

电火花-电解复合加工的低电极损耗机理研究

唐健,张彦,MD Rashedul Islam,纪磊,王国乾

(南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211800)

摘要:微小孔电火花-电解复合高速制孔加工过程中,因电火花放电而导致的工具电极快速损耗,严重影响了微小孔的加工精度。针对该问题,研究基于溅射补偿的低电极损耗电火花-电解复合加工机理,通过实验验证采用中性盐浓液可促进溅射补偿速率、降低工具电极损耗,从而有效改善微小孔加工精度。通过电火花高速穿孔加工和电火花-电解复合高速制孔加工的对比实验发现,当采用中性盐浓液作为工作液时,工具电极端部工件材料成分含量比电火花高速穿孔加工多了7.34%,工具电极的损耗减少了14.7%。此外,优化实验表明,采用工作液电导率为10 mS/cm,脉冲宽度为15 μ s,脉冲间隔为38 μ s,峰值电流为8 A的工艺参数组合,可高效促进溅射层的形成,且工具电极损耗率低。

关键词:电火花-电解复合加工;电极损耗;溅射补偿;微小孔

中图分类号: TG484 文献标志码: A 文章编号: 1671-5276(2019)06-0018-04

Research on Low Electrode Wear EDM and ECM Hybrid Process Based on Sputter Compensation

TANG Jian, ZHANG Yan, MD Rashedul Islam, JI Lei, WANG Guoqian

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: In tube electrode high-speed EDM and ECM hybrid process, the tool electrode wear caused by electrical discharge has great influence on the machining accuracy of micro holes. To solve this problem, the mechanism of low electrode wear based on sputtering compensation is studied, and the experiment shows that neutral salt liquid can be used to promote the sputter compensation rate, reduce the tool electrode wear and improve processing accuracy. The experiments of high-speed EDM and ECM hybrid process show that the material content of the workpiece at the end of the tool electrode is 7.34% more than that of EDM, and the tool electrode wear is reduced by 14.7% when this working fluid is used. Through optimization experiments, it is found that when the working fluid conductivity is 10 mS/cm, pulse width is 15 μ s, pulse interval is 38 μ s, and peak current is 8 A, the formation of sputtering layer can be effectively promoted and the tool electrode wear can be minimized.

Keywords: EDM and ECM hybrid process; electrode wear; sputter compensation; micro holes

0 引言

微小孔结构广泛用于航空航天制造领域,其加工精度和表面质量直接影响零部件的性能和使用寿命^[1-3]。为了进一步获得高加工精度和高表面质量的微小孔,ZHANG Y等^[4]人提出了一种电火花-电解复合高速制孔加工的方法。电火花-电解复合高速制孔加工是将管电极高速放电钻孔和电化学溶解相结合的一个过程,可实现高深径比微孔的高效加工^[5]。但由于电火花侵蚀的存在,加工过程中必然会发生工具电极的损耗,使得微孔的加工精度和表面质量不断降低^[6]。因此,开展对电火花-电解复合加工的低电极损耗机理研究,对降低工具电极损耗率和提高加工精度具有重要意义。

为了进一步减小工具电极损耗,提高微孔加工精度,国内外学者进行了大量的研究。MOHRI等^[7]发现电火花制孔中工具电极表面沉淀物可以有效地减少电火花制孔

过程中高温火花放电对工具电极的蚀除,工具电极表面的沉淀物中的碳含量越高,工具电极的损耗则越小。当工作液选用粉末悬浮油时,即使在长脉冲持续时间下也能显著提高加工稳定性。MARAFONA^[8]证明在放电过程中将工作介质中的碳和铁等元素转移到工具电极端部并形成二维非均匀性的黑色层,可有效降低工具电极的损耗,并且该黑色层对工件加工的效率无太大影响。YIN等^[9]采用电导率比去离子水高得多的电解质作为加工液,利用加工过程中电沉积来补偿工具电极的损耗,并采用纳秒脉冲电源和侧绝缘的工具电极来抑制过度的电解腐蚀。

本文首先研究了电火花-电解复合高速制孔加工过程中溅射层补偿工具电极损耗的原理,然后利用能谱分析,验证具有一定电导率的盐浓液可以促进溅射层的形成并降低工具电极损耗,最后通过优化实验探究工作液电导率、脉冲宽度、脉冲间隔和峰值电流对电火花-电解复合高速制孔加工过程中工具电极的损耗规律,并获得最佳参数组合。

作者简介:唐健(1994—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为电火花-电解复合高效制孔加工。

1 电火花-电解复合加工的低电极损耗机理

在电火花-电解复合高速制孔中,通过采用中性盐浓液,利用其导电性以增加单个脉冲放电释放的能量,在去除工件材料过程中发生更强烈的工件材料熔融溅射;随后,处于连续热状态的工件碎屑在电极端部再次凝固并形成溅射层,如图1所示。此外,电化学反应作用进一步促进加工过程中工件材料的去除,提高了工件碎屑的转移速率。通过提高工件碎屑的溅射效率,以增加电极端部溅射层厚度,从而实现对工具电极损耗的补偿,进而降低电极端部锥度和提高微孔加工精度。

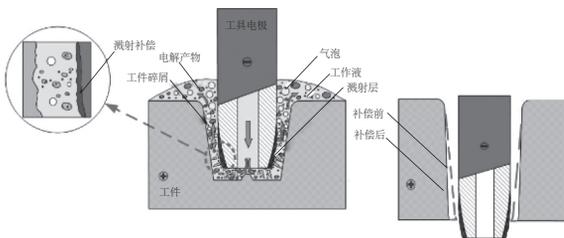


图1 电火花-电解复合加工的低电极损耗机理

2 试验装置及方案

2.1 实验设备和材料

为了验证低电极损耗电火花-电解复合加工机理,设计并搭建如图2所示的电火花-电解复合高速制孔的实验装置。

试验的工具电极为外径 0.5 mm、内径 0.2 mm 的黄铜管电极,工件材料为定向凝固镍基高温合金 IC10。

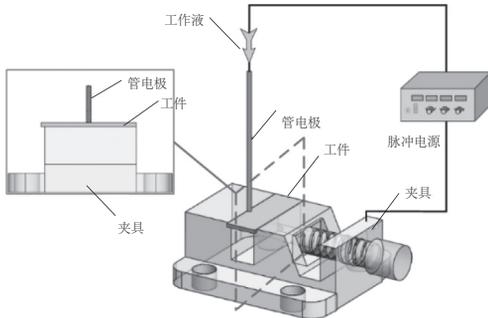


图2 实验装置示意图

2.2 加工过程和条件

为了验证中性盐浓液可提高工件碎屑的溅射量,进行电火花高速穿孔加工与电火花-电解复合高速制孔加工的对照实验。其中,电火花高速穿孔加工使用的工作液为去离子水,电火花-电解复合高速制孔加工使用 4 mS/cm NaNO₃ 溶液作为工作液,其他固定参数如表1所示。其次,对电火花-电解复合高速制孔加工中的工作液电导率、脉冲宽度、脉冲间隔和峰值电流进行参数优化试验,进一步验证溅射补偿可减少工具电极损耗,提高微小孔加工性能。优化实验的加工参数如表2所示。

表1 电火花高速穿孔加工和电火花-电解复合高速制孔加工对照实验参数值

实验参数	电火花高速穿孔加工	电火花-电解复合高速制孔加工
冲液压力/MPa	4	4
脉冲宽度/ μ s	6	6
脉冲间隔/ μ s	14	14
峰值电流/A	16	16

表2 优化实验加工参数

实验参数	水平	其他固定参数
脉冲宽度 T_{on}/μ s	3 6 9 12 15	$T_{off} = 14 \mu$ s, $I_p = 16$ A, $C = 4$ mS/cm NaNO ₃
脉冲间隔 T_{off}/μ s	6 14 22 30 38	$T_{on} = 6 \mu$ s, $I_p = 16$ A, $C = 4$ mS/cm NaNO ₃
峰值电流 I_p/A	8 16 24 32 40	$T_{on} = 6 \mu$ s, $T_{off} = 14 \mu$ s, $C = 4$ mS/cm NaNO ₃
工作液 $C/(mS/cm)$	2 4 6 8 10	$T_{on} = 6 \mu$ s, $T_{off} = 14 \mu$ s, $I_p = 16$ A

3 实验结果和分析

3.1 电火花-电解复合加工的低电极损耗机理分析

通过电火花高速穿孔加工与电火花-电解复合高速制孔加工的对照实验可知,具有一定电导率的中性盐浓液可以促进电极端部溅射层的形成,进而减小工具电极的损耗,提高微孔加工精度。两种加工方式的相对电极损耗率对比图如图3所示。

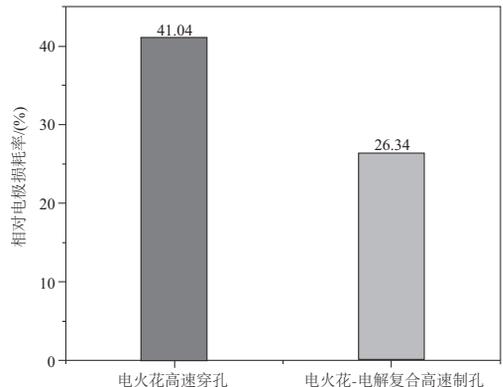


图3 电火花高速穿孔加工与电火花-电解复合高速制孔加工的相对电极损耗率对比

由图3可知,电火花高速穿孔加工中相对电极的损耗率为 41.04%,而电火花-电解复合高速制孔加工中的相对电极的损耗率为 26.34%,相对于电火花高速穿孔加工降低了 14.7%。

图4为两种加工方式的工具电极端部形貌对比。由图4a)可知,在电火花高速穿孔过程中,由于高温熔化和工具电极末端锥角($\theta=14^\circ$)的影响,导致工具电极端部表面存在大量电蚀坑。当使用电火花-电解复合高速制孔加工时,如图4b)所示,工具电极表面的电蚀坑显著减小,电极端部下方表面相对平滑。此外,通过测量发现复合加工的电极端部的锥角为 27° ,由此可以证明,采用具有一定电导率的中性盐浓液,可以有效减少工具电极的损耗,降低电极端部锥度。

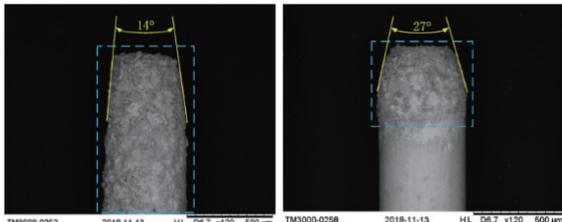


图4 不同加工过程中工具电极端部形貌对比

不同工艺形成的电极表面溅射层元素能谱图如图5所示。由图5可知,在两种加工工艺的工具电极端部表面均检测出工件的元素。其中,电火花高速穿孔加工中的工件元素含量为50.45%,在电火花-电解复合高速制孔加工中的工件元素含量为57.79%。这是因为采用低电导率盐溶液进行复合高速制孔加工时,单个脉冲放电具有更高的能量,进一步增加工件材料溅射黏附的速率。同时,电化学溶解也进一步加快工件碎屑的转移,最终使电火花-电解复合高速制孔加工的电极表面溅射量高于电火花加工过程中的溅射量。通过工件碎屑溅射和电化学溶解共同作用,进一步降低复合高速制孔加工中电极的损耗,提高工具电极的轮廓精度和微孔的加工精度。

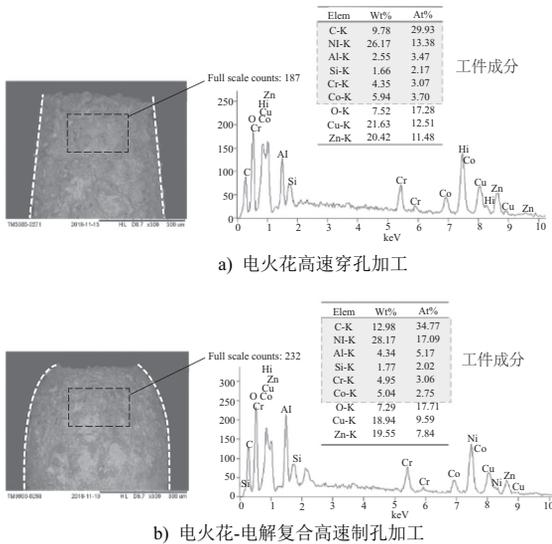
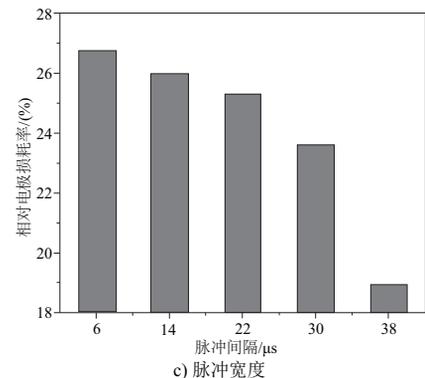
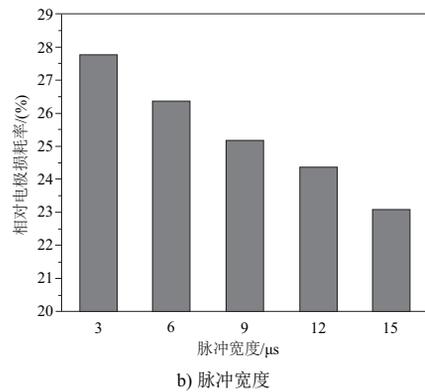
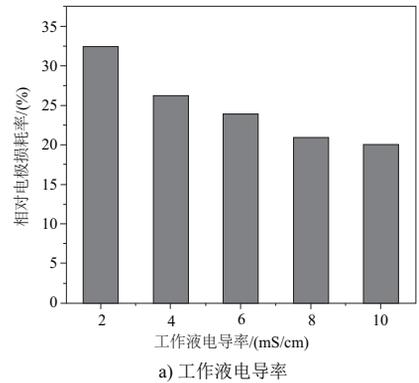


图5 不同工艺形成的电极表面溅射层的元素能谱图

3.2 加工参数对电极损耗影响分析

为了进一步降低工具电极的损耗,通过优化实验研究

了不同加工参数对电极损耗率的影响规律如图6所示。由图6a)可知,随着工作液电导率的增加,相对电极的损耗率逐渐降低。工作液电导率从2 mS/cm增加到10 mS/cm,相对电极损耗率降低了12.43%。这是因为工作液电导率增大导致材料去除机制从放电侵蚀转变为电化学溶解,进一步提高工件碎屑的去除速率,有效地减少了工具电极的损耗。从图6b)可以看出,随着脉冲宽度从3 μs增加到15 μs,相对电极磨损率降低了4.66%。这是因为随着脉冲宽度的增加,单个脉冲的放电能量提高,导致在工具电极表面上溅射的电腐蚀产物不断增加,加快了电极端部的补偿速率,进而减少工具电极的损耗。由图6c)可知,随着脉冲间隔的增大,单位时间内脉冲放电次数不断减少,复合加工过程中放电蚀除材料过程逐渐减少而电化学溶解不断增强,最终使得工具电极损耗不断减少。由图6d)可知,相对电极损耗率随着峰值电流增大而不断增大,这是因为较大的峰值电流在快速消耗工具电极材料的同时也加快溅射层对工具电极端部的补偿和保护,进而降低其损耗速率。



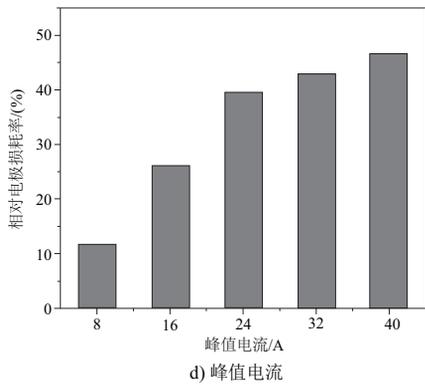


图 6 不同工艺参数对相对电极损耗率的影响

通过上述分析可知,当工作液电导率为 10 mS/cm、脉冲宽度为 15 μ s、脉冲间隔为 38 μ s、峰值电流为 8 A 时,可实现最低工具电极损耗的电火花-电解复合微孔加工。

4 结语

本文研究了电火花-电解复合加工的低电极损耗机理,通过对照实验发现当进行电火花-电解复合高速制孔加工时,工具电极端部工件材料成分含量比电火花高速穿孔加工多了 7.34%,工具电极的损耗减少了 14.7%,电极端部的锥角提高了 13°。通过优化实验得出当工作液电导率为 10 mS/cm、脉冲宽度为 15 μ s、脉冲间隔为 38 μ s、峰值电流为 8 A 时,可以实现最优的工件碎屑溅射补偿率,进而降低电火花-电解复合加工的电极损耗,提高微孔的精度加工。

参考文献:

- [1] CHAVOSHI S Z, LUO X. Hybrid micro-machining processes: a review[J]. Precision Engineering, 2015, 41:1-23.
- [2] 解宝成,崔贺新,张元. 微细电火花微孔加工技术的发展现状[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23:29-34.
- [3] 徐正扬,张辰翔. 基于电火花-电解复合加工方法的微小孔制造[J]. 航空制造技术, 2018(3):16-22.
- [4] ZHANG Y, XU Z, ZHU D, et al. Tube electrode high-speed electrochemical discharge drilling using low-conductivity salt solution[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 2015, 92:10-18.
- [5] MURRAY J, ZDEBSKI D, CLARE A T, et al. Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro-EDM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212:1537-1547.
- [6] 张尹哲,王建青,王璟,等. 范数权重灰关联度超声电火花优化试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 32-35.
- [7] MOHRI N, SUZUKI M, FURUYA M, et al. Electrode wear process in electrical discharge Machinings[J]. Cirp Annals-manufacturing Technology, 1995, 44:165-168.
- [8] MARAFONA J. Black layer characterisation and electrode wear ratio in electrical discharge machining (EDM) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184: 27-31.
- [9] YIN Q, WANG B, ZHANG Y, et al. Research of lower tool electrode wear in simultaneous EDM and ECM [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 1759-1768.

收稿日期:2019-08-21

(上接第 17 页)

4 结语

本文针对某型转向架轴箱端盖螺栓孔与端盖体的过渡区域易产生裂纹的问题,基于 FKM 准则和 EN13749 标准规定载荷对该轴箱的静强度进行评估,可得出以下结论:

1) 在初始螺栓预紧力 52 500 N 作用时,轴箱端盖静强度各工况结果均大于屈服强度 230 MPa,不满足要求,应力最大的位置位于端盖螺栓孔与端盖体的过渡区域。

2) 通过对比静强度各工况结果得知轴箱端盖最大应力过大,产生裂纹的主要原因是螺栓预紧力过大。

3) 根据 FKM 准则计算出了轴箱端盖 3 个主应力的利用度和单个工况的利用度。

4) 针对轴箱端盖螺栓预紧力过大,容易产生裂纹的问题,提出了采用提高材料屈服强度和降低螺栓预紧力相结合的优化方案,为解决轴箱端盖裂纹提供参考建议。

综上所述得到轴箱端盖易产生裂纹的主要原因是螺栓预紧力过大,为了减小端盖螺栓孔与端盖体过渡区域的最大应力,提高寿命,在安全性和经济性允许的范围内可采用提高材料屈服强度和降低螺栓预紧力相结合的方法来提轴箱端盖强度。

参考文献:

- [1] 杨继震. CRH_2 动车组拖车轮对轴箱强度分析[D]. 北京:北京交通大学,2008.
- [2] 高磊,郭平波. 高速动车组轴箱静强度疲劳强度试验载荷的确定[J]. 机械,2014,41(9):1-3,34.
- [3] 王金辉,黄友剑,孙海燕,等. 基于 S-N 和 FKM 准则的橡胶元件疲劳寿命预测方法[J]. 计算机辅助工程,2013,22(S2): 184-187.
- [4] 郭晓军,卜继玲,曾晶晶,等. 基于 FKM 准则的抗侧滚扭杆疲劳强度分析[J]. 机车电传动,2016(6):39-42.
- [5] 孟金凤,陆正刚,章焕章. 基于 FKM 准则的转向架构架疲劳损伤研究[J]. 机车电传动,2011(1):28-31.
- [6] MCKELVEY S A, BARKEY M E. Stress-based uniaxial fatigue analysis using methods described in FKM-guideline[J]. Journal of Failure Analysis & Prevention, 2012, 12(5):445-484.
- [7] ERWIN Haibach. Analytical strength assessment of components in mechanical engineering (5th edition): FKM Guideline [S]. 2003.
- [8] EN13749:2001 Standards I. Railway applications-wheelsests and bogies-methods of specifying the structural requirements of bogies frames[S]. 2011.
- [9] 闻邦椿. 机械设计手册,第 2 卷,机械零部件设计(连接、紧固与传动)[M]. 第 5 版,北京:机械工业出版社,2010.

收稿日期:2018-09-10