

[文章编号] 1004-0609(2002)03-0458-06

激光熔凝的数值模拟及其在激光定向凝固中的应用^①

刘振侠, 黄卫东, 杨 森

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

[摘 要] 建立了一套激光熔凝的数学模型和计算方法, 给出了两种条件下熔池深度与扫描速度的关系曲线。计算结果与实验值吻合良好, 验证了模型的有效性。根据计算分析了激光工艺参数与激光定向凝固组织的关系。据此通过工艺参数的匹配, 在熔池顶部得到了与扫描方向完全一致的凝固组织。

[关键词] 激光熔凝; 数值模拟; 定向凝固

[中图分类号] TG111.4

[文献标识码] A

高能密度的激光束以一定的速度扫过工件表面时, 由于吸收了高强度的能量, 在激光光斑的辐照区及其附近, 金属工件表面会形成激光熔池。在熔池的前端固态金属不断熔化, 而在熔池的后端熔化了了的金属又不断凝固, 由此熔池不断向前移动。熔池内部是熔化了了的液态金属, 在浮升力以及表面张力等力的驱动下液态金属会流动。激光功率及其分布、光斑形状及尺寸、扫描速度、工件材料物性等参数的不同会导致熔池中流场分布和温度分布的变化, 而不同的流场和温度场分布会产生不同的熔池形状, 进而造成不同的熔池固-液界面上的温度梯度分布。在熔池的后端固液界面上的温度梯度对于晶体的生长有直接的影响^[1~3]。

晶体的生长方向与生长界面上的温度梯度方向有着重要的联系。尤其对于胞晶的生长, 因其主要受热流方向的影响, 所以我们可以控制熔池后端固-液边界的温度梯度的方向, 并使合金生长处于胞晶区来达到合金的定向凝固。

实际上, 熔池的尺寸是非常小的, 根据不同的工艺参数其量级一般在 1 mm^2 左右^[4~6], 而且熔池内部的温度非常高, 一般在 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 甚至更高, 加之熔池本身位置在不断变化, 所以通过实验的方法测量熔池内的流场和温度场是非常困难的, 甚至是不可能的。因此激光熔凝的数值模拟在激光定向凝固的研究中具有特别重要的意义。

本文作者采用焔法对激光熔池内的液态金属和熔池外的固态金属建立了统一的控制方程, 用 SIMPLE 方法进行求解, 得到了熔池形状的有关参数。通过与实验测得的熔池尺寸进行对比验证了模

型的有效性, 在此基础上对与此相对应算例条件下的定向凝固问题进行了初步的研究。数值模拟与实验进行了对比, 结果比较令人满意。

1 物理模型

1.1 基本假设

如图 1 所示, 功率为定值 P 的高强度激光光束以固定的速度 U 沿 x 轴方向扫过金属表面, 产生的高温使材料熔化, 在金属表面形成熔池。在本文计算模型中我们作如下假设。

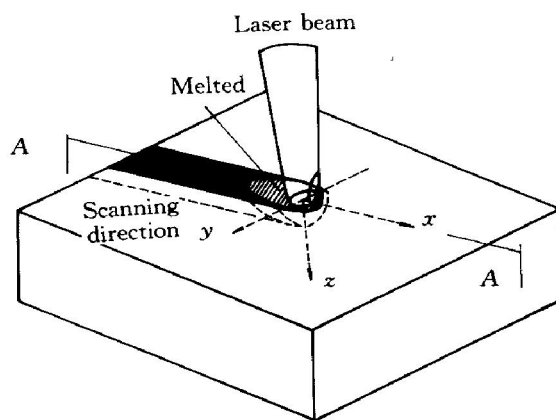


图 1 物理模型示意图

Fig. 1 Sketch map of physical model

- 1) 熔池内为牛顿流体;
- 2) 为不可压缩流体;
- 3) 材料的物性参数值不随温度变化且固液态条件下取值相同, 只在考虑浮升力的作用时认为密

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划项目(G2000067205-3); 航空基金重点资助项目(97z53002)

[收稿日期] 2001-07-16; [修订日期] 2001-10-31

[作者简介] 刘振侠(1963-), 男, 副教授, 博士研究生。

度随温度变化, 亦即采用 Boussinesq 假设;

4) 熔池内流动为层流;

5) 熔池顶部为平面;

6) 流动的驱动力只考虑浮升力和熔池自由表面的表面张力。

1.2 控制方程和边界条件

稳态时, 描述工件上的流场和温度场的控制方程可以写成如下形式^[7]:

连续方程

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\rho(V \cdot \nabla)V = -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] - \rho g(T - T_0) \quad (2)$$

能量方程

$$V \cdot \nabla(H - p) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

式中 V 是速度, ρ 为密度, p 为压力, τ 为剪切力, β 为材料的体积热膨胀系数, g 为重力加速度, T 为绝对温度, T_0 为参考温度, H 为单位体积的热焓, k 为导热系数。

边界条件如下:

1) 工件上表面($z = 0$)

$$w = 0$$

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial \gamma}{\partial T}$$

$$\mu \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial \gamma}{\partial T}$$

在光斑区

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \dot{q} \quad (r \leq a)$$

在其他区域

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_a) + \epsilon(T^4 - T_a^4) \quad (r > a)$$

2) 工件底面($z = \delta$)

$$u = U$$

$$v = w = 0$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_a) + \epsilon(T^4 - T_a^4)$$

3) 扫描轨道中心面($y = 0$)

$$v = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

4) 工件侧面($y = \pm l$)

$$u = U$$

$$v = w = 0$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T - T_a)$$

5) 光斑的远前方($x \rightarrow -\infty$)

$$T = T_0$$

$$u = U$$

$$v = w = 0$$

6) 光斑的远后方($x \rightarrow \infty$)

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$u = U$$

$$v = w = 0$$

上述式中 u, v, w 分别是速度 V 在 x, y, z 方向上的投影; μ 是液态金属的粘性系数; γ 是表面张力; $\dot{q}$ 是激光功率; ϵ 为材料表面对激光的吸收系数; a 是光斑直径; α 为表面换热系数; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; e 为材料表面总辐射系数; T_a 为环境温度; l 为工件宽度之半, 在本计算中假设工件 y 尺度很大, 故可认为关于 $A-A$ 面成对称, 且在 $y = \pm l$ 因距扫描中心线较远, 温度较低, 其辐射可以忽略; U 为激光束扫描速度。

2 求解方法

本文所求解的控制方程具有两大特点: 其一, 方程组是按稳态条件写出来的, 激光光斑的移动或工件的反向移动通过边界条件反映出来, 即其移动速度隐含在 V 中; 其二, 固态和液态的方程形式是统一的。因此求解的过程不需要追踪熔池界面的位置。另一方面, 固液两相存在着两大区别, 一是液相存在流动, 而固相没有; 二是液固两相的焓不同。因此, 还需要引入焓—温度, 粘性—温度两个关系。

2.1 焓—温度关系

焓与温度的关系主要考虑液相有凝固潜焓, 而固相没有。

对于式(3)中的焓 H , 有^[8]

$$H = h + \Delta H$$

式中 $h = c_p T$ 为显焓, $\Delta H = f(T)$ 为潜焓。当考虑糊状区时, 潜焓与糊状区的液相分数有关,

$$f(T) = \begin{cases} L & (T \geq T_l) \\ Lf_1 & (T_l > T \geq T_s) \\ 0 & (T \leq T_s) \end{cases}$$

式中 T_l 是液相温度, T_s 是固相温度, f_1 为液相分数, L 为相变焓。当不考虑糊状区, 即采用等温线凝固时(本文方法),

$$f(T) = \begin{cases} L & (T \geq T_m) \\ 0 & (T < T_m) \end{cases}$$

式中 T_m 为等温熔点。

这样处理之后,以焓的形式表达的能量方程式(3),在液、固两相都能使用。

2.2 粘性—温度关系

方程(2)是由 N-S 方程推导出来的,在液相中可以直接应用,而在固相中实际上没有流动存在,故不能直接应用。我们通过引入有效粘性的概念,来统一液固两相的运动方程。

有效粘性是由粘性—温度关系得到的,这一关系类似于焓—温度关系:

$$\mu_{\text{eff}} = \begin{cases} \mu & (T \geq T_l) \\ C(1-f_l) + \mu & (T_s < T < T_l) \\ C & (T \leq T_s) \end{cases}$$

式中 C 为一个很大的数,其取值视具体计算情形而定,既不能太大不易收敛,也不能太小产生物理上的不真实解^[9],本文中 $C = 10^8$ 。当采用等温线凝固时,

$$\mu_{\text{eff}} = \begin{cases} \mu & (T \geq T_m) \\ C & (T < T_m) \end{cases}$$

可以看出,在方程(2)中采用有效粘性后,液相中方程不变($\mu_{\text{eff}} = \mu$),固相中由于 $\mu_{\text{eff}} = C$ 为一个很大的值,就使得流动速度($V - U$)衰减为非常小(近似为零),这样方程(2)既可以用来描述液相也可以描述固相,达到了两者的统一。

2.3 数值求解

基于本文采用的控制方程的特点,以及上述焓—温度、粘性—温度关系的引入,使得计算过程不需要人为追踪固—液相界面的位置,从而使求解更加容易。本文采用 SIMPLE 算法^[10]求解速度场。为了适应流场及温度梯度的变化,采用变间距网格,靠近激光光斑的位置用细网格,远离光斑的位置用粗网格。这样,既可以提高计算精度也可以加快收敛速度。

3 结论和分析

为了验证方法的可靠性,计算了两种条件下激光熔凝的熔池深度,并通过实验对其进行了测量。实验一:基体材料为 Al-1.2% Mn,激光功率为 1.5 kW,光斑直径为 0.33 mm;实验二:基体材料为 Al-3.2% Mn,激光功率为 1.5 kW,光斑直径为 0.3 mm。

图 2 和图 3 所示是两种不同材料熔池深度与扫描速度之间的关系。可以看出计算与实验的吻合程

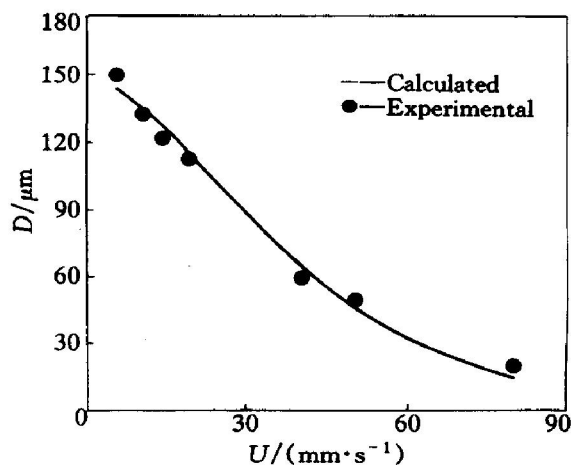


图 2 熔池深度与扫描速度的关系

Fig. 2 Relationship between depth of melting pool and scanning velocity (Al-1.2% Mn)

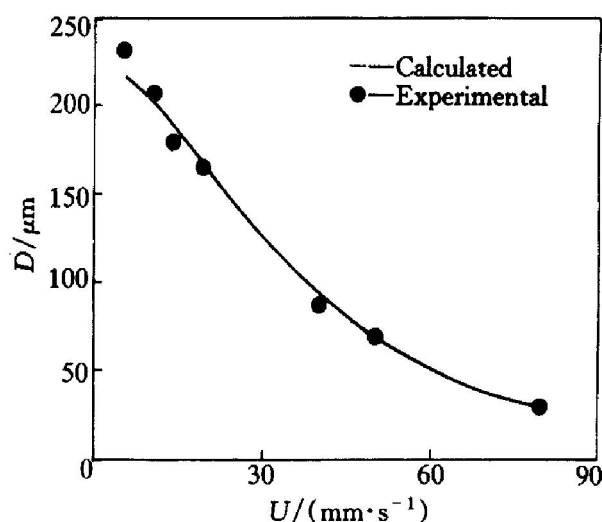


图 3 熔池深度与扫描速度的关系

Fig. 3 Relationship between depth of melting pool and scanning velocity (Al-3.2% Mn)

度还是令人满意的。由此可以验证本文计算的可靠性。

图 4 是计算得到的 Al-1.2% Mn 合金在激光输出功率为 3.25 kW,扫描速度为 24 mm/s 时熔池纵截面(A-A 面)固液界面上的温度梯度分布图,其 x 轴是沿着激光扫描方向离开光斑中心的距离, z 轴是工件内某一点离开激光辐照表面的距离(见图 1 坐标)。通过该图可以预见在熔池底部胞晶组织将垂直向上生长,随着离开熔池底部距离的增加,其生长方向将逐渐发生偏转,到熔池顶部则变成与激光扫描方向基本一致。

在一定条件下熔池顶部的温度梯度方向变得与激光扫描速度方向一致,这一事实使得有可能发展

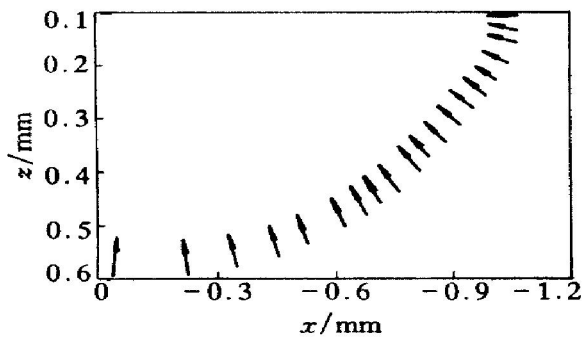


图 4 熔池固液界面上温度梯度的方向

Fig. 4 Distribution of temperature gradient on solid/ liquid interface of melting pool
(Al1.2% Mn, $P= 3.25\text{ kW}$, $U= 24\text{ mm/s}$)

出一种材料的激光定向凝固技术，其特点是具有常规定向凝固技术不具备的超高温温度梯度和很快的凝固速度，这对发展新材料及凝固理论研究都具有重要意义。

图 5 所示为在同样工艺条件下得到的 Al1.2% Mn 合金的熔池纵截面金相组织照片。可见其生长方向与计算分析结果一致。

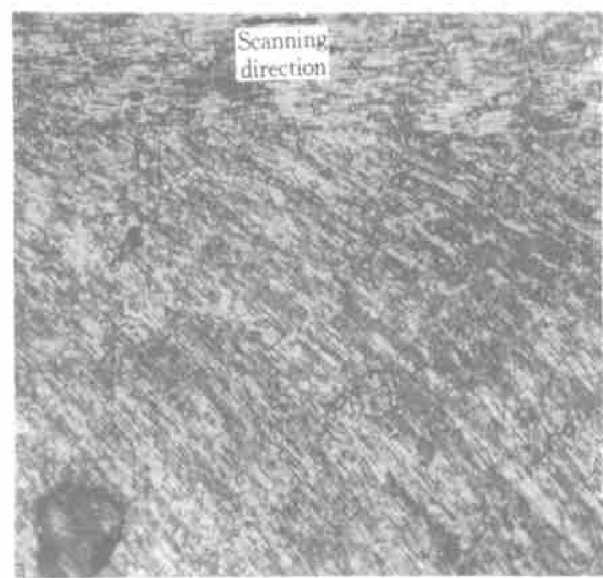


图 5 熔池纵截面金相组织照片

Fig. 5 Microstructure photograph of longitudinal section of melting pool
(Al1.2% Mn, $P= 3.25\text{ kW}$, $U= 24\text{ mm/s}$)

为了进一步研究激光熔凝各工艺参数与定向凝固组织的关系，计算了 Cu-31.4% Mn 合金在相同的激光功率不同的扫描速度下和相同的扫描速度不同的激光功率下，纵截面上熔池固液界面上温度梯度的分布。图 6 所示为计算得到的 Cu-31.4% Mn 合金在激光输出功率为 1.5 kW，扫描速度分别为 5，19，30 mm/s 时，熔池中固液界面处温度梯度分布。图 7 所示是计算得到的 Cu-31.4% Mn 合金在扫描

速度为 24 mm/s，激光输出功率为 1.5，2.0，2.75 kW 时，熔池中固液界面处温度梯度分布。由图可见，功率一定时，在扫描速度较低时熔池表面的温度梯度方向与扫描速度方向一致，随着扫描速度的增加，熔池顶部温度梯度的方向明显偏离扫描速度方向，因而当扫描速度增大后，在熔池顶部将不再能得到与扫描速度方向一致的定向凝固组织。要想改变温度梯度的方向，需要适当增大功率。同样，在一定的扫描速度下，功率太小时，熔池顶部的温度梯度方向不与扫描速度的方向平行，因此也不能得到与扫描速度方向一致的定向凝固组织。通过图 6 和图 7 我们可以看出，要想在熔池顶部获得与扫描速度方向一致的温度梯度，必须要求激光功率与

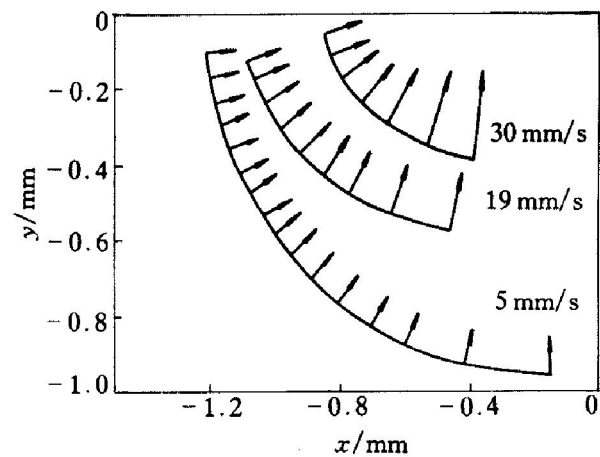


图 6 相同的激光功率不同的扫描速度下纵截面上熔池界面温度梯度分布

Fig. 6 Distribution of temperature gradient on solid/ liquid interface at various scanning velocity
($P= 1\,500\text{ W}$, Cu31.4% Mn)

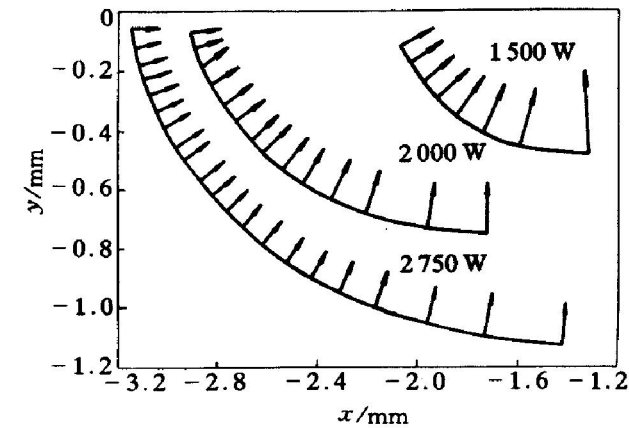


图 7 相同的扫描速度不同的激光功率下纵截面上熔池界面温度梯度分布

Fig. 7 Distribution of temperature gradient on solid/ liuqid interface at different laser power
($U= 24\text{ mm/s}$, Cu31.4% Mn)

扫描速度相互匹配。

据此对激光功率与扫描速度进行调整匹配,并在基体 Cu-31.4% Mn 进行了实验。图 8 是基体为 Cu-31.4% Mn, 激光功率 $P=1.0\text{ kW}$, 扫描速度 $U=5.1\text{ mm/s}$ 时熔池纵截面组织。由图可看出,重熔区组织生长非常规则,从熔池底部到顶部胞晶组织生长方向受熔池中温度梯度场的影响逐渐偏转,最

可以得到与扫描方向完全一致的定向组织。

4 结论

1) 建立了一种激光表面熔凝的数学模型及计算方法,与实验测得的熔池深度的比较证明了数值模拟的有效性。

2) 初步分析了激光定向凝固与工艺参数的关系,通过激光功率与扫描速度的匹配,在熔池顶部中心处得到了与扫描速度方向一致的凝固组织。

[REFERENCES]

- [1] Kurz W, Fisher D J. Fundamentals of Solidification [M]. Aedermannsdorf Tech, 1989. 5- 8.
 - [2] Chong E, Wilcox W R. Control of interface shape in the vertical Bridgman-Stockbarger technique [J]. J Crystal Growth, 1974, 21: 135.
 - [3] Flemings F C. Solidification Processing [M]. New York: Mcgraw-Hill, 1974.
 - [4] Chan C L, Mazumder J, Chen M M. Three-dimensional axisymmetric model for convection in laser-melted pools [J]. Materials Science and Technology, 1987, 4: 306-311.
 - [5] Hoadley A F A, Rappaz M, Zimmermann M. Heat-flow simulation of laser remelting with experimental validation [J]. Metallurgical Transactions B, 1991, 22B: 101-109.
 - [6] Paul A, Debroy T. Ferr surface flow and heat transfer in conduction mode laser welding [J]. Metallurgical Transactions B, 1988, 19B: 851- 858.
 - [7] Kou S, Wang Y H. Three-dimensional convection in laser melted pools [J]. Metallurgical Transactions A, 1986, 17A: 2265- 2270.
 - [8] Voller V R, Parkash. A fixed grid numerical modeling methodology for convection-diffusion mushy region phase change problems [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1987, 30(8): 1709- 1718.
 - [9] 张寅平, 胡汉平, 孔祥冬, 等. 相变储能 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1996.
 - [10] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- ZHANG Yin-ping, HU Han-ping, KONG Xiang-dong, et al. Energy Storage by Phase Change [M]. Hefei: University of Science & Technology of China Press, 1996.
- TAO Wen-quan. Numerical Heat Transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.

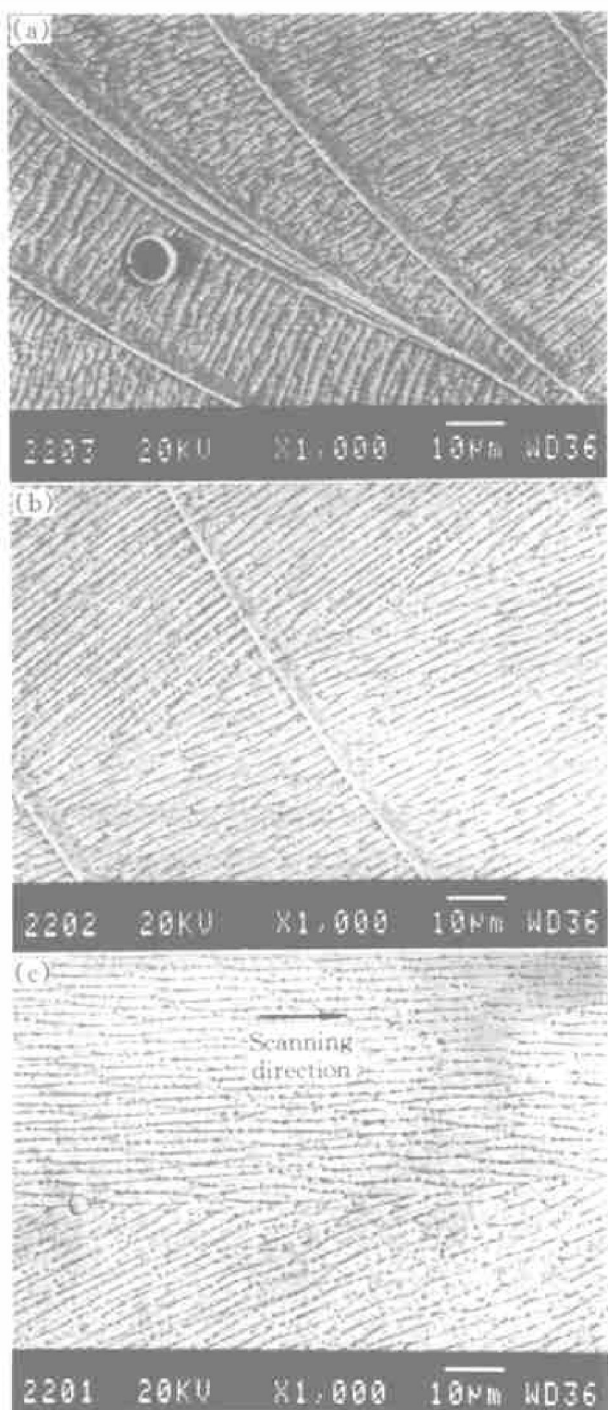


图 8 熔池纵截面组织

Fig. 8 SEM photos of longitudinal section

(Cu-31.4% Mn, $P=1.0\text{ kW}$, $U=5.1\text{ mm/s}$)

(a) —Bottom; (b) —Center; (c) —Top

后在顶部变得完全与激光束的扫描方向一致。可见,通过激光功率与扫描速度的匹配,在熔池顶部

Numerical simulation of laser surface re-melting and its use in laser directional solidification

LIU Zhen-xia, HUANG Wei-dong, YANG Sen

(State Key Lab of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, China)

[Abstract] A model and a numerical method of laser surface re-melting were established. The relationship between the depth of laser melted pools and the laser scanning velocity was calculated for two base materials. The calculations agree with the experiments well, and these validate the model. The relationship between the laser processing parameters and laser directional solidification morphology was analyzed by the model. Based on the model, the morphology with the growth direction same with scanning direction was obtained at the top of the melting pool through the match among the processing parameters.

[Key words] laser re-melting; numerical simulation; directional solidification

(编辑 袁赛前)