

超声跨态处理对 TC4 钛合金激光焊缝组织晶粒度的影响

刘浩东¹ 胡芳友¹ 崔爱永¹ 戴京涛¹ 黄飞² 李洪波³

¹海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛 266041

²海军装备部航技部, 北京 100071

³中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580

摘要 为改善 TC4 钛合金激光焊接质量, 引进超声振动场辅助激光焊接工艺, 即超声跨态处理(UPPLW), 通过改变超声场强度, 采用三圆截点法研究超声功率对激光焊接接头微观组织的影响, 利用可靠性理论对数据进行分析。结果表明, 在外加辅助超声场作用下, 随着超声功率的增加, 焊缝组织晶粒有逐渐细化的趋势, 当超声功率为 1600 W 时, 试样焊缝组织的晶粒度较常规方法获得的细化了 15.8%。最后分析了超声跨态处理工艺细化组织晶粒的机理。

关键词 激光技术; TC4 钛合金; 超声跨态处理; 激光焊接; 晶粒度

中图分类号 TG146.2; TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0802005

Effect of UPPLW on Grain Size of Laser Welding Joints of TC4 Titanium Alloy

Liu Haodong¹ Hu Fangyou¹ Cui Aiyong¹ Dai Jingtao¹ Huang Fei² Li Hongbo³

¹Qingdao Branch, Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao, Shandong 266041, China

²Aviation Technology Support Branch of NED, Beijing 100071, China

³College of Storage and Architecture Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China

Abstract In order to improve the laser welding quality of TC4 titanium alloy, a technology named ultrasonic processing across different phases based on laser welding (UPPLW) is introduced. With the three-circle-cutoff-point method, the effect of ultrasonic vibration field power on the microstructures of laser welding joints is studied by changing the intensity of ultrasonic vibration field, and the measured data are analyzed based on the reliability theory. The results show that, under the influence of the ultrasonic vibration field, with the increase of ultrasonic vibration power, the microstructure grain of the welding joints has a tendency to be progressively refined. When the power is 1600 W, the grain is refined by about 15.8% compared with that obtained with conventional methods. The mechanism for UPPLW to refine grain is finally analyzed.

Key words laser technique; TC4 titanium alloy; UPPLW; laser welding; grain size

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 160.3900; 350.3850

1 引言

钛合金具有高强度、高比强度以及较强的耐蚀性能^[1-5], 其长期工作温度可达 400 °C, 可作为飞机的加强框、梁、接头耳片以及壁板等重要承力构件^[6-10], 在航空航天、国防领域以及国家经济建设中扮演着重要的角色。

收稿日期: 2016-01-12; **收到修改稿日期:** 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51505491)、海军航空工程学院创新基金(20121009)

作者简介: 刘浩东(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事激光加工技术在航空飞行器维修领域应用方面的研究。

E-mail: mdlhd@sina.com

导师简介: 胡芳友(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工技术在航空飞行器维修领域应用方面的研究。E-mail: fyh1960@sina.com

超声跨态处理(UPPLW)是指进行激光焊接时,在焊接位置同侧的附近区域辅加超声振动场,并利用超声发生器的频率跟踪功能实现与试件谐振,从而影响焊接熔池的形成、流动和凝固等跨态转变阶段以及焊缝的高温超塑性固态相变阶段,达到改善焊缝组织、控制焊接变形、缓释接头残余应力、提高接头力学性能以及减少裂纹等缺陷的目的^[11],对军机结构损伤的原位焊接修复具有重要意义。

2 试验材料与方法

超声跨态处理工艺的示意图如图 1 所示。

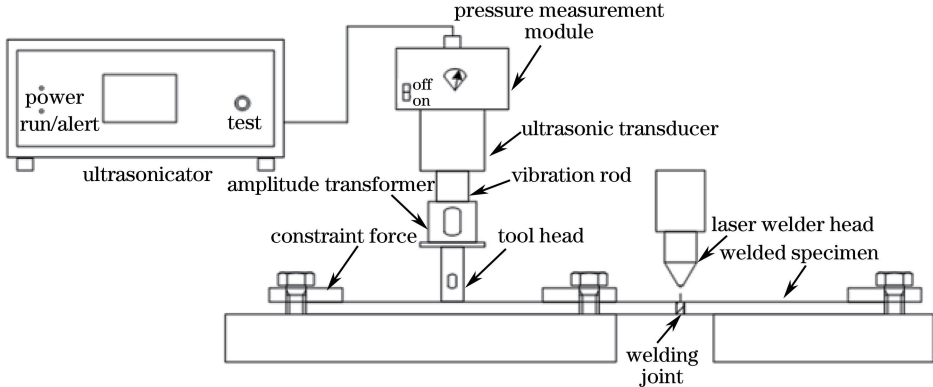


图 1 超声跨态处理系统示意图

Fig. 1 Schematic of UPPLW system

试验材料是厚度为 1.5 mm 并处于退火处理态的 TC4 航空用钛合金薄板,化学成分如表 1 所示。试验前用金相砂纸对待焊端口进行打磨处理,并用丙酮进行清洗。

表 1 TC4 钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of TC4 (mass fraction, %)

Al	V	Fe	O	H	Ti
6.15	4.13	0.08	0.009	0.002	Bal.

焊接设备为自主研制的 LER-3 型 Nd:YAG 激光在线抢修机,并以日本 ERCR-HP3-AA00 型机器人作为执行机构。采用 Ar 气(纯度为 99.99%)作为保护气进行正面保护,固定流量为 1.5 L/min,焊接工艺参数采用二次回归正交旋转组合设计进行优化^[12](表 2),焊接方式为热导焊模式下的单面焊双面成形。超声振动设备为杭州成功超声设备有限公司生产的 TJS-3000-V6.0 型智能数控强振超声系统。焊接完成后制备金相试样,采用专业定量金相分析系统(SRMAS)对焊缝组织进行观察和测量。

表 2 激光焊接工艺参数

Table 2 Laser welding parameters

Current /A	Impulse width /ms	Frequency /Hz	Welding speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Spot diameter /mm	Defocusing amount /mm
187	10	5	2	0.3	-1

采用三圆截点法测量试样的接头组织晶粒度^[13],该方法以同心等距且总周长为 500 mm 的三个圆组成测量网格,测量多个随机选择的视场,记录各视场的截点计数,最后计算晶粒度和置信区间。焊接接头的晶粒度测量位置如图 2 所示,其中 FZ、WZ、HAZ 及 BM 分别代表熔合区、焊缝区、热影响区及母材。

3 结果与分析

3.1 试验结果

图 3 和图 4 分别为在 350 倍光学显微镜下常规激光焊接试样和超声跨态处理试样的焊缝金相照片经 SRMAS 软件处理后的晶粒度测量图。

研究表明,当同一试样在不同视场的总截点数接近 500 时,其精确度一般比较可靠,故测量视场确定为

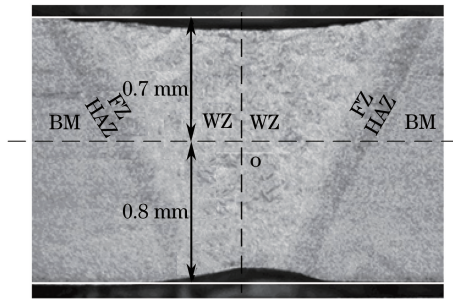


图 2 晶粒度测量位置示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of positions for measuring grain size

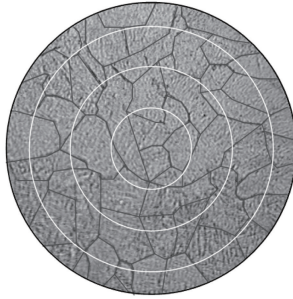


图 3 未施加超声振动的焊缝晶粒度测量图

Fig. 3 Grain size without ultrasonic vibration

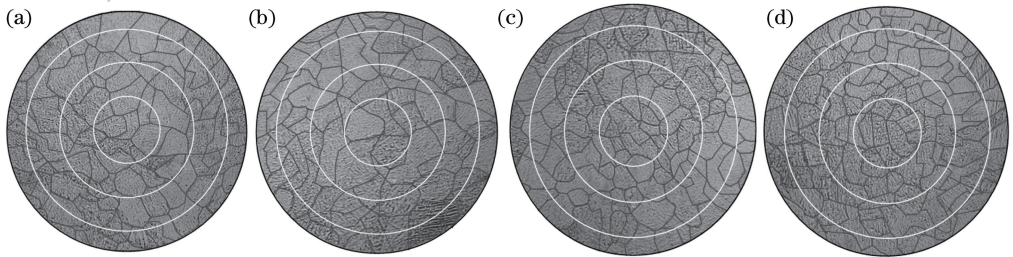


图 4 施加不同功率超声振动的焊缝晶粒度测量图。(a) 400 W；(b) 800 W；(c) 1200 W；(d) 1600 W

Fig. 4 Grain size under different ultrasonic vibration powers. (a) 400 W；(b) 800 W；(c) 1200 W；(d) 1600 W

6 个。表 3 所示为各组试样在不同视场测量的截点数分布,其中 F_i 代表不同的视场。

表 3 试样截点统计

Table 3 Number statistic of sample section

Power /W	0	400	800	1200	1600
F_1	58	67	83	85	95
F_2	61	70	78	88	91
F_3	65	73	81	86	93
F_4	61	74	79	89	93
F_5	62	71	80	88	92
F_6	64	73	82	90	97

对表中数据进行正态测试表明,各组试样在不同视场的截点数均服从正态分布,可以按照正态分布的数据统计方法进行处理。截点数平均值和标准差分别为

$$\bar{F} = \sum_{j=1}^i F_j / i, \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\sum_{j=1}^i (F_j - \bar{F})^2 / (i - 1)}, \quad (2)$$

式中 $F_1, F_2, \dots, F_j, \dots, F_i$ 为同一测量网格在 i 个视场的截点数测量值。

相应的平均晶粒度 D 的计算公式为

$$D = 6.643856 \lg(M \cdot \bar{F}/L) - 3.288, \quad (3)$$

式中 M 为金相照片的放大倍数; L 为测量网格的长度, 单位为 mm。

相应的 95% 置信区间的计算公式为

$$C_{0.95} = 3.321928 \lg \left[\frac{\left(\bar{F} + t \cdot \frac{S}{\sqrt{i}} \right)}{\left(\bar{F} - t \cdot \frac{S}{\sqrt{i}} \right)} \right], \quad (4)$$

式中参量 t 的值由所测视场的个数 i 确定, 如表 4 所示。

表 4 参数 t 取值

Table 4 Value of parameter t

i	5	6	7	8	9	10	11	12
t	2.776	2.571	2.447	2.365	2.306	2.262	2.228	2.201

平均晶粒度的测量结果为 $D \pm C_{0.95}$, 测量相对误差为

$$\delta = \frac{C_{0.95}}{D} \times 100\%. \quad (5)$$

由(1)~(5)式, 可得到相应的平均晶粒度、置信区间以及相对误差, 如表 5 所示。

表 5 试样统计量

Table 5 Statistic of sample parameters

Power /W	0	400	800	1200	1600
\bar{F}	61.8	71.3	80.5	87.7	93.5
S	2.48	2.58	1.87	1.86	2.17
D	7.58	7.99	8.34	8.59	8.78
$C_{0.95}$	0.12	0.11	0.07	0.06	0.07
$D \pm C_{0.95}$	7.58 ± 0.12	7.99 ± 0.11	8.34 ± 0.07	8.59 ± 0.06	8.78 ± 0.07
$\delta / \%$	1.60	1.38	0.84	0.70	0.80

由表 5 可知, 各试验组的相对误差 δ 均小于 5%, 对于常规晶粒度评级, 当相对误差小于 10% 时可认为测量结果有效, 故所测晶粒度数据真实可信。

3.2 结果分析

将各试验组平均晶粒度与超声振动功率的对应关系绘制成曲线(图 5), 可以发现组织晶粒度随超声振动功率的增加呈单调递增的趋势, 即组织随超声功率的增加逐渐细化。

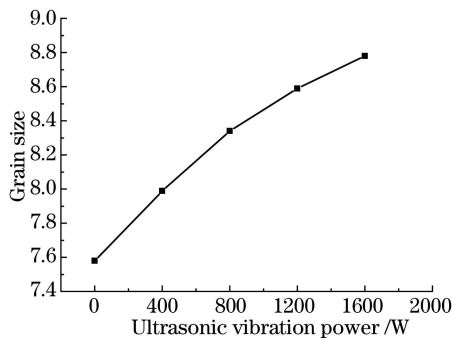


图 5 超声振动功率与组织晶粒度关系

Fig. 5 Relationship between grain size and ultrasonic vibration power

由金属凝固动力学^[14]可知, 金属凝固需要克服较大的能量势垒, 故金属结晶的开始温度 T 要降低至理论结晶温度 T_m 以下, 以便为相变提供驱动力, 固液两相吉布斯自由能差值 ΔG_d 为

$$\Delta G_d = G_s - G_l = \Delta S_m \Delta T, \quad (6)$$

式中 G_s 为固相吉布斯自由能值; G_l 为液相吉布斯自由能值; ΔS_m 为凝固时的熵变; ΔT 为理论结晶温度与开始结晶温度的差值, 称为过冷度, 即晶核形成条件是固液界面前沿液相中存在合适的过冷度。

初生晶核形成时,系统的吉布斯自由能变化主要由作用效果相反的两部分组成,一是固液相之间的体积吉布斯自由能 ΔG_v ,当液相转变为固相时会引起该自由能减小,进而促进结晶进一步发展,是相变驱动力;另一部分是因凝固产生新相界面而使系统增加的界面吉布斯自由能 ΔG_i ,界面能的增大会阻碍凝固进一步进行,是相变阻力。金属凝固时,系统的吉布斯自由能是一个动态变化过程,可表示为

$$\Delta G = \Delta G_v + \Delta G_i = \Delta G_v V + \sigma_s A, \quad (7)$$

式中 ΔG_v 为固液界面的单位体积自由能之差, V 为初生晶核的体积, σ_s 为固液界面的表面张力, A 为初生晶核的表面积。

假定初生晶核的形状为球形且半径为 r ,则该初生晶核引起的系统自由能变化为

$$\Delta G = \Delta G_v 4\pi r^3 / 3 + \sigma_s 4\pi r^2, \quad (8)$$

由于凝固时熵变 ΔS_m 为负值,故结合(6)式可知,(8)式第一项为负值且与初生晶核直径的三次方成正比,第二项界面能为正值且与初生晶核直径的二次方成正比。

当熔体温度低于理论结晶温度时,液相处于热力学不稳定状态,体积吉布斯自由能 ΔG_v 随初生晶核半径 r 的增大而减小,界面吉布斯自由能 ΔG_i 随初生晶核半径 r 的增大而增大,但由于两者与初生晶核半径 r 分别成三次方和二次方的关系,因而在初生晶核形成初期,体积吉布斯自由能的绝对值小于界面吉布斯自由能,但当初生晶核长大到一定程度时, ΔG_v 大于 ΔG_i ,因而系统的总吉布斯自由能变化随初生晶核半径的增大呈先减小后增大最后再减小的趋势,如图 6 所示。

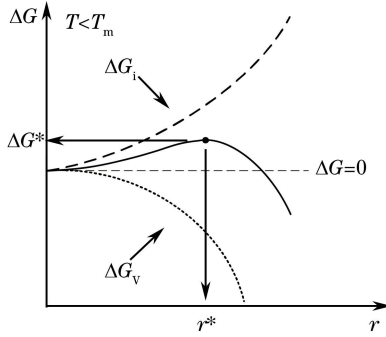


图 6 晶核半径与系统吉布斯自由能的关系

Fig. 6 Relationship between crystal nucleus radius and Gibbs free energy

图 6 自由能曲线的极大值对应初生晶核的临界半径 r^* ,其值可由(8)式求导获得,同时还可得到形核功 ΔG^* :

$$r^* = \frac{-2\sigma_s}{\Delta S_m \Delta T}, \quad (9)$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\sigma_s^3}{3\Delta S_m^2 \Delta T^2}. \quad (10)$$

综上,过冷度为熔体的形核提供驱动力,过冷度越大,驱动力越大,并且过冷度与初生晶核的临界尺寸具有明确的反比关系,即过冷度越大,初生晶核的临界尺寸越小,越容易通过能量起伏发生形核。

超声跨态处理激光焊接过程中,超声波经熔池壁导入熔池,在熔融金属内部传播并发生空化作用,空化作用生成空化泡的内部压力可达 50.5 MPa 以上,并在崩溃时产生 400 km/h 的微射流和强烈冲击波,而压强与形核率之间具有紧密的关系,液态金属在常压和高压下的形核率分别表示为^[15]

$$I = \exp\left[-\frac{\alpha\sigma^3 V_s (2 + \cos\theta) (1 - \cos\theta)^2}{4R_g T_m (\Delta H)^2} \left(\frac{T_m - T}{T_m T}\right)^2\right] \exp\left(-\frac{\Delta G'}{R_g T}\right), \quad (11)$$

$$I_k = \exp\left[-\frac{\alpha\sigma_k^3 V_s (2 + \cos\theta) (1 - \cos\theta)^2}{4R_g T_m (\Delta H)^2} \left(\frac{T_m - T}{T_m T}\right)^2\right] \exp\left(-\frac{\Delta G'_k}{R_g T}\right), \quad (12)$$

式中 θ 为润湿角, α 为几何常数, σ_k 和 σ 分别为超声跨态处理和常规凝固时的界面张力, V_s 为固相原子体积, ΔH 为结晶潜热, $\Delta G'_k$ 和 $\Delta G'$ 为液固相之间的相变激活能, R_g 为气体常数。

将(11)式和(12)式等式两边分别相除,可得到常压与高压下的形核率关系为

$$I_k = I \exp[\Psi(\sigma^3 - \sigma_k^3)] \exp[(\Delta G' - \Delta G'_k) / (R_g T)], \quad (13)$$

由于压强对固液相的界面张力影响较小,可忽略其变化,则 $\exp[\Psi(\sigma^3 - \sigma_k^3)] \approx 1$, 此时

$$I_k = I \exp[(\Delta G' - \Delta G'_k) / (R_g T)], \quad (14)$$

由(14)式可知,超声场和常压下的形核率与固液相转变时的吉布斯自由能变化量(激活能)的差值呈指数关系,激活能为固液相转变的能量势垒,即

$$\Delta G' = \Delta V dP - \Delta S dT, \quad (15)$$

能量势垒越小则越容易发生形核。由(14)、(15)式可得

$$I_k = I \exp[\Delta V (dP - dP_k) / (R_g T)], \quad (16)$$

当常压液态转变为固态时,压强基本不变($dP \approx 0$),但在超声振动场中,空化泡闭合过程中会形成局部高压($dP_k < 0$),故由(16)式可得 $I_k > I$,因而超声跨态处理可使液态金属凝固过程的结晶形核率得到显著提高。

另外,初生晶核是由近程有序并处于动态的原子集团(晶胚)形成的,不同时刻各原子所属的原子集团是变化的,从而形成相起伏。相起伏在每个温度下对应一个晶胚半径极大值 r_{\max} ,且温度越高, r_{\max} 越小,由金属凝固热力学^[16-17]可知,在过冷液相金属中出现较大尺寸的相起伏是形核的必要条件,超声振动可增强熔池的散热,使凝固温度降低,因此晶胚半径极大值 r_{\max} 增大,形核率增加;同时,超声振动机械破碎熔池凝固过程所形成的粗大枝晶,也是组织细化的重要原因。

随着超声功率的增大,熔池中空化作用的强度和作用区域均相继变大,结晶形核率也随之增大;同时由上述分析知,随着超声功率的增大,晶胚半径极大值 r_{\max} 随之增大,因此结晶形核率也随之增大;另外,超声对熔池凝固过程产生的粗大枝晶的机械破碎作用也随超声功率的增大而增强,三方面的共同作用使接头的组织晶粒随超声振动功率的增大而逐渐细化。

4 结 论

- 1) 超声跨态处理激光焊接试样的组织晶粒度与常规激光焊接试样相比具有显著差异,当置信区间为95%、超声功率为1600 W时,接头组织晶粒度较常规接头组织细化了15.8%;
- 2) 超声空化作用通过两个方面细化激光焊缝组织,其一是通过降低微区温度使过冷度增加,从而增大结晶驱动力;其二是通过形成局部高压使凝固势垒降低,从而提高形核率;
- 3) 超声振动引起的熔池散热增强以及它在熔池凝固过程中对枝晶的机械破碎作用,均对焊缝组织的细化具有重要影响。

参 考 文 献

- 1 Nie Xiangfan, He Weifeng, Zang Shunlai, *et al.* Experimental study on improving high-cycle fatigue performance of TC11 titanium alloy by laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0803006.
聂祥樊, 何卫锋, 臧顺来, 等. 激光喷丸提高 TC11 钛合金高周疲劳性能的试验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803006.
- 2 Yang Wulin, Yang Xiaohua, Li Xiaoyan, *et al.* Analysis on fatigue property and fracture mechanism of TC4 titanium alloy joint during laser welding[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2012, 33(3): 105-108.
杨武林, 杨晓华, 李晓延, 等. TC4 钛合金薄板激光焊接接头的疲劳寿命及断口分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 105-108.
- 3 Ning Xingrong. Application of welding titanium in Russian aviation industry[J]. Titanium Industry Progress, 1998(1): 22-26.
宁兴荣. 焊接钛合金在俄罗斯航空工业中的应用[J]. 钛工业进展, 1998(1): 22-26.
- 4 Oh J, Kim N J, Lee S. Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 340(1): 232-242.
- 5 Chen Bo, Shao Bing, Liu Dong, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC17 titanium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403001.
陈博, 邵冰, 刘栋, 等. 热处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403001.

- 6 Editing committee of practical handbook of engineering materials. Titanium alloy and copper[M]// Practical handbook of engineering materials (2nd edition): Volume 4. Beijing: Chinese Standard Press, 2002: 74-76.
《工程材料实用手册》编辑委员会. 钛合金铜合金[M]//工程材料使用手册(第二版): 第4卷. 北京: 中国标准出版社, 2002: 74-76.
- 7 Xi Mingzhe, Gao Shiyu. Heat-treated microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser rapid forming[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103007.
席明哲, 高士友. 激光快速成型 TA15 钛合金热处理组织及其力学性能[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103007.
- 8 Gao Yang, Sun Zhichao, Yang He. Deformation behavior and microstructure evolution of TA15 titanium alloy after isothermal near β deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(5): 951-956.
郭 阳, 孙志超, 杨 合. TA15 钛合金等温近 β 变形行为及微观组织演化[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(5): 951-956.
- 9 Li Qiang, Xu Yongbo, Shen Letian, *et al.* Dynamic mechanical properties and damage characteristics of titanium alloys (Ti17)[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(5): 491-494.
李 强, 徐永波, 沈乐天, 等. Ti17 钛合金动态力学性能和损伤特性[J]. 金属学报, 1999, 35(5): 491-494.
- 10 Li Jing, Lin Xin, Qian Yuanhong, *et al.* Study on microstructure and property of laser solid forming TC4 titanium alloy [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1103010.
李 静, 林 鑫, 钱远宏, 等. 激光立体成形 TC4 钛合金组织和力学性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103010.
- 11 Liu Haodong, Hu Fangyou, Cui Aiyong, *et al.* Experimental on thermal cycle of laser welding with ultrasonic processing across different phases[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(8): 13-17.
刘浩东, 胡芳友, 崔爱永, 等. 基于超声跨态处理的焊接热循环试验[J]. 焊接学报, 2015, 36(8): 13-17.
- 12 Liu Haodong, Hu Fangyou, Cui Aiyong, *et al.* Study on laser welding parameters of TC4 titanium alloy thin-plate based on response surface[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(s1): s103006.
刘浩东, 胡芳友, 崔爱永, 等. 基于响应面法的 TC4 薄板激光焊接工艺参数优化[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s103006.
- 13 Yu C F, Hsieh K C. The mechanism of residual stress relief for various tin grain structures[J]. Journal of Electronic Materials, 2010, 39(8): 1315-1318.
- 14 Hu Hanqi. Metal solidification principle[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 80-106.
胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 80-106.
- 15 Zhou Yaohe, Hu Zhuanglin, Jie Wanqi. Solidification technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 176-179.
周尧和, 胡壮麟, 介万奇. 凝固技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 176-179.
- 16 Liu Zhien. Fundamentals of materials science[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 84-86.
刘智恩. 材料科学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 84-86.
- 17 Tao Xide, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei, *et al.* Cladding angle model and variation law of Fe-based coating fabricated by mechanical vibration assisted laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303014.
陶喜德, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 机械振动作用下铁基涂层熔覆角的模型构建及其变化规律研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303014.