



预热下激光沉积修复 GH4169 合金 表面损伤的残余应力和拉伸性能

卞宏友¹, 董文启¹, 曲 伸², 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, 沈阳 110136;

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

摘 要: 结合 GH4169 高温合金表面损伤的修复需求, 研究基体预热对不同基体厚度的激光沉积修复 GH4169 高温合金试样残余应力、显微组织、拉伸性能的影响规律。结果表明: 与未预热修复试样相比, 基体预热 300 ℃ 的 GH4169 合金激光沉积修复试样的残余应力 σ_x 、 σ_y 均明显降低, 修复区枝晶间析出的 Laves 相变得粗壮并呈现颗粒状的碎化趋势, 抗拉强度略微降低, 但断后伸长率提高 60% 以上, 达到锻件标准。基体厚度越大, 修复体厚度越小, 修复试样的残余应力减小, 枝晶间析出的 Laves 相减少, 抗拉强度与断后伸长率均略有增加。

关键词: GH4169 合金; 激光沉积修复; 预热; 残余应力; 显微组织; 拉伸性能

文章编号: 1004-0609(2018)-06-1136-07

中图分类号: TG15; TG178

文献标志码: A

GH4169 合金(美国相近牌号 Inconel 718)具有良好的强度和塑性, 在航空航天、石油化工等领域得到广泛应用, 尤其在航空航天领域存在大量高温合金制造的大型薄壁零部件, 如机匣、叶片、涡轮盘、鼓筒轴等^[1-2]。这些零部件在机械加工过程中, 常常会因各种原因而产生尺寸超差、铣切沟槽等加工损伤, 或在零件服役使用过程中, 因恶劣的工作环境而发生裂纹、点蚀、磨损等损伤失效情况。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巨大的应用前景^[3-5]。

激光沉积修复时的局部能量输入以及层层沉积时的局部热量累积, 在修复体内部以及修复体与基体之间都会产生高温度梯度的不均匀温度场, 修复部位易产生过大的残余应力, 导致修复件变形甚至开裂, 影响修复件的性能及尺寸的稳定性^[6]。另外激光沉积修复属于快速熔凝, 凝固速度快, 导致对 GH4169 合金修复体起强化作用的 γ'' 和 γ' 强化相, 因析出速度缓慢来不及析出, 且修复层内枝晶间存在连续态的 Laves 相, 由于其高脆性和大量强化元素 Nb 的消耗, 导致材料强度、延展性等性能下降^[7]; 激光沉积修复试样的强度与塑性仅达到铸件标准^[8]。

为改善修复件的力学性能, 有必要进一步降低工件残余应力、优化修复组织, 基体预热下修复是有效手段之一, 预热可以降低修复过程中修复体与基体间及修复体内部的温度梯度, 有利于减小残余应力。JENDRZEJEWSKI 等^[9]、ZHANG 等^[10]的激光熔覆研究表明, 基体预热有助于残余应力的消减和抑制沉积层裂纹缺陷的产生。FARAHMAND 等^[11]研究发现, 激光熔覆与感应加热相结合可使熔覆层的显微组织得到明显改善。龙日升等^[12]利用有限元分析发现基板预热到 400 ℃ 可以显著降低成形过程中试样的热应力。闫世兴等^[13]研究发现对 HT250 基体预热有利于提高熔覆层的强度与性能。

损伤零部件经修复前的打磨处理后, 可分为表面损伤和穿透性损伤两类。结合 GH4169 高温合金表面损伤的修复需求, 对不同基体厚度的 GH4169 高温合金试样, 采用感应加热设备对基体预热至 300 ℃ 进行激光沉积修复, 研究基体预热对激光沉积修复 GH4169 合金试样的残余应力、显微组织及拉伸性能的影响。

1 实验

激光沉积修复 GH4169 合金试验是在沈阳航空航

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375316); 航空科学基金资助项目(2014ZE54028); 辽宁省高等学校科学研究项目(L2014054)

收稿日期: 2016-06-17; **修订日期:** 2017-03-01

通信作者: 卞宏友, 副教授, 博士; 电话: 18040036511; E-mail: bhy@sia.cn

天大学建立的 LDM-800 系统上完成的。基体修复区局部预热采用的感应加热装置^[8]包括: 可调节电流的高频感应加热设备、根据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监测的上海巨哥公司的 MAG30 型红外热像仪。

试验基体材料选取经时效热处理的 GH4169 镍基高温合金, 熔覆材料选取 Inconel718 球形粉末, 粉末粒度为 53~150 μm。基材与粉末材料的主要化学成分如表 1 所列。根据 GH4169 合金薄壁类零件的表面损伤结构特点, 修复样件基体尺寸为 200 mm×100 mm×3 mm, 加工成盲槽形式, 如图 1(a)所示: 每个待修复槽长(L)30 mm, 上沿宽(W)14 mm, 坡角(θ)30°, 槽底基体厚度(S)选取 2.0 mm 与 2.5 mm, 对应沉积厚度即修复体厚度分别为 1.0 mm 与 0.5 mm。

激光沉积修复试验中采用的主要工艺参数为: 激

表 1 GH4169 和 Inconel718 球形粉末的化学成分
Table 1 Chemical composition of GH4169 and Inconel718 powders

Alloy	Mass fraction/%			
	C	Mo	Ni	Fe
GH4169	0.046	2.92	51.96	Bal.
Inconel718	0.03	3.17	53	Bal.

Alloy	Mass fraction/%			
	Cr	Al	Ti	Nb
GH4169	18.16	0.48	1.04	5.02
Inconel718	19.2	0.54	0.65	5.16

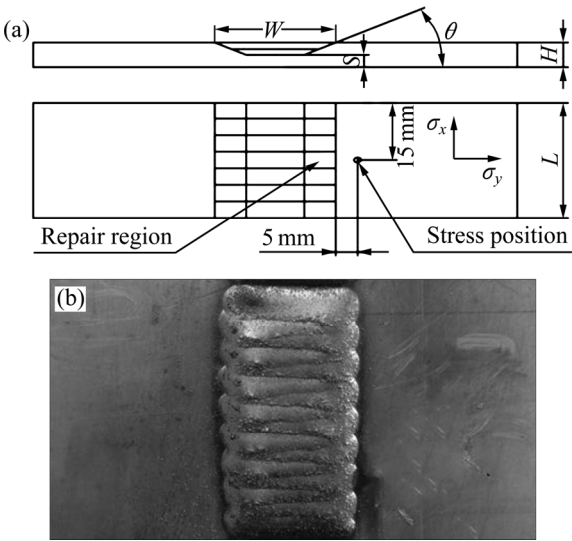


图 1 盲槽损伤试样示意图和基体预热的激光沉积修复试样
Fig. 1 Schematic diagram of non-through groove damage(a) and laser deposition repair specimen base on preheating substrate(b)

光功率 1400 W, 扫描速度 7 mm/s, 送粉速度 6.5 g/min, 搭接率 40%, Z 轴抬升量 0.5 mm, 并采用多道多层沉积方式进行修复。试验中基体状态为未预热和预热至 300 °C, 基体预热温度全程由热像仪检测, 通过温度检测信息适当调整感应加热设备电流大小, 保持基体温度稳定。扫描方式选取短边平行往复扫描。基体预热下的激光沉积修复 GH4169 合金试样如图 1(b)所示。

根据修复试样的翘曲变形情况判断, 残余应力的较大部位应位于修复区与基体的结合区域。因此, 如图 1(a)所示应力检测点选在距离修复区与基体结合处 5 mm 处位置, 并采用中科院金属所 KJS-3 型压痕应力测试仪进行应力检测。首先将应变片牢固地粘贴在工件所测区域上, 在应变片中心点通过压痕冲击头加载制造一定尺寸的压痕, 通过应变仪记录应变增量数值, 利用事先对所测材料标定得到的弹性应变与应变增量的关系来计算出原始残余应力^[14]; 利用线切割截取试样, 经打磨、抛光和盐酸、硝酸、氢氟酸混合液 ($V_{\text{HCl}}:V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=80:7:13$) 化学腐蚀后制成金相样品, 并采用日本 OLYMPUS-GX51 型光学显微镜和德国 ZEISS-SIGMA 型扫描电镜进行金相样品的显微组织观察与分析以及能谱扫描分析。利用美国 INSTRON-5982 型试验机进行室温拉伸性能测试, 拉伸件尺寸如图 2 所示, 拉伸时采用位移控制, 加载速率 2 mm/min。

激光沉积修复 GH4169 合金的试样编号如表 2 所示。对每个样品取 3 个点进行测量。

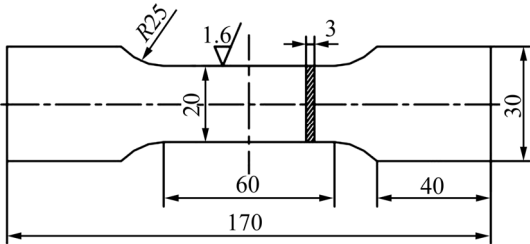


图 2 拉伸性能测试样尺寸示意图
Fig. 2 Schematic diagram of sketch of tensile testing specimen (Unit: mm)

表 2 激光沉积修复试样编号
Table 2 Specimen number of laser deposition repair GH4169 alloy

Specimen No.	Substrate state	Substrate thickness/mm	Deposition thickness/mm
1	No preheating	2.0	1.0
2	Preheating to 300 °C	2.0	1.0
3	No preheating	2.5	0.5
4	Preheating to 300 °C	2.5	0.5

2 结果与分析

2.1 残余应力

表3所列修复体厚度为1.0 mm、0.5 mm的未预热和预热300 ℃时激光沉积修复GH4169合金试样的残余应力测量数据。其中， σ_x 、 σ_y 方向如图1(a)所示。从表3可以看出，在损伤零件基体上应力检测点的残余应力为压应力。因为激光束瞬时局部输入高能量，使熔池及修复区域与基体间产生了很大的温度梯度，周围较冷的基体对熔池及修复区域的受热膨胀变形起到约束作用，因此，基体处的残余应力为压应力^[8]。图3所示为激光沉积修复试样的残余应力直方图，图中数值为表3中各样品测量值的平均值。

由表3和图3可知，相比于未预热试样，基体预热300 ℃的修复试样残余应力明显降低；当修复体厚度为0.5 mm时， σ_x 平均降低11.1%， σ_y 平均降低42.0%。因为对基体预热降低了激光修复过程中修复体与基体

表3 修复试样的残余应力

Table 3 Residual stress of repair specimen

Specimen No.	σ_x /MPa	σ_y /MPa	Specimen No.	σ_x /MPa	σ_y /MPa
1-1	-343	-301	2-1	-267	-87
1-2	-313	-262	2-2	-282	-147
1-3	-370	-271	2-3	-350	-188
3-1	-253	-127	4-1	-219	-83
3-2	-319	-218	4-2	-274	-135
3-3	-315	-162	4-3	-297	-75

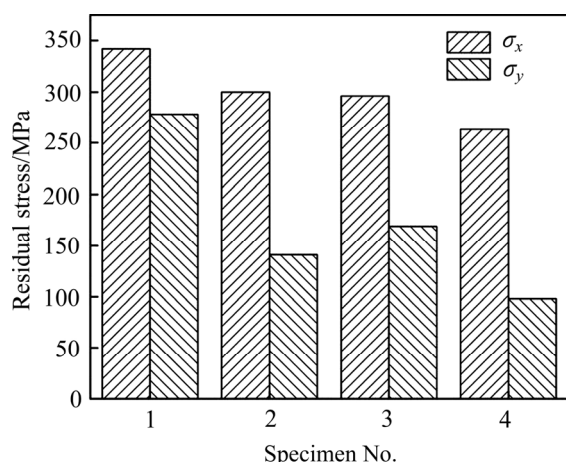


图3 修复试样的残余应力直方图

Fig. 3 Histogram of residual stress of repair specimens

之间的温度梯度以及修复体内部温度梯度，有利于减小修复过程的残余应力。

从表3和图3还可以看出，无论基体预热与否，基体厚度越大，即修复体厚度越小，修复试样的残余应力随之减小。以预热试样为例，基体厚度从2.0 mm到2.5 mm，即修复体厚度从1 mm到0.5 mm，残余应力 σ_x 平均降低12.3%， σ_y 平均降低30.5%。因为修复体厚度越小，热累积减小，温度梯度降低，有利于减小残余应力。

2.2 合金的显微组织

图4和5所示分别为激光沉积修复GH4169合金试样光学(OM)显微组织和扫描电镜(SEM)显微组织。从图4可以明显看出，合金的光学显微组织基本一致。修复区组织均呈现外延生长的柱状枝晶特点，且枝晶生长具有较强的取向性，趋向于平行沉积高度方向生长；基体为等轴晶组织；整体组织由基体经熔合区向修复体连续变化，修复体与基体之间呈致密的冶金结合。

由图5可以看出，修复体厚度为1 mm和0.5 mm的情况下，未预热试样和预热试样均在枝晶间析出了Laves相，但析出形态有所不同。相比于未预热试样，基体预热至300 ℃的试样修复区的Laves相出现碎化现象，且变得粗壮。这是因为基体预热降低了激光沉积修复过程中基体与修复区之间的温度梯度，熔池凝固速度相对降低，使得枝晶间析出的Laves相在凝固过程中有更长的时间长得更粗壮^[15]。

由图5还可以看出，无论基体预热与否，基体厚度越大，即修复体厚度越小，修复区枝晶间析出的Laves相减少。因为修复体厚度越小，热累积越小，修复体温度整体降低，即当前熔池所处的基体温度降低，降低了熔池的冷却速度，使得Nb元素有相对更多的时间扩散，Laves相析出减少^[16]。

2.3 拉伸性能

图6所示为激光沉积修复GH4169合金拉伸性能测试试样，从图6可以明显看出试样的断裂位置均位于修复区内，表明基体与修复体之间形成了致密的冶金结合。

表4所示为激光沉积修复GH4169合金试样的室温拉伸性能测试数据。由表4可以发现，与未预热修复试样相比，预热300 ℃修复试样的抗拉强度略微降低，而断后伸长率提高了60%以上，达到了锻件标准

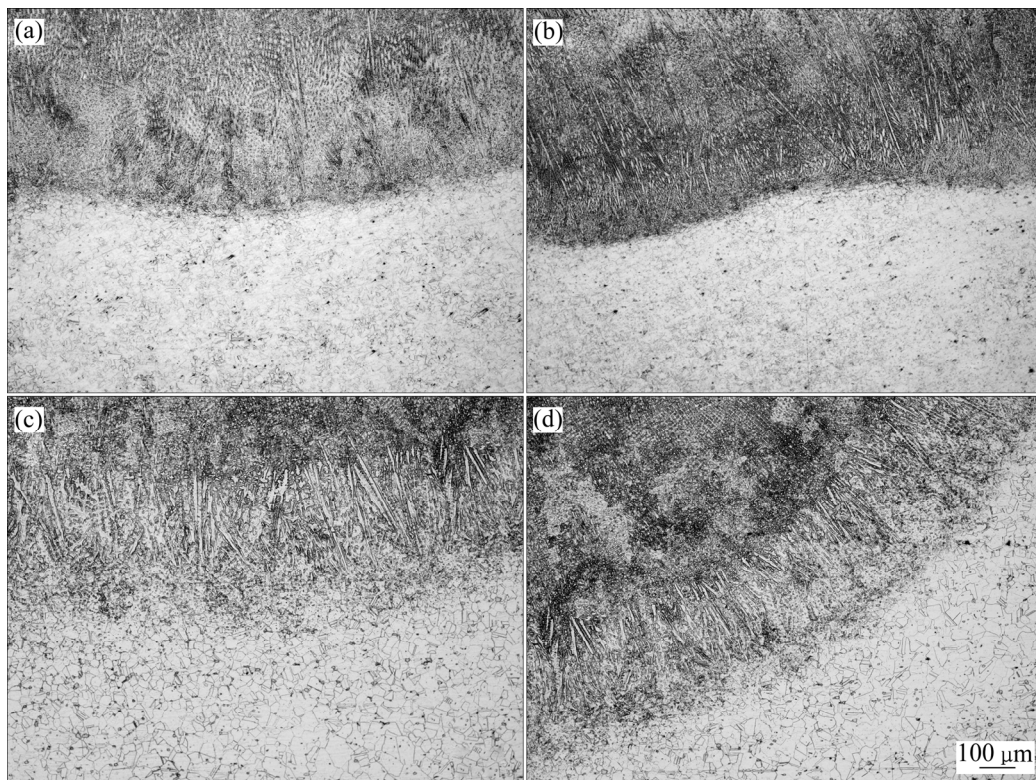


图 4 GH4169 合金修复试样的显微组织

Fig. 4 Microstructures of GH4169 alloy repaired specimen: (a) OM photo of specimen 1; (b) OM photo of specimen 3; (c) OM photo of specimen 2; (d) OM photo of specimen 4

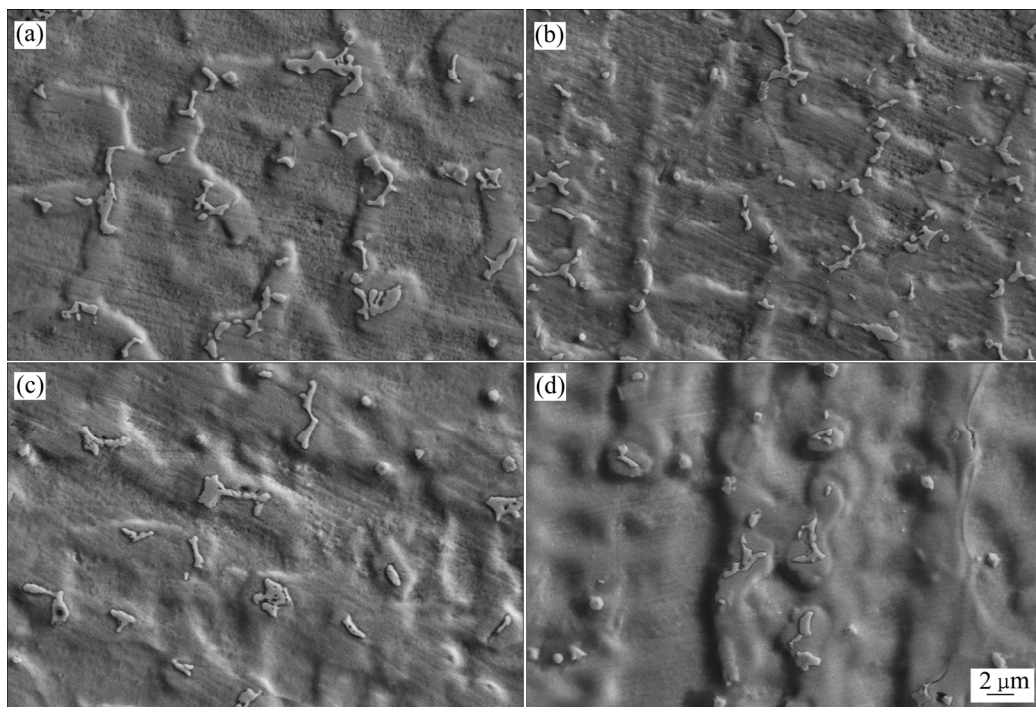


图 5 GH4169 合金修复试样的 SEM 像

Fig. 5 SEM images of GH4169 alloy repaired specimen: (a) Specimen 1; (b) Specimen 3; (c) Specimen; 2 (d) Specimen 4

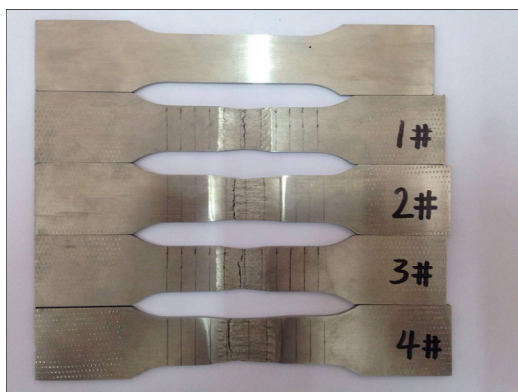


图6 拉伸测试试样照片

Fig. 6 Photos of tensile specimen

表4 激光沉积修复 GH4169 合金室温拉伸性能

Table 4 Room temperature tensile testing results of laser deposition repair GH4169

Specimen No.	σ_b /MPa	δ /%	Specimen No.	σ_b /MPa	δ /%
1-1	888	8.0	2-1	891	11.1
1-2	906	7.2	2-2	849	11.7
1-3	892	7.2	2-3	825	13.3
3-1	956	6.7	4-1	833	11.7
3-2	943	8.2	4-2	885	13.3
3-3	905	8.3	4-3	851	13.3
Casting standard(Q/5B 453—1995)				825	5.0
Wrought standard(Q/3B 548—1996)				1340	12.0

(Q/3B 548—1996)水平。因为基体预热 300 °C 的 GH4169 合金修复试样与未预热修复试样的显微组织基本一致,故预热下修复试样的拉伸强度变化不大。而预热下沉积层中的脆性 Laves 相出现碎化,有利于提高塑性^[16]。

从表 4 中的数据还可以看出,无论基体预热与否,基体厚度越大,即修复体厚度越小,抗拉强度与断后伸长率均略有增加。这是因为修复体厚度越小,枝晶间析出的 Laves 相越少以及残余应力越小,有利于拉伸性能的提高。

3 结论

1) 相比于未预热的修复试样,基体预热 300 °C 的

激光沉积修复 GH4169 合金表面损伤试样的残余应力降低、组织中 Laves 相变得粗壮且出现碎化现象、抗拉强度略微降低但断后伸长率明显提高。

2) 基体厚度越大,修复体厚度越小,残余应力减小、枝晶间析出的 Laves 相数量减少、抗拉强度与断后伸长率均略有增加。

REFERENCES

- [1] 师昌绪, 仲增墉. 我国高温合金的发展与创新[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1281–1288.
SHI Chang-xu, ZHONG Zeng-yong. Development and innovation of superalloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1281–1288.
- [2] 郭建亭, 周兰章, 袁超, 侯介山, 秦学智. 我国独创和独具特色的几种高温合金的组织 and 性能[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 237–250.
GUO Jian-ting, ZHOU Lan-zhang, YUAN Chao, HOU Jie-shan, QIN Xue-zhi. Microstructure and properties of several originally invented and unique superalloys in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 237–250.
- [3] 薛蕾, 黄卫东, 陈静, 林鑫. 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.
XUE Lei, HUANG Wei-dong, CHEN Jing, LIN Xin. Application of laser forming repair technology on the aerial castings[J]. Foundry Technology, 2008, 29(3): 391–394.
- [4] 苏海军, 尉凯晨, 郭伟, 马菱薇, 于瑞龙, 张冰, 张军, 刘林, 傅恒志. 激光快速成形技术新进展及其在高性能材料加工中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1567–1574.
SU Hai-jun, WEI Kai-chen, GUO Wei, MA Ling-wei, YU Rui-long, ZHANG Bing, ZHANG Jun, LIU Lin, FU Heng-zhi. New development of laser rapid forming and its application in high performance materials processing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6): 1567–1574.
- [5] 盛定高. 精铸镍基合金涡轮叶片缺陷激光熔覆修复工艺[J]. 铸造技术, 2009, 30(10): 1341–1343.
SHENG Ding-gao. Technology of repairing fine cast Nickel-base alloy turbine blade by laser cladding[J]. Foundry Technology, 2009, 30(10): 1341–1343.
- [6] 杨健, 黄卫东, 陈静, 林鑫. 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.
YANG Jian, HUANG Wei-dong, CHEN Jing, LIN Xin. Residual stress on laser rapid forming metal part[J]. Applied Laser, 2004, 24(1): 5–8.
- [7] 赵卫卫, 林鑫, 刘奋成, 赵晓明, 陈静, 黄卫东. 热处理对激光立体成形 Inconel718 高温合金组织和力学性能的影响

- 响[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3220–3225.
- ZHAO Wei-wei, LIN Xin, LIU Fen-cheng, ZHAO Xiao-ming, CHEN Jing, HUANG Wei-dong. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser solid forming Inconel718 superalloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3220–3225.
- [8] 卞宏友, 赵翔鹏, 杨光, 钦兰云, 王维, 任宇航. 热处理对激光沉积修复 GH4169 合金残余应力和拉伸性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003001-1–6.
- BIAN Hong-you, ZHAO Xiang-peng, YANG Guang, QIN Lan-yun, WANG Wei, REN Yu-hang. Effect of heat treatment on residual stress and tensile properties of laser deposition repair GH4169 superalloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003001-1–6.
- [9] JENDRZEJEWSKI R, SLIWINSKI G, KRAWCZUK M, OSTACHOWICZ W. Temperature and stress fields induced during laser cladding[J]. Computer & Structures, 2004, 82(7/8): 653–658.
- [10] ZHANG Y M, DRAKE R P, GLIMM J. Numerical evaluation of the impact of laser preheat on interface structure and instability[J]. Physics of Plasmas, 2007, 14(6): 062703.
- [11] FARAHMAND P, LIU S, ZHANG Z, KOVACEVIC R. Laser cladding assisted by induction heating of Ni-WC composite enhanced by nano-WC and La_2O_3 [J]. Ceramics International, 2014, 40: 15421–15438.
- [12] 龙日升, 刘伟军, 邢飞, 王华兵, 卞宏友. 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.
- LONG Ri-sheng, LIU Wei-jun, XING Fei, WANG Hua-bing, BIAN Hong-you. Effects of substrate preheating on thermal stress during laser metal deposition shaping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 241–247.
- [13] 闫世兴, 董世运, 徐滨士, 王玉江, 任维彬, 方金祥. 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.
- YAN Shi-xing, DONG Shi-yun, XU Bin-shi, WANG Yu-jiang, REN Wei-bin, FANG Jin-xiang. 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.
- [14] 刘生, 陈怀宁, 陈静, 黄春玲, 刘英. 未知主应力方向残余应力的压痕应变法测量及其程序设计[J]. 压力容器, 2013, 30(2): 36–40.
- LIU Sheng, CHEN Huai-ning, CHEN Jing, HUANG Chun-ling, LIU Ying. Residual stress measurement of unknown principal stress direction by indentation strain-gage method and its program design[J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(2): 36–40.
- [15] 刘洪刚, 李铸国, 黄坚, 聂璞林, 张尧成, 吴毅雄. 冷却速率对激光熔覆 K4169 高温合金涂层组织的影响[J]. 机械工程材料, 2012, 36(12): 21–24.
- LIU Hong-gang, LI Zhu-guo, HUANG Jian, NIE Pu-lin, ZHANG Yao-cheng, WU Yi-xiong. Effect of cooling rate on microstructure of K4169 superalloy coating prepared by laser cladding[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(12): 21–24.
- [16] 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.
- ZHANG Yao-cheng. Studies on component segregation and strengthening mechanism of laser cladding Inconel718 alloy coating[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 107–132.

Residual stress and tensile property of laser deposition repair GH4169 alloy surface damage with preheating

BIAN Hong-you¹, DONG Wen-qi¹, QU Shen², YANG Guang¹, QIN Lan-yun¹, WANG Wei¹

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Welding Laboratory, Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation LTD, Shenyang 110043, China)

Abstract: Combining with the repairing demand of GH4169 alloy surface damage, the effect of substrate preheating process on the residual stress, microstructure and tensile property of laser deposition repair (LDR) GH4169 alloy specimen with different substrate thickness were investigated. The results show that, in contrast to repaired specimen without preheating, laser deposition repair GH4169 alloy after the substrate is preheated to 300 °C, both σ_x and σ_y of residual stress are reduced obviously. The Laves phase of the interdendritic in deposition becomes thick, and it presents a granular fragmentation phenomenon. The tensile strength is reduced slightly, but the elongation rate increases above 60%. These indicate that the standard of forging is reached. With the bigger substrate thickness and the smaller deposition thickness, the residual stress and Laves phase of the interdendritic of repaired specimen are decreased, the tensile strength and elongation are improved slightly.

Key words: GH4169 alloy; laser deposition repair; preheat; residual stress; microstructure; tensile property

Foundation item: Project(51375316) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2014ZE54028) supported by the Aeronautical Science Foundation of China; Project(L2014054) supported by the Scientific Research Program of Higher Education of Liaoning Province, China

Received date: 2016-06-17; **Accepted date:** 2017-03-01

Corresponding author: BIAN Hong-you; Tel: +86-18040036511; E-mail: bhy@sia.cn

(编辑 龙怀中)