

超声电解复合微细加工硬质合金试验研究*

Experimental Investigation of Combined Ultrasonic and Electrochemical Micro-machining of Cemented Carbide

南京航空航天大学机电学院 李红英 云乃彰
扬州大学机械工程学院 朱永伟

[摘要] 超声电解复合微细加工工艺具有效率高、精度高、环保安全等优点,在硬质合金材料微结构加工方面具有一定的技术优势和发展潜力。本文阐述了超声电解复合微细加工机理和试验装置,对硬质合金材料进行了多组对比工艺试验,分析了加工电压、进给压力、电解液等加工参数对加工效果的影响,优化了加工参数和加工条件,提高了硬质合金微结构的微细加工精度。

关键词: 超声加工 电解加工 复合加工 微细加工 试验研究

[ABSTRACT] The combined ultrasonic and electrochemical micro-machining technology has many excellences in machining productivity, precision, environmental safety, and also has technical predominance and development potential in aspects of machining micro-structures of cemented carbide. In this paper, the machining mechanism and test device of combined ultrasonic and electrochemical micro-machining is expatiated. Many comparative machining tests of cemented carbide are carried out. The influence of machining parameters such as voltage, feeding force and electrolyte on machining result is analyzed. By optimizing the machining parameters and machining conditions, the micro-machining accuracy of cemented carbide microstructures is increased.

Keywords: Ultrasonic machining Electrochemical machining Combined machining Micro-machining Cemented carbide

硬质合金是由硬度很高的难熔金属碳化物(WC、TiC、TaC、NbC等)以钴或镍作胶结剂,用粉末冶金方法制造出来的合金材料^[1]。由于它的硬度很高,并有一定的韧性,已经越来越广泛地成为微机械中加工微构

件的主要材料。目前由于受到材料性质和现有加工方法的加工原理的限制,硬质合金材料的微细加工工艺还有待进一步开发。

超声电解复合微细加工是将超声频振动、磨料冲击和脉冲电流电解作用有机复合在一起的微细加工技术,克服了单一超声加工工具磨损大、加工效率较低以及单一脉冲电流微细电解加工的过程难以持续进行、杂散腐蚀严重等缺点,保持了电解加工阴极无损耗、表面质量好的优点,从机理上对难加工硬脆材料(如硬质合金)的微结构加工具有很大的优势。国内外对这种复合微细加工方法进行了很多的初步探讨^[2],但对其加工机理及工艺参数影响分析还在不断地深入。本课题在自行构建的超声电解复合微细加工系统上,利用组合微细电加工方法制作的阴极工具头对硬质合金材料进行微结构加工试验研究,验证了此复合加工工艺在硬质合金微结构加工方面的优势。

1 加工机理

电解加工是基于电化学阳极溶解原理,借助工具阴极将工件按一定形状和尺寸加工成形的工艺方法。加工时,工件表面产生的钝化膜会阻止低电流密度下的电解作用,钝化区电流密度一般在 $5\sim 20\text{A}/\text{cm}^2$ ^[3],常规电解加工用较高电流密度及高速流动的电解液来消除钝化,清除电解产物,保持电解过程连续高速进行。而微细加工材料去除量微小,加工精度要求很高,电解作用必须在低电位、微电流密度下进行,此时工件表面的钝化膜难以破坏,电解作用不能持续。

工件表面的钝化膜虽然在单一微电流电解作用下难以消除,但其厚度极薄且强度远低于基体材料,如果加工区工具阴极加上高频超声振动,加工区钝化电解液中加入微细磨料,利用电解液的超声频振动冲击波、“负压空化”作用及磨料的刮擦冲击作用可消除附着在工件表面的钝化膜,并能及时、有效地排除间隙区的电解加工产物,改善及加强电解作用,使加工过程连续进行下去。若同时再采用高频脉冲电流,使

* 国家自然科学基金(50675192)资助项目。

电解作用间歇进行,更有利于改善和稳定电解加工的间隙状态,提高电解去除的定域性,进而提高加工精度和表面质量。

另外,钝化膜破坏后的表面由于电解作用而又迅速产生新的钝化膜,阻止进一步电解,这样可避免通常大电流密度电解时产生的杂散腐蚀作用。这种特性对 MEMS 器件的高深度比沟槽加工非常重要。

可见,在整个超声电解复合微细加工过程中,工件表面始终处于“钝化—活化—钝化”不断交替变化作用下,加工材料以钝化膜层为单位逐渐有选择地去除,并且电解钝化与高频振动作用消除交替进行,机理上可保证加工过程中钝化膜产生和去除的协调配合,解决电解微细加工过程难以持续的问题,使其实用成为可能,并能大大减小加工工具的磨损,保持了加工的硬脆金属(如硬质合金、淬火钢)材料的加工效率,得到好的表面加工精度。

超声电解复合微细加工原理如图 1 所示。换能器将超声发生器输出的高频电信号转变为机械振动能,通过变幅联接件使阴极工具头端面作小振幅超声高频振动,工件由粘结剂(或双面胶)固定于绝缘工作台上,阴极工具头和工件分别接脉冲电流电解加工电源的负极和正极,并在电解回路中串入传感器,采集并显示加工电压与电流信号;加工区内注入复合悬浮工作液,在超声振动加强的磨料冲击和脉冲电流电解作用下,加工部位逐步蚀除,最终形成与阴极工具头端面相对应的工件。

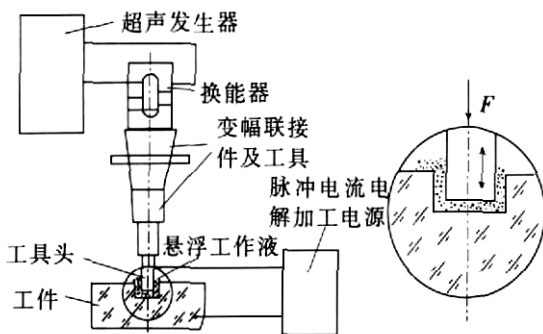


图 1 超声电解复合微细加工原理

Fig.1 Principle of combined ultrasonic and electrochemical micro-machining

采用微细磨料和钝化性电解液组成的悬浮工作液。微细阴极工具头用螺纹联接在换能器末端,联接面之间用凡士林填充以减少超声能量损失。通过可移位测量显微镜标定毛坯与阴极工具头间的加工起始

位置。根据加工要求调节合适的工作压力。启动超声发生器,将系统调至共振状态,再开启电解加工脉冲电源,即可进行超声电解复合微细加工。

2 试验装置

构建的超声电解复合微细加工试验系统如图 2 所示,包括超声振动单元,电解加工单元,主轴进给运动单元及工作台,测量、分析及控制单元。

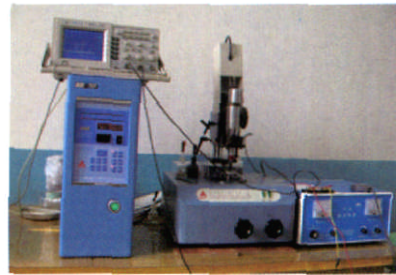


图 2 超声电解复合微细加工试验装置

Fig.2 Testers of combined ultrasonic and electrochemical micro-machining

2.1 超声振动单元

超声振动单元由超声电源、超声波换能器、换能器与阴极工具头联接部分及阴极工具头组成。超声功率无级可调,并有记忆功能;具有手动和定时 2 种加工模式;通过压电陶瓷式钛合金换能器转换电-机振动能量;频率为 20kHz 左右;功率为 0~150W。

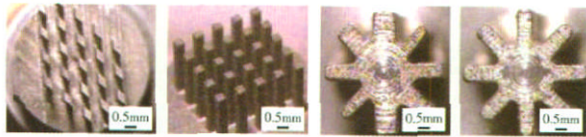
2.2 电解加工单元

电解加工单元由阴极工具头、脉冲电源、工件及悬浮工作液组成。脉冲电源输出方波/直流波形,输出功率为 5~5 000Hz,电压为 3~12V,电流为 0~30A,占空比为 0~1。

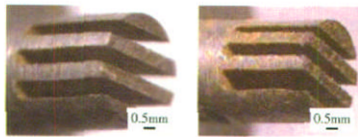
根据工件材料和加工要求,选用微细磨料(1 600# 碳化硅、W10 碳化硼或金刚石磨料)和低质量分数 NaNO_3 钝化性电解液组成的悬浮工作液。在微细加工场合,仅需人工注入、更新悬浮工作液,定时滴加补充即可。选用 NaNO_3 钝化性电解液,使工件待加工区处在超钝化状态,而非加工区由于阳极电位较低而处于钝化状态,受到钝化膜的保护,这样可以减少杂散腐蚀,提高加工精度^[4]。

微细加工材料去除量微小,加工精度和表面质量要求很高,加工时,阴极工具头与整个超声振动系统作超声频振动,其设计、制作与安装精度对加工效率、加工精度及表面质量的影响很大。因此微细阴极工具头的设计、制作是实现超声电解复合微细加工的关键。

键,对工艺的完善具有重要意义。制备的试验用阴极工具头如图3所示。



(a)阵列菱形、正方形微柱及米字形阴极工具头



(b)等宽和不等宽槽形阴极工具头



(c) $\phi 0.3, 0.5, 0.74\text{mm}$ 微轴类阴极工具头

图3 各类截面形状的微细阴极

Fig.3 Micro cathodes with different sections shapes

2.3 主轴进给运动单元和工作台

试验采用圆形磁悬浮工作台,可以实现Y、Z向微位移和转动。为适用于三维复杂形状微器件,增加了X向进给微位移。随着加工深度的增加,磁悬浮工作台自动抬升向+Z进给,保持工件与阴极工具头之间的压力。阴极工具头与微器件之间的间隙随超声频率振动周期性变化,微器件的加工深度由深度测微仪测出。

2.4 测量控制单元

测量控制单元包括工作台微位移、超声振幅及加工电流的测量与控制装置。加工电流测量分析装置由电流传感器、数字存储示波器、PC机组成。电流传感器串接在电解加工回路中,借助数字存储示波器将信号传送到PC机,并完成测量、显示、存储,以便对加工过程进行分析及实现参数优选控制与优选。

如图4所示,采用5kHz-4V脉冲电压加工。脉冲电压:时基100 $\mu\text{s}/\text{div}$,幅度2V/div;电解加工电流:时基100 $\mu\text{s}/\text{div}$,幅度50mV/div。

3 试验结果与分析

3.1 电压对加工的影响

加工电压是电解加工的原动能,它克服双电层的反电势和溶液欧姆压降,建立起必要的极间电流场,

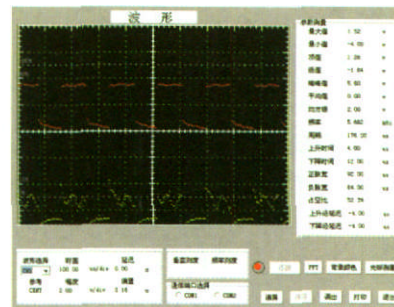


图4 复合加工中脉冲电压波形及电流波形

Fig.4 Voltage pulse and current waveform in combined machining process

从而确保达到所需要的电流密度^[3]。在正常微细加工条件下,应选取较低的加工电压值。

(1) 试验1。

试验条件:工件材料YG8;采用不等宽槽(宽0.3、0.4、0.5mm)端面阴极工具头;磨料为1600#碳化硅磨料;磨料在悬浮工作液中的质量分数为15%,另加质量分数为5%的NaNO₃水溶液;电解加工脉冲频率为5kHz;占空比为4:6;0V、2V直流,2V、3V、4V脉冲电压;进给力为1.6N;加工时间2min。加工效果比较见图5。

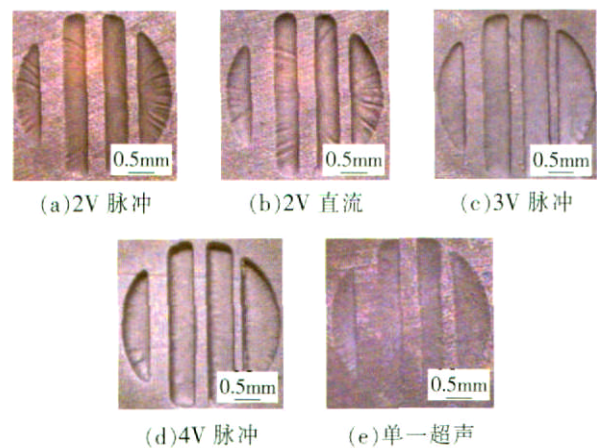


图5 不同脉冲电压下加工的不等宽筋YG8试件

Fig.5 Unequal width rib YG8 specimen under different pulse voltage

单一超声加工只在工件表面形成浅显印痕,效果明显最差;超声电解加工能使阴极工具头端面形状的工件上清晰成形,3V脉冲电流成形精度最好,表面粗糙值R_a也最低,为0.8 μm ,4V电压时电流明显加大,加工深度最深,但杂散腐蚀也随之增大,精度稍差。2V

脉冲电流电解和 2V 直流电解加工比较, 脉冲电流加工精度明显高于直流加工, 前者更有利于改善及稳定加工间隙状态, 提高电解去除的定域性, 从而提高了复合加工的精度及表面质量。YG8 在不同电解加工电压下加工深度与表面粗糙度比较见图 6。

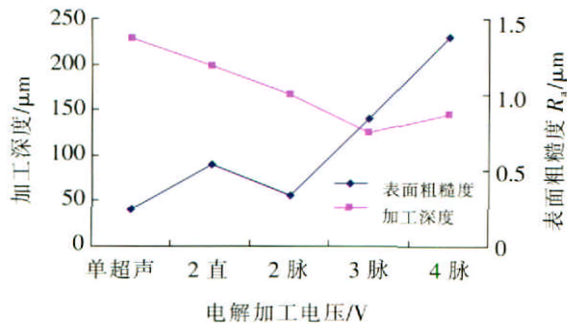


图 6 加工 YG8 时脉冲电压与加工深度、表面粗糙度的关系曲线

Fig.6 Relation curves of pulse voltage and working depth as well as surface roughness when YG8 machining

观察试件可见, 不等宽筋随加工深度增加, 宽度变小, 边缘直线度和平行度逐渐变差, 这可能起因于微细筋受磨粒不断撞击、悬浮工作液不断冲刷、排出的产物影响, 及电压电解杂散腐蚀的综合作用。

(2) 试验 2。

试验条件: 工件材料为 YT15; 采用等宽槽 (宽 0.4mm) 端面阴极工具头; 磨料为 1 600# 碳化硅, 磨料在悬浮工作液中的质量分数为 15%, 电解液为质量分数为 5% 的 NaNO_3 的水溶液; 电解加工脉冲频率为 5 000Hz; 占空比为 4:6V; 0V、2V 直流、2V 脉冲; 进给力为 0.8N; 加工时间为 2min。

加工效果如图 7 所示, 不同电压下 YT15 工件加工深度、加工误差与阴极磨损量比较如图 8 所示。

超声脉冲电流电解复合加工中, 阴极损耗量最小, 单一超声加工工具头损耗量最大, 原因是复合加工中超声振动的磨料去除了电解生成的强度远低于基体材料的钝化膜; 同时, 脉冲电流间歇性作用改善了电解加工过程, 及时更新电解液并排除产物, 减小了加工区磨料及产物混合物对阴极工具头的持续抛磨, 从而减小了阴极工具头损耗。

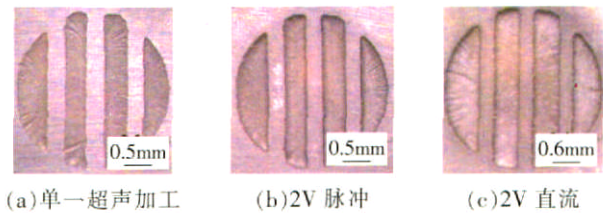


图 7 不同脉冲电压下加工 YT15 的等宽筋试件
Fig.7 Equal width rib specimen under different pulse voltage when YT15 machining

3.2 进给压力对加工的影响

在超声电解复合微细加工过程中, 阴极工具头对于工件应有合适的进给力, 才能达到最好的加工效果。实际加工中, 存在着一个提高加工效率的最佳工作压力。压力大小与加工面积、阴极工具头材料、工件硬度及脆性有关。

试验条件: $\phi 0.5\text{mm}$ 微轴型阴极工具头; 工件材料为 YG8; 磨料为 1 600# 碳化硅; 磨料在悬浮工作液中的质量分数为 15%, 另加质量分数为 4% 的 NaNO_3 的水溶液; 电解加工脉冲频率为 5kHz; 占空比为 4:6; 1V、2V 和 3V 脉冲电压; 进给力为 0.5N、1N; 加工时间为 2min。加工效果如图 9 所示, 进给力、电解加工电压对加工深度的影响见图 10。

由图 9 可见, 进给力偏小时, 加工深度很浅, 微孔未能完全成形, 进给力为 1N 效果较好, 但接触压力也不可太高, 否则易使阴极工具头个别微轴单元产生挠性弯曲, 造成工件微孔轴线偏斜或形状改变。保证工件表面与阴极工具头轴线的垂直度, 适当调节接触压力, 都能够避免此类现象发生。长时间使用的微轴型阴极工具头会出现磨损或材料粘接现象, 可用电火

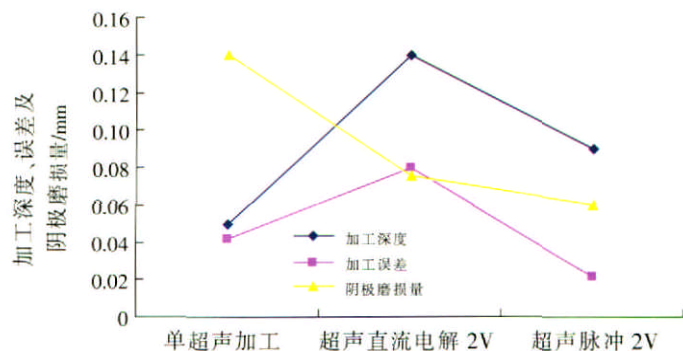
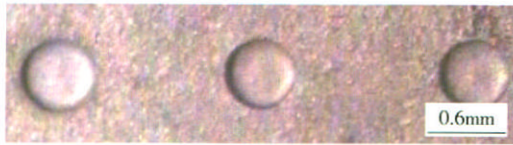


图 8 加工 YT15 时脉冲电压对加工深度、误差及阴极磨损量的影响

Fig.8 Effect of pulse voltage on machining depth, error and cathode wear on YT15



(a)进给力 1N,脉冲电压为 1,2,3V(从左到右)



(b)进给力 0.5N,脉冲电压为 1,2,3V(从左到右)

图9 不同进给力下的复合加工的试件
Fig.9 Specimen under different feeding forces in combined machining

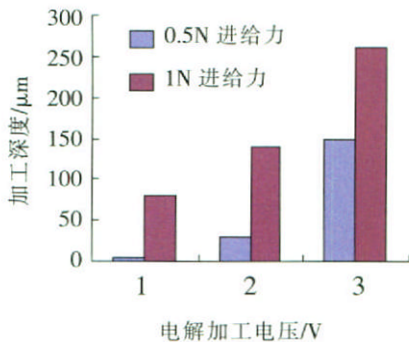


图10 进给力对复合加工的加工深度的影响
Fig.10 Effect of feeding force on machining depth in combined machining

花线切割或再次放电套形加工修整。

3.3 悬浮工作液对加工的影响

由机理分析可知,工作液中电解质质量分数对加工效果有很大的影响,质量分数过低对加工效率不利,较高的质量分数又可能使加工精度下降。由于微细加工材料绝对去除量很少,复合加工中的电解作用必须采用低电流密度来加以控制,所以宜选用低质量分数的 NaNO_3 钝化性电解液。

试验条件: $\phi 0.5\text{mm}$ 微轴型阴极工具头;工件材料为 YG8;磨料为 1 600[#] 碳化硅;磨料在悬浮工作液中的质量分数为 15%;电解加工脉冲频率为 5 000Hz,占空比为 4:6;2V 和 3V 脉冲电压;进给力为 1N;加工时间为 2min; NaNO_3 电解质质量分数分别取 4%、8%。

由图 11 可见,随着 NaNO_3 电解质质量分数的增大,加工深度增加,加工效率提高,微孔直径也略有扩大,但是较高的 NaNO_3 电解质质量分数会使材料去

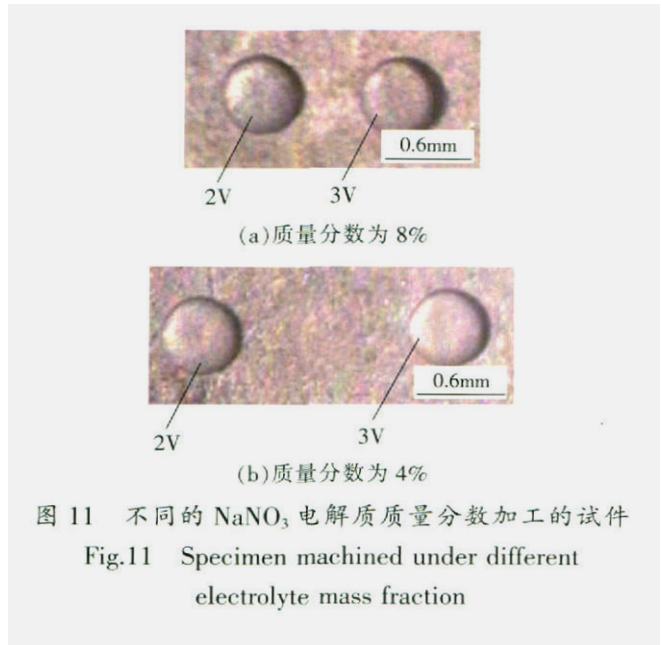


图11 不同的 NaNO_3 电解质质量分数加工的试件
Fig.11 Specimen machined under different electrolyte mass fraction

除区域性变差,加工精度有所降低。

4 结论

对硬质合金工件进行加工试验,得到以下结论:

(1)超声电解复合微细加工技术在微结构器件加工方面具有比单一超声加工、单一电解加工工艺更强的技术优势,能够获得较好的加工精度和表面质量。

(2)相对于单一超声加工,复合加工时阴极工具头磨损大大减小。

(3)硬质合金的超声电解复合微细加工生产率比单一电解加工高,有很好的经济效益。

超声电解复合微细加工技术在硬质合金成形中显示出显著的技术优势,研制出的阴极工具头及试验装置能很好地满足工艺要求。但对该工艺的研究还处于探索阶段,在理论 and 应用方面尚有许多问题有待研究。

参考文献

- [1] 彭福泉. 机械工程材料手册, 有色金属材料. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [2] Rusza A, Skoczypiec S, Czeka J, et al. Surface micro and nanofinishing using pulse electrochemical machining process assisted by electrode ultrasonic vibrations. Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining, 2007: 309-314.
- [3] 王建业, 徐家文. 电解加工原理和应用. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [4] 陈安骏. 超声电解复合加工在微器件制作中的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005: 1-72. (责编 未艾)