

激光定向生长修复DZ125L柱状晶叶片力学性能研究

齐宝路 张安峰 张文龙 师博飞 李涤尘

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 在DZ125L定向基材上进行激光直接成形同种材料的定向生长修复,对修复后的DZ125L熔覆组织进行了微观分析和常温力学性能测试,并对熔覆组织与定向基材的结合面强度进行了测试。结果表明:激光直接成形DZ125L的组织为外延生长的柱状晶组织,其一次枝晶间距为8~12 μm ,二次枝晶退化,热处理后柱状晶尺寸增大为30~90 μm ,柱状晶基体上析出大量均匀分布的 γ' 强化相;沉积态柱状晶组织的纵向抗拉强度为1312 MPa,延伸率为5.27%,热处理后柱状晶组织的纵向抗拉强度降低为1201 MPa,延伸率达到6.69%,均满足国家标准;熔覆层柱状晶组织与定向基材的结合面力学性能良好,定向生长满足使用要求。

关键词 激光光学;激光直接成形;定向生长修复;DZ125L;力学性能

中图分类号 TG249;TG113.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0603002

Research on Mechanical Properties of DZ125L Columnar Crystal Blade Directionally Repaired by Laser Direct Forming

Qi Baolu Zhang Anfeng Zhang Wenlong Shi Bofei Li Dichen

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Directional repair of the same material by laser direct forming is performed on the columnar crystal substrate of DZ125L. Microstructure and normal mechanical properties of cladding layers are analyzed and tested. Besides, the mechanical properties of the interface between cladding layers and directional substrate are tested. The results show that the microstructure of laser direct forming DZ125L is columnar crystal with the primary dendrite arm spacing of 8~12 μm and the deterioration of secondary dendrite arm. The size of columnar crystal after heat treatment rises to 30~90 μm and γ' strengthening phases separate out on the matrixes of columnar crystals in quantity and uniformly; The longitudinal tensile strength of as-deposited columnar crystal is 1312 MPa, while the elongation is 5.27%. After heat treatment, the longitudinal tensile strength and elongation are 1201 MPa and 6.69%, respectively, which both meet the national standards. The interface between cladding layers and directional substrate shows good mechanical property, which can meet the operation requirements.

Key words laser optics; laser direct forming; directional repair; DZ125L; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引言

DZ125L是我国使用较多的一种定向凝固镍基高温合金。由于其优异的高温蠕变及持久性能,已被应用于航空发动机叶片生产^[1-6]。由于涡轮叶片长期服役于高温苛刻环境下,难免会出现损伤,容易发生损坏失效,如果不能修复直接报废会造成严重的经济损失。若能使用激光直接成形技术修复受损叶片,将具有巨大的工程应用价值和可观的经济价值。

近年来国内外许多机构对镍基高温合金的修复进行了初步的研究。Zhong等^[7]使用Inconel738进行激光

收稿日期: 2015-01-26; 收到修改稿日期: 2015-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(51275392)

作者简介: 齐宝路(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光金属直接成形方面的研究。E-mail: qib11559@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 张安峰(1956—),男,副教授,主要从事激光增材制造及其定向凝固技术方面的研究。

E-mail: zhangaf@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

熔覆定向晶的修复,通过优化工艺得到了无裂纹的熔覆层;潘等^[8]进行了激光熔覆修复GH4169稀释率的研究,建立了工艺参数与稀释率的模型;韩等^[9]进行了激光成形修复DZ125的研究,对DZ125成形微观组织进行了分析;智等^[10]采用FGH95进行了GH4169高温合金的修复,获得了质量良好的熔合区;刘等^[11-12]研究了稀土元素对激光熔覆镍基高温合金开裂的影响,完成了K417G叶片的修复。这些研究主要集中于修复工艺的优化和组织的分析。然而,对于激光直接成形DZ125L力学性能的研究,目前还未见报道。本文采用优化后的工艺参数制备了DZ125L成形试样和修复试样,并对试样热处理前后的微观组织和力学性能进行了分析。

2 实验方法

实验在西安交通大学激光直接成形系统上完成^[13]。实验所用的DZ125L球形粉末粒度为60~120 μm;基板为DZ125L定向凝固基板,基板尺寸为25 mm×1.4 mm×60 mm,其化学成分如表1所示。实验前将DZ125L粉末置于真空干燥箱中,在120 ℃条件下干燥4 h去除水分、增加粉末流动性。DZ125L基板表面经砂纸打磨后,先用丙酮清洗以除去油污,再用乙醇清洗干净。成形过程在Ar气保护下进行,粉末由送粉器经同轴送粉喷嘴输送至激光熔池中,载粉气体也为Ar气。实验使用的主要工艺参数如表2所示。

表1 DZ125L粉末和DZ125L基材的主要成分(质量分数,%)

Table 1 Main elements of DZ125L powder and substrate (mass fraction, %)

Element	DZ125L powder	DZ125L substrate
Co	9.64	9.54
Cr	9.70	8.74
W	7.14	6.46
Mo	2.18	2.21
Ti	3.12	3.18
Al	4.90	5.03
Ta	3.78	3.96
C	0.09	0.12
B	0.015	0.0076
Ni	Residual	Residual

表2 激光直接成形主要工艺参数

Table 2 Main process parameters of laser direct forming

Parameter	Value
Laser power /W	210~230
Scanning speed /(mm/s)	4~6
Powder feed rate /(mm ³ /s)	8.7~9.3
Shielding gas flow rate /(L/min)	0.4~0.6
Oxygen content /(10 ⁻⁶)	50~80

在定向基材上进行DZ125L试样的激光直接成形,将成形后试样按照GBT 228.1-2010标准进行常温拉伸试样的制备。拉伸试样分为两组。第一组试样为100%激光直接成形DZ125L熔覆试样;第二组试样为50%熔覆部分和50%的基材。每组试样各分为沉积态和热处理两部分,热处理制度为:1080 ℃×3 h/空冷(固溶)+900 ℃×10 h/空冷(时效)。热处理在NWTQ-1400箱式气氛电炉中进行,使用Ar气为保护气体。

在MTS858拉伸实验机上对以上两组试样进行常温力学性能的测试。使用光学显微镜KEYENCE VH-600和SU-8010场发射扫描电镜(SEM)对微观组织和拉伸断口形貌进行分析。使用HXD-1000TMC显微硬度计对修复试样进行显微硬度的测试,所用载荷为200 g,加载时间为10 s。

3 实验结果与讨论

3.1 激光直接成形DZ125L的显微组织和力学性能

图1为激光直接成形DZ125L沉积态组织的SEM图像。由图1可知沉积态的DZ125L微观组织为具有典

型外延生长特征的柱状晶组织。其一次枝晶间距约为8~12 μm ,二次枝晶不发达,柱状晶尺寸约为6~8 μm 。由图1(b)可知,沉积态组织主要由 γ 相、少量的晶间碳化物和 γ - γ' 共晶组织组成,并未观察到明显的 γ' 强化相析出。这是因为熔池在快速凝固的过程中生成了过饱和固溶体, γ' 强化相来不及析出就已凝固^[4],因此沉积态熔覆组织中的 γ' 强化相数量较少。

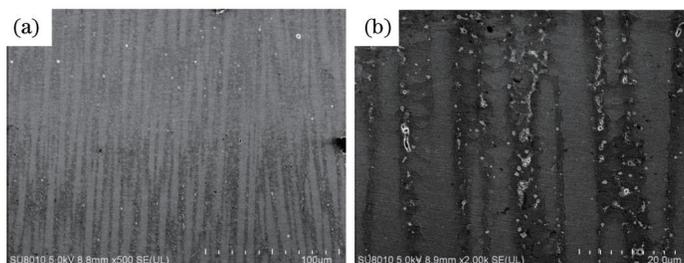


图1 激光直接成形 DZ125L 沉积态 SEM 组织。(a) 500 \times ; (b) 2000 \times

Fig.1 As-deposited SEM microstructure of laser direct forming DZ125L. (a) 500 \times ; (b) 2000 \times

图2为热处理后的微观组织形貌。与沉积态相比,热处理后的组织仍然为外延生长的柱状晶组织,但晶粒尺寸明显增大。由图2(a)可知热处理后的晶粒尺寸约为30~90 μm ,与沉积态相比增大了6~8倍。另外,由图2(b)和2(c)可知,时效后的柱状晶基体上析出了大量的网状 γ' 强化相,强化相分布均匀,网状尺寸为0.15~0.3 μm 。同时晶间块状碳化物得到钝化,数目增多。这说明固溶过程合金的溶质均匀扩散,通过时效热处理析出了均匀分布的 γ' 强化相和碳化物。

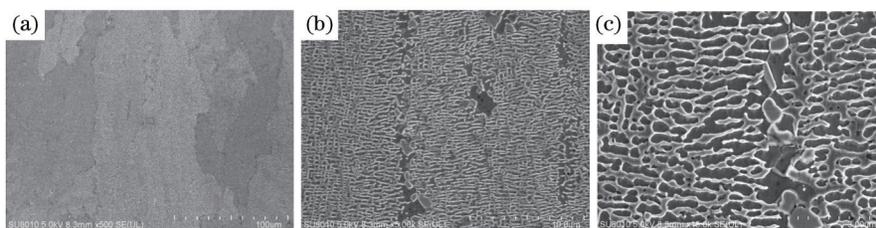


图2 激光直接成形 DZ125L 热处理态 SEM 组织。(a) 500 \times ; (b) 5000 \times ; (c) 15000 \times

Fig.2 Heat treatment SEM microstructure of laser direct forming DZ125L. (a) 500 \times ; (b) 5000 \times ; (c) 15000 \times

表3为激光直接成形 DZ125L 熔覆组织室温拉伸测试的结果。由表3可知,常温下沉积态柱状晶组织纵向抗拉强度达到1312 MPa,延伸率为5.27%。热处理后材料室温抗拉强度降低为1201 MPa,与沉积态相比降低了8.46%,延伸率提高至6.69%。由表3可知,热处理前后材料的力学性能均达到了国家标准的要求。激光直接成形 DZ125L 力学性能高于国家标准,主要有以下两方面原因:1) 激光直接成形快速熔凝过程中熔池的温度梯度较高,生成细小的柱状晶组织,晶粒尺寸远小于铸造水平,因此强度较高;2) 熔池在快速凝固过程中生成了非平衡的过饱和固溶体,大量合金元素固溶在柱状晶基体 γ 之中起到固溶强化作用,增强了激光直接成形 DZ125L 柱状晶的力学性能。

此外,虽然热处理后基体上析出了大量 γ' 强化相,但材料抗拉强度却出现了明显的下降。这主要由两方面原因造成:1) 沉积态的柱状晶组织具有较高的过饱和固溶度,固溶时效热处理则是在过饱和固溶体基体 γ 上析出大量的 γ' 强化相,固溶度明显下降,导致材料的综合力学性能提高了,但强度指标(屈服强度和抗拉强度)有所下降;2) 固溶时效热处理也使柱状晶尺寸明显增大,晶粒尺寸的增大将会在一定程度上降低其强度。因此,热处理之后材料的强度指标出现了下降的趋势,延伸率略有提高。

表3 激光直接成形 DZ125L 试样常温力学性能测试结果

Table 3 Room-temperature tensile properties of DZ125L by laser direct forming

Forming technology	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%
As-deposited	1139.5	1312	5.27
As-deposited + Heat treatment	1001	1201	6.69
National standard	≥ 840	≥ 980	≥ 5

图3为激光直接成形试样常温拉伸断口的形貌。观察可知热处理前后的试样断口宏观形貌较平整,呈暗灰色,拉伸过程中试样变形均匀,均无明显的颈缩现象。由图3(c)、(d)可知,热处理前后试样断口表面均存在明显的韧窝,断裂为韧性穿晶断裂。对比图3(e)、(f)可发现热处理之后韧窝内的颗粒状物质的数目明显增多,由以上分析可确定为 γ' 强化相。

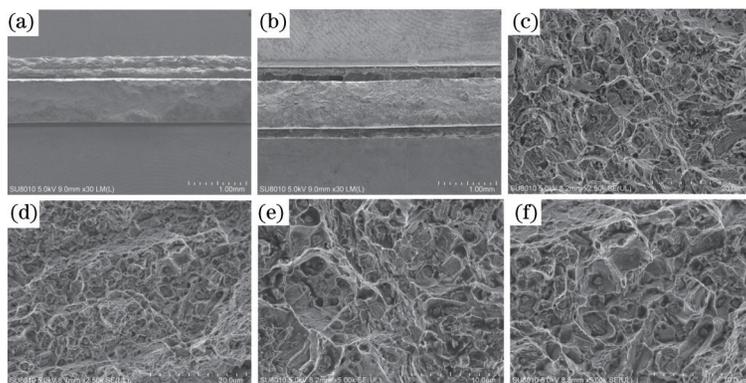


图3 激光直接成形 DZ125L 试样断口形貌。(a) 30 \times , (c) 2500 \times , (e) 5000 \times , 沉积态; (b) 30 \times , (d) 2500 \times , (f) 5000 \times , 热处理
Fig.3 Fractography of laser direct forming DZ125L. (a) 30 \times , (c) 2500 \times , (e) 5000 \times , as-deposited; (b) 30 \times , (d) 2500 \times , (f) 5000 \times , heat treatment

3.2 结合面组织和力学性能的分析

基材与沉积层结合面的力学性能是修复试样机械性能的关键所在。图4为修复试样不同状态下结合面处的微观组织形貌。热处理前后结合面均呈现为“圆弧”状。熔覆组织为具有典型的外延生长特征的柱状晶组织。

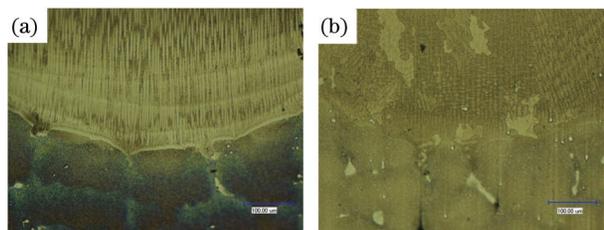


图4 激光直接成形修复 DZ125L 结合面微观形貌。(a) 沉积态; (b) 热处理态

Fig.4 Microstructures of interfaces of laser directing forming DZ125L. (a) As-deposited; (b) heat treatment

结合面强度的测试结果如图5和表4所示。由图5可知修复试样的拉伸断裂均出现在基材上,试样未经屈服阶段即发生断裂,这证明修复组织与基材的结合面性能良好,而结合面处力学性能主要由两方面保障:1)是结合面处的组织形貌。由图4可知熔覆组织沿基材结合面外延定向生长,晶粒取向和基材相一致,且熔覆组织晶粒尺寸小,固溶度高,在一定程度上保障了结合强度;2)是结合面处的熔覆深度。由图4可知结合面处熔深最大可达100 μm 左右,一定的熔深可以保障在基材和熔覆层间形成完全的冶金结合面,提高结合性能的可靠性和稳定性。实验结果也证明了熔覆层组织的常温力学性能高于铸件。激光定向生长修复

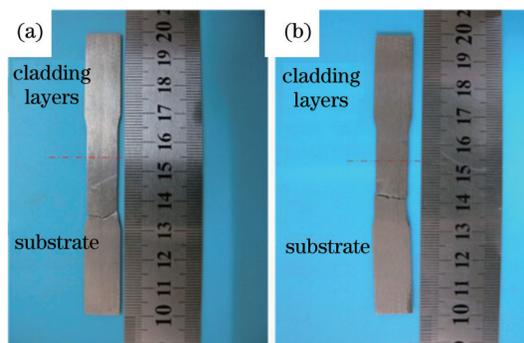


图5 激光直接成形 DZ125L 修复试样拉伸结果。(a) 沉积态; (b) 热处理态

Fig.5 Tensile results of repaired samples by laser direct forming DZ125L. (a) As-deposited; (b) heat treatment

零件可满足使用要求。

表 4 激光直接成形 DZ125L 修复试样常温力学性能测试结果

Table 4 Room-temperature tensile properties of DZ125L by laser direct forming

Forming technology	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%
As-deposited	-	799.5	-
As-deposited + Heat treatment	-	830	-
National standard	≥ 840	≥ 980	≥ 5

图 6 为激光直接成形 DZ125L 显微硬度随熔覆高度的变化曲线。对比两条曲线可知,热处理后熔覆层的显微硬度与沉积态相比降低了 80 HV 左右,这也对应了热处理后熔覆层强度的降低。

对于沉积态的试样,随着熔覆高度的增加,显微硬度虽有波动,但总体稳定在 520 HV 左右。而对于沉积态试样的基材,在结合面下 0~0.5 mm 的范围内,其显微硬度变化较大,最大为 477 HV,最小为 411 HV。随着与结合面距离的增加,基材的显微硬度最终稳定在 430 HV 左右。沉积态熔覆层显微硬度比基材显微硬度高出约 90 HV。

另外,对于固溶时效后的试样,由图 6 可知,其熔覆层显微硬度随高度波动较小,基本稳定在 440 HV 附近,这说明热处理之后熔覆组织的结构更加均匀。对于该种状态下的基材而言,其显微硬度与沉积态具有相似的特征,最终均稳定在 430 HV 左右。可见经过固溶时效处理后,熔覆层的显微硬度略高于基材的显微硬度,两者相差不大。

对于热处理前后的试样,结合面从基材向熔覆层过渡时,显微硬度均呈现出增加的趋势,这也说明激光熔覆修复 DZ125L 的结合面的强度是高于基材的。

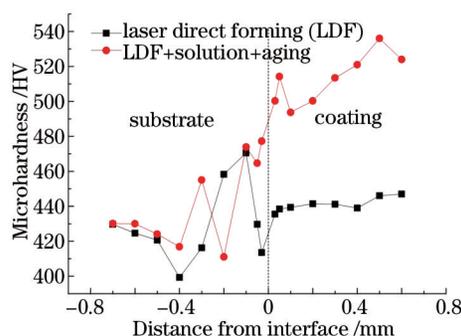


图 6 显微硬度测量结果

Fig.6 Results of microhardness

4 结 论

1) 激光直接成形 DZ125L 的组织为典型的柱状晶组织,其一次枝晶间距为 8~12 μm ,沉积态柱状晶组织的纵向抗拉强度为 1312 MPa,延伸率为 5.27%,熔覆组织的显微硬度约为 520 HV,高于铸造基材的 430 HV。

2) 热处理后熔覆层的柱状晶尺寸增大为 30~90 μm ,柱状晶基体上析出大量的 γ' 强化相。柱状晶组织的纵向抗拉强度达到 1201 MPa,延伸率为 6.69%,均满足国家标准;热处理后熔覆层的显微硬度降为 440 HV,与基材接近。

3) DZ125L 熔覆层与定向基材的结合面力学性能良好,热处理前后结合面的常温强度均高于基材,可满足使用要求。

参 考 文 献

1 Chen Rongzhang, She Li, Zhang Hongwei, *et al.*. Investigation of directionally solidified alloy DZ125[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(4): 14-19.

陈荣章, 余力, 张宏伟, 等. DZ125 定向凝固高温合金的研究[J]. 航空材料学报, 2000, 20(4): 14-19.

2 Zhang J, Lou L H. Directional solidification assisted by liquid metal cooling[J]. Journal of Material Science & Technology, 2007, 23

- (3): 289-300.
- 3 Fu H Z, Geng X G. High rate directional solidification and its application in single crystal superalloys[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2(1): 197-204.
- 4 Ge Jiangbo, Zhang Anfeng, Li Dichen, *et al.*. Process research on DZ125L superalloy parts by laser metal direct forming[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0703004.
葛江波, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金零件工艺的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703004.
- 5 Luo Yao, Pang Shengyong, Zhou Jianxin, *et al.*. Numerical simulation of recast layer formation in nanosecond pulse laser drilling on nickel-based high-temperature alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403007.
罗 垚, 庞盛永, 周建新, 等. 镍基高温合金纳秒激光脉冲制孔再铸层形成过程数值模拟[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403007.
- 6 Do Xuantuoi, Li Dichen, Zhang Anfeng, *et al.*. Numerical experimental investigation on the epitaxial growth of columnar crystal in laser direct forming of DZ125L super-alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603008.
Do Xuantuoi, 李涤尘, 张安峰, 等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金柱状晶连续生长的数值模拟与实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603008.
- 7 Zhong M L, Sun H Q, Liu W J, *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.
- 8 Pan Hu, Zhao Jianfeng, Liu Yunlei, *et al.*. Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloys by laser cladding repair[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403007.
潘 浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403007.
- 9 Han Jiajun, Lin Xin, Yang Haiou, *et al.*. Microstructure of directional solidified DZ125 nickel-base superalloy repaired by laser forming reaping[J]. Foundry Technology, 2014, 35(10): 2320-2323.
韩加军, 林 鑫, 杨海欧, 等. 激光成形修复定向凝固 DZ125 镍基高温合金的组织研究[J]. 铸造技术, 2014, 35(10): 2320-2323.
- 10 Zhi Xiang, Zhao Jianfeng, Cai Jun. Effect of process parameters on gorming quality of fusion zone in laser cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 101403.
智 翔, 赵剑峰, 蔡 军. 激光熔覆修复工艺参数对熔合区成形质量的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 101403.
- 11 Liu Qibin, Li Shaojie. Repairing of aeroengine blade with cast defect by laser cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(3): 52-55.
刘其斌, 李绍杰. 航空发动机叶片铸造缺陷激光熔覆修复的研究[J]. 金属热处理, 2006, 31(3): 52-55.
- 12 Sheng Dinggao. Technology of repairing fine cast nickel-base alloy turbine blade by laser cladding[J]. Foundry Technology, 2009, 30(10): 1341-1343.
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.
- 13 Doan Tatkhua, Li Dichen, Lu Bingheng, *et al.*. Effect of scanning methods on the cracking of the DZ125L superalloy in laser direct metal forming[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1003002.
Doan Tatkhua, 李涤尘, 卢秉恒, 等. 扫描方式对激光金属直接成形 DZ125L 高温合金薄壁件开裂的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1003002.
- 14 Hu Xiaohua, Zhang Anfeng, Li Dichen, *et al.*. Effects of heat treatment on microstructure and micro-hardness of laser metal forming DZ125L superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, (2): 12-16.
胡小华, 张安峰, 李涤尘, 等. 热处理对激光金属成形 DZ125L 合金组织及硬度的影响[J]. 材料工程, 2013, (2): 12-16.

栏目编辑: 张浩佳