

基于热导机制的光纤激光焦点高频旋转点焊工艺

彭书胜, 邹江林, 李新桐, 武强*, 肖荣诗

北京工业大学激光工程研究院高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124

摘要 利用焦点高频旋转方法进行了光纤激光点焊工艺研究, 并与传统激光点焊工艺进行了对比分析。结果表明, 在热导焊接模式下, 利用激光焦点高频重复扫描的熔池热积累效应, 通过调节激光旋转工艺参数, 可以有效调控焊点形貌。随着热量的不断累积, 焊点形貌由双“V”形转变为“W”形, 直至“U”形。与传统激光点焊工艺相比, 焦点高频旋转点焊的焊点宽深比大, 且基本无气孔缺陷。同时, 该方法可以有效调控焊点显微组织及显微硬度。

关键词 激光技术; 激光点焊; 光纤激光; 焦点旋转; 焊点形貌; 显微硬度

中图分类号 TG442

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1102011

Fiber Laser High-Frequency Focus Rotation Spot Welding Process Based on Thermal Conductivity

Peng Shusheng, Zou Jianglin, Li Xintong, Wu Qiang*, Xiao Rongshi

High-Power and Ultrafast Laser Manufacturing Laboratory, Institute of Laser Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The fiber laser spot welding process is studied with the high-frequency laser focus rotation method and compared with the traditional laser spot welding processes. The results show that, under the thermal conduction welding mode, the spot weld morphology can be effectively controlled by using the heat accumulation effect from the laser focus high-frequency repetitive scanning and the adjustment of the laser rotation process parameters. With the further heat accumulation, the spot weld morphology changes from the double “V” shape to the “W” shape and until to the “U” shape. Compared with those for the traditional laser spot welding process, the width-depth ratio of the spot welds is relatively larger for the high-frequency focus rotation spot welding process and substantially free of porosity defects. Simultaneously, the microstructure and microhardness of spot welds can be effectively regulated by the proposed method.

Key words laser technique; laser spot welding; fiber laser; focus rotation; spot weld morphology; microhardness

OCIS codes 140.3460; 140.3380; 140.339

1 引 言

激光点焊具有能量控制精准、热变形小、可达性好等优点, 被广泛应用于航空航天等工业领域^[1-3]。熔合面熔宽是决定焊点力学性能的重要指标^[4-5], 采用激光深熔模式进行点焊时, 激光的高穿透性使得焊点的深宽比较大。因此, 在获取更大熔合面熔宽的同时, 熔深势必剧烈增大。在薄壁构件搭接点焊中, 过大的焊点熔深不仅不利于提升焊点力学性能, 而且容易导致构件表面下塌、背部凸起^[6]; 而控制焊

点熔深会导致熔合面宽度减小, 力学性能降低。因此, 获取较大的焊点宽深比(熔合面熔宽与熔深的比)是薄壁构件激光点焊的重要工艺需求。

激光点焊的成形机理、力学性能、过程质量监控以及数值模拟已得到广泛的研究^[7-9], 而深熔焊接模式下的气孔缺陷控制也是研究热点之一^[10-13]。Hajavifard 等^[10]采用不同脉冲整形方法实现了铝合金激光点焊, 并减少了气孔及裂纹缺陷。赵守辉^[11]采用优化的缓降和锯齿波形使得点焊中小孔分段闭合, 抑制了气孔和裂纹的产生。Hayashi

收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-07-09; 录用日期: 2018-07-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51775009)

* E-mail: jlwuqiang@bjut.edu.cn

等^[12]通过增大 304 不锈钢焊接过程中深熔小孔直径,减少了气孔缺陷并增大了熔合面熔宽。官祥威^[13]采用激光束旋转及振动的方式,有效调控了铝合金焊缝的熔深和熔宽,减少了气孔缺陷。然而,深熔模式焊接本身无法解决焊点深宽比大的问题,且气孔缺陷难以完全消除,这使得传统深熔模式的激光点焊工艺在薄壁构件点焊中存在一定局限性。

热导焊接不产生深熔小孔,过程稳定,气孔缺陷极少,在薄壁构件焊接中具有明显的工艺优势^[14-15]。然而,由于热导焊的焊点熔深小,搭接面处存在接触热阻^[16-17],因此,上板厚度不小于 1 mm 的焊接很难形成有效的搭接点焊接头。本文提出了一种基于热导机制的焦点高频旋转点焊工艺方法。该方法利用热导焊接时材料对光纤激光吸收率大的优点,同时结合了焦点高频旋转重复扫描下的熔池热积累效应,来获取宽深比大且无气孔缺陷的搭接焊点。研究了焦点旋转点焊工艺中焊点的成形机理,焦点旋转参数及焊接工艺参数对焊点形貌的影响规律;并与传统激光点焊试验结果进行了对比,分析了两种工艺条件下的焊点组织及显微硬度。

2 试验方法及设备

选用 GH3128 高温合金进行试验,上板试样尺寸为 30 mm × 30 mm × 1 mm,下板试样尺寸为

30 mm × 30 mm × 3 mm。采用搭接方式进行激光点焊试验,激光器为美国 IPG 公司的 YLS-6000 型掺镱光纤激光器,最大输出功率为 6000 W,波长为 1060~1070 nm,光束聚焦参数为 8 mm · mrad,传输光纤直径为 200 μm,输出耦合准直镜焦距为 200 mm,光束直径为 30 mm,聚焦镜焦距为 300 mm。激光焦点旋转点焊示意图如图 1 所示,其中 f 为聚焦镜焦距, r 为焦点旋转半径, θ 为楔形镜楔角, δ 为通过楔形镜后光束的偏转角。采用激光焦点旋转装置^[18]调控激光焦点运动参数,利用楔形透镜使得入射激光束发生偏转,经聚焦后焦点发生水平方向偏移。通过电机带动楔形镜转动,实现了焦点围绕一点作平面圆周运动。试验焦点旋转半径为 1.5 mm,通过调节电机旋转频率改变焦点的旋转频率。试验过程中,激光功率为 1600 W,焦点作用于上板表面,采用半导体照明激光照射熔池表面,利用日本 Photron 公司的 Fastcam Mini UX100 彩色高速摄影仪对点焊过程的熔池行为进行观测记录。

传统激光点焊试验采用的激光传输与聚焦参数同上。制备焊点试样,将试样抛光后用王水进行腐蚀,利用日本 Olympus 公司的 GX51 金相显微镜观测焊点形貌及组织;利用美国 Future-Tech 公司的 FM-300 显微硬度仪分析焊点显微硬度分布规律。

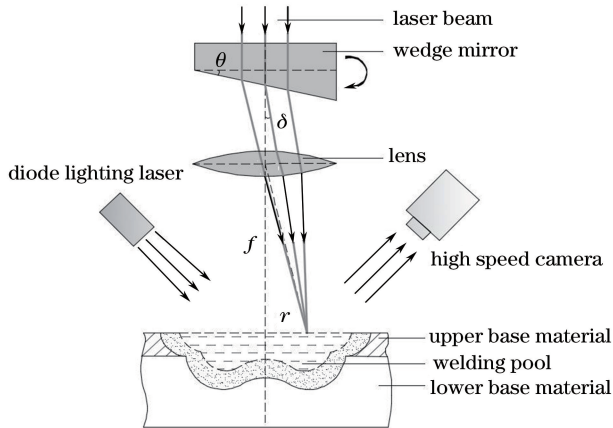


图 1 激光焦点旋转点焊示意图

Fig. 1 Schematic of laser focus rotation spot welding process

3 结果与分析

3.1 旋转点焊焊点形貌随时间的演变规律及成形机理分析

当焦点旋转频率为 30 Hz 时,焊点形貌及熔池表面状态随焊接时间的变化如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,在单道焊接时,焊点熔深浅,焊接羽辉小,焊

点表面无飞溅,焊接过程为典型的热导焊接。这是因为激光焦点的旋转频率大,焦点扫描速度快,光斑作用于一点的时间很短,即使在功率密度达到深熔阈值的条件下也无法形成深熔小孔。当焊接时间为 0.2 s 时,焊点熔池为全液态,焊点表面熔宽增大。通过分析可知,在激光重复焊接的过程中,熔池不断冷却和升温,熔池持续发生凝固和重熔现象。随着激光旋转

圈数的增加,热积累效应不断增大,环形焊缝温度持续升高,直至大于母材熔点,使得激光扫描区域全部变为液态,从而进入液态熔池的拓展阶段。并且 0.2 s

时焊点熔深仍小于上板的厚度,焊点呈非对称形貌。这是由于焊缝外围金属的热量散失大于环形焊点中心区,金属向焊点中心区熔化的趋势更加明显。

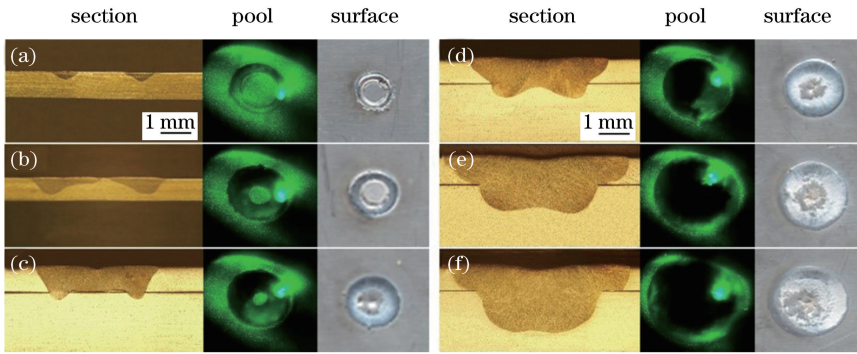


图 2 焊点形貌及熔池表面状态随焊接时间的变化。(a) 0.037 s;(b) 0.2 s;(c) 0.4 s;(d) 0.6 s;(e) 1.0 s;(f) 1.8 s

Fig. 2 Spot weld morphology and molten pool state versus welding time.

(a) 0.037 s; (b) 0.2 s; (c) 0.4 s; (d) 0.6 s; (e) 1.0 s; (f) 1.8 s

随着点焊时间的继续增加,环形熔池进一步向中心拓展,使得中心固态金属区域减小,同时焊点的熔深和熔宽逐渐增大。当焊接时间为 0.4 s 时,上板焊透并形成了有效的环形搭接焊点;随着焊接时间的进一步增加,焊点形貌呈双“V”形,如图 2(d)所示,此时焊点中心区域金属全部熔化,形成一个圆形熔池。当焊接时间为 1 s 时,下板液态金属区域向中间部分持续拓展并最终熔合为一体,凝固后焊点形貌由双“V”形转变为“W”形。最后,当焊接时间增加至 1.8 s 时,中间部分熔深持续增大并得到“U”形焊点。

间的进一步增加,熔池主要向下板焊点中间位置拓展,使得熔合面熔宽由 1.4 mm 增大到 3.86 mm;当点焊时间大于 0.6 s 后,熔合面处熔池截面为稳定的圆形,熔池主要向四周及下方拓展,熔合面熔宽增加幅度趋于稳定。这种变化主要与熔池的热积累及热扩散条件密切相关。

由焊点形貌变化规律可知,基于热导模式焊接的焦点高频重复扫描热积累效应是激光焦点旋转点焊的基本成形机理,焊点形态的演变规律是由环形高速重复加热的热源形式以及薄板搭接结构决定的。

当点焊时间大于 0.6 s 时,熔深和熔合面熔宽均与时间呈正相关,且增大幅度相近,宽深比变化不大。宽深比对点焊时间保持较低的敏感性将有利于提高该工艺的稳定性。

焊点尺寸随焊接时间的变化如图 3 所示。结合图 2 可以看出,当点焊时间小于 0.2 s 时,上板未焊透,此时熔合面熔宽为零;当点焊时间为 0.4 s 时,下板形成环形熔池,此时熔合面熔宽较小;随着点焊时

3.2 焦点旋转频率对焊点形貌及尺寸的影响规律

焦点旋转频率对焊点形貌及尺寸的影响分别如图 4、5 所示,可以看出,当激光功率为 1600 W,点焊

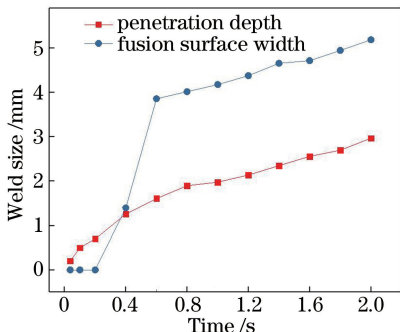


图 3 焊点尺寸随焊接时间的变化

Fig. 3 Spot weld size versus welding time

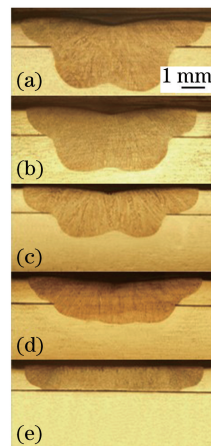


图 4 焦点旋转频率对焊点形貌的影响。(a) 30 Hz; (b) 50 Hz;(c) 70 Hz;(d) 90 Hz;(e) 110 Hz

Fig. 4 Influence of focus rotation frequency on spot weld morphology. (a) 30 Hz; (b) 50 Hz; (c) 70 Hz; (d) 90 Hz; (e) 110 Hz

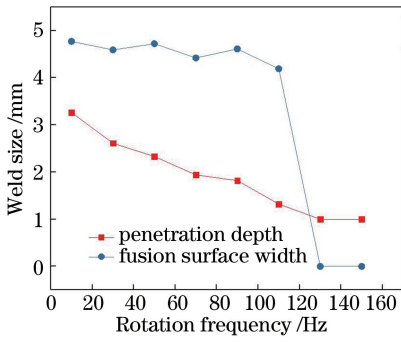


图 5 焊点尺寸随焦点旋转频率的变化

Fig. 5 Spot weld size versus focus rotation frequency

时间为 1.0 s, 离焦量为 0 mm 时, 焦点旋转频率的增大使得焊点形貌由“W”形向“U”形转变, 同时焊点熔深减小, 熔合面熔宽变化不明显, 因此, 宽深比随着旋转频率的增大而增大。当旋转频率过大时, 熔池仅存在于上板母材, 如图 4(e) 所示, 熔合面熔宽为 0 mm。随着旋转频率的增大, 相同时间内重复加热次数增加, 相对于外围低温无限体母材, 熔池

圆形区中心的热量散失更慢, 使得中心区域热积累效应更大, 熔化效果明显, 导致焊点形貌由“W”形向“U”形转变。

在相同的激光功率和焊接时间下, 热源输入到熔池的总能量不变。当频率增大时, 单次焊接速度加快, 单圈焊接热输入量减小, 使材料单次升温幅度减小, 即使相同时间下重复加热次数增加, 其总的热量散失也相对于低频率时更大, 因此热积累效应也更小, 从而使得熔池体量减小, 熔深减小; 而熔合面熔宽主要由扫描半径决定, 变化幅度小。

3.3 两种点焊方式下焊点宽深比及气孔缺陷对比

焦点旋转点焊所得典型焊点形貌为“W”形或“U”形, 其宽深比大。不同工艺参数下传统激光点焊焊点形貌见表 1。可以看出, 点焊时间、激光功率、离焦量以及聚焦镜焦距的改变对熔合面熔宽的改善均并不明显; 焊点形貌均为“T”字形, 焊点熔深大, 气孔缺陷明显。

表 1 不同工艺参数下传统激光点焊焊点形貌

Table 1 Spot weld morphologies by traditional laser spot welding under different process parameters

Welding time / s	Laser power / W	Defocusing / mm	Focus / mm	Weld geometry
1.0	1800	+2	150	
1.6	2000	+8	150	
1.0	1200	+2	300	
1.6	1400	+8	300	
1.6	3400	+25	300	

为了进一步对比焊点宽深比和气孔倾向, 进行了不同参数下两种点焊方式的工艺试验, 并测量了焊点宽深比和气孔倾向(单个焊点截面的气孔面积)^[19]。两种点焊方式下焊点质量随激光功率的变化如图 6 所示。从图 6(a) 可以看出, 在不同工艺条件下, 焦点旋转点焊的焊点宽深比为 1.7~2.7, 而传统点焊宽深比基本小于 1。这是因为激光焦点旋转点焊的过程稳定, 不产生深熔小孔, 宽深比较大; 而传统激光点焊为深熔模式焊接, 激光的强穿透性使得焊点熔深大, 同时, 激光非作用区域的熔池拓展行为受搭接界面接触热阻^[16-17]的影响明显, 使得焊点

熔宽在熔合面处发生突变, 焊点宽深比较小。

从图 6(b) 可以看出, 当离焦量为 0 mm 时, 随着激光功率的增大, 传统激光点焊产生气孔的倾向明显增大, 在 1800 W 时孔隙面积达到了 0.72 mm²; +8 mm 离焦时, 其气孔倾向仍然较大。而焦点旋转点焊的焊点气孔缺陷基本消失, 气孔倾向基本保持为零, 只在激光功率为 1800 W 以上时有少许微小气孔。这是因为焦点旋转点焊采用的热导焊接模式有效避免了深熔焊接模式才会产生的气孔缺陷。

3.4 旋转点焊与传统点焊组织及显微硬度对比

当激光功率为 1600 W, 焊接时间为 1.0 s, 离焦

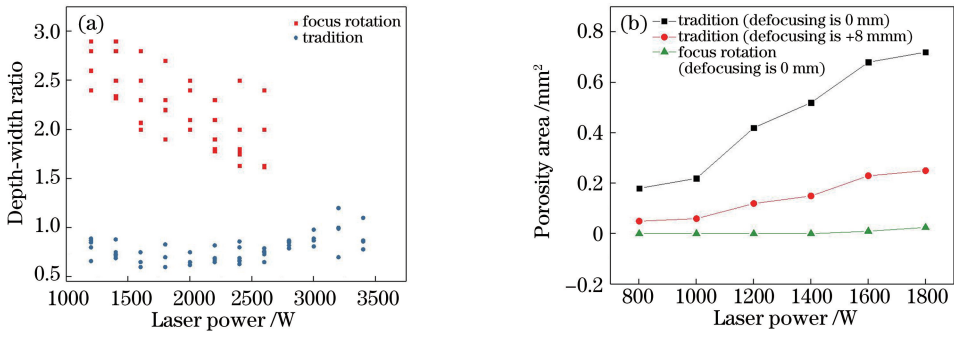


图 6 两种点焊方式下焊点质量随激光功率的变化。(a) 宽深比; (b) 气孔倾向
Fig. 6 Spot weld quality versus laser power under two spot welding processes.

(a) Width-depth ratio; (b) porosity repression

量为 0 mm 时,两种点焊方式的焊点显微组织分别如图 7、8 所示。从图 7 可以看出,传统激光点焊的焊点从熔合线至焊点中心依次为树枝晶和等轴晶。焊点组织呈典型的高能束焊接焊缝组织分布,具有明显的组织晶粒状态的过渡现象。由于焊点凝固

时,由熔合线向焊点中心的温度梯度逐渐减小,靠近熔合线处的温度梯度较大,因此,树枝晶垂直于熔合线向中心生长,其树枝晶的主轴较长,横向枝晶很短^[20-21];而中心区域的温度梯度小,呈树枝状等轴晶分布。

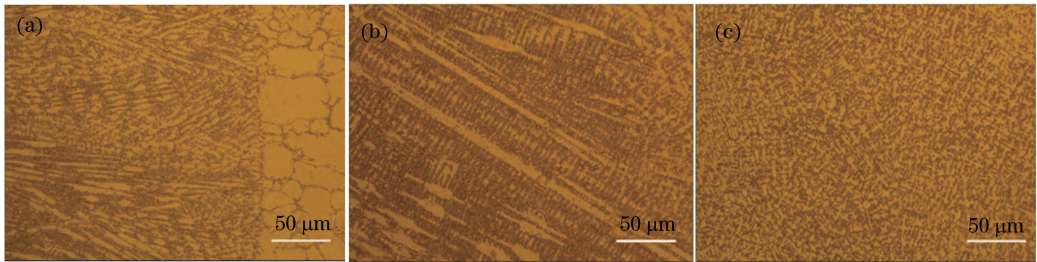


图 7 传统激光点焊焊点的显微组织。(a) 熔合线区; (b) 柱状晶区; (c) 中心等轴晶区
Fig. 7 Microstructure of spot weld under traditional laser spot welding process.
(a) Fusion line zone; (b) columnar grain zone; (c) centered equiaxed zone

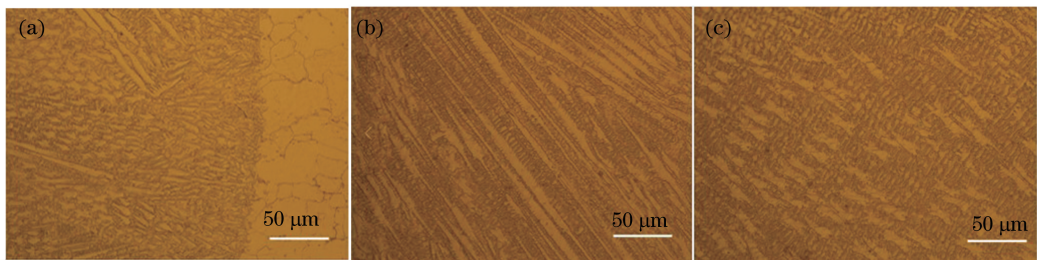


图 8 焦点旋转点焊焊点的显微组织。(a) 熔合线区; (b) 柱状晶区; (c) 中心区域
Fig. 8 Microstructure of spot weld under focus rotation spot welding process.
(a) Fusion line zone; (b) columnar grain zone; (c) central zone

从图 8 可以看出,焦点旋转点焊的焊点没有明显的组织晶粒状态的过渡现象,均为树枝晶形态,且主轴更长,其一次主轴由熔合线直至焊点中心;中心区附近分布着含有二次枝晶臂的短树枝晶。

两种点焊方式下焊点的显微硬度如图 9 所示。可以看出,两种焊点的显微硬度均大于母材的。传统激光点焊焊点区域内不同位置处的显微硬度相

近,但中心等轴晶区的硬度稍有增大。而激光旋转点焊焊点中心区域显微硬度远大于母材及其他区域的。

由于传统激光点焊显微组织在焊点中心处为等轴晶,而旋转点焊在焊点中心处没有出现等轴晶,因此,激光焦点旋转点焊工艺获得的焊点中心显微硬度较大。二者的树枝晶区域内均呈细长树枝晶形

态,故该区域内显微硬度差别不大。在两种激光点焊方式下,熔池凝固均表现为非平衡态的快速凝固

行为,获得的焊点组织晶粒均细于母材的,因此,焊点显微硬度均大于母材的。

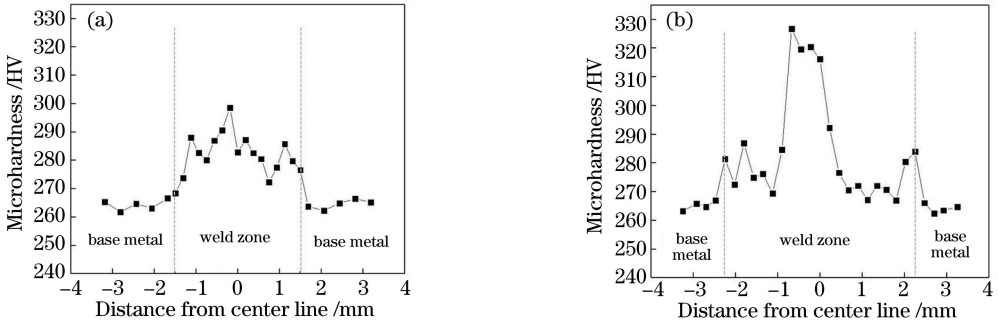


图 9 两种点焊方式下焊点的显微硬度。(a)传统;(b)焦点旋转

Fig. 9 Microhardness of spot weld under two spot welding processes. (a) Tradition; (b) focus rotation

4 结 论

运用激光焦点高频旋转的方法对 GH3128 高温合金进行了搭接点焊工艺试验,并且与传统激光点焊进行了对比,得到以下结论。

- 1) 激光焦点旋转点焊工艺的成形机理为基于热导焊接模式下的焦点高频重复扫描热积累效应。
- 2) 激光焦点旋转点焊工艺可以有效调控焊点形貌,获取具有较大宽深比的“W”形和“U”形焊点形貌,并且可有效抑制气孔缺陷。
- 3) 针对 GH3128 材料,与传统激光点焊相比,激光焦点旋转点焊工艺获得的焊点组织树枝晶主轴更长,且焊点中心区域无等轴晶。焊点区域总体显微硬度均大于母材的。

参 考 文 献

[1] Janota M, Neumann H. Share of spot welding and other joining methods in automotive production[J]. *Welding in the World*, 2008, 52(3/4): 12-16.

[2] Siva Shanmugam N, Buvanashakaran G, Sankaranarayanan K. Some studies on weld bead geometries for laser spot welding process using finite element analysis[J]. *Materials & Design*, 2012, 34: 412-426.

[3] Wang Y J, Yang W P. Research on laser spot-welding technology of Nb-Hf alloy nozzle extension section[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2017, 43(6): 88-96.
王英杰, 杨卫鹏. 铌钨喷管延伸段激光点焊工艺研究[J]. *火箭推进*, 2017, 43(6): 88-96.

[4] Yang Y S, Lee S H. A study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 94(2/3): 151-156.

[5] Wei S T, Liu R D, Lü D, *et al.* Study on fibre laser spot welding of TRIP980 steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 31(11): 1271-1281.

[6] Yang J. Study on the process behavior and defects control during laser deep penetration welding of aluminium alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
杨璟. 铝合金激光深熔焊接过程行为与缺陷控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.

[7] Saldi Z S, Kidess A, Kenjereš S, *et al.* Effect of enhanced heat and mass transport and flow reversal during cool down on weld pool shapes in laser spot welding of steel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 66: 879-888.

[8] Hu B, Hu S S, Shen J Q, *et al.* Modeling of keyhole dynamics and analysis of energy absorption efficiency based on Fresnel law during deep-penetration laser spot welding[J]. *Computational Materials Science*, 2015, 97: 48-54.

[9] Tao W. Quality monitoring and control of laser spot welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
陶汪. 激光点焊焊点质量监测与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

[10] Hajavifard R, Motahari M, Özden H, *et al.* The effects of pulse shaping variation in laser spot-welding of aluminum[J]. *Procedia Manufacturing*, 2016, 5: 232-247.

[11] Zhao S H. Optimizing of aluminum laser spot welding process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
赵守辉. 铝合金激光点焊工艺优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[12] Hayashi T, Matsubayashi K, Katayama S, *et al.* Reduction mechanism of porosity in tandem twin-spot laser welding of stainless steel[J]. *Welding International*, 2003, 17(1): 12-19.

- [13] Guan X W. Investigation on the method and device of fiber laser welding with focus rotation and vertical oscillation[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
官祥威. 光纤激光焦点旋转和垂直振动焊接方法及装置研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [14] Jin C, Mei S W, Hu P P, *et al.* Study on laser conduct welding process of stainless steel thin plates with thickness of 1.5 mm[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(19): 205-207, 210.
金诚, 梅述文, 胡佩佩, 等. 1.5 mm 不锈钢薄板纵缝激光热导焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(19): 205-207, 210.
- [15] Lei H D, Wang B R, Huang W R, *et al.* Laser conducting-limited welding of thin-wall HR-2 steel parts[J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 28-31, 34.
雷华东, 王宝瑞, 黄文荣, 等. HR-2 钢薄壁件激光热导焊研究[J]. 激光技术, 2005, 29(1): 28-31, 34.
- [16] Incropera F P, Dewitt D P, Bergman T L, *et al.* Fundamentals of heat and mass transfer[M]. Ge X S, Ye H, Transl. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 62-70.
英克鲁佩勒·弗兰克, 德推特·大卫, 伯格曼·狄奥多尔, 等. 传热和传质基本原理[M]. 葛斯石, 叶宏, 译. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 62-70.
- [17] Wang Q, Jiao J K, Zan S P, *et al.* Effect of thermal contact conductance on temperature field of CFRTP/stainless steel laser direct joining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402002.
王强, 焦俊科, 管少平, 等. 接触热导率对 CFRTP/不锈钢激光直接连接温度场的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402002.
- [18] Wu Q, Guan X W, Xiao R S. A laser welding device with focus rotation and vertical oscillation: 201510907252.7[P]. 2016-03-23.
武强, 官祥威, 肖荣诗. 一种焦点旋转和垂直振动的激光焊接装置: 201510907252.7[P]. 2016-03-23.
- [19] Zhao L, Tsukamoto S, Arakane G, *et al.* Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding[J]. Chinese Journal of 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.
- [20] Lu Y H, Li J W, Zhang Q Y, *et al.* Microstructure and microhardness of GH3536 high temperature alloy joint by electron beam welding[J]. Welding & Joining, 2010(9): 47-50.
陆业航, 李晋炜, 张庆云, 等. GH3536 高温合金电子束焊组织及显微硬度分析[J]. 焊接, 2010(9): 47-50.
- [21] Welding Society of China Mechanical Engineering Society. Welding handbook[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013: 727-729.
中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 727-729.