

制作微结构的超声复合加工机理

朱永伟 王占和 范仲俊

(扬州大学机械工程学院,扬州 225001)

摘 要 提出了制作微结构的超声复合加工方法,分析了超声、超声复合电火花、超声复合电解微细加工机理。用微细放电组合工艺制作了多种截形微细工具电极;完善试验系统,进行了多种材料、形状微结构超声复合加工试验。结果表明:超声加工是制作硬脆材料微结构的有效方法;超声复合电火花制作金属材料微结构有较好的精度及加工稳定性;超声复合电解加工兼有效率高、精度好的技术优势。

关键词 微结构,超声加工,电火花加工,电解加工,复合微细加工

Mechanism of Ultrasonic Combined Machining for Micro-Structures

Zhu Yongwei Wang Zhanhe Fan Zhongjun

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225001)

Abstract The methods of ultrasonic combined machining micro-structures are described. The micro-machining mechanism and characteristics of ultrasonic combined machining were analyzed. Several kinds of cathodes with different sections were manufactured by combined electro-discharge micro-machining. The micro-machining system was built and improved. The micro-structures were manufactured by combined ultrasonic machining. It is proved that ultrasonic machining is an effective method for micro-structures of hard and brittle materials. Good precision and machining process stability can be obtained by ultrasonic combined electric-discharge machining micro-structures of hard and tough metal materials. Good precision and high productivity can be obtained by ultrasonic combined electrochemical machining.

Key words Micro-Structure, Ultrasonic machining (USM), Electric discharge machining (EDM), Electrochemical machining (ECM), Combined micro-machining

1 引言

现代工业的发展,对产品小型化、微型化的要求日益迫切。微结构制作是微型机械实用化的技术关键。传统机械切削加工方法已很难实现精密微细零件的特殊加工要求,特别是高强度、高硬度、高韧性、高耐磨性的关键零部件的微细加工,必须采用微细特种加工方法^[1-2]。

本文设计了多种截面形状的微结构电极,对微结构进行了超声复合加工机理试验研究。

2 超声复合微细加工机理分析

2.1 微细超声加工机理

微细超声加工在成形工具和工件之间加入液体和微细磨料混合的悬浮液,工具以微小压力接触工

件,工具头作纵向超声振动,迫使悬浮液中的磨粒以很高速度和加速度持续撞击、抛磨被加工表面,表面产生众多细微裂纹,正负交变的液压冲击迫使工作液钻入被加工材料的微裂缝处,加剧了机械破坏及表面材料的剥落脱离;同时,工具端部的超声振动使磨料悬浮液产生“空化”现象,强迫工作液在加工间隙中循环流动、更新,并带走被粉碎的微细产物。因此微细超声加工是硬脆材料微结构制作的一种有效方法。

2.2 微细超声电火花复合加工机理

在电火花放电加工过程中,由于电场、介质、工件与电极表面状态变化,间隙物理过程很复杂,常产生短路、电弧放电,使有效的火花放电比率减少,从而降低了电火花加工效率;此外,由于表面张力、内聚力和

收稿日期:2008-03-19;修回日期:2008-06-27

基金项目:国家自然科学基金项目(50675192);江苏省研究生科研创新计划项目(CX07S_022z)

作者简介:朱永伟,1966年出生,博士,副教授,主要从事微细特种加工新技术研究。E-mail: ywzhu@yzu.edu.cn

固液材料之间的粘接力等作用,蚀除材料不能及时排出加工区,使加工效率进一步降低,电火花加工精度及表面质量变差。

如图 1 所示,电极和工件接入直流(脉冲)电压,以一定微压力接触,之间加入含微细磨粒的具有绝缘性能的工作介质,如无水乙醇,工具电极引入超声频振动,加工间隙中将产生脉冲性火花放电。电极与工件间存在最小间隙 Δ_{\min} ,约为单个磨粒直径,由于最小间隙的作用可有效避免放电短路。当电极与工件之间的间隙小于 Δ_{\max} 时,产生微细电火花放电加工。在火花放电的间隙,超声的空化和泵吸作用,可有效、及时去除产物,加速工作液循环,改善间隙放电条件,有效地避免电弧放电,提高有效脉冲利用率,改善加工精度、表面质量。此工艺适用于硬韧金属材料微结构加工。采用高频脉冲电源,放电时区,放电频率增加,超声作用效果更明显,更有利于提高加工精度与表面质量,但加工效率有所下降。

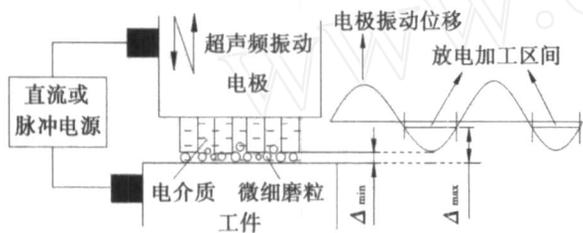


图 1 微细超声电火花复合加工原理图

Fig 1 Principle draft of combined micro-USM & EDM

微细放电加工过程及精度稳定性好,但去除机理是熔融、气化、爆炸抛除,表面有极薄热影响层,且局部放电作用强处,会有火花烧蚀,对表面完整性有影响,疲劳强度有所下降,交变载荷作用易产生表面剥落层,重要微结构制作须考虑此问题。

2.3 微细超声电解复合加工机理

超声电解复合微细加工机理如图 2 所示,加工过程中,采用低电压(1~5 V)、低浓度钝化电解液(如 5% NaNO₃ 水溶液),由于微电流电解作用,在工件表面产生极薄、强度远低于基体材料的电解钝化膜,可阻止低电流密度电解作用。

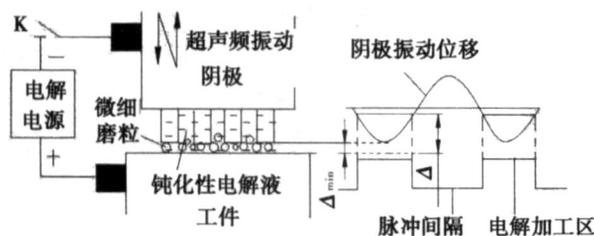


图 2 超声电解复合微细加工原理图

Fig 2 Principle draft of combined ultrasonic electrochemical micro machining

引入超声频振动、脉冲电流后,磨粒的冲击刮擦、高频振动冲击波及“负压空化”作用能有效消除钝化膜,并及时地排除间隙区的电解产物,改善及加强电解作用,使加工过程连续进行下去。

在微细阴极与工件间由于微细磨粒的存在,存在最小间隙 Δ_{\min} ,约为磨粒最大直径,使阴极与工件避免直接接触,发生电解短路。当阴极与工件间的间隙小于 Δ_{\min} 时,斩波开关 K 闭合,进行电解加工;反之,斩波开关断开,电解作用停止。

超声电解复合微细加工电解作用间歇进行,超声效应辅助及时去除电解产物、更新电解液,有利于改善和稳定电解加工的间隙状态,提高电解去除的定性,可避免通常大电流密度电解时产生的杂散腐蚀作用^[3-4],有效提高加工精度及表面质量。此工艺可实现金属导电材料微结构高精度、高效率微细加工。

此工艺去除材料机理主要是离子溶解(有微量超声加工效应),加工区磨粒保证阴、阳极最小间隙,不会电解短路,表面层质量将不受影响,具有很好的表面完整性与很小的表面粗糙度。此外电解具有效率高、阴极无损耗等特殊优点,因此该工艺可用于微结构的大批量制作。

3 微细工具头电极设计与制作

3.1 工具头电极设计

微细孔、微细槽、微细筋等微结构的平面、台阶成形是微细加工的基础,也是衡量加工微细三维结构能力的一种标志。本文设计了轴、槽、筋等形状微细工具电极,总体形状相似,但工具头端部形状和尺寸需要根据工件的加工的形状要求来设计(图 3)。

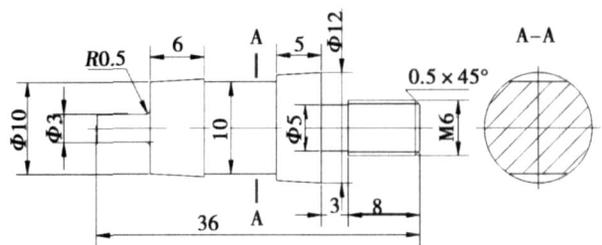


图 3 工具头外形设计图

Fig 3 Design draft of electrode outside forms

工具总体长度设计值不能超过工具系统材料中超声波传播波长的十分之一,工具径向尺寸不超过换能器小端的几何尺寸。工具头尺寸小,与换能器底部直径相差很大,因此工具外形设计为锥形,端部长度预留一定损耗修正量。工具头外形设计如图 3 所示,切割出 A-A 平面便于夹持、安装。

3.1.1 微细轴工具电极

微细轴工具电极设计如图 4 所示。制作直径 0.75 mm 微细轴可用于进行微孔超声加工试验。

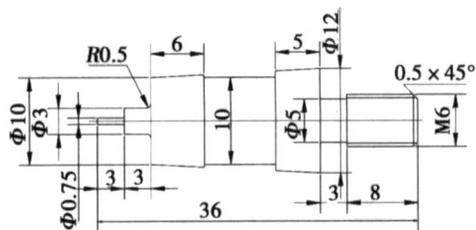


图 4 0.75 mm 微小轴电极设计图

Fig 4 Design draft of electrode of 0.75 mm micro axes

3.1.2 等宽与不等宽米字形筋工具电极

等宽及不等宽米字形筋设计如图 5 所示,长度为 3.0 mm。

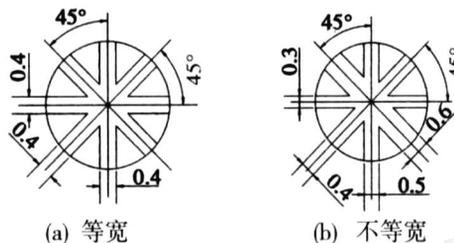


图 5 米字形筋工具电极端面设计

Fig 5 Reticle prealignment's designs on electrode's end

3.1.3 等宽与不等宽槽工具电极

等宽及不等宽槽设计如图 6 所示。

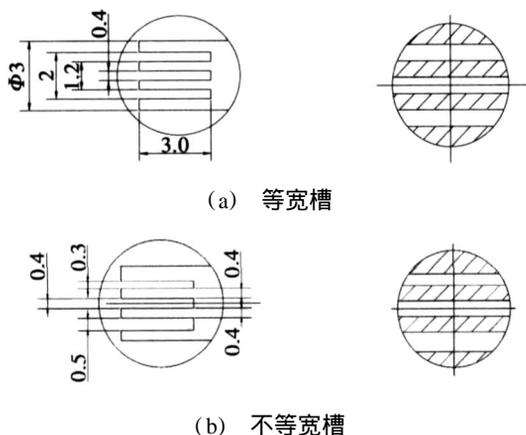


图 6 工具电极端面槽尺寸设计

Fig 6 Designs of electrode's end grooves

3.2 工具电极材料

制作微结构工具电极需要有足够的强度、良好的刚度及耐磨性,电加工时还须具备良好的导电性。调质 45#钢、工具钢或滚动轴承钢、淬火弹簧钢具有抗疲劳强度高、耐磨损、耐腐蚀的特点,考虑试验要求,选用调质 45#钢作为工具材料。

3.3 工具头电极制作

首先加工工具的形外,包括外形锥体、阶梯端面及螺纹。再用精密线切割加工出对称安装夹紧面,最后用组合电加工进行加工端面微结构制作。

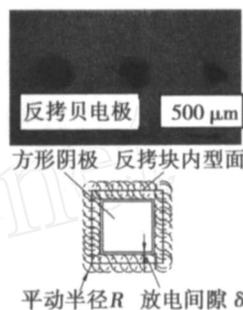
3.3.1 “反拷贝+平动”加工微轴工具头电极

如图 7(a)所示,用单体电极微细放电或微细线

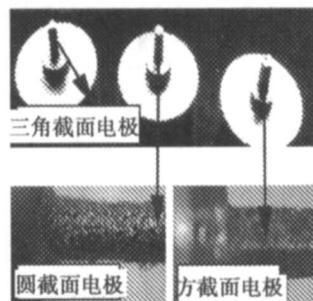
切割可加工出圆孔、方孔、三角孔等截面反拷贝电极,用微细电火花“反拷贝+平动”放电方式,改变平动头的平动半径 R ,可制作与母电极截面形状相同、尺寸为加工需要的各种微轴电极,见图 7(b)。

图 7(c)所示的 5×5 阵列孔母电极是由慢走丝微细线切割而成,利用精密电火花“拷贝+平动”放电方式可制作出图 7(d)所示的阵列微细轴电极。

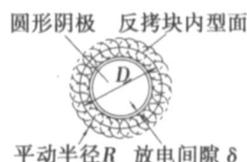
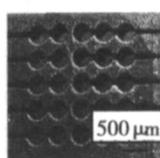
“拷贝+平动”放电加工工具尺寸较母电极内型尺寸减小值为:平动半径 R 与放电间隙 δ 之和的 2 倍。



(a) 反拷贝电极及平动放电



(b) 制作的微细轴工具



(c) 阵列孔电极及平动放电



(d) 阵列微细轴工具

图 7 “平动+反拷贝”方法制作微细工具电极

Fig 7 Making electrode by copy adding translation

3.3.2 “内、外面转换”放电加工工具头端部

首先微细电火花线切割加工方式制作米字形反拷贝电极,母电极材料采用紫铜,轴长 15 mm,然后利用专用夹具固定好待加工工具电极,将紫铜母电极夹

在数控电火花成形机 z 向主轴上,采用放电套料方法加工出等宽与不等宽两种米字形工具头电极。等宽与不等宽母电极及套料反拷加工出的米字筋工具头如图 8 所示。

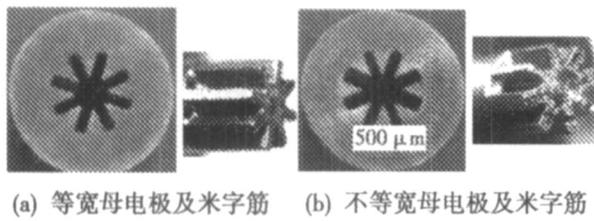


图 8 米字形电极显微照片

Fig 8 Micrograph of reticle prealignment electrode

3.3.3 微细线切割加工工具头端部

采用电火花微细线切割加工等宽槽、不等宽槽及十字沟槽端面工具头,如图 9 所示。

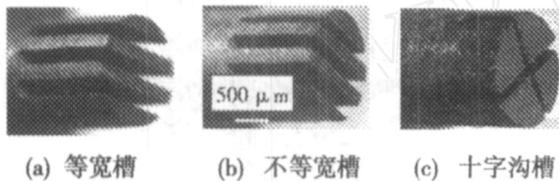


图 9 微细线切割制作的微细电极显微照片

Fig 9 Micrograph of electrode made by wire micro-EDM

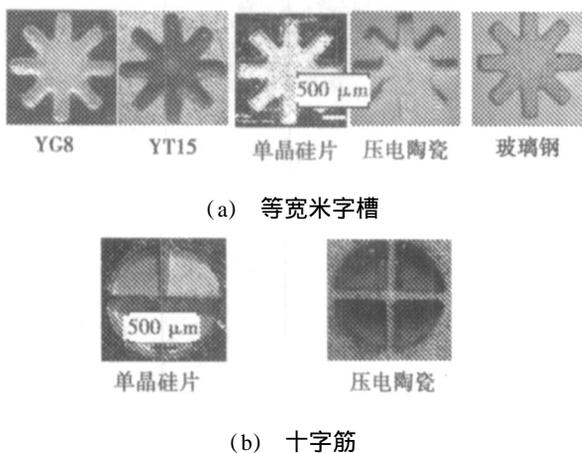
4 加工试验及结果分析

设备:精密超声加工机、脉冲电源、标定值 5 A/75 mV 电流传感器、双通道数字存储示波器等。

4.1 单一微细超声加工

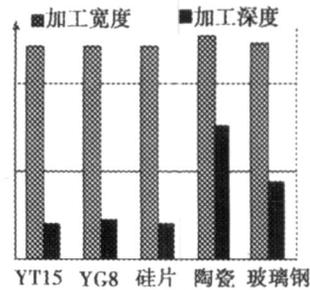
试件选用硬质合金 YG8、YT15、单晶硅片、压电陶瓷及玻璃钢;约 16 μm 碳化硅;磨料质量分数为 15%,工件与工具间静压力 0.80 N;加工时间 3 min。

采用图 8(a) 0.40 mm 等宽米字筋及图 9(c) 宽 0.30 mm 十字沟槽工具,单一超声加工出米字槽及十字筋显微照片如图 10(a)、(b) 所示。



(a) 等宽米字槽

(b) 十字筋



(c) 等宽米字槽工艺特性

图 10 单一超声加工照片及工艺特性

Fig 10 Micro-structures and properties made by USM

如图 10 所示,工件尺寸比工具有扩大,扩大量约为磨粒直径两倍,磨粒越细,成形精度越高;压电陶瓷超声加工效率越高,表面粗糙度小、三维成形精度较好。压电陶瓷、单晶硅片等硬脆性材料超声加工效率高,但易产生表面剥落、塌边,减小振幅及磨粒直径,提高安装精度可避免。

硬质合金、玻璃钢的加工精度和表面质量好,但加工效率很低,原因是硬质合金等材料硬度高、脆性小,且强度高、韧性好,超声加工效率低。

4.2 微细超声电火花复合加工试验

试件材料选用硬质合金 YG8、YT15;磨料 1 600 目碳化硅;加工介质为无水乙醇,含磨粒浓度 15%;工件与工具间静压力 0.80 N;加工时间 3 min。

试验中,调节超声频率系统保持在共振状态,工具端面产生雾化。加工电压与电流波形如图 11。

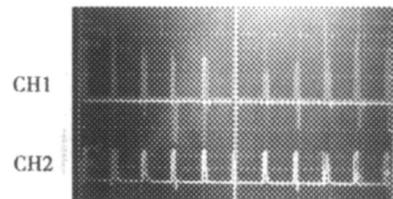


图 11 微细超声电火花复合加工电压与电流波形图

Fig 11 Voltage and current waveform of USM & EDM

CH1:放电电压 时基 50 μs/div,幅度 2.0v/div

CH2:放电电流 时基 50 μs/div,幅度 200.0mv/div

4.2.1 微细筋超声电火花复合加工试验

用如图 9 所示电极,超声电火花加工等宽微细筋见图 12(a),不等宽微细筋见图 12(b)、(c)。

在体视测量显微镜下观测可知,超声电火花复合加工的微结构形状和电极形状保持了较高的一致性,深度均大于单一超声加工。YT15 表面加工出现局部烧蚀,这是由于磨料及乙醇工作液供给不及时,造成局部频繁短路所致。调节超声振幅,减小放电参数,保证磨料工作液的有效供给,可避免火花局部烧蚀,提高微结构加工精度。

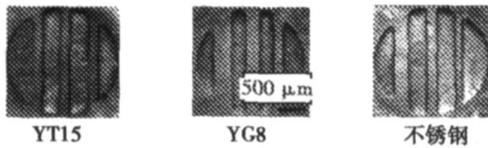


图 12 微细筋超声电火花加工显微照片

Fig 12 Micrograph of micro tendon made by USM & EDM

4.2.2 阵列孔超声电火花复合加工试验

采用如图 7(e)所示的工具头电极,加工得到的阵列微细孔显微照片如图 13所示。

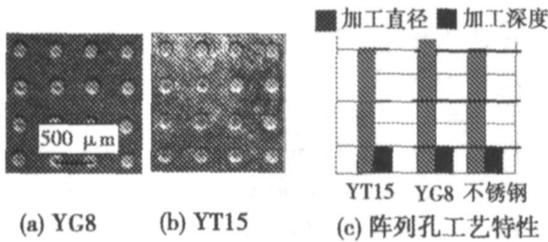


图 13 阵列孔超声电火花复合加工显微照片

Fig 13 Array hole and properties made by USM & EDM

如图 13(c)超声电火花复合加工微结构形状和电极形状保持了较高的一致性,深度大于单一超声加工。加工圆孔直径相对电极直径略有增加,原因一方面是磨粒超声抛磨及火花放电间隙的影响;另一方面,加工中工具电极存在微小横向振动,随着加工深度的增大,引起磨粒对边缘二次加工。

4.3 微细超声电解复合加工试验

图 14为微细超声电解复合加工系统原理图。

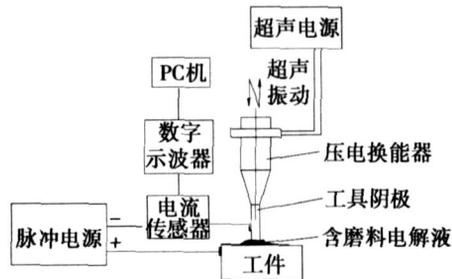


图 14 微细超声电解复合加工系统

Fig 14 Micro-machining system of USM & ECM

采用脉冲电源,浓度 5%钝化性 NaNO_3 电解液。在电解回路串入电流传感器,将加工电解电流通过数字存储示波器及 PC机记录和分析,对加工参数可在线调节,保证加工过程稳定、优化^[5~6]。

试件材料为硬质合金 YG8、YT15,磨料为 $16\ \mu\text{m}$ 碳化硅;电解液为 5% NaNO_3 水溶液,采用“静液”方式供给;工件与阴极间静压力 $0.80\ \text{N}$;加工时间 3 min;脉冲电压幅值 1、2、3、4 V;频率 5 kHz。幅值电压 4 V 复合加工双通道波形见图 15。

宇航材料工艺 2008年 第 5期

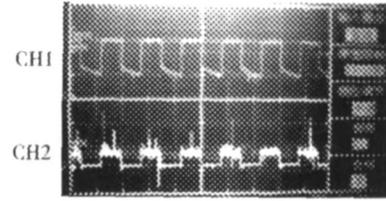


图 15 微细超声电解复合加工电压与电流波形图

Fig 15 Voltage and current waveform of micro-USM & ECM

CH1: 脉冲电压 时基 $100.00\ \mu\text{s}/\text{div}$, 幅度 $2.00\ \text{V}/\text{div}$

CH2: 电解电流 时基 $100.00\ \mu\text{s}/\text{div}$, 幅度 $50.00\ \text{mV}/\text{div}$

4.3.1 微孔超声加工及超声电解加工对比试验

采用 $0.75\ \text{mm}$ 微轴阴极,超声复合电解加工微细孔的显微照片如图 16所示。

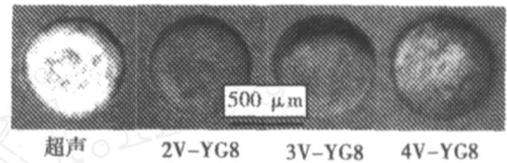


图 16 脉冲电压微小孔加工显微照片

Fig 16 Micrograph of micro holes with pulsed voltages

由加工显微照片可看出,单超声加工深度小,2 V、3 V加工精度及深度均较单超声加工好,4 V 电解加工深度、直径最大,精度下降,同时有轻微电解杂散腐蚀,表面质量及圆度精度也有所下降。

4.3.2 微细筋超声加工及超声电解加工对比试验

采用如图 9(b)所示工具头,加工不等宽微细筋显微照片如图 17所示。

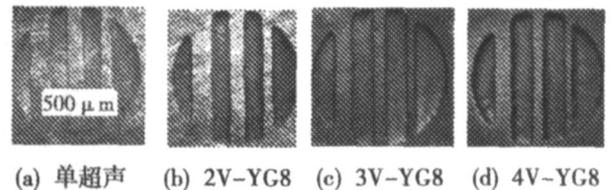


图 17 不等宽微细筋加工显微照片

Fig 17 Micrograph of micro tendon of different width

由图 17可看出,单纯超声方法加工效果较差,工件表面仅加工出工具痕迹,深度仅 $35.6\ \mu\text{m}$;而复合电解加工能清晰、精确复制电极端面形状,3 V 脉冲加工成形精度最好,加工深度 $117.7\ \mu\text{m}$,4 V 脉冲电解电流明显增加,深度达 $222.1\ \mu\text{m}$,电压升高,加工效率增大,但加工间隙与误差亦增加。

4.3.3 米字槽及十字筋超声电解复合加工试验

用图 8(b)、9(c)所示阴极,复合加工的不等宽米字槽及十字筋如图 18所示。

由图 18(a)看出,3 V 脉冲加工不等宽米字槽精度及表面质量最好,精度可达 $\pm 0.01\ \text{mm}$,直线度能达到 $\pm 1\ \mu\text{m}$,加工效率(深度)也最高。超声电解加工硬质合金精度及效率明显好于超声加工。

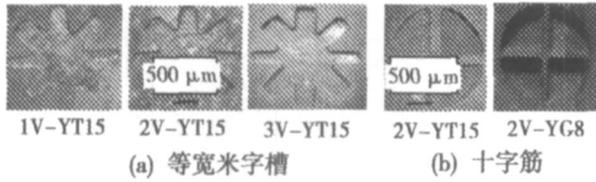


图 18 微细超声电解复合加工显微照片

Fig 18 Micrograph of micro-structures by USM & ECM

由图 18(b)看出,硬质合金 YT15加工效率(槽深度)低于 YT8,原因是 YT15含钛合金,电极电位、分解电压、组织强度及韧性高。

5 结论

(1)超声加工是制作硬脆材料微结构的有效方法,但在材料强度、韧性高及加工面积大时,加工效率低,又因工具相对损耗大,精度也较差。

(2)超声与微细放电复合,超声振动可有效改善放电过程,效率、精度及稳定性均较超声加工高,但放电作用会影响表面层完整性及疲劳强度。

(3)超声与电解复合,材料主要由电解方式以离子单位蚀除,超声作用主要是清除产物及更新电解液,具有效率高、精度好、表面质量佳的技术优势;加

工中可用微粉磨料,显著减小阴极抛磨损耗,提高耐用度,大批量制作优势明显,因此超声电解工艺是制作金属材料微结构的有效方法。

参考文献

- 1 曹凤国. 超声加工技术. 北京:化学工业出版社, 2004
- 2 Jia Zhixin, Zhang Jianhua. A i xing study on a new kind of combined machining technology of ultra-sonical machining and electrical discharge machining. Int J. Mach, Tools Manufact, 1997; 37(2): 193 ~ 199
- 3 朱永伟,徐玉明,齐金华. 超声—电解复合微细加工阴极制作工艺研究. 宇航材料工艺, 2007; 37(4): 46 ~ 49
- 4 Bhattacharyya B, Munda J, Malapati M. Advancement in electrochemical micro-machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004; 44: 1 577 ~ 1 589
- 5 Zhu Yongwei, Xu Yuming, Yun Naizhang. The test study of ultrasonical combined electrochemical micro-machining. In: 15th International Symposium on Electro-machining, Pittshurgh, USA, 2007: 493 ~ 498
- 6 朱永伟,王占和. 电解复合超声频振动微细加工机理与试验研究. 中国机械工程, 2008; 19(15): 1 786 ~ 1 992

(编辑 吴坚)

欢迎订阅 2009年《材料导报》(半月刊)

《材料导报》创刊于 1987年,是由科学技术部主管、科技部西南信息中心主办的中国科技论文源统计期刊,中国科学引文数据库来源期刊, CNKI期刊全文数据库收录期刊。

《材料导报》将于 2009年全面改版,由月刊改为半月刊,分为《材料导报》(综述篇)和《材料导报》(研究篇)。

《材料导报》(综述篇)每月 10日出版,主要栏目有:材料科技发展评述、材料科技政策、新材料新技术介绍、信息发布、专题评论、人物专访及专稿、材料产业论坛、会议报道、国际动态及快讯等。

《材料导报》(研究篇)每月 25日出版,主要栏目有:研究简报、材料加工工艺与应用、材料分析测试与表征、材料设计计算机模拟、博士论文摘要、新成果转化及产业化等。

《材料导报》全年 24期,每期约 30万字,国内外公开发行人。刊号: ISSN 1005 - 023X CN50 - 1078 /TB, 邮发代号: 78 - 93, 广告经营许可证: 渝工商广许可号 020530号, 定价: 12.00元/册。

欢迎各订户到当地邮局定购。漏订者,可直接向材料导报社补订。

通讯地址:重庆市渝北区洪湖西路 18号 材料导报社 邮编: 401121

电话/传真: 023 - 63505701 E-mail: mat - rev@126.com ; mat - rev@163.com

开户银行:重庆银行七星岗支行

户名:重庆天旭科技信息有限公司(材料)

帐号: 150101040006888

欢迎订阅、投稿和刊登广告