

激光修复 GH4169 镍基高温合金的弯曲性能

戚永爱 赵剑峰 谢德巧 李悦 沈理达 肖猛

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 基于激光修复技术,采用镍基高温合金 FGH95 粉末对航空发动机常用材料 GH4169 合金进行不同激光能量密度 q 下激光修复对比试验,对修复试样进行弯曲性能测试与金相分析。研究激光能量密度对修复试样弯曲性能的影响,探讨激光修复后试样弯曲性能变化的微观机理。结果表明:修复试样弯曲强度与无损试样接近,基本达到无损试样的弯曲性能。当 $q=120.0 \text{ J/mm}^2$ 时,修复试样弯曲强度最大,为 827.16 MPa,高于无损试样 0.5%。随着激光能量密度的增加,修复试样弯曲强度先增加后减小。在较高激光能量密度下 (154.3 J/mm^2),因修复区组织枝晶粗化,导致修复试样弯曲性能下降。

关键词 激光技术;激光修复;GH4169 合金;弯曲性能;微观组织

中图分类号 TN249; TG136 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1103009

Flexural Property of GH4169 Nickel-Based Superalloy by Laser Repair

Qi Yongai Zhao Jianfeng Xie Deqiao Li Yue Shen Lida Xiao Meng

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

Abstract Laser repair contrast experiments by using nickel-based superalloy material FGH95 powder are performed on the GH4169 that is commonly used in aero-engine filed under different laser linear energy densities q . By testing the flexural property and analyzing the metallic phase, the influence of the laser linear energy density on flexural properties of repaired samples and microscopic mechanism of flexural property change are studied. The results indicate that the flexural strength of repaired samples is close to that of original sample and basically achieves flexural property of original sample. When $q=120.0 \text{ J/mm}^2$, the flexural strength of 827.16 MPa is maximum and has a 0.5 percent larger than that of original sample. With laser linear energy increasing, the flexural strength of repaired samples first increases and then decreases. The flexural property decreases at a higher laser energy density of 154.3 J/mm^2 due to the coarsening of repaired area dendrites.

Key words lasers technique; laser repair; GH4169 superalloy; flexural property; microstructure

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引 言

近年来,由于激光修复技术成形快、稀释率低、界面冶金结合、易于修复难加工材料等特点^[1-2],在航空领域中受到广泛关注。学者们也对不同材料航空零部件的修复试样的性能进行了研究。薛雷等^[3]

对激光修复 TC4 合金锻件的低周疲劳性能进行了研究,由于修复试样的强度高塑性低,而低应变区强度起主要作用,高应变区塑性起主要作用,从而修复试样的低应变区疲劳寿命高于 TC4 模锻件、高应变区低于模锻件。Liu 等^[4]测试了激光修复 AA7075-

收稿日期: 2013-05-07; **收到修改稿日期**: 2013-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(51205198)、航空科学基金(2011ZA52007)、中央高校基本科研业务费专项资金(30820122011ZA52007)、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj120216)

作者简介: 戚永爱(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: aiyong_qi@163.com

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

E-mail: zhaojf@nuaa.edu.cn(通信联系人)

T651 合金试样的拉伸性能、疲劳性能和耐腐蚀性能,一些工艺参数下的熔覆层组织出现裂纹和气孔等缺陷,性能测试结果显示修复试样抗拉强度和疲劳寿命均低于原无损试样,而修复区比基体更耐腐蚀,因此需要对工艺参数进行优化,使得修复试样的各项性能均衡。针对航空发动机关键零部件常用镍基高温合金材料 GH4169,凡进军等^[5-7]用 FGH95 合金粉末进行了激光修复的研究工作,并对修复试样的高温、常温冲击韧性、显微硬度等性能进行了测试,试样的高温和常温冲击韧性最大值分别为 101.82 J/cm² 和 109.09 J/cm²,修复区显微硬度明显高于被修复基体。

材料的弯曲强度表征了材料抵抗弯曲变形的能力,航空发动机转子、叶片等零部件在冷却过程中发生弯曲变形是不可避免的,因零部件弯曲而导致发动机故障的实例早有报道^[8]。航空发动机零部件的弯曲性能对航空发动机运行稳定性非常关键,为使修复件能够正常投入实际使用,对修复后零部件的弯曲性能进行研究是非常重要的。目前,针对激光修复镍基高温合金航空件弯曲性能的研究相对较少。

本文基于激光修复技术,通过激光功率与扫描

表 1 FGH95 与 GH4169 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of FGH95 and GH4169 (mass fraction, %)

	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	W	Co	Fe	Ni
FGH95	12.00~14.00	3.30~3.70	3.30~3.37	3.30~3.70	2.30~3.70	3.30~3.70	7.00~9.00	0.50	Etc
GH4169	17.00~21.00	4.75~5.50	2.80~3.30	0.65~1.55	0.20~0.80	—	≤1.00	Etc	50.00~55.00

与美国 IPG 公司合作搭建试验系统,该系统由 STS2000 型 CO₂ 激光器、XSL-PF-01A-2 型双料仓负压式同轴送粉器、三轴联动数控工作头、氩气保护系统等组成。激光器最大功率为 2 kW,可提供连续与脉冲两种形式激光,与之配套的送粉装置送粉量在 5~150 g/min 范围内连续可调。

2.2 试验方法

采用电火花线切割的方法在基体上加工出截面为梯形的凹槽作为待修复试样,对试样进行砂纸打磨、丙酮清洗去除氧化层与油污,并对粉末进行烘干处理。待修复试样如图 2 所示,试样的长宽高尺寸分别为 104 mm×58 mm×6 mm,中间梯形槽深为 2 mm,上底为 10 mm,下底为 6 mm。修复时对基体进行预热,预热温度约为 350 °C,并采用氩气气氛保护。

为使粉末吸收激光能量充分,采用矩形光斑^[9],光斑内激光能量沿纵向均匀分布,横向呈高斯分布。修复过程中,激光沿凹槽长度方向单向扫描,矩形光

速度 2 个工艺参数的正交试验,分析激光能量密度对 GH4169 镍基高温合金修复试样弯曲性能的影响,探讨激光修复后试样弯曲性能变化的微观机理,以为同类失效零件的激光修复提供一定的试验和理论参考。

2 激光修复工艺试验

2.1 试验材料与设备

修复试验基体材料为航空发动机常用的镍基高温合金 GH4169,粉末材料为镍基高温合金 FGH95 粉末,粉末颗粒直径为 140~180 μm,粉末颗粒形貌如图 1 所示,粉末与基体材料主要成分如表 1 所示。

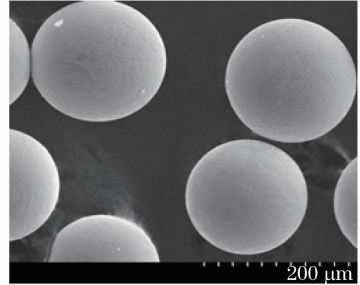


图 1 FGH95 粉末颗粒

Fig. 1 Powder particles of FGH95

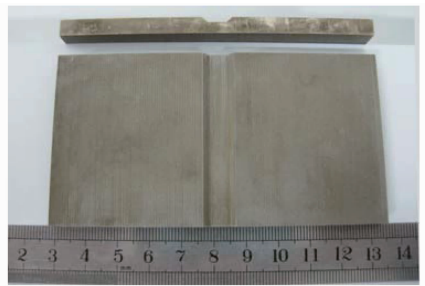


图 2 待修复试样

Fig. 2 Sample for laser repair test

斑的长边平行于扫描方向,主要工艺参数如表 2 所示。激光能量密度为激光热源在单位长度上输出的能量,是修复过程中各种热现象的重要影响因素,不但影响峰值温度的分布和冷却速度,还影响凝固时间,从而影响修复试样的冶金特性和力学性能^[10]。激光能量密度 q 表示为

$$q = \frac{P}{(v_s \times a)}, \quad (1)$$

式中 P 为激光功率, v_s 为扫描速度, a 为与扫描方向垂直的矩形光斑边长。

表 2 激光修复试验主要工艺参数

Table 2 Process parameters of laser repair

Sample number	Laser power P /W	Scan speed v_s /(mm/min)	Linear energy density q /(J/mm ²)	Beam size /mm	Scanning pitch l /mm	Powder feed rate v_f /(g/min)
1	1350	450	120.0			
2	1250	450	111.1			
3	1150	450	102.2			
4	1350	400	135.0			
5	1250	400	125.0	1.5×3	1.2	21.7
6	1150	400	115.0			
7	1350	350	154.3			
8	1250	350	142.9			
9	1150	350	131.4			

激光以一定速度按照预定的轨迹扫描照射修复区,一层修复结束后激光头上升一个熔覆层的距离进行下一层修复,直至修复完成。修复区共进行3层熔覆,根据修复区尺寸设计熔覆层层高分别为:0.6、0.8、0.8 mm,每层熔覆道数分别为:7、8、11。金相分析时采用 XJP-300 金相显微镜和 LEO1530VP 扫描电镜对修复试样微观组织进行观

察,对修复试样进行线切割获得横截面试样,横截面垂直于激光扫描方向。按照规定程序^[11]对其打磨及抛光,腐蚀剂为盐酸(50 mL)、硝酸(5 mL)、水(50 mL)的盐酸硝酸溶液。激光修复完成并经过相应的机械加工处理后,用电火花线切割的方法沿试样长度方向切割弯曲性能测试样件,试件长宽高尺寸分别为 104 mm×20 mm×6 mm,如图 3 所示。

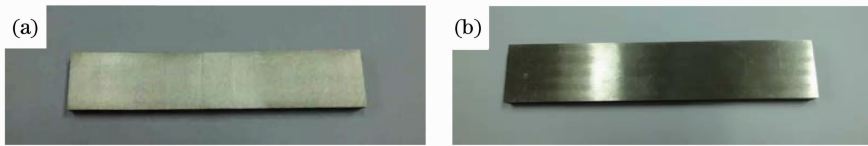


图 3 弯曲性能测试样件。(a) 修复试样; (b) 无损试样

Fig. 3 Samples for flexural strength tests. (a) Repaired sample; (b) original sample

3 弯曲性能测试及结果

试样的弯曲性能采用 SANS-CM5105 型万能材料试验机进行测试。为保证试样表面粗糙度达到性能测试要求,修复完成后,采用高速铣削的方法对试样修复部位进行修整。弯曲强度测试时,试样跨距为 80 mm,采用的压头直径为 10 mm,加载速率为 2 mm/min,每组工艺参数下制备 5 件测试样件,结

果以每组试样计算值的算术平均值来表示。为减小修复试样测试中因试样微小翘曲变形引起的误差,采用背弯的测试方法,即压头位于修复区对面,图 4 为弯曲强度测试示意图。

图 5 为 7 号、4 号和 1 号修复试样与无损试样弯曲强度测试后的宏观形态,7 号与 4 号修复试样表面出现裂纹。由于试样的具体形状对弯曲强度影响较大,而本文中只是在同一尺寸下对修复试样与原无损试样的弯曲强度进行对比,因此与实际航空发动机零部件的弯曲强度具有一定差异。考虑实际工作中对零件变形有严格地限制,计算时以试样的挠度达到跨距的 1% 时^[12],试样外表面所承受的最大弯曲应力作为其弯曲强度的参考值。弯曲应力 σ_f 、弯曲应变 ϵ_f 和弹性模量 E_f 分别表示为

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}, \quad (2)$$

$$\epsilon_f = \frac{6Yh}{L^2}, \quad (3)$$

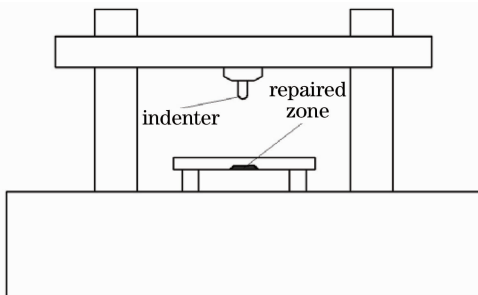


图 4 弯曲强度测试示意图

Fig. 4 Sketch of flexural strength test

$$E_t = \frac{L^3}{4bh^3} \cdot \frac{F}{Y}, \quad (4)$$

式中 F 为施加的载荷, L 为试样跨度, b 为试样宽度,

h 为试样厚度, Y 为与载荷对应的挠度。

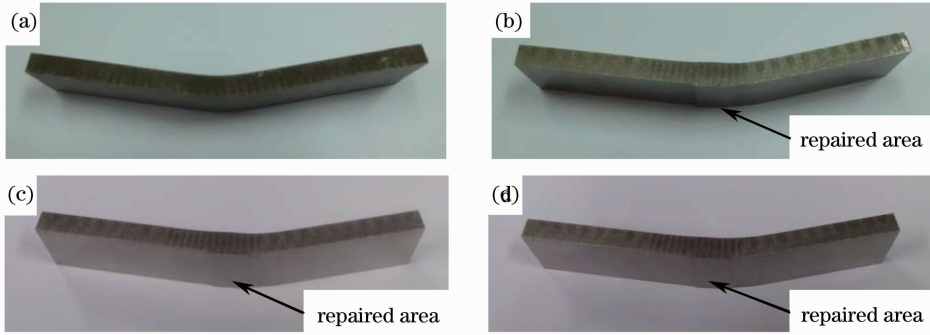


图 5 弯曲强度测试后试样形态。(a) 无损试样; (b) 7 号修复试样; (c) 4 号修复试样; (d) 1 号修复试样

Fig. 5 Forms of samples after flexural strength tests. (a) Original sample; (b) repaired sample 7; (c) repaired sample 4; (d) repaired sample 1

图 6 为 7 号和 1 号修复试样及无损试样弯曲强度测试的应力-应变曲线。常温塑性弯曲测试中, 在外力作用下, 试样的总变形量分为弹性变形和塑性变形。卸载后, 弹性变形完全消失而塑性变形会保留下来。图 7 为不同激光能量密度下修复试样测试计算所得弯曲强度和弹性模量变化曲线, 图中虚线分别为无损试样的弯曲强度和弹性模量。试样弯曲强度和弹性模量计算值的标准差分别为 0.88 和 1.03。

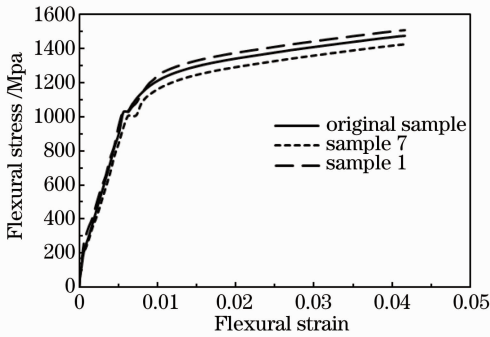


图 6 试样弯曲应力-应变曲线

Fig. 6 Curves of flexural stress versus flexural strain of samples

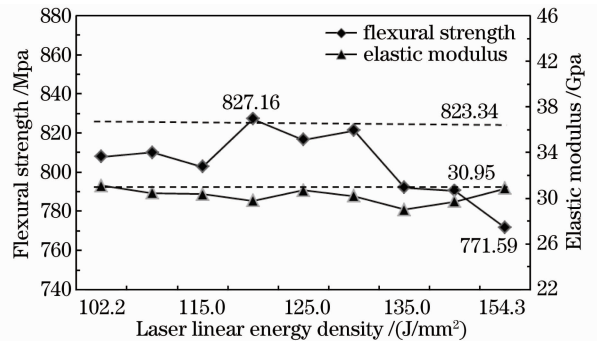


图 7 弯曲强度和弹性模量与激光能量密度的变化曲线

Fig. 7 Curves of flexural strength and elastic modulus versus laser linear energy density

827.16 MPa, 高于无损试样 0.5%。但当 q 增大至 154.3 J/mm² 时, 修复试样弯曲强度为 771.59 MPa, 明显低于无损试样。

图 8 为不同激光能量密度下垂直于扫描方向试样修复区截面的微观组织。图 8(a)~(d) 为微观组织金相图, 图 (e)~(h) 为对应的局部微观组织 SEM 图, 从中可以看出修复区组织致密没有显微裂纹等明显的缺陷, 修复区与基体结合界面如图 8 中白色曲线标记所示, 两者形成良好的冶金结合。结合区下方是一层胞状晶组织, 枝晶和等轴晶相间分布于结合区上方。随着激光能量密度的增大, 结合区附近等轴晶数量逐渐减小, 并且等轴晶逐渐致密。当激光能量密度为 131.4 J/mm² 时, 修复区组织中中等轴晶生长比较致密, 枝晶生长充分但未出现明显粗化[图 8(c)、(g)], 从而修复试样的弯曲强度与无损试样接近。当 $q=120.0$ J/mm² 时, 修复区微观组织中中等轴晶与枝晶相间生长, 等轴晶生长致密并且枝晶尺寸较为均匀[图 8(b)、(f)], 具有致

4 分析与讨论

从图 7 中可看出修复试样弹性模量变化较小, 这是因为弹性模量只与材料和温度有关^[13]。修复试样弯曲强度与无损试样弯曲强度接近, 修复后基本达到原无损试样的弯曲性能。随着激光能量密度的增大, 修复试样弯曲强度先增加后减小。当激光能量密度 $q \leq 131.4$ J/mm² 时(除 $q=120$ J/mm² 外), 修复试样的弯曲强度低于无损试样弯曲强度, 但相差不大。当 $q=120$ J/mm² 时, 修复试样弯曲强度最大, 为

密的等轴晶和均匀的枝晶组织的修复试样的弯曲强度最大。从图 8(d)、(h)可以看出当 q 增加到

154.3 J/mm^2 时,熔覆区组织呈现发达的枝晶状,其晶体结构明显粗化。

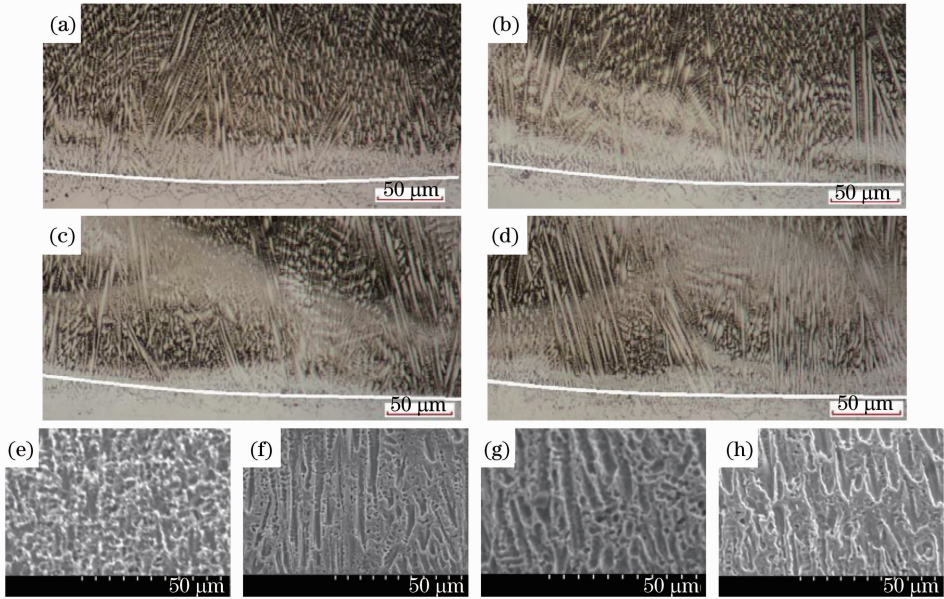


图 8 不同激光能量密度下垂直于扫描方向试样修复区截面的微观组织。

(a)、(e) $q=102.2 \text{ J/mm}^2$; (b)、(f) $q=120.0 \text{ J/mm}^2$; (c)、(g) $q=131.4 \text{ J/mm}^2$; (d)、(h) $q=154.3 \text{ J/mm}^2$

Fig. 8 Microstructures of the repaired area sections perpendicular to the scanning direction under different laser linear energy densities. (a)、(e) $q=102.2 \text{ J/mm}^2$; (b)、(f) $q=120.0 \text{ J/mm}^2$; (c)、(g) $q=131.4 \text{ J/mm}^2$; (d)、(h) $q=154.3 \text{ J/mm}^2$

试验中光斑尺寸较小,温度梯度沿扫描方向和垂直于扫描方向的分量基本相等^[14],即传热沿扫描方向和垂直于扫描方向同时激烈进行。当激光功率较小时,过冷度较大,并且由于惰性保护气体的冷却效果等条件,凝固速度沿扫描方向增大而沿垂直扫描方向减小,激光熔池的温度梯度在沿扫描方向上占有较大优势,枝晶组织会沿着有利于温度梯度较大的方向生长。根据 J. D. Hunt 模型^[15]可知熔池内形核率增加,等轴晶体积分数占绝对优势,因而凝固组织主要受形核控制,所以凝固组织生长为等轴晶。但由于激光能量密度较小(102.2 J/mm^2),材料吸收的激光能量较小,组织生长不充分,形成的等轴晶不致密[图 8(a)、(e)],从而修复试样的弯曲强度较小。

7 号修复试样采用的激光能量密度较大(154.3 J/mm^2)且扫描速度较小,此时激光作用于材料的能量较多,粉末吸收的能量较多,熔池吸收能量充足,熔覆区过冷度较小,材料的凝固速度慢,组织生长充足,晶体生长动力学特征明显,形成了发达的枝晶组织[图 8(d)、(h)]。而在弯曲过程中相对粗大的枝晶容易碎裂,致使修复试样的弯曲性能降低。

试验中 $q=120.0 \text{ J/mm}^2$ 时,采用了大激光功率(1350 W)匹配高扫描速度(450 mm/min),修复

试样的弯曲强度最大。此时材料凝固过程中,系统具有良好的热量和质量传输、温度梯度匹配凝固速率,使得修复区组织中等轴晶生长致密、枝晶生长均匀[图 8(b)、(f)],从而修复试样具有良好的弯曲性能。因此为得到性能良好的修复试样,需要选用合适的激光能量密度,并且合理匹配激光功率和扫描速度,大激光功率匹配高扫描速度有利于提高修复试样的弯曲性能。

5 结 论

1) 修复试样弯曲强度与无损试样弯曲强度接近,部分修复试样弯曲强度大于无损试样,激光修复后的试样弯曲性能基本达到修复前材料性能。

2) 随着激光能量密度的增加,修复区组织中等轴晶逐渐生长致密并且枝晶逐渐长大,导致修复试样弯曲强度先增大后减小。并且致密的等轴晶和均匀的枝晶组织结构下,修复试样能够获得最好的弯曲性能。

3) 试验中激光能量密度为 120.0 J/mm^2 时,修复区组织生长最为均匀,弯曲强度最大;激光能量密度为 154.3 J/mm^2 时,修复区组织粗化严重,弯曲强度最低。修复时选用的激光能量密度不能过大,采用大激光功率匹配高扫描速度可以使修复

试样的弯曲性能有所提高。

参 考 文 献

- 1 S J Na, J J Kim. 3D laser-forming strategies for sheet metal by geometrical information[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(6): 843–852.
- 2 Dong Shiyun, Xu Binshi, Wang Zhijian, *et al.*. Laser remanufacturing technology and its applications[C]. SPIE, 2008, 6825: 68251N
- 3 Xue Lei, Chen Jing, Lin Xin, *et al.*. Low cycle fatigue property of laser forming repaired TC4 forgings[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(7): 1225–1229.
薛蕾, 陈静, 林鑫, 等. 激光成形修复 TC4 合金锻件的低周疲劳性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(7): 1225–1229.
- 4 Liu Qianchu, Madabhushi Janardhana, Bruce Hinton, *et al.*. Laser cladding as a potential repair technology for damaged aircraft components[J]. *International J Structural Integrity*, 2011, 2(3): 314–331.
- 5 Fan Jinjun, Zhao Jianfeng. Microstructure and mechanical properties of samples prepared by direct laser metal sintering with FGH95 alloys[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0103003.
凡进军, 赵剑峰. 激光直接烧结 FGH95 合金的微观组织与性能[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0103003.
- 6 Cai Jun, Zhao Jianfeng. Impact toughness of superalloy FGH95 prepared by DLMS[J]. *Electromachining & Mould*, 2010, (2): 38–40.
蔡军, 赵剑峰. 激光直接烧结 FGH95 高温合金冲击韧性试验研究[J]. *电加工与模具*, 2010, (2): 38–40.
- 7 Pan Hu, Zhao Jianfeng, Liu Yunlei, *et al.*. Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloy by laser cladding reparation [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.
- 8 Zhang Lianxiang. Analysis of typical aeroengine vibration fault related to thermal bowed rotor[J]. *J Vibration and Shock*, 2008, 27(8): 7–9.
张连祥. 航空发动机转子热弯曲引发的典型故障分析[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(8): 7–9.
- 9 Chen Shuhai, Li Liqun, Chen Yanbing. Laser welding-brazing of Ti/Al dissimilar alloys joint with rectangle spot[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(12): 2036–2041.
陈树海, 李俐群, 陈彦宾. 矩形光斑钛/铝异种合金激光熔钎焊[J]. *中国激光*, 2008, 35(12): 2036–2041.
- 10 Mohammed Jasim Kadhim, Sami Ibrahim Al-Rubaiey, Ali Sabea Hammood. The influence of laser specific energy on laser sealing of plasma sprayed yttria partially stabilized zirconia coating[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(2): 159–166.
- 11 Ministry of Metallurgical Industry of China. GB/T 13298-91 metal-omnpection method of microstructure [S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
中华人民共和国冶金工业部. GB/T 13298-91 金属显微组织检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- 12 Committee of Science, Technology and Industry for National Defense. HB 5434. 6-2004 test methods for aircraft wheel friction materials-part 6; test method for bend strength [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
国防科学技术工业委员会. HB 5434. 6-2004 航空机轮摩擦材料试验方法第 6 部分: 弯曲强度试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- 13 Simon Hasbroucq, Abdelbacet Oueslatin, Ge'ry de Saxce'. Analytical study of the asymptotic behavior of a thin plate with temperature-dependent elastic modulus under cyclic thermomechanical loadings [J]. *International J Mechanical Sciences*, 2012, 54(1): 95–104.
- 14 Lu Jiangang. The Research on Process and Microstructure of Thin Parts in Laser Cladding Forming [D]. Hunan: Hunan University. 2004. 50–51.
卢建刚. 激光熔覆成形薄壁试件的工艺和显微组织研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2004. 50–51.
- 15 J D Hunt. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic[J]. *Materials Science and Engineering*, 1984, 65(1): 75–83.

栏目编辑: 宋梅梅