

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180915001

激光熔覆工艺热-弹-塑-流多场耦合数值模拟与试验

李 昌¹, 于志斌¹, 高敬翔¹, 韩 兴¹, 董 欣²

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院 鞍山 114051; 2. 鞍山正发表面技术工程股份有限公司 鞍山 114044)

摘 要: 熔覆过程存在极其复杂的传热及热-弹-塑-流多场耦合变化, 将影响对流、传热、传质、凝固和相变, 而熔覆中的急冷急热会产生复杂的残余应力与变形, 产生熔覆裂纹, 影响熔覆层质量。揭示熔覆过程中多场耦合演变机理是控制和避免产生熔覆裂纹的关键。文中以 CALPHAD 法计算温变物性参数, 建立了碟片激光器激光熔覆过程多场耦合模型, 综合考虑了光束与粉末间的相互作用, 熔池表面张力、浮力对液态金属流动的影响, 熔覆带的瞬时变化, 计算得出了熔覆过程温度场、速度场、应力场的瞬时变化规律。运用 Zeiss-ZIGMA HD 扫描电镜进行金相实验, 验证了所建模型的准确性。计算表明: 形成近似 2 mm×1.5 mm×1 mm 椭球体熔池, 最高温度在光斑中心偏后位置; 700 ms 后, 等效热应力稳定在 548 MPa 左右, 熔池底部热应力最大。该研究为减小和消除残余应力提供了有效途径与方法。

关键词: 碟片激光器; 激光熔覆; 多场耦合; 温度场; 速度场; 应力场

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)01-0124-11

Numerical Simulation and Experiment of Thermo-Elastic-Plastic-flow Multi-field Coupling in Laser Cladding Process

LI Chang¹, YU Zhibin¹, GAO Jingxiang¹, HAN Xing¹, DONG Xin²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 2. Anshan Zhengfa Surface Technology Engineering Company Limited by Shares, Anshan 114044, China)

Abstract: Laser cladding exhibits highly complex heat transfer and thermo-elastic-plastic-flow multi-physics field coupling changes. The temperature and flow fields in the melt pool influence the convection, heat transfer, solidification and phase change. The quick cooling and rapid heating of the laser cladding process cause complex residual stress and deformation, producing cladding cracks and affecting the quality of the cladding layer. It has been revealed that the mechanism of multi-physics field coupling in the laser cladding process is the key to control and avoid cladding cracks. The material's temperature-dependent physical parameters were obtained by the CALPHAD method and a multi-field coupling model for a laser cladding process by disk lasers was established. In the mathematical model, the interactions between the laser beam and the powder flow, the influence of the surface tension and the buoyancy on the liquid metal flow in the melt pool, and the instantaneous change in the shape of the cladding layer were considered. Finally, the laws of instantaneous change for the temperature, flow and stress fields in the cladding process were obtained. The microstructure of the cladding layer was observed by a Zeiss-ZIGMA HD field emission scanning electron microscope, and the accuracy of the model was verified. Results show that an ellipsoid melting pool approximating 2 mm×1.5 mm×1 mm is formed, and the maximum temperature is at the back of the spot center. After 700 ms, the equivalent thermal stress is about 548 MPa, and the maximum thermal stress is at the bottom of the melting pool. This provides an effective way to reduce and eliminate residual stresses.

Keywords: disk laser; laser cladding; multi-field coupling; temperature field; velocity field; stress field

收稿日期: 2018-09-15; 修回日期: 2019-01-18

通信作者: 李昌(1980—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 机械可靠性工程、激光表面处理技术; E-mail: lichang2323-23@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(E050402, 51374127); 辽宁省教育厅项目(2017FWDF01); 辽宁科技大学团队项目(6601009830-02)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (E050402, 51374127), Project of Education Department in Liaoning Province (2017FWDF01) and Team Project of University of Science and Technology Liaoning (6601009830-02)

引用格式: 李昌, 于志斌, 高敬翔, 等. 激光熔覆工艺热-弹-塑-流多场耦合数值模拟与试验[J]. 中国表面工程, 2019, 32(1): 124-134.

LI C, YU Z B, GAO J X, et al. Numerical simulation and experiment of thermo-elastic-plastic-flow multi-field coupling in laser cladding process[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(1): 124-134.

0 引言

激光熔覆是用不同的送料方式在熔覆基体表面放置所需的涂层材料, 经激光束辐照使涂层和基体同时熔化, 并快速凝固形成冶金结合的熔覆层, 改善基体表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化性及电气特性。具有稀释率小、组织致密、结合性好、效率高、速度快、绿色环保等特点, 在航空航天、汽车、海洋、石油、化工等领域应用广泛^[1-2]。

20世纪60到70年代, 随着大功率激光器的发展, 激光束开始进入工业表面处理领域。2016年, Gao W建立了三维热场模型计算熔池温度、冷却速率和固液界面凝固速率, 但未考虑 Marangoni流对熔池的影响^[3]。2017年, 甘政涛利用 COMSOL建立了包括温度场、流场的熔覆模型, 但未对残余应力进行分析, 且建模中未考虑基体和粉材物性参数的温变影响, 忽略了粉末对激光能量的衰减作用^[4]。2018年, YU TB采用 Taguchi-grey 关联法对激光熔覆工艺参数进行了多响应优化, 并验证了 Taguchi-grey 关联法的可行性^[5]。

激光熔覆是动态物理冶金过程, 涉及激光、粉末、工件三者之间的交互作用, 存在复杂的多场耦合变化, 多场耦合相互作用规律如图1。目前对激光熔覆模拟主要集中在对单一温度场的模拟, 对热应力场和残余应力场的瞬变规律研究较少。且建模中均忽略了粉末流与激光束间的相互作用, 同时没有考虑基体和熔覆粉的物性参数随温度变化。而激光熔覆过程是热-弹-塑-流多场耦合演变过程, 各物理场间相互耦合影响, 建模中只考虑单一场或部分场必然会造成误差, 同时基体和熔覆粉的物性参数温变影响较大, 激光束与粉末相互作用明显, 忽略这些影响将造成计算误差。因此, 文中建立了碟片激光器激光熔覆过程热-弹-塑-流多场耦合模型, 综合考虑了粉末流与激光束之间的相互作用, 熔池表面张力、浮力对熔池液态金属流动的影响, 温度的自熔性及熔覆带形状的瞬时变化, 以相图计算法 (Calculation of phase diagram, 简称 CALPHAD) 得出基体和粉材的温变物性参数, 计算得出了熔覆温度场、速度场、凝固行为、应力场分布与演变规律。考虑可移动熔池的对流和扩散, 通过温度梯度 G 和凝固生长速率 S 预测其形态和凝固组织, 运用 Axioskop 2 电子显微镜和 Zeiss- Σ IGMA HD 扫描电镜对熔覆

层微观组织进行观察, 验证了分析方法的可行性。

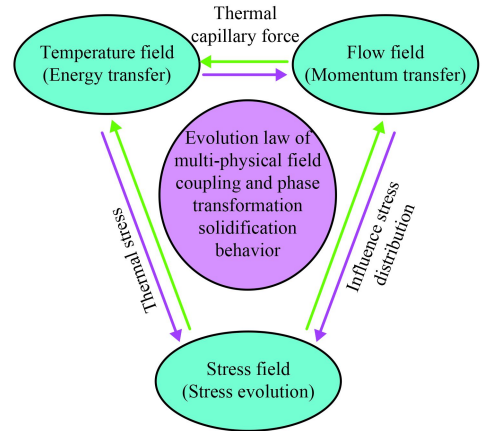


图1 激光熔覆多场耦合相互作用规律

Fig.1 Law of multi field coupling interaction in laser cladding

1 试验材料及设备

基体为45钢, 退火处理, 成分如表1, 熔覆粉为Fe60, 成分如表2。试件如图2, 熔覆原理如图3。试验选取 TruDisk4002 激光器, 配以六自由度机器人实现激光熔覆。碟片激光器优势在于将棒状晶改为碟片晶, 传统棒状晶通过晶体棒径向热传导实现侧面冷却, 棒内温度呈抛物线分布, 导致热透镜效应影响光束质量, 且这种影响随着抽运功率增大而增大。碟片晶体薄且径厚比大, 可及时有效冷却, 一维热传导使晶体内部温度分布非常均匀, 解决了热透镜问题, 改善了光束质量、转换效率及功率稳定性, 比传统激光器具有优势。试验激光器波长为1030 nm, 激光功率80~4000 W, 输出光束0.2 mm时, 光束质量为8 mm·mard。其转换率可达30%。

将试件沿垂直光束扫描方向剖开, 打磨抛光处理, 采用4%的硝酸酒精溶液腐蚀, 用 Axioskop 2 电子显微镜、Zeiss- Σ IGMA HD 场发射电子显微镜观察熔覆层显微组织形貌。

表1 45钢的元素组成

Table 1		Element composition of 45 steel								(w/%)
Element	Fe	Cr	Cu	Mn	Ni	Si	C	P	S	
Content	97.46	0.25	0.25	0.8	0.3	0.37	0.5	0.035	0.035	

表2 Fe60的元素组成

Table 2		Element composition of Fe60						(w/%)
Element	Fe	Ni	Cr	Si	B	C		
Content	60.36	11.89	18.25	4	3.5	2		

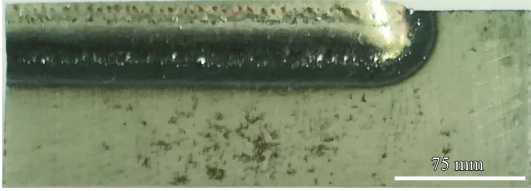


图2 激光熔覆试验试件

Fig.2 Experimental specimen of laser cladding

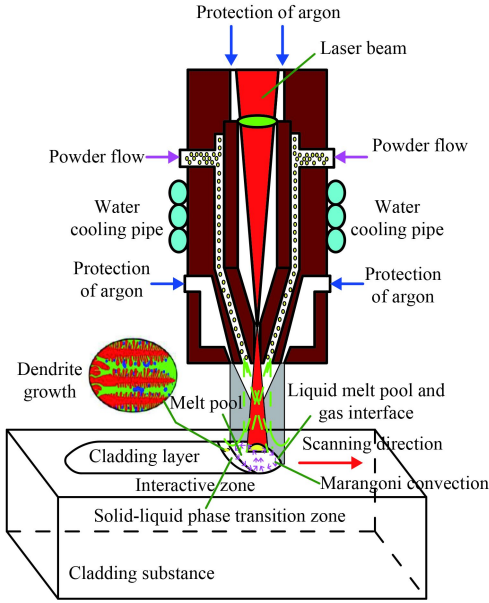


图3 激光熔覆过程原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser cladding principle

2 激光熔覆工艺过程理论建模与求解

激光熔覆过程理论建模基于以下假设：①熔池内金属流为层流、不可压缩牛顿流体；②激光束能量在光斑内呈高斯分布且功率恒定；③材料为各向同性；④粉末流浓度服从高斯分布，掉落到熔池中粉末立即熔化；⑤熔覆材料服从 Von Mises 屈服准则。

2.1 激光熔覆过程总体控制方程

激光熔覆过程总体控制方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2\mu}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] - K_0 \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3 + B} \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) - \frac{\partial H}{\partial t} - \rho \mathbf{u} \cdot \nabla H \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \xi^2}{\partial t^2} = \nabla \cdot S + FV \quad (4)$$

式中， ρ 为密度， t 为时间， \mathbf{u} 为熔池内金属流动速度， μ 为流体动力粘度， p 为压强， T 为温度， C_p 为比热容， k 为导热系数， ξ 是位移矢量， F 为约束力， S 是总位移量。方程 (1) 为连续质量方程。方程 (2) 为 Navier-Stokes 动量方程， K_0 是一个由多孔形态确定的常数， B 是一个避免分母为零的极小参数。方程 (3) 是能量方程， H 是金属熔化潜焓，即为 $\Delta H = Lf_l$ ，其中 f_l 为液体质量分数，可计算为：

$$f_l = \begin{cases} 1, & T > T_1 \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s \leq T \leq T_1 \\ 0, & T < T_s \end{cases} \quad (5)$$

式中，下标 s、l 分别表示固相和液相。方程 (4) 是应力方程。

2.2 模型求解初始条件与边界条件为

2.2.1 激光热源

碟片激光器的高斯热源与普通激光器相比，有效热影响区面积较大且温度均匀，通过改变 x 与 y 的取值范围，可调整有效热影响区的大小，以针对碟片激光器高斯热源模型做出适应性改变。采用改进后的移动高斯热源，热通量为：

$$q = \frac{2aP}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2((x-Vt)^2 + y^2)}{R^2}\right) - h_c(T - T_0) - \sigma_b \varepsilon (T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

式中， P 为激光功率， a 为激光能量的吸收率， R 是激光光斑半径， V 为扫描速度， x 、 y 分别是激光光斑中心的瞬时坐标值。 h_c 是热传递系数， σ_b 是 Stefan-Boltzmann 常量， ε 是发射率， T_0 是初始环境温度。

2.2.2 液体/气体动量方程的边界条件

$$F_{L/G} = \sigma \mathbf{n}^* \kappa - \nabla_s T \frac{d\sigma}{dT} \quad (7)$$

式中，等号右侧两项分别代表毛细力和热毛细力， σ 为表面张力， \mathbf{n}^* 是曲面法向参数， κ 是曲面曲率。

以同轴送粉为例，考虑液/气界面流动，边界移动速度为：

$$V_{L/G} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}^* + V_p \cdot \mathbf{n}^* \quad (8)$$

式中, \mathbf{u} 是液/气界面流速; V_p 代表因熔覆粉材的增加导致液/气界面的移动速度。

$$V_p = \frac{2m_f\eta_m}{\rho_m\pi R_p^2} \exp\left(\frac{-2((x-Vt)^2+y^2)}{R_p^2}\right)z \quad (9)$$

式中, m_f 是质量流量, η_m 是粉末流率, ρ_m 是粉末密度, 而 R_p 是粉末流半径, z 是在 z 方向的单位向量。

2.2.3 熔覆粉末与激光束的相互作用

激光熔覆中, 当高能激光束穿过粉末流时, 其部分能量被粉末颗粒吸收、反射和散射, 剩余能量穿过粉末流到达熔池表面。同时粉末颗粒因吸收激光能量, 在落入熔池前温度已经升高^[6-8]。根据 Lambert-Beer 光透射定理和米氏理论, 粉末流对激光束的衰减与激光功率、波长、粉末颗粒特性、粉末流浓度及光束穿越的粉末流长度有关, 可表达为:

$$q'(r, \phi) = q \exp(-\delta N \phi) \quad (10)$$

式中, $q'(r, \phi)$ 为激光在距离喷嘴 ϕ 的平面上激光中心点功率密度; r 为消光面积 (取粉末颗粒投影面积之和); N 为单位体积内粉末颗粒数。

粉末颗粒在落入熔池前, 因吸收激光束能量的升温由热平衡式得出:

$$2\pi R_{add} q'(r, \phi) a_p \frac{s}{v_f} = \frac{4}{3} \pi \rho_m c_{pm} \Delta T' \quad (11)$$

式中, R_{add} 为粉末颗粒半径, a_p 为粉末颗粒对激光能量的吸收率, s 为喷嘴到熔池表面的距离, v_f 为粉末颗粒的速度, ρ_m 为密度, c_{pm} 为比热容, $\Delta T'$ 为粉末颗粒的升温, 可计算为:

$$\Delta T = \frac{3q'(r, l)\alpha_p s}{2R_{add}\rho_m c_{pm} v_f} \quad (12)$$

屈服准则如式 (13) 所示。式中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为不同方向主应力, σ_s 为屈服极限。

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq \sigma_s \quad (13)$$

3 激光熔覆过程多场耦合数值模拟

3.1 有限元模型的建立与参数设置

模型中设置基体为 45 钢, 熔覆粉末为 Fe60。基于 COMSOL Multiphysics 平台搭建熔覆过程热-

弹-塑-流多场耦合有限元模型。熔覆工件左右对称, 为节省计算时间, 建立 1/2 模型, 尺寸 20 mm×10 mm×6 mm, 采用自由四面体划分网格, 打开网格自动加密功能, 网格包含 315 989 个域单元、11 325 个边界元和 368 个边单元, 如图 4。选用热应力、层流、两相水平集模块瞬时计算熔覆过程中温度场、流场和热应力场的多场耦合变化规律, 采用基于任意拉格朗日-欧拉法 (ALE) 的动网格描述熔池表面动态形状变化过程。模型参数选取如表 3。工作初始温度为环境温度, 熔池初速为 0 m/s。熔覆过程中, 基体对激光束能量吸收率 α 与激光波长、基体粗糙度有关, 且随温度变化, 由 Hagen-Rubens 公式得出吸收率。

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{30}} \times \sqrt{\frac{r_e}{\lambda_0}} \quad (14)$$

式中, r_e 为电阻率, λ_0 为激光波长。熔池物性参数为:

$$W_{bath} = \beta W_{matrix} + (1 - \beta) W_{powder} \quad (15)$$

W_{bath} 是熔池热物性参数, W_{matrix} 和 W_{powder} 分别是基体和熔覆粉的热物性参数。 β 是混合分数, 取决于二者在熔覆层横截面积占比。用 CALPHAD 法计算得基体、粉材的温变物性参

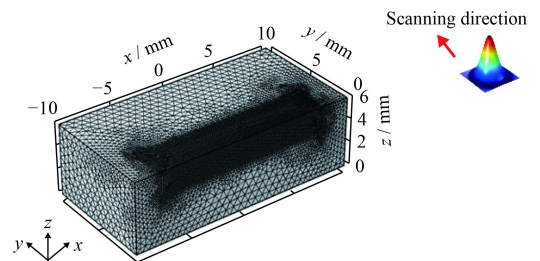


图4 激光熔覆模型有限元网格划分

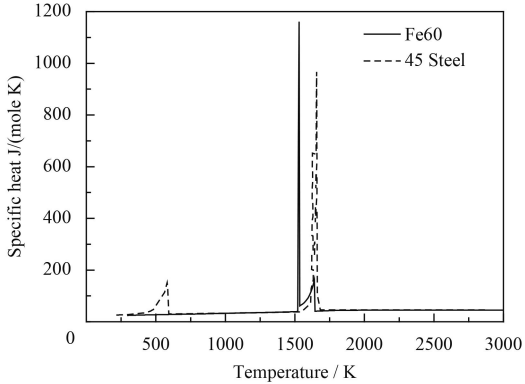
Fig.4 Finite element mesh division of laser cladding model

表3 激光熔覆计算参数

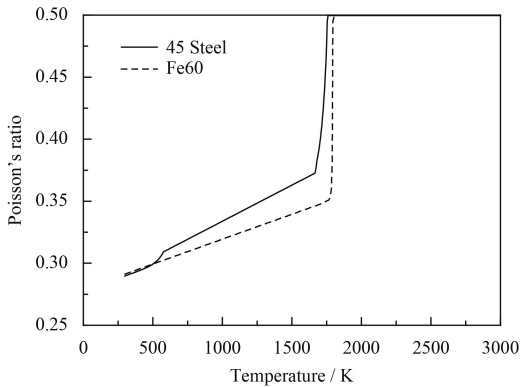
Table 3 The calculation parameters of laser cladding

Parameters	Values
Laser power, P / W	900
Beam radius, R / mm	3
Scanning speed, V / (mm·s ⁻¹)	1.8
Mass flow rate, m_f / (g·min ⁻¹)	6.2
Mass flow radius, R_p / mm	2.5
Convective heat transfer coefficient, h_c / (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	100
Laser wavelength, λ_0 / nm	1030
Environmental temperature, T_0 / K	298.15

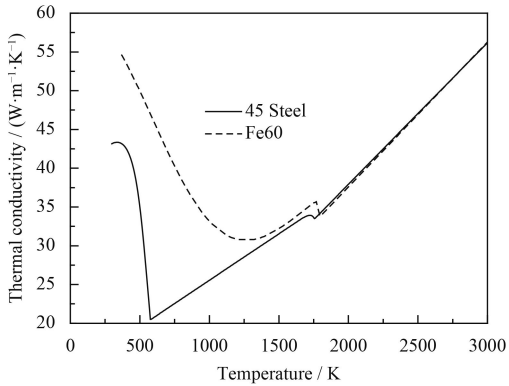
数,如图5,用插值函数导入COMSOL中。设置求解和边界条件,利用SIMPLE求解器求解。



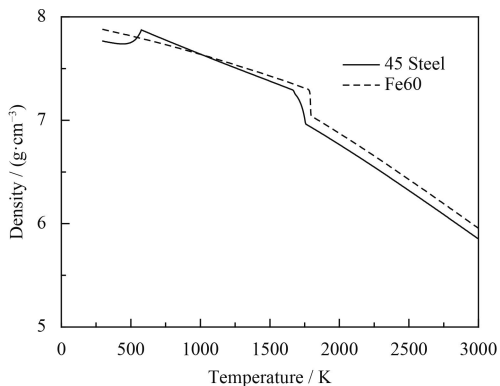
(a) Specific heat varied with temperature



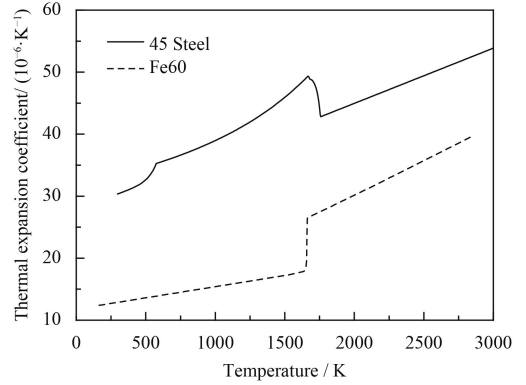
(b) Poisson's ratio varied with temperature



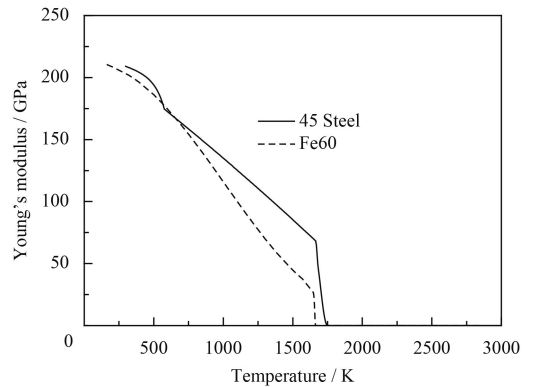
(c) Thermal conductivity varied with temperature



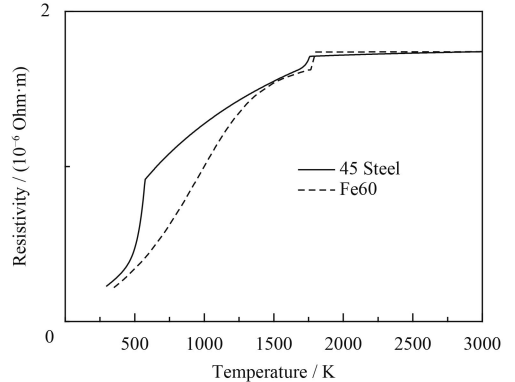
(d) Density varied with temperature



(e) Thermal expansion coefficient varied with temperature



(f) Young's modulus varied with temperature



(g) Resistivity varied with temperature

图5 45钢基体和Fe60粉材物性参数随温度变化曲线

Fig.5 Variation curves of physical properties of 45 steel matrix and Fe60 powder with temperature

3.2 模拟计算与结果分析

3.2.1 温度场计算结果

熔覆温度对熔覆层的相变凝固行为、晶体生长、形核率及微观组织具有重要影响^[9-11]。计算得出从0时刻到700 ms温度场变化规律,选取3个时刻的计算结果分别如图6,0 ms时刻熔覆从 $x=0$ mm处开始,100 ms时熔覆0.18 mm,500 ms时熔覆0.9 mm,700 ms时熔覆1.26 mm。激光熔覆过程信息采集轨迹如图7,绘制熔覆温度瞬时变

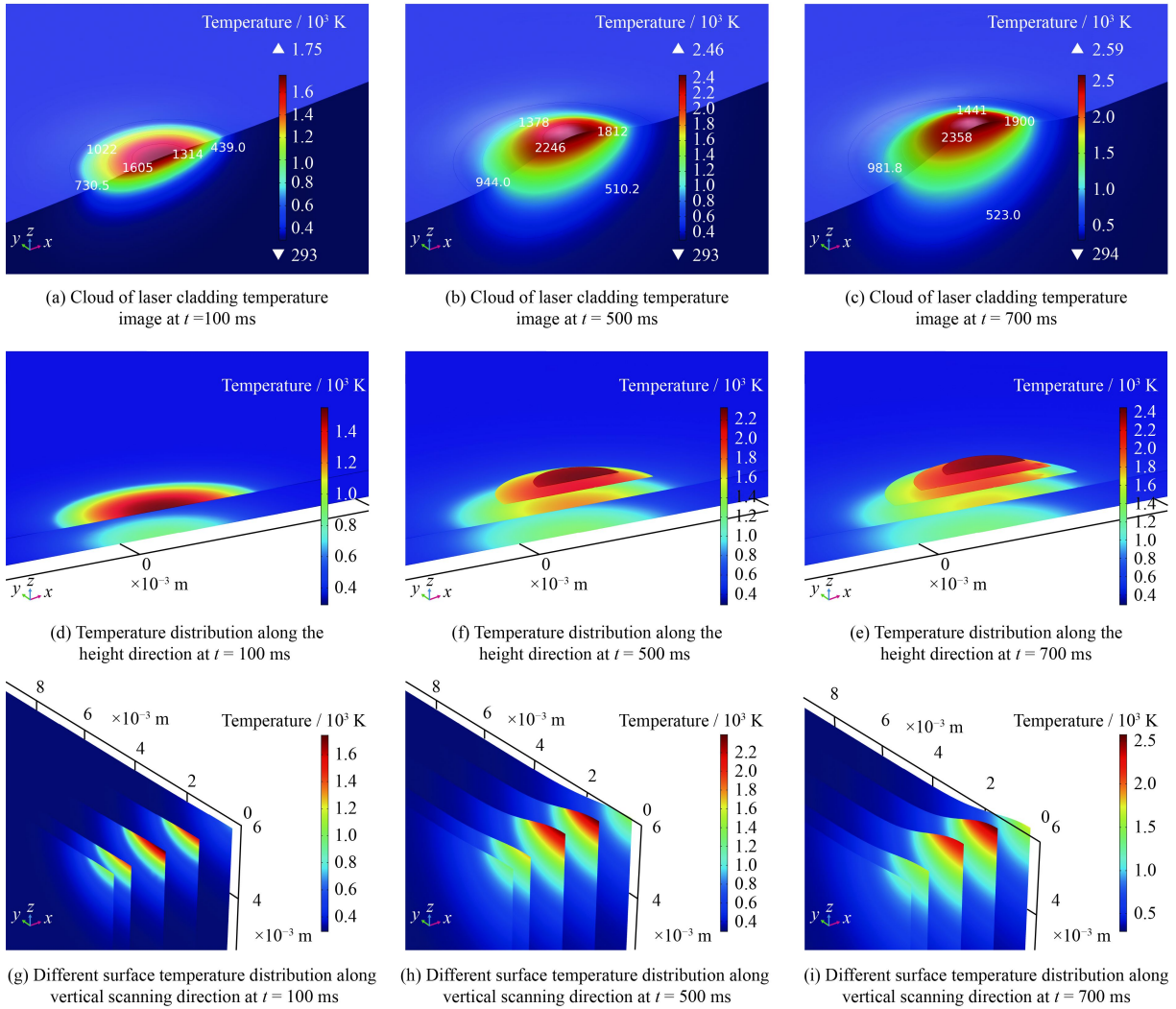


图 6 激光熔覆温度场演变规律

Fig.6 Temperature field evolution law of laser cladding

化曲线, 分别如图 8。图 6(a)~(c) 计算结果表明: 熔覆初始阶段, 因激光辐照产生急热效应, 加热区温度迅速升高, 到 700 ms 时刻熔池温度达最高值 2600 K, 最高温度出现在移动光斑中心偏后位

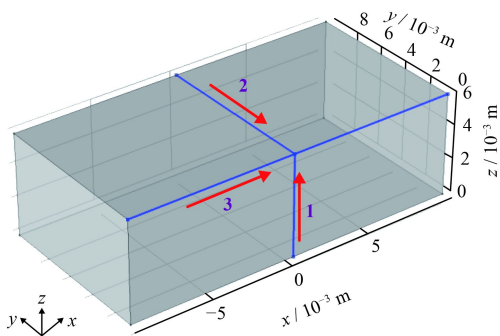


图 7 激光熔覆过程信息采集轨迹

Fig.7 Track and position of information acquisition in laser cladding process

置。当最高温度超过了固相线后, 基体发生固液相转变, 开始形成熔池, 最终形成了近似 $2 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的椭球体熔池。不同时刻熔池前方温度等高线分布较为密集, 温度变化较为剧烈, 后方温度等高线分布较为稀疏, 温度变化较为平缓。图 6(d)~(i) 是将熔池等距剖分观察到的温度分布, 结果表明: 随着粉末颗粒不断添加到熔池内, 导致熔覆层逐渐变厚, 但每一时刻熔池最高温度始终处于熔覆层的顶端表面, 不同剖面上温度围绕光斑呈近似椭圆形分布, 温度值由内向外逐渐递减。图 8 是沿着图 7 不同轨迹采集的温度曲线, 计算结果表明: 不同时刻, 沿着熔池深度 1 号轨迹方向, 靠近光斑温度呈递增趋势, 增长变化梯度以熔池热影响区边界呈现明显不同阶段变化, 接近影响区前温度变化梯度逐渐增大, 进

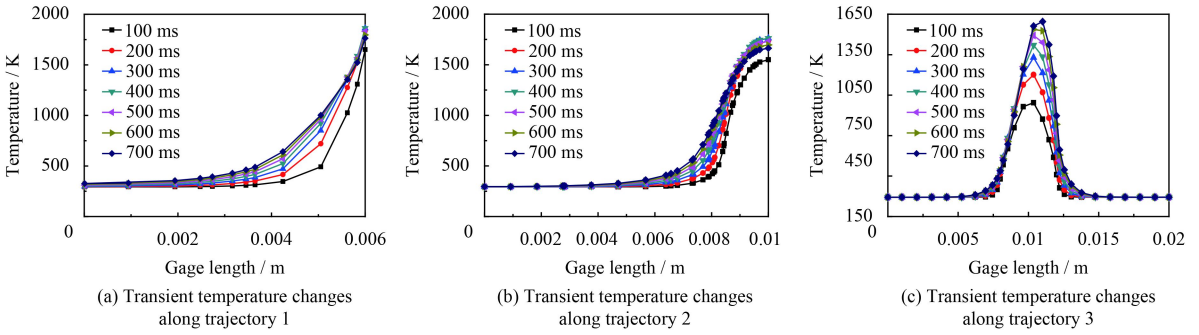


图8 激光熔覆过程沿不同轨迹的温度变化曲线

Fig.8 Temperature variation curves of laser cladding process along different trajectories

入热影响区后, 温度变化梯度逐渐减小, 最终趋于一致。沿着熔池 y 向 2 号轨迹, 靠近光斑温度呈递增趋势, 增长变化梯度随着时间逐渐减小, 最终趋于一致。沿着扫描方向 3 号轨迹, 不同时刻的温度先增大后减小, 增长梯度要高于减小梯度, 光斑偏后位置温度最高, 最高温度随熔覆过程逐渐增大。

3.2.2 速度流场计算结果

Marangoni 效应是熔池中存在的对流现象。用 Marangoni 数表征流动特性, 取决于几何形状^[12-15]。熔池内 Marangoni 力会影响流体流动和温度分布, 如图 9, 进而改变熔池的生长, 导致材料内部产生应力, 引起变形裂纹。

计算得出从不同时刻流场变化规律, 选取 3 个时刻的计算结果分别如图 10 所示, 100 ms 时熔覆 0.18 mm, 500 ms 时熔覆 0.9 mm, 700 ms 时熔覆 1.26 mm。图 10 计算结果表明: 由于表面张力的温度系数为负, 熔池金属流从激光束中心向熔池的边缘移动, 熔池中心流速小, 熔池与基体交界处流速大, 最大流速出现在熔池前方。t=700 ms 时, 熔池内金属流速最大值达到 0.23 m/s, 熔池被

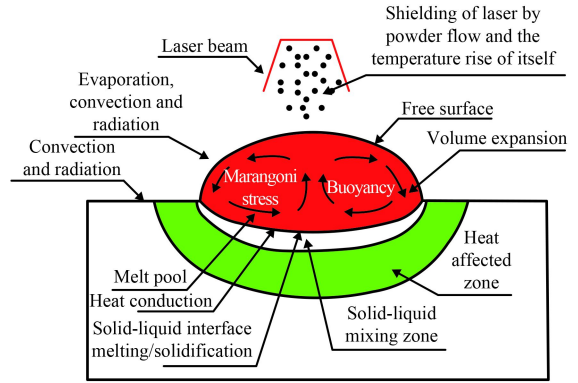


图9 激光熔覆熔池 Marangoni 效应示意图

Fig.9 Schematic diagram of Marangoni effect in laser cladding pool

强烈的 Marangoni 流所控制。绘制熔覆流速瞬时变化曲线, 如图 11 所示。图 11(a) 表明: 沿着 1 轨迹线, 远离熔池区流速为 0, 越接近光斑, 流速呈现先增大后减小的变化, 最大流速逐渐变大。图 11(b) 为沿着 2 轨迹线熔池内部流速曲线, 直到 300 ms 以前, 熔池内流速变化趋势相近, 流速最大值不断升高, 300 ms 时刻最大流速达流的增强, t=700 ms 时, 熔池内金属流速最大值达到 0.19 m/s, 呈现微小变动。300 ms 以后流速呈现先增大后减小, 然后继续增大, 最大流速仍随着时

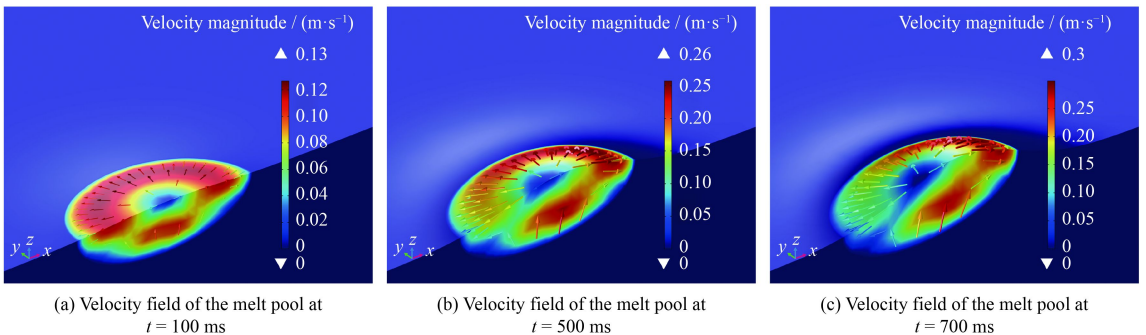


图10 激光熔覆熔池不同时刻的速度流场

Fig.10 Velocity field of laser cladding pool at different time

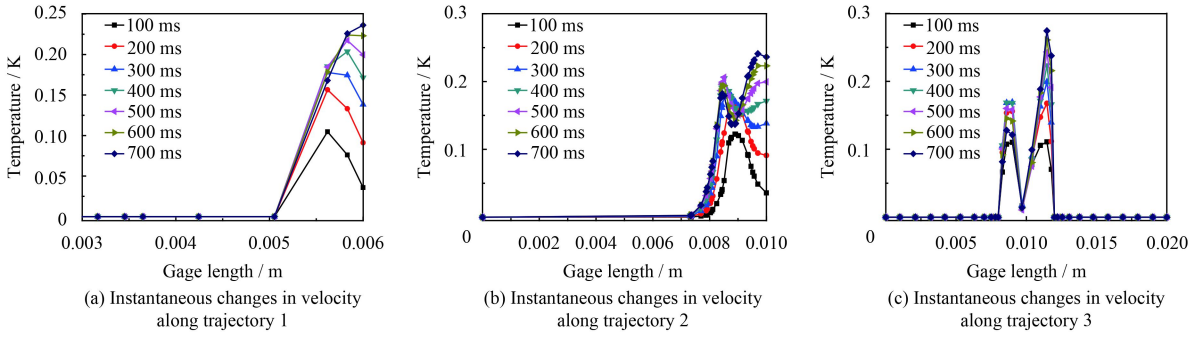


图 11 激光熔覆不同位置的流速瞬时变化

Fig.11 Instantaneous change of velocity in different position of laser cladding

间逐渐变大, 700 ms 时刻最大流速达到 0.243 m/s。
 图 11(c) 表明: 沿着扫描方向, 熔池流速呈现两边高、中间低的“双峰”分布, 在 0.0116 m 位置出现最高峰值, 流速为 0.284 m/s, 最高峰位置滞后熔

池前端 0.0004 m。熔池外仍不存在流速, 且不同位置流速最大值随着时间逐渐增大。

3.2.3 应力场计算结果

图 12 为激光熔覆过程中不同时刻的应力状

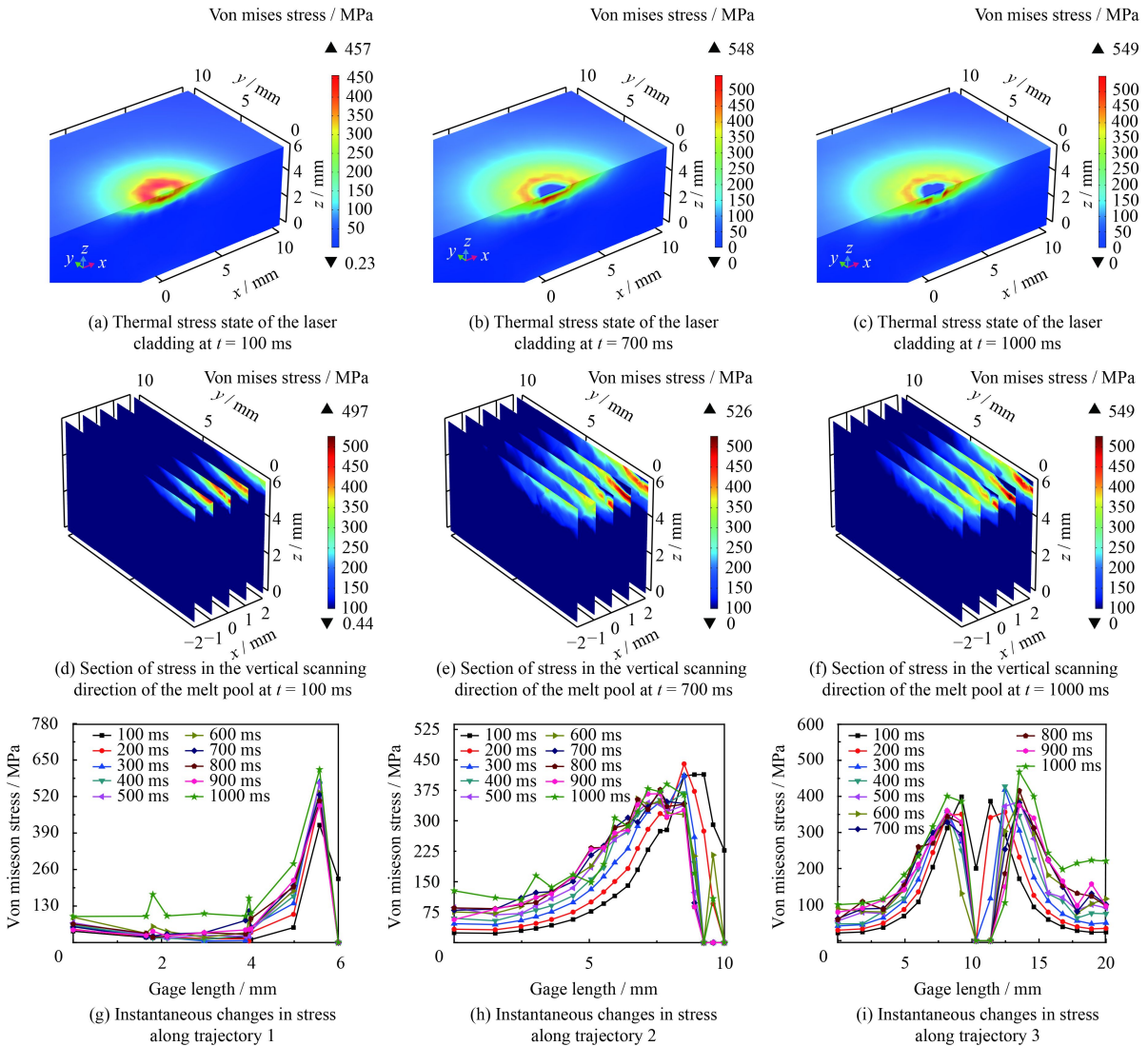


图 12 激光熔覆不同轨迹的应力状态

Fig.12 Stress state at different positions of laser cladding

态。激光熔覆中，因高能激光束辐照，基体因局部受热熔化而发生热膨胀，而局部体积热膨胀受限于周围低温区域的约束，产生弹性热应力；同时，急热导致材料屈服极限随温度的升高而下降，当局部热应力值超过材料屈服极限时，熔覆区产生局部弹塑性热压缩变形；熔覆后冷却阶段，熔覆区相对周围区域将缩短、变窄形成塑性热压缩变形^[16-18]。当温度降至初始温度后会形成残余于零件中的残余应力。如图12所示，100 ms时熔覆0.18 mm，700 ms时熔覆1.26 mm，1000 ms时熔覆1.8 mm。图12(a)~(f)表明：靠近扫描前端的熔池边界应力较大，熔覆热应力呈先快速增大后趋于稳定的趋势；700 ms以后，等效热应力在548 MPa左右趋于稳定；熔池边界热应力明显高于熔池内部，熔池底部热应力最大。图12(g)~(i)表明：沿1轨迹线，熔池应力逐渐呈现峰值，熔池顶部应力达550 MPa，明显高于底部；沿着2轨迹线，应力呈现先缓慢增大而后递减趋势，最终接近0 MPa，熔池中无应力。熔池边缘处应力达最大值，为460 MPa；沿3轨迹线，应力呈现明显“驼峰”分布，熔池中应力为0 MPa，熔池边界应力偏高，远离边界应力逐渐递减。

3.3 枝晶生长试验

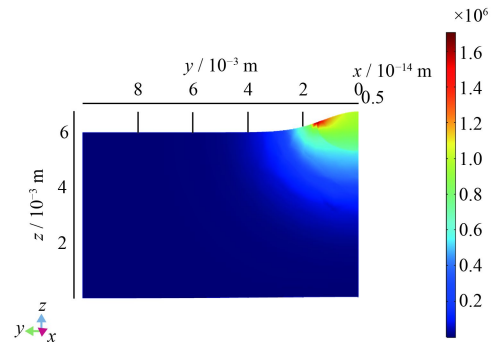
多场耦合作用对熔池的凝固行为有显著影响。图13描述了冷却速率、温度梯度和凝固速度对凝固微观组织结构和尺寸的影响，表明冷却速率 $G \times S$ 对凝固组织尺寸大小的影响，较高的冷却速率导致组织更加精细^[19]。 G/S 决定了微观组织的

形态，即从平面晶、胞晶、柱状枝晶、等轴晶的形态变化。影响凝固微观组织的两个关键因素是凝固前的温度梯度 G 和固/液界面推移速率 S 。

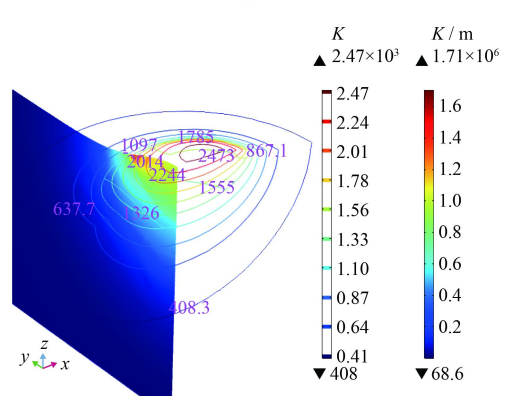
$$\begin{cases} G = \frac{\Delta T_d}{\Delta d} \\ S = V \cos \theta \end{cases} \quad (16)$$

ΔT_d 是单位距离上温度的变化值， Δd 是单位距离， θ 为固/液界面推移速率(即凝固生长速率)方向与激光扫描速度方向的夹角。接近熔池与基体相交接的底部， S 与 V 近似垂直，越靠近熔池顶端， θ 角越小， S 越大。可断定熔池的凝固生长速率从熔池底端到熔池表面呈增大趋势。 G 由模拟计算得出，如图14。根据模拟得出的 G 与计算得出 S 可导出冷却速率 $G \times S$ 和形状控制因子 G/S ，进而预测熔覆过程中熔池凝固组织的形态和尺寸。

图15为熔覆层试件的试验剖面与A、B、C位置的微观组织，该试件是利用碟片激光器在45钢基体熔覆Fe60所形成的熔覆层，分别运用Axioskop 2电子显微镜、Zeiss-ΣIGMA HD型场发



(a) Change in temperature gradient G in the vertical scanning direction



(b) Change in temperature gradient G in the vertical scanning direction and temperature contours

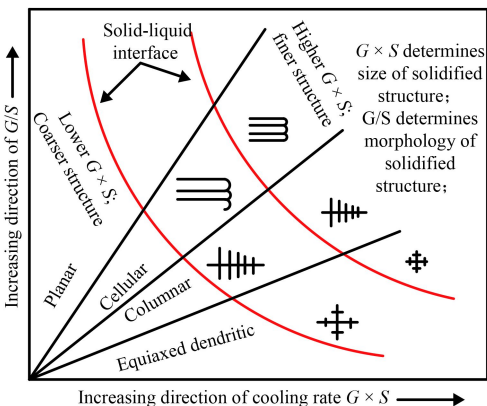


图13 激光熔覆过程中 G 和 S 对熔池凝固组织类型和尺寸的影响

Fig.13 Effects of the G and S on the morphology and scale of the solidified microstructure in laser cladding process

图14 激光熔覆过程中 G 变化云图

Fig.14 Changing cloud chart of G during laser cladding

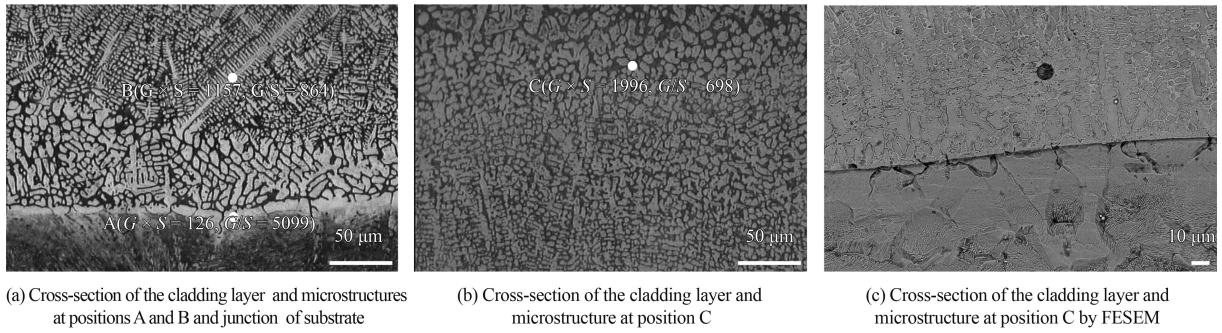


图15 熔覆层的试验剖面与A、B、C位置的微观组织

Fig.15 Experimental cross-section of deposited track and the microstructure in the points of A, B and C

射扫描电子显微镜观察得出的微观组织。模拟计算与试验结果对比表明: A位置处于熔池底部, 具有较高的 G/R 和较低的 $G \times R$, 处于平面结晶区。C位置处于熔池顶部, 具有较低 G/R 和较高 $G \times R$, 为等轴晶与柱状枝晶共存区。B区处于枝晶区, 为柱状的枝晶。熔覆层试验剖面B位置处观察到柱状和粗枝状的枝晶。C位置处为等轴晶和较细的枝晶组织, 试验结果与仿真吻合良好, 验证了文中所建模型的有效性。

4 结论

(1) 采用移动的高斯热源, 综合考虑了传导、对流、粉光匹配影响、相变、凝固、应力的相互作用, 基于随温度变化的热物理参数, 建立了三维热-弹-塑-流多场耦合数值模型, 使模拟结果更接近实际。

(2) 采用碟片激光器在45钢基体熔覆Fe60粉, 加热区温度迅速升高, 形成近似 $2\text{mm} \times 1.5\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的椭球体熔池, 最高温度出现在移动光斑中心偏后位置。熔覆初期, 熔池金属流速最大值为 0.13m/s , 熔池内热传导起主要作用; 700ms 最大金属流速为 0.3m/s , 熔池热对流起主要作用。 700ms 以后, 等效热应力稳定在 548MPa 左右。熔池边界热应力明显高于熔池内部应力, 熔池底部热应力最大。

(3) 对相同工艺和材料下的熔覆过程进行材料学试验分析, 模拟结果与试验数据吻合良好, 验证了文中方法的有效性。

参考文献

[1] DHARANI S. Pradip majumdar finite element analysis of laser irradiated metal heating and melting processes[J]. Op-

tics & Laser Technology, 2010, 42: 855-865.

- [2] LEI Y W, SUN R L, TANG Y, et al. Numerical simulation of temperature distribution and TiC growth kinetics for high power laser clad TiC/NiCrBSiC composite coatings[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44: 1141-1147.
- [3] GAO W, ZHAO S, WANG Y. Numerical simulation of thermal field and Fe based coating doped Ti[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 92: 83-90.
- [4] GAN Z T, YU G, HE X L, et al. Numerical simulation of thermal behavior and multicomponent mass transfer in direct laser deposition of Co-base alloy on steel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104: 28-38.
- [5] YU T B, YANG L, ZHAO Y, et al. Experimental research and multi-response multi-parameter optimization of laser cladding Fe313[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 108: 321-332.
- [6] HUANG Y L, YANG Y Q, WEI G Q, et al. Boundary coupled dual-equation numerical simulation on mass transfer in the process of laser cladding[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6: 356-360.
- [7] HOFMANA J T, LANGEC D F, PATHIRAJ B, et al. FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 187-196.
- [8] ALI E, MASOUD A, AMIR K. Correlation between temperature distribution and in situ formed microstructure of Fe-TiC deposited on carbon steel using laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 9025-9031.
- [9] BEDENEO D V, KOVALEV O B, SMURVA I, et al. Numerical simulation of transport phenomena, formation the bead and thermal behavior in application to industrial DMD technology[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 95: 902-912.
- [10] HAO M Z, SUN Y W. A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of Ti6Al4V alloy using an inverse modeling approach[J]. International Journal of

- Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 352-360.
- [11] NIE P, OJO O A, LI Z G. Modeling analysis of laser cladding of a nickel-based superalloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258: 1048-1059.
- [12] WU J Z, WEI H Y, YUAN F B, et al. Effect of beam profile on heat and mass transfer in filler powder laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 47-57.
- [13] LEE Y S, NORDIN M, BABU S S, et al. Influence of fluid convection on weld pool formation in laser cladding[J]. Welding Research, 2014, 93: 292s-300s.
- [14] 周佳平. 激光沉积制造应力演化及其控制[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016: 15-20.
ZHOU J P. Research on stress evolution mechanism and control of laser deposition manufacturing[D]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2016:15-20(in Chinese).
- [15] 王福雨, 刘伟军, 赵宇辉. 复杂薄壁零件激光快速成型过程热力耦合场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 192-198.
WANG F Y, LIU W J, ZHAO Y H. Thermo-mechanical coupling field simulation of complex thin-wall part laser rapid prototype process[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(5): 192-198 (in Chinese).
- [16] 龙日升, 刘伟军, 卞宏友. 扫描方式对激光金属沉积成形过程热应力的影响[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 74-81.
LONG R S, LIU W J, BIAN H Y. Effects of scanning methods on thermal stress during laser metal deposition shaping[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2007, 43(11): 74-81 (in Chinese).
- [17] CHEN C R, LIAN G F, JIANG J B, et al. Simplification and experimental investigation of geometrical surface smoothness model for multi-track laser cladding processes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 621-628.
- [18] LIN J B, CHEN C J, ZHANG M, et al. The effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Tribaloy 400 coatings deposited by laser cladding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(12): 6339-6348.
- [19] 王丽. 激光熔覆 YSZ@Ni 涂层的温度场和应力场有限元研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017: 31-32.
WANG L. Finite element study of temperature field and stress field of laser cladding YSZ@Ni coating[D]. Nanchang: Journal of Nanchang Hangkong University, 2017: 31-32 (in Chinese).