

弱电解质中电解放电复合加工 工艺技术

Technology of Electro-Chemical Discharge Machining in Low Conductive Electrolyte

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 尹青峰 王宝瑞 李建原 吉方 张勇斌



尹青峰

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所硕士研究生,主要从事电火花/电学复合加工工艺研究。

电解放电复合加工同时利用电化学阳极溶解作用和电火花高温熔解作用对金属材料进行去除,利用电镀作用对电极损耗进行一定程度的补偿,选择合适的工艺参数,可实现高效、低损耗加工。

火花高温熔解作用对金属材料进行去除,利用电镀作用对电极损耗进行一定程度的补偿,选择合适的工艺参数,可实现高效、低损耗加工。

电解放电复合加工机理

电解放电复合加工最早由日本学者提出^[2],因具有独特的工艺特性,广大专家学者对其进行了大量的研究工作。20世纪80年代国外学者对加工机理和孔加工工艺进行探索,成功实现了复合过程,并获得了高的加工效率。20世纪90年代复合型腔加工、复合光整加工获得了较大进展,研究成果显著^[3]。但受加工机理和工艺研究不够深入,以及电解作用和电火花作用比例无法有效控制的制约,近些年电解放电复合加工的研究成果较少,该工艺方法还未正式应用于实际生产。

对于该复合加工工艺方法,不同

的研究者对其命名也不同,有电火花电化学复合加工^[2]、电解电火花复合加工^[3]、电化学放电加工^[4]、电解放电复合加工^[5]。具体工艺过程也存在差别。哈尔滨工业大学郭永丰和南京航空航天大学邱明波研究的复合加工^[2-4],工作液电导率较大,电解只是为电火花放电创造条件,工件为绝缘材料,需要有辅助电极,材料的去除全部由电火花放电完成。华南理工大学王建业和西北工业大学任中根研究的复合加工在导电能力极弱的工作液中进行^[3-5],其加工对象为导电工件,电火花放电和电解溶解共同作用将材料去除,其加工原理如图1所示,给两电极之间加上电压后,工件和电极之间的等效电阻用 R^* 表示, R 为电源自身电阻。在电极间隙为数 μm 的条件下,只要工作液电导率选取合适,电阻 R^* 就可分得足够大的电压,在间隙中产生强电

电火花成形加工作为特种加工工艺,自创建以来,已获得了很大发展,但存在加工效率低、电极损耗大的问题。电解加工利用电化学阳极溶解作用对材料进行去除,加工效率高,但通常加工精度较低,低频宽脉冲成形加工尺寸精度一般为 $0.1\sim 0.15\text{mm}$ ^[1]。电解放电复合加工同时利用电化学阳极溶解作用和电

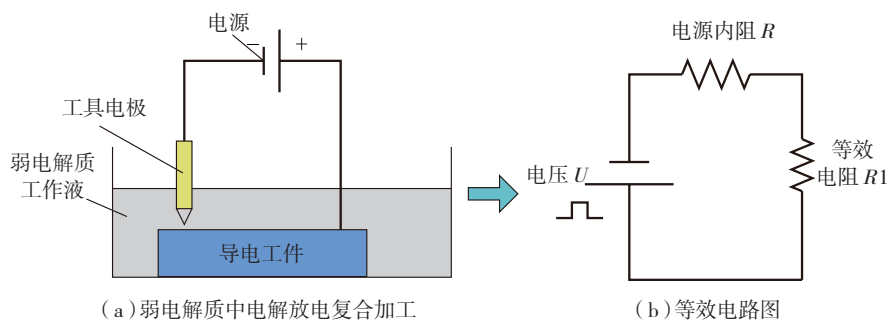


图1 弱电解质中电解放电复合加工

场,将工作液击穿,即发生电火花放电。

等效电阻阻值 R^* 可按点-面接触模型计算^[6],其计算公式为:

$$R^* = \frac{1}{G\sqrt{\pi S_d}}, \quad (1)$$

式中, G 为工作液电导率; S_d 为进电点面积。

本文针对紫铜材料电火花加工电极损耗大的问题,采用弱电解质做工作液,进行系列实验,探索工作液电导率对加工质量的影响规律。

工艺试验设计

本文研究在弱电解质中的电解放电复合加工。以中物院机械制造工艺研究所研制的微细电火花精密加工系统 μ EDM-50 作为实验平台,该系统集成了纳秒级脉宽的微能脉冲电源及精密运动平台,具有一维、二维、三维微细加工能力。

工作液的配置是实验设计的关键步骤之一。要实现电解放电复合加工,复合加工工作液除传统电火花液必须具备的压缩放电通道、排除间隙产物等作用外,还必须具备一定的导电能力。本文采用往去离子水中加入三乙醇胺的方式配制工作液。三乙醇胺电导率约为 1ms/cm ,可与水以任意比互溶,具有良好的活化作用、分散功能以及防锈功能^[1]。

电解放电复合加工过程中,加工尺寸精度、加工效率及电极相对损耗,除受机床本身性能影响外,还受电源参数、主轴转速、电极及工件材

料、工作液添加方式、工作液的溶剂类型及电导率等因素的影响。其中,工作液的电导率是决定复合加工能否稳定进行、复合加工质量好坏的关键因素。本文在选定溶剂、溶质类型前提下,对工作液的电导率进行相关试验研究,试验条件如表 1 所示。

试验系统如图 2 所示,进行小孔加工,加工过程中,采用 Tektronix 公司的高压隔离探头对加工过程中两电极间的电压信号进行监测,电流探头对加工回路中的电流信号进行监测,示波器对监测到的电压电流信号进行存储和分析。

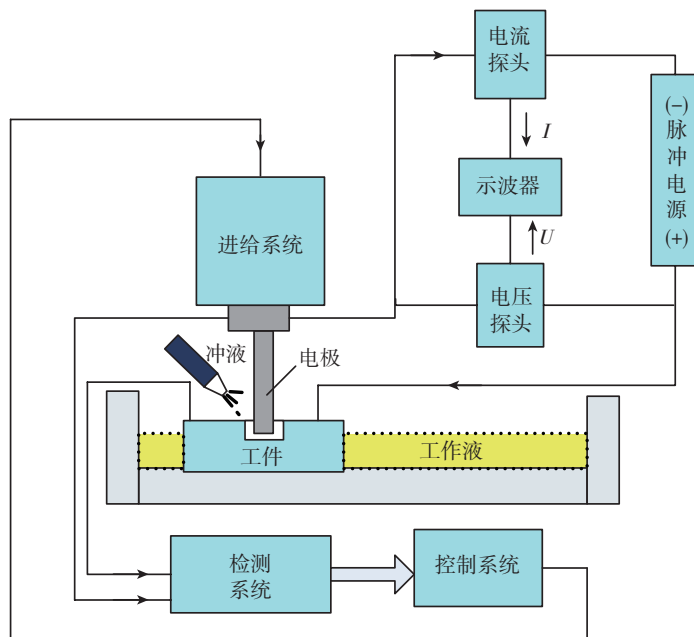


图2 电解放电复合加工系统示意图

试验结果与分析

1 电导率对加工精度的影响

表1 电解放电复合加工试验条件

项目	内容
电极材料及尺寸	紫铜; $\phi 1$
工件材料	紫铜
工作液工作方式	冲液
空载电压	120V
峰值电流	4.8A
脉冲宽度	$5\mu\text{s}$
脉冲间隔	$5\mu\text{s}$
主轴转动状态	不转动
加工极性	正极性加工

加工尺寸偏差用 d 来评估, $d = (d_2 - d_1)/2$, d_1 为加工前电极直径, d_2 为加工后小孔直径,采用显微镜对电极直径和孔径进行放大测量。 d 与电导率的关系曲线如图 3 所示,加工精度随电导率的增大而降低,当电导率大于 $320\mu\text{s/cm}$ 后,精度降低非常显著。

电导率对加工精度的影响有多个方面的原因。首先,加工紫铜的过程中,阳极除了由于高温熔解形成金

属微粒外,还会形成金属氧化物微粒。由于工作液具有导电性,两电极之间除了发生电火花放电,还存在电

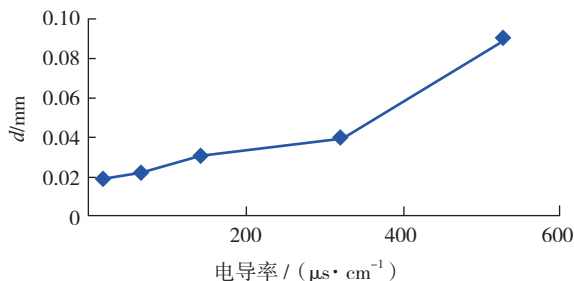
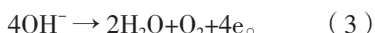


图3 电导率与d的关系曲线

解作用。在电极阳极,因电极电位很高,同时存在式(2)、式(3)两个反应:



新生成的 O_2 具有较强氧化性,易失去电子,与进入溶液中的 Cu^+ 结合,生成 Cu_2O 微粒。 Cu_2O 微粒同时受到溶液的冲击作用和阴极产生的气泡的扰动作用,在加工间隙滞留一定时间后,随工作液一起流出间隙。新生成的 Cu_2O 进入间隙,已经滞留一定时间的颗粒流出间隙,这样加工间隙总有一定量的金属氧化物微粒存在。在同样的电参数条件下,加工间隙分布的金属氧化物颗粒可使间隙局部电场强度增大至原电场强度的3倍^[8]。阴极电极表面发生式(4)所示的反应:



该还原反应产生的气泡进入工作液,工作液变成气液混合体,抗电击穿强度降低。一方面电场强度增大,另一方面抗电击穿强度降低,两者共同作用,在相同电极电压条件下,放电间隙增大。

当加工间隙达到一定值时,圆柱电极的圆柱面与孔的内表面之间的电场强度低于击穿临界值,不再发生电火花放电,但只要两电极之间存在一定电压,工作液存在一定导电能力,孔的内表面会继续发生电解溶解作用,导致孔径持续增大。此外,由于电镀作用,铜离子在阴极沉积,如果电导率足够大,沉积量就会大于电火花放电的电极损耗量,阴极电极

径向增大,使加工得到的孔径增大。如图4所示,(a)为加工前电极形貌;(b)为在电导率为 $675 \mu\text{s}/\text{cm}$ 的工作液中加工小孔后的电极形貌,电极径向的增大导致小孔孔径增大。

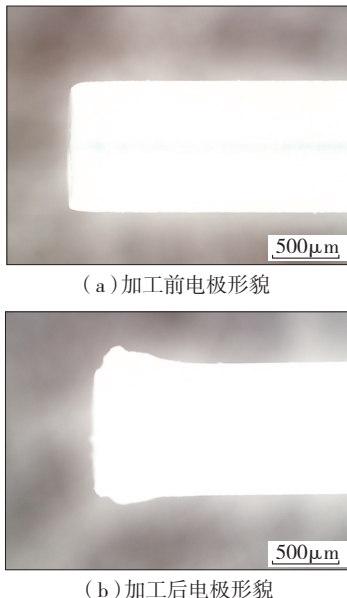


图4 加工前后电极形貌对比

2 电导率对加工效率的影响

加工效率用加工相同深度的小孔所用时间 T 来评估。电导率与时间 T 的实验曲线如图5所示。

随着电导率的增大,加工效率明显提高。电导率对加工效率的影响主要有3方面的原因。

(1) 电解作用在阴极产生大量气泡,气泡从产生到膨胀到爆破的过

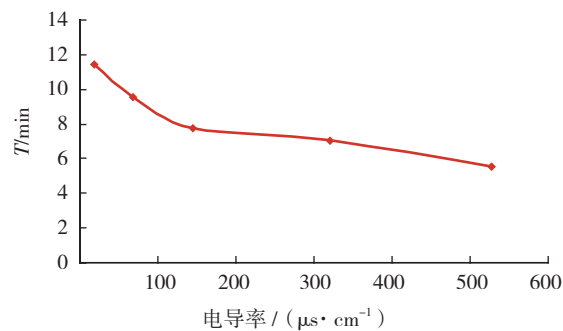


图5 电导率与加工效率的关系曲线

程引起工作液振动,可增强对加工间隙中微粒的排出能力,防止间隙中的颗粒链接成小桥引起拉弧,使有效放电次数增多,从而提高加工效率。图6(a)为电导率为 $18 \mu\text{s}/\text{cm}$ 的工作液中加工后电极端面形貌;(b)为在电导率 $675 \mu\text{s}/\text{cm}$ 的工作液中加工后电极端面形貌。图6(a)的中间位置存在凹坑,且表面存在明显的烧伤痕迹。很多文献都已经说明了在电火花加工中,如果加工屑的排出不通畅,碎屑堆积在加工间隙,引起拉弧,使工件中间部位材料不能被有效去除,就会使工件表面出现凸面,使电极端部出现凹面。图6(b)整个端面比较平整,因为工作液电导率较大,产生的气泡对工作液产生扰动,加快了加工间隙碎屑的排除速度,因此不存在碎屑链接成小桥引起拉弧而导致凹坑和烧伤痕迹。另外,气泡的混入,使工作液变成气液两相体,其抗电击穿强度低于液体抗电击穿强度,更加容易击穿,有效放电脉冲数增加,加工效率也就得到提高。

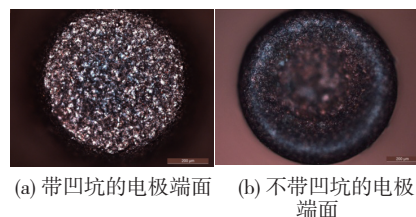


图6 不同电导率工作液加工后电极端面形貌

(2) 本试验平台的 Z 轴采用自适应控制,如图7所示, Z 轴从 A 点开始以恒定速度 V 进给,到达 B 点后,电场强度达到击穿工作液的临界值,开始放电, Z 轴仍以速度 V 继续进给,直到电极接触 D 点,发生短路, Z 轴迅速回退到 A 点,然后继续进给。如前文所述,电导率的提高增大了加工间隙。在电导率近似为零时,电极必须运动

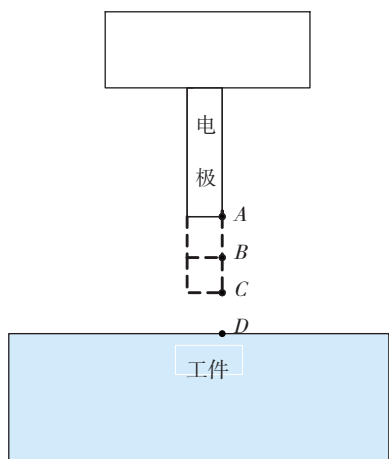


图7 Z轴进给示意图

到C点才开始放电,那么在进给与回退过程中,CD区域为放电区;在一定电导率条件下,电极运动到B点就开始放电,放电区域为BD。显然,在电极的一次进给与回退过程中,其他加工条件确定情况下,电导率越大,放电区越长,在相同时间内有效放电次数越多,加工效率就越高。

(3) 两电极之间存在电解电流,随着电导率的增大,阳极溶解速率增加,使加工效率提高。

3 电导率对电极轴向损耗的影响

电极轴向损耗采用 δ 值评估, $\delta = (Z_1 - Z_2) / Z \times 100\%$, Z_1 为加工前电极位置, Z_2 加工后电极位置, Z 为加工的小孔深度, Z_1 、 Z_2 的位置采用接触感知的方式确定。如图8所示,随着工作液电导率的增大,电极损耗逐渐降低,当电导率达到 $144 \mu\text{s}/\text{cm}$ 时,电极出现负损耗。电导率对电极损耗的影响主要有两方

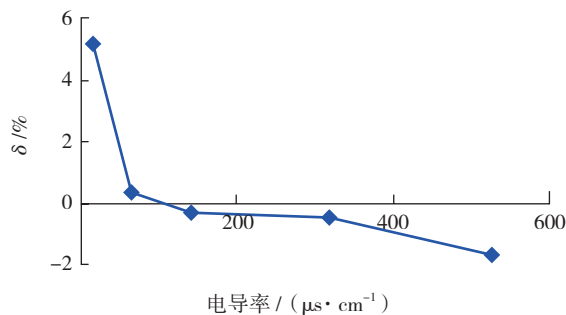


图8 相对电极损耗和电导率关系曲线

面的原因,一是阳极溶解进入工作液的铜离子在电场作用下运动到阴极,在阴极发生还原反应,生成单质Cu沉积在电极表面,补偿电极损耗;阴极电极同时存在电火花烧蚀和电镀沉积,如工作液电导率较大,电镀沉积速率大于电火花烧蚀速率,则电极在轴向和径向同时出现负损耗,由图4可以看出,电极径向尺寸存在明显负损耗。二是由于电解作用,阴极除了 Cu^{2+} 发生还原反应外,还存在 H^+ 还原成 H_2 的过程,生成的气泡覆盖在阴极表面,可在一定程度上阻碍阳离子对阴极的轰击,降低阴极电极损耗。

4 电导率对工件表面形貌的影响

电解作用总是存在杂散腐蚀问题。电解放电复合加工过程中,由于工作液为弱碱性,电解产生铜离子在碱性溶液中形成沉淀,覆盖在工件表面,如图9所示,该覆盖层可在一定程度上保护工件表面不受杂散电流腐蚀,提高表面质量。覆盖层用水冲洗即可洗去,图10为部分覆盖层被冲洗掉的工件。冲洗掉覆盖层后,可以看出,工件表面并不存在明显的杂散电流腐蚀现象。

结论

本文研究了在弱电解质中利用电化学原理来改善加工工艺性能的电解放电复合加工工艺,基于以电导率为变量的工艺实验和理论分析,得到了以下结论:

- (1) 工作液电导率范围在 $150 \sim 320 \mu\text{s}/\text{cm}$ 内,如果电参数选择合适,紫铜加工紫铜,电极损耗可控制在较小范围内;
- (2) 合理选择工作液电导率及电参数,可实现高效低损耗加工;
- (3) 利用高频脉冲电源,在弱电解质中进行电解放电复合加工,加工

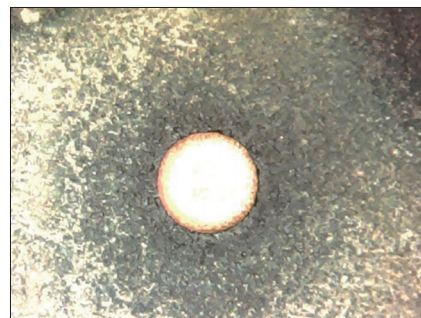


图9 存在覆盖层的小孔



图10 覆盖层部分被冲洗掉的小孔

间隙会比电火花加工增大,但工件表面并不会出现明显的电化学杂散腐蚀现象。

参考文献

- [1] 王建业,徐家文. 电火花加工原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 郭永丰,黄荣和,李常伟,等. 非导电材料的电化学电火花复合加工工艺研究. 机械工艺师, 2000(2):6-7.
- [3] 王建业,罗干英. 电火花复合加工的发展. 电加工, 1997(3):15-19.
- [4] 邱明波,刘志东,田宗军,等. 绝缘涂层构件电化学放电小孔加工电流特性研究[C]. 第14届全国特种加工学术会议论文集, 哈尔滨工业大学出版社, 2011:561-565.
- [5] 任中根,迟恩田,张安洲. 电火花复合加工工艺技术研究[A]. 陕西省机械工程学会电加工分会第七届学术年会论文集, 2000:95-100.
- [6] 邱明波,黄因慧,刘志东,等. 进电方式对太阳能级硅体电阻影响的基础研究. 电加工与模具, 2008(4):24-28.
- [7] 杨鹏,宋昌清. 电火花线切割液研究进展. 机床与液压, 2011(35):143-146.
- [8] 赵福令,吕占竹,王辉,等. 粉末颗粒在混粉电火花加工中作用机理研究. 大连理工大学学报, 2005(45):668-671.

(责编 亦非)