

应用脉冲式 Nd:YAG 激光焊接心脏辅助装置

樊 宇^{1,2} 田文腾¹ 李宗佩³ 孙 智¹ 张翀昊⁴ 徐 杰¹

¹中国矿业大学材料科学与工程学院, 江苏 徐州 221008

²诺丁汉大学工程学部, 英国, 诺丁汉 NG72RD

³苏州天沃科技股份有限公司, 江苏 苏州 215636

⁴江苏和昊激光装备有限公司, 江苏 苏州 215636

摘要 左心室辅助装置(LVAD)被成功应用于心脏移植过渡治疗方法,缓解末期心脏病人的痛苦。Ti6Al4V 合金由于其优越的抗腐蚀性及生物适应性被作为 LVAD 叶轮外永久性密封包装的材料。由于受到整体装置尺寸及重量的限制,材料厚度仅为 0.5~0.7 mm。激光焊接技术由于其较高的束流质量、较低的热量输入和较大的熔深熔宽比,最终被用作该材料最后的密封焊接工艺。主要介绍脉冲式掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光焊接技术在国外先进的第三代某品牌左心室心脏辅助装置密封焊接中的应用与研究。实验结果表明,经焊接工艺实验最终选定的主要激光焊接工艺参数如下:峰值功率 414 W,焊接速度 360 mm·min⁻¹,覆盖率 70%。焊接接头沿焊缝方向均一稳定,焊缝成型良好,热影响区窄,焊接接头焊缝与原始母材的力学性能差别不大,未发现气孔、夹杂及裂纹等缺陷。

关键词 激光光学; 焊接; 左心室心脏辅助装置; 脉冲激光焊; Ti6Al4V

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s214012

Third-Generation Left Ventricular Assist Device in Pulsed Nd:YAG Laser Welding

Fan Yu^{1,2} Tian Wenteng¹ Li Zongpei³ Sun Zhi¹ Zhang Chonghao⁴ Xu Jie¹

¹School of Material Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China

²Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham NG72RD, UK

³Suzhou THVOW Technology Co., Ltd, Suzhou, Jiangsu 215636, China

⁴Jiangsu Hehao Laser Technology Co., Ltd, Suzhou, Jiangsu 215636, China

Abstract Left ventricular assist device (LVAD) is a successful and useful treatment method for end-stage heart failure. An important part-hydrodynamically suspended impeller exposed to corrosive conditions, is required to be sealed hermetically into micro packages. Laser beam welded Ti6Al4V alloy is adopted in anti-corrosion micro packages for the LVAD impeller. Thin and narrow welds are required for such medical equipments. Pulsed Nd:YAG welding is successfully adopted as sealing method for the impeller. The experimental results show that peak power of 414 W, welding speed of 360 mm·min⁻¹, and overlap of 70% are the final selection of the main laser welding process parameters. Welded joints along the direction of welding line are uniform and stable, the welding line is good, and the heat-affected zone is narrow. There is little difference between welded joints and base metal in terms of mechanical properties. Porosity, inclusions, cracks and other defects are not found.

Key words laser optics; welding; left ventricular assist device; pulsed Nd:YAG laser welding; Ti6Al4V

OCIS codes 140.3390; 140.3580; 160.3900

1 引 言

不管是在发达国家还是发展中国家,心脏衰竭都是引发死亡的重要原因。据调查,仅英国就有 901500

收稿日期: 2015-03-17; 收到修改稿日期: 2015-04-07

基金项目: 中央高校基本科研基金(2014QNA09)、江苏省产学研前瞻性研究基金(BY2015023-02)

作者简介: 樊宇(1983-),男,博士,讲师,主要从事激光成形技术工艺与装备等方面的研究。E-mail: fanyu@cumt.edu.cn

例心脏衰竭患者,而且这个数字在以每年 65000 例的速度递增。据英国心脏基金会的评估,仅英国每年投入用于心衰的相关费用已高达 625 万英镑^[1]。在一些亚洲国家,如中国、印度、印度尼西亚,心血管疾病已经变成导致死亡的头号杀手。在中国城区中,由冠心病引发心血管疾病导致死亡的死亡率已经从 1957 年的 86/100000(占死亡总数的 12.1%)增加到 1990 年的 214/100000(占死亡总数的 35.8%)。以上数据基于相对稳定的人口增长速度(超过 65 岁的老年人口比例从 1953 年的 4.4%增长到 1990 年的 5.6%)。综上所述,缓慢增长的老年人口比例和迅速增长的死亡比例显示了心血管疾病增长的严峻性和普遍性。一般来讲,心衰在医药方面的处理包括受体阻滞剂^[2],利尿剂^[3],乙酰胆碱^[4],血管扩张^[5]等。但是由于较为落后的医学治疗手段和不准确的长期预测,还是有很多患者忍受着心脏疾病带来的健康危害。对于末期心衰病人的医疗手段十分有限,心脏移植仍旧是最好的选择。但是,患者和捐赠者之间的细胞排斥依旧难以精确预测。

对于末期心衰病人的另一种治疗手段是左心室心脏辅助装置(LVAD)配合其他治疗手段,最终实现治愈心衰^[6-7]。该装置的核心部件为流体动力悬浮叶轮,是一个无轴的转子,如图 1 所示。由于人体血液是极其良好的腐蚀环境,而悬浮叶轮在工作过程中,又暴露于人体血液中,因此需要被抗腐蚀性材料密封包裹。

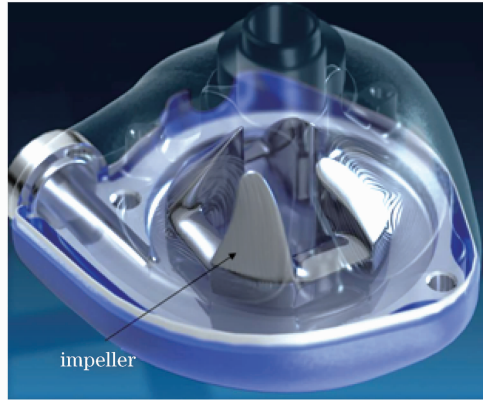


图 1 左心室辅助装置中的流体动力悬浮叶轮^[8]

Fig. 1 Hydrodynamic suspended impeller of left ventricular assist device^[8]

Ti6Al4V 合金由于其卓越的抗腐蚀能力、较高的强度重量以及完美的生物适应性,被用于密封包装材料。相对于材料的选择,包裹密封焊接工艺的选择则需考虑更多的因素。作为植入人体的物体,左心室心脏辅助装置受到整体装置尺寸及重量的限制,因而叶轮外永久性密封包装材料的厚度仅为 0.5~0.7 mm。因此,该密封焊接工艺属于超薄板材料的焊接。此时焊接所要面临的并不是穿透率的问题,而是如何以最小的热输入,在最短的时间内完成焊接。否则将出现焊接板材的弯曲变形。其次,悬浮叶轮的材料为脆弱的磁性材料,焊接能量的控制极为重要。若焊接能量过大,将导致焊穿或焊塌,进一步损坏悬浮叶轮;若焊接时间过长,高温可能导致磁性材料去磁。

图 2 为流体动力悬浮叶轮单个叶片密封焊接示意图。对于此类超薄板密封焊接工艺,除了采用作为高能束流焊之一的激光焊之外,还有电子束焊^[9]和钨极惰性气体保护焊^[10]。电子焊拥有与激光焊类似的特征,可用于一般超薄板密封焊接。但是由于在左心室心脏辅助装置中,悬浮叶轮为磁力材料,会导致电子束

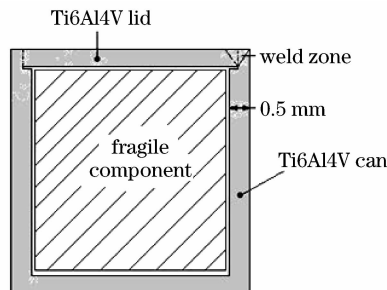


图 2 悬浮叶轮单个叶片密封焊接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of suspended impeller single leaf in seal welding^[11]

的偏折。而钨极惰性气体保护焊虽可进行密封焊接,但会产生较高的热输入及较宽的热影响区,有可能导致悬浮叶轮的损坏。最终,激光焊接技术被选择作为流体动力悬浮叶轮的密封焊接工艺。

激光可以产生非常高的能量密度,从而导致激光焊成为小孔型焊接^[12]。小孔型焊接拥有诸多优点,在其优点中,较高的束流质量、较低的热量输入和较大的熔深熔宽比^[13],满足流体动力悬浮叶轮密封焊接的要求。脉冲式掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器作为一种传统的固体激光器,可以提供 500 W 的功率^[14]。而脉冲式焊接可比连续焊提供更多的调控参数。本文主要介绍脉冲式 Nd:YAG 激光焊在左心室辅助装置流体动力悬浮叶轮的密封焊接中的应用与研究。

2 实验过程

焊接母材为 0.7 mm 厚 Ti6Al4V 合金板材(Timet UK Limited,英国)。母材化学成分如表 1 所示。原始板材被加工成为焊接前样件,尺寸为 60 mm×25 mm×0.7 mm,样件边缘与表面被加工成为 90°直角。在焊接前组装后,两块样件间间距控制在 0.005 mm 以内。

表 1 实验用 Ti6Al4V 的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical constituents of Ti6Al4V(mass fraction, %)

Ti	Al	V	C	Fe	O	N	H	Y
Bal.	6.5	4.0	0.006	0.17	0.156	0.007	0.0005	<0.005

激光焊接设备采用 JK702H GSI 脉冲 Nd:YAG 激光焊接机(CSI Lumonics,英国)。激光焊接工艺实验首先以平面堆积焊的方式进行,平面堆积焊主要以获取要求的熔透率(100%熔透)和焊接接头外观(无气孔、裂纹、凹坑、氧化色等明显缺陷)为主要参考依据。其具体过程如下:选取一组焊接工艺参数(包括能量、脉宽、峰值功率、焊接速度、覆盖率、频率、光斑直径、离焦量、保护气流量等)进行平面堆积焊,该组工艺参数的选取主要依据和参照为类似钛合金材料及厚度的历史焊接经验。保持其他参数不变,仅改变其中一个参数,进行堆焊实验并测量和记录熔透情况和焊接接头外观。选取最佳工艺参数窗口,并在其中选取刚好 100%熔透及符合要求的焊接接头外观形貌的最低线性热输入激光焊接工艺参数。最终确定的激光焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 Nd:YAG 激光焊工艺参数
Table 2 Parameters employed for pulsed Nd:YAG laser welding

Power	Pulse width	Peak power	Welding speed	Overlap	Frequency	Spot diameter
/J	/ms	/W	/(mm·min ⁻¹)	/%	/Hz	/μm
2.9	7	414	360	70	20	300

焊接完成后,焊接质量评估主要通过以下手段:采用 Philips XL30 扫描电子显微镜(SEM)及 X 射线能谱仪(EDS)(FEI,美国)、Nikon/Optiphot 光学显微镜(尼康,日本)和 3D 轮廓图像(Instron,英国)检测焊接接头的合金元素分布情况及微观组织结构,物镜的放大倍数为 5~40。采用 Instron 5569 万能测试仪(Instron,英国)分别检测母材与焊接接头的力学性能。

3 实验结果与讨论

3.1 母材微观组织与元素分布

图 3 为 0.7 mm 厚 Ti6Al4V 母材微观组织,结合 EDS 能谱元素分析结果发现,Ti6Al4V 母材微观组织以等轴晶为主,且三种主要元素(钛、铝、钒)的含量基本符合标准,分别为 91.06%、5.57%和 3.38%。其中白亮区域以 β 钛为主,钒含量猛增为 12.0%(质量分数),而铝含量下降到 3.3%(质量分数);灰暗色区域以 α 钛为主,铝含量增加为 6.1%(质量分数),而钒含量下降到 2.8%(质量分数),如表 3 所示。

3.2 焊接接头微观组织

图 4 为脉冲式 Nd:YAG 焊接接头横截面形貌图。根据晶相组织不同,将焊接接头分为焊缝区(FZ)、热影响区(HAZ)与母材区(PM)。焊缝上部宽度大约为 0.94 mm。热影响区相对狭窄,宽度大约为 0.25 mm。Nd:YAG 焊接接头在焊缝中部、上部和下部均出现凹槽。

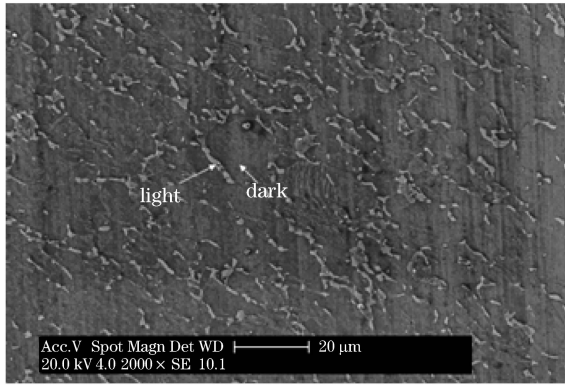


图 3 母材 Ti6Al4V 的 SEM 图像

Fig. 3 SEM image of parent material as-received Ti6Al4V

表 3 Ti6Al4V 元素分布情况

Table 3 Element distribution in parent material as-received Ti6Al4V

Position	Element	Content (mass fraction) / %
Overall view	Al	5.57
	Ti	91.05
	V	3.38
Dark area	Al	6.09
	Ti	91.14
	V	2.77
Light area	Al	3.34
	Ti	84.62
	V	12.04

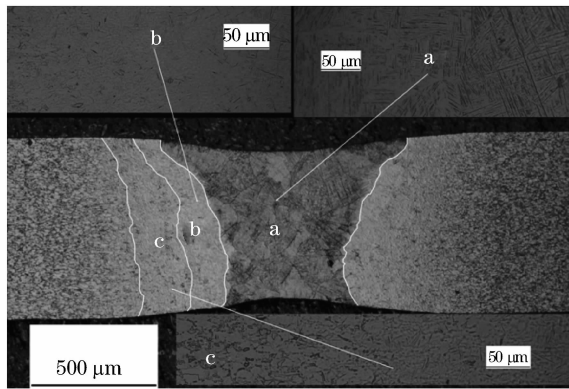


图 4 脉冲式 Nd:YAG 焊接接头横截面形貌图。a:焊缝;b:热影响区;c:热影响区与母材的过渡区间

Fig. 4 Microstructure of Nd:YAG welded Ti6Al4V. a: FZ; b: HAZ; c: boundary of HAZ/PM

国内外学者对 Ti6Al4V 钛合金的激光焊接接头组织做了许多研究。樊宇等^[11,15-17]对 0.7 mm 的 Ti6Al4V 钛合金进行激光焊。研究表明, Ti6Al4V 钛合金母材组织是由等轴的 α 和晶间分布的 β 两相组织组成, 晶粒尺寸细小。焊缝为针状马氏体组成的网篮组织, 粗大的 β 柱状晶边界十分明显图(图 4a)。焊后熔合区 β 相区快速冷却过程中, β 相来不及通过扩散转变成平衡的 α 相, 而是通过 β 相中原子作集体有规律的近程迁移而实现切变相变, 形成针状马氏体相(图 4b 右半部分)。焊缝中主要形成 α' 相, 焊缝中针状 α' 马氏体在 β 柱状晶晶粒边界和晶粒内部同时形核长大, 首先形成一根或若干根相互平行的一次 α' , 并在长距离内扩展贯穿整个晶界, 分割为转变的 β 相, 接着形成一系列相对细小的二次针状 α' , 导致焊缝形成典型的网篮状马氏体组织^[17]。这种网篮状组织的塑性、蠕变抗力及高温持久强度等综合性能都较好^[15]。

热影响区由初生的 α 相和针状马氏体组成(图 4b 左半部分), 这种组织与 720 °C ~ 980 °C 下淬火的组织相似。由于热影响区的最高加热温度低, 大都在 β 相转变温度之下, 且受熔合区传热的影响, 冷却速度比焊缝低,

因此该区域的针状马氏体相较焊缝少且更细小。焊接过程中由于温度梯度的存在造成热影响区组织分布不均匀,靠近熔合线的热影响区较远离熔合线的热影响区晶粒更为粗大,针状马氏体数量多且更密集(图 4b,c)。还有研究表明,焊缝冷却后的组织还与合金中 β 相的稳定元素(V、Mo、Fe 等)有关^[18]; β 相稳定元素含量较少时, β 相会直接转化为密排六方结构的 α' 马氏体,相反,如果 β 相稳定元素含量较高,晶格转变阻力变大,则会转变为斜方马氏体 α'' ^[19],当焊缝中这种斜方马氏体数量增多时,将会使焊缝的强度、硬度下降^[20]。

3.3 焊接接头力学性能

图 5 为脉冲式 Nd:YAG 焊接接头的 3D 轮廓图像分析图。通过 3D 轮廓图可以得知,焊接接头形貌沿焊接方向保持均一,因此,可以用 2D 截面图来表征 3D 形貌图。

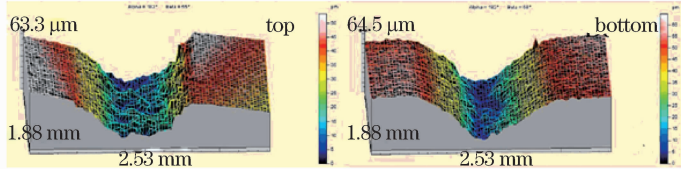


图 5 脉冲式 Nd:YAG 焊接接头的 3D 轮廓图像分析图。Top 为上表面, bottom 为下表面

Fig. 5 3D profiled image of welded joint in pulsed Nd:YAG laser welding. Top is upper surface, bottom is lower surface

图 6 为焊接接头拉伸实验后断面的横截面。可以发现断裂面处于焊缝区,因此,拉伸实验数据表征的是焊缝的力学性能。图 7 所示曲线为焊缝拉伸性能曲线。

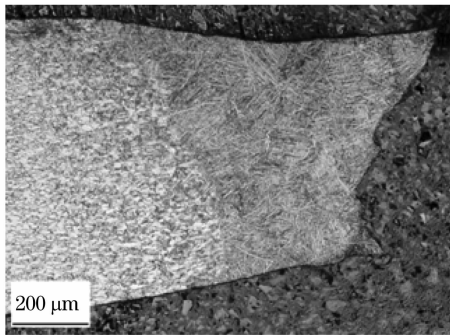


图 6 焊接接头拉伸实验后断面的横截面

Fig. 6 Section of cross section after tensile and compression test

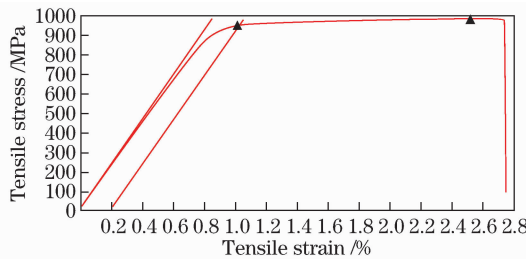


图 7 脉冲式 Nd:YAG 焊缝拉伸曲线

Fig. 7 Tensile curves of welding line in pulsed Nd:YAG laser welding

表 4 所示为焊缝与原始母材的力学性能。通过比较可以看出,杨氏模量与 0.2% 拉伸应力的变化不大。差别主要在于最大拉伸应力,焊缝最大拉伸强度比原始材料降低了 65 MPa,降幅为 6.5%。

表 4 脉冲式 Nd:YAG 焊缝与原始母材的力学性能比较

Table 4 Comparison between welding line in pulsed Nd:YAG laser welding and base metal in terms of mechanical properties

Weld Type	Young's modulus/	Tensile stress at yield (0.2%)/	
	GPa	MPa	
		Tensile stress at maximum load/	
		MPa	
Weld	113.0±1.5	963.3±21.7	989.4±34.6
Base metal	111.0±3.1	978.2±15.3	1054±4.3

4 结 论

脉冲式 Nd:YAG 激光焊接工艺被成功应用于左心室辅助装置中流体动力悬浮叶轮的密封焊接中。焊接 0.7 mm 厚 Ti6Al4V 超薄板材时,主要激光焊接工艺参数包括:能量 2.9 J,脉宽 7 ms,峰值功率 414 W,焊接速度 360 mm·min⁻¹,覆盖率 70%,频率 20 Hz,光斑直径 300 μm。微观组织显示焊接接头沿焊缝方向均一稳定,焊缝成型良好,热影响区窄(小于 300 μm),焊接接头焊缝与原始母材的力学性能差别不大(0.2%拉伸应力约为 970 MPa 左右)。未发现气孔、凹坑、夹杂及裂纹等缺陷。

参 考 文 献

- 1 S Petersen, M Rayner, J Wolstenholme. Coronary heart disease statistics; Heart failure supplement [R]. British Heart Foundation, London, 2002.
- 2 Huang Wenyan, Sun Ming. Mechanism of beta receptor blockade treatment congestive heart failure [J]. Journal of Clinical Cardiology, 2002, 18(3): 136-138.
黄文艳,孙明. beta 受体阻滞剂治疗充血性心力衰竭的机制[J]. 临床心血管病杂志, 2002, 18(3): 136-138.
- 3 Liu Zhiquan. Foundation of treatment congestive heart failure; Diuretic [J]. Chinese Journal of Cardiology, 2002, 30(5): 319-320.
刘治全. 心力衰竭治疗的基石:利尿剂[J]. 中华心血管病杂志, 2002, 30(5): 319-320.
- 4 Zhang Changwei. Study of the Effects of Acetylcholine on Human Atrial Myocardium Electrophysiological Characteristics and the Mechanism of the Desensitization Phenomenon [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
张昌伟. 乙酰胆碱对离体人心房肌电生理特性的影响及其脱敏机制研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2008.
- 5 Xu Qun. Application of the principles and experience for vasodilators in congestive heart failure [J]. Chinese Journal of Internal Medicine, 1994, 14(2): 70-72.
许群. 心力衰竭时血管扩张剂应用的原则与经验[J]. 中国实用内科杂志, 1994, 14(2): 70-72.
- 6 F D Pagani, K D Aaronson, F Swaniker, *et al.*. The use of extracorporeal life support in adult patients with primary cardiac failure as a bridge to implantable left ventricular assist device [J]. Annals of Thoracic Surgery, 2001, 71(3 Suppl): S77-S81.
- 7 G Tansley. Complete Passive Suspension of the VentrAssist Rotary Blood Pump [D]. Sydney: University of Technology, 2000.
- 8 G Tansley, S Vidakovic, J Reizes. Fluid dynamic characteristics of the VentrAssist rotary blood pump [J]. Artificial Organs, 2000, 24(6): 483-487.
- 9 R Sun, R Karppi. The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: An overview [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 59: 257-267.
- 10 E Bayraktar, J Moiron, D Kaplan. Effect of welding conditions on the formability characteristics of thin sheet steels; Mechanical and metallurgical effects [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 175(1-3): 20-26.
- 11 Y Fan. The application of laser welding on left ventricular assist device (LVAD) [C]. Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2011.
- 12 A B Short. Gas tungsten arc welding $\alpha+\beta$ titanium alloy; A review [J]. Material Science and Technology, 2009, 25(3): 309-324.
- 13 S E Anthony. Laser [M]. Palo Alto: Mill Valley, 1986.
- 14 American Welding Society. Recommended practices for laser beam welding, cutting, and drilling [S]. AWS/ANSI, 1998.
- 15 Y Fan, P H Shipway, G D Tansley, *et al.*. The effect of heat treatment on mechanical properties of pulsed Nd:YAG welded thin Ti6Al4V [J]. Advanced Materials Research, 2011, 189-193: 3672-3677.
- 16 Y Fan, Z Chen, C H Zhang, *et al.*. A comparison of microstructure and mechanical properties of welded thin Ti6Al4V with three different types of laser [J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(S4): S187-S192.
- 17 Y Fan. Mechanical Properties of Laser Beam Welded Ti6Al4V [M]. Nottingham: Nottingham University Press, 2010.
- 18 Zhang Jianxun. Unevenness of metal welding performance and its scale effect study [J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(1):24.
张建功. 金属焊接性能的不均匀性及其尺寸效应研究[J]. 电焊机, 2009, 39(1):24.
- 19 Cheng Donghai, Huang Jihua, Lin Haifan, *et al.*. Superplastic behavior and microstructure of laser welding of titanium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 67-71.
程东海,黄继华,林海凡,等. 钛合金激光焊缝的超塑性变形行为及显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 67-71.
- 20 C Leyens, M Peters. Titanium Alloy and Application; Fundamentals and Applications [M]. WILEY-VCH, 2003.

栏目编辑: 吴秀娟