

# 微细电解射流喷射装置研制与工艺试验

黄巍 赵建社 李昞晖 张立鑫 徐坤

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

**文 摘** 为提高微细电解射流加工效率及加工质量,研制了专用喷射装置,并利用该装置进行了初步工艺试验。结果证明该装置保证了电解液在其腔体中能够得到充分“负极化”,且能获得满足加工要求的稳定破碎长度,满足了电解射流加工试验要求。

**关键词** 电解射流加工,喷射装置,负极化,破碎长度,微细电解加工

## Development and Technological Test of Micro Electrochemical Jet Machining Device

Huang Wei Zhao Jianshe Li Binghui Zhang Lixin Xu Kun

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** Micro electrochemical jet machining (EJM) possesses some unique advantages, such as high efficiency and good machining surface quality. For improving the efficiency and machining quality, a special jet device was designed and manufactured, and preliminary processing experiments were performed with the device. The results show that electrolyte can be sufficiently “cathodic polarized” in the cavity of the device and the stable breakup length of electrolyte stream is long enough to machine, so the device meets the requirements for processing experiments.

**Key words** Electrochemical jet machining, Injection device, Cathodic polarization, Breakup length, Electrochemical Micromachining

### 1 引言

随着精密器械产品朝着高性能、高可靠性以及集成化的方向快速发展,在产品零件中出现了大量形状各异的微结构,对于航空航天、精密器械产品中广泛存在的尺寸为  $100\ \mu\text{m} \sim 1.5\ \text{mm}$  的微细孔、窄槽、细缝、微型凹坑、微细刻痕等微结构的加工<sup>[1]</sup>,目前已经发展了多种微尺度加工方法,主要有微细切削和微细特种加工技术,其中微细特种加工技术占据主导地位,主要包括微细电火花加工、微细电解加工、激光加工、LIGA技术、电子束加工、离子束加工以及它们的复合、组合加工<sup>[2-3]</sup>。每一种制造技术都有其显著的优点,也有其自身的局限性。微细电解射流加工是基于电化学阳极溶解原理,以离子为单位去除材料,如果结合机床数控运动,可实现微细孔、窄槽、细缝、微型凹坑、微细刻痕等各种微结构的高质量加工,具备较高的加工柔性。电解液喷射装置是电解射流加工系统中的关键部件之一,直接决定了整个加工系统的可靠性和适用性,从而影响加工的深径比、加工尺寸和形状精度。

### 2 加工原理

微细电解射流加工工艺是在电液束小孔加工的基

础上发展起来的,是一种基于电化学阳极溶解原理的减材加工技术。电解射流加工过程中,被加工工件接正极,喷射装置接电源负极,在正、负极之间加上高压直流电场。液压泵将净化了的电解液压入电解液喷射装置中,电解液在喷射装置腔体内被充分“负极化”后,经过喷嘴形成具有稳定破碎长度的电解液射流束,射向工件的待加工部位,在喷射点上产生电化学阳极溶解,进行微小孔、窄槽、微凹坑的加工。其加工原理如图1所示。

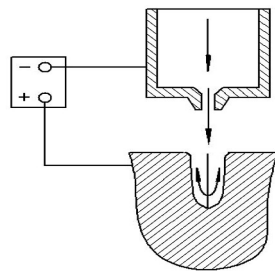


图1 电解射流加工原理图

Fig. 1 Principle scheme of EJM

加工过程中,喷射装置采用不进给或微量进给的方式(在 $z$ 向进给轴带动下,喷射装置可做小于等于初始间隙的进给运动),而喷嘴并不深入加工区域就

收稿日期:2009-10-22;修回日期:2009-12-03

基金项目:国家大学生创新性实验计划项目(081028705);江苏省自然科学基金项目(BK2008394);航空基金资助项目(20080352008);国家自然科学基金资助项目(50675103)

作者简介:黄巍,1988年出生,主要进行了电化学加工新技术方面的研究。E-mail:huangwei089@hotmail.com

能够加工出具有一定深宽比的微结构,还可借助工作台的平面运动实现微细型孔、窄槽、细缝、微型凹坑、微细刻痕等各种微结构的高质量加工,从而提高电解射流加工的柔性。在工件材料去除过程中,工件阳极上的金属原子不断地失去电子成为离子而从工件上溶解,其材料的减少过程是以离子为单位进行,而金属离子的尺寸非常微小,因此,这种微溶解去除方式使得电解加工技术在微细制造领域有着很大的发展潜力和应用前景,而且微尺度电解射流加工还具有被加工材料适应范围广、加工中无宏观切削力、加工表面质量好、具有三维微结构加工能力、工具阴极不损耗、可实现多样化加工工艺等独特的优点<sup>[4]</sup>。

### 3 喷射装置设计

#### 3.1 设计要求

为实现各种微结构优质高效的电解射流加工,其喷射装置必须满足一定的工艺要求。由于电解射流加工采用不进给或微量进给的方式,为提高所加工小孔的深径比,改善小孔的圆度和锥度,喷射出的电解液束必须具有满足要求的稳定破碎长度;为提高加工效率,电解液在喷射装置中必须得到充分“负极化”;另外,为避免喷射装置与工件间在加工中发生火花放电现象,减少杂散腐蚀,防止电解液泄漏等,则还需解决喷射装置与工件间的绝缘和密封问题<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 结构设计

专用的电解射流喷射装置系统见图2。

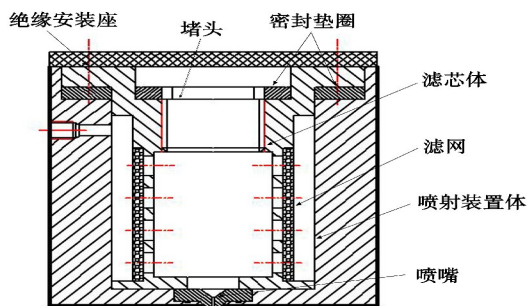


图2 电解射流喷射装置

Fig.2 Electrolyte jet equipment of EJM

工作时,电解液经过进液连接件进入滤芯体与喷射装置壳体形成的环形槽中,充满环形槽后,在压力作用下透过滤网进入滤芯体的内腔体,最终经由喷嘴射向工件的待加工位置。主要设计的结构如下。

(1)喷嘴设计,喷嘴是电解射流喷射装置形成电解液束的重要元件,喷嘴的好坏直接影响到电解液束的质量,进而影响到加工微结构的质量。本装置中的喷嘴并没有采用电液束小孔加工中使用的玻璃喷嘴,避免了加工过程中玻璃喷嘴容易破碎的现象,而是采用组合式喷嘴结构,即喷孔部分采用耐磨的人造宝石制成,而其他部分则用不锈钢加工而成,二者组合成一个完整的喷嘴,导电性能好,且不容易损坏,提高了加工稳定性;内部流道选用圆锥收敛型,为优化喷嘴

流道,运用仿真软件进行了喷嘴参数(锥角、毛细段的长径比)对喷射液束质量影响的数值模拟,优化喷嘴参数,使其喷射液束能够满足电解射流加工要求。

(2)滤芯体设计,滤芯体在整个装置中是实现电解液在形成射流束前对电解液进行过滤、充分“负极化”并消除由液压泵等压力元件引起的脉动现象的关键元件。滤芯体下端圆柱表面为均匀分布的圆孔,滤网包裹在滤芯体外圆柱面上,一起安装于喷射装置壳体的圆柱形腔体内,并将该喷射装置壳体的腔体分成两部分。电解液进入喷射装置后,滤芯体将喷射装置壳体的腔体分成了内腔体和外腔体,滤网的存在使得内外腔体间电解液流动需要克服较大阻力,能有效对电解液过滤并减轻,甚至消除脉动现象。滤芯体采用黄铜材料,导电性好,加工中滤芯体直接与电源负极相连,电解液充满滤芯体的内腔体,在高压电源作用下使电解液被充分“负极化”,提高电解射流加工效率。

除此之外,喷射装置壳体采用有机玻璃制作,喷嘴外表面喷涂绝缘漆,保证了装置的整体绝缘,避免了工件表面的杂散腐蚀及短路放电等情况的发生。滤芯体、喷射装置壳体都与绝缘安装座相连,通过绝缘安装座与z向进给轴相连,保证了与机床的绝缘。喷嘴安装在喷射装置壳体底部圆柱形凹槽内,并由滤芯体轴向固定。整个电解射流加工装置结构简单、使用方便。

### 4 工艺试验

#### 4.1 试验系统

电解液喷射装置与电源、电解液循环过滤系统、工件安装固定及工作台运动控制系统组成了微细电解射流加工的试验装置系统,如图3所示。

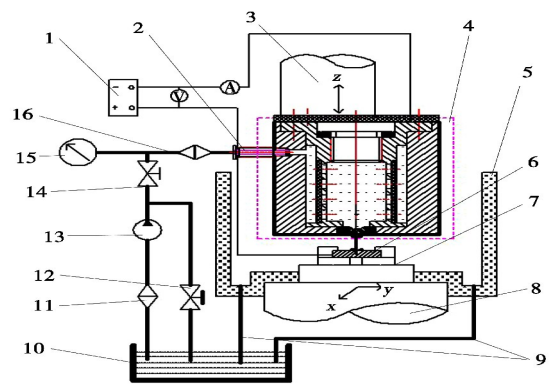


图3 电解射流加工试验系统

Fig.3 Machining system of EJM

1-电源;2-进液连接件;3-z向进给轴;4-电解射流喷射装置;5-工作箱;6-工件;7-夹具;8-x,y双向进给工作台;9-回液管;10-电解液槽;11-一级过滤器;12-溢流阀;13-液压泵;14-球阀;15-液压表;16-二级过滤器。

加工时电解液在液压泵作用下经过两级过滤系统,从进液连接件进入电解液喷射装置,经过滤芯体过滤及稳压后,从喷嘴高速射向工件的待加工表面,最后流入工作箱底部,经由回液管回流至电解液槽。

#### 4.2 喷射液束破碎长度的测量

将喷射装置中零件堵头(图4)的结构进行特殊的处

理,采用红色激光与电解液束同轴喷射,利用激光在液束中是否发生折射的原理,测量喷射液束的破碎长度。红色激光束可通过柱塞上的孔,透过光学玻璃,与电解液束一起从喷嘴射出,当激光束在液束中发生全反射时,液束为透明状态,说明该段液束没有发散,当激光在液束中发生折射时,液束为红色,说明此时液束发生破碎。图5为孔径为0.6 mm喷嘴的破碎长度检测图。

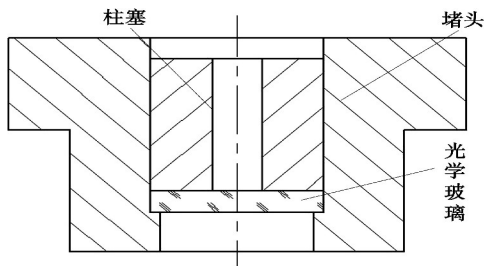


图4 堵头  
Fig. 4 Plug

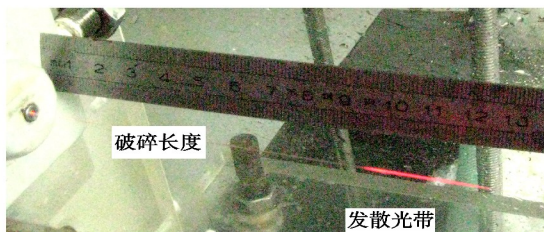


图5 破碎长度检测图

Fig. 5. Detection scheme of breakup length

喷射压力为0.3 MPa,液束的破碎长度约为85 mm,对于孔径在0.1~1.0 mm的喷嘴,其破碎长度经检测一般能保持在70~100 mm,最长可达125 mm。由此可见,设计、制造的一系列喷嘴完全能够满足加工要求。

### 4.3 结果及分析

#### 4.3.1 加工初始间隙对加工质量的影响

利用试验系统(图3)对不锈钢进行了打孔试验。电解液采用工业NaNO<sub>3</sub>,质量分数为20%;压力为0.6 MPa;喷嘴孔径0.6 mm;试件厚度为0.5 mm的不锈钢片;电压为600 V。通过改变初始间隙,将不同的加工间隙下的打孔质量做对比分析。初始间隙为2 mm时,加工孔入、出口直径分别为1 356和926 μm;初始间隙为4 mm时,加工孔入口直径为1 358 μm、出口直径857 μm;初始间隙为10 mm时,加工孔入口直径为1 512 μm、出口孔径为1 017 μm。现有研究的工艺试验中采用加工间隙一般为2~4 mm。由以上数据可见,加工间隙为10 mm时的小孔入口直径是加工间隙为2~4 mm时的小孔入口直径的2.11倍,由此证明该喷射装置喷射出的电解液射流束能够获得满足加工要求的稳定破碎长度,且喷射液束的直径稳定。

#### 4.3.2 加工电压对加工效率的影响

采用初始间隙为4 mm,其余试验条件与上述一致,通过改变加工电压,测量打通试件所需的时间。图6给出了打通时间随加工电压变化的关系曲线。

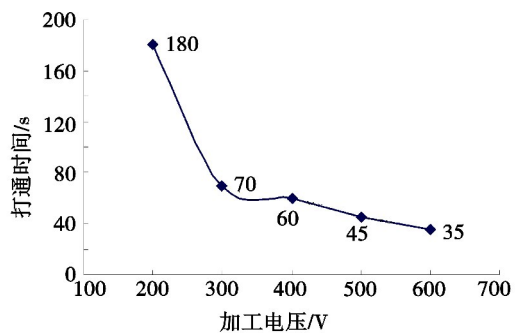


图6 加工电压对打通时间的影响

Fig. 6 Influence of machining voltage on average time of piercing

可以看出在加工条件相同时,打通时间随着加工电压的增加而减少;加工电压>300 V时的打通时间减小的速率小于加工电压<300 V时的。由于加工电压增大,电解液的“负极化”程度增高,工件阳极电化学溶解速度加快,加工效率相应提高。加工过程中,当电压>300 V时,加工区域出现辉光放电现象,此时会有特殊的电解或者还有其他去除材料作用的复合加工作用于加工区域,大大提高加工效率,此时加工电压的增大对加工效率的影响变小。试验证明加工时电解液在喷射装置腔体中能够被充分“负极化”。

### 5 结论

为开展微细电解射流加工技术研究,研制了一种新型的电解射流加工喷射装置,其中滤芯体的结构设计,使得不仅增加了一级过滤功能,提高过滤效果,而且能有效消除电解液脉动现象。通过将红色激光与电解液束同轴喷射,利用激光在液束中是否发散的原理测量出喷射液束的破碎长度一般在70~100 mm,最长可达125 mm。并利用该装置系统进行了初步打孔试验,通过改变初始间隙观察对所加工孔径及孔形,结果证明该装置能获得直径稳定的喷射液束;通过改变加工电压测量其对应的打通时间,打通时间随着加工电压的增加而减少,且当电压>300 V时,加工区域就会出现辉光放电现象,证明了电解液在其腔体中能够得到充分“负极化”,从而获得较高的加工效率,为以后更深入的研究奠定基础。

### 参考文献

- [1] Yu Z, Hu X, Rajurkar K P. Influence of debris accumulation on material removal and surface roughness in micro ultrasonic machining of silicon[J]. *Annals of the CIRP*, 2006, 55(1): 201-204
- [2] 贾宝贤,王振龙,赵万生. 基于特种加工的微小孔加工技术[J]. *电加工与模具*, 2005(2): 1-5
- [3] 陈伦生,李刚,赵万生. 微细特种加工的最新研究进展[J]. *电加工与模具*, 2006(3): 24-28
- [4] Risko D G. Electrolytic micromachining using fixed position cathodes. 15<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining (ISEM) proceedings, Pittsburgh, USA, 2007: 359-364
- [5] 航空制造工程手册. 特种加工[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993

(编辑 吴坚)