不锈钢重熔工艺瞬态热物理性能数值模拟

吴　彬，马　维（中国科学院 力学研究所，北京　100080）

摘要：应用有限元方法对层流等离子体射流不锈钢表面重熔工艺中的瞬态热物理现象进行了数值模拟研究。针对不同加热距离，确定了材料熔化和凝固过程中的瞬态温度场、温度梯度和凝固率的时间和空间分布特征。通过引入等效温度面积密度概念，研究了不锈钢重熔热处理的适合条件。结果表明，9～13 mm 的范围是较为适宜的加热距离，该结果与试验观察基本符合。

关键词：层流等离子体；重熔；不锈钢；等效温度面积密度

中图分类号：TG143；TG156.99　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1254-6051(2006)08-0064-04

Numerical Simulation of Transient Thermal Features in the Remelting Processing of Stainless Steel

WU Bin, MA Wei (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A two-dimension model was established based on the experimental results of the laminar plasma remelting processing on the stainless steel. The main purpose is to determine the proper processing conditions of material surface heat treatment through the finite element simulation. The related results include the determination of the variations of the temperature, the temperature gradients and the cooling rates of the pool substances with time. A criterion based on the concept of the equivalent temperature area density (ETAD) is established to predict the proper processing conditions for the situation of the stainless steel remelting. Theoretically, the method can be used to determine the optimum processing condition of heat treatments and equally generalized to the cladding treatment situations of both the plasma processing and the laser technology. The simulating results show that the appropriate heating distances should be in the region of 9～13 mm for the laminar plasma processing, which is in agreement with the experimental observation.

Key words: laminar plasma; remelting; stainless steel; equivalent temperature area density (ETAD)

等离子体射流的热流密度可达 10^2 W/mm^2，用于金属表面热处理时热效率较高，并且设备的造价及运行费用低，目前已成为表面改性的常用技术之一[1-2]。通常等离子体射流状态为湍流，稳定性较差。与其不同，层流等离子体射流稳定性好，对环境气体卷吸少而且轴向温度梯度小。有可能明显改进等离子体技术并降低加热过程中材料的氧化现象。因此，对层流等离子体材料表面改性技术的研究具有明确的现实意义[1,3]。

重熔过程中材料性能变化发生在毫秒时段内，本文针对此过程的瞬态特性开展数值模拟研究。建立重熔工艺条件下研究不锈钢瞬态热物理性能变化的计算模型，通过有限元模拟研究不锈钢重熔处理的适应性及材料热物理性能的影响，研究不同加热距离对熔池形状、瞬态温度场以及凝固率的影响，应用等效温度面积密度函数确定最佳工艺条件。

1　试验条件及结果

试验基材为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。熔点温度为 1400 ℃，样品尺寸为 80 mm×20 mm×3 mm。材料热导率和比热容均为温度的函数。热源为层流等离子体射流，工作气体为氩气，其截面半径为 3～4 mm、弧功率 5 kW、流量 3～6 L/min、加热距离 3～20 mm、工件平移速度 3 mm/s、扫描时间 2.67 s。图 1 是加热距离分别为 3、5、10、15 和 20 mm 时熔痕表面照片。可见随加热距离的改变熔痕表面特征发生明显变化。

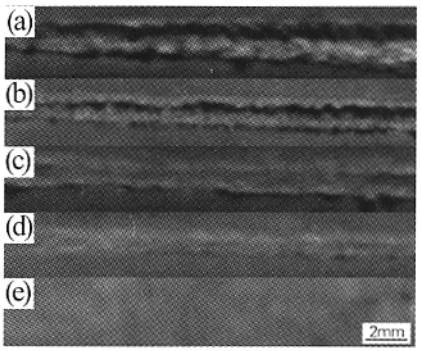

图 1　不同加热距离下不锈钢重熔处理熔痕外貌

Fig. 1 Appearance of the remelting tracks on the stainless steel under different heating distances

(a) 3 mm　(b) 5 mm　(c) 10 mm　(d) 15 mm　(e) 20 mm

2　理论模型

试验观察表明，基体加热时熔痕任意两个横截面上的温度分布除存在一个时间差外，其演化规律完全

作者简介：吴　彬（1980—），女，河北井陉人，在读硕士研究生，研究方向为材料表面改性的数值模拟。联系人：马　维　联系电话：010-82622614　E-mail：watwm@imech.ac.cn

基金项目：国家自然科学基金（10275085）

收稿日期：2006-02-15

相同，热扩散瞬时效应主要发生在样品上下表面，且为与外界进行热交换的主要边界，所以可在横截面内考虑此过程的瞬态温度场，即视为二维问题处理。假设此瞬态过程的温度场满足绝热边界条件，但在射流直接加热区域给定温度分布；材料热物性参数是温度的函数。其具体变化规律依据试验数据通过曲线拟合得以确定。温度场基本控制方程有热传导方程：

$$\nabla \cdot [k(T)\nabla T_j^{(i)}(\vec{r},t)] = \rho c(T)\frac{\partial T_j^{(i)}(\vec{r},t)}{\partial t} \quad (1)$$

其中 $\nabla = (\partial/\partial x_l)e_l$ 是哈密顿算子，$k(T)$、ρ 和 $c(T)$ 分别是材料热导率、密度和比热。$i = \mathrm{I} \sim \mathrm{IV}$ 分别表示样品加热过程中所经历的熔化前热传导、熔化、凝固和凝固后热传导这 4 个阶段。$j = \mathrm{s}, 1$ 分别对应于熔化和凝固过程中固相和液相材料。初始条件为 $T^{(\mathrm{I})}(x_1, x_2, t)_{t=0} = T_0$，$T_0$ 为环境温度。各阶段边界条件为：

（1）I 和 IV 阶段——材料熔化前和凝固后的热传导过程：

$$\kappa(T)\frac{\partial T_S^{(1,IV)}(\vec{r},t)}{\partial x_l} = \begin{cases} Q(x_1,t) & |x_1| < 2a(t), x_2 = 0, l = 2 \\ 0 & |x_1| > 2a(t), x_2 = 0, l = 2 \\ 0 & x_2 = \pm L, l = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\kappa(T)$ 为材料导热系数。$Q(x_1,t)$ 为等离子体射流的热流密度函数。试验测试结果表明层流等离子体射流径向热流密度分布近似满足高斯分布规律。即有：

$$Q(x_l,t) = \beta Q_0[e^{-(\frac{x_1}{a_0})^2} - e^{-(\frac{a(t)}{a_0})^2}] \times [e^{-(\frac{t}{t_0}-\frac{a_0}{t_0 v})^2} - e^{-(\frac{a_0}{t_0 v})^2}] \quad (3)$$

其中 $a(t) = [a_0^2 - (a_0 - vt)^2]^{1/2}$，$\beta$ 为材料吸热系数，取值为 25% ~30%[5-6]，Q_0、a_0、v 和 t_0 分别为热流密度强度、射流半径、扫描速度和时间，值分别为 4×10^7 W/m^2、3 mm、3 m/s 和 1.2 ~2 s。

（2）II 和 III 阶段——材料熔化和凝固过程边界条件仍为式（2）。固－液界面应该满足热量守恒形式的连续性条件：

$$T_s^{(\mathrm{II},\mathrm{III})}(\vec{r},t)|_{x_2=f(x_1,t)} = T_1^{(\mathrm{II},\mathrm{III})}(\vec{r},t)|_{x_2} = f(x_1,t) = T_m$$

$$\left[1 + (\frac{\partial f}{\partial x_1})^2\right]\left[k_s\frac{\partial T_s^{(\mathrm{II},\mathrm{III})}}{\partial x_2} - k_1\frac{\partial T_1^{(\mathrm{II},\mathrm{III})}}{\partial x_2}\right] = \rho_s L\frac{\partial f}{\partial t} \quad (4)$$

其中 $x_2 = f(x_1,t)$ 是固液界面方程，L 和 T_m 分别为材料潜热和熔点温度。

温度控制方程（1）和边界条件（2）的有限元伽辽金加权函数弱形式表述为[7-8]：

$$\int_\Omega \nabla^T w k(T)\nabla T \mathrm{d}\Omega + \int_\Omega w\rho c(T)\frac{\partial T}{\partial t}\mathrm{d}\Omega - \int_{\Gamma_\alpha} wQ\mathrm{d}\Gamma = 0 \quad (5)$$

其中 w 和 $\bar{w}$ 为标量函数，Γ_a 为物体上有热流密度作用边界。物体其它边界条件可通过选择函数 w 得到满足。通过有限元离散可得计算区域 Ω 内温度场的线性方程组。根据问题对称性取样品一半进行计算，有限元网格划分如图 2 所示。在预计的熔池区域进行了网格加密。

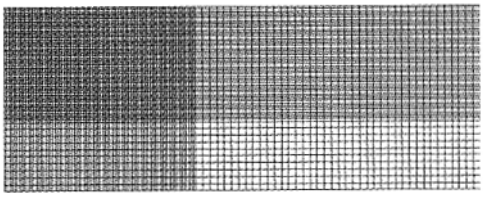

图 2　用于有限元计算的单元网络划分

Fig. 2　Typical grids in the finite element calculation

3　数值模拟结果与讨论

3.1　熔池流体的瞬态热物理特性

图 3 为不同加热距离样品横截面内熔池宽度、深度和面积变化规律。从图 3 中可以看出熔池的最大宽度随加热距离的增加逐渐减小，该趋势与试验结果相符。计算结果表明熔池达到最大尺寸的时刻为等离子体射流使基底表面开始加热后的 0.8 s。图 4 给出熔池峰值温度随时间变化的规律曲线，易见此时刻也是最大峰值温度达到的时刻。材料重熔处理时，熔池液体的峰值温度是影响热处理效果的主要原因之一。通常随峰值温度的增高，熔池液体的粘性会明显降低。等离子体射流工作气体的压力加速了高温液体的流动，快速冷却时形成凹凸不平的表面形貌。另外，如果熔池温度过高，还会引起物质气化，严重影响处理效果（图 1 a，b）。因此，适当选取工艺参数，既确保熔池材料熔化，又能控制峰值温度不易过高，会明显提高处理

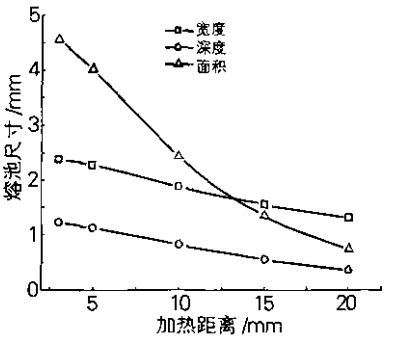

图 3　熔池尺寸与加热距离的关系

Fig. 3　The relationship between the pool dimensions and heating distances

效果。熔池峰值温度计算结果表明符合该条件的加热距离为 10 mm，见图 4。

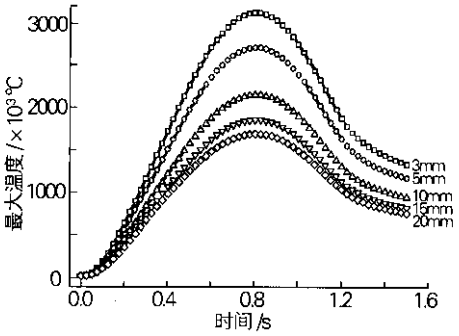

图 4　不同加热距离时熔池最大温度与时间的关系

Fig. 4　Variations of the maximum temperature with time at different heat distances

熔池物质的温度梯度是影响热处理效果的另一主要原因。小的温度梯度可使表面处理层获得较均匀微结构，有利于表面性能的改善。图 5 给出熔池最大时其横截面上分别沿 0°、45°和 90°方向 3 条射线的最大温度梯度随加热距离变化的分布规律。可见，不同加热距离时随幅角的增大温度梯度均增大。当加热距离 <10 mm 后，各方向温度梯度的增长率明显增加。因此，为使熔池温度梯度的增长率维持在较低水平，加热距离需 >10 mm。

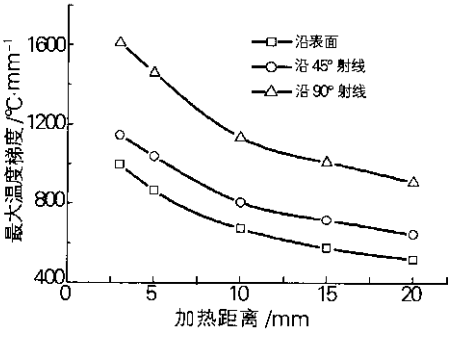

图 5　不同加热距离时熔池横截面上沿表面及 45°、90°方向的温度梯度变化

Fig. 5　Temperature gradient variations of the pools along three directions of 0°, 45° and 90° at different heat distances

冷却速率是影响熔敷层晶体生长机制和微尺度特征的主要因素。提高凝固过程的冷却速率可使晶体结构得到明显细化，甚至得到纳米尺度的晶体微结构[9]。图 6 给出熔池物质在不同加热距离时最大冷却速率与时间的函数关系。可见，随加热距离减小物质冷却速率逐渐增大。当加热距离 <15 mm 时冷却速率增大明显加快。所以从微结构细化机制考虑合适的加热距离应 <15 mm。

3.2　等效温度面积密度判据

通过熔池物质最高温度、最大温度梯度和冷却速

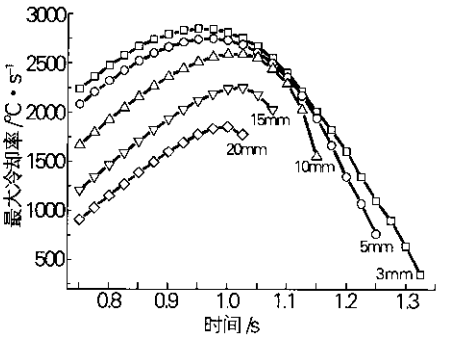

图 6　熔池中物质冷却速率随时间变化规律

Fig. 6　Variations of the cooling rates of the pool substances with time

率等特性的有限元模拟可以确定这些热物理量随加热距离的变化规律，并定量确定适合于重熔工艺条件的取值范围。此外，针对射流热流密度强度和扫描速度等其它工艺参数，同样可以建立熔池物质瞬态热物理特性与这些工艺参数间的联系，在数值模拟基础上综合考虑各工艺参数的影响，建立判断合适工艺条件的判据。实际应用时应从以下几方面考虑材料表面的热处理效果：即从提高功效考虑应尽可能增大熔池面积；为减小残余变形应尽可能减小熔池深度以及为得到均匀的微结构应尽可能减小熔池物质的温度梯度和最高温度值，但这几方面相互矛盾。所以，在建立判断合适工艺条件的判据时必须考虑如何使这些矛盾最小化。

为此，引入以加热距离为自变量的无量纲函数—等效温度面积密度函数，并结合加热距离为自变量的有限元模拟结果提出相关判据确定合适的工艺条件。即有：

$$F(s)=\frac{T_e}{A_p}\{P(Q_0,s,\delta);M(\kappa,\rho,C)\} \tag{8}$$

其中 $T_e=(T_{max}-T_m)/T_m$ 为熔池物质的等效温度，T_{max} 为熔池最高温度；$A_p=\pi ab/2S_0$ 为等效熔池面积，假设熔池断面为半椭圆，a 和 b 分别为长、短半轴，S_0 为与样品尺寸相关的特征量；符号 $\{P(Q_0,s,\delta);M(\kappa,\rho,C)\}$ 表示 T_e 和 A_p 都是工艺参数和材料性能的函数，具体体现在有限元的模拟过程中；$F(s)$ 为加热距离的函数。

图 7 给出熔池等效温度面积密度随加热距离的函数关系曲线。理论上由判据 $dF/ds=0$ 确定的 $F(s)$ 的最小值 $s=11.5$ mm 对应于最佳加热距离，即合适的工艺条件。实际上合适的加热距离取值为一个范围，由该图可见为 9 ~ 13 mm。该范围基本上与试验结果吻合，见图 1。

Ni-P 化学镀层的冲击磨粒磨损性能研究

黄林国（台州科技职业学院，浙江 台州 318020）

摘要：利用单摆划痕法的冲击加载特性，研究了 Ni-P 化学镀层的冲击磨粒磨损性能。用单摆划痕法测定的比能耗（材料产生单位体积划痕所消耗的能量）可作为材料耐冲击磨粒磨损性能的评价指标，材料的比能耗越大，其耐冲击磨粒磨损性能越好。试验结果表明，提高热处理温度可增加 Ni-P 镀层的比能耗，但当磷含量增加时，镀层因发生塑脆转变，比能耗趋于减少。含磷量（质量分数，下同）为 4.5% 的镀层经 600 ℃ 保温 1 h 热处理后其比能耗最大，耐冲击磨粒磨损性能最好。当热处理温度较高时，含磷量分别为 4.5%、8.2% 和 10.8% 的镀层的摩擦系数 μ 趋于一致。在冲击加载条件下，切向动态硬度和法向动态硬度与比能耗有较好的相关性，它们在评价材料耐冲击磨粒磨损性能方面比显微硬度更加可信。

关键词：Ni-P 化学镀层；冲击加载；塑脆转变；冲击磨粒磨损

中图分类号：TG115.5；TG174.44　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-6051(2006)08-0067-04

Impact Abrasive Wear of Electroless Ni-P Coating

HUANG Lin-guo (Taizhou Vocational College of Science and Technology, Taizhou Zhejiang 318020, China)

Abstract: Impact abrasive wear behavior of electroless Ni-P coating was researched by means of single-pass pendulum scratching test characterized by impact loading. Specific energy consumption (energy consumption per volume loss) measured by single-pass pendulum scratching test could be used for evaluating impact abrasive wear resistance of materials, and the more the specific energy consumption is, the better the impact abrasive wear resistance of materials is. The experiment results show that increasing heat-treating temperature could increase the specific energy consumption of the coatings, however, with the increase of phosphorus content, the specific energy consumption decreases as ductile-brittle transition taking place in electoless Ni-P coating. Ni-P coating with phosphorus content of 4.5wt% heat-treated under

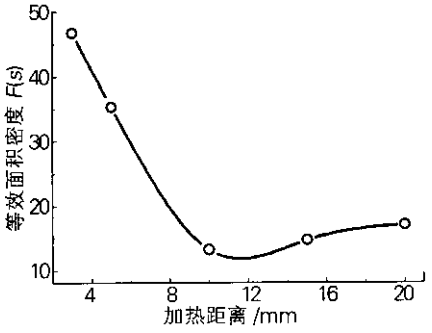

图 7　等效温度面积密度随加热距离的变化规律

Fig. 7　Variation of the ETAD with the heat distances

4　结论

为研究层流等离子体射流不锈钢表面重熔热处理的热学特性，建立了用于计算瞬态温度场特征的二维有限元数学模型。计算结果表明加热距离为 10 mm 时熔池物质的最高温度、冷却速率及温度梯度对应的工艺条件有利于重熔改性层微结构的演化。引入等效温度面积密度函数后，理论上建立了确定最佳工艺条件的判据。由此得到合适的加热距离范围为 9 ~ 13 mm，此结果与试验观察基本符合。表明本文建立的二维有限元计算模型和提出的等效温度面积密度函数概念相结合可以建立正确的判据，对不锈钢重熔处理的适合工艺条件做出判断。

参考文献：

[1] Zhao C, Tian F, Peng H, Hou J. Non-transferred arc plasma cladding of satellite Ni60 alloy on steel [J]. Surface and coating technology, 2002, 155: 80-84.

[2] Ma W, Pan W X, Wu C K. Preliminary investigations on low-pressure laminar plasma [J]. Surface and coating technology, 2005, 191: 166-174.

[3] Ma Wei, Fei Qunxing, Pan Wenxia and Wu Chengkang. Investigation of laminar plasma cladding processing [J]. Applied Surface Science, 2006, 252: 3541-3546.

[4] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册 [M]. 北京：中国标准出版社, 1988; 3: 817-818.

[5] Zhao Guiping, Cho Chongdu, Kim Jae-Do. Application of 3-D finite element method using Lagrangian formulation to dilution control in laser cladding process [J]. International Journal of Mechanical Science A, 2003; 45: 777-796.

[6] Mackwood A P, Crafer R C. Thermal modeling of laser welding and related process: a literature review [J]. Optic & Laser Technology, 2005, 37: 99-115.

[7] Zienkiewicz O C. The Finite Element Method [M]. London: McGraw-Hill Book Company Limited, England, 1977.

[8] 吴永礼. 计算固体力学方法 [M]. 北京：科学出版社, 2003.

[9] Bose S, and DeMasi-Marcin J. Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at pratt & whitney [J]. J. of Thermal Spray Technology, 1997, 6 (1): 99-104.