

团 体 标 准

T/CWAN 0123—2024

钛合金激光-电弧复合焊接推荐工艺规范

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

2024-10-31 发布

2024-12-01 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	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）焊接工艺规程	10

国家标准

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：北京博清科技有限公司、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、安徽博清机器人科技有限公司、国家焊剂产品质量（湖南）检验检测中心、黑龙江工程学院、重庆科技大学、中国船舶集团有限公司第七二五研究所、中国机械总院集团宁波智能机床研究院有限公司、中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司、广东省鑫全利激光智能装备有限公司、天津市特种设备监督检验技术研究院、宁夏大学、上海工程技术大学、北部湾大学、重庆丰利钛新材料科技有限公司、广东省科学院中乌焊接研究所、重庆金世利航空材料有限公司。

本文件主要起草人：冯消冰、武鹏博、李海龙、曾令平、王佳杰、卢文文、尹立孟、张淳、廖志谦、刘爱平、张雷、汪正伟、秦建、边成钢、何永海、缪俊、樊志彬、刘芳、缪露露、路全彬、陈玉华、李海波、马青军、吴斌涛、张天理、冯志强、曹浩、陈昊睿、方乃文、冯伟、张体明、刘和平、孙钦荣、张宇鹏、柴森森、赵坤涛、田宇、李爱民、牛董山钰。

钛合金激光-电弧复合焊接推荐工艺规范

1 范围

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

本文件适用于壁厚 ≥ 3 mm 的钛合金板的激光-电弧复合焊接，钛合金管的激光-电弧复合焊接可参照此标准进行。

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/T 3621 钛及钛合金板材

GB/T 5168 钛及钛合金高低倍组织检验方法

GB/T 6611 钛及钛合金术语和金相图谱

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 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 26955 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验

GB/T 30562 钛及钛合金焊丝

GB 30863 个体防护装备 眼面部防护 激光防护镜

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体

T/CWAN 0009 焊接术语 熔化焊

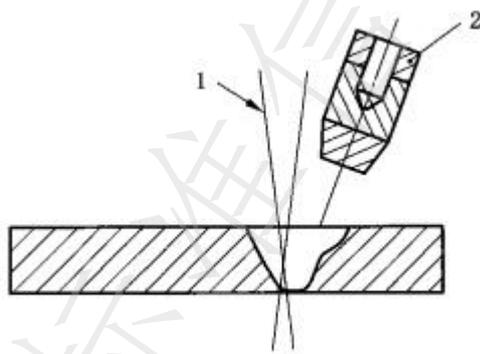
3 术语与定义

GB/T 3375、GB/T 6611、GB/T 19866、GB/T 19867.6和T/CWAN 0009界定的及下列术语与定义适用于本文件。

3.1

复合焊接 hybrid welding

采用两种（或两种以上）热源形成同一个熔池进行焊接的工艺方法，参见图1。



说明：

1— 激光束

2— 焊枪

图 1 激光-电弧复合焊接示意图

3.2

离焦量 defocus amount

离焦量是激光焦点离作用物质间的距离

3.3

光丝间距 laser-wire distance

激光光斑中心到焊丝端头与工件表面接触点的距离

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

4.2.1 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。

4.2.2 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。

4.3 设备及仪器仪表

4.3.1 激光发生器、光束传输系统、弧焊电源、激光-电弧复合焊枪、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 相关设备在安装、搬迁、大修或停止使用1年以上时，应进行检定校准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。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，如需要应增加焊缝背面防护措施。

4.4 材料

4.4.1 钛合金板及焊丝应具有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。

4.4.2 钛合金板应符合GB/T 3621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 焊前应仔细清理母材及焊丝，清理可选以下方法进行：

a) 用5%~10%氢氧化钠溶液或工业丙酮去除母材、焊丝表面残存的油脂等污物；

b) 需要时，宜采用2%~5%氢氟酸（HF）+30%~40%硝酸（HNO₃）+水（H₂O）的溶液，在室温条件下酸洗，时间2min~20min。酸洗后应立即用清水冲洗干净。

4.4.4 钛合金焊丝应符合GB/T 30562相关规定或符合设计技术条件中所提出的要求。

4.4.4.1 钛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有害气体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 钛合金焊丝应在开包后48 h内用完，对于已开包未用完的钛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 39255等相关标准要求。推荐气体配比及流量见表1。

表1 保护气体配比及流量推荐表

保护气位置	保护气体（体积分数）
焊枪保护气	30%Ar+70%He
拖罩保护气	99.99% 纯Ar
背面保护气	99.99% 纯Ar

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 焊接作业环境风速应 ≤ 1.5 m/s。

4.5.3 焊接作业环境湿度应 $< 80\%$ 。

4.5.4 禁止在下雨、下雪等室外环境作业。

4.5.5 环境温度应 ≥ 5 °C

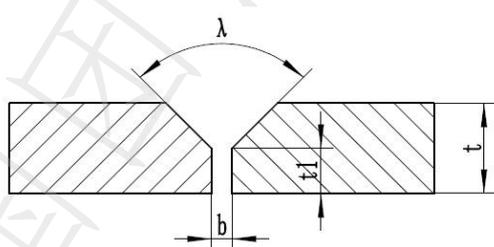
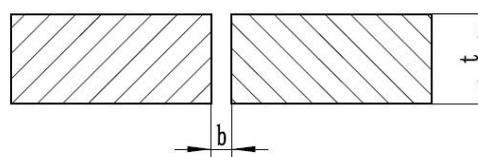
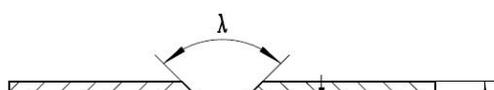
4.5.6 钛合金的焊接操作区域应与其他材料的焊接作业区分开。

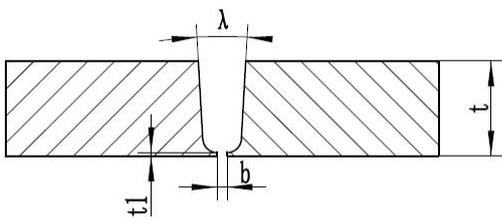
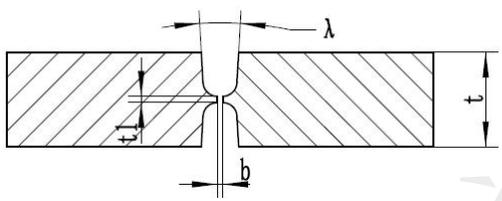
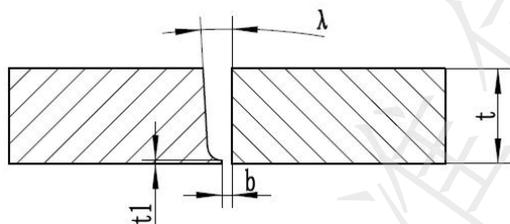
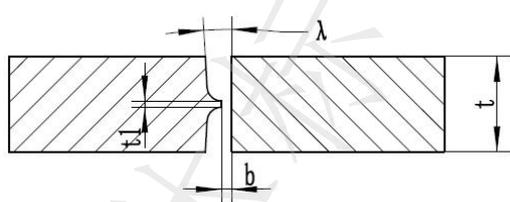
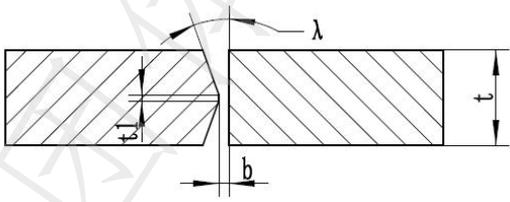
4.6 坡口形式

采用对接接头进行焊接试验，可采用单面焊接或双面焊接，钛合金激光-电弧复合焊坡口可按GB/T 985.1规定选择、设计。推荐采用的坡口形式见表2，其他形式接头由供需双方协商确定。

表2 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
$3 \leq t \leq 5$		Y形坡口	$30 \leq \lambda \leq 45$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 3$
$5 < t \leq 15$			$30 \leq \lambda \leq 45$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$t > 15$			$45 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$3 \leq t \leq 5$		I形坡口	—	$0 \leq b \leq 1$	—
$8 < t \leq 25$		双Y形	$30 \leq \lambda \leq 45$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq t_1 \leq 6$

$t > 25$		坡口	$45 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq t_1 \leq 8$
$t > 15$		U形坡口	$60 \leq \lambda \leq 120$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$8 < t \leq 25$		双U形坡口	$60 \leq \lambda \leq 120$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq t_1 \leq 8$
$t > 25$			$80 \leq \lambda \leq 160$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq t_1 \leq 8$
$5 < t \leq 12$		J形坡口	$30 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$t > 12$			$40 \leq \lambda \leq 80$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$8 < t \leq 25$		双J形坡口	$30 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$t > 25$			$40 \leq \lambda \leq 80$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$8 < t \leq 25$		双K形坡口	$30 \leq \lambda \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 6$
$t > 25$			$40 \leq \lambda \leq 80$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq t_1 \leq 6$

5 工艺要求

5.1 坡口加工

5.1.1 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 $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$ ，钝边的加工精度应控制在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。

5.1.2 坡口宜采用机械或硬质合金磨轮磨削的方法加工，加工面金属不应产生加工氧化色。

5.2 工装夹具

5.2.1 钛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、错边量，保证组对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

5.4.1 为了减少气孔和裂纹等缺陷的产生，在焊接前8 h以内应对待焊坡口两侧 ≥ 20 mm区域内的表面氧化膜和油污，清理后应对坡口区域进行隔离保护。

5.4.2 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。

5.4.3 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。

5.4.4 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。

5.4.5 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。

5.4.6 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。

5.4.7 为抑制钛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。

5.4.8 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/m³。若在真空舱内焊接时，真空舱内环境压力应低于5 Pa。

5.4.10 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 多层多道焊接时应严格控制焊接层间温度不高于150 °C。

5.4.12 当环境空气相对湿度 $RH \geq 50\%$ 时，应预热钛合金板材至 $30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.4.13 钛合金激光-电弧复合焊接推荐工艺参数如表3所示。

表3 钛合金激光-电弧复合焊推荐工艺参数

母材厚度 t/mm	激光功率 P_R/KW	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 $V/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	焊丝直径 ϕ/mm	离焦量 f/mm	光丝间距 D/mm	焊枪喷嘴气体流量 $Q_1/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	托罩气体流量 $Q_2/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	背面保护气体流量 $Q_3/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
$3 \leq t \leq 5$	3~4	80~100	20~23	600~800	1.2	0~4	2~4	15~18	20~30	10~30
$5 < t \leq 7$	5~6	100~120	23~26	600~800	1.2	-2~0	2~4	18~22	20~30	10~30
$7 < t \leq 10$	6~7	120~140	26~29	600~800	1.2	-4~0	2~4	22~23	20~30	10~30
$10 < t \leq 12$	7~8	140~160	29~31	600~800	1.2	-6~0	2~4	23~25	20~30	10~30

5.5 焊后处理

5.5.1 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，防止发生氧化变色。

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 焊缝表面及热影响区表面的颜色满足表4的规定。

表4 焊缝及热影响区表面颜色规定表

焊缝与热影响区表面颜色	保护状况
银白色	良好
淡黄色	较好
深蓝色	较差
灰色或灰白色	很差

6.3 焊缝无损检测按GB/T 3323.1，GB/T 11345相关规定要求进行。

6.4 焊接接头拉伸强度不应低于母材强度极限下限值的90%。

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5，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5 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

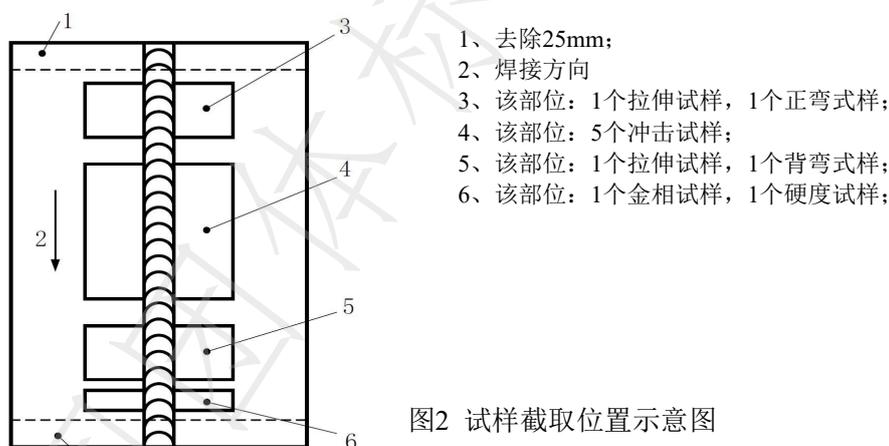


图2 试样截取位置示意图

7.1 拉伸性能检验

7.1.1 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。

7.1.2 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。

7.2 冲击性能检验

7.2.1 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。

7.2.2 焊接接头冲击试样应覆盖焊缝全厚度。

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

7.3 弯曲性能检验

7.3.1 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。

7.3.2 焊接接头正弯和背弯试样应覆盖焊缝全厚度。

7.4 硬度检验

7.4.1 焊接接头硬度试验应按照GB/T 2654规定进行。

7.4.2 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。

7.4.3 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 mm~2 mm的距离测试一个点，纵向测量时每隔1 mm~3 mm测试一个点。

7.5 金相检验

7.5.1 焊接接头宏观金相与微观金相检验应按照 GB/T 5168 和 GB/T 26955 规定进行。

7.5.2 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)

钛合金激光-电弧复合焊接工艺规程 (WPS)

表A.1为钛合金激光-电弧复合焊接工艺规程示例。

表A.1 钛合金激光-电弧复合焊接工艺规程

焊接设备	激光器型号				焊机型号					
	激光器最大激光功率 (KW)				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					
焊接接头坡口型式简图										
焊接工艺参数	焊道	激光功率 P_R/KW	焊接电流/A	焊接电压 /U	焊接速度 $V/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	离焦量 f/mm	光丝间距 D/mm	焊枪喷嘴气体流量 $Q_1/(\text{L}/\text{min})$	托罩气体流量 $Q_2/(\text{L}/\text{min})$	背面保护气体流量 $Q_3/(\text{L}/\text{min})$
	1									
	2									
	3									
焊接操作人员签字	日期		审核人员签字				日期			