

焊接参数对 Ti-6Al-4V 合金双侧同步激光焊接 T 型接头缺陷的影响

马旭颐^{1,2} 巩水利² 张久兴¹ 杨 璟² 芦 伟²

¹北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124

²北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024

摘要 采用双侧同步填丝激光焊接的方法获得 Ti-6Al-4V 合金 T 型接头, 研究激光焊接参数对焊接缺陷如未熔合、气孔等的影响。试验结果表明: 未熔合缺陷的产生由激光功率、焊接速度、激光入射角度及入射位置等参数所决定, 足够大的焊接热输入(较高的激光功率, 较小的焊接速度), 较小的激光入射角度以及较高的激光辐照位置可以避免出现未熔合缺陷。激光功率一定时, 出现未熔合缺陷的焊缝在焊接过程中, 熔池上方等离子体/金属蒸气喷发量多于无此类缺陷的焊缝。不同焊接参数下 T 型接头焊缝中的气孔缺陷具有典型的小孔型气孔特征, 激光功率一定的情况下, 较高的焊接速度有利于减少此类气孔。

关键词 激光技术; Ti-6Al-4V 合金; 双侧激光焊接; T 型接头; 焊接参数; 缺陷

中图分类号 TG44

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0203006

Influence of the Welding Conditions on Weld Defects in Double-Sided Laser Beam Welded T-Joints of Ti-6Al-4V Alloy

Ma Xuyi^{1,2} Gong Shuili² Zhang Jiuxing¹ Yang Jing² Lu Wei²

¹College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

²Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China

Abstract The T-joints of Ti-6Al-4V alloy are fabricated by double-sided synchronized laser beam welding with the homologous filler wire. The influence of the welding conditions on weld defects such as lack of fusion and porosity are investigated. Results show that the lack of fusion defects are determined by the laser power, welding speed, laser incident angle and position. With larger enough welding heat input (higher laser power, and slower welding speed), the lower laser incident angle and higher laser incident position are required to avoid the lack of fusion defects. The quantity of plasma/metal vapor above the molten pool for weld seam with the lack of fusion defects is larger than that of the weld seam without the defects under a certain laser power. The porosity defects in the welded T-joints are mainly the type of keyhole porosity defects under different welding conditions, and the higher welding speed is helpful to decrease the porosity defects under a certain laser power.

Key words laser technique; Ti-6Al-4V alloy; double-sided laser beam welding; T-joints; welding parameter; defects

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 110.5200

1 引 言

薄壁结构作为一种常见结构被广泛应用于航空、航天等领域^[1-2]。出于减重考虑, 该类结构通常采用轻质合金如铝合金及钛合金等制造, 同时, 通过使用加强筋提高此类结构的强度和刚性^[3]。目前, 此类加强筋

收稿日期: 2015-09-29; 收到修改稿日期: 2015-10-19

作者简介: 马旭颐(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: maxuyi@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 巩水利(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高能束流加工方面的研究。E-mail: gongshuili@sina.com

构通常采用铆接或电阻点焊的方法加工。但是由于筋条弯边的存在,一方面增加了结构重量,另一方面铆接及点焊点处容易因为应力集中发生失效^[4]。近些年,随着对带筋薄壁结构减重及高可靠性的需求不断提高,激光焊接以其高效、低变形、与传统方法相比无需筋条弯边从而大幅减重等优点逐步应用于带筋薄壁结构的制造^[5-6]。

近年来,研究人员针对T型接头激光焊接技术做了许多工作^[7-9]。杨志斌等^[10]指出铝合金双侧激光同步焊接T型接头的焊缝表面成形质量与匹配的激光功率、焊接速度及送丝速度等参数密切相关,优化的焊接角度、光束入射位置及光束间距有助于提高接头的力学性能。Tao等^[11]研究了送丝工艺包括送丝位置、送丝方向以及送丝角度等对铝合金T型接头焊接过程的影响,研究表明,送丝采用液桥过渡模式、前送丝方式以及较小的送丝角度时气孔缺陷较少。祁俊峰等^[12]研究表明在满足焊缝熔透要求的情况下增加激光束的入射角度可以降低铝合金T型接头内部的气孔缺陷。这些研究表明,在T型接头双侧同步激光焊接中,由于结构及焊接方式的特殊性,对焊接参数的选择及控制等要求很高,稍有疏忽就会产生焊接缺陷,从而影响焊接质量。

然而,到目前为止,针对T型接头激光焊接过程中缺陷的产生原因及影响因素方面的研究工作很少,并且现有研究大多针对铝合金,有关钛合金的研究工作却鲜有报道。由于材料物理特性不同,钛合金与铝合金双光束激光焊接从焊接设备到工艺参数选取及其对缺陷的影响方面差别很大。本试验以钛合金带筋壁板双光束激光焊接技术开发为背景,针对Ti-6Al-4V合金T型结构进行了双侧同步激光填丝焊接。研究不同焊接参数如激光功率、焊接速度、激光入射角度及辐照位置等对Ti-6Al-4V合金T型接头未熔合、气孔等焊接缺陷的影响,为避免钛合金焊接过程中产生此类缺陷提供数据支持。

2 试验方法

筋条、蒙皮材料分别使用厚度为1.5 mm和2.0 mm的Ti-6Al-4V合金轧制板材,焊丝使用直径为1.0 mm的同质焊丝,其化学成分如表1所示。焊前先对试板进行机械打磨去除表面氧化膜,然后用弱酸和无水乙醇擦洗干净。试验设备为两台TRUMPF 3 kW Nd:YAG激光器及透射聚焦式焊接头,焦距为200 mm,焦斑直径为0.6 mm。焊接时,激光束于筋条两侧同步施焊,送丝方式为前送丝,如图1所示。一台Mega CMOS高速摄像机用于观察焊接过程中的熔池及等离子体/金属蒸气。焊接工艺参数及高速摄像参数如表2所示。本试验中改变一种焊接参数时,其他焊接参数保持不变。

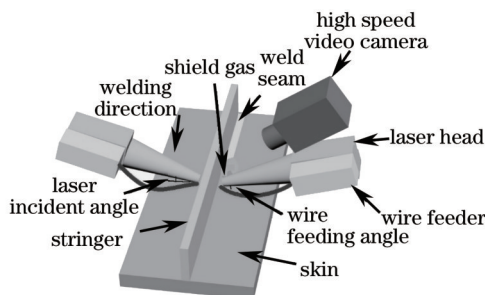


图1 双光束激光焊接系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the double-sided synchronized laser beams welding system

表1 Ti-6Al-4V合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V alloy (mass fraction, %)

Element	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
Skin	6.00	4.02	0.17	0.025	0.013	0.006	0.170	Bal.
Stringer	5.97	4.04	0.20	0.025	0.012	0.009	0.197	Bal.
Filler wire	6.23	4.02	0.05	0.009	0.010	0.002	0.080	Bal.

采用X射线无损探伤的方法测试焊缝内部质量,并对探伤底片进行拍照。利用线切割在垂直于焊接方向切取焊接接头试样,经打磨、抛光和腐蚀后制成金相试样。所用腐蚀剂体积比为HF:HNO₃:H₂O=1:1:48。在Leica DM6000M型光学显微镜下观察T型接头形貌及不同熔深处母材、热影响区和焊缝区的微观形

貌。利用 Image-Pro Plus (IPP) 图像处理软件对焊接接头横截面图片中的焊缝尺寸进行测量。

表2 焊接工艺参数及高速摄像参数

Table 2 Welding and high speed video camera parameters used in this experiment

Items	Parameters	Values
Welding process	Laser power /W	1400~2800
	Welding speed /(m·min ⁻¹)	3~12
	Wire feed rate /(m·min ⁻¹)	4
	Laser incident angle /(°)	30~50
	Wire feeding angle /(°)	45
	Shielding gas flow rate in coaxial /(L·min ⁻¹)	25
	Shielding gas flow rate in back /(L·min ⁻¹)	15
High speed video camera	Resolution /pixel	1280×500
	Frames per second /(frame/s)	2000

3 试验结果与讨论

3.1 激光焊接参数对未熔合缺陷的影响

3.1.1 激光功率对未熔合缺陷的影响

当焊接速度不变时,降低激光功率,即降低焊接热输入,研究此时激光功率变化对未熔合缺陷的影响。焊接速度为 10 m/min,激光功率变化时的接头形貌,如图 2 所示。从图中可以看出,当激光功率足够大时,筋条两侧熔池相连形成共同熔池。降低激光功率时,由于未能达到形成共同熔池所需的能量,两侧焊缝不能相连,出现未熔合缺陷。且随着激光功率的降低,未熔合的程度逐渐增大。图 3 所示为激光入射方向焊缝熔深及未熔合长度随激光功率改变的变化情况。可以看出,当激光功率小于 2600 W 时,出现未熔合缺陷,焊缝熔深随激光功率减小逐渐降低,而未熔合的尺寸则逐渐增大。因此,当激光入射角度及焊接速度一定时,未熔合缺陷与焊缝熔深线性相关,激光功率越大,熔深越大,越不容易出现未熔合缺陷,反之则易出现该种缺陷。

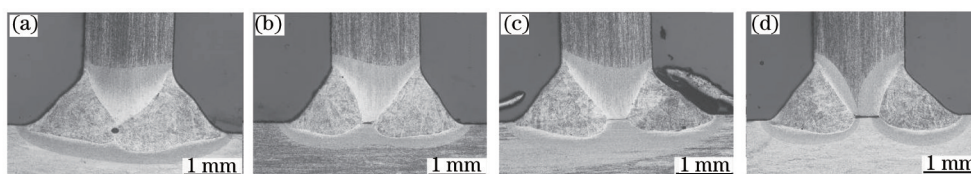


图2 焊接速度不变时,不同激光功率对 T 型接头未熔合缺陷的影响。(a) 2600 W; (b) 2400 W; (c) 2200 W; (d) 2000 W

Fig.2 Effect of laser power on lack of fusion defects of welded T-joints with same welding speed.

(a) 2600 W; (b) 2400 W; (c) 2200 W; (d) 2000 W

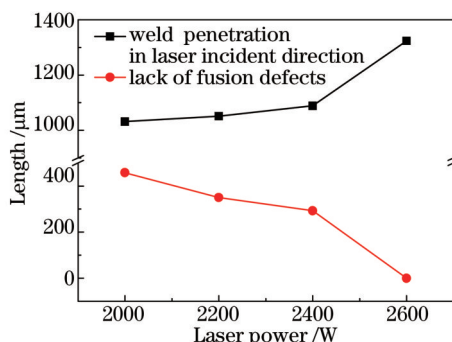


图3 焊缝尺寸随激光功率改变的变化情况

Fig.3 Sizes distribution with changing of laser power

3.1.2 焊接速度对未熔合缺陷的影响

图 4 为不同焊接速度对接头未熔合缺陷的影响。可以看出,当激光功率为 2800 W,提高焊接速度至 12 m/min 时,出现未熔合缺陷,此时的焊接热输入为 14 J/mm,与图 2(b)即焊接热输入为 14.4 J/mm 时的形貌

相似。当焊接功率降为 1400 W 时,如图 4(c)、(d)所示,不同焊接速度下的焊缝中均出现了未熔合缺陷,并且焊接速度增大未熔合尺寸也随之增大。虽然此时焊接热输入与激光功率为 2800 W 时相同,分别为 16.8 和 14 J/mm,但相比之下未熔合尺寸却有较大增幅。分析原因,一方面由于激光功率较小时,即能量密度较小时,激光的穿透能力较低;另一方面,由于焊接速度降低,单位面积填丝量增加,焊丝对激光能量的吸收增加,作用于接头的能量随之降低,使得更易出现未熔合缺陷,且未熔合尺寸增加。

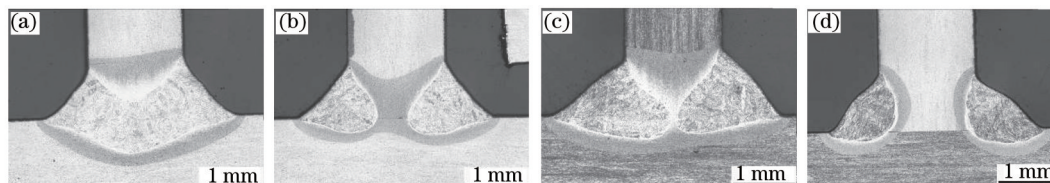


图 4 不同焊接速度对 T 型接头未熔合缺陷的影响。(a) 2800 W, 10 m/min; (b) 2800 W, 12 m/min; (c) 1400 W, 5 m/min; (d) 1400 W, 6 m/min

Fig.4 Effect of welding speed on lack of fusion defects of welded T-joints. (a) 2800 W, 10 m/min; (b) 2800 W, 12 m/min; (c) 1400 W, 5 m/min, and (d) 1400 W, 6 m/min

为了进一步分析焊接速度变化对接头未熔合缺陷的影响过程,本试验采用高速摄像监测了焊接过程中熔池、等离子体/金属蒸气等随焊接速度的变化情况,如图 5 所示。可以看出,图 5(a)焊接过程中熔池上方等离子体/金属蒸气喷发量较小,随着焊接速度的增大,等离子体/金属蒸气喷发量随之增加。同时,当焊接功率为 1400 W 时,与 2800 W 对应相同热输入的接头焊接过程中等离子体/金属蒸气分布规律也基本相同,如图 5(c)和(d)所示。而当等离子体/金属蒸气喷发量较大时,均出现了未熔合缺陷。分析原因,当深熔焊接时,材料剧烈气化,高温蒸气产生的膨胀压力将液态金属排开,形成小孔,等离子体/金属蒸气向外喷发^[13]。T 型接头双光束激光焊接属于未熔透焊接,当焊接速度较高时,焊接热输入较低,小孔深度较小,产生的等离子体/金属蒸气向外喷发阻力较小,且与试样表面距离较短,此时熔池上方的等离子体/金属蒸气喷发量较大。而当焊接速度降低时,焊接热输入增加,小孔深度增大,孔内等离子体/金属蒸气向外喷出时所受的阻力增加,喷发距离也随之增加,使得熔池上方等离子体/金属蒸气喷发量降低。因此,T 型接头双光束激光焊接过程中,激光功率一定时,焊接速度越大,熔深越小,容易出现未熔合缺陷,而此时熔池上方等离子体/金属蒸气喷发量相比无此类缺陷的焊缝有所增加。

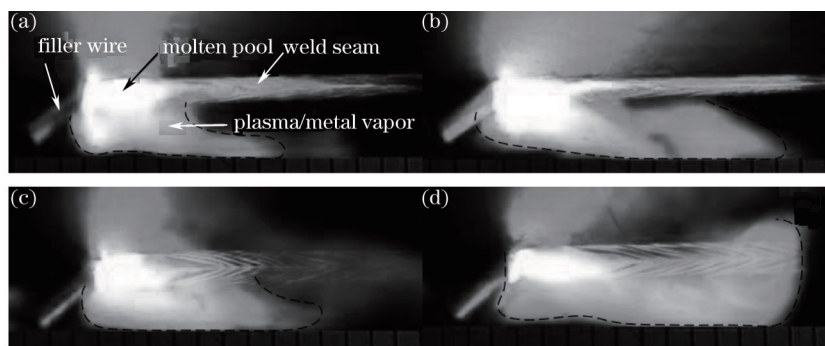


图 5 不同焊接速度下焊接过程高速摄像照片。(a) 2800 W, 10 m/min; (b) 2800 W, 12 m/min; (c) 1400 W, 5 m/min; (d) 1400 W, 6 m/min

Fig.5 Photographs of the welding process with different welding speeds: (a) 2800 W, 10 m/min; (b) 2800 W, 12 m/min; (c) 1400 W, 5 m/min, and (d) 1400 W, 6 m/min

3.1.3 激光入射方式对未熔合缺陷的影响

激光入射方式如激光入射角,激光辐照位置的改变同样能够导致接头未熔合缺陷的产生。图 6(a)、(b)为激光入射角为 40°及 50°时的接头截面形貌。可以看出,随着激光入射角的增加,T 型接头的焊缝熔深有所增加,虽然筋条两侧焊缝相连,但由于焊缝熔宽较小,在筋条中心位置出现了未熔合缺陷,并且未熔合尺寸随激光入射角的增加而增大。图 6(c)为激光辐照位置对未熔合缺陷的影响。如图所示,一侧激光束以正常位置入射,即蒙皮与筋条之间,另一侧激光束则偏离筋条,靠近蒙皮侧入射,偏移量为 0.6 mm,此时,在焊缝熔宽和熔深不变的情况下,焊缝的偏移使其远离筋条,容易出现未熔合缺陷。

综上所述,T型接头未熔合缺陷的产生与激光功率、焊接速度、激光入射角及辐照位置有关。为了避免出现未熔合缺陷,需要足够大的激光焊接热输入(较高的激光功率,较低的焊接速度)、较小的激光入射角度以及较高的激光辐照位置。

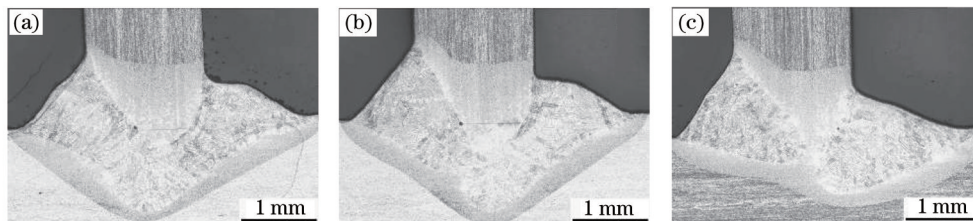


图6 激光入射方式对T型接头未熔合缺陷的影响:(a) 激光入射角为40°;(b) 激光入射角为50°;(c) 激光向蒙皮侧偏移0.6 mm

Fig.6 Effect of welding conditions on lack of fusion defects of welded T-joints: (a) 40° as the laser incident angle;

(b) 50° as the laser incident angle, and (c) 0.6 mm as the offset to the skin of the laser incident position

3.2 激光焊接参数对气孔缺陷的影响

图7所示为不同焊接参数焊缝中气孔的形貌及分布情况。可以看出,气孔多位于T型接头焊缝的中部或底部,单侧斜焊缝的根部,与平板未熔透焊缝中气孔的位置类似^[14]。从气孔的局部放大图[图7(d)]中可以看出,气孔呈不规则形状,为典型的小孔型气孔形貌^[15]。不同焊接参数下相同长度的焊缝沿焊接方向气孔分布情况及焊缝中气孔的数量如表3所示。从表中可以看出,当激光功率为2800 W,焊接速度大于等于8 m/min时,能够获得无可视气孔的焊缝。当焊接速度降低至6 m/min时,焊缝中的气孔数量显著增加。而当激光功率为1400 W,焊接速度小于4 m/min时,焊缝中均出现了气孔缺陷,并且气孔数量随焊接速度的增大而增加,同时,与激光功率为2800 W相同热输入的焊缝相比,气孔数量也有一定程度的增加。因此,对于钛合金双光束激光焊接T型接头而言,在不考虑未熔合缺陷的情况下,较高的焊接速度有利于消除气孔缺陷,即当激光功率为2800 W时,焊接速度不低于8 m/min;当激光功率为1400 W时,焊接速度大于4 m/min。

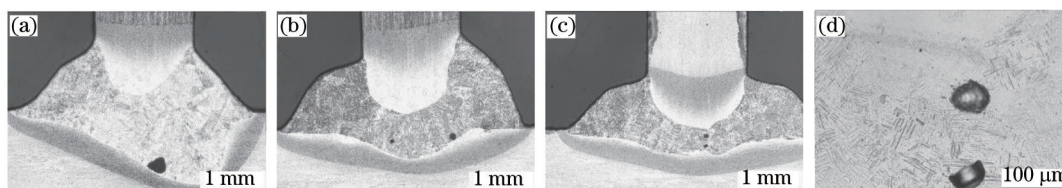


图7 不同焊接参数下焊缝中气孔的形貌:(a) 2800 W, 6 m/min;(b) 1400 W, 3 m/min;(c) 1400 W, 4 m/min;(d)图(c)中气孔局部放大

Fig.7 Morphology of porosity defects under different welding conditions: (a) 2800 W, 6 m/min, (b) 1400 W, 3 m/min,

(c) 1400 W, 4 m/min, and (d) magnified porosity defects in picture (c)

表3 不同焊接参数下气孔缺陷的分布和数量

Table 3 Distribution and quantities of porosity defects under different welding conditions

Welding conditions	Distribution of porosity defects by X-ray inspection	Quantities of porosity
2800 W, 6 m/min		8
2800 W, 8 m/min		0
2800 W, 10 m/min		0
1400 W, 3 m/min		13
1400 W, 4 m/min		10
1400 W, 5 m/min		0

已有研究表明,对于平板未熔透激光深熔焊接接头,小孔型气孔缺陷的产生与焊接速度密切相关,焊接速度较慢时,由于热输入较大,小孔壁的局部强烈蒸发产生凹陷或小孔底部失稳坍塌,形成与小孔分离的封闭空间,从而产生气孔^[16]。而对于T型接头焊缝,除了焊接速度的影响以外,由于两侧熔池与水平方向呈一定夹角,使得液态熔池金属的受力状态与平板对接焊相比更容易使小孔塌陷闭合,产生气孔^[12]。另外,焊接过程中产生的气泡由于筋条的阻隔很难从正上方逸出,虽然同步焊接时联合熔池的形成使得气泡能够从两侧逸出,但当焊接速度较小,热输入较大时,焊缝的熔深较大,此时由于逸出距离增加,气泡来不及逸出,容易产生气孔。

4 结 论

1) 对于指定尺寸的钛合金双光束激光焊接T型接头而言,激光入射角度一定时,焊接速度保持10 m/min不变,激光功率小于2600 W时,会出现未熔合缺陷;而当激光功率保持2800 W,焊接速度大于等于12 m/min时,或者当激光功率为1400 W,焊接速度大于5 m/min时,同样会出现未熔合缺陷。

2) 当激光功率一定时,出现未熔合缺陷的焊缝在焊接过程中,熔池上方等离子体/金属蒸气喷发量多于无此类缺陷的焊缝。

3) 对于常规焊接参数下无未熔合缺陷的T型接头焊缝,增大激光入射角度或者增加激光向蒙皮侧的偏移量也会出现未熔合缺陷。

4) 不同焊接参数下T型接头焊缝中的气孔缺陷具有典型的小孔型气孔特征,在不考虑未熔合缺陷的情况下,较高的焊接速度有利于消除气孔缺陷,即当激光功率为2800 W时,焊接速度不低于8 m/min,当激光功率为1400 W时,焊接速度大于4 m/min。

致谢 感谢北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室的大力支持。

参 考 文 献

- 1 Leyens C, Peters M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications[M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag Gmb H & Co K Ga A, 2005.
- 2 Schubert E, Klassen M, Zerner I, *et al.*. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry[J]. J Mater Process Tech, 2001, 115(1): 2-8.
- 3 Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Mater Sci Eng A, 1996, 213(1): 103-114.
- 4 Briskham P, Blundell N, Han L, *et al.*. Comparison of Self-Pierce Riveting, Resistance Spot Welding and Spot Friction Joining for Aluminium Automotive Sheet[R]. Warrendale, PA: SAE International, 2006.
- 5 Dittrich D, Brenner B, Winderlich B, *et al.*. Progress in laser beam welding of aircraft fuselage panels[C]. Temecula, USA: 2008.
- 6 Schumacher J, Zerner I, Neye G, *et al.*. Laser beam welding of aircraft fuselage panels[C]. Scottsdale, USA: 2002.
- 7 Chen Yanbin, Yang Zhibin, Tao Wang, *et al.*. Microstructure characteristics and mechanical properties of double-sided laser beam welded aluminum alloy T-joint[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503009.
陈彦宾, 杨志斌, 陶 汪, 等. 铝合金T型接头双侧激光同步焊接组织的特征及力学性能[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503009.
- 8 Chu Zhentao, Yu Zhishui, Zhang Peilei, *et al.*. Weld profile prediction and process parameters optimization of T-joints of laser full penetration welding via response surface methodology[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203006.
褚振涛, 于治水, 张培磊, 等. 基于响应面分析的T型接头激光深熔焊缝形貌预测及工艺参数优化[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203006.
- 9 Li K, Lu F, Cui H, *et al.*. Investigation on the effects of shielding gas on porosity in fiber laser welding of T-joint steels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(9): 1881-1888.
- 10 Yang Z B, Tao W, Li L Q, *et al.*. Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Process, microstructure, and mechanical properties[J]. Mater Design, 2012, 33: 652-658.
- 11 Tao W, Yang Z B, Chen Y B, *et al.*. Double-sided fiber laser beam welding process of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects[J]. Opt Laser Technol, 2013, 52: 1-9.
- 12 Qi Junfeng, Niu Zhen, Zhang Dongyun, *et al.*. Control of shaping of welds for CO₂ laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy

- [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 297-302.
祁俊峰, 牛 振, 张冬云, 等. CO₂激光焊接船用铝合金 T 型材的焊缝成形控制[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 297-302.
- 13 Duan A Q, Chen L. The influence of parameters on characteristic of the molten pool during laser welding of TA15[C]. Orlando, F L, United states, 2009.
- 14 Gong Shuili, Yao Wei, Shi Steve. Porosity formation mechanisms and controlling technique for laser penetration welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, (1): 60-62.
巩水利, 姚 伟, Shi Steve. 铝合金激光深熔焊气孔形成机理与控制技术[J]. 焊接学报, 2009, (1): 60-62.
- 15 Wang Zeming, Wang Jun, Tang Bin, *et al.*. Effect of welding processing parameters on porosity formation and prevention mechanism analysis of zircaloy sheet by YAG laser welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, (11): 2782-2786.
王泽明, 王 军, 唐 彬, 等. 焊接工艺参数对锆合金薄板 YAG 激光焊接气孔形成的影响及控制机理分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, (11): 2782-2786.
- 16 Chen Wuzhu. Quality Control of Laser Welding and Cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

栏目编辑: 张浩佳