

40Cr 合金表面等离子熔覆温度场的数值模拟*

毕晓勤¹, 杨仲磊²

(1. 河南工业大学 材料科学与工程学院, 郑州 450052; 2. 郑州机械研究所, 郑州 450052)

摘 要: 在 40Cr 合金钢表面等离子熔覆 Ni-Cr 合金涂层, 应用 Ansys 进行等离子熔覆温度场的数值模拟。模拟结果表明: 模拟所得熔池尺寸与实测的数据较为接近, 表明所建模型具有一定的适用性。随着远离熔池的距离增加, 熔池前方温度下降较为剧烈, 熔池后方的则较为缓慢, 在相等的距离上温度变化的幅度从中心向下部以及从中心向外侧均逐渐变缓。熔覆时温度梯度可高达 5.9×10^6 °C/s, 温度场呈现准稳态分布, 各节点在滞后一定时间之后均达到最高温度。

关键词: 等离子; 熔覆; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TG14; TN2

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2009)03-0043-06

Simulation of Temperature Field in the Cladding Coated on 40Cr Alloy by the Plasma Transferred Arc

BI Xiao-qin¹, YANG Zhong-lei²

(1. College of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China; 2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450052)

Abstract: Ni-Cr cladding was coated on 40Cr alloy by the PTA (plasma transferred arc). The cladding temperature field was simulated by Ansys. The results show that the simulation size of the weld pool is approximate to the actual size. This indicates that the thermal FEA model has a certain degree of applicability. With the increase of the distance away from the welding pool, the temperature in the front of the welding pool decreases intensely and the temperature at the back of the welding pool decreases slowly. The temperature in the same distance varies slowly from the center to the bottom and the lateral side. The maximum temperature gradient can attain to 5.9×10^6 °C/s. The cladding temperature field appears the quasi-steady distribution. The temperature of each node attains to the maximum after delaying a period.

Key words: plasma transferred arc; cladding; temperature field; simulation

0 引 言

40Cr 合金钢由于具有较高的抗拉强度、疲劳强度、屈服强度及良好的韧性, 在工业生产中被广泛用于制造承受中、高负荷和中等速度且具有较高表面硬度及耐磨性的轴类零件^[1,2]。作者利用等离子熔覆技术进行合金化处理, 使高性能的涂层材料熔覆到 40Cr 基体表层, 形成冶金结合的涂层合金化表面, 对 40Cr 合金钢进行了表面改性处理和表面修复。

等离子熔覆是一个急剧升温和快速冷却的过程^[3,4], 因等离子弧具有极高的热流密度而导致的表

面熔化与凝固过程伴随着相变、导热、对流、和辐射等现象, 关于这一过程中温度的变化是无法用试验精确测量的, 而等离子熔覆过程温度的变化对建立工艺参数与组织、性能之间的关系又是极其重要的。因此, 文中在 40Cr 合金钢等离子熔覆涂层的试验基础上, 对离子熔覆温度场进行了数值模拟, 并用试验结果验证数值模拟的适用性。

1 试验材料及方法

选用 40Cr 合金钢为基体材料, 熔覆材料的质量分数为 60%~70%Ni、10%~15%Cr 和 8%~20%Fe 的混合合金粉末。

采用手涂预置粉末法, 将 Ni-Cr 合金粉末调成糊状均匀预涂敷在 40Cr 合金钢基体上并烘干; 选

收稿日期: 2009-03-23; 修回日期: 2009-04-06

基金项目: *河南省科技攻关项目 (2009A430003)

作者简介: 毕晓勤(1967-), 女(汉), 辽宁大连人, 副教授, 博士。

用转移型等离子弧, 在 1.8~2.4 kW 熔覆功率和 8.8~15.5 mm/s 扫描速度下进行等离子合金化平面单道熔覆试验, 得到一定宽度的熔覆带。

2 温度场模型建立

等离子熔覆与 TIG (钨极惰性气体保护焊) 焊接在物理学上存在相似性, 因此可以借鉴较为成熟的 TIG 焊接温度场的计算方法。由于实际传热问题非常复杂, 纯数理方法尚无能为力, 而数值解法中的有限元法, 具有很大的适应性, 对于比较复杂的情况都能较好地解决。因此, 文中利用 Ansys 进行等离子熔覆温度场的数值模拟, 以得到等离子熔覆过程中的温度、温度梯度和热循环曲线等。

2.1 热源模型

为了简化计算, 在对熔覆温度场进行分析的过程中做如下假设: ① 熔覆材料与基体材料为各向同性; ② 忽略熔池流体的流动作用、材料的汽化作用、小孔效应和变形热; ③ 等离子束热流密度服从高斯分布; ④ 忽略热辐射现象。

热源模型的选用很大程度上影响着模拟所得熔池的形状、尺寸以及温度场的分布。热源模型选择合适, 计算得到的温度场分布将与实际情况相一致, 熔合线与实际熔池轮廓曲线相吻合。热源模型中的特征参数通过反复试算, 与实验结果进行比较后进行调整, 来提高模拟结果精度。

等离子熔覆过程中的热输入具有局部集中和随时间变化的特点, 且基材为中厚板, 因此选用移动的高斯热源较为理想。Friedman^[5]、Krutz 和 Segerlind^[6]等提出了移动的高斯面热源模型。与热源一起移动的局部坐标系(χ, y, ξ)和固定整体坐标系(χ, y, z)的建立见图 1。

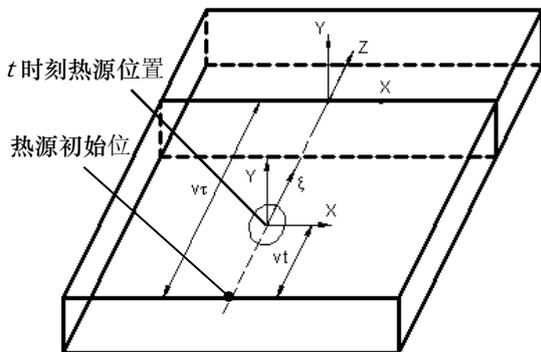


图 1 移动的高斯热源

Fig.1 Schematic of the moving Gauss Source

在坐标系(χ, y, ξ)下, 热源分布函数为:

$$q(\chi, \xi) = q_{\max} e^{-\frac{3(\chi^2 + \xi^2)}{r_0^2}} \quad (1)$$

其中 $q_{\max} = \frac{3Q}{\pi r_0^2}$ 为热源中心处的热流最大

值; $Q = \eta UI$ 为热源的有效热功率(其中 U 为离子束工作电压, I 为工作电流, η 为有效热功率系数, 依据 TIG 焊接碳钢试样时为 0.62~0.70, 故在文中, 取 $\eta = 0.65$); r_0 为热源斑半径。

局部坐标系(χ, y, ξ)和整体坐标系(χ, y, z)之间的关系式为:

$$\xi = z + v(\tau - t) \quad (2)$$

式中: v 为熔覆热源移动速度; τ 定义了热源在整体坐标系下的初始位置。

据此, 在整体坐标系下的移动高斯热源分布函数为:

当 $\xi^2 + x^2 < r_0^2$ 时,

$$q(x, z, t) = q_{\max} e^{-\frac{3[(z+v(\tau-t))^2 + x^2]}{r_0^2}} \quad (3)$$

当 $\xi^2 + x^2 \geq r_0^2$ 时,

$$q(x, z, t) = 0 \quad (4)$$

2.2 热边界条件

在等离子弧作用过程中, 可将等离子熔覆的导热问题的边界条件做如下处理:

(1) 基体的上表面

如图 2 所示, 等离子束的扫描速度为 v , 当扫描方向确定后, 等离子束作用圆形区域中心点在基体上表面任意时刻 t 的位置 $Z = Z_0 + vt$ 确定。其中: Z_0 为等离子束起始位置 ($Z_0 = v\tau$)。

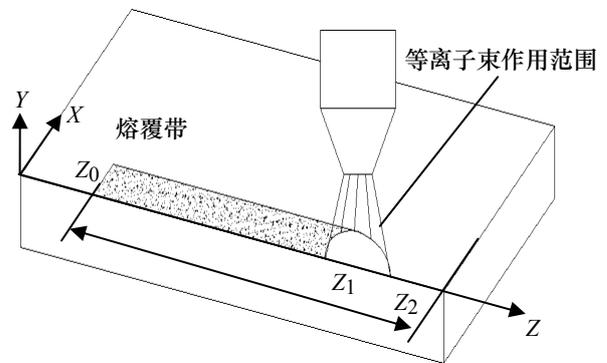


图 2 边界条件示意图

Fig.2 Schematic of boundary condition

当 $t = t_1$ 时，等离子束作用的中心位置 $Z_1 = Z_0 + vt_1$ 。在基体上表面以 Z_1 为圆心、 r_0 (等离子束半径, 文中取 3 mm) 为半径的区域内, 将 Z_1 代入式(3)得式(5)的加载热流密度载荷; 在等离子束作用区域外, 以式(6)计算基体与空气的热对流。

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{3Q}{\pi r_0^2} e^{-\frac{3[(Z_0+vt_1)-Z]^2+x^2}{r_0^2}} \quad \xi^2 + x^2 < r_0^2 \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_0) \quad \xi^2 + x^2 \geq r_0^2 \quad (6)$$

式中, T_0 为环境温度; Q 为有效功率; h 为材料表面与空气的对流换热系数。

经过一个时间间隔 δt , 到达 $t_2 = t_1 + \delta t$ 时刻。此时, 等离子束作用的中心位置为 Z_2 。首先删除在 t_1 时刻对基体上表面施加的热边界条件后, 再在其上以 Z_2 为圆心、 r_0 为半径的区域内, 以式(5)施加热流密度载荷; 区域外, 以式(6)计算基体与空气的热对流。通过不断循环, 即可在基体上表面实现连续移动热载荷的加载。

(2) 对称面

由于本文采用的是对称模型, 因此在对称面施加对称约束:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

(3) 其他表面

在其他表面上给定对流换热边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \quad (8)$$

2.3 有限元模型

由于工件的对称性, 采用对称模型, 有限单元模型见图3所示。考虑到熔覆层、基体材料的热物理参数不同, 采用分层和分块建模; 同时, 在网格划分时, 将整个模型分为: 加密网格区、过渡区和

稀疏网格区。在加密网格区和稀疏网格区采用六面体单元划分; 在过渡区采用四面体单元, 实现单元由加密网格区向稀疏网格区的过渡。加密网格区和稀疏网格区的单元尺寸为等离子束的斑点半径分别乘以其比例系数 (算例中比例系数加密网格区取 0.16, 稀疏网格区取 6)。这种处理既保证了具有足够的计算精度又节省了计算时间^[7]。

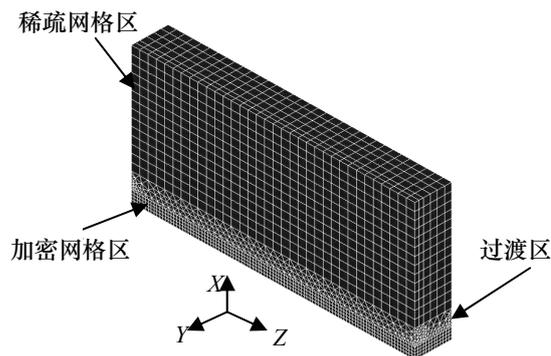


图3 有限单元模型

Fig.3 Finite element method model

2.4 材料特征参数及预涂层孔隙处理

影响温度场的材料特征参数主要有密度、导热系数、比热容及相变焓。这些特征值是随着温度变化而变化的, 并且遵循一定的规律。由于高温时材料热物理性参数的测量相当困难, 文献上很少提供材料的高温热物理性参数。文中依据相图采用 JMatPro 材料性能模拟软件计算凝固过程中随温度变化的物理参数 (如: 比热、焓、潜热、密度; 热膨胀系数; 杨氏/体积/剪切模量、泊松比等)。通过对比 20~600℃ 间 40Cr 的热物理性参数, 表明 JMatPro 计算所得的热物理性参数具有较高的可信度。因此, 文中的热物理参数 (见表 1) 取自其计算的结果。

由于预涂层是由合金粉与粘结剂均匀混合后凝固形成的, 其内部将产生孔隙。因此, 文中的数

表 1 40Cr 的热物理参数

Table1 Thermal-physical properties of 40Cr alloy

温度/℃	25	200	400	730	740	770	1420	1480	1490	1600
比热/(J/(kg·℃))	457	525	619	3394	4206	594	697	1200	7846	830
导热系数/(W/(m·℃))	43	41	36	30	28	26	34	34	33	35
焓 (J/g)	0	74	188	450	489	536	956	1165	1254	1345

值模型通过对密度和导热系数乘上相应比例因子来做调整,采用麦式方程^[8]进行计算:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{(1-\phi)}{1+\phi} \quad (9)$$

式(9)中: λ_1 为预涂层的导热系数; λ_2 为折算后的导热系数; ϕ 为孔隙占总体积比。

3 计算与结果分析

3.1 温度场计算模型的检验

为检验文中模型计算的可靠性和准确性,将试验实测熔池的几何尺寸与模拟所得熔池的几何尺寸进行比较。熔池几何尺寸的实测方法是:熔覆过程中,在熄弧的同时,用大流量氩气吹击熔池,将熔池内处于液态的金属吹出,冷却后测量熔池坑的深度及宽度。

图4给出了预涂层厚3 mm,熔覆功率1.8 kW和扫描速度8.8 mm/s工况下实际的熔池形状。图5为相应工艺参数下,模拟所得熔池尺寸的形貌及等温线图, Ni-Cr系合金熔点约为1 200 °C。从图5(a)可知,上表面的等温线为封闭的椭圆型,在热源前方密集,后方稀疏;热源移动越快,长轴越长;当与热源的距离增加时,热源前方温度的下降最为剧烈,而在热源后方则最为缓慢,热源两边为中等梯度,等温线以热源移动线为对称。



图4 实际熔池形貌
Fig.4 Morphology of the weld pool

表2给出了实测熔池的数据与模拟熔池的数据对比结果。从表2可以看出,通过对多个熔池的测量,所得实验结果与本文的数值模拟结果比较接近。虽然模拟结果和实测数据也略存有偏差,分析认为:

这是由于等离子束具有匙孔效应,本文在建立模型时做了适当的假设,采用的高斯面热源忽略了熔池中液态金属的对流和电弧吹力的影响。由于数值偏差在合理的范围^[9,10],因此,通过将模拟数据与实测数据进行比较验证了所建模型的适用性。

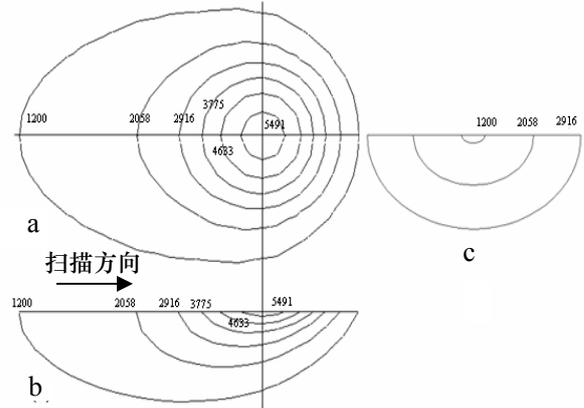


图5 模拟熔池的形貌及等温线图(a)俯视 (b)纵截面 (c)横截面
Fig.5 The simulating weld pool and the temperature isotherm (a) top view (b) vertical section (c) transverse section

表2 熔池几何尺寸(mm)的实测值与模拟值的对比
Table 2 Comparison between calculated results and measured results (mm)

类型	工艺参数		
	* $p=1.8\text{kW}$; $v=8.8\text{mm/s}$	$p=2.1\text{kW}$; $v=10\text{mm/s}$	$p=2.4\text{kW}$; $v=15.5\text{mm/s}$
熔深	实测值 3.2	模拟值 3.4	2.9
熔宽	实测值 6.4	模拟值 6.6	5.9
	实测值 6.0	模拟值 6.2	5.8

注: * p 为等离子束功率, v 为其扫描速度。

3.2 总体温度场不同时刻分布特点

图6是2.4 kW熔覆功率和15.5 mm/s扫描速度条件下,等离子束从工件上表面一端向另一端进行直线扫描,不同时刻下的温度场云图。

图6(a)是等离子束在上表面扫描时间为2.5 s,扫描距离为37.5 mm的情况;图6(b)是扫描时间为3.3 s,扫描距离为49.5 mm的情况。对比图6(a)与图6(b),可以看出,随着等离子束的直线运动,工件的温度场呈现准稳态分布。

3.3 线温度变化特点

图7(a)是上表面取线位置示意图,用L1~L4虚

线表示上表面不同位置温度分布情况，虚线 L1 穿过熔池表面中心且与 x 轴平行，虚线 L1~L4 以间隔 1mm 等距离分布。图 7(b)为纵切面取线位置示意图，L1、L5、L6 和 L7 虚线表示工件纵切面不同位置温度分布情况，虚线 L1、L5~L7 以间隔 0.5 mm 等距离分布。

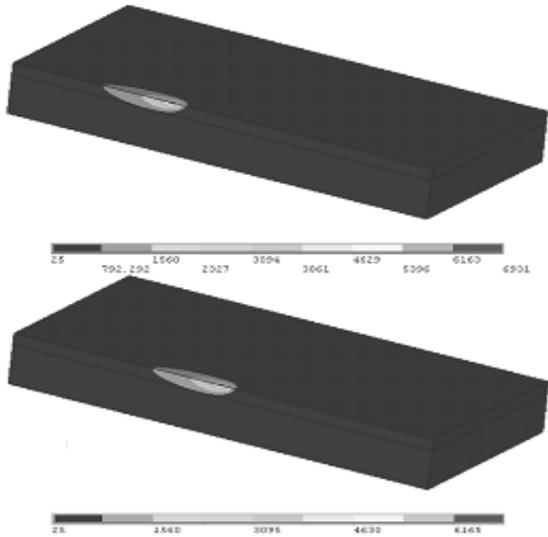


图 6 不同时刻温度场云图

Fig.6 Nephogram of temperature at different times

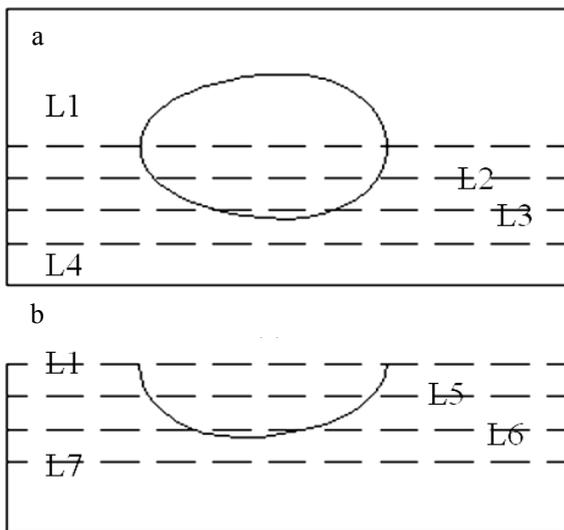


图 7 取线位置示意图 (a)上表面 (b)纵切面

Fig.7 Schematic of path position (a)top surface (b)longitudinal section

图 8 是在功率 2.4 kW 和扫描时间 3.2 s 的条件下，位置对应图 7 的温度分布曲线（图 7 中的 L1~L7 线的左端点为图 8 中横坐标的零点）。由图 8(a)可见，熔池中心温度最高，随着与熔池中心距离的增加，

温度逐渐降低，在相等的距离上温度变化的幅度从中心向下部逐渐变缓。图 8(b)中，上表面熔池中心温度最高，随着与熔池中心距离的增加，温度逐渐降低，在相等的距离上温度变化的幅度从中心向外侧逐渐变缓。

3.4 不同节点的热循环曲线

当热源作用时，工件上某点的温度随时间的变化过程称为热循环。只要获得了某点的热循环曲线，就能提取熔覆时热循环特征参数（如峰值温度、加热速度、冷却速度和在某一温度区间的维持时间等），了解这些特征参数，可为合理选择熔覆工艺参数提供重要依据。

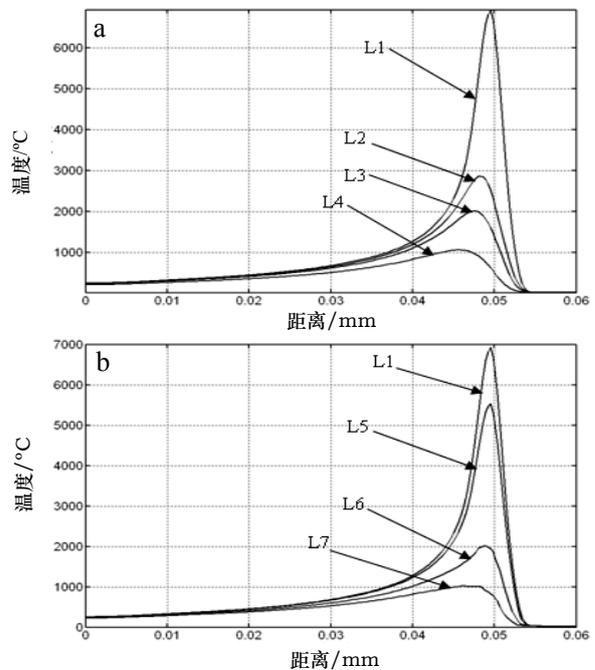


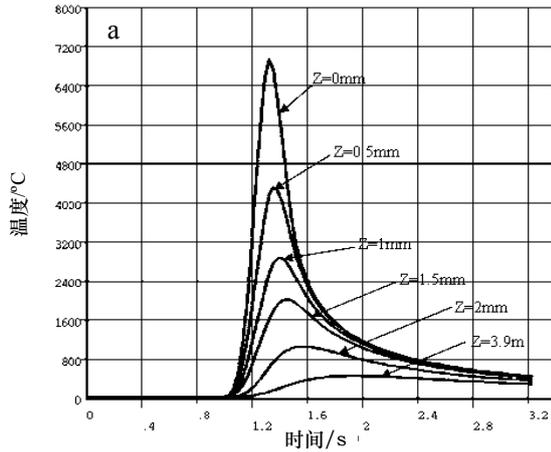
图 8 不同位置的温度分布 (a)上表面 (b)纵切面

Fig.8 Temperature distribution along different path (a)top surface (b) longitudinal section

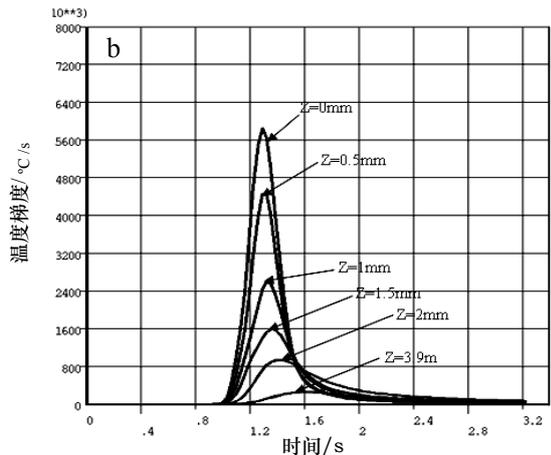
图 9(a)为等离子束中心纵切面上，分别距离工件上表面 0 mm, 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 3.9mm 的位置示意图。

图 9(a)的热循环曲线图可知，当等离子束扫描接近 Z=0 mm 点时，该点迅速由低温升至高温，并发生熔化，当等离子束离开该点时，其温度迅速下降至熔点以下，并通过一段时间逐渐降至室温；由于热量需要一定时间从表面向内部传递，各点在分别滞后了不等的时间之后才达到最高温。图 9(b)的温度梯

度曲线图中可以看到：熔覆时工件的最高温度梯度可达到 $5.9 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ，说明等离子束具有产生超细晶及非晶组织的能力^[11]；随着深度的增加，温度梯度逐渐降低，而且热量的传递具有一定的滞后，其他点也具有类似的热循环特征。



(a)热循环曲线



(b)温度梯度曲线

图9 不同节点热循环曲线及温度梯度曲线

Fig.9 Heat cycling curves and temperature gradient curves of the different nodes (a)Heat cycling curves (b) temperature gradient curves

4 结论

- (1) 应用 Ansys 软件建立了等离子熔覆温度场的三维有限元模型。
- (2) 模拟所得熔池几何尺寸与实测的数据较为接近，表明所建模型具有一定的适用性。
- (3) 随着远离熔池中心的距离增加，热源前方温度下降较为剧烈，热源后方的则较为缓慢，在相等

的距离上温度变化的幅度从中心向下部以及从中心向外侧均逐渐变缓。

(4) 熔覆时工件最大温度梯度可达 $5.9 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 。温度场呈现准稳态分布，各节点在滞后一定时间之后均达到最高温度。

参考文献:

- [1] 王林梅, 杨川, 程海明, 等. 国产与进口轴承钢组织结构与性能分析[J]. 热加工工艺, 2008, 37(18): 25-28.
- [2] 陈瑞芳, 杨继昌, 等. 40Cr 钢表面激光复合强化机理研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(10): 31-34.
- [3] 刘邦武, 张丽民, 李惠琪, 等. 等离子熔覆铁基涂层开裂行为研究 [J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(4): 545-547.
- [4] 李敏, 李惠东, 李惠琪, 等. 等离子体表面改性技术的发展 [J]. 金属热处理, 2004, 29(5): 39-42.
- [5] Frideman E, Thermomechanical analysis of the welding process using the finite element method[J]. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 1975, 97: 206-213.
- [6] Krutz G.W and Segerlind L.J, Finite element analysis of welded structures[J].Welding Journal Research Supplement, 1978, 57: 211-216.
- [7] 席明哲, 虞钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟 [J]. 中国激光, 2004, 31(12): 1528-1532.
- [8] 徐庆鸿, 郭伟, 田锡唐. 激光熔覆三维温度场数值模型的建立与验证 [J]. 焊接学报, 1997, 18 (2): 58262.
- [9] 莫春立, 钱百年, 国旭明, 等. 焊接热源计算模式的研究进展 [J]. 焊接学报, 2001, 22(2): 16-19.
- [10] 应丽霞, 王黎钦, 陈观词, 等. 3D 激光熔覆陶瓷-金属复合涂层温度场的有限元仿真与计算 [J]. 金属热处理, 2004, 29(7): 24-28.
- [11] 吴玉萍. 压缩弧光等离子束熔覆层中晶相与非晶相 [J]. 材料热处理学报, 2002, 23(1): 11-14.

作者地址：郑州市高新技术产业开发区莲花街 450001
 河南工业大学 人事处
 Tel: 13676985084
 E-mail: bi_xq@163.com



(上接第 42 页)

- [8] Arata Y, Ohmori A, Li C J. Electrochemical method to evaluate the connected porosity in ceramic coatings[J]. Thin solid films, 1988, 156(2): 315-25.
- [9] 李建保, 周益春, 林红, 等. 新材料科学及其实用技术[M]. 北京：清华大学出版社, 2004: 477-487.

作者地址：福州市福州大学材料学院 350108
 Tel : 13960841201
 E-mail : wzyforjustice@163.com