文章编号：1000-5773(2009)02-0091-07

电火花放电通道蚀除绝缘工程陶瓷的热力学特性研究*

刘永红，于丽丽，徐玉龙，纪仁杰，李庆云

（中国石油大学(华东)机电工程学院，山东东营 257061）

摘要：研究开发出一种绝缘工程陶瓷电火花加工新技术，它是利用电火花放电通道流经绝缘工程陶瓷表面时产生的瞬时高温作用进行蚀除加工的。建立了电火花放电通道热蚀除加工绝缘工程陶瓷的温度场和热应力场数学模型，对绝缘工程陶瓷表面上的温度梯度和热应力场进行了数值模拟，给出了火花放电通道在绝缘工程陶瓷表面上形成的温度梯度和热应力分布规律。模拟结果为揭示绝缘工程陶瓷的电火花微观去除机理、预测绝缘工程陶瓷表面的微观形貌和电加工参数的选择等奠定了理论基础。

关键词：绝缘工程陶瓷；电火花加工；温度梯度；热应力；数值模拟

中图分类号：TQ174.1；TG661 **文献标识码**：A

1 引 言

绝缘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[1-2]。但其高脆性、高硬度和绝缘性等给加工带来了极大的困难[3-4]。例如：机械磨削加工存在成本高、效率低和加工表面易产生微裂纹等问题；超声波加工效率低、工具损耗较严重；激光加工主要适用于切割和打孔，且设备昂贵[5-6]。目前，国内外学者多集中于研究绝缘工程陶瓷电解电火花复合加工技术。这种加工方法是利用电解液中火花的放电作用进行加工的，存在精度差、效率低、易锈蚀机床和对环境有污染等缺陷。对该种加工技术研究较多的学者有：日本学者土屋八郎、九保田护、近森邦夫，瑞士学者 B. Bhattacharyya，印度学者 K. Allesu，以及我国的刘永红和郭永丰等[7-9]。日本学者福泽康、毛利尚武等利用工具电极与放置在绝缘工程陶瓷上的金属辅助电极间的火花放电作用，以及火花放电时的碳化导电作用，在煤油中实现了对绝缘工程陶瓷的电火花加工，该研究成果最具有代表性，但仍未达到实用化的程度，仅能用于型孔加工[10-11]。日本学者黑松彰雄等开展了机械电解电火花复合磨削技术(MEEC)的研究工作，该复合磨削方法与单纯的机械磨削方法相比具有生产率高、加工质量好和成本低等优点，但由于加工过程中排出一些有害的电解气体，易污染环境和锈蚀机床，因此未能在实际生产中得到推广应用。

刘永红等人研究开发出了一种利用电火花放电通道流经绝缘工程陶瓷表面时产生的高温作用来进行蚀除加工的电火花加工新技术。该技术具有加工效率高、成本低和对环境无污染等特点[12-13]。电火花放电加工过程中的温度梯度和热应力场等特性对该种新技术的加工效率、精度和表面质量等有很大的影响。由于其加工机理不同于通常的导电材料电火花加工技术，因此不能直接套用通常的电火花加工理论来解决该种新技术在加工过程中遇到的一些难题。为了弄清该种新技术的材料微观蚀除机理和

* **收稿日期**：2008-07-08；**修回日期**：2008-10-15

基金项目：国家自然科学基金项目(50675225)；山东省科技攻关项目(2006GG2204001)

作者简介：刘永红(1965－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事特种加工与机器人研究. E-mail：liuyh@hdpu.edu.cn

工艺规律，本工作对电火花放电蚀除加工过程中，放电通道在绝缘工程陶瓷上形成的温度梯度和热应力场等进行研究，总结出了相应的规律，为实际生产中推广应用该技术提供了理论依据和工艺指导。

2 绝缘工程陶瓷火花放电蚀除加工的物理及数学模型

2.1 物理模型

绝缘工程陶瓷的电火花加工是利用连续间隔的脉冲放电进行加工的，其材料去除量是一个个相互独立的脉冲放电去除量的累加。为了方便快捷地弄清绝缘工程陶瓷的电火花微观去除机理，本工作将研究单脉冲放电在绝缘工程陶瓷表面上形成的热力特性。

绝缘工程陶瓷单脉冲放电蚀除加工的物理模型如图 1 所示。加工时，薄铜片电极和针状钢电极分别与脉冲电源的正、负极相连，铜片电极紧贴在绝缘工程陶瓷的表面上，针状钢电极沿陶瓷表面向铜片电极送进。当两极之间的距离达到放电间隙尺度时，极间介质被放电击穿，产生火花放电，由放电通道流经绝缘工程陶瓷表面时产生的瞬时高温蚀除效应来去除加工绝缘工程陶瓷。该种加工技术用乳化液代替目前国内外绝缘材料电解电火花复合加工技术中常用的电解液，加工过程无电解作用存在，避免了电解电火花复合加工方法存在的加工环境差、易锈蚀机床的问题；同时，加工效率也有较大的提高，如用其加工绝缘 Al_2O_3 陶瓷材料，加工效率比通常的电解电火花复合加工方法提高近 10 倍。

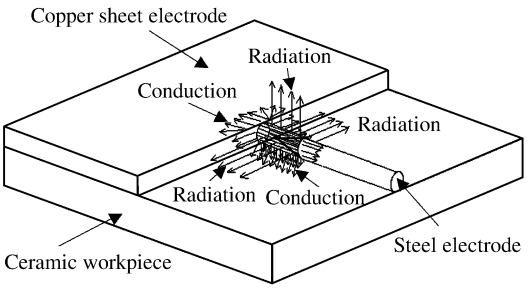


图 1 绝缘工程陶瓷单脉冲放电蚀除加工的物理模型

Fig. 1 Physical model of machining insulating ceramics with single pulse discharge

2.2 数学模型

2.2.1 温度场

作用于铜片电极和绝缘工程陶瓷工件上的火花放电通道热量满足如下的热传导微分方程[14]

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

式中：ρ 为密度(kg/m^3)，$c(T)$为比热(J/(kg·℃))，$\lambda(T)$为导热系数(W/(m·℃))，T 为瞬时温度(℃)，t 为时间(s)，r 为沿陶瓷工件和铜片表面距离放电中心的距离(m)，z 为距离陶瓷工件上表面的深度(m)。

边界条件为

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial z}=\begin{cases}q & (r\leqslant R)\\ h(T-T_0) & (r>R)\end{cases} \tag{2}$$

式中：q 为加工中作用于铜片电极和绝缘工程陶瓷的热流密度(W/m^2)，h 为换热系数(W/(m^2·℃))，T_0 为周围介质温度(℃)，R 为放电通道半径(m)。

2.2.2 热应力场

温升作用下的应力-应变方程为[15-16]

$$\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\varepsilon}-\boldsymbol{m}) \tag{3}$$

其中：

$$\boldsymbol{\sigma}=(\sigma_{xx},\sigma_{zz},\sigma_{xz})^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}=(\varepsilon_{xx},\varepsilon_{zz},\varepsilon_{xz})^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{m}=\frac{E\alpha_t\Delta T}{1-2\nu}(1,1,0)^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{D}=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{pmatrix}1-\nu & \nu & 0\\ \nu & 1-\nu & 0\\ 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2}\end{pmatrix} \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{D}$ 为弹性矩阵,$\boldsymbol{\sigma}$ 为应力向量(N/m^2),$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变向量,E 为杨氏模量(Pa),ν 为泊松比,α_t 为热膨胀系数(℃$^{-1}$),ΔT 为温升(℃)。

3　有限元模型的建立

3.1　有限元模型及网格划分

对放电几何模型进行有限元网格划分的主要思路是:在满足计算精度的前提下,尽量减少占机时间。具体做法是:在距离放电通道热源较近的区域,网格划分细密;距离热源较远的区域,网格划分稀疏。图 2 为所建立的电火花加工电极与绝缘工程陶瓷工件的有限元网格划分模型,模型中铜片的厚度为 0.1 mm,陶瓷的厚度为 0.4 mm。图 3 为放电区域中,铜片电极与陶瓷工件有限元网格划分模型剖面的局部放大图。

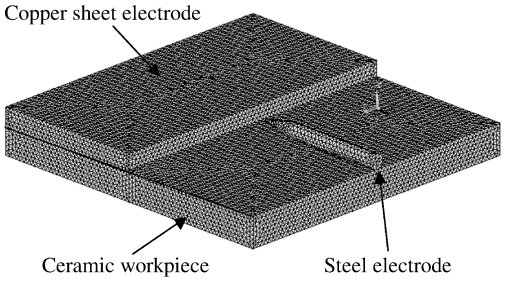


图 2　电极与陶瓷工件的有限元模型

Fig. 2　Finite element model of electrode and ceramic workpiece

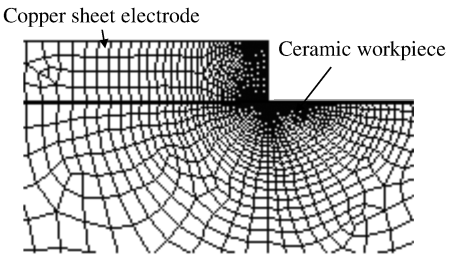


图 3　放电区域铜片电极与陶瓷有限元网格局部放大图

Fig. 3　Partial enlarged view of finite element model mesh for electrode and ceramic workpiece in discharge area

3.2　热源模型

在导热计算中,为获得较精确的解,放电时的热源被看作为具有一定尺寸的表面热源。单脉冲电火花加工的热流密度呈高斯分布[17],可通过下式求得

$$q=\frac{4.45U_bI}{\pi R^2}\eta\exp\left[-4.5\left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \tag{8}$$

式中:U_b 为放电电压(V),I 为放电电流(A),R 为放电通道半径(m),r 为距离放电中心的距离(m),η 为热量分配系数。

4　计算结果与分析

4.1　铜和 Al_2O_3 陶瓷热学物理参数

分析计算时所用的铜和 Al_2O_3 陶瓷材料的热学物理参数如表 1 所示[18-19]。

表 1　铜和 Al_2O_3 陶瓷的热学物理参数

Table 1　Thermodynamic parameters of copper and Al_2O_3 ceramic

T/(℃)	λ_{cu}	c_{cu}	λ_{cer}	c_{cer}	T/(℃)	λ_{cu}	c_{cu}	λ_{cer}	c_{cer}
127	392	398	26.4	942	1 927	348	490	6.42	1 369
327	381	418	15.8	1 093	2 127	166	490	6.42	1 420
527	360	432	10.4	1 179	2 727	166	382	6.42	1 420
927	348	458	7.07	1 256	3 227	166	382	6.42	1 420
1 327	348	490	6.42	1 307					

4.2　温度梯度

单次脉冲放电时,铜片电极和 Al_2O_3 陶瓷工件上的温度场分布如图 4 所示。所模拟的放电条件为:放电脉宽 300 μs、放电电流 15 A、放电电压 30 V,空气中放电。

图 4 的上半部分为铜片电极上的温度分布，下半部分为 Al_2O_3 陶瓷工件上的温度分布。由图 4 可以看出，靠近针状电极侧的绝缘工程陶瓷表面上形成的温度梯度高，有利于放电蚀除加工。这主要是由于放电通道流经陶瓷表面的高温作用，同时极性效应和尖端放电效应使放电能量大部分作用于绝缘工程陶瓷的表面上。由图 4 还可以看出，放电中心位置的温度最高，达 10405 ℃，Al_2O_3 陶瓷工件上放电中心区边缘的温度为 10156 ℃。高温区范围很小，在离放电点大约 0.4 mm 以外的区域温度很低。在放电点附近温度场变化快，温度梯度高；在远离放电点的区域温度场变化缓慢。

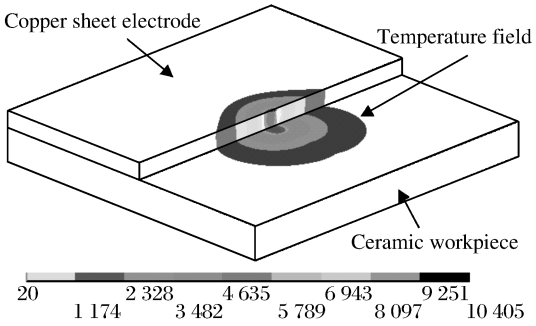


图 4 铜片电极和 Al_2O_3 陶瓷工件上的温度场分布图

Fig. 4 Temperature distribution on copper sheet electrode and Al_2O_3 workpiece

图 5 为不同放电脉冲宽度下，Al_2O_3 陶瓷工件表面上沿针状钢电极方向距离放电中心的位置（与针状钢电极的尖部相对，未放电蚀除时铜片边缘的位置）与温度梯度的关系曲线。图中远离铜片的方向为负方向，靠近铜片的方向为正方向。由图 5 可以看出，随着单次脉冲放电宽度的增加，陶瓷表面上的温度梯度增加，同时热影响区的面积也增加，即加工的坑痕面积变大。这与实际的电火花加工规律是一致的，电火花加工中，在其它条件不变的情况下，随着脉冲宽度的增加，单次脉冲放电的能量增加，放电蚀除量增加。图 5 中的纵坐标是不对称的，这是由于尖端放电效应使放电通道向针状钢电极方向的扩展速度加快，此外由于铜片电极良好的热传导作用，使得铜片下、陶瓷上的放电能量散失量增加。上述两种因素的综合作用，使得靠近针状钢电极方向的陶瓷上放电能量的作用区域大于铜片下方的区域，因此其纵坐标是不对称的。在各种脉冲宽度下，Al_2O_3 陶瓷表面上距离放电中心的位置与温度梯度关系曲线的变化规律都是基本一致的。放电中心处的温度梯度最大，在 100 μs 时，最大温度梯度达 177 M℃/m；在 600 μs 时，最大温度梯度达 480 M℃/m，如此高的温度梯度是造成材料蚀除和工件表面产生微裂纹的主要原因。在 −0.4～0.1 mm 区域以内的温度梯度变化较快，之外变化较慢，逐渐趋近于零。

图 6 为不同放电脉冲宽度下，距离 Al_2O_3 陶瓷工件上表面的深度与温度梯度的关系曲线。由图 6 可以看出，随着单次脉冲放电宽度的增加，陶瓷表面上的温度梯度增加，同时热影响区的深度也增加，即加工的坑痕变深。这与实际的电火花加工规律是一致的，电火花加工中，在其它条件不变的情况下，随

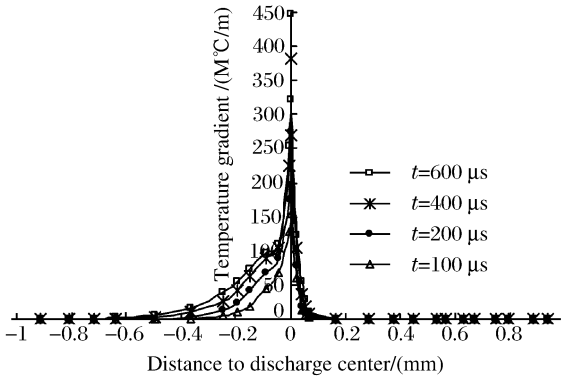


图 5 陶瓷表面上距离放电中心的位置与温度梯度的关系曲线

Fig. 5 Relation curve of distance to discharge center on ceramic surface with temperature gradient

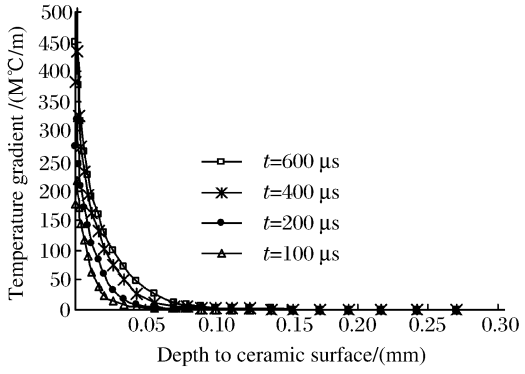


图 6 距离陶瓷上表面的深度与温度梯度的关系曲线

Fig. 6 Relation curve of depth to ceramic surface with temperature gradient

着脉冲宽度的增加,单次脉冲放电的能量增加,其放电蚀除量增加。在各种脉冲宽度下,距离 Al_2O_3 陶瓷上表面的深度与温度梯度关系曲线的变化规律都是基本一致的。在上表面处的温度梯度最大,在 100 μs 时,最大温度梯度达 177 M℃/m;在 600 μs 时,最大温度梯度达 480 M℃/m,如此高的温度梯度是造成材料蚀除和工件表面产生微裂纹的主要原因。在深度大于 0.08 mm 的区域,陶瓷的温度梯度趋近于零。

4.3　热应力

图 7 为不同放电脉冲宽度下,Al_2O_3 陶瓷工件表面上沿针状钢电极的方向距离放电中心的位置(与针状钢电极的尖部相对,未放电蚀除时铜片边缘的位置)与等效应力的关系曲线。图中远离铜片的方向为负方向,靠近铜片的方向为正方向。由图 7 可以看出,随着单次脉冲放电宽度的增加,陶瓷表面上的等效应力增加,同时等效应力影响区的面积也增加。这与实际的电火花加工规律是一致的,电火花加工中,在其它条件不变的情况下,随着脉冲宽度的增加,单次脉冲放电的能量增加,放电蚀除量增加。图 7 中的纵坐标是不对称的,其原因同图 5。在各种脉冲宽度下,Al_2O_3 陶瓷表面上距离放电中心的位置与等效应力关系曲线的变化规律都是基本一致的。放电中心处的等效应力最大,在 100 μs 时,最大等效应力达 6 880 MPa;而在 600 μs 时,最大等效应力达 22 400 MPa。在 −0.4～0.15 mm 的区域内等效应力变化较快,之外区域变化较慢,逐渐趋近于零。

图 8 为不同放电脉冲宽度下,距离 Al_2O_3 陶瓷工件上表面深度与等效热应力的关系曲线。由图 8 可以看出,随着单次脉冲放电宽度的增加,陶瓷深度方向上的等效应力增加。这与实际的电火花加工规律是一致的,电火花加工中,在其它条件不变的情况下,随着脉冲宽度的增加,单次脉冲放电的能量增加,放电蚀除量增加。在各种脉冲宽度下,距离 Al_2O_3 陶瓷上表面的深度与等效应力关系曲线的变化规律都是基本一致的。在上表面处的等效应力最大,在 100 μs 时,最大等效应力达 6 880 MPa;而在 600 μs时,最大等效应力达 22 400 MPa。在深度大于 0.08 mm 的区域,陶瓷的等效应力趋近于零。

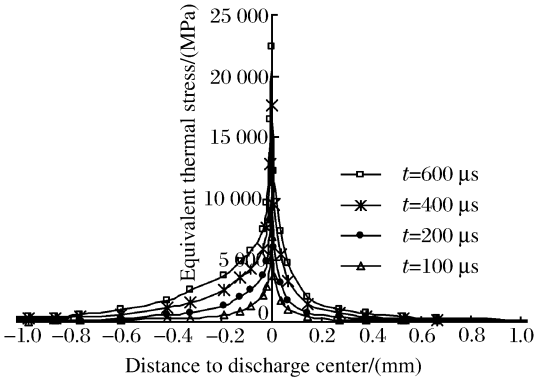


图 7　陶瓷表面上距离放电中心的位置与等效热应力的关系曲线

Fig. 7　Relation curve of distance to discharge center on ceramic surface with equivalent thermal stress

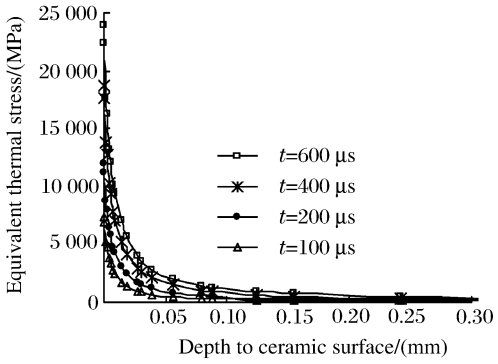


图 8　距离陶瓷上表面的深度与等效热应力的关系曲线

Fig. 8　Relation curve of depth to ceramic surface with equivalent thermal stress

4.4　实验验证

图 9 为单脉冲放电实验装置的照片。图中工件材料为绝缘 Al_2O_3 工程陶瓷,铜片电极材料为紫铜,针状电极材料为 45 钢,实验机床为电火花成型加工机床,单脉冲放电电源和计算机数据采集系统为自行研制的实验装置,空气中放电。实验时,针状电极和铜片电极分别与单脉冲电源的正、负极相连,针状电极安装在成型电火花加工机床的主轴伺服头上。在主轴伺服头的驱动下沿绝缘 Al_2O_3 工程陶瓷表面向铜片电极送进,当两极之间的距离达到放电间隙尺度时,极间介质被放电击穿,产生火花放电,由放电通道流经绝缘工程陶瓷表面时产生的瞬时高温蚀除效应来去除加工绝缘工程陶瓷。实验后,采用万能工具显微镜观测到的绝缘 Al_2O_3 工程陶瓷表面上,放电蚀除坑的尺寸与理论预测值的误差在 10%

左右,从而验证了理论分析的正确性。

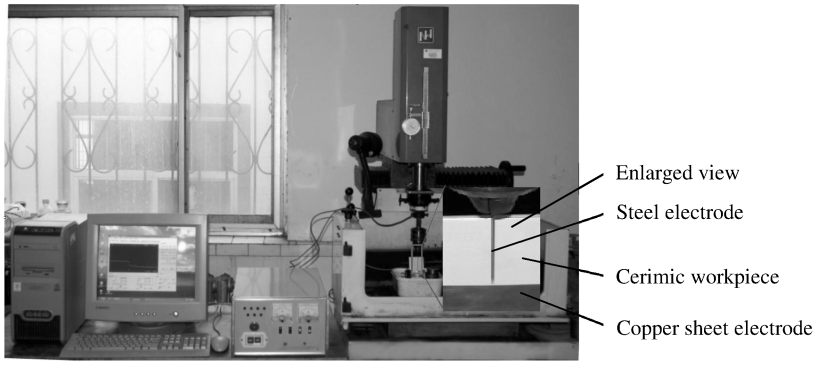


图 9 绝缘工程陶瓷单脉冲放电的实验装置图

Fig. 9 Experimental set-up of insulating engineering ceramics with single pulse discharge

5 结 论

(1) 放电脉冲宽度对绝缘工程陶瓷单次脉冲放电蚀除特性影响较大。随着脉冲宽度的增加,放电蚀除的温度梯度和等效热应力增加。实际加工时,如果脉冲宽度选择不当,将会导致陶瓷表面产生裂纹,甚至工件破裂。选择合适的脉冲宽度,不仅可以提高加工效率,也可以提高加工精度和表面质量。

(2) 在放电中心点附近的温度梯度和等效热应力变化最快,中心点处的温度梯度和等效热应力最高。高的温度梯度和等效热应力是造成材料蚀除和工件表面产生裂纹的主要因素。

(3) 模拟结果可为预测绝缘工程陶瓷表面微结构形貌和裂纹的形成特性,揭示电火花加工的放电机理,以及选择合适的加工参数等提供理论依据。

References:

[1] Pavese M, Fino P, Ortona A, et al. Potential of SiC Multilayer Ceramics for High Temperature Applications in Oxidising Environment [J]. Ceramics International, 2008, 34(1): 197-203.

[2] Malzbender J, Steinbrech R W. Threshold Fracture Stress of Thin Ceramic Components [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(1): 247-252.

[3] Kiyoshi S, Tetsutaro U, Manabu I, et al. A New Complex Grinding Method for Ceramic Materials Combined with Ultrasonic Vibration and Electrodischarge Machining [J]. Key Engineering Materials, 2007, 329: 439-444.

[4] Zheng L, Yuan J T, Li S H. Drilling Hole Mechanisms of Ceramic Composite Armors [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(5): 568-573. (in Chinese)
郑 雷, 袁军堂, 李少华. 陶瓷复合装甲的孔加工及机理 [J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(5): 568-573.

[5] Li X P, Liu Y H, Ji R J, et al. Non-Traditional Machining Technique for Insulting Engineering Ceramics [J]. Electromachining & Mould, 2006, (5): 6-9. (in Chinese)
李小朋, 刘永红, 纪仁杰, 等. 绝缘工程陶瓷的特种加工技术 [J]. 电加工与模具, 2006, (5): 6-9.

[6] Chang C W, Kuo C P. An Investigation of Laser-Assisted Machining of Al_2O_3 Ceramics Planning [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(3-4): 452-461.

[7] Chak S K, Venkateswara R V. Trepanning of Al_2O_3 by Electro-Chemical Discharge Machining (ECDM) Process Using Abrasive Electrode with Pulsed DC Supply [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(14): 2061-2070.

[8] Ji R J, Liu Y H, Yu L L, et al. Research on Mechanism of Ultra-Precision Electrical Discharge and Mechanical Grinding for Nonconductive Engineering Ceramics [A]//Proceedings of the International Conference on Integration and Commercialization of Micro and Nanosystems 2007 [C]. Sanya, 2007: 1445-1448.

[9] Guo Y F, Bai J C, Deng G Q, et al. High Speed Wire Electrical Discharge Machining (HS-WEDM) Phenomena of

Insulating Si_3N_4 Ceramics with Assisting Electrode [J]. Key Engineering Materials,2007,339:281-285.

[10] Tani T,Fukuzawa Y,Mohri N,et al. Machining Phenomena in WEDM of Insulating Ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology,2004,149(1-3):124-128.

[11] Fukuzawa Y,Gotoh H,Mohri N,et al. Line Swept Surface Generation on Insulating Ceramics by Wire Electrical Discharge Machining [J]. Journal of the Australasian Ceramic Society,2005,4(1):17-21.

[12] Liu Y H,Ji R J,Li X P,et al. Electric Discharge Milling of Insulating Ceramics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part B:Journal of Engineering Manufacture,2008,222(B2):361-366.

[13] Liu Y H,Ji R J,Li X P,et al. Effect of Machining Fluid on the Process Performance for Electric Discharge Milling of Insulating Al_2O_3 Ceramic [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2008,48:1030-1035.

[14] Yadava V,Jain V K,Dixit P M. Temperature Distribution during Electro-Discharge Abrasive Grinding [J]. Machining Science and Technology,2002,6(1):97-127.

[15] Yadava V,Jain V K,Dixit P M. Thermal Stresses Due to Electrical Discharge Machining [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2002,42(8):877-888.

[16] Yadava V,Jain V K,Dixit P M. Theoretical Analysis of Thermal Stresses in Electro-Discharge Diamond Grinding [J]. Machining Science and Technology,2004,8(1):119-140.

[17] Shankar P,Jain V K,Sundarajan T. Analysis of Spark Profiles during EDM Process [J]. Machining Science and Technology,1997,1(2):195-217.

[18] Yang S M. Basis of Heat Transfer [M]. Beijing:High Education Press,1991:198-202. (in Chinese)
杨世铭. 传热学基础 [M]. 北京:高等教育出版社,1991:198-202.

[19] Liu H L,Jin Z H,Hao Z B,et al. Design,Fabrication and Properties of Carbon/Carbon/Al_2O_3 Ceramic Functionally Gradient Materials [J]. Journal of Functional Materials and Devices,2004,10(1):123-127. (in Chinese)
刘红林,金志浩,郝志彪,等. 碳/碳/Al_2O_3 陶瓷功能梯度材料的制备与研究 [J]. 功能材料与器件学报,2004,10(1):123-127.

Thermodynamic Characteristics of Machining Insulating Engineering Ceramics with Electrical Discharge Channel

LIU Yong-Hong,YU Li-Li,XU Yu-Long,JI Ren-Jie,LI Qing-Yun

(*School of Electromechanical Engineering,*
China University of Petroleum,Dongying 257061,*China*)

Abstract:A new technique of machining insulating engineering ceramics with instantaneous high temperature produced by electrical discharge channel (EDC) flowing insulating engineering ceramic surface is developed. The mathematical models for the temperature and thermal stress of machining insulating ceramics with EDC are established. The numerical simulation on the temperature gradient and thermal stress of electrical discharge machining insulating engineering ceramics are done. The distribution of the temperature gradient and thermal stress produced by EDC on the insulating engineering ceramic surface are given. The simulation results give the theoretic foundation for revealing the microscale mechanism of removing insulating engineering ceramics with EDC,predicting the microcosmic profile of insulating engineering ceramic surface machined by EDC,and selecting the electrical parameter for the new process.

Key words:insulating engineering ceramics;electrical discharge machining;temperature gradient;thermal stress;numerical simulation