

感应加热参数对激光沉积修复基板温度场的影响

卞宏友¹ 韩双隆^{1*} 李英¹ 杨光¹ 钦兰云¹ 王维¹ 赵翔鹏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中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限公司技术中心, 辽宁 沈阳 110043

摘要 利用ANSYS有限元中的“生死单元”技术,在基板修复区和近修复区施加不同预热温度,模拟分析激光沉积修复过程温度场的影响规律;利用感应加热装置对TA15基板进行不同距离、不同基板厚度以及不同感应加热器形状的加热实验,并采用红外热像仪实时测量采集基板上表面温度,分析了不同加热参数对基板温度场分布的影响规律,为激光沉积修复过程中预置基体表面温度场的实时调控提供依据。

关键词 激光光学;感应加热;加热参数;表面温度场;温差法;红外热像

中图分类号 TG156.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.111403

Effect of Different Induction Heating Parameters on the Substrate Temperature Field during Laser Deposition Repair

Bian Hongyou¹ Han Shuanglong¹ Li Ying² Yang Guang¹ Qin Lanyun¹

Wang Wei¹ Zhao Xiangpeng¹

¹Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China

²Technique Center, Shenyang Liming Aviation Engine (Group) Co., Ltd., AICC, Shenyang, Liaoning 110043, China

Abstract Using the birth-and-death elements of ANSYS, the temperature field during laser deposition repair is studied while different preheating temperatures are applied to the substrate forming area and near forming area. The temperature field of TA15 titanium alloy substrate is studied at different heating distances, substrate thicknesses and shapes of the induction heater through adopting induction heating device, and the real-time temperature data of substrate is recorded with the infrared thermal imager during the heating process. The effect of different induction heating parameters on the substrate temperature field is researched. It is beneficial to real-time control of preset temperature field during laser deposition repair process.

Key words laser optics; induction heating; heating parameters; surface temperature field; temperature difference method; infrared thermal image

OCIS codes 140.3390; 290.5838

1 引言

激光沉积修复技术融合了激光熔覆和快速成形二者的优点,具有热输入能量可控、柔性化制造特点,在飞机机匣、叶片等钛合金贵重材料损伤零件的修复领域具有明显的技术优势和巨大的应用前景,已成为一个研究应用热点^[1-2]。在激光修复过程中经历的高能激光束的周期性剧烈加热和冷却、移动熔池在强约束下的快速凝固收缩及其短时非平衡循环固态相变,在零件内部产生很大且极其复杂的热应力、组织应力产生和凝固收缩应力,并与夹具外约束应力交互耦合作用和应力集中,当应力超过构件材料屈服极限时,会直接引

收稿日期: 2014-06-11; 收到修改稿日期: 2014-06-19; 网络出版日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(51375316, 51305280)、辽宁省自然科学基金(201202173)

作者简介: 卞宏友(1975—),男,博士,副研究员,主要从事金属零件激光沉积修复技术等方面的研究。

E-mail: bianhongyou@sau.edu.cn

*通信联系人。E-mail: shield1124@126.com

发工件变形和开裂^[3-5]。特别在钛合金等金属零件激光修复应用领域,由于待修复工件已处于机械加工阶段甚至是精加工阶段或是已服役的零件,加工余量小或没有加工余量,修复时要防止工件开裂,也不能发生工件变形,因为即使很小的变形量也将破坏工件结构的完整性;因此,修复工件并预防变形开裂是激光沉积修复发展和应用迫切需要解决的瓶颈难题^[6-10]。

鉴于此,提出一种采用预置基体表面温度场辅助钛合金激光沉积修复的方法,这种温度场是通过水冷和气冷的冷却装置在修复区形成低温区,并通过感应加热装置在近修复区形成高温区,高温区与低温区形成对比,进而构成预置基体表面温度场,两区温度梯度通过感应加热装置对近修复区的加热来实现,利用温差拉伸效应主动控制消减修复过程应力,最终达到防止工件变形开裂的目的。

本文利用 ANSYS 软件对基板预置不同温度的激光修复过程温度场进行模拟,分析修复过程温度梯度的变化规律;利用感应加热装置对钛合金 TA15 基板进行不同参数条件下的加热实验,并采用红外热像仪对加热过程中的基板温度分布数据进行实时采集,分析不同加热参数对基板温度场分布的影响规律,为修复过程中预置基体表面温度场的实时调控提供依据。

2 预置温度场辅助激光修复温度场模拟分析

利用 ANSYS 软件 APDL 命令及生死单元技术^[11] 分别模拟有无预置温度场作用下的激光沉积修复温度分布云图,模拟条件:激光功率为 2 mW,扫描速度为 5 mm/s,激光光斑半径为 1 mm。模型采用的基板和沉积材料均为 TA15,其中沉积修复区采用 5 道双层模拟,计算模型中基板和沉积修复区的长宽高 $X \times Z \times Y$ 分别为 30 mm×80 mm×2.5 mm, 10 mm×10 mm×0.6 mm。

图 1(a)为激光沉积修复过程中的温度分布云图;图 1(b)为基板上感应加热的近修复区和冷却的修复区的对应加热区域划分模型,修复区及基板的其他区域初始温度设置为室温 20 ℃;图 1(c)为在基板近修复区预置 300 ℃的预热温度时模拟出的温度分布云图;图 1(d)为基板近修复区预置 300 ℃时的温度场作用下激光沉积修复过程温度场模拟的温度分布云图;图 1(e)为基板近修复区预置 500 ℃时的温度场作用下激光沉积修复过程温度场模拟的温度分布云图。

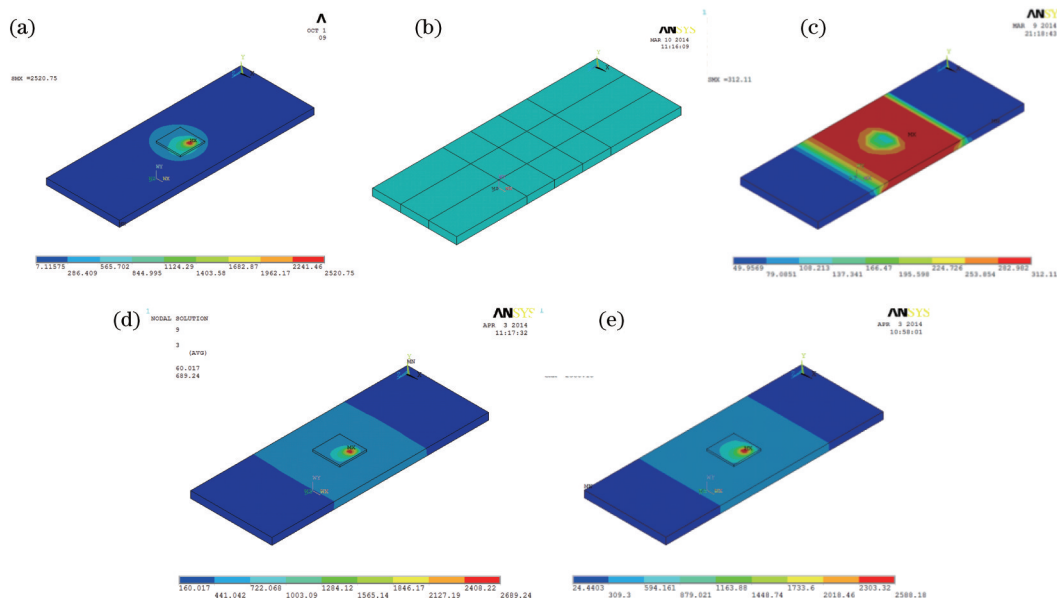


图 1 模拟温度分布云图。(a)激光沉积修复温度分布云图;(b)加热区域划分模型;(c)近修复区预置 300 ℃时基板的温度分布云图;(d)近修复区预置 300 ℃时激光沉积修复温度分布云图;(e)近修复区预置 500 ℃时激光沉积修复温度分布云图

Fig.1 Analog temperature contours. (a) Laser deposition repair temperature contours; (b) heating zoning model; (c) substrate temperature contours near restoration area at 300 ℃; (d) substrate temperature contours near restoration area at 300 ℃ under laser deposition repair; (e) substrate temperature contours near restoration area at 500 ℃ under laser deposition repair

分别将无预置温度场、近修复区预置 300 °C、近修复区预置 500 °C 温度场作用下的基板最高温度点所在 X 轴上所有基板上表面的节点在某一时刻的温度值记录下来并绘制成温度曲线(图 2)。由温度曲线图可以看出,近修复区预置 300 °C 时修复区温度梯度放缓。提高近修复区预置温度到 500 °C 时修复区温度梯度随着温度的升高温差进一步减小。

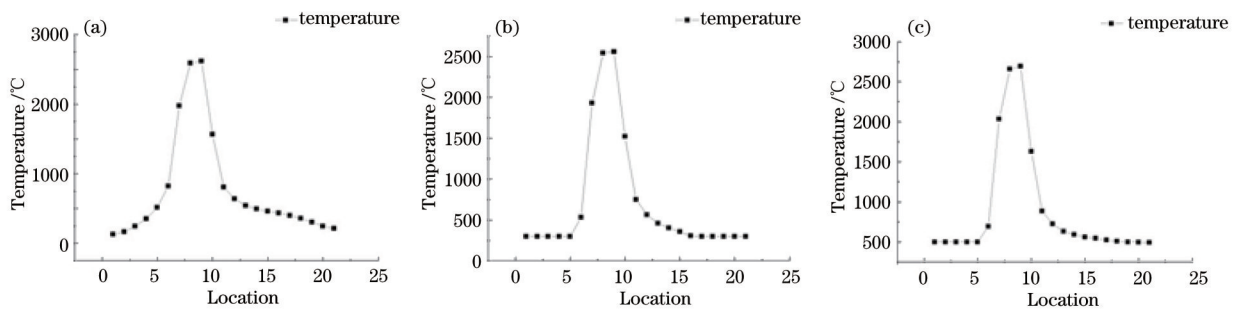


图 2 基板上表面 X 轴节点温度分布曲线图。(a)无预置温度场;(b)预置 300 °C;(c)预置 500 °C

Fig.2 Node temperature distribution along X-axis on the substrate surface. (a) No preset temperature; (b) preset temperature of 300 °C; (c) preset temperature of 500 °C

因此可以分析得出,在近修复区和修复区预置基板表面温度场可以有效减缓基板激光修复过程的温度梯度,有利于减小残余应力。

3 感应加热下基板温度分布测试实验

基板预置温度场辅助激光沉积修复系统的示意图如图 3 所示。

鉴于基板预置表面温度场的两区温度梯度通过感应加热装置对近修复区的加热来实现,实验分析不同加热参数对基板温度分布的影响规律,这是调控基板表面温度场的前提。

3.1 实验仪器和样件制备

基板材料为 TA15 钛合金,尺寸为 30 mm×80 mm×2.5 mm;实验前先将基板打磨抛光,去除表面氧化皮层并增加其表面光洁度,然后用丙酮进行清洗处理。

加热实验和温度测试现场如图 4 所示,基板放置于感应加热器下方,感应加热器与感应加热电源相连接,所用感应加热电源为自动控制型高频感应加热设备,频率为固定的 30 kHz,可根据输入电流的大小改变加热温度及加热速度,可调最大感应输入电流为 37 A。感应加热器可根据实际工件待修复区的形状及位置进行设计,本实验所用感应加热器分别为 60 mm×200 mm 矩形线圈,50 mm×50 mm 正方形线圈,直径为 50 mm 圆形线圈,线圈所用铜管直径均为 6 mm。

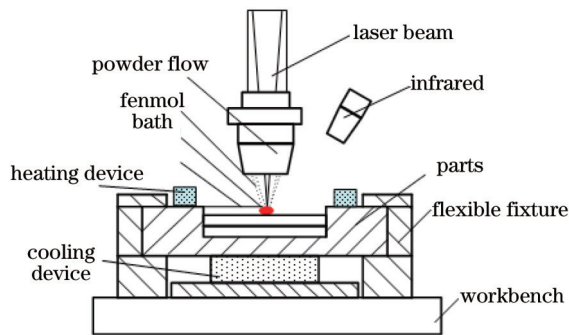


图 3 梯度温度场辅助激光修复示意图

Fig.3 Schematic diagram of temperature gradient field assisted laser repair

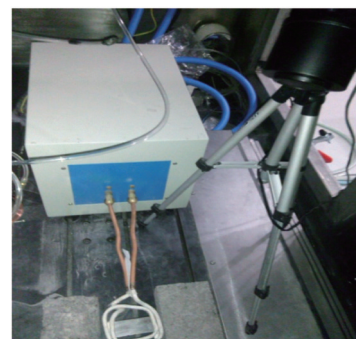


图 4 感应加热与温度测试

Fig.4 Induction heating and temperature test

红外热像仪对准加热区温度进行实时监测并保存,测温范围为 200 °C ~ 1600 °C,TA15 的红外热像仪发射率为 0.905,其中发射率为红外能量在基板表面能量衰减的补偿系数。

3.2 实验准备

不同加热条件会对基板的加热效果产生直接影响;其中基板与加热器之间的距离大小、基板的厚度以

及感应加热器的形状对基板的加热效果、温度场分布影响最为明显。为了分析感应加热参数对基板温度场分布的影响,在13种不同的工艺条件进行实验(表1)。

表1 加热实验工艺参数

Table 1 Process parameters of the heating experiments

Process ID	Distance /mm	Thickness /mm	Coil size /mm
1	2	2.5	60 × 200
2	5	2.5	60 × 200
3	7	2.5	60 × 200
4	15	2.5	60 × 200
5	20	2.5	60 × 200
6	2	1.5	60 × 200
7	2	2	60 × 200
8	2	2.5	60 × 200
9	2	5	60 × 200
10	2	12	60 × 200
11	2	2.5	60 × 200
12	2	2.5	50 × 50
13	2	2.5	φ 25

在表1中第1~5组实验用以研究基板相对感应加热器的距离对加热效果产生的影响;第6~10组实验用以研究基板的厚度对感应加热效果产生的影响;第11~13组实验用以研究感应加热器的形状对基板加热效果产生的影响。

实验时,分别将第1~13组实验的感应输入电流依次调至9、12、15、18、21 A,加热时间均为调节电流后5 min,即温度上升并保持稳定后进行记录。加热时使用红外热像仪对基板高温区与低温区的数据进行采集,每组基板做3次感应加热实验并记录3次实验的平均值作为温度数据。

4 加热实验结果及分析

4.1 基板与感应加热器的距离对基板温度场的影响

图5为感应输入电流为15 A时红外热像仪实时采集的第1~5组实验用基板温度场分布图。如图5所示,第1组和第2组实验基板感应加热高温区主要集中在基板长边的边缘位置,这是由于当加热基板时热量由中心向四周扩散,基板边缘与空气接触散热效果变差形成温度累积,同时在热量扩散的过程中由于长边距离中心较近,与短边相比热量更容易累积,因此形成长边两侧明显的高温区。随着基板与感应加热器的距离增大,感应加热产生的热能逐渐减少,基板边缘的热量累积也相应减少,因此高温区面积逐渐扩大但温度梯度在逐渐减缓。其中第1组实验基板的高温区面积最小但温度梯度最明显。

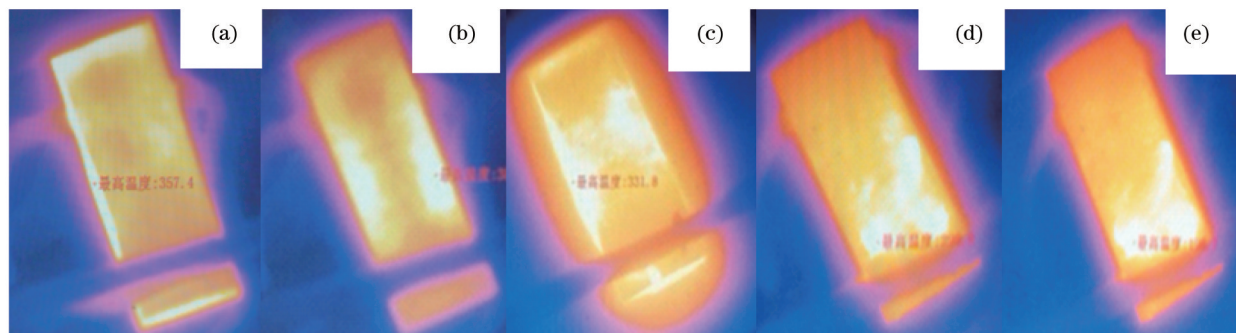


图5 第1~5组实验基板温度场。(a)第1组实验;(b)第2组实验;(c)第3组实验;(d)第4组实验;(e)第5组实验

Fig.5 Substrate temperature field in 1st~5th group experiments. (a) 1st group; (b) 2nd group; (c) 3rd group; (d) 4th group; (e) 5th group

第4组和第5组实验中基板的高温区主要集中于感应加热器下方附近位置,这是由于当基板与感应加热器的距离超过一定范围后,感应加热产生的热能向边缘扩散的速度低于基板自身冷却的速度,因此基板

没有出现热量累积现象,同时高温区位置向感应加热器偏移。

图6(a)为不同感应输入电流下感应加热器与基板不同距离时的高温区温度值曲线。在相同的感应输入电流加热条件下,随着基板与感应加热器之间的距离增加,最高温度值逐渐下降。同时,随着感应输入电流的增强,基板最高温度值均逐渐增加。

图6(b)为不同感应输入电流条件下感应加热器与基板不同距离时的基板高温区与低温区的表面温差曲线。在相同的感应输入电流条件下,基板与感应加热器的距离越小,基板的温度差越明显,随着感应电流的增强,第1~5组实验基板的表面温差均增大,并且基板与感应加热器的距离越小,表面温差增加越明显。

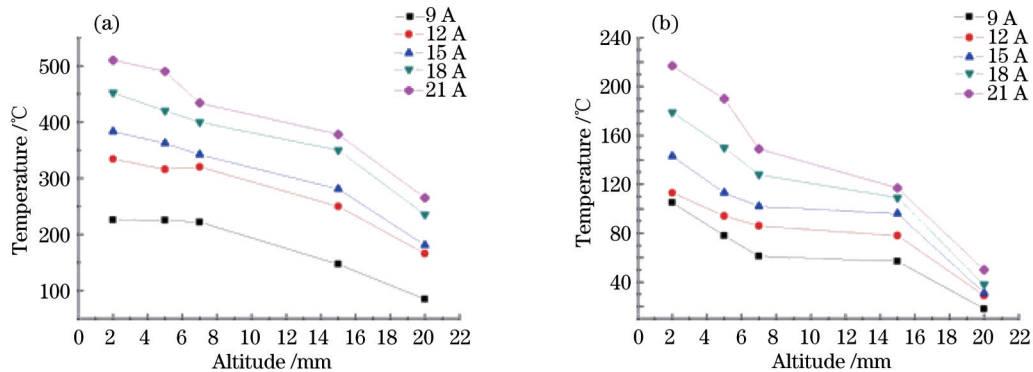


图6 不同加热距离时基板温度曲线。(a)最高温度值曲线;(b)表面温差曲线

Fig.6 Substrate temperature curves at different heating distances. (a) Maximum temperature curves; (b) surface temperature difference curves

4.2 基板的厚度对基板温度场的影响

图7为输入电流为15 A时红外热像仪实时采集第6~10组实验基板的温度场分布图。如图7所示,感应加热所产生的热能由基板表面由中心向外辐射,并在基板的边缘位置形成热量累积并形成高温区。第6~10组实验基板随着厚度的增加高温区面积逐渐增大但温度梯度逐渐放缓。第10组实验基板的温度场分布相对平均,高温区面积最大。

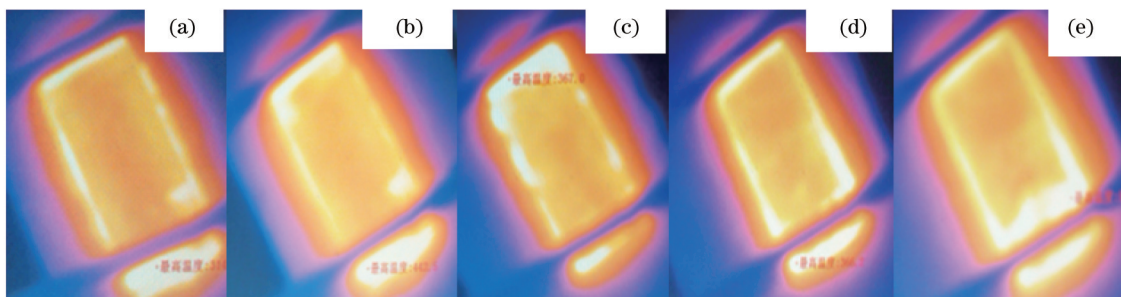


图7 第6~10组实验基板温度场。(a)第6组实验;(b)第7组实验;(c)第8组实验;(d)第9组实验;(e)第10组实验

Fig.7 Substrate temperature field in 6th~10th group experiments. (a) 6th group; (b) 7th group; (c) 8th group; (d) 9th group; (e) 10th group

图8(a)为不同厚度的基板高温区温度值曲线,如图所示,在相同的感应输入电流条件下,基板厚度越小,最高温度值越大。各个基板的高温区温度值随着感应输入电流值增加而增大。

图8(b)为基板高温区与低温区的表面温差曲线。如图所示,在相同的感应输入电流条件下,基板的厚度越小,温差越大。随着感应电流的增大各个基板的表面温度差均逐渐增加。

4.3 感应加热器不同尺寸对基板温度场的影响

图9为第11~13组实验基板在感应输入电流为15 A时不同尺寸感应加热器加热条件下的温度场,如图所示,第11组和第12组基板的高温区与感应加热器形状相似,近似矩形,第12组实验基板的高温区面积相对较大。第13组实验基板的高温区与圆形线圈类似,近似弧形,基板的高温区位置均集中在基板的边缘,高温区面积大小与基板所在感应加热器内的面积大小成正比,感应加热器的形状对基板高温区的形状影响也比较明显。

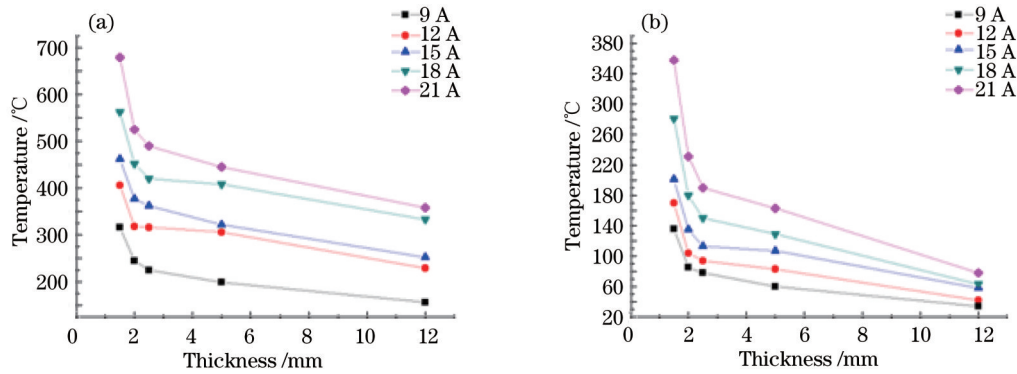


图8 不同厚度基板加热的温度曲线。(a)最高温度值曲线;(b)表面温差曲线

Fig.8 Substrate heating temperature curves with different thicknesses. (a) Maximum temperature curves; (b) surface temperature difference curves

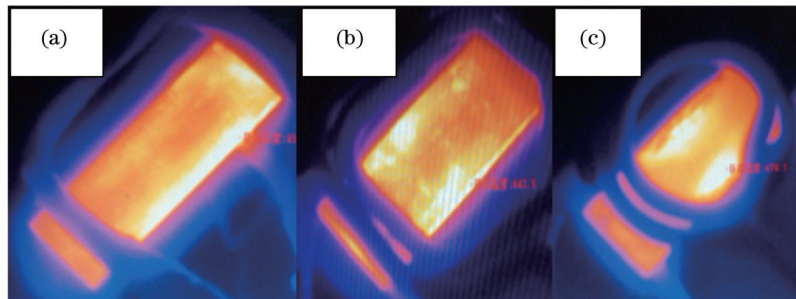


图9 第11~13组实验基板温度场。(a)第11组实验;(b)第12组实验;(c)第13组实验

Fig.9 Substrate temperature field in 11th-13th group experiments. (a) 11th group; (b) 12th group; (c) 13th group

5 结 论

1)由模拟分析可知,施加预置基板表面温度场可降低激光沉积修复过程温度梯度,有利于消减残余应力从而控制基材变形。

2)基板与感应加热器的距离越小,基板最高温度值越大,温度梯度越大;基板厚度越小,基板最高温度值越大,温度分布越不均匀。

3)感应加热器的形状及其内部面积大小对基板加热效果有明显的影响,根据工件的尺寸合理设计感应加热器的形状尺寸可以有效地提高感应加热效果。

参 考 文 献

- 1 Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3204-3209.
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[J].中国激光,2009,36(12):3204-3209.
- 2 Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing, *et al.*. Laser forming repair of titanium alloy parts [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, (8): 55-58.
林鑫,薛蕾,陈静,等.钛合金零件的激光成形修复[J].航空制造技术,2010,(8):55-58.
- 3 Lai Youbin, Liu Weijun, Kong Yuan, *et al.*. Influencing factors of residual stress of Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr alloy by laser rapid forming process [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(7): 1526-1530.
来佑彬,刘伟军,孔源,等.激光快速成形TA15残余应力影响因素的研究[J].稀有金属材料与工程,2013,42(7):1526-1530.
- 4 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and forming characterizations of Ti-6Al-4V titanium alloy after laser rapid forming processing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(10): 1839-1843.
张霜银,林鑫,陈静,等.工艺参数对激光快速成形TC4钛合金组织及成形质量的影响[J].稀有金属材料与工程,2007,36(10):1839-1843.
- 5 Huang Weidong, Chen Jing, Yang Haiou. Mechanical proper of Ti alloy TC4 laser rapid forming [J]. Aeronautical

- Manufacturing Technology, 2013, (5): 73-76.
黄卫东, 陈 静, 杨海欧. TC4钛合金激光快速成形力学性能[J]. 航空制造技术, 2013, (5): 73-76.
- 6 Fu Xingling, Lin Xin, Yu Jun, *et al.*. Effect of substrate pre-deformation on stress and strain fields of stainless steel test-piece by laser solid forming [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(11): 178-181.
付兴领, 林 鑫, 于 君, 等. 基板预变形对不锈钢激光立体成形件应力应变的影响 [J]. 热加工工艺, 2010, 39(11): 178-181.
- 7 Su Ronghua, Liu Weijun, Long Risheng, *et al.*. Effects of different substrate preheating temperature on the thermal stresses during laser metal deposition shaping [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2009, (4): 78-83.
苏荣华, 刘伟军, 龙日升, 等. 不同基板预热温度对激光金属沉积成型过程热应力影响研究[J]. 制造技术与机床, 2009, (4): 78-83.
- 8 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.
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.
- 9 Xi Mingzhe, Gao Shiyou. Heat-treated microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser rapid forming [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103007.
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(8): 0103007.
- 10 Xi Mingzhe, Gao Shiyou. Microstructures and mechanism of cracks forming of Rene 80 high-temperature alloy fabricated by laser rapid forming process [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0803008.
席明哲, 高士友. 激光快速成形 Rene 80 高温合金组织及裂纹形成机理[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0803008.
- 11 Long Risheng, Liu Weijun, Shang Xiaofeng. Numerical simulation of temperature field on laser metal deposition shaping [J]. Laser Technology, 2007, 31(4): 394-396.
龙日升, 刘伟军, 尚晓峰. 激光金属成形过程中温度场的数值模拟[J]. 激光技术, 2007, 31(4): 394-396.