

文章编号: 1001-3806(2007)04-0394-03

## 激光金属沉积成形过程中温度场的数值模拟

龙日升<sup>1,2</sup>, 刘伟军<sup>1\*</sup>, 尚晓峰<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 沈阳航空工业学院, 沈阳 110004)

**摘要:** 为了降低成形过程的热应力, 根据有限元方法中的“单元生死”技术, 利用 APDL 语言编程实现了对多道多层激光金属沉积成形过程三维温度场的数值模拟, 再现了成形过程中温度场的动态变化, 得到了成形过程中模型温度场及温度梯度的分布规律。结果表明, 试样同一纵断面上各节点虽然被激活的时间不一样, 但它们具有相似的温度变化规律; 试样内的温度梯度主要沿 z 轴方向分布, 基板内的温度梯度主要沿平行基板方向分布, 具有明显的分层现象, 熔池区的温度梯度非常大。在相同的工艺参数下, 实际成形试样的扫描电镜照片与模拟结果吻合很好。

**关键词:** 激光技术; 激光金属沉积成形; 瞬态温度场; 数值模拟

**中图分类号:** TG665 TF124 **文献标识码:** A

## Numerical simulation of temperature field on laser metal deposition shaping

LONG Ri-sheng<sup>1,2</sup>, LIU Wei-jun<sup>1</sup>, SHANG Xiao-feng<sup>3</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110004, China)

**Abstract** In order to decrease the thermal stress during process based on the “element life and death” technique of finite element method (FEM), detailed numerical simulation of 3-D multi-track and multi-layer temperature field during laser metal deposition Shaping (LMDS) process was conducted with ANSYS parametric design language (APDL). Through those simulation, the dynamic variation of temperature in model reappeared, and the distribution rule of temperature and temperature gradient was obtained. The calculated results show that although the nodes on longitudinal section have different activated time, they have similar temperature variation history, the temperature gradients in sample are mainly along z direction, and the temperature gradients in substrate are mainly parallel to substrate. Under the same conditions, the SEM photos of samples tallies closely with the simulation results.

**Key words** laser technique; laser metal deposition shaping; transient temperature field; numerical simulation

### 引 言

激光直接金属成形技术是在同轴或侧向送粉条件下, 利用高能激光束局部熔化金属表面形成熔池, 然后由惰性气体将合金粉末送入熔池, 随着激光的连续移动从而实现高性能复杂结构、致密金属零件直接成形的一种新技术。但是, 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, 它一方面使得试样的微观组织呈现很强的方向选择性, 影响试样的机械性能; 另一方面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。

目前, 国内外学者对激光金属沉积成形过程温度场的研究多集中在对熔池温度场及其流动传热等方面<sup>[1-8]</sup>, 对于多道多层金属沉积成形过程瞬态温度场的研究尚未见报道。这是因为激光金属沉积成形过程是一个材料逐道逐层添加的复杂冶金过程, 在数学建模上难以实现, 采用实验手段来获得成形过程中瞬态温度场的动态分布也是十分困难的。随着计算机技术和有限元理论的发展, 有限元中的“单元生死”技术提供了解决这一问题的方法。

### 1 “单元生死”技术

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

作者简介: 龙日升(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究激光快速成型、CAD/CAM、工业自动化过程控制等。

\* 通讯联系人。E-mail: wjl@sia.cn

收稿日期: 2006-05-16 收到修改稿日期: 2006-06-28

Q 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,只需要将其刚度,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。

## 2 有限元模型的建立

根据经典热传导方程,假设:(1)激光光斑内部能量密度均匀分布;(2)金属沉积材料和基板为理想各向同性材料;(3)基板下边界与耐火砖接触,视为绝热。利用有限元分析中的“单元生死”技术,通过 APDL 编程建立了金属成形过程的有限元计算模型,如图 1a 所示。

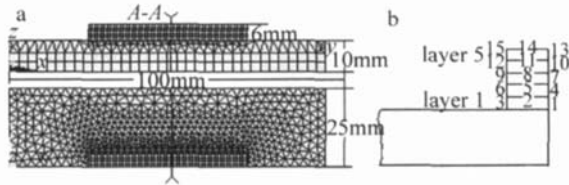


Fig 1 The simulation model of transient temperature field in IMDS a— side and top view of FEA model b— locations of the nodes on the longitudinal section

Table 1 Partial thermal physical parameters of N 60A and technological parameters list in simulation

parameter name	value
enthalpy/J	464
latent heat/(J·kg <sup>-1</sup> )	248000
density/(kg·m <sup>-3</sup> )	8522
melting point/°C	950~1000

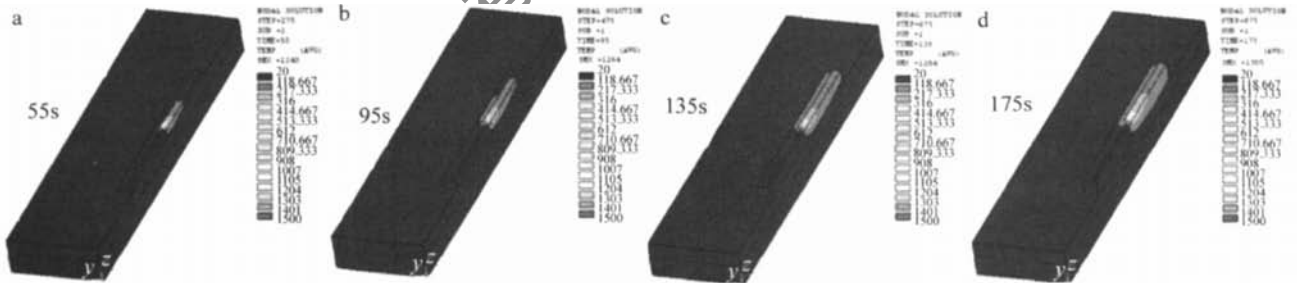


Fig 3 The temperature field contour of different time during cladding process

时刻,此时正在沉积试样第 3 层第 2 道;图 3c 为第 135s 时刻,此时正在沉积试样第 4 层第 2 道;图 3d 为第 175s 时刻,此时正在沉积试样第 5 层第 2 道。

通过对比可以发现,模型中温度场的分布随着激光束的移动而呈现运动状态,沉积过程中受激光能量影响的区域也在逐渐扩大。这是因为沉积过程中随着沉积层数的增加,试样已成形区域被反复加热,其热量累积效应使得试样新沉积层的冷却速率逐渐降低,从而使得沉积过程中的温度逐渐升高,受激光能量影响的区域也逐渐扩大。同时,模型中的高温区域很小,只局限在熔池区域,这是因为激光能量的高度集中所致。

模型中金属沉积材料为 N 60A,其部分热物性参数见表 1,基板材料为 45# 钢,其热物性参数来源于文献 [9]。考虑到模型 y 方向轴对称,为了节省计算时间,其 y 方向尺寸只为实际模型的一半,如图 1 所示。同时,为了避免网格过密带来的巨大计算量,在金属试样处采用较细的规则映射网格,基板及基板与试样过渡处分别采用较粗的六面体网格和四面体网格。图 1b 为有限元计算模型中 A-A 纵剖面上各节点的位置示意图。

模型中还采用了沿长边平行往复扫描的方式,如图 2 所示。图 2a 为模拟过程中激光束在 x-y 平面内沿 x 方向往复扫描运动轨迹示意图。当激光束沿扫描轨迹沉积完一层以后,它首先由扫描轨迹的终点平移到轨迹的起点,并沿 z 方向上升一个层高,然后重新开始沉积下一层,如图 2b 所示。

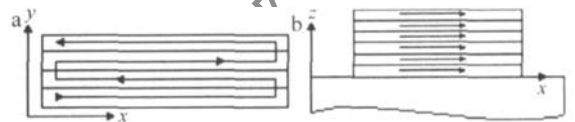


Fig 2 The schematic diagram of x direction parallel scanning paths a— in xy plane b— in xz plane

## 3 温度场计算结果及分析

模型中设定激光功率 600W,光斑直径 1mm,扫描速度 5mm/s,送粉速率 4g/min,扫描间距 1.0mm,环境温度 20°C,整个模拟过程历时 240s。图 3 为模型在不同时刻的瞬态温度场分布云图,其中图 3a 为第 55s 时刻,此时正在沉积试样第 2 层第 2 道;图 3b 为第 95s

图 4a 为纵断面 A-A 上第 1 层节点的温度随时间变化曲线,图 4b 为纵断面 A-A 上第 3 层节点的温度随时间变化曲线。如图 4a 所示,节点 1 在前 5s 内温度都保持在 20°C。这是因为前 5s 内节点 1 处于“被杀死”的状态,没有温度变化记录。但是在第 5s 时刻,节点 1 所在单元被激活,节点 1 的温度迅速升高。同样,节点 2 和节点 3 分别在前 15s 和前 35s 内处于“被杀死”的状态,温度始终保持在 20°C。但是节点 2 所在单元在第 15s 时刻被激活,节点 2 的温度迅速升高,此时节点 1 距离节点 2 很近,在临近区域的加热作用下它也经历一次快速的升温 and 降温过程。节点 3 所在

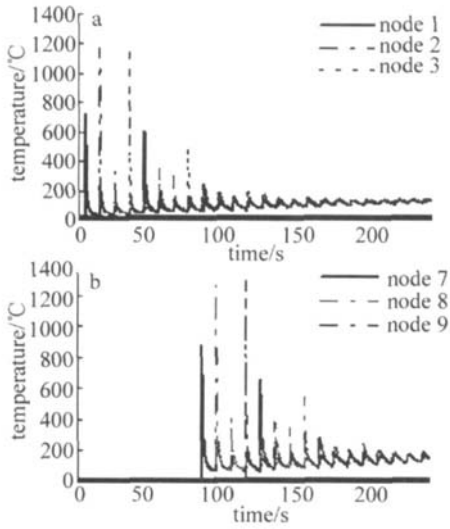


Fig 4 The temperature variation histories of the nodes in different layers on longitudinal section  
a—the first layer b—the third layer

单元在第 35s时刻被激活,节点 3 的温度迅速由室温迅速升高,此时节点 2 距离节点 3 很近,节点 2 也同样经历了一次升温 and 降温的过程。

在后续模拟过程中,节点 1, 2, 3 反复地快速升温 and 降温,其温度变化规律逐渐趋于一致。这是因为每当激光热源经过它们所在单元上方时,它们都被由熔池及附近区域传导过来的热量所加热升温,而后再迅速冷却降温。这种升温 and 降温的过程就像对节点 1, 2, 3 所在单元进行退火一样,有助于金属试样组织的均匀化,但这种温度变化的幅度随着试样成形厚度的增加变得愈来愈小。第 3 层节点具有和第 1 层节点相似的升温 and 降温过程以及一样的变化周期,只是被激活的时间比较晚,就像第 1 层节点的温度变化被延迟了 80s 一样,如图 4b 所示。

图 5 为不同时刻下模型的温度梯度矢量图。如图所示,激光金属沉积成形过程中温度梯度的分布具有

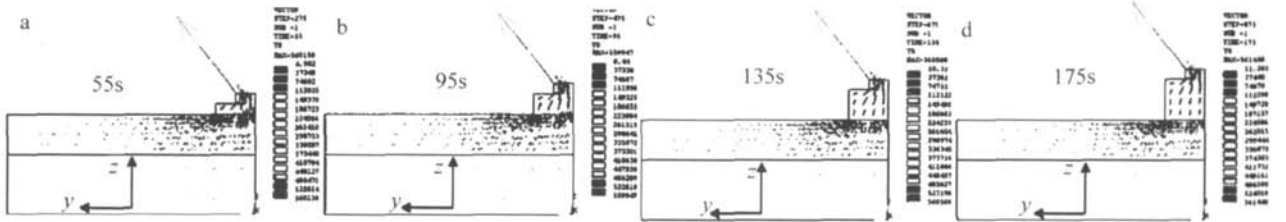


Fig 5 The temperature gradient vector diagram of different time

以下几个特点: (1)温度梯度在试样内分布不均匀,在受激光能量影响的区域,温度梯度强而集中,在远离激光能量影响的区域,温度梯度小而分散,熔池及其附近区域的温度梯度非常大; (2)温度梯度在试样内基本沿 z 方向即垂直基板方向分布,其它方向较小; (3)温度梯度在基板内分布不均匀,在接近试样区域温度梯度比较集中,远离试样区域以及基板底部温度梯度比较弱而且分散; (4)温度梯度在基板内主要沿平行基板方向分布,具有明显的分层现象。

### 4 金属成形试样及金相图

在与模拟过程相同的条件下,利用中国科学院沈阳自动化研究所自行研制激光金属沉积成形设备制备的金属试样如图 6a 图 6b 所示。图 6c 图 6d 为图 6b 箭头处的扫描电镜照片。如图 6c 所示,在单一沉积层的顶部,试样的微观组织呈等轴晶(图中 A 区域)和枝晶(图中 B 区域)两种组织形态,等轴晶形成于熔池的中央区域,而枝晶形成于熔池边缘区域和底部;在单一沉积层的中部,试样的微观组织主要由枝晶组成,如图 6d 所示。这是因为熔池中央吸收了较多热量,使得绝大多数颗粒均熔化为液态,在此区域内表现为均质形核,凝固后表现为等轴晶组织。而熔池边缘和底部的

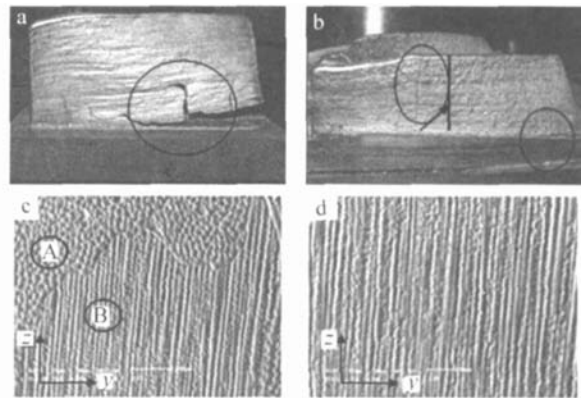


Fig 6 SEM micrograph of the longitudinal section of metal parts in z direction ( in the same deposition layer)  
a b—metal sample fabricated by LMDS c—at the top of cladding layer d—at the middle of cladding layer

颗粒在激光束加热下处于部分熔化状态,在沿 z 轴方向极高的温度梯度和冷却速度作用下,晶粒的生长具有强烈的方向选择性,从而形成基本沿 z 轴方向生长的枝晶组织。这与之前的温度梯度分布规律非常吻合。

### 5 结论

通过编程实现了对多道多层金属材料沉积成形过程中三维瞬态温度场的数值模拟,再现了试样和基板

(下转第 430 页)

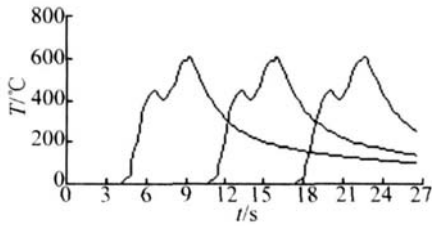


Fig 7 The temperature of three points on themoving path changeswith time 随时间的变化图, 扫描速度  $v = 4\text{mm/s}$ , 激光功率  $P_0 = 100\text{W}$ , 光束半径  $r = 3\text{mm}$ , 石英玻璃的物理参数见表 1。

## 5 结论

用  $\text{TEM}_{00}$  激光加热石英玻璃时, 温度的分布范围较小, 主要集中在光斑的中心, 温度变化比较迅速, 产生较大的温度梯度和较大的热应力, 这样可以利用  $\text{TEM}_{00}$  对玻璃进行预热后的加工;  $\text{TEM}_{11}$  激光加热石英玻璃时, 温度和应力分布范围比较大, 在光斑中心的四周, 而且变化趋势比较平缓, 适合于对石英玻璃进行加工前的预热。有了这个结论, 就可以根据需要选择合适的激光模式进行石英玻璃板的预热和加工, 为玻璃的加工提供理论上的依据。

(上接第 396 页)

在成形过程中温度场的动态变化, 分析了成形过程中试样和基板温度场及温度梯度的分布规律, 对于优化工艺参数和改善试样成形质量具有重大意义。结果表明, 模型同一纵断面上各节点虽然被激活的时间不一样, 但它们具有相似的温度变化规律; 试样内的温度梯度主要沿  $z$  轴方向分布, 基板内的温度梯度主要沿平行基板方向分布, 具有明显的分层现象, 熔池区的温度梯度非常大。成形试样的微观组织在单一沉积层中部近似沿  $z$  方向分布, 与模拟得到的温度梯度分布规律非常吻合。

## 参考文献

[1] ZENG D W, XIE Ch Sh. A numerical simulation for three dimensional quasi state fluid flow field and temperature field in molten pool for composite coating system [J]. Laser Technology, 2000, 24(6): 370~374 (in Chinese).

[2] ZHANG J Y, GAO L X, CUI L L *et al*. Analysis of the temperature field induced by laser strengthening [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 56~59 (in Chinese).

## 参考文献

- [1] CHUI G K, DEARBORN F M C. Laser cutting of hot glass [J]. Ceramic Bulletin, 1975, 54(5): 514~518.
- [2] WANG Y, YUAN Zh J, HU G Y. Laser heating on ceramics surface [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(3): 71~73 (in Chinese).
- [3] JIN H M. Measure and calculate the temperature of glass heated by  $\text{CO}_2$  laser [J]. Translations of Overseas Building Materials, 1997(1): 43~48.
- [4] HAI Y H. Temperature distribution in rock under action of laser [J]. Journal of Xian University of Science and Technology, 1997, 17(4): 372~374 (in Chinese).
- [5] ZHANG J Y, GAO L X, CUI L L *et al*. Analysis of the temperature field induced by laser strengthening [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 56~58 (in Chinese).
- [6] LI J Ch. Laser's diffractive and thermal effect calculation [M]. Beijing Science Press, 2002, 220~222 (in Chinese).
- [7] ZHENG Q G. Laser advanced manufacture [M]. Wuhan Huazhong University of Science and Technology Press, 2002, 34~40 (in Chinese).
- [8] LI W T, HUANG B H, BI Zh B. Analysis and application of thermal stress [M]. Beijing, China Electric Power Press, 2004, 79~82 (in Chinese).
- [9] FEI T M, D. RUBENCHIK A M. Mechanisms of  $\text{CO}_2$  laser mitigation of laser damage growth in fused silica [J]. SPIE, 2003, 4932: 91~102.
- [3] WANG X F, LÜ X D, CHEN G N *et al*. Simulation and verification of the temperature field in laser hardening [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 162~165 (in Chinese).
- [4] YE X H, CHENG X. Simulation of the fluid flow and heat transfer in laser heating melt pool using a region dividing method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 16(3): 264~267 (in Chinese).
- [5] XIM Zh YU G. Numerical simulation for the transient temperature field of 3-D moving laser molten pool [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(12): 1527~1532 (in Chinese).
- [6] XIM Zh, ZHANG Y Zh, SHIL K *et al*. Numerical simulation of 3-D transient temperature field in thin wall metal parts fabricated by laser direct deposition [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 887~892 (in Chinese).
- [7] YANG J. Research on mechanical behavior of laser rapid forming metal part [D]. Xi'an Northwestem Polytechnical University, 2004, 35~69 (in Chinese).
- [8] ZHU X K, CHAO Y J. Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146~263~272.
- [9] Chinese Iron/Steel Research Institute. Complex alloy steel manual lower volume (first volume) [M]. Beijing Metallurgical Industry Press, 1992, 3~45 (in Chinese).