

机身钛合金壁板激光焊接技术研究及应用

Research and Application of Laser Welding Technology in Titanium-Alloy Fuselage Panel

中航工业成都飞机设计研究所 赵志远 江少华 周煜青

[摘要] 本文介绍了在机身钛合金壁板上应用的两种激光焊接技术:单激光束熔焊技术和双激光束填丝角焊接技术。从工艺原理、外观质量、内部质量、力学性能4个方面对两种技术进行了研究。与传统连接方式的对比结果验证了激光焊接技术的优越性。探讨了两种技术在工程应用中的问题,提出了解决方案。

关键词: 激光焊接 整体壁板 熔焊 角焊 钛合金

[ABSTRACT] There are two laser welding technologies introduced in this paper: single laser fusion welding and double laser fillet welding. The research is based on technological fundamentals, apparent quality, internal quality and mechanics properties. It is proved that laser welding is better than traditional panel connection mode. Some solutions are presented to the technical difficulties in engineering application of two laser welding technologies.

Keywords: Laser welding Integrated panel Fusion welding Fillet welding Titanium-alloy

激光焊接技术是20世纪60年代发展起来的先进焊接工艺,历经几次技术变革,已经形成了较完善和稳定的工艺方法^[1]。相对于其他焊接方法,该技术具有加热集中、热影响区小、焊缝深宽比大、焊接变形小等优势,同时具有自动化程度高、焊接速度快、控制精度高、无需真空环境等特点^[2]。目前已经在航空航天、武器制造、船舶汽车等领域得到应用。机身高温区壁板普遍采用比强度高、耐热性好、塑性好的钛合金制成,同时钛合金还有普通铝合金所不具备的特点——可焊性好^[3]。利用这一特点,将激光焊接技术应用在机身高温区钛合金壁板所制成的整体壁板结构,具有重量轻、表面质量好、连接强度高、焊接质量稳定、生产效率高等优点。这充分适应了机身壁板大型化、整体化、轻质化的发展趋势,也满足了飞机高气动和隐身性能的要求。

目前在机身钛合金壁板上得到应用的激光焊接技术主要有:单激光束熔焊技术和双激光束填丝角焊接技术。本文从工艺原理、外部质量、内部质量、力学性能等多角度对这两种技术进行了研究,并结合工程应用将机身钛合金激光焊接整体壁板结构与传统铆钉连接、点焊连接壁板进行了对比,分析了其优越性和存在的问题。

1 单激光束熔焊技术

1.1 工艺原理

单激光束熔焊的原理是采用单束激光沿待焊零件之间的对缝方向移动,利用激光的高能特性,将对缝周边材料瞬间熔化,熔化的组织冷却后凝结成焊缝,从而实现两个零件的连接。在机体钛合金壁板上主要应用于不同蒙皮之间的对缝连接。焊接完成后,其焊接接头截面图如图1所示。

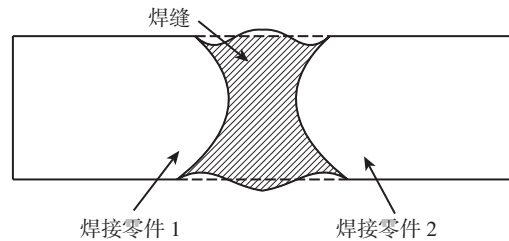


图1 单激光束熔焊接头截面图
Fig.1 Sectional view of single laser fusion welding structure

1.2 外观质量

(1) 焊缝表面形状。

从图1中可以看到,单激光束熔焊后形成的焊缝截面形状是:焊缝上表面和下表面均成褶皱状,这种焊缝形式会降低焊接接头的整体静力学性能及疲劳性能,以致无法满足机身钛合金壁板的强度要求。因此必须采用修饰焊的方法对焊缝进行处理,处理后焊接接头截面形式如图2所示。

(2) 焊缝余高与宽度。

焊缝最高点与零件外形之间的距离称为余高,图2

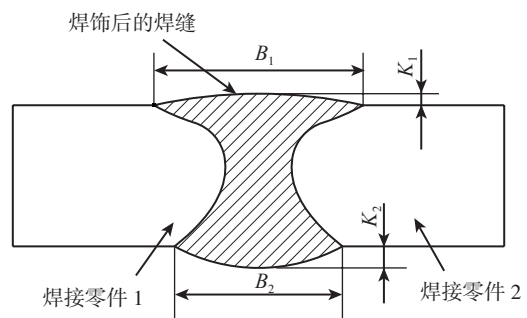


图2 修饰后的熔焊接头截面图
Fig.2 Sectional view of embellished fusion welding structure

中 K_1 和 K_2 即是焊缝的正面和背面余高。合适大小的余高能增加焊缝连接强度,但影响蒙皮表面质量。为满足机体壁板表面的气动和隐身要求,须对余高进行打磨。

焊缝在蒙皮表面上所表现出来的宽度称为焊缝宽度,图2中 B_1 和 B_2 即是焊缝的正反面宽度和背面宽度。焊缝宽度过宽或过窄均会降低焊接接头的力学性能。为此焊接机身壁板时需通过调整焊接参数,对其进行严格控制。

1.3 内部质量

焊缝常见的内部质量缺陷有气孔和夹杂两种形式,这两种缺陷会大幅降低焊缝的力学性能,缩短使用寿命。若从缺陷处萌生裂纹,向蒙皮扩展,则还会对机体的安全构成威胁。夹杂的影响程度大于气孔,因此允许一定数量和一定大小的气孔存在,但焊缝中绝对不能存在夹杂。内部缺陷的主要无损检测方式为X射线检测。排除超差气孔的主要办法为补焊,即加大激光器功率,对存在气孔的部位进行二次熔化、凝固。

1.4 力学性能

(1) 静力学性能。

按照 GB 2651-81《焊接接头拉伸试验法》制造母材为 TC4,厚度为 2mm 的矩形拉伸试片。按照 HB 6736-93《金属板材剪切试验方法》和图3制造母材为 TC4 的剪切试片。焊缝外观和内部质量均符合 1.2 和 1.3 节要求,分别进行拉伸、剪切试验,结果见表1。

测得同批次 TC4 材料的抗拉强度 $R_m=1089.1\text{MPa}$,

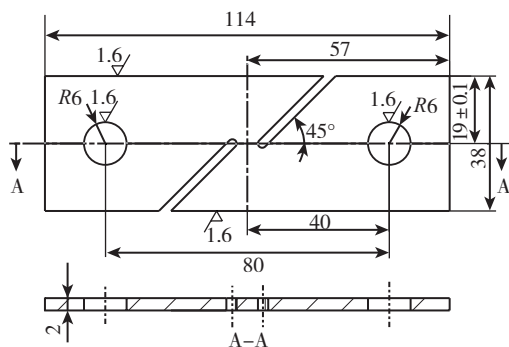


图3 剪切试片示意图
Fig.3 Shear test tablet

表1 TC4板材单激光束熔焊对接试片静力试验

试件编号	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 R_p/MPa	伸长率 $A/\%$	剪切强度 τ/MPa	试件断裂位置
1	1102.5	1058.0	9.4	644.6	断于焊缝
2	1090.5	1054.0	9.6	657.1	断于焊缝
3	1090.5	1045.0	9.9	636.3	断于焊缝
4	1094.5	1054.0	9.7	636.6	断于焊缝
5	1095.0	1064.0	11.0	640.7	断于焊缝
AVE	1094.6	1055	9.9	643.1	/

$\tau=653.5\text{MPa}$ 。根据表1中数据可得出以下结论:常温下单激光束熔焊接头抗拉强度是母材的100.5%,剪切强度是母材的98.4%。能够完全满足机身壁板的焊接接头拉伸及剪切强度达到母材的90%以上的要求。另外,从表1中得到伸长率为9.9%,说明焊接接头有一定的韧性,满足机身壁板使用要求。

(2) 疲劳性能。

焊接试片按照图4加工,母材选用 TC4,焊缝外观质量、内部质量均符合要求。按照 HB 5287-96《金属材料轴向加载疲劳试验方法》对焊接试片进行拉-拉疲劳试验,选取 $L=40\text{mm}$,应力比为0.1,加载频率为15Hz,得到试验结果见表2,其中 δ_{\max} 表示最大应力。

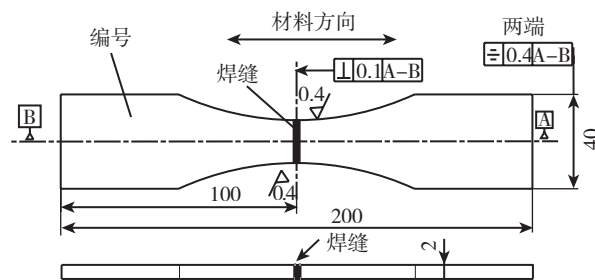


图4 拉-拉疲劳试验件示意图
Fig.4 Tensile fatigue tablet

表2 TC4板材单激光束熔焊对接试片拉-拉疲劳试验疲劳寿命

编号	δ_{\max}/MPa					断裂位置
	690MPa	633MPa	575MPa	518MPa	460MPa	
1	10476	9820	12206	31710	33444	焊缝
2	7474	12324	14157	44323	84239	焊缝
3	8085	9554	19736	33282	38350	焊缝
4	6814	11546	24437	25517	55429	焊缝
5	6933	16089	18942	23741	42036	焊缝
AVE	7596	11867	17896	31715	50700	/

从表2中可以得到, $\delta_{\max}=460\text{MPa}$ 时,平均寿命已经达到了 5×10^4 次以上,最低寿命也达到了 3×10^4 次以上,能够满足机身壁板的疲劳寿命要求。

2 双激光束填丝角焊技术

2.1 工艺原理

双激光束填丝角焊技术是一种新兴的焊接工艺,原理是通过两台激光器和固定在其上的两套同步送丝机构,从底板内侧沿着其与立筋的两侧缝隙同时进行角焊接,从而形成T形焊接接头的焊接技术。在机身钛合金壁板上主要应用于长桁或普通框与蒙皮之间的连接。焊接完成后,其接头形式和截面形状如图5所示。

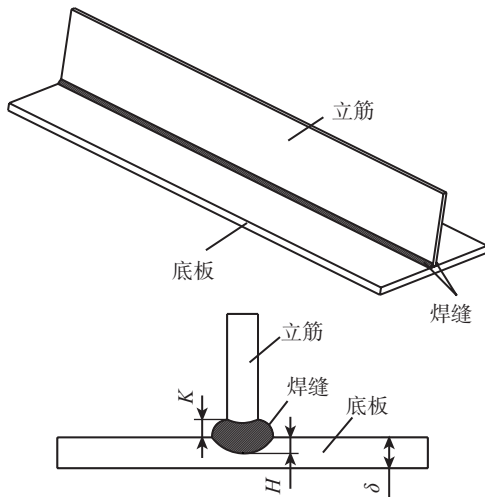


图5 双激光束填丝角焊接头、截面示意图
Fig.5 Double laser fillet welding structure

2.2 外观质量

(1) 熔深。

熔深是焊缝陷入底板(蒙皮)的深度,图5中 H 即为熔深。适量大小的熔深可保证焊接接头的连接强度,熔深过大会导致底板(蒙皮)烧穿,使得其传力性能降低,气动表面质量变差。因此焊接时必须严格控制工艺参数,保证熔深 H 小于底板厚度 δ ,避免烧穿现象的发生。

(2) 焊脚高度。

焊缝凸出底板内表面的高度称为焊脚高度,即图5中的 K 。合适大小的 K 可以保证T形焊接接头的力学性能,并提高接头的刚度。但是 K 过大会加剧立筋和底板的损伤,增加产生焊缝内部缺陷的概率,降低接头性能。因此在焊接时必须严格控制工艺参数,保证 K 在全焊缝长度上处于0.5~3mm之间。

2.3 内部质量

双激光束填丝角焊缝常见的内部缺陷有气孔和夹杂两种。其对T形焊接接头的影响程度、原理、检测及排除方式与单激光束熔焊相同。

2.4 力学性能

按照GB 228-76《金属拉力试验法》和图6制造母材为TC4的拉伸试验试片。HB 7032-86《T型角焊接头弯曲试验方法》制造母材为TC4,底板厚度为2mm,立筋厚度为1.5mm的弯曲试验试片。焊缝外观质量、内部质量均符合2.2和2.3节要求。分别对焊接试片进行拉伸和弯曲试验,试验结果见表3。

表3中, R_m 表示抗拉强度, $R_{p0.2}$ 表示屈服强度, A 表示断后伸长率, α 表示弯曲角度。

测得同批次TC4材料的抗拉强度 $R_m=1050$ MPa,可计算得双激光束填丝角焊接头抗拉强度是母材的

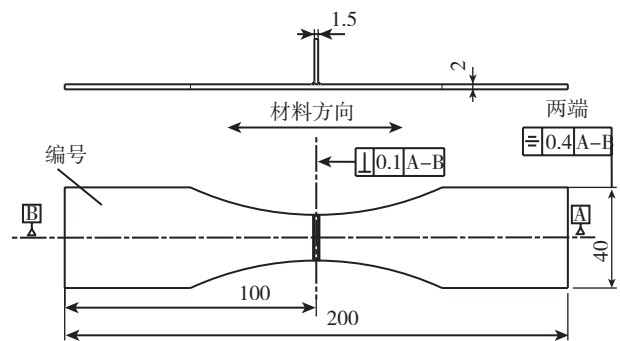


图6 拉伸试验件示意图
Fig.6 Tensile specimen

表3 TC4板材双激光束填丝角焊片静力试验

编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	α (°)	备注
1	1147.39	1036.70	6.23	133.6	断于焊缝
2	1138.06	866.41	5.67	133.3	断于焊缝
3	1144.82	930.30	6.97	130.9	断于焊缝
4	1152.82	943.51	6.97	/	断于焊缝
5	1138.83	976.23	8.40	/	断于焊缝
AVE	1144.38	950.63	6.85	132.6	/

109%,完全符合机身壁板使用要求。同时,132.6°的弯曲角度表明焊接接头有较强的抗弯曲和协调变形能力,能满足机身壁板的使用要求。

3 对比分析及工程应用

3.1 单激光束熔焊整体蒙皮

由于结构功能、热成形能力、热处理能力、材料规格等各种原因,机身壁板蒙皮不可避免的要分块设计制造,再分别装配到骨架构件上。为保证传力连续性,通常要将分块蒙皮连接起来。传统连接方式为带板铆接形式,如图7所示。从图中可看出,蒙皮表面存在铆钉头痕迹,对缝处存在0.5mm左右缝隙(考虑到材料伸缩性和装配精度),这导致壁板表面气动特性和隐身性能差。采用单激光束熔焊技术可实现钛合金蒙皮之间的无缝对接,如图8所示。从图中可看出,钛合金整体焊接壁板表面光滑,无对接间隙,气动性能和隐身性能极佳。

除此之外,相对于带板铆对接蒙皮,单激光束熔焊蒙皮零件数量少、重量轻。蒙皮和带板材料采用TC4,分别按照图7和图8制造相同尺寸的带板铆对接蒙皮和单激光束熔焊整体蒙皮,经计算得带板铆对接蒙皮试件重量为94.2g,单激光束熔焊整体蒙皮试件重量为62.6g,后者相对于前者减重33.5%。

单激光束熔焊在机身钛合金壁板上的应用存在的难点及解决方式有:

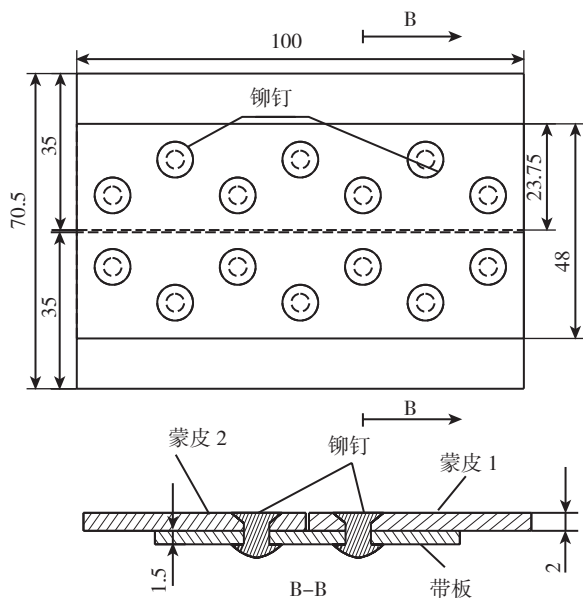


图7 带板铆接对接蒙皮试件
Fig.7 Tablet of panel connected with rivet

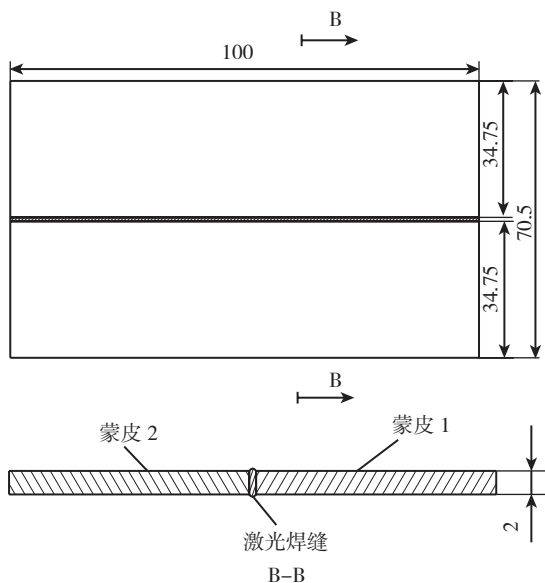


图8 单激光束熔焊整体蒙皮试件
Fig.8 Tablet of single laser fusion welding integrated panel

(1) 蒙皮具有单曲度、双曲度等多种形状,对缝呈曲线形式,难以实现高质量焊接。采用多自由度激光探头随蒙皮形状扫掠,焊接过程中严格控制焊接参数的稳定性和适应性,可以实现多种焊缝形状的焊接。

(2) 焊接的加热和冷却过程会导致机身壁板的变形,引起装配干涉或装配间隙,且无法满足机身气动要求。常用的消除焊接变形量方法是:在焊接过程中,用专用夹具固定住机身壁板蒙皮,初步抑制了焊接变形的萌生。然后在焊后热处理过程中,仍然采用专用热处理夹具将整个焊接试件固定,最终达到矫正焊接变形量的

目的,满足贴模度要求。

图9是单激光束熔焊整体蒙皮的工艺样件(局部),从图中可以看出焊缝均匀光滑,无损检测结果表明焊缝内无气孔、夹杂等缺陷,满足机身壁板使用要求。



图9 单激光束熔焊整体蒙皮工艺样件
Fig.9 Sample of single laser fusion welding integrated panel

3.2 双激光束填丝角焊整体壁板

机身壁板主要由蒙皮、普通框、长桁、带板和口盖口框等结构组成。长桁和普通框与蒙皮的传统连接方式主要有铆接和点焊两种,基于两种连接方式的壁板在蒙皮表面均存在不同程度的凸起或凹陷点,这大大降低了蒙皮的气动性能。

双激光束填丝角焊接整体壁板则不存在此问题,由于长桁和普通框直接焊接在蒙皮内表面,因此外表面光洁度很高。相对于铆接壁板而言,其连接件大幅减少,从而大大降低了因连接装配开孔对结构产生的削弱和初始缺陷。另外,由于角焊接方式的特殊性,长桁和普通框无需像传统铆接和点焊那样在与蒙皮连接的一侧带出连接翻边,因此焊接整体壁板重量更轻。

分别按照图10、11所示形式制造点焊壁板和双激光束填丝角焊接壁板试件,均采用TC4材料,其规格参数及重量见表4。从表4中可以计算得到,双激光束填丝角焊接整体壁板试件相对于点焊壁板试件减重了16%。

双激光束填丝角焊接技术在机身壁板上应用,所存在的难点有:

- (1) 机身壁板蒙皮有单曲度、双曲度等多种形状,焊缝形状复杂。
- (2) 长桁/普通框端面无法加工成双曲面,与蒙皮对缝处存在间隙。
- (3) 长桁/普通框带内弯边,不便于夹持。
- (4) 长桁/普通框形成双向加筋结构,变形量难以控制。
- (5) 起焊和终焊处10mm范围内激光器功率不稳

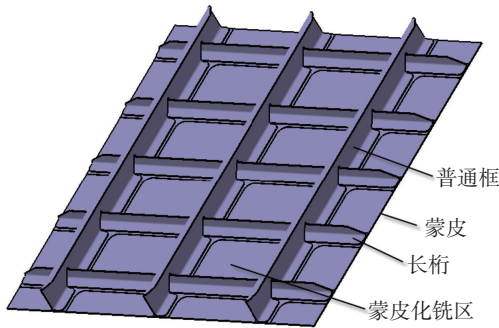


图10 点焊壁板试件

Fig.10 Tablet of resistance spot welding panel

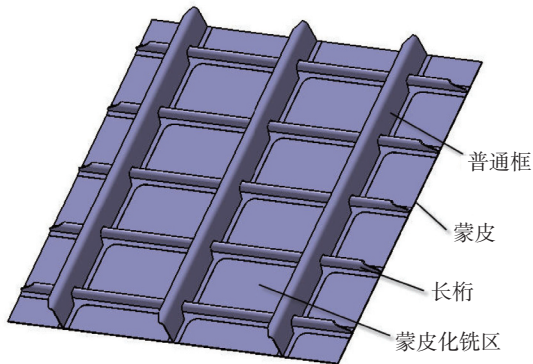


图11 双激光束填丝角焊整体壁板试件

Fig.11 Tablet of double laser fillet welding integrated panel

表4 点焊壁板试件和双激光束填丝角焊整体壁板试件重量对比表

零件名称	厚度 δ /mm	尺寸/mm		数量	总重量/kg	
		点焊	双激光束焊		点焊	双激光束焊
蒙皮	2.0	600×600	600×600	1	2.70	2.60
长桁	1.5	20	结构高 20	5	0.73	0.42
普通框	1.5	结构高 50	结构高 50	3	0.87	0.57
合计	/	/	/	/	8.96	6.41

定,常产生气孔,严重影响焊接接头力学性能。

针对以上难点,经理论分析与工艺试验,设计出了可随焊缝形状扫描的双激光器,通过实时控制送丝速率,弥补长桁/普通框端面与蒙皮不贴合的缺陷。巧妙设计出了适应长桁和普通框形状的夹具,以及焊接中、焊接后的夹具,保证其定位精度和焊接质量。分别在焊接过程中及热处理过程中采用专用高刚度夹具固定整体壁板,从而最大限度的纠正焊接变形量。在长桁两端通过点焊弱连接了引弧板,焊接时在引弧板上起焊和终焊,焊接完成后将引弧板连带其上的起焊或终焊焊缝段一起拆除,从而避免了气孔的存在。

在国际上,双激光束填丝角焊接技术已经在 A380 的铝合金壁板上得到了成功应用,焊接选用的材料为 AA6013 (蒙皮材料)/AA6056 (长桁材料)^[4-5]。在国内,双激光束填丝角焊接机体钛合金整体壁板已经有了初步研究和应用,其工艺样件如图 12 所示,无损检测结果表明该壁板无气孔、夹杂等内部缺陷,充分满足了机身壁板的使用要求。

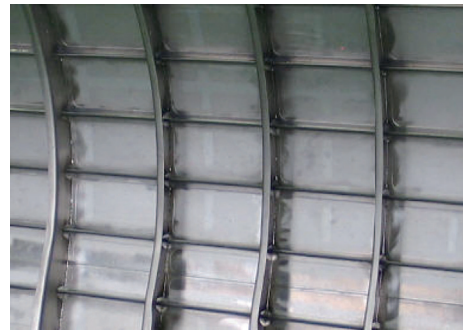


图12 激光焊接整体壁板样件

Fig.12 Sample of laser welding integrated panel

4 结论及展望

通过对单激光束熔焊焊接结构和双激光束填丝角焊焊接结构工艺原理、外观质量、内部质量和力学性能的研究,表明这两种激光焊接形式能够满足机身钛合金壁板的表面质量和力学性能要求。对比采用两种焊接技术的壁板样件与传统形式的壁板样件,结论显示焊接壁板均比传统形式重量轻、整体性好且可靠性高。工艺样件及其无损检测结果证明了上述结论,为实际工程应用奠定了基础。

但是上述研究还存在着不足,后续仍需针对双激光束填丝角焊接壁板中长桁和普通框对蒙皮的稳定性的影响程度、焊缝的疲劳性能、应用两种焊接技术的典型件的整体力学性能、激光焊接接头的疲劳裂纹扩展性能等方面开展一系列研究,以期对机体钛合金壁板激光焊接技术得到更加全面和深入的认知。

参考文献

- [1] 王家淳. 激光焊接技术的发展与展望. 激光技术, 2000, 25(1):48-54.
- [2] 陈俐, 巩水利. 铝合金激光焊接技术的应用与发展. 航空制造技术, 2011(11):46-49.
- [3] 王向明, 刘文珽. 飞机钛合金结构设计与应用. 北京: 国防工业出版社, 2010.11.
- [4] Xie J. Dual-beam laser welding. Welding Journal, 2001, 81:223-230.
- [5] Mendez P F, Eagar T W. Welding processes for aeronautics. Advanced Materials and Processes. 2001, 159(5): 39-43.

(责编 深蓝)