

扫描方式对激光直接成形过程中热力耦合场与残余应力分布的影响

孔源^{1,2} 刘伟军¹ 王越超¹ 赵宇辉¹ 来佑彬^{1,2}

(¹ 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 利用有限元中的“单元生死”技术,通过 ANSYS 参数化设计语言(APDL)编程研究了长边扫描、短边扫描以及交错扫描方式对成形过程的热力耦合场以及残余应力分布的影响,并详细分析了各种扫描方式下,所选节点温度和热应力随时间的变化规律及残余应力沿各方向的分布规律。在与模拟过程相同条件下,实际成形实验所得结果与模拟结果吻合较好。

关键词 激光技术;激光金属直接成形;扫描方式;热力耦合场;残余应力

中图分类号 TN129;TF124;TG111.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.051405

Effect of Scanning Methods on Residual Stress Distribution and Thermal-Stress Couple Field During Direct Laser Metal Deposition Shaping

Kong Yuan^{1,2} Liu Weijun¹ Wang Yuechao¹ Zhao Yuhui¹ Lai Youbin^{1,2}

(¹ Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract According to the “element life and death” technique of finite element method, with ANSYS parametric design language (APDL), we simulated the effects of long edge reciprocating scanning method, short edge reciprocating scanning method and direction orthogonal changing in different layers reciprocating scanning method to thermal-stress couple field and residual stress distribution during whole laser metal deposition shaping (LMDS) process. The dynamic regularities of thermal stress, temperature and residual stress distribution under different scanning methods are studied in detail. With the same process parameters, the samples fabricated by LMDS show good agreement with the simulation results.

Key words laser technique; laser metal deposition shaping; scanning methods; thermal-stress couple field; residual stress

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引言

钛合金金属激光直接成形技术实际上就是使用激光熔覆的方法将钛合金金属粉末材料按照二维轮廓信息逐层堆积,最终形成三维实体零件。该技术一经推出,就成为各国研究的热点^[1,2]。激光熔覆的工艺特点是高功率激光束与金属粉末,基板金属交互作用产生熔池,工艺的好坏与熔池内冶金动力学过程密切相关。由于激光金属沉积过程中本身所固有的能量集中输入和快速加热及冷却等特点,金属试样内部不同区域以及试样与基板之间存在巨大且剧烈变化的温度梯度,使得沉积过程中产生很大的热应力,当热应力达到材料极限时,试样将发生断裂。由于熔池的冷却和移动速度很快,并且熔池很小,所以实验测量的方法是非常困难的。随着计算机模拟技术的发展,有限元中的单元生死技术提供了解决这一问题的方法。

2003年,美国激光电子股份有限公司 Labudovic 等^[3]采用 ANSYS 参数化设计语言(APDL)建立了直接激光金属粉末沉积(DLPD)成形过程的三维数值模拟模型。中国科学院沈阳自动化研究所,刘伟军研究组建立了多道多层工件的温度场模型,可掌握块状零件热力耦合场随时间变化的规律^[4,5]。北京有色金属

收稿日期: 2012-01-05; 收到修改稿日期: 2012-01-12; 网络出版日期: 2012-03-22

作者简介: 孔源(1984—),男,博士研究生,主要从事金属成形工艺方面的研究。E-mail: ykong@sia.cn

导师简介: 刘伟军(1969—),男,博士,研究员,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: wyliu@sia.cn

研究总院席明哲等^[6]于2003年利用ANSYS有限元软件中的“生死单元”技术,建立了与激光快速成形过程一致的三维瞬态薄壁零件温度场计算模型。通过该计算模型,可以掌握成形过程中薄壁零件温度场随时间的变化规律。美国的Sandia National Laboratories的Ensz等对不同的沉积方式对残余应力的影响做了很多工作^[7]。西班牙的Taberero等^[8]对不同的扫描方式对残余应力的影响进行了测量与分析。西北工业大学的杨建等^[9]对残余应力的测量做了一定的工作。目前国内外对激光直接成形的研究主要集中在成形过程中、温度、残余应力以及熔池等的数值模拟和实验^[3~8,10~12],关于不同扫描方式对激光沉积成形过程中热力耦合场及各方向的残余应力场分布的影响却少有报道。

本文通过温度场、热应力及残余应力的数学模型,结合有限元分析的生死单元技术,对在不同扫描方式下,对建立的模型进行了数值模拟,得到了所选节点的温度随时间变化,瞬态热应力随时间变化的曲线以及各层各方向的残余应力变化的动态分布规律。同时在与模拟过程相同的条件下进行成形实验,在成形过程中进行了温度测量以及残余应力测量实验,实验结果与模拟结果吻合较好。

2 热力耦合场数值模拟模型的建立

2.1 条件假设

- a) 激光侧面轮廓为高斯分布。
- b) 粉末为标准球形,且进入熔池后瞬间熔化。
- c) 沉积材料与基板材料的热物性参数均为温度的函数。
- d) 材料均为各向同性材料。
- e) 整个过程中,工件表面只有熔化没有气化。

2.2 相变潜热的处理

激光金属沉积成形过程中存在两类相变问题:一类是固态相变,即材料金相组织的转变;另一类是固液相变,即材料的熔化和凝固。材料在发生相变时,会吸收或释放一定的热能,所以在计算焊接温度场时,需考虑相变潜热问题,否则,计算结果会有很大的偏差。本文采用热焓法处理相变潜热:

$$H = \int_{T_0}^T \rho c dT.$$

式中 ρ 为材料密度, c 为材料的比热容, T 为温度。这样,无论比热容怎样变化, H 总是一个光滑函数。

2.3 生死单元

有限元中的单元生死技术并不是在模拟过程中简单地将单元从模型中去除或者添加,这是因为模拟过程中刚度矩阵的稳定性要求模型中被杀死或被激活的单元只能在前处理阶段建模。当要杀死一个单元时,其单元刚度(或热传导)矩阵将被乘以一个很小的因子,此时被杀死单元的质量、比热等特性以及单元载荷均等于0,不参加求解过程,单元的应变也始终等于0,就好像这部分单元不存在一样。同样,当激活一个被杀死单元时,只需要将其温度、质量、单元载荷等恢复到初始数值,就好像这部分单元被逐步添加一样,只是被激活的单元没有应变记录和热量存储。

3 有限元模型的建立

利用有限元方法中的“生死单元”技术,采用APDL建立了金属成形过程的数值模拟。图1为有限元模型的显示图,覆层体积为 $0.02\text{ m} \times 0.01\text{ m} \times 0.004\text{ m}$,网格为 $0.001\text{ m} \times 0.001\text{ m} \times 0.001\text{ m}$ 的正六面体网格,单元类型为Solid5,模型中金属沉积及基板材料均为TC4(Ti-6Al-4V),其部分热物性参数见表1。模型中分别采用了长边往复扫描、短边往复扫描及交错往复扫描三种方式,扫描方式如图2所示,其中交错往复扫描为单数层长边

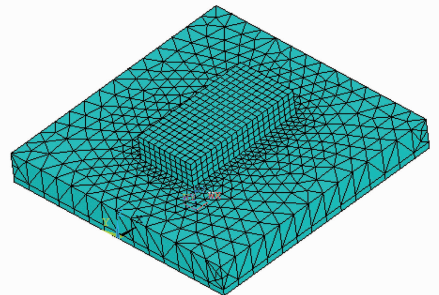


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

扫描,双数层短边扫描。

表 1 TC4 热物性参数

Table 1 Thermal physical parameters of TC4

Temperature $\theta / ^\circ\text{C}$	Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{K} \cdot \text{m})$	Specific heat capacity $c / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	Density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	Modulus of elasticity E / GPa	Coefficient of linear expansion $\alpha_1 / 10^{-5} \text{K}^{-1}$	Poisson's ratio μ
20	17	500	4420	120.0	0.900	0.300
200	15	580	4420	110.0	0.965	0.310
400	15	595	4420	88.0	1.107	0.325
600	16	615	4420	70.0	1.004	0.342
1530	20	760	4420	3.5	1.005	0.380
1650	20.5	840	4420	3.0	1.006	0.384
2000	21	730	4420	0.1	1.008	0.390

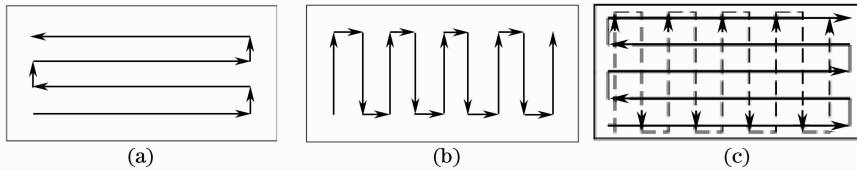


图 2 三种不同的扫描方式。(a)长边扫描;(b)短边扫描;(c)交错扫描

Fig. 2 Three different scanning methods. (a) Long edge reciprocating scanning; (b) short long edge reciprocating scanning; (c) direction orthogonal changing in different layers scanning

4 不同扫描方式对热力耦合场的影响

模型中设定激光功率为 2000 W,光斑半径为 1 mm,扫描速度为 5 mm/s,送粉速率为 3 g/min,扫描间距为 1 mm,环境温度 20 $^\circ\text{C}$,整个过程历时 360 s(加工时间 160 s+冷却时间 200 s)。

4.1 对温度场的影响

图 3 是坐标为(0.010,0.005,0.001),(0.010,0.005,0.002),(0.010,0.005,0.003),(0.010,0.005,0.004)的点分别在不同的扫描方式下的温度变化曲线。

由图 3 可以看出每层所选节点的温度变化规律,以图 3(a)为例,从曲线 1 上可以看出,该点的温度初始为 0,在 18 s 时突然升高。这是由于之前该点所代表的单元未被激活的原因,之后看到节点温度均随时间呈现周期性变化,但是变化的幅度(每一次降温 and 再升温的温度差)逐渐降低,但是整个系统的温度逐渐升高。这是由于激光周期性扫描和热积累效应共同作用的结果,当第 58,98 和 138 s 时,激光分别经过的第二层,第三层和第四层所对应的点的位置,由于粉末的遮挡和能量吸收,所以温度升高的幅度小于而在第 18 s 时激光直接作用时的温度变化幅度,而由于成形过程中,随着成形层数的增加,成形区域被不断地反复加热所

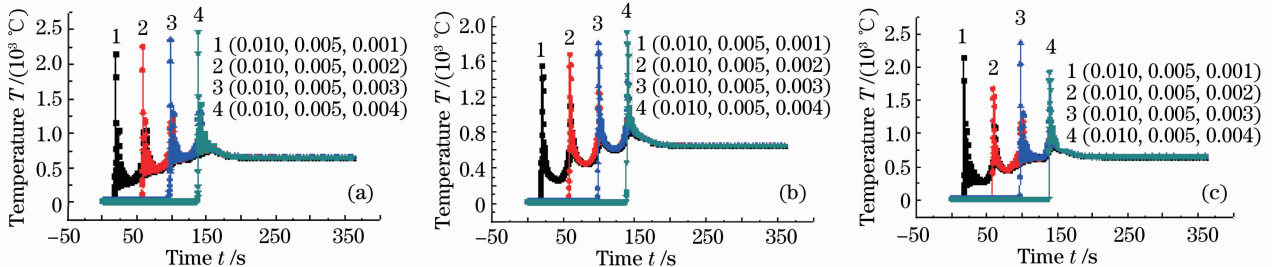


图 3 不同扫描方式下各层节点的温度变化。(a)长边扫描节点;(b)短边扫描节点;(c)交错扫描节点

Fig. 3 Temp-time curves of nodes on different layer under different scanning methods. (a) The nodes under long edge reciprocating scanning; (b) the nodes under short edge reciprocating scanning; (c) the nodes under direction orthogonal changing in different layers scanning

产生的热量不断积累,促使成形过程中的系统的温度逐渐升高。从曲线 2、曲线 3 和曲线 4 上可以看出,第二层、第三层和第四层节点的温度变化和第一层节点的温度变化非常相似,只是分别延迟了 40,80 和 120 s。那是因为之前的时间里,节点没有被激活而已。图 3(b)为短边扫描方式下各层所选节点的温度变化,与图 3(a)类似,每层节点的激活时间与图 3(a)相比均相应地延迟了 1 s,而且可以看出,短边扫描方式下所选节点的温度值均比长边扫描方式下所对应的节点的温度低并且温度的变化幅度也比较小。从图 3(c)看到,第一层和第三层所选节点的温度变化与图 3(a)对应的节点温度变化类似,第二、四层节点与图 3(b)所对应位置的节点温度变化类似,这与扫描方式的设定是吻合的。而且可以看到交错扫描可以降低短边扫描时的节点温度变化幅度。这点对于降低节点温度变化幅度很有意义。因为这样可以有效地降低温度梯度,避免产生较大的瞬态热应力。

4.2 对节点热应力的影响

图 4 是坐标为(0.010,0.005,0.001),(0.010,0.005,0.002),(0.010,0.005,0.003),(0.010,0.005,0.004)的点分别在不同的扫描方式下的瞬时热应力变化曲线。由整个图 4 可以看出各层节点虽然扫描方式不同,但是其瞬时热应力随时间变化的趋势均具有相同的趋势,都是在激光到达该点或者临近点位置时,该点的热应力起变化。这是由于当激光扫描到该点附近时,由于激光能量的集中性,使节点周围的温度梯度陡然发生变化,熔池及附近区域被急剧加热并局部熔化,熔池材料因相变体积变化不均及相变的不等时性从而产生热应力,同时熔池及附近区域的温度分布也极不均匀,它们的受热膨胀受到周围较冷区域的约束也将产生一部分热应力。通过图 4 可以看出使用交错扫描方式可以有效地降低瞬态热应力。降低的幅度最大可以达到其他扫描方式所产生应力的 50%左右。而使用短边扫描和长边扫描的方法所产生的热应力大致相当。图 4(a)中第一层所选节点在短边扫描与长边扫描条件所产生的热应力不同是由于其靠近基板,受到基板热应力的影响。

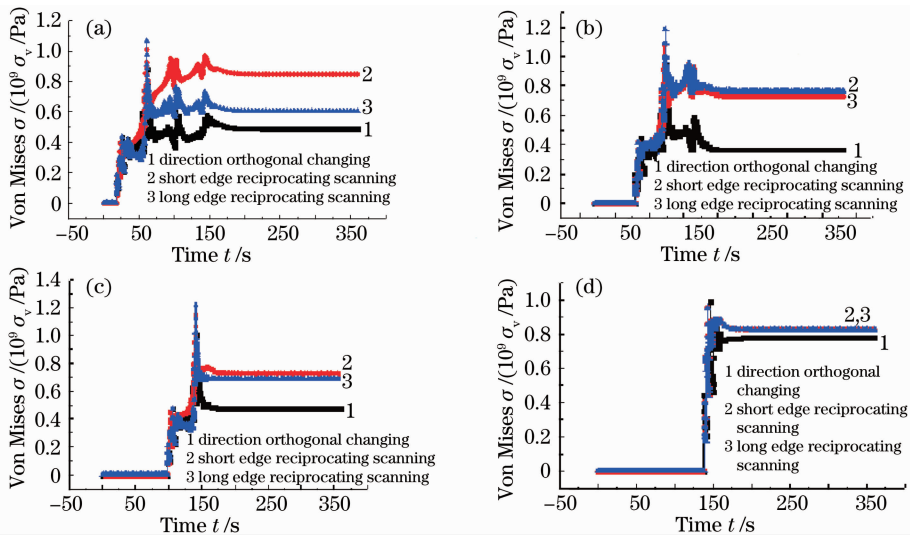


图 4 不同扫描方式下各层节点的热应力变化曲线。(a) 第一层;(b)第二层;(c) 第三层;(d)第四层

Fig. 4 Von Miss's thermal stress curves of nodes on each layers under different scanning methods

(a) The first layer; (b) The second layer; (c) The third layer; (d) The fourth layer

4.3 对残余应力的影响

图 5 表示不同扫描方式下各层在 X 方向上的残余应力分布。可以看出交错扫描方式下各层 X 方向的残余应力较小,并且变化幅度也很小。而短边扫描与长边扫描方式下各层的 X 方向残余应力也逐层接近。在 X 方向的两端残余应力的变化幅度比较大,这是由于激光扫描完成一层后,再回到下一层的起始位置继续扫描,而刚刚完成的那层的起始点位置的温度早已冷却,所以造成了起始点位置的温度梯度起伏很大,并且起始点位置周围的较冷区域也对新层起始点位置的膨胀产生约束,造成应力集中。在每层的结束点位置产生应力急剧变化同样也是这个道理。在样件的各层的中部,交错扫描造成的应力变化幅度非常小,几乎是一条直线,这说明交错扫描可以有效地降低残余应力。而长边扫描形成的残余应力变化比较频繁,这是由于长边扫描在 X 方向温度梯度变化相对来说比其他方向平缓,所以单方向的应力变化幅度很小。而短边扫描

造成的残余应力在中部逐渐集中,这是由于扫描方向与温度梯度分布方向不一致导致的。

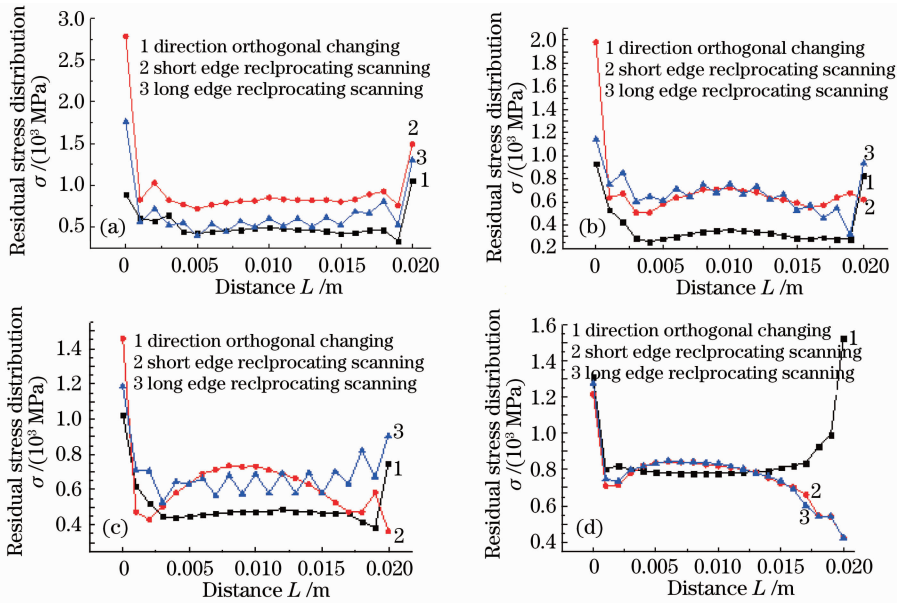


图5 不同扫描方式下残余应力在各层 X 方向上的分布。(a) 第一层;(b) 第二层;(c) 第三层;(d) 第四层

Fig. 5 Residual stress distribution under different scanning methods on X direction of each layer

(a) The first layer; (b) The second layer; (c) The third layer; (d) The fourth layer

图6表示不同扫描方式下各层节点在Y方向上的残余应力分布。与图5的分析一样,同样可以看到,在交错扫描条件下各层的Y方向的残余应力较小,而长边与短边扫描条件下,残余应力变化逐层接近。短边扫描条件下各层所选节点的Y方向热应力变化幅度很小,同样也可以说明短边扫描在Y方向温度梯度变化相对来说比其他方向平缓,所以单方向的应力变化幅度很小。而长边扫描在Y方向的残余应力分布较大,尤其是第二层和第四层,这是由于扫描方向与温度梯度分布方向不一致导致的。

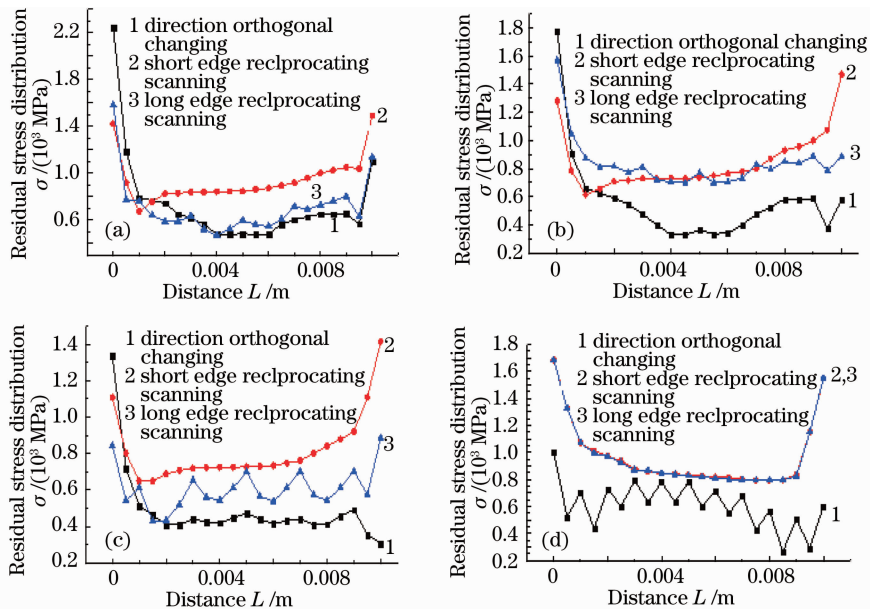


图6 不同扫描方式下残余应力在各层 Y 方向上的分布。(a) 第一层;(b) 第二层;(c) 第三层;(d) 第四层

Fig. 6 Residual stress distribution under different scanning methods on Y direction of each layer

(a) The first layer; (b) The second layer; (c) The third layer; (d) The fourth layer

图7为不同扫描方式下在试件中心处的残余应力随高度的分布。可以看到短边扫描条件下残余应力变化幅度较小,但数值很大;长边扫描变化幅度最大,并且数值也很大;而交错扫描在高度方向变化规律是试件底部与顶部的残余应力较大而中间部分很小。但是数值很小。这正是由于层间不同扫描方式的变换所造成的,这说明,变化层间扫描方式可以有效地降低残余应力。

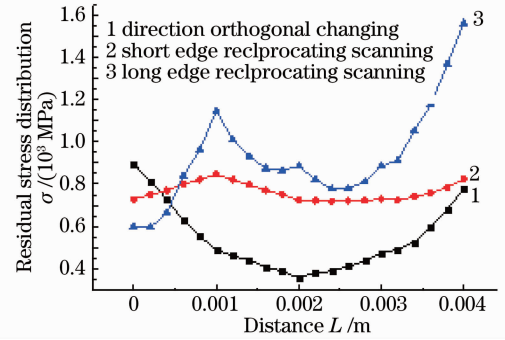


图7 不同扫描方式下在试件中心处的残余应力随高度的分布

Fig. 7 Residual stress distribution at the center of sample under different scanning methods

5 实验验证

5.1 温度测量

为验证温度场数值模拟结果,使用与仿真完全一样的工艺参数(激光功率 2000 W,光斑半径 0.001 m,扫描速度 5 mm/s,送粉速率 3 g/min,扫描间距 1.0 mm,环境温度 20 °C),对成形过程中的温度场进行了检测,验证温度场数值模拟的准确程度,进而揭示激光直接成形加工工艺参数对加工过程中温度场的影响。首先将 TC4 基板研磨,去氧化皮同时增加基板表面光滑程度,之后用丙酮清洗,钛合金粉末在 120 °C 真空环境下烘干。之后向真空腔体内填充氮气,使腔体内含氧量小于 0.05% 体积分数,从而避免氧化。其中温度场检测仪器为高温热像仪和热电偶。使用热电偶进行定点测量,使用红外测温仪进行实时测量。图8为实验所用激光器及其配套设备。采用红外热像仪及热电偶进行温度测量,其中,红外测温仪量程为 400 °C ~ 2500 °C,热电偶的量程为 0 ~ 1800 °C,由于热电偶测量的是基板的温度,而红外测温仪主要测量激光作用下熔池的温度,所以认为两者的量程已经足够。

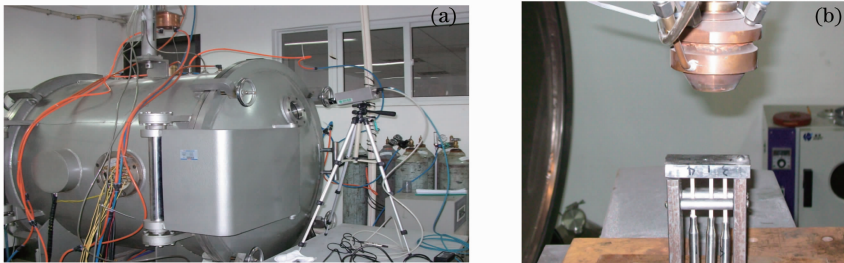


图8 激光器及其配套设备。(a) 激光器等实验设备;(b) 使用热电偶进行定点测量

Fig. 8 Frame of LMDS system. (a) Photo of titanium alloy LMDS; (b) temperature measurement with thermocouple

图9为使用热电偶测量基板上固定点(0.010, 0.005, 0)处温度变化,每隔 5 s 取一次读数,通过热电偶定点测量温度随时间变化曲线(图9)中的曲线1和曲线2相对比,可以看到仿真结果与实验读数基本吻合,误差不大于 10%;可以清楚地看到基板上的点与图3各图中的曲线1是相类似的,只是温度低了一些。这是由于粉末的遮挡及粉末吸收能量熔化等因素共同作用的结果。

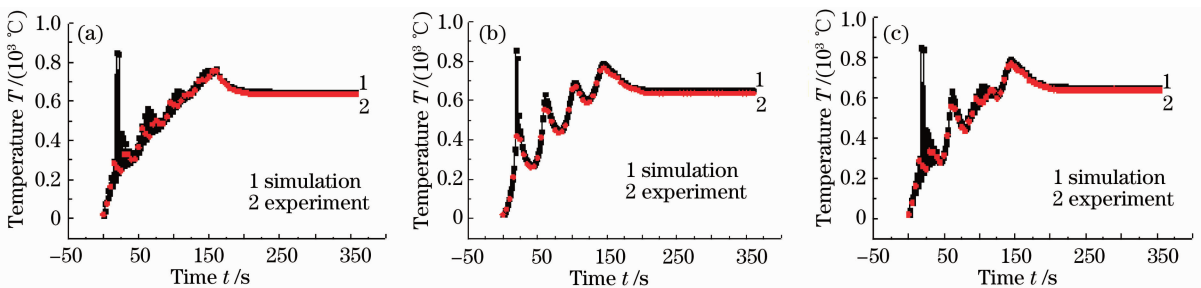


图9 热电偶测量基板上点的温度。(a) 长边扫描方式;(b) 短边扫描方式;(c) 交错扫描方式

Fig. 9 Measuring the temperature of substrate with thermocouple. (a) Long edge reciprocating scanning; (b) short long edge reciprocating scanning; (c) direction orthogonal changing in different layers scanning

图 10 为 $t=138$ s 时红外测温仪所测得的交错扫描方式熔池附近的温度,虽然更换了更利于红外短波通过的观测窗有机玻璃材料,但是在一定程度上还是存在一定的测量误差,所以温度略微偏低。测量所得结果与温度场分析结果误差不超过 16%。这说明仿真方法是可取的,可以验证温度场与瞬态热应力场的正确性。

5.2 激光直接成形样件残余应力的测量

5.2.1 实验原理

为了验证所叙述的残余应力结果,利用盲孔法^[8],对冷却后的样件顶层表面进行了残余应力测试实验。盲孔法的基本思想是:在存在应力场的工件中钻一个小孔,小孔周围的局部应力平衡收到破坏,则孔周围的应力将重新调整,测得孔周附近的应力变化,就可以用弹性力学原理来推算小孔处的应力。

5.2.2 实验步骤

1) 将应变片粘贴在试样表面上,为了保证应变片与试样表面紧密结合,粘贴前对试样表面进行去毛刺、金相砂纸打磨等处理。

2) 按与水平方向呈 $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ 的角度粘贴应变片或应变花,小孔中心距应变片敏感栅中心取 3 mm,以减少孔边塑性应变影响如图 11 所示。

3) 小孔直径取 2 mm,沿成形时间长度钻孔,孔间距均为 10 mm,消除孔与孔之间的影响。

4) 为避免钻削热的影响,采用平均值法求得释放应变,在钻孔后 40 min(或更长)内每 5 min 读一次应变值,再求平均值。

5.2.3 实验结果及讨论

图 12 表示随长度变化的 σ_x, σ_y 的残余应力分布图,可以看出长边扫描与短边扫描方式下[如图 12(b)、(c)所示],顶层残余应力分布沿长度分布基本类似, σ_y 变化幅度不大,都是由 0 逐渐增大到中心点处,表现为拉伸应力,再逐渐减小为 0,由拉伸应力变为收缩应力后再增大。 σ_x 规律类似,只是变化的幅度大一些。在图 12(a)中, σ_x 基本表现为收缩应力,在中点处最小,之后再逐渐增大。 σ_y 与此相反,基本表现为拉伸应力,在中点处最小。由此可以看出:交错扫描条件下,沿长度方向,残余应力最小,这与图 5(d)结论相吻合。

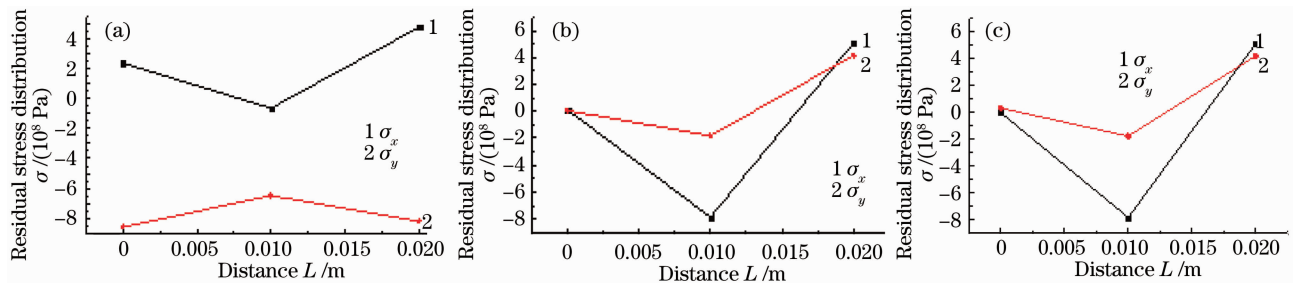


图 12 不同扫描方式下试件表面 X 方向残余应力分布。(a) 交错扫描;(b) 长边扫描;(c) 短边扫描

Fig. 12 Residual stress distribution under different scanning methods on X direction of surface of samples. (a) Direction orthogonal changing in different layers scanning; (b) long edge reciprocating scanning; (c) short long edge reciprocating scanning

图 13 表示随宽度变化的 σ_x, σ_y 的分布图,可以看出长边扫描与短边扫描方式下[如图 13(b)、(c)所示]顶层残余应力沿宽度分布基本类似, σ_x 开始表现为收缩应力,逐渐减小为 0 后变为拉伸应力,再逐渐增大,

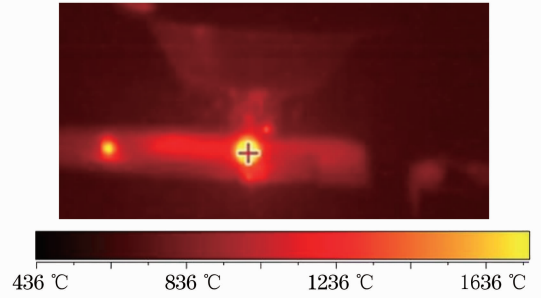


图 10 $t=138$ s 时红外测温仪所测得的交错扫描方式熔池附近的温度

Fig. 10 Real-time measuring temperature results of region that approach the molten pool at $t=138$ s

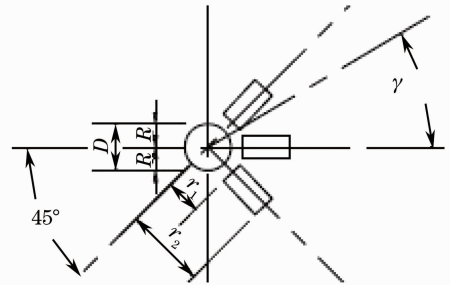


图 11 应变片位置示意图

Fig. 11 Sketch of strain gauge position

在中点处为最大值,之后再逐渐减小到0后变为收缩应力,逐渐增大。 σ_y 基本表现为拉伸应力,在中点处最小。在图13(a)中, σ_x 开始表现为拉伸应力,随宽度变化,逐渐减小为0,转变为收缩应力后逐渐增大, σ_y 最开始为0,随宽度变化逐渐增大,在中点处最大,然后逐渐减小为0,由拉伸应力转变为收缩应力,逐渐增大。由此可以看出:沿交错扫描条件下,沿宽度方向,残余应力最小,这与图6(d)结论相吻合。

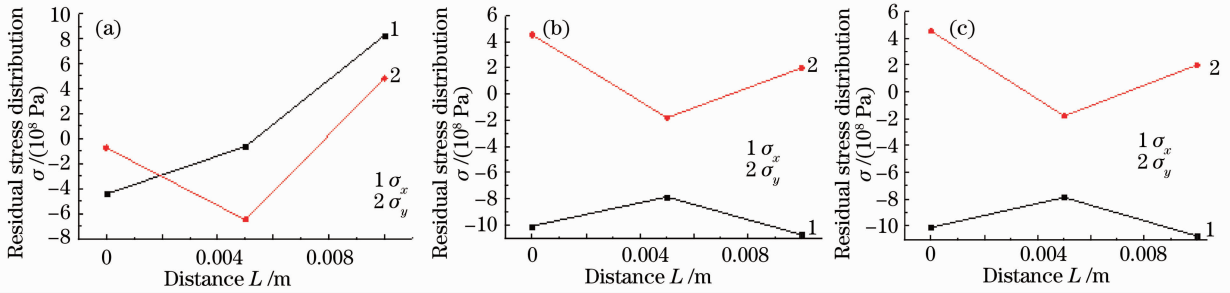


图13 不同扫描方式下试件表面Y方向残余应力分布。(a)交错扫描;(b)长边扫描;(c)短边扫描

Fig. 13 Residual stress distribution under different scanning methods on Y direction of surface of sample. (a) Direction orthogonal changing in different layers scanning; (b) long edge reciprocating scanning; (c) short long edge reciprocating scanning

6 结 论

1) 沿短边平行往复扫描时试样的温度最低;交错扫描可以降低沿长边扫描时的温度;交错扫描可以降低沿短边扫描时的节点温度变化幅度。

2) 采用交错扫描时各应力值的幅值比采用单一沿长边或短边平行扫描时要小,这说明采用交错扫描可以降低沉积成形过程中的热应力。

3) 采用交错扫描时各残余应力值的数值与幅值均比采用单一沿长边或短边平行扫描时要小,这说明采用交错扫描可以降低样件的残余应力。

4) 实验结果表明,交错扫描可以有效地降低温度变化幅度,降低成形过程中的瞬态热应力,降低残余应力,有助于提高成形质量。这为激光金属直接成形过程扫描方式的选择和工艺参数优化提供了重要依据。

参 考 文 献

- Zuo Tiechuan, Chen Hong. Green manufacture in 21 century ——laser manufacturing technology and application[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2009, **45**(10): 106~110
左铁钊, 陈虹. 21世纪的绿色制造——激光制造技术及应用[J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(10): 106~110
- Yao Shan, Zeng Feng, Ye Changke *et al.*. New laser rapid prototyping method and it's applications[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **43**(5): 230~234
姚山, 曾峰, 叶昌科等. 新的激光快速成形方法及应用[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(5): 230~234
- M. Labudovic, D. Hu, R. Kovacevic. A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping[J]. *J. Materials Science*, 2003, **38**(1): 35~49
- Long Risheng, Liu Weijun, Shang Xiaofeng. Numerical simulation of temperature field on lasermetal deposition shaping[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(4): 394~396
龙日升, 刘伟军, 尚晓峰. 激光金属沉积成形过程中温度场的数值模拟[J]. *激光技术*, 2007, **31**(4): 394~396
- Long Risheng Liu Weijun, Bian Hongyou *et al.*. Effects of scanning methods on thermal stress during laser meter deposition shaping[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **43**(11): 74~80
龙日升, 刘伟军, 卞宏友等. 扫描方式对激光金属沉积成形过程热应力的影响[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(11): 74~80
- Xi Mingzhe, Yu Gang. Numerical simulation for the transient temperature field of 3D moving laser molten pool[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1527~1532
席明哲, 虞钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1527~1532
- Wang Xin, Xiao Ping. Characterisation of ceramic coatings sintering using residual stress measurements[J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2004, **24**(2): 283~288

- 8 I. Tabernero, A. Lamikiz, S. Matinez *et al.*. Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding[J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2011, **51**(6): 465~470
- 9 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
- 10 J. Mazumder. Overview of melt dynamics in laser processing[J]. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(8): 1208
- 11 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Numerical simulation for temperature/strees field of TC4 titanium alloy hollow blade during laser rapid forming process[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
- 12 Zeng Dawen, Xie Changsheng. Numerical simulation for the process of 3D transient convection and heat transfer in the molten pool[J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(2): 102~105
曾大文, 谢长生. 激光熔池三维非稳态对流传热过程的数值模拟[J]. *激光技术*, 2002, **26**(2): 102~105