

微细电火花线切割加工表面干摩擦磨损特性^{*}

丁海娟^{1,2} 崔海¹ 张志航¹ 郭黎滨¹

(1. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 154007)

【摘要】 以球-面接触方式,在0.6 mm振幅下,研究微细电火花线切割加工表面在不同载荷和不同频率下的往复滑动干摩擦磨损行为,并探讨其磨损机理。结果表明,微细电火花线切割加工的模具钢M42表面,随着载荷的增加,摩擦过程转变为三体摩擦,降低了摩擦因数;随着频率的增加,由于温升形成的氧化膜降低了微凸体接触界面的抗剪强度,从而使摩擦因数降低;磨损体积随着载荷和频率的增大均呈增大的趋势,磨痕呈现为典型的粘着磨损和氧化磨损机制。

关键词: 微细电火花线切割加工 表面形貌 干摩擦 磨损 摩擦因数

中图分类号: TH117.1; TG484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0228-05

Tribological Properties of the Micro-WEDM Surface under Dry Friction and Wear Conditions

Ding Haijuan^{1,2} Cui Hai¹ Zhang Zhihang¹ Guo Libin¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2. College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

Abstract

The reciprocating sliding tribological behavior of the micro wire electrical discharge machining (micro-WEDM) surface was investigated under dry friction and wear conditions by using the ball-on-flat contact model with 0.6mm amplitude. The influences of different loads and frequencies on the friction coefficient were analyzed and the wear mechanism was also studied. The results showed that the friction coefficient decreased with the load increasing because of the third body friction, friction coefficient decreased with the frequency increasing because the oxide film formed with temperature rising led to the decrease of shear strength of microtip contact surface. The wear-loss volume of the micro-WEDM surface increased with load and frequency increasing, and the wear scars appeared adhesion and oxidation wear mechanism.

Key words Micro wire electrical discharge machining (micro-WEDM), Surface topography, Dry friction, Wear, Friction coefficient

引言

产品的微型化是现代生产发展的主要趋势之一,微细电火花线切割加工技术由于能够加工难加工材料、微小三维结构而具有独特优势,已成为微机械中重要的加工方法^[1]。

零件表面的微观形貌特征在很大程度上影响着

零件的支承能力、润滑油滞留能力和耐磨性能等,是影响其表面质量和功能特性的重要因素。微细电火花线切割加工零件表面是由电极丝的随机放电形成的,其形成机理与传统的机械加工方法差别很大,所以其微观形貌特征有其固有的特点。揭示微细电火花线切割加工表面的摩擦磨损特性对其加工表面形貌的识别具有重要的意义^[2]。本文对微细电火花

线切割加工的 M42 模具钢表面进行摩擦磨损研究,以探索微细电火花线切割加工表面形貌与摩擦磨损行为的关系,进一步推动微细电火花线切割加工的研究和应用。

1 实验

1.1 试样制备

试样材料为模具钢 M42,高红热硬度,硬度 269HB 以上,温火热处理。选用哈尔滨工业大学研制的微细电火花线切割加工机床(HIT100 型)加工,油基工作液,往复双向走丝,电极丝为直径 $\phi 30 \mu\text{m}$ 的钨丝,微能 RC 方波脉冲电源,脉冲宽度 $2 \mu\text{s}$,脉冲间隔 $20 \mu\text{s}$ 。

1.2 实验方法

采用美国 CETR 公司 UMT-2MT 型多功能摩擦磨损实验机进行纯滑动摩擦磨损实验^[3-4],实验环境为室温和大气环境,球-面接触式。上试样材料为 440C 不锈钢球,直径 $\phi = 4\text{mm}$,硬度 62HRC。下试样是微细电火花线切割加工的模具钢 M42。实验时,上试样固定不动,下试样作往复直线运动,振幅 0.6mm 。

1.2.1 实验因素水平

考虑到载荷、频率和磨损时间等因素的影响,分别分析 3 个水平,如表 1 所示。

表 1 实验因素与水平
Tab.1 Testing factors and levels

水平	因素		
	载荷 A/N	频率 B/Hz	时间 C/min
1	0.5	5	10
2	1.0	10	30
3	1.5	15	60

1.2.2 正交实验设计及实验方法

由表 1 可知是 3 因素 3 水平实验,因此选用 $L_9(3^4)$ 正交实验表。考虑到实验误差,每次实验重复 3 次,实验方案、数据及结果如表 2 所示。

实验完毕后用丙酮超声清洗试样 15 min,晾干备用。采用美国 ADE 公司的 MicroXAM 型非接触式表面形貌分析仪测量其三维表面形貌磨损体积,以磨痕深度来表征其磨损量,并用日本电子公司的 JSM-6480 型扫描电子显微镜(SEM)观察磨痕的表面形貌。

2 实验结果分析

2.1 表面形貌特征

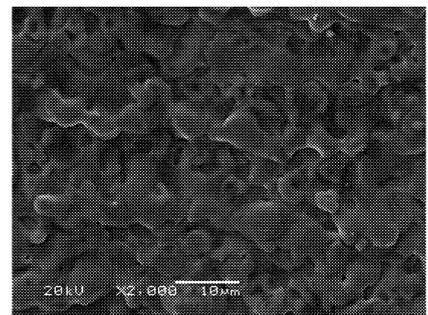
在微细电火花线切割加工过程中,电能转换为

表 2 实验方案、数据及结果

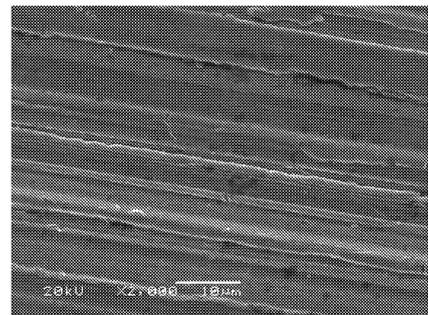
Tab.2 Testing program, data and results

实验号	A	B	C	摩擦因数
1	1	1	1	0.712 6
2	1	2	2	0.637 5
3	1	3	3	0.612 8
4	2	1	3	0.714 3
5	2	2	1	0.674 9
6	2	3	2	0.638 2
7	3	1	2	0.640 2
8	3	2	3	0.563 7
9	3	3	1	0.487 9
\bar{y}_{j1}	0.654 3	0.689 0	0.625 1	
\bar{y}_{j2}	0.675 8	0.625 4	0.638 6	
\bar{y}_{j3}	0.563 9	0.579 6	0.630 3	
极差 R_j	0.111 9	0.109 4	0.013 5	
最优水平	A_3	B_3	C_1	
主次因素		A, B, C		
最优组合		$A_3 B_3 C_1$		

热能来蚀除金属,产生很大的冲击力,加工表面的表面特征为无数个随机分布的高温熔融、圆滑的小坑点。表面呈现圆弧形,其表面轮廓高度陡峭度小,变化平缓,轮廓支承面积率大,无明显尖峰凸起,与传统的机械加工表面形貌存在明显的区别,如图 1 所示。



(a)



(b)

图 1 扫描电镜下加工表面形貌

Fig.1 SEM morphologies of the surfaces

(a) 微细电火花线切割加工表面 (b) 外圆磨削加工表面

2.2 微细电火花线切割加工表面干摩擦磨损性能

2.2.1 载荷对摩擦因数的影响

图2给出了频率为5 Hz,在不同载荷0.5、1.0、1.5、2.0 N下,微细电火花线切割加工的模具钢M42表面在空气中的往复滑动摩擦因数随时间变化的曲线。可以看出:各载荷下的摩擦磨损过程,基本都分为两个阶段,首先是摩擦因数呈波动上升趋势的过渡期,起始摩擦因数约为0.5,而后进入相对稳定的阶段;摩擦因数随载荷的增大而下降,这点与Bowden和Tabor的实验分析结果相一致^[5-7]。

在载荷作用下,微细电火花线切割加工表面与磨球表面接触时,首先是圆弧形微凸体顶端接触,微凸体的变形支撑着载荷,接触点呈离散状态;在摩擦进入稳定期后,峰顶处接触点的局部应力很大,峰顶材料发生塑性变形,表面的微凸体在正压力作用下可能产生屈服直至疲劳脱落而形成细小磨屑,摩擦因数逐步趋于稳定。另一方面,随着载荷的增加,接触表面产生大量磨屑。由于振幅只有0.6 mm,上、下试样的重叠区较大,这些小磨屑在相对闭塞的磨痕区域不可能被全部排出,总有一部分较小的磨屑残留在磨痕内,使得摩擦过程由二体摩擦转变为三体摩擦;摩擦体系第三体在摩擦过程中既可充当磨粒进一步犁削基体,也可以充当类似滚动轴承中“滚珠”的角色以改变摩擦副的运动方式,使摩擦从纯滑动变为滑动和滚动的复合运动形式,从而降低摩擦因数。

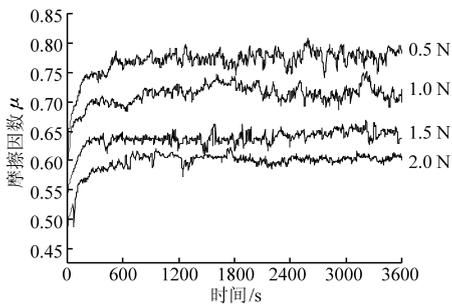


图2 不同载荷下微细线切割加工表面摩擦因数随时间变化曲线

Fig.2 Curves of friction coefficient under different loads at 5 Hz of the micro-WEDM surface

由于材料本身的不均匀性,以及各种外界因素对摩擦接触面影响的不确定性,摩擦的微观过程充满随机性。图3所示为载荷与稳定阶段摩擦因数统计平均值的关系,图4为载荷与摩擦因数标准偏差的关系。可以看出,载荷对微细电火花线切割加工表面摩擦因数标准偏差的影响与它对摩擦因数平均值的影响有相同的趋势。

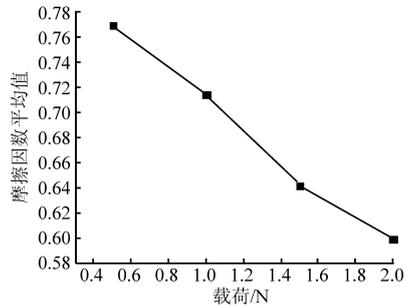


图3 摩擦因数平均值随载荷变化的关系曲线

Fig.3 Relation of average friction coefficient with loads

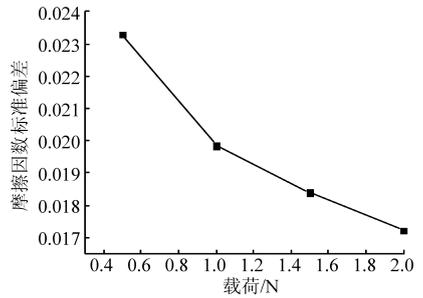


图4 摩擦因数标准偏差随载荷变化的关系曲线

Fig.4 Relation of friction coefficient standard deviation with loads

2.2.2 频率对摩擦因数的影响

图5为载荷0.5 N,频率分别为5、10和15 Hz时,微细电火花线切割加工的模具钢M42表面摩擦因数随时间的变化曲线。由图可见,微细电火花线切割加工表面的摩擦因数随着频率的增加而降低。这是因为,一方面频率的增加将导致摩擦速度增加,快速运动更容易生成磨屑——第三体,摩擦因数受到第三体形貌和状态的影响。在摩擦速度较低条件下,形成的第三体疏松,致密性差,与基体的结合强度有限,容易破碎脱落;随着摩擦速度的提高,形成的第三体致密程度增加,与基体的结合程度好,形成对基体的良好覆盖,所以高速条件下第三体的流动和变形起到润滑作用,可以降低接触表面间的摩擦因数。另一方面,频率对摩擦因数的影响也是通过改变摩擦面的温度来实现的。随着速度的增加,摩

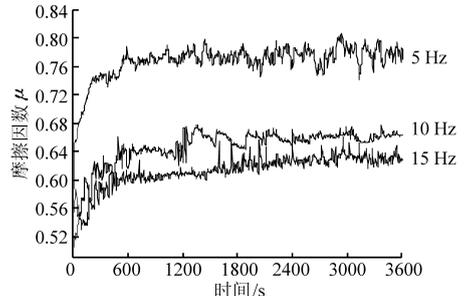


图5 不同频率下微细线切割加工表面摩擦因数随时间变化曲线

Fig.5 Curves of friction coefficient under different frequencies at 0.5 N of the micro-WEDM surface

擦热的增加可使摩擦面的温度,特别是圆弧形微凸体接触点的温度迅速增加;由于温升在表面形成的氧化膜降低了接触界面的抗剪强度,使其表面软化,从而使摩擦因数降低。因此,摩擦因数随着频率的升高呈下降趋势。

2.3 磨损表面分析

图 6 给出了微细电火花线切割加工模具钢 M42 表面的磨痕表面形貌 SEM 照片。由图可清晰地看到,当载荷增加到 1.5 N 时,表面有粘着磨屑被拉起的迹象。由于微细电火花线切割加工的工件表面有许多圆弧形微凸体存在,摩擦时表面之间的接触实际上仅限于许多微凸体之间的点接触,滑动摩擦使

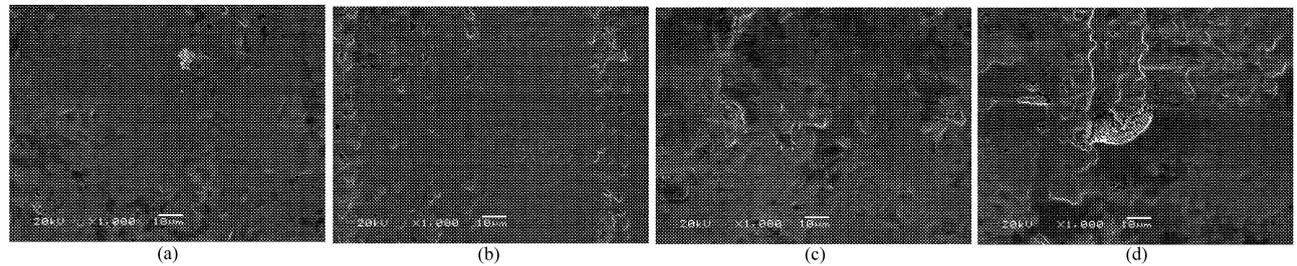


图 6 微细线切割加工表面不同载荷的磨痕 SEM 表面形貌

Fig. 6 SEM morphologies of wear scars of micro-WEDM surface

(a) 0.5 N, 5 Hz (b) 1.0 N, 5 Hz (c) 1.5 N, 5 Hz (d) 2.0 N, 5 Hz

表 3 列出频率为 5 Hz 时,0.5、1.0、1.5 和 2.0 N 4 种载荷下,分别在空气中经 60 min 摩擦磨损后,微细电火花线切割加工的模具钢 M42 试件表面形貌的粗糙度参数和磨损体积。可见,摩擦表面的粗糙度参数 S_a 、 S_q 与载荷有密切的关系^[8]。在相同频率下,随着载荷增加, S_a 和 S_q 均增大,说明随着载荷增加,被测表面上各点到平均平面偏距的平均值增大,整个磨损表面偏离平均平面的程度也增大。也就是说,摩擦热向垂直于摩擦表面方向传递的距离越远。由表 3 可知,磨损体积随着载荷的增大而增加,亦即磨损量随着载荷的增大而增加。因为载荷越大,摩擦热向远处传递的距离越大,摩擦表面接触区域温度升高,圆弧形微凸体材料塑性变形程度增大,耐磨性下降,从而材料的磨损量增加。从图 6 也可以看出,试样磨损后表面较为粗糙。

表 3 不同载荷时的表面形貌参数和磨损体积

Tab. 3 Parameters and wear-loss volume under different loads at 5 Hz

载荷/N	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$	磨损体积/ μm^3
0.5	0.659	0.849	3.011×10^5
1.0	0.672	0.894	4.261×10^5
1.5	0.686	0.917	4.660×10^5
2.0	1.020	1.250	5.486×10^5

这些接触点产生剪切作用。相对于摩擦副 440C 不锈钢球而言,试样 M42 的硬度较低,当施加载荷时,两表面之间产生正压力,由于实际接触面积小,工件很快达到屈服点,使接触点处的材料发生流动——塑变,实际接触面积迅速增大,直到能够支承所加载荷为止。在圆弧形微凸体接触处发生塑性流动时,会伴有大量的热产生,并使接触界面在瞬间达到 M42 的熔融温度,以至与对磨的 440C 不锈钢球表面熔焊在一起,即发生焊合。因此,在剪切、塑变和焊合作用下,接触微凸体不可避免地产生熔融、粘着直至脱落,使得加工表面局部区域出现明显的剥落痕迹,如图 6c、6d 所示,磨损机制为典型的粘着磨损。

图 7 所示载荷为 0.5 N,频率 5 Hz 时,微细电火花线切割加工的试样表面穿过磨痕中心处的轮廓曲线图,轮廓曲线大致呈 V 形。实验证明,随着载荷和频率的增加,磨痕变宽变深,证实了磨损体积随之增加的结果。

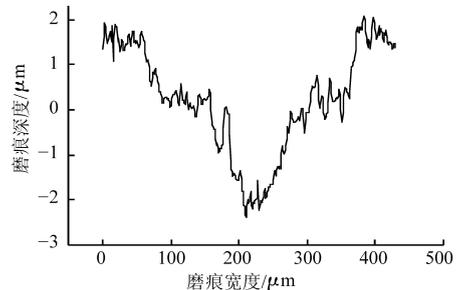


图 7 穿过中心处的磨痕轮廓线

Fig. 7 Profile curve of wear scars at 0.5 N

对微细电火花线切割加工的表面在空气中的磨痕进行能谱分析,得到图 8 的 EDS 谱。由谱图中的元素成分可知,试样 M42 磨损之前的氧元素含量为 7.31%,摩擦磨损后的氧元素含量达到 18.83%,表明摩擦磨损过程中存在氧化磨损。

3 结论

(1) 在实验条件下,对微细电火花线切割加工 M42 钢表面的摩擦因数影响的主次因素分别为载荷、频率和磨损时间。

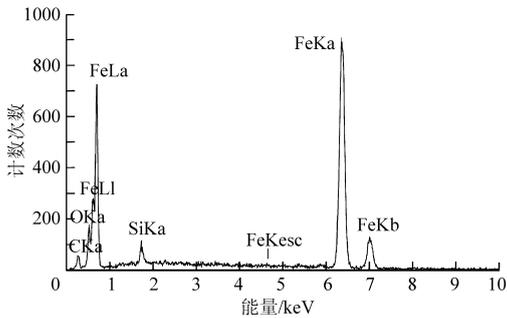


图8 图6b磨痕处的EDS谱

Fig. 8 EDS spectra of wear scars of Fig. 6b

(2) 在较低载荷下,微细电火花线切割加工的M42试样表面和440C不锈钢对磨球在对磨运动过

程中,两表面微凸体交互接触,应力不足以使其屈服,导致摩擦因数较高。随着载荷的上升,圆弧形微凸体被逐渐磨平,摩擦因数趋于减小。

(3) 频率的增加意味着运动速度的增加,将直接导致摩擦热的增加,从而使微细电火花线切割加工表面基体的温度升高。低速下产生的摩擦热较少且相对容易散热,高速下的摩擦热促进了摩擦副接触区表面的氧化反应,而且由于往复滑动摩擦磨损振幅较小,使氧化膜的形成速度加大,而氧化膜的剪切强度比金属的低,从而使摩擦因数降低。

(4) 微细电火花线切割加工表面的往复滑动干摩擦磨损属于典型的粘着磨损和氧化磨损机制。

参 考 文 献

- 1 Miller S F, Kao C C, Shih A J, et al. Investigation of wire electrical discharge machining of thin cross-sections and compliant mechanisms [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(15): 1 717 ~ 1 725.
- 2 狄平, 顾伟生, 朱世根, 等. 电火花涂层的特性和耐磨性研究[J]. *金属热处理*, 2006, 31(3): 30 ~ 32.
Di Ping, Gu Weisheng, Zhu Shigen, et al. Characterization and wear behavior of the electrospark alloying coatings[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, 31(3): 30 ~ 32. (in Chinese)
- 3 ASTM G 133-05. Standard test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear[S] // *Annual Book of ASTM Standards*, 2005.
- 4 丁红燕, 戴振东, 周飞, 等. LY12 微弧氧化膜在不同水溶液中的摩擦学行为[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8): 1 389 ~ 1 394.
Ding Hongyan, Dai Zhendong, Zhou Fei, et al. Tribological behaviors of micro-arc oxidation film of LY12 in different aqueous [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(8): 1 389 ~ 1 394. (in Chinese)
- 5 Bonny K, De Baets P, Ost W, et al. Influence of electrical discharge machining on the reciprocating sliding friction and wear response of WC-Co cemented carbides [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, 27(2): 350 ~ 359.
- 6 Bonny K, De Baets P, Ost W, et al. Influence of electrical discharge machining on the reciprocating sliding wear response of WC-Co cemented carbides [J]. *Wear*, 2009, 266(1 ~ 2): 84 ~ 95.
- 7 Bonny K, De Baets P, Vleugels J, et al. Reciprocating sliding friction and wear behavior of electrical discharge machined zirconia-based composites against WC-Co cemented carbide [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, 27(2): 449 ~ 457.
- 8 于会媛, 张来彬, 樊建春, 等. 套管磨损三维表面形貌恢复及其机理分析[J]. *摩擦学学报*, 2007, 27(5): 477 ~ 481.
Yu Huiyuan, Zhang Laibin, Fan Jianchun, et al. 3D surface topography rebuilding and analysis of casing wear [J]. *Tribology*, 2007, 27(5): 477 ~ 481. (in Chinese)