文章编号: 1004-0609(2011)07-1681-07

等离子体电解氧化弧光放电的瞬态测定及温度场模拟

刘晓静^{1,2},李光¹,段红平¹,夏原¹

(1. 中国科学院 力学研究所,北京 100190; 2. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

摘 要:为描述等离子体电解氧化(PEO)过程中单个弧光放电通道内部及周围温度场分布,构建圆柱形放电通道 模型。采用高速摄像机和概率统计方法,测定铝合金 PEO 膜层生长典型阶段弧光放电的弧斑密度及通道尺寸等 特征参数;通过计算单个弧光的延迟寿命(140 μs)以及能量,获得模型参数。采用 Ansys 软件模拟单个弧光放电通 道内部及周围温度场分布,计算得出弧光通道中心温度超过 2×10⁴ K,从传热学角度解释了 PEO 陶瓷层中 γ-Al₂O₃ 和 α-Al₂O₃ 的生成过程以及陶瓷层微结构的形成原因。

关键词: 等离子体电解氧化; 单弧光; 瞬态放电; 温度场模拟 中图分类号: TG178 文献标志码: A

Instantaneous measurement and temperature field simulation of arc discharge in plasma electrolytic oxidation process

LIU Xiao-jing^{1, 2}, LI Guang¹, DUAN Hong-ping¹, XIA Yuan¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to describe the temperature field distribution around a single discharge channel exactly during plasma electrolytic oxidation (PEO) process, a cylinder-shaped discharge model was designed. In the typical stage of the PEO coating growth on aluminium alloy, by using the high-speed camera and statistical method, the characteristic parameters of discharges, such as the spatial density of arc spot and size of channel, were measured, the lifetime (140 μ s) and energy of a single spark were also calculated. The parameters of the model were obtained. The Ansys software was adopted to simulate the temperature field around a single discharge channel. The center temperature of the discharge channel was over 2×10^4 K. The results can explain the formation of γ -Al₂O₃ and α -Al₂O₃ and microstructure in the ceramic coatings from the heat transfer theory.

Key words: plasma electrolytic oxidation; single spark; instantaneous discharge; temperature filed simulation

等离子体电解氧化(Plasma electrolytic oxidation, PEO)过程涉及电化学及较为复杂的物理化学反应,其 典型特征是通过高电压、大电流使置于电解液中的电 极表面产生瞬间等离子体微弧放电,击穿钝化层并烧 结形成陶瓷层^[1-10]。在此过程中,陶瓷层的生长不仅 源于阴、阳离子的相互作用、陶瓷层的击穿、熔化, 而且还与高温熔融产物在金属基体及电解液冷却作用 下的凝固过程密切相关^[11-12]。然而,由于 PEO 反应过 程的复杂性及目前实验和检测手段的局限性,尚缺乏 对 PEO 反应过程及氧化膜生长机制的准确描述。

文献[12-14]的研究结果表明,微区放电热效应是 影响陶瓷层生长、熔化和凝固的重要因素之一,因此, 对 PEO 放电微区热效应的研究将有助于理解陶瓷层 的形成机理。已有研究表明,采用温度场数值计算的 方法,可预测 PEO 单弧光放电的温度分布。但是,人 们在模拟单个微放电通道温度场时采用了太多的假定

基金项目:国家自然科学基金面上项目(10772179);国家自然科学基金重点项目(10832011);中国博士后科学基金资助项目(20090460536) 收稿日期:2010-07-22;修订日期:2010-09-19

通信作者:夏原,研究员,博士;电话: 010-82543858; E-mail: xia@imech.ac.cn

条件,如 KLAPKIV^[13]根据已有研究结果,假设单个 微放电通道中物质分布情况及存在形态并结合其存在 条件, 推测了 PEO 过程中单个微放电通道内部温度的 大致分布; YEROKHIN 等^[11]忽略通道内部各点因为位 置不同而造成的温度差异,设定 PEO 过程中单个微放 电通道内部单位体积氧化膜温度的变化公式,并建立 相应模型,研究了单个微放电通道内部各点的温度变 化,初步计算了冷却过程的冷却速率:王立世等[14]基 于微放电的圆柱形通道模型,借鉴点热源的传热公式, 在模型尺寸假定的前提下,从二维角度计算通道内部 及放电衰退过程中毗邻膜层的温度场,初步分析膜层 中存在的物相种类及晶态类型;此外,李华平等^[12]设 定微弧熔区的初始温度,采用 Ansys 软件对其淬冷过 程进行模拟,分析了淬冷过程对氧化铝微观结构的影 响,阐述了单个弧光的淬冷过程对陶瓷层表面形貌的 影响。

放电微区热效应的研究进展深化了对 PEO 反应 过程中单个弧光放电通道温度场的认识,也为深入分 析 PEO 过程中陶瓷层的生长机制提供了重要的理论 依据,因此,减少必要的假设条件,开展基于微弧放 电特征实验测定的温度场模拟十分必要。为此,本文 作者针对 PEO 过程中氧化膜生长的典型阶段(稳定微 弧放电阶段),利用实验和概率统计的方法得到弧光放 电特征参数,并基于实验结果构建圆柱形放电通道模 型;采用 Ansys 软件进行有限元模拟,获得单个弧光 放电通道内部及周围三维温度场分布,从传热学角度 解释 PEO 陶瓷层中 γ-Al₂O₃和 α-Al₂O₃ 的生成过程以 及陶瓷层微结构的形成原因,推测了 PEO 陶瓷层的生 长机制。

1 实验

试样选用含 1.6%Si(质量分数)铸铝合金,圆饼形 试样直径为 38 mm,厚度为 5 mm,通过聚四氟乙烯 夹具密封,使之单面(直径为 30 mm)接触电解液;PEO 处理过程采用交变脉冲恒流模式,电流密度为 0.8 mA/mm²,峰值电压为 420 V,处理时间根据条件进行 设定。电解液采用碱性硅酸盐体系,电解液温度控制 在(25±2) ℃。采用 FEIsirion 400NC 型扫描电镜观察 PEO 陶瓷层的表面形貌;采用涡流测厚仪测定 PEO 陶瓷层的厚度。对 PEO 过程中某一时刻,采用高速摄 像机(10 000 帧,像素 768×768,曝光时间 1/40 000 s) 获得铝合金表面弧光放电形态。

2 模型的构建与相关实验

在实验条件下,PEO 过程在 6~30 min,呈现稳定 的弧光放电特征,即氧化膜生长的典型阶段。本文作 者针对氧化膜生长的典型阶段(PEO 处理时间为 10 min,陶瓷层厚度约为 10 μm),构建单个弧光放电通 道内部及周围温度场模拟模型,并对弧光特征参数进 行实验测定以获取模型参数。

2.1 模型的构建

基于 PEO 陶瓷层中放电微孔的三维结构特征,不 考虑文献[15]中膜层表面的微孔部分,构建圆柱形放 电通道模型,如图 1(a)所示,对单个弧光放电通道内 部及周围温度场进行数值模拟,考虑到基体温度在 PEO 进行过程中的升幅较小,取初始温度为 333 K^[12]。 边界条件如下:电解液对膜层的冷却作用为对流散热, 对流系数为 15 kW/(m²·K)^[12],电解液温度为 298 K, 同时鉴于在放电通道区域有体热源的作用,引入荷载 因素。

考虑到该模型为轴对称,如图 1(b)所示,可以将 三维温度场分布简化为二维温度分布,进而解释模型 整体的温度分布情况。

相应的传热方程如下。 在圆柱坐标系下,瞬态热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho C}$$
(1)

考虑到轴对称空间热传导问题,则温度不随 θ 变 化,瞬态热传导方程可以简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho C}$$
(2)

侧面及底面的绝热边界条件为

侧面:
$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, r = \frac{D}{2}$$
 (3)

底面:
$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, z = H_s$$
 (4)

电解液的冷却作用可以用表面对流散热条件来 表示:

$$k\frac{\partial T}{\partial z} = h[T(r) - T_f]$$
⁽⁵⁾



图 1 单弧光放电通道模型(*H*_c为陶瓷层厚度; *d* 为单个弧光 放电通道直径)

Fig.1 Model of single discharge channel(H_c is thickness of ceramic coating and *d* is diameter of single discharge channel): (a) Cubic diagram; (b) Simplified section diagram

式中: *T* 为温度; *t* 为时间; *C* 为比热容; $\alpha = \frac{k}{\rho C}$ 为 材料的导温系数; θ 、*z* 和 *r* 为柱坐标; *k* 为材料的导 热参数; *Q* 为体热源密度; ρ 为材料的密度; *T*_f 为电 解液温度; *h* 为对流散热系数; *H*_s 为基体和陶瓷层的 总体厚度。

陶瓷层为氧化铝,基体材料近似为纯铝,考虑到 PEO 放电区为金属-电介质-气体-电解液四相体系, 放电区尺寸小、边界条件复杂、温度梯度大、体系的 某些热力学参数很难准确测定,本研究中采用常温值。 模拟中使用的 Al 和 Al₂O₃ 的物性参数如表 1 所列。

弧光放电温度场模拟所需参数由两部分组成:物 性参数和模型参数。表1给出了物性参数,而模型参数的获取需要对单个弧光的放电特征参数进行实验 测定。

Table 1 Physical parameters of Al and $Al_2O_3^{[11-12, 16-17]}$

Material	Density/ (kg·m ⁻³)	Specific heat capacity/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Melting point/ K
Al	2 700	895	228	933
Al_2O_3	3 630	1 260	>21)	2 303

1) Changing with temperature.

2.2 单个弧光放电特征参数的测定

2.2.1 弧光延迟时间及弧斑数量分析

高速摄像机得到的一组图像,能够直观显示弧光 从出现到消失的整个过程,本研究选取试样表面放电 的固定区域考察弧光放电寿命。如图2所示,图像拍 摄的相隔时间为100 µs,可以认为如果某个位置的弧 光在N张图片中一直出现,那么这个弧光的延迟寿命 为(N×100) µs,通过概率统计计算可以得到弧光的延 迟寿命约为140 µs,即瞬态放电分析的时间为140 µs。

由图 2 可知,在一个脉冲期间,所有产生弧光图 片的弧光数目基本相同,在弧光产生阶段,假设弧光 是成批出现的,每批弧光个数相同,并且相隔时间为 一个弧光的延迟寿命,根据实验得到在一个脉冲期间 弧光的存在时间为 2 000 μs,依据高速摄像机分析结 果,单个弧光的延迟寿命为140 μs,计算得到在一个 脉冲期间有 14 批弧光产生。

图 3 所示白圆圈(直径为 30 mm)统计了一批弧光 典型照片中的弧斑数量,得到弧光数目约为 250 个(弧 光分布密度为 3.5×10⁵ 个/m²),即每批产生 250 个弧 光,因此,在一个脉冲期间总共产生约 3 500 个弧光。 2.2.2 单弧光能量分析

采用 PEO 工艺设备中装配的信号采集系统,可以 得到每一时刻施加在电极两端的电压和电流特征波 形。图 4 所示为在 PEO 典型阶段处理时间为 10 min 时单个脉冲的瞬时电压一时间曲线和电流一时间曲 线。

根据等离子体电解氧化放电原理,仅正向电压对放电火花提供能量来源。因此,在分析能量问题时,本文作者只考虑正向电压(*U*)及电流(*I*)所带来的所有能量(*W*),利用积分原理 $W = \int_{0}^{0.02} UIdt$,可以得到一个

脉冲期间的总能量消耗为 5.76 J。

在 PEO 处理过程中,每一次弧光放电是陶瓷层生 长的直接驱动力,根据电流利用率的计算公式^[18],设 PEO 生长膜层密度为 3 630 kg/m^{3[16]},通过对电流利用 率的计算,得到实际用于弧光放电的能量约占总能量



图 2 PEO 典型阶段弧光放电图像(处理时间 10 min, 连续拍摄过程时间间隔为100 µs)

Fig.2 Pictures of sparks in typical stage of PEO (treated for 10 min): (a), (b), (c), (d) Continuous capture process with interval of 100 µs



图 3 PEO 典型阶段弧光分布图(处理时间为 10 min) Fig.3 Distribution diagram of sparks in typical stage of PEO (treated for 10 min)

的 43%。由上节研究得出,在一个脉冲期间共产生 3 500 个弧光,因此单个弧光的能量为 7.08×10⁻⁴ J。 假设能量在通道均匀分布,则体热源密度为 1.79×10¹⁶ W/m³,即体热源作用荷载为 1.79×10¹⁶ W/m³。 2.2.3 微弧瞬态放电时微弧尺寸及热影响区分析

假设微弧放电之间相互绝热,根据表面弧光数, 得到单个弧光的影响区域半径为 950 μm,弧光对铝基 体的影响区半径取 1 000 μm,即 *D* = 1 900 μm; *H*_s = 1 010 μm。

图 5 所示为样品在 PEO 曲型阶段的 SEM 像。由 图 5 可以看出,放电通道大小很不规则,这是由于其 相互覆盖造成的,选择一些比较规则的孔洞(白圆圈 内),统计得到其直径范围为 3~6 μm,取单个弧光放 电通道直径为 6 μm,即 *d* = 6 μm,实际的放电通道直 径一般在 1~10 μm^[3],与统计数据相符。



图4 单个脉冲的瞬时电压一时间曲线和瞬时电流一时间曲 线(处理时间为10 min)

Fig.4 Instantaneous voltage and current waveforms of single pulse (treated for 10 min): (a) Voltage—time curve; (b) Current—time curve



图 5 PEO 典型阶段膜层的表面形貌(处理时间为 10 min) Fig.5 Surface morphology of coating in typical stage of PEO (treated for 10 min)

3 结果分析与讨论

3.1 弧光放电特征参数

PEO 过程伴随着试样表面产生一系列弧光放电现象。在膜层生长的典型阶段,弧光不断闪烁并移动,

其寿命非常短暂,本文作者根据放电击穿介质的实验 现象,构建圆柱形放电通道模型;用实验方法获得弧 光寿命以及单个弧光的能量,对每个弧光产生的放电 通道及周围温度场的分布进行瞬态计算分析。

因此,针对 PEO 过程膜层生长的典型阶段前期,本文作者采用高速摄像机进行试样表面弧光放电的捕捉拍摄,根据统计方法得到弧光寿命约为140 µs,可见,弧光的寿命在微秒级,这与 BAOVAN 等^[19]测算的"单个火花"寿命为 0.17 ms 比较接近,由于其短暂性,采用瞬态计算分析方法是有效的。同时一根据实验观察得到在一个脉冲期间弧光的存在时间为 2 000 µs,将此与处理时间为 10 min 时单脉冲的瞬时电流一时间曲线进行比较(如图 4(b)所示),存在弧光的时间范围为 2.1~4.1 ms,在此阶段,根据图 4(a),电压的变化范围为 445~565 V,而在脉冲的其他时间范围,电压快速降低,由于电压的集中性,产生批次弧光时每批的弧光数目接近。

通过 Ansys 分析,图 6 所示为简化分析截面(见图 1(b))放电通道附近的局部温度场分布。温度高于 2 908 K 的区域主要集中在放电通道附近,通道中心温度超 过 2×10⁴ K,而在其影响的大部分区域温度都低于 2 908 K,因为 2 908 K 相对 2×10⁴ K 非常低,因此,大部分区域的温度变化不大,单个弧光的放电能量对此 区域的影响可以忽略,根据微弧放电之间的相互绝热 性,估算了单个弧光的影响区大小,验证了弧光尺寸 的合理性。另外,考虑到相机的通光量及曝光时间等 参数的限制,统计得到的弧斑数量稍微偏小,但其占 总消耗能量的绝大部分,可见,最终得到的温度值稍 微偏高,但差别不大。



图 6 PEO 典型阶段单个弧光放电通道中心及周围温度场的分布云图

Fig.6 Temperature field distribution around single discharge channel in typical stage during PEO process

1686

过 2×10⁴ K,明显高于 Al₂O₃ 的熔点及 γ-Al₂O₃ 和 α-Al₂O₃ 的形成温度,具备 Al₂O₃ 向 γ-Al₂O₃ 和 α-Al₂O₃ 转变的驱动力。说明 PEO 陶瓷层形成是由一系列熔化 和凝固瞬态过程构成,每一个脉冲瞬态过程均存在 Al 及 Al₂O₃等多相物质的瞬态熔化与瞬态凝固行为。

由图 6 还可以看出,放电通道中心温度高于两侧 温度,均高于 Al₂O₃ 的熔点,已形成熔池。温度梯度 引起熔池表面张力梯度,由于表面张力温度系数通常 为负值^[12],温度与表面张力成反比,因为越靠近放电 通道中心位置的温度明显高于偏离放电通道中心位置 的温度,所以,前者熔池表面形成的张力小于后者熔 池表面形成的张力,促使熔融的 Al₂O₃ 向放电通道两 侧流动,从而使放电通道中心形成孔洞,这也就解释 了陶瓷层表面多孔的现象。同时,考虑到固体可见光 辐射一般在 1 000 ℃以上^[12],弧光的面积大于放电通 道的面积。

图 7 所示为放电通道中心底部与基体交接点温度 随时间的变化曲线。可见,在单个弧光放电结束时, 基体温度已高于其熔点,这表明铝会发生重熔现象。 鉴于此,对陶瓷层的生长机制进行推测:在高电压、 大电流的作用下,膜层被击穿,存在电子导电的同时, 也存在离子导电,使熔化的铝形成铝离子并向膜层表 面迁移;铝离子与电解液中 OH 和大量水分子在放电 通道附近反应形成高温状态下的氧化铝,可能的反应



图 7 PEO 典型阶段单个弧光放电过程通道中心底部与基 体交接点温度随时间变化曲线

Fig.7 Temperature—time curves of connection node between bottle middle of discharge channel and substrate in single discharge in typical stage of PEO

$2Al+9H_2O \longrightarrow Al_2O_3+6H_3O^++6e$	(6)
$Al+3OH^{-} \rightarrow Al(OH)_{3}+3e$	(7)
$2Al(OH)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O_3$	(8)

本文作者未考虑放电结束后由于电解液冷却而产 生的各点温度变化,实际上,每个放电过程后,通道 内各点都会产生极高的冷却速度,将引发高温状态下 的氧化铝发生复杂的相变行为^[20-21],最终获得晶态或 非晶态陶瓷涂层。

4 结论

1) 针对 PEO 过程生长典型阶段,通过实验确定 了弧光寿命约为 140 μs、微弧尺寸约为 6 μm; 一个脉 冲期间总的能量消耗为 5.76 J。以单个弧光放电的有 效转换能量计算,单个弧光的放电能量为 7.08×10⁻⁴ J。

2) 针对 PEO 过程生长典型阶段,基于圆柱形放 电通道模型和实验获得的模型参数,对单个弧光放电 通道内部及周围区域温度场进行模拟,计算得出弧光 放电通道中心温度超过 2×10⁴ K。

3) 放电通道内部及周围的高温作用使放电通道 中心与基体交接点处铝发生重熔,结合通道附近复杂 的化学反应以及相变行为,推测出 PEO 陶瓷层的生长 机制。

REFERENCES

- XUE W B, ZHU Q Z, JIN Q, HUA M. Characterization of ceramic coatings fabricated on zirconium alloy by plasma electrolytic oxidation in silicate electrolyte[J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 120: 656–660.
- [2] MATYKINA E, ARRABAL R, SKELDON P, THOMPSON G E. Investigation of the growth processes of coatings formed by AC plasma electrolytic oxidation of aluminium[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54: 6767–6778.
- [3] YEROKHIN A L, NIE X, LEYLAND A, MATTHEWS A. DOWEY S J. Plasma electrolysis for surface engineering[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 122: 73–93.
- [4] MATYKINA E, ARRABAL R, SCURR D J, BARON A, SKELDON P, THOMPSON G E. Investigation of the mechanism of plasma electrolytic oxidation of aluminium using ¹⁸O tracer[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54: 6767–6778.

第21卷第7期

- [5] 姜兆华,辛世刚,王福平,吴晓宏,清水纪夫. 铝合金在水玻 璃-KOH-NaAlO₂ 体系中的微等离子体氧化[J]. 中国有色金属 学报,2000,10(4):519-524. JIANG Zhao-hua, XIN Shi-gang, WANG Fu-ping, WU Xiao-hong, QINGSHUI Ji-fu. Micro-plasma oxidation of aluminum alloy in sodium silicate-KOH-NaAlO₂[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 519-524.
- [6] 吴振东,姜兆华,姚忠平,孙学通,张雪林. 纯铝及其合金的 微等离子体氧化成膜特征[J]. 中国有色金属学报,2005,15(6): 946-951.

WU Zhen-dong, JIANG Zhao-hua, YAO Zhong-ping, SUN Xue-tong, ZHANG Xue-lin. Coating-forming characteristics of pure aluminum and aluminum alloy during micro-plasma oxidation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 946–951.

- [7] DUAN H P, DU K Q, YAN C W, WANG F H. Electrochemical corrosion behavior of composite coatings of sealed MAO film on magnesium alloy AZ91D[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51: 2898–2908.
- [8] HUSSEIN R O, NIE X, NORTHWOOD D O, YEROKHIN A, MATTHEWS A. Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation(PEO) process[J]. J Phys D: Appl Phys, 2010, 43: 1–13.
- [9] WU Z Q, XIA Y, LI G, XU F T. Structure and mechanical properties of ceramic coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation on aluminized steel[J]. Applied Surface Science, 2007, 253: 8398–8403.
- [10] GUAN Y J, XIA Y. Interface fracture property of PEO ceramic coatings on aluminum alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(17): 4204–4209.
- [11] YEROKHIN A L, SNIZHKO L O, GUREVINA N L, LEYLAND A, PILKINGTON A, MATTHEWS A. Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium[J]. Appl Phys, 2003, 36: 2110–2120.
- [12] 李华平,柴广跃,彭文达,阳 英,高 敏,郭宝平,牛憨笨. 微弧熔区的淬冷过程及其对氧化铝膜微观结构的影响[J]. 无 机材料学报,2008,23(1):114-120.

LI Hua-ping, CHAI Guang-yue, PENG Wen-da, YANG Ying, GAO Min, GUO Bao-ping, NIU Han-ben. Simulation of quenching process during microarc oxidation(MAO) and its effect on the microstructure of Al₂O₃ coating[J]. Journal of Inorganic Materials, 2008, 23(1): 114-120.

- [13] KLAPKIV M D. Simulation of synthesis of oxide-ceramic coatings in discharge channels of a metal-electrolyte system[J]. Materials Science, 1999, 33: 279–283.
- [14] 王立世,潘春旭,蔡启舟,魏伯康.等离子体电解氧化过程中 单个稳态微放电的热效应研究[J].物理学报,2007,56(9): 5341-5344.

WANG Li-shi, PAN Chun-xu, CAI Qi-zhou, WEI Bo-kang. Study of the heat effect of single steady-state microdischarge during plasma electrolytic oxidation[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(9): 5341–5344.

- [15] XUE W B. Features of film growth during plasma anodizing of Al 2024/SiC metal matrix composite[J]. Applied Surface Science, 2006, 252: 6195–6200.
- [16] CURRAN J A, CLYNE T W. Porosity in plasma electrolytic oxide coatings[J]. Acta Materialia, 2006, 54: 1985–1993.
- [17] ROHSENOW W M. 传热学手册(上册)[M]. 李荫亭,译. 北京:
 科学出版社, 1985: 125-128.
 ROHSENOW W M. Handbook of heat transfer (Volume I)[M].
 LI Yin-ting, transl. Beijing: Science Press, 1985: 125-128.
- [18] 薛文斌,邓志威,来永春,陈如意,张通和. 铝微弧氧化电流 效率的测定[J]. 电镀与精饰, 1998, 20(3): 1-5.
 XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, LAI Yong-chun, CHEN Ru-yi, ZHANG Tong-he. Determination of current efficiency in microarc oxidation on aluminum[J]. Plating and Finishing, 1998, 20(3): 1-5.
- [19] BAOVAN T, BROWN S D, WIRTZ G P. Mechanism of anodic spark deposition[J]. Ceramic Bulletin, 1977, 56(6): 563–566.
- [20] 贺永胜,赵志龙,刘一洋,刘林. 铝合金微弧氧化热力学机 理及影响因素的分析[J]. 电镀与环保,2005,25(6):38-40.
 HE Yong-sheng, ZHAO Zhi-long, LIU Yi-yang, LIU Lin. Thermodynamic mechanism and affecting factors analysis of aluminum alloy microarc oxidation[J]. Electroplating and Pollution Control, 2005, 25(6): 38-40.
- [21] 薛文彬,邓志威,来永春,陈如意. 铝合金微弧氧化陶瓷膜的 相分布及其形成[J]. 无机材料学报,1997,11(2):169-176. XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, LAI Yong-chun, CHEN Ru-yi. Phase distribution and formation mechanism of ceramic coatings formed by microarc oxidation(MAO) on alloy[J]. Journal of Inorganic Materials, 1997, 11(2):169-176.

(编辑 陈卫萍)