

# 高频往复条件下 M42 高速钢干摩擦特性研究

包磊,周燕飞

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**利用高频往复摩擦试验机,设计正交试验方案,研究法向载荷、工作温度、往复频率和表面渗氮处理对 M42 高速钢(HSS)摩擦磨损性能的影响,利用扫描电镜(SEM)观察摩擦磨损表面微观形貌,并使用能谱分析功能(EDS)统计磨损微区的元素种类及含量,进而推断磨损机制。结果表明:在高频往复干滑动条件下,往复频率对摩擦系数的影响最显著,表面有渗氮层对磨损量的影响最显著,摩擦系数和磨损量与工作温度和往复频率呈负相关,与法向载荷呈正相关。

**关键词:**高频往复;干摩擦;M42 高速钢;摩擦磨损

**中图分类号:**TH117.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)03-0054-04

## Investigations on Friction and Wear Characteristics of M42 High Speed Steel under High Frequency Reciprocating Condition

BAO Lei, ZHOU Yanfei

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

**Abstract:** The orthogonal test plan was carried out to investigate the effects of normal load, temperature, reciprocating and surface nitriding on the friction and wear properties of M42 (HSS) by using a high frequency reciprocating tribo-tester. Morphologies of the worn surface was analyzed by SEM, and the type and the content of elements in the micro area of wear were calculated by EDS. According to the range analysis, it is found that the reciprocating frequency has the greatest effect on the friction coefficient, while surface nitriding has the most significant effect on the wear mass. The friction coefficient and wear mass are negatively correlated with temperature and reciprocating frequency, and positively correlated with load.

**Keywords:** high reciprocating; dry friction; M42 HSS; friction and wear

## 0 引言

M42 (W2Mo9Cr4VCo8) 高速钢是钨钼系高速钢的代表型号,经热处理后硬度可达 68~70 HRC,其钴含量高,约有 8%。钴元素提高了二次硬度和高温硬度,改善了韧性和碳化物的稳定性<sup>[1]</sup>。M42 高速钢的红硬性和耐磨性非常好,有比硬质合金更好的韧性及切削加工性,因此主要用途是制作成各种精密且形状复杂的刀具以及各种冲压模具。目前研究工作主要集中在 M42 高速钢的制备工艺<sup>[2-3]</sup>、热处理工艺<sup>[4-5]</sup>和磨损行为<sup>[6-7]</sup>等方面。

斯特林制冷机是一种基于逆向斯特林热力循环的低温冷却器,为了满足空间探测的需要和防止工质被润滑油污染,活塞与气缸必须采用干摩擦。由于其密封间隙 $\leq 5 \mu\text{m}$ ,并且活塞以 50 Hz 工作频率作往复运动,冲击和振动较大,磨损问题比较严重。目前主要采取在活塞表面喷涂涂层以减小磨损,但是涂层喷涂存在结合强度低、线膨胀系数大和喷涂质量不稳定等问题,并且磨屑以粉末形式自行脱落污染工质和阻塞回热通道,影响制冷效率。国外有资料表明,以 M42 高速钢作为活塞与气缸材料,热处理

后硬度为 65 HRC,珩磨、抛光后表面粗糙度 0.2 以下,可以减少磨损,提高可靠性<sup>[8-9]</sup>。

由于受到研究背景与试验条件的限制,以往对 M42 高速钢在高频往复滑动条件下的摩擦磨损特性鲜有报道。因此本文旨在研究高频往复干滑动条件下 M42 高速钢的摩擦磨损特性,探讨法向载荷、工作温度、往复频率和表面渗氮处理对 M42 高速钢摩擦磨损性能的影响,以摩擦系数、磨损量为表征参数,通过观察摩擦表面的微观形貌,进而推断出磨损机制,为金属摩擦副技术在斯特林制冷机的应用提供基础试验研究。

## 1 试验部分

试验材料选用 M42 高速钢,生产厂家为日本某会社,密度为  $8.1 \text{ g/cm}^3$ ,弹性模量为 220 GPa,泊松比为 0.3,其质量分数如表 1 所示。

表 1 M42 高速钢质量分数 单位:%

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   | W    | V    | Co   |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| 1.11 | 0.48 | 0.29 | 0.021 | 0.015 | 3.80 | 9.61 | 1.37 | 1.10 | 7.73 |

第一作者简介:包磊(1994—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为摩擦学。

为了模拟斯特林制冷机活塞与气缸的运动过程,设计了一套圆柱-内凹圆柱面接触副,如图 1 所示。气缸试件固定不动,活塞试件受到法向载荷作用挤压气缸试件并在其中往复滑动。活塞试件按直径  $\phi 20$  mm 加工,气缸试件内径按  $\phi 22$  mm 加工,外径按  $\phi 30$  mm 加工。为了提高表面质量,活塞外圆面和气缸内孔面珩磨后抛光,最终表面粗糙度为  $Ra 0.02$ ,圆柱度  $\leq \phi 5 \mu\text{m}$ 。活塞试件和气缸试件均采用 M42 高速钢。为了减小黏着倾向,气缸试件热处理后硬度为 65 HRC。活塞试件分别采用两种强化方式,其中 1#活塞采用常规热处理,硬度为 68 HRC;2#活塞表面采用渗氮处理,渗氮层厚度  $10 \sim 15 \mu\text{m}$ ,硬度  $> 70$  HRC。

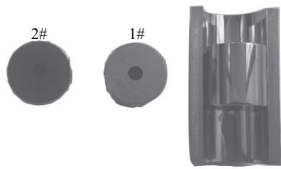


图 1 摩擦副样件实物图

试验在 MGW-02 型高频往复疲劳摩擦磨损试验机上进行,该试验机由往复驱动机构、加载机构、数据采集系统、微机控制系统、摩擦副及专用夹具组成。试验机原夹具用来装夹球-平面接触副,为了能装夹圆柱-凹面接触副,在保持原运动机构的基础上,根据原夹具接口,重新设计了一套新的夹具,用于装夹摩擦副试件,如图 2 所示。

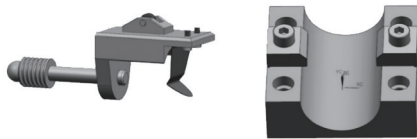


图 2 夹具设计

## 2 结果与讨论

本次试验变量为有法向载荷、工作温度、往复频率和表面是否渗氮处理。由于试验因素较多,采用正交试验法设计试验,对 M42 高速钢进行  $L_9(3^4)$  的正交试验,每组试验时间为 5 h。试验前仔细检查摩擦表面质量,测量表面粗糙度和圆柱度、硬度等参数,满足精度要求进行后续试验。将加工好的活塞试件用丙酮超声清洗,放入真空干燥箱烘干,称重并记录。根据设备的操作规程进行操作,设置法向载荷、运动频率、位移和工作温度等工况参数,

表 2 正交试验因素与水平表

| 因素      | 水平 |     |     |
|---------|----|-----|-----|
| 法向载荷/N  | 5  | 10  | 15  |
| 温度/°C   | 20 | 100 | 150 |
| 往复频率/Hz | 30 | 40  | 50  |
| 表面渗氮    | 渗氮 | 无   | 渗氮  |

当工作温度达到设定值时开始试验。试验环境为空气,相对湿度为 40%~50%,无润滑剂。试验过程中,试验机可实时采集正压力和摩擦力,计算并绘制摩擦系数变化曲线。采用精度为 0.1 mg 的 FA2104N 型分析天平称量材料在磨损前后的质量,计算质量损失。使用蔡司 sigma500 型扫描电镜(SEM)拍摄活塞表面的磨损痕迹,观察磨损特征,并使用能谱分析功能(EDS)统计磨损微区的所有元素种类及含量,推断磨损机制。

### 2.1 摩擦磨损特性

由图 3 可知,在整个试验过程中,摩擦系数首先经历不稳定的磨合期,然后进入稳定磨损阶段,摩擦系数趋于平稳。这是因为摩擦表面实际接触发生在微凸体上,实际接触区域也只占摩擦表面很小的一部分。磨合开始时,相互接触的微凸体将发生挤压变形和剪切破坏,摩擦系数不稳定。随着试验进行,表面质量得以改善,摩擦系数变化逐渐平稳。

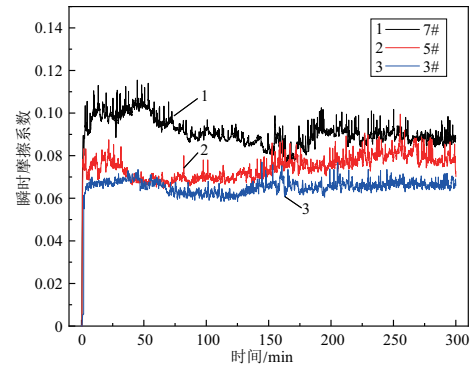


图 3 摩擦系数变化曲线

正交试验方案与试验结果如表 3 所示,使用极差分析法对摩擦系数进行分析,其中  $K_i$  表示各因素中第  $i$  水平对应的摩擦系数之和,  $k_i$  表示各因素第  $i$  水平对应的摩擦系数均值,  $R$  为极差,根据  $R$  的大小分析各因素对摩擦系数影响的主次程度。从表 4 极差分析结果可知,影响 M42 高速钢摩擦系数的主次因素依次为往复频率、工作温度、渗氮处理和法向载荷。同理影响磨损量的主次因素依次为渗氮处理、法向载荷、往复频率和工作温度。

表 3 正交试验方案与试验结果

| 试验编号 | 载荷/N | 温度/°C | 频率/Hz | 表面渗氮 | 摩擦系数  | 磨损量/g   |
|------|------|-------|-------|------|-------|---------|
| 1#   | 5    | 20    | 30    | 渗氮   | 0.252 | 0.022 3 |
| 2#   | 5    | 100   | 40    | 无    | 0.122 | 0.026 5 |
| 3#   | 5    | 150   | 50    | 渗氮   | 0.065 | 0.016 4 |
| 4#   | 10   | 20    | 40    | 渗氮   | 0.154 | 0.021 9 |
| 5#   | 10   | 100   | 50    | 渗氮   | 0.074 | 0.013 7 |
| 6#   | 10   | 150   | 30    | 无    | 0.206 | 0.028 5 |
| 7#   | 15   | 20    | 50    | 无    | 0.091 | 0.034 1 |
| 8#   | 15   | 100   | 30    | 渗氮   | 0.241 | 0.030 9 |
| 9#   | 15   | 150   | 40    | 渗氮   | 0.133 | 0.021 2 |

表 4 摩擦系数极差分析

| 项目    | 载荷/N  | 温度/℃  | 频率/Hz | 表面渗氮  |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $K_1$ | 0.439 | 0.497 | 0.699 | 0.919 |
| $K_2$ | 0.434 | 0.437 | 0.409 | 0.419 |
| $K_3$ | 0.465 | 0.404 | 0.230 | —     |
| $k_1$ | 0.146 | 0.166 | 0.233 | 0.153 |
| $k_2$ | 0.145 | 0.146 | 0.136 | 0.139 |
| $k_3$ | 0.155 | 0.135 | 0.077 | —     |
| $R$   | 0.010 | 0.031 | 0.156 | 0.014 |

根据表 4 的极差分析结果得到摩擦系数随因素水平变化趋势,如图 4 所示。可以看出:

1) 摩擦系数基本随着法向载荷增大而增大,法向载荷的大小直接决定了摩擦接触表面的尺寸、应力场与变形程度。但是法向载荷从 5 N 增长至 15 N,摩擦系数的增长幅度比较小,这说明在较小的法向载荷范围内,摩擦系数受法向载荷的影响有限。因为 M42 高速钢的硬度非常大,当名义法向载荷增大时,作用到摩擦表面的真实法向应力引起接触面积和变形程度增长有限。

2) 摩擦系数与工作温度呈负相关,在摩擦过程中环境热、接触热、变形热和摩擦热积累使材料发生软化,塑性变形抗力降低,摩擦阻力更小,摩擦系数下降。

3) 摩擦系数受往复频率影响显著,随往复频率增大而减小。因为当往复频率增加时,摩擦副相对运动速度加快,摩擦表面相互挤压时间与变形程度减小,导致实际接触面积较小。同时,往复频率增加使磨屑容易被带出摩擦表面,磨屑作为磨粒参与二次磨损概率降低。

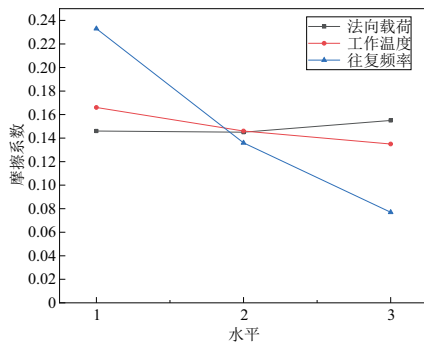


图 4 摩擦系数随因素水平变化趋势

## 2.2 表面微观形貌分析

为了进一步地分析 M42 高速钢的磨损机制,利用扫描电子显微镜观察了活塞试件表面磨损痕迹的微观形貌。图 5 中因材料塑性堆积而形成大小不等的瘤,这是由于黏着结点被剪切破坏导致较软的气缸表面材料被撕裂,被剪切的材料以及剥落的磨屑迁移、黏附到硬度更大的活塞表面上,并且这些塑性堆积瘤会不断犁削气缸表面。图 6 表面散布着大小不等的痘斑与点蚀,这是典型的疲劳磨损。在高频往复滑动与小幅度滚动的合成运动下,试件表面承受接触应力与摩擦应力的反复加载与卸载,随后导致疲劳破坏。图 7 表面中零散分布着鳞片状磨屑,对其进行 EDS

能谱分析如图 8 所示,元素含量统计结果如表 5 所示。可以看出氧元素含量为 31.72%,这说明在磨损过程中出现了氧化磨损现象。据此推断活塞表面无渗氮层时,磨损机制是黏着磨损和疲劳磨损。活塞表面有渗氮层时,渗氮处理能降低黏着效应,磨损机制以疲劳磨损为主。

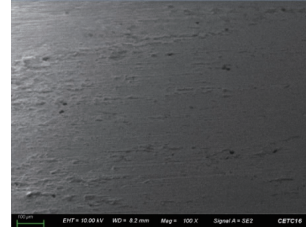


图 5 无渗氮试件表面形貌

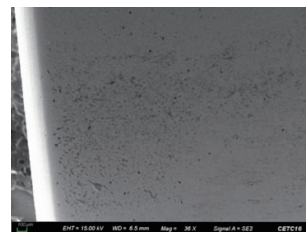


图 6 渗氮试件表面形貌

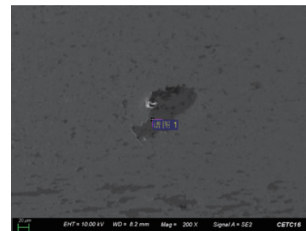


图 7 磨屑微观形貌

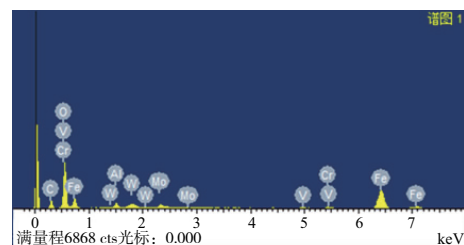


图 8 能谱分析结果

表 5 元素含量统计 单位:%

| 元素   | 质量    | 原子    |
|------|-------|-------|
| C K  | 0.44  | 1.15  |
| O K  | 31.72 | 61.80 |
| Al K | 2.15  | 2.49  |
| V K  | 0.95  | 0.58  |
| Cr K | 2.36  | 1.42  |
| Fe K | 55.20 | 30.81 |
| Mo L | 3.53  | 1.15  |
| W M  | 3.64  | 0.62  |

### 3 结语

本文采用正交试验法,在高频往复干滑动条件下研究了法向载荷、工作温度、往复频率和表面渗氮对 M42 高速钢的摩擦磨损性能的影响,得出了如下结论:

1) 通过极差分析发现:往复频率是影响摩擦系数主要因素,表面有渗氮层对磨损量的影响最显著,摩擦系数和磨损量与工作温度和往复频率呈负相关,与法向载荷呈正相关。

2) 在高频往复干滑动条件下,M42 高速钢常规热处理基体的磨损机制是黏着磨损和疲劳磨损,对 M42 高速钢表层进行渗氮处理后,磨损机制以疲劳磨损为主,磨损过程中有氧化现象。

#### 参考文献:

- [1] 刘宇,李丽声,高德生,等. 钴对 M42 型超硬高速钢组织和性能的影响[J]. 钢铁,1989,24(1):36-40,35.
- [2] 赵顺利,樊俊飞,周灿栋,等. 喷射成形 M42 高速钢初生碳化物的细化[J]. 宝钢技术,2013(3):53-57,68.
- [3] 马超,赵顺利,樊俊飞,等. 热处理对喷射成形 M42 高速钢显

微组织及硬度的影响[J]. 热加工工艺,2012,41(12):156-158.

- [4] GODEC M, VEČKO PIRTOVŠEK T, ŠETINA BATIČ B, et al. Surface and bulk carbide transformations in high-speed steel[J]. Scientific Reports,2015,5:16202.
- [5] 马凯,杨伏良,黄珂,等. 淬火方式对 M42 高速钢组织和性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2014,19(2):241-247.
- [6] 李飞舟,沈立,郭便. EM42 与 GCr15 干摩擦磨损性能的研究[J]. 热加工工艺,2012,41(16):37-39.
- [7] 凌晓红. 粉末高速钢 S690 与 M35、M42 钢组织性能对比[J]. 工具技术,2015,49(3):68-70.
- [8] 何庆生. 线性分置式斯特林制冷机国产化应用研究[J]. 低温与超导,2014,42(2):21-25.
- [9] VEPRÍK A, ZECHTZER S, PUNDAK N. Split stirling linear cryogenic cooler for a new generation of high temperature infrared imagers[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. Proc SPIE 7660, Infrared Technology and Applications XXXVI, Orlando, Florida, USA; 2010,7660:76602K.

收稿日期:2020-04-23

#### (上接第 43 页)

- [9] 孙发青,李庆忠. 雾化施液抛光中化学作用和机械作用的试验研究[J]. 机械制造与自动化,2017,46(6):17-19,24.
- [10] 高国富,王岩. 磁力研磨加工技术研究进展[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(6):813-817.
- [11] 万宏强,韩佩瑛,葛帅,等. 工件表面超声振动抛光方法发展概况[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2018,38(2):94-100.
- [12] 牛燕辉. 化学气相沉积技术的研究与应用进展[J]. 科技风,2020(13):161.
- [13] 韩光超,孙明,孙海鸥,等. 基于 CAM 的机器人抛光轨迹规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2008(5):60-62.
- [14] 樊成,赵继,张雷,等. 移动抛光自由曲面材料去除的理论建模与试验研究[J]. 机械工程学报,2014,50(5):173-181.
- [15] 张露,吴晓君,张凤勇. 弹性球头磨具曲面抛光参数对抛光效果的影响研究[J]. 兵器材料科学与工程,2019,42(3):

40-45.

- [16] 张伟,李洪玉,金海. 气囊抛光去除函数的数值仿真与试验研究[J]. 机械工程学报,2009,45(2):308-312.
- [17] YANG M Y, LEE H C. Local material removal mechanism considering curvature effect in the polishing process of the small aspherical lens Die [J]. Journal of Materials Processing Technology,2001,116(2/3):298-304.
- [18] SONG C, DAI Y F, PENG X Q. Model and algorithm based on accurate realization of dwell time in magnetorheological finishing[J]. Applied Optics,2010,49(19):3676-3683.
- [19] 淮文博,唐虹,李虹. 砂布轮抛光工艺参数对 TC4 表面粗糙度影响规律的研究与分析[J]. 西安理工大学学报,2017,33(2):226-232.

收稿日期:2020-05-25