

团 体 标 准

T/CWAN 0146—2025

轨道车辆铝合金激光-电弧复合焊接  
第 1 部分：设计要求

Laser-arc hybrid welding of aluminum alloys for railway vehicles—Part 1: Design requirements

2025-05-27 发布

2025-07-01 实施

## 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 接头设计要求 .....	1
5 结构设计要求 .....	3
6 性能指标要求 .....	4
附录 A（资料性）铝合金激光-电弧复合焊推荐接头设计形式 .....	5
附录 B（资料性）铝合金激光-电弧复合焊接头性能要求 .....	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）、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、青岛磊金德冲压件有限公司、西南交通大学、中国科学院金属研究所、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、马国龙、马凯、檀财旺、雷振、金延累、阚盈、陈辉、刘艳、黄瑞生、崔辉、姜建召、邹吉鹏、张良、金延顺、刘福运、韩伟、曹浩、李海波、朱宗涛、徐野、武鹏博、张宇、刘桐、黎泉、何志军、马寅、冯志强、吴妍、李爱民。

# 轨道车辆铝合金激光-电弧复合焊接 第1部分：设计要求

## 1 范围

本文件规定了轨道车辆铝合金激光-电弧复合焊接的接头设计、结构设计及性能指标要求。本文件适用于板厚范围为0.5 mm~50 mm的轨道车辆铝合金型材和板材。

## 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 324 焊缝符号表示法

GB/T 985.1 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口

GB/T 985.3 铝及铝合金气体保护焊的推荐坡口

GB/T 3375 焊接术语

GB/T 5185 焊接及相关工艺方法代号

GB/T 6417.1 金属熔化焊接头缺欠分类及说明

GB/T 19867.6 激光-电弧复合焊接工艺规程

GB/T 22087 铝及铝合金的弧焊接头缺欠质量分级指南

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/T 25343.3 铁路应用 轨道车辆及其零部件的焊接 第3部分：设计要求

GB/T 37893 激光-电弧复合焊接推荐工艺方法

## 3 术语和定义

GB/T 3375、GB/T 25343.1和GB/T 25343.3界定的术语和定义适用于本文件。

## 4 接头设计要求

### 4.1 一般原则

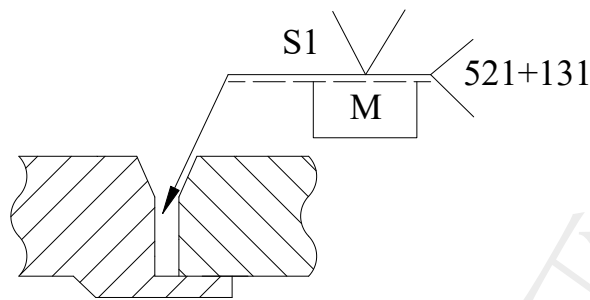
4.1.1 激光-电弧复合焊接头应按力学性能、结构形式、外观要求等确定设计要求，应符合GB/T 25343.3的规定。

4.1.2 焊缝符号的标注应符合GB/T 324的规定。

### 4.2 坡口设计

4.2.1 激光-电弧复合焊接的坡口可按GB/T 985.1、GB/T 985.3的规定进行设计，尺寸的选择上应兼顾激光穿透能力强的工艺特点。铝合金激光-电弧复合焊接头设计推荐见附录A。

4.2.2 在设计图纸中应明确所采用的激光-电弧复合焊接方法，应采用“激光焊代号+电弧焊代号”的方式。焊接方法代号应符合GB/T 5185的规定。激光-电弧复合焊接头标注示例见图1。



注：

1. 521+131表示所采用的激光-电弧复合焊接方法；其中，521表示采用固体激光焊，131表示采用熔化极惰性气体保护焊；
2. S1表示接头熔深数值，M表示接头带衬垫。

图1 激光-电弧复合焊接头标注图例

### 4.3 应力等级

4.3.1 应力等级根据接头应力系数确定，应力系数为激光-电弧复合焊接头的计算/测量疲劳应力与许用疲劳应力的比值。

4.3.2 根据应力系数，激光-电弧复合焊接头的应力等级分为高、中、低，具体见表1。

表1 激光-电弧复合焊接头应力等级

应力等级	应力系数 ( $S$ )
高	$\geq 0.9$
中	$0.75 \leq S < 0.9$
低	$< 0.75$

### 4.4 安全等级

4.4.1 安全等级定义了单个激光-电弧复合焊接接头失效对人员、设施和环境的影响。

4.4.2 根据造成的影响，安全等级分为低、中、高，具体见表2。

表2 激光-电弧复合焊接头安全等级

安全等级	影响
低	激光-电弧复合焊接头的失效不会导致整体功能的任何直接损害，不可能造成人身伤害事件的发生。
中	激光-电弧复合焊接头的失效会导致整体功能的损害，或可能造成人身伤害事件。
高	激光-电弧复合焊接头的失效会导致整体功能故障和人身伤害。

### 4.5 质量等级

4.5.1 激光-电弧复合焊缝质量等级应在设计阶段根据应力等级和安全等级确定。

4.5.2 激光-电弧复合焊缝质量等级分为CP A、CP B1、CP B2、CP C1、CP C2、CP C3和CP D七级，具体见表3。激光-电弧复合焊缝质量等级应在设计图纸和相关文件中给出。

表3 激光-电弧复合焊缝质量等级

应力等级	安全等级		
	高	中	低
高	CP A <sup>a</sup>	CP B2 <sup>b</sup>	CP C2

中	CP B1 <sup>a</sup>	CP C2	CP C3
低	CP C1 <sup>b</sup>	CP C3	CP D
a 焊缝质量等级CP A和CP B1: CP A和CP B1仅适用于生产和维护过程具有全熔透和检验完全可达的焊缝; b 焊缝质量等级CP B2和CP C1: CP B2和CP C1也适用于不能进行内部检验的焊缝;在这种情况下,应在相关焊接检验文件中注明“要求增加表面检验”。			

#### 4.6 检验等级

4.6.1 激光-电弧复合焊接头的检验等级根据该接头的焊缝质量等级确定。

4.6.2 激光-电弧复合焊接头的检验等级分为CT1、CT2、CT3和CT4四级,激光-电弧复合焊缝质量等级对应的检验等级及最低要求见表4。激光-电弧复合焊缝检验等级应在设计图纸和相关文件中给出。

表4 激光-电弧复合焊缝质量等级与检验等级最低要求对应关系

应力等级	安全等级	质量等级	缺欠等级	检验等级 最低要求	内部检验 RT 或 UT	表面检验 MT 或 PT	外观检验 VT
高	高	CP A	B	CT1	100%	100%	100%
高	中	CP B2	B	CT2	10%	10%	100%
高	低	CP C2	C	CT3	不需要	不需要	100%
中	高	CP B1	B	CT2	10%	10%	100%
中	中	CP C2	C	CT3	不需要	不需要	100%
中	低	CP C3	C	CT4	不需要	不需要	100%
低	高	CP C1	C	CT2	10%	10%	100%
低	中	CP C3	C	CT4	不需要	不需要	100%
低	低	CP D	D	CT4	不需要	不需要	100%

注: 缺欠等级见 GB/T 22087。

#### 4.7 缺欠等级

4.7.1 激光-电弧复合焊缝缺欠类型应符合GB/T 6417.1的规定。

4.7.2 激光-电弧复合焊缝接头的缺欠质量等级根据焊缝质量等级和缺欠类型确定,具体见表5。激光-电弧复合焊缝缺欠等级应在设计图纸和相关文件中给出。

4.7.3 激光-电弧复合焊缝每种缺欠质量等级的缺欠限值应符合GB/T 22087的规定。

表5 与焊缝质量等级相关的激光-电弧复合焊缝缺欠质量等级

GB/T 6417.1规定的缺欠	焊缝质量等级			
	CP A	CP B1/CP B2	CP C1/CP C2/CP C3	CP D
组别100、200、300、400	B	B	C	D
5011、5012、5013、502、504、506、509、511、510、515、516、517	不允许	B	C	D
5071、5072、601	B	B	C	D
503、5213、512 <sup>a</sup> 、617	不适用	B	C	D
505、多重缺陷	B	B	未被评估	未被评估
5214	不适用	不适用	参考设计文件中定义的几何尺寸	
602	是否允许取决于应用需求,如材料、耐腐蚀性防护			
610	不适用			

a 512: 如果角焊缝是T型接头或者HV焊缝上的附加焊缝,则不评估角焊缝的焊脚不对称。

### 5 结构设计要求

5.1 激光-电弧复合焊接结构设计应符合GB/T 25343.3的规定。

5.2 激光-电弧复合焊接焊缝应避免在高应力区域。

5.3 激光-电弧复合焊缝间的距离应避免热影响区(HAZ)交叠。当HAZ重叠时,应考虑该区域的材料力学性能(如残余应力、强度下降、硬度降低)。当厚度小于20mm时,焊缝间距离至少为30mm。

5.4 焊缝质量等级为CP A、CP B1和CP B2的对接接头及T型接头，以及认定的其他重要接头，应在其始端和终端采用引弧板和收弧板。引弧板和收弧板的使用应符合GB/T 25343.3的规定。

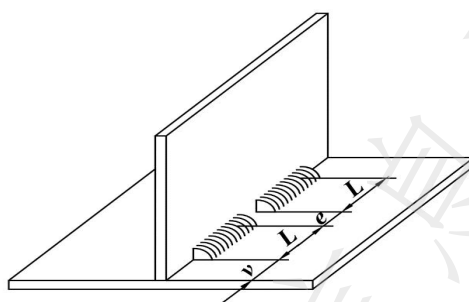
5.5 激光-电弧复合焊断续焊焊缝最小焊缝长度：

—— $t_{\max} \leq 10\text{mm}$ ， $L_{\min} > 5 \times t_{\max}$ ，至少应为20 mm；

—— $t_{\max} > 10\text{mm}$ ， $L_{\min} > 3 \times t_{\max}$ ，至少应为30 mm；

断续焊缝间距 $e \leq 3 \times L$ ；

距端部距离 $v \leq 0.5 \times L$ 。



标引符号说明：

L—单段焊缝长度；

e—断续焊缝间距；

v—边距。

图 2 激光-电弧复合焊断续焊缝示意图

## 6 性能指标要求

6.1 铝合金激光-电弧复合焊接头的抗拉强度应满足设计要求。

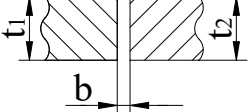
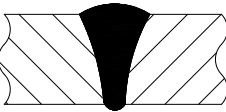
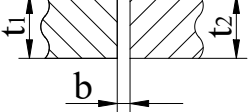

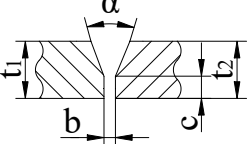
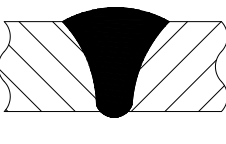
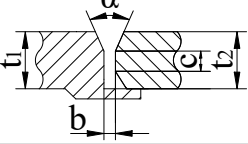
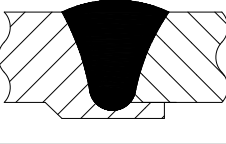
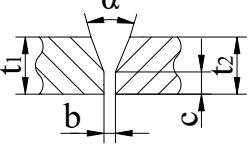
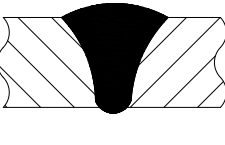
6.2 不同母材和焊后热处理状态的焊缝系数见附录B。

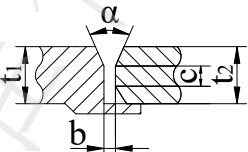
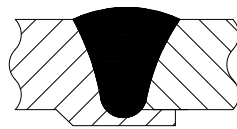
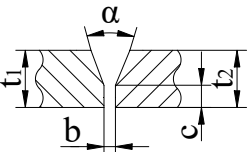
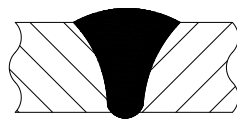
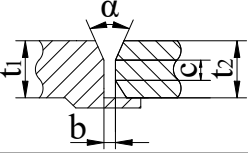
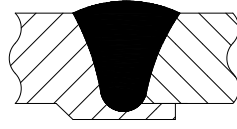
附录 A  
(资料性)

## 铝合金激光-电弧复合焊推荐接头设计形式

单面对接激光-电弧复合焊推荐坡口形式如表A.1所示。

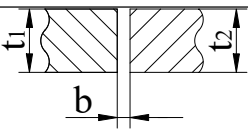
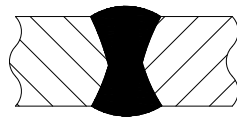
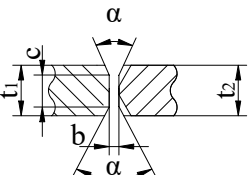
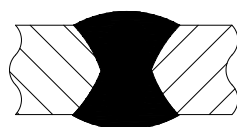
表 A.1 单面对接激光-电弧复合焊推荐坡口形式

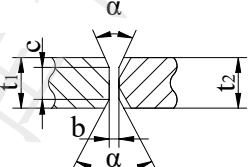
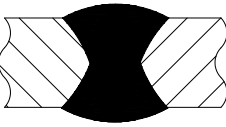
序号	母材厚度t/mm	坡口种类	坡口剖面图	尺寸			焊缝示意图
				坡口角度 $\alpha^\circ$	间隙b/mm	钝边c/mm	
1	$1 < t \leq 3$	I形坡口		-	$0 \leq b \leq 0.5$	-	
2	$3 < t \leq 5$	I形坡口		-	$0 \leq b \leq 0.5$	-	
		V形坡口		$30 \leq \alpha \leq 50$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 3$	
3	$5 < t \leq 15$	带衬垫V型坡口 (衬垫厚度 $\geq 3$ )		$30 \leq \alpha \leq 50$	$0 \leq b \leq 2$	$2 \leq c \leq 3$	
		V形坡口		$30 \leq \alpha \leq 50$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 8$	

		带衬垫V型坡口 (衬垫厚度 $\geq 3$ )		$30 \leq \alpha \leq 50$	$0 \leq b \leq 2$	$2 \leq c \leq 8$	
4	$t > 15$	V形坡口		$30 \leq \alpha \leq 50$	$0 \leq b \leq 2$	$4 \leq c \leq 10$	
		带衬垫V型坡口 (衬垫厚度 $\geq 3$ )		$30 \leq \alpha \leq 50$	$0 \leq b \leq 2$	$4 \leq c \leq 10$	

双面对接激光-电弧复合焊推荐坡口形式如表A.2所示。

表 A.2 双面对接激光-电弧复合焊推荐坡口形式

序号	母材厚度 $t/\text{mm}$	坡口种类	坡口剖面图	尺寸			焊缝示意图
				坡口角度 $\alpha/^\circ$	间隙 $b/\text{mm}$	钝边 $c/\text{mm}$	
1	$t \leq 8$	I形坡口		-	$0 \leq b \leq 1$	-	
2	$8 < t \leq 25$	双V形坡口		$30 \leq \alpha \leq 40$	$0 \leq b \leq 2$	$6 \leq c \leq 15$	

3	$t > 25$	双V形坡口		$20 \leq \alpha \leq 40$	$0 \leq b \leq 2$	$12 \leq c \leq 20$	
---	----------	-------	--	--------------------------	-------------------	---------------------	---

附录 B  
(资料性)

铝合金激光-电弧复合焊接头性能要求

激光-电弧复合焊缝系数下限要求如表 B.1 所示。

表 B.1 激光-电弧复合焊缝系数下限值

组别 (根据ISO/TR 15608)	焊前母材的状态 <sup>a,b</sup>	焊后状态 <sup>c</sup>		焊缝系数 $T=Rm(w)/Rm(pm)$
22	所有状态	焊态		1 <sup>d</sup>
23.1	T4	自然时效	单层单道	0.8
			多层多道	0.75
	T4	人工时效	单层单道	0.8 <sup>e,f</sup>
			多层多道	0.75 <sup>e,f</sup>
	T5和T6	自然时效	单层单道	0.7
			多层多道	0.7
	T5和T6	人工时效	单层单道	0.8 <sup>e</sup>
			多层多道	0.75 <sup>e</sup>
23.2	T4	自然时效	单层单道	1
			多层多道	1
	T4	人工时效	单层单道	0.85 <sup>e,f</sup>
			多层多道	0.8 <sup>e,f</sup>
	T6	自然时效	单层单道	0.85
			多层多道	0.8 <sup>e,f</sup>
	T6	人工时效	单层单道	0.85 <sup>f</sup>
			多层多道	0.8 <sup>e,f</sup>

<sup>a</sup> 见GB/T 16475。  
<sup>b</sup> 本表中未列出的其他状态母材，其Rm(w)应按设计标准取值。  
<sup>c</sup> 时效条件应符合设计规范。  
<sup>d</sup> Rm(pm)以“O”态（退火状态）下规定的拉伸强度下限为准，不考虑试验时母材的状态。  
<sup>e</sup> 试件在焊接完成后，开始试验之前做人工时效时，效率系数T适用于T6母材条件。  
<sup>f</sup> 如果焊后做整体热处理，可以获得更高的性能。Rm(w)应按设计标准取值。