

K418 高温合金叶轮脉冲激光再制造形状与性能控制

任维彬¹, 周金宇¹, 张锁荣¹, 徐滨士², 王玉江², 陈国炎¹

(1. 江苏理工学院, 江苏 常州 213001)

(2. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要: 针对 K418 高温合金叶轮材料成本高、制造工艺复杂以及体积损伤频繁的实际, 以该牌号体积损伤叶轮再制造为目标, 设计了成分接近、工艺匹配的成形粉材, 基于波形可调制脉冲激光优化工艺, 实现了形状和性能的再生。结果表明: 叶片成形后表层及内部无裂纹, 成形部位与基体为冶金结合, 加工后尺寸精度在 1 mm 以内, 形变精度在 0.03 mm 以内, 成形层显微硬度 HV_{0.1} 为 9~14 GPa, 超过基体 20%。在高温动转平衡试验下, 叶轮最大转速达 13 500 r/min, 与设计振幅理想值的最大差值为 0.4 mm, 无明显偏转及喘振现象, 符合动平衡性能要求。

关键词: 脉冲激光; 叶轮; 再制造; K418

中图分类号: TG132.3⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)10-3315-05

K418 铸造高温合金作为用量最大的铸造高温合金, 由于其良好的高温力学性能, 被广泛应用于制作航空航天发动机、地面推进器、远洋燃气轮机等的各级各类叶片乃至整体连铸涡轮及导向器等部件^[1]。但受高温工况下高速粒子冲蚀作用影响, 叶片易发生边部体积损伤, 引起整个机组停转, 需要拆解叶轮进行堆焊修复后再进行安装调试方可投入运行^[2-6]。但上述工艺方法仍具有一定局限性^[7,8]:

(1) 该合金中 Al、Ti 元素含量较高, 焊接过程中易与空气中氢、氮、氧等元素反应, 造成接头脆化、塑性降低以及晶格偏移, 降低材料性能。已有工艺主要是对熔池施加惰性气体保护, 但在实际成形中, 随着激光熔池位置的随动, 保护气的加载不能实现位置变化的实时同步, 熔池的保护效果不充分, 再制造后性能与基体的匹配性难以保证, 成形部位力学性能下降较大;

(2) 堆焊成形修复的方式热输入过大, 易引起接头软化、萌生裂纹、整体形变超限以及热影响区范围过大。已有研究主要是采用焊前预热和焊后缓冷的工艺方法控制形变, 但增加工艺复杂性, 且难适用于空间复杂形状, 尤其是局部微小体积的再制造;

(3) 冷焊条件下, 叶片尖部易产生成形塌陷, 形

状拟合困难。已有成形方法主要是多次变位成形实现塌陷尺寸的补偿, 增加了成形工艺复杂性和性质的不可控性, 且基体热输入和形变也因此而相应增大。

综合上述问题, 本研究设计与 K418 合金具有较强匹配性的镍基高温合金材料, 采用波形可调制脉冲激光优化工艺, 实现了成形形状的高精度拟合以及性能的匹配控制, 提升了成形部位的高温力学性能, 为高温合金叶片类部件再制造提供理论及工艺借鉴。

1 成分与可焊性比较

K418 合金为 γ' 相沉淀硬化镍基高温合金, 该合金叶轮服役工况为 700~850 °C。基于其高温工况力学需求, 设计了一种与该合金成分接近的高温镍铬铁合金材料, 材料主要成分如表 1 所示。由材料成分及可焊性分析可知^[9], 两种材料在再制造过程中, 可能存在以下缺陷:

(1) 气孔多发。二者均属镍基合金材料, 固/液相温度差小, 流动性较差, 且镍元素高温下极易与空气中的氧反应生成 NiO, NiO 又与熔融态金属中的氢、碳发生继发反应形成 H₂O 和 CO, 气体在熔池的快速冷凝过程中, 无充分时间逸出, 产生气孔;

(2) 易生裂纹。镍基合金对焊接热裂纹敏感性较

收稿日期: 2018-10-27

基金项目: 常州市科技计划 (CJ20180058); 江苏省大学生实践创新训练计划 (11311711802), 常州市装备再制造工程重点实验室开放课题 (CRM2018A02)

作者简介: 任维彬, 男, 1983 年生, 博士, 江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州 213001, 电话: 0519-86953085, E-mail: renweibin100@163.com

高，碳、镍等元素在熔池中形成低熔点共晶，这些共晶在结晶后期在熔池的对流搅拌作用下，排挤在晶界部位，形成晶间液膜。这种液膜结构在成形热应力作用下，易引起裂纹；

(3) 夹渣附着。镍基合金流动性差，渗透力较小，再制造过程中生成的氧化物在熔池的对流搅拌作用下，易附着在成形层表面，在多层成形中，层间清渣不彻底，易重新卷裹进入熔池，造成夹渣。

综上，K418 合金叶轮再制造过程中，除复杂曲面薄壁以及尖部的形状控制外，对成形缺陷以及相关力学性能的控制，也是影响叶轮性能及寿命的关键环节。

2 脉冲激光成形工艺优化

2.1 脉冲激光波形调制

针对叶片型部件壁薄、易产生热变形等再制造难点，以成形热输入控制为目标，采用脉冲输出模式进行成形，实现热输入和热累积效应减少的同时，增加熔池的散热时间。基于已有的脉冲激光单道成形实验工艺^[10]：激光功率 1.2 kW，光斑直径 3 mm，扫描速度 5 mm/s，单道成形层宽度 3.2 mm，脉冲激光脉宽 10 ms，占空比 1:1；进一步对脉冲激光输出波形进行调制如图 1 所示。

与已有脉冲激光成形工艺对比，该状态波形脉冲激光工艺实现了进一步优化：

(1) 在保证材料充分成形的基础上，在同样占空比下，采用更小的输出脉宽，进一步减少了热输入并增加

了熔池的散热时间，减轻了熔池的热累积效应；

(2) 激光功率提升过程中，采用短时预热，二次提升的方式：首次提升 80%并保持微小时间间隔，实现对基体材料的预热，以减少基体对激光能量的反射，提升激光能量利用率，而后再次提升达到输出功率；

(3) 采用较大的激光功率下调速率，是为熔池获得更多的降温时间和更大的温度梯度，利于细晶组织的形成。

2.2 尖部与边部塌陷控制

实验激光光束能量呈高斯分布，激光光斑内距热源中心 r 处的热流密度 $q(r)$ 如式 (1) 所示^[11]：

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi r_H^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_H^2}\right) \quad (1)$$

式中， r_H 为加热光斑半径。其整体能量分布如图 2 所示，其中， Q 为热源中心处的最大热流密度。

成形过程中，激光熔池位置动态变化，光束扫描所形成的熔池呈现双半椭球形，熔池前端椭圆半轴较后端稍短，如图 2 所示。因此，成形过程结束关闭时刻，熔池后半部因能量略低于前半部，将造成成形尾部的塌陷^[12]。在叶片尖部体积损伤再制造过程中，尤其在多层成形过程中，这类边角塌陷的累积效应将无法在其后续成形过程中进行补偿，造成再制造成形尺寸的缺失，难以实现叶片形状的再生。

由于该类塌陷形成的尺寸缺失产生在熔覆层的末端，结合叶片损伤的几何特征，可从以下两方面对该类尺寸缺失进行工艺优化：

表 1 试验材料成分

Table 1 Test material composition ($\omega/\%$)

Material	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	C	Fe
Cladding layer	50.25~55.87	17.22~21.83	4.75~5.55	2.84~3.83	0.65~1.62	0.23~0.84	0.93~1.02	0.03~0.08	Bal.
K418	50.01~55.20	17.01~21.04	4.42~5.38	2.81~3.32	0.62~1.53	0.34~0.75	0.36~0.98	0.02~0.08	Bal.

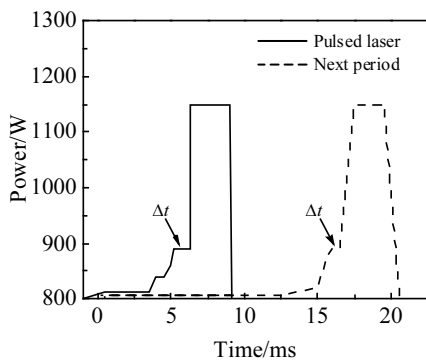


图 1 脉冲激光再制造调制输出波形

Fig.1 Output waveform of pulsed laser for laser remanufacture

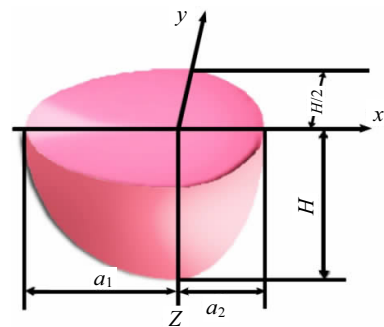


图 2 熔池动态历程中能量双半椭球体分布

Fig.2 Double half ellipsoid energy distribution of molten pool in the dynamic process

(1) 采用叶片同种材料形状块体与损伤部位进行连接, 通过延长成形路径, 将塌陷部位外移至成形部位外部, 以保证成形部位无塌陷, 尺寸恢复充分;

(2) 通过移动叶片尖端部位角度, 使成形部位位于同一水平面内, 实现尖部尺寸的恢复, 但形状尺寸精度将有所下降, 且可以恢复的叶尖尺寸相对较小。

3 成形过程与基本性能

3.1 成形过程

实验前对叶片损伤部位进行机械加工, 并对基材进行砂纸打磨, 用丙酮及无水乙醇清洗, 去除表面氧化膜及锈蚀, 将熔覆粉末置于 DSZF-2 型真空干燥箱内以 150 °C 干燥 2 h。实验采用光纤激光再制造系统进行, 送粉方式为四路同轴送粉, 过程中对熔池施加氩气保护。基于已有优化工艺参数, 采用激光功率 1.2 kW, 脉冲宽度为 5 ms, 占空比为 1:1, Δt 保温时间设置为 1.5 ms, 扫描速度 6 mm/s, 载气流量为 3 L/min, 送粉速率为 21.4 g/min。为避免或控制过程中热裂纹的产生, 对叶轮进行整体预热, 预热温度为 300 °C。此外, 在叶片待成形部位用非接触方式搭接同种材料试块, 以控制边部塌陷和利于成形后尺寸余量的去除, 同时以铝合金板对相邻叶片进行遮挡, 以避免激光光束的无效热输入, 如图 3a 所示。实验采用单道逐层叠加的方式进行, 多层成形时, 适当延长层间熔覆时间间隔, 以控制层间热累积效应以减少形变, 并采用机械打磨方式清除层间夹渣, 避免卷裹进入下一成形层熔池, 叶片成形后整体形貌如图 3b 所示。

图 3b 中叶片 1, 3 采用 2.2 节中所述外接试块的工艺方式成形; 图 3b 中叶片 2 采用 2.2 节中所述变换叶片角度为同一水平的方式进行成形, 简化了成形工艺, 实现了尖部体积损伤的形状恢复, 机械加工前形状尺

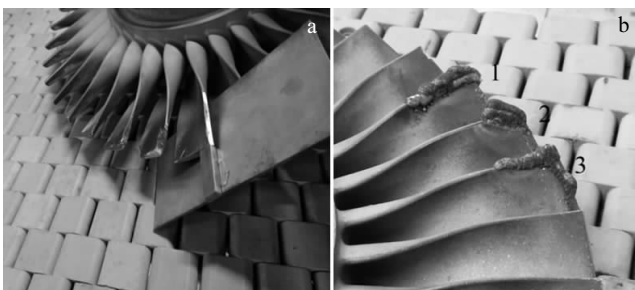


图 3 体积损伤叶轮激光再制造工艺过程

Fig.3 Process of the volume damage impellers for laser remanufacture: (a) overall morphology of the volume damage blades before laser remanufacturing and (b) overall morphology of the blades after laser remanufacturing

寸精度在 2 mm 以内; 而叶片 1, 3 形状精度相对更高, 机械加工前可控制在 1 mm 以内。机械加工后, 经三维反复测量表明, 叶片整体形变尺寸精度在 0.03 mm 以内。清除成形部位表面粉末粘附后, 在成形部位喷少许红色渗透剂, 并每隔 5 min 喷一次, 全程喷 3 次, 待干燥后, 将显像剂喷于表面进行显像, 以检验成形部位表层有无缺陷及裂纹产生, 探伤结果也验证了叶片成形后表层无裂纹。

3.2 基本金相组织

图 4 所示为体积损伤部位成形层金相组织。由图 4a~4d 可知, 熔覆层顶部为细小致密的等轴晶, 中部为相互交错分布的粗大的树枝晶, 熔覆层底部为胞状晶, 呈现典型的快速熔化凝固组织分布特征。由图 4b 可知, 树枝晶穿越多层成形层交错分布生长, 且取向趋于一致, 与沉积成形方向成 30°~40°夹角, 一次枝晶间距为 80~100 μm , 并向熔覆层顶部与底部延伸。这主要是因为熔覆层中部温度梯度相对较小, 枝晶具有充分孕育并长大的条件; 而熔覆层顶部及底部由于分别与空气及基体接触, 散热加快, 温度梯度加大, 树枝晶向等轴晶和胞状晶退化。由图 4c 可知, 晶内及晶间析出少量不规则颗粒状析出相, 起到弥散强化作用。由图 5 析出颗粒的 XRD 图谱可知, 该颗粒中存在严重的 Nb 元素偏析, 推断该相为 Laves 相。这主要是由于熔池温度经历由高到低的急冷过程, Laves 相在固溶体中溶解度降低而产生, 且这种析出相属硬脆相, 易于在晶间析出, 造成晶间开裂和塑性下降^[13]。但由于激光工艺的优化以及热输入的有效控制, 使该相仅少量析出, 且未形成团簇, 保证了材料高温力学性能。

3.3 成形层硬度匹配

图 6 所示为从熔覆层至基体显微硬度分布。由该图可知, 成形层由于高温析出强化相, 硬度获得提升, $\text{HV}_{0.1}$ 可达 9~14 GPa, 基体硬度为 8~10 GPa, 成形层较基体硬度提升 10%~40%, 实现了成形层与基体的过强匹配, 而过强匹配为成形层材料高温工况下可能存在力学性能下降留有空间。由成形层顶端至结合界面硬度值呈递减趋势, 这主要是因为成形层顶部温度梯度较大, 晶粒细小; 而熔覆层底部受接头软化作用影响, 导致硬度下降。

3.4 动转平衡测试

将再制造成形后叶轮进行打磨加工, 以符合叶片轮廓尺寸标准。采用动转平衡试验机进行试车试验^[14], 测量结果如图 7 所示。由该图可知, 叶轮最高转速达到 13 500 r/min, 动平衡振幅趋于平稳, 与设计振幅理想值的最大差值为 0.4 mm, 低于动平衡振幅性能设计的最大值, 符合再制造叶轮的工况要求。

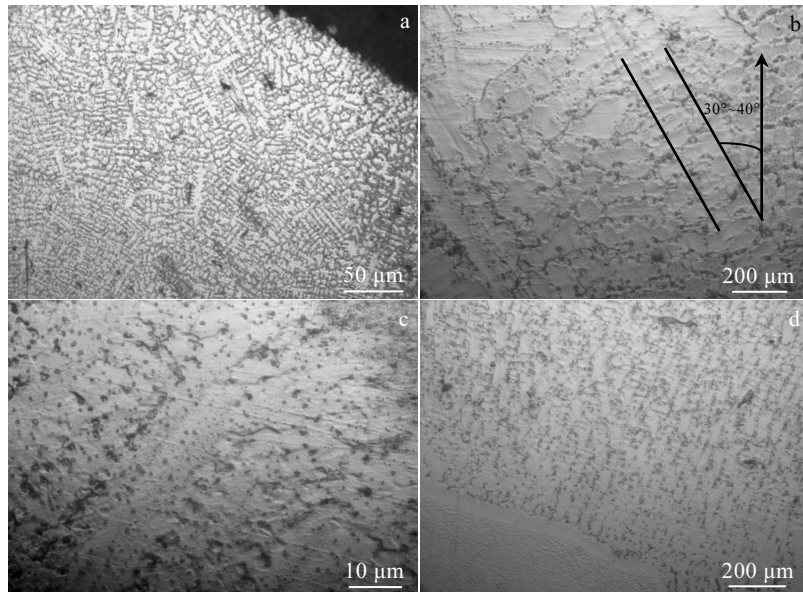


图 4 成形层及界面处金相组织

Fig.4 Metallographic structure of the forming layer and interface: (a) top cladding layer, (b) middle cladding layer, (c) bottom cladding layer, and (d) cladding interface

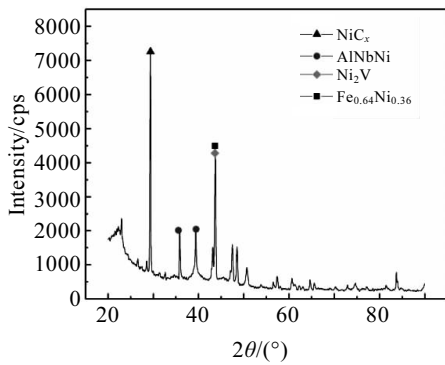


图 5 激光熔覆层内析出颗粒的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of precipitated particle in the laser cladding layer

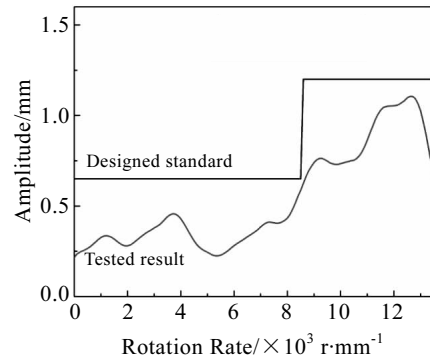


图 7 再制造叶轮动转平衡试验测量结果

Fig.7 Test result of remanufacturing impeller dynamic balance

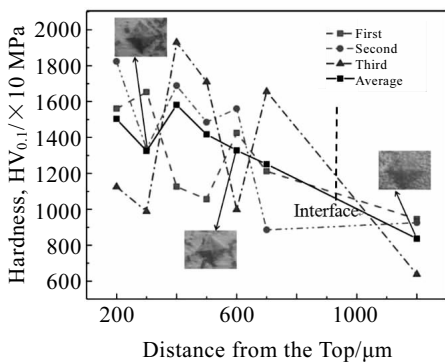


图 6 激光再制造成形层与基体硬度分布

Fig.6 Hardness distribution of the cladding layer and substrate

4 结 论

1) 基于“中途预热，二次提升”的工艺设计，调制了脉冲激光输出波形，对裂纹等成形缺陷进行控制，采用了激光功率 1.2 kW，脉冲宽度为 5 ms，保温时间为 1.5 ms，占空比为 1:1 的优化工艺，实现了 K418 高温合金叶轮叶片再制造，成形尺寸精度在 1 mm 以内，形变精度在 0.03 mm 以内。

2) 成形层与基体间形成致密的冶金结合，成形层内部呈典型的熔化急冷组织形态，高温析出硬脆相得到有效控制，在保证材料高温下力学性能的同时，硬

度超过基体 20%，实现了过强匹配。

3) 该再制造叶轮运转速度可达到 13 500 r/min，无明显偏转及喘振等异常。

参考文献 References

- [1] Lu Penghui(卢朋辉), Liu Jianrui(刘建睿), Xue Lei(薛蕾) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 315
- [2] Lang Jingwei(郎经纬), Du Xiaodong(杜晓东), Chen Fengjun(陈丰君) *et al. China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2016, 47(6): 103
- [3] Lee B, Suh J, Lee H *et al. Engineering Failure Analysis*[J], 2011, 18(7): 1900
- [4] Farrhi G H, Tirehdast M, Masoumi K A *et al. Engineering Failure Analysis*[J], 2011, 18(1): 474
- [5] Zhao Yanhua(赵彦华). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Jinan: Shandong University, 2015
- [6] Shi Zhaoxia(石照夏), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(11): 1935
- [7] Ren Weibin(任维彬), Dong Shiyun(董世运), Xu Binshi(徐滨士) *et al. Journal of Harbin Institute of Technology*(哈尔滨工业大学学报)[J], 2017(5): 173
- [8] Ren Weibin(任维彬), Dong Shiyun(董世运), Xu Binshi(徐滨士) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2017, 45(5): 1
- [9] Meng Qingsen(孟庆森). *Metal Weldability Foundation*(金属焊接性基础)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010
- [10] Ren Weibin(任维彬), Dong Shiyun(董世运), Xu Binshi(徐滨士) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(9): 2487
- [11] Han Xiaohui(韩晓辉), Chen Jing(陈静), Kan Ying(阚盈) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2017, 44(5): 502 002
- [12] Chen Lie(陈列), Xie Peilin(谢霖霖). *Laser Technology*(激光技术)[J], 2007, 31(5): 518
- [13] Liu Yongchang(刘永长), Guo Qianying(郭倩颖), Li Chong(李冲) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2016, 52(10): 1259
- [14] Deng Wangqun(邓旺群), Gao Deping(高德平). *Journal of Aerospace Power*(航天动力学报)[J], 2003, 18(5): 669

Forming and Performance Control of Pulsed Laser Remanufacturing for K418 Alloy Impeller

Ren Weibin¹, Zhou Jinyu¹, Zhang Suorong¹, Xu Binshi², Wang Yujiang², Chen Guoyan¹

(1. Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

(2. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Due to the high material cost, the complex manufacturing process and the frequent volume damage of K418 cast superalloy impeller, the laser remanufacture for edge volume damage of this type was taken as a target, and the composition-approached and process-matched alloy was designed. Its shape and performance was recovered by the waveform modulated pulse laser. The results show that no surface and internal cracks exist, while a metallurgical bonding occurs between the forming layer and the substrate. The forming precision is within 1 mm, and the deformation precision is within 0.03 mm. The surface HV_{0.1} hardness of the forming zone is 9~14 GPa, which is 20% higher than that of the substrate. In the high temperature dynamic balance test, the maximum rotation speed of the impeller is 13 500 r/min, the maximum difference value with the ideal design amplitude is 0.4 mm, and there is no deflection and surge. It can meet the dynamic balance performance requirements.

Key words: pulsed laser; impeller; remanufacture; K418

Corresponding author: Ren Weibin, Ph. D., Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, P. R. China, Tel: 0086-519-86953085, E-mail: renweibin100@163.com