

激光金属熔覆成形过程中温度场演化的三维数值模拟

张冬云 吴 瑞 张晖峰 刘 臻

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 采用三维瞬态模型模拟了同轴送粉激光金属熔覆成形(LMD)技术制作直壁墙过程中温度场的演化,被加工的材料为定向凝固镍基高温合金 Rene80。首先模拟了粉末在下落过程中与激光的相互作用,并分析了其对熔池温度场可能造成的影响,其次模拟了直壁墙成形过程中温度场的演化。模拟过程考虑了固液相变和液体流动对熔池温度场变化的影响,模拟过程所用的工艺参数为制作直壁墙实验中获得的最优参数。通过模拟获得的熔池温度场演化过程再现了成形过程中熔池形貌的变化及成形过程的不稳定性,模拟计算的温度场变化规律与实验测得结果相符。

关键词 激光技术; 激光金属熔覆成形; Rene80 定向凝固镍基高温合金; 温度场; 三维数值模拟

中图分类号 TG174.4; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0503006

Numerical Simulation of Temperature Field Evolution in the Process of Laser Metal Deposition

Zhang Dongyun Wu Rui Zhang Huifeng Liu Zhen

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract A comprehensive three-dimensional transient model is developed for the evolution of the temperature field during the vertical wall manufacturing process using coaxial laser metal deposition (LMD), the material manufactured is directional solidification (DS) superalloy Rene80. The interaction between laser and powder during the powder falling process is simulated, and its possible effect on the temperature field of molten pool is analyzed. After that, the evolution of temperature field during the vertical wall manufacturing process is studied. By numerical simulation, the change of phase (solid/liquid, and mushy zone) and the liquid flowing are considered and the parameters are from optimized vertical wall manufacturing experiments. The results reproduce the shape changing of the molten pool and the instability of laser metal deposition process. The changing rule of temperature field is in conformity with that of real vertical wall manufacturing experiment.

Key words laser technique; laser metal deposition; directional solidification superalloy Rene80; temperature field; three-dimensional numerical simulation

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 240.6700

1 引 言

定向凝固(DS)镍基高温合金 Rene80 是一种沉淀强化铸造高温合金,广泛用于制造喷气发动机的一级和二级涡轮叶片和发电厂大型燃气轮机,定向凝固 Rene80 镍基高温合金由于消除了与应力轴垂直的横向晶界,与普通铸造镍基合金 Rene80 相比,其拉伸性能和蠕变寿命分别提高了 10%~15% 和 1~3 倍^[1]。激光金属熔覆成形(LMD)技术是一种通过逐点逐层熔化沉积添加材料、快速制造或者修复具有复杂形状金属近终形零件的柔性制造技术。由于熔池具有超高的温度梯度及快速凝固的特点,成形过程中可通过调节激光功率、送粉速度、激光扫描速度等重要参数实现对热输入量、熔池形貌、熔池凝固速度、温度场等的控制,是理想的定向凝固高温合金零部件修复制造技术^[1-2]。

从激光熔覆成形制造直壁墙的过程中温度场的演化可以获得熔池凝固过程中形核、核长大以及组织的

收稿日期: 2014-12-23; 收到修改稿日期: 2015-01-16

基金项目: 北京市自然科学基金重点研究专题(Z140002)

作者简介: 张冬云(1969—),女,博士,副教授,主要从事激光快速成形和激光焊接方面的研究。E-mail: zhangdy@bjut.edu.cn

形成机制的相关信息,对凝固组织的形成和性能具有指导意义。Wang等^[3-5]在激光熔覆成形过程的研究中表示,温度的快速变化会产生热应力及其他应力,而这些应力则会导致工件内部产生相应的裂纹。

目前对 Rene80 镍基合金粉末激光快速成形研究很少,而温度场及凝固速度对于 DS Rene80 镍基合金的凝固及组织形成具有非常重要的意义。席明哲等^[1]对 Rene80 镍基高温合金在激光快速成形过程中组织和裂纹形成的机理做了详细的描述,并解释了激光快速成形 Rene80 镍基合金厚壁件中的裂纹形成与温度变化有着重大的关系。日本学者 Yorikawa^[6]分析了在温度快速变化下,Rene80 镍基合金热疲劳裂纹的扩展趋势。

国内外学者近些年来对成形过程的温度场以及熔池形状等方面进行的研究较多,他们大多通过建立二维或三维数值模型计算激光熔覆成形过程的温度场和熔池形状以及直壁墙成形过程温度场的演化情况。但是研究的重点、研究的过程不同,结果也有很大的差别。Hoadley等^[7]建立了一个二维模型模拟激光熔覆成形过程中粉末的注入过程,计算粉末下落过程的准稳态温度值,然后将其用于熔池中粉末的吸热熔化和熔池的形状计算。Picasso^[8]通过一个简单但是实用的三维模型即给定熔覆高度来计算熔池的形状。Huang^[9]研究了一个三维有限元模型,计算熔池中固液相变系统中的液体流动以及热量传输。刘昊^[10]基于生死单元法建立了三维数值模型计算瞬态温度场以及熔池几何形貌,但是上述模拟计算没有考虑熔池内液体流动的情况。华亮等^[11]基于生死单元法建立三维数值模型,在考虑熔池液体流动及熔池相变的情况下计算瞬态温度场及残余应力,以此来验证激光熔覆参数的可靠性。Shao^[12]采用三维有限元模型对不锈钢粉末激光快速成形过程中温度场的变化进行了模拟,不仅计算了粉末下落过程准稳态温度值,而且计算了熔池中固液相变系统中的液体流动以及热量传输,并且对熔池的形状也做了计算。然而,熔覆成形过程是一个多层累加的过程,上述研究仅仅是对成形过程中熔池的某个瞬态做了数值模拟,三维零件成形过程中,熔池温度场及形状随着时间、层数的累加而发生的变化却没有讨论。Hofmeister等^[13-14]虽然通过建立三维热传导模型计算了采用激光近形(LENS)技术制作直壁墙过程中的温度演化,但没有考虑材料参数与温度的关系以及熔池中相变与液体流动对熔池温度场变化的影响。Costa^[15]耦合热传导分析和相变动力学建立了热-动力模型用以估算成形层数为 10 层的 SS420 直壁墙的微观结构和硬度分布。Neela^[16]建立三维热传导模型计算直壁墙 LENS 成形过程温度的演化和熔池的形状,但上述两个模型均没有考虑粉末下落过程中与激光的作用及其对成形过程的影响,也没有考虑熔池内液体流动对熔池形状的影响。

本文在考虑粉末下落过程中与激光的相互作用、熔池中固液相变和液体流动的影响下采用三维瞬态模型计算了多层成形过程中熔池的温度场,模型再现了成形过程中直壁墙内温度的演变过程以及激光熔覆成形过程初期的不稳定性。最后采用 Rene80 镍基合金粉末进行对比实验,模拟结果与实验结果相符。

2 模型的建立

激光熔覆成形技术的基本原理^[17]是:首先在计算机中绘制实体零件的三维 CAD 模型,然后将该模型按照一定厚度进行切片处理,这样复杂的三维零件就离散为一系列的二维平面图形,控制系统由此获得扫描轨迹指令。通过调节工艺参数,将激光束会聚成较小的光斑作用在金属基体上,并在基体上沿着一定的方向运动,被辐照的基体部分熔化成为熔池,同时借助送粉系统将金属粉末经送粉喷嘴输送到喷嘴末端与基体之间,在这里形成激光、粉末、基体和保护气体共同存在的相互作用区。激光与粉末、基体相互作用形成熔池,激光离开刚刚辐照的位置,熔池快速冷却凝固形成一个金属点。激光通过数控系统的控制沿着给定的扫描路线进行扫描,通过搭接逐点逐层熔覆堆积出任意形状的三维实体零件。

在同轴送粉激光熔覆成形过程中,激光通过粉末喷嘴的中间通道垂直向下辐照,粉末在载气/保护气与重力的共同作用下沿着送粉喷嘴中的粉末通道下落(图 1)。粉末束与激光束共同聚焦于基体表面,粉末在到达基体前,与激光之间已经发生了短时间的相互作用。

在直壁墙制作过程中,喷嘴沿着水平方向移动,激光辐照过的基体表面或者成形路径将发生熔化形成熔池,由于粉末的注入及熔化增加了熔池的高度,在激光移走后熔池迅速冷却形成具有一定高度的成形路径。在实验过程,激光在水平方向上完成一定长度的路径后,又回到开始的位置,并向上运动一个层厚的距离,然后沿着相同的扫描路径进行下一道的扫描,如此反复多次,最终形成一道直壁墙(图 2)。

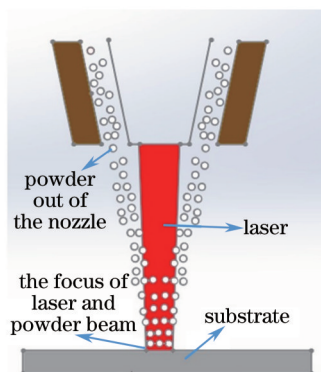


图1 粉末下落示意图

Fig.1 Powder falling process

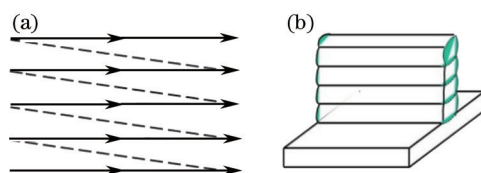


图2 直壁墙制作过程中的激光扫描路径。(a) 激光扫描路径; (b) 采用LMD制作的 Rene80 直壁墙
Fig.2 Vertical wall manufacturing process and scanning pattern of laser. (a) Laser beam scanning pattern; (b) as-deposited Rene80 vertical walls with LMD

2.1 基本假设

为了便于计算,对激光熔覆成形过程的温度场模拟采用了以下基本假设:

1) 激光熔覆成形实验中所用粉末的粒径范围为 45~75 μm 之间,这里假设所用的粉末粒子尺寸相同,在激光与粉末的相互作用区内粉末下落的过程中粒子在垂直方向上按照速度关系呈一定规律分布。而在激光与粉末作用区任意横截面上呈均匀分布,并符合公式:

$$\rho_0 v S \Delta t = m_{in} \Delta t / 60, \quad (1)$$

式中 v 为粉末从送粉喷嘴末端出来时的运动速度, Δt 为任意瞬间(即 0.01 s 时间范围内), S 为送粉喷嘴末端处的横截面面积, m_{in} 为送粉速率。采用上述公式可以求出送粉喷嘴末端处粉末密度 ρ_0 。通过计算可得,在以光轴为中心、粒径尺寸为厚度的一个粉末通道纵截面微体积内,平均每排有 3 个粉末粒子。因此,在粉末到达基体之前的温度场模型中,本文追踪其中任意一排 3 个粒子并计算其在到达基体前产生的温度变化。

2) 激光光束强度 $I(r)$ 为高斯分布,表示为

$$I(r) = \frac{2P}{\pi R_b^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{R_b^2}\right), \quad (2)$$

式中 P 为激光功率, R_b 为光束半径, r 为距激光束中心的距离。

3) 在直壁墙制作过程中,由于粉末利用率的不确定性,无法精确确定熔化粉末的质量,按照实验数据,成形层的高度为 0.2 mm,可以把熔化粉末质量近似为 0.2 mm 高度镍基合金质量(熔覆道的长度和宽度已经根据实验确定)。

2.2 粉末到达基体前的温度分布

粉末下落过程中与激光的相互作用对成形过程的影响一直都是研究的热点。不同的材料、不同的实验条件下会产生很大的差异。另外粉末材料对激光的吸收对其也有较大的影响。在这短暂的粉末粒子与激光的相互作用中,粉末是否熔化对成形过程中熔池的温度场以及液体流动有着重要的影响。建立一个近似模型用以追踪粉末粒子下落到基体前的温度变化,以此为基础分析粉末在下落过程中与激光的相互作用以及对成形过程中熔池温度演化的影响。

2.1.1 理论模型

综合考虑激光辐照、气体对流以及相变,粉末粒子在达到基体前的温度场可以通过能量守恒定律得到^[12]:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \eta I \frac{A_p}{4} - m_p L_f \frac{df}{dt}, \quad (3)$$

式中 m_p 为粉末粒子质量, A_p 为粉末粒子表面积, c_p 为粉末比热, h 为散热系数, T 为温度, T_∞ 为保护气体温度, T_p 为粉末温度, η 代表吸收率, I 为激光功率密度。 $m_p \times c_p \times dT \times L_f \times df$ 为粒子能量的变化, 其中 $m_p \times L_f \times df$ 代表粒子固液相变引起的能量变化。 $-h \times A_p \times (T_\infty - T_p) \times dt$ 为牛顿热方程中散去的热量, $\eta \times I \times A_p \times dt/4$ 为吸收的能量。其中

$$f = \frac{m_l}{m_p} \begin{cases} 0, & T_p \leq T_{sol} \\ \frac{T_p - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}}, & T_{sol} < T_p < T_{liq}, \\ 1, & T_p \geq T_{liq} \end{cases} \quad 0 \leq f \leq 1. \quad (4)$$

粉末熔化的过程中, f 从 0 状态变为 1 状态, 即从固态(T_{sol})转变为液态(T_{liq})。

2.2.2 计算方法

在同轴送粉激光熔覆系统中, 粉末喷嘴轴心与光束中心重合。由于中心对称性, 仅需对任意一个经过喷嘴轴心的粉末通道纵截面微体积内的粉末粒子进行模拟, 其结果就可以代表整个空间内粉末粒子的结果。按照激光辐照范围将激光功率密度 I 定义为分段函数, 没有激光辐照的区域 I 为 0, 有激光辐照的区域 I 为(2)式的高斯函数。在数值计算中, 将下落过程时间离散化为一系列较短的时间载荷步处理, 上一载荷步的温度场计算结果作为下一载荷步计算的初始条件, 利用移动网格模型使每一步都自动重新划分网格, 形成一个动态模拟过程。

2.2.3 模型描述

模型采用 COMSOL Multiphysics 软件中的微分方程模块对粉末下落过程进行模拟, 网格划分如图 3 所示。网格划分方式采用自由划分四边形网格, 网格最大和最小尺寸都为 $1 \mu\text{m}$ 。采用移动网格让粉末网格随着粉末运动而运动。所用的送粉喷嘴为自己研制而成, 送粉通道与垂直方向成 17° 角, 即粉末与垂直方向成 17° 角下落, 粉末通道宽度为 0.5 mm , 粉末平均粒径为 $60 \mu\text{m}$, 粉末的热物理性能参数见参考文献[18]。实验中激光功率为 600 W , 送粉速度为 6.55 g/min 。另外, 对粉末与气体流动速度做了模拟, 得到了粉末在重力与保护气体共同作用下的速度图, 如图 4 所示(其中横坐标为离开熔覆喷嘴末端的距离 Z)。粉末在载气的作用下沿着送粉通道被运送到熔覆喷嘴, 在离开送粉喷嘴末端后, 粉末在载气和重力的共同作用下运动, 因而会有一个加速的过程(对应图 4 中 1 区域)。然后粉末进入载气、重力和保护气体共同形成的涡流区域(对应图 4 中 2 区域), 粉末在气体涡流的边缘, 气体涡流造成向上的压力占优, 且其作用大于重力的作用, 粉末在该区域为减速过程。在图 4 中 3 区域内, 粉末向气体涡流的中心运动, 此时, 气体涡流造成向上压力的粉末的作用小于重力的作用, 甚至气体开始造成向下的压力, 粉末因此在这一区域开始加速。在图 4 中 4 区域, 粉末到达气体涡流的边缘, 开始接近基板。此时由于保护气体与基板的作用, 对靠近基板的粉末有很强的向上的压力(这个压力就是保护气体能够保护激光熔覆成形过程中工件不会被氧化、氮化等的原因), 粉末因此再次减速。

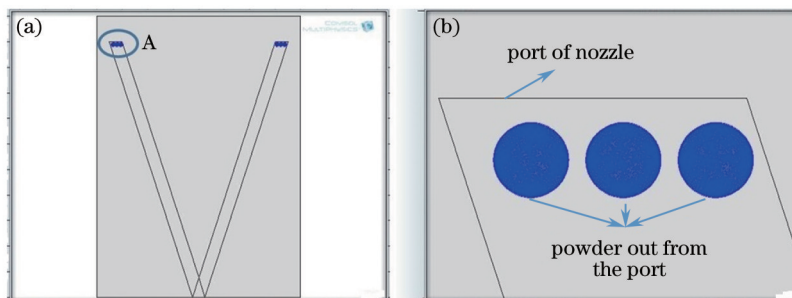


图 3 网格划分示意图。(a) 网格划分图; (b) (a)图中 A 区放大图

Fig.3 Schematic of the meshed geometry for the powder falling process. (a) Meshed geometry for the powder; (b) amplification of the region A in Fig.(a)

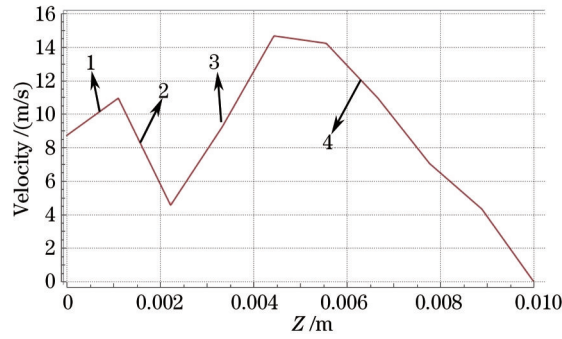


图4 粉末到达基体前下落过程速度图

Fig.4 Speed of the falling powder before reaching the substrate

2.3 熔池温度场

激光辐照基材表面在成形路径上形成熔池,而熔池的大小形状、温度变化、液体流动将会决定成形件的组织形成和随后的应力应变从而影响内部组织结构和表面质量。温度场分布的变化则能很直观地反应熔池的大小形状、温度变化、液体流动,并且温度也是人们最容易直接测量获取参照数据的参数,因此学者都将温度场的模拟作为成形过程模拟的重点。

在成形过程中,伴随着熔池温度的升高会出现相的变化,相变则会导致密度函数 ρ 、比热函数 C 与热焓函数 h 发生较大的变化,其中 ρ 函数和 C 函数来源于文献的数值拟合, $H_s = C_s T, H_l = C_l T + \Delta l, H_m = C_m T + f_l \Delta l$ 。式中下标 s 代表固体状态, l 代表液体状态, m 代表固液混合状态; $\Delta l = (C_s - C_l)T_s + L_m$, L_m 为潜热。

为了处理成形过程中多种状态(固态、液态以及气态)的变化,对海维赛德方程进行求导得到

$$\delta(\phi) = \begin{cases} 0, & |\phi| > \xi \\ \frac{1}{2\xi} + \frac{1}{2\xi} \cos\left(\frac{\pi\phi}{\xi}\right), & |\phi| \leq \xi \end{cases} \quad (5)$$

式中 2ξ 为将气/固相与固/液相分开的过渡区域的厚度。

综合考虑固液相变、粉末注入以及流体流动,熔池的温度和液体流动速度可以通过下列能量守恒方程和动量守恒方程得到。

其中能量守恒方程可以写为

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V H) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \nabla \cdot [\rho f_s (h_l - h_s) V] + \dot{S}_{enthalpy}, \quad (6)$$

式中 ρ 为密度函数, H 是热焓函数, k 为热导率, V 是速度函数。

$$\dot{S}_{enthalpy} = \dot{S}_q + \dot{S}_{enthalpy_add}, \quad (7)$$

$$\dot{S}_q = [q_1^* + q_p^* - A_h(T - T_0) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4)] \delta(\phi), \quad (8)$$

式中 $\dot{S}_{enthalpy_add}$ 为气化增加的能量,可忽略。 q_p^* 为粉末带来的能量,可忽略。

$$I(r) = \frac{2P}{\pi R_b^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{R_b^2}\right) \text{ 为吸收激光的能量, } A_h(T - T_0) \text{ 为保护气体带走的能量, } T_0 \text{ 为环境温度。 } \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4)$$

为自身辐射的热量,因太小被忽略, σ 为玻尔兹曼常量, ε 为辐射系数。

将(6)式变形后得到

$$\rho h(T) \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot [-k \nabla T + \rho H(T) V(T) + \rho f_s (H_l - H_s) V] = \frac{2P(x)\alpha}{\pi R_b^2} \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{R_b^2}\right]. \quad (9)$$

而动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = \nabla \cdot (\mu \nabla V) - \nabla p + \dot{S}_{mom}, \quad (10)$$

μ_1 是液体粘度, $\mu_m = \mu_1 \frac{\rho_m}{\rho_1}$, p 为粉末带来的动量。

$$\dot{S}_{x\text{mom}} = -\frac{\mu_m}{K} - \mathbf{e}_x \cdot (\gamma n \kappa - \nabla_s \gamma) \delta(\phi), \quad (11)$$

$$\dot{S}_{y\text{mom}} = -\frac{\mu_m}{K} - \mathbf{e}_y \cdot (\gamma n \kappa - \nabla_s \gamma) \delta(\phi), \quad (12)$$

$$\dot{S}_{z\text{mom}} = -\frac{\mu_m}{K} - \mathbf{e}_z \cdot (\gamma n \kappa - \nabla_s \gamma) \delta(\phi) + \rho_r g \beta (T - T_r), \quad (13)$$

式中 $K^{-1} = K_0^{-1} \frac{(1-f_1)^2}{f_1^3 + \tau}$, $\nabla_s \gamma = \gamma_T \nabla_s T$, $\gamma \kappa$ 为表面弧度带来的动量,可忽略。 $\rho_r g \beta (T - T_r)$ 代表热膨胀导致的速度变化, β 为膨胀系数。

变形后得

$$\rho(T) \frac{dV}{dt} + V(T) \frac{d\rho}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot [-\mu(T) \nabla V + \rho V V] = \frac{-\mu_m(T)}{K(T)}. \quad (14)$$

2.3.1 计算方法

在计算温度场模型时,将直壁墙模型固定,定义一个移动的激光功率函数为移动的激光。激光功率函数的中心以设定的参数沿水平方向平移或者沿垂直方向提高。激光辐照过的区域温度按照模拟方程变化,模拟结果为所有划分网格区域的温度变化情况,能够直观的表现直壁墙成形过程中温度场的演变过程。

2.3.2 模型描述

模型采用 COMSOL Multiphysics 软件中的微分方程模块对成形过程的前6层熔池温度场做了模拟,网格划分如图5所示。

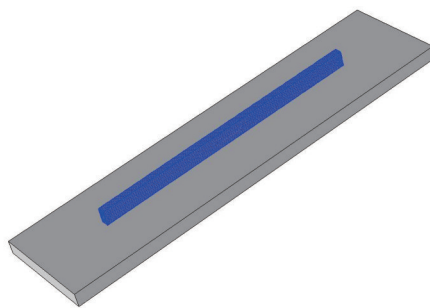


图5 直壁墙网格的划分

Fig.5 Schematic of the meshed geometry for the wall

成形中基体尺寸为 $60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,直壁墙尺寸为 $40 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。为了便于程序的运算,网格划分方式采用自由划分四面体网格,网格最大和最小单元尺寸均为 0.2 mm ,只对与激光有相互作用的基体区域划分网格,其他区域不划分。另外,激光功率为 600 W ,扫描速度 0.04 m/s ,粉末为 Rene80 镍基合金粉末,固相线(液相线)为 1593.15 K (1613.15 K),送粉速度 6.55 g/min ,扫描一层所需时间为 1 s ,扫描一层后进行时间区间为 2 s 的冷却,每扫描一层后,送粉喷嘴垂直上升 0.2 mm ,并沿横坐标回到原点。上述所选的成形过程参数为直壁墙建造过程中优化的参数。

3 结果与讨论

3.1 粉末到达基体前的温度

将材料的参数函数及工艺参数函数输入数值模型,根据(3)、(4)式计算粉末粒子下落到基体前的温度场。在 $t=0.00103 \text{ s}$ 时,获得从纵截面左侧下落到距离基体最近的粉末粒子温度分布如图6所示。由于粉末与垂直方向成 17° 角下落(如图1),与熔覆喷嘴轴心距离不同的粒子进入与激光相互作用区的时间点不同,而它们到达基体所需时间相同,这意味着它们与激光相互作用的时间不同,在水平方向上的位移也不相同。距离熔覆喷嘴轴心远的粒子[图6(b)中左边的粒子]与激光作用时间最短,粉末在水平方向上从激光光束边缘运动了很短的距离(尚未到达光束中心),在到达基体前温度能够达到 500 K 。而距离喷嘴轴心近的粒子[图6(b)中右边的粒子]与激光作用时间最长,粉末在水平方向上从激光光束边缘运动到光束中心,然后运动到另一

侧边缘,到达基体前的温度则能达到 1200 K。另外,根据高斯光束的特性,光束中心功率密度最大,离中心越远,功率密度最小,因此离喷嘴轴心不同的距离在相同时间内吸收光的能量也不同,距离轴心近的粒子吸收光的能量高,这也是导致图 5 中左右位置不同粒子温度不同的一个重要原因。

所用镍基高温合金 Rene80 的熔点为 1593.15 K,上述计算结果显示粉末到达基体前的温度远没有达到熔点,不能被熔化。根据上述结果估算可得,粉末对激光的吸收为 5%左右。但是,由于粉末的质量太小,到达熔池的粉末带来的能量相对基体吸收的能量太小,因此在熔池温度场研究过程中不考虑粉末粒子带来的能量。另外,由于粉末粒子的高速下落,而根据文献[7]所得结果,熔池中的液体流动相对粉末下落的速度较为缓慢,因此在研究熔池时需要考虑粉末粒子带来的动量变化。

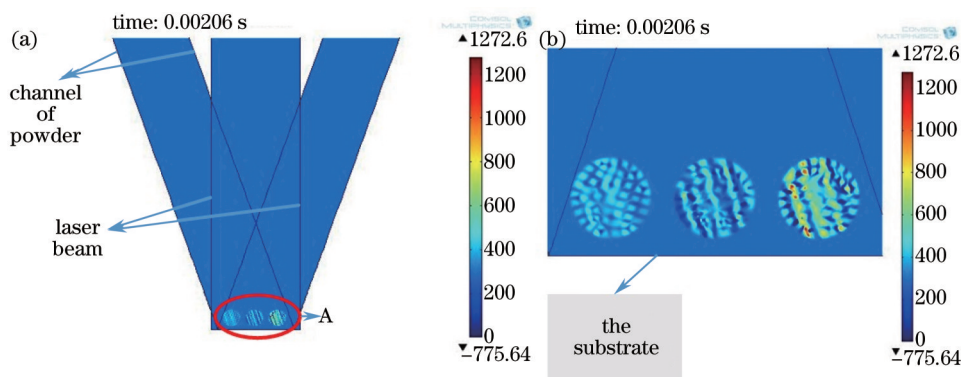


图 6 粉末粒子到达基体前的温度场。(a) 粉末温度分布图; (b) (a)图中 A 区域放大图

Fig.6 Temperature field of falling powder at the moment reaching the substrate. (a) Temperature distribution of the powder; (b) amplification of the region A in Fig.(a)

3.2 温度场的演化

将材料的各个参数函数及工艺参数函数输入计算模型,根据(5)~(14)式计算模拟激光熔覆成形过程的温度场及其变化情况。激光扫描第 1 层($t=1$ s)后,其垂直于直壁墙生长方向的横截面上整体温度分布如图 7 所示。激光沿着 X 轴方向扫描后在基体上形成第一条路径。形成的第一个熔池中心温度为 2050 K 左右,激光扫描过后,辐照区域的温度很快降至熔点(1593.25 K)以下,当激光扫描完一道 40 mm 的长度时,熔覆道的开始端还是会保持在一个较高的温度 500 K 以上,激光扫描过程中 40 mm 熔覆道内垂直直壁墙横截面内温度的变化情况如图 7 所示。其他 5 层扫描过程中直壁墙内整体温度变化与其相似,只是由于热积累的缘故温度值具有较大的差别。

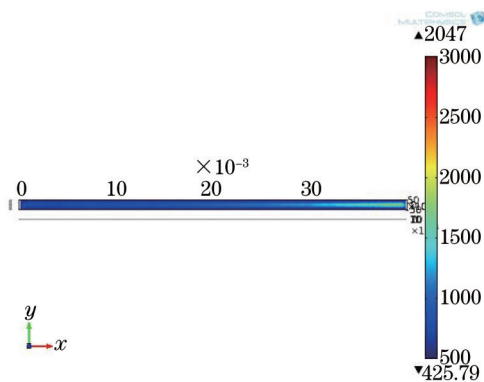


图 7 激光完成第 1 层扫描后熔覆道内温度分布 ($\phi = 0, t = 1$ s)

Fig.7 Temperature distribution of the first layer after laser scanning ($\phi = 0, t = 1$ s)

图 8 为相同比例下直壁墙前 6 层的横截面内部分(扫描的最后阶段)温度分布图,它们分别按照时间顺序依次标注为 8(a)~(f)。图 8(a)即为图 7 中的一段,其温度变化情况这里不再赘述。图 8(b)可见熔池形状有些不规则,但不是特别明显,熔池中心温度为 2300 K 左右。(c)图中熔池形状不规则已经非常明显,温度最高值已经不在熔池中心,熔池温度最高值已达到 2500 K 左右。图(d)~(f)中熔池中心温度分布较为均匀,没有中心峰值,熔池

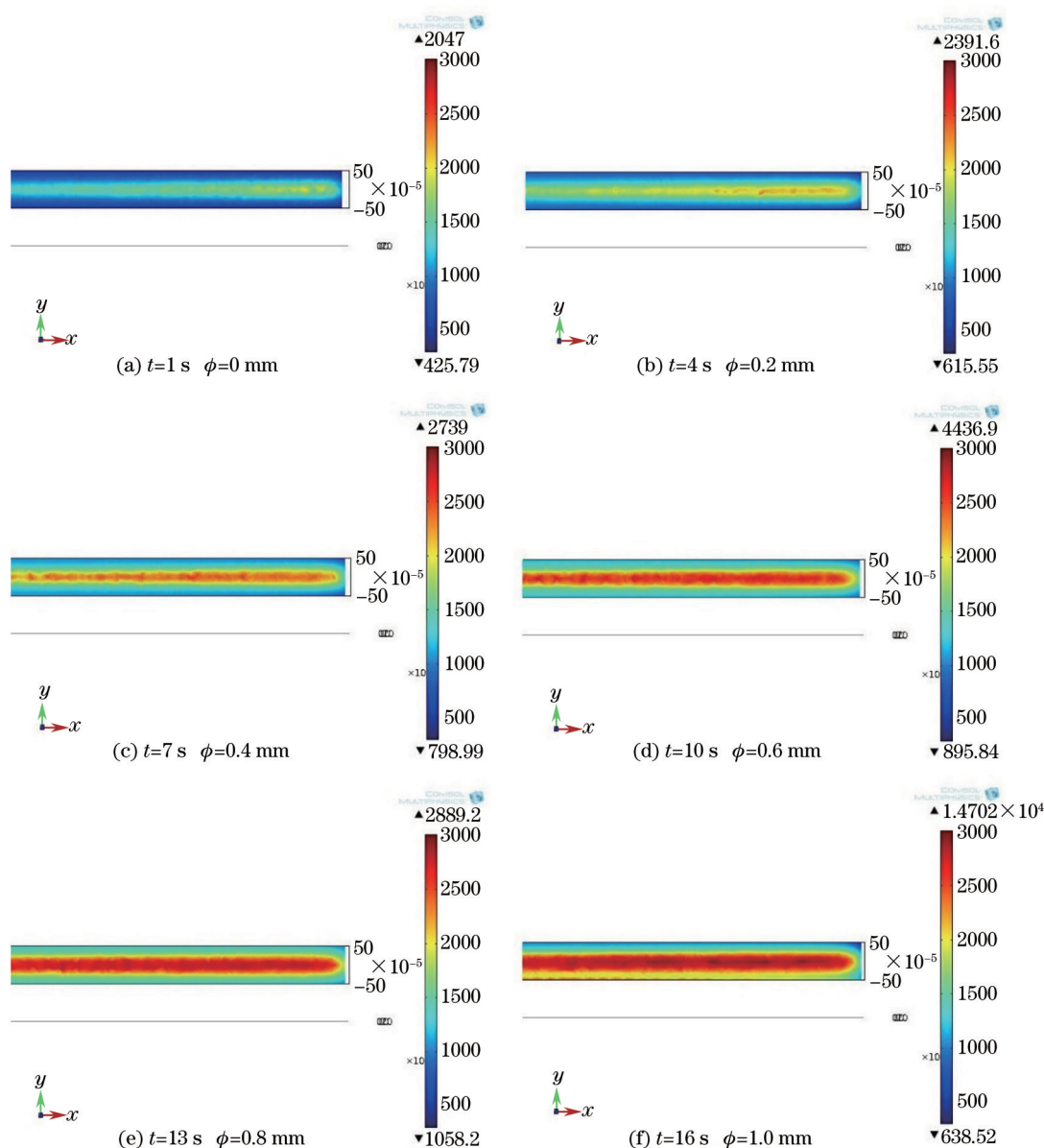


图8 直壁墙内不同层扫描后熔池横向(xoy面)温度场分布图。

Fig.8 Transverse distribution (xoy plane) of temperature field of different layer after laser scanning

温度分别为 2700 K、2850 K、2900 K。上述温度值均为熔池中心附近处多次取值的平均值(在软件中进行)。

对图 8(a)~(f)进行对比、总结后发现,在直壁墙的成形过程中,随着成形层数的增加,熔池的温度将会增加,并且在一定层数后会达到一个温度平衡。这是因为在第一次扫描后、第二次扫描开始前, $t = 1$ 时间内形成的熔覆道尚未完全冷却,如图 7 所示,扫描开始端的最低温度为 500 K。因而第二层扫描时作为基体的前一层具有更高的初始温度值。同理,后面几层也都有相对前一层更高的初始温度,这种现象称为温度累积。由于温度累积的原因,层数越多,温度越高。但是,随着直壁墙高度的增加,直壁墙的散热越快,即由原来的二维散热转变为三维散热,这时温度升高变慢。当直壁墙到达一定高度后,将会到达一个吸收与散热平衡的情况,熔池温度不再随着层数增加而提高。

另外,随着成形层数的增加,在第 2、3、4 层熔池温度分布开始变得没有规则,到第 5、6 层熔池温度逐渐呈均匀分布。这一变化是因为,按照流体动力学的动量方程以及文献[7]的结果,熔池内液体流动速度与熔池温度成正比。由于模拟过程考虑了熔池内的液体流动,激光开始扫描时,熔池流速几乎为零,液体流动对温度分布没有影响,温度分布与激光束能量分布相似。温度升高后,液体开始流动,由于激光能量为高斯分布,不同区域温度不相同,液体的流动使熔池温度开始变得无规则。当温度继续提高,熔池内液体流动更

快,液体温度在相对较高流速下很快就呈均匀分布。

图9为相同比例下6层直壁墙中每层的纵向(即与直壁墙生长方向平行)熔池温度分布图。图9中(a)~(f)分别与图8中(a)~(f)相对应。如果说从图7和图8可以观察激光完成每一层扫描后熔覆道内横截面的温度分布,那么从图9中能够清楚地观察到熔池附近的温度分布情况以及直壁墙内部温度随着成形高度增加的变化情况。在熔池温度的纵向截面图中可以看到,直壁墙内温度变化、熔池附近温度变化规律与图8中横向截面温度分布规律相同。但是,从纵截面温度分布图中可以发现,随着直壁墙层数的增加,熔池温度在增加,直壁墙内热量积累在增加。从熔池温度的变化可以看到,熔池内超过材料熔点的部分在增加,也就是说熔池尺寸在变大。熔池尺寸的增加不仅体现在熔池深度、也体现在熔池宽度上。因而直壁墙制作过程中如果不附加任何温度反馈单元,直壁墙的形状将发生变化,即“下窄上宽”,如图10所示。但是,随着直壁墙层数的增加,直壁墙内部温度累积与散热达到平衡后,这种建造过程的不稳定性会随着直壁墙内温度分布均匀后而消失。另外,图9(f)中出现一些温度过高的区域,其原因是高温导致液体流动速度较高,而流动的液体对温度分布的影响极大,因此在一些边缘网格出现一些错误的运算结果,在对比结果时,可以将这部分忽略。

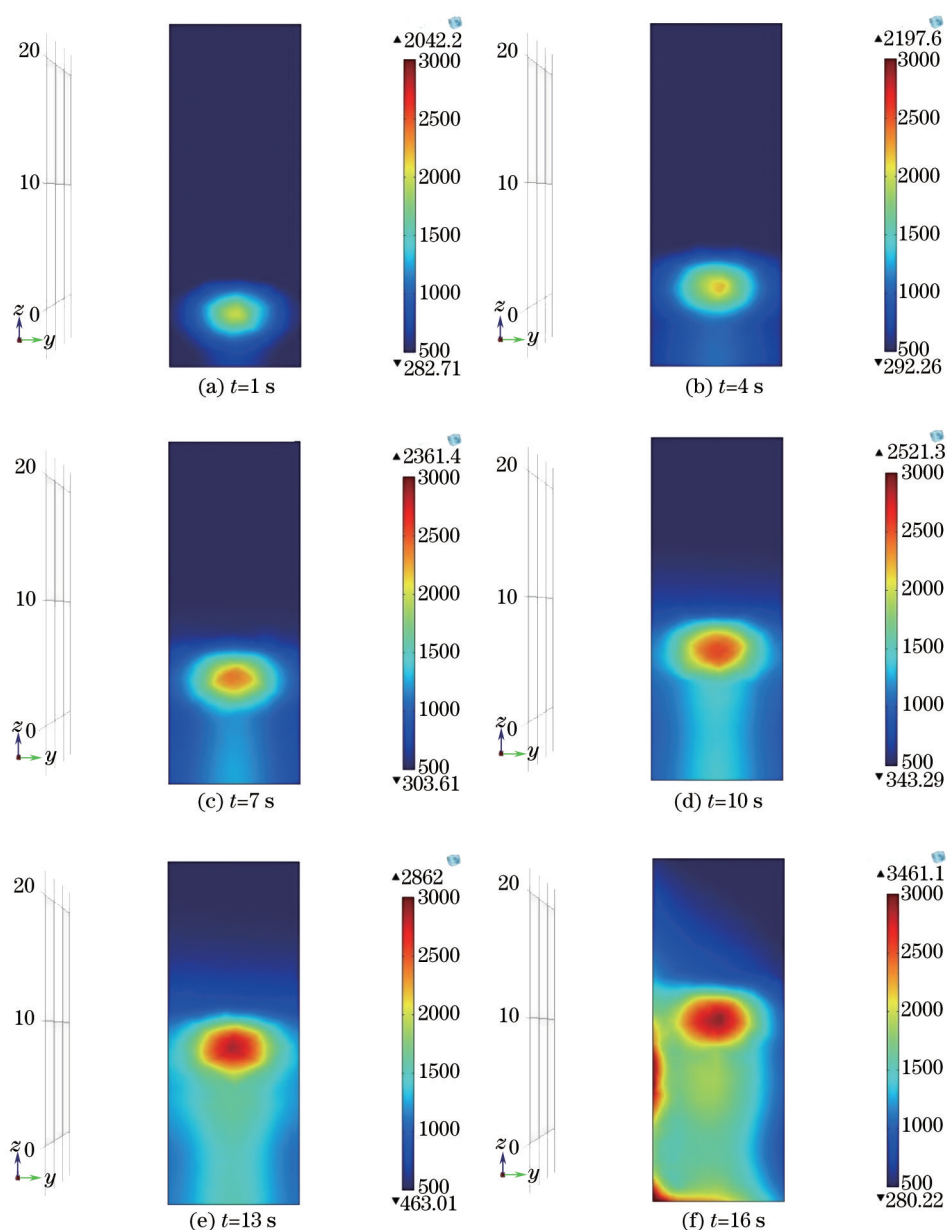


图9 激光扫描不同层的纵截面熔池温度(yoz面)分布图

Fig.9 Longitudinal distribution (yoz plane) of temperature field of different layers after laser scanning

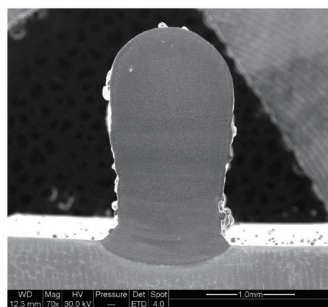


图 10 直壁墙样件纵截面图的 SEM 图

Fig.10 SEM photograph of longitudinal cross section of vertical wall manufactured

4 Rene80直壁墙制作实验

由于模拟过程需要定义许多边界条件和参数函数,为了减小模拟结果与实际测量结果的差别,进行了激光熔覆成形制作直壁墙过程的测温实验,并将实验结果与模拟的温度场进行了对比。

4.1 实验材料和设备

实验材料为 DS Rene80 镍基合金粉末,基体为 DZ125 定向凝固镍基高温合金板。Rene80 以及 DZ125 镍基合金的化学成分分别如表 1、2 所示。

表 1 Rene80 粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of superalloy Rene80 powder

Element	C	Cr	Co	Mo	Al	Ti	W	Fe	B	Zr	Ta	Hf	Ni
Rene80	0.17	14.0	9.5	4.0	3.0	5.0	4.0	0.35	0.015	0.03	0.1	0.1	balance

表 2 DZ125 合金的化学成分

Table 2 Chemical composition of Nickel base superalloy DZ125

Element	C	Cr	Co	Mo	Al	Ti	W	Fe	B	Zr	Ta	Hf	Ni
DZ125	0.1	9.7	9.6	2.2	4.9	3.1	7.1	0.3	0.015	0.08	3.78	1.5	balance

实验采用最高输出功率为 6000 W 的快速轴流 CO₂ 激光器作为热源,其中激光器的聚焦特征参数 $K_f=8.67 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,激光束的输出模式为 TEM₀₁ 模。目前测温方法较多^[19],结合所模拟内容及实验条件,实验采用非接触式温度检测方法。测温实验采用 SCIT 系列分离式红外温度计,该红外温度计的测量距离为 0.5 m~∞,测温头的视场调到最小尺寸 $d=2 \text{ mm}$ 。红外测温头测量的是被测物体的最高温度。

4.2 测温实验及测量误差分析

实验采用的激光功率为 600 W、扫描速率 0.04 m/s、送粉速度 6.55 g/min。激光扫描完成一道后送粉喷嘴垂直抬高 0.2 mm。实验采用移动式定点测温方法,即在直壁墙制作过程中,测温头固定在精密升降台上,首先依靠测温仪的指示光将测温头对准待扫描熔覆层表面的中间位置处,完成一道扫描后,根据成形高度适时调整升降台用以调整测温点,保证测温点位于下一层的熔覆层表面。温度采样频率为 50 s,采用上述方法测量直壁墙制作过程中温度变化示意图如图 11 所示。

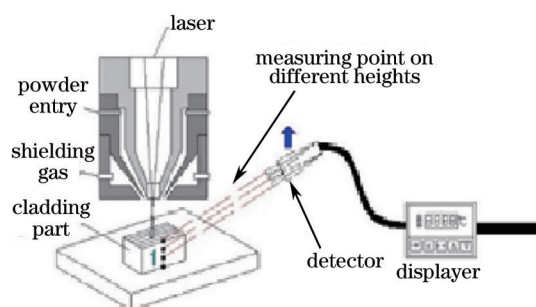


图 11 测温方法示意图

Fig.11 Schematic of method for temperature measuring

由于红外测温头在测量时的最佳方向是与被测目标表面呈垂直状态,但是因为本实验采用同轴送粉喷嘴进行激光熔覆成形实验,并且直壁墙制作过程中送粉喷嘴末端与工件表面之间的距离比较小(在 10~12 mm 左右),而喷嘴与被加工表面始终保持垂直关系。这样红外测温仪的测量方向与被测表面的法线方向的夹角比较大,不能全方位扑捉到成形过程中的辐射,从而导致测量值偏低。但是由于测量条件相同,所有的测量值与实际值呈相同比例。因此测量结果对于定性分析直壁墙成形过程中温度的变化规律没有影响。

按上述方法采用 Rene80 镍基高温合金粉末进行了直壁墙制作实验及测温实验,由此获得的温度随时间变化曲线为图 11 所示。该直壁墙的制作高度为 10 层,图 11 中由 10 个“锯齿”组成,每一个“锯齿”为直壁墙中一层的扫描过程中温度的变化。这种温度的变化与测量方法有关。可以看到,在前四层的扫描过程中,温度上升、下降的比较剧烈,“锯齿”上存在一些“抖动”,这是由于温度变化不规则造成的。从第五层开始最高温度达到了一个平衡。图 12 中最高温度为 800 °C,也就是 1073 K。这一最高温度显著低于模拟计算的温度。

4.3 结果与讨论

与上述实验结果相对比发现,模拟结果与实验测温结果在温度变化规律上大体相符。在前 4 层的制作过程中,随着层数的增加,温度不断升高,温度差逐渐减小,自第 5 层起温度基本稳定,也就是说热积累与散热基本上达到了平衡。此外,制作的直壁墙样本确实存在“下窄上宽”的情况,如图 12 所示。综上所述,模拟结果与实验结果大体相一致,温度变化趋势完全相同,说明了该模型计算多层成形温度场的有效性和可靠性。采用本模型和计算方法可以进一步计算其他复杂零件的成形过程的熔池温度场变化。

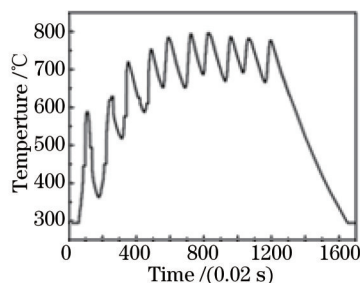


图 12 移动定点测量的温度随时间变化图

Fig.12 Temperature changing with time from temperature measuring data

5 结 论

对 Rene80 镍基合金粉末直壁墙的制作过程的温度场变化做了较为详细的模拟,并进行了对比试验,获得以下结论:

1) 粉末由喷嘴末端下落到基体表面之前温度最高可升至 1200 K 左右,不能被熔化。粉末对激光的吸收为 5% 左右,相对较小,本文在熔池温度场研究过程中没有考虑粉末粒子带来的能量。

2) 在直壁墙激光熔覆成形前四层制作过程中,随着成形层数的增加,熔池附近的温度和制件内部的温度都将会显著增加,而且熔池温度分布开始变得不规则。成形层数达到第五层之后,熔池温度开始趋于稳定,温度分布近似均匀分布。在成形过程中,熔池尺寸也发生了较大变化,造成直壁墙样件的“下窄上宽”的形状。结果揭示了成形过程初期的不稳定性。

3) 实验测温所得温度变化规律反映了直壁墙制作过程中温度场附近以及直壁墙内的温度积累,并且与模拟计算的结果相符。

本文对采用 LMD 方法制作直壁墙的数值模拟结果从另外一方面证实了对成形过程进行温度场模拟的必要性,直壁墙成形尺寸、精度等的质量保证需要附加具有反馈功能的温控系统,6 层的直壁墙相对尺寸较大的零件来说还很小,其温度积累与散失还相对简单,因而模拟计算还需要进一步进行,以便掌握大型零件成形过程中温度的变化以及影响。

参 考 文 献

- 1 Xi Mingzhe, Gao Shiyu. Microstructures and mechanism of cracks forming of Rene80 high-temperature alloy fabricated by laser

- rapid forming process[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0803008.
 席明哲, 高士友. 激光快速成形 Rene80 高温合金组织及裂纹形成机理[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0803008.
- 2 Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin, *et al.*. Research progress of laser cladding forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 29-39.
 宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 29-39.
- 3 Wang F, Mao H, Zhang D. Online study of cracks during laser cladding process based on acoustic emission technique and finite element analysis[J]. Appl Surf Sci, 2008, 255(5): 3267-3275.
- 4 Yu Chengxue, Jing Cainian, Li Huaixue. Forming mechanism and controlling method of laser cladding crack[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 4: 75-79.
 于承雪, 景财年, 李怀学. 激光熔覆裂纹的形成机理及控制方法[J]. 航空制造技术, 2012, 4: 75-79.
- 5 Xu Dapeng, Zhou Jianzhong, Guo Huafeng. Investigation of generation mechanism and controlling method of cladding layer ranking by laser cladding[J]. Tool Engineering, 2007, 41(4): 24-28.
 徐大鹏, 周建忠, 郭华锋. 激光熔覆裂纹产生机理及控制方法分析[J]. 工具技术, 2007, 41(4): 24-28.
- 6 Yorikawa Morio, Matsuda Noriaki, Anbe Minoru. Thermal fatigue crack growth behaviors in a cylindrical specimen of nickel-base superalloys with a rapid temperature gradient in thickness[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 2005, 54(7): 761-766.
- 7 A F A Hoadley, M Rappaz. Heat-flow simulation of laser remelting with experimental validation[J]. Metallurgical Transactions B, 1991, 22(1): 101-109.
- 8 M Picasso, C F Marsden, J D Wagniere. (A) simple but realistic model for laser cladding[J]. Metallurgical Transactions B, 1994, 25(2): 281-291.
- 9 Huang Y L, Liang G Y, Su J Y. (A) comprehensive model of laser cladding by powder feeding[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2004, 17(1): 21-27.
- 10 Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 203007.
 刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 203007.
- 11 Hua Liang, Tian Wei, Liao Wenhe. Study of thermal-mechanical coupling behavior in laser cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 091401.
 华亮, 田威, 廖文和. 激光熔覆热影响区及残余应力分布特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 091401.
- 12 Shao Y W, Yung C Shin. Modeling of transport phenomena during the coaxial laser direct deposition process[J]. Journal of Appl Phy, 2010, 108(4): 044908.
- 13 W Hofmeister, J Philliber, J Smugeresky. Investigation of solidification in the laser engineered net shaping process[J]. J Met, 1999, 51(7): 51-57.
- 14 Ye R, J Smugeresky, Zheng B. Numerical modeling of the thermal behavior during the LENS process[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 428(1-2): 47-53.
- 15 L Costa, R Vilar, T Reti. Rapid tooling by laser powder deposition: process simulation using finite element analysis[J]. Acta Mater, 2005, 53(14): 3987-3999.
- 16 V Neela A De. Three-dimensional heat transfer analysis of LENSTM process using finite element method[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2009, 45(9-10): 935-943.
- 17 Zuo Tiechuan. The Advanced Manufacturing in the 21st Century-Laser Technology and Engineering[M]. Science Press, 2007: 300-303.
 左铁钊. 21 世纪的先进制造-激光技术与工程[M]. 科学出版社, 2007: 300-303
- 18 L A Chapman, R Morrell, P N Qusted. PAMRIC: Properties of alloys and moulds relevant to investment casting[J]. NPL REPORT MAT 9, 2008: 62-69.
- 19 Hu Xiaodong, Yu Chengsong, Yao Jianhua. Review of laser cladding molten pool temperature measurement and control system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 120003.
 胡晓东, 于成松, 姚建华. 激光熔覆熔池温度监测与控制系统的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 120003.

栏目编辑: 宋梅梅