



电极内冲气外冲液的双介质高速电火花铣削技术

刘小勇¹ 申 泱² 陈济轮²

(1. 中国人民解放军火箭军装备部驻北京地区第一军事代表室, 北京 100076;

2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)



摘要: 研究电极内高速气体冲刷和电极外高速液体冲刷排屑(气液组合高速电火花加工)的高速电火花铣削加工技术。电极管外的液体用来压缩和冷却气体介质,它能够增加气体介质的排屑能力和冷却加工间隙的能力。通过对比研究纯气体、纯液体和气液组合三种介质模式的高速电火花铣削试验,发现和气中电火花加工相比,气液组合电火花加工的材料去除率可以提高 23%,宽度过切量可以减少 15%,并获得相似的表面粗糙度。和液中电火花加工相比,气液组合电火花加工的优势体现在:表面粗糙度可以降低 30%,宽度过切量降低 50%,重铸层厚度降低 82%,微裂纹明显减少。

关键词: 电火花加工; 高速加工; 气液组合电介质; 重铸层

High-speed EDM Milling with In-gas and Outside-liquid Electrode Flushing Techniques

Liu Xiaoyong¹ Shen Yang² Chen Jilun²

(1. First Military Representative Office of CPLA Rocket Army Equipment Department in Beijing Area,

Beijing 100076; 2. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076)

Abstract: This study investigates the high-speed electrical discharge machining (EDM) milling process with high-speed gas flushing in electrode inner and liquid in outer (gas-liquid high-speed EDM). The liquid in electrode outer is used to compress and cool the gas dielectric, which can add to the capacity of expelling the debris and cooling the machining gap for gas dielectric. Comparative milling experiments of high-speed EDM using gas, liquid and gas-liquid as dielectric were conducted. Compared to gas EDM, the MRR of gas-liquid EDM can improve 23% and the WOC can reduce 15% with the same SR. Gas-liquid EDM shows advantages over the liquid EDM in reducing 30% SR, 50% WOC, 82% re-solidified layer thickness and significantly fewer micro-cracks.

Key words: EDM; high-speed machining; air-liquid dielectric; re-solidified layer

1 引言

镍基高温合金^[1]、钛合金^[2]、硬质合金^[3]等难切削材料,由于其优良的机械性能、优秀的可焊接性,以及较高的性价比,被广泛应用于航空航天、核能、石油化工等领域。然而,较低的加工效率一直制约着该

类材料的应用推广。虽然国内外专家进行了大量的试验探索来提高该类材料的加工效率,如氧气辅助^[4]、超声辅助^[5]、磁场辅助^[6]、压电传动装置辅助^[7]等,该材料的加工效率都没有超过 200mm³/min。

高速电火花铣削加工技术是一种通过大幅提高加工电流和脉冲宽度来提高加工效率的加工技术^[8]。该技

基金项目:“十三五”装备预研共用技术(41423030406);“十三五”装备预研领域基金重点项目(61409230307)。

作者简介:刘小勇(1980),硕士,航天工程专业;研究方向:航天产品特种加工。

收稿日期:2019-07-29

术和传统电火花加工方法相比,电流从5~30A提高到1000A,脉冲宽度从100 μ s提高到10ms。该方法在加工钛合金Ti6Al4V^[9]时最大加工效率21494mm³/min,加工模具钢时的最大加工效率12688mm³/min^[10],明显高于传统电火花加工。在该技术中,液体介质的高速冲刷保证了碎屑的快速去除。然而,使用液体介质的高速电火花加工会在被加工表面产生较高的粗糙度、较厚的重铸层、较大的放电坑和较多的微裂纹。而使用气体介质的高速电火花加工又会呈现出较低的加工效率和较厚的热影响层^[11]。可见电介质对高速电火花加工具有重要的影响。

本文使用两种不同的电介质研究基于空芯管状电极的高速电火花铣削技术。其中高速气体从电极的内部冲入加工间隙,而高速液体介质从电极外部冲入。分别对比气、液、气-液组合介质下的加工效果,研究介质类型、气体压力和液体压力对材料去除率、表面粗糙度和宽度过切量的影响。

2 不同介质的研究情况

Misbah等人^[12]发现使用煤油介质的电火花加工铝合金6061T6能够获得比去离子水介质更高的材料去除率。Dhakara和Dvivedi^[13]研究发现在相同参数设置的准干式电火花加工中,甘油和空气的混合介质比水和空气的混合介质能够获得更高的材料去除率。吴等人^[14]发现表面活性剂可以提高电火花加工模具钢SKD61的加工效率,归因于较高的导电率和较少的放电延迟。陶^[4]等人发现在电火花加工中,水-气混合介质可以获得更好的表面粗糙度,而煤油-气混合介质可以获得较高的材料去除率。Kao^[15]等人研究发现和干式电火花加工相比,准干式电火花加工能得到较快的材料去除率,更精确地加工外形,碎屑粘附更少;和液中电火花加工相比,准干式电火花加工在小能量时能够获得更高的加工效率和更窄的放电间隙。申洪^[16]等发现在高速电火花加工中使用雾介质(水气混合)比气体介质能够获得更高的材料去除率、更低的表面粗糙度和更窄的过切量。综上所述,气液混合介质能够获得更好的加工效果。

3 实验过程

3.1 实验原理

电极内部冲气外部冲液的高速电火花加工原理图如图1所示。使用一台自主开发的数控电火花机床对比铣削试验;使用一台高功率脉冲电源(最大峰值电流700A)连接在旋转电极和工件两侧,以提供足够的能量满足加工需要;使用一台最大气压0.7MPa的空气压缩机通过电极内芯向加工间隙提供压缩空气;使用一台最大压力0.4MPa的水泵通过电极外部的冲液装置向加工间隙提供高速液体介质;气体和液体对加工间隙的组合作用能够影响火花放电过程,冷却电极并高效地排除碎屑;使用一个气压计和一个液压计分别测量气体和液体的压力值;利用一个工控机显示加工状态并控制运动卡,设置电源加工参数;使用一个运动控制卡作为下位机控制主轴的伺服运动和旋转,同时发送和接收脉冲电源信号。

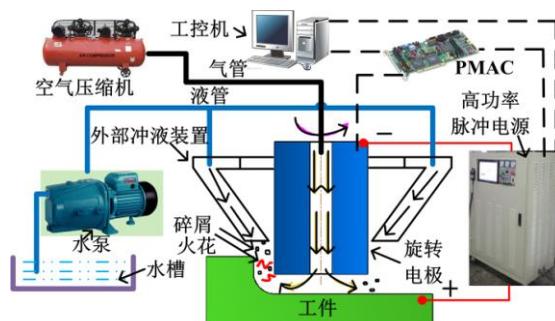


图1 电极内部冲气外部冲液高速电火花加工原理图

3.2 实验条件

一台精度为0.1mg的天平称重GH4169和石墨管加工前后的质量;一个记录精度为0.1s的秒表用来记录加工持续的时间;一个测量精度0.02mm的游标卡尺用来测量被加工位置的尺寸;一台扫描电子显微镜用来观察被加工材料表面的微观形貌;一个连接在该扫描电子显微镜上的3D绘图插件用来标定GH4169的表面粗糙度。

3.3 实验步骤

理论上,气体和液体对加工间隙的组合作用效果能够结合两者的优势。为了验证该假设,分别对比气、液、气-液组合介质下的加工效果。试验过程中,在镍基高温合金GH4169上加工长度80mm深度2mm的窄槽。对比试验参数如表1所示。在试验过程中,研究介质类型、气体压力和液体压力对材料去除率、表面粗糙度和宽度过切量的影响。

表1 高速电火花加工的工艺参数

参数/单位	数值
介质	空气, 空气+去离子水, 去离子水
工件	GH4169(60mm×12mm×4mm)
电极	管状石墨(8/4mm)
加工极性	正极(+)
峰值电流 I/A	700
峰值电压 U/V	300
脉冲宽度 td/ms	9
脉冲间隔 ti/ms	2
液压 PI/MPa	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
气压 Pg/MPa	0.1, 0.3, 0.5, 0.7
电极转速 $S/r \text{ min}^{-1}$	3000
伺服速度 $m \text{ s}^{-1}$	2
加工宽度 W/mm	8

4 结果与讨论

4.1 介质类型对加工性能的影响

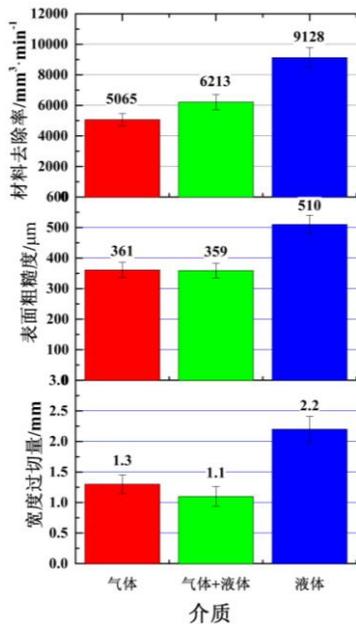


图2 不同介质中 GH4169 的加工性能

($I=700A$; $U=310V$; $S=500r/min$; $td=9ms$; $ti=2ms$)

分别使用气体、液体和气液组合作为电介质进行高速电火花加工, 获得材料去除率、表面粗糙度和宽度过切量如图2所示。电极内气压为0.7MPa, 外液压力为0.3MPa。气液组合介质加工可获得比气体介质中更高的材料去除率。产生这种现象的原因可能是气液组合介质具有较高的介电强度和冷却能力。介电强度和气体压力正相关。Kao 等^[15]使用气液混合介质进行电火花加工获得了比气中加工更高的材料去除率。研究

发现气液混合介质较高的介电强度和粘度是提高材料去除率的主要原因。然而, 在高速电火花加工中, 介质粘度对材料去除率没有明显影响。使用气液组合电介质进行高速电火花加工获得的材料去除率明显低于液体介质, 这可能是由于在气液介质中加工区域充满的是气体。

气液组合介质加工表面的粗糙度明显低于液体介质, 这是由于气液组合介质气体粘度较低, 表面产生更浅的放电坑。气液组合介质的表面粗糙度与气中加工类似, 这可能是由以下两方面原因造成的: 一方面是气液组合介质有较高的介电强度, 在单次放电中产生较大的放电坑, 增加了表面粗糙度; 另一方面, 气液组合介质加工产生的碎屑在被加工表面沉积量的减少会减小表面粗糙度。

气液组合介质加工的宽度过切量低于气体介质, 这可能是两个原因造成的: 一是介电强度较高的作用, 二是碎屑堆积量少的效果。高的介电强度会产生一个较窄的放电距离, 而电极侧面较少量的工件材料堆积能够减少电极的等效直径。气中加工和气液组合介质加工的宽度过切量均低于液体介质, 这归因于液体介质明显高的介电强度。

4.2 内部冲气压力对加工性能的影响

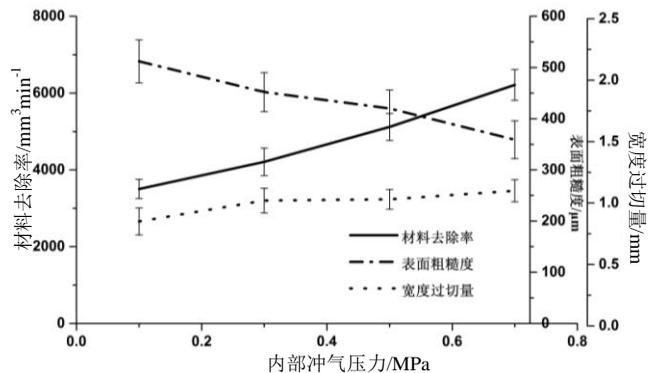


图3 内部冲气压力的影响

使用气液组合电介质进行高速电火花加工镍基高温合金 GH4169, 内部冲气压力对材料去除率、表面粗糙度和宽度过切量的影响如图3所示。气液组合介质的材料去除率随着冲气压力的增加呈现增大的趋势。而普通电火花加工中, 碎屑冲刷作用的增强效果比介电常数的影响效果更大。气液混合介质液滴的尺寸会随着气体压力的增大而减小^[17], 从而增强介质的冷却能力, 这可能是导致材料去除率增加的另一个原因。Lonardo 和 Bruzzone^[18]也发现在电火花加工中较大的

介质规准会产生更高的材料去除率。

由于碎屑冲刷作用的改善和碎屑粘附在工件表面体积的减少,被加工材料的表面粗糙度随着气体压力的增加逐渐减少。由于更多的工件材料被去除,宽度过切量随着内部冲气压力的增大有一定程度的增加。

4.3 外部冲液压力对加工性能的影响

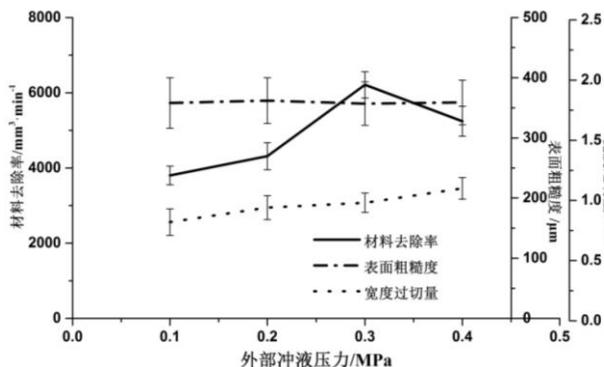


图 4 外部冲液压力的影响

使用气液组合电介质进行高速电火花加工,外部冲液压力对材料去除率、表面粗糙度和宽度过切量的影响如图 4 所示。当冲液压力低于 0.3MPa 时,随着外部冲液压力的增大,材料去除率逐渐增大。Dhakara 和 Dvivedi^[13]发现较高的气体压力能够增强冲刷效果,从

而导致材料去除率的提高。张彦振等^[19]发现放电点的压力大小也是影响材料去除特性的重要因素。当液体压力超过 0.3MPa 时,材料去除率随着外部冲液压力的增大明显下降。这是由于此时高速液体对放电间隙的压缩作用明显增强而冷却作用保持在一个相对稳定的水平。高度压缩的气体会减小放电区域气体流动的速度,导致材料去除率下降。

外部冲液压力的变化对表面粗糙度影响不大。由于在较高的冲刷压力下更多的熔融材料被排出加工间隙,随着外部冲液压力的增大,加工的宽度过切量从 0.8mm 增加到 1.1mm。

4.4 被加工表面和横截面研究

分别使用气体、液体和气液组合作为电介质进行高速电火花加工镍基高温合金 GH4169,被加工表面和横截面的显微照片如图 5 所示。和液体介质加工相比,如图 5c 所示,气液组合介质加工(图 5b)的表面燃烧坑明显小而且浅。而气中加工(图 5a)表面没有发现类似的燃烧坑。可以推测出燃烧坑是由液体介质在加工过程中产生的。当高速气体遇到液体时会产生许多微小的液滴,这些液滴在放电加工时会汽化并在加工时产生燃烧坑。由于这些燃烧坑,气液组合介质加工的表面粗糙度明显低于液体介质加工。

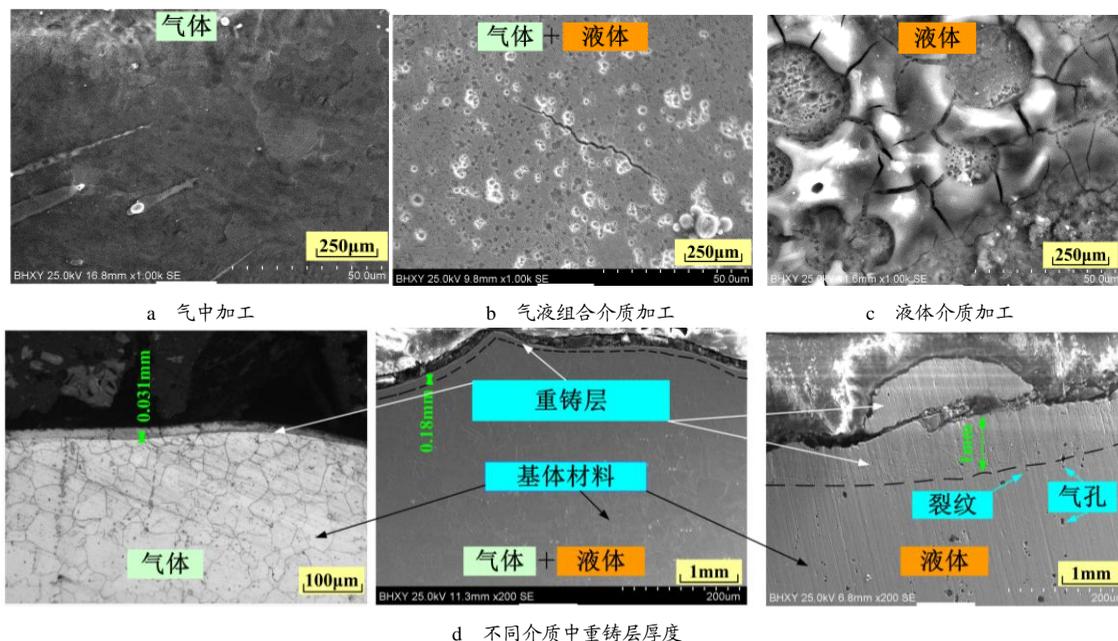


图 5 不同介质中高速电火花加工 GH4169 表面和横截面的显微照片

气液组合介质中重铸层厚度约 180 μm,而液体介质中的重铸层厚度超过 1000 μm。产生这种现象的原因是气体的冷却能力明显低于液体。在液体介质加工的

工件横截面上可以发现许多微裂纹和微气泡,在气体和气液组合介质加工中未被发现,如图 5d 所示,这是由于气体的冷却能力低于液体。Wong 等人^[20]研究发现

更多的热量传递到母体材料能够减少表面裂纹,因此较高的冷却能力会减少传递到母体材料的能量比例,从而增多表面微裂纹。

5 结束语

本文分别对比气、液、气-液组合介质下的加工效果。研究介质类型、气体压力和液体压力对材料去除率、表面粗糙度和宽度过切量的影响。得到如下结论:

a. 和气中电火花加工相比,气液组合电火花加工的材料去除率可以提高 23%,宽度过切量可以减少 15%,并获得相似的表面粗糙度。和液中电火花加工相比,气液组合电火花加工的优势体现在:表面粗糙度可以降低 30%,宽度过切量降低 50%,重铸层厚度降低 82%,微裂纹明显减少;

b. 由于高压会产生较高的气流速度,因此随着电极内部气压的增加,在气液组合介质的加工中获得较快的材料去除率、较优的表面粗糙度和较少的宽度过切量;

c. 以材料去除率为考核标准,外部冲液压力存在一个最优值为 0.3MPa;

d. 和液体介质加工相比,气液组合介质加工的表面燃烧坑明显小而浅,因此气液组合介质加工中表面粗糙度较低,微裂纹较少。气液组合介质加工产生的重铸层厚度大约为 180 μm 。

参考文献

- 1 Prihandana G S, Sriani T, Mahardika M, et al. Application of powder suspended in dielectric fluid for fine finish micro-EDM of Inconel 718[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2014(75): 599~613
- 2 Shen Yang, Liu Yonghong, Dong Hang, et al. Parameters optimization for sustainable machining of ti6al4v using a novel high-speed dry electrical discharge milling[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2017(90): 2733~2740
- 3 Shen Yang, Liu Yonghong, Zhang Yanzhen, et al. High-throughput electrical discharge milling of WC-8%Co[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2016(82): 1071~1078
- 4 Tao Jia, Shih A, Ni J. Experimental study of the dry and near dry electrical discharge milling processes[J]. J Manuf Sci Eng Trans ASME, 2008(130): 1~8
- 5 Zhang Qinhe, Du Ruxu, Zhang Jianhua, et al. An investigation of ultrasonic assisted electrical discharge machining in gas[J]. Int J Mach Tools Manuf, 2006(46): 1582~1588

- 6 Joshi S, Govindan P, Malshe A, et al. Experimental characterization of dry EDM performed in a pulsating magnetic field[J]. CIRP Ann Manuf Technol, 2011(60): 239~242
- 7 Kunieda M, Takaya T, Nakano S. Improvement of dry EDM characteristics using piezoelectric actuator[J]. CIRP Ann Manuf Technol, 2004(53): 183~186
- 8 Shen Yang, Liu Yonghong, Zhang Yanzhen, et al. High-speed dry electrical discharge machining[J]. Int J Mach Tools Manuf, 2015(93): 19~25
- 9 Wang Fei, Liu Yonghong, Zhang Yanzhen, et al. Compound machining of titanium alloy by super high speed EDM milling and arc machining[J]. J Mater Process Technol, 2014(214): 531~538
- 10 Wang Fei, Liu Yonghong, Tang Zemin, et al. Ultra-high-speed combined machining of electrical discharge machining and arc machining[J]. Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf, 2014(228): 663~672
- 11 Shen Yang, Liu Yonghong, Dong Hang, et al. Surface integrity of Inconel 718 in high-speed electrical discharge machining milling using air dielectric[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2017 (90): 691~698
- 12 Misbah N, Shoaib S, Haris A, et al. Effect of different dielectrics on material removal rate, electrode wear rate and microstructures in EDM[J]. Pro CIRP, 2017(60): 2~7
- 13 Krishnakant D, Akshay D. Experimental investigation on near-dry EDM using glycerin-air mixture as dielectric medium[J]. Mater Tod Pro, 2017(4): 5344~5350
- 14 Kun Lingwu, Biing H, Jyh W, et al. Study on the characteristics of electrical discharge machining using dielectric with surfactant[J]. J Mater Process Technol, 2009(209): 3783~3789
- 15 Kao C, Tao Jia, Shih A. Near dry electrical discharge machining[J]. Int J Mach Tools Manuf, 2017(47): 2273~2281
- 16 Shen Yang, Liu Yonghong, Sun Wanyun, et al. High-speed near dry electrical discharge machining[J]. J Mater Process Technol, 2016(233): 9~18
- 17 Liu Nailong, Zhang Xu. Distribution of droplet diameters and the spline of their empirical equation for spiral nozzle[J]. J Exp Fluid Mech China, 2006(20): 8~12
- 18 Lonardo P, Bruzzone A. Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM[J]. Ann CIRP, 1999(48):123~126
- 19 Zhang Yanzhen, Liu Yonghong, Ji Renjie, et al. Study of the recast layer of a surface machined by sinking electrical discharge machining using water-in-oil emulsion as dielectric[J]. Appl Surf Sci, 2011(257): 5989~5997
- 20 Wong Y, Lim L, Lee L. Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces[J]. J Mater Process Technol, 1995(48): 299~305