射线源的有效焦点尺寸,单位为毫米(mm);

b —沿射线束中心测定的焊缝受检部位射线源侧表面与探测器之间的距离,单位为毫米(mm)。

6.2.2 最大放大倍数

理论上,对于给定的检测系统,可由式(2)计算最佳放大倍数。

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

式中:

M_0 —最佳放大倍数;

U_c —探测器固有不清晰度(约等于探测器像素大小的2倍)。

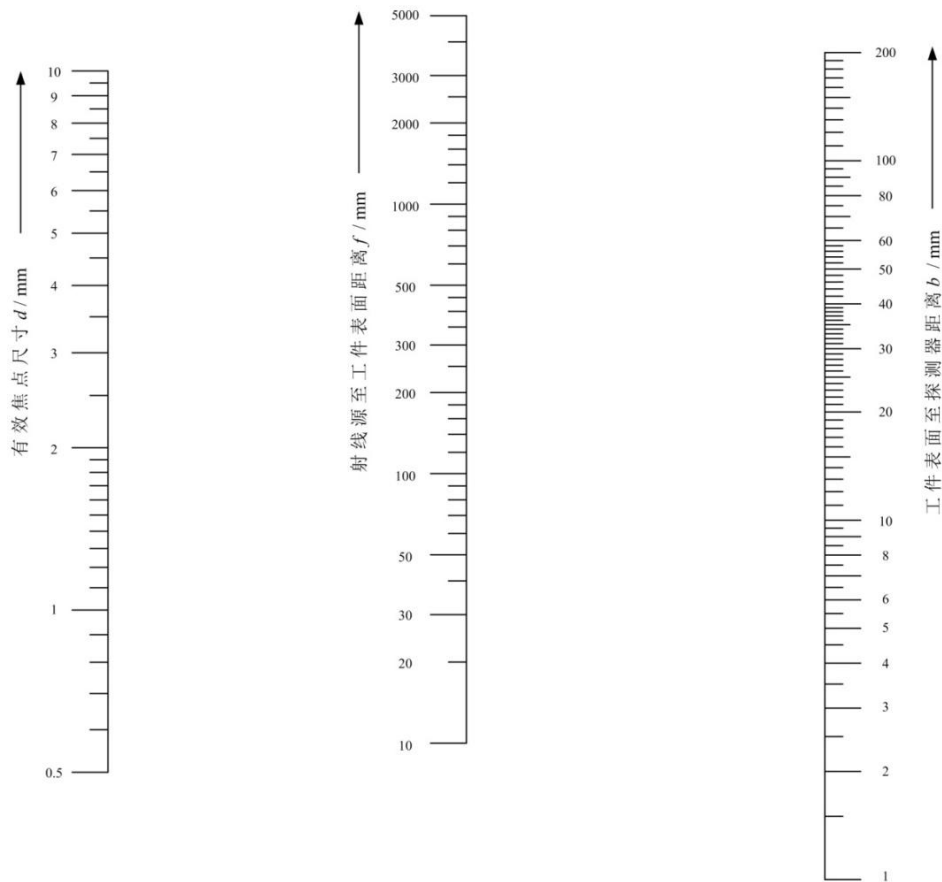


图3 确定焦点至工件表面最小距离 f 的诺模图

6.2.3 X射线能量

通常根据曝光曲线选择管电压，不同透照厚度下选取的管电压值一般不超过图4的规定。

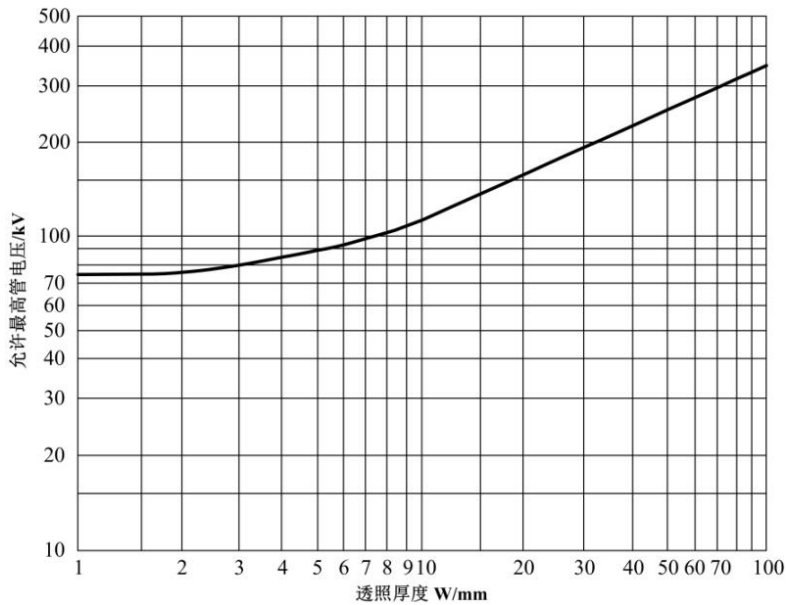


图4 透照厚度和允许的最高管电压

6.2.4 曝光量

6.2.4.1 曝光量等于单帧图像曝光时间和管电流的乘积，用 $\text{mA}\cdot\text{s}$ 表示。

6.2.4.2 增加曝光量可提高信噪比。按照检测速度、检测设备和检测质量的要求，面阵列探测器通过合理选择图像叠加幅数和管电流来控制曝光量。

6.2.5 透照厚度比

不考虑焊接结构造成的透照厚度差异，在焊缝长度方向上射线经过厚度均匀评定区外端斜向穿透厚度与中心束的透照厚度之比不大于 1.03。

6.3 标记

6.3.1 透照部位的标记由识别标记和定位标记组成。

6.3.2 识别标记包括产品编号、焊缝编号、透照日期等。返修后的透照需要增加返修标记。

6.3.3 摆放定位标记的目的在于准确对照图像和焊缝的位置，一般包括中心标记和搭接标记，通常结合分段透照放置相应的标记。对于长度较大的焊缝，也可采用标记带的形式定位。

6.3.4 标记一般应放置在距焊缝边缘至少 5mm 以外的部位，标记影像不应重叠，且不应干扰有效评定范围内的影像。

6.4 射线屏蔽

应采用滤波板、准直器（光阑）、铅板等适当措施，减少散射线和无用 X 射线。

7 图像质量

7.1 一般要求

7.1.1 图像灰度、图像灵敏度、图像分辨率和归一化信噪比应同时满足要求。

7.1.2 测定图像质量的像质计分为线型像质计和双线型像质计。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。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。

7.2 线型像质计

7.2.1 线型像质计的材质应为工业纯钛。一般应放置在 X 射线机侧，无法放置在 X 射线机侧时，允许放置在探测器侧，但应增加“F”标记，且其像质计灵敏度值的要求应提升一级。

7.2.2 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，金属丝应垂直且尽可能的横跨焊缝，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。

7.2.3 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。

7.2.4 在邻近焊缝母材区的图像灰度均匀的部位能够清晰的看到长度不小于 10mm 的连续的像质计丝影像时，则该丝认为是可识别的。

7.3 双线型像质计

7.3.1 双线型像质计应放置在射线源侧工件表面。

7.3.2 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° ~ 5° ）。

7.3.3 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。

7.3.4 双线型像质计的识别方法见附录 B。

7.4 图像灵敏度

线型像质计置于 X 射线机侧时，图像灵敏度应满足表 1 的规定。

表 1 图像灵敏度值

应识别丝号（丝径/mm）	工件厚度（ <i>t</i> ）/mm
W16（0.100）	≤3.5
W15（0.125）	>3.5~5.0

W14 (0.160)	>5.0~7.0
W13 (0.20)	>7.0~10
W13 (0.25)	>10~15

7.5 图像分辨率

图像分辨率宜满足表2的规定。若图像分辨率达不到表2的规定，可通过提高信噪比来提高图像灵敏度进行补偿，图像分辨率降级补偿时（最大允许降两级），其图像灵敏度值应同时提高相应的级别。

表 2 图像分辨率

工件厚度 (<i>t</i>) /mm	图像分辨率/ (lp/mm)	丝号	丝径/mm
≤5	5.00	D10	0.10
>5~10	3.85	D9	0.13
>10~25	3.125	D8	0.16

8 图像评定

8.1 一般要求

8.1.1 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。

8.1.2 可通过正像或负像的方式显示。

8.1.3 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。

8.1.4 图像有效评定区内不应存在干扰缺陷图像识别的伪像。

8.2 图像灰度

8.2.1 图像有效评定区内的灰度值应控制在满量程的10%~80%。

8.2.2 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。

8.3 信噪比

8.2.1 归一化信噪比应不低于140。

8.2.2 归一化信噪比测试方法见附录C。

8.4 图像存储

8.4.1 存储格式宜按照DICONDE格式执行。

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

8.4.3 焊缝编号应与图像编号相对应。

8.5 缺陷识别与评定

8.5.1 缺陷的识别和评定可采用人工或计算机辅助的方法。

8.5.2 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。

8.6 缺陷几何尺寸测量

8.6.1 应通过系统软件对缺陷的几何尺寸进行测量，测量公式可参考公式（5）。

$$S = \delta \times N_s \quad (5)$$

式中：

S—几何尺寸；

δ —标定因子，单位为毫米每像素（mm/像素）；

N_s —由计算机测量缺陷图像尺寸得到的像素个数。

8.6.2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（6）。

$$\delta = L/N_i \quad (6)$$

式中：

δ —标定因子（mm/像素）；

L —标定所用试件的实际尺寸，单位为毫米（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。

9 质量分级

9.1 缺陷分类

型材焊缝中的缺陷按性质和形状可分为裂纹、未熔合、未焊透、条形缺陷和圆形缺陷共五类。

9.2 质量分级依据

根据焊缝中存在的缺陷性质、数量和密集程度，将其质量分为1级、2级和3级。

9.3 质量分级一般规定

9.3.11级焊接接头内不允许存在裂纹、未熔合、未焊透和条形缺陷。

9.3.22级焊接接头内不允许存在裂纹、未熔合和未焊透。

9.3.3圆形缺陷评定区内同时存在圆形缺陷和条形缺陷时，应进行综合评级，分别评定后将两者之和减一作为综合评级的质量级别。

9.3.4除综合评级外，当各类缺陷评定的质量级别不同时，应以最低的质量级别作为焊接接头的质量级别。

9.3.5焊接接头中缺陷评定的质量级别超过2级时一律定为3级。

9.4 圆形缺陷的评定

9.4.1采用圆形缺陷评定区对圆形缺陷进行评定，评定区为一个与焊缝平行的正方形，其尺寸为10mm×10mm。圆形缺陷评定区应选在缺陷最严重的区域。

9.4.2评定区内和与评定区边界线相割的圆形缺陷按表3的规定换算为点数，并按表4的规定评定级别。

9.4.3当缺陷的长径不大于0.3mm时，评定时不计该缺陷的点数，但在圆形缺陷评定区内不得多于10个，否则其质量应降低一级。

表 3 缺陷点数换算表

缺陷长径/mm	≤1	>1~2	>2~4	>4
缺陷点数	1	2	4	8

表 4 圆形缺陷质量分级

工件厚度 t /mm	≤3	>3~5	>5~10
1级	1	3	4
2级	2	5	7
3级	缺陷点数大于2级或缺陷长径大于 $T/2$		

9.5 条形缺陷的评定

9.5.1条形缺陷评定对单个缺陷长度和一组缺陷的累计长度进行评定，并按表5的规定分级。

9.5.2一组条形缺陷是指在长度为 $12t$ ，宽度为4mm且与焊缝长度方向平行任意选定的矩形评定区内（其最长缺陷长度为 L ），相邻缺陷间距不超过 $6L$ 的任一组条形缺陷。

9.5.2当两个或两个以上条形缺陷处于同一直线上，且相邻缺陷的间距小于或等于较短缺陷长度时，应作为一个缺陷处理，且间距也应计入缺陷的长度之中。

表 5 条形缺陷分级

级别	单个缺陷允许的最大长度/mm	一组条形缺陷累计允许的最大长度/mm
1级	不允许	
2级	4	t (最小可为4)
3级	大于2级	

10 检测报告及资料保存

10.1 检测报告

检测完成后应对检测结果及有关事项进行详细记录并出具检测报告，报告内容包括：

- a) 委托信息：项目编号、制造单位等；
- b) 被检焊缝：产品名称、编号、材质、规格；
- c) 检测设备：设备型号和名称；
- d) 检测标准和验收等级；
- e) 检测规范：透照方式、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；
- g) 检测结果：缺陷类型、返修次数和质量等级；
- h) 检测日期、检测人员和审核人员签字。

10.2 资料保存

X 射线数字成像图像、原始记录和检测报告应保存，以备随时核查。

附录A
(规范性)
系统分辨率核查方法

A.1 系统分辨率核查应采用双线型像质计。

A.2 双线型像质计样式见 GB/T 23901.5。

A.3 双线型像质计应经过测试，配备合格证书。

A.4 核查方法

A.4.1 将双线型像质计紧贴在探测器表面中心区域，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表面的距离为 $1000\text{mm}\pm 50\text{mm}$ 。
- b) 曝光参数：管电压 90kV、1mm 铝滤波板。
- 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， $SNR_n \geq 140$ ；像素值 $< 80\mu\text{m}$ 时， $SNR_n \geq 100$ 。

A.4.2 系统分辨率的识别方法参见附录 B。

附录B
(规范性)
双线型像质计的识别

B.1 双线型像质计的布置

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

B.2 双线型像质计可识别率的测量方法

B.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。

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

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

式中：

ΔGV —可分辨的最细线对的灰度差；

BGV —背景灰度。

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

B.2.4 双线型像质计图像中第一组小于 20% 的线对，即为表 2 要求的最小分辨率。

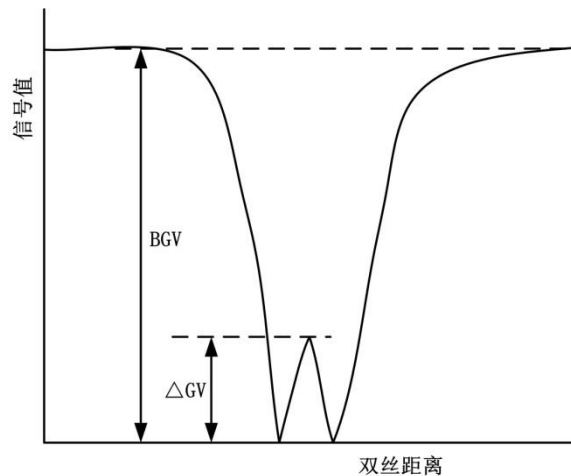


图 B.1 双线像质计可识别率图

附录C
(规范性)
归一化信噪比测试方法

C.1 归一化信噪比计算

归一化信噪比 SNR_n 由式 (C.1) 计算得到:

$$SNR_n = SNR_m \times \frac{88.6}{P} \quad (C.1)$$

式中:

P —探测器像素大小 (μm);

SNR_m —测量信噪比。

C.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 20 像素×55 像素的矩形待测区域, 计算此区域的均值和标准差, 均值与标准差的比值即为测量信噪比 SNR_m 。