

# 基于材料性质转换的金属粉末直接选区 激光烧结温度场数值模拟\*

沈显峰<sup>1,2</sup> 姚 进<sup>2</sup> 王 洋<sup>1</sup> 杨家林<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 绵阳 621900;

2. 四川大学制造科学与工程学院 成都 610065)

摘要: 基于 MSC.Marc 非线性有限元分析软件, 建立金属粉末直接选区激光烧结过程的温度场有限元分析模型。模型中考虑了粉体—实体转化过程中热导率等物理性质随温度的非线性变化规律。对于表面对流和辐射散热条件, 采用修正系数的方法, 考虑激光冲击加热作用引起的极大温度梯度的影响。同时还采用在不同载荷步之间转换单元材料物理性质, 以考虑激光烧结过程中的局部热源输入作用。对采用在不同载荷步之间转换单元材料物理性质的方法和不采用此方法进行模拟对比研究, 结果表明: 前者在烧结开始时在光斑中心附近具有极大的温度梯度, 这与试验结果一致; 前者热传播的主要范围集中在已烧结区域, 而后者热传播的范围则是整个粉床; 前者进入稳态烧结后光斑中心温度变化趋于平缓, 而後者的光斑中心温度一直持续上升。这主要是由于已烧结部分的材料热导率比未烧结部分的粉末高约 100 倍造成的。

关键词: 快速原型制造 DMLS 数值模拟 有限元法 温度场

中图分类号: TG665

## 0 前言

金属粉末直接选区激光烧结(Direct metal laser sintering, DMLS)是选区激光烧结(Selective laser sintering, SLS)方法之一, 在 DMLS 工艺中, 高功率的激光直接烧结金属粉末成形致密度较高的零部件<sup>[1-2]</sup>, 而一般不需要或很少需要炉中热处理强化和金属二次熔浸等辅助工艺手段。与间接 SLS 技术相比, DMLS 工艺最主要的优点就是取消了昂贵且费时的预处理和后处理工艺步骤<sup>[3]</sup>。因此, DMLS 技术的商业化应用已在世界范围内引起工业界广泛的关注, 它正广泛应用于快速模具、电火花加工电极、梯度功能材料, 以及航空、航天和其他装备用高性能关键金属零部件的集成制造领域<sup>[2-4]</sup>。

然而, 目前 DMLS 还处在刚刚能够控制成形的阶段, 成形的零件还存在着较大翘曲变形和较大的残余应力<sup>[5-6]</sup>。DMLS 是一种热能传播主导的净成形方式, 其源驱动力就是激光辐射能, 激光辐射促使粉末发生相变和固化, 同时, 粉床温度、环境温度也会对成形过程、成形件质量产生影响。不难想象, 如果缺乏对烧结过程中热能传播的认识和控制, 就会导致烧结件产生大的变形和缺陷区。因此, 有必要对 DMLS 的传热过程进行深入研究。

与 SLS 烧结聚合物粉末不同, 在 DMLS 过程中, 粉末颗粒经过熔化、凝固等相变物理过程烧结或粘结在一起<sup>[7]</sup>, 因此 DMLS 过程模拟难度更大。先前的研究对聚合物粉末、覆膜金属粉的选区激光烧结温度场模拟已经较充分<sup>[8-9]</sup>, 但对于 DMLS 的研究还不够, 如瑞士的 KOLOSSOV 等<sup>[10]</sup>基于连续介质理论建立了 DMLS 烧结过程的三维有限元分析模型, 模型考虑了随温度变化和相变而改变的热传导、比热容非线性材料行为的影响, 并且针对 Ti 粉的 DMLS 过程的温度场进行了数值模拟和试验验证, 但没有考虑激光扫描路径的影响。Connecticut 大学的 DAI 等<sup>[11]</sup>建立了多种材料激光致密化激光快速成形方法的有限元分析模型, 考察了加工过程中瞬态温度场、瞬态应力场, 模型中考虑了随温度及孔隙率变化的热传导、热辐射条件和随温度变化的热对流条件, 还采用折算的办法考虑了粉末到实体的转变中热导率的变化, 但仅仅考虑了孔隙率为最大的粉末状态和孔隙率接近于零的近实体状态, 没有考虑在大温度范围(从室温到材料熔点)内的热导率变化规律。

在 DMLS 过程中, 随着激光束的扫描, 粉末颗粒相互烧结或粘结, 材料的热导率等物理性质在从粉末到实体的转换过程中发生了显著的变化, 在模拟中需要考虑这种变物理性质的影响; 又由于激光烧结过程中的局部热源输入, 激光扫描过的部分已经转化为实体了, 未扫描部分还处于粉末状态, 在

\* 中国工程物理研究院基金重大项目资助(2002Z0303), 20050624 收到初稿, 20060215 收到修改稿

模拟中需要考虑这种单元个体之间的差异。基于 MSC.Marc 环境建立了三维 DMLS 的温度场有限元分析模型,在模型中考虑了粉末-实体转化中不同单元热导率等物理性质随温度变化的非线性变化规律的影响。利用 MSC.Marc 子程序接口,实现在不同载荷步间、不同模型单元的热导率等物理性质的转换。并就采用这种单元材料性质转换和不采用这种转换进行了对比研究。以 25 钢为例进行了有限元模拟计算,并对最高温度变化,各个烧结道之间的影响等进行了讨论和分析。

## 1 DMLS 温度场有限元建模

### 1.1 模型描述

烧结过程的有限元模型如图 1 所示。

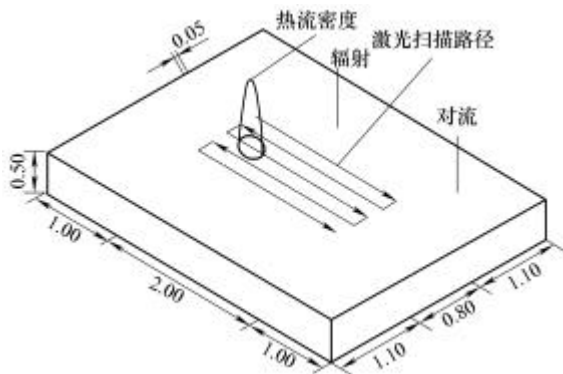


图 1 DMLS 有限元分析模型

用  $l_x$ 、 $l_y$ 、 $l_z$  分别表示粉末在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的尺寸,则烧结之前,整个粉末的三维尺寸为  $l_x \times l_y \times l_z$ ,即  $3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ,其中烧结区域为  $2 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 。激光能量的输入为高斯分布,以热流密度的方式输入到粉末中。激光光束多道扫描路径采用光栅扫描方式,如图 1 中折线所示,扫描间距为  $0.2 \text{ mm}$ 。网格的大小,采用  $0.05 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$  的立方网格划分。模型中能量的散失包括对流散热和辐射散热。

### 1.2 边界条件与初始条件的确定

烧结前,假设粉末具有一致的初始温度  $q_0$ ,在室温下或者预热时间足够长的情况下,这种条件易于满足。温度场初始条件可以由式(1)表达

$$q(x, y, z, 0) = q_0 \quad (1)$$

粉末上表面的散热( $y=0$ )主要是通过通过对流和辐射方式进行的,其温度场边界条件为

$$-l \frac{\partial q}{\partial y} \Big|_{y=0} = b \left[ (e_r q^4 - q_s^4) + h(q - q_c) \right] \quad (2)$$

式中  $l$  ——热导率

$e_r$  ——实际物体的有效辐射率(黑度)

$s$  —— Stefan-Boltzmann 常数,约为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

$q_s$  —— 空间环境温度

$q_c$  —— 环境换热流体介质温度

$h$  —— 对流换热系数

激光辐射具有加热、冷却速度快、温度梯度大的显著特点, $\beta$  为考虑这种冲击效应的影响而采用的修正系数。

当在没有保护气氛的空气中烧结时, $q_s$  和  $q_c$  均为室温  $q_0$ ,因此式(2)可以表示为

$$-l \frac{\partial q}{\partial y} \Big|_{y=0} = b \left[ e_r s (q^3 + q^2 q_0^1 + q^1 q_0^2 + q_0^3) + h \right] \times (q - q_0) \quad (3)$$

定义  $H = b[e_r s (q^3 + q^2 q_0^1 + q^1 q_0^2 + q_0^3) + h]$ 。在稳态下, $\beta$  取 1。对于激光加工,姜任秋<sup>[12]</sup>考虑了激光束照射后在热作用区产生强烈的温度梯度,将  $H$  值进行了修正,取为稳态下  $H$  值的 80~100 倍;王秀凤等<sup>[13]</sup>根据激光与材料相互作用温度场的试验结果,将  $H$  值进一步进行了修正,在低温段约为稳态下  $H$  值的几千倍,高温段和姜任秋取值相当。DMLS 已烧结部分表面与其他激光加工相类似,具有更大的有效辐射度;DMLS 未烧结部分粉末表面与其他激光加工相比,其表面积较大,辐射散热更强,但对流散热更弱。模拟中, $\beta$  值取为 80。

在烧结过程中,激光能量是以热流密度  $q$  输入到粉末中的,服从高斯分布,即

$$q = \frac{2AP}{\pi w^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (4)$$

式中  $w$  ——光斑半径,即热流密度降为光斑中心热流密度  $\exp(-2)$  处距光斑中心的距离

$A$  ——粉末对激光束的吸收率

$P$  ——激光功率

$r$  ——粉末表面上一点到光斑中心的距离

### 1.3 相变潜热的处理

在选区激光烧结过程中,存在着相变过程,即在加热过程从固态熔化为液态和在冷却过程中从液态凝固为固态。相变潜热指的是在相变过程中吸收或放出的热量。对于金属等晶体材料而言,相变潜热是不可忽略的因素之一。MSC.Marc 软件描述相变潜热的方法之一就是假设在产生潜热的两相温度间热量是均匀地释放或被均匀地吸收,进而按用户给定潜热大小和两相温度来处理相变引起的热量突变。

### 1.4 热导率的确定

在影响粉床烧结性能的热物性参数中,粉床的有效热导率最为重要,并且其传热机理很复杂,其准确的确定也很困难。假设所有粉末颗粒都为球形,且不存在接触变形,则初始状态下粉床的有效热传导系数 $I_e$ 可以由式(5)进行估计<sup>[14-15]</sup>

$$\frac{I_e}{I_g} = (1 - \sqrt{1-j}) \left( 1 + \frac{jI_r}{I_g} \right) + \sqrt{1-j} \left\{ \frac{2}{1 - \frac{I_g}{I_s}} \left[ \frac{1}{1 - \frac{I_g}{I_s}} \ln \left( \frac{I_s}{I_g} \right) - 1 \right] + \frac{I_r}{I_g} \right\} \quad (5)$$

$$I_r = 4Fsq_p^3D_p \quad (6)$$

式中  $I_g$  —— 环境气体(加保护气时为保护气,不加为空气)的热导率

$j$  —— 初始孔隙率

$I_s$  —— 固体材料的热导率

$I_r$  —— 粉床中由辐射引起的热导率

$F$  —— 表观系数,可近似取为 1/3

$s$  —— Stefan-Boltzmann 常量

$q_p$  —— 粉末微粒的温度

$D_p$  —— 粉末颗粒的平均直径

在激光烧结过程中,液相烧结规律常用来描述金属粉末烧结率的变化,文献[16]介绍了烧结件孔隙率的变化规律

$$1 - \frac{e}{e_p} = \{ \tanh[5 \times (1 - X)] \}^4 \quad (7)$$

$$e = \frac{r_s - r}{r_s} \quad (8)$$

$$e_p = \frac{r_s - r_p}{r_s} \quad (9)$$

式中  $e, e_p$  —— 烧结件和粉床的孔隙率

$r$  —— 材料密度

$r_p$  —— 粉床密度

$r_s$  —— 实体密度

$X$  —— 固体分数,从固相温度到液相温度线性变化

相对密度可以表示为

$$r_r = \frac{r}{r_s} = \frac{r_s - (r_s - r)}{r_s} = 1 - e(q) \quad 0 \leq r_r \leq 1 \quad (10)$$

假设在材料的固相线温度和熔点温度之间,烧结过程热导率从粉体热导率线性地变化到实体的热

导率。则任一温度点( $q$ )的热导率( $I$ )可以表示为

$$I(q) = I_g(q) + r_r^4 \times [I_s(q) - I_g(q)] \quad q_s \leq q \leq q_m \quad (11)$$

前已述及,在固相线温度以上烧结时,随着液相量的增多,材料的接触面成倍增多,也就是说材料的热导率变化越来越快,文献[17]中材料相对烧结颈以指数为 4 的幂函数增长,这里也将热导率取为以相对密度的 4 次方增长。

采用 MSC.Marc 软件中的 ANKOND 用户子程序接口,用 FORTRAN 语言实现由于激光动态扫描过程局部热源输入作用,引起的模型不同单元在不同载荷步之间热导率等材料物理性质的转换。

## 2 结果与讨论

在模拟过程中,采用 25 钢粉末作为烧结材料,其相应的参数如表所示<sup>[18]</sup>。

表 25 钢的物理性能

温度 $q/$	20	250	500	750
热导率 $I/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	81.1	72.1	63.5	50.3
比热容 $c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	460	480	530	675
密度 $r/(kg \cdot m^{-3})$	7 820	7 700	7 610	7 550
温度 $q/$	1 000	1 500	1 700	2 500
热导率 $I/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	39.4	29.6	29.4	31.6
比热容 $c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	670	660	780	820
密度 $r/(kg \cdot m^{-3})$	7 490	7 350	7 300	7 090

模拟是在下列条件进行的:激光功率为 200 W,光斑直径为 0.6 mm,扫描速度为 0.04 m/s,粉末颗粒平均直径为 40  $\mu$ m,粉床热吸收率为 0.1,粉床初始孔隙率  $j$  为 0.395,粉床有效辐射率为 0.8,粉床上表面非照射区域施加对流换热条件,换热介质温度为 20  $^{\circ}$ C,表面传热系数取为 10,修正系数  $\beta$  取为 80。

在激光烧结过程中,由于局部输入激光能量的影响,烧结部分由激光未扫描之前的粉体变为扫描后的实体,因此随烧结的进行,不同单元在不同载荷步之间材料物理性质发生了变换。采用在不同载荷步之间转换材料物理性质和不采用这种转换分别进行了模拟,图 2 为最高温度变化曲线,曲线 1、曲线 2 分别为上述两种情况下的最高温度变化曲线。变化趋势类似,因此仅取前 1.6 s 的最高温度变化情况。在曲线 1 中,热导率按式(11)变化;在曲线 2 中热导率取为粉体热导率( $I_s(q)$ )和实体热导率( $I_b(q)$ )的平均值,  $I = [I_p(q) + I_s(q)]/2$ 。

根据图 2 所示,曲线 1、2 的最高温度变化,有如下特点。

(1) 初始烧结时,曲线 1 的最高温度比稳态时的最高温度高 5~6 倍,约为 12 000  $^{\circ}$ C,这导致了

很大的温度梯度，主要原因是由于开始时所有粉末均为粉体，粉体的热导率比实体的低2个数量级，因此粉床吸收的热量来不及传出，主要集聚在光斑中心附近区域。这样造成的结果就是在烧结道的初始位置，形成了一条凸起的烧结线，如图3所示；而曲线2的最高温度在进入稳态前为一个逐渐升高的过程，这是由于粉床的热导率一致，随着烧结进行热量积聚的结果。

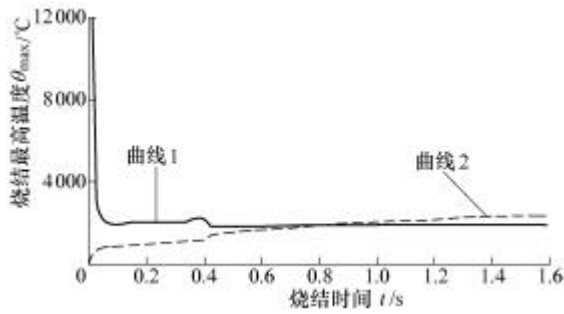


图2 最高温度变化曲线

(2) 曲线1在进入稳态以后，最高温度变化趋于平缓，这时输入到粉床内的热量和通过边界对流辐射散热基本达到了平衡；而曲线2在整个烧结过程中最高温度持续上升，这是由于整个粉床的热导率都一致，后续热量的输入因有了之前的粉床温度基础，使得整个粉床的温度持续地上升。

(3) 曲线1在从第一道扫描转入第二道扫描时，有温度波动，先是升高，然后下降到平均温度，这主要是由于采用了光栅扫描策略，在第二道刚刚开始时，激光能量的积聚效应明显，而在第三、四、五道刚开始时，热导率接近实体的已烧结区域范围较大，扫描道转换造成的能量集聚也能够得到较快的传出，因此这些烧结道的温度波动较小；而曲线2则不存在这样的温度波动，这是由于在整个烧结过程中，热量向各个方向的传播速度相同，热量传递的范围更大。



初始烧结形成的凸起线

图3 初始烧结形成的凸起线

0.34 s时刻上表面的温度场分布如图4所示，从图4可以看出以下结果。

(1) 整个温度分布近似以  $x = -0.04$  呈对称分布，这主要是在第一道烧结时，各项同性的材料属性就会造成温度场沿  $y$  轴方向的对称分布。

(2) 温度梯度最大区域发生在烧结方向的前端，这是由于烧结方向的前端为粉末状态，导热率较低，不易向前方传播；而烧结过的区域，材料特性已经从粉末转变为了近似实体的状态，导热率较大，传热较快，温度梯度也就小得多。

(3) 温度较高的等温线形状呈前大后小的轮廓形状，而温度较低的等温线形状则呈前小后大的轮廓形状。温度较高的等温线形状分布是由于激光束扫描通过后，上一步的热量仍然来不及传走，上一步光斑中心附近仍有较高的温度分布，后方的热导率比两侧的热导率大，而光斑中心线附近区域温度超过了25钢的熔点，热导率达到了最高，即达到了实体的热导率，因此向后方传导更容易，等温线后方较尖，这种情况下，不同区域热导率的差异占主导作用。温度较低的等温线形状分布是由于前方热导率较小，而后方随烧结的进行，温度升高，热导率虽然没有显著增加，但由于时间的推移，热量能够向更宽的领域传播，在这种情况下时间起到了主要作用。

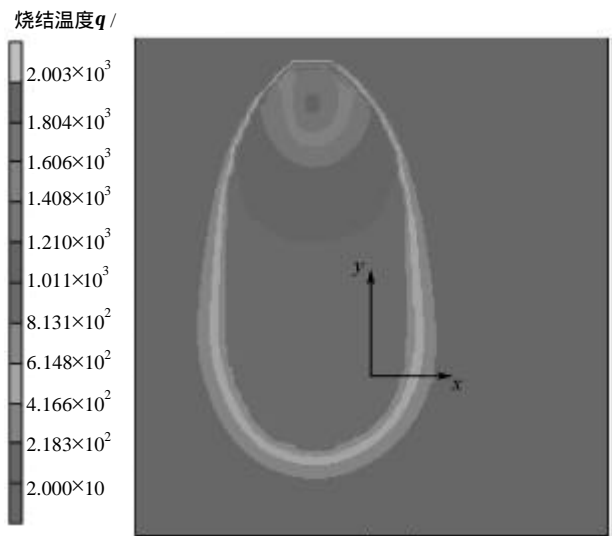
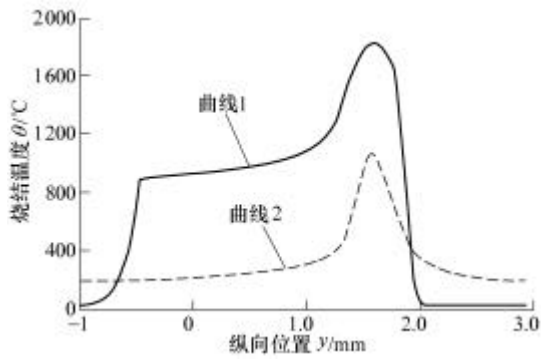
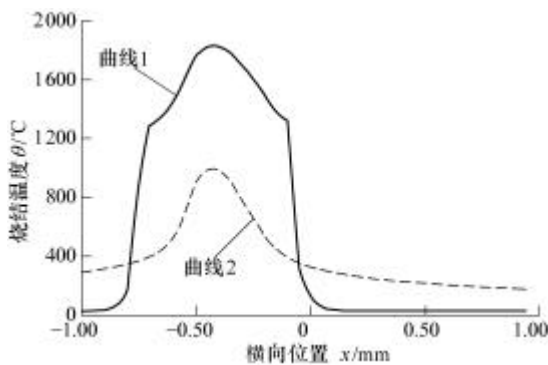


图4 0.34 s时刻上表面的温度场分布图

0.34 s时刻上表面的  $y$  轴方向上( $x = -0.04, z = 0$ )的温度场分布、 $x$  轴方向上( $y = 1.7, z = 0$ )的温度场分布如图5a、5b所示。其中曲线1表示采用不同载荷步材料性质转换的情况，曲线2表示不采用不同载荷步材料性质转换的情况。

$y$  轴方向上的温度分布表示了激光扫描方向上的温度分布，采用不同载荷步材料性质转换(图5a曲线1)与不采用不同载荷步材料性质转换相比(图5a曲线2)有以下特点。

(a)  $y$  轴方向上的温度分布,  $x = -0.04, z = 0$ (b)  $x$  轴方向上的温度分布,  $y = 1.7, z = 0$ 图 5 0.34 s 时刻上表面的  $x$ 、 $y$  轴方向上的温度分布图

(1) 前者温度梯度较大的区域发生在  $y < 0.45 \text{ mm}$  和  $y > 1.9 \text{ mm}$  的附近, 在这些区域温度迅速下降, 特别是激光扫描方向的前端温度下降非常迅速, 这是由于当粉末温度超过固相线温度  $910^\circ\text{C}$  时, 这部分的热导率迅速上升, 而其他部分的热导率仍然保持很低, 热量传播的范围基本局限在已烧结区域内, 其他部分的温度仍然很低; 而后者温度梯度较大的区域发生在光斑中心区域范围附近, 在激光辐射的区域, 温度较高, 其他区域温度相差不大。

(2) 前者以峰值温度为中心, 已烧结区域、未烧结区域差别明显, 而后者近似为对称分布, 已烧结部分、未烧结部分几乎不存在差别, 这也是由于前者热导率在已烧结部分和未烧结部分差别明显, 而后者的整个粉床的热导率保持一致, 显然前者更加符合实际情况。

(3) 前者的峰值温度、已烧结部分温度比后者高  $600 \sim 700^\circ\text{C}$ , 而前者烧结区域以外的温度却比后者低近  $200^\circ\text{C}$ , 这是由于前者的传热区域局限在已烧结区域, 而后者的传热区域却是整个粉床。

$x$  轴方向上的温度分布表示了激光扫描方向两侧的温度分布情况, 与  $y$  轴方向上的温度分布类似, 采用不同载荷步材料性质转换(图 5b 曲线 1)与不采用不同载荷步材料性质转换(图 5b 曲线 2)的温

度分布相比有以下特点。

(1) 前者的热量集聚在光斑中心区域, 光斑直径为  $0.6 \text{ mm}$ , 后者的热量向更宽的区域传导。

(2) 由于热量集聚的原因, 前者光斑中心温度远高于后者的光斑中心温度。

### 3 结论

(1) 建立了金属粉末直接选区激光烧结的三维瞬态温度场有限元分析模型, 在模型中考虑了热导率、比热容等变物性参数的影响。采用修正表面传热系数的方法来考虑激光加工冲击效应的影响。粉床的初始热导率可以通过折算的方式估计得到。

(2) 热导率在温度场模拟中起关键作用。通过 MSC.Marc 的子程序入口, 实现了在不同载荷步间不同模型单元的热导率等物理性质的转换。采用这种转换导致了初始激光烧结时极大的温度梯度以及进入稳态烧结后光斑中心温度变化趋于平缓, 而不采用这种转换的光斑中心温度一直持续上升, 这是由于前者随着烧结的进行, 已烧结区域越来越大, 已烧结部分的热导率比粉体高得多, 因此热量更易向已烧结部分传播。分析和试验结果表明, 采用这种转换更符合实际情况。

(3) 采用不同载荷步之间转换单元材料性质时, 由于已烧结区域与未烧结区域的热导率相差明显, 因此热量集聚在已烧结区域, 热传播的主要范围集中在已烧结区域, 而不采用这种转换时, 热传播的范围则是整个粉床。

### 参 考 文 献

- [1] SIMCHI A, PELZOLDT F, PHOL H. Direct metal laser sintering: material considerations and mechanisms of particle bonding[J]. The International Journal of Powder Metallurgy, 2001, 37(2): 49-61.
- [2] HANNINEN J. Direct metal laser sintering[J]. Advanced Materials and Processes, 2002, 160(5): 33-36.
- [3] KHAING M W, FUH J Y H, LU L. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterization of EOS parts [J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 113(1): 262-272.
- [4] DAS S, BEAMA J J, WOHLERT M, et al. Direct laser freeform fabrication of high performance metal components[J]. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4(3): 112-117.
- [5] DAI K, SHAW L. Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic

- powders[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(1) : 69-80.
- [6] MATSUMOTO M, SHIOMI M, OSAKADA K, et al. Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42(1) : 61-67.
- [7] ZHANG Y W. Thermal modeling of advanced manufacturing technologies : grinding, laser drilling and solid free- form fabrication[D]. Connecticut : University of Connecticut, 1998.
- [8] 赵保军, 施法中, 冯涛, 等. 选择性激光烧结聚苯乙烯粉末成形温度场的数值模拟研究[J]. *激光杂志*, 2002, 23(2) : 66-69.
- [9] 杜建红, 白培康, 程军. 选择性激光烧结过程温度场数值模拟[J]. *华北工学院学报*, 2000, 21(1) : 30-32.
- [10] KOLOSISOV S, BOILLAT E, GLARDON R, et al. 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(2) : 117-123.
- [11] DAI K, SHAW L. Thermal and stress modeling of multi-material laser processing[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49 (2) : 4 171-4 181.
- [12] 姜任秋. 热传导、质扩散与动量传递中的瞬态冲击效应[M]. 北京 : 科学出版社, 1997.
- [13] 王秀凤, 吕晓东, 陈光南, 等. 激光强化温度场的数值模拟与校验[J]. *激光技术*, 2004, 28(2) : 162-165.
- [14] SIH S S, BARLOW J W. Measurement and prediction of the thermal conductivity of powders at high temperature[C]//*Proceedings of the 5th Annual SFF Symposium*, Austin, TX, 1994. Austin : the University of Texas at Austin, 1994, 321-329.
- [15] SIH S S, BARLOW J W. The prediction of the thermal conductivity of powders[C]//*Proceedings of the 6th Annual SFF Symposium*, Austin, TX, 1995. Austin : the University of Texas at Austin, 1995, 397-401.
- [16] JIANG W, XU Z X, DALGARNO K W, et al. Numerical prediction of thermal stresses in direct metal SLS process [C]//*Proceeding of the Second International Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing* Beijing, 2002. Beijing : Tsinghua University Press, 2002, 64-69.
- [17] TOLOCHKO N K, ARSHINOV M K, GUSAROV A V, et al. Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2003, 9 (5) : 314-326.
- [18] 鹿安理, 史青宇, 赵海燕, 等. 厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟[J]. *中国机械工程*, 2001,

12 (2) : 183-186.

## FINITE ELEMENT SIMULATION FOR TEMPERATURE EVOLUTION IN DIRECT METAL LASER SINTERING BASED ON MATERIAL PROPERTIES TRANSFORMATION WITH LOAD STEPS

SHEN Xianfeng<sup>1,2</sup> YAO Jin<sup>2</sup>

WANG Yang<sup>1</sup> YANG Jialin<sup>1</sup>

(1. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering

Physics, Mianyang 621900;

2. School of Manufacture Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

**Abstract** : Taking account of temperature-dependent thermal conduction and heat capacity, a three-dimensional finite element model of temperature field in DMLS has been established with the employment of the non-linear Finite Element Analysis (FEA) software MSC.Marc. As to the effect of extremely high thermal gradient caused by laser processing, the surface boundary conditions of surface convection and radiation is revised by using a coefficient. A method to transform element material properties between load steps is also taken for consideration of the regional-input high-power laser beam. Comparisons of simulation results between with the method and without it are conducted, and some conclusions are reached: Temperature gradient of the former one in the first steps is very great, which is consistent in the trend with the experimental phenomena; Heat affected zone of the former one is mainly confined in sintered region, while that of the latter one can reach the whole powder bed; The temperature of powder bed under the laser spot with increasing load steps of the former one remains constantly, while that of the latter one increases continuously. These are primarily caused by the hundred times rising of the thermal conductivity after laser sintering.

**Key words** : Rapid prototyping and manufacturing

Direct metal laser sintering

Numerical simulation Finite element method

Temperature distribution

作者简介：沈显峰，男，1977年出生，博士。主要研究方向为激光快速成形与高能束加工技术。

E-mail : shxfmail@21cn.com