

## 激光沉积修复 GH4169 合金试验研究

卞宏友<sup>1</sup>, 赵翔鹏<sup>1</sup>, 李英<sup>2</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 钦兰云<sup>1</sup>, 王维<sup>1</sup>, 任宇航<sup>1</sup>

- (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. 中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限公司焊接研究所, 辽宁 沈阳 110043)

**摘要:** 采用激光沉积修复技术对 GH4169 镍基高温合金贯通槽式损伤工件进行修复, 分析了修复过程中气孔及熔合不良等缺陷的产生原因, 通过优化工艺参数, 获得了无缺陷的修复件; 考察了修复件的微观组织及力学性能, 并对修复件进行了局部热处理。结果表明: 优化工艺参数后得到的修复区和基体形成了致密的冶金结合, 采用局部热处理可明显提升修复件的抗拉强度。

**关键词:** 激光沉积修复; GH4169 镍基合金; 缺陷; 力学性能; 局部热处理

**中图分类号:** TH164 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0206006

## Experimental study on laser deposition repair GH4169 alloy component

Bian Hongyou<sup>1</sup>, Zhao Xiangpeng<sup>1</sup>, Li Ying<sup>2</sup>, Yang Guang<sup>1</sup>, Qin Lanyun<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>, Ren Yuhang<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Welding Research Institute, Shenyang Liming Aviation Engine(Group) Co., Ltd, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110043, China)

**Abstract:** Researches on the laser deposition repair of GH4169 nickel-based superalloy with defects of through-groove damage were conducted. The reasons of occurring defects such as gas porosities and ill bonding in the repaired zone were analyzed. And flawless samples were obtained through optimizing laser process parameters. The microstructure characteristic and mechanical properties of laser deposition repair component were investigated, and the local heat treatment of the laser deposition repair component was done. The results indicate that there is a dense metallurgical bond between the repaired zone and the substrate with the optimized process parameters. The tensile strength of laser deposition repair component can be significantly improved with the local heat treatment.

**Key words:** laser deposition repair; GH4169 nickel-based super alloy; defect; mechanical properties; local heat treatment

收稿日期: 2015-06-11; 修订日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(51375316); 辽宁省自然科学基金(201202173); 航空科学基金(2014ZE54028); 辽宁省高等学校科学研究(L2014054)

作者简介: 卞宏友(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光沉积成形、修复方面的研究。Email: bhy@sia.cn

## 0 引言

GH4169 合金是以  $\gamma'$  和  $\gamma''$  相为沉淀强化相的一种镍-铬-铁基变形高温合金,在 650 °C 以下,其力学性能具有很好的稳定性,在飞机发动机中这种合金的比重占 30% 以上。由于 GH4169 合金零部件多为复杂薄壁结构,机加工量巨大,生产周期长,在制造过程中易出现加工超差等缺陷,在恶劣服役环境下出现疲劳裂纹、磨损等失效情况<sup>[1]</sup>。因此,迫切需要对 GH4169 合金零部件进行高质高效的修复,以降低制造成本、缩短交货周期,保证生产和科研进度。

激光沉积修复技术是以损伤零件为基体,采用逐层熔化堆积的方式,对损伤部位进行三维成形修复,相当于在特定的基体上成形出特定的三维几何体<sup>[2]</sup>。相比扩散焊、TIG 焊、摩擦焊、气体保护焊等修复技术而言,它具有以下优点:热输入小,应力和变形小;零件本体和修复区界面处为致密的冶金结合;损伤部位能实现近净成形修复等。David W. Gandy<sup>[3]</sup> 等研究表明,激光熔覆在修复裂纹敏感性较大的镍基高温合金叶片上与传统的焊接工艺相比有很多优势。L.Sexton<sup>[4]</sup> 等研究表明,激光熔覆层比 TIG 涂层具有较小的热影响区和稀释率,以及良好的微观组织和较高的硬度。但在激光沉积修复过程中会出现气孔、熔合不良、夹杂等缺陷,降低修复工件的力学性能。孙鸿卿等<sup>[5]</sup> 研究了在定向凝固镍基高温合金基体上激光熔覆 Inconel738 的裂纹敏感性。罗根香等<sup>[6]</sup> 分析了在 K418 镍基高温合金表面激光熔覆不同成分涂层与基体的结合情况。

目前针对 GH4169 合金激光沉积修复的研究较少,且沉积修复组织中常会出现气孔、熔合不良等缺陷以及修复强度弱化等问题,文中采用与 GH4169 合金性能极为接近的 Inconel718 镍基高温合金粉末,针对 GH4169 合金零部件在服役过程中产生的裂纹损伤进行激光沉积修复试验,分析了修复过程中气孔和熔合不良等缺陷的形成原因,通过优化工艺参数使得缺陷得到减小和消除,并通过局部热处理的方式提高修复工件的力学性能。

## 1 试验设备与条件

试验所用的激光沉积修复设备,主要包括:6 kW

光纤激光器,悬臂式三轴平移运动系统,集成冷却系统和保护气系统的同轴熔覆头,双桶送粉器,配有气体循环净化系统的氩气保护箱,水氧含量可控制在 50 ppm 以下,保护气体与载粉气体均使用高纯氩气。

试验采用多道多层沉积方式修复工件,基体为经过固溶+时效处理的 GH4169 高温合金板,基体成分见表 1,尺寸为 200 mm×100 mm×3 mm,待修复区贯通槽(图 1)尺寸:上底宽 14 mm,下底宽 4 mm,高为 3 mm,倾斜坡度为 30°,槽长为 30 mm。试验前用砂纸打磨掉待修复表面的氧化皮,用丙酮擦拭干净。选用粒度分布为 53~150  $\mu\text{m}$  的球形 Inconel718 合金粉末作为沉积材料,粉末成分见表 1,粉末经真空烘干处理后备用。金相试样采用标准方法制备,腐蚀液为盐酸硝酸氢氟酸混合液( $V_{\text{HCl}}:V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=80:7:13$ ),采用 OLYMPUS-DP71 型光学显微镜和 S3400 型扫描电镜进行组织检测。在 Z050 型试验机上测试力学性能,拉伸时采用位移控制,加载速率 1 mm/min。

表 1 GH4169 和 Inconel718 合金粉末的化学成分  
(单位:wt%)

Tab.1 Chemical composition of GH4169 and Inconel718 powders (Unit:wt%)

Elements	C	Mo	Ni	Fe	Cr	Al	Ti	Nb
GH4169	0.046	2.92	51.96	Base	18.16	0.48	1.04	5.02
Inconel718	0.03	3.17	53	Base	19.2	0.54	0.65	5.16

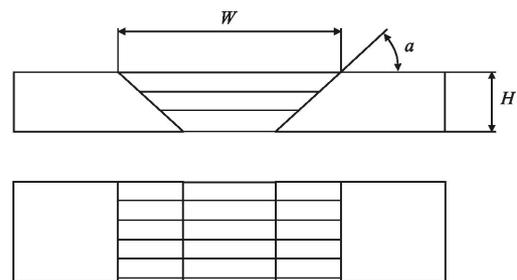


图 1 修复工件槽损伤试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of defects through-groove damage

## 2 结果与分析

### 2.1 修复区常见缺陷的形成原因

激光沉积修复是个多因素作用的过程,工艺参数的匹配不当、修复环境等都会导致修复件出现诸如气孔、熔合不良等缺陷。

沉积层中气孔(图 2)的形成与工艺参数和修复环境有关。通过工艺参数的优化,可以解决因参数匹配不当而形成的气孔。修复环境中存在的水汽是气孔形成的影响因素<sup>[7]</sup>。水汽可通过熔池的搅拌作用与金属液充分接触而溶解于其中,最后因为熔池凝固速率过大,导致来不及溢出而残留在沉积层中形成气孔。为排除修复环境中的水汽,该试验是在经水氧净化系统循环后的氩气环境中进行的,可将水氧含量净化至 50 ppm 以下;同时也避免了修复区受到氧化,从而影响到修复工件的性能。另外,水汽也可通过吸附在沉积粉末表面进入熔池,这主要是因为沉积粉末未进行干燥或干燥的不够充分而造成的;在粉末进行充分干燥后,可以大大降低修复区的气孔大小和气孔率;但由于采用载气式送粉方式,粉筒在氩气箱外部,送粉时不可避免存在微量水汽会伴随着载气进入熔池,所以仍不能完全避免微小气孔的存在。

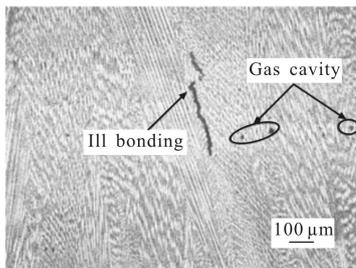


图 2 激光沉积修复工件中的缺陷

Fig.2 Defects in the laser deposition repair sample

熔合不良(图 2)是激光沉积修复过程中另一种常见的缺陷。这主要是因为工艺参数的匹配不当,使得修复过程中能量密度不足,粉末无法充分熔化或者基体熔深不足。因此易在沉积层与基体结合处、沉积层内部出现熔合不良现象。另外,由于激光光斑的能量为高斯分布,其中间高边缘低的分布模式,造成了熔池边缘部位的粉末无法充分熔化,也是熔合不良缺陷产生的一个原因。

## 2.2 工艺参数对缺陷产生的影响分析及优化

激光沉积修复是一项工艺性较强的技术,当固定了激光光斑和离焦量后,影响沉积层质量的因素主要有激光功率、扫描速度、送粉速率、搭接率以及层高等。通过工艺参数的前期试验,初步优化的激光工艺参数范围为:激光功率 800~2 000 W,扫描速度 3~9 mm/s,送粉速率 4~14 g/min,搭接率 30~50%,层

高 0.4~0.7 mm。

### 2.2.1 确定合理的激光功率

通过试验发现,随着激光功率的增大,沉积层中的气孔亦随之减少。这是因为随着激光功率的增加,热输入增大,粉末熔化充分,熔池凝固相对缓慢,气体可及时溢出。但同时薄壁类修复件的受热变形亦随之变大、甚至被熔透,这都将导致修复工件的尺寸精度超差过大。但激光功率过小,会因热输入不足产生熔合不良。致使在基体与沉积层结合处不能形成致密的冶金结合;在沉积层内部会形成不规则形状的气孔或是成为裂纹。

### 2.2.2 选择合适的扫描速度

过快的扫描速度,使得激光光斑的停留时间缩短、熔池形成不充分。导致未完全熔化的粉末在沉积层中形成夹杂,在道与道之间形成熔合不良。但扫描速度过慢,亦会造成沉积层热量累积,对基材造成很大的热影响,引起薄壁零件的翘曲变形。

### 2.2.3 相匹配的送粉速率

对于每一组激光功率和扫描速度都有一个最佳送粉速率。过高的送粉速率时,粉末量超过熔池的热熔极限,会在沉积层中夹杂未熔颗粒;也会使沉积层表面粘粉过多,层间产生熔合不良。过小的送粉速率,使得层高过低,沉积层数过多,进而造成热量累积使得修复工件变形严重,同时也降低了修复效率。

### 2.2.4 确定搭接率与层高 $\Delta Z$

在激光修复过程中,多数情况下是采用多道多层的沉积方式。因此,道与道之间的搭接率和层与层之间的重熔深度,都会对工件的修复精度与质量产生重要影响。因为单道沉积层的横截面近似弓形,所以搭接率过小就会使得道与道之间形成凹沟。搭接率过大,会因沉积层的堆积效应,使得沉积层表面呈一斜坡状,严重者将导致修复无法进行。层与层之间的重熔深度由层高  $\Delta Z$  决定, $\Delta Z$  的大小还直接影响到各沉积层的工艺条件变化,如离焦量、粉末汇聚点与沉积表面的相对位置等。 $\Delta Z$  过大会导致重熔深度减小,使得道与道之间的凹沟无法得到重熔,将在沉积层中形成气孔、熔合不良等缺陷。 $\Delta Z$  过小会造成重熔深度过大,受反复加热与冷却的热循环影响,会造成重熔区组织粗化,使得沉积层出现性能不均匀现象。

经过多组参数优化试验,工艺参数进一步优化为:激光功率 1 400 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。图 3 为工艺参数优化后沉积层的截面微观组织,组织内部无气孔、熔合不良等缺陷。

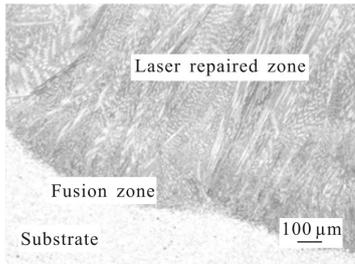


图 3 优化后沉积层的显微组织

Fig.3 Micrograph of the deposited layer after the optimized process parameters

图 3 中左下部为基体区,中部为基体与修复区的熔合区,右上部为激光沉积修复区,从图中可看出基体与修复区之间呈致密的冶金结合,整体组织由基体经熔合区向修复区连续变化。熔合区为基体区与修复区的过渡区域(图 4,宽度约为 25~35 μm),组织与基体相比变化不大,均为等轴晶组织。修复区为典型的外延生长柱状枝晶的组织特点,总体呈垂直于基体并趋向激光沉积高度方向的贯穿多层连续生长。修复区底部(图 4)以基体表面作为非均匀形核的

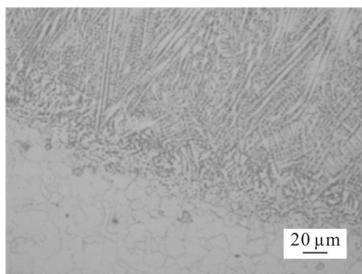


图 4 熔合区的显微组织

Fig.4 Micrograph of the interface layer

基底,枝晶取向呈现出 inconsistent 的现象。在修复过程中,熔池中绝大部分热量以热传导的方式通过基体散失,造成沿沉积高度方向的温度梯度最大,而枝晶的生长方向往往在沿着逆热流方向接近温度梯度的方向占据有利地位,因此在修复区内部(图 3)的枝晶表现出方向的一致性,其他方向的枝晶被逐步淘汰。另外,由于激光沉积修复是一个逐层堆积的过程(在

图 3 中可清晰地看到层与层之间地层带结构,以及道与道之间的弧状结构),为了保证修复质量,中间各层均要经受部分重熔;在重熔过程中下一层的枝晶将会以上一层的枝晶为形核质点延续生长<sup>[8]</sup>。

## 2.3 修复试样的拉伸强度测试及提高措施

### 2.3.1 修复试样的拉伸强度

工件待修复区如图 1 所示,此试验是模拟薄壁类零件因服役损伤产生裂纹而进行的激光沉积修复。为便于进行修复,对裂纹损伤部位进行了规则化加工处理,加工后损伤部位一般为贯通槽状形式;因为高温合金液态流动性差,为防止在槽根部结合不良,沟槽边缘加工坡口;另外,修复过程中在修复区下方添加一块背板,用于承接粉末和形成熔池,图 5 是工件修复前装夹状态。

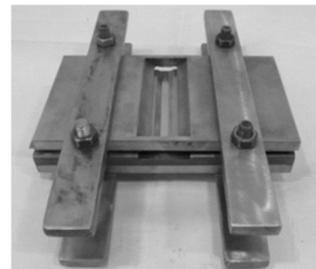


图 5 工件修复前装夹状态

Fig.5 Workpiece clamping state before repair

将修复工件制成板状拉伸试样,如图 6 所示。试样断裂面分布在修复区内(图 6),说明激光沉积修复区与基体之间形成了致密的冶金结合。由表 2 可知,沉积态拉伸试样平均抗拉强度达到 810 MPa 以上,达到铸件(标准热处理)抗拉强度的 98%;沉积态拉伸试样平均断后延伸率为 6%,略高于铸件(标准热处理)水平,可满足相应铸件损伤的修复强度需求。

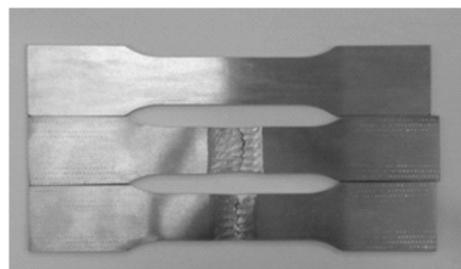


图 6 激光沉积修复拉伸试样

Fig.6 Laser deposition repair tensile sample

表 2 室温下修复工件(沉积态)的拉伸性能

Tab.2 Tensile properties of repaired samples (deposition) at room temperature

Type	Sample	Rm/MPa	A
Deposition	1	783	5.5%
	2	888	8.0%
	3	760	4.5%
Cast	-	825	5.0%
Substrate	-	1 400	10%

沉积态修复工件的抗拉强度和断后延伸率均低于基体的相关指标,这是由于激光沉积修复的快速冷却凝固,抑制了主要强化相  $\gamma'$  和  $\gamma'$  的析出<sup>[9]</sup>;另外,沉积层内枝晶间存在微观偏析,析出相呈白色,形如岛状或树枝状,能谱分析(EDS)结果显示,该析出相 Nb 含量为 19.51 wt%,为 Laves 脆性相(图 7)。Laves 相的析出消耗了大量的 Nb 元素,而这种元素正是形成  $\gamma'$  和  $\gamma'$  强化相所必需的主要元素<sup>[10]</sup>;因此导致了沉积层的强度和塑性弱于基体。

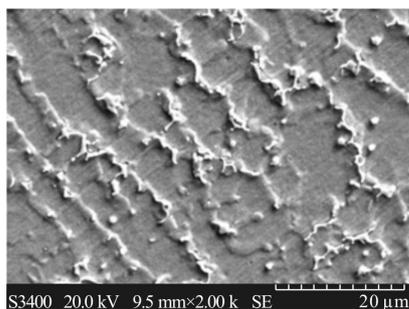


图 7 沉积态 SEM 照片

Fig.7 SEM micrograph of deposition

### 2.3.2 局部热处理对拉伸性能的影响

虽然沉积态修复工件的强度及延伸率均达到了铸件(标准热处理)的标准,但是与基体相比依然存在较大的差距;而热处理是提高沉积态修复工件力学性能的主要手段。在对发动机机匣等大型零部件进行热处理时,往往为避免氧化而选择对工件整体进行真空热处理,但修复工件整体热处理需要装夹保证的位置精度复杂众多,专用热处理夹具难于设计制造,且整体热处理时的应力释放容易引起新的变形超差;而局部热处理采用感应加热技术通过局部装夹对工件修复部位进行加热,避免了专用夹具

设计制造困难和工件受热变形超差等问题<sup>[11]</sup>。

如图 8 所示,局部热处理采用自动控制型高频感应加热设备,频率为 30 kHz,通过改变电流的大小来调节加热温度及加热速度,输入电流最大为 37 A,感应加热过程中采用 MAG30 型热成像仪进行温度检测。



图 8 局部热处理与红外热成像仪测温

Fig.8 Thermal imager testing images on local heat treatment

热处理工艺为:直接时效处理(720 °C, 8 h/炉冷至 620 °C, 8 h/空冷)。热处理前使用夹具对修复后工件进行夹持,工件上下的压板能使工件受热区的温度分布地更加均匀,同时还避免了修复件在高温环境下受热变形。通过红外热像仪对热处理过程中工件上表面的温度分布进行实时检测,以此来精确控制热处理的温度变化。

由表 3 可知,修复工件经局部热处理后,抗拉强度有了显著提高,平均值达到 1 163 MPa 以上。与热处理前的工件相比提高了 43%,已大大超过了铸件(标

表 3 室温下修复工件(局部热处理)的拉伸性能

Tab.3 Tensile properties of repaired samples (local heat treatment) at room temperature

Type	Sample	Rm/MPa	A
Local heat treatment	4	1 149	4.6%
	5	1 178	5.5%
	6	1 162	4.2%
Cast	-	825	5.0%
Substrate	-	1 400	10%

准热处理)水平,达到基体抗拉强度的 80%。这是因为在直接时效热处理阶段,沉积层析出了大量的  $\gamma'$  和  $\gamma'$  强化相,根据 EDS 显示,在图 9 中发现了  $\gamma'$  和  $\gamma'$  强化相的成分。由图 9 和图 7 对比,可明显看出经过局部热处理后修复区晶界间 Laves 析出相明显减少,但依然存在;这是因为直接时效的热处理温度低于 Laves

脆性相的完全固溶温度,无法使得 Laves 相完全固溶消失<sup>[12]</sup>,也正因此局部热处理后工件的强度依然低于基体。另外,由于  $\gamma'$  和  $\gamma''$  强化相的析出,导致了局部热处理后修复工件断后延伸率略微降低<sup>[13]</sup>。

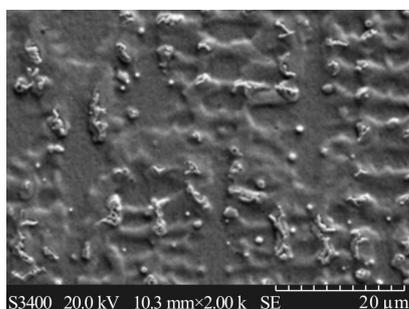


图 9 局部热处理 SEM 照片

Fig.9 SEM micrograph of local heat treatment

### 3 结论

GH4169 合金激光沉积修复区与基体(固溶+时效处理)之间呈现致密的冶金结合,基体组织为等轴晶组织,修复区为典型的外延生长柱状枝晶组织,枝晶呈垂直于基体并趋向激光沉积高度方向的贯穿多层连续生长,熔合区完成了从等轴晶组织到枝晶组织的过渡。

修复过程中出现的气孔、层间或道间的熔合不良等缺陷,通过改善试验条件及优化工艺参数得到了减小或消除。

沉积态修复工件的抗拉强度及断后延伸率达到铸件(标准热处理)水平,但由于  $\gamma''$  和  $\gamma'$  强化相仅有少量析出,以及在激光沉积修复过程中存在微观偏析,析出相为 Laves 脆性相;所以与基体(固溶+时效处理)相比有一定差距。

经过局部热处理后,沉积层中析出了  $\gamma''$  和  $\gamma'$  强化相,修复工件的抗拉强度显著提高,大大超过了铸件(标准热处理)水平;但低于基体(固溶+时效处理)强度,这是因为直接时效热处理没有使 Laves 脆性相完全溶解。

### 参考文献:

[1] Li Yajiang, Xia Chunzhi, Shi Lei. Resent situation about welding research of nickel-base high-temperature alloy at home[J]. *Modern Welding Technology*, 2010(7): J-1-J-4. (in Chinese)

[2] Xue Lei, Huang Weidong, Chen Jing, et al. Application of laser forming repair technology on the aerial castings [J]. *Foundry Technology*, 2008, 29(3): 391-393. (in Chinese)

[3] Gandy D W, Frederick G J, Peterson A J, et al. Development of a laser-based/high strength weld filler process to extend repair limits on IN-738 gas turbine blades [C]//Fourth International EPRI Conference, 2000: 7-9.

[4] Sexton L, Lavin S, Byrne G, et al. Laser cladding of aerospace materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002(122): 63-68.

[5] Sun Hongqing, Zhong Minlin, Liu Wenjin, et al. Cracking sensitivity on laser cladding Inconel738 on directionally solidified Ni-base superalloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2005, 25(2): 26-31. (in Chinese)

[6] Luo Genxiang, Wu Guoqing, Huang Zheng, et al. Microstructures of Ni-Cr-Ti-Al laser cladding on K418 superalloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(2): 283-287. (in Chinese)

[7] Liu Fencheng, Lin Xin, Yang Gaolin, et al. Microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickle base superalloy Inconel718 prepared in different atmospheres [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(9): 1047-1054. (in Chinese)

[8] Huang Weidong. Laser Solid Forming[M]. Xi'an: Northwest Industrial University Press, 2007: 126-136. (in Chinese)

[9] Xi Mingzhe, Gao Shiyu. Research on tensile properties of Inconel718 superalloy fabricated by laser rapid forming process [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 1-6. (in Chinese)

[10] Zhao Weiwei, Lin Xin, Liu Fencheng, et al. Effect of hert treatment on microstructure and mechanical prooerties of laser solid forming Inconel718 superalloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3221-3225. (in Chinese)

[11] Bian Hongyou, Han Shuanglong, Li Ying, et al. Effects of different induction heating parameters on the substrate temperature field during laser deposition repair [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 111403. (in Chinese)

[12] Li Zhenrong, Tian Sugui, Zhao Zhonggang, et al. Effects of hert treatment on creep properties of HCR-GH4169 superalloy [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(12): 7-12. (in Chinese)

[13] Qu Fengsheng, Zhang Kaifeng, Lu Hongjun. LBW/SPF complex forming for multi-sheet structure of GH4169 superalloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2009, 29(4): 27-32. (in Chinese)