

激光增材制造中工艺参数对残余应力的影响

来佑彬^{1,2} 刘伟军¹ 赵吉宾¹ 赵宇辉¹ 王福雨^{1,2}

(¹ 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了研究激光增材制造(LAM)中不同工艺参数对残余应力的影响情况,针对 TA15 钛合金材料,在专用激光增材制造系统中制造出 10 个不同工艺参数的测试样件,样件截面均为 24 mm×40 mm 矩形。利用压痕应力测量方法分别对样件进行残余应力测量,研究了激光比能量、激光能量密度以及粉流密度等工艺参数对激光增材制造样件残余应力的影响情况,给出了曲线图。结果表明,激光增材制造样件中的残余应力明显小于材料屈服强度的拉应力,残余应力数值变化与激光比能量和激光能量密度成正相关,而与粉流密度成负相关。

关键词 光学制造;激光增材制造;压痕法;残余应力;工艺参数

中图分类号 TG146.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s103001

Effect of Process Parameters on the Residual Stress in Laser Additive Manufacturing

Lai Youbin^{1,2} Liu Weijun¹ Zhao Jibin¹ Zhao Yuhui¹ Wang Fuyun^{1,2}

(¹ Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to study the effect of different process parameters on the residual stress in laser additive manufacturing, 10 test samples are made with different process parameters by the special laser additive manufacturing system with TA15 alloy material. Cross sections of specimens are all 24 mm×40 mm square. Using the indentation stress measurement method to measure the residual stress of sample, laser power density and powder flow density on the residual stress in laser additive manufacturing are studied. The results show that the residual stress in the laser additive manufacturing is significantly less than the yield strength. The residual stress is positively correlated with the laser specific energy and laser power density, and is negatively correlated with the powder flow density.

Key words optical fabrication; laser additive manufacturing; indentation method; residual stress; process parameter

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

激光增材制造(LAM)技术将快速成形技术和激光熔覆技术相结合,是一种无需模具和刀具,直接把 CAD 模型转化为复杂金属零件的先进制造技术^[1]。该技术可直接制造出具有复杂外形和良好力学性能的全密度三维实体金属零件,具有制造速度快、柔性好、生产周期短、成本低等优点,在航空航

天、汽车船舶、武器装备、生物医学等领域有着广泛的应用前景^[2]。该工艺以高能激光束作为移动热源,一方面,激光快速加热冷却为材料加工提供了常规手段无法实现的极端非平衡条件,使成形件具有细小、致密的组织和优异的综合性能;但另一方面,局部热输入造成的不均匀温度场必然引起局部热效应,表现为熔池在凝固及随后冷却过程不一致^[3-4],

收稿日期: 2013-09-01; **收到修改稿日期**: 2013-10-01

作者简介: 来佑彬(1988—),男,博士研究生,主要从事激光增材制造工艺方面的研究。E-mail: youbinlai@163.com

导师简介: 刘伟军(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事逆向工程、数控加工、激光快速成形等方面的研究。

E-mail: wjliu@sia.cn

从而在成形件和基板上产生残余应力。残余应力作为一种内应力对材料性能有非常不利的影响,也会影响制造精度和制造件机械性能^[5],严重时甚至会直接引发裂纹缺陷^[6]。

因此,有必要对残余应力影响因素进行研究,但是目前对于激光增材制造残余应力方面的研究多针对单一参数^[7-8],然而激光增材制造是一个多参数交互作用的复杂过程,各工艺参数并不是独立地影响工艺过程,而是交互作用在一起对增材制造过程起到一个综合的效果^[9]。本文通过压痕法测量不同样件残余应力,研究了激光比能量、激光能量密度以及粉流密度等组合工艺参数对增材制造样件残余应力的影响情况。

2 实验方法与内容

2.1 压痕法测残余应力原理

压痕应力测量方法对测试样件具有较小的损伤,而且测量方便准确,其原理^[10]为:在平面应力场中,由压入球形压痕产生的材料流变会引起受力材料的松弛变形(拉应力区材料缩短,压应力区材料伸长),与此同时,由压痕自身产生的弹塑性区及其周围的应力应变场在残余应力的作用下也要产生相应变化,这两种变形行为的叠加所产生的应变变化量可称之为叠加应变增量(简称应变增量)。利用球形压痕诱导产生的应变增量求解残余应力的方法就叫做压痕应变法。该方法采用电阻应变花作为测量用的敏感元件,在应变栅轴线中心通过机械加载制造一定尺寸的压痕(图1),通过应变仪记录应变增量数值,利用事先对所测材料标定得到的弹性应变与应变增量的关系得到残余应变大小,再利用胡克定律求出残余应力。

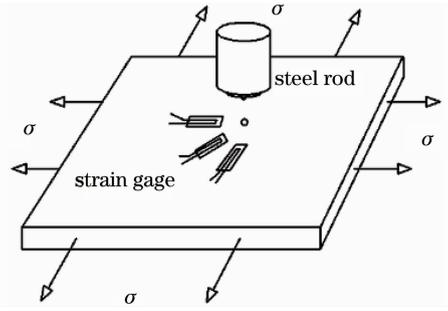


图1 压痕法测量残余应力示意图

Fig.1 Sketch map of residual stress tested by indentation method

2.2 实验内容

实验在中国科学院沈阳自动化研究所激光增材制造系统(图2)上进行,所采用的工艺参数如表1所示。基板材料为TA15钛合金,实验前先将基板打磨抛光,以便去除表面氧化皮层并增加其表面光洁度,然后用丙酮对其做进一步的清洗处理,粉末材料为TA15钛合金球形粉末,粒度为-100~+200目(75~150 μm)(化学成分如表2所示),实验前在120℃真空环境下进行干燥处理。

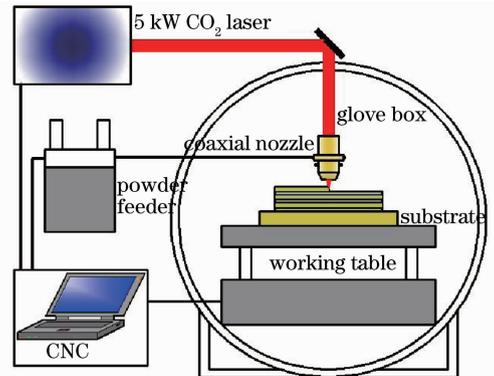


图2 激光增材制造系统示意图

Fig.2 Sketch map of laser additive manufacturing system

表1 激光增材制造工艺参数

Table 1 Process parameters of laser additive manufacturing

Laser power /kW	Scanning speed /(mm/s)	Powder feeding rate /(g/min)	Laser spot diameter /mm	Overlaps /%
1.2~2	3~9	0.5~2	2~3	30~60

表2 TA15钛合金粉末化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of the TA15 titanium alloy powder (mass fraction, %)

Al	Mo	V	Zr	Fe	Si	C	O	N	H	Ti
6.4	1.4	1.5	1.9	0.12	0.02	0.02	0.07	<0.01	<0.001	Bal.

实验中采用单因素实验方法,分别改变激光功率、扫描速度、送粉速度等参数,增材制造出10个样件(图3),样件截面均为24 mm×40 mm矩形,加工层数为50,利用压痕应力测量法分别对其进行残余

应力测量,为了使测量结果更具说服力,在每个样件上选取3个测量位置进行测量(图4为测点位置示意图),这里关注的是测量结果中的最大值。



图 3 激光增材制造样件

Fig. 3 Samples of laser additive manufacturing

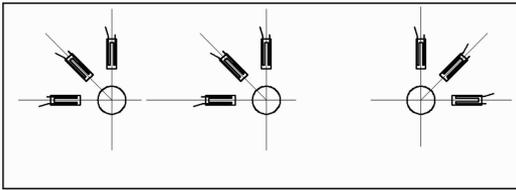


图 4 残余应力测点位置示意图

Fig. 4 Sketch map of test point of residual stress

3 实验结果与分析

探讨激光增材制造中的组合工艺参数对残余应力的影响情况,所谓组合工艺参数,即多种单因素工艺参数的组合,引入的组合工艺参数有激光比能量 E 、激光能量密度 ρ 以及粉流密度 G ,具体定义为^[11]。

$$E = \frac{P}{DV}, \quad (1)$$

$$\rho = \frac{4P}{\pi D^2}, \quad (2)$$

$$G = \frac{U}{DV}, \quad (3)$$

式中 P 为激光功率, D 为光斑直径, V 为扫描速度, U 为送粉速度。3 个复合工艺参数与残余应力之间关系分别如图 5、图 6 和图 7 所示。

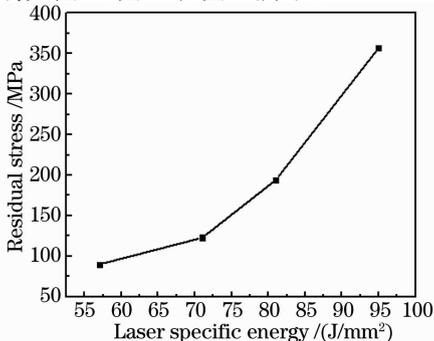


图 5 不同激光比能量对残余应力的影响

Fig. 5 Residual stress in different laser specific energies

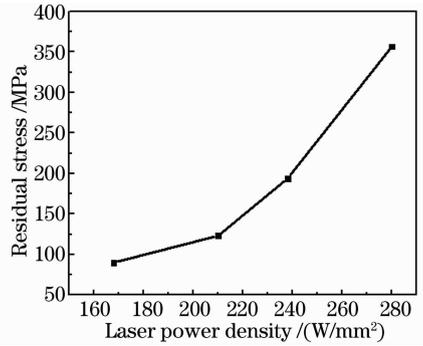


图 6 不同激光能量密度对残余应力的影响

Fig. 6 Residual stress in different laser power densities

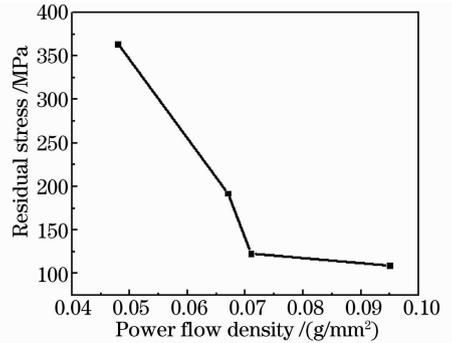


图 7 不同粉流密度对残余应力的影响

Fig. 7 Residual stress in different powder flow densities

分析图 5,6,7 可知,样件中存在的残余应力为拉应力,其数值明显小于材料屈服强度,属于低残余应力。3 个组合工艺参数对残余应力的影响为残余应力数值变化与激光比能量 E 和激光能量密度 ρ 成正相关,而与粉流密度 G 成负相关。这是因为,随着激光比能量或者激光能量密度的增大,增材制造过程中的熔池将会得到更高的能量,热输入造成的温度分布不均匀化情况加重,应力积累效应增大,因此,出现残余应力数值随激光比能量和激光能量密度的增大而升高的规律。相反,随着粉流密度的增大,受钛合金粉末与激光光束相互作用的影响,熔池中能量输入随之减少,表现为残余应力随之减小。

4 结 论

1) 激光增材制造样件中的残余应力为明显小于材料屈服强度的拉应力。

2) 激光比能量、激光能量密度以及粉流密度等组合工艺参数对残余应力有明显的影 响,残余应力随激光比能量或者激光能量密度的增大而增大,随粉流密度的增大而减小。

参 考 文 献

1 Yang Xiaohu, Zhang Anfeng, Li Dichen, et al.. Influence of

- process parameters on self-healing ability in laser metal direct forming[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603023.
- 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.
- 2 Ge Jiangbo, Zhang Anfeng, Li Dichen, *et al.*. Process research on DZ125L superalloy parts by laser metal direct forming[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0703004.
- 葛江波, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金零件工艺的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703004.
- 3 Yang Jian, Huang Weidong, Chen Jing, *et al.*. Residual stress on laser rapid forming metal part[J]. Applied Laser, 2004, 24(1): 5-8.
- 杨 健, 黄卫东, 陈 静, 等. 激光快速成形金属零件的残余应力[J]. 应用激光, 2004, 24(1): 5-8.
- 4 Yang Jian, Chen Jing, Yang Haiou, *et al.*. Experimental study on residual stress distribution of laser rapid forming process [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(12): 1304-1307.
- 杨 健, 陈 静, 杨海欧, 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.
- 5 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Temperature/stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(9): 1308-1312.
- 贾文鹏, 林 鑫, 陈 静, 等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1308-1312.
- 6 Long Risheng, Liu Weijun. Numerical simulation of thermal stress on laser metal deposition shaping[J]. High Technology Letters, 2007, 17(2): 142-147.
- 龙日升, 刘伟军. 激光金属沉积成形过程热应力的数值模拟[J]. 高技术通讯, 2007, 17(2): 142-147.
- 7 Kong Yuan, Liu Weijun, Wang Yuechao, *et al.*. Analysis of process parameters about direct laser metal deposition shaping process of titanium alloys based on logistic regression model[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1103005.
- 孔 源, 刘伟军, 王越超, 等. 基于 Logistic 回归模型的钛合金件激光直接成形工艺参数分析[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1103005.
- 8 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.
- 9 Zhang Kai. Research on Processing Characteristics during Laser Metal Deposition Shaping Technology[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2006. 117-118.
- 张 凯. 激光直接成形金属零件的工艺研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2006. 117-118.
- 10 Metallic Materials—Residual Stress Determination—The Indentation Strain-Gage Method[S]. GB/T 24179-2009.
- 11 Yang Guang, Liu Weijun, Wang Wei, *et al.*. Research on process of titanium alloy laser rapid prototyping [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2010, (6): 50-53.
- 杨 光, 刘伟军, 王 维, 等. 钛合金激光快速成形工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2010, (6): 50-53.

栏目编辑: 韩 峰