

# 基于内冲液的电火花小孔加工 间隙流场仿真研究\*

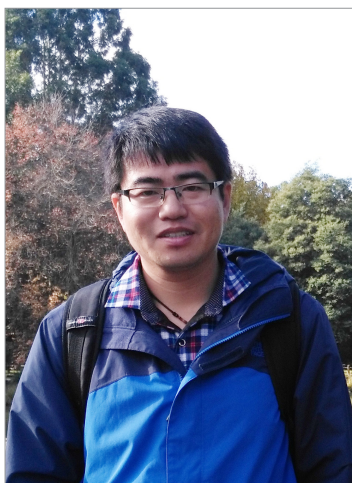
刘宇, 刘创业, 马付建, 杨大鹏, 沙智华, 黄文丽, 张生芳

(大连交通大学机械工程学院, 大连 116028)

**[摘要]** 电火花加工小孔时, 间隙流场中的电蚀产物和气泡如果不能及时排出, 会严重影响加工效率和加工质量。通过对电火花间隙流场特性分析, 建立三维圆柱组合体间隙流场几何模型, 运用 FLUENT 软件中 VOF、DPM 模型和二次开发功能来实现电蚀产物和气泡在底面加工间隙内不断随机生成, 建立电火花小孔加工间隙流场气-液-固三相流耦合仿真模型, 并加入中空内冲液排屑方法, 仿真分析了不同冲液速度和不同加工深度下电蚀产物和气泡在间隙流场中的分布情况。对电蚀产物颗粒分布进行统计, 表明增大内冲液速度能够促进电蚀产物排出, 减少底面和侧面间隙内气泡相的浓度。加工深度越小, 底面间隙处向上的速度越大, 电蚀产物和气泡越容易排出。

**关键词:** 电火花小孔加工; 电蚀产物; 气泡; 间隙流场; 内冲液

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.04.036



刘宇

教授, 博士, 硕士生导师, 国家自然科学基金通讯评审人, 辽宁省百千万人才工程千层次人选, 大连市青年科技之星。研究方向为微细、特种加工技术和难加工材料高效精密加工技术。近年来主持国家自然科学基金项目 2 项, 主持省部级科研项目 6 项, 参与国家级及省部级项目 20 余项。发表学术论文 40 余篇, 其中 SCI、EI 检索论文 20 余篇, 获批专利 11 项。

随着科学技术的快速发展, 越来越多的高精密设备出现在制造行业, 加工零件使用的材料越来越难加工, 尺度微型化趋势日益增加<sup>[1]</sup>。电火花加工是一种非接触式加工, 加工过程大多发生在绝缘的工作液介质中, 通过瞬时脉冲放电产生的局部高温来蚀除工件, 在加工微小孔时, 较传统加工方法具有适用性强、不产生切削力、加工成本低等优点<sup>[2]</sup>。但电火花微小孔加工也存在一定的局限性, 在加工过程中, 高温蚀除材料产生的电蚀产物和裂解工作液产生的气泡如果不能及时排出, 在底面间隙内大量堆积会引起拉弧放电发生, 从而使加工效率和加工质量下降。针对电火花加工微小孔间隙流场内的运动状况, 叶明国等<sup>[3]</sup>对深小孔加工过程

进行模拟, 建立了加工过程中的流场模型, 并对有无磁场时蚀除物在流场内运动状态进行仿真, 分析了永磁场对电蚀产物排出的影响。Ferraris 等<sup>[4]</sup>在内冲液电极侧面分别涂覆 Parylene C 和 SiCN/SiC 材料以使其绝缘, 最终实现在 10mm 的工件上加工出孔径约为 0.18mm, 深径比高达 60 的微小孔。Mastud 等<sup>[5]</sup>建立了超声振动下电蚀产物运动仿真模型, 发现振幅和频率越大, 电蚀产物的排出效果越好。许加利等<sup>[6]</sup>通过 FLUENT 仿真得到了圆柱电极和螺旋电极加工流场中的速度场和压力场, 得到了转速对加工速度的影响和螺旋电极能促进电蚀产物排出的结论。曹一龙等<sup>[7]</sup>通过试验验证螺旋电极电火花小孔加工速度最高可提升 20%。张杰等<sup>[8]</sup>

\* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875074); 辽宁省自然科学基金指导计划项目(20180550425)。

建立了间隙流场的三维仿真模型,模拟了电极在进行上下往复的抬刀运动过程中间隙流场内的工作液和电蚀产物的运动情况,认为往复抬刀运动可以推动间隙流场内工作液和电蚀产物进行运动。Koenig等<sup>[9]</sup>对电火花加工过程中的冲液过程进行仿真,建立了冲液过程中底面加工间隙流场内的数学模型,用数学方法对加工间隙内的压力场和速度场进行了计算。Kunieda等<sup>[10]</sup>对电火花加工过程中的流场进行仿真研究,在研究过程中考虑了流场中存在的气泡和工作液的影响,对电蚀产物的运动情况进行模拟,计算了在电火花加工过程中电蚀产物的运动速度场。目前国内外学者对电火花微小孔加工间隙流场的仿真分析,大多只考虑了固-液两相流,没有考虑到气泡的产生和对电蚀产物在间隙流场内运动的影响,对冲液影响下电蚀产物分布规律研究较少。本文主要通过对接隙流场特性进行分析,建立电火花微小孔加工过程中的气-液-固三相流仿真模型,模拟电蚀产物和气泡随加工时间不断在底面间隙随机生成,并加入中空内冲液排屑方法,分析了电蚀产物和气泡在内冲液作用下在间隙流场内的分布状况。

## 间隙流场仿真模型的建立

电火花加工小孔过程中,当电极向下运动到工件极近的某一位置时,两极间的脉冲电压将工作液介质击穿,形成火花放电。如图1所示,放电通道的产生将脉冲电源的大部分能量转化为热能,在高温作用下两极材料被熔化抛出到工作液介质中形成电蚀产物,同时工作液温裂解作用下会产生高压气体,分布在加工间隙内。

### 1 仿真条件

根据现有试验设备,仿真条件选取放电电压为70V,峰值电流为2A,放电周期为40 $\mu$ s,其中脉宽和脉间都为20 $\mu$ s。加工工具电极直径

1mm的紫铜,工件采用TC4钛合金,工作液为去离子水。仿真主要使用FLUENT中的VOF模型来描述气泡生成这一过程,对于气泡的初始大小和压强,可通过观测到的气泡来推算。利用直径为1mm的紫铜电极在电火花加工设备对钛合金板进行打孔试验,对加工中产生的气泡进行观测,如图2所示,可以看出在电火花加工微小孔时,不断有气泡产生,在上升过程中不断扩张并发生融合,观察发现气泡在水深为40mm时达到稳态,测量得此时气泡的直径为0.6mm。假设气泡内气体为理想气体,根据流体力学理论计算得到气泡的初始状态为直径0.04mm,压强为 $1.5 \times 10^8$ Pa,通过二次开发功能将气泡的大小和压强赋予气相。参考文献[11]的研究成果,根据试验所采用的放电参数,在本研究中近似认为电蚀产物颗粒均为直径20 $\mu$ m的球形颗粒,通过试验测量每次脉冲放电两极材料所减少的质量,估算出每次脉冲放电会产生约30个电蚀产物Cu颗粒和12个TC4颗粒。假设放电有效率为50%,通过FLUENT中的DPM模型,利用二次开发功能在每两个放电周期内在底面加工间隙内随机产生42个颗粒和1个气泡,从而模拟出电蚀产物和气泡在间隙流场中不断生成的过程。仿真设计如表1所示,模拟在不同冲液速度和不同加工深度下中空内冲液下电蚀

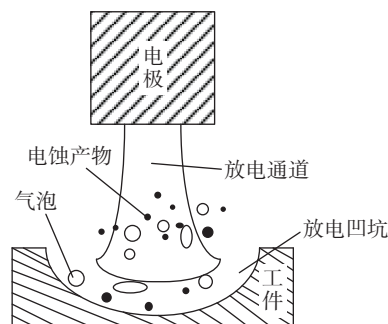


图1 电火花加工电蚀产物生成物理模型  
Fig.1 Physical model of debris generate in EDM

产物和气泡的分布状况。

## 2 间隙流场几何模型

电火花加工小孔时,电极形状为圆柱形,考虑到远离孔出口处的电极对间隙流场的影响较弱,为减少计算量,主要取加工间隙内和孔附近的流场进行建模,因此可以把间隙流场简化为三维圆柱组合体。本文根据前人的研究成果估算在本仿真放电参数下底面加工间隙为50 $\mu$ m<sup>[12]</sup>,通过对试验打孔测量,单边侧面加工间隙为100 $\mu$ m。将几何模型进行划分,分别为底面间隙 $S_1$ 、侧面间隙 $S_2$ 和外部流域 $S_3$ ,仿真边界和区域划分如图3所示。

## 仿真结果分析

仿真模拟在0.04s内不同冲液速度和不同加工深度下电火花加工孔的过程,对比分析速度场、竖直方向速度大小分布曲线和不同时间下电蚀产物和气泡在间隙流场内的分布状况。

### 1 内冲液速度对电蚀产物和气泡的影响

电火花加工小孔时,不同冲液速度对间隙流场的影响不同,从而影响

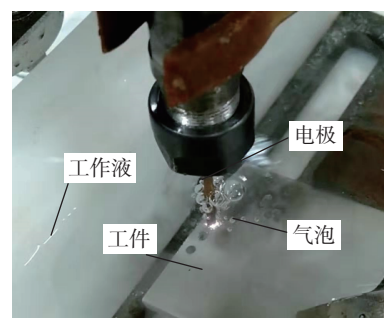


图2 电火花小孔加工气泡生成观察试验  
Fig.2 Observation experiment of bubble

表1 仿真分组设计

Table 1 Simulation grouping design

| 分组 | 冲液速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 加工深度/mm |
|----|---|---------|
| 1  | 1, 2, 4                                 | 5       |
| 2  | 2                                       | 3, 7    |

电蚀产物和气泡的分布状态。图4为不同内冲液速度下间隙流场的速度云图,可以看出,中空部分工作液沿冲液口向下流动,当工作液进入底面间隙时流速变小,底面间隙内的工作液沿侧面间隙内存在竖直向上的

速度,并且随着内冲液入口速度的增大,侧面间隙内流速增大,出口处速度更加明显。当冲液速度为1m/s时,在出口处工作液向外流出的趋势较弱,随着冲液速度增大,当冲液速度为4m/s时,在外部流域形成了明显

的旋涡状流场。

选取侧面间隙内从孔底到出口处的一条直线,提取在不同内冲液速度下直线上不同位置处工作液竖直方向的速度大小,如图5所示,可以看出,在孔底面间隙处竖直向上流速较小,在远离底面间隙后快速增大,在距离底面约0.5mm时达到最大,然后侧面间隙内向上的流速基本稳定,当内冲液入口处流速增大为两倍时,可以看出在侧面间隙内和出口处向上的流速约增大到原来的两倍。

图6为加工时间为0.04s时不同内冲液速度下电蚀产物在间隙流场中的分布状况,黑色为TC4颗粒,白色为Cu颗粒,可以看出,当加入内冲液后,电蚀产物都能从底部放电间隙沿侧面间隙向外部流域运动。当内冲液速度为1m/s时,可以看出在0.04s时大部分颗粒位于底部和侧面

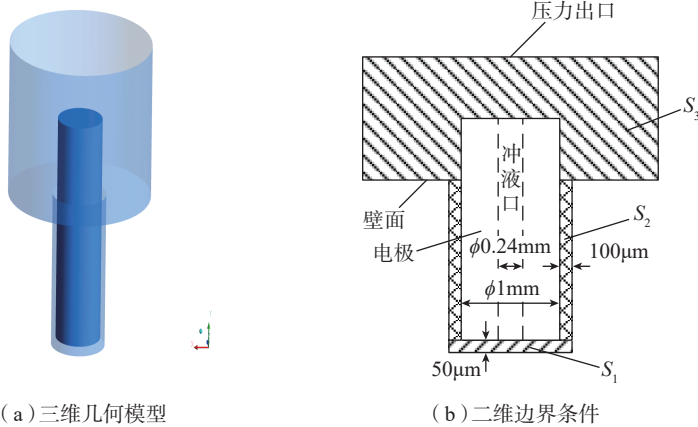


图3 间隙流场三维仿真模型和边界条件

Fig.3 3D simulation model and 2D boundary conditions of gap flow field

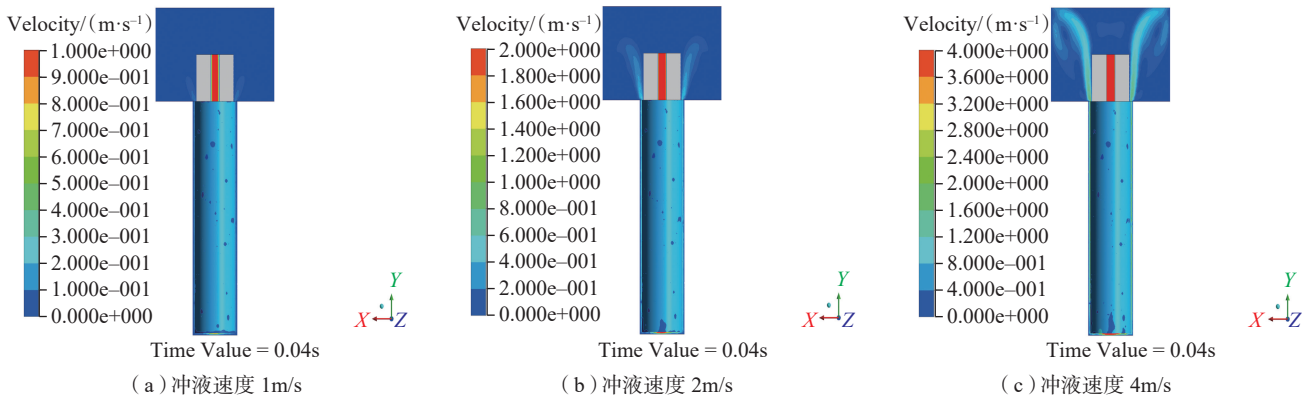


图4 不同内冲液速度下间隙流场的速度云图

Fig.4 Velocity counter of gap flow field under different internal flush velocities

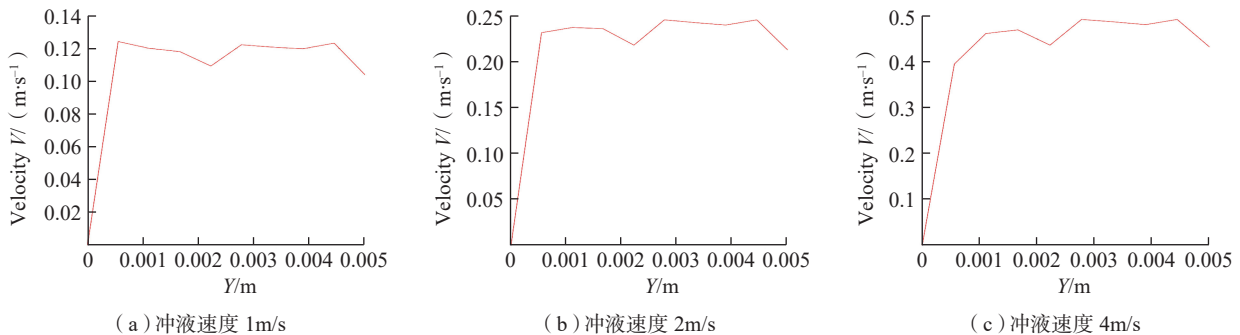


图5 不同冲液速度下侧面间隙内向上速度大小分布曲线图

Fig.5 Distribution curve of upward velocity in side gap under different flushing velocities

间隙内,少量的运动到了外部流域;当内冲液速度增大为2m/s时,由于侧面间隙内流速增大,可以看出相同时间内运动到外部流域的颗粒越来越多,但底部间隙内仍有颗粒堆积;当内冲液速度增大为4m/s时,可以看出底面间隙内残余的颗粒数量更少,大部分颗粒排出到外部流域。从

电极表面可以看到间隙流场内气泡相分布状况,如图7所示,可以看出,气泡随工作液沿侧面间隙上升。当冲液速度较小时,在底面间隙和侧面间隙内气泡相分布较多,随着冲液速度的增大,底部间隙气泡和侧面间隙气泡相占比减少。

通过粒子统计程序,对内冲液不

同冲液速度下颗粒随加工时间在 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 区域内的数量进行统计,分布如图8所示,可以看出,当冲液速度为1m/s时, $S_1$ 区域内电蚀产物缓慢增加, $S_2$ 区域内电蚀产物快速增多,表明此时随加工时间不断产生的模拟电蚀产物颗粒在冲液作用下大部分进入到 $S_2$ 区域,一小部分仍在 $S_1$

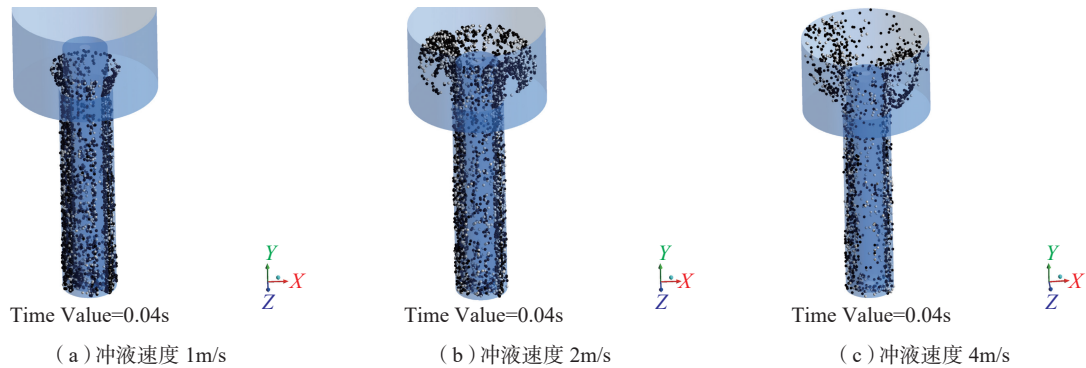


图6 加工时间为0.04s时不同冲液速度下电蚀产物在间隙流场中的分布状况

Fig.6 Distribution of debris in gap flow field at different flushing speeds when the processing time is 0.04s

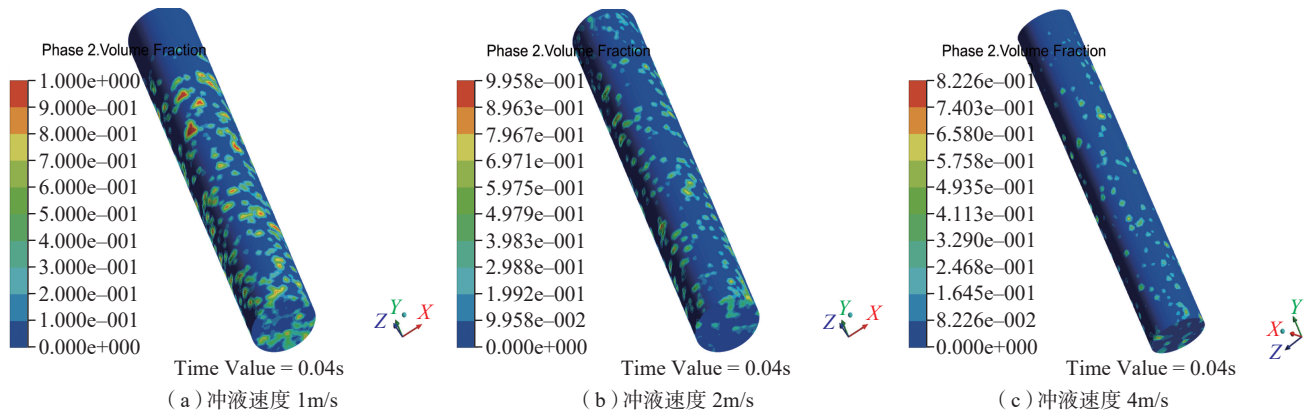


图7 加工时间为0.04s时不同冲液速度下气泡在间隙流场中的分布状况

Fig.7 Distribution of bubbles in gap flow field at different flushing speeds when the processing time is 0.04s

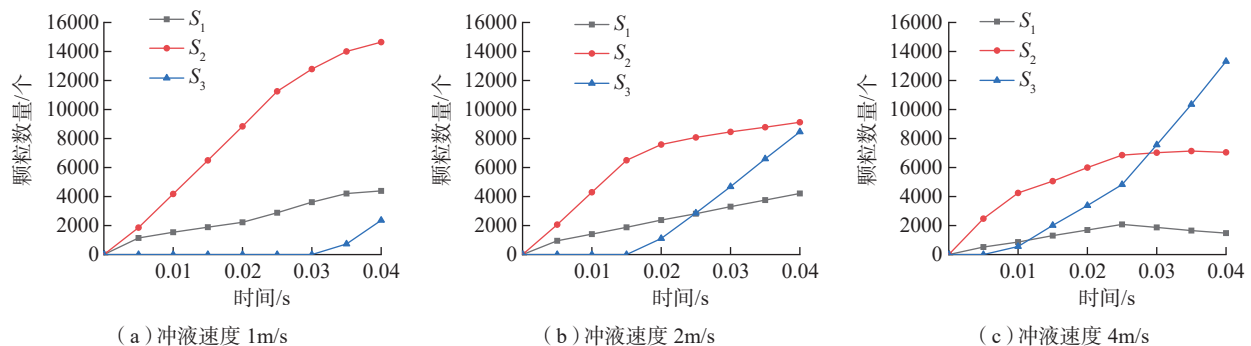


图8 不同冲液速度下 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 区域内的颗粒数量随时间分布情况

Fig.8 Distribution of debris in  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$  regions with time under different flushing speeds

区域堆积,在此冲液作用下,排出底面间隙内的电蚀产物颗粒小于生成的速度,在0.03s时 $S_3$ 区域颗粒开始增加,说明此时已经有颗粒运动到了 $S_3$ 区域,但在0.04s时 $S_3$ 区域内颗粒数量较少,仅有2362个,此时 $S_1$ 区域内颗粒数量增长为4839个。当冲液速度增大到2m/s时,此时 $S_1$ 区域内颗粒数量仍在缓慢增加,相比于冲液为1m/s,在0.015s时 $S_2$ 区域内颗粒数量开始增加缓慢, $S_3$ 区域开始出现颗粒,说明由于冲液速度的增大, $S_2$ 区域内的颗粒能更快运动到 $S_3$ 区域,较冲液速度为1m/s时 $S_2$ 区域颗粒数量减少,更多的颗粒排出到了 $S_3$ 区域,在0.04s时, $S_3$ 区域内颗粒数量为8460个, $S_1$ 区域内颗粒数量增加为4211个,较冲液速度1m/s数量减少。当冲液速度为4m/s时,可以看出在0.01s时 $S_3$ 区域已经有颗粒出现, $S_1$ 和 $S_2$ 区域内颗粒数量更少,表明从颗粒底面间隙进入侧面间隙的速度更快,在侧面间隙内滞留的时间更短,在0.025s时,可以看到 $S_1$ 区域颗粒数量出现减少的趋势,表明此时排出颗粒的速度大于颗粒生成的速度,在0.04s时大部分颗粒处于 $S_3$ 区域, $S_3$ 区域颗粒数量为13317个, $S_1$ 数量减少为1478个,说明此时排屑效果较好。

## 2 内冲液下加工深度对电蚀产物和气泡的影响

在内冲液作用下,为了研究在

冲液速度一定时,不同加工深度下电蚀产物和气泡的分布情况,继续选取冲液速度为2m/s,加工深度为3mm和7mm进行仿真分析,和孔深为5mm相互对比。图9为加工深度在3mm和7mm时的速度云图,可以看出,当加工深度变化时,在侧面间隙和出口处的速度基本不变,都能很好地带动底部间隙内的工作液向出口处流动。

图10为加工深度在3mm和7mm时侧面间隙内工作液竖直方向上速度大小在不同位置的分布曲线,对比5mm加工深度,可以看出,随着加工深度的增加,侧面间隙和出口处向上的最大流速基本不变,在距孔底0.5mm时,可以发现,当加工深度较小时,向上的流速越大,说明底面间隙处向上的流速随加工深度的增加

而减小。

图11和图12分别为3mm和7mm加工深度时颗粒和气泡分布图。从图11可以看出,在孔深为3mm时,此时在冲液作用下底部和侧面间隙内颗粒分布较少,大部分被排出到了外部流域,当加工深度增加到5mm(图6(b))和7mm时,底面间隙内颗粒数量增多,颗粒在冲液作用下在侧面间隙运动的时间越长,侧面间隙内粒子数量增多,外部流域颗粒数量减少。图12可以看出当加工深度增大时,气泡相在侧面间隙内占比增多,在底面间隙内差别不大。

通过粒子统计程序,对加工深度为3mm和5mm(图8(b))加工深度下颗粒分布情况进行统计,如图13所示,可以看出,当加工深度为3mm时,由于孔深较浅,底面间

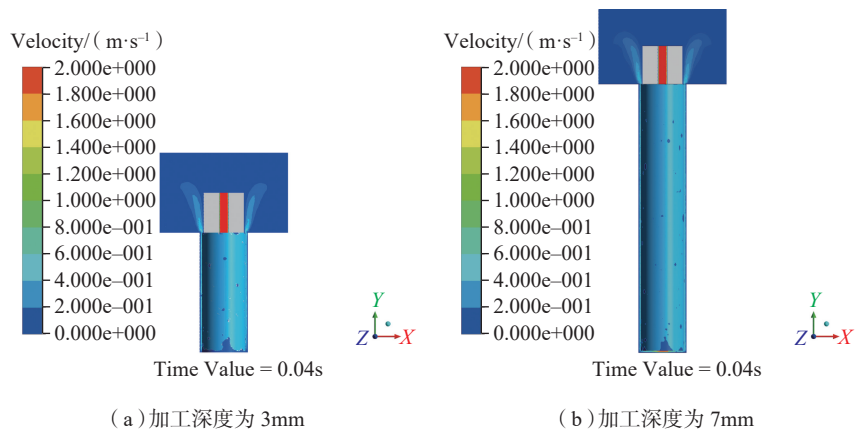


图9 不同加工深度下间隙流场的速度云图  
Fig.9 Velocity counter of gap flow field at different machining depths

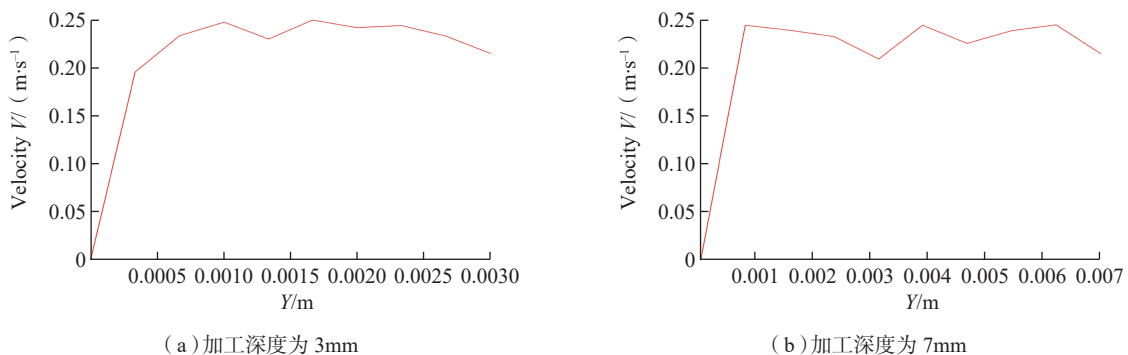


图10 不同加工深度下侧面间隙内向上的速度大小分布曲线  
Fig.10 Distribution curve of upward velocity in side gap under different machining depths

隙处竖直向上的流速较大,  $S_1$  区域内颗粒数量较少, 并随加工时间增加颗粒数量基本区域稳定, 说明此时底面间隙内颗粒生成的数量和排出到

侧面间隙内的数量基本相等, 由于加工深度较小,  $S_3$  区域在 0.01s 已经出现颗粒, 在 0.04s 时,  $S_3$  区域内颗粒数量为 11821 个,  $S_1$  区域内为 3131

个。当加工深度增大为 5mm (图 8 (b)) 和 7mm 时,  $S_3$  出现颗粒的时间分别为 0.015s 和 0.02s, 随孔深增大, 颗粒从底部间隙向侧面间隙内排出的速度减慢, 在 0.04s 时,  $S_3$  区域内颗粒数量分别为 8460 个和 4916 个,  $S_1$  区域内颗粒数量分别为 4211 个和 5272 个, 表明相同冲液速度时, 加工深度越大, 排屑效果越差。

## 结论

本文通过对电火花加工间隙流场特性分析, 模拟了中空内冲液下电火花加工小孔的过程, 通过 FLUENT 建立气-液-固三相耦合模型, 对内冲液下电火花小孔加工间隙流场进行仿真分析, 直观表现了不同冲液速度和不同加工深度间隙流场内电蚀产物和气泡的运动状况。通过对不同加工时间下间隙流场内颗粒分布进行统计, 得到如下结论:

(1) 中空内冲液能在间隙流场内形成一个从底部间隙沿侧面间隙到出口处的流场, 电蚀产物和气泡在冲液作用下都能排出到加工间隙外。

(2) 加工冲液速度越大, 间隙中流场流速越大, 底面间隙内电蚀产物数量越少, 研究表明增加工作液的入口速度能够缓解电蚀产物的堆积, 提高材料去除率。在加工时, 应选取合适的冲液速度来保证加工效率和加工质量。

(3) 加工深度越小, 靠近电极底面与工件表面处工作液向上的流速越大, 蚀除产物数量越少。研究表明加工深度越小, 工作液排出电蚀产物效果越佳。在加工深度增加时, 应适当增加冲液速度。

## 参考文献

[1] 高飞, 顾琳. 微小孔特种加工技术研究现状及展望 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(23/24): 108-111.

GAO Fei, GU Lin. Research status and prospect of micro-hole special processing

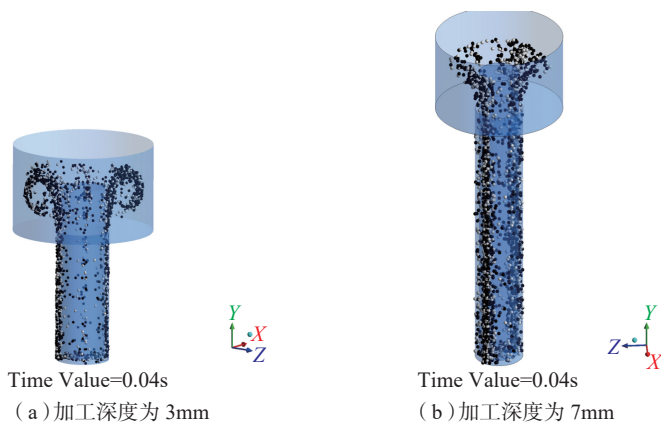


图11 加工时间为0.04s时不同加工深度下电蚀产物在间隙流场中的分布状况

Fig.11 Distribution of debris in gap flow field at different processing depths when the processing time is 0.04s

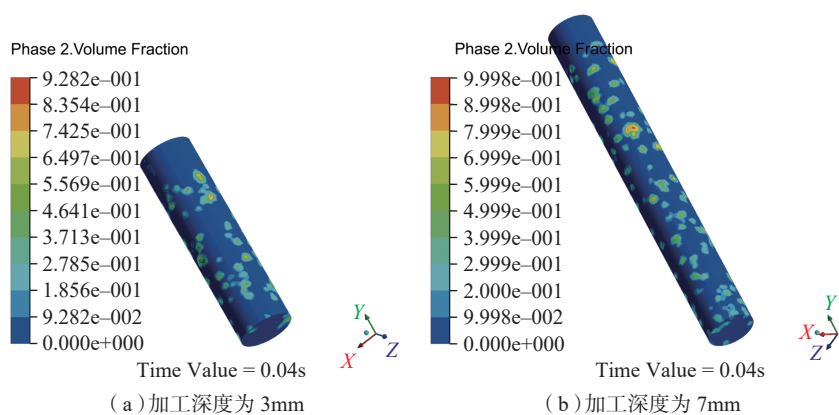


图12 加工时间为0.04s时不同加工深度下气泡在间隙流场中的分布状况

Fig.12 Distribution of bubbles in gap flow field at different processing depths when the processing time is 0.04s

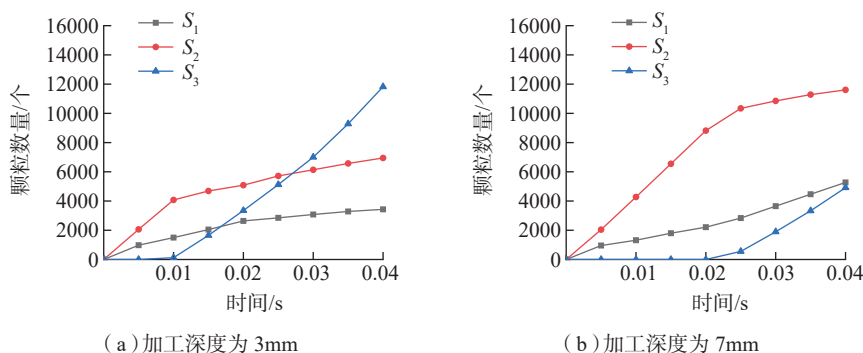


图13 不同加工深度下  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  区域内的颗粒数量随时间分布情况

Fig.13 Distribution of debris in  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$  regions with time under different processing depths

technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(23/24): 108-111.

[2] 王峰, 赵昌辉, 张恩元. 高速电火花小孔加工工艺及应用[J]. *中国新技术新产品*, 2016(20): 68.

WANG Feng, ZHAO Changhui, ZHANG Enyuan. High-speed EDM micro hole processing technology and its application[J]. *New Technologies and Products in China*, 2016(20): 68.

[3] 叶明国, 杨胜强, 曹明让. 永磁电火花复合深小孔加工流场排屑模拟[J]. *电加工与模具*, 2009(4): 17-20.

YE Mingguo, YANG Shengqiang, CAO Mingrang. Flow field debris removal simulation for deep hole machining with permanent magnet EDM[J]. *Electric Machining and Mold*, 2009(4): 17-20.

[4] FERRARIS E, CASTIGLIONI V, CEYSSENS F. EDM drilling of ultra-high aspect ratio micro holes with insulated tools[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 191-194.

[5] MASTUD S A, KOTHARI N S, SINGH R K, et al. Modeling debris motion

in vibration assisted reverse micro electrical discharge machining process (R-MEDM)[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24(3): 661-667.

[6] 李建功, 许加利, 裴景玉. 基于 Fluent 电火花深小孔加工间隙流场的研究[J]. *电加工与模具*, 2009(2): 18-22.

LI Jianguo, XU Jiali, PEI Jingyu. Research on the gap flow field of deep hole machining based on Fluent[J]. *Electric Machining and Mold*, 2009(2): 18-22.

[7] 曹一龙, 曹明让, 郝岳峰, 等. 螺旋电极电火花小孔加工排屑仿真和试验[J]. *机械设计与研究*, 2015(1): 89-92.

CAO Yilong, CAO Mingrang, HAO Yuefeng, et al. The chip removal simulation and experimental research of EDM drilling with spiral electrode for small hole [J]. *Machinery Design and Research*, 2015(1): 89-92.

[8] 张杰, 韩福柱. 电火花加工间隙流场的三维仿真研究[J]. *电加工与模具*, 2008(2): 12-15.

ZHANG Jie, HAN Fuzhu. Three dimensional simulation of gap flow field in EDM [J]. *Electric Machining and Mold*.

2008(2): 12-15

[9] KOENIG W, WEILL R, WERTHEIM R, et al. The flow fields in the working gap with electro-discharge-machining[J]. *Annals of the CIRP*, 1977, 25(1): 71-76.

[10] HARUKA T, KUNIEDA M. Relation between debris concentration and discharge gap length in EDM process[J]. *International Journal of Electrical Machining*, 2007, 41(8): 156-162.

[11] WANG J. Study on debris and bubble movement and control strategy for realizing high efficiency machining of electrical discharge machining[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[12] 井上洁. 放电加工原理[M]. 帅元伦, 于学文, 译. 北京: 国防工业出版社, 1983.

KIYOSHI Inoue. Principle of electrical discharge machining[M]. SHUAI Yuanlun, YU Xuewen, Trans. Beijing: National Defense Industry Press, 1983.

通讯作者: 张生芳, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为难加工材料高效精密加工、CAD/CAM/CAE 技术, E-mail: zsf@djtu.edu.cn.

## Simulation Study on Gap Flow Field in EDM Small-Hole Machining Based on Internal Flush

LIU Yu, LIU Chuangye, MA Fujian, YANG Dapeng, SHA Zhihua, HUANG Wenli, ZHANG Shengfang

(School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**[ABSTRACT]** In the process of small-hole machining in EDM, if the debris and bubbles are not removed from the gap flow field, which will seriously affect the processing efficiency and surface quality. By analyzing the characteristics of discharge gap, the geometric model of three-dimensional cylindrical gap flow field is established, the VOF, DPM model and the secondary development function of FLUENT were used to realize the continuous and random generation of debris and bubbles in the bottom machining gap, the simulation model of gas-liquid-solid three phase flow coupling of gap flow field in micro hole EDM was established, and adding hollow internal flushing liquid to remove debris, the distribution of debris and bubbles in the gap flow field was simulated and analyzed under different velocity and processing depth. Through the statistics of debris particle distribution, the results show that increasing the velocity of the internal flushing fluid can promote the remove of the debris and reduce the concentration of the bubble phase in the bottom gap and the side gap. The smaller the machining depth is, the greater the upward velocity of the bottom gap is, and the easier the debris and bubbles are removed.

**Keywords:** EDM small-hole machining; Debris; Bubble; Gap flow field; Internal flush

(责编 阳光)