

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

卞宏友 赵翔鹏* 杨光 钦兰云 王维 任宇航

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

摘要 研究了感应加热局部热处理和真空炉整体热处理对激光沉积修复GH4169合金修复件残余应力和拉伸性能的影响。结果表明,激光沉积修复GH4169合金修复件经直接时效热处理后,组织特征变化不大,具有较强生长取向性的外延枝晶组织特征,但枝晶间Laves相出现了部分溶解,残余应力明显消减,拉伸强度显著提高。相比沉积态修复件,局部热处理后残余应力平均降低了33%以上,拉伸强度达到了锻件水平的86%以上;真空热处理后残余应力平均降低了43%以上,拉伸强度达到了锻件水平。

关键词 激光技术; 激光沉积修复; GH4169合金; 微观组织; 残余应力; 拉伸性能

中图分类号 TG156.92 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1003001

Effect of Heat Treatment on Residual Stress and Tensile Properties of Laser Deposition Repair GH4169 Superalloy

Bian Hongyou Zhao Xiangpeng Yang Guang Qin Lanyun Wang Wei Ren Yuhang

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

Abstract The effects of induction heating local heat treatment and vacuum furnace overall heat treatment on the residual stress and tensile properties of laser deposition repair GH4169 superalloy are investigated. As compared with as-deposited samples, direct aged microstructure of laser deposition repair GH4169 superalloy changes little, and still presents the microstructural characteristic of columnar dendrites which grow epitaxially from the substrate. But Laves phase of interdendritic dissolves partly. The residual stress is reduced. The tensile strength is significantly improved. After local heat treatment, the residual stress decreases averagely more than 33%, and the tensile strength reaches over 86% of the mechanical properties of forgings. After vacuum heat treatment, the residual stress decreases averagely more than 43%, and the tensile strength reaches the mechanical properties of forgings.

Key words laser technique; laser deposition repair; GH4169 superalloy; microstructure; residual stress; tensile properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 310.4925

1 引言

GH4169(Inconel 718)是一种时效沉淀强化的镍基超合金,因其良好的高温力学性能,被广泛应用于航空发动机、燃气轮机以及核工业领域。在航空发动机领域,主要用于制造机匣、叶片、涡轮盘等高温端部件,占发动机总质量的30%以上^[1-2]。高温合金零部件在制造和服役过程中常因机加超差、磨损或疲劳裂纹等导致失效。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^[3-4]。

收稿日期: 2015-03-27; 收到修改稿日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(51375316)、辽宁省自然科学基金(201202173)、航空科学基金(2014ZE54028)、辽宁省高等学校科学研究(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

*通信联系人。E-mail: xiangpengzhao@163.com

激光沉积修复过程中存在高温梯度,导致修复部位产生过大的残余应力;且激光沉积修复属于快速熔凝,会抑制GH4169合金强化相的充分析出,导致修复部位的力学性能弱化^[5-6]。而热处理是调整优化组织、消减残余应力进而提高修复件性能的有效和必要手段^[7]。钟敏霖等^[8]针对Inconel 738单晶叶片进行了激光沉积修复,修复后工件的拉伸性能达到了基体的80%。Blackwell等^[9-10]研究了激光沉积成形Inconel 718合金,发现经热处理后Inconel 718成形件的强度可达到甚至超过锻件的水平。张霜银等^[11]通过热处理有效地消减了TC4钛合金在激光成形过程中产生的残余应力。

但对航空发动机机匣等大型薄壁类零件而言,采用整体真空热处理需要装夹保证的位置和尺寸精度复杂众多,专用热处理校形夹具难于设计制造,且工件整体热处理时的应力释放易引起新的变形超差。而采用感应加热技术可实现对工件修复部位的局部热处理,避免大型工件整体热处理所面临的专用夹具难于设计制造和工件受热易发生变形超差的问题^[12]。目前该技术已应用于大型石化设备的焊后热处理^[13]。采用感应加热局部热处理和真空炉整体热处理两种方式,研究了不同热处理方式对激光沉积修复GH4169合金样件的残余应力和拉伸性能的影响规律,为激光沉积修复工件的后续热处理、改善修复件力学性能提供指导依据。

2 试验材料与方法

GH4169合金的激光沉积修复在沈阳航空航天大学建立的LDM-800系统上完成,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。采用VAF-130型真空炉对修复件进行整体热处理。局部感应加热系统包括:自动控制型高频(30 kHz)感应加热设备,通过调节电流来控制加热温度及加热速度,最大输入电流为37 A;感应加热器可根据工件修复部位的实际形状进行仿形设计制造;利用MAG30型红外热像仪(测温范围为200~1500 ℃,采样频率达到50 Hz/s)对工件热处理温度进行实时检测。

修复试验的基体材料为时效处理的GH4169合金;粉末材料为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。根据GH4169合金薄壁类零件的裂纹损伤结构特点,修复样件基体尺寸为200 mm×100 mm×3 mm,加工成贯通槽形式,如图1所示:槽长 L 为30 mm,上沿宽 W 为14 mm,高 H 为3 mm,坡角 θ 为30°。

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, %)

Elements	C	Mo	Ni	Fe	Cr	Al	Ti	Nb
GH4169	0.046	2.92	51.96	Bal.	18.16	0.48	1.04	5.02
Inconel718	0.03	3.17	53	Bal.	19.2	0.54	0.65	5.16

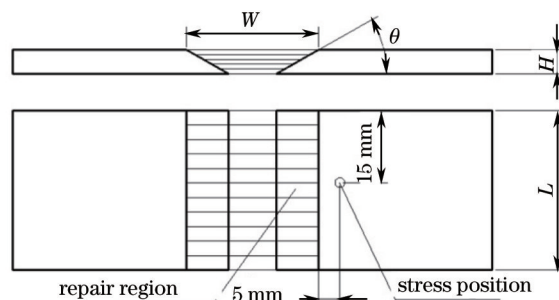


图1 修复件槽损伤试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of defects through-groove damage

采用多道多层沉积方式修复工件,修复过程中在贯通槽下方添加一块背板,用于承接粉末和形成熔池的基体;激光沉积修复工艺参数为: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。修复样件采用的热处理制度为:直接时效处理(720 ℃,8 h炉冷至620 ℃,8 h空冷)。

根据修复样件的翘曲变形现象判断,残余应力较大部位应位于修复区与基体结合区域,因此,如图1所示应力检测点选在距修复区与基体结合面5 mm处的位置;并采用KJS-3型压痕应力测试仪进行应力检测。

利用线切割沿垂直于激光扫描方向截取试样,经打磨、抛光和盐酸硝酸氢氟酸混合液(体积比 $V_{HCl}:V_{HNO_3}:V_{HF}=80:7:13$)化学腐蚀后制成金相样品;并采用 OLYMPUS-DP71 型光学显微镜和 S3400 型扫描电镜对金相样品进行微观组织观察分析。采用 Z050 型试验机测试修复样件的拉伸性能,拉伸件尺寸如图 2 所示,拉伸时采用位移控制,加载速率为 1 mm/min。

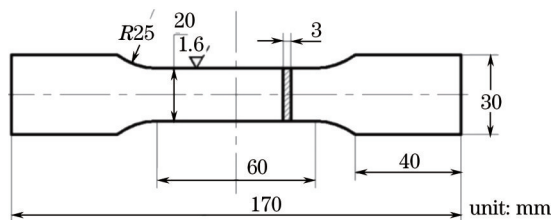


图 2 拉伸性能测试样尺寸

Fig.2 Sketch of tensile testing specimen

3 试验结果与分析

3.1 残余应力

表 2 为激光沉积态、感应加热局部热处理态和真空炉整体热处理态的残余应力测试数据, σ_x 为垂直于激光扫描方向应力, σ_y 为平行于激光扫描方向应力。由表 2 可以看出,基体上应力检测点的残余应力为压应力。这是因为激光沉积修复过程中,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。图 3 为修复件 3 种状态下的残余应力直方图,为便于视图,图中应力数值采用绝对值表示。

表 2 3 种状态下试样的残余应力

Table 2 Residual stress date of three conditions

Group number	As-deposited		Local heat treatment		Vacuum heat treatment	
	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa
1	-430	-401	-329	-240	-228	-93
2	-463	-478	-256	-182	-247	-194
3	-491	-213	-335	-195	-303	-134

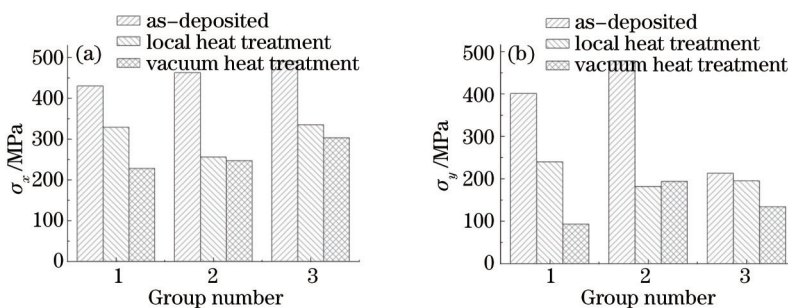


图 3 残余应力直方图。(a) σ_x ; (b) σ_y

Fig.3 Histogram of residual stress. (a) σ_x ; (b) σ_y

由表 2 和图 3 可以看出,经感应加热局部热处理后, σ_x 的最大降幅为 207 MPa,平均降低 33.5%。 σ_y 的最大降幅为 296 MPa,平均降低 43.5%。相比局部热处理,真空炉整体热处理对残余应力的消减程度要高 10%~20%, σ_x 平均降低 43.8%、 σ_y 平均降低 61.5%。这是因为局部热处理是对工件修复部位的局部加热而实现应力释放,而真空炉热处理是对修复件进行整体加热,因而修复区的残余应力能够在更大的区域中得到更为均匀的重新分布和松弛,所以真空炉整体热处理对修复工件残余应力的消减效果要比感应加热局部热处理更为明显。另外可知,采用两种热处理方式后,修复工件的残余应力都有了显著降低,对于大型修复工件而言,不便于采用真空炉整体热处理时,采用感应加热局部热处理方式也是消减修复工件残余应力的一种有效手段。

3.2 拉伸性能

图4和5分别给出了激光沉积修复GH4169合金不同热处理方式下的光学显微组织和高倍扫描电子显微镜(SEM)组织。从图4(a)可以看出,沉积态组织呈外延柱状生长枝晶特点,枝晶生长取向性较强,趋于平行沉积高度方向。在枝晶间存在微观偏析,析出相为白色、形如树枝状的不规则Laves相,如图5(a)所示;Laves相的能谱分析(EDS)结果如图6所示。从光学显微组织[图4(b)]来看,局部热处理态的组织特点与沉积态相比变化不大,但枝晶间的析出相有一定的溶解,从图5(b)可明显地看到Laves相由原先的树枝状变成了独立的岛状。由图4(c)和5(c)可以看出,真空热处理态的组织特点及枝晶间的析出相变化与局部热处理态相比没有明显的变化。

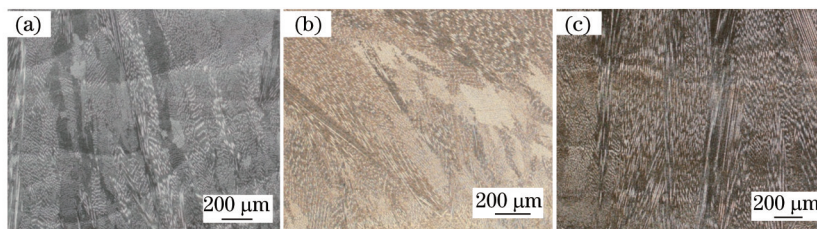


图4 激光沉积修复GH4169的光学显微组织。(a) 沉积态; (b) 局部热处理态; (c) 真空热处理态

Fig.4 Optial microstructure of laser deposition repair GH4169. (a) As-deposited; (b) local heat treatment; (c) vacuum heat treatment

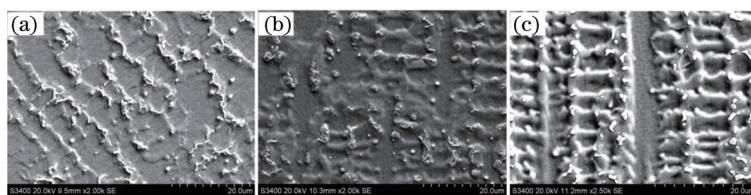


图5 激光沉积修复GH4169的SEM组织。(a) 沉积态; (b) 局部热处理态; (c) 真空热处理态

Fig.5 SEM analysis of laser deposition repair GH4169. (a) As-deposited; (b) local heat treatment; (c) vacuum heat treatment

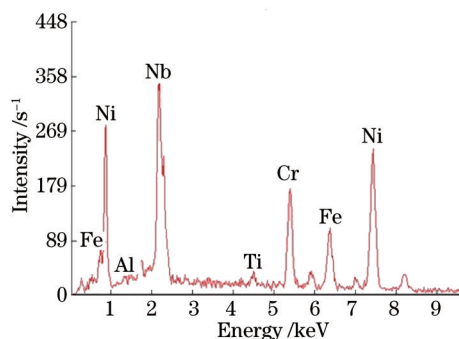


图6 枝晶间区域Laves相EDS分析

Fig.6 EDS spectrum of inter-dendritic Laves phase of laser deposition repair GH4169

激光沉积修复GH4169合金工件的沉积态、局部热处理态和真空热处理态的拉伸性能如表3所示。图7为激光沉积修复GH4169合金拉伸试样,修复试样的断裂处均位于修复区,表明在基体与修复区之间形成了致密的冶金结合。由表3可以看出,沉积态修复件的抗拉强度 σ_b 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 及断后伸长率 δ 达到铸造技术标准Q/5B 453-1995的水平。由表4可以看出,沉积态试样中Laves相富集了大量用于形成 γ'' 和 γ' 强化相的合金元素Nb;且由于激光沉积修复的快速冷却凝固,抑制了与基体共格的强化相析出;另外,Laves相作为一种脆性相还是裂纹形成与扩展的通道,这就导致了沉积态修复件的拉伸力学性能低于锻造技术标准Q/3B 548-1996(高强)。局部热处理态修复件的平均抗拉强度和屈服强度分别达到了锻造技术标准的86.8%和98.3%。而真空热处理态修复件的平均抗拉强度达到了锻造技术标准的98.5%,平均屈服强度则超过了该锻造技术标准。这是因为在直接时效热处理过程中, γ'' 和 γ' 强化相进一步弥散析出,主要强化相 γ'' 相与基体共格析出所引起的共格强化以及有序强化,提高了修复件的拉伸强度。另外,由于局部热处理态修复件的残余应力高于真空热处理态,这应该是导致局部热处理态修复件的拉伸强度稍低的原因。修复件经两种方

式热处理后的断后伸长率,相比于沉积态没有明显的变化;这应该是由直接时效热处理的温度低于 Laves 相 1080 °C 以上的完全固溶温度^[10],无法将 Laves 脆性相完全固溶消失的原故。

表 3 激光沉积修复 GH4169 合金室温拉伸性能

Table 3 Room temperature tensile testing results of laser deposition repair GH4169

Group number	As-deposited			Local heat treatment			Vacuum heat treatment		
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
1	783	624	5.5	1162	1116	4.2	1274	1170	4.5
2	888	655	8.0	1178	1156	5.5	1341	1138	5.0
3	790	630	5.0	1149	972	4.6	1344	1167	5.5
Average	820.3	636.3	6.2	1163	1081.3	4.8	1319.7	1158.3	5
Wrought standard(Q/3B 548-1996)				1340	1100	12			

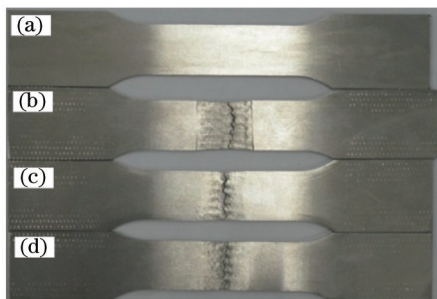


图 7 修复件拉伸试样。(a) 拉伸试样; (b) 沉积态; (c) 局部热处理态; (d) 真空热处理态

Fig.7 Tensile specimen of repair parts. (a) Tensile specimen; (b) as-deposited; (c) local heat treatment; (d) vacuum heat treatment

表 4 沉积态枝晶区域 Laves 相元素 EDS 分析结果

Table 4 EDS analysis results of laser deposition repair GH4169 as-deposited specimen

Element	Al	Nb	Ti	Cr	Fe	Ni
Mass fraction /%	00.14	19.51	01.12	13.75	12.86	52.62
Atomic percentage /%	00.33	12.89	01.43	16.23	14.13	55.00

4 结 论

1) 激光沉积修复 GH4169 合金沉积态修复件的修复区与基体结合处存在残余压应力集中现象,经热处理后残余应力得到明显消减。局部热处理后, σ_x 平均降低 33.5%、 σ_y 平均降低 43.5%。真空热处理对残余应力的消减程度比局部热处理高 10%~20%, σ_x 和 σ_y 分别平均降低了 43.8% 和 61.5%。

2) 激光沉积修复 GH4169 合金沉积态修复件经感应加热局部热处理和真空炉整体热处理后,显微组织均呈趋于沉积方向外延生长的柱状枝晶特征,与沉积态组织基本相同;但枝晶间 Laves 析出相有部分溶解。

3) 经直接时效热处理后,修复件的拉伸强度得到显著提高。局部热处理态的抗拉强度与屈服强度达到了锻造技术标准 Q/3B 548-1996(高强)的 86.8% 和 98.3%,真空热处理态的抗拉强度与屈服强度则达到和超过了锻造技术标准。但因 Laves 相未能被完全固溶,热处理后修复件的塑性相比于沉积态没有明显的变化。

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 Changru, Zhong Zengyong. Development and innovation of superalloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1281-1288.
师昌绪,仲增庸.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): 391-393.

- 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): 391-393.
- 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 Huang Weidong. Laser Solid Forming[M]. Xi'an: Northwest Industrial University press, 2007: 244-264.
黄卫东, 等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 244-264.
- 6 Xi Mingzhe, Gao Shiyu. Research on the tensile properties of Inconel 718 superalloy fabricated by laser rapid forming process[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303004.
席明哲, 高士友. 激光快速成形 Inconel718 超合金拉伸力学性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303004.
- 7 Chen Bo, Shao Bing, Liu Dong, *et al.*. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC17 titanium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403001.
陈 博, 邵 冰, 刘 栋, 等. 热处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403001.
- 8 M Zhong, H Sun, W Liu, *et al.*. Boundary liquation and interface cracking characterization in laser deposition of Inconel 738 on directionally solidified Ni based superalloy[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(2): 159-164.
- 9 P L Blackwell. The mechanical and microstructural characteristics of laser-deposited IN718[J]. J Materials Processing Technol, 2005, 170(1): 240-246.
- 10 Zhao Weiwei, Lin Xin, Liu Fencheng, *et al.*. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser solid forming Inconel 718 superalloy[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3221-3225.
赵卫卫, 林 鑫, 刘奋成, 等. 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[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3221-3225.
- 11 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Influence of heat treatment on residual stress of Ti-6Al-4V alloy by laser solid forming [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(5): 774-778.
张霜银, 林 鑫, 陈 静, 等. 热处理对激光立体成形 TC4 残余应力的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(5): 774-778.
- 12 Bian Hongyou, Han Shuanglong, Li Ying, *et al.*. Effect 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.
- 13 Duan Zhanjun, Chen Xiaoxia. Research on heat treatment after welding for large facilities[J]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36(3): 71-72.
段占军, 陈晓霞. 大型设备焊后热处理技术研究[J]. 石油工程建设, 2010, 36(3): 71-72.

栏目编辑: 宋梅梅