

激光熔覆修复工艺参数对熔合区成形质量的影响

智翔 赵剑峰 蔡军

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 采用 FGH95 镍基高温合金粉末对航空发动机叶片铸造材料 GH4169 基体进行了激光熔覆修复的实验。通过改变激光熔覆修复过程中抽运电流、离焦量、扫描速度以及扫描间距等工艺参数,研究了各工艺参数对激光熔覆修复件成形质量的影响。实验结果表明,GH4169 高温合金和 FGH95 镍基高温合金粉末可以实现良好的冶金结合,当抽运电流 300 A、离焦量+8 mm、扫描速度 180 mm/min、扫描间距 1.0 mm 时,激光熔覆修复件熔合区能获得最少缺陷的成形质量。

关键词 激光技术;激光熔覆修复;镍基合金;工艺参数;成形质量

中图分类号 TN249; TG174.44 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.101403

Effect of Process Parameters on Forming Quality of Fusion Zone in Laser Cladding

Zhi Xiang Zhao Jianfeng Cai Jun

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract The powerful laser sintering experiment is performed on the foundry material GH4169 of an aircraft engine blade by using FGH95 which is one of nickel-based metal powder material. By changing the technology parameters such as pump current, defocusing distance, scanning speed and scanning line spacing in the laser sintering process, the effect on the forming quality of fusion zone of the sintered specimens is studied. It has been found that the foundry material GH4169 can achieve a good metallurgical bonding with nickel-based metal powder material FGH95. When the pump current is 300 A, the defocusing distance is 8 mm, the scanning speed is 180 mm/min, the scanning line spacing is 1.0 mm, and the fusion zone in laser cladding has a better forming quality.

Key words laser technique; laser cladding composite to repair; nickels-based alloy; process parameters; forming quality

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引言

航空类构件的材料主要是高温合金、高强度钢、钛合金、耐热不锈钢、镍合金等高强高韧合金。由于航空类构件长期在高温、高速、高压等苛刻环境下运转,极易发生损伤。航空类构件成本通常非常高,因此选择一种合适的修复技术来对航空类构件进行修复,对节省装备维护费用,提高装备使用寿命具有重要的意义。

国外对航空类零部件修复及再制造的研究较早,现已在工业上得到成功的应用。美国 GE 公司应用激光成形修复技术修复了高压涡轮叶片的叶尖,德国汉诺威激光研究中心发展了激光堆焊技术用于涡轮叶片的修复,瑞士洛桑理工学院、英国 TTL 公司等也开展了相关研究^[1~5]。国内的研究主要集中在叶片及其他零部件的修复工艺及修复材料的研究上。中国科学院金属腐蚀与防护研究所和西北工业大学凝固技术国家重点实验室都对 316L 不锈钢、TC4 钛合金和 GH4169 等典型合金进行了激光成形修复的工艺和组织性能

收稿日期: 2011-03-21; **收到修改稿日期**: 2011-04-23; **网络出版日期**: 2011-08-06

基金项目: 南京航空航天大学青年科技创新基金(NS2010144)资助课题。

作者简介: 智翔(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: zhixiangxy@163.com

导师简介: 赵剑峰(1971—),男,教授,主要从事激光快速成形技术和纳米材料制造技术等方面的研究。

E-mail: zhaojf@nuaa.edu.cn

研究,并成功修复了一批零件。南京航空航天大学激光快速成形中心很早就开展了直接激光烧结 FGH95 等多种镍基高温合金粉末的工艺研究。北京航空航天大学、贵州大学等单位也开展了激光修复方面的基础研究工作^[6~11]。

当前航空类零部件如涡轮、叶片等普遍采用的是镍基高温合金 GH4169 材料,但 GH4169 高温合金粉体制备工艺尚不成熟,采用激光熔覆的方法修复 GH4169 材料零部件时,无法获得一致的材料配对。本文采用与 GH4169 合金性能最为接近的 FGH95 镍基高温合金粉末,对 GH4169 高温合金基体进行激光熔覆修复实验,研究工艺参数对修复熔合区成形质量的影响,寻求 GH4169 高温合金材料零部件激光熔覆修复的工艺方法。

2 实 验

2.1 设备、材料及方法

实验所用激光器为 GXY-500 型 Nd:YAG 固体激光器,其可控参数为抽运电流、脉宽和频率。样品分析采用 XJP-300 金相显微镜和 LEO1530VP 扫描电镜。待修复基体为 GH4169,修复材料选用 FGH95。在带有梯形槽(上底 10 mm,下底 6 mm,深度为 1 mm)的长方体基体[图 1(a)]上预置一定致密度的金属粉末层,在适当的工艺参数下通过高能激光束辐照将粉末熔覆在基体上,实现点到线、由线到面的修复过程,如图 1(b)所示。在进行修复实验之前,对基体的梯形槽表面进行砂纸打磨去除氧化层,并用丙酮进行表面清洗以去除油脂。

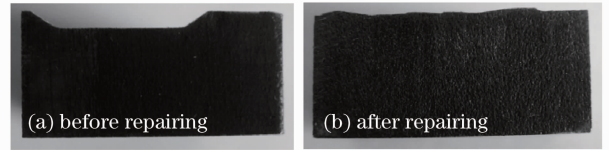


图 1 长方形基体粉末层修复前后

Fig. 1 Rectangler foundry weterial before and after repairing

2.2 工艺参数

受设备条件所限,激光脉冲宽度和脉冲频率设置为固定值,分别为 0.5 ms 和 100 Hz,粉层厚度为 0.4 mm。其他参数如表 1 所示。

表 1 激光修复实验参数

Table 1 Test parameters of laser cladding repair

No.	Pump current /A	Scanning speed / (mm/min)	Scanning interval /mm	Defocusing distance /mm
01	300	180	1.0	+8
02	250	180	1.0	+8
03	350	180	1.0	+8
04	400	180	1.0	+8
05	300	120	1.0	+8
06	300	150	1.0	+8
07	300	210	1.0	+8
08	300	180	1.0	+6
09	300	180	1.0	+10
10	300	180	1.0	+4
11	300	180	0.9	+8
12	300	180	0.8	+8
13	300	180	1.1	+8

3 实验结果与分析

3.1 抽运电流对熔合区成形质量的影响

在离焦量 $f = +8$ mm、扫描速度 $V = 180$ mm/min 和扫描间距 $L = 1.0$ mm 时,观察并分析抽运电流分别在 250,300,350 和 400 A 时熔合区的成形质量。

当抽运电流在 250 A 和 300 A 时,熔覆层与基体结合界面较完整,没有明显的缺陷,少量的基体材料被熔化,修复组织中枝晶数目增多,熔覆层和基体之间呈较好的冶金结合,如图 2(a)和(b)所示。当激光电流在 350 A 时,在熔覆层和基体之间出现了明显的孔隙,如图 2(c)中 A 所示;当激光电流在 400 A 时,熔覆层和基体之间以及熔覆层中均出现孔隙,如图 2(d)中 C 和 B 所示。

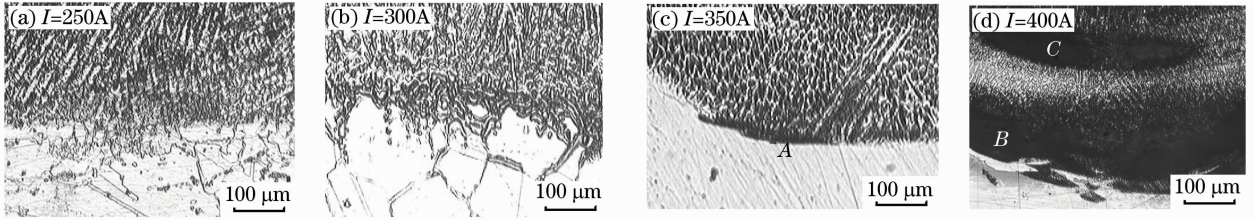


图 2 激光电流影响下扫描线熔合区的显微组织

Fig. 2 Microstructure of fusion zone influenced by the pump current

随着抽运电流的增加,激光能量密度增大,粉层吸收的能量越来越多,使得熔池中的液相迅速增加。随着液相的流动,粉末颗粒发生滑动、旋转、重排,使烧结体迅速致密化^[12],增强了熔覆层与基体组织的结合;但当抽运电流过大时,激光能量密度将随之过大,熔池会过多地吸收周围粉末,导致下一处熔池内粉末量不足,容易出现孔隙。与此同时,能量密度的增加导致熔池温度升高,部分液相气化,熔池体积膨胀,激光束离开后,在熔池凝固过程中形成封闭的孔隙。

3.2 扫描速度对熔合区成形质量的影响

在抽运电流 $I=300$ A、离焦量 $f=+8$ mm、粉层厚度 $\delta=0.4$ mm 和扫描间距 $L=1.0$ mm 的条件下,观察并分析扫描速度分别在 120,150,180 和 210 mm/min 时熔合区的成形质量。

当扫描速度为 120 mm/min 时,熔合区出现较大尺寸的孔隙,如图 3(a)中 D 所示;当扫描速度上升到 150 mm/min 时,熔合区孔隙变小,熔覆层成形质量有所改善,如图 3(b)所示;当扫描速度为 180 mm/min 时,熔合区成形质量变好,界面处没有出现孔隙,如图 3(c)所示;但当扫描速度达到 210 mm/min 时,如图 3(d)F 所示,熔合区再次出现孔隙。

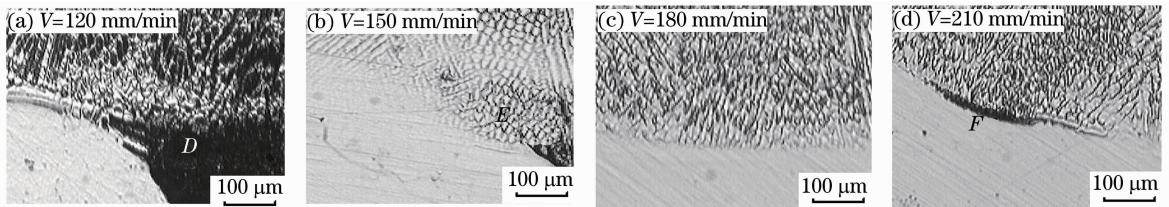


图 3 扫描速度影响下扫描线熔合区的显微组织

Fig. 3 Microstructure of fusion zone influenced by the scanning speed

当其他工艺参数一定时,激光辐照时间与扫描速度成反比。扫描速度慢,则激光辐照时间长,能量密度大,粉层吸收的能量多,产生过多的液相,使得单个熔池过大,吸收过多的粉末,形成孔穴,熔合区易出现较大孔隙。但当扫描速度过快时,激光辐照时间过短,导致粉末不能充分熔融,不能产生足够的液相,乃至无法进行熔覆,熔合区也会产生孔隙^[13~15]。适当的扫描速度可使粉层吸收的能量能产生恰当的熔池,形成稳定均匀的熔覆层。

3.3 离焦量对熔合区成形质量的影响

在抽运电流 $I=300$ A、扫描速度 $V=180$ mm/min、粉层厚度 $\delta=0.4$ mm 和扫描间距 $L=1.0$ mm 的条件下,研究离焦量分别在 +4,+6,+8 和 +10 mm 时修复样件熔合区的成形质量。

当离焦量较小时,熔合区出现较大孔隙,如图 4(a)中 G,4(b)中 H 所示,且熔合程度极差。当离焦量增大到 8 mm 时,熔合区成形质量较好,没有孔隙等缺陷,但当离焦量继续增大到 10 mm 时,虽然界面处未出现孔隙,但熔覆层中出现了孔隙缺陷,如图 4(d)中 K,J 所示,且成形质量较差。

离焦量影响着光斑的激光能量密度,同时也影响着光斑直径。离焦量小则光斑直径小,在相同的激光能

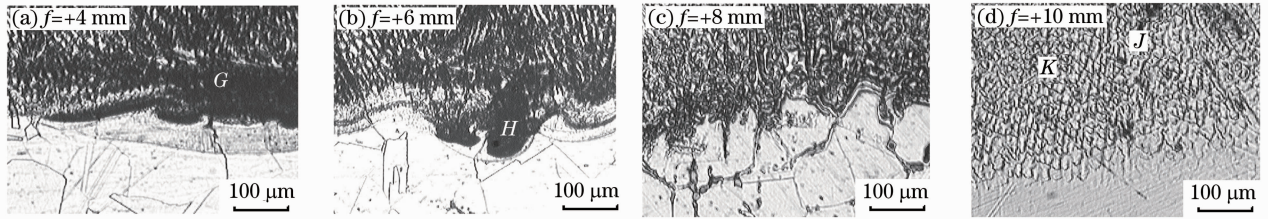


图4 离焦量影响下垂直于扫描线熔合区的显微组织

Fig. 4 Microstructure of fusion zone influenced by the defocusing distance

量下,光斑直径小,则能量密度大,粉层吸收的能量多。当离焦量过小时,粉层吸收过多的能量,使熔合区内气相增加,导致熔合区出现孔隙,同时由于能量密度大,单个熔池吸收过多粉末,使下一熔池内粉末吸收不足,也导致孔隙的出现。但当离焦量过大时,激光能量密度过低,吸收不到足够的能量,无法充分熔融,熔池内液相不足,会导致孔隙和裂纹的出现。

3.4 熔合区组织结构

在前文实验的基础上,选择抽运电流 300 A、离焦量 +8 mm、扫描速度 180 mm/min 和扫描间距 1.0 mm 的参数配置,获得较好成形质量的制件。对制件熔合区进行微观组织结构分析发现,熔覆层与基体之间实现了良好的冶金结合,如图 5(a)所示。从结合区到熔覆层组织过渡良好,表明熔覆粉末材料与基体材料之间有着良好的相容性。熔覆层组织基本沿着热扩散方向生长,具有定向快速凝固特征。熔合界面的微观组织表现为枝状晶和等轴晶的交错结构,熔合区没有孔隙、裂纹等缺陷,成形质量良好。图 5(b)显示了熔覆层层间的微观组织结构,可看出熔覆层内部组织主要呈枝状晶结构,晶粒细致、均匀,且没有孔隙、裂纹等缺陷。

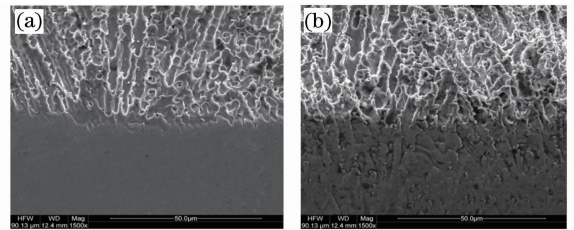


图5 下熔合区显微组织

Fig. 5 Microstructure of fusion zone

4 结 论

1)GH4169 高温合金和 FGH95 镍基高温合金粉末可以实现良好的冶金结合,熔合界面的微观组织表现为枝状晶和等轴晶的交错结构,成形质量良好。

2)激光熔覆修复工艺参数对熔合区成形质量具有重要影响,抽运电流、扫描速度以及离焦量过大或过小都会导致熔合区成形质量差,出现孔隙等缺陷,但均可控。

3)在本实验条件下,在抽运电流 300 A、离焦量 +8 mm、扫描速度 180 mm/min 和扫描间距 1.0 mm 的参数配置下,能获得较好的熔合区成形质量。

参 考 文 献

- 1 L. Shepeleva, B. Medres, W. D. Kaplan *et al.*. Laser cladding of turbine blades[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, **41**(1-3): 45~48
- 2 P. Bendeicha, N. Alamb, M. Brandt *et al.*. Residual stress measurements in laser clad repaired low pressure turbineblades for the power industry[J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, **10**(1): 70~74
- 3 L. Sextona, S. Lavina, G. Byrnea *et al.*. Laser cladding of aerospace materials[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2002, **122**(1): 63~68
- 4 Y. P. Kathuria. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, **132**(2-3): 262~269
- 5 R. Vilar, E. C. Santos, P. N. Ferreira *et al.*. Structure of NiCrAlY coatings deposited on single-crystal alloy turbine blade material by laser cladding[J]. *Acta Materialia*, 2009, **57**(18): 5292~5302
- 6 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 296~301

- 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 296~301
- 7 Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 1014~1018
- 于君, 陈静, 谭华等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(7): 1014~1018
- 8 Zhao Jianfeng, Zhang Jianhua, Zhang Jianfeng *et al.*. Analysis on microstructure feature of Ni-alloy parts prepared by direct laser metal sintering[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, **16**(3): 264~267
- 赵剑锋, 张建华, 张剑锋等. 镍合金激光直接烧结合成制件显微结构及微观缺陷[J]. 中国机械工程, 2005, **16**(3): 264~267
- 9 Wang Maocai, Zhang Jie. Powder metallurgy repair & remanufacturing of high temperature alloy bucket[J]. *China Surface Engineering*, 2010, **23**(1): 75~79
- 王茂才, 张杰. 高温合金叶片粉末冶金修复再制造[J]. 中国表面工程, 2010, **23**(1): 75~79
- 10 Zhang Jianhua, Zhao Jianfeng, Tian Zongjun *et al.*. Experimental research on selective laser sintering of nickel-based alloy powder[J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, **15**(5): 431~434
- 张建华, 赵剑峰, 田宗军等. 镍基合金粉末的选择性激光烧结试验研究[J]. 中国机械工程, 2004, **15**(5): 431~434
- 11 Gao Enmeng, Zhao Jianfeng, Liu Bingjun. Microstructure and mechanical property of samples prepared by DLMS with FGH95 powder[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2009, **30**(3): 656~659
- 高恩猛, 赵剑峰, 刘炳军. FGH95 粉末激光直接烧结的微观组织及力学性能[J]. 热处理技术与装备, 2009, **30**(3): 656~659
- 12 Guo Shiju. Powder Sintering Theory[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998. 301~311
- 果世驹. 粉末烧结理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998. 301~311
- 13 Deng Qilin, Hu Dejin. Rapid prototyping densified metal components by laser cladding[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2008, **28**(2): 33~38
- 邓琦林, 胡德金. 激光熔覆快速成形致密金属零件的试验研究[J]. 金属热处理, 2008, **28**(2): 33~38
- 14 Ma Lei, Wu Maoliang, Li Dichen *et al.*. A study on laser scan strategy of stereo lithography (SL) based on layers characteristics[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2001, **20**(2): 269~271
- 马雷, 吴懋亮, 李涤尘等. 基于层特征的快速成型激光扫描策略的研究[J]. 机械科学与技术, 2001, **20**(2): 269~271
- 15 Liu Ximing, Guan Zhenzhong. Conditions and factors for obtaining optimum coatings in the laser coating process by a powder feeding method[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(5): 470~476
- 刘喜明, 关振中. 送粉式激光熔覆获得最佳熔覆层的必要条件及其影响因素[J]. 中国激光, 1999, **A26**(5): 470~476