

团 体 标 准

T/CWAN 0148—2025

轨道车辆铝合金激光-电弧复合焊接
第 3 部分：生产要求

Laser-arc hybrid welding of aluminum alloys for railway vehicles—
Part 3: Production requirements

2025-05-27 发布

2025-07-01 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
附录 A（资料性）激光-电弧复合焊接推荐工艺规程	4

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。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：中车青岛四方机车车辆股份有限公司、哈焊国创（青岛）焊接工程创新中心有限公司、包头北方创业有限责任公司、哈尔滨工业大学（威海）、西南交通大学、青岛磊金德冲压件有限公司、中国科学院金属研究所、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、山东光之聚激光科技有限公司、广东省鑫全利激光智能装备有限公司、北部湾大学、南京埃斯顿电气有限公司、广西机电职业技术学院。

本文件主要起草人：韩晓辉、杨海峰、毛镇东、檀财旺、陈辉、金延累、阚盈、雷振、庞建新、房顺利、李刚卿、宋晓国、黄瑞生、刘艳、刘洋、曹浩、金潇、邹吉鹏、何建英、韩伟、李海波、武永寿、武鹏博、王鹏、黎欣、何志军、冯志强、李爱民、吴妍。

轨道车辆铝合金激光-电弧复合焊接 第3部分：生产要求

1 范围

本文件规定了轨道车辆铝合金激光-电弧复合焊接人员资质要求、工艺装备要求、焊前准备要求、焊接工艺方法、焊后处理和缺陷修复方法。激光-电弧复合焊是通过同步或交替使用激光束与电弧能量源实现协同作用的焊接方法，兼具高能量密度激光的深熔和电弧的强搭桥能力。

本文件适用于轨道车辆铝合金激光-MIG/MIG 复合焊接。

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 3375 焊接术语
- GB/T 4842 氩
- GB/T 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件
- GB 7247.1 激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求
- GB/T 7247.4 激光产品的安全 第4部分：激光防护屏
- GB/T 7247.14 激光产品的安全 第14部分：用户指南
- GB/T 8118 电弧焊机通用技术条件
- GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证
- GB 9448 焊接与切割安全
- GB/T 12467 金属材料熔焊质量要求
- GB/T 15490 固体激光器总规范
- GB/T 15579 弧焊设备
- GB/T 19805 焊接操作工技能评定
- GB/T 19840.1 机械安全 激光加工机 第1部分：通用安全要求
- GB/T 19866 焊接工艺规程及评定的一般原则
- GB/T 19867.6 激光-电弧复合焊接工艺规程
- GB/T 19869.2 铝及铝合金的焊接工艺评定试验
- GB/T 25343.1 铁路应用 轨道车辆及其零部件的焊接 第1部分：总则
- GB 30863 个体防护装备 眼面部防护 激光防护镜
- GB/T 31358 半导体激光器总规范
- GB/T 32532 焊接与切割用钨极
- GB/T 33645 钢、镍及镍合金激光-电弧复合焊接工艺评定试验
- GB/T 37893 激光-电弧复合焊接推荐工艺方法
- GB/T 39255 焊接与切割用保护气体
- JB/T 3223 焊接材料质量管理规程

3 术语和定义

GB/T 3375、GB/T 37893、GB/T 19866 和 GB/T 19867.6 界定的术语及定义适用于本文件。

4 安全要求

激光-电弧复合焊的环境条件及防护措施应符合 GB 9448、GB/T 5226.1、GB 7247.1、GB/T 7247.4、

GB/T 7247.14、GB/T 19840.1、GB 30863 等标准的相关规定。

5 一般要求

5.1 人员资质

5.1.1 产品组装人员应了解激光-电弧复合焊接技术，掌握工件组装精度要求，并经工艺培训且考试合格后方可上岗操作。

5.1.2 焊接人员应按 GB/T 19805 或用户认可的其他标准的有关规定进行技能评定，并取得相关资质证书。实际焊接操作前，焊接人员还应接受必要的培训，具备相应的知识、能力，并经考核合格后方可进行焊接操作。

5.1.3 检验人员应了解激光-电弧复合焊接缺陷类型，并具有 GB/T 9445 或用户认可的相应资质。

5.2 工艺设备

5.2.1 激光-电弧复合焊接设备至少应包括激光器、冷却系统、激光束传输及聚焦系、弧焊电源及激光-电弧复合焊枪、控制系统、工作台、供气系统及安全防护系统等主要部分；还可根据实际使用要求增加激光清洗、焊缝跟踪、过程监测、焊后检验等装置。

5.2.2 激光发生器应符合 GB/T 15490、GB/T 31358 等相关标准的规定；弧焊电源应符合 GB/T 8118、GB/T 15579 等相关标准的规定。

5.2.3 焊接设备应按规定进行定期保养、维护和日常点检，确保设备处于良好状态。

5.2.4 工装夹具应保证状态完好，以保证满足焊接使用要求。

5.3 材料

5.3.1 母材及焊丝经验收合格后方可投入使用。

5.3.2 焊丝应根据母材种类及性能要求进行匹配选择。焊丝存储应符合 JB/T 3223 的规定或焊丝供应商的要求。

5.3.3 激光-电弧复合焊用保护气体应符合 GB/T 39255 的规定，氩气还应符合 GB/T 4842 的规定。

5.3.4 焊接用钨极应符合 GB/T 32532 的规定，钨极应分类标记明确，包装完好，钨极表面无污染和破损。

5.3.5 工件及接头的制备可采用机械切削（铣削、锯切、冲剪、线切割等）、水切割、激光切割、等离子切割等方法进行。当采用激光切割、等离子切割等方法时，应留出足够余量，切割后去除切割面被氧化材料和切痕等直至母材区域。工件表面应无杂质、毛刺等。

5.3.6 接头制备过程中应严格控制待焊部位的尺寸精度，钝边的加工精度应控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 范围内。

5.4 环境要求

焊接场所要保持清洁，尽量应防止有害物质（如灰尘、金属粉末、油漆类等）以及不利气候（如风、雨、雪及车间内气流）对焊缝质量的影响。铝合金焊接场所温度不小于 8°C ，湿度不大于 80%。

6 焊接工艺

6.1 焊接工艺评定

6.1.1 铝合金的激光-电弧复合焊接应按 GB/T 19869.2，并参考 GB/T 33645 进行焊接工艺评定试验。

6.1.2 焊接工艺评定应能覆盖产品中所有接头。

6.2 焊接工艺规程

6.2.1 对于焊缝质量等级为 CP A、CP B1、CP B2、CP C1、CP C2、CP C3 焊缝，应编制焊接工艺规程（WPS，见附录 A 和附录 B）；焊缝质量等级为 CP D 的焊缝，只有当用户有要求才需编制 WPS。

6.2.2 激光-电弧复合焊接工艺规程应符合 GB/T 19867.6 的规定。

6.2.3 激光-电弧复合焊接的主要工艺参数包括激光功率、离焦量、焊接电流、焊接速度、热源间距等。应根据材料种类、接头类型、坡口尺寸确定工艺参数，可参考 GB/T 37893 中的推荐参数范围。

6.2.4 应根据接头要求和激光设备能力选取合适的离焦量，一般薄板焊接宜采用正离焦（焦点位于工件表面上方），厚板焊接宜采用负离焦（焦点位于工件表面下方）。

7 焊接生产

7.1 焊前准备

7.1.1 焊前应对工件待焊区域表面及两侧各不小于20mm范围内采用有机溶剂清除油污等后，采用机械打磨等方法清除氧化膜，再用有机溶剂清洗去除可能的污染源；清洗完成后应在规定时间内完成焊接操作。

7.1.2 工件应尽可能使用焊接工装进行装夹固定，保证焊接过程安全可靠。应通过工装调整尽量使接头处于易焊接操作的位置。检查工件的装夹状态，检查母材表面氧化膜是否去除并呈现均匀的银白色金属光泽，测量坡口组装间隙和错边量等组装状态数值，保证满足焊接要求。

7.1.3 检查激光设备、激光保护镜片、激光光路、激光控制软件状态（是否存在错误、报警等提示）、弧焊设备、保护气体、侧吹气体、焊接程序等是否满足焊接工艺要求，确认无异常后方可准备焊接。

7.1.4 为确保气路的通畅、洁净，焊接前可先送气一段时间直至排出气路内的空气、水分等。

7.1.5 为消除工件表面二次氧化、附着水分油污等问题并提升生产效率，可采用激光清洗集成于自动焊接设备，在焊接过程中同时在熔池前端完成工件的表面清洗。

7.2 焊接过程

7.2.1 检查自动焊程序中各焊接工艺参数是否设置正确。

7.2.2 为保证焊接路径的准确性，可通过程序空运行的方式校核焊接路径，若出现位置偏离以及设备与工件、工装干涉等情况，应重新修订校核程序，直至准确无误。

7.2.3 定位焊时可根据产品尺寸精度和性能要求，采用单激光焊接、激光填丝焊、电弧焊、激光-电弧复合焊接等方式。

7.2.4 连续焊的焊接顺序可根据产品焊接变形和残余应力等的要求进行确定。

7.2.5 若连续焊过程中因异常导致中断，应立即关闭激光；排除异常后，将中断处焊缝进行焊前清理后完成后续焊接。

7.3 焊后处理

7.3.1 焊后一般待焊缝冷却至室温后再对焊缝进行清理，所有焊缝焊后应清理黑灰、飞溅、焊渣等杂物。

7.3.2 为提升生产效率，可在自动焊接设备集成激光清洗装置，在焊接完成后即可完成黑灰的自动化激光清理。

7.3.3 焊后工件尺寸精度应满足设计图纸要求。当工件因焊接变形需要调修时，可采用机械或加热方法对其进行矫正。

8 缺陷修复

8.1 准备

8.1.1 修复前须确认缺陷或损伤产生的原因和范围。

8.1.2 焊接缺陷应优先通过打磨去除，打磨后通过渗透探伤确认，经过打磨能够消除且符合设计图纸要求的不需要补焊。

8.2 修复

8.2.1 修复工艺原则上应与原焊接工艺相同，两者不一致时，修复工艺应评定合格。

8.2.2 焊缝有缺陷时，原则上首先选用激光-电弧复合焊进行修补。修补方法为先清理磨平问题焊缝区域，再采用经过评定合格的修复工艺重新焊接。

8.2.3 返修焊缝较短时，可采用手工电弧焊进行修复。手工电弧焊修复前，应通过铲削或磨削方法将焊接缺陷彻底清除，然后通过PT和（或）RT确认焊缝无缺陷后再行补焊。

8.2.4 同一位置补焊的次数不宜超过两次。对补焊超过两次的焊缝若需再进行补焊时，应进行修复工艺评定。

8.2.5 补焊后必须通过无损检测确认缺陷完全消除，补焊焊缝质量要求满足设计要求。

附录 A
(资料性)

激光-电弧复合焊接推荐工艺规程

推荐焊接工艺规程如表A.1所示。

表A.1 推荐焊接工艺规程

(公司名称/logo)		焊接工艺规程 Welding Procedure Specification (WPS)					WPS 编号 No.		
							版本号 Ver.:		
工艺评定报告编号: WPQR No.: 金属过渡形态: Mode of metal transfer: 接头型式及焊缝种类: Joint Type and Weld Type: 焊缝制备细节(示意图)*: 见下图 Weld preparation details (Sketch)*: The following sketch					制备及清理方法: Method of preparation and cleaning: 母材牌号(组类): Parent material Designation: 母材厚度/规格(mm): Material thickness/Outside diameter(mm): 焊接位置: Welding positions:				
接头设计 Joint design					焊接顺序 Welding sequences				
焊接细节 Welding details									
焊道 Run	焊接方法 Process	激光功率 Laser power (kW)	光斑直径 Spot diameter (mm)	热源间距 Stand off (mm)	焊接电流 Current(A)	离焦量 Defocus amount(mm)	焊材规格 Size of filler metal(mm)	焊接速度* Travel speed (mm/s)	
保护气体/焊剂种类 Gas/Flux		电弧保护 Shielding			保护气体流量 Gas flow rate (L/min)		电弧保护 Shielding		
		根部保护 Backing					根部保护 Backing		
焊材类别和牌号: Filler metal classification and trade name: 特殊衬垫或烘干: Any Special Baking or Drying: 钨极种类/尺寸: Tungsten electrode type/size: 清根/衬垫的细节: Details of back gouging/Backing: 预热温度(°C): Preheat temperature(°C): 预热维持温度(°C): Pre-heat maintenance temperature(°C): 层/道间温度(°C): Interpass temperature(°C): 焊后热处理或时效处理: Post-weld Heat treatment and/or Ageing: 时间、温度、方法、加热速度和冷却速度*: Time、Temperature、Heating and cooling rates*: 注: 焊接电流、焊接电压、焊接速度允许上下浮动 10%					环境温度(°C): Environment temperature(°C): 摆动(焊道的最大宽度)(mm): Weaving(maximum width of run)(mm): 摆动:幅度、频率、暂停时间: Oscillation: amplitude, frequency, dwell time: 脉冲焊接细节: Pulse welding details: 干伸长(mm): Stickout(mm): 焊接细节: Welding details: 热源角度(°): Torch angle(°): 程序编号: Program No.: / / Note:Current,voltage and travel speed can be changed around 10%				
制订 Prepared by					校核 Reviewed by			批准 Approved by	
* 必要时 If required									