

团 体 标 准

T/CWAN 0187—2025

铝合金激光-电弧复合焊接推荐工艺规范

Recommendation procedure specification for laser-arc hybrid welding of aluminium alloy

2025-12-23 发布

2026-01-01 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 术语与定义	2
4 一般要求	2
5 工艺要求	5
6 焊接质量要求	8
7 焊接检验	8
附录 A（资料性）焊接工艺规程	11

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：江西昌景航空制造有限公司、南昌航空大学、中焊科技发展（哈尔滨）有限公司、湖北美科精毅科技有限公司、上海工程技术大学、河北创力机电科技有限公司、北部湾大学、中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司、广西机电职业技术学院、哈尔滨理工大学、南昌职业大学。

本文件主要起草人：张体明、谢吉林、申洋、巫正瑜、殷祚炷、王苏煜、陈玉华、武鹏博、胡建华、林晓辉、李旭、张天理、秦建、王雷、方乃文、冯志强、牛董山钰、张大林、付原科、陈昭鑫、于春洋。

铝合金激光-电弧复合焊接推荐工艺规范

1 范围

本文件规定了铝合金激光-电弧复合焊接的一般要求、工艺要求、质量要求和焊接检验等内容。

本文件适用于板厚范围 ≥ 3 mm 的铝合金板材和型材的激光-电弧复合焊接，铝合金管的激光-电弧复合焊接可参照此标准。

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 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 2650 金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验

GB/T 2651 焊接接头拉伸试验方法

GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法

GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法

GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 3323.1 焊缝无损检测 射线检测 第1部分：X和伽玛射线的胶片技术

GB/T 3375 焊接术语

GB/T 4842 氩

GB/T 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 10858 铝及铝合金焊丝

GB/T 11345 焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定

GB/T 15490 固体激光器总规范

GB/T 15579 弧焊设备

GB/T 18851.1 无损检测渗透探伤第1部分：总则

GB/T 19805 焊接操作工技能评定
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 22087 铝及铝合金弧焊接头的缺欠质量等级
GB/T 22641 船用铝合金板材
GB/T 26953 焊缝无损检测焊缝渗透检测验收等级
GB/T 26955 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验
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 32182 轨道交通用铝及铝合金板材
GB/T 32259 焊缝无损检测 熔焊接头目视检测
GB/T 37910.2 焊缝无损检测 射线检测验收等级 第2部分：铝及铝合金
GB/T 42793 航空用铝合金板材通用技术规范
T/CWAN 0009 焊接术语 熔化焊

3 术语与定义

GB/T 3375、GB/T 19866、GB/T 19867.6、GB/T 37893和T/CWAN 0009界定的术语及定义适用于本文件。

4 一般要求

4.1 人员

4.1.1 焊接操作人员应经过系统的理论学习和培训，具备足够的焊接专业知识和技能，通过考核并取得考试机构颁发的资格证书，且证书应在有效期内。

4.1.2 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。

4.1.3 焊接检验人员应经过相关检验知识理论学习和培训，并取得相应的资格证书，且证书应在有效期内。其中，无损检测人员应取得GB/T 9445中规定的2级以上资格证书。

4.2 安全防护

4.1.1 焊接操作的环境条件应符合GB/T 7247.1、GB/T 7247.4等标准的相关要求。

4.1.2 焊接操作要求及防护措施应符合GB/T 7247.14、GB 9448和GB 30863等标准的相关要求。

4.3 设备及仪器仪表

4.3.1 激光发生器、光束传输系统及聚焦系统、弧焊电源、激光-电弧复合焊枪、焊枪行走机构、除尘装置、侧吹装置、气体压力表、气体流量计和温度测量表等相关设备及仪器仪表应经过检定合格方可使用，并按照相关要求定期进行检修及检定。

4.3.2 激光发生器应符合GB/T 15490和GB/T 31358等标准的相关规定；弧焊电源应符合GB/T 8118和GB/T 15579等标准的相关规定。

4.3.3 设备应按要求定期保养、维护和校准。

4.3.4 相关设备在安装、搬迁、大修或停止使用1年以上时，应进行检定并进行工艺参数确认，合格后方可使用。

4.3.5 相关设备连入的电源网路电压波动范围不应超过额定值的 $\pm 10\%$ ，否则应配备稳压器。

4.3.6 焊接设备应安装惰性气体保护装置。应根据坡口形式及尺寸采用相应的保护罩形式进行气体保护，以保证焊缝高温区域得到防护，如需要宜增加焊缝背面防护措施。

4.4 材料

4.4.1 铝合金板及焊丝应具有生产厂家提供的质量保证书，如有必要应按照相关标准进行复验。

4.4.2 铝合金板应符合GB/T 22641、GB/T 32182、GB/T 42793标准相关规定或符合设计技术条件中所提出的要求。

4.4.3 在焊前4 h以内应仔细清理母材及焊丝，清理可选以下方法进行：

4.4.3.1 用工业酒精或丙酮去除母材及焊丝表面残存的油污等污物；

4.4.3.2 需要时，宜采用10% NaOH溶液清洗10 min去除氧化膜，再用30% HNO₃溶液亮化处理约1 min，清洗后应立即用清水冲洗、烘干；

4.4.3.3 当铝合金板材较大时推荐采用激光清洗。

4.4.4 铝合金焊丝应符合GB/T 10858相关规定或符合设计技术条件中所提出的要求。

4.4.4.1 铝合金焊丝应存放在干燥、通风良好的库房中，不允许露天存放或放在有害气和腐蚀性介质的室内，室内温度应控制在10℃~15℃，相对湿度 $\leq 60\%$ 。室内应保持整洁。堆放时不宜直接放在地面上，宜放在离地面和墙壁 ≥ 300 mm的架子或垫板上，以保持空气流通，防止受潮。

4.4.4.2 铝合金焊丝应在开包后48 h内用完，对于已开包未用完的铝合金焊丝要从送丝装置中取出进行密封储存；开包后的焊丝要防止其表面被凝结露，或被锈、油脂及其他碳氢化合物所污染，保持焊丝表面干净、干燥。

4.4.5 焊接过程所使用的保护气体应符合GB/T 4842等相关标准要求，纯度不小于99.99%，露点在-50℃以下。

4.5 环境

4.5.1 焊接环境应保持通风良好，焊接环境清洁，无灰尘、烟雾等。

4.5.2 焊接作业环境风速宜 ≤ 1.5 m/s。

4.5.3 焊接作业环境湿度宜 $<80\%$ 。

4.5.4 禁止在下雨、下雪等室外环境作业。

4.5.5 焊件表面温度宜 $\geq 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

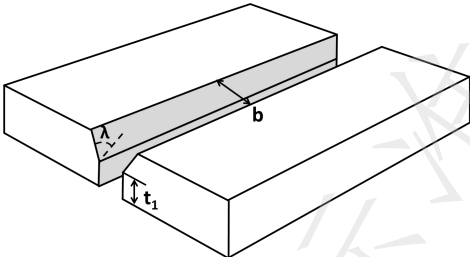
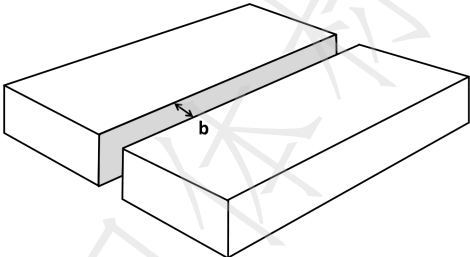
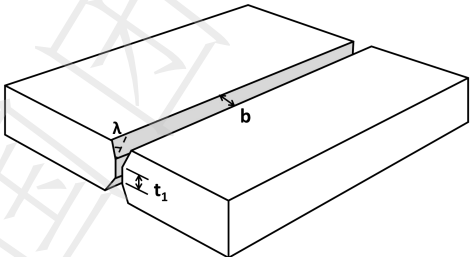
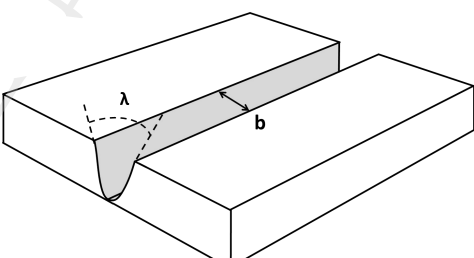
4.5.6 铝合金的焊接操作区域应与其他材料的作业区分开，建议设立独立的恒温恒湿的焊接车间。

4.6 坡口制备

铝合金激光-电弧复合焊的坡口可按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，推荐采用的坡口形式见表1，其他形式接头由供需双方协商确定。

表1 推荐采用坡口形式

单位为mm

母材厚度 t	坡口形式	坡口种类	规格尺寸		
			坡口角度 λ	坡口间隙 b	钝边 t_1
$3 < t \leq 5$		Y形坡口	$30 \leq \lambda \leq 45$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 3$
$5 < t \leq 15$			$30 \leq \lambda \leq 45$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$t > 15$			$45 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$3 < t \leq 5$		I形坡口	—	$0 \leq b \leq 0.5$	—
$8 < t \leq 25$		双Y形坡口	$30 \leq \lambda \leq 45$	$0 \leq b \leq 0.5$	$4 \leq t_1 \leq 6$
$t > 25$			$45 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 0.5$	$4 \leq t_1 \leq 8$
$t > 15$		U形坡口	$60 \leq \lambda \leq 120$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 6$

$8 < t \leq 25$		双U形坡口	$60 \leq \lambda \leq 120$	$0 \leq b \leq 0.5$	$4 \leq t_1 \leq 8$
$t > 25$			$80 \leq \lambda \leq 160$	$0 \leq b \leq 0.5$	$4 \leq t_1 \leq 8$
$5 < t \leq 12$		J形坡口	$30 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$t > 12$			$40 \leq \lambda \leq 80$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$8 < t \leq 25$		双J形坡口	$30 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$t > 25$			$40 \leq \lambda \leq 80$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$8 < t \leq 25$		双K形坡口	$30 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$t > 25$			$40 \leq \lambda \leq 80$	$0 \leq b \leq 0.5$	$2 \leq t_1 \leq 6$

5 工艺要求

5.1 试板加工

5.1.1 铝合金试板待焊坡口两侧10 mm范围内应平整、光洁、无毛刺、裂纹、氧化皮、油污及锈斑等，表面粗糙度 $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$ ，钝边的加工精度应控制在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。

5.1.2 加工后应检查待焊工件的加工面是否存在毛刺、切口不平整、明显划伤等问题。

5.2 工装夹具

5.2.1 铝合金焊接工装在焊接过程中不允许与激光-电弧复合焊枪、保护拖罩、夹具等可移动部件发生干涉。

5.2.2 将待焊接工件放置在焊接夹具上，完成工件装夹。检查工件的装夹状态，测量工件装夹后的间隙、错变量等情况，保证组队及装夹条件满足焊接要求。

5.3 设备状态检查

5.3.1 检查激光设备、激光保护镜片、激光光路、激光控制软件状态（是否存在报警、错误等提示）、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，确认无误后方可准备焊接。

5.3.2 为了确保气路的通畅、洁净，可在焊接之前先送气排出气路内的空气、水分等。

5.4 焊接

5.4.1 为了减少气孔和裂纹等缺陷的产生，在焊接前8 h以内应采用机械打磨、酸洗清理铝合金板待焊坡口两侧 ≥ 30 mm区域内的表面氧化膜和油污。

5.4.2 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。

5.4.3 必要时可采用定位焊固定工件，定位焊长度宜控制在2 mm~5 mm之间，间距宜控制在50 mm~150 mm之间。当采用定位焊方法固定工件时，若定位焊缝不构成焊接接头的一部分，则在焊前或焊接过程中应将其完全清除；若定位焊缝熔入焊接接头，则其表面上应无缩孔、弧伤、裂纹、气孔、咬边和可能影响焊接实施的其他缺陷；施焊定位焊应采用与主焊缝相同的焊接工艺进行焊接；若定位焊缝质量不合格，应将它全部清除，且不得在同一部位重新实施定位焊。

5.4.4 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。

5.4.5 双面坡口推荐采用双面打底焊，熔深需超过钝边厚度。单面坡口推荐采用单面打底焊，保证单道焊透双面成形；打底焊接时焊缝背面需要通入惰性气体进行保护。

5.4.6 打底焊接后应观察焊缝表面及熔深情况，如发现焊缝表面成形不良或熔深不足应进行焊缝修正或返修处理。

5.4.7 在每道次焊接之前应清理干净焊缝内待焊区域内及周围氧化物和飞溅。

5.4.8 焊接过程中应根据坡口宽度变化，适时调整焊接工艺参数以实现多道多层填充而完成整条焊缝的焊接。

5.4.9 为抑制铝合金焊接过程中产生气孔缺陷，保证良好的侧壁熔合及层间熔合情况，并优化焊缝表面成形，激光焊枪宜增加摆动工艺。

5.4.10 焊接过程可采用拖罩、拖罩与喷嘴结合的方式对焊接熔池和高温区域进行保护，特殊情况下可在惰性气体保护舱或真空舱内焊接。

5.4.11 焊接过程中应至少提前10 s送气，焊后直到焊缝及热影响区金属冷却到 150 °C以下时方可移开焊枪停气，若在惰性气体保护舱内焊接时，保护舱内氧气含量应不大于 213 mg/m³。若在真空舱内焊接时，真空舱内环境压力应低于5 Pa。

5.4.12 储存惰性气体的气瓶压力小于0.5 MPa时应停止使用。

5.4.13 多层多道焊接时应严格控制焊接层间温度不高于 150 °C。

5.4.14 当环境空气相对湿度 $RH \geq 50\%$ 时，应预热铝合金板材至 50 °C~ 80 °C。

5.4.15 铝合金激光-电弧复合焊接推荐工艺参数如表3所示。

表3 铝合金激光-电弧复合焊推荐工艺参数

母材厚度 (mm)	激光 功率 P_R/W	焊接电 流 I/A	焊接电 压 U/V	焊接速度 $V/m \cdot \min^{-1}$	离焦 量 f/mm	光丝 间距 D/mm	焊枪喷嘴 气体流量 $Q/L \cdot \min^{-1}$	托罩气 体流量 $Q_1/L \cdot \min^{-1}$	背面保护 气体流量 $Q_2/L \cdot \min^{-1}$
$3 \leq t \leq 5$	4~5	80~100	18~20	600~800	-5~5	3~5	15~18	5~15	5~10
$5 < t \leq 7$	6~7	100~120	20~23	600~800	-5~5	3~5	18~20	8~15	6~12
$7 < t \leq 10$	7~8	120~140	22~25	600~800	-5~5	3~5	20~22	10~18	7~13
$10 < t \leq 12$	8~9	140~160	24~28	600~800	-5~5	3~5	20~25	12~20	8~15

5.4.16 检查自动焊程序中各焊接工艺参数是否设置正确。

5.4.17 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。

5.4.18 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。

5.5 焊后处理

5.5.1 焊后一般待焊缝冷却至室温后再对焊缝正面、背面余高过高或向母材急剧过渡时，可采用角磨机对余高进行修整至圆滑过渡。修整余高时应避免过热，防止发生氧化。

5.5.2 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。

5.5.3 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。

5.6 缺陷修复

5.6.1 修复前须确认缺陷或损伤产生的原因和范围。

5.6.2 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。

5.6.3 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。

5.6.4 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。

5.6.5 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，然后通过渗透检测和（或）射线检测确认焊缝无缺陷后再行补焊。

5.6.6 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。

5.6.7 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。

6 焊接质量要求

6.1 焊缝表面成形应均匀、致密、平滑向母材过渡，不应有裂纹、未熔合、咬边及气孔等缺陷。

6.2 焊接接头渗透检验、射线检验、超声检验及合格指标由供需双方协商确定。

6.3 焊接接头拉伸性能及合格指标由供需双方协商确定。

6.4 焊接接头冲击性能试验温度及合格指标由供需双方协商确定。

6.5 焊接接头弯曲性能合格指标由供需双方协商确定。

6.6 焊接接头疲劳性能合格指标由供需双方协商确定。

6.7 焊接接头硬度合格指标由供需双方协商确定。

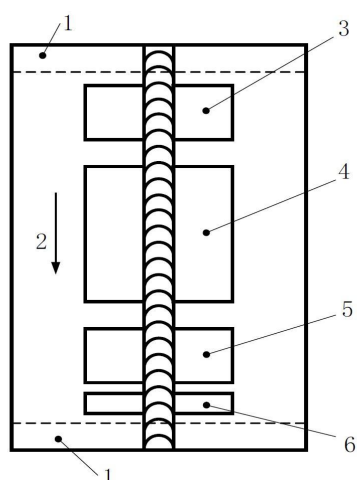
6.8 焊接接头宏观金相与微观金相试样均不得有裂纹、未熔合、夹渣和气孔等焊接缺陷。

7 焊接检验

焊接接头的检验项目与数量或范围见表2，试样截取位置示意图1。若有特殊的使用条件所需的试验由供需双方协商确定补充检验项目和数量。

表2 焊接接头的检验项目与数量或范围

试件状态	检验项目	检验数量或范围
焊后检验	目视检验	100%
	射线或超声波检验	100%
	渗透检验	100%
	拉伸试验	2个试样
	冲击试样	3个试样
	弯曲试样	2个面弯试样和2个背弯试样
	疲劳试样	3个试样
	硬度检验	1个试样
	焊接变形	100%
	宏观金相检验	1个试样
	微观金相检验	1个试样
厚度 ≥ 12 mm时，可采用4个侧弯试样代替2个面弯试样和2个背弯试样。		



- 1、去除25mm;
- 2、焊接方向;
- 3、该部位: 1个拉伸试样, 1个正弯式样, 1个背弯式样;
- 4、该部位: 3个冲击试样, 3个疲劳试样;
- 5、该部位: 1个拉伸试样, 1个正弯式样, 1个背弯式样;
- 6、该部位: 1个金相试样, 1个硬度试样;

图1 试样截取位置示意图

7.1 无损检验

7.1.1 目视检测

外观目视检验应按照GB/T 32259的规定进行。检查焊缝表面是否存在裂纹、表面沟槽和未焊透等缺陷; 检查接头的错边、表面下凹量等缺陷, 应按照GB/T 22087的规定进行评判和记录。

7.1.2 渗透检验

渗透检验应按照GB/T 18851.1的规定进行, 验收等级应符合GB/T 26953的规定进行或由供需双方协商确定。

7.1.3 射线检验

射线检验应按照GB/T 3323.1的规定进行, 验收等级应符合GB/T 37910.2的规定进行或由供需双方协商确定。

7.1.4 超声检验

超声检验应按照GB/T 11345的规定进行。

7.1.5 变形检验

焊接试板变形度检验可通过对接试件焊后表面夹角进行测定, 为保证测量精度, 测定仪器推荐采用faro三坐标形位公差测量仪。

7.2 拉伸性能检验

7.2.1 焊接接头拉伸试样尺寸及拉伸试验应按照GB/T 2651的规定进行。

7.2.2 焊接接头拉伸试样的焊缝余高应以机械方法去除, 使之与母材齐平并应覆盖焊缝全厚度。

7.3 冲击性能检验

7.3.1 焊接接头冲击试样尺寸及冲击试验应按照GB/T 2650的规定进行。

7.3.2 焊接接头冲击试样应覆盖焊缝全厚度。

7.3.3 当焊接接头厚度 $\leq 5\text{mm}$ 时可以取消冲击性能检验。

7.4 弯曲性能检验

7.4.1 焊接接头弯曲试样尺寸及弯曲试验应按照GB/T 2653的规定进行。

7.4.2 焊接接头正弯和背弯试样应覆盖焊缝全厚度。

7.5 疲劳性能检验

疲劳试验应按照GB/T 3075的规定进行。

7.6 硬度检验

7.6.1 焊接接头硬度试验应按照GB/T 2654规定进行。

7.6.2 硬度试样制备完成后进行适当腐蚀，以便于确定焊接接头不同区域的硬度测量位置。

7.6.3 硬度试验应覆盖焊接接头横截面表层、中层、底层和纵向焊缝中心区硬度。横向测量时每隔 $0.5\text{mm}\sim 2\text{mm}$ 的距离测试一个点，纵向测量时每隔 $1\text{mm}\sim 2\text{mm}$ 测试一个点。

7.7 金相检验

7.7.1 焊接接头宏观金相与微观金相检验应按照GB/T 26955的规定进行。

7.7.2 应在已做过低倍组织检查的试样上，认为需要的部位切取高倍试样，或按供需双方协议从其他面上切取试样。

附录A
(资料性)

铝合金激光-电弧复合焊接工艺规程 (WPS)

铝合金激光-电弧复合焊接工艺规程格式如表A.1所示。

表A.1 铝合金激光-电弧复合焊接工艺规程

工艺评定报告编号:				日期:								
焊接设备	激光器型号				焊机型号							
	激光器最大激光功率 (W)				焊接电源名称							
	激光波长 (nm)				焊接电源执行标准							
	激光器光纤芯径 (μm)				焊接电源极性							
	激光枪头焦距(mm)				光斑直径(mm)							
	光斑尺寸(mm)				光束参数乘积 BPP(mm·mrad)							
材料	母材型号				母材规格 (mm)							
	母材炉/批号				母材执行标准							
	焊材型号/牌号				焊材规格 (mm)							
	焊材批号				焊材执行标准							
	预热温度 ($^{\circ}\text{C}$)				热处理制度							
焊接	熔滴过渡形态				焊接位置							
	焊接顺序				层/道间温度 ($^{\circ}\text{C}$)							
	电弧保护气种类				根部保护气种类							
焊接接头坡口型式简图												
焊接工艺参数	焊道	激光功率 P_R/W	焊接电流/A	焊接电压/U	焊接速度 $V/m\cdot\text{min}^{-1}$	离焦量 f/mm	光丝间距 D/mm	焊枪喷嘴气体流量 $Q_1/L\cdot\text{min}^{-1}$	拖罩保护气体流量 $Q_2/L\cdot\text{min}^{-1}$	根部保护气体流量 $Q_3/L\cdot\text{min}^{-1}$		
	1											
	2											
	3											
焊接操作人员签字		制定人员签字		校核人员签字		批准人员签字						