

光纤激光焊接铝合金离焦量对焊缝成形的影响

张健^{1,2} 林仕君² 苏绍兴³ 于艳玲³ 费旺² 陈其宝² 曹宇² 唐霞辉¹

¹华中科技大学激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074

²温州大学浙江省激光加工机器人重点实验室, 浙江 温州 325035

³温州职业技术学院温州激光应用工程技术研究中心, 浙江 温州 325036

摘要 采用高功率光纤激光对3 mm厚铝合金进行焊接实验,系统研究了离焦量对焊缝熔池形貌、熔深、熔宽、底部驼峰及深宽比、宽度比例系数的影响。结果表明,随着离焦量的增加,焊接模式由深熔焊转变为热导焊,熔宽变化不明显,底部驼峰高度和宽度比例系数降低;用高功率光纤激光焊接时,通过减小负离焦量或改变为正离焦的方式能降低焊缝塌陷程度与底部驼峰高度;用较低功率光纤激光焊接时,通过增大负离焦量或减小正离焦量的方式能增大背面熔宽。

关键词 激光技术; 光纤激光焊接; 铝合金; 离焦量; 焊缝成形

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.121405

Effect of Defocusing Amount on Weld Shaping in Fiber Laser Welding of Aluminum Alloy

Zhang Jian^{1,2} Lin Shijun² Su Shaoxing³ Yu Yanling³ Fei Wang²

Chen Qibao² Cao Yu² Tang Xiahui¹

¹National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²Zhejiang Provincial Key Laboratory for Robotic Laser Processing, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

³Wenzhou Laser Application Engineering Technology Research Center, Wenzhou Vocational and Technical College, Wenzhou, Zhejiang 325036, China

Abstract The high power fiber laser is used to conduct a welding experiment on 3 mm thick aluminum alloy, and the effects of the defocusing amount on the morphology, penetration depth, penetration width, root humps, aspect ratios, and width ratio coefficient of weld pools are systematically investigated. The results show that, with the increase of the defocusing amount, the welding mode is transformed from the deep-penetration welding to heat-conduction one, the weld width does not change obviously, the root hump height and the width ratio coefficient decrease; with the high power fiber laser, the degree of welding bead subsidence and the height of root humps can be reduced by cutting back the negative defocusing amount or transforming into positive defocus; with the low power fiber laser, the back weld width could be increased by strengthening the negative defocusing amount or reducing the positive defocusing amount.

Key words laser technique; fiber laser welding; aluminum alloy; defocusing amount; weld shaping

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.3900

1 引言

2124 铝合金为 Al-Cu 系硬铝合金,具有较强的断裂韧性、抗疲劳与应力腐蚀等优良综合性能,已成为

收稿日期: 2016-06-27; **收到修改稿日期:** 2016-07-24; **网络出版日期:** 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(51605338)、浙江省教育厅资助项目(Y201533195)、温州市科技计划(J20140026, 2014F004, G20140050, G20150003)、温州市重点科技创新团队项目(C20150006)

作者简介: 张健(1982—),男,博士后,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhangjian200623@sina.com

航空航天工业的主要结构材料。用于铝合金焊接的传统方法主要为钨极稀有气体保护焊(TIG)与熔化极稀有气体保护焊(MIG),但传统 TIG、MIG 焊接方法的热源能量密度低、热输入量大,易导致铝合金焊接变形,焊缝成形质量差,焊接材料很难达到使用要求^[1]。与传统焊接热源相比,激光焊接热源具有能量密度高、焊接速度快、热输入小、焊接变形小等优点^[2-4],其中高亮度光纤激光作为一种新型激光焊接工具是未来激光焊接的主流光源,能够在一定程度上克服铝合金高反射率和高热导性造成的能量耦合壁障^[5-6]。国内外针对光纤激光焊接的研究主要集中在低碳钢、不锈钢等铁碳合金焊接工艺方面,有关铝、镁、钛等轻质合金的光纤激光焊接研究较少。

影响激光焊接铝合金焊缝成形质量与接头性能的主要工艺因素包括激光功率、扫描速度和离焦量^[7-9]。在激光功率与扫描速度一定的条件下,为达到激光深熔焊接所需的功率密度,必须保证光束焦点处于合理位置。离焦量很小的变化就会造成工件表面激光功率密度与能量传输效率的较大差异,从而导致焊缝熔深和熔宽的巨大差异。研究表明,离焦量是影响焊缝底部驼峰高度的主要原因之一^[10-12]。

本文在前期大量实验基础上,针对 3 mm 厚 2124 铝合金,采用高功率光纤激光器作为焊接热源,在激光功率和扫描速度不变的条件下,研究不同离焦量下铝合金的焊缝成形特征及其变化规律,为高强度铝合金的激光焊接工艺优化提供了一定的参考。

2 实验设备及方法

2.1 实验设备

采用 6 kW 激光加工机器人工作站进行实验,激光器为德国 ROFIN FL060 型光纤激光器,其最大输出功率为 6 kW;采用德国普雷发特 YW30 型焊接头;透镜焦距为 250 mm,聚焦光斑直径为 0.6 mm;运动装置为六轴机械手(IRB4600, ABB 公司,瑞士)和自制回转工作台。

高功率光纤激光焊接热输入量较高,易诱发热应力,导致板材弯曲变形,因此,为保证良好的焊缝成形,实验采用具有双面气体保护功能的自制焊接夹具。用底部装有弹性垫圈的紧固螺栓将铝合金板材与承接板固定夹紧,焊接过程中上、下表面同时吹气保护,以防止焊接变形与焊缝背面氧化。

2.2 实验材料及方法

实验材料为 100 mm×200 mm×3 mm 的 2124 铝合金板材,其化学成分见表 1。对材料表面进行焊前处理,具体流程为:先用砂纸进行打磨,再用碱溶液清洗,除去油污后用清水冲洗,接着用酸洗液洗去氧化层,然后用清水冲洗干净,最后烘干。碱洗溶液使用质量分数为 5%~10% 的 NaOH 酒精碱溶液,酸洗液使用质量分数为 5% 的 HF 和 30% 的 HNO₃ 的合成水溶液,烘干温度为 80~120 °C。

根据前期大量实验,当激光功率为 2.7 kW,扫描速度为 20 mm/s,保护气体流量为 15 L/min 时(使用体积分数为 99.999% 高纯氩气作为保护气体),可获得较好的焊缝成形效果与稳定的深熔焊接过程。定义位于工件表面以上的焦点为正离焦,表面以下的为负离焦,表面的为正焦(即离焦量为 0 mm)。在该工艺条件下分别进行离焦量 d 为 -2, -1, 0, +1, +2 mm 的激光焊接工艺实验,每个离焦量下进行 5 组实验,选优去劣。

焊接完成后沿垂直于焊接方向每隔 20 mm 截取试样,共截取 5 次。按照常规方法制备金相试样,抛光后经质量比为 $m(\text{HF}):m(\text{HNO}_3):m(\text{H}_2\text{O})=1:2:7$ 的侵蚀液腐蚀。利用体视显微镜(SZ6745-B1, Nikon 公司,日本)与金相显微镜(AX10, ZEISS 公司,德国)观测不同离焦量下的焊缝表面形貌与熔池形貌,并利用其自带软件测量熔深、熔宽及驼峰高度,对比分析不同离焦量下的焊缝成形特征与规律。

表 1 2124 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 2124 aluminum alloy (mass fraction, %)

| Element | Cu | Mg | Mn | Si | Fe | Cr | Zn | Ti | Al |
|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Content | 3.8-4.9 | 1.2-1.8 | 0.3-0.9 | ≤0.20 | ≤0.30 | ≤0.10 | ≤0.25 | 0.15 | Bal. |

3 实验结果与分析

3.1 离焦量对焊缝熔池形貌、熔深的影响

不同离焦量对铝合金焊缝熔池形貌的影响如图 1 所示。由图可知,随着焦点位置由负离焦变为正离焦,

熔池形貌由酒杯状过渡到丁字状,最后转变为月牙状,焊接模式由深熔焊转变为热导焊。图2为焊缝熔深、深宽比随离焦量的变化曲线。由图2可知,随离焦量的增加,焊缝熔深、深宽比近似呈线性下降。当离焦量为 -2 , -1 mm时,光束会聚于工件内部,较大熔池热输入量使得铝合金焊缝上表面大量低熔点金属元素气化,进而引起焊缝表面塌陷,熔深由 4.17 mm减小到 3.16 mm,减小了 23.98% 。当离焦量为 0 mm时,作用于工件的光斑大小与熔池热输入量较为适中,激光束不断会聚于小孔内部;小孔四壁包围着熔融金属,在小孔壁层表面张力和孔腔内连续产生的蒸汽压力的作用下,熔融金属的流动能够保持动态平衡,焊接匙孔稳定延伸,获得了稳定的深熔焊过程与较好的焊缝成形效果^[13-14]。当离焦量为 $+1$ mm时,作用于工件表面的光斑增大而功率密度减小并达到临界功率密度,焊接模式由深熔焊向热导焊转变,为不稳定焊接模式。当离焦量为 $+2$ mm时,焊接模式为浅表热导焊接模式,熔深由 2.34 mm减小到 1.21 mm,减小了 48.29% 。由此可知,当激光功率与扫描速度一定时,焦点位置的改变或波动易引起作用于工件表面功率密度的变化,从而影响焊接模式稳定性与焊缝成形质量,离焦量的大小在一定程度上决定了最大熔深。

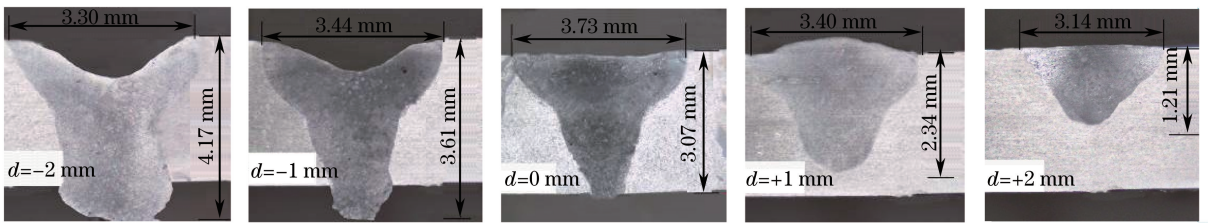


图1 离焦量对焊缝熔池形貌的影响

Fig. 1 Effect of defocusing amount on weld pool morphology

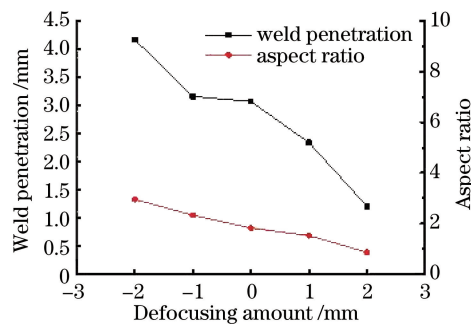


图2 焊缝熔深、深宽比随离焦量的变化

Fig. 2 Variations of weld penetration and aspect ratio with defocusing amount

将离焦量对焊缝熔池形貌与熔深的影响简化为图3所示的物理模型。结合图1、图2分析可知,当离焦量为负值时,入射能量集中、穿透力强的激光束会聚于工件内部,使得作用于工件内部的激光功率密度比工件表面还要高,引起了较强的熔化、气化作用,产生了稳定的焊接匙孔,促使激光能量向熔池深处传递,获得了较大熔深与稳定的深熔焊接过程。若负离焦量过大,则材料内部能量过于集中,易引起Mg等低熔点、低沸点合金元素气化量增大和熔融金属下漏,导致焊缝严重下塌、成形质量恶化。当离焦量为正值时,入射到工件内部的激光束处于发散状态,光斑尺寸较大,大大降低了工件表面和内部的功率密度,削弱了激光穿透能力,减小了焊缝熔深和深宽比,不利于焊缝成形,出现焊接过程不稳定和周期性转化现象,难以获得稳定的深熔焊接过程。当离焦量为 0 mm时,作用于工件表面的功率密度与熔池热输入量较为适中,可获得稳定深熔焊过程与较好的焊缝成形效果。因此,负离焦比正离焦更容易得到较大的熔深和深宽比,在进行大于 35 mm厚度的铝

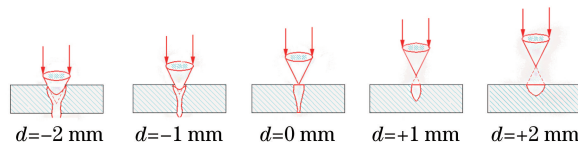


图3 离焦量影响焊接熔池的物理模型

Fig. 3 Physical model of defocusing amount influencing on weld pool

合金焊接时,优先选择负离焦方式可获得较大熔深;在进行 4.5~35 mm 中等厚度的铝合金焊接时,优先选择正焦方式可获得较好的焊缝成形效果;在进行厚度小于 4.5 mm 的薄板铝合金焊接时,宜采用正离焦方式。

3.2 离焦量对焊缝熔宽、宽度比例系数的影响

由第 3.1 节分析可知,离焦量很小的变化就会造成熔池形貌及熔深、深宽比的较大差异,甚至焊接模式的改变。对于板材熔焊而言,除了在保证焊缝全焊透的基础上获得尽可能大的深宽比外,还应使焊缝背面熔宽 W_b 与正面熔宽 W_f 的比例系数 v 达到一定值,以减少因熔池锥度过大或过小及熔合线过渡不平滑造成的焊缝机械性能下降,从而保证焊缝具有良好的综合性能。

图 4 为铝合金焊缝正面熔宽与背面熔宽随离焦量的变化曲线。由图可知,焊缝正面熔宽 W_f 随离焦量的变化曲线较为平缓,离焦量对其影响不大;而焊缝背面熔宽 W_b 、宽度比例系数 v 与离焦量呈近似反比关系,离焦量对两者影响较大。结合图 1 可知,当离焦量为负值时,母材完全熔透,可获得较好的宽度比例系数与熔池锥度,但焊缝上表面出现不同程度的下塌与底部驼峰;当离焦量为 0 mm 时,如图 5 所示,母材完全熔透,焊缝上下表面平整连续,无下塌和驼峰,焊缝成形效果较好,但宽度比例系数较小,熔池锥度较大;当离焦量为正值时,背面熔宽为零,母材未熔透。

综上所述,运用连续光纤激光深熔焊接铝合金时,要获得较好的焊缝成形质量,在满足母材金属完全熔透条件下,需综合考虑激光功率与离焦量的匹配关系。通过减小负离焦量或改为正离焦的方式来降低较高激光功率引起的焊缝上表面塌陷的程度与底部驼峰的高度;通过增大负离焦量或减小正离焦量的方式来增大过低激光功率引起的较小背面熔宽,提升焊缝机械性能。

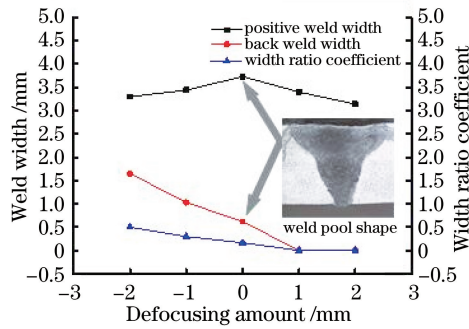


图 4 焊缝正面熔宽、背面熔宽及宽度比例系数随离焦量的变化

Fig. 4 Variations of positive weld width, back weld width, and width ratio coefficient with defocusing amount

3.3 离焦量对焊缝底部驼峰的影响

激光全熔透焊接铝合金时易出现底部驼峰及塌陷等缺陷^[15],驼峰和塌陷主要是熔池熔融金属下漏至板材底部堆积造成的,其中离焦量是影响底部驼峰高度的关键因素。

图 5 为不同离焦量对铝合金焊缝正、背面形貌的影响,图 6 为底部驼峰高度、宽度随离焦量的变化曲线。由图可知,底部驼峰高度、宽度与离焦量呈反比关系。当离焦量为 +1 mm 时,存在深熔焊与热导焊相互转化的不稳定焊接模式,熔融金属不均匀滴漏,从而造成底部驼峰的断断续续;当离焦量为 0 mm 时,工件完全熔透,且焊缝上、下表面平整连续,表明焊接过程相对稳定;当离焦量为 -1 mm 时,工件内部聚集能量增大,

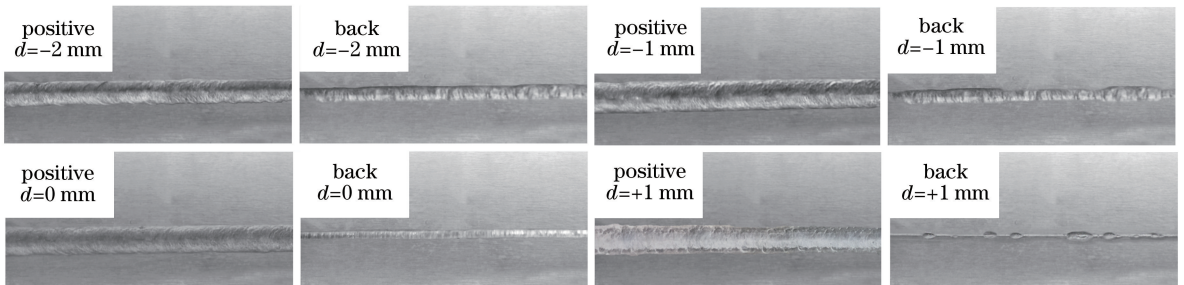


图 5 离焦量对焊缝正、背面形貌的影响

Fig. 5 Effect of defocusing amount on positive and back morphologies of welds

熔融金属下漏至焊缝下表面,焊缝出现上表面塌陷、下表面凸起,形成具有一定宽度与高度的连续驼峰;当离焦量为 -2 mm 时,工件内部聚集能量进一步增大,熔池内部熔融金属表面张力已无法克服重力作用,焊缝下表面熔滴体积不断变大,底部驼峰宽度和高度继续增大,最后底部驼峰变得连续一致且较为规整,同时上表面塌陷更为严重。

综上所述,负离焦时激光能量体大,焦平面位于板材下方,驼峰高度和宽度变大,在自身重力作用下,熔融金属向下流动并在底部聚集,导致底部驼峰高度和宽度增加。正离焦时激光能量体小,焦平面位于板材上方,在重力作用下出现局部滴漏,但底部驼峰不明显。

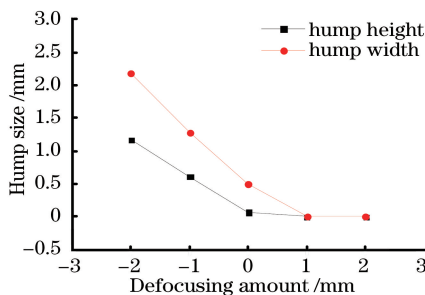


图6 底部驼峰高度和宽度随离焦量的变化

Fig. 6 Variations of root hump width and height with defocusing amount

4 结 论

利用高功率光纤激光焊接铝合金时,离焦量对熔池形貌和焊接模式有重要影响,很小的变化就会造成焊缝成形质量的较大差异。当激光功率为 2.7 kW 、扫描速度为 20 mm/s 、保护气体流量为 15 L/min 时,随着离焦量的增加,熔池形貌由酒杯状过渡到丁字状,最后转变为月牙状,焊接模式由深熔焊转变为热导焊。为了获得较好的焊缝成形质量,在满足母材金属完全熔透的条件下,需综合考虑激光功率与离焦量的匹配关系。

参 考 文 献

- Xu Fei, Yang Jing, Gong Shuili, *et al.* Effect of heat input on weld appearance for fiber laser beam full penetration welding aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1203001.
许 飞, 杨 璟, 巩水利, 等. 热输入对铝合金光纤激光穿透焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1203001.
- Xu Guojian, Li Xiang, Hang Zhengxiang, *et al.* Laser welding of high strength steel using fiber laser and CO_2 laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 031403.
徐国建, 李 响, 杭争翔, 等. 光纤激光及 CO_2 激光焊接高强度钢[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 031403.
- Cao Lijie, Zhang Chaomin. CO_2 laser-beam welding procedure and weld formation of aluminum alloys 5A02[J]. Welding Technology, 2010, 39(9): 35-38.
曹丽杰, 张朝民. 5A02 铝合金 CO_2 激光焊接工艺与焊缝成形[J]. 焊接技术, 2010, 39(9): 35-38.
- Sibillano T, Rizzi D, Ancona A, *et al.* Spectroscopic monitoring of penetration depth in CO_2 Nd:YAG and fiber laser welding processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 910-916.
- Cui Li, Zhang Yanchao, He Dingyong, *et al.* Research progress of high power fiber laser welding[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 154-159.
崔 丽, 张彦超, 贺定勇, 等. 高功率光纤激光焊接的研究进展[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 154-159.
- Chen Genyu, Zhou Yu, Zhang Mingjun, *et al.* Study on improving surface quality of weld of autogenously laser welding of thick plate with high power fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103011.
陈根余, 周 宇, 张明军, 等. 大功率光纤激光厚板自熔焊焊缝表面质量改善研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103011.
- Zhang Jian, Wu Ruihuan, Li Zexi, *et al.* Research on double-station processing system in laser processing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1003003.
张 健, 吴锐欢, 李泽曦, 等. 激光加工中双工位加工系统的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1003003.

- 8 Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Arakane Goro, *et al.* Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103004.
赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103004.
- 9 Yu Zhaohui, Yan Hongge, Guan Zhenggang, *et al.* Effects of laser welding parameters on weld appearance and cracking tendency of high strength magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6): 1479-1488.
俞照辉, 严红革, 管正刚, 等. 激光焊接工艺参数对高强镁合金焊缝成形及裂纹倾向的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1479-1488.
- 10 Wang Jiachun, Wang Xizhe, Hui Songxiao. Research of linear heat input and laser focus position for laser welding HE130 titanium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(2): 179-184.
王家淳, 王希哲, 惠松骁. HE130 合金激光焊接线能量与焦点位置研究[J]. 中国激光, 2003, 30(2): 179-184.
- 11 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, 43(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, 43(11): 2782-2786.
- 12 Ma Xuyi, Gong Shuili, Zhang Jiuxing, *et al.* Influence of the welding conditions on weld defects in double-sided laser beam welded T-joints of Ti-6Al-4V alloy[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0203006.
马旭颐, 巩水利, 张久兴, 等. 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[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203006.
- 13 Wu Dongjiang, Zhang Tianwu, Ma Guangyi, *et al.* Influence of welding parameters on the morphology of Fe-Ni alloy with continuous wave YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303003.
吴东江, 张天武, 马广义, 等. 连续激光焊接 Fe-Ni 合金工艺参数对焊缝形貌的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303003.
- 14 Matsunawa A. Problems and solutions in deep penetration laser welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 6(6): 351-354.
- 15 Chen Genyu, Xia Hailong, Zhou Cong, *et al.* Study on the mechanism of root humping of laser welding with high power fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203004.
陈根余, 夏海龙, 周聪, 等. 高功率光纤激光焊接底部驼峰的机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203004.