

碳化硼陶瓷电火花小孔加工精度的工艺研究

邵明东, 郭 疆, 孙继明

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 在详细分析碳化硼陶瓷电火花小孔加工精度影响因素的基础上, 采用单因素试验方法试验了基本工艺参数(脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电流、加工深度、工具电极等)对孔扩量、出入口直径差的影响, 同时分析了影响孔扩量的主要因素, 为加工参数的选择提供了依据。

关键词: 碳化硼; 电火花加工; 孔扩量; 出入口直径差

中图分类号: TG661 文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112812.0051

Technical Study of Electrical Discharge Machining to Micro-hole on B₄C Ceramic

SHAO Ming-dong, GUO Jiang, SUN Ji-ming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: The effect of technical machining small hole on B₄C with EDM were analyzed in detail and the experiments were carried out to investigate how the single parameter(pulse time (t_i), pulse off-time (t_{off}), peak current (I_e), the depth of hole etc.) affect the machining process and results, such as expanding hole and diameter variation between entrances and exits(DVEE). Finally, the principle and rule of choosing the process parameters were achieved.

Keywords: B₄C; EDM; expanding hole; DVEE

1 引 言

碳化硼陶瓷具有高熔点、高硬度和高耐磨性等

一系列优点, 是最引人注目的非氧化物陶瓷之一, 在民用、宇航和军事领域都得到了重要应用。国内外工程陶瓷孔加工普遍采用激光加工、超声振动加

工等技术, 激光加工可能引起工件的热和化学反应。超声振动加工无残留应力、也不产生细微裂纹, 但是加工效率很低^[1-3]。

电火花加工是一种用来加工导电工程陶瓷材料的有效途径。研究证明, 电火花放电加工方法能够对电阻率 $<100 \Omega \cdot \text{cm}$ (电导率 $>0.01 \text{ s/cm}$) 的材料进行低成本的加工^[4-7]。目前, 国内外对电火花加工碳化硼陶瓷小孔的研究还比较少。基于碳化硼陶瓷的优良特性和良好的应用前景, 作者对该方法进行了研究, 深入研究电火花加工的基本工艺参数对碳化硼陶瓷小孔精度的影响规律, 为加工参数的选择提供依据。因此, 该项研究对碳化硼陶瓷孔的应用很有意义。

2 试验条件

试验材料: 直径 23 mm, 厚度 2 mm、4 mm、6 mm 的碳化硼陶瓷薄片; 试验机床: 苏州中特机电科技有限公司生产的 DK703 数控高效电火花小孔加工机床; 工具电极: 紫铜 (中空), 直径 0.5 mm; 工作液: 去离子水。

3 影响因素分析

3.1 影响孔扩量的因素

在电火花小孔加工过程中, 放电间隙的大小及其一致性、工具电极的抖动及安装误差都会对孔扩量造成影响。为方便根据不同的孔径要求合理地选用加工电极, 需要对上述因素进行分析。

3.1.1 电参数的影响

如图 1 所示, 孔扩量是由电极侧面放电形成的, 侧面间隙中无论是电火花放电还是蚀除产物在排出过程中的二次放电, 均会导致侧面间隙加大。因此, 孔扩量的大小主要受放电时间的长短和放电能量的影响, 即受脉宽时间和放电电流的影响。实验研究单个脉冲与放电间隙存在如下函数关系^[7]:

$$\delta_0 = K_v \cdot V + K_R \cdot \varepsilon_0^{0.4} + A_m$$

式中: K_v 是随介质介电系数变化的常数系数; V 为

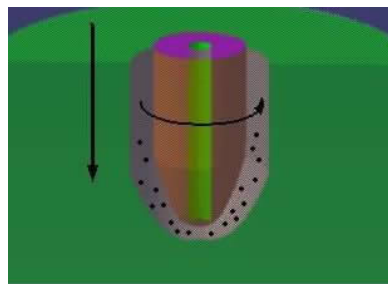


图1 加工过程示意图

脉冲的开路电压 (V); K_R 是随工件材料的不同而取不同值的常数系数, 当工件材料为钢时, $K_R=2.5 \times 10^2$; ε_0 为单个脉冲能量 (J); A_m 是工件和电极的机械变形 (A_m 约在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 之间);

3.1.2 电极的影响

电极的质量、外径一致性及直度直接影响孔的尺寸精度; 电极的内孔不一致会引起冲液的压力和流量的变化, 对孔加工精度的影响也是不容忽视的。

由于电极在安装过程中不可避免地会产生安装误差 (如图 2 所示), 因此, 导向套和电极之间的间隙将反映到加工小孔的孔扩量上, 如图 3 所示, 同

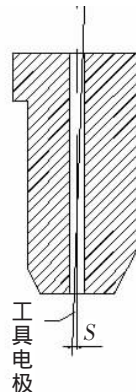


图2 导向套及其误差分析图

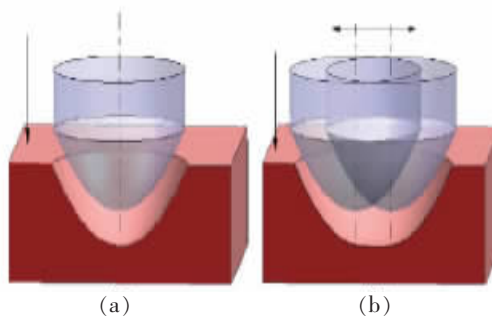


图3 向套和电极间的间隙反映到工件上的效果图

时, 在加工过程中, 电极的抖动也将反映到加工小孔的孔扩量上, 而且电极伸出导向套的距离越大, 孔扩量越大。

3.2 影响出入口直径差的因素

在孔刚刚打通时, 蚀除颗粒在工作液的带动下将从孔的出口处流出, 这大大减少了二次放电的几率, 同时, 工具电极的顶端便尖使出入口直径的差值进一步加大, 如图4所示。

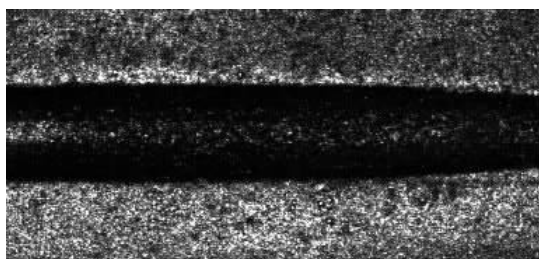


图4 加工效果图

4 试验结果与分析

4.1 脉冲宽度的影响

孔扩量随脉冲宽度的变化如图5所示。加工参数: 工件厚度为4 mm, 脉间脉宽比为2。由图5可知, 随着脉冲宽度的增大, 孔扩量增加, 但变化不太明显。这主要是因为脉冲宽度增大, 电火花放电的持续时间较长, 在较长的火花持续放电时间内, 从工件中释放出更多的电子来撞击工作液中的中性粒子。但试验曲线 $I=1$ 和 $I=2$ 在脉冲宽度较小时孔扩量有所减小, 这是因为孔扩量还与电极有关, 脉冲

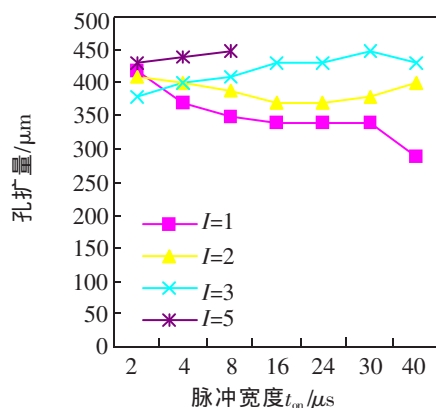


图5 孔扩量随脉冲宽度的变化曲线

宽度较小时, 单个脉冲能量就小, 加工过程不太稳定, 电极颤抖使孔径增大。所以, 尽管脉宽小时, 孔的表面粗糙度小, 但孔径大小不稳定, 在加工中不可选用太小的脉冲宽度。

出入口直径差随脉冲宽度的变化如图6所示。加工参数: 工件厚度为4 mm, 脉间脉宽比为2。由图6可知, 随着脉冲宽度增加, 出入口直径差减小。这是因为在加工电流不太高时, 脉冲宽度增加, 放电能量增强, 放电过程更加平稳, 从而减小了二次放电的几率, 使得出入口直径差变小。

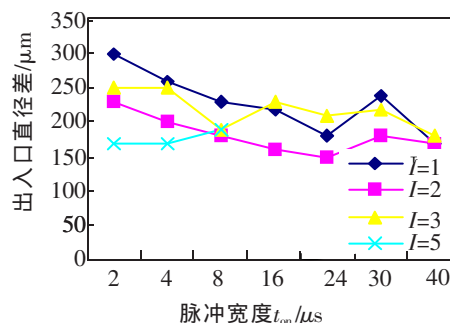


图6 出入口直径差随脉冲宽度的变化曲线

4.2 脉冲间隔 t_{off} 的影响

图7为孔扩量随脉冲间隔的变化曲线。加工参数: 工件厚度为4 mm, 脉冲宽度 $30 \mu s$ 。试验曲线显示, 在脉宽保持不变的情况下, 孔扩量随着脉冲间隔的增大而减小。上述现象可以解释为: 在脉冲宽度保持不变的情况下, 脉冲间隔增加, 有利于消电离, 从而减小了电蚀产物的二次放电几率, 使得孔扩量有所减小。

图8为出入口直径差随脉冲间隔的变化曲线。

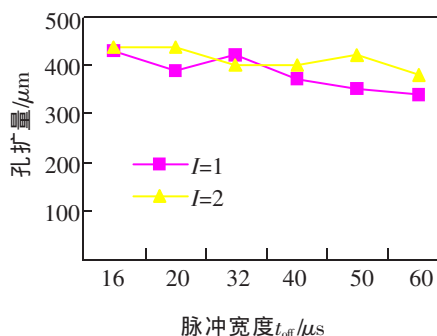


图7 孔扩量随脉冲间隔的变化曲线

加工参数：工件厚度为 4 mm，脉冲宽度 $30\ \mu\text{s}$ 。曲线显示：随着脉冲间隔的加大，出入口直径差有所减小。这主要是因为脉冲间隔加大，有利于蚀除产物排出，二次放电几率减小，出入口直径差也随之减小。

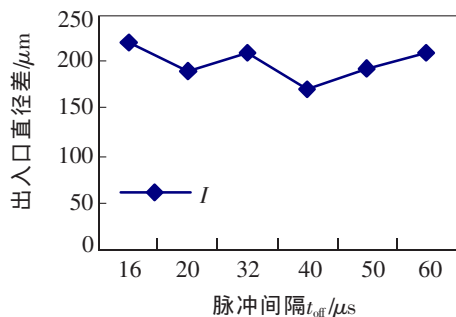


图8 出入口直径差随脉冲间隔的变化曲线

4.3 峰值电流的影响

孔扩量随峰值电流的变化如图9所示。加工参数：工件厚度为 4 mm，脉间脉宽比为 2。由图9可知，随着峰值电流的增加，孔扩量增大。这是因为峰值电流增加，单个脉冲能量随之增加，电蚀产物增多，在电极侧部形成二次火花放电的几率大大增加。

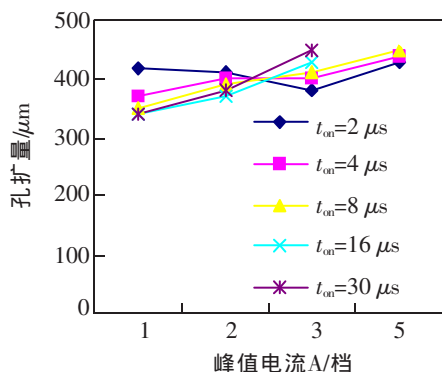


图9 孔扩量随峰值电流的变化曲线图

图10为出入口直径差随峰值电流的变化曲线。加工参数：工件厚度为 4 mm，脉间脉宽比为 2。由图10可知，随着峰值电流的增加，出入口直径差的增减很小。这是因为随着峰值电流的增大，出口和入口直径同时增加的缘故。但当峰值电流为 1 档时，出入口直径之差很大，这是因为加工不稳定，电极频繁回退且抖动，使得入口直径很大。

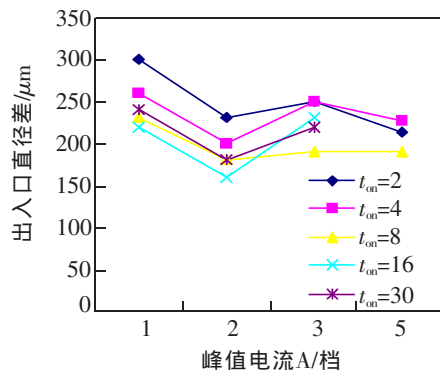


图10 出入口直径差随峰值电流的变化曲线

4.4 加工深度的影响

图11为不同加工深度下孔扩量的变化曲线。加工参数：峰值电流为 1 档，脉间脉宽比为 2。由图11可知，加工深度增加，孔扩量随之增大，但增加的幅度减小。这主要是因为加工深度增加，有更多的蚀除产物排出，这大大增加了二次放电的几率，孔扩量随之增大。

图12为不同加工深度下出入口直径差的变化曲线。加工参数：峰值电流为 1 档，脉间脉宽比为 2。

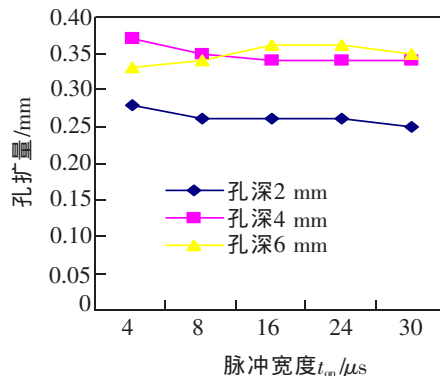


图11 孔扩量加工深度的变化曲线

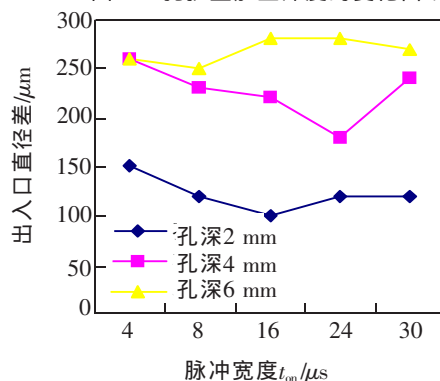


图12 加工深度对出入口直径差的影响曲线

曲线显示：加工深度增加，孔的出入口直径差加大。这主要是因为加工深度增加，不利于蚀除产物排出，二次放电的几率增大，孔径增大，出入口直径差也随之增大。

4.5 不同电极材料的影响

图 13 为电极材料对孔扩量的影响曲线。加工参数：峰值电流为 1 档，加工深度 4 mm，脉间脉宽比为 2。曲线显示：黄铜作工具电极时孔扩量明显减小。这是由于不同材料的工具电极，其常温和高温下不同的热学物理常数，影响两极材料间电蚀产物颗粒的大小和抛出，因此二次放电的几率不同，孔扩量也有所不同。

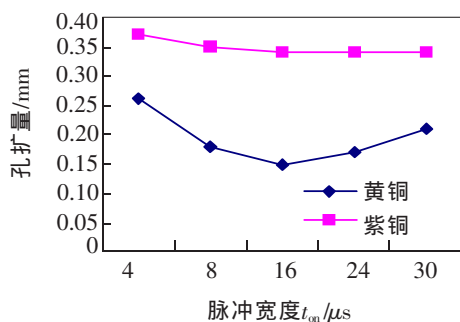


图 13 电极材料对孔扩量的影响曲线

图 14 为电极材料对出入口直径差的影响曲线。加工参数：峰值电流为 1 档，加工深度 4 mm，脉间脉宽比为 2。曲线显示：黄铜作工具电极时出入口直径差明显减小。这是由于不同材料的工具电极，其常温和高温下不同的热学物理常数影响了孔扩量，因此也使得出入口直径差有所不同。

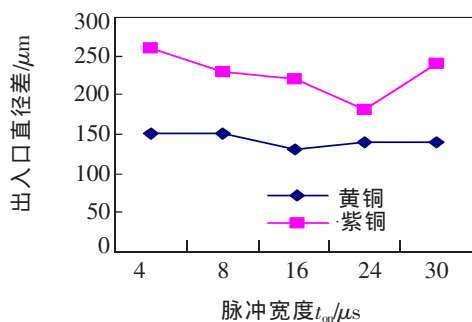


图 14 电极材料对出入口直径差的影响曲线

4.6 电极旋转的影响

虽然在电极弯曲的情况下，电极的旋转使孔扩

量增加，但电极的旋转有利于排屑，减小了二次放电的几率，同时增加了孔的圆度，所以在加工的过程中使电极旋转。

4.7 影响孔扩量的因素分析

由以上叙述可知，对孔扩量的影响因素很多，在众多的影响因素中，试验证明，在蚀除产物排出过程中所形成的二次放电是影响孔扩量的主要因素（如表 1 所示）。因此，如何解决排屑就显得很重要。排屑问题也是影响孔的加工深度的主要因素。

表 1 孔扩量的影响因素表

孔扩量 (mm)	脉冲宽度 (μs)	二次放电因素的影响 (mm)	其他因素的影响 (mm)
0.37	4	0.25	0.12
0.35	8	0.225	0.125
0.34	16	0.21	0.13
0.34	24	0.175	0.165
0.34	30	0.22	0.12

5 结 论

(1) 孔扩量随着脉冲宽度、峰值电流的增大而增加；随着脉冲间隔的增大而减小；随着加工深度的增加而增大，但增加的幅度较小。黄铜比紫铜作工具电极时孔扩量要小。

(2) 出入口直径变化随着脉冲宽度和脉冲间隔的增加有所减少，但变化幅度不大；随着峰值电流的增加而明显减少；随着加工深度的增加有所增加。黄铜和紫铜这两种工具电极对出入口直径变化影响不大。

(3) 虽然在电极振动的情况下，电极的旋转使孔扩量增加，但电极的旋转有利于排屑，减小了二次放电的几率，同时增加了孔的圆度，所以在加工过程中使电极旋转。

(4) 对孔扩量的影响因素很多，在众多的影响因素中，试验证明，在蚀除产物排出过程中所形成的二次放电是影响孔扩量的主要因素。因此，如何解决排屑，就显得很重要。

参考文献

- [1] 黄春峰. 工程陶瓷的加工技术[J]. 航空精密制造技术, 2001(1): 31-35.
- [2] 张勤河. 工程陶瓷材料孔加工技术及其机理研究[D]. 济南: 山东工业大学硕士学位论文, 1995.
- [3] Faulk N M. Electrical discharge machining of advanced ceramics[C]. *Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials*, Gaithersburg, MD, 1993: 525-534.
- [4] Konig W, Panten U. Effective machining process even for ceramic materials[C]. *Proceedings of the International Symposium of Electro-machining, ISEM-X*, Magdeburg, 1992: 269-286.
- [5] Kuppan, Rajadurai A, Narayanan S. Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2008, 38: 74-84.
- [6] Jahan M P, Wong Y Sn, Rahman M. A comparative experimental investigation of deep-hole micro-EDM drilling capability for cemented carbide(WC-Co) against austenitic stainless steel (SUS 304)[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2010, 46: 1145-1160.
- [7] 安立宝. 电火花精加工间隙特性研究[J]. 机械设计与制造, 1995(2): 48-50.

作者简介: 邵明东 (1983-), 男, 山东曹县人, 助理研究员, 主要从事空间遥感成像技术的研究。

E-mail: shaomingd@tom.com