

难加工金属材料放电诱导可控 烧蚀高效加工技术

刘志东

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 介绍了一种放电诱导烧蚀加工方法,即向加工区域可控地通入氧气,在电火花放电诱导作用下首先对加工材料进行活化,而后伴随着氧气的通入产生金属燃烧反应,利用金属燃烧释放的巨大化学能蚀除材料,从而大大提高材料去除率,并通过控制氧气及采用电火花修整以保障加工表面的质量。该加工方法与被加工材料的力学性能无关,仍然属于无宏观切削力方式,其克服了难加工材料机械加工困难及电火花加工效率受制于脉冲电源的难题,适合于“车、铣、钻、成形、打孔”等各种加工形式。该加工方法改变了难加工材料能进行加工的准则,实现了“能烧即能加工”。对淬火 Cr12 进行放电诱导烧蚀铣削加工,效率比传统电火花加工高 10 倍以上且表面质量相当;进行放电诱导雾化烧蚀深盲型孔加工,蚀除效率为电火花的 5.45 倍,最大加工深度达到 132mm 且还能继续加工。

关键词: 难加工材料;电火花加工;放电诱导烧蚀;高效加工

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.22.034



刘志东

教授,博导,主要研究方向为特种加工新技术。近 5 年发表学术论文近百篇,SCI、EI 收录 30 余篇,编著书籍 3 部,获发明专利 15 项。目前担任中国机械工程学会全国特种加工分会常务理事,全国特种加工分会电火花线切割专业委员会副主任委员,江苏省第六届特种加工学会理事长。

随着科技的进步,新材料、新结构不断涌现,特别是在航空航天领域,随着飞行器性能要求的不断提高,钛合金、高温合金、高强度钢及复合材料的使用比例越来越高,并且结构件已经呈现出整体结构、复杂结构、切削加工量大、薄壁件多、加工精度高等特点。

磨削是难加工材料最常用的机械加工方式,然而在磨削加工时,工件表面易产生磨削烧伤和裂纹,从而对零件的使用性能产生不利影响,同时砂轮也易发生堵塞和损耗,降低了砂轮的耐用度。对于切削过程,难加工材料硬度高、强度大,切削变形抗力大幅度增加,刃口附近的接触应力也明显增大;难加工材料导热系数小,切削时产生的切削热不易传出,致使切削区温度升高;难加工材料切削加工中塑性变形大,在较大的切削力及较高的切削温度的作用下,已加

工表面硬化现象严重;切削过程中产生的较大塑性变形、切削力及较高切削温度,增加了切屑和刀具前刀面或加工表面与刀具后刀面的摩擦,加剧了刀具前刀面或后刀面的磨损,从而造成严重的粘接磨损、扩散磨损及氧化磨损。另外,对于超耐热合金等难加工材料,在切削过程中也会出现由于加工硬化而引起的较严重的边界磨损。因此,传统机械加工对难加工材料切削加工非常困难,且加工成本较高,加工薄壁件时易发生变形^[1]。

电火花加工不受制于材料的力学性能,已成为难加工材料的重要加工手段,但常规电火花加工材料蚀除率很低,不能满足高效加工的需求,严重影响了其在难加工材料领域的应用^[2]。

为此,南京航空航天大学刘志东教授针对难加工金属材料(如钛合金、高温合金、高强度钢等)提出了

放电诱导烧蚀加工方法^[3-4],该方法是具有完全自主知识产权的高效放电加工技术^[5]。其利用加工中金属燃烧氧化释放出的热量作为材料蚀除的主要能量完成加工。与传统电火花加工相比,烧蚀加工极间获取的能量大幅度增加,材料蚀除率显著提高,加工表面质量也可以得到较好的控制。本文首先对放电诱导可控烧蚀加工的原理进行了阐述,而后围绕放电诱导烧蚀铣削加工、放电诱导雾化烧蚀加工、多通道功能电极放电诱导烧蚀加工以及双伺服控制的烧蚀/车削复合加工4个典型加工方式对烧蚀加工工艺进行介绍。

放电诱导烧蚀加工原理

放电诱导烧蚀加工是借助电火花加工产生的电蚀作用,首先将放电点金属加热至其燃点温度以上,使其保持活化状态,然后通入氧气使其与活化金属发生剧烈的燃烧氧化反应,释放出巨大的化学能,该能量直接作用于基体材料,使烧蚀反应快速扩展,并借助火花放电产生的爆炸力和气流冲刷作用将熔融金属及烧蚀产物排出加工区域,而后切断氧气,通过常规电火花加工对已烧蚀加工表面进行修整,从而完成高效加工^[6]。该加工技术不同于以往的常规电火花加工,其利用金属材料与氧气发生氧化反应所释放的化学能作为蚀除能量的主要来源,而电火花放电主要起到引燃和修整作用。烧蚀加工过程包含以下几个阶段^[7]:

(1)引燃活化阶段。常规电火花放电引燃活化阶段,利用电极与工件间形成火花放电所产生的高温高热加热工件表面,形成高温活化区域,如图1(a)所示。

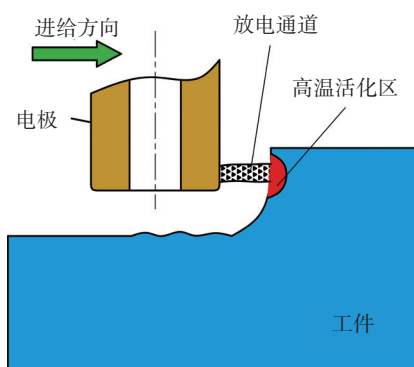
(2)氧化蚀除阶段。表面活化的金属与通入的氧气产生剧烈的氧化反应,释放出大量化学能,该能量直接作用于基体材料,不断加热周围金属,使氧化得以持续进行。此过程中

形成熔融的金属和氧化物,在放电爆炸力和气流冲刷作用下,不断被清除出加工区域,如图1(b)所示。

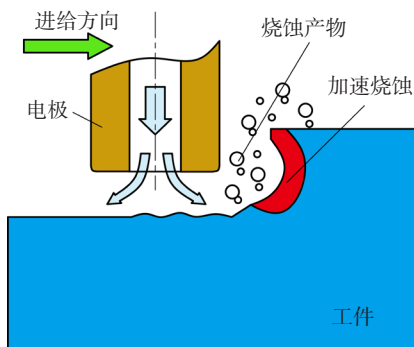
(3)修整阶段。此阶段停止氧气供给,采用液中常规电火花加工的方式对加工表面进行放电修整蚀除,如图1(c)所示。

在整个放电诱导烧蚀加工过程中,3个阶段重复进行。

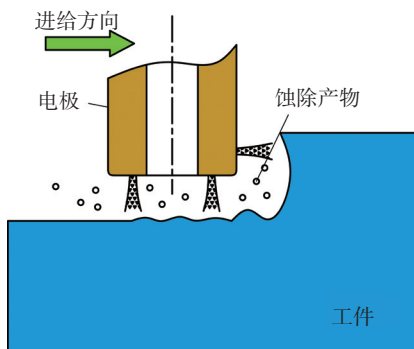
烧蚀加工的主要能量来源于金属氧化反应,氧气在烧蚀加工中主要起到以下作用^[8]:



(a) 引燃阶段



(b) 氧化烧蚀阶段



(c) 修整阶段

图1 放电诱导烧蚀加工过程
Fig.1 Machining processes of EDM ablation

(1)参与氧化放热。金属在电火花放电作用下,形成活化区域,后与氧气发生氧化放热反应。所生成热量远大于常规电火花加工所释放的能量,足以维持烧蚀加工进行。

(2)蚀除金属。高压氧气流对烧蚀加工中形成的熔融金属和氧化物有强力的清除作用,排出加工中形成的熔融金属和氧化物,推动其在金属表面运动,并最终脱离金属表面,使烧蚀得以持续进行。同时,氧气流还可带走极间的蚀除颗粒,为后续加工提供保障。

(3)冷却作用。冷却电极和放电通道,对未达到燃点温度的金属进行冷却,降低热影响区温度。

由于电火花放电在烧蚀加工中主要起放电诱导、活化金属及蚀除修整作用,其已经不是加工中的主要蚀除能量,在整个放电诱导烧蚀加工过程中所占的比例很少,所以电极的损耗要比常规电火花加工小很多。

放电诱导烧蚀加工典型工艺

放电诱导烧蚀加工适合于“车、铣、钻、成形、打孔”等各种加工形式。

1 放电诱导烧蚀铣削加工

烧蚀铣削加工与传统的电火花铣削加工类似,采用表1中试验参数使用两种方法对淬火Cr12进行铣削加工。结果表明,相同时间内“放电诱导烧蚀铣削”较传统的电火花铣削蚀除效率高10倍以上(见图2)。

采用常规电火花铣削与放电诱导烧蚀铣削加工所得的工件表面微

表1 放电诱导烧蚀铣削试验参数

参数	数值
峰值电流 /A	26
脉宽 / μ s	150
脉间 / μ s	120
水压 /MPa	0.25
氧气压力 /MPa	0.3
极性	正
时间 /min	20

观形貌对比如图 3 所示。常规电火花铣削加工表面布满放电坑,放电诱导烧蚀铣削加工表面可以看到常规电火花放电修整时所形成的放电坑,在氧气关断阶段,加工区域氧气浓度减小,氧化程度降低,主要进行常规电火花放电加工,利用火花放电对已加工面进行修整,清除部分重熔层,改善了加工表面质量。经测试,两种加工方式变质层厚度基本相当,表面质量相近。

2 放电诱导雾化烧蚀加工

放电诱导雾化烧蚀加工过程中水以一定压力持续冲入加工区域,而氧气通过电磁阀的控制间歇性地通入,形成雾化烧蚀加工,以进一步提高加工的可控性和表面质量,原理如图 4 所示。

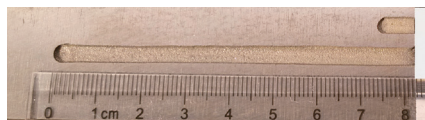
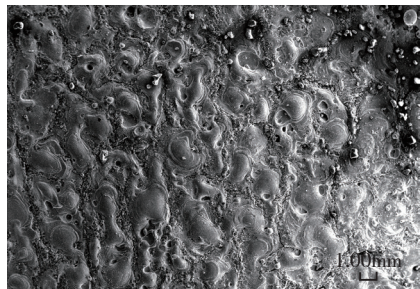
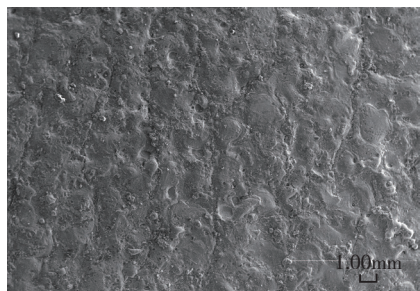


图2 烧蚀铣削(下)与常规电火花铣削(上)对比

Fig.2 EDM ablation milling (lower) and traditional EDM milling (upper)



(a) 常规电火花铣削加工



(b) 放电诱导烧蚀铣削加工

图3 不同铣削加工方式下工件表面微观照片
Fig.3 Microcosmic diagram of workpiece surface at different milling methods

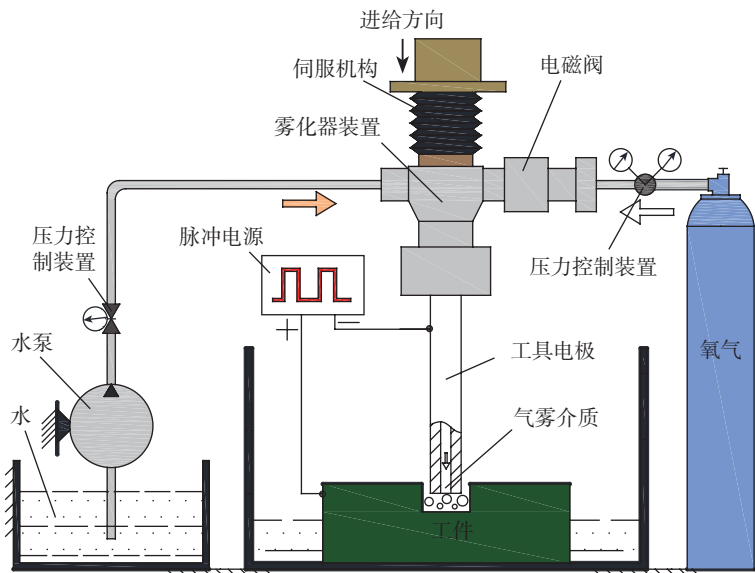


图4 放电诱导雾化烧蚀加工系统示意图

Fig. 4 Experimental system of aerosol dielectric EDM ablation

放电诱导雾化烧蚀加工过程是两种加工放电状态的循环过程:一是气雾介质下的放电诱导烧蚀加工:氧气通入,与水混合形成气雾并进入加工区域,放电点被放电活化形成高温活化区,而后在富氧条件下,活化区的金属与氧气发生氧化反应,产生的巨大化学能使活化区金属变成熔融态,并产生喷发,该过程蚀除效率很高;二是水介质条件下的常规电火花放电修整加工:氧气关断后,一定压力的水流冲入加工区域,进一步冷却并排出烧蚀过程残留的熔融金属液滴,同时对加工区域通过电火花放电对烧蚀层进行修整,提高加工表面质量,放电诱导雾化烧蚀深型孔加工现场如图 5 所示。

使用表 2 所示的参数、边长 4.8mm 的电极对放电诱导雾化烧蚀加工(氧气压力 0.3MPa)、间歇通氧烧蚀加工(氧气压力 0.3MPa)及常规电火花加工在 Cr12 工件上进行方形孔加工对比试验^[9],结果如图 6 所示,可见放电诱导雾化烧蚀加工具有加工稳定性高、可持续性好的特点,蚀除效率为常规电火花加工的 5.45 倍,表面质量及形状精度均明显好于间歇通氧烧蚀加工,与常规电火花加工相当或更好。采用边长 4.8mm 电极

进行雾化烧蚀加工,深型孔的加工最大深度已经达 132mm (见图 7),并且还能继续加工。

放电诱导雾化烧蚀加工当极间是雾化介质时,蚀除产物能喷射性喷出,如图 5 所示,并且已加工侧壁表面形成的氧化膜能减少蚀除产物排

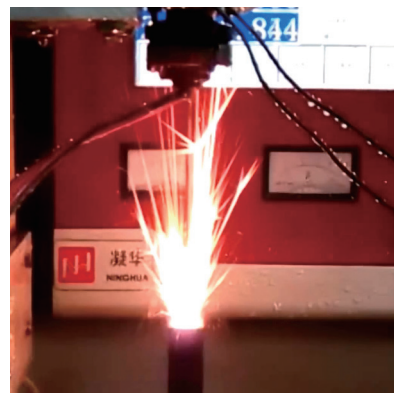
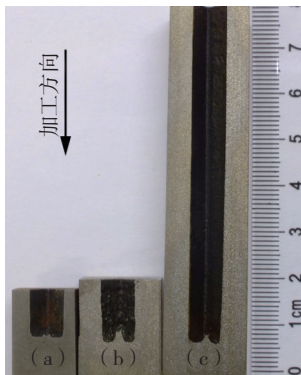


图5 放电诱导雾化烧蚀深型孔加工现场
Fig.5 Scene photograph of aerosol dielectric EDM ablation

表2 放电诱导雾化烧蚀试验参数

参数	数值
峰值电流 /A	22
脉宽 / μ s	150
脉间 / μ s	100
水面高度 /mm	20
水压 /MPa	0.26
极性	正
时间 /min	30

出时产生的“二次放电”,因此能进行深型孔加工,这是其他加工方法所难以完成的。



(a) 间歇通氧烧蚀加工
(b) 常规电火花加工 (c) 雾化烧蚀加工
图6 深型孔不同加工方式的工件及电极实物图

Fig.6 Deep-type holes and electrodes at different EDM methods

3 多通道功能电极放电诱导烧蚀加工

为进一步提高放电诱导烧蚀加工的可控性及稳定性,提高加工表面质量,可采用功能电极放电诱导烧蚀加工技术,其车削系统如图8所示。

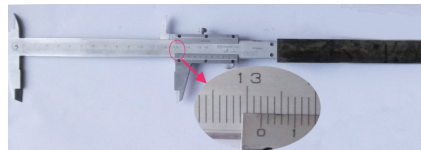


图7 深型孔实物照片

Fig.7 Deep-type hole machined by aerosol dielectric EDM ablation

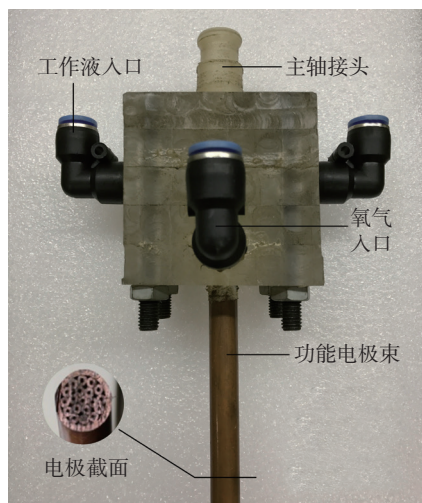


图9 多通道功能电极实物照片

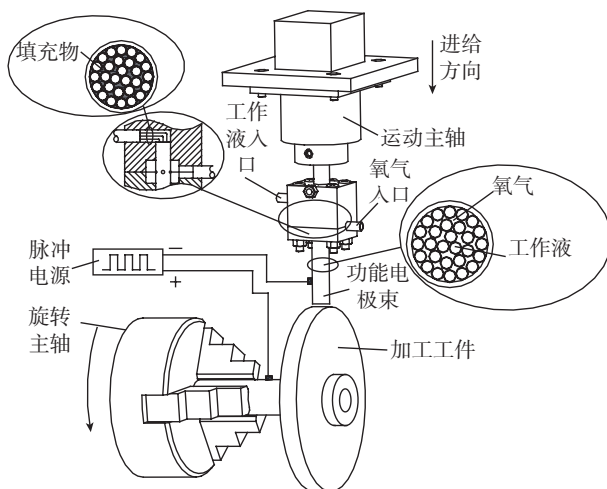
Fig.9 Physical diagram of the functional electrode

示。系统由试验机床、功能电极驱动系统、功能电极放电诱导烧蚀加工系统、工作液循环系统和氧气供给系统组成。

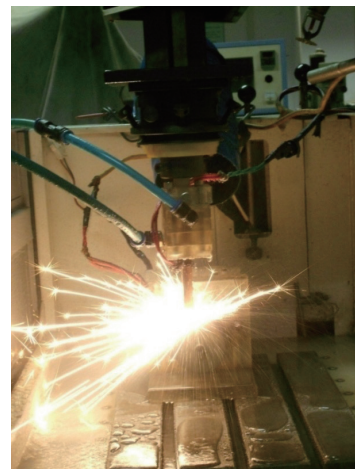
图9为多通道功能电极放电诱导烧蚀加工所用功能电极实物照片。功能电极由内部功能电极束和外部壳体两部分组成,电极束由外部中空铜管和内部众多中空细铜管组成。

由于多通道功能电极通过彼此独立的通道向加工区域通入高压工作液和氧气,氧气被喷入加工区域的工作液冲击、分散,形成均匀的气泡,随工作液冲向加工表面,在加工区形成均匀气泡,替代了原来的间歇通氧方式,因此功能电极的采用大大提高了烧蚀加工的可控性及稳定性,并且随着输入能量和烧蚀能量的降低,烧蚀坑逐渐减小,氧化层也逐渐变薄,烧蚀深度降低,表面质量逐渐提高,直至获得需要的加工表面^[10]。

选取表3参数,φ12mm电极对TC4钛合金分别进行功能电极电火花诱导烧蚀车削加工(氧气压力0.1MPa)和功能电极常规电火花加工,结果表明,功能电极放电烧蚀车削加工与电火花车削加工相比:加工效率提高了15.74倍,单位电流下单位面积电极的加工效率提高了



(a) 功能电极烧蚀加工系统



(b) 功能电极烧蚀加工现场

图8 多通道功能电极放电诱导烧蚀车削加工系统

Fig.8 Turning system of the functional electrode EDM ablation

17.25 倍,单位能耗下的加工效率提高了 19.52 倍;电火花车削加工的电极体积相对损耗是放电烧蚀车削加工的 4.19 倍。

4 双伺服控制烧蚀/车削复合加工

对于难加工金属材料,还可以借助放电诱导烧蚀形成的巨大热量,达到软化金属表面的效果,而后借助于传统金属切削方式,在软化层中对金属进行切削加工。图 10 为双伺服控制烧蚀/车削复合加工系统原理示意图。

表3 功能电极电火花诱导烧蚀试验参数

参数	数值
脉宽 / μs	800
脉间 / μs	100
低压电流 / A	24
水压 / MPa	0.1
电极转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	945
工件材料	钛合金 TC4
极性	正

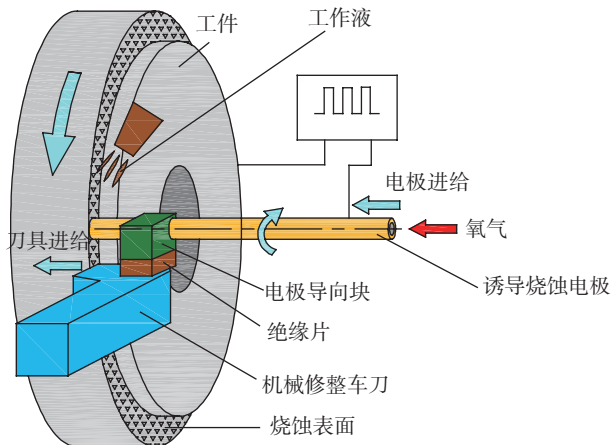


图10 烧蚀/车削复合双伺服控制系统原理图

Fig. 10 Dual servo systems schematic of EDM ablation and turning combined machining

表4 复合加工试验参数

参数	数值
脉宽 / μs	350
脉间 / μs	350
低压电流 / A	10
氧气压力 / MPa	0.5
工件转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	720
电极转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	60

意图。

使用不锈钢管材电极对 TC4 钛合金进行电火花加工、电火花诱导可控烧蚀加工、电火花诱导可控烧蚀及车削修整复合加工对比试验,电火花诱导放电参数见表 4,试验结果见图 11。

由试验结果可知,在相同试验条件下,电火花诱导可控烧蚀/车削复合加工的加工速度是电火花加工的 46 倍,是电火花诱导可控烧蚀加工的 1.8 倍。常规电火花加工的电极相对损耗为 21.50%,而电火花诱导可控烧蚀加工的电极相对损耗仅为 4.62%,电火花诱导可控烧蚀/车削复合加工的电极相对损耗仅为 4.34%。因此,电火花诱导可控烧蚀/车削复合加工可实现对钛合金材料的高效低损耗加工。

烧蚀结合车削机械修整后,可将

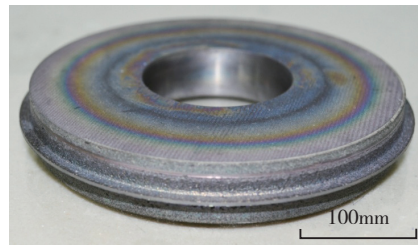


图12 烧蚀/车削复合加工零件实物图

Fig.12 Physical diagram of the workpiece machined by EDM ablation and turning combined machining

已烧蚀加工表面的烧蚀产物大部分通过车削去除,从而提高了烧蚀加工的表面质量(见图 12)^[11]。

由于在放电诱导烧蚀中形成了表面软化层,车削深度在软化层范围内时,切削力很小,需要的机床主轴电机功率也很小,大大提高了难加工材料的可切削性能,缓解了难加工金属材料的加工难题。而当切削深度超过软化层厚度后,烧蚀区基体材料被去除,加工表面平整,表面质量接近于机械加工表面。因此加工系统可以通过调整伺服系统,控制切削力的大小,从而达到控制材料切削深度的目的。

结束语

放电诱导烧蚀加工是特种加工领域中的一种全新加工技术,为难加工金属材料的高效加工提供了一种新的途径,并且仍然属于宏观无切削力的加工方式,因此特别适合钛合金、高强度钢、高温合金等难加工金属材料的高效去除及薄壁件加工。

(1) 该加工方法以电火花加工为基础,仍属于无接触、无宏观切削力加工,可降低对设备刚性的要求。

(2) 加工过程中引入新的蚀除能量——化学能,电火花放电在烧蚀加工中主要起到引燃和修整作用,材料蚀除的能量大部分来源于金属材料自身的氧化放热,显著减少了电能消耗。

(3) 该加工方式采用水(或水溶

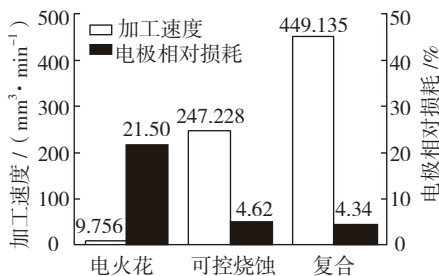


图11 不同加工方式对加工速度和电极损耗的影响

Fig.11 Effects of different processing on processing speed and tool wear

性介质)和氧气作为工作介质,不存在环境污染和安全性问题,符合未来加工技术的发展方向。

(4)可以发展为多种加工方式,以满足不同的加工需求,在国防工业领域有着重要的应用前景。

由于放电诱导烧蚀加工方法提出的时间不长,因此还有许多机理及实际应用的问题有待进一步研究。在今后的发展中,也需要进一步研究放电诱导烧蚀加工的控制策略,改进烧蚀加工控制系统,增强放电间隙的在线检测,提高自动化水平和控制的精度。另外,其加工表面残留的重熔层,表面微裂纹、物理化学性质变化等对零件性能的影响也需进一步进行细化研究。

参 考 文 献

- [1] 傅玉灿. 难加工材料高效加工技术[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [2] 刘志东. 特种加工[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.
- [3] 刘志东. 放电诱导可控烧蚀高效加工典型工艺方法[J]. 电加工与模具,2012(1):1-6.
- [4] LIU Zhidong. Series typical efficient machining methods of controllable burning by discharge-induced[J]. Electromachining & Mould,2012(1):1-6.
- [5] LIU Z D, YIN C J, CHEN L H, et al. Efficient combined machining of electrospark-induced controllable combustion and turning dressing for TC4[J]. Materials and Manufacturing Processes,2014,29(5):614-620.
- [6] 刘志东,田宗军,王祥志,等. 电火花诱导可控燃烧及放电加工蚀除方法:CN201010545526.X[P]. 2011-04-13.
- [7] LIU Zhidong, TIAN Zongjun, WANG Xiangzhi, et al. Electrical discharge machining ablation:CN201010545526.X[P]. 2011-04-13.
- [8] 王祥志,刘志东,邱明波,等. 气体压力对钛合金电火花诱导烧蚀加工的影响[J]. 航空学报,2014,35(12):3480-3488.
- [9] WANG Xiangzhi, LIU Zhidong, QIU Mingbo, et al. Research on the influence of gas pressure on the EDM ablation of titanium alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2014,35(12):3480-3488.
- [10] CAO Z L, LIU Z D, LING J J, et al. Deep-type hole machining by inner jetted aerosol dielectric ablation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,78(9-12):1989-1998.
- [11] XU A Y, LIU Z D, LI W P, et al. Study of high-efficiency electrical discharge machining-induced ablation machining of titanium alloy TC4 using a multi-function electrode[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,72(1):377-385.
- [12] 陈龙海,刘志东,邱明波,等. TC4钛合金电火花诱导可控烧蚀复合车削技术研究[J]. 航空学报,2013,34(11):2626-2634.
- [13] CHEN Longhai, LIU Zhidong, QIU Mingbo, et al. Technical research of combined machining of TC4 titanium alloy by EDM induced controllable combustion and turning dressing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2013,34(11):2626-2634.

High Efficient Machining Technology of Electrical Discharge Machining Ablation for Difficult-to-Cut Metal

LIU Zhidong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The process of electrical discharge machining ablation (EDM-A) machining is proposed, that is bubbled into oxygen to the processing area in a controlled manner and firstly activates the materials under the effect of EDM induced, then metal combustion reaction occurs with the oxygen and materials are removed with the chemical energy of metal burning, thus the material removal rate is greatly improved and quality of machined surface can be guaranteed by controlling the oxygen and using the EDM trimming. This technology is suitable for “turning, milling, drilling, shaping, deep-hole machining” for it still belongs to the machining method of no macro cutting force and it overcomes the problem of difficulty in machining and the low efficiency of EDM for difficult-to-cut materials machining. The technology has changed the processing guidelines of difficult-to-cut materials. And almost all combustible conductive materials are able to be machined by EDM-A. The efficiency of EDM-A milling for Cr12 is ten times higher than the traditional EDM and the surface quality is equivalent. The efficiency of aerosol dielectric EDM-A for Cr12 blind hole machining is 5.45 times higher than the traditional EDM, maximum machining depth reaches 132mm and can continue processing.

Keywords: Difficult-to-cut materials; EDM; EDM-A; Efficient machining

(责编 玲犀)