



中华人民共和国国家标准

GB/T 37893—2019

激光-电弧复合焊接推荐工艺方法

Recommendation procedure specification for laser-arc hybrid welding

2019-08-30 发布

2020-03-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 安全防护 2

5 焊接操作人员资质 2

6 激光复合焊设备 2

7 保护气体 2

8 接头设计及制备 2

9 焊丝选择 7

10 焊前准备..... 7

 10.1 焊前处理 7

 10.2 工件的组对及装夹 7

 10.3 设备状态检查 7

11 焊枪的设计..... 7

12 工艺评定..... 8

13 焊接工艺参数..... 8

14 焊接质量检验及验收 10

15 焊接返修 10

附录 A（资料性附录） 高强钢激光复合焊接工艺规程示例 11

附录 B（资料性附录） 铝合金激光复合焊接工艺规程示例 13

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国焊接标准化技术委员会(SAC/TC 55)提出并归口。

本标准起草单位:哈尔滨焊接研究院有限公司、中车青岛四方机车车辆股份有限公司、广州特种承压设备检测研究院、福建省工业设备安装有限公司。

本标准主要起草人:腾彬、王旭友、李茂东、韩晓辉、朴东光、苏金花、雷振、范志忠、李刚卿、毛镇东。

激光-电弧复合焊接推荐工艺方法

1 范围

本标准规定了激光-电弧复合焊接通用的工艺参数及技术要求。

本标准适用于钢、铝及铝合金的激光复合焊。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 3323 金属熔化焊焊接接头射线照相

GB/T 3375 焊接术语

GB/T 3863 工业氧

GB/T 4842 氩

GB/T 6052 工业液体二氧化碳

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 8110 气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝

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 18851.1 无损检测 渗透检测 第1部分:总则

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 铝及铝合金的弧焊接头 缺欠质量分级指南

GB/T 29713 不锈钢焊丝和焊带

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 33214 钢、镍及镍合金的激光-电弧复合焊接接头 缺欠质量分级指南

GB/T 33645 钢、镍及镍合金的激光-电弧复合焊接工艺评定试验

3 术语和 义

GB/T 3375 和 GB/T 19866 界定的术语和定义适用于本文件。

4 安全防护

激光复合焊接的环境条件、操作要求及防护措施应符合相关标准(如:GB 9448、GB 7247.1、GB/T 7247.4、GB/T 7247.14 和 GB 30863)。

5 焊接操作人员资质

焊接操作人员应接受必要的培训,具备相应的知识、能力和资质。

6 激光复合焊设备

设备组成有激光发生器、光束传输系统、弧焊电源及激光-电弧复合焊枪等主要部分。
设备应按要求定期保养、维护和校准。

7 保护气体

激光复合焊接所使用的保护气体应符合相关标准(如:GB/T 6052、GB/T 4842、GB/T 3863)要求。
气体配比及流量可按表 1 选择使用。

表 1 气体的选用

母材	保护气体(体积分数)	保护气体流量/(L/min)
碳钢	Ar+(15%~20%)CO ₂	15~30
	CO ₂	
不锈钢	Ar+(2%~5%)CO ₂	
	Ar+(2%~5%)O ₂	
铝合金	纯 Ar	

8 接头设计及制备

激光复合焊接的坡口形式及尺寸的选择原则上应以弧焊接头设计为主,还应兼顾激光穿透能力较强的工艺特点。

激光复合焊坡口可按 GB/T 985.1 和 GB/T 985.3 规定选择、设计。

表 2、表 3 分别推荐了激光复合焊的单面对接及双面对接坡口。推荐激光功率只作为参考,其实际选用功率与激光设备本身额定功率、材料、焊接速度以及焊接接头质量等因素有关,应根据接头质量要求及实际生产情况确定。

接头的制备可采用机械加工,采用激光或等离子切割加工时,应考虑切口硬化问题。接头制备过程中,应严格确保试件待焊部位的加工尺寸精度,坡口钝边大小变化影响焊缝根部的熔透效果,钝边的加工精度应控制在±0.5 mm 范围内。

表 2 激光-电弧复合焊单面对接坡口

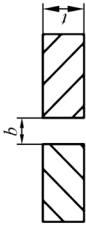
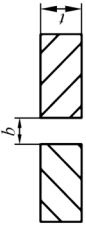
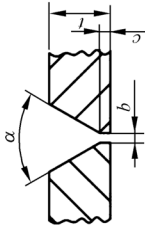
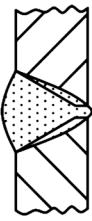
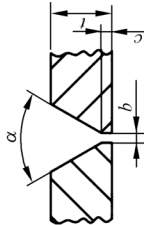
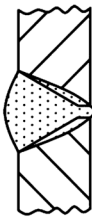
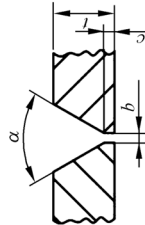
序号	母材厚度 t	推荐激光功率	坡口/接头种类	横截面示意图	尺寸			焊缝示意图
					坡口角度 α 或坡口面角 β	间隙 b	钝边 c	
1	$1 < t \leq 3$	2 kW~4 kW	I 形坡口		—	$0 \leq b \leq 0.5$	—	
2	$3 < t \leq 5$	4 kW~6 kW	I 形坡口		—	$0 \leq b \leq 1$	—	
		2 kW~4 kW	V 形坡口		$30 \leq \alpha \leq 45$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 3$	
3	$5 < t \leq 15$	4 kW~6 kW	V 形坡口		$30 \leq \alpha \leq 45$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 6$	
4	$t > 15$	4 kW~6 kW	V 形坡口		$45 \leq \alpha \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 6$	

表 2 (续)

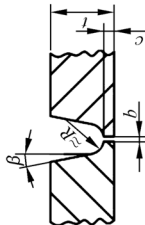
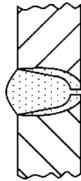
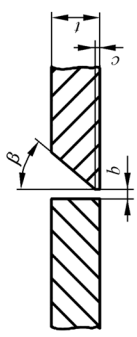
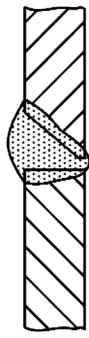
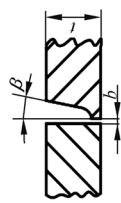
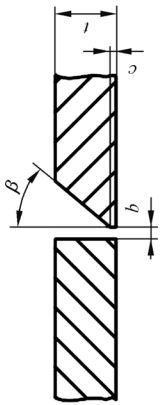
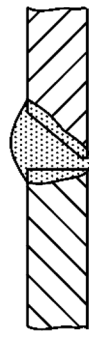
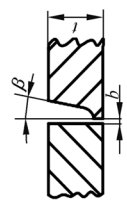
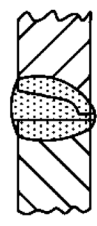
序号	母材 厚度 t	推荐激光 功率	坡口/接头 种类	横截面 示意图	尺寸			焊缝示意图
					坡口角度 α 或坡口面角 β	间隙 b	钝边 c	
4	$t > 15$	4 kW ~ 6 kW	U 形		$8 \leq \beta \leq 12$ $2 \leq R \leq 6$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 6$	
5	$5 \leq t \leq 12$	4 kW ~ 6 kW	单边 V 形坡口		$15 \leq \beta \leq 30$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 6$	
			单边 U 形坡口		$15 \leq \beta \leq 30$ $2 \leq R \leq 4$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 6$	
6	$t > 12$	4 kW ~ 6 kW	单边 V 形坡口		$45 \leq \beta \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 6$	
			J 形坡口		$45 \leq \beta \leq 60$ $2 \leq R \leq 6$	$0 \leq b \leq 1$	$2 \leq c \leq 6$	

表 3 激光-熔化电极复合双面对接坡口

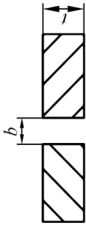
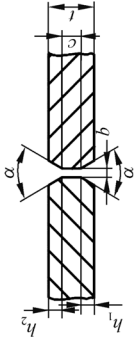
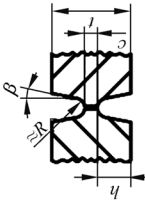
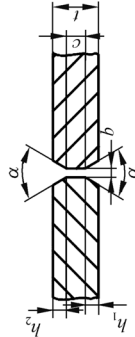
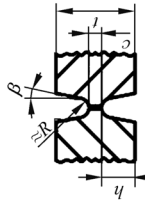
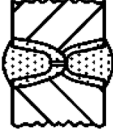
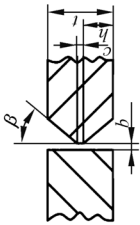
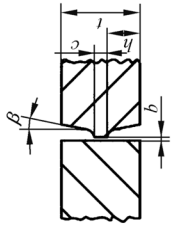
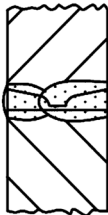
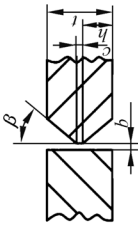
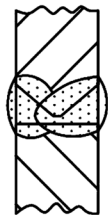
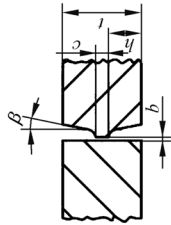
序号	母材 厚度 t	推荐激光 功率	坡口/接头 种类	横截面 示意图	尺寸			焊缝示意图
					坡口角度 α 或坡口面角 β	间隙 b	钝边 c	
1	$t \leq 8$	4 kW~6 kW	I 形坡口		—	$0 \leq b \leq 1$	—	
2	$8 < t \leq 25$	4 kW~6 kW	双 V 形坡口		$30 \leq \alpha \leq 45$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq c \leq 6$	
		≥ 4 kW	双 U 形坡口		$8 \leq \beta \leq 12$ $2 \leq R \leq 6$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq c \leq 8$	
3	$t > 25$	≥ 4 kW	双 V 形坡口		$45 \leq \alpha \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq c \leq 8$	
			双 U 形坡口		$15 \leq \beta \leq 30$ $2 \leq R \leq 6$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq c \leq 8$	

表 3 (续)

序号	母材 厚度 t	推荐激光 功率	坡口/接头 种类	横截面 示意图	尺寸			焊缝示意图
					坡口角度 α 或坡口面角 β	间隙 b	钝边 c	
4	$8 \leq t \leq 25$	$\geq 4 \text{ kW}$	K 形坡口		$30 \leq \beta \leq 45$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq c \leq 8$	
			双 J 形坡口		$30 \leq \beta \leq 45$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq c \leq 8$	
5	$t > 25$	$\geq 4 \text{ kW}$	K 形坡口		$45 \leq \beta \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq c \leq 8$	
			双 J 形坡口		$45 \leq \beta \leq 60$	$0 \leq b \leq 1$	$4 \leq c \leq 8$	

9 焊丝选择

焊丝应按母材匹配选择,并符合相关的焊丝标准,如:GB/T 10858、GB/T 8110、GB/T 29713 的要求。

10 焊前准备

10.1 焊前处理

10.1.1 工件状态检查

组对之前应对待焊工件、使用的设备进行必要的检查,包括:

- a) 检查待焊工件的加工面的加工质量是否存在明显质量问题(如:毛刺、切口不平整等)。
- b) 检查待焊工件的表面是否存在明显的划伤。

10.1.2 焊前清理

为了防止焊缝中出现气孔、夹渣等缺陷,焊接前应对坡口进行清理。焊前清理的内容主要包括清理待焊部位及邻近区域(至少 20 mm)的铁锈、氧化膜、油污;去除由于机械或切割下料产生的毛刺。

特别是铝及铝合金材料,焊前清理尤为重要,应去除铝及铝合金坡口周边氧化膜,清理时需在干燥的环境中进行,并且清理好的待焊工件应在 24 h 内焊接完毕。

10.2 工件的组对及装夹

将待焊接工件放置在焊接夹具上,完成工件装夹。检查工件的装卡状态,测量工件装卡后的间隙、错边量,保证组对及装卡条件满足焊接要求。

必要时,可采用点固焊方法固定工件,点固焊应按工艺规定实施。

10.3 设备状态检查

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。

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。

11 焊枪的设计

激光-熔化极电弧复合焊枪一般采用激光-电弧旁轴复合方式。

复合焊枪设计时应考虑激光枪光学参数、电弧焊枪结构参数、激光光束与弧焊焊枪的空间位置、等离子体去除与焊缝保护方式等设计要素。涉及的参数主要有激光枪焦距、光束焦斑尺寸、光丝间距、光束与焊枪轴线角度、焊丝伸出长度等因素(见图 1):

- 光丝间距是指激光光斑中心位置到焊丝前端的距离,根据需要可设计成固定距离和可调距离两种方式;
- 激光枪焦距是指透镜中心到光束焦点的距离,激光-熔化极电弧复合热源焊接方法,电弧在焊接过程中会产生较多飞溅,为了防止飞溅对复合焊枪枪体的污损,建议选用焦距略大的激光枪,同时,除特殊需求产品焊接,激光-电弧复合焊为了提高焊接搭桥能力,建议其焦点位置理论计算光斑应大于 0.6 mm;
- 光束与焊枪轴线角度是复合焊枪设计的重要参数,通常在 30°~45°为最宜;

- 焊丝伸出长度是指导电嘴端头到焊丝端头的距离,在激光-熔化极电弧复合热源焊接方法中焊丝伸出长度一般选用 15 mm~22 mm;
- 保护气体可通过电弧焊枪送进或采用旁轴保护方式。

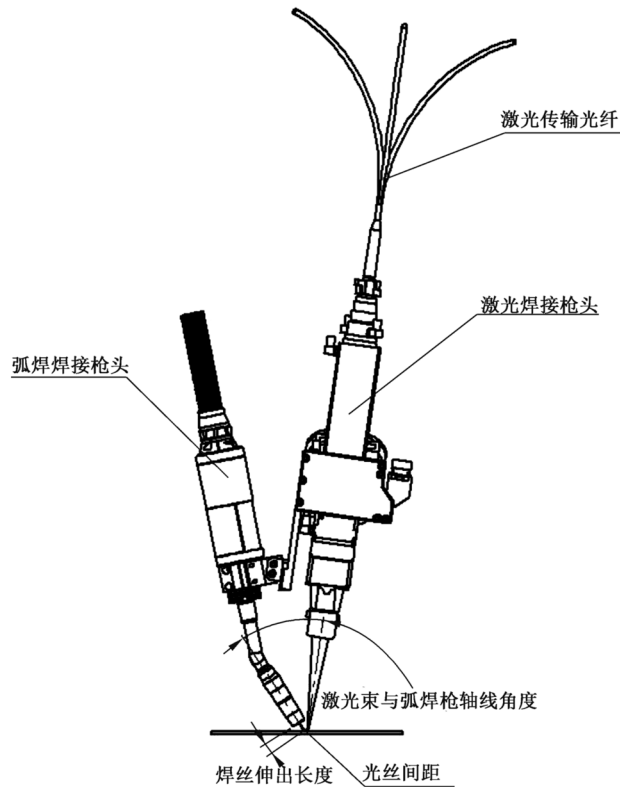


图 1 焊枪示意图

12 工艺评定

激光-电弧复合焊接的工艺参数应按 GB/T 19866 和 GB/T 19867.6 确定,焊接工艺可按 GB/T 33645 规定进行评定。

13 焊接工艺参数

激光-熔化极电弧复合热源焊接方法的焊接工艺参数主要包括离焦量、焊接速度、激光功率、焊接电流、电弧电压、保护气流量等。

应根据自身激光设备能力及产品特点选取合适的离焦量。

焊接铝合金材料时,激光焊接枪应适当倾斜一定角度,一般情况下,采用 10° 倾角(沿焊接方向激光束与工件垂直方向夹角)。

表 4、表 5 和表 6 分别为不同板厚的钢、铝合金激光复合焊接的推荐工艺参数,选用焊丝直径为 1.2 mm,钢坡口组装间隙不大于 1 mm,铝合金坡口组装间隙不大于 0.5 mm,激光聚焦 300 mm,准直 200 mm,光纤芯径 0.4 mm,离焦量 5 mm。另外,附录 A 和附录 B 分别列举了钢和铝合金产品的工艺规程示例。

针对不同材料,对焊接热输入选择不同,根据不同材料的焊接热输入要求,焊接速度、焊接电流、电弧电压的参数可进行适当调整。

表 4 激光-电弧复合焊接推荐工艺参数(钢的对接,单道焊接)

母材厚度/mm	坡口形式	坡口角度/(°)	钝边/mm	激光功率/kW	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/min)
2	I	—	—	3.0~3.5	60~80	17~18	2.0~3.0
3	I	—	—	4.0~4.5	80~100	19~20	2.0~2.5
	V	30	2	2.5~3.0	160~180	21~22	1.5~2.0
4	I	—	—	4.0~4.5	80~120	19~20	1.5~2.0
	V	30	2	2.5~3.0	260~280	26~27	1.5~2.0
5	I	—	—	4.5~5.0	80~120	19~20	0.8~1.2
	V	30	2~3	3.0~3.5	260~280	26~27	1.0~1.5
6	V	30	3~4	4.5~5.0	260~280	26~27	0.8~1.2

表 5 激光-电弧复合焊接推荐工艺参数(钢的对接,多层多道焊)

坡口形式	坡口角度/(°)	钝边/mm	焊接位置	激光功率/kW	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/min)
单面焊接 V形/U形	30~45	2~4	打底	3.0~4.0	200~220	18~20	0.5~0.8
			填充	0.8~1.5	260~280	26~27	
双面焊接 V形/U形	30~45	5~8	打底	5.5~6.0	200~220	18~20	0.5~0.8
			另一侧封底	1.0~2.0	200~220	18~20	
			填充	0.8~1.5	260~280	26~27	

表 6 激光-电弧复合焊接推荐工艺参数(铝合金的对接,多层多道)

母材厚度/mm	坡口形式	坡口角度/(°)	钝边/mm	焊接道数	激光功率/kW	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m/min)
3~4	单面焊接 V形	30	1~2	一道焊	4.0~5.0	180~210	20~21	1.8~2.0
8~12	单面焊接 V形	50	1~2	不超过四道	1.5~2.0	210~260	22~24	0.8~1.0

14 焊接质量检验及验收

焊接质量的目视、射线、超声波和渗透检测方法可按相应 GB/T 32259、GB/T 3323、GB/T 11345 和 GB/T 18851.1 规定。

验收应按照 GB/T 22087 和 GB/T 33214 规定。

15 焊接返修

焊缝缺陷超出规定限值时,允许进行焊接返修。修复焊接应符合下述要求:

- 同一部位的返修次数原则上不超过两次。修复次数超过两次时,应分析缺陷原因,做必要的修复评定后,严格按产品规程要求进行。
- 修复焊工艺原则上应与原焊接工艺相同,两者不一致时,修复焊工艺应评定合格。
- 返修后,焊件应按原检验项目检验合格,如增加了新的检验项目时,新增加项目亦应检验合格。

附 录 A
(资料性附录)

高强钢激光复合焊接工艺规程示例

表 A.1 给出了高强钢的激光复合焊接工艺规程示例。

表 A.1 高强钢激光复合焊接工艺规程

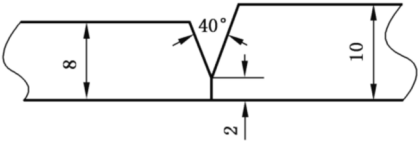
高强钢激光-电弧复合焊接工艺规范			
WPS编号:			
制造商: 哈尔滨焊接研究院有限公司			
工艺评定报告编号:			
设备编号:			
——焊机		福尼斯TPS500	
——光纤直径		0.4 mm	
——光束聚焦系统			
——准值光学系统		300	
——聚焦光学系统		200	
——电弧热源		单丝MAC	
——激光热源		IPG光纤激光器	
母材技术条件: 低合金高强钢			
材料1:		WELDOX960E	
		厚度: 8 mm	
材料2:		WELDOX960E	
		厚度: 10 mm	
填充或附加材料: 气体保护焊焊丝			
——型号: ER100S-G		低合金焊丝	
——尺寸: $\phi 1.2$			
接头种类: 对接V形			
接头设计/接头制备:		层道顺序:	
		打底, 标准、短路	
		填充, 脉冲	
		盖面, 脉冲	
激光、电弧、接头几何参数 (照片, 草图……)			

表 A.1 (续)

夹具		☒ 是	☐ 否
机械夹持:			
定位焊缝及工艺:			
预热: $\geq 75\text{ }^{\circ}\text{C}$		☒ 是	☐ 否
焊后热处理:		☐ 是	☒ 否
准备:		设备准备、坡口打磨清理、水电气检查	
程序:		编制自动焊接程序	

	单位	定位焊道	焊道
1 焊接位置	水平		
2 焊接速度	打底: 0.6 m/min 填充: 1.2 m/min 盖面: 1.2 m/min		
3 焊接速度变化率	无		
4 作用在工件上的激光功率			
——连续的	打底: 4.0 kW~4.5 kW 填充: 0.8 kW~1.2 kW 盖面: 0.8 kW~1.2 kW		
5 功率变化斜率说明			
a ——上升	无		
b ——交迭	无		
c ——下降	无		
d ——斜率形状	无		
6 电弧参数			
a ——方式/极性	打底焊: 短路 填充: 盖面: 脉冲		
b ——送丝速度	打底焊: 5 m/min 填充: 9 m/min~10 m/min 盖面: 9 m/min~10 m/min		
c ——电流	打底: 160 A~180 A 填充: 240 A~60 A 盖面: 260 A~280 A		
d ——电压	打底: 15 V~16 V 填充: 26 V~28 V 盖面: 28 V~30 V		
e ——基值电流			
f ——脉冲电流			
g ——基值电流持续时间			
h ——脉冲电流持续时间			
i ——脉冲频率			
7 保护气体			
a ——型号及名称	80%Ar+20%CO ₂		
b ——气体流量	20 L/min~25 L/min		
8 几何参数 (见第13章)			
——激光束			
——激光焦距	300 mm		
——激光倾角	10°		
——电弧电压激光离焦量	+5 mm		
——光丝间距	3 mm		
——			
——			
复合焊接	激光在前, 电弧在后		
——			
——			
——			
9 导电嘴至工件距离	18 mm		
10			
11			

备注:	

制造商 (名称, 署名, 日期)	第三方组织 (如果有需要) (名称, 署名, 日期)
---------------------	-------------------------------

附 录 B
(资料性附录)

铝合金激光复合焊接工艺规程示例

表 B.1 给出了铝合金的激光复合焊接工艺规程示例。

表 B.1 铝合金激光复合焊接工艺规程

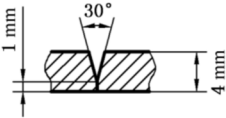
铝合金激光-电弧复合焊接工艺规范			
WPS编号:			
制造商: 哈尔滨焊接研究院有限公司			
工艺评定报告编号:			
设备编号:			
—焊机		福尼斯TPS500	
—光纤直径		0.4 mm	
—光束聚焦系统			
—准值光学系统		300	
—聚焦光学系统		200	
—电弧热源		单丝MAC	
—激光热源		IPG光纤激光器	
母材技术条件: 低合金高强度			
材料1:		A6N01S	
		厚度: 4 mm	
材料2:		A6N01S	
		厚度: 4 mm	
填充或附加材料: 气体保护焊焊丝			
—型号: ER5356		低合金焊丝	
—尺寸: $\phi 1.2$			
接头种类: 对接V形			
接头设计/接头制备:		层道顺序:	
		单道	
激光、电弧、接头几何参数 (照片, 草图.....)			

表 B.1 (续)

夹具	☒ 是	☐ 否	
机械夹持:			
定位焊缝及工艺:			
预热:	☐ 是	☒ 否	
焊后热处理:	☐ 是	☒ 否	
准备:	设备准备、坡口打磨清理、水电气检查		
程序:	编制自动焊接程序		

	单位	定位焊道	焊道
1 焊接位置	水平		
2 焊接速度	1.8 m/min~2.0 m/min		
3 焊接速度变化率	无		
4 作用在工件上的激光功率			
——连续的	4.5 kW~5.0 kW		
5 功率变化斜率说明			
a ——上升	无		
b ——交迭	无		
c ——下降	无		
d ——斜率形状	无		
6 电弧参数			
a ——方式/极性	脉冲		
b ——送丝速度	10 cm/min~12 cm/min		
c ——电流	180 A~200 A		
d ——电压	21 V~22 V		
e ——基值电流			
f ——脉冲电流			
g ——基值电流持续时间			
h ——脉冲电流持续时间			
i ——脉冲频率			
7 保护气体			
a ——型号及名称	100%Ar		
b ——气体流量	20 L/min~25 L/min		
8 几何参数 (见第13章)			
激光束			
——激光焦距	300 mm		
——激光倾角	10°		
——电弧电压激光离焦量	+5 mm		
——光丝间距	3 mm		
——			
——			
复合焊接	激光在前, 电弧在后		
——			
——			
——			
9 导电嘴至工件距离	18 mm		
10			
11			

制造商
(名称, 署名, 日期)

第三方组织 (如果有需要)
(名称, 署名, 日期)