

基于 COMSOL 的微弧氧化过程温度场分布研究

姜曼¹, 柴永生¹, 周京¹, 牟玲龙¹, 岳艳丽^{1,2}

(1. 烟台大学 机电汽车工程学院, 山东 烟台 264005;

2. 海军航空工程学院 基础实验部, 山东 烟台 264005)

摘要: **目的** 研究微弧氧化过程的温度场分布情况对成膜过程及表面形貌的影响。**方法** 以 7075 铝合金微弧氧化过程中的一个放电通道为研究对象, 基于多物理场仿真软件 COMSOL Mutiphsysics 建立了微弧氧化传热过程的数学模型及物理模型。基于有限元法求解出微弧氧化成膜过程的温度场分布, 选择特定参考线及参考点, 绘制了温度-时间曲线。选择 0、100、500、1000 μs 四个关键时间点, 绘制了对应的温度-纵向深度曲线、温度分布云图及温度梯度分布云图, 并探究其对陶瓷层表面形貌的影响。**结果** 在 0~100 μs 时, 放电通道区域温度下降速率最快; 在 100~500 μs 时, 温度下降速率逐渐减小; 在 500~1000 μs 时, 温度下降速率最小且趋于不变。相对于放电通道中心区域, 靠近氧化铝膜层-铝合金基体界面区域温度下降速率较快, 温度梯度较大; 在 0、100、500、1000 μs 时, 最高温度所在位置的纵向深度依次为 93、20、26、38 μm , 呈现先减小后增大的趋势。**结论** 电解液对微弧氧化过程的冷却作用主要集中于放电通道形成后的 100 μs 内。除电解液外, 氧化铝膜层-铝合金基体界面在微弧氧化成膜过程中有一定的冷却作用, 而放电通道各区域冷却速率不均衡是氧化膜表面形成火山口状孔洞的主要原因。

关键词: 铝合金; 微弧氧化; 温度场; 温度梯度; 表面形貌; 有限元

中图分类号: TG174.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)03-0017-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.03.004

Temperature Field Distribution of Micro-arc Oxidation Process Based on COMSOL

JIANG Man¹, CHAI Yong-sheng¹, ZHOU Jing¹, MOU Ling-long¹, YUE Yan-li^{1,2}

(1. School of Electromechanical Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. Department of Basic Experiment, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264005, China)

ABSTRACT: The work aims to study effects of temperature field distribution during micro-arc oxidation process on film formation process and morphology. With a discharge channel of 7075 aluminum alloy as object of study, a mathematical model and a physical model were established for micro-arc oxidation heat transfer process based on the multi-physics simulation software COMSOL Mutiphsysics. The temperature field distribution of the micro-arc oxidation film forming process was solved in finite element method. Some specific reference lines and reference points were selected to plot temperature-time curve; key time

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-03-02

Received: 2017-01-10; **Revised:** 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51405416); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2014EEQ024); 山东省科技发展计划 (2012YD15010)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51405416), Shandong Provincial Natural Science Foundation, China (ZR2014EEQ024), Shandong Provincial science and technology development program (2012YD15010)

作者简介: 姜曼 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事微弧氧化。

Biography: Jiang Man (1992—), Female, Master, Research focus: micro-arc oxidation.

通讯作者: 柴永生 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事特种加工与机械结构分析。

Corresponding author: CHAI Yong-sheng (1976—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: non-traditional machining.

points including 0, 100, 500, 1000 μs were selected to plot temperature-longitudinal depth curve, temperature distribution chart and temperature gradient distribution chart. Their effects on morphology of the ceramic layer were investigated as well. In 0~100 μs , temperature of the discharge channel region decreased at the fastest speed; in 100~500 μs , the temperature descending rate decreased gradually; in 500~1000 μs , the temperature drop rate was the smallest and tended to be constant; compared with that in the discharge channel central area, temperature drop was faster and the temperature gradient was larger near alumina film-aluminum alloy interface; at 0, 100, 500, 1000 μs , longitudinal depth of the maximum temperature position was 93, 20, 26, 38 μm , tending to decrease first and increased later. Cooling effect of the electrolyte on the micro-arc oxidation process is mainly present within 100 μs after the discharge channel takes shape; in addition to the electrolyte, the alumina-aluminum alloy interface has also played a certain role during this process, and unbalanced cooling rate in each area of the discharge channel is the main cause of formation of the crater-like holes on the oxide film surface.

KEY WORDS: aluminium alloy; micro-arc oxidation; temperature field; temperature gradient; morphology; finite element

铝及其合金以质量轻、比强度高和导热性好的特性而被广泛应用,但由于其硬度较低、耐摩擦磨损与耐腐蚀性能差,不能满足某些应用场合耐腐蚀抗疲劳的要求,所以通常需要通过表面处理来提高其性能,微弧氧化便是其表面处理的一种^[1-2]。

微弧氧化(Micro-arc oxidation, MAO)又称微等离子体氧化,是指在普通阳极氧化的基础上,通过微弧氧化电源将工作区域由阳极氧化的法拉第区升高至高压放电区,在工件金属(Al、Mg、Ti等阀金属)与电解液相互作用下,于工件表面产生微弧放电,从而在金属表面形成一层陶瓷膜的表面处理技术。微弧氧化处理得到的陶瓷层具有较好的耐磨损、耐腐蚀、耐热冲击及绝缘性能,在航空航天等领域有着极为广泛的应用^[3-4]。

目前,对于微弧氧化的研究多停留在实验研究阶段,但这种宏观唯象的研究方法费时费力,缺乏细致的数值分析,而建模和仿真可以减少大量实验,有效节约成本和时间。因此,本文将利用多物理场仿真软件COMSOL Mutiphysics对微弧氧化过程中的温度场分布情况作进一步研究。

1 传热过程分析

1.1 数学模型

基于阳极气泡击穿理论^[5-7],微弧氧化成膜过程主要可分为四个阶段:1~50 V的低电压下,工件表面生成一层阳极氧化膜;100~200 V左右电压下,工件表面的氧化膜形成一些孔隙结构,并在孔底部发生电化学反应并生成氧气;电压超过300 V,工件表面产生电晕放电现象;电压达到400 V左右,孔隙结构内的氧气泡首先被击穿,产生等离子体,进而引发孔底氧化膜的雪崩式击穿,放电通道形成,此过程产生大量的热,反应产物达到熔融状态。待放电结束后,熔融的反应产物急剧冷却,堆积于放电通道内,微弧

氧化陶瓷层形成^[8]。

由于微弧氧化过程极其复杂,目前为止尚未有令所有人信服的理论体系解释微弧氧化陶瓷层的成膜过程。因此,在进行温度场数值模拟的过程中,需要在不影响计算精度的前提下对其进行简化。鉴于微弧氧化的热力学过程主要发生在第四阶段,本文对微弧氧化条件的简化假设如下:1)只研究每次放电的一个放电通道;2)等离子体放电通道是一个均匀圆柱体;3)传热过程主要以热传导和热对流为主;4)忽略过程中热辐射的作用;5)放电过程中热通量全部集中于材料表面,且无损失;6)能量密度在放电通道内分布均匀。

由于放电时间短,且热量集中,所以微弧氧化过程中的传热过程可用Fourier定律来描述,公式见式(1)。

$$dQ = -\lambda dS \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1)$$

式中, dQ 为传热速率,W; dS 为传热面积, m^2 ; $\frac{\partial t}{\partial n}$ 为温度梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{m}$; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

1.2 物理模型

基于上述分析,选取工件的一个放电通道为本文的研究对象。其中,工件为30 mm×30 mm×2 mm的7075铝合金,而由于微弧氧化过程中放电间隙极小,难以测得放电通道的直径。因此,借鉴电火花放电通道半径计算公式^[9-12]做一个大致预测,其公式见式(2)。

$$R_0 = 2.04 \times 10^{-3} \times I^{0.43} \times t^{0.44} \quad (2)$$

式中, R_0 为放电通道半径,m; I 为峰值电流,A; t 为脉宽,s。

根据有限元分析条件,建立二维微弧氧化有限元分析模型,如图1所示。图1a为工件的径向剖面图,为便于观察同时简化计算,只选取工件的部分区域作局部分析,ABEF为100 μm 厚的 Al_2O_3 陶瓷膜,BCDE为400 μm ×400 μm 的铝合金基体,JIHG为半径10 μm

的放电通道。放电通道区域作为研究的重点，其放大图如图 1b 所示，为后续研究考虑，绘制 JI 、 KL 、 GH 三条特殊位置边线以及分别取 KL 、 GH 的六个点（1—6）。采用自动网格划分，将放电通道区域的网格单元尺寸设置为特别细化，其余区域均设置为较细化网格。网格划分结果如图 2 所示。

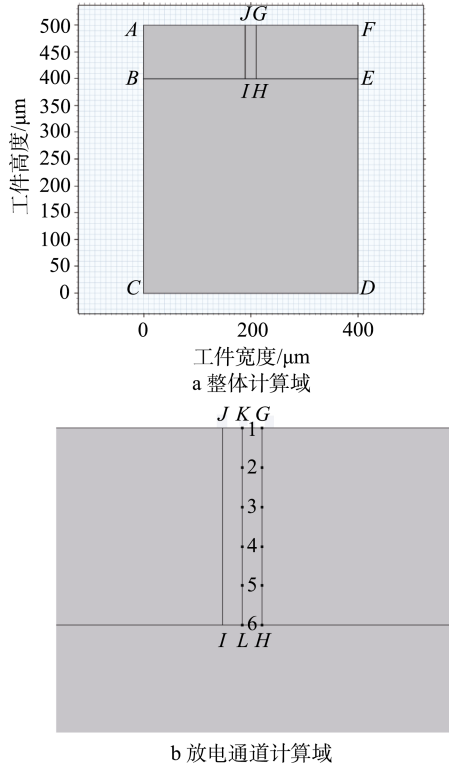


图 1 工件有限元模型

Fig.1 Workpiece finite element model: a) overall computing domain, b) discharge channel calculation domain

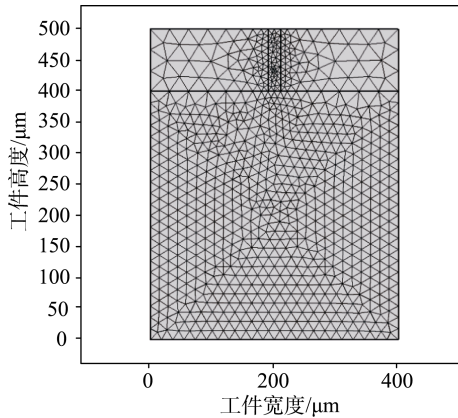


图 2 工件网格划分结果

Fig.2 Results of workpiece meshing

1.3 边界条件

基于 COMSOL Multiphysics 传热模块的固体传热对铝合金工件进行温度场分析，其传热控制方程见式（3）。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \nabla T = \nabla (K \nabla T) + Q \quad (3)$$

式中， ρ 为固体密度， kg/m^3 ； C_p 为常压热容， $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$ ； K 为导热系数， $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ ； T 为温度， K ； t 为时间， s ； Q 为热量， J 。

图 3 为微弧氧化过程中工件阳极的边界条件示意图。本研究中，将放电通道形成的瞬间设置为初始时间（ $t=0$ ），并设定此时工件处于室温（ 20°C ）环境下，即工件阳极的初始温度为 20°C 。工件表面发生放电击穿时释放大热量，故放电通道及其周围小部分区域内会产生热辐射，但对于总热来说，热辐射所占的比重很小，因此忽略不计^[13]。设放电通道半径为 R ，放电通道中心沿工件表面向外延伸的距离为 r ，当 $r > R$ 时，工件表面热量传递形式主要以热对流为主，此时边界条件的数学模型为 $\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = k(T - t)$ 。式中， λ 为材料导热系数， k 为工件与电解液的热交换系数， z 为热流向量， T 为工件表面的瞬时温度， t 为电解液温度；当 $r \leq R$ 时，工件表面热量传递主要以热通量为主，此时边界条件的数学模型为 $\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = q$ ，式中， q 为热通量。

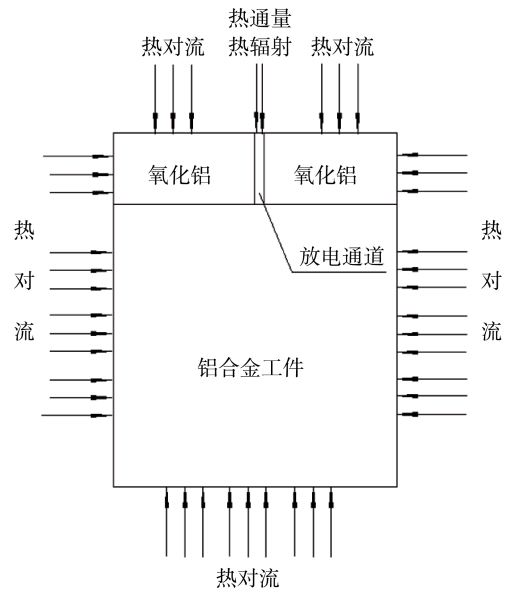


图 3 边界条件示意图

Fig.3 Schematic diagram of boundary conditions

热量在铝合金工件内部以热传导形式传播，由于铝合金导热性能良好，热传导过程中消耗的热量很小，对本文研究影响不大，因此可适当忽略，即将边界条件施加于完整铝合金工件表面与施加于局部区域的边界线上并无二致。基于以上分析，对于二维计算域来说，由于 Al_2O_3 熔点为 2050°C ，初始时间为放电通道形成瞬间，此时的 Al_2O_3 必定是刚进入熔融状态，故设置 $JHGH$ 区域初始温度为 2050°C ；放电通道形成之前，铝合金表面已经历了一段普通阳极氧化过程，该过程产生一定的热量，使铝合金工件温度

有了一定程度的升高,故设置铝合金工件放电通道以外的区域(*AJIB*、*GFEH*、*BEDC*)初始温度为 90°C ;设置*AF*边传热系数为 $15000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,*BC*、*CD*、*DE*边传热系数为 $30000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[14]。由于电解液中设置搅拌系统和冷却系统,故认为微弧氧化过程中电解液温度始终保持不变,均为 20°C 。

1.4 求解与分析

求解结果如图4所示,图4a、4b分别为边线*KL*、*GH*上6个参考点的温度随时间变化图,对比可见,虽然起始温度有所差异,*KL*线上参考点的温度均高于*GH*线,但两条线上6个参考点的温度变化趋势基本一致,均随时间的推移逐渐降低,但并非直线关系。在 $0\sim 100\mu\text{s}$ 时,曲线斜率较大,参考点上温度下降速度较快; $100\sim 500\mu\text{s}$ 时,曲线斜率逐渐减小,参考点温度下降速率降低,但仍保持一定的下降幅度; $500\sim 1000\mu\text{s}$ 时,曲线逐渐趋于平缓,此时温度下降速率极小; $1000\mu\text{s}$ 后,曲线基本达到平缓状态,此时温度下降速率可近似于不变。由此可知,电解液在成膜过程中的冷却作用主要集中于放电通道形成后的 $100\mu\text{s}$ 内。

基于上述分析, 0 、 100 、 500 、 $1000\mu\text{s}$ 是成膜过程中的四个关键时间点,绘制这四个时间的温度分布云图,如图5所示。分析可知,经电解液冷却后,放电

通道处温度仍为最高。整体来看,工件的温度分布以放电通道区域为中心,呈放射性递减趋势。在 $0\mu\text{s}$ 时,放电通道刚形成,工件的最高温度位于放电通道底部。一方面是由于在放电通道内发生氧化膜的“雪崩式”击穿,这一过程释放大量热;另一方面是放电通道底部距氧化膜-电解液界面有一定距离,在通道形成瞬间电解液的冷却作用无法到达底部。而随着时间的推移,最高温度逐渐移至放电通道中心部位,最高温度点沿*KL*线移动。

为便于观察,绘制 0 、 100 、 500 、 $1000\mu\text{s}$ 时*JI*、*KL*、*GH*线的温度-纵向深度曲线,如图6所示。由图可知,*KL*线上温度始终高于*JI*、*GH*线,而*JI*、*GH*线的温度曲线保持重合,表明放电通道中心线温度最高,两侧壁由于对称,温度相同。但三条线上温度随纵向深度变化趋势一致,均随纵向深度的增大先升高再降低。不同的是,在 $0\mu\text{s}$ 时,最高温度位于放电通道底部,即纵向深度约 $93\mu\text{m}$ 处; $100\mu\text{s}$ 时,最高温度位于纵向深度为 $20\mu\text{m}$ 左右处; $500\mu\text{s}$ 时,最高温度位置移至纵向深度为 $26\mu\text{m}$ 左右处; $1000\mu\text{s}$ 时,最高温度则位于纵向深度为 $38\mu\text{m}$ 左右的位置。

为对该现象做进一步研究,绘制各时间点对应的温度梯度分布云图,如图7所示。由图可以看出,虽然放电通道区域温度最高,但却并非温度梯度最大的

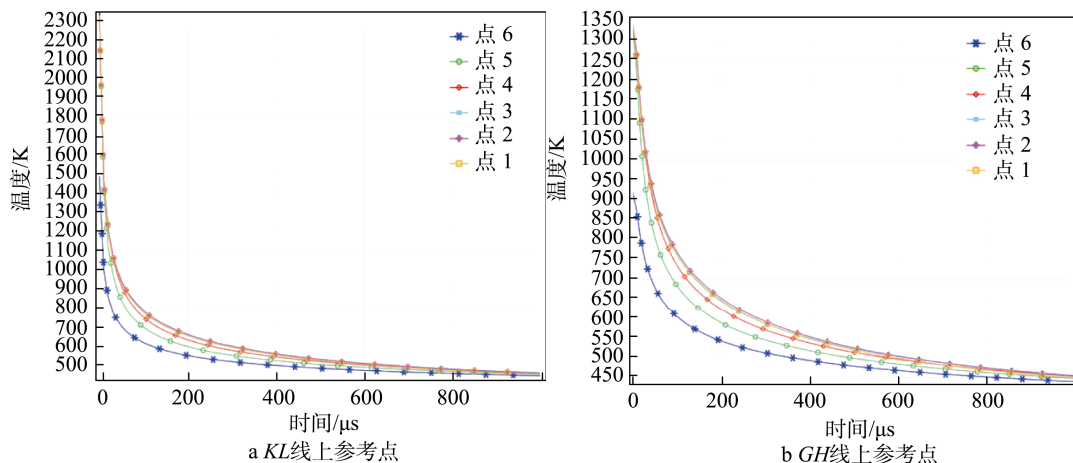


图4 参考点温度分布

Fig.4 Temperature distribution of reference point: a) reference point of *KL* line, b) reference point of *KL* line

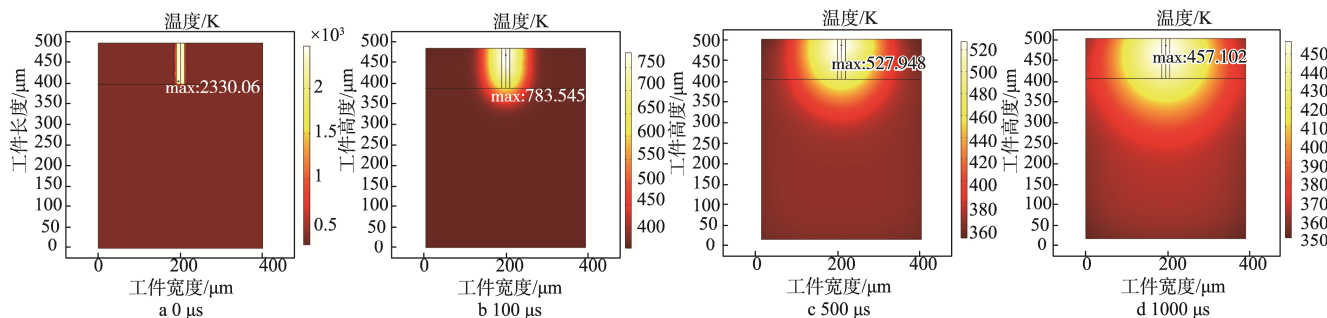


图5 温度分布云图

Fig.5 Temperature distribution cloud picture

位置, 温度梯度最大位置位于放电通道区域两侧的 Al_2O_3 膜层内。放电通道 $JHGH$ 内的最大温度梯度产生于 IH 边附近, 即氧化铝膜层-铝合金基体界面。综合图 5、图 6 及图 7 可看出, 氧化铝膜层-铝合金基体界面在微弧氧化成膜过程中, 也起到了一定的冷却作用^[14]。放电通道顶部受电解液的冷却作用, 底部受氧

化铝膜层-铝合金基体界面的冷却作用, 温度下降速率较快, 会率先通过熔融状态进入凝固期, 而此时放电通道内仍继续进行电化学反应, 并生成氧气, 由于已没有相应的逸出通道, 氧气必须要冲破刚进入凝固期的氧化物, 犹如“火山喷发”般, 在氧化膜表面形成火山口状的孔洞^[15]。

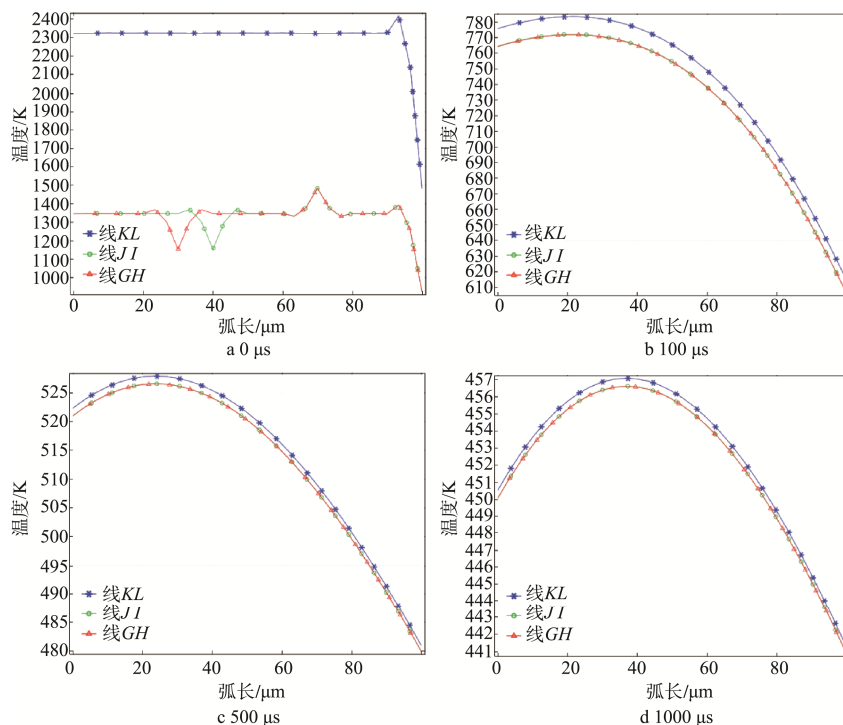


图 6 温度-纵向深度曲线

Fig.6 Temperature-longitudinal depth curve

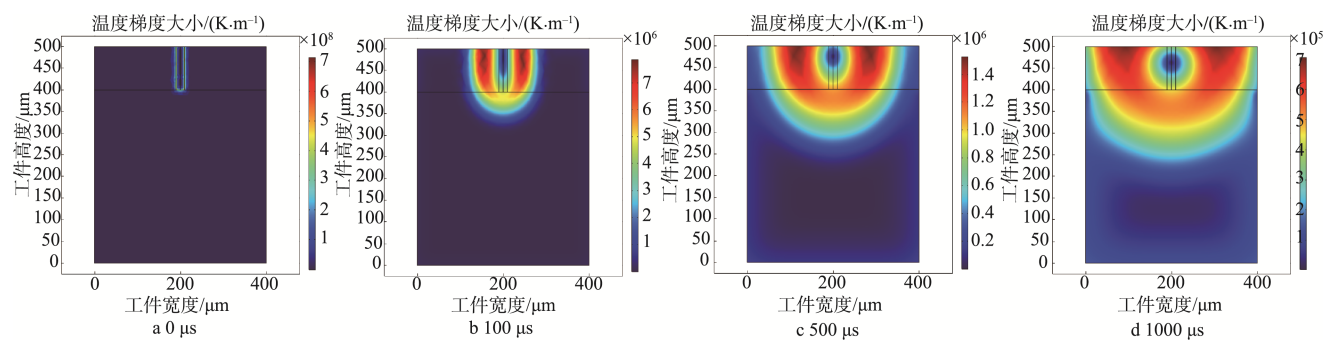


图 7 温度梯度分布云图

Fig.7 Temperature gradient distribution cloud picture

2 结论

建立了微弧氧化成膜过程的有限元分析模型, 基于有限元法求解出其温度分布情况, 归纳出其对陶瓷层表面形貌的影响, 对微弧氧化成膜机理研究起到了一定的指导意义。

1) 通过多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 的传热模块进行数值模拟, 重点分析成膜过程中的四

个关键时间点: 0、100、500、1000 μs , 求解出其对应的温度及温度梯度分布。

2) 通过温度分布结果分析, 验证了氧化铝膜层-铝合金基体界面在微弧氧化成膜过程中有一定冷却作用。

3) 通过温度梯度分布结果分析, 认为放电通道内不同部位温度下降速率不均衡是氧化膜表面形成火山口状孔洞的主要原因。

参考文献:

- [1] 马晋. 铝合金微弧氧化工艺研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
MA Jin. Investigation on Technology of Micro-arc Oxidation on the Surface of Aluminum Alloy[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.
- [2] 蒋百灵, 刘东杰. 制约微弧氧化技术应用开发的几个科学问题[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2402—2407.
JIANG Bai-ling, LIU Dong-jie. Scientific Aspects of Restricting Development and Application of Micro-arc Oxidation Technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2402—2407.
- [3] WIRTZ G P, BROWN S D, KIRVEN W M. Ceramic by Anodic Spark Deposition[J]. Mater Mauf Process, 1991, 6(1): 87—115.
- [4] WU H H, JIN Z S, LONG B Y, et al. Characterization of Microarc Oxidation Process on Aluminium Alloy[J]. Chin Phys Lett, 2003, 20(10): 1815—1819.
- [5] 邓志威, 来永春, 薛文彬, 等. 微弧氧化材料表面陶瓷化机理的探讨[J]. 原子核物理评论, 1997, 14(3): 193—195.
DENG Zhi-wei, LAI Yong-chun, XUE Wen-bin, et al. Formation Mechanism of Surface Ceramics on Aluminum Alloy with Micro-arc Oxidation[J]. Nuclear Physics Review, 1997, 14(3): 193—195.
- [6] 陈宏, 郝建民, 冯忠绪. 微弧氧化机理及电击穿模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(5): 116—119.
CHEN Hong, HAO Jian-min, FENG Zhong-xu. Micro-arc Oxidation Mechanism and Electrical Discharge Model[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(5): 116—119.
- [7] 唐婉霞, 严继康, 倪尔鑫, 等. 微弧氧化的机理及其发展趋势[J]. 热加工工艺, 2016(14): 6—8.
TANG Wan-xia, YAN Ji-kang, NI Er-xin, et al. Mechanism and Development Trend of Micro-arc Oxidation[J]. Hot Working Technology, 2016(14): 6—8.
- [8] 辛铁柱. 铝合金表面微弧氧化陶瓷膜生成及机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
XIN Tie-zhu. Research on the Formation and Mechanism of Ceramic Coating Prepared by Micro-arc Oxidation on Surface of Aluminum Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [9] 薛瑞. 电火花放电通道的理论分析与放电间隙测试研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
XUE Rui. Theoretical Analysis of Electrical Discharge Channel and Research of Gap Distance Testing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [10] YU Z B, JUN T, KUNIEDA M. Dry Electrical Discharge Machining of Cemented Carbide[J]. Journal of Material Processing Technology, 2004, 25: 353—357.
- [11] PATEL M R, BARRUFTE M A, EUBANK P T, et al. Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. II. The Anode Erosion Model[J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66(9): 4104—4111.
- [12] MARAFONA J, CHOUSAL J A G. A Finite Element Model of EDM Based on the Joule Effect[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(6): 595—602.
- [13] 谷萌, 李丽, 朱翠雯, 等. 基于有限元对电火花放电加工中钎铁硼材料温度场的研究[J]. 热加工工艺, 2013(24): 77—80.
GU Meng, LI Li, ZHU Cui-wen, et al. Research on Temperature Field of NdFeB Material Based on Finite Element Method in EDM[J]. Hot Working Technology, 2013(24): 77—80.
- [14] 李华平, 柴广跃, 彭文达, 等. 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(1): 114—120.
LI Hua-ping, CHAI Guang-yue, PENG Wen-da, et al. Simulation of Quenching Process During Micro-arc Oxidation (MAO) and Its Effect on the Micro Structure of Al_2O_3 Coating[J]. Journal of Inorganic Materials, 2008(1): 114—120.
- [15] 王艳秋, 王岳, 陈派明, 等. 7075 铝合金微弧氧化涂层的组织结构与耐蚀耐磨性能[J]. 金属学报, 2011, 47(4): 455—461.
WANG Yan-qiu, WANG Yue, CHEN Pai-ming, et al. Microstructure Corrosion and Wear Resistances of Microarc Oxidation Coating on Al Alloy 7075[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(4): 455—461.