

ICS 25.160.01

CCS J 33

T/CWDPA

团

体

标

准

T/CWDPA XXX—2026

电磁脉冲焊接质量控制与测试方法

Quality control and testing methods for electromagnetic pulse welding

(征求意见稿)

2026 – XX – XX 发布

2026 – XX – XX 实施

中国西部开发促进会 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 质量控制要求 1

 4.1 人员资质 1

 4.2 设备 1

 4.3 工艺参数控制 2

 4.4 焊接前准备 2

 4.5 焊接过程控制 2

 4.6 焊接后处理 3

5 测试方法 3

 5.1 外观检查试验 3

 5.2 尺寸测量试验 3

 5.3 无损检测试验 3

 5.4 力学性能试验 3

 5.5 残余应力试验 3

6 记录与报告 3

 6.1 记录要求 3

 6.2 报告要求 4

7 检验规则 4

 7.1 抽样方法 4

 7.2 合格判定 4

 7.3 不合格处理 4

8 标志、包装、运输和贮存 4

 8.1 标志 4

 8.2 包装 5

 8.3 运输 5

 8.4 贮存 5

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。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件首次发布。

电磁脉冲焊接质量控制与测试方法

1 范围

本文件规定了电磁脉冲焊接的质量控制要求、测试方法、记录与报告、检验规则、标志、包装、运输和贮存等内容。

本文件适用于电磁脉冲焊接质量控制与测试方法。

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 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法
GB/T 9445—2024 无损检测 人员资格鉴定与认证
GB/T 38952—2020 无损检测 残余应力超声体波检测方法
EN 18007-5:2024 电磁脉冲焊接 第5部分：质量与检验要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电磁脉冲焊接 electromagnetic pulse welding

利用电磁力驱动金属工件高速碰撞，通过冶金结合实现连接的焊接方法。其特点包括无热影响区、焊接接头强度高于母材、适用于异种材料连接等。

3.2

界面波状结构 interface wave-like structure

由冲击速度梯度形成的焊接界面特征形貌，需通过金相分析评估其均匀性。

4 质量控制要求

4.1 人员资质

焊接工作人员应具备以下资质：

- a) 操作人员应通过 EN 18007-3 认证或等效国内培训，具备电磁脉冲焊接设备操作、参数调整及常见故障处理能力；
- b) 无损检测人员应持有 GB/T 9445 规定的 II 级或以上资格证书。

4.2 设备

4.2.1 设备组成

电磁脉冲焊接设备应至少包括主机系统、控制系统和生产系统：

- a) 主机系统即电磁脉冲发生装置，由脉冲放电电路构成，应具备调节充能等级的功能，并在毫秒内将储能释放，为线圈工具提供强大瞬态电流；
- b) 控制系统应具备工艺参数调节的功能，并对设备运行状态进行监测；

- c) 生产系统应依据焊接产品实现自动化操作，包含工具线圈，用于产品加工，通过与主机输出的脉冲电流协同工作，实现产品制造。

4.2.2 脉冲电源

脉冲电源应符合表1的规定。

表 1 脉冲电源指标

项目	单位	指标
焊接能量	kJ	10~90
放电电流	kA	20~700
电流频率	kHz	5~30
脉冲频率	次/min	≥2

4.2.3 线圈工具

新设备安装后应进行3次重复性测试，工具应标注最大使用次数。焊接线圈应根据工件形状设计，采用导电率≥98%的铜合金材料，并通过有限元仿真优化磁场分布。

4.2.4 控制系统

应具备实时监测功能，电磁线圈温度应≤80℃，冲击速度偏差应控制在±5%。

4.3 工艺参数控制

4.3.1 关键参数

应至少包括峰值电流、脉冲宽度、焊件间隙等参数。例如，铝—铜焊接时，界面金属间化合物层厚度应控制在10 μm以内，优先选用阶梯式线圈设计降低边缘效应。

4.3.2 工艺文件

应使用经认证的焊接工艺规程（WPS），明确材料预处理要求。

4.4 焊接前准备

4.4.1 材料预处理

焊接前材料准备应满足以下要求：

- a) 核查母材牌号、状态及表面质量，异种金属焊件应进行相容性评估；
- b) 待焊表面平整、干净，无脏污、无裂纹、毛刺；
- c) 清洁后应在 24 h 内完成焊接，否则需重新处理。

4.4.2 工具检验

工具（线圈、工作台和夹紧部件）应充分清除污染物，并定期检查工具的磨损情况。

4.4.3 焊件装配

装配间隙偏差范围应控制在±0.1 mm，同轴度误差范围应≤0.5%。

4.5 焊接过程控制

4.5.1 实时监测

可安装电流传感器、温度传感器（精度±2℃）和力传感器（精度±1%），实时采集电流、线圈温度、焊接压力等数据。当电流波动超过设定值±5%或线圈温度≥80℃时，设备应自动停机并报警。

4.5.2 数据记录

每批次焊接应记录工艺参数（电压、频率、电流等）、过程数据（电流曲线等）及操作人员信息，保存期限应≥5年。

4.6 焊接后处理

目视检查焊缝表面，不应存在裂纹、气孔等缺陷，界面波状结构需均匀连续。

5 测试方法

5.1 外观检查试验

采用目视检查或5~10倍放大镜进行观察，焊缝表面不应存在裂纹、飞溅、未熔合等缺陷，允许存在少量直径 ≤ 0.5 mm的微小气孔，焊缝宽度偏差范围应控制在 ± 0.2 mm，余高 ≤ 0.5 mm。

5.2 尺寸测量试验

使用精度0.01 mm的千分尺测量焊点直径、板件变形量，焊点直径偏差范围应控制在 ± 0.1 mm，同轴度误差 ≤ 0.3 mm。

5.3 无损检测试验

5.3.1 超声检测试验（UT）

采用脉冲反射法，探头频率2 MHz~5 MHz，检测灵敏度设定为 $\Phi 2$ mm平底孔当量。并对焊缝进行扫查，记录缺陷位置、尺寸及回波高度。

5.3.2 涡流检测试验（ET）

使用频率1 kHz~10 kHz的穿过式线圈检测表面及近表面缺陷，如喷射残留、界面孔隙等。检测速度 ≤ 50 mm/s，信号异常时应进行金相分析。

5.3.3 金相分析试验

截取焊接接头横截面，经研磨、抛光后用3%硝酸酒精溶液侵蚀，观察界面波状结构、金属间化合物层及显微裂纹。

5.4 力学性能试验

5.4.1 拉伸试验

应按GB/T 228.1制备拉伸试样，测试焊接接头抗拉强度。接头强度应大于等于母材强度的90%，且断裂位置应位于母材或热影响区。

5.4.2 弯曲试验

采用三点弯曲法，弯芯直径为试样厚度的3倍，弯曲角度180°。试样弯曲后外表面无裂纹或开裂为合格。

5.4.3 剪切试验

对焊点进行剪切测试，剪切力应大于等于设计值的95%。若为异种材料焊接，剪切强度需满足行业规范。

5.4.4 通流试验

环境温度23℃ $\pm$ 5℃，219 A持续过流1 h，连接片表面最高温度不超过60℃。

5.5 残余应力试验

应按照GB/T 38952的规定执行，检测焊缝及热影响区的残余应力。

6 记录与报告

6.1 记录要求

记录分为过程记录和检测记录两类，内容应真实、完整、可追溯。

6.1.1 过程记录

过程记录应符合以下要求：

- a) 设备信息：电磁脉冲发生器型号、序列号、校准日期及结果、焊接线圈编号、材料牌号、设计参数；
- b) 材料信息：母材牌号、规格、材质证明编号、表面处理方法、处理时间及操作人员签字；
- c) 环境参数：焊接车间温度、相对湿度、记录时间；
- d) 工艺参数：放电电压、储能电容容量、脉冲频率、工件定位坐标、实时监测数据、异常记录。

6.1.2 检测记录

检测记录应满足以下要求：

- a) 外观缺陷：裂纹、飞溅、未熔合等缺陷的位置、尺寸、数量、焊缝宽度、余高的实测值；
- b) 尺寸偏差：焊点直径、管件同轴度、板件变形量的实测值与公差范围；
- c) 无损检测记录：超声检测（UT）、涡流检测（ET）以及金相分析；
- d) 力学性能测试记录：拉伸试验、弯曲试验、剪切实验、通流试验。

6.2 报告要求

报告内容应至少包括引言、基本信息、检测结果以及不合格项的处理。其中不合格项的处理应明确以下内容：

- a) 缺陷描述：包括位置、性质、超标程度；
- b) 原因分析：如“参数设定偏差，放电电压低于下限 2%”；
- c) 处置措施：返工或报废，返工需记录返工工艺参数及复检结果；
- d) 验证结论：如“返工后剪切强度达标”。

7 检验规则

7.1 抽样方法

7.1.1 首件检验

每班次生产前需进行首件检验，应至少包括外观、尺寸、力学性能测试。

7.1.2 批量检验

每批次焊件按5%抽样，若发现不合格品，应加倍抽样复检。

7.2 合格判定

7.2.1 关键项目

外观、无损检测、力学性能测试应全部合格。

7.2.2 一般项目

尺寸偏差、微观结构指标允许20%范围内的样品超出标准值。

7.3 不合格处理

不合格品应按以下方式进行处理：

- a) 标识隔离：不合格品应进行明确标识并隔离存放；
- b) 原因分析：对不合格品应进行失效分析，如：断口形貌呈现“河流状”和韧窝结构混合形式，判定为韧脆混合断裂；
- c) 纠正措施：针对不合格原因应调整工艺参数或设备，重新验证后方可恢复生产。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

合格焊件应采用激光打标或蚀刻工艺，在显著位置标注永久标志，应至少包括焊件型号、规格、批号及生产日期、检验状态、追溯码等内容。

8.2 包装

8.2.1 内包装

采用防静电PE袋或铝箔袋封装，内部填充干燥硅胶，必要时喷涂防锈剂。使用EPE珍珠棉或聚氨酯泡沫包裹焊件，厚度应 $\geq 10\text{ mm}$ 。

8.2.2 外包装

采用瓦楞纸箱或金属周转箱，箱体外表面印刷运输标志。使用尼龙扎带或钢带固定，钢带厚度应 $\geq 0.8\text{ mm}$ 。

8.2.3 特殊防护

异种金属焊件之间采用聚四氟乙烯材质的绝缘垫片隔离，螺栓连接处涂抹导电膏。

8.3 运输

包装箱堆码层数应 ≤ 5 层，运输过程中应固定牢固，避免振动和电磁干扰。

8.4 贮存

贮存环境温度应在 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 70\%$ ，远离酸碱等腐蚀性物质。
