

文章编号: 1000-8608(2008)03-0373-05

混粉电火花加工介质击穿及放电通道位形研究

吕战竹^{*1,2}, 赵福令³, 杨义勇¹

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083;
2. 北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081;
3. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 回顾了流光理论的基本过程, 并运用流光理论对混粉电火花加工极间介质击穿的微观过程进行了详细论述。将粉末颗粒视为插入两电极之间的一串联电极, 则极间距离以粉末颗粒为界分成两段, 两段介质均以流光的形式击穿后, 放电通道便由一电极表面经由粉末颗粒到达另一电极表面而形成串联放电。在此基础上, 结合实验现象, 研究了放电通道的位形, 认为放电过程以单通道放电为主, 而正极放电点面积的增大改变了正极表面的热量分布, 最终确保了加工表面粗糙度的改善。

关键词: 电火花加工; 混粉电火花加工; 介质击穿; 放电通道

中图分类号: TG661 **文献标志码:** A

0 引言

电火花加工技术在模具制造、航空航天等领域发挥着重要作用。为了解决电火花加工难以实现大面积镜面加工的难题, 特别是针对模具型腔大面积光整加工的需要, 人们开发了混粉电火花加工技术, 即在通常所用的煤油工作液中添加硅、铝等导电性微细粉末, 借此来改善加工时的放电状态, 结果卓有成效, 主要体现在如下方面: 放电过程更加稳定、加工表面粗糙度显著降低、精加工效率大大提高, 并在一定程度上缓解了加工速度和加工表面质量之间的矛盾^[1]。

对于这些现象产生的原因, 国内外学者进行了大量的研究, 得出了多种不同的解释^[2~5]。这些解释所共同遵循的理论基础是汤森德放电理论, 然而由于汤森德放电理论用于解释火花放电过程时存在不足, 即其击穿时延比较长^[6], 这与放电时的实际情况不相符, 由此得出的击穿放电模型用于描述混粉电火花加工的实际放电过程也会存在一定的不足。流光理论(又称流注理论或条带理论)则对火花放电过程给出了更为恰当的解释^[7],

它是以汤森德电子雪崩理论为基础, 并考虑放电空间辐射光子造成的体积光电离过程而形成的, 它以火花间隙中负流光和正流光物理模型来进行分析, 解决了汤森德理论未能解决的问题。为了更加真实地揭示混粉电火花加工的物理本质, 本文运用流光理论对加工时的击穿过程及放电通道的位形进行探讨, 从而建立新的放电模型。

1 流光理论简介

流光理论是研究气体介质放电过程的重要理论, 图1为流光的物理模型^[7], 包含负流光和正流光两个阶段。

负流光就是气体中电子在极间电场作用下形成奔向阳极的电子雪崩。正常情况下, 极间总存在微量的初始带电粒子, 当电极间电压达到火花击穿电压时, 电子在强电场作用下向阳极运动发生电子雪崩过程, 形成一个向阳极运动的负流光, 并在流光内产生强烈的短波辐射(包括光在内), 由于光子的速度远高于电子的迁移速度, 光子会远远跑在电子雪崩的前头, 沿途引起强烈电离和激

收稿日期: 2006-06-23; 修回日期: 2008-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金资助项目(10276009).

作者简介: 吕战竹*(1975-), 男, 大连理工大学2005届博士, 讲师, E-mail:lzz@cugb.edu.cn; 赵福令(1945-), 男, 教授, 博士生导师.

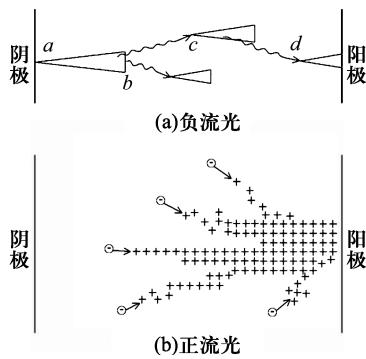


图 1 流光物理模型

Fig. 1 Physical model of streamer

发,会产生次级电子雪崩。如图 1(a)所示,当初始电子由 a 处运动到 b 处时,光电离产生的电子可能在更靠近阳极的 $c, d \dots$ 等处出现,并在该处产生次级电子雪崩,直至到达阳极。这样,火花放电负流光扩展速度会远大于电子雪崩的扩展速度,且火花放电通道会出现分叉和不连续的现象。

正流光是指负流光前沿抵达阳极后,在极强的正空间电荷场作用下,吸引附近的电子雪崩向正离子群汇集,从而使放电空间形成高电导状态的过程。当负流光的前沿抵达阳极之后,电子群很快就达到了阳极。因为高气压下正离子的迁移速度远小于电子的迁移速度,所以空间出现了正离子群。又因为正离子浓度大,所以正空间电荷产生的场强甚至比极间电压产生的场强还要强,使光电子引起的电子雪崩向正离子群汇集,从而使正流光向阴极迅速地扩展,如图 1(b)所示。当正流光发展到阴极时,放电电流便打通火花间隙,使放电空间形成高电导状态,并产生耀眼的曲折光线。

2 介质击穿过程

电火花加工虽然是在液体介质中进行的,但由于气体介质的放电理论是研究液体介质放电的基础,研究电火花加工的极间介质击穿理论时,一般都是借鉴气体介质击穿放电的有关理论^[8],因而流光理论对于混粉电火花加工过程的研究也是有借鉴意义的。

按照流光理论,间隙介质击穿形成火花放电的过程为碰撞电离及光电离共同作用的结果。当在外加电场作用下出现向阳极运动的初级电子雪崩时,同时必然发生激发和电离,激发出的光子向

各方向发射。对于常规电火花加工而言,因所用工作液为纯煤油,光子在其中运动时无其他障碍物,因而只要满足光电离所需的能量条件,在更靠近阳极的部位发生光电离并产生次级电子雪崩是可能的,于是负流光和正流光也就能够形成,放电间隙便呈高导电状态,发生火花放电。但事实上,电火花加工所用工作液不可能是完全纯净的,其中总是含有大量胶体颗粒及其他杂质,这些胶体颗粒和杂质在电场作用下向电场较强的地方聚集、结链^[9],进一步加剧极间电场的不均匀程度,从而使击穿更容易实现。

混粉电火花加工所用的工作液,含有大量导体或半导体粉末,为固液两相悬浮液,在宏观上表现为非透明液体。但由于粉末颗粒为分散相,假设粉末均匀分散,则悬浮粉末颗粒间的平均距离为

$$L = 10 \cdot d \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi \rho}{6t}} \quad (1)$$

式中: d 为颗粒平均直径 (μm); t 为粉末浓度 (g/L); ρ 为介质材料密度 (g/cm^3)。前期的研究结果已证实,颗粒之间的平均距离与放电间隙为同一数量级^[10]。同时,粉末颗粒尺寸与放电间隙相比,其差别也在同一数量级以内。可见,放电间隙、粉末颗粒间的平均距离、粉末颗粒的尺寸三者在数值上差别不大,于是,三者关系可用图 2 示意描述。

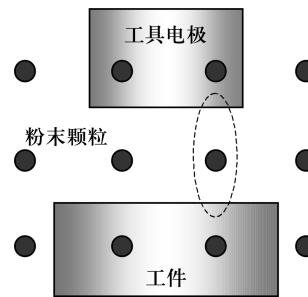


图 2 粉末颗粒与放电间隙示意图

Fig. 2 Schematic diagram of powder particles and discharge gap

在这种情况下,由于粉末颗粒的大小不能忽略,可将粉末颗粒看做置于间隙介质中的一段导体,则该导体可等效为两极之间插入的串联电极,而两极间的距离则以粉末颗粒为界划分为两段,即从工具电极表面到粉末颗粒上表面、从粉末颗粒下表面到工件表面,如图中虚线圈出的部位,因每段介质仅含有单一的煤油相,而无其他固体相,

光子可在其间自由运动,故可应用流光理论进行解释。

于是,混粉电火花加工间隙介质的击穿过程可描述为:当两极间加上足够强的外电场时,因粉末属于导体或半导体材料,在电场作用下会产生大量极化电荷,粉末颗粒的上下表面分别积聚有等量的异号电荷,如图3所示,颗粒内部成为一等势体,颗粒周围的电场则发生严重畸变,使其上、下表面附近的电场强度远高于其余位置。这样,随着外加电场强度的升高,当初始电子雪崩由阴极开始向阳极发展时,由于粉末颗粒上表面积聚较多的正电荷,附近电场强度较高,对电子雪崩前沿的吸引力较大,负流光的前沿会朝向颗粒上表面发展。同时,由于颗粒下表面积聚较多的负电荷,其附近的电场强度也较高,该处也会产生向阳极发展的电子雪崩。伴随着电子雪崩的发展,激发出的光子会在前方更靠近颗粒上表面或阳极的部位引起光电离,产生次级电子雪崩,直至抵达颗粒上表面和阳极表面,负流光便将阴极、颗粒、阳极三者串联起来。而在负流光的前沿抵达颗粒上表面和阳极表面之后,电子群较快也就到达了颗粒上表面和阳极表面,而由于正离子的迁移速度远小于电子的迁移速度,空间出现了正离子群。较高浓度的空间正离子群产生的场强也会高于原外加场强,因此会吸引光电子引起的次级电子雪崩向正离子群汇集,从而使正流光迅速向反方向扩展。当自阳极表面出发的正流光抵达颗粒下表面,而自颗粒上表面出发的正流光抵达阴极表面时,放电间隙便被完全打通,进入高导电状态,形成图3所示的串联放电。

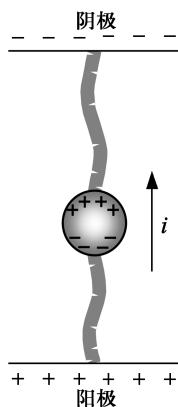


图3 串联放电示意图

Fig. 3 Schematic diagram of series-discharge

此外,在击穿过程中,工作液中所含的胶体颗粒和其他细小杂质颗粒所起的作用也不可忽视,它们在电场作用下定向移动甚至聚集、结链会加剧极间电场的不均匀程度,从而和空间正离子群产生的场强叠加在一起,促进介质的击穿过程。

当粉末颗粒尺寸变大时,根据式(1),在浓度不变的情况下颗粒间的距离会同步增大,其可能导致的结果是极间间隙内的颗粒数减少,在放电中的作用也会减弱,而粗大的颗粒还可能导致极间短路,从而使放电的稳定性和加工效果均下降。所以,粉末颗粒尺寸一般不宜过大,根据实验情况,应以不超过 $15 \mu\text{m}$ 为宜,而且,对于颗粒尺寸较大的粉末,一般应相应地加大浓度。

而对于粒度适中的粉末,随着浓度的增加,颗粒间的平均距离会按浓度的 $1/3$ 次方的比例减小,极间电场的不均匀程度会增加,而放电间隙则会随之进一步增大。当粉末浓度达到一定值时,图2、3所假设的情形就会有所变化,即极间包含的粉末可达到两层以上,因而间隙击穿时可能经由两颗以上的粉末颗粒,形成多级串联放电。若颗粒间的距离过小,颗粒相互碰撞并聚结的机率将大大增加,进而会在极间搭接成导电“小桥”,影响放电过程的稳定性,这也正是粉末浓度不宜过高的根本原因。

3 放电通道位形

根据前述讨论,混粉电火花加工间隙介质击穿后,放电电流由阳极流出,沿着火花通道,流经粉末颗粒,最后流入阴极,形成如图3所示的工具电极-粉末颗粒-工件之间的串联放电,此时,放电通道将两极表面连接起来。

尽管在空气中发生火花放电时火花通道会有明显的分叉现象,但分叉现象事实上发生于正流光阶段,是正流光由阳极向阴极扩展时的次级电子崩流入而形成的,这些分枝一般不会扩展到阴极表面,因为当主流光到达阴极表面时,其他分枝便会由于没有次级电子崩输入而终止发展。同样,在混粉电火花加工中,火花通道虽然也可能会出现分叉,但各分枝同时发展到阴极表面的可能性也极为渺茫。而且,即便因粉末的作用能够使两枝以上的分枝同时到达阴极表面,使放电点分散,也

仍然与事实不符,因为混粉电火花加工中只有工件接正极时才能加工出大面积光整表面,也就是说,如果放电通道能够分散为多个子通道,也应该是在阳极表面分散而不是在阴极表面。因此,混粉电火花加工中间隙介质击穿时仍以单通道放电为主。

由于放电通道等离子体的密度、温度在空间的分布是不均匀的,其密度和温度的梯度所引起的压强将导致等离子体向边界流动,而磁场力箍缩效应及周围介质的压力又会限制其向外扩张,此外,通道内粒子之间的剧烈碰撞作用还会引起通道位形的扩散作用,这些因素的共同作用决定着放电通道的位形^[7]。因放电通道各处的压力梯度和粒子扩散速度不同,达到位形平衡时的尺寸也各不相同。电子的扩散速度远远高于正离子的扩散速度,因而阳极表面附近通道直径会远大于阴极表面附近通道直径。而在中间部位,因放电通道流经粉末颗粒,而固体颗粒的形状和尺寸不能像流体那样可变,因而在该处放电通道的直径不能任意扩展,会受到颗粒的限制而最终保持稳定。

图4为混粉电火花加工放电通道示意图。

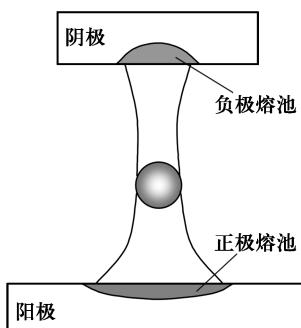


图4 放电通道示意图

Fig. 4 Schematic diagram of discharge channel

可见,混粉电火花加工放电通道的位形平衡时,因粉末颗粒的参与放电而与常规电火花加工的喇叭形有显著不同,但正极表面放电点大于负极表面放电点的特点是相似的,并且因为放电间隙的变大使得两极放电点面积的差异有所加大。这在加工中即体现为正极放电点面积更大,能量密度更低,热量的分布更趋向于集中在表层,因而使得正极熔池变大变浅,放电结束后部分熔融材料被去除,便在加工表面留下大而浅的放电凹坑,

从而使加工后的表面粗糙度明显得到改善。

上述结论可通过观测加工后留下的放电痕直径加以证明,当工件材料为钢,加工参数为脉宽 $\tau_{on} = 4 \mu s$ 、脉间 $\tau_{off} = 7 \mu s$ 、峰值电流 $I_p = 6 A$ 、空载电压 $U = 280 V$ 时,混粉电火花加工正极表面的放电痕平均直径为 $54 \mu m$,而常规电火花加工正极放电痕平均直径则为 $47 \mu m$,负极表面则均由于放电痕较深且形状不规则无法测量其直径^[11]。

由于粉末颗粒悬浮在两极之间,其在空间的位置是不固定的,电场的作用和工作液的流动等因素均会使其空间位置发生变化,放电通道的位置也跟随发生变化,这必然会加剧放电通道等离子体的振荡。而放电通道等离子体的振荡对电火花加工是有利的,在放电能量保持不变的情况下,其振幅和频率越大,其电极材料的蚀除量也越大,而且加工表面粗糙度也越低,即放电凹坑的深径比小,这正是混粉电火花加工工艺最大的优点,因而也就为本文关于放电通道的观点提供了又一佐证。

4 结语

本文对混粉电火花加工极间介质击穿的微观过程进行了分析,由于目前引用较多的汤森德放电理论无法正确解释火花放电现象,本文引用了流光理论来进行合理解释,并在此基础上对混粉电火花加工放电通道的位形进行了研究,认为放电通道从一电极表面流经粉末颗粒到达另一电极表面形成串联放电,且以单通道放电为主,正极放电点面积的增大改变了正极表面的热量分布,确保了加工表面粗糙度的改善。

参考文献:

- [1] 赵福令,吕战竹,张宝荣,等.混粉电火花加工工艺特性的研究[J].科学技术与工程,2003,3(6):573-576
- [2] GROVE B. High-speed mirror surface finishing [J]. EDM Technology, 1994, 2:30-33
- [3] 索来春,居喜国,郭永丰,等.混粉大面积电火花加工机理的分析[J].制造技术与机床,1998,7:24-26
- [4] CHOW Han-ming, YAN Biing-hwa, HUANG Fuang-yuan, et al. Study of added powder in

- kerosene for the micro-slit machining of titanium alloy using electro-discharge machining [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2000, **101**:95-103
- [5] 孟庆国, 赵万生, 赵新通. 大面积混粉电火花加工机理探讨[J]. 中国机械工程, 2002, **13**(11):904-906
- [6] 杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 18-32
- [7] 胡志强, 颖汉生, 施迎难. 气体电子学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985:126-128
- [8] 李明辉. 电火花加工理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989:335
- [9] 陈湛清, 李明辉. 放电加工极间胶体系统[J]. 电加
工, 1979, **5**:1-9
- [10] 赵福令, 吕战竹, 王 辉, 等. 粉末颗粒在混粉电火花加工中作用机理研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, **45**(5):668-671
(ZHAO Fu-ling, LÜ Zhan-zhu, WANG Hui, et al. Research on effecting mechanism of particles in powder-mixed EDM[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2005, **45**(5):668-671)
- [11] 吕战竹, 赵福令, 杨连文, 等. 混粉电火花加工中极性效应的研究[J]. 中国机械工程, 2004, **15**(6): 549-552

Research on dielectric breakdown and discharge channel in powder-mixed EDM

LÜ Zhan-zhu^{*1,2}, ZHAO Fu-ling³, YANG Yi-yong¹

- (1. School of Engineering Technology, China University of Geosciences (Beijing),
Beijing 100083, China;
2. School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology,
Beijing 100081, China;
3. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The main procedures of the streamer breakdown of gas gaps were reviewed, and the dielectric fluid breakdown procedure of powder-mixed electrical discharge machining (EDM) was analyzed by means of the streamer theory. Considering the particle as an in-between electrode in series with the workpiece and tool electrode, the interelectrode gap can be divided into two sections. In each section, streamers can occur and expand rapidly, and the breakdown of the dielectric fluid is accomplished simultaneously. Thus the discharge channel connects the electrode couple via some certain particle and series-discharging is then conducted. According to the analytical results, the shape of the discharge channel was subsequently deduced combining with some experimental phenomena. The single-channel discharge model is accepted rather than the multi-channel discharge model. The bettering of the machined surface roughness is on account of the over expansion of the plasma channel radius near the anode which causes a decrease in the local energy density at the anode surface.

Key words: electrical discharge machining (EDM); powder-mixed EDM; dielectric breakdown; discharge channel