

激光修复 GH4169 镍基高温合金的高温拉伸性能

赵剑峰 成 诚 谢得巧 肖 猛

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 采用镍基高温合金 FGH95 粉末对航空发动机常用材料 GH4169 合金进行激光修复试验, 测试不同工艺参数下修复试样的高温拉伸性能并对其断裂机理进行分析。研究表明, 在合适的工艺参数下, 修复试样的高温抗拉强度可达到无损试样的 85% 以上; 当激光能量密度为 100 J/mm^2 时, 修复试样的高温抗拉强度达到最大值 708 MPa, 为无损试样的 90.4%, 其屈服强度也达到最大值 538 MPa, 超过无损试样的 4.3%。修复试样的高温拉伸断裂位置位于基体的热影响区, 在激光束照射所产生的交变循环热作用下, 热影响区发生的元素偏析是导致修复试样高温拉伸性能下降的主要原因。

关键词 激光技术; 激光修复; 高温合金; 高温拉伸性能; 元素偏析

中图分类号 TN249; TG136

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0802012

High-Temperature Tensile Property of GH4169 Nickel-Based Superalloys by Laser Repair

Zhao Jianfeng Cheng Cheng Xie Deqiao Xiao Meng

*College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210016, China*

Abstract Laser repair of GH4169 alloy which is commonly used in aero engines by usage of the nickel-based superalloy FGH95 powder is tested. The high-temperature tensile properties of the repaired sample with different process parameters are investigated and the fracture mechanism is also analyzed. The results show that, with appropriate process parameters, the high-temperature tensile strength of the repaired samples can be recovered up to more than 85% of that of the intact samples. When the laser linear energy density is 100 J/mm^2 , the maximum high-temperature tensile strength is 708 MPa, which is 90.4% of that of the intact sample and the maximum yield strength is 538 MPa, which exceeds 4.3% of that of the intact sample. The fractions of the repaired samples occur at the substrate heat-affected zone, where the segregation of elements is induced by the alternating heat action of laser scanning. This segregation is the main reason for the degradation of the high-temperature tensile property of the repaired samples.

Key words laser technique; laser repair; superalloy; high-temperature tensile property; element segregation

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引 言

激光修复技术兼具激光熔覆和 3D 打印的技术优势, 可以实现对失效制件的快速修复, 已经成为高性能材料制件修复的重要技术之一^[1-6]。如何实现修复后制件的性能接近、达到甚至超过原制件是当前激光修复技术的研究热点之一, 诸多研究者对此进行了研究^[7-10]。航空发动机热端零部件常用材料 GH4169 高温合金是激光修复的主要研究对象之一, 如何提高其修复后的机械性能受到广泛关注。刘彦涛等^[11]发现将修复试样进行热处理后, 其常温抗拉强度达到锻件的 84.5%; 卞宏友等^[12]采用真空热处理方法、张少平等^[13]采

收稿日期: 2016-02-03; **收到修改稿日期:** 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(51475238)

作者简介: 赵剑峰(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光直接制造技术和纳米材料制备方面的研究。

E-mail: zhaojf@nuaa.edu.cn

用直接双极时效热处理方法使修复试样的常温抗拉强度达到或超过锻件水平;明宪良等^[14]在双极时效热处理修复试样的高温持久性能的研究中发现,在 650 °C、725 MPa 条件下,修复试样的持久寿命和延伸率均可达到锻造技术标准,但都低于锻件实测值;戚永爱等^[15]采用镍基高温合金 FGH95 粉末修复 GH4169 合金试样,修复后常温弯曲强度达到 827.16 MPa,超过无损试样的 0.5%。上述研究大多聚焦于修复试样的常温力学性能,而较少涉及其在高温环境下的力学性能。本文以航空发动机热端零部件常用材料 GH4169 合金为修复对象,采用高温合金 FGH95 粉末进行修复试验,测试并分析修复试样的高温拉伸性能,探讨其拉伸断裂机理,为激光修复技术提供了试验依据和理论参考。

2 试验及结果

试验系统由光纤激光器、同轴送粉系统、工业机器人、控制系统组成。激光器为碟片激光器(TruDisk 6002,德国通快集团,德国),最大输出功率为 6 kW;同轴送粉系统由双料仓负压式同轴送粉器(XSL-PF-01A-2,沈阳新松机器人自动化股份有限公司,中国)、同轴送粉喷头和氩气保护系统组成;机器人采用工业机器人[KUKA-KPC2,库卡机器人(上海)有限公司,上海]。试验用基体材料为镍基高温合金 GH4169 块体(锻件),修复材料为镍基高温合金 FGH95 粉末,粉末颗粒直径为 100~160 μm,试验前将粉末放入烘干箱中保持 160 °C 烘干 60 min,修复粉末和基体材料成分见表 1。

表 1 修复粉末和基体材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical components of repair powder and substrate (mass fraction, %)

Element	Cr	Al	Nb	Mo	Ti	Fe	Co	Ni	W
FGH95	14.54	6.91	2.31	2.50	3.13	0.67	8.57	59.97	1.89
GH4169	16.57	0.67	4.74	3.17	0.97	Bal.	0.83	51.47	

为模拟发动机叶片局部失效的修复流程,在基体材料 GH4169 合金块体上进行开槽处理,凹槽尺寸如图 1 所示。按照表 2 所示的工艺参数,利用合金 FGH95 粉末在凹槽内的逐层沉积来制备获得修复样件,其中激光光斑直径为 2 mm,送粉率为 9.8 g/min。用线切割方法按图 2 所示路径切割,并根据高温拉伸试验要求制成如图 3 所示的标准拉伸试样。为对比分析,同步制备了 GH4169 合金高温拉伸标准试样——无损试样。利用高温拉伸试验机(SHIMADZU AG-IC,日本岛津制作所,日本)对上述试样进行拉伸测试,温度设定为 600 °C。将拉伸断裂试样的断面打磨抛光并用 1 ml HF+10 ml HNO₃ 的腐蚀液进行腐蚀,然后利用 OLYMPUS 光学显微镜(BX53MTRF-S,日本奥林巴斯株式会社,日本)和扫描电镜(SEM,JSM-6360LV,日本电子株式会社,日本)对试样的微观组织结构和断口形貌进行分析。

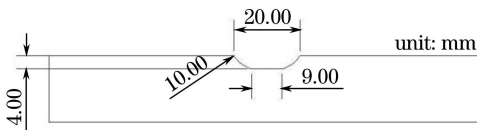


图 1 待修复凹槽形貌

Fig. 1 Morphology of grooves to be repaired

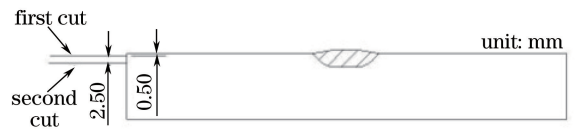


图 2 切割加工路径

Fig. 2 Cutting path

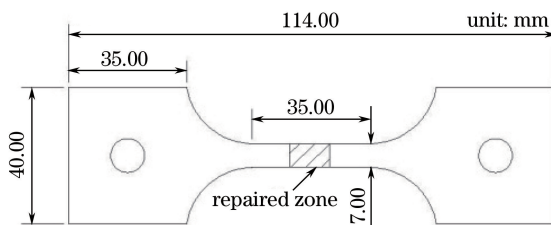


图 3 拉伸试样尺寸

Fig. 3 Size of tensile samples

表 2 激光修复工艺参数

Table 2 Process parameters of laser repair

Sample number	Laser power /W	Scanning speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Linear energy density /($\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$)
1	2000	10	100
2	2000	11	90.9
3	2000	12	83.3
4	2200	10	110
5	2200	11	100
6	2200	12	91.7

表 3 为试样高温拉伸的测试结果,其中 R_m 是抗拉强度, $R_{p0.2}$ 是屈服强度, δ 是延伸率。从表中可知,修复试样的高温抗拉强度均低于无损试样的抗拉强度,其中,试样 3 的抗拉强度最低,仅为无损试样的 78.3%,试样 1 的抗拉强度最高,达到无损试样的 90.4%,其余试样的抗拉强度均达到无损试样的 85% 以上。修复试样的屈服强度和延伸率与抗拉强度相一致,试样 3 的屈服强度和延伸率明显低于其他试样,而试样 1 的屈服强度高于其他试样,甚至略高于无损试样。从试样的断裂位置判断,仅试样 3 的断裂发生在修复区,而其余试样的断裂均发生在热影响区。

表 3 试样高温拉伸性能

Table 3 High-temperature tensile properties of samples

Sample	Tensile strength R_m /MPa	Yield strength $R_{p0.2}$ /MPa	Elongation δ /%	Fracture position
Repaired 1	708.2	538.4	12.3	Heat-affected zone
Repaired 2	688.4	470.4	11.4	Heat-affected zone
Repaired 3	614.1	456.8	6.8	Repaired zone
Repaired 4	693.5	473.2	10.5	Heat-affected zone
Repaired 5	695.4	496.8	9.7	Heat-affected zone
Repaired 6	699.1	501.2	9.7	Heat-affected zone
Intact	783.4	515.8	36.5	Substrate

3 分析与讨论

与其他修复试样相比,试样 3 显示出更低的高温拉伸性能,并且其拉伸断裂发生在修复区。通过对比观察所有试样修复区的金相显微图和断口扫描电镜图发现,与试样 1 相比,试样 3 的晶体组织结构不仅更为混乱,而且在晶体内部存在众多孤立的微小颗粒和微细孔洞,如图 4 所示。制备试样 3 采用的激光能量密度为 83.3 J/mm^2 ,为试验中的最小值,尽管试样 3 制备采用的激光功率和试样 1、试样 2 相同,但是其扫描速度更高,这意味着单位时间、单位面积内粉末材料吸收的激光能量更少。更少的激光能量使得部分粉末颗粒不能完全熔化,而更短的激光照射时间使得熔池底层刚刚形核但尚未充分生长的晶粒开始凝固,与此同时,由于熔池内的液态金属缺乏足够的流动性,晶粒凝固时由于体积收缩而形成的微细孔洞不能被液态金属充分填充,以至于最终在试样组织内形成了由孔洞包围的孤立颗粒以及较为杂乱的晶体结构,从而成为试样的微观缺陷,严重降低了试样的力学性能。

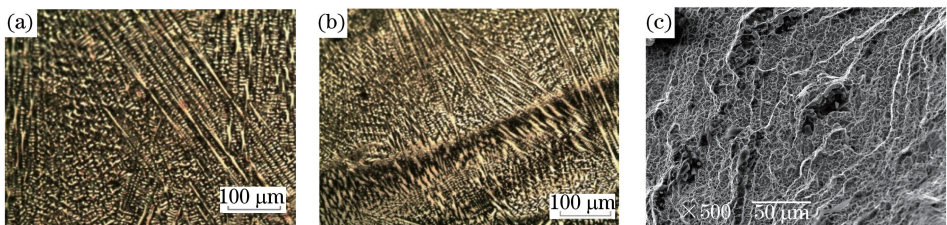


图 4 修复试样修复区的微观形貌。(a) 试样 1 的横截面; (b) 试样 3 的横截面; (c) 试样 3 的拉断面

Fig. 4 Microscopic morphology of the repaired area of samples.

(a) Cross section of sample 1; (b) cross section of sample 3; (c) fracture section of sample 3

在激光修复的过程中,由于熔池的热传导作用,修复区域附近的基体材料经历复杂的、循环交变的快速加热和快速冷却过程,从而形成热影响区。由于激光束位置的动态变化,施加于热影响区的温度场导致了热影响区内的材料发生再结晶、偏析、甚至重熔等动态结晶行为。图 5 的金相图显示出拉断试样的热影响区晶粒发生了粗化,即热影响区的晶粒尺寸明显大于非热影响区的晶粒尺寸。采用扫描电镜观察发现,与热影响区相比,热影响区内出现许多条状、岛状析出相,如图 6 所示。对这些析出相进行能谱分析,发现析出相内 Nb、Mo 等元素含量有了较大幅度增加,如图 7 所示,形成了 Laves 相。Laves 相作为脆性有害相,会降低材料的抗拉强度,同时也降低了材料的延伸率^[14]。

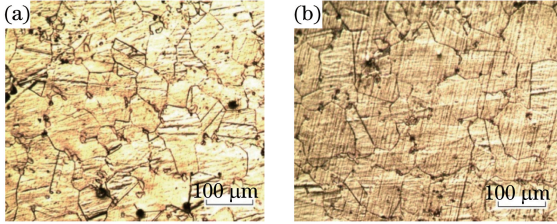


图 5 修复试样的金相组织。(a) 基体材料区域;
(b) 热影响区域

Fig. 5 Metallurgical structure of repaired samples.

(a) Substrate zone; (b) heat-affected zone

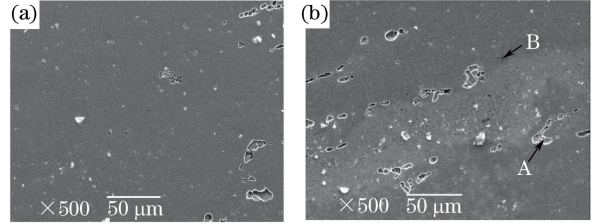


图 6 修复试样 SEM 照片。(a) 基体材料区域;
(b) 热影响区域

Fig. 6 SEM images of repaired samples.

(a) Substrate zone; (b) heat-affected zone

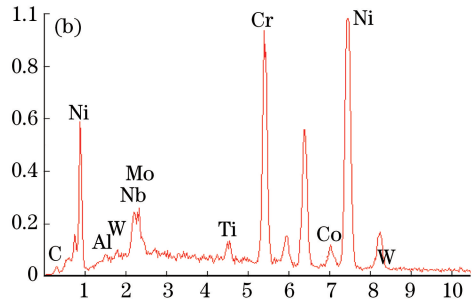
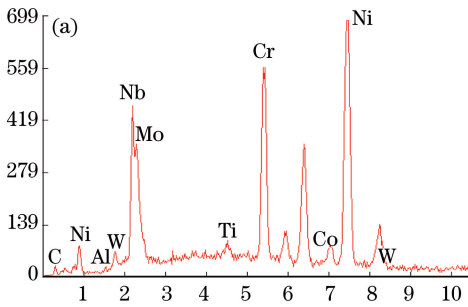


图 7 图 6 中修复试样热影响区域的 EDS 分析。(a) A 点; (b) B 点

Fig. 7 EDS analysis of heat-affected zone of repaired samples in Fig. 6. (a) Point A; (b) point B

对部分试样的断面微观形貌进行观察,结果如图 8 所示。试样 1 的韧窝大小与无损试样相当,但是韧窝深度更深一些,且分布较为均匀,尽管其他修复试样的局部韧窝深度(以试样 5 为例)也超过无损试样,但其韧窝大小不一,且深浅各异,这在一定程度上证明了试样 1 的屈服强度在所有修复试样中是最大的,甚至略大于无损试样,同时也表明在激光修复中,特定工艺参数下形成的交变循环热作用,在一定程度上产生了热处理的效果,对修复试样的力学性能起到一定的改善作用。

除试样 3 之外其他修复试样的高温拉伸断裂位置均发生在热影响区,这表明在排除试样微观缺陷导致试样失效的前提下,修复试样上 FGH95 粉末修复部分的高温拉伸性能优于受交变循环热作用的基体热影响区的高温拉伸性能。对比修复试样常温拉伸试验的测试结果^[8],可以推测出修复试样上 FGH95 粉末修复部分的高温拉伸性能接近或达到无损试样的高温拉伸性能。但无论是无损试样还是修复试样,在高温环

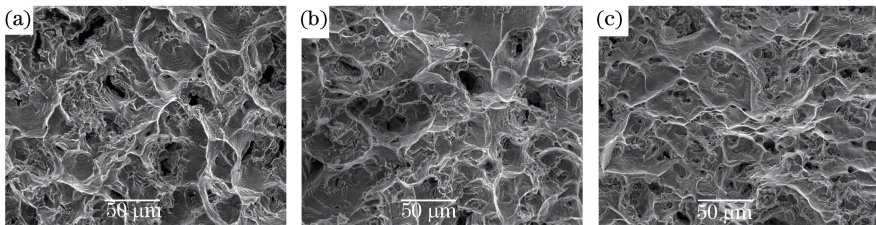


图 8 拉伸试样断面的微观组织。(a) 修复试样 1; (b) 修复试样 5; (c) 无损试样

Fig. 8 Microscopic morphology of fracture sections of tensile samples.

(a) Repaired sample 1; (b) repaired sample 5; (c) intact sample

境下,其拉伸性能较常温环境均有不同程度的降低,且修复试样降低的程度更大一些。

4 结 论

在适当的工艺参数范围内,修复试样的高温抗拉强度和高温屈服强度分别可达到无损试样的 85%和 90%以上,但修复试样的高温延伸率降低幅度较大,仅达到无损试样的 30%左右。受到激光束交变循环热作用的影响,修复试样热影响区内发生的结晶粗化、晶粒重熔以及元素偏析等动态结晶行为降低了基体材料自身的高温力学性能,从而导致修复试样的断裂位置发生在基体材料热影响区。

参 考 文 献

- Zhao Jianfeng, Ma Zhiyong, Xie Deqiao, *et al.* Metal additive manufacturing technique[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(5): 675-683.
赵剑峰, 马智勇, 谢得巧, 等. 金属增材制造技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 675-683.
- Xue Lei, Lu Penghui, Chen Jing, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of laser repaired 1Cr12Ni3MoVN alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 887-890.
薛蕾, 卢鹏辉, 陈静, 等. 激光修复 1Cr12Ni3MoVN 合金的组织性能研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 887-890.
- Yang Guang, Ding Linlin, Wang Xiangming, *et al.* Influence of scanning path on residual stress and distortion of laser repairing titanium alloy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 2926-2932.
杨光, 丁林林, 王向明, 等. 扫描路径对激光修复钛合金残余应力与变形的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2926-2932.
- Hu Guohang, Zhao Yuan'an, Li Dawei. Technology and mechanism of CO₂ laser treatment for mitigating surface damage growth[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 185-189.
胡国行, 赵元安, 李大伟. 抑制损伤发展的 CO₂ 激光修复技术及机理研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 185-189.
- Xu Songhua, Xiao Yang, Li Jian. Organization property researches of the laser repair technology in the helicopter engine turbine oriented implement[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2311-2316.
徐松华, 肖阳, 李健. 直升机发动机涡轮导向器激光修复组织性能研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2311-2316.
- Wang Xiaoyan, Chen Jing, Lin Xin, *et al.* Microstructure of laser forming repair 7050 aluminum alloy with AlSi₂ powder[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1585-1590.
王小艳, 陈静, 林鑫, 等. AlSi₂ 激光成形修复 7050 铝合金组织[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1585-1590.
- Chen Jing, Zhang Qiang, Liu Yanhong, *et al.* Research on microstructure and high temperature properties of Ti17 titanium alloy fabricated by laser solid forming[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603022.
陈静, 张强, 刘彦红, 等. 激光成形修复 Ti17 合金组织与高温性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603022.
- Liu Yunlei. Research on microstructure and mechanical property of bonding zone for laser remanufacturing parts of nickel-based superalloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013: 45-51.
刘云雷. 镍基高温合金激光再制造零件结合区组织研究与性能控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 45-51.
- Yao Jianhua, Ye Zhong, Shen Hongwei. Application of laser processing technologies on turbine blades[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 031403.
姚建华, 叶钟, 沈红卫. 激光加工技术在汽轮机叶片制造中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 031403.
- Wilson J M, Piya C, Shin Y C, *et al.* Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 80: 170-178.
- Liu Yantao, Gong Xinyong, Zhao Xiaohao, *et al.* Microstructure and tensile property of laser melting deposited GH4169 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(2): 91-98.
刘彦涛, 宫新勇, 赵霄昊, 等. 激光熔化沉积修复 GH4169 合金的组织与拉伸性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(2): 91-98.
- 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, 赵祥鹏, 杨光, 等. 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.
- Zhang Shaoping, Sui Shang, Ming Xianliang, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser repaired GH4169 superalloy[J]. Applied Laser, 2015, 35(3): 277-281.

- 张少平, 隋 尚, 明宪良, 等. 激光修复 GH4169 高温合金的组织与力学性能[J]. 应用激光, 2015, 35(3): 277-281.
- 14 Ming Xianliang, Chen Jing, Tan Hua, *et al.* Research on persistent fracture mechanism of laser forming repaired GH4169 superalloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403005.
- 明宪良, 陈 静, 谭 华, 等. 激光修复 GH4169 高温合金的持久断裂机制研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403005.
- 15 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.