

[文章编号] 1004- 0609(2002)03- 0464- 07

电弧喷涂层温度场数值模拟^①

王伊卿, 唐一平, 武殿梁, 赵文轸, 卢秉恒

(西安交通大学 先进制造技术研究所, 西安 710049)

[摘 要] 详细介绍了电弧喷涂层沉积过程中三维温度场有限元模拟技术, 采用有限元分析软件计算了不同工艺、不同时刻以及不同位置涂层内的温度场, 在建立传热模型过程中考虑了金属液滴束向涂层的传热与传质以及涂层向系统外的热量散失。采用在厚度方向以微小层叠加来模拟涂层的增厚, 以此为基础构造涂层有限元计算几何模型, 逐层激活单元参与计算过程, 实现移动边界以充分模拟真实的喷涂沉积过程。以实验验证计算结果, 并详细讨论了喷涂沉积速率、界面传热系数以及间歇喷涂对涂层温度场的影响。

[关键词] 电弧喷涂; 涂层; 有限元; 数值模拟; 温度场

[中图分类号] TG 706

[文献标识码] A

由电弧喷涂的原理可知, 大量熔化的金属液滴在高速气流的作用下, 冲击基体表面, 在基体表面凝固形成致密、均匀的涂层, 将热量传给基体。有必要建立传热模型以推测涂层形成过程中任何位置的温度过程, 根据模型推测的温度曲线确定涂层/基体界面、涂层内应力及沿涂层厚度方向微观组织的特征变化。

涂层内温度场变化的瞬态性, 决定了电弧喷涂层温度场的直接精确测量还存在一定难度。电弧喷涂层沉积过程的温度场数值模拟不仅能作为计算涂层的应力场所必须的温度载荷, 而且可为预测和分析电弧喷涂层显微组织, 优化喷涂工艺, 提高电弧喷涂层与基体结合的稳定性提供依据。

1 涂层沉积速率以及涂层/基体界面温度的测量

电弧喷涂设备的型号为 MS-400, 空气压力为 0.65~ 0.75 MPa, 喷涂材料为 Zn-Al10, 基体采用热物性参数已知的 Q235 钢以及环氧树脂, 其尺寸为 60 mm × 30 mm × 6 mm, 其表面经粗化。涂层/基体界面温度的测量传感器采用镍铬-镍硅热电偶。在基体中心钻孔, 将热电偶采用环氧树脂封装于孔中, 温度记录仪为 RW-11T 型日产 X-Y 记录仪。

影响涂层温度最显著的因素是涂层厚度的增长速率。涂层厚度的增长速率与送丝速度以及喷涂距离有关, 增大送丝速度与减小喷涂距离, 均可增加

涂层厚度的增长速率, 送丝速度由送丝电压所决定。本研究选择喷涂距离分别为 14, 18 cm, 送丝电压为 15, 18 V。喷涂实验工艺参数列于表 1。

表 1 喷涂实验工艺参数

Table 1 Parameters of arc spray experiment

Serial number	Wire feeding voltage/V	Spray distance / cm	Spray time/s	Surface treatment
I	15	14	20	Soft steel and sand blasted
II	15	18	26	Soft steel and sand blasted
III	18	18	20	Soft steel and sand blasted
IV	15	14	20	Epoxy resin

2 涂层三维温度场数学模型

对于涂层沉积过程的瞬态温度场三维问题, 如果将金属液滴凝固潜热释放按等效比热容法处理, 涂层在沉积方向为可移动边界, 则温度场变量 $T(x, y, z, t)$ 在直角坐标系中应满足的热传导方程可表示为^[1]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho D \frac{\partial g_s}{\partial t} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

潜热项可变换成如下形式:

$$\rho D \frac{\partial g_s}{\partial t} = \rho D \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

① [收稿日期] 2001- 06- 18; [修订日期] 2001- 12- 17

[作者简介] 王伊卿(1964-), 男, 博士研究生。

式中 D 为涂层增长速率, g_s 为体积固相率, f_s 为质量固相率, 可近似认为二者相等。将潜热项移至方程右端, 则有

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho(C - LD \frac{\partial f_s}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式(3)中 $(C - LD \frac{\partial f_s}{\partial T})$ 称为等效比热容。

若令固相率随温度下降而呈线性增长, 则有

$$T = T_L - (T_L - T_s) \cdot f_s \quad (4)$$

故可得

$$\frac{\partial f_s}{\partial T} = - \frac{1}{T_L - T_s} \quad (5)$$

所以等效比热容可表示为

$$C_E = C + LD \frac{1}{T_L - T_s} \quad (6)$$

本计算模型用到的边界条件可表示为:

1) 第三类边界条件

$$- (k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z) = h(T_a - T) \quad (7)$$

2) 辐射边界条件

$$- k \frac{\partial T}{\partial x} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad (8)$$

3) 界面热阻边界条件

$$- k \frac{\partial T}{\partial z} = h_c (T - T_a) \quad (9)$$

上述各式中 ρ —材料密度, kg/m^3 ; C —材料比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; L —材料的凝固潜热, J/kg ; t —时间, s ; k_x, k_y, k_z —材料沿 x, y, z 方向的热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; n_x, n_y, n_z —一边界外法向; h —界面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; D —涂层沉积速率; T_a —外界的温度; T_L —金属液相温度; T_s —金属固相温度。

3 瞬态导热方程的有限元解法

对于三维问题, 用六面体单元来进行涂层的离散, 单元温度插值函数为

$$(x, y, z)^T = [N] \{x_1, y_1, z_1, x_2, \dots, z_8\}^T \quad (10)$$

式中

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & \dots & N_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_1 & N_2 & \dots & N_8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_1 & N_2 & \dots & N_8 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中各项形函数分别为

$$N_i(r, s, t) = \frac{1}{8} (1 + rr_i)(1 + ss_i)(1 + tt_i) \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (12)$$

以下利用加权余量法推导三维导热微分方程的有限元离散方程。

对导热微分方程的余量进行积分, 并令其积分和为零, 获得控制方程。采用伽辽金法选择权函数, 代入积分和式, 进行逐项分步积分。考虑到 T 满足强制边界条件, 可得到最终的控制方程为

$$\begin{aligned} & \sum_e \int_{\Omega} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} (k_x \frac{\partial N}{\partial x}) + \frac{\partial N_i}{\partial y} (k_y \frac{\partial N}{\partial y}) + \right. \\ & \left. \frac{\partial N_i}{\partial z} (k_z \frac{\partial N}{\partial z}) \right] T^e d\Omega + \sum_e \int_{\Omega} N_i \rho C_N \frac{\partial T^e}{\partial t} d\Omega - \\ & \sum_e \int_{\Omega} LD \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega - \sum_e \int_{\Gamma_2} N_i q d\Gamma - \\ & \sum_e \int_{\Gamma_3} N_i h T_a d\Gamma + \sum_e \int_{\Gamma_3} N_i h N T^e d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

写成矩阵形式:

$$C \frac{dT}{dt} + KT = P \quad (14)$$

式中 C 是热容矩阵, $C_{ij} = \sum_e C_{ij}^e$; K 是热传导矩阵, $K_{ij} = \sum_e K_{ij}^e + \sum_e H_{ij}^e$; P 是温度载荷列阵, $P_i = \sum_e P_{Q_i}^e + \sum_e P_{q_i}^e + \sum_e P_{H_i}^e$; T 是结点温度列阵; $\frac{dT}{dt}$ 是结点温度对时间的导数列阵。

设热传导矩阵 K 和热容矩阵 C 不随时间变化

$$(C/\Delta t + K\theta) T_{n+1} + [-C/\Delta t + K(1-\theta)] T_n = \bar{P} \quad (15)$$

式中

$$\begin{aligned} \theta &= \int_0^1 W_i \xi d\xi / \int_0^1 W_i d\xi, \\ \bar{P} &= \int_0^1 W_i P d\xi / \int_0^1 W_i d\xi \end{aligned}$$

θ 为差分时间离散因子, P 与未知场函数 T 采用相同的插值。

整理后得到涂层三维温度场有限元计算控制方程:

$$(C/\Delta t + K\theta) T_{n+1} = [C/\Delta t + K(1-\theta)] T_n + P_{n+1}\theta + P_n(1-\theta) \quad (16)$$

式(16)就是涂层沉积过程的三维温度场有限元求解的迭代方程。在求解温度场时, 适当选取初始时间步长 Δt_1 及随后的各时间步长 Δt_i , 将每一步的计算结果作为下步计算的起始温度, 直至温度计算结果降到设定值为止。

事实上, 上式中在时间方向上的离散采用的是

时间独立于空间的一维离散, 所得结果相当于在时间上采用有限差分, 这种做法因其简单易行又不影响精度而普遍采用^[2, 3]。

4 涂层温度场计算边界条件及初始条件的确定

在实际计算中, 将辐射边界条件转化为等效对流换热系数, 数学推导过程如下:

$$\begin{cases} -k(\frac{\partial T}{\partial x}n_x + \frac{\partial T}{\partial y}n_y + \frac{\partial T}{\partial z}n_z) = \\ \quad \varepsilon\delta(T^4 - T_0^4) + h(T - T_0) = \\ \quad h_r(T - T_0) + h(T - T_0) \\ h_r = \varepsilon\delta(T^2 + T_0^2)(T + T_0) \end{cases} \quad (17)$$

式中 ε 为玻尔兹曼常数, $\varepsilon = 6.78 \times 10^{-8} \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$, h_r 为辐射传热边界等效为对流边界热阻换热系数。

在实际数值计算中, h_r 是变值, 由前一段时间的表面温度代入式(17)中计算得到。

涂层下表面与基体上的一层应力释放薄膜接触, 此薄膜为热的不良导体, 可认为边界上存在热阻, 边界条件可表示为

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h_c(T - T_a) \quad (18)$$

基体材料选用 Q235 钢和环氧树脂, 其表面粗化处理, 基体材料涂层的有关热物性参数可参照文献、金属手册及实验测试得到^[4~6], 具体数值列于表 2。涂层上表面对流-辐射传热系数 h_r 取 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[7], 与基体接触面的等效传热系数 h_r 取 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

涂层材料 Zr-Al10 的比热容随温度变化, 表现出可变热物性, 比热容、潜热以热焓的形式输入。

5 有限元计算几何模型

采集涂层各点厚度为 h , 则涂层各点处的沉积速率可表示为 $v = h/t$, 将微小时刻 δt 时间沉积涂层厚度逐层叠加, 选取 $30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 为考察范围, 涂层厚度在 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 之间, 计算几何模型如图 1 所示。

在划分网格单元的实际过程中, 选用 8 节点实体 Brick 单元, 在相邻层内选用相同的单元数, 通过在几何体周边定义单元个数。单元尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

6 涂层温度场计算及实验结果分析

图2所示为涂层下表面温度实验测量结果。随

表 2 实验及计算中所用材料热物性参数^[4~6]

Table 2 Thermal-physical constants of materials

Material	Thermal conductivity / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Specific heat capacity/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$			Density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Latent heat of solidification/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
		100 °C	420 °C	1 000 °C		
Soft steel	50	0.469			7 860	
Zr-Al10	113	0.400	0.52	0.54	7 100	100.9
Epoxy resin	0.15		1.3		1 200	

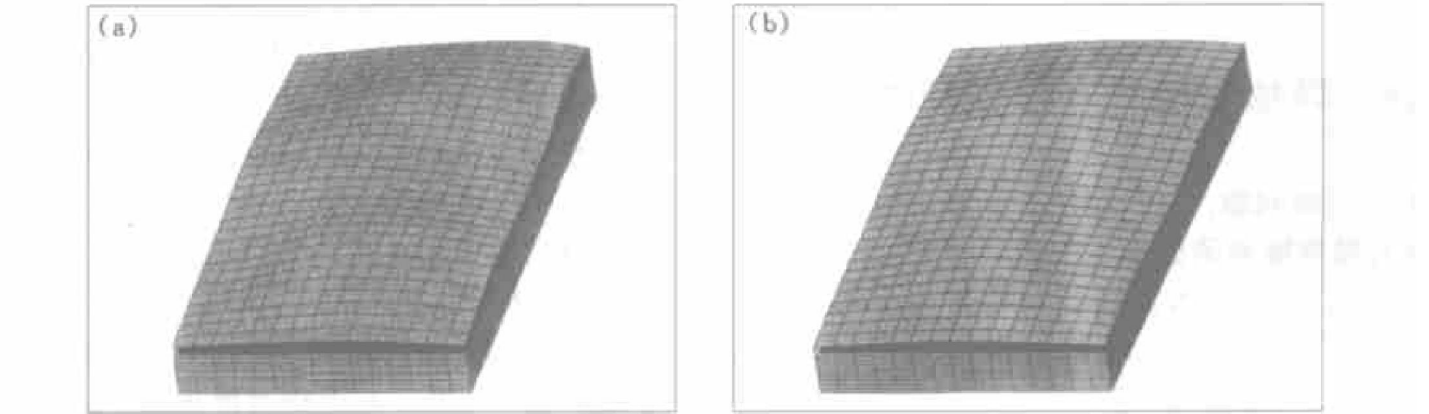


图 1 涂层温度场计算几何模型有限元网格剖分

Fig. 1 FEM grid of geometrical model

(a) —Wire feeding voltage 15 V, spray distance 14 cm, spray time 20 s;
(b) —Wire feeding voltage 15 V, spray distance 18 cm, spray time 26 s

着喷涂过程的进行, 金属液滴形成的扁平粒子所释放的热量引起基体和已形成的涂层温度逐渐升高, 停止喷涂时, 基体和热电偶表面温度达到最高, 之后, 基体表面温度迅速下降, 并且, 温降速度越来越缓慢, 直到冷却至室温。

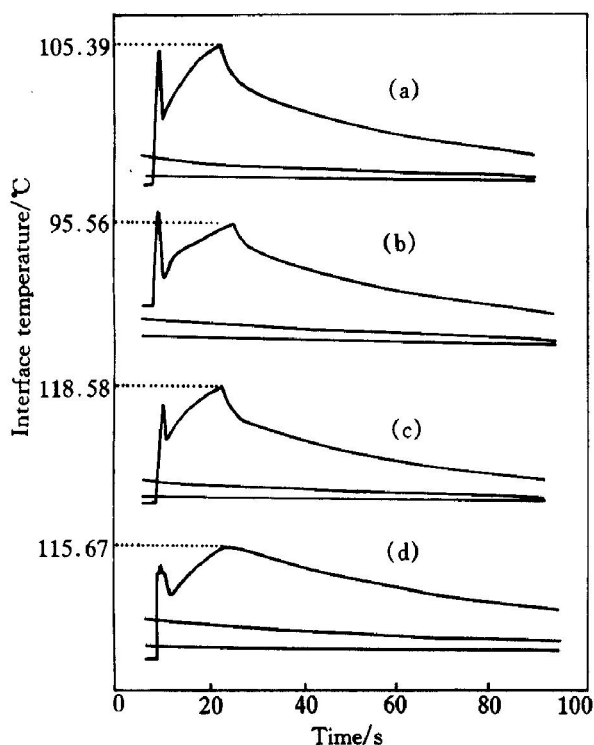


图 2 涂层/基体界面温度随时间变化实测结果

Fig. 2 Temperature measurement of interface between coating and substrate

- (a) —Wire feeding voltage 18 V, spray distance 18 cm, spray time 20 s;
- (b) —Wire feeding voltage 15 V, spray distance 18 cm, spray time 26 s;
- (c) —Wire feeding voltage 15 V, spray distance 14 cm, spray time 20 s;
- (d) —Wire feeding voltage 15 V, spray distance 18 cm, spray time 26 s, epoxy resin substrate

图 3 所示为采用不同沉积速率, 获得相同厚度涂层时, 整个喷涂、冷却过程中, 涂层下表面温度随时间的变化计算结果。可以发现, 喷涂距离从 14 cm 增加到 18 cm 时, 在获得同样涂层厚度的情况下, 涂层的温度变化率由 2.8 K/s 降低到 1.8 K/s。

7 界面传热系数对涂层温度的影响

图 4 所示为在相同的喷涂工艺条件下, 涂层下表面的传热系数不同时, 涂层下表面的温度随时间变化的计算结果。

涂层下表面的传热系数对涂层的凝固过程的影

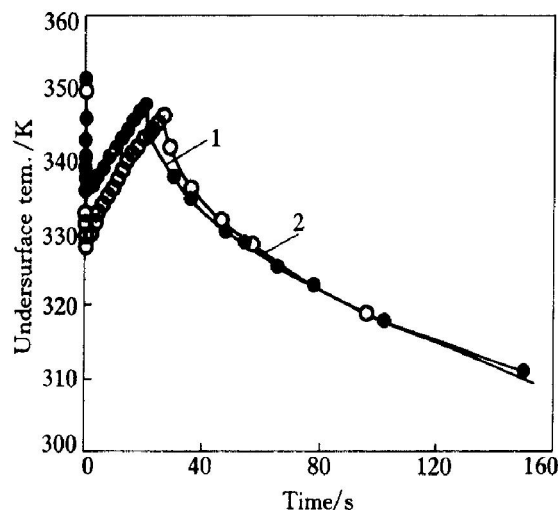


图 3 涂层下表面温度—时间计算曲线

Fig. 3 Temperature calculation results of coating interface under different arc spray conditions

- 1—Wire feeding voltage 15 V, spray distance 14 cm, spray time 20 s;
- 2—Wire feeding voltage 15 V, spray distance 18 cm, spray time 26 s

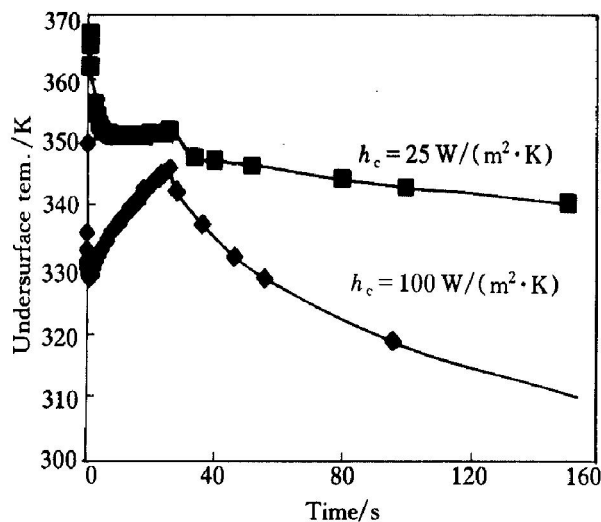


图 4 不同界面传热系数时涂层下表面温度—时间计算曲线

Fig. 4 Temperature calculation results of coating interface with different thermal conductivities

- (Wire feed voltage: 15 V; Spray distance: 18 cm; Spray time: 26 s)

响还是比较显著的, 涂层下表面的热传递系数与基体的材料和表面形状有关。由涂层下表面的边界条件方程(9)可知, 降低基体温度或者提高界面的传热系数(选用强制冷却或选用高导热率材料), 均可以降低涂层下表面温度。

由涂层下表面的热力学分析可知, 降低涂层下表面的传热系数, 可以减少涂层热量向基体的散失, 使金属液滴的温度降低过程趋于缓慢, 温度一

时间梯度降低, 涂层一开始即保持较高的温度。同时, 涂层下表面的传热系数的降低, 导致喷涂过程结束后, 涂层释放热量的速率降低, 温度降低的速率也下降。

8 涂层温度场分析

将图 1 所示的有限元几何模型沿截面剖开, 显示涂层下表面沿 x , y 方向的节点, 如图 5 所示, 研究涂层截面及下表面在 x , y , z 方向温度分布与时间的关系。

图 6 所示为送丝电压 15 V, 喷涂距离 14 cm 的工艺条件下喷涂 20 s, 然后冷却 150 s, 涂层下表面

及截面上的温度分布计算结果。在喷涂的最初时刻 ($t = 1$ s), 涂层下表面温度沿 x , y 方向温度分布存在较大起伏(图 6(a), (b)), 与涂层的有限元几何模型(图 1)相比较可知, 温度分布与涂层的厚度起伏有关, 实际上与沉积速率有关。随着喷涂过程的进行, 涂层厚度对温度分布的影响越来越小, 在 $t = 20$ s 时, 涂层下表面沿 x , y 方向温度分布基本一致。

图 6(c) 为涂层截面温度随时间变化计算结果。可以发现: 涂层上表面以及涂层内部的温度变化与涂层下表面处温度变化趋势完全一致, 在整个喷涂及冷却过程中, 涂层上表面及涂层内部与涂层下表面的温度差别很小。

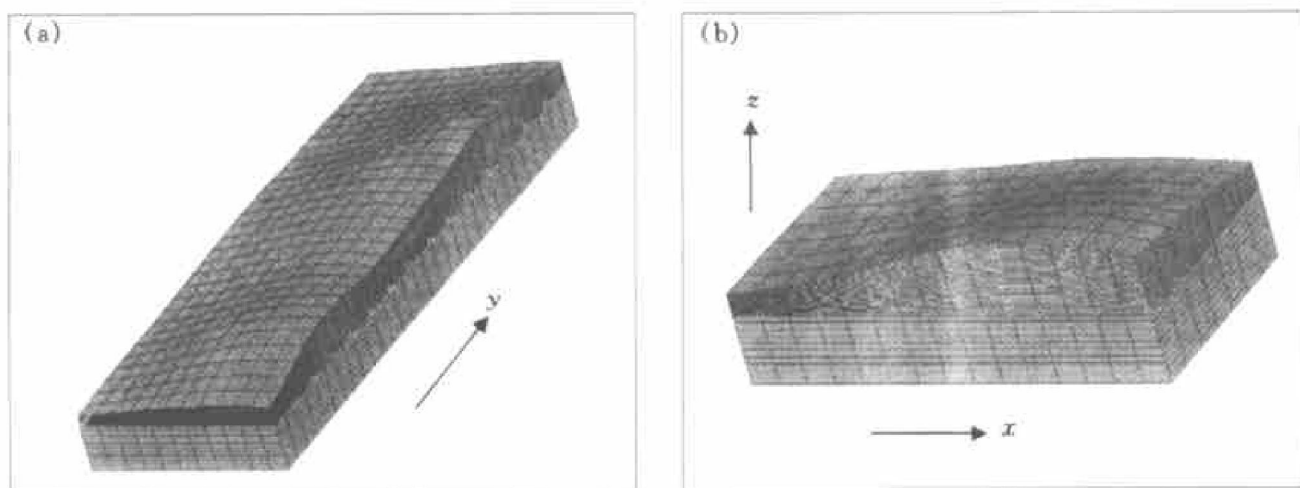


图 5 涂层及基体的有限元计算几何模型截面

Fig. 5 Section of FEM geometrical model of coating and substrate

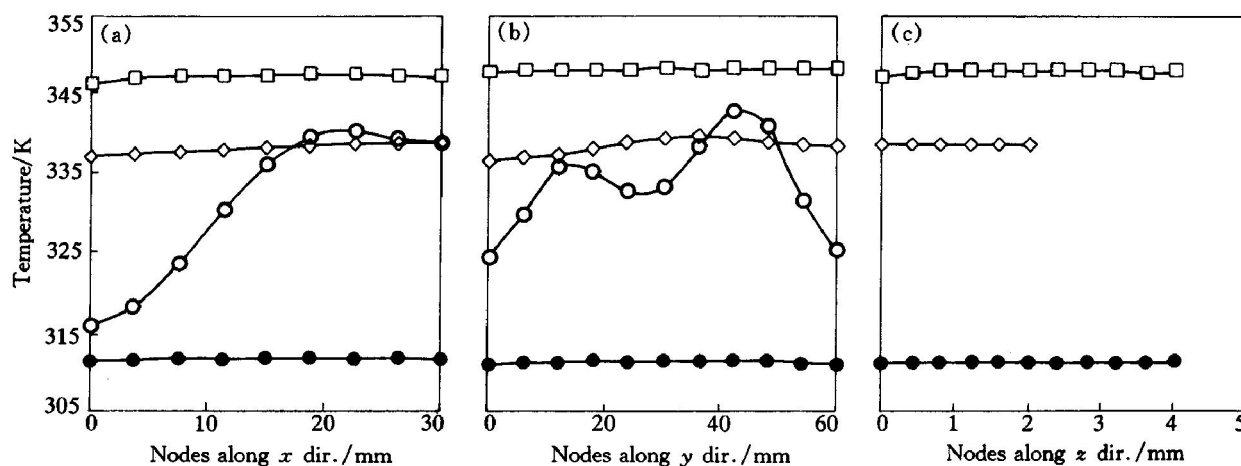


图 6 涂层下表面及截面不同位置节点、不同时刻的温度分布计算结果

Fig. 6 Temperature calculation results under different moment and nodes of coating interface and coating section
(Wire feeding voltage: 14 V, Spraying distance: 14 cm; Spray time: 20 s)

○— $t = 1$ s; ◇— $t = 10$ s; □— $t = 20$ s; ●— $t = 150$ s

涂层上、下面的换热方式包括:高温金属液滴自身形成涂层时,面临高压空气流所产生的强烈对流传热,与冷的金属基体的接触传热,金属涂层的辐射传热。在目前的电弧喷涂工艺中,工艺、设备性质决定了喷涂沉积速率不能够达到喷射成型的速率(喷射成型速率可达到 $2\sim 6\text{ mm/s}$)^[8],涂层表面的对流散失热量与金属液滴所带热焓通过降低温度放出的热量相当,仅仅能够维持涂层温度缓慢上升。实际上,喷涂距离的减小,意味着沉积速率的增加。当提高沉积速率时,金属液滴所带热焓高于表面对流与辐射失去的热量,涂层表面能够维持较高温度,涂层上表面与下表面的温度差逐渐增加,直至上表面温度超过下表面温度,如果沉积速率足够大,甚至在表面会出现液态层。

对于传热系数较大的金属材料 Zn-Al10 合金,涂层沉积速率如果不是特别快,涂层表面温度与涂层下表面温度相差很小,涂层沉积速率对涂层上、下表面温度的影响作用相似。

在不同工艺下,实验测量值与有限元计算值峰点温度的差别在 $30\%\sim 40\%$ 之间。误差原因分析如下。

在建立有限元几何模型时,采用微小层厚逐层叠加的方法,本次计算中选取沉积 1 s 的厚度作为 δh ,即建立模型时,将实际的涂层厚度连续增加的过程,简化为断续的过程,激活每一 δh 厚度的涂层参与计算时,相当于提前将一部分涂层置于环境中,也就是 δh 厚度的涂层在环境中停留时间增加,在这个过程中, δh 厚度的涂层向环境中散失一部分热量,导致计算过程中自身的温度降低,从而导致涂层下表面最终计算结果低于实验测量结果。由此可认为, δh 越小,有限元单元划分越细,计算精度越高,同时计算时间越长。

以上计算所用计算机为 P III450,每次计算时间 $5\sim 7\text{ h}$ 。

9 结论

设计了一套涂层三维温度场的有限元计算方法,采用逐个微小厚度层叠加的模型建立方法,实现了可移动的边界条件,模拟了真实的涂层沉积过程中的温度场,计算结果能够与实验结果相符。计算与实验结果表明:

1) 涂层下表面温度决定于涂层沉积速率,与送丝速度、喷涂距离有关,改变送丝速度和喷涂距离,均可改变涂层温度。

2) 基体的传热系数影响涂层温度分布,在其他界面边界条件不变时,降低涂层下表面的传热系数,则导致喷涂结束后,涂层释放热量的速率降低,即涂层冷速降低。

3) 在沉积速率不很大的情况下,喷涂过程中,涂层内温度沿基体表面 x, y 平面内起伏较小,涂层的上、下表面的温度差较小,并且随着涂层沉积速率的增加,涂层的上、下表面的温度差增加。

[REFERENCES]

- [1] 张自立,张韵琴,王文祥. 数学物理方法 [M]. 西安:西安交通大学出版社,1989. 9.
ZHANG Zi-li, ZHANG Yun-qin, WANG Wen-xiang. Mathematic-Physic Method [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989. 9.
- [2] 孙菊芳,荣王五. 有限元法及其应用 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1990. 93.
SUN Ju-fang, RONG Wang-wu. FEM and Its Application [M]. Beijing: University of Aeronautics and Astronautics Press, 1990. 93.
- [3] 冀守礼,朱古君,杨帆. 三维物体稳态及瞬态温度场的有限元分析 [J]. 工程热物理学报,1987, 5: 159 - 165.
JI Shou-li, ZHU Gu-jun, YANG Fan. FEM analysis of static and transient temperature field on a 3D object [J]. Acta Engineer and Thermal-Physics, 1987, 5: 159 - 165.
- [4] 美国金属学会主编. 金属手册(第九版,第二卷,性能与选择:有色合金及纯金属) [M]. 北京:机械工业出版社,1994. 906- 1051.
American Metallic Academy. Metallic Handbook(Performance and Selection, Volume 2, Nonferrous Metals and Pure Metals) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994. 906- 1051.
- [5] 程军,张毅. 计算机在铸造中的应用 [M]. 北京:机械工业出版社,1993. 123.
CHENG Jun, ZHANG Yi. The Application of Computer in Casting [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1993. 123.
- [6] 蒋乃隆. 铸造工艺CAD及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社,1994. 173.
JIANG Nai-long. The Application of Casting Technics CAD [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994. 173.
- [7] 傅晓伟,张济山,孙祖庆. 喷射过程的计算机模型及优化软件 [J]. 金属学报,1999, 35(2): 147- 151.
FU Xiao-wei, ZHANG Ji-shan, SUN Zu-qing. Modeling and optimizing software of spray deposition process [J].

- Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(2): 147– 151.
- [8] 张济山, 等. 雾化喷射沉积成型凝固过程模拟研究 [J]. 金属学报, 1998, 34(1): 7– 12.

ZHANG Ji-shan, et al. Simulation of solidification behavior in spray deposited preform [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1998, 34(1): 7– 12.

Numerical simulation of temperature field during arc spray coating

WANG Yi-qing, TANG Yi-ping, WU Dian-liang, ZHAO Wen-zhen, LU Bing-heng
(Institute of Advanced Manufacturing Technology, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049, China)

[Abstract] The method of 3D FEM numerical simulation of coating temperature field during deposition process was introduced in detail. The FEA program Ansys was used in the temperature field calculation. The transfer of heat and mass from metal spray to coating and the heat loss by radiation were taken into account when the mathematical model was put forward. The geometry model was built through the micro-thickness increase of the coatings. In the model, the micro-thickness lamellas were activated gradually to participate in the calculation. Movable boundary condition was used to simulate the practical deposition process. Experiments proved that the calculation results are believable. The influence of deposition rate, coefficient of heat transfer and spraying process on coating temperature field was discussed.

[Key words] arc spray; coating; FEM; numerical simulation; temperature field

(编辑 袁赛前)