

文章编号: 1001-1455(2012)02-0129-07

Al₂O₃陶瓷引弧微爆炸加工温度场模拟*

张保国¹, 林克凌², 田欣利¹, 薛春芳², 李富强¹

(1. 装甲兵工程学院再制造技术重点实验室, 北京 100072;

2. 装甲兵工程学院机械工程系, 北京 100072)

摘要: 建立了 Al₂O₃ 陶瓷引弧微爆炸加工 (micro-detonation of striking arc machining, MDSAM) 过程的传热模型, 基于有限元理论, 利用 ANSYS 软件对加工过程中的温度场分布进行了模拟。结合材料性质, 对模拟和实验得到的蚀坑尺寸进行了比较, 并分析了加工参数对温度场的影响。模拟结果表明, Al₂O₃ 陶瓷引弧微爆炸加工时在给定的加工参数下的最高温度可达 13 435 °C, 且高温影响区范围很小, 加工实验与模拟结果符合较好。随着脉冲宽度和工作电流的增加, 加工区域的温度以及蚀坑的半径和深度增大; 随着喷嘴半径的增大, 加工区域的温度降低而蚀坑的径深比增大。模拟结果可为 Al₂O₃ 陶瓷引弧微爆炸加工过程中表面形态的预测、材料去除机理的揭示以及加工参数的选择等提供参考。

关键词: 爆炸力学; 温度场; 引弧微爆炸加工; Al₂O₃ 陶瓷

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

工程陶瓷因具有硬度高、耐磨、耐腐和质轻等优良性能, 被日益广泛地应用于现代工业、国防和高科技等领域^[2], 但其高脆性、高硬度给加工带来了极大的困难。工程陶瓷传统的加工手段为金刚石砂轮磨削, 但加工成本高、效率低, 而且只能加工简单的平面或圆弧曲面组成的零件, 对于复杂的型腔或型面则无法加工, 因而陶瓷材料的应用与发展^[2]受到了限制。目前, 特种加工技术是当今工程陶瓷加工领域的热点, 如激光加工^[3]、电火花加工^[4]、等离子体切割^[5]、引弧微爆炸加工 (micro-detonation of striking arc machining, MDSAM)^[6]等, 并取得了一些有意义的成果。其中, 引弧微爆炸加工作为一种新型的加工方法, 已经在高效、低成本等方面显露出较明显的优势。

引弧微爆炸加工是一项最新开发出的适用于工程陶瓷粗加工的特种加工技术, 该技术综合利用了微爆炸过程产生的等离子体射流的烧蚀及冲蚀作用。通过对陶瓷孔、平面、槽、外圆表面、异型面的加工实验, 发现该技术具有设备简单、加工效率高、运行成本低、可控性好等优良特性^[7]。在引弧微爆炸加工时, 材料的去除主要是依靠微爆炸等离子体射流的热和冲击的联合作用完成的, 因此对作用区域的温度场进行研究, 对于揭示该技术的加工机理具有重要意义。由于作用区域的温度极高, 对温度场直接测试很困难, 而采用数值模拟的方法, 可以节省大量的人力物力, 并能取得实时准确的结果。

本文中拟采用有限元法对引弧微爆炸加工 Al₂O₃ 陶瓷过程中的温度场进行数值计算, 给出典型工艺参数的温度场计算结果, 并分析主要工艺参数对温度场的影响。

1 建模计算及结果分析

1.1 导热微分方程及边界条件

引弧微爆炸加工 Al₂O₃ 陶瓷的过程是一个瞬态加热的复杂过程, 为了简化分析, 作如下假设: (1) Al₂O₃ 陶瓷材料的组织、成分均匀, 没有间隙和缺陷; (2) 加工中不受引弧微爆炸冲击的表面视为绝热边界; (3) 加工中释放的热量通过热传导传递到 Al₂O₃ 陶瓷中, 不考虑由于熔化、气化导致的形状改变; (4) 仅分析单脉冲引弧微爆炸的情况。

* 收稿日期: 2011-01-18; 修回日期: 2011-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51075399)

作者简介: 张保国(1979—), 男, 博士研究生。

加工中,引弧微爆炸产生的热量作用在 Al_2O_3 陶瓷上,满足导热微分方程

$$\rho c(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(t) r \frac{\partial t}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial z} \right] \quad (1)$$

式中: ρ 为 Al_2O_3 陶瓷的密度, c 为比热容, λ 为导热系数, t 为瞬时温度, τ 为时间变量, r, z 为圆柱坐标系中的空间变量。

初始条件为

$$t(r, z, \tau = 0) = t_0 \quad (2)$$

式中: t_0 为初始温度, Al_2O_3 陶瓷工件取 25°C 。

边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} = \begin{cases} q & r \leq R \\ h(t - t_0) + \varepsilon \sigma t^4 & r > R \end{cases} \quad (3)$$

式中: q 为作用于 Al_2O_3 陶瓷的热流密度; h 为换热系数; R 为微爆炸冲击区域的半径; ε 为发射率; σ 为斯忒藩-波耳兹曼常量,且 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

模拟分析时,除微爆炸冲击点处和对流边界上有热流密度输入外,其他边界可认为是绝热表面。引弧微爆炸加工时,喷嘴和 Al_2O_3 陶瓷试件之间的距离较小,通道中辐射到周围介质中的热量很少,可忽略不计。

1.2 高斯分布方程

引弧微爆炸加工采用高斯分布热源,即 q 在微爆炸冲击的轴心处密度最高,离轴心越远密度越小,边缘处微爆炸的密度最低。高斯函数^[8]如下

$$q(r) = q_m \exp(-Kr^2) \quad (4)$$

式中: $q(r)$ 为距离热源中心 r 处的热流密度, q_m 为热源中心的最大热流密度, K 为热能集中系数。

由于作用在 Al_2O_3 上的总热量等于引弧微爆炸的有效功率 Q ,所以有

$$Q = \int_0^\infty 2\pi r q(r) dr \quad (5)$$

式中: $Q = \eta UI$, U 为加工电压, I 为工作电流, η 为电弧有效利用率。

将式(4)代入式(5),可得

$$q_m = \frac{QK}{\pi} \quad (6)$$

微爆炸把热能传给 Al_2O_3 陶瓷是通过陶瓷上一定的冲击面积进行的。对于引弧微爆炸,这个面积称为微爆炸点。它的定义是:设微爆炸点的半径为 r_H ,引弧微爆炸传给 Al_2O_3 陶瓷的热能中,有 90% 落在以 r_H 为半径的微爆炸点内。根据微爆炸点的定义,有

$$0.9Q = \int_0^{r_H} 2\pi r q(r) dr \quad (7)$$

将式(4)、(6)代入式(7)中,可求得热能集中系数为

$$K = \frac{2.3}{r_H^2} \quad (8)$$

综合式(4)、(6)、(8),可得引弧微爆炸加工时热源的高斯分布方程如下

$$q(r) = \frac{2.3\eta UI}{\pi r_H^2} \exp\left(-\frac{2.3r^2}{r_H^2}\right) \quad (9)$$

1.3 建立模型

引弧微爆炸加工时,微爆炸冲击范围相对于 Al_2O_3 陶瓷尺寸较小且冲击时间很短,热量来不及传导,只有微爆炸冲击点周围的小部分区域受热影响,因此引弧微爆炸加工可视为面热源对半无限大物体加热。本文中所建立的几何模型是根据实际的物理过程简化而来的,在划分单元以前定义材料的部分物理属性^[9]如表1所示, $H - H_{25}$ 为相对于 25°C 时的焓变。

若采用均匀网格划分,则占用空间太大,计算速度太慢,造成资源浪费,所以模型采用非均匀网格划分。整体网格划分较稀疏,放电点附近采用网格逐渐细化的递阶式网格划分。根据二维温度场分析单元类型的选择原则,作瞬态温度场分析时,特别是涉及相变问题时,应选择低阶热单元 Quad4 node55^[10],网格划分如图 1 所示,长为 4 mm,宽为 1 mm。

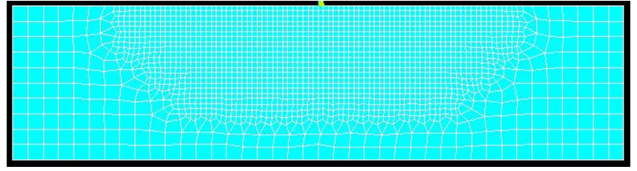


图 1 Al₂O₃ 陶瓷网格划分

Fig. 1 The mesh division of Al₂O₃ ceramics

表 1 Al₂O₃ 陶瓷的导热系数、比热容和焓变随温度的变化

Table 1 Variation of thermal conductivity, specific heat and enthalpy change of Al₂O₃ ceramics with temperature

$t/^\circ\text{C}$	λ	c	$(H-H_{25})$	$t/^\circ\text{C}$	λ	c	$(H-H_{25})$
	$/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$	$/(\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$	$/(\text{GJ}/\text{m}^3)$		$/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$	$/(\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$	$/(\text{GJ}/\text{m}^3)$
25	34.10	774	0	1 327	6.42	1 307	6.07
127	26.40	943	0.35	1 927	6.42	1 370	9.27
327	15.80	1 093	1.17	2 127	6.42	1 420	14.99
527	10.40	1 183	2.08	2 727	6.42	1 420	18.38
927	7.07	1 257	4.02	3 727	6.42	1 420	21.21

1.4 计算结果与实验验证

引弧微爆炸加工的参数:脉冲宽度为 80 ms,工作电流为 100 A,加工电压为 160 V,喷嘴半径为 1 mm。在此条件下,利用 ANSYS 软件模拟的温度场分布与实际加工情况随时间变化如图 2 所示。

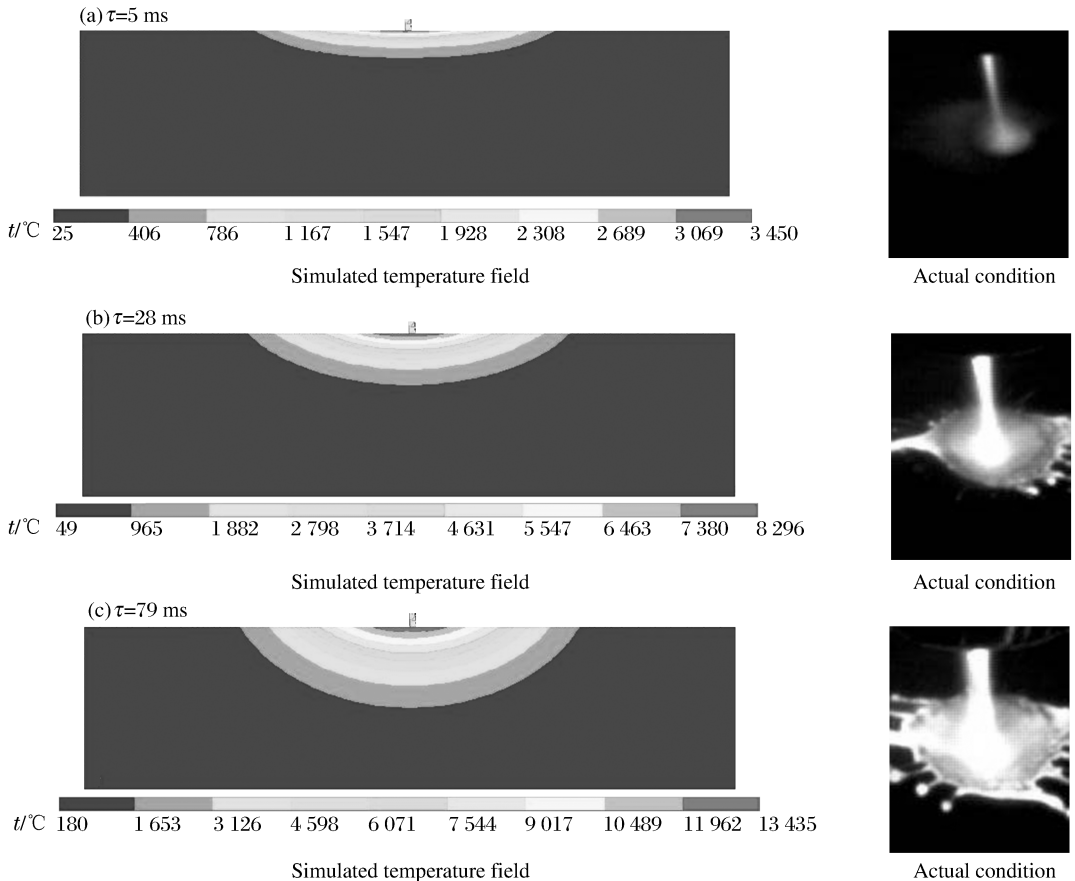


图 2 温度场分布与实际加工情况随时间的变化

Fig. 2 The simulated temperature distribution and the actual processing conditions at the different times

在距离微爆炸作用点最近的位置,温度最高,达到 $13\,435\text{ }^{\circ}\text{C}$,如图 2(c)所示。高温区范围很小,在离开微爆炸冲击点区约 2 mm 外的大部分区域,温度较低。微爆炸冲击点附近温度场变化迅速,温度梯度大,在远离微爆炸冲击点的地方温度场变化缓慢。这是因为在加工中,引弧微爆炸产生大量的热量,大部分的热量传入 Al_2O_3 陶瓷中,这些传入的热量在加工中常常来不及传入工件深处而聚集在工件表面形成局部高温。

假设达到 Al_2O_3 陶瓷的熔化温度 $2\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的材料全部剥离抛出,则数值模拟得到半径约为 1.044 mm 、深度约为 0.444 mm 的圆冠蚀坑。相同加工条件下,实验所得蚀坑的半径约为 1 mm ,深度约为 0.2 mm 。但蚀坑底部存在厚度为 $0.15\sim 0.20\text{ mm}$ 的变质层,该层结构与基体完全不同,层内的晶粒有明显的重熔现象。因此, Al_2O_3 陶瓷试件在深度方向的热影响区为 $0.35\sim 0.40\text{ mm}$,见图 3。模拟结果比实验结果大一些,是因为在实际加工中,材料熔融后一部分被抛出,一部分被堆放到微爆炸冲击的外围,另外建立的热源模型也会造成一定的模拟误差。总的来说,模拟结果与实验结果吻合较好。

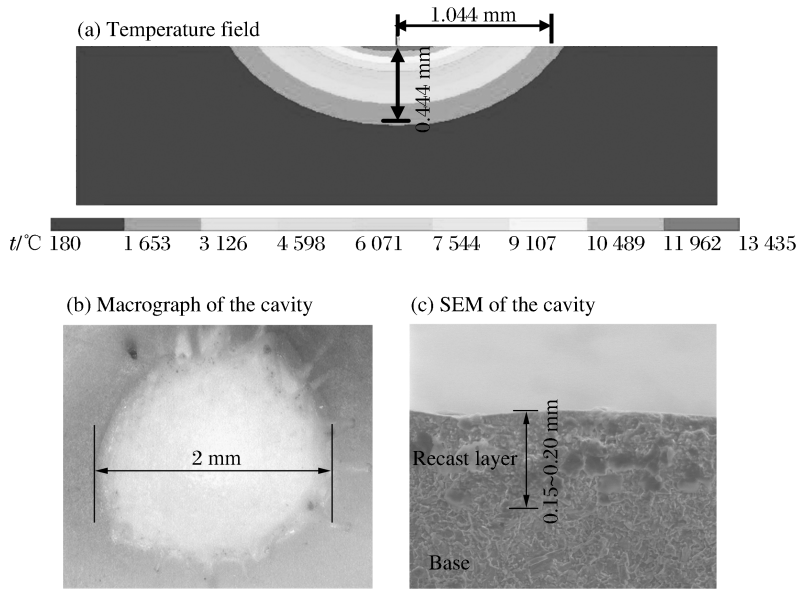


图 3 引弧微爆炸加工 Al_2O_3 陶瓷得到的温度场及蚀坑形貌

Fig. 3 The temperature field and the cavity for Al_2O_3 ceramics machined with MDSAM

2 加工参数对温度场的影响

利用数值模拟分析不同脉冲宽度、工作电流和喷嘴半径对 Al_2O_3 陶瓷温度场的影响。

2.1 脉冲宽度对 Al_2O_3 陶瓷温度场的影响

图 4 为不同脉冲宽度下 Al_2O_3 陶瓷沿半径和深度方向的温度场计算结果。由图 4(a)可知,随脉冲宽度的增加,温度沿半径方向在热影响区 $0\sim 1.0\text{ mm}$ 范围内迅速升高,在热影响区范围外温度变化不大。假设达到熔点以上的 Al_2O_3 陶瓷被全部剥离抛出,则脉冲宽度为 $50、60、70$ 和 80 ms 时,相应的蚀坑半径分别约为 $0.937、0.975、1.011、1.044\text{ mm}$ 。由图 4(b)可知,在热影响区 $0\sim 0.4\text{ mm}$ 范围内,温度沿深度方向随脉冲宽度的增加而迅速升高,而在此范围外变化不大。脉冲宽度为 $50、60、70$ 和 80 ms 时,相应的蚀坑深度分别约 $0.317、0.372、0.416$ 和 0.444 mm 。脉冲宽度为 50 ms 时, Al_2O_3 陶瓷表面的最高温度约 $10\,905\text{ }^{\circ}\text{C}$,而脉冲宽度为 80 ms 时,最高温度可以达到 $13\,435\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见脉冲宽度越大,温度越高,相应形成的冲击蚀坑的宽度和深度也越大,即材料去除率随脉冲宽度的增大而增大。

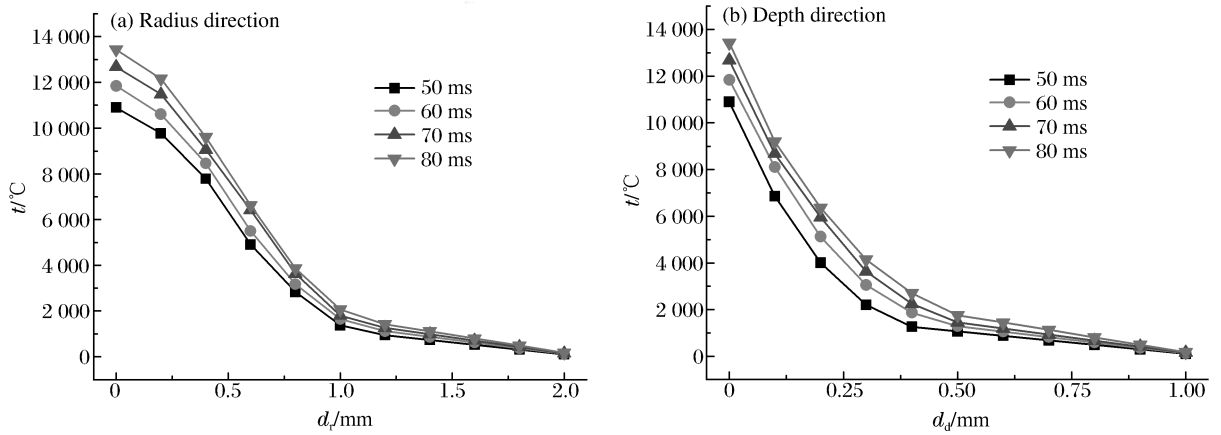


图 4 不同脉冲宽度下 Al₂O₃ 陶瓷沿半径和深度方向的温度分布

Fig. 4 The temperature distribution of Al₂O₃ ceramics along radius and depeth directions at different pulse widths

2.2 工作电流对 Al₂O₃ 陶瓷温度场的影响

图 5 为不同工作电流下 Al₂O₃ 陶瓷沿半径和深度方向的温度场计算结果。由图 5(a)可知,随工作电流的增大,温度沿半径方向在热影响区 0~1.0 mm 范围内迅速升高,工作电流为 70、80、90 和 100 A 时,相应的蚀坑半径分别约为 0.925、0.975、1.010 和 1.044 mm。由图 5(b)可知,温度沿深度方向在热影响区 0~0.4 mm 范围内随电流的增大迅速升高,而在此范围外变化不大。工作电流为 70、80、90 和 100 A 时,相应的蚀坑深度分别约为 0.369、0.398、0.415 和 0.444 mm。工作电流为 70 A 时,Al₂O₃ 陶瓷表面的最高温度约 9 304 °C,而工作电流为 100 A 时,最高温度可以达 13 435 °C。可见工作电流越大,温度越高,相应形成的冲击蚀坑的宽度和深度也越大,即材料去除率随着工作电流的增大而增大。

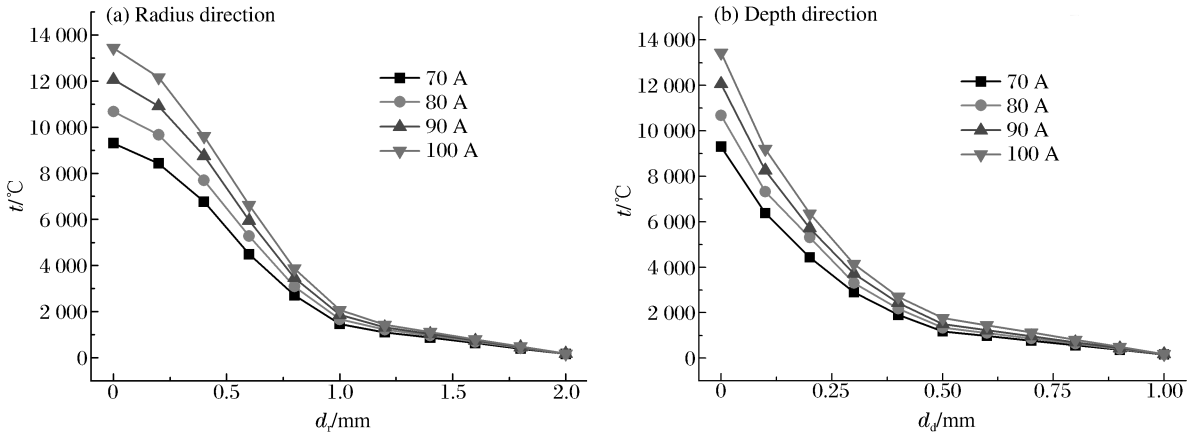


图 5 不同工作电流下 Al₂O₃ 陶瓷沿半径和深度方向的温度分布

Fig. 5 The temperature distribution of Al₂O₃ ceramics along radius and depeth directions at different working currents

2.3 喷嘴半径对 Al₂O₃ 陶瓷温度场的影响

图 6 为不同喷嘴半径下 Al₂O₃ 陶瓷沿半径和深度方向的温度场计算结果。由图 6(a)可知,随喷嘴半径的增大,温度沿半径方向在热影响区 0~0.8 mm 范围内迅速升高,而且可以看出在 0~0.8 mm 范围内,喷嘴半径越小温度越高,0.8~2.0 mm 范围内,喷嘴半径越大温度越高。喷嘴半径为 0.6、0.8、1.0 和 1.2 mm 时,相应的蚀坑半径分别约为 0.883、0.971、1.044 和 1.120 mm。由图 6(b)可知,温度沿深度方向在热影响区 0~0.4 mm 范围内随喷嘴半径增大迅速升高,而在此范围外变化不大。喷嘴半径为 0.6、0.8、1.0 和 1.2 mm 时,相应的蚀坑深度分别约为 0.736、0.476、0.444 和 0.393 mm。喷嘴半

径为 1.2 mm 时, Al_2O_3 陶瓷表面的最高温度约 9 504 $^\circ\text{C}$, 而喷嘴半径为 0.6 mm 时, 最高温度可以达到 33 549 $^\circ\text{C}$ 。可见喷嘴半径越大, 相应形成的冲击蚀坑的宽度越大, 深度越小, 即加工所得的蚀坑径深比越大。

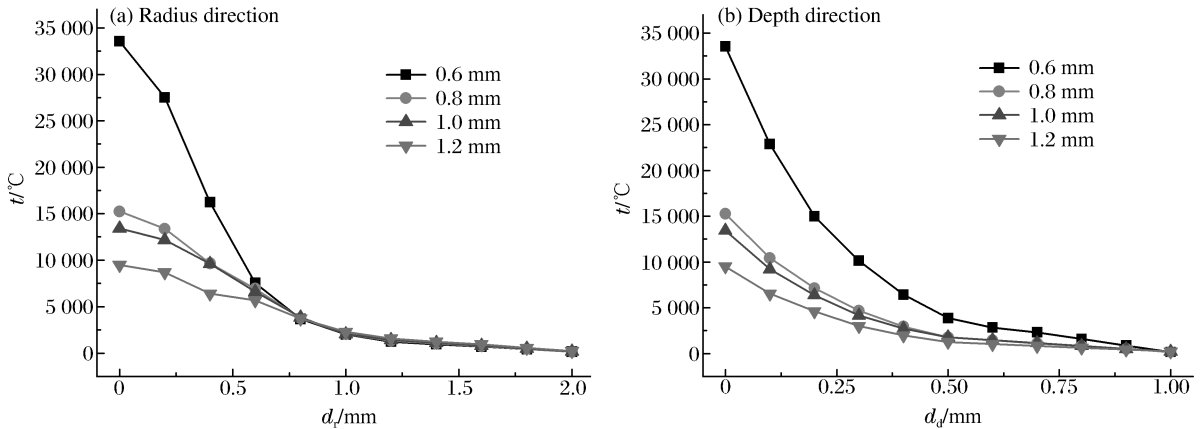


图6 不同喷嘴半径下 Al_2O_3 陶瓷沿半径和深度方向的温度分布

Fig. 6 The temperature distribution of Al_2O_3 ceramics along radius and depth directions at different nozzle radii

3 结论

建立了引弧微爆炸加工 Al_2O_3 陶瓷温度场的数学模型, 应用有限元方法计算了不同脉冲宽度、工作电流和喷嘴半径等加工参数下 Al_2O_3 陶瓷的温度分布。模拟结果很好地展示了不同加工参数下冲击蚀坑中的温度分布和微爆炸冲击过程中蚀坑形状的变化情况, 由此可以根据加工要求模拟加工过程, 而不受实验条件的限制。通过对不同加工参数下温度场的计算, 可知 Al_2O_3 陶瓷的温度随脉冲宽度和工作电流的增大而升高, 随喷嘴半径的增加, 径深比逐渐变大。这可为选择最优的加工工艺参数, 获得良好的表面质量提供理论依据, 在实际应用中具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Malzbender J, Steinbrech R W. Threshold fracture stress of thin ceramic components[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(1): 247-252.
- [2] 骆志高. 陶瓷材料电加工表面质量的研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(11): 75-79.
LUO Zhi-gao. Study on surface quality of ceramics after electrical discharge machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(11): 75-79.
- [3] 洪蕾, 李力钧, 鞠春雷. 调 Q 脉冲 CO_2 激光切割 Si_3N_4 工程陶瓷的机理研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(6): 61-66.
HONG Lei, LI Li-jun, JU Chun-lei. Investigation of cutting of Si_3N_4 engineering ceramics with Q-switched pulse CO_2 laser[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(6): 61-66.
- [4] 刘永红, 于丽丽, 李小朋, 等. 非导电工程陶瓷电火花磨削技术[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 132-136.
LIU Yong-hong, YU Li-li, LI Xiao-peng, et al. Technology for electrical discharge grinding of non-conductive engineering ceramics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 132-136.
- [5] 徐文骥, 卢毅申, 金洙吉, 等. 等离子体在陶瓷加工中的应用[J]. 机械工程学报, 2002, 38(增刊): 73-75.
XU Wen-ji, LU Yi-shen, JIN Zhu-ji, et al. Plasma arc cutting process for engineering ceramics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(Suppl): 73-75.
- [6] TIAN Xin-li, YANG Jun-fei, LIU Chao, et al. Study of engineering ceramic machining with a new design of ripple controlled microdetonation of electrode arc striking[J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2010, 48(5/6/7/8): 529-536.

- [7] 田欣利, 杨俊飞, 张保国, 等. 面向工程陶瓷的电极引弧微爆炸加工系统开发与加工特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(5): 517-522.
TIAN Xin-li, YANG Jun-fei, ZHANG Bao-guo, et al. System development and performance research of the MDEAS machining technology for hard and brittle materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(5): 517-522.
- [8] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 22-24.
- [9] 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: 72-73.
- [10] 孔祥谦. 有限元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 10.

Numerical simulation of temperature field for Al_2O_3 ceramics during micro-detonation of striking arc machining*

ZHANG Bao-guo¹, LIN Ke-ling², TIAN Xin-li¹, XUE Chun-fang², LI Fu-qiang¹

(1. *Science and Technology on Remanufacturing Laboratory,*

Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China;

2. *Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)*

Abstract: A thermal transfer model for Al_2O_3 ceramics during micro-detonation of striking arc machining (MDSAM) was established. Based on the finite element theory, the temperature field of Al_2O_3 ceramics during MDSAM was simulated with the aid of the ANSYS software. Combined with the material properties, the simulated cavity dimension was compared with the machining experimental result and the effects of the machining parameters on the temperature field were analyzed. The simulated results show that the highest temperature of Al_2O_3 ceramics during MDSAM can reach 13 435 °C with the given machining parameters. The heat-affected zone is quite small and the machining test is consistent with the simulated results. With the increase of the pulse width and the working current, the temperature of the processing region and the radius and depth of the cavity increase. The temperature decreases with the increase of the nozzle radius, whereas the diameter-to-depth ratio of the cavity increases. The simulated results can provide an important reference for the prediction of the surface topography, the disclosure of the material removal mechanism, and the optimization of the machining parameters for Al_2O_3 ceramics during MDSAM.

Key words: mechanics of explosion; temperature field; micro-detonation of striking arc machining; Al_2O_3 ceramics

* Received 18 January 2011; Revised 14 March 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51075399)

Corresponding author: ZHANG Bao-guo, zhang_baoguo@126.com