ICS 25.160
CCS J 33

T/CS

团 体 标 准

T/CS 484—2026

焊缝缺陷自动检测设备性能要求与试验方法

Technical requirements and test methods for automated welding defect detection equipment

2026－09－11 发布 2026－09－11 实施

中国商品学会 发 布

目　　次

前言 III
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 分类 1
4.1 检测原理 1
4.2 检验形式 2
按检测形式分类： 2
5 一般要求 2
5.1 设备组成 2
5.2 环境适应性 2
5.3 安全性 2
6 性能要求 2
6.1 仪器性能 2
6.2 探头/探测器性能 2
6.3 机械系统性能 3
6.4 检出能力 3
6.5 信噪比 3
6.6 重复性与稳定性 3
7 试验方法 3
7.1 试验条件 3
7.2 仪器性能试验 4
7.3 探头性能试验 4
7.4 机械系统精度试验 4
7.5 检出能力试验 4
7.6 信噪比试验 5
7.7 重复性与稳定性试验 5
7.8 环境适应性试验 6

8 检验规则 6
8.1 出厂检验 6
8.2 型式检验 6
8.3 判定规则 6
附录 A （规范性） 参考试块技术要求 1
A.1 一般规定 1
A.2 人工反射体 1
A.3 对称性要求 1
A.4 试块验证 1
A.5 标记与文件 1
附录 B （规范性） 检出率试验用对比试件制作要求 1
B.1 目的 1
B.2 试件材料 1
B.3 缺陷设置 1
B.4 缺陷制作方式 1
B.5 缺陷真实性确认 1
B.6 标记与文件 2

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。

本文件由武汉逸飞激光股份有限公司提出。

本文件由中国商品学会归口。

本文件起草单位：武汉逸飞激光股份有限公司、华中科技大学、唐山松下产业机器有限公司、武汉中科创新技术股份有限公司、河南华探检测技术有限公司、重庆日联科技有限公司。

本文件主要起草人：冉昌林、孟昌、蔡汉钢、康宜华、冯搏、李江、韩志雄、桂玲玲、敬和生、王全军、郭俊峰、程树刚。

焊缝缺陷自动检测设备性能要求与试验方法

1 范围

本文件规定了焊缝缺陷自动检测设备的分类、一般要求、性能要求、试验方法、检验规则。

本文件适用于焊缝缺陷自动检测设备。

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。

GB/T 3323.2 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 6587 电子测量仪器通用规范

GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测

GB/T 27664.1 无损检测仪器 超声检测设备的性能与检验 第1部分：仪器

GB/T 27664.2 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第2部分：探头

GB/T 40733 焊缝无损检测 超声检测 自动相控阵超声技术的应用

GB/T 42399.1 无损检测仪器 相控阵超声设备的性能与检验 第1部分：仪器

GB/T 42399.2 无损检测仪器 相控阵超声设备的性能与检验 第2部分：探头

GB/T 44362 焊缝无损检测 超声检测 自动全聚焦技术（TFM）

NB/T 11663.2 承压设备无损检测系统性能测试与评价 第2部分：相控阵超声检测系统

3 术语和定义

GB/T 12604.1、GB/T 40733、GB/T 44362界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

焊缝缺陷自动检测设备 automated welding defect detection equipment

能够按照预设程序自动完成焊缝缺陷检测、数据采集、信号处理和结果判定的成套检测装置，通常包括检测仪器、探头/探测器阵列、机械扫描装置、数据采集与处理系统、控制与显示系统等。

3.2

检测灵敏度 detection sensitivity

设备对焊缝中缺陷的最小可检出能力，以特定反射体（如平底孔、横孔）的当量尺寸表示。

3.3

定位误差 positioning error

设备检测出的缺陷位置与实际缺陷位置之间的偏差。

3.4

检出率 probability of detection; POD

在规定的检测条件下，设备检出特定类型、尺寸缺陷的概率。

4 分类

4.1 检测原理

按检测原理分类：

a) 超声检测设备（含相控阵超声检测设备、全聚焦超声检测设备、衍射声时检测设备）；
b) 射线数字成像检测设备；
c) 其他（如涡流检测、视觉检测等）。

4.2 检验形式

按检测形式分类：
a) 半自动检测设备：包含控制一个或多个探头运动线路的固定装置，通过位置传感器测量探头位置，以手动方式实现扫查；
b) 全自动检测设备：包含机械驱动系统，可自动完成扫查路径规划和运动控制。

5 一般要求

5.1 设备组成

设备应至少包括以下组成部分：
a) 检测仪器主机（含信号发射/接收单元、数据处理单元）；
b) 检测传感器（探头/探测器阵列）；
c) 机械扫查装置（含运动控制与位置编码器）；
d) 数据采集、处理与显示系统；
e) 辅助装置（含耦合系统、校准试块等）。

5.2 环境适应性

设备在下列环境条件下应能正常工作：
a) 环境温度：-10 ℃～+60 ℃（或按制造商标称范围）；
b) 相对湿度：≤85%（非冷凝）；
c) 电源电压：220 V±22 V，50 Hz±1 Hz。

5.3 安全性

设备电气安全应符合GB/T 6587中相关要求。

6 性能要求

6.1 仪器性能

6.1.1 超声检测仪器

超声检测仪器的性能应符合 GB/T 27664.1、GB/T 42399.1 的相关规定。主要指标包括：
a) 增益范围：≥100 dB（或覆盖探头标称频率下实际工作增益范围），步进≤1 dB；
b) 带宽：应覆盖探头标称频率范围，且相对带宽不低于 60%；
c) 动态范围：≥32 dB；
d) 采样频率：≥100 MHz（常规 A 型脉冲设备）；全聚焦（TFM）设备宜≥100 MHz，且采样点应满足 TFM 重建算法对信号完整性的最低要求；
e) 数字滤波带宽：0.5 MHz～20 MHz 范围内可调。

6.1.2 射线数字成像设备

射线数字成像设备应符合GB/T 3323.2中探测器系统的相关要求。

6.2 探头/探测器性能

6.2.1 超声探头

超声探头应符合GB/T 27664.2或GB/T 42399.2的相关规定。对于相控阵探头，还应满足：
a) 阵元数量：≥16 通道（全聚焦检测宜≥64 通道）；
b) 中心频率：0.5 MHz～15 MHz 范围内可选；

c） 阵元间距：应满足检测分辨率和偏转角度要求。

6.2.2 数字化探测器

采用数字阵列探测器（DDA）时，应满足GB/T 3323.2中第5章的要求。

6.3 机械系统性能

机械扫查装置应满足以下要求：

a） 定位精度：≤0.5 mm；
b） 重复定位精度：≤0.2 mm；
c） 扫查速度：可调，最大速度≥50 mm/s；
d） 位置编码器分辨率：≤0.1 mm。

6.4 检出能力

6.4.1 灵敏度

设备对焊缝内部缺陷的检测灵敏度应不低于Φ2 mm平底孔当量（或等效反射体）。

6.4.2 检出率

在规定的检测条件和验收等级下，对下列缺陷的检出率应满足：

a） 气孔缺陷（直径≥1.6 mm）：检出率≥99%；
b） 裂纹类缺陷（高度≥1 mm，长度≥3 mm）：检出率≥95%；

注：检出率指标应基于附录B规定的对比试件，采用盲测方式验证。对于尺寸处于指标下限的缺陷（如长度3 mm、高度1 mm），允许检出率指标降低5个百分点，但需在报告中注明。

c） 未熔合/未焊透缺陷（长度≥3 mm）：检出率≥95%。

6.4.3 定位误差

缺陷定位误差应满足：

a） 沿焊缝方向：≤3 mm；
b） 焊缝截面方向（深度/水平距离）：≤1 mm。

6.4.4 定量误差

缺陷尺寸（长度、高度）测量误差应满足：

a） 长度测量误差：≤±3 mm；
b） 高度测量误差：≤±1 mm或±10%（取较大值）。

6.5 信噪比

在规定的检测灵敏度下，系统信噪比应不低于12 dB。

6.6 重复性与稳定性

6.6.1 重复性

在同一检测条件下对同一参考反射体进行10次重复测量，信号幅值波动应不超过±2 dB。

6.6.2 稳定性

设备连续工作4 h，灵敏度漂移应不超过±2 dB。

7 试验方法

7.1 试验条件

试验应在以下条件下进行：

a） 环境温度：20 ℃±5 ℃；

b） 相对湿度：45%～75%；
c） 电源电压：220 V±5%，频率 50 Hz±0.5 Hz；
d） 设备预热时间：不少于制造商规定值（通常不少于 30 min）。

7.2 仪器性能试验

7.2.1 超声检测仪器性能试验

按GB/T 27664.1、GB/T 42399.1的相关规定进行：
a） 增益精度与线性：使用校准试块，测量实际增益与标称增益的偏差；
b） 垂直线性：测量输入信号幅度与显示幅度的线性关系，偏差不超过±5%；
c） 水平线性：测量时基线的线性度，偏差不超过±2%；
d） 动态范围：按 GB/T 27664.1 附录规定的方法测试。

7.2.2 全聚焦（TFM）仪器性能试验

具有全聚焦功能的设备，除 7.2.1 外，还应按 GB/T 44362-2024 第 8 章的规定进行仪器检查。

7.3 探头性能试验

7.3.1 常规超声探头

按 GB/T 27664.2 的规定进行以下项目：
a） 中心频率测量；
b） 相对带宽测量；
c） 脉冲持续时间测量；
d） 灵敏度测量。

7.3.2 相控阵/全聚焦探头

按 GB/T 42399.2 或 NB/T 11663.2-2024 第 5 章的规定进行：
a） 阵元一致性测试（灵敏度差异≤±3 dB，中心频率差异≤±10%）；
b） 阵元串扰测试（相邻阵元串扰≤-30 dB）；
c） 楔块声学特性测试。

7.4 机械系统精度试验

7.4.1 定位精度

使用激光干涉仪或高精度位移传感器测量：
a） 按设备标称运动范围设定目标位置点（不少于 5 个）；
b） 记录各位置实际到达值与目标值的偏差，取最大值作为定位精度。

7.4.2 重复定位精度

应符合：
a） 使运动部件从同一方向多次（不少于 7 次）运动至同一目标位置；
b） 记录实际位置偏差，按 3 倍标准差计算重复定位精度。

7.4.3 位置编码器分辨率

读取编码器最小增量对应的位移量，应符合 6.3 中 d）的要求。

7.5 检出能力试验

7.5.1 灵敏度试验

应符合：
a） 选用与检测对象材质相近的参考试块，内嵌Φ2 mm 平底孔（或等效反射体）；
b） 按设备操作程序对试块进行自动检测；

c） 调节增益使反射体回波达到满屏 80%，该增益值对应的灵敏度即为设备灵敏度。

7.5.2 检出率试验

应符合：

a） 制备含已知数量、类型、尺寸缺陷的对比试件（缺陷数量不少于 30 个）；

b） 采用盲测方式，由设备自动检测并记录检出缺陷；

c） 按公式（1）计算检出率：

$$POD = \frac{N_t}{N_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

POD——检出率；

N_d——检出的缺陷数量；

N_t——试件中缺陷实际总数。

d） 检出率应满足 6.4.2 的要求。

7.5.3 定位精度试验

应符合：

a） 在参考试块上设置已知位置的人工反射体（不少于 5 个）；

b） 设备自动检测并记录各反射体位置；

c） 计算检测位置与实际位置的偏差，取最大值作为定位误差，应满足 6.4.3 要求。

7.5.4 定量精度试验

应符合：

a） 使用含不同尺寸人工反射体（长度、高度已知）的试块；

b） 设备自动检测并测量各反射体尺寸；

c） 计算测量值与真实值的偏差，应满足 6.4.4 要求。

7.6 信噪比试验

应符合：

a） 在检测灵敏度下，测量参考试块中反射体回波幅度（信号幅值）；

b） 在无反射体的邻近区域，测量背景噪声幅度；

c） 按公式（2）计算信噪比：

$$SNR = 20\log_{10}\frac{A_s}{A_n} \quad (2)$$

式中：

SNR——信噪比，单位为分贝（dB）；

A_s——信号幅值；

A_n——噪声幅值。

d） 信噪比应满足 6.5 的要求。

7.7 重复性与稳定性试验

7.7.1 重复性试验

应符合：

a） 对同一参考反射体，在相同条件下连续测量 10 次；

b） 记录每次回波幅值，计算最大值与最小值的差值，应满足 6.6.1 要求。

7.7.2 稳定性试验

应符合：

a） 设备开机后 30 分钟，记录参考反射体回波幅值 A_0；

b） 设备连续运行 4 小时，期间每隔 30 分钟记录一次幅值 A_i；
c） 计算最大幅值漂移 $|A_i - A_0|$ 应满足 6.6.2 要求。

7.8 环境适应性试验

按 GB/T 6587 中相关方法进行温度、湿度试验。

8 检验规则

8.1 出厂检验

每台设备出厂前应进行出厂检验，检验项目包括：
a） 外观与结构检查；
b） 仪器基本功能检查；
c） 6.1、6.2、6.3、6.4.3、6.5、6.6 规定的项目。

8.2 型式检验

8.2.1 有下列情况之一时，应进行型式检验：
a） 新产品定型或老产品转厂生产；
b） 产品结构、材料、工艺有重大改变，可能影响性能；
c） 正常生产时，每 3 年进行一次；
d） 停产 2 年以上恢复生产；
e） 国家质量监督机构提出要求。

8.2.2 型式检验应包括第 6 章全部项目。

8.2.3 对于采用 AI/深度学习缺陷识别算法的设备，算法版本更新或训练数据集发生重大变更时，应进行型式检验或专项性能验证

8.3 判定规则

应符合：
a） 所有检验项目符合要求，判定为合格；
b） 存在不符合项目时，允许进行整改后复检，复检仍不合格则判定为不合格。

附 录 A
（规范性）
参考试块技术要求

A.1 一般规定

A.1.1 参考试块用于设备校准、灵敏度设置和性能验证。

A.1.2 参考试块应采用与被检工件声学性能相同或相近的材料制作。材料应满足以下要求：

a) 材质晶粒度均匀，内部无影响使用的缺陷信号；
b) 声衰减系数与被检工件相同或相似，相同厚度材料前三次背面反射幅度之和与被检材料的差值在±25%范围以内；
c) 声速与被检工件的差异不大于±1%；
d) 与被检工件具有相同的几何特征（壁厚、曲率等），推荐使用同厂、同批次工件试样制作。

A.2 人工反射体

A.2.1 总则

参考试块中的人工反射体类型应根据检测方法和验收等级确定，可包括平底孔、横孔、方槽、V 形槽等。

A.2.2 平底孔反射体要求

应符合：

a) 平底孔直径宜采用Φ2 mm 或Φ3 mm，用于灵敏度设置和当量比较；
b) 平底孔轴线与检测面垂直度偏差不超过±2°；
c) 平底孔深度位置应覆盖被检焊缝的厚度范围。

A.2.3 槽型反射体要求

应符合：

a) 模拟表面缺陷的槽型反射体深度可为 1 mm，宽度为 2 mm，长度宜为 10 mm～20 mm；
b) 槽的加工应采用电火花（EDM）方法，保证尺寸精度和形貌一致性。

A.2.4 反射体加工精度

反射体加工精度应满足以下要求

a) 孔径/槽宽公差：±0.1 mm；
b) 深度公差：±0.2 mm；
c) 长度公差：±0.5 mm；
d) 位置公差：±0.5 mm。

A.3 对称性要求

A.3.1 对于需要双侧检测的焊缝，参考试块中上下游对应反射体的回波幅值偏差应不大于2 dB。

A.3.2 试块装配后，反射体加工区域与管体应保持在同一圆度上，精度不应影响探头移动。

A.4 试块验证

A.4.1 试块加工完成后，应使用经校准的检测系统进行综合性能验证。

A.4.2 验证内容包括但不限于：

a) 各反射体回波增益测量；
b) 上下游对称性复验；
c) 相邻反射体信号串扰检查，相邻通道波束覆盖宜达到 5%～40%。

A.5 标记与文件

A.5.1　试块应有永久性标记，标明试块编号、材料牌号、壁厚和加工日期。

A.5.2　试块应附有出厂合格证书，包含材质证明、反射体尺寸检测报告和超声验证报告。

附 录 B
（规范性）
检出率试验用对比试件制作要求

B.1 目的

本附录规定了6.4.2条检出率试验所用对比试件的制作要求，用于验证设备对焊缝中自然缺陷或模拟缺陷的检出能力。

B.2 试件材料

试件材料应符合：

a) 对比试件应采用与被检工件相同或相近的材料制作，包括相同的材质、板厚/壁厚、焊接工艺和坡口形式；
b) 试件的焊接工艺（焊接方法、焊接参数、焊材）应与实际被检工件一致。

B.3 缺陷设置

B.3.1 缺陷类型和数量

对比试件中应包含以下类型缺陷，缺陷总数不少于30个：

a) 气孔（含密集气孔）：不少于 6 个；
b) 裂纹（含根部裂纹、中部裂纹、横向裂纹）：不少于 6 个；
c) 未熔合/未焊透（含坡口未熔合、根部未焊透）：不少于 6 个；
d) 条渣（条形夹渣）：不少于 6 个；
e) 其他类型缺陷（如咬边、焊趾裂纹等）：适量。

B.3.2 缺陷尺寸

缺陷尺寸应覆盖以下范围：

a) 缺陷长度：5 mm～50 mm，公差±3 mm；
b) 缺陷自身高度：1 mm～6 mm，公差±1 mm；
c) 气孔直径：Φ2 mm～Φ6 mm，公差±0.5 mm；
d) 缺陷深度位置应覆盖焊缝全厚度范围。

B.3.3 缺陷位置

应符合：

a) 缺陷应在焊缝不同分区（根部、热焊区、填充区、盖面层）均有分布；
b) 缺陷宜分布在焊缝的不同周向/纵向位置，避免相互干扰；
c) 同一试件内缺陷之间间距应不小于 20 mm，避免相邻缺陷信号混叠。

B.4 缺陷制作方式

B.4.1 人工预制缺陷可采用以下方式：

a) 焊接过程中植入（如预置金属片、铜丝等）；
b) 机械加工后补焊形成；
c) 电火花加工（EDM）槽型缺陷。

B.4.2 鼓励采用包含自然缺陷的试件进行检出率验证，以更真实反映设备对实际缺陷的检测能力。

B.5 缺陷真实性确认

B.5.1 试件制作完成后，应采用多种无损检测方法（如射线检测、常规超声检测、TOFD检测等）对缺陷进行综合验证，确认缺陷的类型、位置和尺寸。

B.5.2 对于代表性缺陷，可采用破坏性试验（如解剖、金相检验）进行真实尺寸确认。

B.5.3 应出具缺陷确认报告，报告内容应包括：

a) 试件编号和规格信息；
b) 缺陷分布图（标注各缺陷的位置、类型、尺寸）；
c) 缺陷确认的检测方法及检测结果；
d) 缺陷真实尺寸数据（经破坏性验证时）。

B.6 标记与文件

试件应有唯一的永久性编号，并标注检测起始端和方向，试件应随附完整的缺陷参数表。