

文章编号: 0258-7025(2007)09-1308-05

# 空心叶片激光快速成形过程的 温度/应力场数值模拟

贾文鹏<sup>1,2</sup>, 林鑫<sup>1</sup>, 陈静<sup>1</sup>, 杨海鸥<sup>1</sup>, 钟诚文<sup>2</sup>, 黄卫东<sup>1</sup>

(西北工业大学<sup>1</sup>凝固技术国家重点实验室,<sup>2</sup>高性能计算研究与发展中心, 陕西 西安 710072)

**摘要** 针对航空发动机空心涡轮叶片激光快速成形(LRF),建立了温度场/应力场瞬态模型,采用有限单元生死技术模拟了熔覆层的沉积生长过程。采用随动强化及米塞斯屈服准则进行了热弹塑性分析,通过间接耦合模拟了TC4钛合金空心叶片激光快速成形的温度场/应力场演变过程。结果分析表明,在TC4钛合金空心叶片激光快速成形过程中,随着熔池的移动和成形高度的增加,温度场和应力场动态演化,其中由于基座的冷却及约束作用和熔池加热及应力释放作用,激光快速成形空心叶片温度和应力/应变场沿高度( $z$ 轴)方向呈梯度分布。温度场上高下低,散热方向从上至下,从熔池到基座;应力场下高上低,叶根等效应力最大。空心叶片激光快速成形结束冷却到室温,残余应力与熔覆过程应力分布规律基本相同,只是叶片顶部等效应力有所提高。

**关键词** 激光技术;激光快速成形;空心叶片;温度/应力场

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

## Temperature/Stress Field Numerical Simulation of Hollow Blade Produced by Laser Rapid Forming

JIA Wen-peng<sup>1,2</sup>, LIN Xin<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>1</sup>,

YANG Hai-ou<sup>1</sup>, ZHONG Cheng-wen<sup>2</sup>, HUANG Wei-dong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Solidification Processing, <sup>2</sup>Center for High Performance Computing, )  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

**Abstract** A transient temperature/stress field finite-element model for the laser rapid forming (LRF) process of a hollow blade of aeroengine is developed. The deposition process is simulated with the finite element birth and death technology, the thermo-plastics is analyzed by bilinear isotropic hardening and Von Mises yield criteria, and the indirectly coupled temperature/stress field evolution during the LRF process of a TC4 alloy hollow blade is simulated. The results show that during the LRF process of a TC4 alloy hollow blade, the temperature/stress field in the TC4 alloy hollow blade is dynamically developed with the movement of melting pool and increase of forming height. For the reason of cooling/constrain effect of the substrate and heating/stress-release effect of the melting pool, the temperature/stress field gradient distributes along the altitude direction. The temperature declines from the top to the bottom, and the heat dispersing direction was from the top to the bottom i. e. , from the melting pool to the substrate. The stress field increases from the top to the bottom, and reaches a maximum at the bottom of the blade. When the blade was cooled to room temperature, the residual stress distribution is similar to that in the cladding process, expect for a larger stress at the top of the blade.

**Key words** laser technique; laser rapid forming; hollow blade; temperature/stress field

收稿日期:2007-01-31;收到修改稿日期:2007-03-26

基金项目:国家自然科学基金(50331010,50201012和50405038)资助项目。

作者简介:贾文鹏(1969—),男,陕西人,博士研究生,主要从事激光快速成形及数值模拟的研究。

E-mail: lasergyro@gmail. com

导师简介:黄卫东(1956—),男,博士生导师,主要从事凝固原理、计算材料学和液态/半固态成形、高能束流加工及成形等方面的研究。E-mail: huang@nwpu. edu. cn

## 1 引言

激光快速成形(LRF)技术是在快速原型技术和大功率激光熔覆技术的基础上迅速发展起来的一项新的先进制造技术。由于借鉴了快速原型技术“离散+堆积”的增材制造思想,同时将仅在零件表面和局部区域获得的激光熔凝组织通过多层熔覆扩展到整个三维实体零件,从而能够实现具有高性能复杂结构致密金属零件的快速、无模具、近净成形。这项技术尤其适用于大型复杂结构零件的整体制造,在航空航天等高技术领域具有广阔的发展前景<sup>[1]</sup>。新一代先进高推重比航空发动机要求空心涡轮叶片在保证材料组织性能的前提下具有复杂形面及精细的气膜冷却内部通道,以满足叶片在极端苛刻环境下长时间稳定可靠工作的要求<sup>[2]</sup>。激光快速成形技术给高推比发动机航空空心叶片的成形提供了一个简单、快速、低成本的从粉末到整件的柔性制造技术。美国 Sandia 国家实验室(Sandia National Laboratories)<sup>[3]</sup>进行了激光快速成形空心叶片研究工作。国内西北工业大学凝固技术国家重点实验室也开展了空心叶片激光快速成形及相关技术研究。

激光快速成形过程中成形件内部温度场和应力应变场变化对激光快速成形过程具有非常重要的影响。在熔化凝固及连续冷却过程中,温度场直接影响材料凝固组织形态及固态相变组织结构,从而最终决定组织形态以及各种缺陷分布。应力应变场的发展演化会造成零件的变形和残余应力分布,影响成形精度以及成形后的机械性能。黄卫东等<sup>[4]</sup>和黄延禄等<sup>[5]</sup>采用有限差分结合流体体积法(VOF)研究了激光快速成形过程熔覆熔池流场/温度场演化过程,Ehsan Toyserkani 等<sup>[6]</sup>和 W. Hofmeister 等<sup>[7]</sup>以及席明哲等<sup>[8]</sup>采用有限元结合单元生死技术研究了激光快速成形过程温度场的演变和熔覆层的生长。根据温度梯度信息,席明哲等还分别分析了激光快速成形组织柱状晶外延生长的特征。K. Dai 等<sup>[9]</sup>和 A. H. Nickel 等<sup>[10]</sup>采用热弹塑性理论及有限元法对多道粉末激光选择烧结(laser selected sintering)过程进行了模拟,分析了激光快速成形工艺和路径对应力及变形的影响。

本文针对航空空心叶片激光快速成形过程,通过对成形过程的温度场/应力场演变模拟,揭示了空心叶片激光快速成形过程温度、形变及残余应力的分布规律,为复杂精细空心叶片激光快速成形及工艺优化实践提供了理论支持。

## 2 基本假设

由于激光熔池是一个极快速的熔化、凝固过程,而且熔池的尺寸相对于整个成形件一般很小,当进入准稳态后熔池大小及温度场基本保持恒定,所以为了简化计算,采用以下假设:

- 1) 激光快速成形开始后立刻进入准稳态,准稳态熔池大小及温度场保持恒定;
- 2) 激光快速成形熔覆层生长速度与激光扫描速度相等;
- 3) 与温度有关的力学性能、应力应变在微小的时间增量内线性变化;
- 4) 材料初始应力为零,服从双线性强化准则;
- 5) 材料服从米赛斯(Von Mises)屈服准则。

## 3 数学模型

### 3.1 粉末对激光的遮蔽

激光能量分布满足高斯分布

$$I_0(x, y) = \left( \frac{2AP}{\pi r_b^2} \right) \exp \left[ -\frac{2(x^2 + y^2)}{r_b^2} \right], \quad (1)$$

式中  $P$  为激光功率,  $A$  为材料对激光的吸收系数,  $r_b$  为最大峰值功率密度的光斑半径。当激光在熔池上方与气/粉两相流交互作用时,由于粉流对激光的衰减,激光能量在熔池表面分布可表示为

$$I(x, y) = I_0(x, y)[1 - \alpha n(x, y)], \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为衰减系数,  $n(x, y)$  为粉流截面粉末颗粒分布函数。

### 3.2 熔池温度分布

成形件导热控制方程为

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (UH) - \nabla \cdot (K \nabla T) = Q, \quad (3)$$

式中  $H = \int \rho c(T) dT$  为焓,  $U$  为工件移动速度,  $Q$  为单位体积热生成率,  $K$  为导热系数。

边界条件为

$$-K(\nabla T \cdot n)|_{\Omega} = \begin{cases} I(x, y, t) & \Omega \in \Gamma \\ -h_c(T - T_a) & \Omega \notin \Gamma \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $n$  为表面法线方向,  $\Gamma$  为激光加热区域,  $\Omega$  为成形件表面,  $h_c$  为表面换热系数,  $T_a$  为环境温度。

### 3.3 应力应变场

在成形区域中力平衡方程为

$$\sigma_{ij} = 0, \quad (5)$$

式中  $\sigma_{ij}$  为应力分量,已包括热应力项。

热应变可描述为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^T = \alpha_{ij} (T - T_0) \delta_{ij}, \quad (6)$$

式中  $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^T$  为热应变张量,  $\alpha_{ij}$  为热膨胀系数,  $T_0$  为参考温度,  $\delta_{ij}$  为  $\delta$  算子。

应力应变间的本构方程为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p - d\varepsilon_{kl}^c - d\varepsilon_{kl}^T), \quad (7)$$

式中  $D_{ijkl}$  为弹性本构张量系数,  $d\varepsilon_{kl}$ ,  $d\varepsilon_{kl}^p$ ,  $d\varepsilon_{kl}^c$ ,  $d\varepsilon_{kl}^T$  分别为总应变、塑性应变、蠕变应变和热应变的微分表达式。

## 4 计算方法

采用有限元数值模拟与实验相结合的方式成形件温度场和应力应变场计算分析, 具体方法为:

- 1) 采用红外线测温及近距实时观察测得准稳态后熔池温度及熔池大小形状;
- 2) 建立几何模型后, 按熔池大小为基本单元大小划分激光成形区域网格;
- 3) 采用有限元单元生死技术按时间和路径顺序激活熔覆层有限单元模拟熔覆层的生长;
- 4) 采用焓法统一考虑熔化凝固温度场传热;
- 5) 采用温度场与应力应变场顺序间接耦合方式计算成形件应力应变场的演变。

## 5 物理模型及计算结果分析

### 5.1 物理模型

为简化计算, 忽略圆角等细部, 几何模型如图 1 所示, 其中基座为  $60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 空心叶片壁厚  $2 \text{ mm}$ , 底宽  $40 \text{ mm}$ , 高  $60 \text{ mm}$ , 沿轴线旋转角  $-1.8^\circ$ , 顶宽  $34 \text{ mm}$ 。采用沿周向扫描, 垂直叠加成形, 计算采用的激光快速成形参数为: 激光功率  $2100 \sim 2300 \text{ W}$ , 光斑直径  $1.5 \sim 2 \text{ mm}$ , 激光扫描速

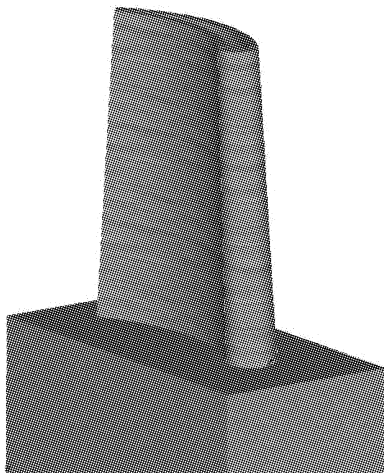


图 1 激光快速成形空心叶片几何模型

Fig. 1 Geometric model of LRF hollow blade

度  $5 \sim 15 \text{ mm/s}$ , 送粉率  $5 \sim 15 \text{ g/min}$ 。

开始激光快速成形前, 基座首先预热到  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 进入准稳态后由红外线测温及近距实时观察测得熔池大小约为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$ , 熔池表面温度平均为  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ , 如图 2 所示。

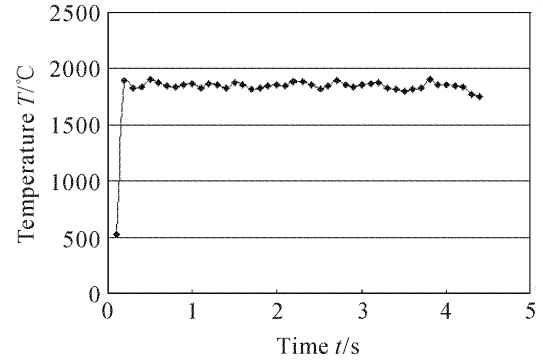


图 2 熔池表面温度红外线测温

Fig. 2 Surface temperature of melting pool from infrared measurement

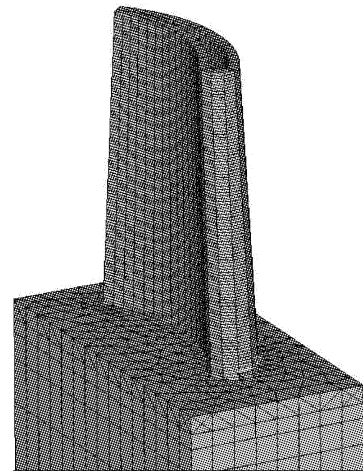


图 3 激光快速成形空心叶片有限单元网格模型

Fig. 3 Mesh model of LRF hollow blade

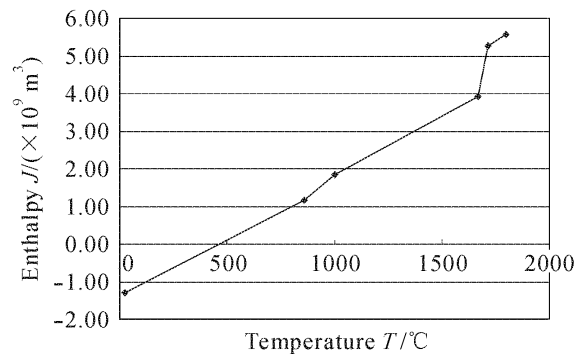


图 4 TC4 钛合金焓与温度关系

Fig. 4 Enthalpy of TC4 according to temperature

按熔池大小采用六面体划分网格如图 3: 基座使用较粗六面体网格, 空心叶片单元网格模型如图 3 所示。

由 JMatPro-demo 软件得到 TC4 钛合金焓与

温度关系如图4所示。

应力应变分析时固定底面和相邻的两个侧面，如图5所示。

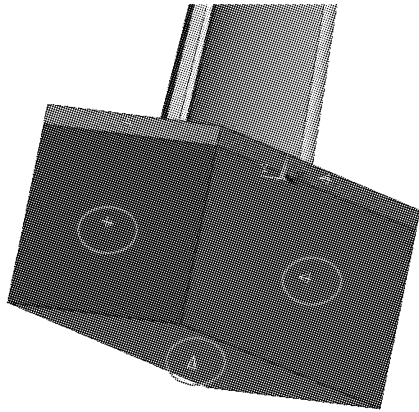


图5 应力应变分析边界条件

Fig. 5 Boundary condition of stress/strain analysis

激光快速成形过程中存在着较大的几何和材料非线性,同时为全面考虑分析中的塑性材料性能,必须考虑屈服准则、流动准则和硬化定律的统一。因此,采用双线性随动强化模型模拟材料非线性,同时考虑米赛斯屈服准则,并采用全牛顿拉普森(Full Newton-Raphson)方法进行平衡迭代及刚度矩阵修正求解。

### 5.2 计算结果分析

采用以上模型按时间和路径顺序不断激活熔覆层有限单元,被激活单元具有材料熔化温度,作用时间为激光扫描单元所需时间,模拟熔覆层生长及温度场分布,然后采用温度场结果间接耦合计算空心叶片应力应变场,空心叶片激光快速成形过程的温度场/应力场演变计算结果如图6所示。其中,(a)~(e)为不同时刻空心叶片激光快速成形的温度场演化过程,(f)~(j)为与温度场对应时刻空心叶片激光快速成形的等效应力。

在激光快速成形过程中,随着熔池的移动及凝固,在基座上通过逐层叠加的方式沉积出空心叶片,而在此过程中温度和应力/应变在成形空心叶片中随熔覆层连续沉积而动态演化。

在成形初期(11 s时刻,如图6(a)),此时刚刚开始沉积第2层,熔池表面温度为1800 °C,熔覆层及基座温度较低,在300 °C左右,由于基座对熔池冷却作用强烈,熔池附近温度梯度G较高,其中底部垂直方向  $G_z$  为  $1.8 \times 10^6$  K/m,熔池后沿水平方向  $G_x$  为  $0.4 \times 10^6$  K/m,受基座的约束沉积层不能自由收缩,等效应力值较高,平均为500 MPa左右,最大等

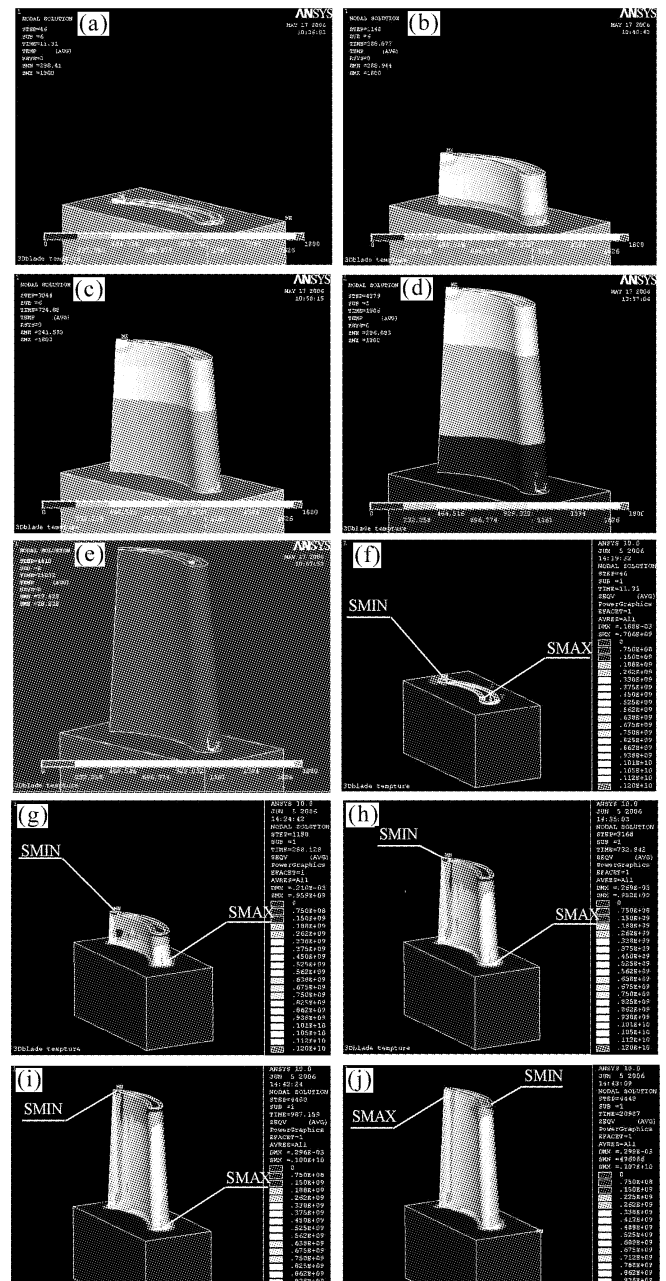


图6 空心叶片激光快速成形过程的温度场/应力场演变  
 (a) 11 s 温度场;(b) 288 s 温度场;(c) 734 s 温度场;(d) 1006 s 温度场;(e) 21032 s 温度场;(f) 11 s 等效应力;(g) 288 s 等效应力;(h) 734 s 等效应力;(i) 1006 s 等效应力;(j) 21032 s 等效应力

Fig. 6 Temperature and stress/strain fields evolution of LRF hollow blade

(a) 11 s temperature field; (b) 288 s temperature field; (c) 734 s temperature field; (d) 1006 s temperature field; (e) 21032 s temperature field; (f) 11 s stress field; (g) 288 s stress field; (h) 734 s stress field; (i) 1006 s stress field; (j) 21032 s stress field

效应力为706 MPa,出现在叶片的头部(见图6(f)中SMAX),而在第二层熔覆层沉积过程中,由于熔池的加热作用,在熔池附近温度重新升高,第一层的一部分也被熔化,由于液态熔池等效应力为零(见图6(f)中SMIN),随着熔池的移动可以看到熔池对第一层的等效应力有释放作用。

随熔覆高度的增加,熔池逐渐远离基座,散热路径加长,熔池高温区持续扩大,温度梯度  $G$  减小,到熔覆最后一层(1006 s时刻,如图 6(d))时,底部垂直方向  $G_z$  为  $0.26 \times 10^6$  K/m,熔池后沿水平方向  $G_x$  为  $0.64 \times 10^5$  K/m,同时成形件温度场沿  $z$  轴方向垂直向上梯度分布,表明虽然随熔覆高度的增加成形叶片表面换热作用加强,但整体散热方向没变,仍是自上而下,从熔池到基座。同时,随熔覆高度的增加,基座对熔覆层的约束作用减小,同时由于新熔覆层熔池对前熔覆层应力有释放作用,空心叶片在激光快速成形过程中,等效应力沿  $z$  轴方向垂直向上呈递减梯度分布,最大等效应力出现在叶根的尾部(如图 6(g)~(i)中 SMAX),最小等效应力出现在顶部熔池处(如图 6(g)~(i)中 SMIN),而与温度  $z$  轴方向垂直梯度分布不同的是,等效应力梯度与温度梯度方向相反且没有温度梯度变化那么明显,而在叶头部和尾部等效应力相对于腹部及背部有应力集中现象。到熔覆最后一层(1006 s时刻,如图 6(i))时,等效应力分布沿  $z$  轴方向基本可分为四段:叶根等效应力最高,平均为 850 MPa 左右,叶根以上到叶中,等效应力有所降低但仍维持在 600 MPa 左右,从叶中再往上到叶片四分之三处,等效应力维持在 400 MPa 左右,叶片顶部等效应力最低,平均为 200 MPa 左右。叶头部和尾部等效应力相对于腹部及背部较高,最大等效应力为 1000 MPa,出现在叶根的尾部(如图 6(i)中 SMAX)。

最后成形叶片经长时间(21032 s 时刻,如图 6(e))的冷却温度整体降到室温,同时应力演变为残余应力(残余应力分布如图 6(j))。与熔覆最后一层应力分布(1006 s时刻,如图 6(i))相比,残余应力与熔覆最后一层应力分布规律基本相同,只是叶片顶部等效应力有所提高,平均为 300 MPa 左右,等效应力梯度趋于缓和。

总体说来,由于基座的冷却及约束作用,激光快速成形空心叶片温度和应力/应变沿  $z$  轴方向呈梯度分布,散热方向从上至下,从熔池到基座。叶根等效应力最大,新熔覆层熔池对前熔覆层应力有释放作用,叶片顶部等效应力最低。残余应力与熔覆过程应力分布规律基本相同,只是叶片顶部等效应力有所提高。

## 6 结 论

### 1) 激光快速成形空心叶片温度场沿 $z$ 轴方向

呈梯度分布,散热方向从上至下,从熔池到基座,熔池附近温度梯度较高,随熔覆高度的增加,熔池逐渐远离基座,散热路径加长,熔池高温区持续扩大,温度梯度减小。

2) 由于基座的约束作用和新熔覆层熔池对前熔覆层应力的释放作用,应力/应变沿  $z$  轴方向呈梯度分布,叶根等效应力最大,叶片顶部等效应力最低,在叶片头部和尾部等效应力相对于腹部及背部有应力集中现象。

3) 残余应力与熔覆最后一层应力分布规律基本相同,只是叶片顶部等效应力有所提高,等效应力梯度趋于缓和。

## 参 考 文 献

- 1 W. P. Jia, C. Jing, H. O. Yang *et al.*. Microstructures and mechanical properties of laser rapid formed Ti-6Al-4V alloy [C]. *SPIE*, 2005, **5629**:119~128
- 2 Wang Zengqiang. The development of high-performance aeroengine manufacturing technology [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2007, **1**:52~55  
王增强. 高性能航空发动机制造技术及其发展趋势[J]. *航空制造技术*, 2007, **1**:52~55
- 3 Laser Engineered Net Shaping. Sandia National Laboratories. available at <http://www.sandia.gov/mst/pdf/LENS.pdf>
- 4 Weidong Huang, Zhenxia Liu, Xin Lin. A new treatment of interface condition in temperature field calculation during high energy beam processing of materials [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2000, **292**(2):216~218
- 5 Y. L. Huang, G. Y. Liang, J. Y. Su. A comprehensive model of laser cladding by powder feeding [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2004, **17**(1):21~27
- 6 Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Steve Corbin. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**:849~867
- 7 W. Hofmeister, M. Wert, J. Smugeresky *et al.*. [www.tms.org/pubs/journals/JOM/9907/Hofmeister/Hofmeister-9907.html](http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9907/Hofmeister/Hofmeister-9907.html)
- 8 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Shi Likai *et al.*. Numerical simulation of 3D 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  
席明哲,张永忠,石力开等. 激光快速成形金属薄壁零件的三维瞬态温度场数值模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2003, **13**(4):887~892
- 9 K. Dai, L. Shaw. Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic powders [J]. *Acta Materialia*, 2004, **52**(1):69~80
- 10 A. H. Nickel, D. M. Barnett, F. B. Prinz. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, **317**(1):59~64