

基体预热对激光沉积修复 GH4169 合金性能的影响

卞宏友¹ 赵翔鹏¹ 曲 伸² 王世杰³ 杨 光¹ 钦兰云¹ 王 维¹

¹沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136

²中国航空工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司焊接研究所, 辽宁 沈阳 110043

³沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要 研究了基体预热对激光沉积修复 GH4169 合金试样的残余应力、组织和拉伸性能的影响。结果表明, 基体预热至 300 °C 的 GH4169 合金试样, 残余应力 x 向分力 σ_x 的平均降幅为 59.4 MPa, 降低了 11.7 %。残余应力 y 向分力 σ_y 的平均降幅为 189.7 MPa, 降低了 44.6 %。沉积层枝晶间析出 Laves 相呈现颗粒状的碎化现象。抗拉强度和屈服强度与未预热的修复试样基本一致, 断后伸长率为 12.3%, 提高了近一倍, 达到锻件标准。试验表明基体预热可有效提高激光沉积修复 GH4169 合金的室温拉伸性能。

关键词 激光技术; 激光沉积修复; GH4169 合金; 预热; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号 TG15

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0702003

Effect of Substrate Preheating on Property of GH4169 Alloys Repaired by Laser Deposition

Bian Hongyou¹ Zhao Xiangpeng¹ Qu Shen² Wang Shijie³ Yang Guang¹
Qin Lanyun¹ Wang Wei¹

¹Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aerouautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China

²Welding Institute, AVIC Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation LTD, Shenyang, Liaoning 110043, China

³School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

Abstract The effect of substrate preheating process on the residual stress, microstructure, and tensile property of GH4169 alloy samples repaired by laser deposition is studied. The results show that when the substrate is preheated to 300 °C, as for the GH4169 alloy sample, the average decrease in amplitude of the residual stress along x direction (σ_x) is 59.4 MPa, which is reduced by 11.7%. The average decrease in amplitude of σ_y along y direction is 189.7 MPa, which is reduced by 44.6%. The Laves phase of the interdendritic precipitation in deposition layers presents a granular fragmentation phenomenon. Both the tensile strength and yield strength are basically equivalent to those of repaired samples without preheating, and the elongation rate is 12.3%, which is a onefold increase. These indicate the standard of forging is reached. The experimental results indicate that substrate preheating can effectively improve the tensile property of GH4169 alloys repaired by laser deposition at room temperature.

Key words laser technique; laser deposition and repair; GH4169 alloy; preheating; microstructure; tensile property

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

GH4169 合金是一种时效沉淀强化的镍基高温合金, 在 650 °C 以下具有良好的强度和塑性。在航空发动机领域目前主要被用于制造机匣、叶片、涡轮盘等零部件^[1-2]。但 GH4169 镍基合金零件在机械加工的过

收稿日期: 2016-01-14; 收到修改稿日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51375316)、航空科学基金(2014ZE54028)、辽宁省高等学校科学研究一般项目(L2014054)

作者简介: 卞宏友(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光沉积成形/修复技术方面的研究。E-mail: bhy@sia.cn

程中,常常会因为各种原因产生尺寸超差、铣切沟槽等加工缺陷,或者在零件使用过程中,恶劣的工作环境导致裂纹、点蚀、磨损等失效情况出现。激光沉积修复技术因热影响区小、工艺重复性好及可实现缺损部位近净成形修复等优点,在 GH4169 合金等贵重金属零件的快速修复方面表现出明显的技术优势和较大的应用前景^[3-4]。

激光沉积修复技术是以损伤零件为基体,采用逐层熔化堆积的方式,对损伤部位进行三维成形修复。激光修复的局部能量输入以及层层沉积时局部热量的累积,在修复体内部以及修复体与基体间都会产生高温梯度场的不均匀温度场,修复部位易产生过大的残余应力,导致修复件的变形甚至开裂,影响激光沉积修复件的性能和精度^[5]。另外,激光沉积修复属于快速熔凝,对 GH4169 合金修复体起强化作用的 γ'' 和 γ' 强化相析出速度缓慢而来不及析出,且修复层内枝晶间存在连续态的 Laves 相(脆性相),其高脆性和大量强化元素铌(Nb)的消耗最终导致材料强度、延展性等性能下降^[6]。这种情况下的激光沉积修复试样强度与塑性仅达到铸件标准^[7]。

为满足锻件修复的性能要求,有必要进一步优化修复组织、降低工件残余应力,改善修复件力学性能,而基体预热下的修复是有效手段之一。基体预热可以提高金属材料对激光的吸收率,减小激光修复体与基体之间的温度梯度,降低熔池冷却速度,延长熔池凝固时间。国内外的学者对于基体预热已经作了一定的研究。Jendrzewski 等^[8-9]的激光熔覆研究表明,基体预热有助于消减残余应力和抑制沉积层裂纹缺陷的产生。李永强等^[10]在铝合金的搭接激光焊中进行了预热。闫世兴等^[11]在 HT250 基体上分别以不同预热温度制备了 NiCuFeBSi 合金熔覆层,结果表明预热有利于提高熔覆层的强度与性能。龙日升等^[12]利用有限元软件建立了激光沉积过程的数值模拟模型,计算结果表明基板预热到 400 °C 可以显著降低成形过程中试样的热应力变化幅度。

本文通过基体预热下的激光沉积修复 GH4169 合金的试验与测试,分析基体预热对 GH4169 合金激光沉积修复试样残余应力、显微组织和拉伸性能的影响。

2 试验材料与方法

激光沉积修复 GH4169 合金试验是在沈阳航空航天大学构建的 LDM-800 系统上完成的,该系统由 6 kW 光纤激光器、悬臂式三轴平移运动系统、集成冷却和保护气系统的同轴熔覆头、双桶送粉器、气体循环净化系统以及氩气保护箱等组成。基体修复区局部预热是由感应加热系统^[13]完成,该系统包括:通过调节电流(最大输入电流为 37 A)来控制加热温度及加热速度的高频(30 kHz)感应加热设备;可根据试样修复部位的实际加热区域形状大小需求进行仿形设计制造的感应加热器;对试样加热温度进行实时检测的红外热像仪(MAG30,上海巨哥电子科技有限公司,中国。测温范围为 200~1500 °C,最大采样帧频可达 50 Hz)。

试验中的基体材料选用经时效处理的 GH4169 镍基合金,基体尺寸为 200 mm×33 mm×3 mm。熔覆材料为 Inconel 718 球形粉末,粒度为 53~150 μm ,基体与粉末材料的化学成分如表 1 所示。针对 GH4169 合金薄壁类零件穿透性裂纹的修复需求,将待修复部位加工成贯通槽形式,如图 1(a)所示。槽长 L 为 33 mm,上沿宽 W 为 14 mm,高 H 为 3 mm,坡角 θ 为 30°。采用多道多层沉积方式修复试样,修复过程中在贯通槽下方添加一块背板,用于承接粉末并作为激光熔池的基体。试验中基体状态分为未预热和预热至 300 °C。激光沉积修复 GH4169 合金试样的工艺参数为:激光功率 1400 W,扫描速度 7 mm/s,送粉速率 6.5 g/min,搭接率 40%,层高 0.5 mm。基体预热下的激光沉积修复 GH4169 合金试样如图 1(b)所示。

表 1 GH4169 和 Inconel 718 合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of GH4169 and Inconel 718 powders (mass fraction, %)

Element	C	Mo	Ni	Fe	Cr	Al	Ti	Nb
GH4169	0.046	2.92	51.96	Bal.	18.16	0.48	1.04	5.02
Inconel 718	0.03	3.17	53	Bal.	19.2	0.54	0.65	5.16

根据修复试样的翘曲变形现象判断,较大的残余应力应位于 KJS-3 型修复区与基体结合区域,因此,图 1 所示应力检测点选在距离修复区与基体结合面 2 mm 处的位置,并采用压痕应力测试仪(KJS-3,中国科学院金属研究所,中国)进行应力检测。沿垂直于激光扫描方向用线切割截取修复试样,试样经打磨、抛光和经

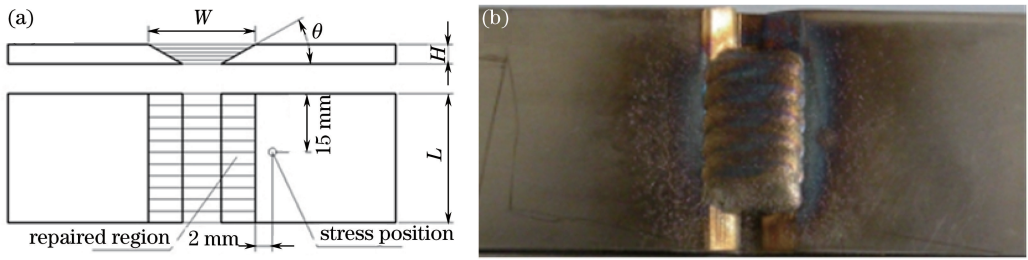


图 1 (a) 修复件槽损伤试样示意图; (b) 基体预热的激光沉积修复试样

Fig. 1 (a) Schematic diagram of repaired specimens with damaged grooves; (b) specimens with substrate preheating repaired by laser deposition

盐酸(HCL)、硝酸(HNO₃)、氢氟酸(HF)的混合液(体积比 V_{HCL}:V_{HNO₃}:V_{HF} = 80:7:13)化学腐蚀后制成金相试样,并采用光学显微镜(OLYMPUS-DP71, 奥林巴斯公司, 日本)和扫描电镜(S3400, 日立公司, 日本)对金相样品进行微观组织观察分析。采用试验机(Z050, Zwick 公司, 德国)测试修复试样的拉伸性能, 拉伸件尺寸如图 2(a)所示, 其中 R 为圆角半径; 拉伸试样如图 2(b)所示, 拉伸时采用位移控制, 加载速率为 1 mm/min。

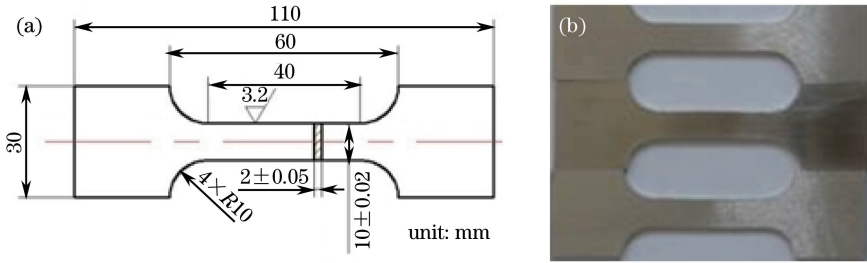


图 2 (a) 拉伸性能测试试样尺寸; (b) 拉伸试样

Fig. 2 (a) Sketch of specimen for tensile performance testing; (b) specimen for tensile testing

3 试验结果与分析

3.1 残余应力

表 2 为激光沉积修复 GH4169 镍基合金在未预热和预热至 300 °C 时的残余应力测试数据, 其中, σ_x 为垂直于激光扫描方向的应力, σ_y 为平行于激光扫描方向的应力。由表 2 可以看出, 基体上应力检测点的残余应力为压应力。这是因为在激光沉积修复过程中, 激光束能量的瞬时局部输入, 使熔池及其附近区域与零件基体间产生了很高的温度梯度, 温度较低的基体区域对熔池及其附近区域的受热膨胀变形起到约束作用^[7]。

表 2 修复试样的残余应力

Table 2 Residual stress of repaired specimen

As-deposited (no preheating)			Preheating state (preheated to 300 °C)		
Sample	σ_x /MPa	σ_y /MPa	Sample	σ_x /MPa	σ_y /MPa
1	-575	-586	4	-460	-425
2	-491	-213	5	-442	-146
3	-463	-478	6	-449	-137
Average	-509.7	-425.7	Average	-450.3	-236

由表 2 可知, 当零件基体预热温度达到 300 °C 时, 相比于未预热试样, 基体上 σ_x 的平均降幅为 59.4 MPa, 降低了 11.7%; σ_y 的平均降幅为 189.7 MPa, 降低了 44.6%。基体预热下的激光沉积修复试样, 残余应力有了明显的降低。对基体修复部位预热到一定温度, 可降低激光修复过程中修复体与基体之间的温度梯度和修复体内部的温度梯度, 因此起到了消减残余应力的作用。

3.2 显微组织

图 3 所示为未预热沉积态修复试样和基体预热至 300 °C 的 GH4169 合金激光沉积修复试样的光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)的显微组织。由图 3(a)、(c)可以看出, 基体预热至 300 °C 的 GH4169 合

金修复试样与未预热沉积态修复试样的 OM 组织基本一致,均呈现出外延生长的柱状枝晶特点,枝晶有较强的取向性,沿平行于沉积高度的方向生长^[14]。由图 3(b)、(d)可以看出,未预热试样和预热试样均在枝晶间析出了 Laves 相,但是 Laves 相的析出形态有所不同。预热试样显微组织中的 Laves 相呈现出碎化的现象,由未预热试样组织中的连续状变成断裂的颗粒状形态,晶粒大小在 4.8 μm 左右,比未预热试样中的 Laves 相略粗一点。

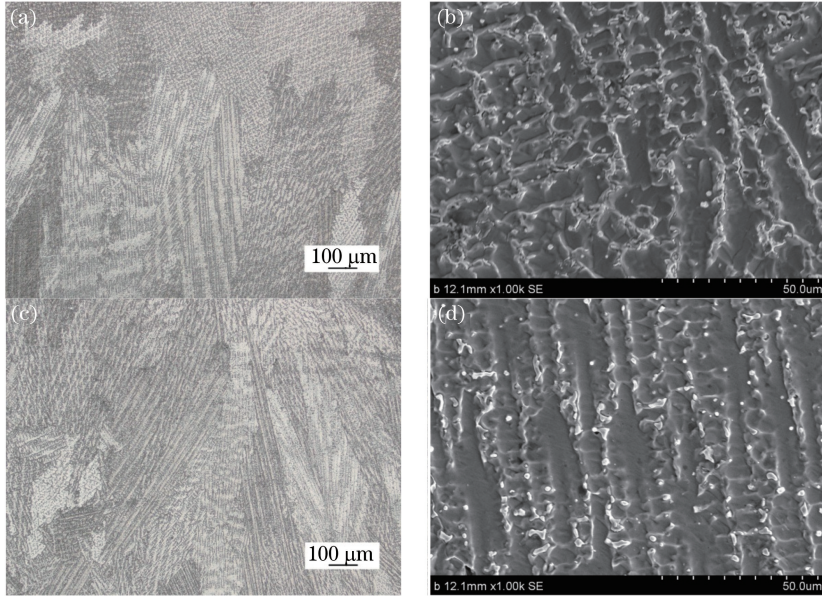


图 3 GH4169 合金修复试样的显微组织。(a) 未预热修复试样的 OM 照片；(b) 未预热修复试样的 SEM 照片；(c) 预热修复试样的 OM 照片；(d) 预热修复试样的 SEM 照片

Fig. 3 Microstructure of repaired GH4169 alloy specimen. (a) OM images of repaired samples without preheating; (b) SEM images of repaired samples without preheating; (c) OM images of repaired samples with preheating; (d) SEM images of repaired samples with preheating

3.3 拉伸性能

室温下 GH4169 合金未预热沉积态和预热态修复试样的拉伸性能测试数据如表 3 所示,图 4 所示为激光沉积修复 GH4169 合金拉伸性能测试试样,修复试样的断裂处均位于修复区,这表明在基体与修复体之间形成了致密的冶金结合。未预热的沉积态试样的平均抗拉强度 σ_b 和平均屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 分别为 816 MPa 和 631 MPa,断后伸长率 δ 为 6.7%,与铸造技术标准(Q/5B 453-1995)水平相当。基体预热至 300 °C 的激光沉积修复 GH4169 合金试样的平均抗拉和屈服强度为 813 MPa 和 475 MPa,平均断后伸长率为 12.3%,其中抗拉强度与未预热沉积态相当,而断后伸长率则达到了锻件标准(Q/3B 548-1996)的水平,超过未预热试样近 1 倍左右。

表 3 室温下激光沉积修复 GH4169 合金的拉伸性能

Table 3 Tensile performance of GH4169 alloys repaired by laser deposition at room temperature

Sample	As-deposited (no preheating)			Sample	Preheating state (preheated to 300 °C)		
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
1	850	652	6.5	4	852	479	11.0
2	806	616	7.5	5	799	470	14.0
3	793	625	6.0	6	787	476	12.0
Average	816	631	6.7	Average	813	475	12.3
	Casting standard (Q/5B 453-1995)				825	640	5.0
	Wrought standard (Q/3B 548-1996)				1340	1100	12

由于基体预热至 300 °C 的 GH4169 合金修复试样与未预热沉积态修复试样的显微组织基本一致,预热修复试样的力学性能变化不大。基体预热降低了熔池的冷却速度,使得沉积层中的合金元素 Nb 有比较充

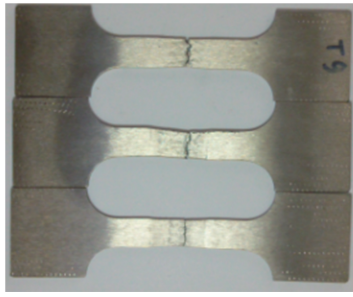


图 4 拉伸测试试样

Fig. 4 Specimen for tensile testing

分的时间扩散,有利于减小偏析,减少了脆性有害相 Laves 相的形成,其中 Laves 相往往是裂纹形成与扩展的通道且可显著降低修复试样的塑性^[15]。从图 3 可以看到,经过预热后沉积层中的 Laves 相出现碎化现象,除少数几个较大的颗粒外,多数均为较细小的颗粒。因此,经预热后修复试样的断后伸长率有显著的提高,达到了锻件标准。

4 结 论

1) 基体预热至 300 °C 的激光沉积修复 GH4169 合金试样的残余应力明显减小, σ_x 平均降低了 11.7%, σ_y 平均降低了 44.6%;

2) 相比于未预热的沉积态修复试样,基体预热至 300 °C 的 GH4169 合金修复试样组织中的 Laves 相出现碎化现象,析出形态由连续态变为颗粒状;

3) 与未预热的沉积态修复试样相比,基体预热至 300 °C 的 GH4169 合金修复试样的抗拉强度变化不大,但断后伸长率提高了近一倍,达到了锻件技术标准。

参 考 文 献

- 1 Tang Zhongjie, Guo Tieming, Fu Ying, *et al.*. Research present situation and the development prospect of nickel-based superalloy[J]. Metal World, 2014(1): 36-40.
唐中杰, 郭铁明, 付 迎, 等. 镍基高温合金的研究现状与发展前景[J]. 金属世界, 2014(1): 36-40.
- 2 Shi Changxu, Zhong Zengyong. Development and innovation of superalloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1281-1288.
师昌绪, 仲增埔. 我国高温合金的发展与创新[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1281-1288.
- 3 Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing, *et al.*. Application of laser forming repair technology on the aerial castings[J]. Foundry Technology, 2008, 29(3): 391-394.
薛 蕾, 黄卫东, 陈 静, 等. 激光成形修复技术在航空铸件修复中的应用[J]. 铸造技术, 2008, 29(3): 391-394.
- 4 Qi Yongai, Zhao Jianfeng, Xie Deqiao, *et al.*. Flexural property of GH4169 nickel-based superalloy by laser repair[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103009.
戚永爱, 赵剑峰, 谢德巧, 等. 激光修复 GH4169 镍基高温合金的弯曲性能[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103009.
- 5 Yang Jian, Huang Weidong, Chen Jing, *et al.*. Residual stress on laser rapid forming metal part[J]. Applied Laser, 2004, 24(1): 5-8.
杨 健, 黄卫东, 陈 静, 等. 激光快速成形金属零件的残余应力[J]. 应用激光, 2004, 24(1): 5-8.
- 6 Qi Huan. Review of INCONEL 718 alloy: Its history, properties, processing and developing substitutes[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(8): 92-100.
齐 欢. INCONEL 718 (GH4169) 高温合金的发展与工艺[J]. 材料工程, 2012(8): 92-100.
- 7 Bian Hongyou, Zhao Xiangpeng, Yang Guang, *et al.*. Effect of heat treatment on residual stress and tensile properties of laser deposition repair GH4169 superalloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1003001.
卞宏友, 赵翔鹏, 杨 光, 等. 热处理对激光沉积修复 GH416 合金残余应力和拉伸性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003001.
- 8 Jendrzejewski R, Sliwiński G, Krawczuk M, *et al.*. Temperature and stress fields induced during laser cladding[J].

- Comput Struct, 2004, 82(7): 653-658.
- 9 Zhang Y M, Drake R P, Glimm J. Numerical evaluation of the impact of laser preheat on interface structure and instability[J]. Phys Plasmas, 2007, 14(6): 062703.
- 10 Li Yongqiang, Zhao He, Zhang Weihua, *et al.*. Laser lap welding of aluminum alloy with preheating[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 251-254.
李永强, 赵 贺, 张伟华, 等. 预热铝合金搭接激光焊[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 251-254.
- 11 Yan Shixing, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.*. Effect of preheating temperature on microstructure and property of laser clad Ni-based alloy coating on gray cast iron substrate[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(1): 30-36.
闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. 预热温度对灰铸铁表面激光熔覆镍基涂层组织与性能的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(1): 30-36.
- 12 Long Risheng, Liu Weijun, Xing Fei, *et al.*. Effects of substrate preheating on thermal stress during laser metal deposition shaping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 241-247.
龙日升, 刘伟军, 邢 飞, 等. 基板预热对激光金属沉积成形过程热应力的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 241-247.
- 13 Bian Hongyou, Han Shuanglong, Li Ying, *et al.*. Effects of different induction heating parameters on the substrate temperature field during laser deposition repair[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 111403.
卞宏友, 韩双隆, 李 英, 等. 感应加热参数对激光沉积修复基板温度场的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 111403.
- 14 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Laser Solid Forming[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 126-135.
黄卫东, 林 鑫, 陈 静, 等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 126-135.
- 15 Zhang Yaocheng. Studies on component segregation and strengthening mechanism of laser cladding INCONEL 718 alloy coating[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 107-132.
张尧成. 激光熔覆 INCONEL 718 合金涂层的成分偏聚与强化机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 107-132.