

文章编号: 1004-0609(2003)04-0887-06

激光快速成形金属薄壁零件的三维瞬态温度场数值模拟^①

席明哲, 张永忠, 石力开, 高士友

(北京有色金属研究总院 复合材料研究中心, 北京 100088)

摘 要: 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。计算结果表明, 金属薄壁零件中, 与 x 方向温度梯度相比, y 方向温度梯度占绝对优势, 因此在薄壁零件冷却过程中, 热量散失主要方向为 y 方向。激光功率越高, y 方向温度梯度也越大, 因此形成的枝晶组织就越细长。

关键词: ANSYS; 温度场; 316L 不锈钢; 数值模拟

中图分类号: TN 249

文献标识码: A

金属零件的激光快速成形是 1995 年美国能源部为制造小批量核武器零件而开始发展的先进制备技术。该技术在无需任何硬质工模具的情况下, 通过高功率激光熔化同步输送的各种金属粉末, 逐点逐层堆积来成形全致密的金属零件, 激光束或沉积基板的运动通过零件实体 CAD 模型经切片分层处理后形成的二维平面信息来控制^[1~8]。激光快速成形过程中, 金属零件能否顺利成形及成形后的组织、性能的优劣直接取决于成形工艺参数的选择。要想正确选择成形工艺参数, 获得形状规整、组织致密和性能优良的成形零件, 就必须掌握快速成形过程中, 金属零件各点温度随时间的变化规律。目前, 采用实验手段来准确把握快速成形过程中金属零件的瞬态温度场, 尚有很大困难, 国内外采用数值模拟手段研究激光快速成形金属零件过程中的瞬态温度场的研究工作尚未见报道。因此, 作者拟用数值模拟的方法获得同轴送粉条件下, 成形过程中金属零件的瞬态温度场, 为正确选择成形工艺参数提供理论依据。

1 金属薄壁零件三维瞬态温度场的算法设计

要准确反映成形过程中金属薄壁零件各点温度随时间的变化规律, 就必须建立与实际成形过程相一致的溫度场计算模型。要建立这样的溫度场计算

模型, 就要用到 ANSYS 有限元软件的高级分析技术中的‘生死单元’技术^[9, 10]。图 1 所示为‘生死单元’技术在求解激光快速成形金属薄壁零件溫度场中应用的示意图。如图所示, 当激光束扫描到金属薄壁零件第一层的位置 1 时, 可以看做是实际激光快速成形过程中, 在位置 1 处沉积一小段金属材料, 而此时, 由于激光束未扫描到第 1 层的位置 2, 3, 4 处, 所以在位置 2, 3, 4 处, 并没有沉积的金属材料。同样, 在第 2, 3 层处, 也没有沉积的金属材料。所以, 此时的溫度场求解区域为第一层的在位置 1 处的小段金属加上基板。当激光束扫描过第 1 层后, 金属薄壁零件的溫度场求解域则变为第一层的金属加上基板。那么怎样才能实现随着激光束的移动, 金属薄壁零件的溫度场求解域不断扩大呢? 我们用 ANSYS 软件的‘生死单元’技术来解决

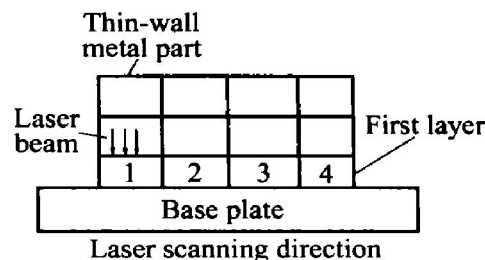


图 1 激光快速成形过程中‘生死单元’技术应用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ‘birth and death’ element technology applied for laser direct deposition

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G200067205-1)

收稿日期: 2002-09-23; 修订日期: 2003-01-16

作者简介: 席明哲(1969-), 男, 高级工程师, 博士。

通讯联系人: 席明哲, 博士; 电话: 010-62545533-2236; E-mail: ximzh@sohu.com

上述问题,即将模型中激光束没有扫描到的单元‘杀死’。但 ANSYS 程序并不是将‘杀死’的单元从模型中删除,而是将其刚度矩阵乘以一个很小的因子(因子缺省值为 1×10^{-6})。死单元的单元载荷将为 0,从而不对载荷向量生效。同样,死单元的质量、比热容和其他类似效果也设为 0 值,死单元的质量和能量不包括在模型求解结果中。当激光束扫描到先前被‘杀死’的单元位置时,则需要重新激活这些单元。当一个单元被重新激活时,其刚度、质量、单元载荷等将恢复其原始的数值。因此,通过 ANSYS 的‘生死单元’技术,就可以建立起与激光快速成形过程相一致的金属薄壁零件的温度场计算模型。

2 金属薄壁零件有限元模型的建立

由于所研究的金属薄壁零件温度场为三维问题,为能够准确反映薄壁零件温度场的分布规律,需要较小的网格尺寸,以获得足够的计算精度。但为了避免过多的网格划分,引起计算时间过长,在有限元网格划分时,在不锈钢薄壁零件处采用较细网格,而在模型其他区域采用较粗网格。同时,由于金属薄壁零件的几何对称性,故计算中只需建立金属薄壁零件的一半,采用 ANSYS 中的 Solid 70 六面体八节点热单元进行网格划分,如图 2 所示。所选基板材质为 45 钢,尺寸为 $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$;金属薄壁零件的材质为 316L 不锈钢,尺寸为 $30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ 。薄壁零件分为 6 层,每层厚 0.3 mm 。

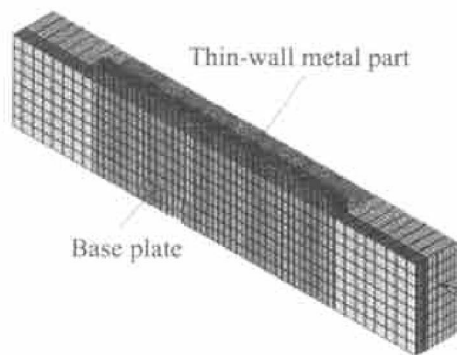


图 2 金属薄壁零件温度场有限元计算模型

Fig. 2 FEM model of temperature field in thin-wall metal part

3 金属薄壁零件温度场边界条件的确定

边界条件的准确确定是获得准确温度场的前

提。根据激光快速成形的原理可知,在金属薄壁零件成形过程中,激光束一直处于连续的移动状态,激光束位置为时间 t 和坐标系 x, y, z 的函数。图 3 所示为激光快速成形金属薄壁零件过程中,激光束移动轨迹示意图。由于研究对象为金属薄壁零件的温度场,激光束在 z 轴方向没有位移,在成形每 1 个单层时,激光束沿 x 轴进行正向或负向的移动,当 1 层成形完后,激光束沿 y 轴上升 1 个层厚。要确定成形过程中激光束的位置,则要知道成形 1 个单层激光束所要扫描的距离 $L(\text{mm})$,即金属薄壁零件的长度,以及激光束移动速度 $v(\text{mm/s})$ 、层号 I (即 I 为 1, 3, 5, ... 时,激光束沿 x 轴正向扫描, I 为 2, 4, 6, ... 时,激光束沿 x 轴负向扫描)、层厚 $H(\text{mm})$ 、每层扫描开始位置 L_s 、基板厚度 H_1 。知道上述参数后,就可以按照式(1)确定出激光快速成形过程中,激光束在任意时刻 t ($0 \sim L/v$) 的位置 $L(x, y, z)$:

$$\begin{cases} L(x, y, z) = L(L_s + v \times t, H_1 + H \times I, z) & (I \text{ 为 } 1, 3, 5 \dots \text{时}) \\ L(x, y, z) = L(L - v \times t, H_1 + H \times I, z) & (I \text{ 为 } 2, 4, 6 \dots \text{时}) \end{cases} \quad (1)$$

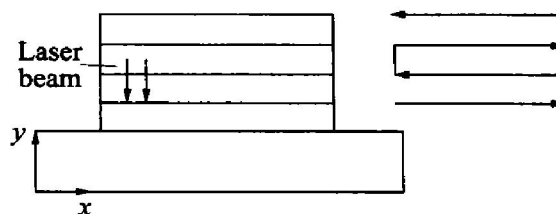


图 3 激光束移动轨迹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser beam trace

确定出激光快速成形过程中,激光束在任意时刻 t 的位置,就可以以此为根据,采用 ANSYS 软件的高级分析技术中的‘生死单元’技术,编写求解激光快速成形金属薄壁零件三维瞬态温度场的有限元程序。首先,建立有限元模型,然后将金属薄壁零件部分的单元杀死,将激光束扫描到的单元重新激活,按照式(2)加载。这样,就可以实现与实际快速成形过程相一致的有限元的温度场计算模型。

1) 激光束作用区域的热边界条件的偏微分方程为

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \eta \frac{Q}{\pi R_0^2} \quad R \leq R_0 \quad (2)$$

式中 η 为材料表面对激光的吸收率; R_0 为激光束半径; k 为导热系数; Q 为激光功率。

2) 激光束作用区域外的热边界条件。

本研究在激光束作用区域以外的模型表面设置 1 层表面单元 SURF152, 计算模型与周围空气的自然对流换热。环境温度 t_a 为 20℃, 空气的自然对流换热系数 h 为 10 W/(m²·℃)。其热边界偏微分方程为

$$\begin{cases} -k \frac{\partial t}{\partial y} = h(t - t_a) & (R \geq R_0) \\ -k \frac{\partial t}{\partial x} = h(t - t_a) \\ -k \frac{\partial t}{\partial z} = h(t - t_a) \end{cases} \quad (3)$$

3) 由于 45 钢板下表面与耐火砖相接触, 将 45 钢板下表面处理为绝热状态。

$$-k \frac{\partial t}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

4 计算模型中材料热物性参数

在所建立的计算模型中, 共包含 2 种材料, 即 316L 不锈钢和 45 钢, 其热物性参数见文献[10 - 12]。

5 316L 不锈钢薄壁零件瞬态温度场计算及分析

图 4 所示为 316L 不锈钢薄壁零件计算模型纵切面温度场分析示意图。如图所示, 316L 不锈钢薄壁零件尺寸为 30 mm×3 mm×1.8 mm, 按图 3 所示扫描方式进行扫描, 共扫描 6 层, 每层厚度为 0.3 mm。点 1、点 2 位于薄壁零件的第 3 层, 2 点间距 10 mm, 点 1 距离薄壁零件左端 10 mm。点 9、点 10 位于 45 钢基板的 1/2 厚度处, 在 x 方向上, 分别与点 1、点 2 位置相同, 点 3~ 8 分别位于薄壁零件各层, 各点距离薄壁零件左端 15 mm。

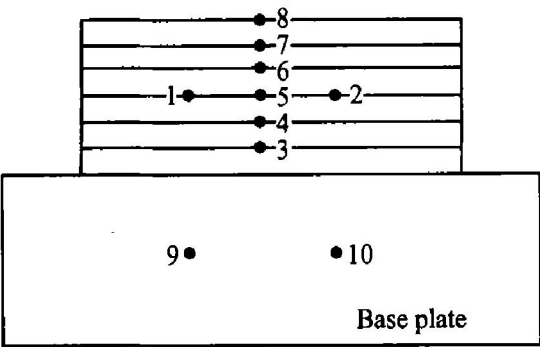


图 4 薄壁零件纵切面温度场分析示意图

Fig. 4 Schematic diagram analyzing temperature field in longitudinal section of thir-metal wall part

图 5 所示为在激光功率 900 W、扫描速度 3mm/s、光斑直径 3 mm 条件下, 不同时刻时不锈钢薄壁零件和基板内的温度场分布。图 5(a) 为成形时间 30 s 时的温度场云图。如图 5(a) 所示, 此时, 正在沉积薄壁零件的第 3 层(沉积 1 层所用时间为 11 s), 可以看出, 随激光束的移动, 薄壁零件中的温度场分布也呈‘运动态’。图 5(b) 为成形时间 60 s 时的温度场云图, 与图 5(a) 相比, 激光束扫描方向发生了改变, 薄壁零件中温度分布发生了明显变化。同时, 薄壁零件的高度也增加了(此时正在沉积薄壁零件的第 6 层)。对比图 5(a) 和(b) 可以发现, 随激光扫描时间的增加, 基板的温度升高, 熔池的温度也升高。

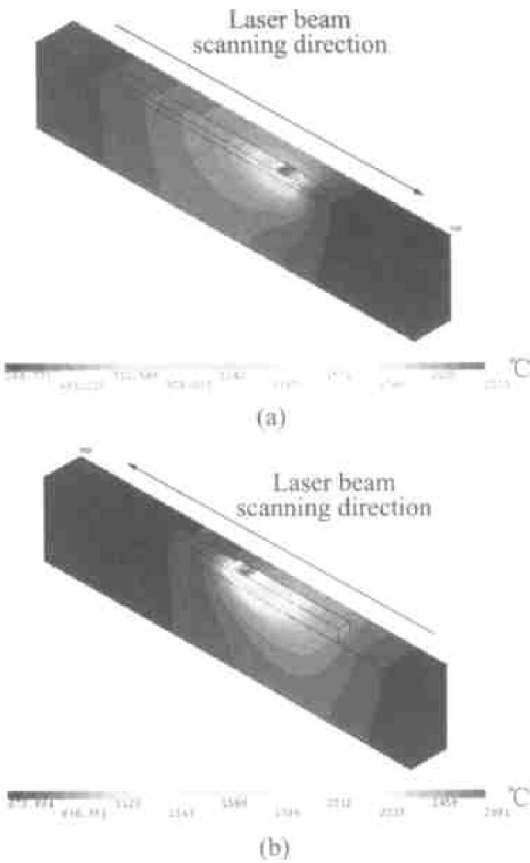


图 5 不同时刻下薄壁零件和基板内温度分布云

Fig. 5 Nephogram of temperature distribution in thirwall part and base plate at different time (a) —30 s; (b) —60 s

图 6(a) 为不锈钢薄壁零件纵切面上点 1、点 2 (图 4) 的温度随时间的变化曲线。如图所示, 在 0~ 24 s 这个时间段, 点 1 的温度一直保持在室温 20℃。这是因为在 0~ 24 s 内, 激光束未扫描到点 1, 其间点 1 保持‘死状态’, 因此点 1 温度没有变化。当薄壁零件的第 1、第 2 层成形完后, 开始进行薄壁零件的第 3 层成形(此时激光束沿 x 的正方向扫

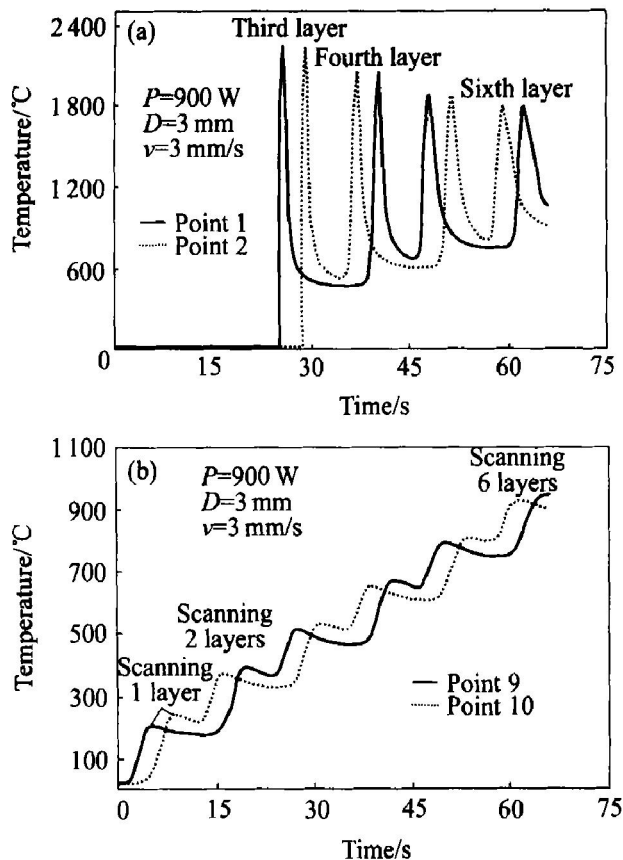


图6 薄壁零件和基板内定点温度随时间的变化规律

Fig. 6 Temperature of different points within thin-wall part and base plate at different time

描), 当激光束扫描到点1时, 点1所处的单元被‘激活’, 点1的温度迅速由室温升高到2205℃, 此时激光束还未扫描到点2, 因此点2温度依然保持在室温。随激光束的继续移动, 激光束离开点1并逐渐远离, 点1的温度迅速下降到590℃。激光束扫描到点2, 点2所处单元被‘激活’, 点2温度由室温升高到2215℃。随激光束离开点2, 点2温度下降。当薄壁零件的第3层成形完后, 开始薄壁零件的第4层成形(此时激光束沿 x 的负方向扫描), 所以激光束将先经过点2的上方。可以看到, 当激光束扫描过点2的上方时, 点2的温度由490℃快速升高到2020℃, 由于在薄壁零件的第3层上新沉积了第4层, 所以此时点2的温度要比在成形薄壁零件第3层时, 激光束扫描过点2时的温度要低。激光束继续移动到点1的上方, 点1的温度升高, 随激光束的离开, 温度又迅速下降。在成形薄壁零件第5、第6层时, 点1、点2温度随时间的变化情况如图6(a)所示。

图6(b)显示基板纵切面上点9、点10(图4)温度随时间的变化曲线。如图所示, 由于基板内的单元一直处于‘活状态’, 因此, 一开始进行薄壁零件

的成形时, 点9、点10的温度就开始变化, 在成形薄壁零件的第1层时, 随激光束沿 x 的正方向移动, 点9的温度逐渐升高, 当激光束经过点9的正上方时, 点9的温度上升到最高值206℃, 在激光束离开点9向点10移动时, 点9的温度开始下降, 而点10温度开始逐渐升高。在成形薄壁零件的第2~6层过程中, 点9、点10的温度总体处于上升状态, 其具体随时间变化情况见图6(b)。

图7所示为薄壁零件纵切面上点3~8(见图4)的温度随时间的变化曲线。如图所示, 在成型薄壁零件的第1层时, 当激光束没有扫描到点3时, 点3温度保持在室温没有变化, 而当激光束扫描经过点3时, 点3处的单元由‘死’变‘活’(与实际成形过程相对应, 表明此时在点3处沉积了1层金属), 点3处的温度迅速上升, 当激光束离开并逐渐远离点3, 点3的温度迅速下降。当激光束扫描过点4时(沿 x 负向扫描), 点4处的单元由‘死’变‘活’(相当于在点3的上方沉积了1层新的金属), 点4的温度迅速上升, 与此同时, 由于点3处于点4的正下方, 所以点3的温度也迅速上升, 但点3的温度最高值与点4相比要低。在成形薄壁零件的第3~6层的过程中, 点3~8的温度随时间变化的情况如图7所示。

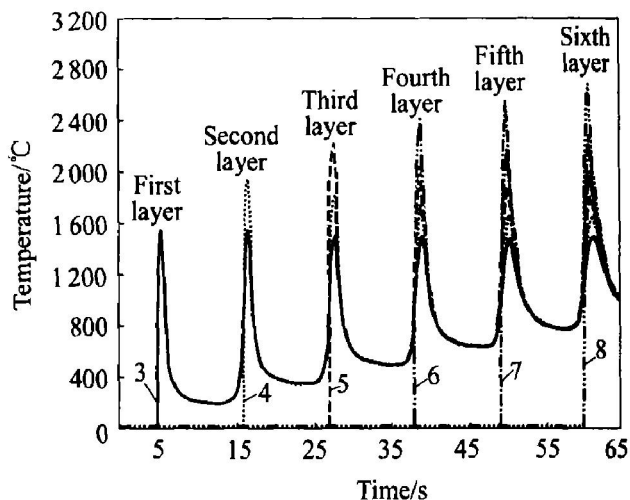


图7 薄壁零件内各点温度随时间的变化规律

Fig. 7 Temperature history of different points during laser direct deposition

6 薄壁零件横截面金相组织分析

图8为快速成形过程中薄壁零件内温度梯度分析示意图。图9(a)所示为功率1100W, 扫描速度3mm/s, 光斑直径3mm条件下(图8中当激光束扫描过点1时), x 和 y 方向温度梯度沿直线 H_1 的计算

结果分布情况。如图所示, 随与熔池表面距离的增加, y 方向温度梯度逐渐下降。同时可以看出, 与 x 方向温度梯度相比, y 方向温度梯度占绝对优势。由此可知, 在熔池冷却过程中, 热量主要沿 y 方向散失, 因而形成与基板相垂直的枝晶组织。图 9(b) 所示为激光功率对 y 方向温度梯度的影响情况, 可见, 随激光功率升高, y 方向温度梯度增大。

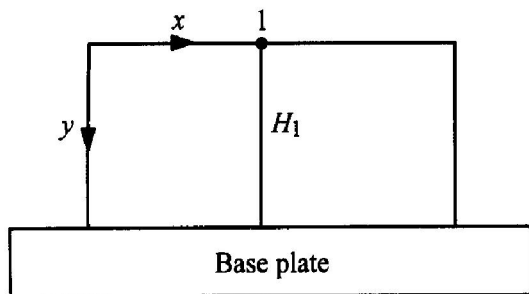


图 8 薄壁零件内温度梯度分析示意图

Fig. 8 Schematic diagram for temperature gradient analysis in thirwall part

图 10 (a) ~ (c) 所示分别为激光功率为 1 100, 900, 700 W (光斑直径 3 mm、扫描速度 3 mm/s) 条件下, 所成形的 316L 不锈钢薄壁零件 (薄壁零件尺寸为 30 mm × 3 mm × 1.8 mm, 由 6 层组成, 每层厚 0.3 mm) 横截面金相组织照片。可见, 3 种功率成形的薄壁零件横截面金相组织均由与基板相垂直的枝晶组成, 说明激光熔池在冷却过程中, 热量的散失主要沿垂直于基板 y 的负方向, 而在与基板平行的 x 方向, 热量散失较小。表明在激光熔池中, 沿 y 方向分布的温度梯度较大, 而沿 x 方向分布的温度梯度较小。对比图 10 (a) ~ (c) 可以发现, 当光斑直径、扫描速度一样时, 随激光功率升高, 薄壁

零件横截面的枝晶组织由短小而变得细长。这种组织上的变化表明, 激光熔池中沿 y 方向分布的温度梯度随激光功率的升高而变大。结合图 9 与图 10 可知, 实验结果与计算结果相符。

7 结论

1) 利用 ANSYS 有限元软件中的‘生死单元’

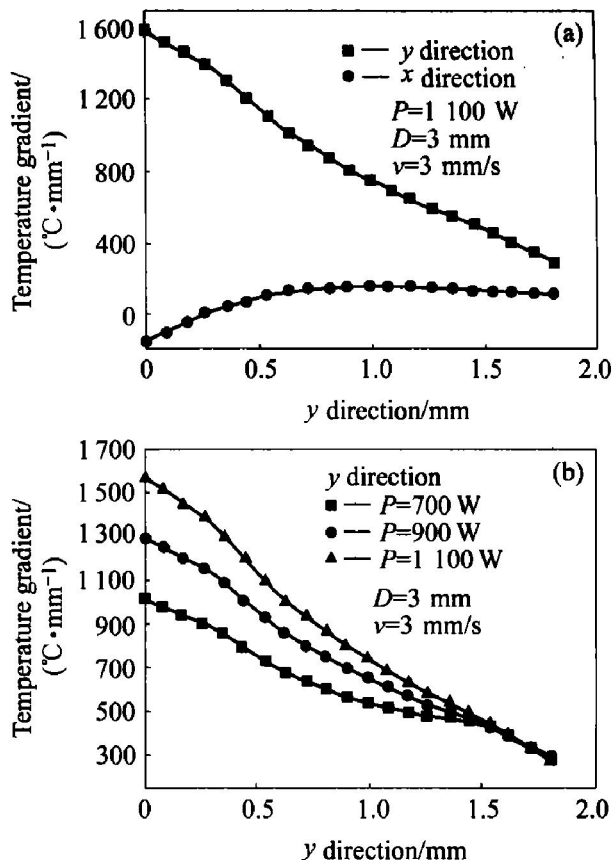


图 9 薄壁零件内温度梯度分布

Fig. 9 Temperature gradient distribution in thirwall part

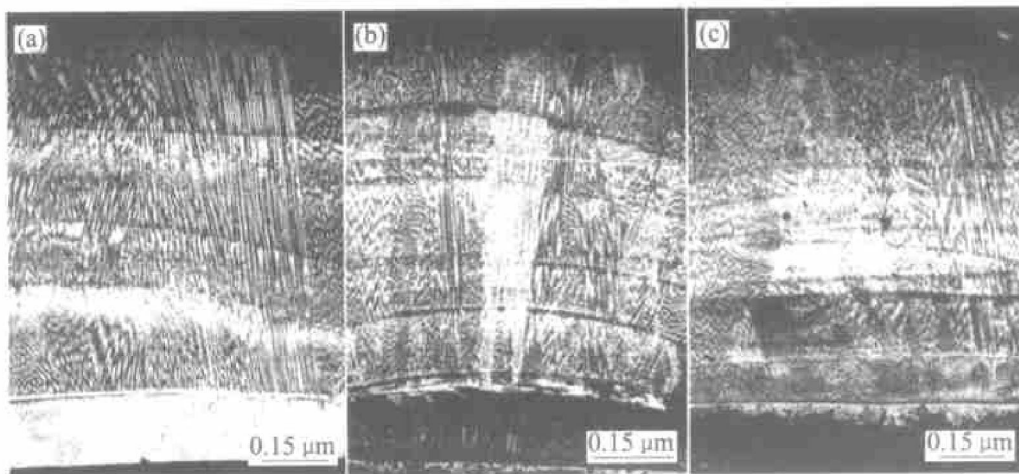


图 10 薄壁零件金相组织

Fig. 10 Microstructures of laser direct deposited thirwall part
(a) —1 100 W; (b) —900 W; (c) —700 W

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。

2) 计算表明,激光熔池中,与 x 方向温度梯度相比, y 方向温度梯度占绝对优势,表明在熔池冷却过程中,热量散失主要方向为 y 方向。

REFERENCES

- [1] Keicher D M, Smugeresky J E. The laser forming of metallic components using particulates materials[J]. JOM, 1997, 49(5): 51-54.
- [2] Magee J, Watkins K G, Steen W M. Advances in laser forming[J]. Journal of Laser Application, 1998, 10(6): 235-240.
- [3] Abbott D H, Archella F G. Laser forming titanium components, advanced materials and processes[J]. Materials and Manufacturing Processes, 1998, 15(5): 29-30.
- [4] Xue L, Ishlam M U. Free-form laser consolidation for producing metallurgically sound and functional components[J]. Journal of Laser Applications, 2000, 12(4): 160-166.
- [5] Mzumder J, Schiffer A, Choi J. Direct materials deposition: designed macro and microstructure[J]. Mat Res Soc Symp Proc, 1999, 54(2): 51-63.
- [6] Keicher D M, Smugeresky J E, Romero J A, et al. Using the laser engineered net shaping (LENS) process to produce complex component from a CAD solid model[J]. SPIE, 1997, 299(3): 91-97.
- [7] Zhang X D, Zhang H, Grylls R J, et al. Laser deposited advanced materials[J]. Journal of Advanced Materials, 2001, 33(1): 17-23.
- [8] 席明哲, 张永忠, 石力开. 工艺参数对激光快速成形 316L 不锈钢组织性能的影响[J]. 中国激光 A, 2002, 29(11): 1045-1048.
XI Ming-zhe, ZHANG Yong-zhong, SHI Li-kai. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316 SS fabricated by laser direct deposition[J]. Chinese Journal of Lasers A, 2002, 29(11): 1045-1048.
- [9] 王国强. 数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000. 267-272.
WANG Guo-qiang. Numerical Simulation Technology and Its Application in ANSYS[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2000. 267-272.
- [10] 冶金工业部钢铁研究总院. 合金钢手册: 下册(第 1 分册)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992. 3-45.
Chinese Iron-Steel Research Institute. Complex Alloy Steel Manual: Lower Volume(First Volume)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992. 3-45.
- [11] 谭真, 郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 4-78.
TAN Zhen, GUO Guang-wen. Thermophysics Nature of Engineering Alloy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996. 4-78.
- [12] 丛勉. 铸造手册(铸钢分册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 6-156.
CONG Mian. Casting Manual(Cast-Steel Division Manual)[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1991. 6-156.

Numerical simulation of 3 D transient temperature field in thin wall metal parts fabricated by laser direct deposition

XI Ming-zhe, ZHANG Yong-zhong, SHI Li-kai, GAO Shi-you

(Research Center for Nonferrous Metal Composites, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: By using 'birth and death' element technology of the ANSYS software, the FEM model simulating the real process of the metal thin wall fabricated by laser direct deposition was established to calculate the 3 D transient temperature field in the thin wall metal part. The temperature field at different time in the thin wall metal part can be understood by the FEM model. The calculated results show that, the temperature gradient along y direction within the metal thin wall is absolutely predominant compared with the temperature gradient along x direction, thus heat dissipates mainly along y direction during deposition. The higher the laser power, the greater the temperature gradient along y direction of thin wall metal part, therefore the finer the dendrites.

Key words: ANSYS software; temperature field; 316L stainless steel; numerical simulation

(编辑 陈爱华)