

超声辅助等离子体中微细电火花加工技术研究*

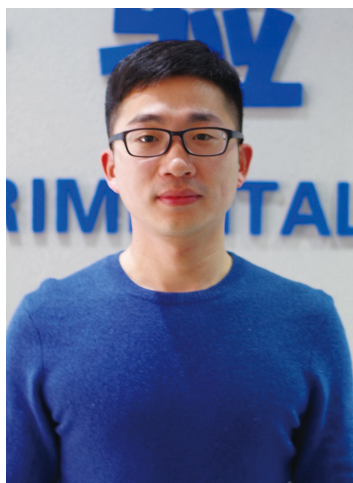
张从阳, 邹日貌, 余祖元

(大连理工大学机械工程学院, 大连 116024)

[摘要] 冷等离子体射流中微细电火花加工在一定程度上获得了比纯气体介质中更好的加工性能。然而由于放电脉冲能量小, 造成放电间隙小, 使得电蚀产物排出困难, 短路、拉弧等不正常放电现象仍然频繁发生, 严重影响了加工的质量和稳定性。为此, 提出在工件上施加超声振动的方法以改善冷等离子体射流中微细电火花加工过程的稳定性, 并探究其加工特性。针对电火花加工的击穿距离、材料去除率、表面粗糙度以及工具电极相对损耗率等工艺指标, 进行了工艺试验。试验结果表明: 工件施加超声振动以后, 熔融的电蚀产物更容易从工件表面剥离; 当以冷等离子体和压缩空气混合射流为加工介质时, 超声辅助等离子体中微细电火花加工性能得以明显改善, 材料去除率提高 13%, 表面粗糙度降低 19%, 电极相对损耗率降低 13%。

关键词: 超声振动; 微细电火花加工; 击穿距离; 冷等离子体射流; 混合射流

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.11.032



张从阳

硕士研究生, 主要从事微细加工、微细电火花加工和冷等离子体射流中的微细电火花加工机理与方法等相关研究工作。

放电介质作为电火花加工的关键因素, 直接影响电火花加工的效率、精度和质量。煤油因具有良好的绝缘性能, 早期被广泛用作电火花加工放电介质, 但煤油作为可燃物, 在放电加工过程中存在火灾隐患; 并且在加工过程中煤油受热还会产生一些对人和环境有害的气体。国内外学者针对煤油存在的问题, 对其他介质做了大量的研究。通过对水基工作液电火花加工的研究试验, 范广信等^[1]验证了水基工作液在安全、经济、绿色以及加工速度和表面加工质量方面均优于煤油。尽管如此, 油基工作液和水基工作液作为放电介质进行电火花加工时, 工具电极损耗皆非常严重, 很大程度上限制了微细电火花加工所能达到的加工精度。也有许多学者提出采用混粉和雾气

作为放电介质, 并进行了大量的探究性研究。虽然这两种介质在一定程度上改善了电火花加工的性能, 但加工过程中工具电极损耗仍十分严重; 此外, 所用工具电极皆为管电极, 细小尺寸的管电极制备难度较大。因此, 这两种介质也很难应用于微细电火花加工中。Kunieda 等^[2]提出了将气体作为电火花加工的放电介质, 通过试验, 验证了气体作为放电介质的可行性; 并得出了气中电火花加工工具电极损耗率接近于零的结论。为了改善气中电火花加工的特性, Kunieda 等^[3]利用压电驱动器来控制气中电火花放电间隙, 使得加工速度进一步提高。基于气中电火花加工材料去除率高, 工具电极损耗小等优点, Yu 等^[4]通过硬质合金三维铣削加工试验, 对比干式电火花加工

* 基金项目: 国家自然科学基金(51475075, 91860134)。

和油中电火花加工的特点,获得了干式电火花铣削更适合硬质合金的铣削加工的结论。相比其他介质,气体作为放电介质虽然具有工具电极不损耗的优势,但气中放电加工也存在放电间隙小、电蚀产物排出困难、短路和拉弧等非正常放电现象的频繁发生。为此,邹日貌等^[5]提出采用大气压冷等离子体射流作为电火花加工介质,并且通过试验,验证了冷等离子体射流中微细电火花加工的可行性。晏成洋^[6]采用晶体管脉冲电源对氮气等离子体射流(Nitrogen Plasma Jet, NPJ)中微细电火花加工特性做了进一步探究,通过对比氮气等离子体混合氧气射流和氮气等离子体加压缩空气射流(Nitrogen Plasma Jet Aided by High Velocity Air Jet, NPJ+HVAJ)中的微细电火花加工特性发现,氮气等离子体加压缩空气射流中微细电火花加工的质量更好。有研究表明:等离子体射流中微细电火花加工和气中微细电火花加工相比,前者的放电间隙更大,加工质量更好,加工速度更快^[7]。由此可见,等离子体射流作为放电介质很大程度上改善了气体介质在电火花加工中存在的不足。然而,相比液体介质,等离子体射流仍存在放电间隙小、短路率高、加工不稳定、材料去除率低等与气体介质类似的问题。

复合加工是一种把多种加工方法结合起来共同实现对材料去除的加工技术。该技术综合了各种加工方法的优点,为以往一种加工方法很难完成的加工提供了有效的解决方案。超声振动辅助电火花加工技术就是复合加工技术的其中一种。法国的 Kremer 等^[8]对超声电火花加工性能的影响做了系统研究,结果表明,超声振动缩短了加工时间,提高了电火花放电效率和加工稳定性,从而大大提升了电火花加工的性能;另外加工表面质量也得到了很大程度上的改善。Yu 等^[9]提出采用电极

摇动同时在工件上加载超声波振动的新方法,成功地在 3.5mm 厚的不锈钢板上加工出平均直径为 120 μm 的通孔,深径比达到 29。Zhang 等^[10-11]通过试验探究了超声振动辅助气中放电加工,试验表明,超声振动辅助气中电火花加工的材料去除率比单纯的气中放电加工高,减少了短路现象的发生,提高了加工过程的稳定性。

综上所述可知,等离子体射流作为一种新型电火花放电介质,具有其他气体介质所不具备的优势,但也存在放电间隙小、短路频繁、加工不稳定等不足。超声振动辅助电火花加工可从很大程度上改善电火花加工

性能。因此,为改善等离子射流中微细电火花加工存在的不足,本文提出了采用超声振动辅助等离子体中微细电火花加工的新方法,并通过工艺试验对该方法的加工特性进行了研究。

试验及方法

1 试验装置

试验采用自主研发的超声振动辅助等离子体中微细电火花加工机床,如图 1 和 2 所示,分别为试验装置示意图和实物图。该机床主要由机床主体部分、XYZ 伺服运动平台(分辨率为 0.1 μm ,重复定位精度为 1 μm)、超声振动装置、RC 弛张式脉冲电路和放电检测回路(图 3)、

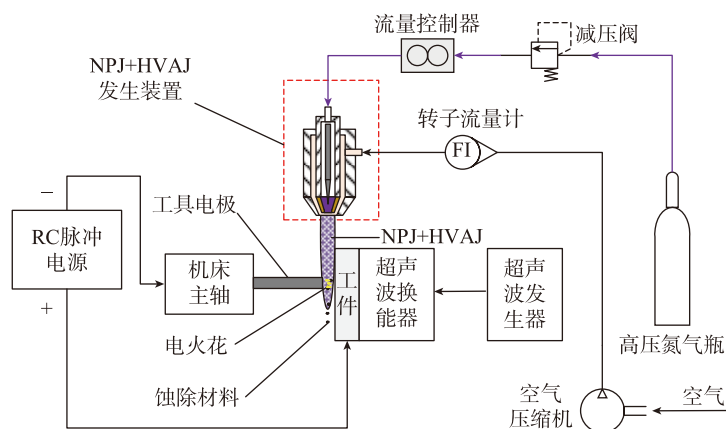


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

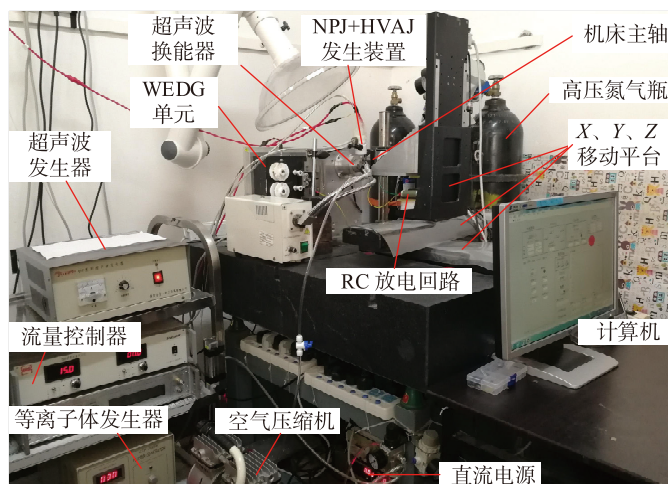


图2 试验装置

Fig.2 Experimental equipment

WEDG 单元以及 NPJ+HVAJ 发生装置^[12]等部分组成。

其中,线电极磨削技术(Wire Electrical Discharge Grinding, WEDG)可实现工具电极的在线制备。NPJ+HVAJ 发生装置可单独产生 NPJ 介质和 NPJ+HVAJ 介质,以满足工艺试验的要求。超声振动装置由超声波发生器和超声波换能器组成。发生器为模拟电路超声波发生器,可产生频率为 35kHz 的正弦波电信号;换能器为压电式,振幅范

围为 0.3~3 μm 。

2 试验方法

本文试验内容是在前期研究内容的基础上^[7],对等离子体射流中微细电火花加工施加超声振动,进行了一系列工艺试验。通过对比试验现象,研究超声振动对加工性能的影响。

2.1 实施方案

超声振动辅助电火花加工主要有两种形式,即工件振动和工具电极振动。本文试验采用工件振动的形

式来实施工艺试验。

为了与前期的研究试验结果进行对比,本文中的试验也是在 H62 黄铜片上进行竖槽铣削加工,如图 4 所示。竖槽长度为 350 μm ,进给总深度为 30 μm ,槽宽由实际电极直径和放电间隙决定。加工时,介质射流(NPJ 或 NPJ+HVAJ)沿着竖槽的槽形方向被吹入到放电间隙,保证了在加工过程中介质射流可充满整个加工区域。

试验加工参数设置如表 1 所示;试验主要分为 3 个阶段,具体试验内容如表 2 所示。

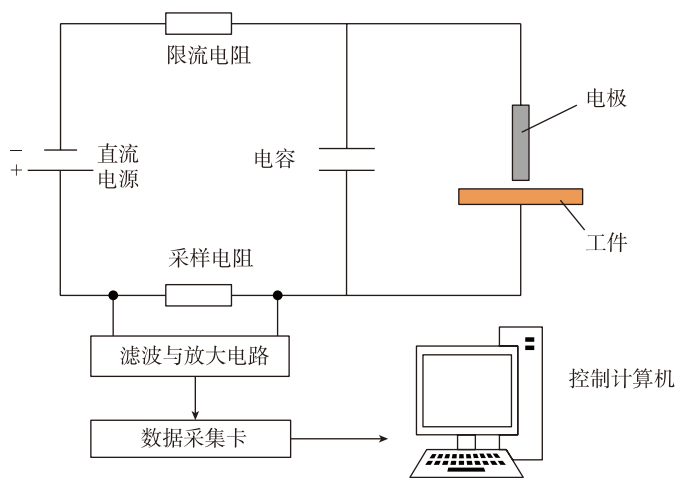


图3 脉冲放电及检测电路原理图

Fig.3 Schematic diagram of pulse discharge and detection circuit

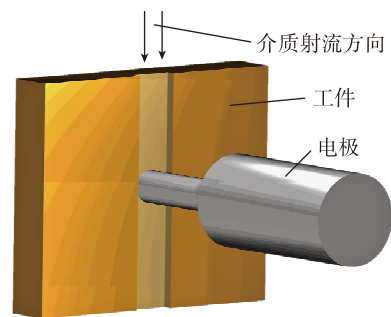


图4 铣削竖槽示意图

Fig.4 Schematic diagram of milling vertical groove

表1 加工参数设置

Table 1 Machining parameter setting

参数	设置
脉冲电源	RC 式脉冲电源
工件材料	H62 黄铜
工具电极材料	钨
工具电极直径/ μm	70 \pm 10
工具电极转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	600
电极进给深度/ μm	30
层厚/ μm	1
电极跨距/ μm	500
放电介质	NPJ、NPJ+HVAJ
电压/V	100、80
电容/pF	8200、3300、470
超声振动频率/kHz	35
振幅/ μm	1

表2 不同加工阶段试验内容

Table 2 Experiment content of different machining processes

试验阶段	加工介质	介质流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	电压/V	电容/pF	辅助方式
击穿距离探测	NPJ	15	100	8200	—
			80	3300	—
			80	470	—
			100	8200	超声振动
			80	3300	—
			80	470	—
竖槽铣削加工1	NPJ	15	100	8200	超声振动
			80	3300	
			80	470	
竖槽铣削加工2	NPJ+HVAJ	65	100	8200	超声振动
			80	3300	
			80	470	

2.2 加工性能衡量指标

(1) 击穿距离^[7]。

如图4所示,本文所做的工艺试验为竖槽铣削加工,即利用工具电极端部对工件进行电火花放电加工。在加工过程中,电极端部与工件加工表面的放电间隙是电火花加工的一个重要指标,直接影响加工过程稳定性和加工精度。为了比较施加超声振动前后对等离子体射流中微细电火花加工放电间隙的影响,本文采用了测量击穿距离的方法,比较放电间隙的变化。击穿距离的探测原理如图5所示。为了比较准确地探测出放电间隙,本文采用了数字示波器、电流探头和电压探头来探测放电信号。在探测试验开始前,首先利用电接触法探测出工件表面的位置并设置零点。当设置完零点以后,将工具电极后退至距离工件表面 $60\mu\text{m}$ 处,并把电路中电参数设置为加工电参数。然后工具电极以 $1\mu\text{m}$ 的步长向工件表面进给,直至示波器捕捉到放电信号。此时电极端部与工件表面的距离即为击穿距离。

(2) 工艺指标。

电火花加工性能通常从加工速度、工件加工表面质量以及工具损耗来评价。本文选用了材料去除率(Material Removal Rate, MRR)、加工表面粗糙度 R_a 和工具电极损耗率(Tool Wear Ratio, TWR)作为衡量加工性能的指标。

结果与讨论

1 NPJ 介质中击穿距离对比

为了分析超声振动施加前后对等离子体射流中微细电火花加工放电间隙的影响,对NPJ中电火花加工的击穿距离进行了测量,结果如图6所示。从图6中可以看出,施加超声振动以后,NPJ中的击穿距离呈增大的趋势,并且随着加工能量变大,击穿距离增大的趋势更加明显。当开路电压 100V —电容 8200pF

($100\text{V}-8200\text{pF}$)时,施加超声振动后NPJ中微细电火花加工的击穿距离增大了 $1\mu\text{m}$,约为未施加超声振动时的20%。然而,从误差线可知,测得的数值分布范围较大,考虑移动平台的精度为 $1\mu\text{m}$,无法得出准确的结论。因此,虽然平均击穿距离值增大了,但这种增大效果不明显。

关于施加超声振动对电火花加工放电间隙影响的研究,有学者认为:施加超声振动后,加工过程的平均放电间隙将大于最大放电间隙。

原因是:工件施加超声振动以后,工件与工具电极端面的距离在每个振动周期内都存在一个间隙最大值和间隙最小值。当两极间隙最小值小于等于最大放电间隙时,极间介质便能被击穿形成放电通道。由于放电加工过程为自持放电,即使极间间隙在超声振动的作用下变大甚至大于最大放电间隙,极间仍能保持正常放电状态^[13]。但由于本文试验研究的是等离子体射流中微细电火花加工,放电间隙小(仅有几 μm),放电能量

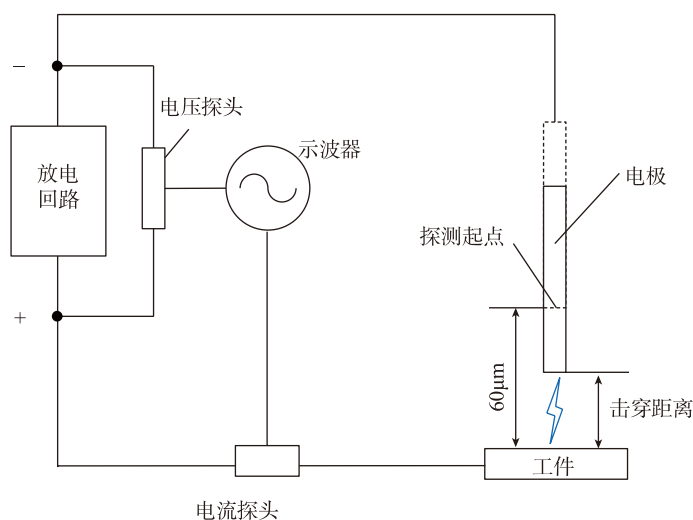


图5 击穿距离探测原理图

Fig.5 Schematic diagram of discharge distance detecting

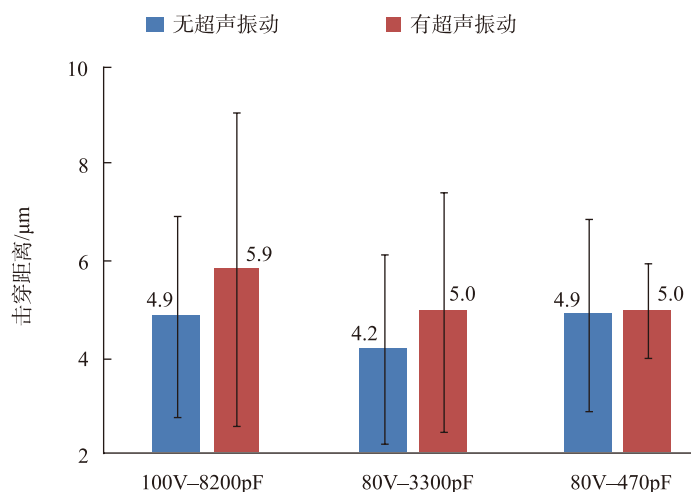


图6 NPJ 介质中击穿距离

Fig.6 Results of discharge distance in NPJ

小,超声振动幅值仅为 $1\mu\text{m}$,因此,此结论不应该是本文放电间隙有增大趋势的主要原因。通过分析,可能原因是超声波振动使得极间的等离子射流中的带电粒子分布不均,间隙内的绝缘介质层易被击穿。

2 超声振动辅助 NPJ 中电火花加工

虽然对工件施加超声振动以后,可使得电火花加工在 NPJ 介质中的击穿距离增大。然而,当在 NPJ 中进行铣槽加工时,试验在所有能量下都无法进行。图 7 为加工后工件和工具电极 SEM 图片,加工能量为 $100\text{V}-8200\text{pF}$ 。可以得出,加工过程中严重的非正常放电导致了加工失败。为了确定电极端部黏结的材料,对工件加工部位和电极端部进行了 X 射线能谱仪 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 分析,结果如图 8 所示。通过结果可以看出,电极端部所黏结的材料大部分为工件材料,而工件加工部位没有电极元素。可见,在 NPJ 中进行电火花加工,超声振动的引入加剧了工具电极端部电蚀产物的黏附。这主要是因为:对工件施加超声振动后,增强了放电熔融材料的抛出能力。但是,由于放电间隙小, NPJ 的射流压力又不足以将间隙内的电蚀产物及时吹离,使得从工件表面抛出的大量电蚀材料黏附在工具电极端部,充当电极进行加工。随着黏附材料体积的积累,恶化了放电间隙状态,最终导致加工失败。

3 超声振动辅助 NPJ+HVAJ 中电火花加工

从超声振动辅助 NPJ 中电火花加工的试验结果分析可知,由于 NPJ 的射流压力较小,不足以将间隙内的电蚀产物及时吹离而使得加工无法进行。为了验证此结论和获得较好的加工效果,将 HVAJ 和 NPJ 混合,进行了超声振动辅助 NPJ+HVAJ 中电火花加工试验。结果发现,除了在 $80\text{V}-470\text{pF}$ 下因放电加工能量不足仍然无法加工的情况以外,其他两种

电参数下加工皆可进行;并且,施加超声振动后的加工效果要优于未施加振动加工的效果。图 9 为试验分析后的结果。

从图 9 中可以看出,施加超声振动后, NPJ+HVAJ 中电火花加工速度得到了很大程度的提高。在 $100\text{V}-8200\text{pF}$ 和 $80\text{V}-3300\text{pF}$ 两种能量下, MRR 值分别增大了 13% 和 58%。这主要是因为:施加振动后,大大增强了放电熔融材料的抛出能力。抛到间隙内的电蚀材料在 NPJ+HVAJ 高速射流的作用下,被及时吹离放电间隙。加工屑的及时排出,大大减少了加工过程中短路、电弧放电等非正常放电现象的发生,从

而增强了极间消电离、恢复绝缘状态的能力,提高了脉冲利用率,进而缩短了加工时间。

施加超声振动后,在 NPJ+HVAJ 介质中电火花加工的工具电极损耗率降低。如图 9 所示,在 $100\text{V}-8200\text{pF}$ 和 $80\text{V}-3300\text{pF}$ 两种能量下,工具电极损耗率 TWR 值分别降低了 13% 和 43%。工件的超声振动可对间隙内的高速射流产生一定的扰动,从而使射流的压力发生动态变化。这种交变的气流可使电极端部黏结的电蚀材料更容易被剥离,在高速射流的作用下吹离间隙。

在超声振动强化材料抛出的同时,也改善了工件表面的质量。由

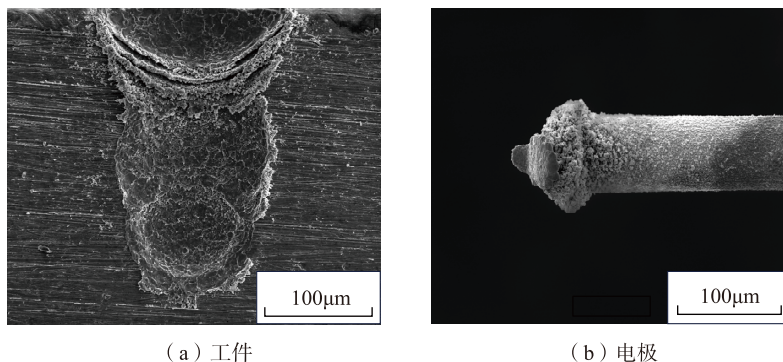


图7 超声振动辅助NPJ中电火花加工结果
Fig.7 Result of machining aided by USV in NPJ

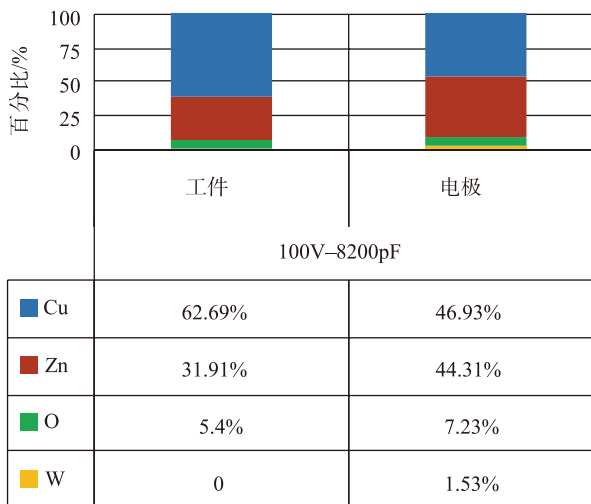


图8 工件和电极EDS分析结果
Fig.8 EDS results of workpiece and tool electrode

图9可知,对工件施加超声振动后,在100V-8200pF和80V-3300pF两种能量下,工件被加工表面的粗糙度 R_a 分别降低了21%和19%。一方面是因为超声振动使得电蚀产物更容易剥离被抛到间隙内,工件表面黏结的电蚀产物大大减少;另一方面,超声振动在间隙内形成的高压交变射流对工件表面熔融材料具有挤压作用,该作用使得熔融材料在表面被平摊得更加平整。加工后的表面形貌如图10所示。

综上所述可知,超声振动辅助NPJ+HVAJ中电火花加工不仅明显改善改善了纯NPJ中电火花加工排屑困难的问题,并且还获得了比未施加振动的NPJ+HVAJ中电火花加工更好的加工效果。图11为超声振动辅助NPJ+HVAJ中电火花加工后的工件和电极SEM图片。与图7中电极SEM图片相比较可看出,图11中电极上黏附的电蚀产物明显减少,且端部更加平整。但是通过加工后的工件和电极尺寸发现,电极侧向的放电间隙为 $14.5\mu\text{m}$,远远大于试验测得的击穿距离。这主要是因为电极侧面黏附的大量电蚀产物使电极在实际加工中直径变大所致。可见,提高射流压力虽能在一定程度上改善电火花加工性能,但要获得更好的加工效果,还需要进一步研究。

结论

(1) 利用超声振动辅助等离子体射流中微细电火花加工,增大了极间平均放电间隙,但不明显。

(2) 在NPJ中微细电火花加工过程中,对工件施加超声振动,可增强电蚀产物被抛出的能力。但当放电介质NPJ流量为 $15\text{L}/\text{min}$ 时,因射流压力太小,不能及时将电蚀产物排出放电间隙,最终导致超声振动辅助NPJ中微细电火花加工无法进行。

(3) 当加工介质为NPJ+HVAJ

时,超声振动辅助微细电火花加工能够正常进行。施加超声振动后,在100V-8200pF和80V-3300pF两种能量下,电火花加工的MRR值分

别提高了13%和58%;表面粗糙度 R_a 值分别降低了21%和19%;工具电极损耗率TWR值也分别降低了13%和43%。

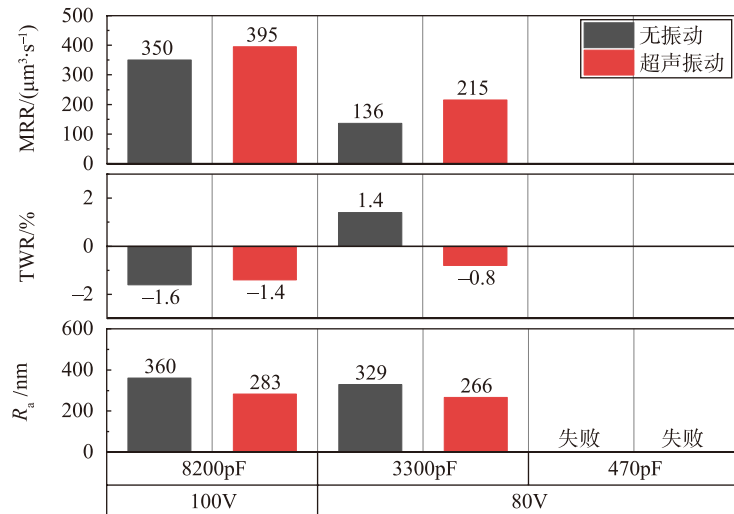
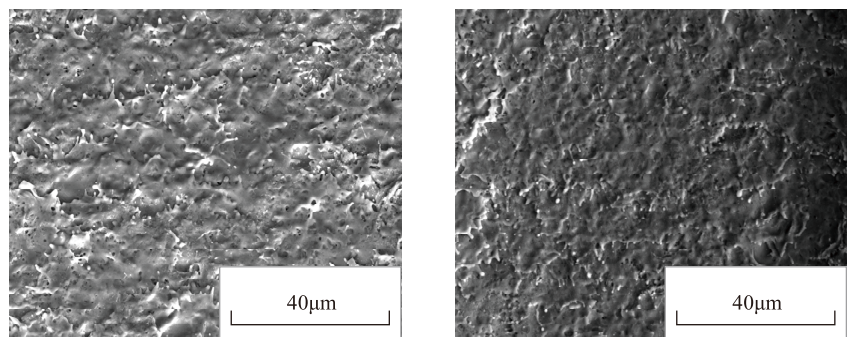


图9 NPJ+HVAJ中电火花加工特性

Fig.9 Performance of machining in NPJ+HVAJ

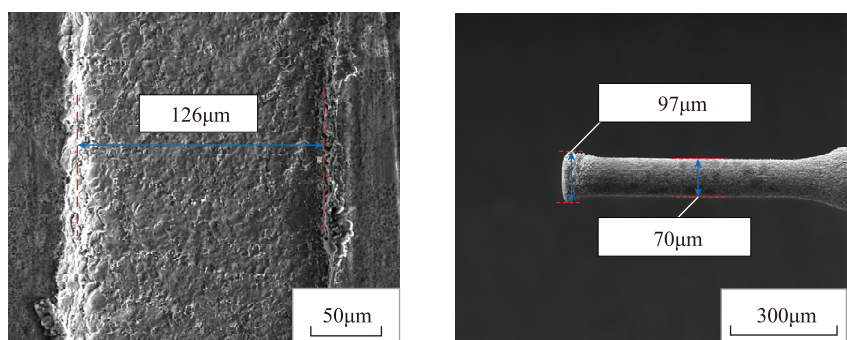


(a) NPJ+HVAJ ($R_a=350\text{nm}$)

(b) NPJ+HVAJ+USV ($R_a=260\text{nm}$)

图10 加工后表面形貌对比

Fig.10 Machining surface comparison in NPJ+HVAJ



(a) 工件

(b) 电极

图11 超声振动辅助NPJ+HVAJ中电火花加工结果

Fig.11 Result of machining aided by USV in NPJ+HVAJ

参考文献

- [1] 范广信, 战国寰, 郭黎滨, 等. 电火花加工用水基工作液的研究[J]. 机械工程师, 1986(4): 7-10.
FAN Guangxin, ZHAN Guohuan, GUO Libin, et al. Study on water-based working fluid for EDM[J]. Mechanical Engineer, 1986(4): 7-10.
- [2] KUNIEDA M, YOSHIDA M, TANIGUCHI N. Electrical discharge machining in gas[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1997, 46(1): 143-146.
- [3] KUNIEDA M, TAKAYA T, NAKANO S. Improvement of dry EDM characteristics using piezoelectric actuator[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 183-186.
- [4] YU Z B, JUN T, MASANORI K. Dry electrical discharge machining of cemented carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1): 353-357.
- [5] 邹日貌, 晏成洋, 余祖元, 等. 冷等离子体射流中微细电火花加工可行性研究[C]//全国电火花成形加工技术研讨会. 北京, 2016.
ZOU Rimao, YAN Chengyang, YU Zuyuan, et al. Feasibility study of micro EDM in plasma jet[C]//The Symposium on Sinking Electro-Discharge Machining Technology. Beijing, 2016.
- [6] 晏成洋. 等离子体中微细电火花加工特性探索性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
YAN Chengyang. Exploratory research on the machining characteristics of micro EDM based in plasma[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [7] ZOU R M, YU Z Y, YAN C Y, et al. Micro electrical discharge machining in nitrogen plasma jet[J]. Precision Engineering, 2018, 51: 198-207.
- [8] KREMER D, LEBRUN J L, HOSARI B, et al. Effects of ultrasonic vibrations on the performances in EDM[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1989, 38(1): 199-202.
- [9] YU Z Y, ZHANG Y, LI J, et al. High aspect ratio micro-hole drilling aided with ultrasonic vibration and planetary movement of electrode by micro-EDM[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 213-216.
- [10] ZHANG Q H, ZHANG J H, DENG J X, et al. Ultrasonic vibration electrical discharge machining in gas[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1-3): 135-138.
- [11] ZHANG Q H, DU R, ZHANG J H, et al. An investigation of ultrasonic-assisted electrical discharge machining in gas[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(12): 1582-1588.
- [12] 余祖元, 邹日貌, 晏成洋, 等. 一种提高大气压冷等离子体射流中电火花加工效率的方法及其装置: CN201710023496 [P]. 2017-03-22.
YU Zuyuan, ZOU Rimao, YAN Chengyang, et al. Method and device for improving efficiency of electric discharge machining in atmospheric pressure cold plasma jet: CN201710023496 [P]. 2017-03-22.
- [13] 徐明刚. 超声振动—气体介质电火花复合加工技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
XU Minggang. Research on technology and mechanism of ultrasonic vibration assisted EDM in gas medium[D]. Jinan: Shandong University, 2007.

通讯作者: 余祖元, 博士、教授, 研究方向为特种加工技术、微细加工技术, E-mail: zyu@dlut.edu.cn.

Study on Micro EDM Aided by Ultrasonic Vibration in Nitrogen Plasma Jet

ZHANG Congyang, ZOU Rimao, YU Zuyuan

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] The micro-EDM in nitrogen plasma jet (NPJ) obtained better processing performance than that in gas. However, due to the small discharge gap and the difficult exfoliation of the molten material, the abnormal discharge phenomena such as short circuit and arcing still occurred frequently. These phenomena seriously affected the quality and stability of the processing. In this paper, a new method of applying ultrasonic vibration to the workpiece is proposed to improve the processing performance of micro-EDM in NPJ. The process experiments were carried out on process indexes such as discharge distance, material removal rate (MRR), surface roughness and tool electrode relative wear rate (TWR) of EDM. The experimental results show that after the ultrasonic vibration is applied to the workpiece, the molten material is more easily exfoliated from the surface of the workpiece. When the mixture of nitrogen plasma jet and high velocity air jet (NPJ+HVAJ) is used as the dielectric in the proposed method, the MRR increased by 13%, the surface roughness decreased by 19%, and the TWR decreased by 13%.

Keywords: Ultrasonic vibration; Micro-EDM; Discharge distance; Nitrogen plasma jet; Nitrogen plasma jet and high velocity air jet (NPJ+HVAJ)

(责编 铃兰)