ICS 37.020
CCS N 30

T/CS

团 体 标 准

T/CS 492—2026

基于深度学习的管道焊缝缺陷检测设备技术规范

Technical specification for pipeline weld defect detection equipment based on deep learning

2026－09－11 发布　　2026－09－11 实施

中国商品学会　　发 布

目　　次

1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　总体要求 2
4.1　设备分类 2
4.2　设备组成 2
4.3　深度学习工作原理 2
4.4　设备适用条件 2
5　技术要求 2
5.1　尺寸偏差 2
5.2　运行要求 2
5.3　性能要求 2
5.4　软件功能要求 3
5.5　环境适应性试验 4
5.6　安全要求 4
6　试验方法 5
6.1　基本要求 5
6.2　尺寸偏差 5
6.3　运行要求 5
6.4　性能要求 5
6.5　软件功能要求 6
6.6　环境适应性试验 7
6.7　安全要求 7
7　检验规则 7
7.1　检验分类 7
7.2　出厂检验 7
7.3　型式检验 8
8　标志、包装、运输与贮存 8
8.1　标志 8
8.2　包装 8
8.3　运输 8
8.4　贮存 8
参考文献 10

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。

本文件由中国商品学会标准管理委员会提出。

本文件由中国商品学会归口。

本文件起草单位：华中科技大学、南京钢铁股份有限公司、福建省特种设备检验研究院宁德分院、苏州耐迪特精密模具有限公司、重庆日联科技有限公司、河南华探检测技术有限公司、唐山松下产业机器有限公司、山东建筑大学。

本文件主要起草人：康宜华、杜裕平、孙明辉、顾玄、郭俊峰、叶俊超、董科研、王需要、李江、霍玉双。

基于深度学习的管道焊缝缺陷检测设备技术规范

1 范围

本文件规定了基于深度学习的管道焊缝缺陷检测设备的总体要求、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输与贮存。

本文件适用于采用激光测量/X射线检测技术与深度学习算法的管道焊缝缺陷检测设备（以下简称“设备”）。

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 工业探伤放射防护标准

GB/T 191 包装储运图示标志

GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温

GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温

GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验

GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）

GB/T 2893.5 图形符号 安全色和安全标志 第5部分：安全标志使用原则与要求

GB/T 3768 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 采用反射面上方包络测量面的简易法

GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB/T 6388 运输包装收发货标志

GB 7247.1—2024 激光产品的安全 第1部分：设备分类和要求

GB/T 10320 激光设备和设施的电气安全

GB/T 13306 标牌

GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件

GB 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GB/T 35388 无损检测 X射线数字成像检测 检测方法

GB/Z 41476.1 无损检测仪器 1MV以下X射线设备的辐射防护规则 第1部分：通用安全技术要求

JB/T 6221 无损检测仪器 工业X射线探伤机电气通用技术条件

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

深度学习 deep learning

通过训练具有许多隐层的神经网络来创建丰富层次表示的方法。

[来源：GB/T 41867-2022，3.2.27]

3.2

焊缝 weld

对接、搭接或角接过程中，通过焊接形成的连接部位。

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。

注：以下简称“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。

4 总体要求

4.1 设备分类

4.1.1 设备按适用管道外径规格分为：

a) 小径管检测设备：适用于管径≤100 mm；
b) 中径管检测设备：适用于 100 mm＜管径≤500 mm；
c) 大径管检测设备：适用于管径＞500 mm。

4.1.2 设备按自动化程度分为：

a) 半自动检测设备：需人工辅助完成管道的定位、进给及检测过程的启动与监控；
b) 全自动检测设备：具备自动夹持、定位、进给及检测功能。

4.2 设备组成

设备组成应包括激光测量单元/X射线检测单元、图像/三维数据采集单元、深度学习处理单元、结果显示与存储单元，以及机械传动/定位单元。如采用X射线检测单元，应同时具备X射线辐射防护单元。深度学习处理单元应基于训练好的神经网络模型，实现焊缝缺陷的自动识别、分类和定位。

4.3 深度学习工作原理

通过激光测量单元和/或X射线检测单元获取焊缝区域的图像或三维点云数据；利用预训练的卷积神经网络、分割网络等深度学习模型对数据进行特征提取与分析，实现缺陷的自动识别、定位、分类与量化；最终通过软件系统输出检测结果，并支持可视化展示与报告生成。深度学习模型具备持续学习与优化能力，可通过更新模型版本提升检测性能。

4.4 设备适用条件

设备应能在以下条件下稳定工作：

a) 环境温度：-10 ℃～65 ℃；
b) 相对湿度：≤80%；
c) 大气压力：86 kPa～106 kPa；
d) 周围无强电磁干扰，磁场强度≤400 A/m；
e) 周围无强烈振动，振幅≤0.1 mm；
f) 周围粉尘浓度应＜10 mg/m³ 。

5 技术要求

5.1 尺寸偏差

5.1.1 设备外形尺寸（长×宽×高）相对于标称值偏差应≤±5 mm。

5.1.2 激光测量单元与机械定位单元的相对位置偏差应≤±1 mm；X 射线检测单元与机械定位单元的相对位置偏差≤±0.8 mm。

5.2 运行要求

设备运行时噪声应≤70 dB（A），按钮、旋钮等操作部件灵活可靠，显示界面文字清晰、无闪烁。

5.3 性能要求

5.3.1 激光测量性能

5.3.1.1 精确率、召回率

设备对常见焊缝缺陷的激光测量精确率、召回率应符合表1规定的要求。

表 1　激光测量精确率、召回率

缺陷类型	缺陷尺寸	精确率/%	召回率/%
裂纹	长度≥0.5 mm	≥95%	≥95%
气孔	直径≥1 mm	≥98%	≥98%
夹渣	最大尺寸≥1 mm	≥95%	≥95%

5.3.1.2　检测速度

全自动设备的连续检测速度应≥50 mm/s；半自动设备的单帧处理时间应≤2 s。

5.3.1.3　缺陷定位精度

缺陷边界定位误差应不超过缺陷实际长度的5%。

5.3.1.4　缺陷尺寸测量精度

长度、宽度测量误差应≤±0.1 mm；深度测量误差应≤±0.05 mm。

5.3.2　X 射线检测性能

5.3.2.1　精确率、召回率

设备对常见内部焊缝缺陷的X射线检测精确率、召回率应符合表2规定的要求。

表 2　X 射线检测精确率、召回率

缺陷类型	缺陷尺寸	精确率/%	召回率/%
内部气孔	直径≥0.5 mm	≥95%	≥95%
内部夹渣	最大尺寸≥0.5 mm	≥92%	≥92%
未焊透	长度≥0.3 mm	≥90%	≥90%

5.3.2.2　穿透边界

碳钢焊缝穿透厚度应≤50 mm，不锈钢焊缝穿透厚度应≤30 mm。

5.3.2.3　图像分辨率

图像分辨率应≥2.5线对/mm。

5.3.2.4　检测速度

数字成像模式下连续检测速度应≥30 mm/s。

5.3.3　缺陷分类能力

设备应能对检测到的缺陷进行分类，分类准确率应≥90%。缺陷类型包括但不限于裂纹、气孔、夹渣、未熔合、未焊透、咬边、焊瘤、凹陷等。

5.3.4　模型鲁棒性

设备所使用的深度学习模型应在不同光照、焊缝表面状态及成像条件下保持稳定的缺陷分类能力，分类准确率均不应低于85%。

5.4　软件功能要求

5.4.1　数据采集

应支持实时采集激光图像/点云数据与X射线图像/数据，可手动/自动触发。

5.4.2　实时检测

应具备缺陷实时识别、标记及报警功能。

5.4.3 结果存储

应支持保存原始数据、类型、位置、尺寸等缺陷参数及检测时间，支持CSV、JSON格式及点云文件PCD格式。

5.4.4 可视化

应支持2D/3D视图切换，可放大、缩小、旋转查看缺陷细节。

5.4.5 报告生成

应支持自动生成检测报告，包含管道信息、缺陷列表、统计分析及图像附件。

5.4.6 模型功能

5.4.6.1 单帧图像推理时间不大于 80 ms。

5.4.6.2 激光测量/X 射线检测训练数据集应符合：常见缺陷类型（气孔、夹渣、焊瘤等）每类原始样本不少于 2000 张，稀有缺陷类型（裂纹、未熔合、未焊透等）每类原始样本不少于 500 张，各类缺陷含经认证的数据增强样本后的有效总数每类不少于 4000 张，数据增强方法包括但不限于几何变换（旋转、翻转、缩放）、光学变换（亮度、对比度、噪声注入）及弹性形变，增强样本的标注应与原始样本标注结果一致并经验证。

5.4.6.3 数据集标注准确率不低于 95%，标注应由不少于 2 名具备相应专业经验的人员独立完成，取一致性不低于 90%的样本入库，不一致的样本由第 3 名专业人员仲裁后确定。

5.4.6.4 应支持模型版本记录、授权升级及离线更新。

5.5 环境适应性试验

按表3的规定对产品进行环境适应性试验，试验后外观无明显变化，标志应无损坏，并能正常运行；振动试验后，X射线管焦点漂移应≤0.1 mm，图像分辨率下降应≤10%。

表 3 环境适应性试验

项目	试验条件		
	试验条件	持续时间	状态
高温试验	温度：55 ℃±2 ℃	48 h	非工作状态
低温试验	温度：-25 ℃±2 ℃	48 h	
恒定湿热试验	温度：50 ℃±2 ℃ 湿度：90%±3%	72 h	
振动（正弦）试验	振动方向为三个互相垂直方向 加速度2.0 g 频率5 Hz～55 Hz 扫频循环10次	10 min	

5.6 安全要求

5.6.1 防护等级

设备外壳防护等级应不低于IP65。

5.6.2 激光安全

5.6.2.1 激光安全等级应符合 GB 7247.1—2024 中 1C 类或 2 类的要求。

5.6.2.2 设备应配备激光联锁装置，激光出口处张贴符合 GB 7247.1—2024 规定的安全标志。

5.6.3 X 射线辐射安全

应符合GB/Z 41476.1、GBZ 117、GB 18871中的相关要求。

5.6.4 电气安全

应符合GB/T 10320、JB/T 6221中的相关要求。

6 试验方法

6.1 基本要求

试验中所使用的计量器具、仪器仪表及标准试块（试样）均应在有效检定或校准周期内，其测量范围与精度应符合本文件规定的测试要求。

6.2 尺寸偏差

6.2.1 用精度 1 mm 的钢卷尺或精度 0.5 mm 的激光测距仪分别测量设备长、宽、高的实际尺寸，与制造商标称值对比，并计算偏差。

6.2.2 用精度 0.01 mm 的百分表或精度 0.02 mm 的激光跟踪仪测量激光测量单元中心与机械定位单元基准点在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向的相对位置，连续测量 3 次，取最大值。

6.2.3 用精度 0.01 mm 的激光跟踪仪测量 X 射线管焦点与机械定位基准点的 X 轴、Y 轴、Z 轴偏差，连续测量 3 次，取最大值。

6.3 运行要求

6.3.1 噪声测量按 GB/T 3768 的规定进行。

6.3.2 手动操作按钮、旋钮等部件 10 次，检查是否灵活无卡滞；连续运行设备 2 h，观察显示界面是否清晰、无闪烁。

6.4 性能要求

6.4.1 激光测量性能

6.4.1.1 精确率、召回率

采用经第三方认证的标准焊缝试样，至少包含200个缺陷，且应包含表1规定的各类缺陷。设备检测后与人工标定的真实结果进行对比，分别按式（1）、式（2）计算精确率、召回率，结果以百分数表示。独立检测不少于3次，最终取各指标平均值。

$$P = \frac{TP}{TP+FP} \times 100\% \cdots\cdots (1)$$

式中：

P ——精确率；

TP——被正确识别为缺陷的数量，单位为个；

FP——被错误识别为缺陷的数量，单位为个。

$$R = \frac{TP}{TP+FN} \times 100\% \cdots\cdots (2)$$

式中：

R ——召回率；

FN——未被识别出的真实缺陷的数量，单位为个。

6.4.1.2 检测速度

6.4.1.2.1 全自动设备：检测 1 m 长标准焊缝，用计时器记录时间并计算平均速度。

6.4.1.2.2 半自动设备：在软件界面手动触发单帧采集与处理，用系统日志或外部计时器记录从采集指令结束到处理结果完全显示的时间。重复测试 10 次，取平均值作为单帧处理时间。

6.4.1.3 缺陷定位精度

在标准焊缝试样上预先标记已知缺陷的边界位置，使用精度不低于0.01 mm的坐标测量设备测量其实际位置作为基准。设备对试样进行检测后，提取其输出的缺陷边界坐标，与基准位置进行比对。

6.4.1.4 缺陷尺寸测量精度

用精度0.01 mm的千分尺测量缺陷实际长度、宽度、深度，与设备测量值对比并计算误差。

6.4.2 X射线检测性能

6.4.2.1 精确率、召回率

采用经第三方认证的标准焊缝试样，至少包含150个缺陷，且应包含表2规定的各类缺陷。设备检测后与人工标定的真实结果进行对比，分别按式（1）、式（2）计算精确率、召回率，结果以百分数表示。独立检测不少于3次，最终取各指标平均值。

6.4.2.2 穿透边界

对以下各厚度试块进行X射线检测，记录图像中缺陷的可识别性：

a) 碳钢试块：材质宜为Q235B或同等抗拉强度级别的低碳钢，厚度分别为10 mm、30 mm、50 mm、55 mm，均含直径≥0.1 mm内部人工气孔；
b) 不锈钢试块：材质宜为304或同等级别的奥氏体不锈钢厚度分别为10 mm、20 mm、30 mm、35 mm，均含直径≥0.1 mm内部人工气孔。

6.4.2.3 图像分辨率

采用符合GB/T 35388要求的X射线线对测试卡，将线对卡置于X射线检测区域，按设备最佳参数采集图像，用专用图像分析软件测量可分辨的最大线对数量。

6.4.2.4 检测速度

采用长度为1 m的标准环焊缝试块，在数字成像模式下，设置设备为连续检测状态，用精度0.1 s的计时器记录从检测开始到完成1 m焊缝扫描的总时间，计算平均检测速度。

6.4.3 缺陷分类能力

采用经第三方认证的标准焊缝试样，包含不少于5种缺陷类型，每种缺陷不少于20个样本，总缺陷数不少于100个。设备检测后，将其分类结果与人工标定结果进行对比，按式（3）计算分类准确率，结果以百分数表示。

$$CA = \frac{C}{T} \times 100\% \quad \cdots\cdots (1)$$

式中：

CA——分类准确率；

C ——正确分类的缺陷数量，单位为个；

T ——总缺陷数量，单位为个。

6.4.4 模型鲁棒性

在以下三种典型条件下分别进行缺陷分类能力试验，每种条件下测试不少于30个缺陷：

a) 光照条件变化：照度范围200 lx～1 000 lx；
b) 焊缝表面存在轻微锈蚀或污物；
c) 成像角度偏差±5°。

6.5 软件功能要求

6.5.1 数据采集

操作设备进行手动和自动触发采集，检查是否能实时获取激光图像/点云数据或X射线图像/数据。

6.5.2 实时检测

在设备运行时引入已知缺陷，检查是否能实时标记缺陷并触发声光报警。

6.5.3 结果存储

完成检测后，查看存储文件，检查是否包含原始数据、缺陷参数及检测时间。

6.5.4 可视化

操作软件进行2D/3D视图切换、放大、缩小、旋转，检查是否能清晰查看缺陷细节。

6.5.5 报告生成

触发报告生成指令，检查报告是否包含管道信息、缺陷列表、统计分析及图像附件。

6.5.6 模型功能

6.5.6.1 取 100 张 1920×1080 分辨率的激光/X 射线标准图像各 50 张，测算单帧推理平均时间；核查制造商提供的训练数据集数量；随机抽取 200 张样本，由专业人员复核标注准确率。

6.5.6.2 查看模型版本记录，尝试授权升级和离线更新，检查是否能正常完成操作。

6.6 环境适应性试验

6.6.1 高温试验

按GB/T 2423.2的规定进行。

6.6.2 低温试验

按GB/T 2423.1的规定进行。

6.6.3 恒定湿热试验

按GB/T 2423.3的规定进行。

6.6.4 振动（正弦）试验

按GB/T 2423.10的规定进行。采用X射线检测单元的设备经振动试验后，用X射线焦点测量仪测量焦点位置，焦点漂移应≤0.1 mm，图像分辨率下降应≤10%。

6.7 安全要求

6.7.1 防护等级

按GB/T 4208的规定进行。

6.7.2 激光安全

按GB 7247.1—2024的规定进行。

6.7.3 X 射线辐射防护安全

按GB/Z 41476.1、GBZ 117、GB 18871的规定进行。

6.7.4 电气安全

按GB/T 10320、JB/T 6221的规定进行。

7 检验规则

7.1 检验分类

设备的检验分为出厂检验和型式检验。

7.2 出厂检验

7.2.1 每台设备出厂前应做出厂检验，检验合格方可出厂，出厂应附有合格证。出厂检验的项目按表 4 的规定进行。

表 4　检验项目

检验项目	要求	试验方法	出厂检验	型式检验
尺寸偏差	5.1	6.2	√	√
运行要求	5.2	6.3	√	√
性能要求	5.3	6.4	—	√
软件功能要求	5.4	6.5	—	√
环境适应性试验	5.5	6.6	—	√
安全要求	5.6	6.7	—	√

7.2.2　如有一项或以上不合格，则判该台设备出厂检验不合格，但允许返修后，重新提交检验；若全部项目合格，则判该台设备出厂检验合格。

7.3　型式检验

7.3.1　正常生产期间每一年进行一次，有下列情况之一时，也应进行型式检验：

a)　新产品投产或老产品转厂生产的试制定型鉴定；
b)　正式生产后，如结构、材料、工艺有较大改变，可能影响产品性能；
c)　产品停产一年后，恢复生产；
d)　出厂检验结果与上次型式检验有较大差异；

7.3.2　型式检验的样品应从出厂检验合格品中随机抽取。型式检验项目按表 4 的规定进行。

7.3.3　型式检验中，若全部符合本文件要求，则判定该次型式检验合格；如有一项或以上项目不合格，则判该次型式检验不合格。

8　标志、包装、运输与贮存

8.1　标志

8.1.1　设备应在醒目部位设置标牌，标牌应符合 GB/T 13306 的规定，标牌上应至少注明下列内容：

a)　产品名称；
b)　产品类型；
c)　生产单位；
d)　执行标准编号；
e)　生产日期。

8.1.2　采用 X 射线检测单元的设备应粘贴符合 GB/T 2893.5 要求的 X 射线辐射警示标志。

8.1.3　在包装箱外应标注产品名称、类型、生产单位名称及地址、箱体外形尺寸、生产日期、批号等，包装储运图示标志应符合 GB/T 191 的规定。

8.1.4　运输发货标志应符合 GB/T 6388 的规定。

8.2　包装

8.2.1　包装箱应符合 GB/T 13384 的规定。

8.2.2　设备在包装箱中应固定牢固。X 射线检测单元应单独用防振泡沫包装。

8.3　运输

8.3.1　运输应符合交通运输部门的有关规定，且保证设备在运输过程中无损伤。

8.3.2　运输、装卸时，应按包装箱标识的朝向放置，并轻拿轻放，不挤压、抛掷。若发现外包装破损，应及时开箱查验设备状态，确认无损伤后方可继续流转。

8.3.3　运输工具应有防雨措施，并保持清洁无污染，不应与有腐蚀性的物品混合运输。

8.4　贮存

8.4.1　应存放在通风、干燥的库房内，应采取防晒、防潮、防雨、防腐蚀等措施。X 射线管单独贮存于

铅屏蔽箱中。

8.4.2　仓库环境温度应为-10 ℃～50 ℃，相对湿度不应大于 80%，周围环境应无腐蚀、易燃气体，无强烈机械振动、冲击及强磁场作用。

参 考 文 献

[1] GB/T 41867-2022 信息技术 人工智能 术语