ICS 37.020
CCS N 30

T/CS

团 体 标 准

T/CS 483—2026

基于X射线数字图像的焊缝缺陷检测方法

Weld defect detection method based on X-ray digital image

2026－09－04 发布 2026－09－04 实施

中国商品学会 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　技术原理 2
5　设备要求 2
5.1　X射线机 2
5.2　数字探测器 3
5.3　图像采集与处理软件 3
5.4　辅助设备 3
6　检测方法 3
6.1　检测前准备 3
6.2　图像采集 4
6.3　图像处理 4
6.4　图像评定 5
7　数据处理与存储 5
7.1　数据处理 5
7.2　数据存储 6
8　检测报告编制 6
8.1　报告内容 6
8.2　报告编制要求 6
附录A（资料性）　缺陷检测记录表 8

前　言

本文件按照GB/T 1.1—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。

请注意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。

本文件由中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司提出。

本文件由中国商品学会归口。

本文件起草单位：中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、镇海石化建安工程股份有限公司、福建省特种设备检验研究院宁德分院、恒时汇(南京)新材料科技有限公司、南京航空航天大学、江苏科技大学、华中科技大学、重庆日联科技有限公司、西华大学、中核建中核燃料元件有限公司、沈阳化工大学、宁波市特种设备检验研究院。

本文件主要起草人：巴特、闫翰林、许明、俞烽、孙明辉、刘谦、王建峰、陈书锦、康宜华、郭俊峰、叶文强、李铜、黄帆、王树强、吕圣。

基于X射线数字图像的焊缝缺陷检测方法

1 范围

本文件规定了基于X射线数字图像的焊缝缺陷检测的技术原理、设备要求、检测方法、数据处理与存储和检测报告编制。

本文件适用于基于X射线数字图像的焊缝缺陷检测,涉及的焊缝母材材质包括但不限于黑色金属(如碳素结构钢、低合金高强度钢、不锈钢、耐热钢)及有色金属(如铝合金、钛合金、铜合金、镍基合金);适用于对接焊缝、角焊缝等常见焊缝类型,可用于工业领域中承压设备(如压力容器、压力管道)、钢结构(如建筑钢结构、桥梁钢结构)、机械零部件、轨道交通装备焊接件等产品的焊缝质量检测。

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。

GBZ 117-2022 工业探伤放射防护标准

GB/T 3323.2-2019 焊缝无损检测 射线检测 第2部分:使用数字化探测器的X和伽玛射线技术

GB/T 14055.2-2012 中子参考辐射 第2部分:与表征辐射场基本量相关的辐射防护仪表校准基础

GB 22448-2008 无损检测仪器 500 kV以下工业X射线探伤机防护规则

GB/T 23901(所有部分) 无损检测 射线照相底片像质

GB/T 26830-2011 无损检测仪器 高频恒电位工业X射线探伤机

GB/T 26837-2011 无损检测仪器 固定式和移动式工业X射线探伤机

JB/T 7808-2010 无损检测仪器 工业X射线探伤机主参数系列

JB/T 11278-2012 无损检测仪器 工业X射线探伤机 通用技术条件

NB/T 47013.2-2015 承压设备无损检测 第2部分:射线检测

ASTM E2698-18e1 用数字探测器阵列进行射线照相检验的标准实施规程(Standard Practice for Radiographic Examination Using Digital Detector Arrays)

ASTM E2736-17(2022) 数字探测器阵列射线照相的标准指南(Standard Guide for Digital Detector Array Radiography)

ISO 17636-2:2022 焊接非破坏性测试-射线检测-第2部分:数字探测器的X射线和伽玛射线技术(Non-destructive testing of welds-Radiographic testing-Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

X射线数字图像 x-ray digital image

通过X射线数字探测器(如平板探测器、线阵探测器)接收穿透焊缝后的X射线信号,经模数转换、信号处理后生成的数字化图像。

3.2

焊缝 weld

焊件经焊接后所形成的结合部分,分为有填充金属焊缝和无填充金属焊缝。

3.3

焊缝缺陷 weld defect

焊缝中不符合设计或工艺要求的不连续或不致密性缺陷，主要包括裂纹、气孔、夹渣、未熔合、未焊透、咬边、焊瘤、凹陷等。

3.4

透照厚度比 transillumination thickness ratio

X射线穿透焊缝时，有效透照厚度与焊缝公称厚度的比值。

3.5

焊缝缺陷评定区 weld defect assessment area

在X射线数字图像中划定的用于缺陷识别和尺寸测量的特定区域。

3.6

暗场校正 dark field correction

在探测器无射线照射、遮光状态下，采集探测器暗电流信号并扣除，以消除暗电流对图像灰度影响的处理过程。

3.7

亮场校正 bright field correction

在探测器接收均匀射线照射（通过标准厚度块或空透照）条件下，采集信号并用于修正射线强度不均匀对图像影响的处理过程。

3.8

阈值分割 threshold segmentation

通过设定灰度阈值，将图像中灰度值高于或低于阈值的区域分离，从而提取疑似缺陷区域的图像处理算法。

3.9

边缘检测 edge detection

通过算法识别图像中灰度值突变的区域，以勾勒缺陷轮廓、明确缺陷边界的图像处理技术。

3.10

灰度补偿算法 gray level compensation algorithm

针对厚度不均匀焊缝，按焊缝厚度分布曲线调整局部灰度，避免厚度差异导致灰度不均掩盖缺陷的图像处理方法。

3.11

伪缺陷 pseudo-defect

由工件表面划痕、标记阴影、探测器灰尘等非焊缝内部缺陷因素造成的，在图像中呈现的类缺陷灰度异常区域。

3.12

交叉验证 cross-validation

由两名及以上检测人员独立记录缺陷信息，对比数据差异并核实修正，以确保缺陷数据准确性的验证方式。

4 技术原理

X射线束穿透焊接接头时，接头内不同密度介质对射线的吸收能力不同：低密度缺陷（如气孔、低密度夹渣）吸收射线少，穿透射线强度高；高密度缺陷（如高密度夹渣）吸收射线多，穿透射线强度低；裂纹、未熔合、未焊透等缺陷则因透照角度不同呈现特定形态的射线穿透差异。

X射线数字探测器接收穿透后的射线信号，将其转换为模拟信号，经模数转换生成数字信号；数字信号通过降噪、灰度校正、对比度增强等图像处理，生成清晰的X射线数字图像。通过分析图像中灰度分布的差异，可识别焊接接头内缺陷的类型、位置及尺寸，进而判定焊缝质量是否符合要求。

5 设备要求

5.1 X射线机

5.1.1 类型：宜采用恒压 X 射线机或脉冲 X 射线机，具备稳定的管电压、管电流输出能力，支持连续调节或分级调节。
5.1.2 技术参数与安全要求：应符合 GB 22448-2008、GB/T 26830-2011、GB/T 26837-2011、JB/T 11278-2012 和 JB/T 7808-2010 等相关要求。

5.2 数字探测器

5.2.1 类型：可选用非晶硅平板探测器、非晶硒平板探测器或线阵探测器。
5.2.2 技术参数与安全要求：应符合 ASTM E2736-17(2022)的相关要求。

5.3 图像采集与处理软件

5.3.1 采集功能：支持与 X 射线机、数字探测器联动控制，可设置曝光参数（管电压、管电流、曝光时间、帧周期、帧频、增益等）、图像分辨率、采集模式（单次采集、连续采集），具备图像实时预览功能。
5.3.2 处理功能：提供灰度校正（包括暗场校正、亮场校正）、降噪（高斯滤波、中值滤波）、对比度增强（直方图均衡化、自适应增强）、图像缩放、旋转、裁剪等基础功能；支持缺陷标记、尺寸测量（长度、宽度、面积）、灰度值分析等专业功能。
5.3.3 兼容性：支持 DICOM、BMP、JPEG、TIFF 等常见图像格式的导入与导出；可与检测报告编制软件联动，实现数据共享。

5.4 辅助设备

5.4.1 工件支撑装置：具备高度、角度调节功能，可固定工件位置，确保透照过程中工件无位移，调节精度不低于 1 mm（高度）、1°（角度）。
5.4.2 射线防护装置：包括防护铅房、铅屏风、铅衣等，防护材料铅当量不低于 2 mmPb（铅房、铅屏风）、0.5 mmPb（铅衣），确保检测区域外辐射剂量率应符合 GBZ 117-2022 和 GB/T 14055.2-2012 的相关要求。
5.4.3 校准器具：包括标准像质计（符合 GB/T 23901 系列标准要求）、厚度块（精度±0.05 mm）、分辨率测试卡、双丝型像质计，用于设备性能校准和图像质量验证。

6 检测方法

6.1 检测前准备

6.1.1 工件信息确认：收集工件图纸、焊接工艺文件、母材材质证明、焊缝编号等信息，明确检测焊缝的位置、类型（对接焊缝/角焊缝）、公称厚度、坡口形式及质量要求（如缺陷允许最大尺寸）。
6.1.2 工件表面清理：采用砂纸、钢丝刷或压缩空气清理焊缝及两侧 20 mm 范围内的表面，去除铁锈、油污、氧化皮、焊渣等杂质，确保表面无影响射线穿透或图像识别的异物；若焊缝表面有飞溅物，需采用角磨机打磨去除，打磨后表面粗糙度 Ra 不大于 25 μm（参照 NB/T 47013.2 对表面准备的一般要求，保证像质计灵敏度不受表面状态影响）。
6.1.3 设备检查与校准，步骤如下：

a) 检查 X 射线机、数字探测器、软件的连接状态，确保设备正常启动，无故障报警；
b) 进行探测器暗场校正和亮场校正：暗场校正需在探测器无射线照射、遮光状态下完成，亮场校正需在探测器接收均匀射线照射（通过标准厚度块或空透照）下完成，校正后图像灰度均匀性误差不超过±5%；
c) 用标准像质计验证图像质量：将像质计放置在焊缝透照区的一端（靠近射线源侧），与焊缝方向平行，像质计金属丝朝向探测器，曝光后图像中应能清晰识别像质计的至少 3 根连续金属丝（按 GB/T 3323.2-2019 要求）；
d) 透照参数设定：根据焊缝公称厚度、母材材质确定透照参数，参考表 1 选择初始透照参数、管电流和曝光时间，确保透照厚度比不大于 1.2（对接焊缝）或 1.5（角焊缝），焦距（射线源到探测器的距离）不小于 600 mm（当焊缝厚度大于 20 mm 时，焦距不小于 800 mm）。

表 1　常见焊缝厚度对应的初始透照参数

焊缝公称厚度（mm）	母材材质	管电压（kV）	管电流（mA）	曝光时间（s）	焦距（mm）
2～8	碳钢	50～120	5～20	1～5	≥600
9～20	碳钢	120～200	20～40	5～15	≥600
21～40	碳钢	200～300	40～60	15～30	≥800
2～10	不锈钢	60～150	5～25	2～8	≥600
11～30	不锈钢	150～250	25～50	8～25	≥800

6.2　图像采集

6.2.1　透照布置

6.2.1.1　对接焊缝透照

6.2.1.1.1　优先采用单壁单影透照（焊缝公称厚度≤20 mm 时），射线束中心轴应垂直于焊缝中心平面，偏差不超过 2 mm，确保焊缝根部、熔合线完全纳入透照范围。

6.2.1.1.2　焊缝公称厚度＞20 mm 或工件无法单壁透照时（如封闭结构），采用双壁单影透照，需通过调整射线源与探测器距离，控制透照厚度比≤1.2，避免因厚度叠加导致缺陷模糊。

6.2.1.1.3　小径管对接焊缝（外径≤89 mm）采用双壁双影透照，透照角度需使焊缝在图像中形成不小于 15° 的重叠角，确保根部未焊透、未熔合等缺陷可清晰识别，且透照厚度比≤1.5。

6.2.1.2　角焊缝透照

6.2.1.2.1　采用倾斜透照方式，射线束与焊缝平面夹角控制在 30° ～45° ，入射方向需指向焊缝根部熔合线（角焊缝“趾部”与“跟部”连接处），避免射线束仅覆盖焊缝表面而漏检根部缺陷。

6.2.1.2.2　角焊缝公称厚度＞10 mm 时，采用分段透照（每段透照长度≤300 mm），相邻段重叠长度不小于 20 mm，确保焊缝全长及两侧热影响区（宽度≥5 mm）无透照盲区。

6.2.1.3　特殊结构焊缝补充

6.2.1.3.1　不等厚对接焊缝（厚度差＞3 mm），需在较薄侧加装与母材同材质的补偿块（厚度=差值，符合 NB/T 47013.2 要求），避免厚度突变导致射线强度不均。

6.2.1.3.2　曲面焊缝（如容器环缝、管道弯管焊缝），采用柔性探测器或弧形支撑装置，使探测器与工件曲面贴合，控制射线源到探测器的焦距偏差≤5 mm，确保焊缝成像无几何变形。

6.2.2　像质计与标记放置

像质计的放置应符合 GB/T 23901.1 和 GB/T 23901.2 的规定，并满足 NB/T 47013.2 第 5 章关于像质计放置的要求。

6.2.3　曝光采集

启动 X 射线机和数字探测器，按照设定的参数进行曝光，曝光过程中禁止移动工件、探测器或射线源；采集完成后，在软件中预览图像，检查图像是否存在伪影（如划痕、灰尘导致的暗点）、灰度是否均匀，若图像质量不符合要求（如像质计识别不清、伪影干扰缺陷判断），需重新清理工件或调整参数后再次曝光。

6.2.4　图像存储

将合格的图像按“工件编号-焊缝编号-透照日期-时间”的命名规则存储，存储格式选用 DICONDE（便于后续数据分析）或 TIFF（无压缩，确保图像质量），同时记录曝光参数（管电压、管电流、曝光时间、焦距）和探测器型号。

6.3　图像处理

6.3.1　基础校正与降噪增强：先执行暗场校正（遮光状态下采集暗电流信号并扣除）和亮场校正（均匀射线照射下采集信号，消除射线强度不均干扰）；再采用高斯滤波（滤波半径 1～3 像素）去除图像

噪声，滤波后需保留缺陷边缘清晰度；最后通过直方图均衡化调整对比度，使焊缝区域灰度范围占图像总灰度范围的 70%以上。

6.3.2 专业处理：针对厚度不均匀焊缝（如变截面焊缝），采用灰度补偿算法，按焊缝厚度分布曲线调整局部灰度，避免厚度差异掩盖缺陷；对疑似缺陷区域进行 2～4 倍局部放大，增强缺陷细节（如裂纹线性特征、气孔圆形轮廓），放大后图像需无像素失真。

6.3.3 处理后验证：处理完成后，重新检查像质计的可识别性和标记的清晰度，确保图像处理未导致缺陷信息丢失或产生虚假缺陷（如滤波过度导致的伪裂纹）；若发现问题，需退回上一步重新处理，调整处理参数（如减小滤波半径、降低对比度增强强度）。

6.4 图像评定

6.4.1 评定区划定：在处理后的图像中，以焊缝中心为基准，划定缺陷评定区，评定区宽度为焊缝宽度+两侧各 10 mm（覆盖热影响区），长度为透照区长度（不小于焊缝长度的 90%）；若焊缝存在弯曲或变向，评定区应随焊缝走向调整，确保覆盖整个检测段焊缝。

6.4.2 缺陷识别应按照以下要求：

a) 正常区域灰度基准界定：人工观察前，需先明确评定区内“正常区域”的灰度特征—焊缝金属区域灰度应呈均匀分布（灰度值波动范围≤5%），母材区域灰度略高于焊缝金属区域（差值通常为 8%～15%，具体需结合母材与焊缝金属的材质差异确认），热影响区灰度介于母材与焊缝金属之间且过渡平缓，无明显突变；

b) 灰度异常区域判定维度：人工通过图像放大功能（放大倍数 2～4 倍）逐段观察评定区，重点识别以下灰度异常区域：

1) 灰度值偏差：与周边同类型正常区域（如同一焊缝段、同一母材区域）相比，灰度值差异≥10%的区域（可通过软件灰度值测量工具直接读取量化差值），包括“低灰度异常区”（灰度值显著低于正常区域，可能对应气孔、裂纹、未熔合、未焊透等缺陷）和“高灰度异常区”（灰度值显著高于正常区域，可能对应高密度夹渣、金属氧化物堆积等缺陷）；

2) 形态特征：灰度异常区域若伴随边界特征（如线性边界、不规则块状边界、圆形/椭圆形边界），或存在灰度梯度突变（边界处灰度值变化率＞20%/mm），需重点标记为疑似缺陷。

c) 伪缺陷排除验证：对初步识别的灰度异常区域，需结合工件表面状态（如是否存在划痕、焊渣残留）、标记位置（是否与工件编号/焊缝编号标记重叠）、探测器状态（是否存在灰尘遮挡）进行验证—若异常区域随工件表面清理、标记移除或探测器清洁后消失，判定为伪缺陷；若异常区域位置固定且形态与缺陷特征（如裂纹的线性延伸、气孔的圆形轮廓）匹配，则纳入疑似缺陷清单，结合软件边缘检测算法进一步确认。

6.4.3 尺寸测量：使用软件中的测量工具（直线测量、面积测量）对确认的缺陷进行尺寸测量，测量精度不低于 0.1 mm（长度、宽度）、0.5 mm²（面积）。

6.4.4 线性缺陷（如裂纹、未熔合、未焊透）：测量缺陷的最大长度（沿缺陷延伸方向）和最大宽度（垂直于缺陷延伸方向），若缺陷为断续分布（如断续裂纹），总长度为各段长度之和（段间间距≤2 mm 时）。

6.4.5 圆形缺陷（如气孔、圆形夹渣）：测量缺陷的最大直径，若缺陷为椭圆形，取长轴和短轴的平均值作为直径；对密集型圆形缺陷（同一评定区内缺陷数量≥5 个），还需测量缺陷的分布密度（缺陷数量/评定区面积，单位：个/cm²）。

6.4.6 质量判定：根据缺陷类型和尺寸，结合相关标准（如 NB/T 47013.2-2015）或设计要求的质量等级，判定焊缝质量是否合格。

7 数据处理与存储

7.1 数据处理

7.1.1 缺陷数据整理：将检测过程中识别的缺陷信息（缺陷类型、位置、尺寸、评定结果）录入 “焊缝缺陷检测数据表”（格式见附录 A），确保数据准确无误，若同一焊缝存在多种缺陷，需分别记录每种缺陷的信息。

7.1.2 图像质量数据统计：统计每次检测的图像分辨率（空间分辨率、灰度分辨率）、像质计识别等

级、透照参数稳定性（管电压、管电流波动值）等数据，形成“图像质量检测报告”（格式见附录 A），用于评估设备性能和检测过程的稳定性。

7.1.3　数据验证：对录入的数据进行交叉验证，由两名检测人员分别独立记录缺陷信息，若数据差异率（如缺陷尺寸差异、类型判定差异）超过 5%，需重新检查图像和测量过程，确认数据准确性后再录入。

7.2　数据存储

7.2.1　存储介质：采用专用服务器或云存储系统存储数据，存储介质需具备防磁、防潮、抗震性能，服务器硬盘容量不小于 1 TB（用于本地存储），云存储空间不小于 10 TB（用于备份）；禁止使用 U 盘、移动硬盘等便携式存储介质长期存储检测数据（仅可用于临时传输）。

7.2.2　存储格式：

a)　图像文件：采用 DICOM 格式或 TIFF 格式存储，存储时需包含图像元数据（如透照参数、探测器型号、检测日期）；

b)　数据文件：采用 Excel 格式或 PDF 格式存储，数据文件需设置访问密码，防止数据篡改；

c)　存储期限：检测数据（图像、数据表、报告）的存储期限应符合相关法规和 NB/T 47013.2 第 8 章对记录和报告保存的要求，最低不少于 7 年；

d)　数据备份：实行“本地+云端”双重备份制度，本地备份每月更新 1 次，云端备份每周更新 1 次；备份数据需进行完整性校验（如计算文件 MD5 值），确保备份数据与原始数据一致。

8　检测报告编制

8.1　报告内容

检测报告应包含以下内容，确保信息完整、清晰，便于用户理解和追溯：

a)　报告标题：“基于 X 射线数字图像的焊缝缺陷检测报告”，注明报告编号（格式：JCBG-年份-月份-序号，如 JCBG-2024-05-001）；

b)　委托信息：委托单位名称、联系人、联系电话、委托日期；检测单位名称、地址、资质证书编号（如无损检测机构资质证书）；

c)　工件信息：工件名称、型号、材质、规格（公称厚度、长度、宽度）、焊缝编号、焊接工艺（焊条型号、焊接电流、焊接速度）、制造单位名称；

d)　检测信息：检测日期、检测人员姓名及资格证书编号（如 RT Ⅱ级证书）、复核人员姓名及资格证书编号（如 RT Ⅲ级证书）；检测设备信息（X 射线机型号、探测器型号、软件版本）；透照参数（管电压、管电流、曝光时间、焦距、透照厚度比）；

e)　图像质量信息：图像分辨率（空间分辨率、灰度分辨率）、像质计识别等级、图像处理方法（如灰度校正、滤波算法）；

f)　缺陷信息：缺陷所在焊缝编号、位置（距焊缝起点距离、深度方向位置）、类型、尺寸（长度、宽度、面积）、评定结果（合格/不合格）；若存在不合格缺陷，需说明缺陷不符合的标准条款或设计要求；

g)　检测结论：明确焊缝质量等级（如按 JB/T 4730.2-2023 划分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级），判定焊缝是否合格；若存在不合格焊缝，需提出处理建议（如返修后重新检测、扩大检测范围）；

h)　附件：包括 X 射线数字图像（标注缺陷位置）、焊缝缺陷检测数据表（附录表 A.1）、图像质量检测报告（附录表 A.2）、检测单位资质证书复印件。

8.2　报告编制要求

8.2.1　数据准确性：报告中的所有数据（如缺陷尺寸、透照参数）需与原始记录一致；若检测过程中存在参数调整或数据修正，需在报告中注明调整原因和修正方法。

8.2.2　表述规范性：使用规范的术语和计量单位（长度单位用 mm、面积单位用 mm^2、剂量单位用μSv），避免使用模糊表述（如“大概”“约”）；缺陷位置描述需具体（如“焊缝 W1-02，距起点 150 mm 处，深度方向位于焊缝根部”）。

8.2.3　审核与批准：报告需经检测人员编制、复核人员审核、检测单位技术负责人批准后发放，编制

人、审核人、批准人需在报告上签字并注明日期，禁止代签。

8.2.4　报告发放：报告采用纸质版（加盖检测单位公章）和电子版（PDF 格式，加密）两种形式发放，纸质版一式三份（委托单位两份、检测单位一份），电子版发送至委托单位指定邮箱；报告发放需登记“检测报告发放记录表”（格式见附录 A.3），记录发放日期、接收人、报告份数。

附 录 A
（资料性）
缺陷检测记录表

焊缝缺陷检测数据表见表A.1；图像质量检测报告见表A.2；检测报告发放记录表见表A.3。

表 A.1 焊缝缺陷检测数据表

序号	工件编号	焊缝编号	缺陷类型	缺陷位置（距焊缝起点/mm）	缺陷尺寸（长度×宽度/mm）	缺陷面积（mm²）	评定结果（合格/不合格）	检测人员	检测日期	备注
1										
2										
...										

表 A.2 图像质量检测报告

检测编号	检测日期	设备型号（X射线机/探测器）	空间分辨率（lp/mm）	灰度分辨率（bit）	像质计识别等级	管电压波动值（%）	管电流波动值（%）	图像处理方法	检测人员	复核人员	结论

表 A.3 检测报告发放记录表

报告编号	委托单位	接收人	联系电话	发放日期	报告形式（纸质版/电子版）	报告份数	发放人	备注