

扫描路径对激光修复钛合金残余应力与变形的影响

杨 光^{1,2,3}, 丁林林¹, 王向明², 王华明³, 钦兰云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. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110135;
3. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 为降低激光沉积修复钛合金基体的残余应力与变形, 采用有限元参数化设计语言研究了不同激光扫描路径对修复基体残余应力与变形的影响, 模拟了不同扫描路径下修复基体残余应力及不同修复层残余应力的分布情况, 并对原因进行了分析。结果表明: 不同扫描路径下基体两端残余应力值较大, 修复层残余应力值两端高, 中间低, 采用层间交错扫描路径时, 各修复层残余应力值大小和波动幅度降低, 修复件表面平整度值最小。采用压痕法对不同扫描方式下修复件表面残余应力进行了测定, 得到了不同扫描路径下基体变形曲线, 并与模拟结果进行了比较, 两者吻合较好, 为提高激光修复质量提供了参考依据。

关键词: 激光修复; 扫描路径; 残余应力; 变形

中图分类号: TG174.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2926-07

Influence of scanning path on residual stress and distortion of laser repairing titanium alloy

Yang Guang^{1,2,3}, Ding Linlin¹, Wang Xiangming², Wang Huaming³, Qin Lanyun¹

- (1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110135, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to decrease the residual stress and distortion of laser repairing titanium alloy substrate, the influence of different laser scanning paths on the residual stress and distortion of repairing substrate was researched by using ANSYS parameter design language, the residual stress distribution of different layers and different scanning paths was simulated. The result shows that the residual stress of both ends of repairing substrate is higher than other location, the residual stress of repairing layers is higher in both ends, and lower in the middle. The residual stress and its ranges in different repairing layers is lower by using direction orthogonal changing scanning paths, and the flatness of repairing substrate decreases. The residual stress of repairing substrates under different scanning paths was measured by indentation test, the distortion curves of different scanning paths were drawn, which was in good agreement with simulated results.

Key words: laser repairing; scanning path; residual stress; distortion

收稿日期: 2015-02-19; 修订日期: 2015-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(51305280, 51375316); 国防基础科研(A3520133001); 航空基金(2013ZE54017)

作者简介: 杨光(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光沉积制造/修复方面的研究工作。Email: yangguang@sau.edu.cn

0 引言

TA15 钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀等优点,目前广泛应用于航空航天零部件和发动机结构中^[1-3]。对损伤的航空零部件进行修复,可以在不影响零件使用性能的前提下,达到节约钛合金资源、提高零件有效利用率的目的。近年来,激光沉积修复技术已成为研究热点^[4-5],该技术是以损伤零件缺陷部位为基体,对修复部位的三维几何形状重新构造,通过分层制造原理,实现粉末材料的逐层堆积,最终达到修复缺陷部位的目的。该技术修复周期短、材料利用率高、不需要专用工装,且修复时热影响区小,可与修复基体形成良好的冶金结合,修复部位的性能可达到甚至超过待修复基体的性能。

在激光沉积修复过程中由于高能量激光束在瞬间将能量输入到修复基体当中,导致在修复过程中温度场和温度梯度伴随激光束移动不断发生动态连续变化且非常剧烈,致使修复过程中产生复杂的应力、应变演化,修复结束后在基体上产生残余应力,修复基体发生翘曲和变形,甚至开裂。严重地影响修复零件的疲劳强度、耐腐蚀性等物理化学性能,造成修复零件尺寸精度下降,产生修复废品,这一问题已成为制约激光修复技术发展的难题。目前国内外学者大多采用数值模拟手段对激光沉积过程温度场进行研究,LABUDOVIC^[6]等采用参数化设计语言,研究了如何建立准确的激光金属粉末沉积成形过程的三维数值模型;来佑彬^[7]等对激光快速成形 TA15 钛合金残余应力的影响因素进行了实验研究,系统研究了残余应力与激光功率、扫描速度以及送粉速率之间的关系;孔源^[8]等对激光沉积 TC4 热耦合场进行了数值模拟,研究了温度场与应力场之间的关系,并进行了分析;张霜银^[9]等对热处理对激光立体成形 TC4 残余应力的影响进行了研究,指出热处理有助于残余应力的缓和。减小激光沉积修复应力、应变的方法^[10]主要有优化沉积修复工艺参数、对基板进行预热、对修复后零件进行热处理和基板预变形处理等方法。文中基于此,采用数值模拟和实验两种手段研究了修复试样在不同扫描路径条件下残余应力和变形的规律,为

优化激光扫描路径,降低残余应力和变形提供理论依据。

1 数学模型建立

激光沉积修复残余应力数值模拟属于热力耦合问题,采用 ANSYS 中的热力耦合方法可以很好地解决该问题。“生死单元”技术可以实现粉末材料的逐层添加。在建模过程中,粉末材料为 TA15 钛合金球形粉末,修复基体采用与之相同的材料,材料的部分热物性参数见表 1。修复基板尺寸长度为 200 mm、宽度为 40 mm、高度为 4 mm,修复成形尺寸长度为 60 mm、宽度为 30 mm、高度为 3 mm,共沉积 10 层。激光扫描路径如图 1 所示,其中图 1(a)为短边平行往复扫描路径示意图,图 1(b)为长边平行往复扫描路径示意图,图 1(c)为层间交错往复扫描路径示意图(奇数层采用短边扫描,偶数层采用长边扫描,依次往复进行)为便于研究基体和修复层残余应力,在不影响计算精度的前提下,采用统一的网格划分,选择的单元分别为 SOLID70 和 SOLID45。相关工艺参数设定为激光功率 2 000 W,扫描速度为 5 mm/s,光斑直径为 3 mm,送粉速度为 0.8 g/rad。模拟时基板和环境温度设定为 20 ℃,不考虑熔池内部的化学反应和流动,相变潜热定义为密度与比热容的光滑函数,边界条件考虑对流换热和辐射条件,将两者耦合到一起,热源模型选择高斯热源,将其定义为时间的函数,实现热源连续加载,采用热-弹塑性理论将温度作为载荷,实现残余应力的模拟。采用不同的算法将单元按 3 种扫描路径逐个激活。建立的有限元模型如图 2 所示。

表 1 TA15 钛合金的部分热物性参数

Tab.1 Thermo-physical properties of TA15

Temperature /℃	Thermal conductivity /($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	Specific heat capacity /($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	Coefficient of thermal expansion /($10^{-5} \cdot ^\circ C^{-1}$)
20	8.0	520	0.9
200	10.2	587	0.9
400	12.2	670	0.9
600	15.1	755	0.94
1540	25.0	1162	0.97
1650	22.0	1200	0.97
2000	20.5	1200	0.97

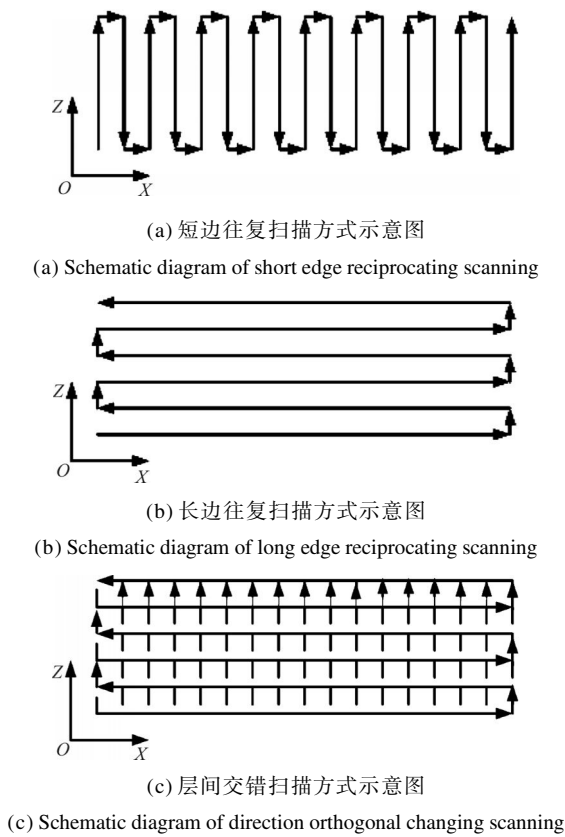


图 1 扫描方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser scanning path

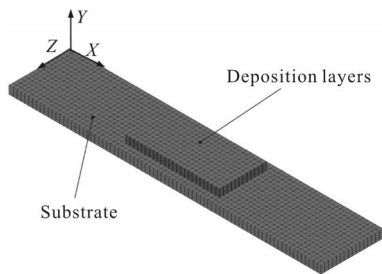


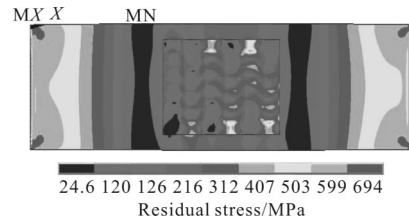
图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

2 数值计算结果与分析

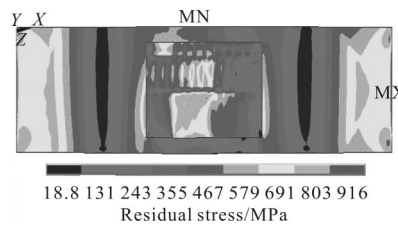
图 3 为激光沉积修复完毕,试样冷却 300 s 时不同扫描路径下模拟的修复试样表面残余应力分布云图。通过观察可发现长边与短边两种扫描方式下残余应力的最大值均分布在修复件的两端,且分布范围较大,在平行于扫描方向的残余应力值比其他方向要大,相对于修复基体,两端的残余应力值基本上呈现对称分布的特征,且残余应力的变化梯度较大,层间交错扫描方式残余应力的最大值虽然出现在修复层,但最大值分布范围很小,最小值分布范围较

大,残余应力的分布梯度较为缓和,可见采用层间交错扫描方式可在一定程度上减小残余应力。



(a) $t=300$ s 时长边往复扫描残余应力分布云图

(a) Residual stress distribution of long edge reciprocating scanning at $t=300$ s



(b) $t=300$ s 时短边往复扫描残余应力分布云图

(b) Residual stress distribution of short edge reciprocating scanning at $t=300$ s



(c) $t=300$ s 时层间交错扫描残余应力分布云图

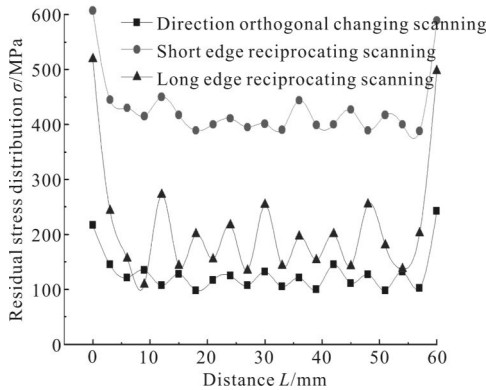
(c) Residual stress distribution of direction orthogonal changing scanning at $t=300$ s

图 3 不同扫描路径下残余应力分布

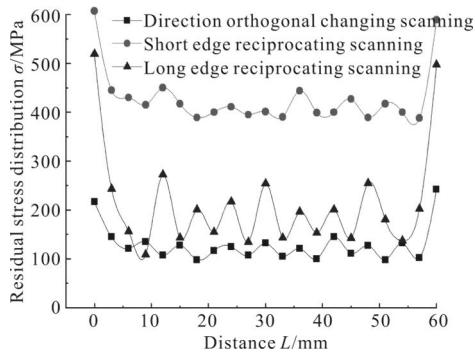
Fig.3 Residual stress distribution of different scanning paths

图 4 为冷却 300 s 时不同扫描方式下第 2、4、6、8 层 Von Mises 等效残余应力分布曲线。通过观察可见每一修复层上采用短边扫描方式的残余应力值比长边扫描和层间交错扫描方式残余应力值要大得多,其残余应力值在 300~500 MPa 之间变化;第 2、4、6、8 层在不同扫描方式下残余应力均呈现两端应力值高、中间低的变化特点,并且各层残余应力值呈现波动特征,残余应力变化趋势相同;随着扫描层数增加,各层残余应力值都有减小的趋势;采用层间交错的扫描方式各层残余应力值要比其余两种扫描方式值要小,并且残余应力值的波动幅度也要小得多。这是因为采用短边往复扫描方式时,在修复过程中沿宽度方向的应力最大,冷却后应力很难在该方向得到释放,最终导致修复层表面残留较大应力,形成残

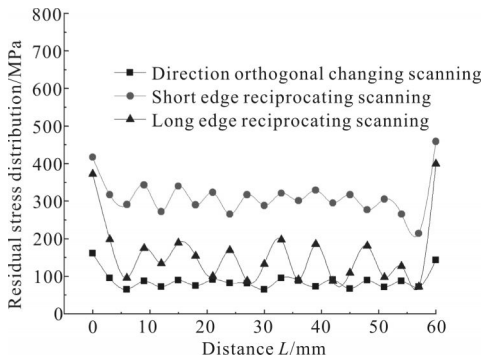
余应力,造成短边往复扫描方式残余应力值最大;虽然采用的扫描方式不同,但在修复层一端时,开始基体温度较低,激光照射到基体上形成很大的温度梯度,故残余应力值变大,当完成一层扫描回到该层起点时该处早已冷却,温度梯度再次变大,残余应力值必然增大,因此两端应力值高。由于扫描方式频繁变化,导致各层残余应力出现一定幅度波动,并且随着扫描的进行,体系内因热量累积,使温度梯度减小故各层残余应力出现减小的趋势。采用层间交错扫描



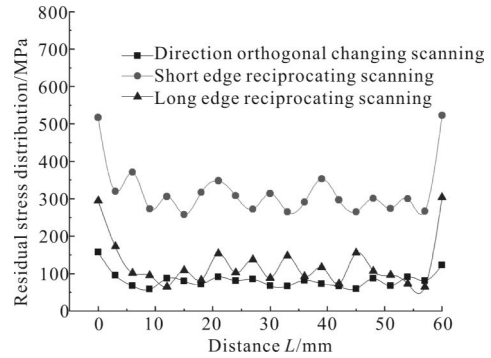
(a) $t=300$ s 时第二层残余应力分布
(a) Residual stress distribution of the second layer at $t=300$ s



(b) $t=300$ s 时第四层残余应力分布
(b) Residual stress distribution of the fourth layer at $t=300$ s



(c) $t=300$ s 时第六层残余应力分布
(c) Residual stress distribution of the sixth layer at $t=300$ s



(d) $t=300$ s 时第八层残余应力分布
(d) Residual stress distribution of the eighth layer at $t=300$ s

图 4 不同扫描方式下各层残余应力分布

Fig.4 Residual stress distribution of different layers

方式,在一定程度上使各层温度梯度沿各方向变化均匀,因此该种扫描方式下残余应力值较小。

3 实验

3.1 实验方法及材料

进行修复实验时选择的工艺参数如下:激光功率为 2000 W、扫描速度为 5 mm/s、光斑直径为 3 mm、送粉速率 0.8 g/rad,激光吸收率为 8.13%~13.7%,搭接率为 40%,采用的激光器为 CO₂ 激光器。实验时测量环境温度为 20 ℃,实验前将 TA15 钛合金修复基板打磨光滑平整,去除基板表面的氧化层之后用丙酮进行清洗,TA15 钛合金粉末在 120 ℃真空环境下进行干燥,整个实验是在氩气保护环境下进行的,防止修复时钛合金发生氧化。实验系统主要由激光器及其光路系统、动态惰性气体保护系统、运动执行机构、送粉系统等及部分组成。实验采用的钛合金粉末成分质量分数如下:含铝量为 5.5%、钨为 0.5%、钒为 0.8%、锆为 1.5%,其余为钛。采用 KJS-3 型压痕仪对残余应力进行测量。实验前先将待测表面用砂纸打磨光滑平整,去除表面毛刺后粘贴应变片对待测位置进行压痕,记录下相应的应力值和应变值即可。

3.2 结果与讨论

图 5 为应变片位置示意图。图 6 为测得不同扫描路径下沿修复试样中心长度方向上第 10 层表面 X、Y 方向残余应力随长度的变化曲线(见图 5),从图中可以看出无论是哪一种扫描方式,修复基体(图 6 中 0~70 mm 及 130~200 mm 区间)表层的残余应力值

都较高,而修复区域表层(图 6 中 70~130 mm 区间)残余应力值都较低,对于同一种扫描方式,X、Y 方向残余应力值大小相当,出现该现象的原因是修复最后几层时,热量输入基本达到饱和,温度梯度变化减缓,甚至基本不变,故修复区表层残余应力值较低。短边扫描修复基体的残余应力值最大,在 300~500 MPa 之间,且波动幅度较大,长边次之,其值在 70~100 MPa 之间,层间交错扫描残余应力最小,残余应力值在 60~90 MPa 之间,对比模拟值与实验测量值,两者之间的平均误差为 10.45%,趋势基本一致,吻合较好。

图 7(a)为长边往复扫描修复试样,图 7(b)为短

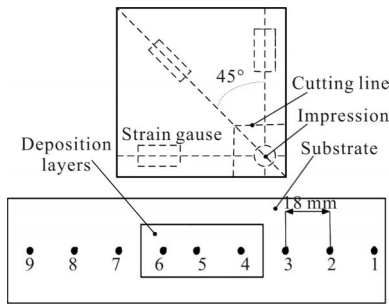
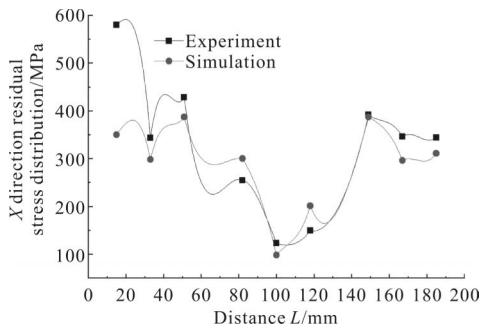


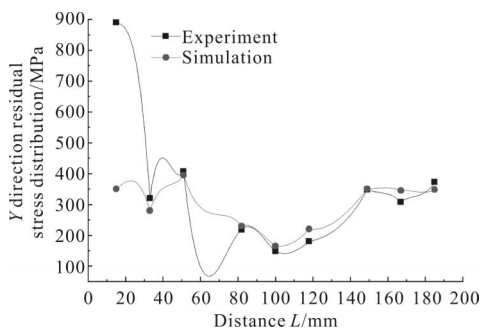
图 5 应变片位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of strain gauge location



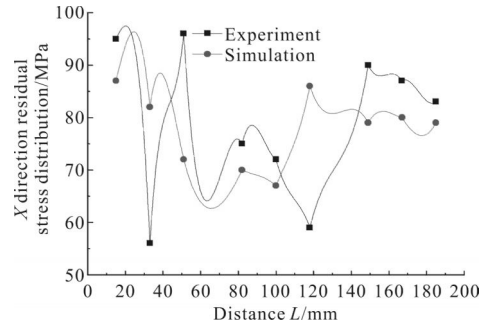
(a) 短边 X 方向残余应力分布

(a) Residual stress distribution of short edge X direction



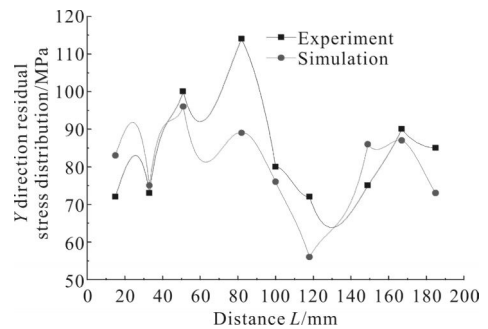
(b) 短边 Y 方向残余应力分布

(b) Residual stress distribution of short edge Y direction



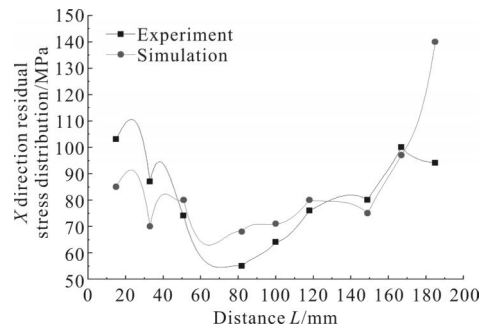
(c) 长边 X 方向残余应力分布

(c) Residual stress distribution of long edge X direction



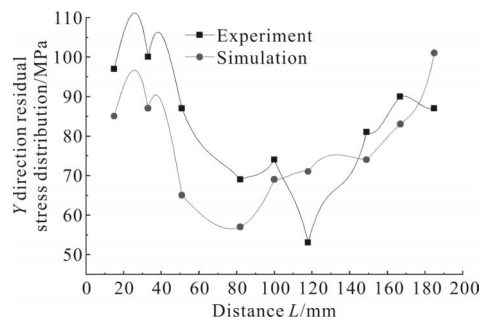
(d) 长边 Y 方向残余应力分布

(d) Residual stress distribution of long edge Y direction



(e) 层间交错 X 方向残余应力分布

(e) Residual stress distribution of direction orthogonal X direction



(f) 层间交错 Y 方向残余应力分布

(f) Residual stress distribution of direction orthogonal Y direction

图 6 残余应力测量结果

Fig.6 Results of residual stress measurement

边往复扫描修复试样,图 7(c)为层间交错扫描修复试样。图 8 为冷却到室温时 3 种不同扫描方式下的沿长度方向修复试样变形曲线。测量时选择 X 轴为水平基准线,每隔 5 mm 选择一个测量点,采用高度尺测量 3 种不同扫描方式下该点相对于水平基准线的变形高度值。由图 8 中可见 3 种扫描方式下变形曲线相对于原点均大致成对称分布特征,修复试样产生变形的原因主要是由于在修复过程中激光熔池与其周围区域材料收缩和膨胀不协调,反复产生弹性和塑性应变造成的。通过比较可知 3 种扫描方式下与修复层对应的基体区域变形相对都比较平缓,波动不大,修复区以外修复基体变形长边扫描和短边扫描都比较大,但最大值位置不同,长边扫描变形最大值位置出现修复区端部,短边扫描方式则出现在近修复区位置,层间交错方式相对均匀,这是由于在激光沉积修复过程中平行于扫描方向的应力分量最大,当采用长边扫描方式时应力会沿试样长度方向释放掉一部分,故两端变形较大,而采用短边扫描方式沿扫描方向应力在宽度方向很难释放掉。表 2 为不同扫描方式下基体平整度值,可见长边扫描表面平整度值最大,层间交错扫

描值最小。图 9 为层间交错扫描方式下模拟的修复基体变形情况,对比图 8 实测的交错扫描路径的变形曲线,两者在形状和数值上基本吻合。综合考虑选择交错扫描方式可以在一定程度上减小修复基体的变形。

表 2 不同扫描方式基体平整度值

Tab.2 Substrate flatness under different scanning paths

Laser power/W	Scanning speed / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Spot diameter/mm	Scanning mode	Flatness
2000	5	3	Short edge	3.533 17
2000	5	3	Long edge	4.819 39
2000	5	3	Direction orthogonal	1.877 63

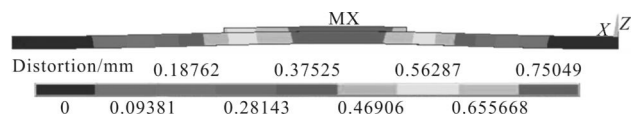


图 9 交错扫描基体变形

Fig.9 Substrate deflection of direction orthogonal changing scanning

4 结 论

文中采用有限元参数化设计语言,模拟了短边往复扫描、长边往复扫描及层间交错 3 种扫描方式下的残余应力与变形,分析了不同扫描方式下残余应力及各修复层残余应力的分布规律。3 种扫描方式下各修复层残余应力值呈两端高、中间低分布特点,长边扫描与短边扫描情况下,残余应力最大值出现在修复基体两端,且残余应力梯度变化较大,长边扫描修复试样变形最大,采用层间交错扫描方式各层残余应力值大小和波动幅度较低,且修复件表面平整度值最小。残余应力测量结果与模拟结果两者吻合较好。在进行激光沉积修复时采用层间交错扫描方式有利于修复件变形与残余应力值的减小和降低。文中的研究结果对降低激光沉积修复残余应力与变形有一定的参考意义。

参考文献:

[1] Qin Lanyun, Wang Ting, Yang Guang, et al. Experimental study on laser deposition repair BT20 alloy component [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 404-410. (in

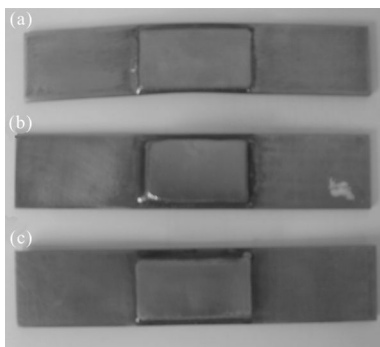


图 7 不同扫描路径下沉积修复试样

Fig.7 Laser deposition repaired samples using different scanning paths

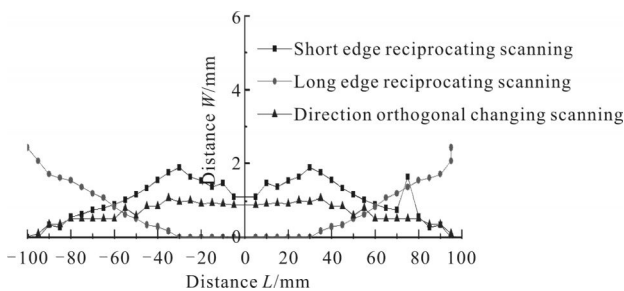


图 8 不同扫描路径变形曲线

Fig.8 Distortion curve under different scanning paths

- Chinese)
- 钦兰云, 王婷, 杨光, 等. 激光沉积修复 BT20 合金实验研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 404-410.
- [2] Yang Guang, Wang Xiangming, Wang Wei, et al. Microstructure and property of laser cladding TiC reinforced composition coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 796-799. (in Chinese)
- 杨光, 王向明, 王维, 等. 激光熔覆制备 TiC 颗粒增强涂层的组织和性能 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43 (3): 796-799.
- [3] Parisa Farahmand, Radovan Kovacevic. An experimental - numerical investigation of heat distribution and stress field in single - and multi - track laser cladding by a high - power direct diode laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63, 154-168.
- [4] Lin Xin, Cao Yongqing, Wu Xiaoyu, et al. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 17-4PH stainless steel[J]. *Materials and Engineering A*, 2012, A553: 80-88.
- [5] Luo Fan, Yao Jianhua, Hu Xiaxia, et al. Effect of laser power on the cladding temperature field and the heat affected zone [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2011, 18(1): 73-78.
- [6] Labudovic M, Hu D, Kovacevic R. A three dimension model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping [J]. *Journal of Materials Science*, 2003, 38(1): 35-49.
- [7] 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 Materials and Engineering*, 2013, 42(2): 1526-1530. (in Chinese)
- 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]. 稀有金属与材料工程, 2013, 42(2): 1526-1530.
- [8] Kong Yuan, Liu Weijun, Wang Yuechao, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field of direct laser metal deposition shaping process of titanium alloys [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47 (24): 74-82. (in Chinese)
- 孔源, 刘伟军, 王越超, 等. 钛合金激光直接成形过程中热力耦合场的数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 74-82.
- [9] Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, et al. Influence of heat treatment on residual stress of Ti-6Al-4V alloy by laser solid forming [J]. *Rare Materials and Engineering*, 2009, 38(5): 774-778. (in Chinese)
- 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光立体成形 TC4 残余应力的影响[J]. 稀有金属与材料工程, 2009, 38(5): 774-778.
- [10] Bian Hongyou, Yang Guang, Li Ying, et al. Grouping parallel scan path generating method of metal laser deposition shaping [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(11): 171-176. (in Chinese)
- 卞宏友, 杨光, 李英, 等. 金属激光成形分组平行扫描路径生成方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 171-176.