

高电阻率碳化硅陶瓷高效电火花铣削技术研究

纪仁杰*, 刘永红*, 于丽丽, 李小朋, 董欣

中国石油大学(华东)机电工程学院, 东营 257061

* 联系人, E-mail: jirenjie202@yahoo.cn, liuyh@hdpu.edu.cn

2008-01-13 收稿, 2008-05-09 接受

国家自然科学基金(批准号: 50675225)和山东省科技攻关项目(编号: 2006GG2204001)资助项目

摘要 采用分组脉冲电源对电阻率为 $500\ \Omega\cdot\text{cm}$ 的碳化硅陶瓷进行电火花铣削加工, 该方法能够提高加工的稳定性及脉冲利用率, 较大地提高了材料去除率, 最高材料去除率可达 $72.9\ \text{mm}^3/\text{min}$. 对高频脉冲宽度、高频脉冲间隔、峰值电压、峰值电流、加工极性、电极转速以及低频脉冲频率等对碳化硅电火花加工工艺效果的影响进行了试验研究与理论分析, 得到了相应的规律关系. 采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)分析、能谱分析(EDS)和硬度测试仪等对电火花铣削加工后碳化硅陶瓷工件表面的微观结构特性进行了测试与分析. 结果表明: 采用钢电极电火花铣削加工后碳化硅陶瓷工件表面的晶粒平均尺寸小于加工前表面的晶粒平均尺寸, 加工后表面含有少量的铁元素, 其硬度高于加工前材料的硬度.

关键词
电火花
碳化硅
铣削
高电阻率
高效

碳化硅(SiC)是共价键很强的化合物, 共价键成分约占 88%, 硬度仅次于金刚石、立方氮化硼和碳化硼等少数几种物质^[1], 并具有力学性能优良、抗氧化性强、耐磨损性好、热稳定性佳以及抗热震和耐化学腐蚀等特性^[2-5], 被日益广泛地应用于电子、机械、冶金、生物医学、石油化工及航空航天等领域中. 例如, 在石油化学工业中可用作各种耐腐蚀容器及管道^[1], 在电子工业中可制作大电流整流系统中的功率 MOSFET^[6], 在机械工业中可作各种轴承、切削刀具和密封部件^[7,8], 在生物医学上可涂敷在 C/C 复合材料表面以加快其与植入组织成化学键合及加快骨整合^[9], 在宇航和汽车工业中可以制造燃气轮机、航天器喷嘴和发动机部件以及空间光学系统的轻质反射镜等^[10-12].

然而, 由于碳化硅的高硬度和高脆性, 其机械加工性能很差, 使用金刚石砂轮的磨削加工仍然是目前最常用的加工方法, 加工时需要高刚度的磨床和昂贵的金刚石砂轮, 加工成本高, 生产效率低, 而且只能加工形状简单的零件, 对于复杂的型腔或型面则难以加工, 并且加工后的碳化硅表面和亚表面会产生多种类型的损伤, 从而影响工件的最终使用性

能^[13,14]. 在线电解修整(ELID)法磨削加工碳化硅时加工表面质量较好, 但是加工效率低, 加工中所用的电解液易锈蚀机床, 对环境产生污染, 难以在实际生产中得到应用^[15]. 电火花加工是一种非接触加工, 可以用软的工具加工硬的工件, 且加工中没有切削力的影响, 避免了机械应力导致的加工工件质量下降, 因此它是加工碳化硅陶瓷的一种较理想的方法. 但是普通电火花加工效率较低, 而且只能加工导电性能较好的碳化硅(电阻率小于 $100\ \Omega\cdot\text{cm}$), 对于较高电阻率的碳化硅则难以加工^[16,17]. 基于此, 本文采用分组脉冲电源对电阻率为 $500\ \Omega\cdot\text{cm}$ 的碳化硅陶瓷进行了电火花铣削加工试验研究, 由于在加工过程中消电离充分、击穿电压高, 提高了加工过程的稳定性和脉冲放电利用率, 因而较大地提高了材料去除率, 最高材料去除率可达 $72.9\ \text{mm}^3/\text{min}$.

为了研究该方法加工碳化硅的基本工艺规律, 掌握其工艺特点和技术关键, 本文对高频脉冲宽度、高频脉冲间隔、峰值电压、峰值电流、加工极性、电极转速以及低频脉冲频率等对碳化硅电火花加工工艺效果的影响进行了试验研究与理论分析, 得到了相应的规律关系, 为今后推广应用该技术提供了理

论支持和工艺指导.

1 试验原理和条件

1.1 原理

采用分组脉冲电源电火花铣削碳化硅陶瓷的原理如图1所示. 该加工所采用的分组脉冲电源是由高频的小脉宽、脉间的矩形波脉冲与低频大脉宽、脉间的矩形波脉冲复合而成的, 其波形见图1. 加工时脉冲电源的正、负极分别与工具电极和工件相连, 工具电极在可变频调速的交流电动机的带动下做高速旋转运动, 工件在自动进给伺服控制工作台的带动下向工具电极进给, 工作液为水基乳化液, 通过喷嘴浇注于工具与工件之间, 当工具电极与碳化硅陶瓷工件之间的间隙达到放电间隙的尺度时, 产生火花放电, 由火花放电时产生的瞬时高温高压作用对碳化硅陶瓷进行蚀除加工, 在放电过程中还伴随产生热效应、电磁效应、光效应、声效应及频率范围很宽的电磁波辐射和爆炸冲击波等一些派生现象, 进一步增强了材料的蚀除效果. 在相邻的两个分组脉冲之间有一个较大的脉冲间隔, 以便于充分地消电离和排除电蚀产物, 使工具电极和工件都能得到充分地冷却, 提高了放电间隙中工作液的介电性能、脉冲放电的击穿爆炸力和脉冲利用率, 同时还可以减少电弧放电的产生. 分组脉冲中的高频脉冲具有较小的单次脉冲放电的能量, 可以降低电火花加工后的表面粗糙度, 使表面变质层的厚度和微裂纹较大地减小. 采用高速旋转的工具电极有利于实现极小间隙的放电作用, 可以较大地提高击穿电压和脉冲的利用率. 因碳化硅陶瓷的电阻率高, 本文试验时利用其本身的阻值来代替通常的电火花加工所使用的限流电阻, 以保证放电加工时所需要的电流. 由上述多种效应的综合结果, 便实现了高电阻率碳化硅陶瓷的高效、高质量的电火花铣削加工. 该种电火花铣削加

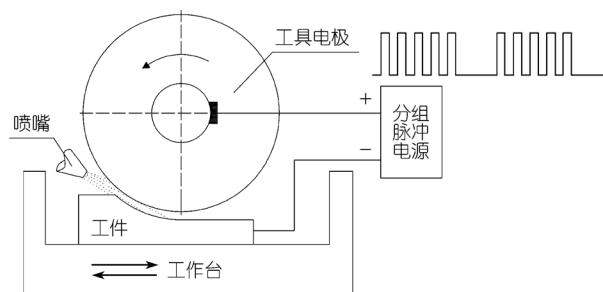


图1 采用分组脉冲电源电火花铣削碳化硅陶瓷的原理图

工技术的优点是: 可以充分利用低频脉冲加工效率高和脉冲加工质量好的优点, 在提高加工效率的同时, 又提高了零件的表面加工质量; 工具电极材料价格低廉, 制造方便; 采用水基乳化液作为工作液, 加工过程中无电解作用的存在, 减少了对环境的污染.

1.2 条件

试验中所用的工件为碳化硅陶瓷(电阻率为 $500 \Omega \cdot \text{cm}$), 工具电极材料为 45#钢, 直径为 180 mm, 工作液为水基乳化液. 试验是在自行研制的专用分组脉冲电源和电火花铣床上进行的. 表面粗糙度值的测量采用北京时代集团生产的 TR220 粗糙度测试仪, 表面粗糙度 R_a 是对表面进行多次测量后对测量值进行计算得到的平均值. 用扫描电子显微镜(SEM HI-TACHI X-650)对加工后的工件表面形貌进行观测, 用 X 射线衍射仪(X' Pert PRO MPD)、X 射线能谱仪(EDS EDAX)和 MH-3 型显微硬度计分别对加工前后的工件表面进行测试. 在以下的各试验中, 未列出的加工参数值取表 1 所示的值.

表1 试验加工参数

试验参数		数值
脉冲电源	高频脉冲宽度/ μs	50
	高频脉冲间隔/ μs	400
	峰值电压/V	200
	峰值电流/A	25
工具电极	转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	1090
	宽度/mm	4
工作液浓度/vol%		5
单次进刀量/mm		0.1
低频脉冲频率/Hz		730
加工极性		工具电极(+)

2 结果和讨论

2.1 高频脉冲宽度对加工性能的影响

高频脉冲宽度对材料去除率(MRR)和表面粗糙度(R_a)的影响关系如图2所示. 由图可知, 表面粗糙度随着高频脉冲宽度的增加而增大, 当高频脉冲宽度小于 $50 \mu\text{s}$ 时, 材料去除率较高且随着高频脉冲宽度的增加而增大, 当高频脉冲宽度大于 $50 \mu\text{s}$ 时, 材料去除率较低且随着高频脉冲宽度的增加而下降, 由图2还可以看出, 当高频脉冲宽度从 $50 \mu\text{s}$ 增加到 $100 \mu\text{s}$ 时, 材料去除率迅速下降. 上述现象可解释为: 在高频脉宽较小时, 放电过程中产生的热量来不及散失, 容易集中作用于工件表面的微小区域, 当放电

结束时该区域的材料被抛出,单脉冲的去除效率较高,因此材料去除率较高,随着高频脉冲宽度的增加单个脉冲的能量增大,热作用的区域变大变深,单个脉冲的材料去除量增加,因而材料去除率增加,表面粗糙度增大;当高频脉冲宽度从 $50\ \mu\text{s}$ 增加到 $100\ \mu\text{s}$ 时,脉宽增加较大,碳化硅具有良好的导热性使得放电产生的能量有足够的时间散失到工件之中,难以起到蚀除作用,单个脉冲的材料去除量迅速减小,因此材料去除率迅速下降,之后再增加高频脉冲宽度,放电过程中散失到工件中的能量增加,蚀除作用进一步下降,另外,高频脉冲宽度的增加使得消电离效果变差,易产生电弧放电,加工表面质量变差,因此随着高频脉冲宽度的增加,材料去除率下降而表面粗糙度却增加。由上述分析可知,在试验设定的参数范围内,较小的高频脉宽适合于碳化硅陶瓷材料的电火花加工。

2.2 高频脉冲间隔对加工性能的影响

图3为在其他条件相同的情况下,得到的高频脉冲间隔与材料去除率和表面粗糙度的关系曲线。

由图3可知,材料去除率随着高频脉冲间隔的增大而下降,当高频脉冲间隔较小时,表面粗糙度随着

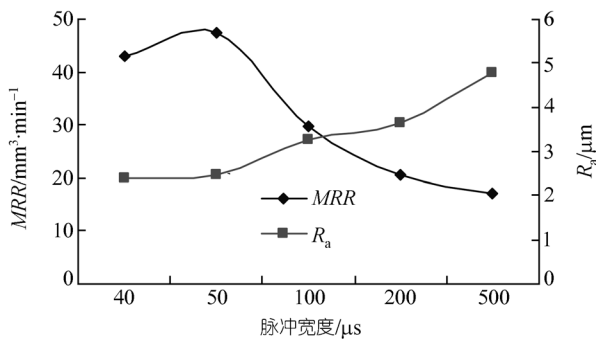


图2 高频脉冲宽度对材料去除率和表面粗糙度的影响

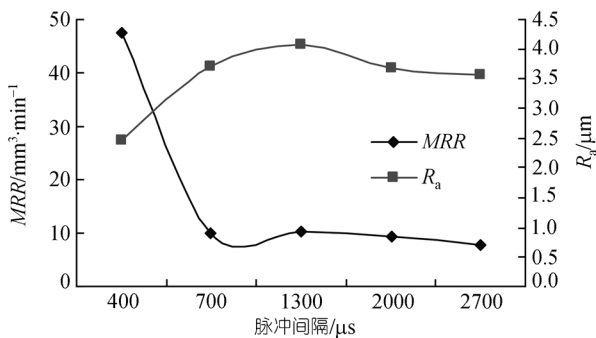


图3 高频脉冲间隔对材料去除率和表面粗糙度的影响

高频脉冲间隔的增大而增加,但是当高频脉冲间隔增大到一定程度时,表面粗糙度随着高频脉冲间隔的增大又有所下降。这是因为,在峰值电流和高频脉冲宽度不变的情况下,随着高频脉冲间隔的增大,单位时间内工作脉冲数目减少,用于蚀除工件的能量也随之减小,因此工件的加工速度减慢。由图3还可以发现,当高频脉冲间隔从 $400\ \mu\text{s}$ 增加到 $700\ \mu\text{s}$ 时,材料去除率迅速下降。这是由于随着高频脉冲间隔的增大,碳化硅良好的导热性使其迅速冷却,有较多的放电蚀除产物来不及抛离放电点而重新凝固于工件表面,因此材料去除率迅速下降而表面粗糙度却随着高频脉冲间隔的增加而增大,当高频脉冲间隔增大到一定程度时,由于单位时间内放电脉冲数目过少,放电频率降低,使蚀除坑个数和密度降低,此时电蚀产物排除和消电离充分,凝固于工件表面的放电产物减少,因而表面粗糙度随着高频脉冲间隔的增大又有所下降。

2.3 峰值电压对加工性能的影响

峰值电压对电火花加工性能的影响规律如图4所示。

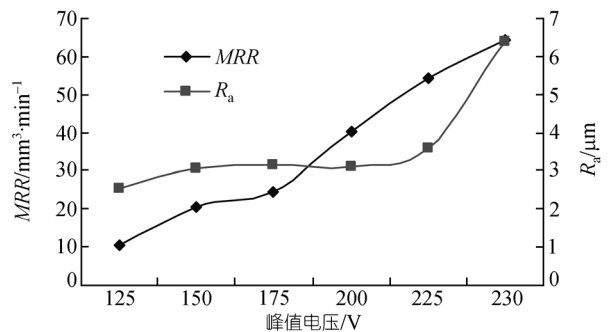


图4 峰值电压对材料去除率和表面粗糙度的影响

由图可知,随着峰值电压的增大,材料去除率增加。这是因为峰值电压增大,放电击穿延时减小,放电电流增加,单个脉冲能量和放电爆炸力增加,有较多的电蚀产物进入放电间隙被工作液带走,因此材料去除率增加。由图4还可以看出,当峰值电压小于 $225\ \text{V}$ 时,表面粗糙度随着峰值电压的增加变化不大,当峰值电压从 $225\ \text{V}$ 增加到 $230\ \text{V}$ 时,表面粗糙度迅速增加。这可以解释为:当峰值电压小于 $225\ \text{V}$ 时,随着峰值电压的增大,单个脉冲能量的增大使得放电凹坑变大变深,但是放电间隙也会变大,这有利于电蚀产物的排除和消电离,使得加工更加稳定,有利

于加工表面质量的提高,两种影响综合作用使得表面粗糙度变化不大,但是当峰值电压从 225 V 增加到 230 V 时,放电比较剧烈,加工表面有烧伤的凹坑,因此表面粗糙度迅速增加。

2.4 峰值电流对加工性能的影响

图 5 为峰值电压 225 V 时得到的峰值电流与材料去除率和表面粗糙度的关系曲线。由图 5 可知,材料去除率随着峰值电流的增加而增加,当峰值电流小于 25 A 时,表面粗糙度随着峰值电流的增加变化不大,当峰值电流从 25 A 增加到 30 A 时,表面粗糙度迅速增加。这是因为随着峰值电流的增加,单个脉冲能量增加,放电爆炸力变大,有更多的材料被加工蚀除,因此材料去除率增加。在峰值电流小于 25 A 时,随着峰值电流的增加,虽然单个脉冲的材料蚀除量增加,放电坑变大,但是放电凹坑的相互叠加效用使得表面粗糙度变化不大,当峰值电流从 25 A 增加到 30 A 时,放电声音和放电火花剧烈增加,工件表面有块状剥落,因此表面粗糙度迅速增加。

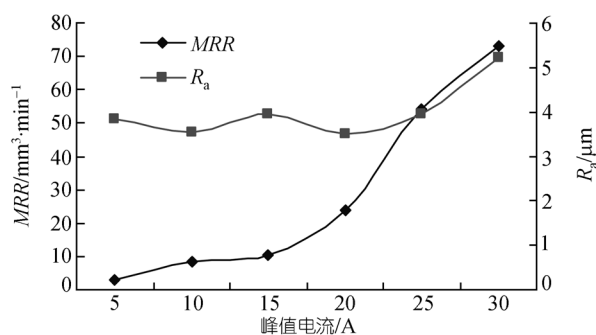


图 5 峰值电流对材料去除率和表面粗糙度的影响

2.5 加工极性对加工性能的影响

加工极性对电火花加工性能的影响关系如图 6 所示。由图 6 可知,工具电极接电源的正极进行加工时,材料去除率较大且工件的表面粗糙度较小。这可以解释为:试验中所加工的碳化硅陶瓷是由微小的碳化硅颗粒分布于以单质硅为晶界的网格之中形成的,主要成分是 SiC, 其中的 C-Si 键键能高而且稳定,根据火花放电的极性效应可知 [18], 当工具电极接电源正极时工件材料主要受正离子的轰击,当工具电极接电源负极时工件材料主要受电子的轰击。由于正离子的质量和惯性远大于电子的质量和惯性,在本试验所设定的脉冲宽度下,正离子有足够的时间加

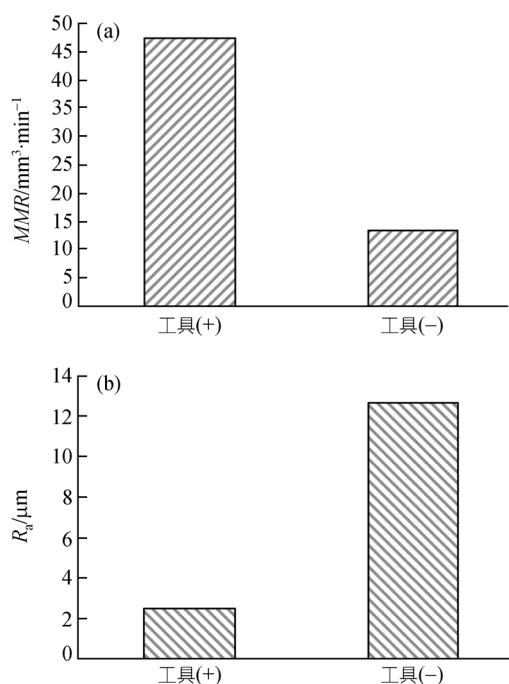


图 6 加工极性对材料去除率(a)和表面粗糙度(b)的影响

速,在达到工件表面时其能量要远大于电子的能量,可以使 C-Si 键发生断裂,从而使碳化硅以较小的微粒去除,加工过程比较稳定,并且正离子撞击碳化硅表面时产生的热量较多,温度升高很快,易使碳化硅产生分解去除,有利于改善其表面质量,因此生产率较高,表面质量较好;当工具电极接电源负极时电子的能量较小,难以对 C-Si 键造成破坏,只能使键能较小的晶界中的硅熔化,易引起碳化硅颗粒的整体去除,加工表面产生较深的凹坑,加工过程不稳定,因此生产效率较低且表面质量较差。用粗糙度仪测量的不同加工极性的加工表面原始轮廓曲线如图 7 所示,由图 7 可知工具电极接负极时加工表面有较深的凹坑。由上述分析可知,工具电极接电源正极适宜于碳化硅的电火花加工。

2.6 电极转速对加工性能的影响

图 8 为电极转速与材料去除率和表面粗糙度的关系曲线。由图 8 可知,随着电极转速的增加,材料去除率增加,表面粗糙度下降,当电极转速增加到一定值时材料去除率最大,表面粗糙度最小,再增加电极转速,材料去除率有所下降,而表面粗糙度却增加。这是因为,当电极转速增加时,有更多的工作液流入放电间隙,两极间迅速恢复绝缘状态,工件被及时冷却,有更多的放电产物被抛离加工表面,因此材料

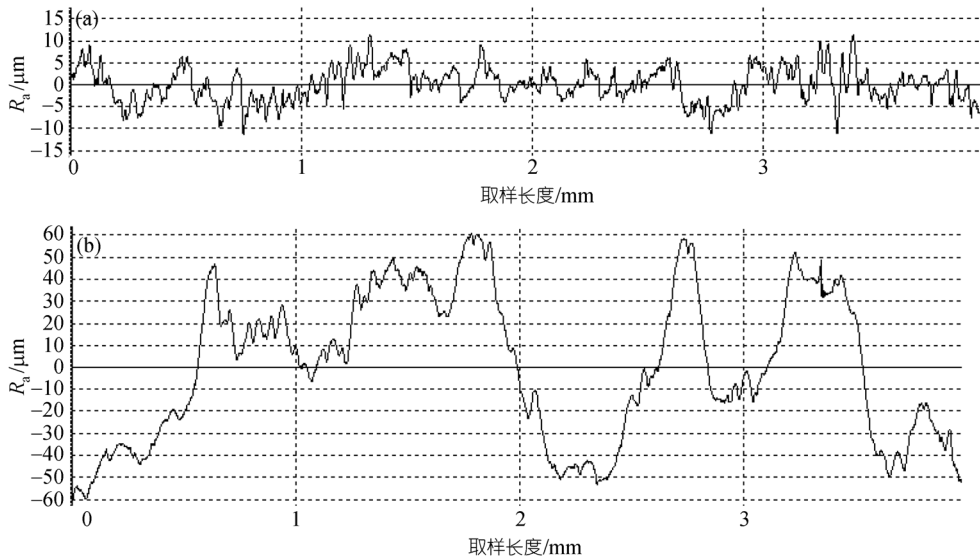


图7 不同加工极性时碳化硅加工表面的原始轮廓曲线
(a) 工具电极接正极; (b) 工具电极接负极

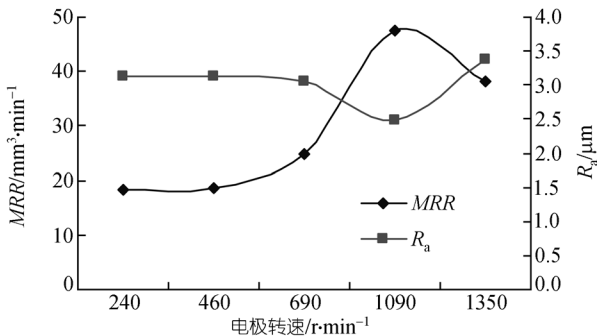


图8 电极转速对材料去除率和表面粗糙度的影响

去除率增加, 电极转速的增加使得工件表面放电点分散, 放电凹坑数目增加, 深度减小, 加工表面质量提高, 所以表面粗糙度随着电极转速的增加而下降, 但是当电极转速增大到一定值时, 再继续增大, 工具电极的振动加大, 使放电过程变得不稳定, 因而材料去除率有所下降, 加工表面变差, 表面粗糙度增加。这主要是因为本试验所使用的机床是采用小型卧式铣床改制而成的, 其主轴悬伸端的滑动套与轴头间的间隙较大, 且其刚度较低, 此外主轴系统本身的回转精度也较低, 试验发现当主轴转速为 1350 r/min 时, 测得振动振幅为 0.09 mm, 因此主轴的转速过高时, 工具电极的振动较大, 影响放电加工的稳定进行。在试验设定的参数范围内, 电极转速为 1090 r/min 时加

工效果最佳。

2.7 低频脉冲的频率对加工性能的影响

在研究低频脉冲的频率对加工性能的影响时, 高频脉宽和高频脉间分别为 50 和 400 μs, 且保持低频脉冲宽度和低频脉冲间隔为 2:1 不变。图 9 为不同的峰值电压和峰值电流下低频脉冲的频率与材料去除率的关系曲线。由图 9 可知, 在同一峰值电压和峰值电流下随着低频脉冲的频率增加, 材料去除率增加, 当低频脉冲的频率增加到 730 Hz 时再增加脉冲频率, 材料去除率有所下降。上述现象可解释为: 随着低频脉冲频率的增加, 单位时间内分组脉冲数目增加, 火花放电次数增加, 所以材料去除率增加,

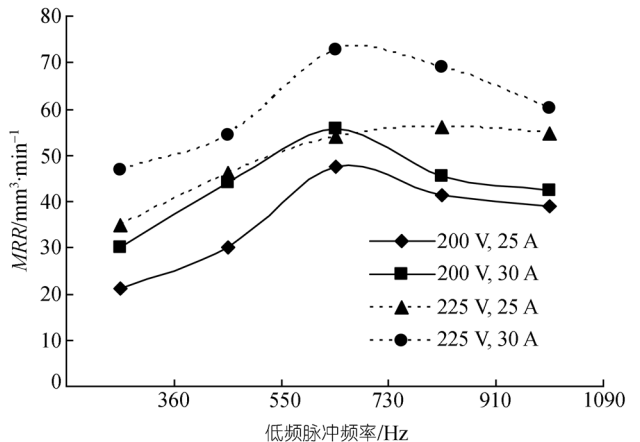


图9 低频脉冲频率对材料去除率的影响

当低频脉冲频率增加到一定值后再增加低频脉冲频率,工作液来不及恢复绝缘状态,容易产生电弧放电,材料去除率下降.

图10为不同的峰值电压和峰值电流下低频脉冲的频率与表面粗糙度的关系曲线.

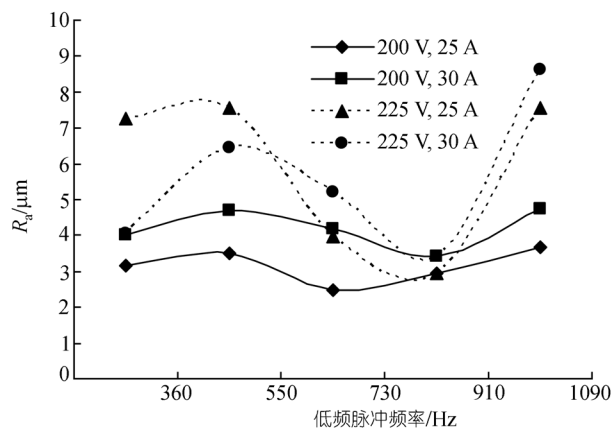


图10 低频脉冲的频率对表面粗糙度的影响

由图10可知,在同一峰值电压和峰值电流下随着低频脉冲的频率增加,表面粗糙度先增加然后减小,但在低频脉冲的频率为1090 Hz时表面粗糙度值最大.这是因为,360和550 Hz相比,360 Hz加工时脉冲间隔较大,空载时间较长,加工间隙能够较好地恢复绝缘状态,有利于提高加工表面质量;从550~910 Hz,随着低频脉冲的频率增加,单次低频脉冲宽度越来越短,工件表面放电点比较分散,有利于改善表面质量,所以表面粗糙度随着低频脉冲频率的增加而减小;当低频脉冲的频率为1090 Hz时,由于低频脉冲间隔太小已经发生电弧放电,对工件表面造成烧伤,工件表面质量较差,所以表面粗糙度较大.

2.8 碳化硅电火花加工表面研究

电火花加工表面的性质状态根据不同的材料去除方式而不同.图11(a)为电火花铣削碳化硅加工后的表面微观形貌SEM照片.可以看出,加工表面有很多不规则形状的凹坑和多棱颗粒.由前文分析可知,碳化硅在加工过程中C—Si键易发生断裂而导致碳化硅以较小的微粒去除,C—Si键断裂的无规律性使得放电坑及放电颗粒没有规则的形状,并且放电爆炸力不可能将全部的放电蚀除产物抛离加工表面,未能抛出的部分在冷却过程中重新凝固在工件表面形成加工后的表面形貌.由图11(a)还可以看到加工表面有很多圆形小孔,分析认为,这是由于碳化硅在高

温下与水蒸气发生反应产生的甲烷气体在放电过程中产生爆炸,爆炸冲击波作用在工件表面会使得材料产生微小的局部去除,从而在工件表面留下很多圆形小孔.放电蚀除物一部分随工作液排除,剩余物质残留于工件表面,再加上放电过程中骤冷骤热的作用而在工件表面形成变化层.为了研究碳化硅加工后的表面变化层,将加工工件的断面经过适当的处理后用扫描电镜观察分析,如图11(b)所示.由图可以看出,在加工后的表面层几乎没有气孔而在基体部分有较多烧结过程中形成的气孔.图12(a)和(b)分别为碳化硅陶瓷加工前与加工后的表面能谱分析(EDS)图,由图12可以看出加工后碳化硅表面增加了铁元素,这是由于加工过程中工具电极中的铁转移到工件表面所致.对加工前后的工件表面分别进行硬度测试可知,碳化硅加工后工件表面硬度要高于加工前的硬度.图13和14分别为碳化硅加工前与加工后的X射线衍射(XRD)分析图谱,两图相比可以看出,碳化硅加工后表面衍射峰强度降低且明显宽化,利用谢乐公式对X射线衍射结果进行计算可知^[19],加工前平均晶粒尺寸为108 nm,加工后平均晶粒尺寸为77 nm,加工后的平均晶粒尺寸小于加工之前,即电火花加工有细化晶粒的作用.分析认为,这是由于电火花放电产生的瞬时高温高压作用使得较大的碳化硅颗粒发生裂解成为若干较小的碳化硅微粒,部分碳化硅微粒被排除,剩余的碳化硅微粒在工作液的冷却作用下在工件表面重新凝固,从而导致工件表面的晶粒产生细化,工件的硬度也有所提高.由于铁的含量较少,在图14中没有出现铁或其化合物的衍射峰.加工后的工件如图15所示.

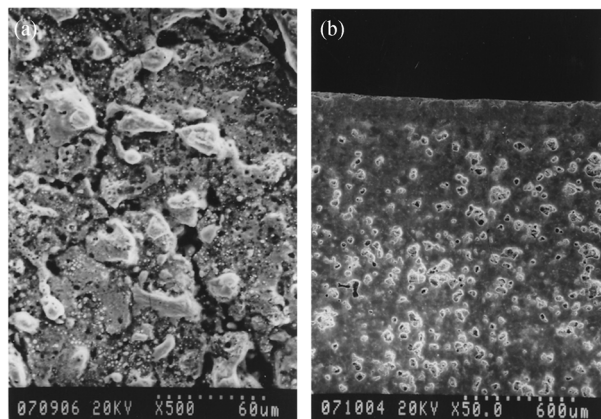


图11 碳化硅加工后的SEM显微照片

(a) 表面; (b) 截面

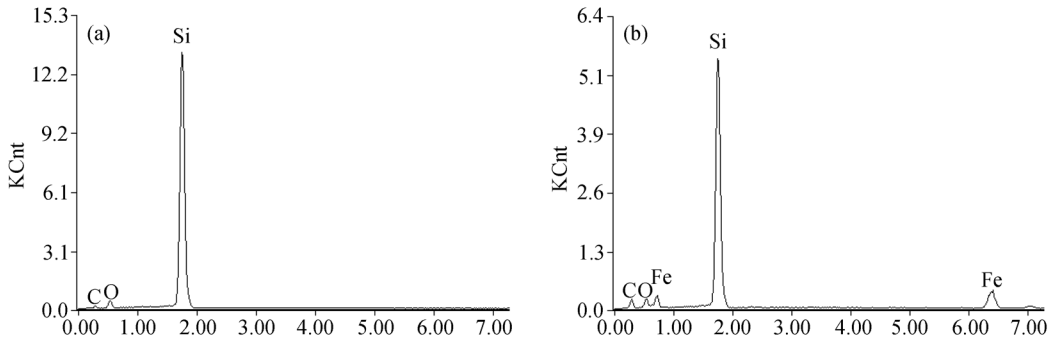


图 12 碳化硅陶瓷表面加工前(a)和加工后(b)的 EDS 分析

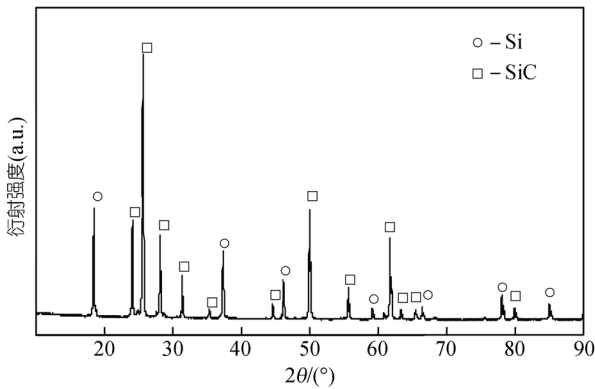


图 13 碳化硅加工前的 X 射线衍射分析图谱

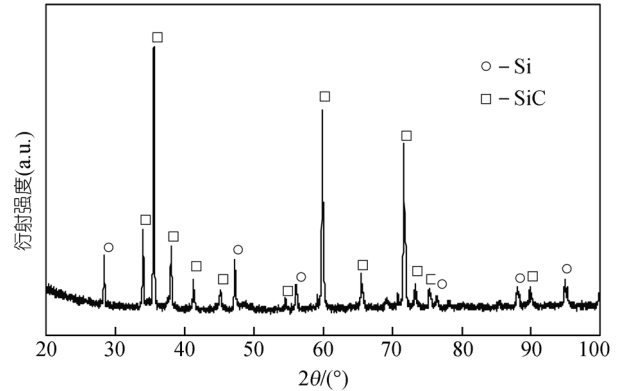


图 14 碳化硅加工后的 X 射线衍射分析图谱

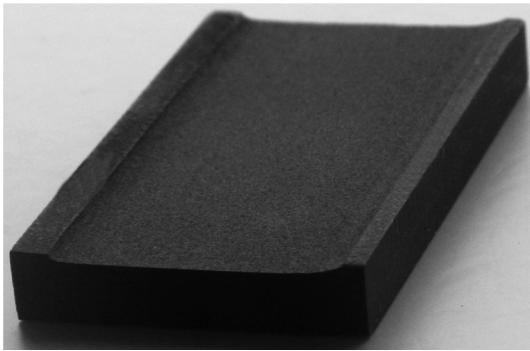


图 15 碳化硅电火花铣削后的照片

3 结论

(i) 采用分组脉冲电源对高电阻率的碳化硅陶瓷($500 \Omega \cdot \text{cm}$)进行电火花铣削加工, 该方法降低了传统电火花加工对材料电阻率的限制, 加工时放电离充分并且击穿电压高, 提高了加工过程的稳定性

和火花放电的利用率, 较大地提高了材料去除率, 最高材料去除率可达 $72.9 \text{ mm}^3/\text{min}$.

(ii) 在试验设定的参数范围内, 较小的高频脉冲宽度、高频脉冲间隔, 较高的峰值电压、峰值电流以及工具电极接电源正极能够得到较好的加工效果, 电极转速和低频脉冲频率在加工过程中均存在最佳值, 通过试验发现, 其最佳值分别为 1090 r/min 和 730 Hz .

(iii) 对碳化硅电火花加工表面研究发现, 加工过程中材料以较小的微粒去除, 工件表面凹坑和颗粒形状不规则, 且含有很多圆形小孔, 部分放电蚀除产物在工件表面重新凝固, 加工表面形成变化层, 其硬度要高于加工前材料的硬度, 采用钢电极加工后工件表面含有铁元素, 加工表面的晶粒尺寸小于加工前表面的晶粒尺寸, 说明碳化硅经过电火花加工有利于改善其表面质量.

致谢 感谢中国石油大学仪器分析中心和中石化胜利油田地质院提供的支持和帮助.

参考文献

- 1 金志浩, 高积强, 乔冠军. 工程陶瓷材料. 西安: 西安交通大学出版社, 2000. 162—166
- 2 Eom J H, Kim Y W, Song I H, et al. Microstructure and properties of porous silicon carbide ceramics fabricated by carbothermal reduction and subsequent sintering process. *Mater Sci Eng A*, 2007, 464(1-2): 129—134[DOI]
- 3 Jacoby M T, Goodman W A. Material properties of silicon and silicon carbide foams. *Optical Materials and Structures Technologies II*, 2005 Aug 1—2, San Diego. Washington: International Society for Optical Engineering, 2005. 1—12
- 4 Lee S H, Lee Y, Kim Y W, et al. Mechanical properties of hot-forged silicon carbide ceramics. *Scripta Mater*, 2005, 52(2): 153—156[DOI]
- 5 Wang Y X, Tan S H, Jiang D L. Microstructure and properties of reaction-formed silicon carbide. *Key Eng Mater*, 2005, 280-283: 1271—1274
- 6 Matsukawa T, Neumeier C, Takaku T, et al. Application of SiC-based power element to high current AC/DC converter system. *Fusion Eng Des*, 2003, 66-68: 1155—1158[DOI]
- 7 Ko Y M, Kwon W T, Kim Y W. Development of Al_2O_3 -SiC composite tool for machining application. *Ceram Inter*, 2004, 30(8): 2081—2086[DOI]
- 8 Carrapichano J M, Gomes J R, Oliveira F J, et al. Si_3N_4 and $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ composite rings for dynamic sealing of circulating fluids. *Wear*, 2003, 255: 695—698[DOI]
- 9 熊信柏, 李贺军, 黄剑锋, 等. 生物医用碳/碳复合材料碳化硅涂层的研究. *西北工业大学学报*, 2003, 21(3): 356—359
- 10 Deason D M, Hilmas G, Buchheit A, et al. Silicon carbide ceramics for aerospace applications processing microstructure and property assessments. *Mater Sci Technol*, 2005, 1: 45—53
- 11 Akira O. Automotive and industrial applications of structural ceramics in Japan. *J Eur Ceram Soc*, 2008, 28(5): 1097—1104[DOI]
- 12 Chen Y F, Wang H, Tang J, et al. Fabrication of lightweight SiC space mirror. *Key Eng Mater*, 2007, 336-338: 1151—1154
- 13 Gopal A V, Rao P V. Modeling of grinding of silicon carbide with diamond wheels. *Miner Process Extr Metal Rev*, 2002, 23(1): 51—63[DOI]
- 14 Yin L, Vancoille E Y J, Lee L C, et al. High-quality grinding of polycrystalline silicon carbide spherical surfaces. *Wear*, 2004, 256(1-2): 197—207[DOI]
- 15 戴玉堂, 姜德生, 大森整. 新型反应烧结碳化硅陶瓷的超精密磨削. *中国机械工程*, 2006, 17(6): 595—597
- 16 Konig W, Dauw D F, Levy G, et al. EDM-future steps towards the machining of ceramics. *CIRP Ann*, 1988, 37(2): 623—631
- 17 Lauwers B, Kruth J P, Brans K. Development of technology and strategies for the machining of ceramic components by sinking and milling EDM. *CIRP Ann Manuf Technol*, 2007, 56(1): 225—228[DOI]
- 18 曹凤国. 电火花加工技术. 北京: 化学工业出版社, 2005. 16
- 19 丘利, 胡玉和. X射线衍射技术及设备. 北京: 冶金工业出版社, 2001. 129