

光束偏移量对 DD407/GH1140 激光焊接头性能的影响

黄永德^{1,2}, 周兴汶¹, 龙伟民², 吕 榛³, 刘奋成¹, 何 鹏⁴

(1. 南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

(2. 郑州机械研究所 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001)

(3. 中航工业南方航空工业(集团)有限公司, 湖南 株洲 412002)

(4. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 对航空发动机整体叶盘所采用的 DD407 和 GH1140 异种材料进行了激光对接试验, 分析了光束偏移对接头力学性能的影响及典型接头横截面的组织特征, 并分析了光束偏移对焊缝微观硬度影响。结果表明, 该异种材料激光焊接头强度可达到 466.3 MPa, 且光束偏移量对接头强度影响不大, 主要取决于 GH1140 母材; 焊缝横截面呈典型的“酒杯状”, 主要由焊缝两侧的枝状晶及中心的等轴晶组成; 接头的显微硬度从 GH1140 侧经焊缝到 DD407 侧呈逐渐递增趋势, W 和 Co 元素的固溶强化、 γ' 强化相的含量的增加、晶粒粗化是显微硬度上升的原因。

关键词: 光束偏移; 激光焊接; 异种材料; 接头性能

中图分类号: TG456.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)05-1620-05

在航空制造领域, 为了满足高性能航空发动机的设计需求, 整体叶盘制造工艺技术越来越受到重视。采用整体叶盘制造技术可将发动机转子叶片和轮盘形成一体, 省去了传统连接中的榫头、榫槽及锁紧装置等, 减少结重量及零件数量, 避免榫头气流损失, 提高气动效率, 使发动机结构大为简化, 现已在各国军用和民用航空发动机上得到广泛应用, 如 EJ200、F119、F414 等军用发动机^[1,2]。虽然整体叶盘有着诸多优点, 但是其制造工艺却非常复杂, 整体叶盘的综合制造工艺技术成为世界性难题。

在整体叶盘制造工艺过程中, 各种成形技术相互渗透, 形成整体叶盘复合制造工艺, 无法以一种方法替代其他所有工艺方法^[1,2]。目前, 普遍采用的整体叶盘制造技术主要有: 精密铸造及锻造技术、精密焊接技术、数控铣削技术、数控电解加工技术等等。就精密焊接技术而言, 主要有高能束焊^[3,4]、线性摩擦焊^[5]等技术。在整体叶盘的制造过程中, 通常用激光焊将单个叶片组成叶片环, 然后用电子束焊接技术将锻造和电解加工成形的轮盘腹板与叶片环焊接成整体叶盘结构^[1]。叶片的工作条件多为高温、高压、高转速、气流交变等恶劣环境, 常用单晶材料制备叶片, 而叶片环基体材料则多用高温合金。因此, 在叶片环制造

过程中涉及到单晶与高温合金异种材料的激光焊技术。虽然, 近年来各种高温合金及其激光焊接均有大量研究, 但对于高温合金与单晶的异种材料焊接研究较少^[6-10]。另外, 高温合金与单晶异种材料的焊接中, 焊缝中合金元素稀释或者增加都会改变接头的组织成分, 影响其力学性能。本实验选取常见的单晶材料 DD407 以及高温合金材料 GH1140 进行激光对接试验, 通过改变光束偏移量来调整焊缝中合金元素的含量, 分析光束偏移量对于该异种金属的激光焊接接头力学性能及组织特征的影响。

1 实 验

试验材料选用固溶态 GH1140 铁镍基高温合金板材和 DD407 镍基单晶棒材。两材料的化学成分如表 1 及表 2 所示。GH1140 高温合金试样加工成板状, 其显微组织如图 1 所示, 尺寸为 40 mm×20 mm×1.5 mm。DD407 镍基单晶则由原始棒材经线切割加工成 1.5 mm 厚的薄片圆, 垂直于生长方向的横截面组织形貌如图 2 所示, DD407 半圆片的直径边与 GH1140 板材进行激光对接。GH1140 组织主要为奥氏体基体, 腐蚀后在其晶内及晶界上可以观察到块状金黄色 TiN 和灰色 TiC。DD407 显微组织主要由基体相 γ 相和强

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(51365044, 51565041); 郑州机械研究所新型钎焊材料与技术国家重点实验室开放基金(SKLABFMT201404)

作者简介: 黄永德, 男, 1974 年生, 副教授, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: huangydhm@nchu.edu.cn

化相 γ' 相组成，晶粒取向一致。 γ 相是由大量固溶元素组成的具有面心立方结构的镍基奥氏体相。 γ' 相是以 Ni_3Al 为基的金属间化合物，其体积分数高达 70%， γ' 相是从 γ 相上共格析出的，与 γ 相一样也具有面心立方结构。

焊前将试样表面和对接端面用砂纸打磨，去除表面氧化层和油污，然后采用丙酮清洗并吹干。焊接试验所用设备为德国 ROFIN 公司生产的 FL020 型光纤激光器。焊后截取接头横截面金相试样，分别采用 $CuSO_4$ 溶液(10 mL HCl + 2 g $CuSO_4$ + 50 mL H_2O)、 $FeCl_3$ 乙醇溶液(20 mL C_2H_5OH + 4 mL HCl + 1 g $FeCl_3$) 和王水(10 mL HNO_3 + 30 mL HCl)对 DD407、GH1140 及焊缝进行腐蚀，在体式显微镜和 MR5000 倒置金相显微镜下观察焊缝截面宏观形貌和接头金相组织。

由于材料尺寸限制，接头拉伸试样线切割加工为 18 mm×1.5 mm×0.3 mm 非标准样，其中，沿焊接方向的切割厚度为 0.3 mm，深度方向为 1.5 mm。采用 Instron5543 型微拉伸试验机对接头进行拉伸试验，每个光束偏移量条件下取 3 组拉伸数据，得到相应条件下的平均拉伸强度。采用 WT-401MVDE 型显微硬度计测量焊缝横截面上水平中心线的硬度分布，测试标距为 0.1 mm。采用 Oxford Inca X-Act 型能谱仪对焊接接头进行能谱分析。

表 1 GH1140 的化学成分

Table 1 Chemical composition of GH1140 ($\omega/\%$)

C	Ni	Cr	W	Mo	Al	Ti	Mn	Si	Fe
0.08	40	21	1.4	2.1	0.3	1.0	0.3	0.3	Bal.

表 2 DD407 的化学成分

Table 2 Chemical composition of DD407 ($\omega/\%$)

Cr	Al	W	Mo	Co	Ti	Ta	Ni
8.00	6.00	5.00	2.25	5.50	2.00	3.50	Bal.

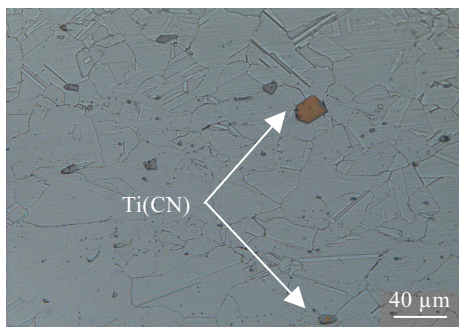


图 1 GH1140 母材组织

Fig.1 Microstructure of GH1140 base metal

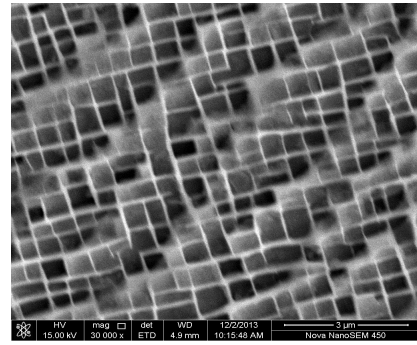


图 2 DD407 母材横截面组织

Fig.2 Cross section of DD407 base metal

通过大量工艺预试验确定焊接最佳参数如下：激光功率 1300 W，焊接速度 20 mm·s⁻¹，光斑直径 0.6 mm，离焦量 0 mm，保护气为工业纯 Ar，气流量为 10 L·min⁻¹。经过预试验及焊缝宽度的测量，确定光束偏移量为±0.2 mm。定义光束偏向 DD407 时的方向为正，光束偏移量的设置如图 3 所示。

2 结果及分析

2.1 光束偏移量对接头拉伸强度的影响

表 3 列出了光束偏移量分别为+0.2、0、-0.2 mm 情况下的接头室温拉伸强度数据。

图 4 为典型的拉伸试样断裂位置图，在不同的光束偏移量条件下，接头均断裂在 GH1140 母材侧。

经测试 GH1140 母材的抗拉强度为 452 MPa。根据表 3 数据，发现光束偏移量对接头的拉伸强度影响不大，接头抗拉强度在(450±13.5) MPa 左右，GH1140 母材的强度决定了接头的强度。单纯从接头强度需求出发，光束偏移量为 0 时，接头抗拉强度较高。

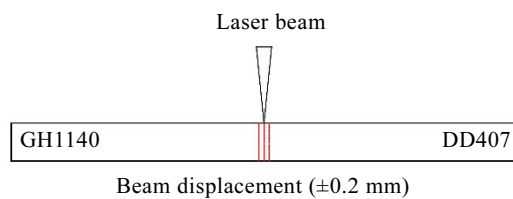


图 3 光束偏移量示意图

Fig.3 Schematic of beam displacement

表 3 不同光束偏移量下的接头抗拉伸强度

Table 3 Tensile strength of joints in different beam displacements

Beam displacements/mm	-0.2	0	+0.2
Tensile strength/MPa	446.5	466.3	439.8

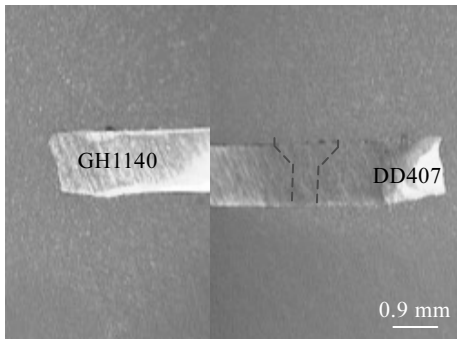


图 4 拉伸试样断裂位置图
Fig.4 Fractured position of joint

2.2 接头的显微组织

对比不同光束偏移量条件下的接头横截面形貌,发现其整体宏观形貌差别不大。因此,取光束偏移量为 0 时的典型接头进行组织分析。

典型接头的横截面宏观形貌如图 5 所示。从图 5 中可以看出,焊缝中未见裂纹、气孔等缺陷,焊缝上宽下窄,最宽处达到 2 mm 左右,而下面熔宽在 0.6 mm 左右,呈典型的“酒杯状”,并以激光作用中心为基准对称分布,这符合连续激光焊焊缝的特点。焊缝横截面上半区呈“洋葱环”状,存在分层现象,这是由于异种金属在激光高能束热源作用下熔化,熔池对称流动,不同的熔化金属不完全混合,且激光的快速加热及冷却使得熔池中金属来不及均匀化。

图 6 为图 5 中各区放大图。图 6a 为 GH1140 熔合线附近的显微组织图,由图可见,对比母材的等轴晶组织(如图 1),焊缝内侧为粗大的枝状晶,枝状晶的生长方向基本垂直于熔合线且向中心生长,根据母材的组织特征,枝状晶主干为面心立方结构的镍基奥氏体相,

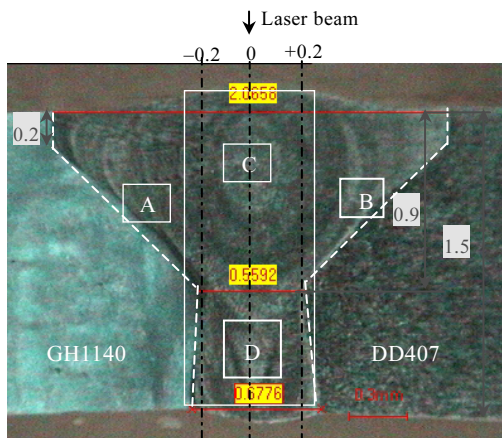


图 5 接头横截面宏观形貌
Fig.5 Morphology of joint cross section

即 γ 相,枝晶间存在一定的成分偏析,表现出颜色的差异。原先存在于母材中的块状 $Ti(CN)$ 颗粒消失。DD407 侧焊缝也呈现枝状晶组织,如图 6b,枝晶的生长方向明显不同,一个垂直于熔合线,而另一个垂直于母材的[001]方向。根据 DD407 母材的组织分析,靠近 DD407 侧焊缝的枝晶主干为组织 γ' 相,而晶间为 γ 相。因为 DD407 母材中 γ' 相占 70% 的体积比,在快速加热冷却的激光焊条件下,组织成分不可能均匀化。焊缝近上表面中心区的组织形态如图 6c 所示。由图可见,原先部分垂直于熔合线生长的枝晶,其生长方向发生变化,两侧都变为垂直于母材的[001]方向,而且在焊缝中心上侧出现了一个等轴晶区,如图 6c 中虚线区域。生长方向的改变是择优生长的结果,生长方向主要有两个,温度梯度方向及最易生长方向。在焊缝中心,温度梯度的影响越来越小,最易生长方向起决定作用,因而出现生长方向改变的现象。

2.3 光束偏移量对接头显微硬度的影响

图 7 为不同光束偏移量条件下,近上表面水平线上,接头显微硬度的分布情况。由图可见,接头的显微

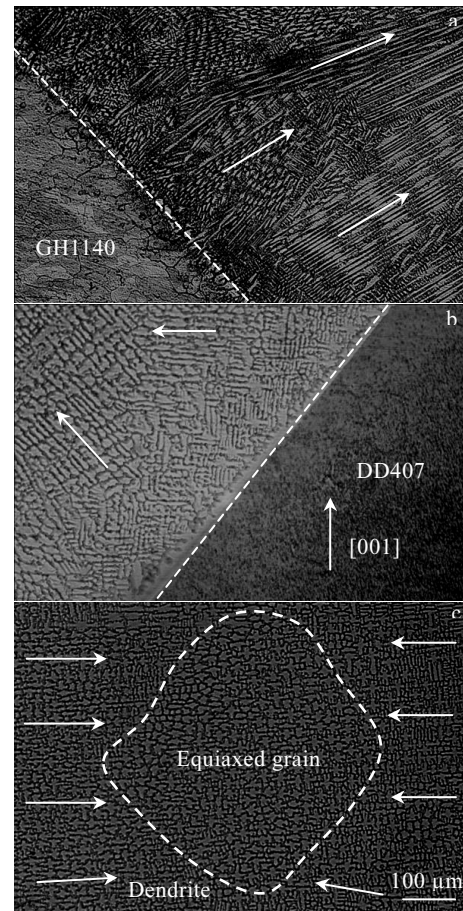


图 6 图 5 中焊接接头不同区域的显微组织
Fig.6 Microstructures of different areas of weld in Fig.5: (a) area A, (b) area B, (c) area C

硬度变化趋势一致, 即从 GH1140 侧经焊缝到 DD407 侧, 其显微硬度呈逐渐递增趋势, 并且都高于 GH1140 母材。这也印证了拉伸试验中接头都断裂在 GH1140 母材上的试验结果。GH1140 母材侧熔合线附近没有出现明显的软化或硬化, 这主要跟焊接方法有关, 激光焊接接头的热影响区较窄。当光束偏移量为-0.2 mm 时, 焊缝区整体的微观硬度与 GH1140 母材差别不大。相应地, 光束偏向 DD407 越多, DD407 的熔合量增加, 焊缝显微硬度也增加, 但都小于 DD407 母材的显微硬度。

3 讨论

通过对接头显微硬度分布分析发现, 光束偏移量对接头的显微硬度分布有明显的影响。对于 GH1140 同种材料激光焊来说, 焊缝的显微硬度较母材是下降的, 主要因为焊缝组织以奥氏体 γ 枝晶状为基, 而 GH1140 母材原有的一次碳化物强化相减少, 因而, 导致其硬度值的下降^[11]。对于 DD407/GH1140 异种材料连接而言, 在不同的光束偏移量条件下, 焊缝的显微硬度相当于或明显高于 GH1140 母材, 如图 7 所示。造成焊缝显微硬度发生变化的原因有多种, 如元素含量的变化、组织成分的变化、晶粒的大小、固溶强化、强化相的析出等等^[12]。

当焊缝近似以激光作用中心为基准对称分布时, 焊缝中元素含量可以采用下式进行量化。

$$\omega t = \frac{1}{2}(\omega t_1 + \omega t_2) + \frac{\Delta S}{S}(\omega t_1 - \omega t_2) \quad (1)$$

式中, ωt 为焊缝中某种元素的质量分数, ωt_1 和 ωt_2 分别为 2 种母材中该元素的质量分数, S 和 ΔS 分别为焊缝面积及光束偏移所改变区域的面积。具体计算如下: 焊缝自上而下依次划分为 2.07 mm×0.2 mm 的矩形及底边长分别为 2.07, 0.56 和 0.68 mm 的 2 个等腰梯形, 如图 5 所示, 焊缝总面积约 1.7 mm²。在光束偏移量为 0.2 mm 时, 光束偏移所改变区域的面积约

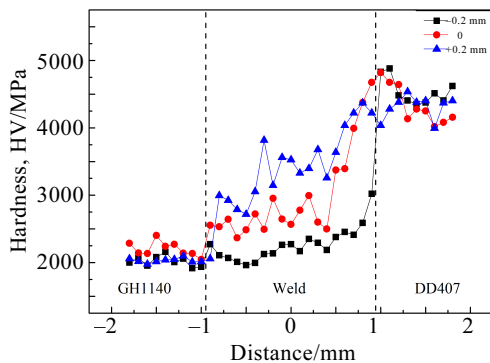


图 7 不同光束偏移量条件下的显微硬度分布

Fig.7 Distribution of micro-hardness of joint cross sections in different beam displacements

0.2 mm×1.5 mm, 两者面积比 $\Delta S/S$ 约为 0.17。将母材成分代入公式进行计算, 理论计算结果列于表 4, 同时对不同光束偏移量下的实际焊缝, 对应于图 5 中 D 区, 进行能谱分析, 其实测结果列于表 5。从表中可以看出, 部分元素含量与理论分析值较为一致。与 GH1140 母材成分相比, 焊缝中 Ni, Al, Co, W 等合金元素含量升高。其中, Co, W 等合金元素使得焊缝组织的固溶强化效果提高。而 Ni, Al 元素的增加使得焊缝中 γ' 相量增加, 从而使得焊缝的显微硬度升高。

元素含量的不同会改变焊缝的组织成分。根据两母材组织成分的分析, GH1140 组织主要为奥氏体 γ 相基体, 而 DD407 则是由体积分数高达 70% 的 γ' 相和 30% 的 γ 相组成。在不同光束偏移量条件下, DD407 在焊缝中熔合量发生变化, 造成 γ' 强化相含量不同, 最后导致其硬度分布的差异。通过理论公式确定 γ' 相在焊缝中的含量, 如式(2)所示,

$$C_{\gamma'} = \left(\frac{1}{2} \pm \frac{\Delta S}{S}\right) C_{DD407} \quad (2)$$

式中, $C_{\gamma'}$ 和 C_{DD407} 分别为焊缝中 γ' 相的增加量及 DD407 母材中的 γ' 相含量, S 和 ΔS 分别为焊缝面积及光束偏移所改变区域的面积, 各面积计算同式(1), 根据式(2)计算可得, 在光束偏移量为-0.2 和 0.2 mm 时, 焊缝中 γ' 相的占比依次增加 23.1% 和 46.9%。因此, γ' 强化相含量的增加也是提高其显微硬度的原因。

另外, 就晶粒大小而言, 焊缝中的枝晶尺寸大于 DD407 母材但小于 GH1140 母材 (对比图 2 和图 6 可知)。根据 Hall-Petch 公式^[12], 多晶体的屈服强度与其晶粒大小成反比, 因而, 焊缝显微硬度高于 GH1140 母材, 而低于 DD407 母材。

表 4 焊缝元素含量的理论值

Table 4 Theoretical value for chemical composition of weld metal ($\omega/\%$)

Beam displaced position	Ni	Al	W	Co
+0.2 mm	58.59	4.12	3.81	3.68
-0.2 mm	49.15	2.18	2.59	1.81

表 5 光束偏移对焊缝元素含量的影响

Table 5 Chemical composition of weld metal in different beam displacement ($\omega/\%$)

Beam displaced position	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	W
+0.2 mm	4.06	0.86	1.83	14.11	13.97	3.59	55.69	2.44	3.43
-0.2 mm	1.94	0.70	1.14	19.51	28.53	1.64	41.27	2.47	2.90

4 结 论

1) DD407 与 GH1140 的异种激光焊接头强度在 (450±13.5)MPa 左右, 接头均断裂于 GH1140 母材, 光束偏移量对接头的拉伸强度影响不大, 主要取决于 GH1140 母材的强度。

2) DD407 与 GH1140 的异种激光焊焊缝横截面呈典型的“酒杯状”。GH1140 侧焊缝为粗大的枝状晶, 枝状晶的生长方向基本垂直于熔合线; DD407 侧焊缝同为枝状晶, 但出现两个明显不同的生长方向; 焊缝中心偏上区域出现等轴晶组织。

3) 接头的显微硬度从 GH1140 侧经焊缝到 DD407 侧呈逐渐递增趋势, 并且都高于 GH1140 母材。W, Co 等元素的固溶强化、 γ' 强化相含量的增加、晶粒大小的变化是显微硬度上升的原因。

参考文献 References

- [1] Yang Jinfu (杨金发), Zhang Jun (张 军), Li Jiayong (李家永) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2015, 481 (12): 70
- [2] Zhang Haiyan (张海艳), Zhang Lianfeng (张连锋). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2013, 58(S2): 38
- [3] Yang Huiyan(杨慧艳), Liu Dong(刘 东). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(4): 565
- [4] Wu Bing(吴 冰), Mao Zhiyong(毛智勇), Guo Haiding(郭海丁) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(1): 16
- [5] Wang Xinyu (王新宇), Li Wenya (李文亚), Ma Tiejun (马铁军). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2015, 58(20): 56
- [6] Gong Weihuai (龚伟怀), Chen Yuhua (陈玉华), Lv Zhen (吕榛) *et al. Chinese Lasers* (中国激光) [J], 2011, 38(6): 124
- [7] Wu Dong (吴 栋), Lu Shanping (陆善平), Li Dianzhong (李殿中). *Transactions of The China Welding Institution* (焊接学报)[J], 2014, 35(09): 69
- [8] Liu Chunyan (刘春艳), Ma Rui (马 瑞), Tan Caiwang (檀财旺) *et al. Chinese Lasers* (中国激光)[J], 2014, 41(8): 72
- [9] Ao Sansan (敖三三), Luo Zhen (罗 震), Shan Ping (单 平) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(8): 2099
- [10] Han Fengkui (韩凤奎), Yan Ping (燕 平), Zhao Jingchen (赵京晨) *et al. Journal of Iron and Steel Research* (钢铁研究学报)[J], 2011, 23(9): 55
- [11] Xiong Jiangang (熊建钢), Wang Liquan (王力群), Hu Qiang (胡强) *et al. Electric Welding Machine* (电焊机) [J], 2001(11): 7
- [12] Daniel Henkel, Alan W Pense. *Structure and Properties of Engineering Materials*[M]. New York: Mcgraw-Hill Higher Education, 2002

Effect of Beam Displacement on Joint Properties of Laser Welding DD407/GH1140 Joint

Huang Yongde^{1,2}, Zhou Xingwen¹, Long Weimin², Lv Zhen³, Liu Fencheng¹, He Peng⁴

(1. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals & Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450001, China)

(3. China National South Aviation Industry Limited Company, Zhuzhou 412002, China)

(4. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Laser butt welding of DD407 and GH1140 commonly used for aeroengine blisk was conducted. The effects of beam displacement on mechanical properties, microstructure characteristics, and microhardness of the laser joints were analyzed. The results show that the tensile strength of the joint reaches 466.3 MPa, which is almost not affected by beam displacements, while determined by the performance of base metal GH1140. The morphology of joint cross section is "wine-cup shaped", and the microstructure of the weld mainly consists of dendritic grains of both sides of the weld and equiaxed grains in the weld centre. The distribution of micro-hardness gradually increases from the base metal of GH1140 to the weld and to the base metal of DD407 in different laser beam displacements, which results from the solution strengthening of W and Co elements, the increased content of γ' strengthening phase, and the coarsened grains in the weld.

Key words: beam displacement; laser welding; dissimilar materials; joint performance

Corresponding author: He Peng, Ph. D., State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, E-mail: Hepeng@hit.edu.cn