

# 液相脉冲放电沉积涂层的温度场模拟及研究

李国亮, 揭晓华, 肖波, 罗雯

(广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006)

**[摘要]** 通过有限元数值模拟的方法,选取合适的热源模型、热边界条件,建立了液体介质中在 45 钢表面进行脉冲放电沉积 TiC 陶瓷涂层的热传导模型。采用有限元分析软件 ANSYS 对液相脉冲电火花放电表面温度场进行数值模拟,研究了脉冲电流参数对温度场和涂层表面形貌的影响。结果表明:工具电极的最高温度远高于工件的最高温度;温度均在轴向上降低较快,而在径向上分布较均匀;最高温度随加工电流的增加呈缓慢下降趋势;随脉冲电流的增大,沉积到工件上的火山口状涂层颗粒明显增大。

**[关键词]** 脉冲放电沉积; 温度场; 有限元模拟; ANSYS

**[中图分类号]** TG174.453; TP391.9

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2012)02-0030-05

## Thermal Field Simulation of Electrical Discharge Coating in Liquid and Its Research

LI Guo-liang, JIE Xiao-hua, XIAO Bo, LUO Wen

(Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**[Abstract]** Heat transfer model of TiC ceramic coating on 45 steel prepared by electrical discharge coating in liquid was established through finite element numerical simulation method. Heat source model and thermal boundary conditions was selected. The temperature field on the surface of the electrodes was simulated by ANSYS software and the influence of pulse current parameters on the temperature field and coating morphology was researched. The results show that the maximum temperature on the tool electrode is far higher than that of the workpiece. The temperature reduces up quickly in the axis and distributes relatively uniformly in the radial, and the highest temperature declines slowly with the increase of the current. The coating particles like crater deposited on the workpiece are enlarged with the increase of pulse current.

**[Key words]** electrical discharge coating; thermal field; finite element numerical simulation; ANSYS

液相脉冲放电沉积陶瓷涂层是一种新的金属材料表面改性技术,其加工机理为:瞬间生成大量的热,形成一个瞬间的高温热源,最高温度可达到 10 000 °C 以上<sup>[1]</sup>,热量由热源中心向一定半径的区域内扩散,在工件和电极的表层形成一熔融的微型熔池,等离子体在力的作用下抛出,从而使得抛出金属与液体中形成的碳原子结合并沉积到工件表面形成涂层。因此,模拟脉冲放电电极的温度场,对于最大限度地合理选择沉积涂层工艺参数,提高涂层的生成效率,减少工具电极损耗有着重要的意义<sup>[2-5]</sup>。

文中通过有限元数值模拟的方法,对煤油中液相脉冲放电制备 TiC 强化层的温度场进行分析,建立起放电过程中等离子体通道的数学和物理模型。采用有

限元分析软件 ANSYS<sup>[6-7]</sup>对液相脉冲电火花放电表面温度场进行数值模拟分析,包括电火花热源模型的选择分析、表面涂层强化过程的模拟热导分析、边界条件的处理等,并且结合实际实验分析其可行性。

## 1 脉冲放电电火花沉积涂层模型的建立

### 1.1 脉冲放电沉积模型

图 1 为煤油中单脉冲放电热源物理模型。在一定的放电参数条件下,由于两极间的热流密度大,工具电极和工件电极表面的热量来不及传导,使之在高温下熔融、气化等形成等离子体,在放电通道中与液体中电离出来的碳原子结合形成 TiC 涂层,沉积到工件电极

**[收稿日期]** 2011-12-03; **[修回日期]** 2012-02-21

**[基金项目]** 国家自然科学基金(51075075)

**[作者简介]** 李国亮(1986—),男,河北廊坊人,硕士生,主攻金属材料表面改性。

**[通讯作者]** 揭晓华(1959—),男,广东广州人,教授,主要研究方向为金属材料表面改性。

的表面。

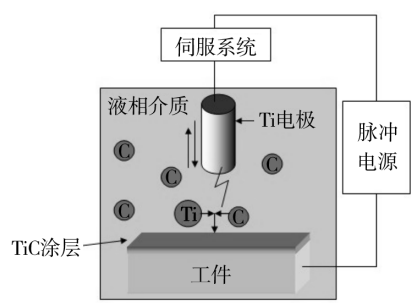


图 1 脉冲放电沉积涂层物理模型  
Fig. 1 Physical mold of the electrical discharge coating

1.2 单脉冲放电热导模型

由脉冲放电机理可知，在单次脉冲放电下产生的瞬时高温热源使得两极间热流密度瞬间增大，致使 Ti 电极材料熔融、气化且电离成等离子体，沿着等离子通道冲向 45 钢工件表面，并且把热量传递给负极，Ti 离子与 C 原子在高温下于工件表面形成 TiC 涂层<sup>[8]</sup>。Ti 工具电极和 45 钢工件电极的温度在受热过程中发生急剧变化，使得其热物理性能也发生相应改变。因此，液相放电沉积 TiC 涂层温度场的分析属于非线性热传导问题<sup>[4]</sup>。而液体放电的过程中，绝大多数的热量都是通过带电粒子传递给电极表面，周围介质热量损耗影响非常小，可忽略不计<sup>[4]</sup>。圆柱坐标下的非线性瞬态热传导方程<sup>[1]</sup>如式(1)所示。

$$c\rho \frac{\partial^2 T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$
 (1)

式中： $c$  为比热容； $T$  为温度； $t$  为时间； $\lambda$  为热导系数； $\rho$  为密度。

1.3 热边界和初始条件

图 2 为模型的热边界条件。热源通过放电通道把能量以热能的形式传导到工件表面，在放电点周围圆柱的区域内，以放电通道中心为原点，半径范围内加载热源，半径范围外，能量以对流换热的形式损耗。工件电极视作半无限大物体，因此工件的无直接接触热源表面 AF、CD 和 FD 远离热源中心点，无传热即处于

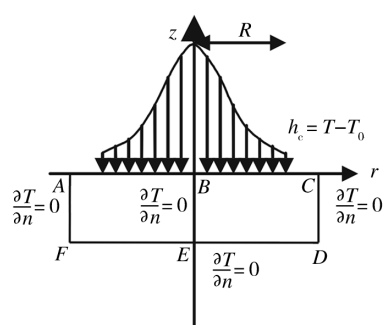


图 2 模型的热边界条件  
Fig. 2 Heat boundary conditions of the mold

恒温状态。边界条件<sup>[9]</sup>如式(2)所示，其中  $h_c$  为煤油的热交换系数。

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} h_c (T - T_0) & r > R \\ q_w & r \leq R \\ 0 & \text{无穷} \end{cases}$$
 (2)

1.4 建模与网格划分

实验采取非均匀网格划分模型，网格划分如图 3 所示。网格划分过大，会导致计算精度不足；划分单元过细，则计算时间过久。因此实验中在放电通道附近的网格最密，远离放电通道的网格较为稀疏，既可保证计算精度，也可以减少网格的数量，缩短计算时间，使其达到预期的效果。

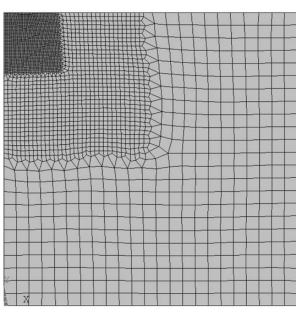


图 3 网格划分实例  
Fig. 3 Mesh of the mold

1.5 材料参数

由于在脉冲放电瞬间，形成的温度场的温度梯度极大，而材料热物理参数对温差变化也极为敏感<sup>[10]</sup>，因此为了精确模拟液相单脉冲放电温度场，在变化温度下的工具和工件材料的热物理参数通过插值法和外推法来确定，其中热导率和材料热焓对温度场的影响较为明显。实验工具电极材料为 Ti，工件材料为 45 钢，其热导率<sup>[11]</sup>可查。热焓由相变潜热公式<sup>[12]</sup>计算得到，见表 1、表 2。

表 1 钛的热焓

Tab. 1 Enthalpy of the titanium

温度/K	热焓/(J·m <sup>-3</sup> )	温度/K	热焓/(J·m <sup>-3</sup> )
298	0	3 631	1.12×10 <sup>10</sup>
1 939	4.79×10 <sup>9</sup>	3 831	4.68×10 <sup>10</sup>
1 941	5.92×10 <sup>9</sup>	5 000	5.04×10 <sup>10</sup>

表 2 45 钢的热焓

Tab. 2 Enthalpy of the carbon steel

温度/K	热焓/(J·m <sup>-3</sup> )	温度/K	热焓/(J·m <sup>-3</sup> )
298	0	3 405	6.69×10 <sup>10</sup>
1 673	7.23×10 <sup>9</sup>	3 605	6.75×10 <sup>10</sup>
1 753	7.43×10 <sup>9</sup>	5 000	7.20×10 <sup>10</sup>

1.6 加载与求解

实验模拟传热模型的热流载荷和边界条件，如图 4 所示，工件下表面和右表面边界为温度定值，可设为

常温 298 K;工件电极的上表面,由于有液体传热介质流过,属强迫对流,可在未受热载区施加对流边界条件,对流换热系数为 1 000 W/(m·℃),介质温度为常温 298 K;此半无限大模型左侧为对称面,无传热。

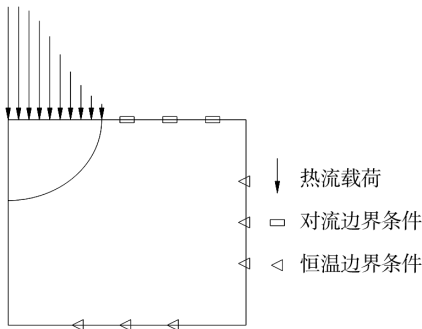


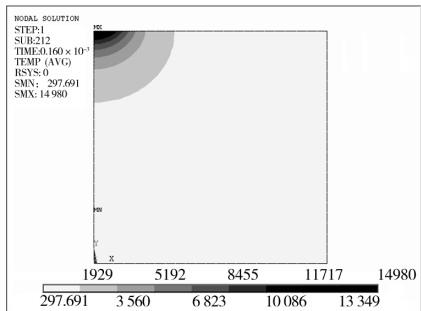
图 4 传热模型的边界条件和热流载荷

Fig. 4 Boundary condition and heat flux load of the heat transfer model

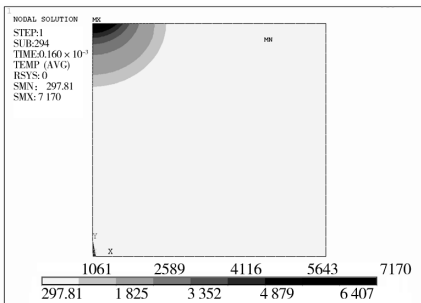
## 2 液相单脉冲放电温度场模拟结果分析

### 2.1 温度场

通过求解,得到液相放电沉积 TiC 涂层的工具电极和工件的单脉冲瞬态温度场,如图 5 所示。脉冲放电参数设置为脉冲电压为 25 V,电流为 12 A。由图 5 可以看出,在一个脉冲放电过程中,工具电极的最高温度远高于工件的最高温度,这使沉积涂层成为可能。这是因为放电过程中的能量分配系数存在差异,放电



a 工具电极



b 工件

图 5 单脉冲瞬态温度场

Fig. 5 Transient state temperature field jingle pulse

过程产生的能量并不是全部被利用,而是有一部分热能损失于周围介质中;而正负极所获得的能量也不是一致的,无论脉冲宽度如何变化,工具电极获得的能量总要比工件电极大得多,即使正负极材料相同,正极上的能量分配比负极大;而且材料热容也是不同的,虽然钛的比热容甚至略大于钢,但由于钛的密度只有钢的 57%,因此钛的体积热容将只有钢的 60%<sup>[11]</sup>,这意味着吸收同样的热量后,钛上升的温度将远高于等体积的钢;再者,钛的热导率是钢的一半左右,这使钛在受到加热时热量不容易传递,使温度梯度加大,即加热点温度很高而周围温度却很低,而钢在受到加热时热量较易传递,即加热区域与非加热区域温度较均匀。

### 2.2 温度的分布

为得到温度场随径向和轴向的分布规律,通过光栅图像处理的方法获得了各温度分布的曲线。从图 6 和图 7 可以看出:1)无论是工具电极还是工件,温度的分布均为在轴向上降低较快,即轴向上热量传递较慢,在径向上,由于工作液的对流,加速了热量传递,因而温度分布较均匀;2)在同样的条件下,工具电极上的温度梯度明显大于工件,这是由于钛的热导率是钢的一半左右,使得钛在受到加热时热量不容易传递,温度梯度加大;3)小脉冲电流时温度分布较集中,温度梯度大,这是因为小电流下等离子放电通道直径较小,加热面积小,所以温度分布集中,当电流加大时,放电通道半径增加,加热面积增加,使温度梯度降低;4)从不同脉冲时间下温度的分布可以看出,在放电初期,温度上升较快,在放电末期,温度上升较慢,是因为热影响区尺寸的扩大导致了温度变化速度减慢;5)工具电极在 1 000~3 500℃、工件在 1 000~3 000℃这一范围内,温度分布曲线出现波动,这是因为材料发生熔化和汽化相变引起的,材料在发生相变时放出潜热,相变潜热的存在将会影响正常的热传导,使温度场分布出现不平衡现象。

### 2.3 脉冲电流的影响

为了得到温度场与电流大小的关系,对不同加工电流时的温度场进行模拟,并统计不同脉冲电流下的最高温度,结果见图 8。可以看到,最高温度随加工电流的增加呈缓慢下降趋势。这是因为随着加工电流的增加,放电通道半径增加,使加热面积增加,而热流密度下降,最终使温度场中的最高温度下降。

### 2.4 脉冲电流影响结果分析

图 9 为采用不同脉冲电流沉积的 TiC 涂层的表面形貌。可以看到,随着脉冲电流的增大,沉积到工件上的粒子颗粒明显增大。从模拟结果看,由于在较大的脉冲电流下,工具电极上的熔融区域增大,熔化的电极

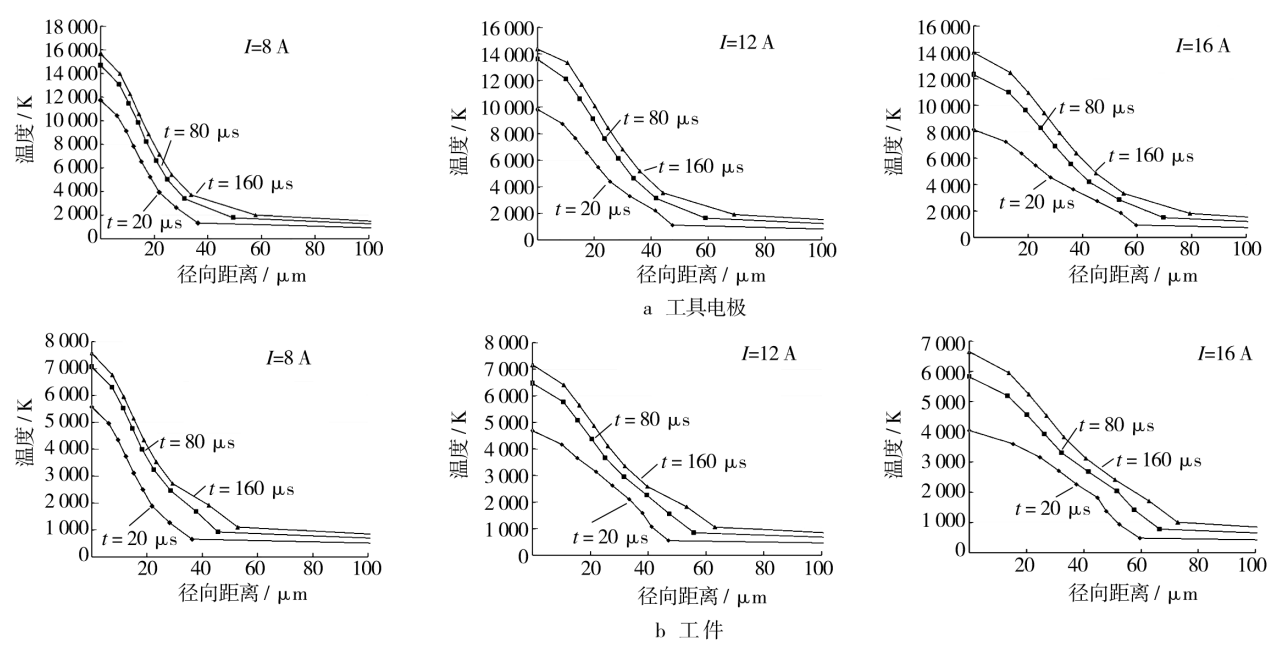


图 6 电极沿径向的上温度分布  
Fig. 6 Radial temperature curves of the electrode

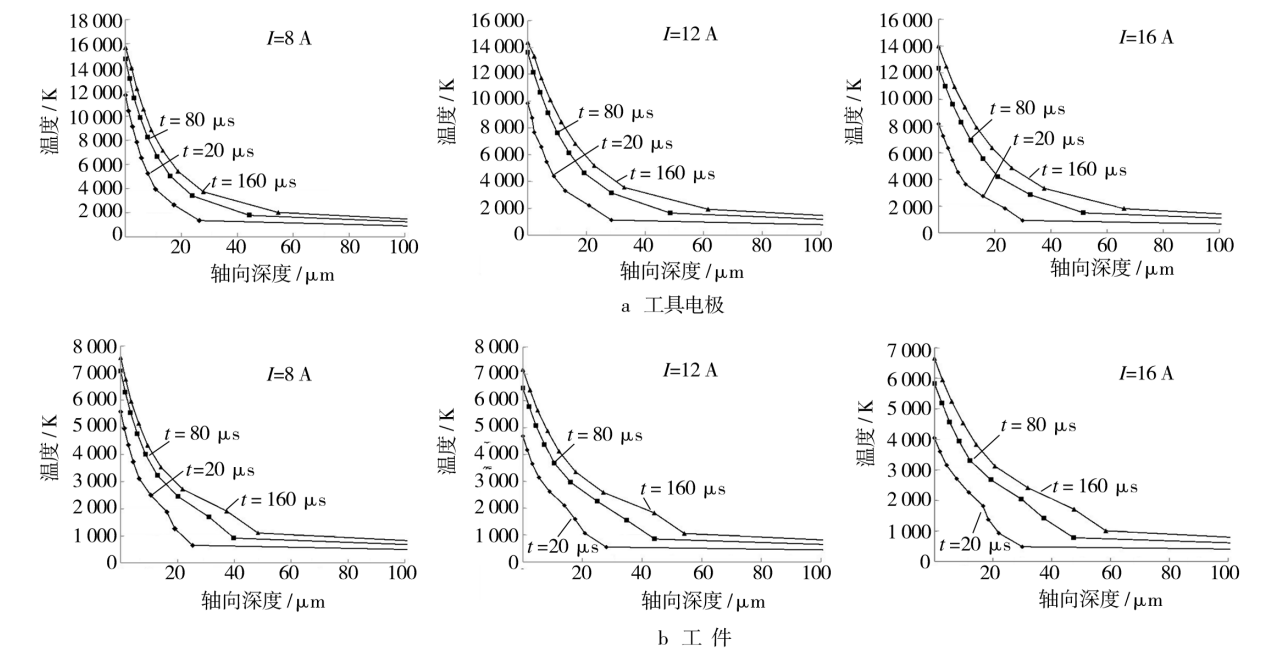


图 7 电极沿轴向上的温度分布  
Fig. 7 Axial temperature curves of the electrode

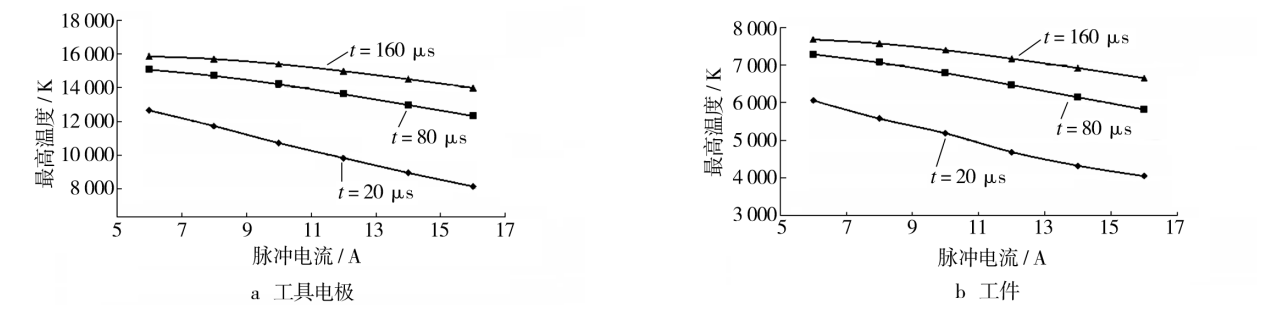


图 8 最高温度与脉冲电流的关系曲线  
Fig. 8 Relationship curves between maximum temperature and electric current

材料增多,被抛离电极表面的材料也明显增多,最终使沉积在工件上的颗粒尺寸增大。从涂层形貌上看,大电流加工的加工速度快,沉积效率较高,但沉积表面的粗糙度较大;小电流加工虽然可以获得较高的表面质量,但加工速度低。因此,加工电流要在分析表面粗糙度、工期等实际情况后作出合理的选择。模拟结果和实际沉积涂层的效果基本一致,这为沉积涂层工艺提供了有力的依据。

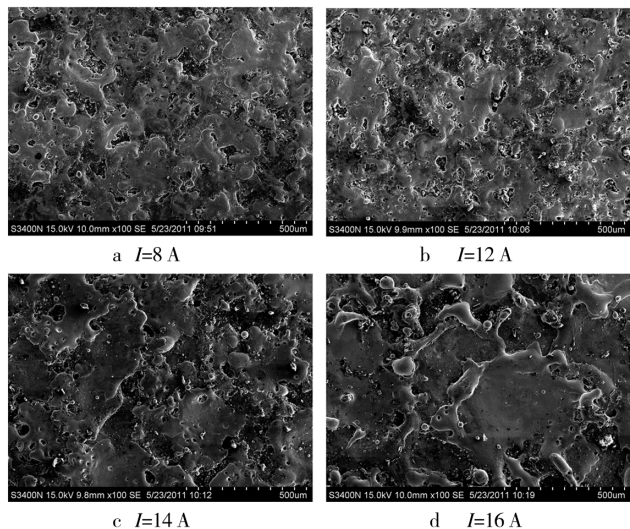


图9 不同脉冲电流下的沉积涂层表面形貌

Fig. 9 Surface topographies of the coating prepared in different pulse current

### 3 结论

1) 在单脉冲放电沉积涂层过程中,能量分配系数、正负极所获得的能量和材料热容等的差异,使得工具电极的最高温度远高于工件的最高温度,这使沉积涂层在理论上成为可能。

2) 无论是工具电极还是工件,温度的分布均为在轴向上降低较快,径向上较均匀;在同样的条件下,工具电极上的温度梯度明显大于工件;小脉冲电流时,温

度分布较集中,温度梯度大;在脉冲放电的初期,温度上升较快,在放电末期,温度上升较慢。

3) 在脉冲放电过程中,最高温度随加工电流的增加呈缓慢下降趋势。

4) 随着脉冲电流的增大,试样表面火山口状的微小 TiC 颗粒尺寸明显增大。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李明辉. 电火花加工理论基础[M]. 北京:国防工业出版社,1989:259,267.
- [2] 黄志刚,郭钟宁. 单脉冲电火花加工温度场的有限元分析[J]. 广东工业大学学报,2002,19(4):38-43.
- [3] 连峰. 45 钢电火花成型表面组织结构的研究[J]. 表面技术,2005,34(4):27-29.
- [4] 尚歌,金柏冬,崔景芝,等. 基于 ANSYS 的气中微细电火花沉积工艺参数的研究[J]. 电加工与模具,2007,31(1):20-23.
- [5] 徐明刚,张建华,任升峰,等. 气体介质电火花加工单脉冲放电温度场分析[J]. 电加工与模具,2006,21(5):14-16.
- [6] 王崧. 有限元分析——ANSYS 理论与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2008:4.
- [7] 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2007:24.
- [8] 靖爱. 液中脉冲放电制备 TiC 陶瓷涂层及其滑动性能研究[D]. 广州:广东工业大学,2005.
- [9] CHAN Y W. Computer Simulation of Heat Flow in Pulses Current Arc Welding [J]. Metal Construction, 1987 (10):599-606.
- [10] 元利伟,楼乐明. 放电通道的波动性与电火花加工机理[J]. 上海交通大学学报,2001,35(7):989-992.
- [11] 叶大伦,胡建华. 实用无机物热力学数据手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2002:321,945.
- [12] 周建兴,刘瑞祥. 凝固过程数值模拟中的潜热处理方法[J]. 铸造,2001,50(7):404-407.

(上接第 22 页)

- [4] GELL M, JORDAN E H, SOHN Y H, et al. Development and Implementation of Plasma Sprayed Nanostructured Ceramic Coating[J]. Surface and Coating Technology, 2001,146/147:48-54.
- [5] LIN X H, ZENG Y, LEE S W, et al. Characterization of Alumina 23wt% Titania Coating Prepared by Plasma Spraying of Nanostructured Powder[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004,24(4):627-634.
- [6] 杨元政,刘正义,庄育智. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13\% \text{TiO}_2$  陶瓷涂层的组织结构及其耐磨性[J]. 功能材料,2000,31

(4):390-392.

- [7] 叶宏,张津,孙智富,等. 镁合金表面等离子喷涂纳米陶瓷涂层研究[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(4):9-11.
- [8] 李莉,贺定勇,蒋建敏,等. AZ31 镁合金基体等离子喷涂 NiAl 粒子扁平行为研究[J]. 材料热处理学报,2010,31(6):150-154.
- [9] 宫文彪,李于朋,马凯,等. 镁合金等离子喷涂  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的耐腐蚀性能[J]. 材料热处理学报,2009,30(6):164-168.