

激光焊接工艺对 GH188 合金焊缝成形及力学性能的影响

芦伟, 马旭颐, 巩水利, 杨璟

中航工业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 研究了激光焊接工艺对 GH188 合金焊接接头焊缝成形及力学性能的影响。结果表明, 高激光功率或低焊接速度对 GH188 合金焊缝成形不利, 使焊缝背面存在飞溅和轻微咬边现象, 接头焊缝区晶粒粗大且接头抗拉强度低。随着焊接速度的增大, 焊缝宽度减小, 焊缝背面飞溅减少; 随着激光功率的增大, 焊缝宽度增加, 焊缝背面飞溅增多。当激光功率为 2.8~3.2 kW、焊接速度为 6 m/min 时, 焊缝成形和接头拉伸性能均较好。

关键词 激光技术; 激光焊接; 光纤激光; 焊缝成形; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041409

Effect of Laser Welding Process on Weld Formation and Mechanical Property of GH188 Alloy

Lu Wei, Ma Xuyi, Gong Shuili, Yang Jing

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

Abstract The effect of laser welding process on the weld formation and mechanical property of GH188 alloy weld joint is studied. The results show that a high laser power or a low welding speed is disadvantageous for the weld formation of GH188 alloy, there exists the phenomenons of spatter and slight undercut on the weld back, and the grain in weld zone of joint is coarse and the tensile strength of joint is low. With the increase of welding speed, the weld width and the spatter on the weld back both decrease. With the increase of laser power, the weld width and the spatter on the weld back both increase. When the laser power is in the range 2.8-3.2 kW and the welding speed is 6 m/min, the weld formation and tensile property of weld joint are both good.

Key words laser technique; laser welding; fiber laser; weld formation; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.3900

1 引言

大飞机、载人航天和新一代战斗机等一批国家重大科技工程项目的实施, 对航空航天构件的轻量化、长寿命和高可靠性提出了新的要求。高温合金是 20 世纪 40 年代发展起来的一种新型材料, 具有抗氧化、耐腐蚀等优点, 可在较大复杂载荷下长期可靠工作, 其主要被用于现代航空和航天发动机热端部件的制造。GH188 合金是一种固溶强化型钴基高温合金, 在 980 °C 以下具有良好的热强度, 在 1100 °C 以下具有优良的高温抗氧化性, 且其成形及焊接等工艺性能良好, 适用于航空航天发动机燃烧室火焰筒、导向叶片及尾喷管等高温部件的制造^[1-2]。

发动机高温合金构件的轻量化要求使其需要大量使用薄壁结构^[3]。激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、焊接变形小、无需真空、柔性好等特点, 是航空航天发动机高温合金薄壁构件制造的理想焊接工艺之一^[4-6]。

高温合金元素多、成分复杂, 因此焊接接头容易产生气孔、结晶裂纹和液化裂纹等现象, 从而影响接头性

收稿日期: 2016-11-02; **收到修改稿日期:** 2016-12-22

作者简介: 芦伟(1988—), 女, 博士, 工程师, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: luwei870808@126.com

能^[7-10]。目前,有关高温合金焊接方面的研究报道主要针对镍基高温合金,如 GH4169^[11-14]。关于钴基 GH188 合金焊接,尤其是激光焊接的研究鲜有报道。因此,本文以工作温度可达 1000 °C 的 GH188 合金为对象,研究了焊接工艺对 GH188 合金激光焊接接头焊缝成形、显微组织和拉伸性能的影响,获得了优化参数,为 GH188 合金在航空和航天构件中的应用提供了参考。

2 实验

实验材料为 GH188 轧制板材,试板尺寸为 200 mm×160 mm×1.5 mm,化学成分见表 1。焊前采用机械打磨和化学清洗两种方法对待焊接试板进行处理。焊接实验在以 IPG 公司 YLS-5000 光纤激光器为核心的激光焊接系统中实现,采用六轴机械手实现机械传动。激光器最大输出功率为 5 kW,焦距为 300 mm,光斑直径为 0.6 mm。

表 1 GH188 合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of GH188 alloy (mass fraction, %)

Component	C	Cr	Ni	W	Fe	B	La	Mn
Content	0.05-0.15	20.0-24.0	20.0-24.0	13.0-16.0	≤3.0	≤0.015	0.03-0.12	≤1.25
Component	Si	P	S	Ag	Bi	Pb	Cu	Co
Content	0.20-0.50	0.020	0.015	≤3.0	≤0.015	0.03-0.12	0.07	Bal.

焊接热输入是影响焊缝成形质量以及接头性能的主要因素之一。对于激光焊接,焊接热输入能量 E 由激光功率 P 和焊接速度 ν 决定:

$$E = \frac{P}{\nu} \quad (1)$$

因此,实验主要考察激光功率 P 和焊接速度 ν 对焊缝成形和拉伸性能的影响。固定离焦量和保护气流量,通过调节激光功率和焊接速度,进行焊接实验,实验设计参数见表 2。选择离焦量为 0 mm;焊接过程中采用同轴、背面和侧吹三路气体保护的方式,保护气体为 Ar 气,保护气流量为:同轴 25 L/min、背面 15 L/min 和侧吹 25 L/min。

表 2 GH188 合金激光焊接工艺参数

Table 2 Process parameters of laser welding of GH188 alloy

Number	Laser power P /kW	Welding speed ν /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	Heat input energy E /($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}$)
1	2.8	2	80
2	2.8	4	43
3	2.8	6	28
4	2.8	8	21.5
5	2.4	6	24
6	3.2	6	32
7	3.6	6	36

焊接后检查焊缝表面成形质量,并采用 X 射线检测焊缝内部质量。利用线切割在垂直于焊道方向上切取焊接接头试样,经打磨、抛光和腐蚀后制成金相试样。利用日本 OLYMPUS 公司生产的 BX51M 型光学显微镜观察接头宏观形貌,取焊缝中间部位观察焊缝区微观组织形貌。

根据国家标准^[15]对 GH188 激光焊接接头进行拉伸实验。垂直于焊缝方向截取拉伸试样,使焊缝位于试样中心,试样几何形状与尺寸如图 1 所示。室温拉伸实验在德国 ZwickRoell 公司生产的 Z100 型材料万能试验机上进行,拉伸性能数据取三组有效数据的平均值。

3 实验结果与讨论

3.1 焊接工艺对焊缝成形质量的影响

图 2 所示为不同焊接速度下焊缝正反面成形质量和焊缝横截面宏观形貌照片。由图可见,当激光功率为 2.8 kW 时,获得全熔透焊缝的焊接速度为 2~6 m/min;当焊接速度增大到 8 m/min 时,热输入过低使焊

缝未熔透。X射线探伤检测发现,全熔透焊缝内部均无气孔、夹渣、未熔合等。另外,全熔透焊缝的正面成形质量均优于背面成形质量,焊缝背面容易产生金属飞溅。低焊接速度不利于获得较好的焊缝成形质量,在较低焊接速度(2 m/min)下,由于热输入较大,熔池反应剧烈,焊缝背面熔融金属飞溅明显,焊缝较宽,焊缝背面焊趾处产生轻微咬边。随着焊接速度的增大,焊接热输入减小,焊缝宽度以及焊缝背面飞溅减小。较高焊接速度有利于获得成形质量良好的焊缝,后续的工艺实验选择焊接速度为6 m/min。

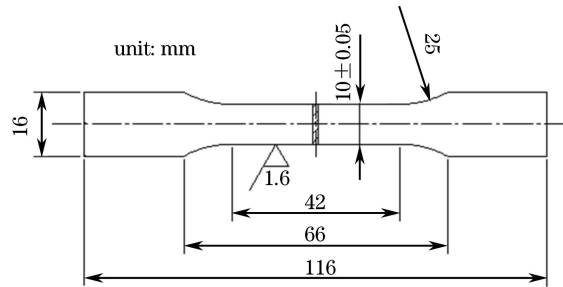


图1 拉伸试样几何示意图

Fig. 1 Geometric sketch of tensile specimen

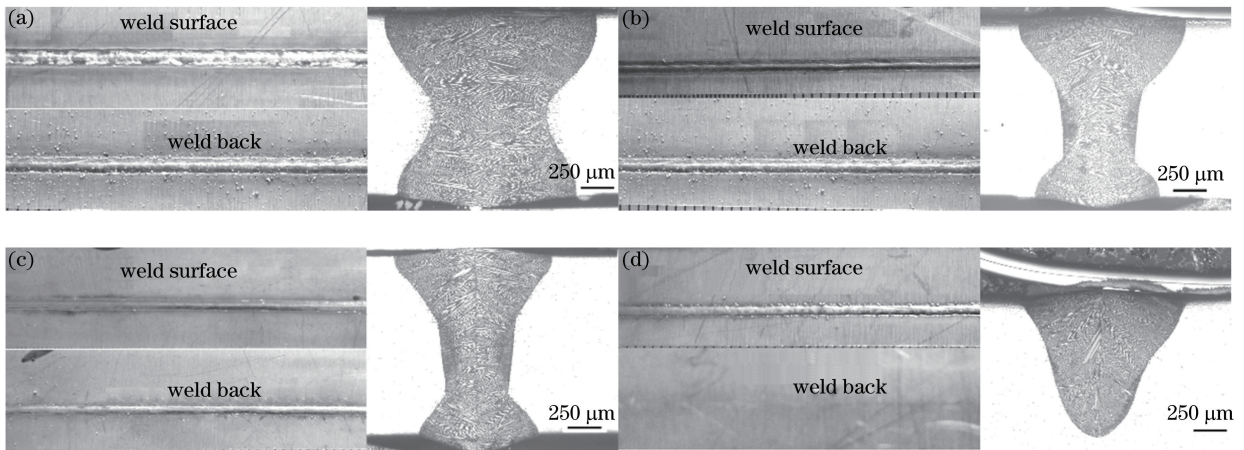


图2 不同焊接速度下焊缝形貌($P=2.8$ kW). (a) $v=2$ m/min; (b) $v=4$ m/min; (c) $v=6$ m/min; (d) $v=8$ m/min

Fig. 2 Weld appearance at different welding speeds ($P=2.8$ kW). (a) $v=2$ m/min;

(b) $v=4$ m/min; (c) $v=6$ m/min; (d) $v=8$ m/min

不同激光功率下焊缝正反面成形质量和焊缝横截面宏观形貌照片如图3所示。可以看出,当焊接速度为6 m/min时,获得全熔透焊缝的激光功率为2.8~3.6 kW;在较低激光功率(2.4 kW)下,热输入过低导致

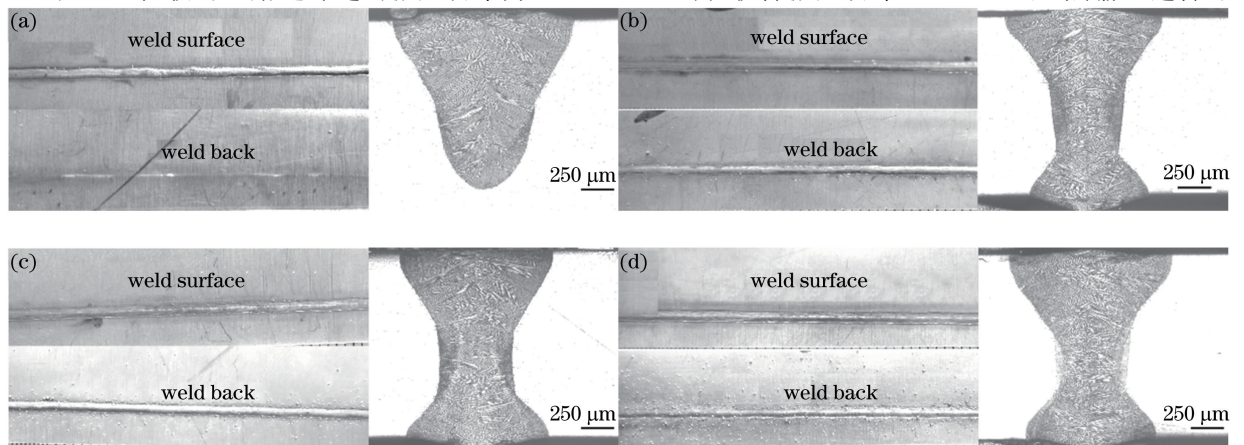


图3 不同激光功率下焊缝形貌($v=6$ m/min). (a) $P=2.4$ kW; (b) $P=2.8$ kW; (c) $P=3.2$ kW; (d) $P=3.6$ kW

Fig. 3 Weld appearance at different laser powers ($v=6$ m/min). (a) $P=2.4$ kW;

(b) $P=2.8$ kW; (c) $P=3.2$ kW; (d) $P=3.6$ kW

焊缝未熔透。全熔透焊缝内部均无气孔、夹渣、未熔合等。另外,较高激光功率不利于获得良好的焊缝成形。在较高激光功率(3.6 kW)下,焊缝背面飞溅明显,且焊趾处存在咬边缺陷。随着激光功率的增大,焊接热输入增大,焊缝宽度以及焊缝背面飞溅呈增加趋势。综上所述,当激光功率为 2.8~3.2 kW 时,可获得良好的焊缝成形质量。

3.2 焊接工艺对显微组织的影响

图 4 所示为不同焊接速度下接头焊缝区的金相组织照片。从图中可见,GH188 激光焊接接头焊缝区显微组织为奥氏体,呈树枝状结晶。随着焊接速度的增加,焊缝树枝晶尺寸减小,且在较低焊接速度下,树枝晶较粗大。当焊接速度从 2 m/min 增大到 4 m/min 时,树枝晶尺寸明显减小,而当速度进一步增大到 6 m/min 时,树枝晶尺寸变化较小。分析其原因认为,在激光功率不变的条件下,增大焊接速度有利于减小焊接热输入,从而导致晶粒细化。在低焊接速度下,由于热输入较大,熔池凝固时间长,树枝晶较粗。

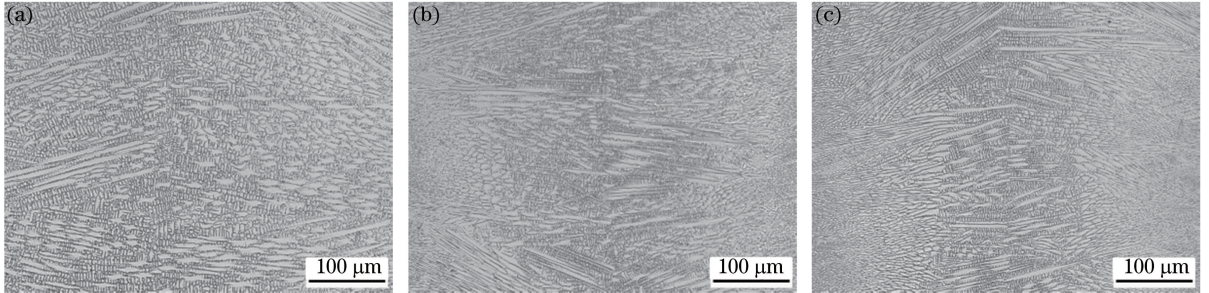


图 4 不同焊接速度下焊缝区显微组织($P=2.8$ kW).(a) $v=2$ m/min;(b) $v=4$ m/min;(c) $v=6$ m/min

Fig. 4 Microstructures of weld zone at different welding speeds ($P=2.8$ kW).

(a) $v=2$ m/min; (b) $v=4$ m/min; (c) $v=6$ m/min

激光功率对接头焊缝区显微组织的影响如图 5 所示。由图可见,随着激光功率的增加,焊缝区树枝晶尺寸增大,且当激光功率达到 3.6 kW 时,树枝晶尺寸明显增大。激光功率对焊缝组织的影响主要归因于焊接热输入的变化。在焊接速度一定的条件下,激光功率越高,焊接热输入越大,焊接熔池凝固时间越长,晶粒越容易长大。

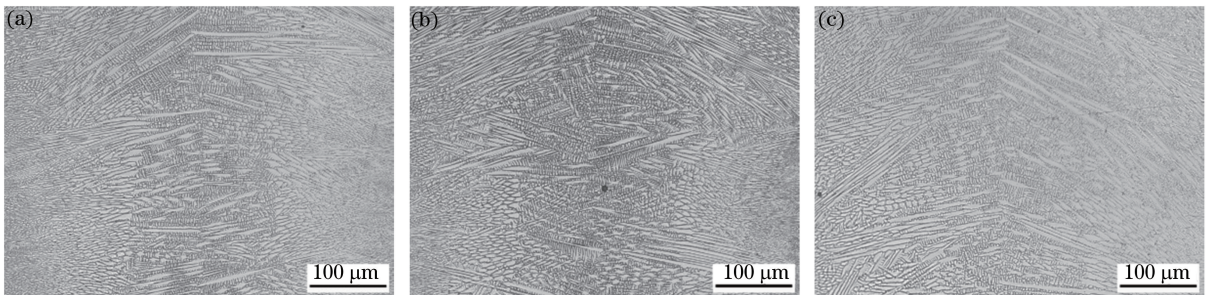


图 5 不同激光功率下焊缝区显微组织($v=6$ m/min).(a) $P=2.8$ kW;(b) $P=3.2$ kW;(c) $P=3.6$ kW

Fig. 5 Microstructures of weld zone at different laser powers ($v=6$ m/min). (a) $P=2.8$ kW;

(b) $P=3.2$ kW; (c) $P=3.6$ kW

3.3 焊接工艺对拉伸性能的影响

图 6 所示为焊接速度对焊接接头横向抗拉强度的影响。由图可见,在不同焊接速度下,接头的抗拉强度均小于母材的。另外,随着焊接速度从 2 m/min 增大到 4 m/min,接头抗拉强度约增大 5.2%(从 951.3 MPa 增大到 1001.2 MPa);当焊接速度进一步增大到 6 m/min 时,接头抗拉强度几乎不变。

激光功率对接头抗拉强度的影响如图 7 所示。由图可见,在不同激光功率下,接头的抗拉强度也均小于母材的。当激光功率从 2.8 kW 增大到 3.2 kW 时,接头抗拉强度变化较小;当激光功率进一步增大到 3.6 kW 时,接头的抗拉强度略有降低,约降低 1.4%(从 1001 MPa 降低到 987 MPa)。综上所述,当焊接速度为 6 m/min、激光功率为 2.8~3.2 kW 时,可获得良好的拉伸性能。在该工艺参数下,接头的抗拉强度可达 1000 MPa,焊接接头系数可达 0.95。

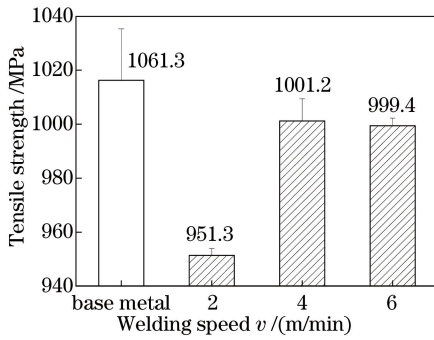


图6 焊接速度对接头抗拉强度的影响

Fig. 6 Effect of welding speed on tensile strength of weld joints

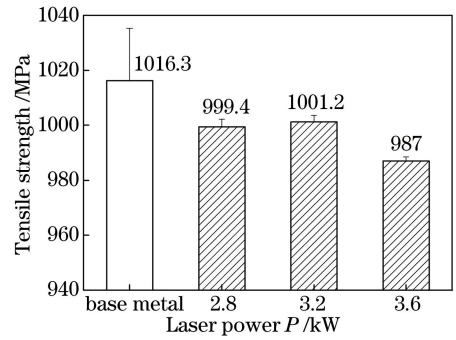


图7 激光功率对接头抗拉强度的影响

Fig. 7 Effect of laser power on tensile strength of weld joints

焊接接头的拉伸性能与焊缝成形及组织形态密切相关。GH188 激光焊接接头的拉伸断裂均发生于焊缝区,焊缝区抗拉强度低于母材的。从力学角度考虑,当接头承受横向拉伸时,强度较低的焊缝先进入塑性状态,母材对焊缝的塑性变形具有拘束作用,使焊缝金属处于三轴应力状态而得到强化^[16]。母材对焊缝的拘束作用与焊缝宽度密切相关,焊缝宽度减小,拘束作用增强,接头抗拉强度增加。从组织形态的角度考虑,焊缝区晶粒尺寸越细小,接头抗拉强度越高。GH188 激光焊接接头的抗拉强度主要受焊缝宽度和焊缝区晶粒尺寸的影响。当激光功率一定时,随着焊接速度从 2 m/min 增大到 4 m/min,焊缝宽度及焊缝区晶粒尺寸减小,接头抗拉强度增大;当焊接速度从 4 m/min 增大到 6 m/min 时,焊缝宽度和焊缝区晶粒尺寸变化较小,接头抗拉强度几乎不变。在低焊接速度下,焊接热输入较大,使得焊缝较宽且焊缝区晶粒粗化,从而造成接头抗拉强度较低。当焊接速度一定时,随着激光功率的增大,焊缝宽度和焊缝区晶粒尺寸呈增大趋势。当激光功率从 2.8 kW 增大到 3.2 kW 时,焊缝宽度和焊缝区晶粒尺寸变化较小,接头抗拉强度变化较小;在较大激光功率(3.6 kW)下,焊缝区晶粒明显变粗,接头的抗拉强度有所下降。

4 结 论

研究了焊接工艺对 GH188 合金激光焊接头焊缝成形、显微组织和拉伸性能的影响。结果表明:当激光功率为 2.8~3.2 kW、焊接速度为 4~6 m/min 时,可获得焊缝成形质量良好的焊接接头。在低焊接速度(低于 2 m/min)或高激光功率(高于 3.6 kW)下,焊缝背面存在明显飞溅和轻微咬边现象。当激光功率一定时,焊接速度越大,焊缝区树枝晶尺寸越细小;当焊接速度一定时,激光功率越大,树枝晶尺寸越大。在低焊接速度(低于 2 m/min)或高激光功率(高于 3.6 kW)下,树枝晶明显粗化。当激光功率一定时,随着焊接速度从 2 m/min 增大到 4 m/min,接头抗拉强度增大约 5.2%;当焊接速度进一步增大到 6 m/min 时,接头抗拉强度变化不明显。在焊接速度一定的条件下,当激光功率从 2.8 kW 增大到 3.2 kW 时,接头抗拉强度几乎不变;当激光功率进一步增大到 3.6 kW 时,接头的抗拉强度略有降低,降低约 1.4%。在低焊接速度(低于 2 m/min)或高激光功率(高于 3.6 kW)下,接头抗拉强度降低。获得良好焊缝成形和力学性能的激光焊接工艺参数:激光功率范围为 2.8~3.2 kW,焊接速度为 6 m/min。

参 考 文 献

- [1] Editorial Committee of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] Huang Qian Yao, Li Han Kang. Superalloy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [3] Schubert E, Klassen M, Zerner I, *et al.* Light-weight structures produced by laser beam joining for future application in automobile and aerospace industry[J]. J Mater Process Tech, 2001, 115(1): 2-8.
- [4] 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, 惠松晓. 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.
- [5] Mölsä A, Turunen K, Mattila K J, *et al.* Analysis of laser beam weldability of Inconel 738 superalloy[J]. Mater Charact, 2010, 61: 569-574.
- [6] Mao Zhitao, Pu Xiaowei, Wang Weideng, *et al.* Comparison of welding deformation and residual stress in Q345 steel thin-plate joints induced by laser beam welding and gas metal arc welding[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 602010
毛志涛, 蒲晓薇, 汪维登, 等. Q345 钢激光焊与气体保护焊的焊接变形与残余应力对比[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 602010
- [7] Guo Jianting. Materials science and engineering for superalloy (II) [M]. Beijing: Science press, 2008.
郭建亭. 高温合金材料学(II) [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] Xu Tao, Gong Zailong, Shen Yangwei, *et al.* Study on the welding procedure of heat-resistant alloy[J]. Turbine Technology, 2005, 47(4): 313-314.
徐 涛, 宫在龙, 沈阳威, 等. 高温合金焊接工艺研究[J]. 汽轮机技术, 2005, 47(4): 313-314.
- [9] Yan F, Wang C M, Wang Y J, *et al.* A study of the mechanism of laser welding defects in low thermal expansion superalloy GH909[J]. Mater Charact, 2013, 78(4): 21-30.
- [10] Montazeri M, Ghaini F M. The liquation cracking behavior of IN738LC superalloy during low power Nd:YAG pulsed laser welding[J]. Mater Charact, 2012, 67(3): 65-73.
- [11] Ojo O A, Richards N L, Chaturvedi M C. Contribution of constitutional liquation of gamma prime precipitate to weld HAZ cracking of cast Inconel 738 superalloy[J]. Scripta Mater, 2004, 50(5): 641-646.
- [12] Qu F S, Liu X G, Xing F, *et al.* High temperature tensile properties of laser butt-welded plate of Inconel 718 superalloy with ultra-fine grains[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(10): 2379-2388.
- [13] Moosavy H N, Aboutalebi M R, Seyedein S H, *et al.* Modern fiber laser beam welding of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloys[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57(4): 12-20.
- [14] Gong Weihuai, Chen Yuhua, Lü Zhen, *et al.* Microstructure and properties of 0.2 mm thick sheet GH4169 by laser microwelding[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603008.
龚伟怀, 陈玉华, 吕 榛, 等. 0.2 mm 厚 GH4169 薄片激光微焊接接头的组织性能[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603008.
- [15] 国家标准局. 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [16] Zhang Yanhua. Principles of welding mechanics and structural integrity[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2007.
张彦华. 焊接力学与结构完整性原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.