

团 体 标 准

T/CWAN 0139—2025

铝-钛异种金属激光熔钎焊推荐工艺规范

Recommended procedure for laser welding-brazing process of aluminum/titanium dissimilar alloys

2025-01-24 发布

2025-02-01 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	7
7 焊接检验	8
附录 A（资料性）铝-钛异种金属激光熔钎焊工艺规程	9

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：杭州华光焊接新材料股份有限公司、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、杭州孚晶焊接科技有限公司、上海中巽科技股份有限公司、广东省鑫全利激光智能装备有限公司、北京博清科技有限公司、山东光之聚激光科技有限公司、中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司、洛阳船舶材料研究所（中国船舶集团有限公司第七二五研究所）、哈工大苏州研究院、上海工程技术大学、哈尔滨理工大学。

本文件主要起草人：黄魏青、武鹏博、余丁坤、王铭秋、王萍、李海波、邹吉鹏、石凯、曹浩、冯消冰、廖志谦，韩伟、吕逸帆、秦建、雷小伟、孙徕博、张天理、王雷、常云峰、方乃文。

铝-钛异种金属激光熔钎焊推荐工艺规范

1 范围

本文件规定了铝-钛异种金属激光熔钎焊的一般要求、工艺要求、质量要求和焊接检验等内容。
本文件适用于板厚≤5 mm 的铝-钛异种金属的激光熔钎焊。

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 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 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 7247.1 激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求
- GB 7247.4 激光产品的安全 第4部分：激光防护屏
- GB 7247.14 激光产品的安全 第14部分：用户指南
- 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 11345 焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定
- GB/T 18851.1 无损检测 渗透检测 第1部分：总则
- 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 31910 潜水器用钛合金板材
- GB/T 32259 焊缝无损检测 熔焊接头目视检测
- GB/T 39255 焊接与切割用保护气
- GB/T 42793 航空用铝合金板材通用技术规范
- GJB 2505A 航空用钛及钛合金板材和带材规范
- T/CWAN 0009 焊接术语 熔化焊

3 术语与定义

GB/T 3375和T/CWAN 0009界定的及下列术语与定义适用于本文件。

3.1

激光熔钎焊 laser welding-brazing

采用激光束作为热源将低熔点金属熔化形成熔焊接头，高熔点金属处于固态形成钎焊接头的一种焊接方法。

3.2

激光束偏置距离 laser beam offset distance

激光束实际焊接位置偏离焊缝中心的距离称为激光束偏置距离，示意如图1所示。

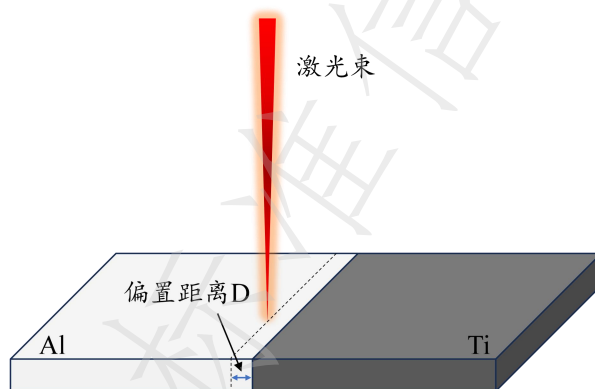


图1 激光偏置距离示意图

3.3

离焦量 defocus amount

激光焦点与作用物质间的距离。

4 一般要求

4.1 概述

铝-钛异种金属激光熔钎焊接除满足本文件规定外，还需要遵循相关产品标准要求。

4.2 人员资格

4.2.1 产品组装人员应经过系统的理论学习和培训，上岗操作前应通过工艺培训考核。

4.2.2 焊接操作人员应经过系统的理论学习和培训，具备足够的激光焊接技术知识和技能，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。

4.2.3 焊接检验人员应按照GB/T 9445的要求进行资格评定，若检测时使用了未包含在GB/T 9445中的方法，则制造商应负责参照GB/T 9445的要求提供培训、书面操作规程、考核和现场操作演示，以保证检

检验检测人员对指定检验检测方法具备操作能力。检验检测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。

4.2.4 破坏性试验人员应通过相应试验操作培训考核。

4.3 设备及仪器仪表

4.3.1 激光器、传输光纤、激光焊接枪头、行走机构、气体压力表、气体流量表和温度测量表等相关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 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。

4.3.3 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。

4.3.4 焊接设备应安装惰性气体保护装置。宜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，焊缝背面需增加惰性气体保护措施。

4.4 材料

4.4.1 母材的性能应符合相应的标准规范要求，生产厂家提供的质量证明书，如有必要应按照相关标准进行复验。

4.4.1.1 钛合金板材应符合GB/T 31910和GJB 2505A等标准相关规定。

4.4.1.2 铝合金板材应符合GB/T 42793等标准相关规定。

4.4.2 材料的运输和存放过程中为避免损坏，钛及钛合金、铝及铝合金应分类存放并做清晰的标识。母材应存放在干燥、通风良好的库房中，不允许露天存放或放在有有害气体和腐蚀性介质的室内，室内温度应控制在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 60\%$ ；堆放时不宜直接放在地面上，宜放在离地面和墙壁 $\geq 300\text{ mm}$ 的架子或垫板上，以保持空气流通，防止受潮。

4.4.3 加工后的工件或试件须清理切口处残留毛刺。工件或试件的尺寸公差、形状公差等应符合设计要求，并满足铝-钛异种金属激光熔钎焊接装配的精度要求。

4.4.4 工件或试件应按要求进行焊前清理，待焊接头表面可用干净纱布或清洗剂清除油渍及污物。

4.4.4.1 为保证钛合金焊接前表面质量，应在焊接前4 h以内进行打磨、清洗钛合金试板待焊位置，以去除其表面氧化膜和油污。推荐使用体积配比为 $5\% \text{HF} + 30\% (\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O})$ 溶液进行清洗，清洗 $10\text{ min}\sim 30\text{ min}$ 后用清水冲洗并吹干。

4.4.4.2 为保证铝合金焊接前表面质量，应在焊接前4 h以内进行打磨、清洗铝合金试板待焊位置，去除坡口表面氧化膜和油污。推荐使用 $10\% \text{NaOH}$ 溶液清洗 10 min 去除氧化膜，再用 $30\% \text{HNO}_3$ 溶液亮化处理 1 min 后用清水冲洗并吹干。

4.4.5 保护气体应符合GB/T 39255相关规定，焊接过程建议使用99.999%的Ar。

4.4.6 焊接长度较大的铝/钛异种金属构件时，建议使用较大流量惰性保护气体或更换气体流量计为压力表进行焊缝及附近区域保护。

4.5 环境

4.5.1 焊接环境应保持通风良好，为防止激光器结露，工作环境的温度、湿度应控制在对应型号激光器结露点以上。

4.5.2 操作区照度不小于300 lx，噪声不大于80 dB，焊接烟尘的最高允许浓度不大于4 mg/m³。

4.5.3 焊接作业环境风速应 ≤ 1.5 m/s。

4.5.4 焊接作业环境湿度应 $< 50\%$ 。

4.5.5 禁止在下雨、下雪等室外环境作业。

4.5.6 环境温度应 ≥ 5 °C。

4.5.7 焊接作业区应符合相应的安全要求，并有必要的防护隔离措施。

4.6 坡口制备

对接接头形式可采用单面焊接或双面焊接，铝及铝合金和钛及钛合金异种金属激光熔钎焊坡口可按GB/T 985.1规定选择、设计；铝及铝合金和钛及钛合金异种金属激光熔钎焊对接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

单位为毫米

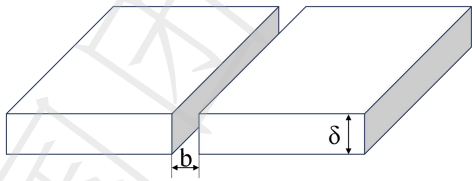
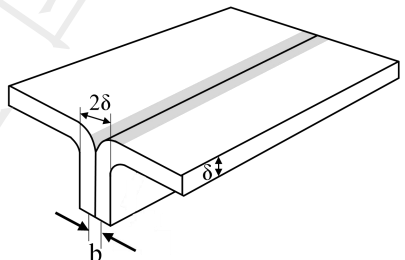
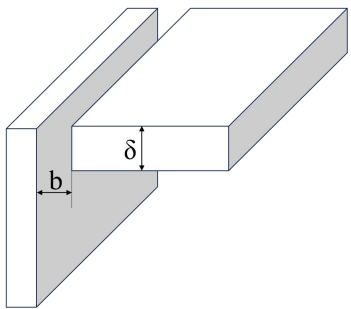
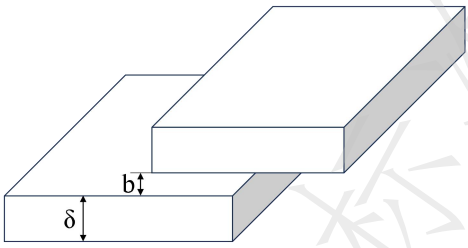
序号	坡口形式	坡口种类	母材厚度 δ	允许最大坡口间隙 b
1		无坡口对接	$\delta \leq 1.5$	$b \leq 0.2$
			$1.5 < \delta \leq 3$	$b \leq 0.3$
			$3 < \delta \leq 5$	$b \leq 0.5$
2		卷边接	$\delta \leq 1.5$	$b \leq 0.25$
			$1.5 < \delta \leq 3$	$b \leq 0.3$
			$3 < \delta \leq 5$	$b \leq 0.55$

表1 推荐采用坡口形式（续）

单位为毫米

序号	坡口形式	坡口种类	母材厚度 δ	允许最大坡口间隙 b
3		无坡口角接	$\delta \leq 1.5$	$b \leq 0.15$
			$1.5 < \delta \leq 3$	$b \leq 0.25$
			$3 < \delta \leq 5$	$b \leq 0.45$
4		搭接	$\delta \leq 1.5$	$b \leq 0.25$
			$1.5 < \delta \leq 3$	$b \leq 0.35$
			$3 < \delta \leq 5$	$b \leq 0.55$

4.7 安全防护

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

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

5 工艺要求

5.1 坡口加工

5.1.1 铝及铝合金、钛及钛合金试板待焊坡口内应平整、光洁、无毛刺、裂纹、氧化皮、油污及锈斑等，表面粗糙度 $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$ ，坡口的加工精度应控制在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。

5.1.2 铝及铝合金、钛及钛合金试板应根据厚度设计反变形，保证焊后焊接试板平整和根部不致开裂。

5.1.3 为了减少气孔和裂纹等缺陷的产生，在焊接前4 h以内应采用打磨、酸洗清理铝及铝合金、钛及钛合金待焊坡口两侧 $\geq 50 \text{ mm}$ 区域内的表面氧化膜和油污。

5.2 工装夹具

5.2.1 铝及铝合金、钛及钛合金焊接工装在焊接过程中不允许与激光枪头和保护气罩等可移动部件发生干涉。

5.2.2 焊接工装应使对接试件的装配间隙及错边量在规定范围内，对接试件焊接装配间隙推和错边量推荐范围见表2。

表2 对接试件焊接装配间隙和错边量推荐范围

单位为毫米

母材厚度 δ	局部最大间隙 b	允许的最大错边量 t
$0.5 \leq \delta \leq 2$	≤ 0.1 或10%，取较小值	0.1
$2 < \delta \leq 3.5$	≤ 0.3 或10%，取较小值	0.2
$3.5 < \delta \leq 5$	≤ 0.5 或10%，取较小值	0.3

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）、保护气体、侧吹气体、焊接整套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 焊接工艺要求

5.4.1 出光之前，应确保激光头侧吹气及焊接保护气处于开启状态。

5.4.2 保护气拖罩应对准熔池中心并距离焊件表面一定高度，防止拖罩强气流影响焊缝成形。

5.4.3 激光入射方向宜与工件法向呈 $5^\circ \sim 10^\circ$ 夹角，以防止激光反射损坏激光头。

5.4.4 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。

5.4.5 进行单面焊双面成形的焊接工艺焊接时焊缝背面需要通入惰性气体进行保护。

5.4.6 单面焊双面成形焊接后应观察焊缝正面和背面成形情况，如发现焊缝正面和背面成形不良或熔深不足应进行焊缝修正或返修焊接修补。

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。

5.4.9 焊接过程中应至少提前15 s送气，焊后直到焊缝及热影响区金属冷却到 300°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/m^3 。若在真空舱内焊接时，真空舱内环境压力应低于 5 Pa 。

5.4.10 储存惰性气体的气瓶压力小于 0.5 MPa 时应停止使用。

5.4.11 焊接环境要求见4.5。

5.4.12 铝-钛异种金属激光熔钎焊推荐焊接工艺参数如表3所示。

表3 铝-钛异种金属激光熔钎焊推荐焊接工艺参数

母材厚度 δ/mm	激光功率 P/W	焊接速度 $V/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	离焦量 F/mm	激光偏移量 D/mm	保护罩气体流量 $Q_1/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	背面保护气体流量 $Q_2/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
$0.5 \leq \delta \leq 2$	1500~2500	1~1.5	0~2	偏向铝合金侧 0.45 mm~0.55 mm	20~25	8~10
$2 < \delta \leq 3.5$	2500~3500	1~1.5	-2~0	偏向铝合金侧 0.55 mm~0.65 mm	25~30	10~15
$3.5 < \delta \leq 5$	3500~4500	1~1.5	-5~-2	偏向铝合金侧 0.65 mm~0.75 mm	30~35	15~20

5.5 焊后处理

焊缝正面、背面余高过高或向母材急剧过渡时，可采用机械打磨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。

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。焊缝宽度和余高应符合表4要求。

表4 焊缝外观要求

单位为毫米

母材厚度 δ	$0.5 \leq \delta \leq 2$	$2 < \delta \leq 3.5$	$3.5 < \delta \leq 5$
焊缝宽度 W_f	$W_f \leq 4$	$W_f \leq 6$	$W_f \leq 8$
焊缝余高 H	$H \leq 0.5$	$H \leq 1$	$H \leq 1.5$

6.2 焊缝允许存在的焊缝内部缺陷范围如表5和表6所示。焊缝表面的气孔、夹杂物、焊瘤、飞溅、裂纹可采用机械打磨进行修整，并重新修饰焊接。

表5 允许存在的焊缝内部气孔和夹渣缺陷范围

每100 mm长度焊缝允许存在的缺陷			
最大尺寸/mm	相邻缺陷的最小间距/mm	个数	总面积/mm ²
1/2 δ 或1.5取较小值	较大缺陷尺寸的3倍	2	6
注1: 相邻缺陷的间距小于规定要求时, 按其分布区域计算面积; 注2: 缺陷尺寸均按其最大尺寸计算; 注3: 不允许存在有尖角的缺陷; 注4: 缺陷之间的距离不超过其最大尺寸时, 并且与缺陷数量和分布无关的缺陷集群可看做1个缺陷; 注5: 焊件厚度不小于1 mm时, 缺陷尺寸 ≤ 0.3 mm, 判别时可不考虑; 直径和总面积不大于表5规定的最大尺寸50%的表面气孔、允许不修补。			

表6 允许存在的未焊透、咬边、凹陷缺陷

每100 mm长度焊缝允许存在的缺陷					
未焊透		咬边		凹陷	
最大深度/mm	占焊缝长度比值/%	最大深度/mm	占焊缝长度比值/%	最大深度/mm	占焊缝长度比值/%
0	0	$\leq 5\% \delta$ 或 0.2取较小值	≤ 10	$\leq 5\% \delta$ 或 0.3取较小值	≤ 20

6.3 焊接接头整体变形度应符合表7的规定。

表7 焊接接头整体变形度

母材厚度/mm	$0.5 \leq \delta \leq 2$	$2 < \delta \leq 3.5$	$3.5 < \delta \leq 5$
整体变形度/ $^{\circ}$	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.3

6.4 焊接接头拉伸强度及合格指标由供需双方协商确定。

6.5 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。

6.6 焊接接头弯曲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8, 试样截取位置示意图2。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8 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	外观检验	100%
	射线检验	100%
	拉伸试验	2
	冲击试样	5
	弯曲试样	2
	硬度检验	1
	焊接变形	100%
	宏观金相检验	1
	微观金相检验	1

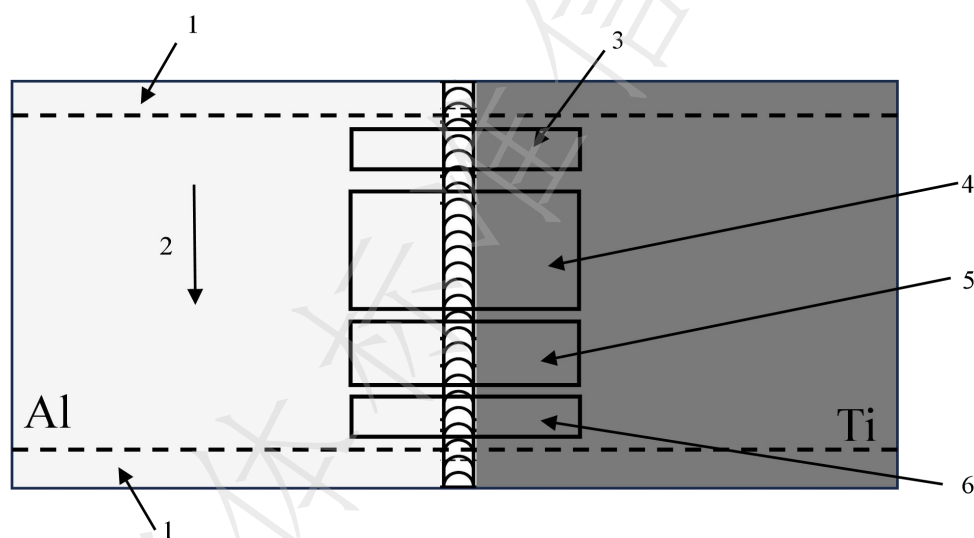


图2 试样截取位置示意图

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

7.1 外观检验

可通过肉眼或放大镜对焊缝宏观形貌尺寸及表面质量进行检查，检测方法应按照GB/T 32259的规定进行。

7.2 焊接接头变形检验

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。

7.3 无损检测

渗透检测应按照GB/T 18851.1的相关规定进行。

超声检测应按照GB/T 11345的相关规定进行。

射线检测应按照GB/T 3323.1的相关规定进行。

7.4 拉伸性能检验

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

7.4.2 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。

7.5 冲击性能检验

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

7.5.2 焊接接头冲击试样应覆盖焊缝全厚度。

7.6 弯曲性能检验

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

7.6.2 焊接接头正弯和背弯试样应覆盖焊缝全厚度。

7.7 硬度检验

7.7.1 焊接接头硬度试验应按照GB/T 2654规定进行。

7.7.2 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。

7.7.3 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0.1 mm~0.2 mm的距离测试1个点，在界面处每隔0.02 mm~0.03 mm取1个点；纵向测量时每隔0.1 mm~0.2 mm测试1个点，在界面处每隔0.02 mm~0.03 mm取1个点。

7.8 金相检验

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

7.8.2 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-钛异种金属激光熔钎焊工艺规程 (WPS)

表A.1为铝-钛异种金属激光熔钎焊工艺规程示例。

表A.1 铝-钛异种金属激光熔钎焊工艺规程

焊接设备	激光器型号				激光器最大激光功率 (W)		
	近红光激光波长 (nm)				激光器光纤芯径 (μm)		
	激光枪头焦距(mm)				光斑直径(mm)		
	光束参数乘积 BPP(mm·mrad)				光斑尺寸(mm)		
材料	钛合金型号				铝合金型号		
	母材炉/批号				母材炉/批号		
	预热温度 ($^{\circ}\text{C}$)				预热温度 ($^{\circ}\text{C}$)		
	钛合金规格 (mm)				铝合金规格 (mm)		
	钛合金执行标准				铝合金执行标准		
	钛合金热处理制度				铝合金热处理制度		
焊接接头坡口型式简图							
焊接工艺参数	焊道	激光功率 P/W	激光束偏移量 D/mm	焊接速度 $V/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	离焦量 F/mm	保护罩气体流量 $Q_1/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	背面保护气体流量 $Q_2/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
	1						
	2						
	3						
焊接操作人员签字		日期		审核人员签字		日期	