

感应预热对激光沉积修复 TA15 钛合金显微组织和残余应力的影响

卞宏友¹, 雷洋¹, 李英², 杨光¹, 钦兰云¹, 王维¹, 韩双隆¹

- (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. 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: 利用 6 kW 光纤激光器的激光沉积修复系统和电磁感应加热设备, 采用 TA15 钛合金粉末在基板未预热和预热到 200 °C、400 °C 时分别进行激光沉积修复实验。利用光学显微镜、显微硬度计、压痕法应力测试仪对激光沉积修复试样的显微组织、显微硬度、残余应力进行测试分析, 得到不同预热温度对激光沉积修复显微组织、显微硬度、残余应力的影响规律。结果表明: 随着感应预热温度的升高, 片层 α 组织变得粗大, 初生 α 相生长更加充分; 组织分布均匀化, 显微硬度轻微降低; 残余应力明显减小。为感应加热辅助激光沉积修复提供指导依据。

关键词: 激光沉积修复; 感应预热; 显微组织; 显微硬度; 残余应力

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0705003

Effects of induction preheating on microstructure and residual stress of laser deposition repair TA15 titanium alloy

Bian Hongyou¹, Lei Yang¹, Li Ying², Yang Guang¹, Qin Lanyun¹, Wang Wei¹, Han Shuanglong¹

- (1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Welding Laboratory, Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation LTD, Shenyang 110043, China)

Abstract: Both 6 kW fiber laser deposition repair system and electromagnetic induction heating equipment were utilized, laser deposition repair experiments were respectively done by TA15 titanium powder under substrate without preheating and preheating at 200 °C and 400 °C. Then microstructure, microhardness and residual stress were tested and analyzed through optical microscope, microhardness tester and indentation stress tester, the influence of microstructure, microhardness and residual stress in different substrate preheating temperature on the laser deposition repair sample was achieved. Results show that microstructure of lamella α becomes thicker and primary α grow more fully; microhardness of material is slightly reduced; residual stress is effectively reduced with the increasing of preheating temperature. The guidance basis for laser deposition repair assisted by induction heating is provided.

Key words: laser deposition repair; induction preheating; microstructure; microhardness; residual stress

收稿日期: 2015-11-11; 修订日期: 2015-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51375316, 51305280); 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项目(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/修复技术研究。Email: bianhongyou@sau.edu.cn

0 引言

激光沉积修复技术(Laser Deposition Repair, LDR)是基于层层叠加制造原理,以激光为热源,对同轴输送的金属粉末材料按照规划的扫描路径实现逐层熔化沉积的技术。它具有热影响区小、自动化程度高、工艺重复性好以及可实现缺损部位近净成形修复等优点,在钛合金等贵重金属零件快速修复方面具有明显的技术优势和巨大的应用前景^[1-2]。激光沉积修复过程是一个非线性、伴随着复杂相变的加工过程,热传递遍历逐点、逐道、逐层堆积加工的始末。修复过程温度场分布直接影响修复显微组织,且修复体内部以及修复体与基体间存在着较大的温度梯度,会导致修复部位存在过大的残余应力,直接影响修复工件的力学性能^[3]。

为减小修复工件残余应力、防止工件变形开裂、提高修复质量,众多学者做了相关的研究工作。龙日升对激光沉积修复工件进行预热处理,有效降低沉积修复过程中工件和基体温度梯度的同时,还可以使沉积修复过程中温度场分布更加均匀稳定^[4];林涛针对感应加热消除不锈钢管焊接应力进行模拟,得出感应加热比其他加热方法更易于操作和控制,消除残余应力效果更明显^[5];黄永俊研究发现感应加热可以提高激光熔覆的沉积效率,形成与基体呈良好冶金结合的无裂纹熔覆层^[6];Oscar Lucía 研究指出感应加热能够有效消除焊接过程中产生的应力^[7];Farahmand 研究发现激光熔覆与感应加热复合,不仅提高了熔覆层的均匀性及平整度,而且使显微组织得到改善^[8]。

文中采用感应加热辅助激光沉积修复的方式,通过实验与检测分析,研究感应预热不同温度对激光沉积修复显微组织、显微硬度和残余应力的影响规律,为感应加热辅助激光沉积修复提供指导依据。

1 实验设备与材料

实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送粉头,双料仓送粉器,配有气体循环净化系统的氩气保护箱等,保护气体与载粉气体均使用高纯氩气。感应预热条件下激光沉积

修复原理如图 1 所示。

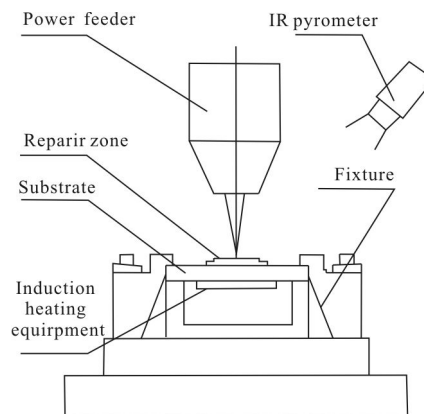


图 1 感应预热条件下激光沉积修复

Fig.1 Laser deposition repair under induction preheating

实验时将基板放入氩气保护箱,箱内水氧含量通过净化循环系统控制在 50 ppm(1 ppm=10⁻⁶)内,以防止基板在高温环境下氧化。基板通过夹具固定于感应加热器上方,感应加热电源为自动控制型高频感应加热设备,频率为 30 kHz,调整输入电流的大小来改变加热温度及加热速度,输入电流最大为 37 A。感应加热器可根据实际工件修复部位的形状及位置进行仿形设计,此次实验所用感应加热器为 90 mm×15 mm 矩形线圈。采用红外热像仪对感应预热基板的上表面温度分布进行实时检测,红外热像仪型号为 MAG30,测温范围为 200~1 600 ℃。

基板尺寸为 180 mm×55 mm×10 mm,实验前先将基板打磨抛光,去除氧化皮并保证其表面光洁,然后用酒精、丙酮对其清洗处理并烘干。选用粉末粒度为 44~149 μm(-100~+325 目)的球形粉末 TA15 作为沉积修复材料,粉末成分见表 1。采用感应加热器将基板加热到指定温度并保持温度稳定进行激光沉积修复实验,包括基板未预热(室温:20 ℃)和感应预热

表 1 TA15 钛合金粉末成分 (wt%)

Tab.1 Composition of TA15 titanium alloy powder (wt%)

Element	H	O	N	C	Si	Fe
Percent	0.005	0.11	0.014	0.012	0.033	0.13
Element	Al	Zr	Mo	V	Ti	
Percent	6.53	1.78	1.53	1.47	Bal.	

200 ℃、400 ℃ 3 种状态。其中激光功率为 1 700 W，扫描速度为 5 mm/s，送粉速度为 6.5 g/min，Z 向分层厚度为 0.6 mm，单道沉积层数分别为 3 层、5 层，多道搭接率为 40%，沉积层数为 5 层；单道沉积层长度为 20 mm，多道为 20 mm×20 mm。

金相试样腐蚀采用 Kroll 腐蚀剂及体积比为 1:6:7 的 HF-HNO₃-H₂O 溶液。试样检测采用 OLYMPUS-GX51 型光学显微镜观察显微组织；用 HXZ-1000 显微硬度计测量试样的显微硬度值，载荷为 1 kgf，保载时间为 12 s；用 KJS-3 型压痕应力测试仪测量试样的残余应力。

2 结果与分析

2.1 预热对沉积层表面形貌的影响

图 2 为单道多层沉积层表面形貌，分别为 3 层和 5 层。图 2(a)中，沉积层外观呈现中间较细、两侧较粗的哑铃状形貌，表面呈现金属光亮；图 2(b)中，沉积层表面变得较为平整，颗粒状物质减少，同时宽度大小整体上趋向均匀，且表面呈现轻微的淡黄色；图 2(c)中，沉积层表面更加趋于平整，表面质量进一步提高，同时宽度更加均匀，沉积层的表面颜色加深。这是由于随着预热温度的升高，基板与沉积层之间的温度梯度逐渐减小，同时熔池的冷却凝固时间变长导致一部分落入熔池边缘的粉末熔化，因此随着预热温度的升高，沉积层表面的粉末颗粒逐渐减少，从而提高了沉积层表面平整性，粉末的利用率也相应逐渐提高；并且随着预热温度升高，熔池出现增大的趋势，进而增加了沉积层的宽度。

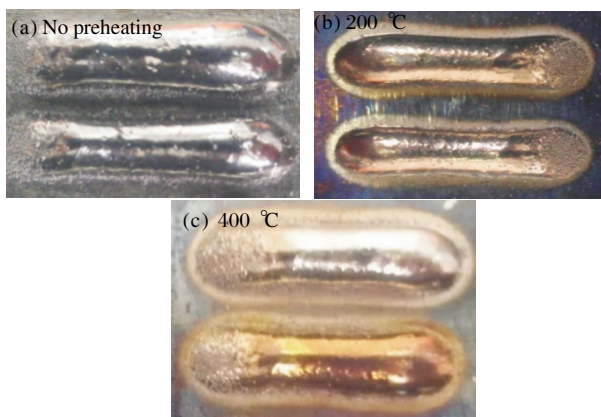


图 2 不同预热温度下的单道沉积层表面形貌

Fig.2 Single-track cladding morphology under different preheating temperatures

图 3 为多道 5 层沉积层表面形貌，图 3(a)中，沉积层外观呈现中间有凹陷表面不平整形貌，表面呈现金属光亮；图 3(b)中，沉积层表面趋于平整，颗粒状物质减少，同时沉积层表面质量趋于稳定，且沉积层表面呈现轻微的淡黄色；图 3(c)中，沉积层的整体表面呈现中间高、四周低的馒头状凸起，表面平整性进一步提高且颜色加深。这是由于随着预热温度的升高，沉积层表面粉末颗粒逐渐减少，沉积层表面质量趋于光滑；同时熔池凝固时间延长，熔池受自稳定效应的影响，沉积层的凹陷缺陷得到了填充，表面质量得到了改善^[9]。但随着预热温度的升高，沉积层处于高温阶段时间延长，从而导致了污染物附着于表面的程度增加，沉积层的表面颜色也逐渐加深。然而无论是单道多层还是多道多层，沉积层表面颜色变化对修复效果都没有影响，厚度只有几微米，通过后续加工即可去除，不影响性能。

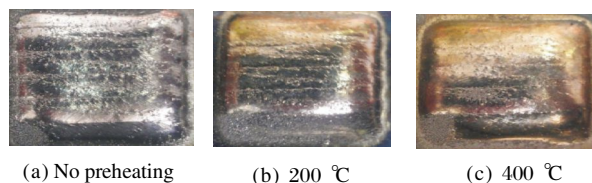


图 3 不同预热温度下的多道沉积层表面形貌

Fig.3 Multi-track cladding morphology under different preheating temperatures

2.2 预热对沉积层显微组织的影响

图 4 所示为垂直于扫描方向上沉积层显微组织图片，可见显微组织随预热温度的变化而发生改变。图 4(a)为未预热条件下的沉积层显微组织，其组织为细小 α 片层交织的网篮状组织， α 丛尺寸细长，长度约为 15.26~19.68 μm ，宽度约为 0.74~1.05 μm ，晶粒呈纵横交错排列。其中 α 取向随机多样，属于快速凝固的组织特性。

图 4(b)为预热 200 ℃时的沉积层显微组织，可以看出，随着预热温度的升高，片层 α 组织变得粗大，

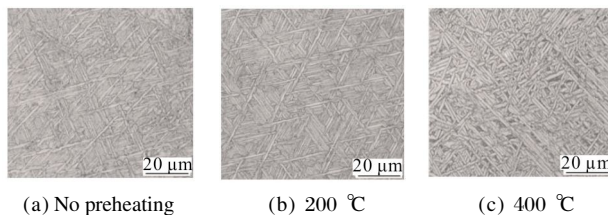


图 4 沉积层显微组织

Fig.4 Cladding microstructure

同时这些组织比例增多,而且排列有序,片层 α 组织的长度 13.2~17.2 μm ,宽度 1.08~1.58 μm 。

图 4(c)为预热 400 $^{\circ}\text{C}$ 时的沉积层显微组织,可以看出,随着预热温度的升高,沉积层中 β 相体积比增多,片层 α 组织变得更加粗大,排列更加均匀,长度 8.7~11.58 μm ,宽度 1.65~2.01 μm 。

可见片层 α 组织随着预热温度升高长径比减小。主要原因是在未预热条件下熔池的冷却速率较快,沉积层与基体温度梯度较大,熔池中绝大部分热量以热传导的方式通过基体沿垂直向下的方向散失,组织逆着热流方向外延生长^[10]。而预热后不仅沉积层与基体温度梯度变小,熔池冷却速率降低,熔池存在时间相应延长,散热缓慢,进而凝固过程相对放缓,使得组织在凝固过程中有更多的时间长大;而且沉积层和基体之间有足够的时间通过熔池进行对流传质,热影响区域增加^[11],并且温度梯度的方向由垂直扫描方向向平行扫描方向转变,因此使得较长的片层 α 组织部分呈现等轴化趋势^[12-13]。另外,随着预热温度的升高,沉积层高温持续时间被延长,导致初生 α 相生长更加充分。

2.3 预热对沉积层显微硬度的影响

对预热修复试样与未预热修复试样进行显微硬度测试,结果如图 5 所示。3 条曲线由上向下依次为基板在未预热, 预热 200 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ 沉积层的显微硬度变化曲线。可以看出,沉积层显微硬度值变化平缓,但随着预热温度的升高,沉积层显微硬度轻微降低,平均硬度整体上很接近,硬度差最大为 23 HV_1 ,这在一定程度上说明组织分布更加均匀化^[14]。未预热时沉积层平均显微硬度为 336 HV_1 ,预热 200 $^{\circ}\text{C}$ 时平均显微硬度为 323 HV_1 ,预热 400 $^{\circ}\text{C}$ 时平均显微

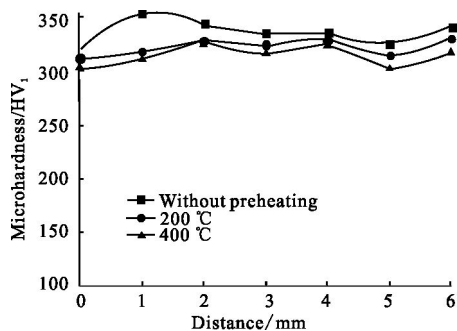


图 5 沉积层显微硬度

Fig.5 Cladding microhardness

硬度为 313 HV_1 。随着预热温度的升高,熔池冷却速率降低,沉积层高温持续时间延长,片层 α 组织长径比减小,同时较长的片层 α 组织部分呈现等轴化趋势,等轴 α 的体积分数和尺度有所增大,使沉积层显微硬度会有轻微降低^[15],所以预热温度越高,显微硬度值越低。

2.4 预热对基板残余应力分布的影响

采用 KJS-3 型压痕应力测试仪对激光沉积修复试样的 3 个不同位置进行残余应力测试,如图 6 所示。

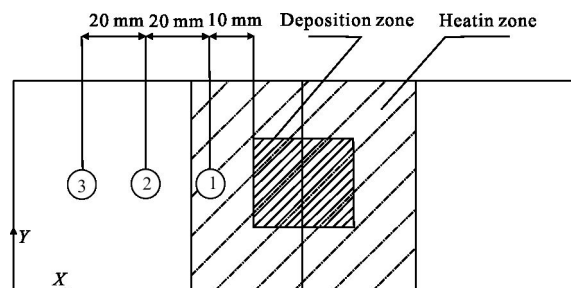


图 6 残余应力测试位置示意图

Fig.6 Diagram for residual stress test location

应力测试时平行于激光沉积修复扫描方向设为 X 轴,垂直于激光沉积修复扫描方向设为 Y 轴,测试过程中分别记录 1 号、2 号、3 号应力测试点沿 X 轴和 Y 轴方向的应力值,测试数据如表 2 所示。基体上应力检测点的残余应力为压应力,这是因为激光沉积修复过程中,激光束瞬时局部输入高能量,使熔池及修复区域与基体间产生了很大的温度梯度,周围较冷的基体对熔池及修复区域的受热膨胀变形起到约束作用^[16],因此,基体处的残余应力为压应力。

如图 7 所示,曲线 1、2、3 分别为试样在未预热、

表 2 残余应力测试数据

Tab.2 Data for residual stress test

Test No.	Sample No.					
	No preheating		Preheating 200 $^{\circ}\text{C}$		Preheating 400 $^{\circ}\text{C}$	
	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_x/MPa	σ_y/MPa
1	-446	-440	-398	-406	-356	-385
2	-383	-344	-346	-325	-316	-321
3	-338	-317	-305	-287	-289	-275

预热 200 °C、预热 400 °C 条件下应力值曲线, 为便于视图, 图中应力数值采用绝对值表示。可以看出, 与沉积区域的距离越近, 基体的残余应力值越大。同时 X 与 Y 方向上的 1~3 号测试点的应力值均随着试样预热温度的增加而降低, 预热温度越高应力越小, 其中预热 200 °C 比未预热条件下试件 σ_x 减少 10.3%, σ_y 减少 7.6%; 预热 400 °C 比未预热条件下 σ_x 减少 17.7%, σ_y 减少 10.9%。这是因为预热降低了沉积层区域的温度梯度, 有均匀熔池温度场的作用, 在一定程度上减小了试样应力。

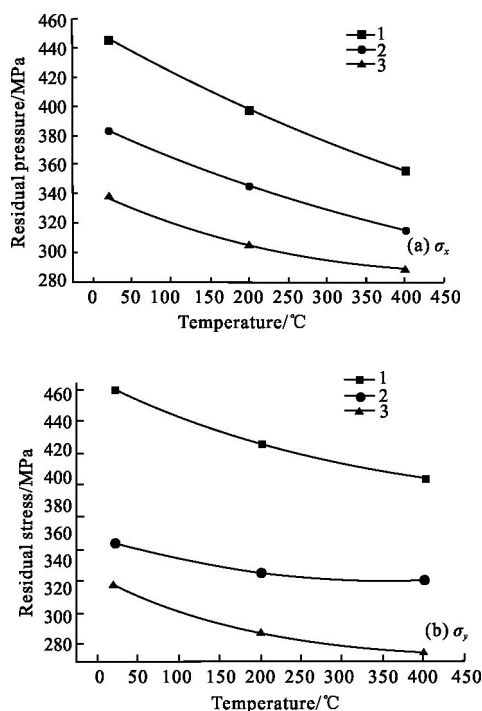


图 7 不同预热温度试件残余应力分布曲线图

Fig.7 Residual stress distribution curves under the conditions of different induction preheating temperatures

3 结论

(1) 随着基板预热温度的升高, 熔池冷却速率降低, 沉积层高温持续时间延长, 片层 α 组织长径比减小, 初生 α 相生长更加充分。

(2) 随着基板预热温度的升高, 熔池冷却速率降低, 沉积层显微硬度轻微降低。

(3) 残余应力随着试样预热温度的增加而降低。因为预热降低了沉积层区域的温度梯度, 有均匀熔池温度场的作用, 在一定程度上减小了试样应力。

参考文献:

- [1] Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components (invited paper)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3204-3209. (in Chinese)
王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战 (邀请论文)[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3204-3209.
- [2] Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component [J]. *Materials China*, 2010, 29(6): 12-27. (in Chinese)
黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2010, 29(6): 12-27.
- [3] Su Ronghua, Long Risheng, Liu Weijun, et al. Effects of substrate preheating temperature on microstructures of parts formed by laser metal deposition shaping [J]. *Journal of Engineering Design*, 2009, 16(3): 210-216. (in Chinese)
苏荣华, 龙日升, 刘伟军, 等. 基板预热温度对激光金属沉积成形零件微观组织的影响 [J]. *工程设计学报*, 2009, 16(3): 210-216.
- [4] Long Risheng, Liu Weijun, Xing Fei, et al. Effects of substrate preheating on thermal stress during laser metal deposition shaping [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(10): 241-247. (in Chinese)
龙日升, 刘伟军, 邢飞, 等. 基板预热对激光金属沉积成形过程热应力的影响 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(10): 241-247.
- [5] Lin Tao, Chen Huaining, Liu Ying. Simulation of relieving welding residual stresses in the girth-weld stainless steel tube by induction heating method [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2009, 26(5): 38-43. (in Chinese)
林涛, 陈怀宁, 刘英. 感应加热消除不锈钢管焊接应力数值模拟 [J]. *压力容器*, 2009, 26(5): 38-43.
- [6] Huang Yongjun. Study on technology and mechanism of laser-induction hybrid cladding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009. (in Chinese)
黄永俊. 激光-感应复合熔覆工艺及机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [7] Oscar Lucía, Pascal Maussion, Enrique J Dede, et al. Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(5): 2509-2520.

- [8] Farahmand P, Liu S, Zhang Z, et al. Laser cladding assisted by induction heating of Ni-WC composite enhanced by nano-WC and La_2O_3 [J]. *Ceramics International*, 2014, 40: 15421-15438.
- [9] Yang Xiaohu, Zhang Anfeng, Li Dichen, et al. Influence of process parameters on self-healing ability in laser metal direct forming [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0603023-1-7. (in Chinese)
杨小虎, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形工艺参数对形貌自愈合能力的影响 [J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603023-1-7.
- [10] Qin Lanyun, Wang Ting, Yang Guang, et al. Experiment study on laser deposition repair BT20 alloy component [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 404-410. (in Chinese)
钦兰云, 王婷, 杨光, 等. 激光沉积修复 BT20 合金试验研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 404-410.
- [11] Gao Xuesong, Tian Zongjun, Huang Yinhui, et al. Microstructure and anti oxidation of MCrAlY coating by high-frequency induction aided laser cladding [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(1): 37-42. (in Chinese)
高雪松, 田宗军, 黄因慧, 等. 高频感应辅助激光熔覆 MCrAlY 涂层的微观组织及其抗氧化性能 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(1): 37-42.
- [12] Xi Mingzhe, Gao Shiyu. Heat-treated microstructures and mechanical properties of TA15 Titanium alloy fabricated by laser rapid forming [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0103007-1-6. (in Chinese)
席明哲, 高士友. 激光快速成形 TA15 钛合金热处理组织及其力学性能 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103007-1-6.
- [13] Zhang Xiaohong, Lin Xin, Chen Jing, et al. Effects of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloys by laser solid forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(1): 142-147. (in Chinese)
张小红, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光立体成形 TA15 合金组织及力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(1): 142-147.
- [14] Yuan Hong, Fang Yanli, Wang Huaming. Influence of heat treatment on microstructure and compressive property of laser melting deposited TA15 titanium alloy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 746-750. (in Chinese)
袁红, 方艳丽, 王华明. 热处理对激光熔化沉积 TA15 钛合金组织及压缩性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 746-750.
- [15] Kong Yuan. Research on the key technology of produce metal parts by laser rapid prototyping method [D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
孔源. 激光快速成形方法制备金属零件关键技术研究 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2012.
- [16] Yang Jian, Chen Jing, Yang Haiou, et al. Experimental study on residual distribution of laser rapid forming process [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(12): 1304-1307. (in Chinese)
杨健, 陈静, 杨海鸥, 等. 激光快速成形过程中残余应力分布的实验研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(12): 1304-1307.