

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.06.004

Si₃N₄ 陶瓷引弧诱导电爆炸加工温度场建模

张巍¹, 孟浩², 于兵², 夏浩³

(1. 装甲兵学院教育技术中心, 安徽 蚌埠 233050; 2. 装甲兵学院研究生队, 安徽 蚌埠 233050;
3. 装甲兵学院图书馆, 安徽 蚌埠 233050)

摘要: 针对传统工程陶瓷材料粗加工技术成本高、效率低的问题, 提出一种利用引弧诱导电爆炸技术加工方法。在Si₃N₄陶瓷引弧诱导电爆炸加工实验中, 对影响温度场分布的主要工艺参数进行实验研究。在简要分析工艺参数对温度场分布影响的基础上, 利用正交实验和回归分析的方法建立了温度场预测模型, 得出了工艺参数对温度场分布的影响规律。仿真实验结果表明: 温度场分布随着加工电流和脉冲宽度的增大而增大, 随着喷嘴半径和喷嘴与工件之间的距离的增大而减小; 研究结果可以为引弧诱导电爆炸过程的控制提供参考依据, 为今后加工多种形状的工件提供参考。

关键词: 温度场; 引弧诱导电爆炸加工; Si₃N₄陶瓷; 正交实验; 建模
中图分类号: TJ510.5 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Temperature for Si₃N₄ Ceramics During Electricity-Detonation of Arc Strike Machining

Zhang Wei¹, Meng Hao², Yu Bing², Xia Hao³

(1. Education Technology Center, Academy of Armored Force, Bengbu 233050, China;
2. Brigade of Postgraduate, Academy of Armored Force, Bengbu 233050, China;
3. Library, Academy of Armored Force, Bengbu 233050, China)

Abstract: Aiming at traditional engineering ceramics high rough machining costs and low efficiency, arc-induced electricity-detonation processing method is introduced. During Si₃N₄ ceramic arc-induced electrical explosion processing experiments, carry out the experimental study of the main process parameters affecting the temperature distribution. Based on brief analysis of process parameters on the temperature distribution, use the orthogonal test and regression analysis to establish the temperature field prediction model, and acquire the influence of process parameters on the temperature distribution. Simulation results show that the temperature distribution increases with the increase of the processing of current and pulse width and decreases with the increase of the distance between the nozzle and the work piece and increase of nozzle radius. The results may give a reference basis for process control of the arc induced electrical explosion, and for processing work pieces of various shapes in future.

Key words: temperature field; arc-induced electricity-detonation processing; Si₃N₄ ceramics; orthogonal test; model building

0 引言

工程陶瓷因具有硬度高、耐磨、耐腐和质轻等优良性能, 被广泛地应用于现代工业、国防和高科技等领域^[1], 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, 无法加工复杂的型腔或型面则, 因而限制了陶瓷材料的应用与发展^[2]。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]、等离子切割^[5]、高压磨料水射流加工^[6]等, 并取得了一些有意义的成果。但这些技术都有各自的局限性, 如激光加工设备昂贵、电火花加工效率低、等离子切割只适用于切割、高压磨料水射流加工质量较差等, 都未能在实际的工程陶瓷加工生产中得到广泛应用。针对工程陶瓷

材料粗加工的高能量密度物理爆炸加工方法, 结合工程陶瓷加工现状, 笔者提出并研究了一种引弧诱导电爆炸技术, 用于加工陶瓷孔、平面、槽、外圆和复杂异型面等多种形状的工件。

1 技术介绍

如图1所示, 引弧诱导电爆炸加工系统由供气装置、专用脉冲电源、数控工作台、电爆炸发生器4部分构成。

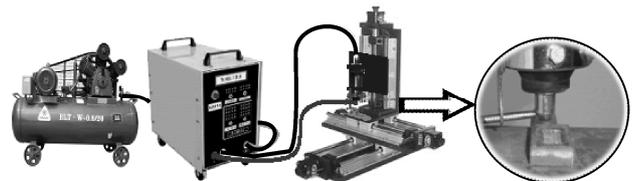


图1 引弧诱导电爆炸加工系统

收稿日期: 2012-02-25; 修回日期: 2012-03-15

作者简介: 张巍(1979—), 男, 山东人, 硕士, 讲师, 从事军事模拟仿真、视觉文化传播与现代教育技术研究。

系统工作时,以电爆炸发生器的喷嘴作为阳极,钨金属为阴极。利用专用脉冲电源在通电后产生的高频电压击穿阳极与阴极间的间隙,形成火花放电使电流急剧增加,气体电离程度随之猛烈增长。温度骤升产生热膨胀的同时受到冷却气流、喷嘴壁及电磁力的压缩效应,在冲出喷嘴时,突破束缚急剧向外扩展引起了电爆炸。引弧诱导电爆炸具有高温及高冲击力的特性,当作用于陶瓷试件表面时,其高温高冲击能量使陶瓷表面材料熔化、汽化及裂纹扩展形成蚀坑,最后达到加工效果。图 2 为系统加工原理图。

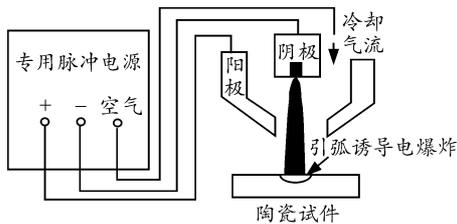


图 2 引弧诱导电爆炸原理

2 温度场计算结果及分析^[7]

引弧诱导电爆炸加工时的参数如下:脉冲宽度为 80 ms;加工电流为 100 A;加工电压为 160 V;喷嘴半径为 1 mm。在此加工条件下,温度场分布与实际加工情况如图 3 所示。可见,在距离电爆炸作用点最近的位置,温度最高,达到 12 100 ℃。高温区范围很小,在离开电爆炸冲击点区大约 2 mm 以外的大部分区域,温度维持在室温。

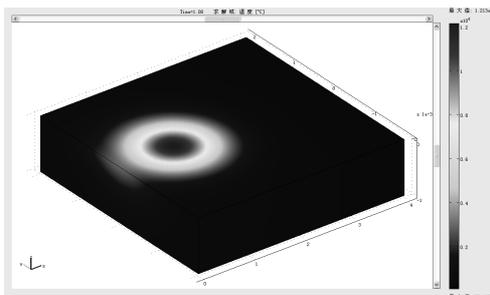
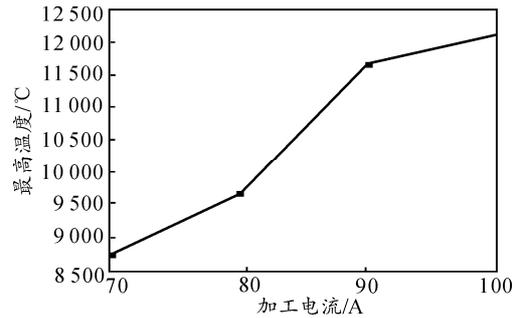
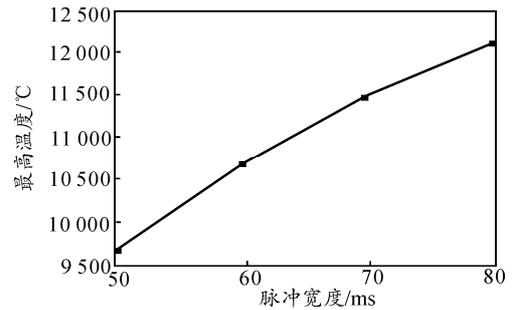


图 3 温度场分布与实际加工情况对比

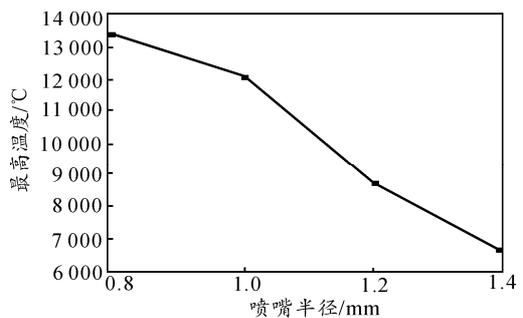
图 4 是不同加工参数对温度场仿真结果影响的直观分析图,由此可看出引弧诱导电爆炸加工参数对温度场的影响程度及变化趋势。



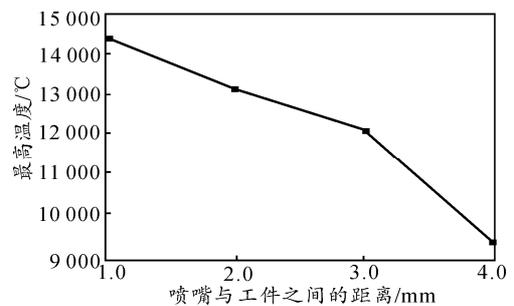
(a) 温度场分布随加工电流变化情况



(b) 温度场分布随脉冲宽度变化情况



(c) 温度场分布随喷嘴半径变化情况



(d) 温度场分布随喷嘴与工件之间距离变化情况

图 4 加工参数对温度场影响的直观分析图

1) 由图 4(a)可知,加工电流越大,温度越高,相应形成的冲击凹坑的宽度和深度也越大,即材料去除率随着加工电流的增加而增加。这是由于加工电流越大,作用于工件表面的能量密度也越大。

2) 由图 4(b)可知,脉冲宽度越大,温度越高,形成的冲击凹坑的宽度和深度也越大,即材料去除率随着脉冲宽度的增加而增加。这是由于脉冲宽度越大,电爆炸作用时间越长,工件获得的能量越多。

3) 由图 4(c)可知,喷嘴半径越大,相应形成的

冲击凹坑的宽度越大, 深度越小, 即加工所得的凹坑径深比越大。这是由于随着喷嘴半径的增加, 电爆炸作用范围增加, 故而工件表面上获得的能量密度越小, 中心温度下降, 边缘温度上升。

4) 由图 4(d)可知, 喷嘴与工件之间距离越大, 相应形成的冲击凹坑的宽度越小, 深度越小, 即加工所得的凹坑去除率越小。这是由于随着喷嘴与工件之间距离的增加, 电爆炸作用范围增加, 电爆炸能量在空气中的损失增加, 故而工件表面上获得的能量密度越小。

3 正交实验

为建立温度场模型, 并提高模拟仿真结果的信息量, 增强预测模型的准确性, 采用多因素正交回归实验的方法及回归分析方法。在正交实验设计时, 以加工电流 I 、脉冲宽度 t_m 、喷嘴与工件之间的距离 h 和喷嘴半径 R 这 4 个对温度场分布有明显影响的参数为因素, 每个因素考虑 4 个水平, 利用正交表 L₁₆(4⁵)设计实验。实验方案和结果见表 1。

表 1 正交实验方案及结果

实验序号	I/A	t_m/ms	h/mm	R/mm	$T/^\circ C$
1	70	50	1	0.8	10 990
2	70	60	2	1.0	7 179
3	70	70	3	1.2	4 710
4	70	80	4	1.4	3 844
5	80	50	2	1.2	6 270
6	80	60	1	1.4	5 262
7	80	70	4	0.8	8 314
8	80	80	3	1.0	9 696
9	90	50	3	1.4	4 896
10	90	60	4	1.2	4 810
11	90	70	1	1.0	12 800
12	90	80	2	0.8	17 710
13	100	50	4	1.0	7 517
14	100	60	3	0.8	16 130
15	100	70	2	1.4	6 389
16	100	80	1	1.2	10 810

3.1 模拟结果的方差分析

采用方差法分析加工参数对温度场分布的影响及显著性, 如表 2 所示, 通过方差比 F 和显著性水平 α 值^[8]可知各参数对温度场影响的主次顺序和显著水平。由表 2 可知, 喷嘴半径对温度场分布影响特别显著, 加工电流和喷嘴与工件之间的距离对温度场分布影响显著, 其主次顺序为: 喷嘴半径、加工电流、喷嘴与工件之间的距离、脉冲宽度。

表 2 温度场分布方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F	$F(3,3)$	显著性
加工电流	197 368 290.94	3	20.370	$F_{0.01}(3,3)=29.5$	**
脉冲宽度	108 528 533.44	3	11.200	$F_{0.025}(3,3)=15.44$	*
喷嘴与工件之间的距离	173 871 205.94	3	17.945	$F_{0.05}(3,3)=9.28$	**
喷嘴半径	308 103 124.38	3	31.798		***
误差	9 689 532.69	3			

3.2 温度场模型的建立

在引弧诱导电爆炸加工过程中, 由于热源模型是高斯分布函数, 故而陶瓷试件上的温度场分布与各加工参数之间近似呈指数关系, 故可建立指数型温度场模型:

$$T = KI^a t_m^b h^c R^d \quad (1)$$

式中: K 为常数; a, b, c, d 为指数。

在式 (1) 两边取对数, 这样式 (1) 转化为:

$$\lg T = \lg K + a \lg I + b \lg t_m + c \lg h + d \lg R \quad (2)$$

令 $y = \lg T, x_1 = \lg I, x_2 = \lg t_m, x_3 = \lg h, x_4 = \lg R, k_0 = \lg K$, 则有

$$y = k_0 + ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 \quad (3)$$

应用多元线性回归法进行拟合, 首先对式 (3) 进行回归分析, 然后反求式 (1) 的各个系数, 可得出指数形式的温度场分布模型。利用表 1 中温度场分布实验结果, 得到的多元回归线性模型可表示为

$$y = 0.728 2 + 1.263 9x_1 + 0.492x_2 - 0.309 4x_3 - 1.696 2x_4 \quad (4)$$

因此, 指数型温度场模型为

$$T = 5.347 5 \times I^{1.263 9} \times t_m^{0.492} \times h^{-0.309 4} \times R^{-1.696 2} \quad (5)$$

式 (5) 可以分析各加工参数对温度场分布的影响规

律。加工电流项和脉冲宽度项的指数为正值, 说明引弧诱导电爆炸加工过程中的最高温度随着加工电流和脉冲宽度的增大而增大; 喷嘴与工件之间的距离项和喷嘴半径项的指数为负值, 说明它们与温度场分布之间的关系为负相关, 即最高温度随着喷嘴与工件之间的距离和喷嘴半径的增大而减小, 这与图 4 的内容相符。

3.3 回归方程的显著性检验

由于由线性回归得到的温度场模型只是一种假设, 尽管这种假设有一定的根据, 但要判断式 (5) 的拟合程度, 必须对温度场分布与几个参数之间的线性关系进行显著性检验。为此, 对构造的统计量进行 F 检验, 统计量为

$$F = \frac{ESS/k}{RSS/(n-k-1)} : F(k, n-k-1) \quad (6)$$

式中: n 为实验组数; k 为变量个数; ESS 为残差平方和; RSS 为回归平方和; 模型的复相关系数为

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} \quad (7)$$