

GH4169 薄壁零件表面损伤的激光沉积修复试验研究

卞宏友¹ 董文启¹ 王世杰² 曲 伸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沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

³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

摘要 研究了不同基体厚度和扫描方式对激光沉积修复(LDR)GH4169 合金修复件的残余应力、微观组织及拉伸性能的影响。结果表明,基体厚度越小,即修复体厚度越大,残余应力和枝晶间析出的 Laves 相体积分数就越大,室温抗拉强度和断后伸长率则越小。试验表明,短边扫描有利于提高激光沉积修复 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; 扫描方式; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号 TG113.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1002002

Experimental Study on Laser Deposition Repair of Surface Damage of GH4169 Thin-Walled Components

Bian Hongyou¹ Dong Wenqi¹ Wang Shijie² Qu Shen³ Yang Guang¹
Qin Lanyun¹ Wang Wei¹

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

²School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

³Welding Institute, Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation LTD, Shenyang, Liaoning 110043, China

Abstract The effects of substrate thickness and scanning mode on the residual stress, microstructure, and tensile property of GH4169 alloy components after laser deposition repair (LDR) are investigated. The results show that the smaller the substrate thickness or the larger the deposition thickness is, the larger both the residual stress and the volume fraction of the interdendritic Laves phase are, in contrast, the smaller both the tensile strength and the percentage elongation after fracture at room temperature are. The experiment indicates that the short edge scanning mode is beneficial to improving the tensile property at room temperature of GH4169 alloy after LDR.

Key words laser technique; laser deposition repair; GH4169 alloy; scanning mode; microstructure; tensile property

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850; 160.3900

1 引 言

GH4169 高温合金在高温环境下具有优良的性能,广泛应用于航空、航天、核能、石油化工等领域。在航空航天领域存在大量高温合金制造的大型薄壁零件,如涡轴发动机的甩油盘、鼓筒轴等重要零件,先进歼击机发动机的机用盘件等关键部件以及航天火箭发动机的关键热端部件^[1-3],这些零部件在机械加工中不可避免地会产生误加工损伤,如尺寸超差、铣切沟槽等,且在使用过程中会产生裂纹、腐蚀和磨损等损伤^[4]。因此,大型薄壁零部件的修复技术日益受到航空制造企业的重视。激光沉积修复(LDR)技术具有热输入能量可控、

收稿日期: 2016-05-09; 收到修改稿日期: 2016-06-15

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和修复技术方面的研究。E-mail: bhy@sia.cn

修复工件残余应力低且变形小以及可柔性化制造等特点,适于大型薄壁结构零部件的三维成形修复^[4-5]。

Taberero 等^[6-7]研究了扫描方式对激光立体成形 Inconel 718 合金力学性能的方向性的影响。席明哲等^[8]的研究表明,激光快速成形 Inconel 718 合金的三个垂直方向上的拉伸力学性能均低于锻件,且表现出明显的各向异性。赵卫卫等^[9]的研究表明,激光立体成形的 Inconel 718 合金在经热处理后,强度达到了高强锻件的技术标准。

修复前损伤零部件经打磨处理后,可分为表面损伤和穿透性损伤两类。卞宏友等^[10]采用激光沉积修复技术对 GH4169 合金穿透性损伤工件进行了修复,获得了无缺陷的修复件,沉积态修复工件的拉伸性能达到铸件标准,热处理后的拉伸强度达到锻件水平。

本文结合 GH4169 高温合金薄壁零部件表面损伤的修复需求,针对不同程度的表面损伤情况,加工了不同基体厚度的 GH4169 高温合金损伤试样,采用长边扫描和短边扫描进行了激光沉积修复的试验研究,测试并分析了修复件的残余应力、微观组织及室温拉伸性能的变化规律。

2 试验材料与方法

在沈阳航空航天大学建立的 LDM-800 系统上完成试验,该系统由 6 kW 光纤激光器、悬臂式三轴平移运动系统、用于集成冷却和保护气系统的同轴熔覆头、双桶送粉器、气体循环净化系统及氩气保护箱构成。

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,粒径为 53~150 μm ,基体与粉末材料的化学成分见表 1。

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

Table 1 Chemical compositions of GH4169 and Inconel 718 spherical 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 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,基体厚度 H 为 3 mm,每个待修复槽的长度 L 为 30 mm,上沿宽 W 为 14 mm,槽底基体厚度 S 分别为 1.5,2.0,2.5 mm,坡角 θ 为 30°,如图 1(a)所示。激光沉积修复 GH4169 高温合金试样的工艺参数如下: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,扫描方式采用短边扫描和长边扫描。采用短边扫描和长边扫描进行激光沉积修复的试样分别如图 1(b)、(c)所示。

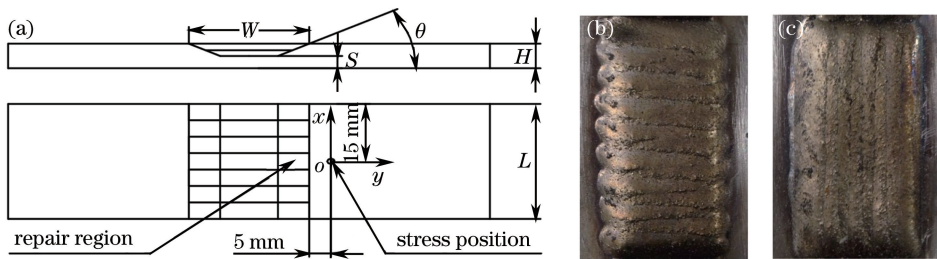


图 1 (a)盲槽损伤试样示意图;(b)激光沉积修复短边扫描试样;(c)激光沉积修复长边扫描试样

Fig. 1 (a) Schematic diagram of damaged non-through groove sample; (b) specimen after LDR with short edge scanning; (c) specimen after LDR with long edge scanning

根据试样的变形情况推断出残余应力集中部位位于修复区与基体的结合区域,因此在距离修复区与基体连接处 5 mm 的位置选取应力测试点,如图 1(a)所示,并采用中国科学院金属研究所自制的 KJS-3 型压痕应力测试仪进行应力检测。利用线切割截取试样,经打磨、抛光和化学腐蚀后制成金相样品,并采用日本奥林巴斯公司的 OLYMPUS-GX51 型光学显微镜(OM)和德国蔡司公司的 ZEISS-SIGMA 扫描电子显微镜(SEM)进行金相样品的显微组织观察与分析。利用美国英斯特朗公司的 INSTRON-5982 试验机进行室温拉伸性能测试,拉伸件尺寸如图 2 所示,其中拉伸件粗糙度为 1.6, R 为过渡圆弧半径。拉伸时采用位移控制,加载速率为 2 mm/min。采用 Image-Pro Plus 6.0 图像分析软件对试样中相的体积分数进行定量分析。

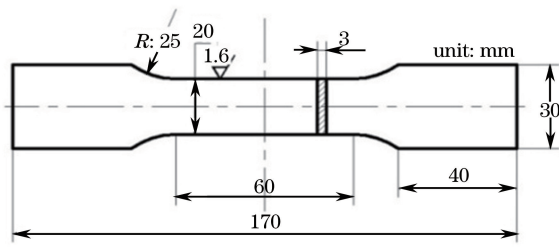


图 2 拉伸性能测试试样尺寸

Fig. 2 Dimension of specimen for tensile property test

激光沉积修复 GH4169 合金的试样编号及 Laves 相体积分数测试分析数据见表 2。

表 2 激光沉积修复 GH4169 合金试样编号及 Laves 相体积分数

Table 2 Specimen number and Laves phase volume fraction of GH4169 alloy after LDR

Specimen number	Scanning mode	Substrate thickness /mm	Deposition thickness /mm	Laves phase volume fraction /%
1 #	Long edge	1.5	1.5	6.8
2 #	Short edge	1.5	1.5	3.6
3 #	Long edge	2.0	1.0	5.5
4 #	Short edge	2.0	1.0	1.6
5 #	Long edge	2.5	0.5	2.5
6 #	Short edge	2.5	0.5	1.0

3 试验结果与分析

3.1 残余应力

表 3 和表 4 分别为采用长边扫描和短边扫描的激光沉积修复试样的残余应力测试数据,其中 σ_x 、 σ_y 为 x 、 y 方向的应力大小。激光沉积修复试样的残余应力形成原因主要有两个方面:一是激光束瞬时局部输入高能量造成温度分布不均匀,熔池及修复区产生热应力,冷却和凝固时相互制约引起局部热塑性变形,进而形成热残余应力;二是熔池及修复区域存在温度梯度且冷却速度不一致,熔池在凝固时因相变体积变化不均而产生相变应力,进而引起不均匀塑性变形而形成相变残余应力。修复件最终的残余应力往往是上述两种原因导致的结果^[11]。

从表 3 和表 4 可以看出,在损伤零件基体上,应力测试点的残余应力为压应力^[10]。图 3 为激光沉积修复试样的残余应力直方图,为了便于观察,图 3 中的数值均采用绝对值进行表示。

表 3 长边扫描激光沉积修复试样的残余应力

Table 3 Residual stress of specimen after LDR with long edge scanning

	1 #		3 #		5 #	
	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa
	-379	-337	-365	-296	-323	-238
	-423	-370	-399	-270	-274	-188
	-402	-351	-386	-316	-342	-219
Average	-401	-353	-383	-294	-313	-215

表 4 短边扫描激光沉积修复试样的残余应力

Table 4 Residual stress of specimen after LDR with short edge scanning

	2 #		4 #		6 #	
	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa
	-378	-345	-343	-301	-253	-127
	-356	-281	-313	-262	-319	-218
	-410	-334	-370	-271	-315	-162
Average	-381	-320	-342	-278	-296	-169

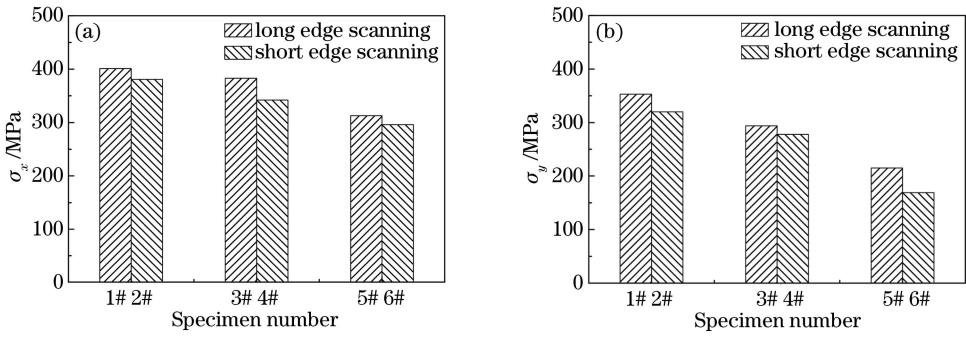


图 3 残余应力直方图。(a) σ_x ; (b) σ_y

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

由表 3、4 及图 3 可知,短边扫描修复试样的 σ_x 、 σ_y 略低于长边扫描。当基体厚度和修复体厚度均为 1.5 mm 时,相对于长边扫描修复试样而言,短边扫描修复试样的 σ_x 降低了 5.0%, σ_y 降低了 9.3%。采用长边扫描时,激光扫描完前一道,折回进行下一道扫描所需的时间较长,预热效果不如短边扫描,相邻扫描道之间的温差较大,易产生较大应力^[12],可见短边扫描修复有利于降低修复残余应力。

如图 1(a) 所示,对于盲槽表面损伤试样,当槽底基体厚度分别为 1.5、2.0、2.5 mm 时,对应修复体厚度分别为 1.5、1.0、0.5 mm。由表 3、4 及图 3 可知,当基体厚度减小时,修复体厚度增加, σ_x 、 σ_y 变大。以长边扫描修复试样为例,当基体厚度从 2.5 mm 减小到 1.5 mm 时,即修复体厚度从 0.5 mm 增加到 1.5 mm, σ_x 增大了 88 MPa,即增加了 28.1%, σ_y 增大了 138 MPa,即增加了 64.2%。随着基体厚度的减小,修复体厚度增加,修复体热累积增大^[13],导致修复体与基体之间的温度梯度增大,残余应力增大。

3.2 显微组织

激光沉积修复试样显微组织的 OM 图如图 4、5 所示,均呈现出外延生长的柱状枝晶特点,且枝晶生长具有较强取向性,趋于平行沉积高度方向生长,修复区与基体之间呈致密的冶金结合。

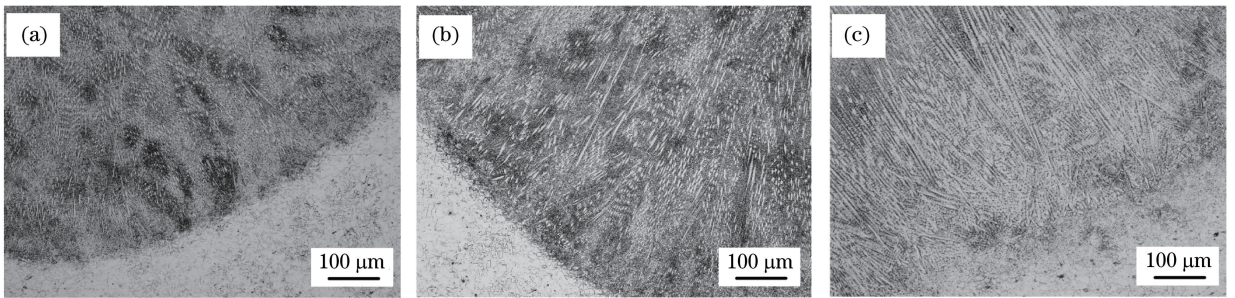


图 4 长边扫描激光沉积修复 GH4169 的显微组织 OM 照片。(a) 5#; (b) 3#; (c) 1#

Fig. 4 OM images of GH4169 alloy microstructures after LDR with long edge scanning. (a) 5#; (b) 3#; (c) 1#

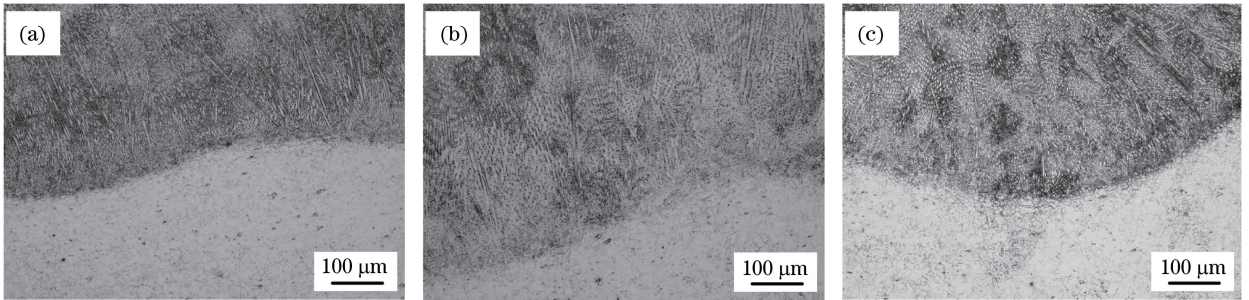


图 5 短边扫描激光沉积修复 GH4169 合金的显微组织 OM 照片。(a) 6#; (b) 4#; (c) 2#

Fig. 5 OM images of GH4169 alloy microstructures after LDR with short edge scanning. (a) 6#; (b) 4#; (c) 2#

激光沉积修复试样显微组织的 SEM 图如图 6、7 所示,激光沉积修复 GH4169 高温合金修复试样在枝晶间析出了白色 Laves 相,呈连续树枝状或独立岛状,Laves 相体积分数见表 2。基体厚度越小,修复体厚度

越大,枝晶间析出的 Laves 相数量越多,且 Laves 相由独立岛状向连续树枝状变化。以长边扫描修复试样为例,当基体厚度从 2.5 mm 减小到 1.5 mm 时,即修复体厚度从 0.5 mm 增大到 1.5 mm,枝晶间析出的 Laves 相体积分数由 2.5% 上升至 6.8%。当基体厚度减小时,修复体体积增大,热累积增大,修复体温度整体升高,即当前熔池所处的基体温度升高,熔池在凝固过程中的冷却速率降低,Laves 相析出的量增多^[14-15]。

由图 6、7 对比可以看出,相比长边扫描修复试样,短边扫描修复试样中 Laves 相数量较少。当基体厚度和修复体厚度均为 1.5 mm 时,Laves 相体积分数由 6.8% (长边扫描修复试样) 下降至 3.6% (短边扫描修复试样)。相对于长边扫描修复试样,短边扫描修复试样热累积的温度较低^[13],即当前熔池所处的基体温度相对较低,熔池在凝固过程中的冷却速率较高,抑制了 Nb 元素的偏析,从而抑制了 Laves 相的析出^[14-15]。

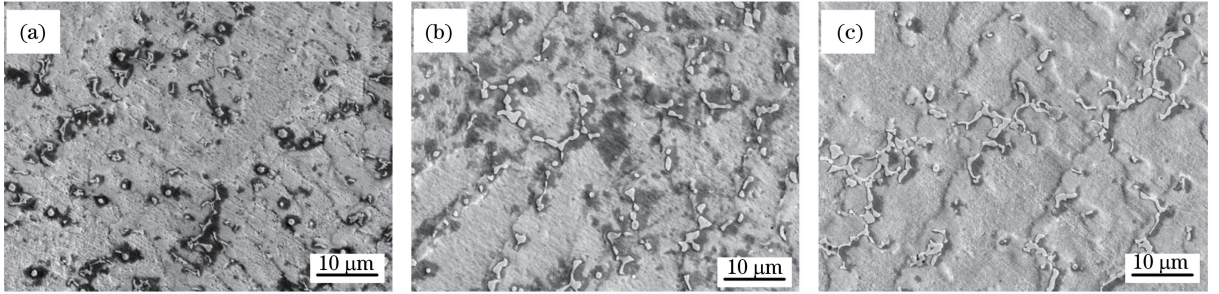


图 6 长边扫描激光沉积修复 GH4169 合金的显微组织 SEM 照片。(a) 5# ;(b) 3# ;(c) 1#

Fig. 6 SEM images of GH4169 alloy microstructures after LDR with long edge scanning. (a) 5# ; (b) 3# ; (c) 1#

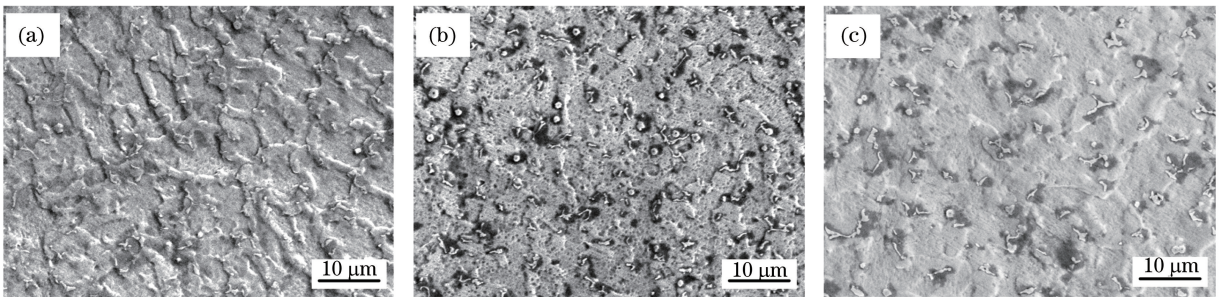


图 7 短边扫描激光沉积修复 GH4169 合金的显微组织 SEM 照片。(a) 6# ;(b) 4# ;(c) 2#

Fig. 7 SEM images of GH4169 alloy microstructures after LDR with short edge scanning. (a) 6# ; (b) 4# ; (c) 2#

3.3 拉伸性能

激光沉积修复 GH4169 高温合金试样的室温拉伸性能测试数据见表 5,其中 σ_b 为室温抗拉强度, δ 为断后伸长率。试样的断裂位置均位于修复区中间,如图 8 所示,表明在基体与修复区之间形成了致密的冶金结合。修复试样的室温拉伸性能低于锻件标准 Q/3B 548-1996($\sigma_b = 1340$ MPa, $\delta = 12\%$)。沉积态修复区内的 Laves 相富集了大量用于形成 γ'' 和 γ' 强化相的合金元素 Nb,导致 γ'' 和 γ' 强化相析出减少。激光沉积修复快速冷却凝固,抑制了强化相析出。因此,沉积态修复试样的拉伸力学性能低于锻件水平。

由表 5 可知,在修复体厚度相同的情况下,相比于长边扫描修复试样,短边扫描具有更高的抗拉强度和

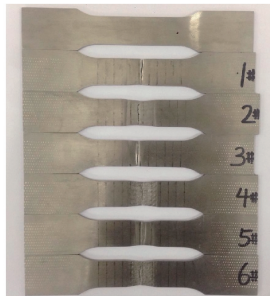


图 8 拉伸测试后试样

Fig. 8 Specimen after tensile test

断后伸长率。相对于短边扫描修复而言,长边扫描修复试样的残余应力更大,拉伸测试时会产生拉伸力和残余应力的叠加,降低了试样的强度。另外,激光沉积修复 GH4169 合金时扫描道搭接处会形成热影响区,热影响区的组织相对粗大。当采用长边扫描时,拉伸性能测试方向与激光扫描道垂直,扫描道之间粗大的热影响区组织会对拉伸性能产生不利影响;而短边扫描拉伸性能测试方向与激光扫描道平行,对拉伸性能的影响相对较小^[8]。由此可见,短边扫描方式有利于改善激光沉积修复试样的力学性能。

由表 5 也可以看出,在扫描方式一定的条件下,基体厚度减小,修复体厚度增加,激光沉积修复 GH4169 高温合金试样的抗拉强度和断后伸长率明显降低;相对于短边扫描而言,长边扫描时基体厚度对修复试样的性能影响更为显著。

基体厚度减小时,修复体厚度增加,修复体内的 Laves 相体积分分数变大且残余应力增大;另外,沉积态修复体的力学性能低于基体力学性能,故随着基体厚度的减小,修复试样的拉伸性能明显降低。

表 5 激光沉积修复 GH4169 合金室温拉伸性能

Table 5 Tensile property at room temperature of GH4169 alloy after LDR

	1#		3#		5#		2#		4#		6#	
	σ_b /MPa	δ /%	σ_b /MPa	δ /%	σ_b /MPa	δ /%	σ_b /MPa	δ /%	σ_b /MPa	δ /%	σ_b /MPa	δ /%
	605	2.6	682	2.5	887	8.8	852	7.5	888	8.0	956	6.7
	628	3.1	717	3.3	890	6.7	831	6.7	906	7.2	943	8.2
	592	2.4	664	2.5	920	6.7	850	8.3	892	7.2	905	8.3
Average	608	2.7	688	2.8	899	7.4	844	7.5	895	7.5	935	7.7

4 结 论

结合 GH4169 高温合金薄壁零部件表面损伤的修复需求,采用长边扫描和短边扫描进行激光沉积修复试验研究,测试并分析了不同基体厚度修复件的残余应力、微观组织及室温拉伸性能的变化规律。研究发现,扫描方式对激光沉积修复试样的应力、组织和性能有明显影响,短边扫描方式有利于改善激光沉积修复试样的力学性能;基体厚度对修复试样的应力、组织和性能也有影响;相对于短边扫描方式而言,长边扫描方式下基体厚度对修复试样的影响更为显著。

参 考 文 献

- Shi Changxu, Zhong Zengyong. Development and innovation of superalloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1281-1288.
师昌绪, 仲增墉. 我国高温合金的发展与创新[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1281-1288.
- Guo Jianting. The current situation of application and development of superalloys in the fields of energy industry[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(5): 513-527.
郭建亭. 高温合金在能源工业领域中的应用现状与发展[J]. 金属学报, 2010, 46(5): 513-527.
- Li Yajiang, Xia Chunzhi, Shi Lei. Present situation about welding research of nickel-base high-temperature alloy at home [J]. Modern Welding Technology, 2010(7): 1-4.
李亚江, 夏春智, 石磊. 国内镍基高温合金的焊接研究现状[J]. 现代焊接, 2010(7): 1-4.
- 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.
- Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.
黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
- Taberero I, Lamikiz A, Martínez S, et al. Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(6): 465-470.
- Liu F C, Lin X, Huang C P, et al. The effect of laser scanning path on microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickel-base superalloy Inconel 718[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(13): 4505-4509.
- Xi Mingzhe, Gao Shiyou. Research on 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 Inconel 718 超合金拉伸力学性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303004.
- 9 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): 3220-3225.
- 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): 3220-3225.
- 10 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 GH4169 合金残余应力和拉伸性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003001.
- 11 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.
- 12 Xian Shiyu, Yang Aiping, Yan Yu, *et al.* Effect of scanning path and overlap rate on substrate deformation during laser cladding[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(2): 26-28.
- 咸士玉, 杨爱萍, 颜 羽, 等. 扫描路径和搭接率对激光平面熔覆基板变形的影响[J]. 航天制造技术, 2011(2): 26-28.
- 13 Long Risheng, Liu Weijun, Xing Fei, *et al.* Effects of scanning methods on temperature during laser directly metal shaping[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2008, 19(4): 528-531.
- 龙日升, 刘伟军, 邢 飞, 等. 扫描方式对激光金属沉积成形过程温度的影响[J]. 光电子•激光, 2008, 19(4): 528-531.
- 14 Liu Honggang, Li Zhuguo, Huang Jian, *et al.* Effect of cooling rate on microstructure of K4169 superalloy coating prepared by laser cladding[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(12): 21-24.
- 刘洪刚, 李铸国, 黄 坚, 等. 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.
- 15 Qu Hongxia, Kou Shengzhong, Pu Yongliang, *et al.* Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of as-cast GH4169 alloy[J]. Foundry Technology, 2016, 37(3): 481-484.
- 曲红霞, 寇生中, 蒲永亮, 等. 冷却速率对 GH4169 合金铸态组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(3): 481-484.