

MoS₂ 薄膜摩擦因数和磨损量的数学模型

陈爽^{1,2}, 王勇杰¹, 李仕华¹, 辛浩天¹, 李浩天¹

(1.燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2.华北理工大学 轻工学院, 河北 唐山 064000)

摘要: **目的** 构建 MoS₂ 薄膜的摩擦因数模型和磨损模型, 预测其磨损体积。**方法** 通过球-盘摩擦磨损实验, 研究法向载荷和滑动速度对 MoS₂ 薄膜摩擦因数的影响规律, 其中最大接触压强范围为 441.08~1393.82 MPa, 滑动速度为 0.05~0.628 m/s。利用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 和白光共聚焦显微镜分析 MoS₂ 薄膜的磨损形貌。**结果** 基于赫兹接触理论, 建立了 MoS₂ 薄膜摩擦因数与法向载荷和滑动速度的数学模型。预测结果与实测结果之间的最大相对误差为 12.02%, 其余预测结果的相对误差均小于 10%。从摩擦耗散能的角度, 研究发现 MoS₂ 薄膜的磨损体积与摩擦耗能之间呈显著的线性关系, 结合新的摩擦因数模型, 提出了 MoS₂ 薄膜的磨损模型。此磨损模型是法向载荷、滑动速度和摩擦时间的函数关系式, 其相对误差绝对值的平均值为 10.81%。与传统 Archard 模型的结果进行比较发现, 新的磨损模型的相对误差较小。通过分析 MoS₂ 薄膜的磨损机理, 探讨了磨损模型产生误差的原因。**结论** 所建立的摩擦因数模型和磨损模型的预测结果与实测结果吻合较好。磨损模型能够较准确地预测 MoS₂ 薄膜的磨损量, 具有重要的工程应用价值。

关键词: MoS₂; 摩擦因数数学模型; 摩擦耗散; 磨损数学模型; 磨损量预测; 法向载荷; 滑动速度

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)03-0051-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.03.004

Mathematical Model of Friction Coefficient and Wear of MoS₂ Film

CHEN Shuang^{1,2}, WANG Yong-jie¹, LI Shi-hua¹, XIN Hao-tian¹, LI Hao-tian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Qinggong College, North China University of Science and Technology, Tangshan 064000, China)

ABSTRACT: The work aims to construct a friction coefficient model and a wear model of MoS₂ film, and predict the wear volume. The effect law of normal load and sliding velocity on the friction coefficient of MoS₂ film was studied by a ball-on-disk tribometer. The maximum contact pressure was between 441.08 and 1393.82 MPa, and the sliding velocity was from 0.05 to 0.628 m/s. The wear morphology of MoS₂ film was characterized respectively by field emission scanning electron microscope (SEM) and white light confocal microscope. Based on Hertz contact theory, the mathematical model of friction coefficient,

收稿日期: 2021-05-04; 修订日期: 2021-07-27

Received: 2021-05-04; Revised: 2021-07-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51775475)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775475)

作者简介: 陈爽 (1983—), 女, 博士在读, 讲师, 主要研究方向为材料摩擦学。

Biography: CHEN Shuang (1983—), Female, PhD student, Lecturer, Research focus: material tribology.

通讯作者: 李仕华 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为并联机器人技术及动态润滑理论。

Corresponding author: LI Shi-hua (1966—), Male, Doctor, Professor, Research focus: parallel robot technology and dynamic lubrication theory.

引文格式: 陈爽, 王勇杰, 李仕华, 等. MoS₂ 薄膜摩擦因数和磨损量的数学模型[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 51-56.

CHEN Shuang, WANG Yong-jie, LI Shi-hua, et al. Mathematical Model of Friction Coefficient and Wear of MoS₂ Film[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 51-56.

normal load and sliding velocity of MoS₂ film was proposed. The maximum relative error between the predicted results and the measured results was 12.02%, and the relative error of other results was less than 10%. From the perspective of friction dissipation energy, it was found that there was a linear relationship between the wear volume and friction energy consumption of MoS₂ film. Then, a wear model of MoS₂ film was established combined with the new friction coefficient model. This wear model was a function of normal load, sliding velocity and friction time and the average absolute value of relative error of the wear model was 10.81%. Compared with the results of Archard model, the relative error of the new wear model was smaller. The wear mechanism of MoS₂ film was analyzed to discuss the causes of errors in wear model. The predicted results of the friction coefficient model and wear model are in good agreement with the measured results. The wear model can accurately predict the wear of MoS₂ film, which has important engineering application value.

KEY WORDS: MoS₂; mathematical model of friction coefficient; friction dissipation; mathematical model of wear; wear prediction; normal load; sliding velocity

固体润滑材料中, MoS₂ 薄膜可在高载荷、高低温、高真空等恶劣工况中长期而稳定地使用, 被广泛用于地面和空间环境中的关键运动部件^[1-2]。建立 MoS₂ 薄膜的摩擦和磨损模型, 对指导摩擦学设计和预测摩擦副寿命具有重要的理论意义和工程应用价值。

MoS₂ 薄膜摩擦磨损性能的影响因素有很多, 在这些参数中, 法向载荷和滑动速度是影响材料摩擦性能最主要的参数^[3]。目前已有大量实验研究了法向载荷和滑动速度对 MoS₂ 薄膜摩擦因数的影响规律^[4-5]。Roberts^[6]根据赫兹接触理论, 建立了法向载荷与摩擦因数的数学模型。在后续研究中此单因素模型被多次使用, 但考虑多因素的摩擦因数模型少有报道。

现有文献中关于预测磨损的模型有 300 多个^[7-8], 这些模型大多数需要不易获得的属性参数, 因此应用在工程实践中十分有限。目前应用广泛的仍然是 Archard 方程导出的简单模型^[9]。关于 MoS₂ 薄膜磨损性能的研究中, 一般采用 Archard 模型计算磨损率^[10-11]。在 Archard 模型中不能体现摩擦因数的影响, 不适合在摩擦因数发生变动的工况下表征摩擦系统的磨损量^[12]。

磨损的能量理论首次在 1973 年提出^[13], 认为磨损的产生来源于摩擦过程中能量的耗散。Mohrbacher 等^[14]引入了摩擦耗散能量的概念, 发现 TiN 硬质涂层的磨损体积与微动实验中在线测量的摩擦耗散能成正比。Wu 等^[15]研究了不同环境参数下, 利用耗散能解释 TiN 涂层微动磨损性能的适用性。Huq 等^[16]证实耗散能理论同样可以应用于单向滑动摩擦实验。Ramalho 等^[17]通过块体材料的单向滑动实验, 探讨了能量法的原理, 认为其可以作为表征摩擦材料响应的一般方法, 能够简化磨损实验, 并可以直接用来预测工作寿命。张高龙等^[18]研究发现单一和组合工况下, 石墨磨损量与系统的摩擦耗散功以及磨损率与摩擦耗散功率之间都呈明显的线性关系。基于能量法的传统磨损模型可以简化磨损实验, 将影响磨损的多种因素综合考虑, 需要确定的变量只有摩擦因数^[18]。针对摩擦因数变化的工况, 该模型仍然需要多次测试特定

工况下的摩擦因数, 致使简化磨损实验的程度有限。

在现有磨损模型中, Archard 模型由于形式简单得到了普遍认可, 但其需要进行大量实验才能获得磨损系数, 且预测误差较大。基于能量法的磨损模型越来越受到关注, 其只需确定摩擦因数即可预测磨损量。文中针对 MoS₂ 薄膜, 建立了多因素的摩擦因数数学模型, 同时考虑了法向载荷和滑动速度的影响。利用新的摩擦因数模型, 结合基于能量法的磨损模型, 可直接预测 MoS₂ 薄膜的磨损量, 为实现摩擦学设计和控制提供指导意见。

1 实验

1.1 材料

MoS₂ 薄膜由中国科学院兰州物理化学研究所采用磁控溅射工艺制备, 其膜厚约为 2 μm。为增加 MoS₂ 薄膜与基体的结合力, 预沉积一层厚度为 200 nm 的 Ti 膜。基体材料选用经调质处理后的 40Cr 钢, 其具有良好的综合力学性能, 在轴类零件中应用广泛。基体尺寸为 φ25 mm×6 mm, 表面沉积 MoS₂ 薄膜后的平均表面粗糙度 *Ra* 为 0.03 μm。实验材料的力学性能见表 1。

表 1 材料的力学性能
Tab.1 Mechanical properties of materials

Materials	Young's modulus/GPa	Hardness	Poisson's ratio
MoS ₂ film	62.9	2.64 GPa	0.30
40Gr	211	HRC34	0.28
GCr15	219	HRC60	0.30

1.2 方法

采用 CSM Tribometer 摩擦磨损实验机在大气环境下进行摩擦实验。对偶球选用 φ6 mm 的 GCr15 轴承钢 (平均表面粗糙度 *Ra* 为 0.02 μm), 实验前用酒精清洗对偶摩擦表面。由于 MoS₂ 薄膜在重载环境中

具有优异的润滑特性，因此重点研究了高接触应力条件下的摩擦学性能。对偶钢球上施加的法向载荷分别取值为 1、5、10 N，MoS₂ 薄膜试样的旋转线速度 v 为 0.05~0.628 m/s， pv 值为 32.41~696.19 MPa·m/s (p 为接触压强)，运行周期至少为 1000 r。摩擦实验参数见表 2，每组参数重复测试 3 次。

表 2 摩擦实验参数
Tab.2 Parameters of friction test

No.	Load/N	Speed/(m·s ⁻¹)	pv /(MPa·m·s ⁻¹)
1	1	0.050	32.41
2	1	0.126	81.68
3	1	0.377	244.41
4	1	0.628	407.13
5	5	0.050	55.43
6	5	0.126	139.68
7	5	0.377	417.93
8	5	0.628	696.19
9	10	0.050	69.69
10	10	0.126	175.62
11	10	0.377	525.47

摩擦接触过程中能量的耗散可以用摩擦力的功来计算，因此摩擦耗散能量 W 可由式 (1) 表示。

$$W = \int_0^t F_f dx = \int_0^t \mu F_n v dt = \bar{\mu} F_n vt \tag{1}$$

式中： F_f 为摩擦力； x 为滑动距离； μ 为摩擦因数； $\bar{\mu}$ 为平均摩擦因数； F_n 为法向载荷； v 为滑动速度； t 为滑动时间。

采用 S-4800 场发射扫描电子显微镜分析 MoS₂ 薄膜的表面形貌。表面粗糙度测量使用的设备是 Form Talysurf_i 60 高精度电感式粗糙度轮廓仪，测量结果取 3 个测试点的平均值。利用白光共聚焦显微镜测量磨损后的表面轮廓，见图 1。计算磨损区域的面积，取 3 个位置计算值的平均值，然后将磨损面积乘以平均周长，得到磨损体积。

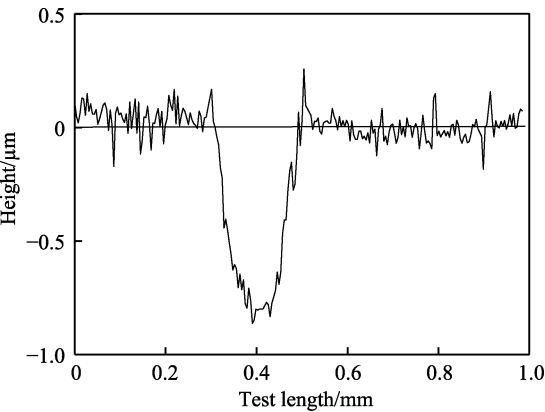


图 1 MoS₂ 薄膜磨损后的二维轮廓曲线
Fig.1 Two-dimensional profiles of MoS₂ film after wear

2 结果及分析

2.1 MoS₂ 薄膜摩擦因数的数学模型

2.1.1 MoS₂ 薄膜的摩擦特性

MoS₂ 薄膜摩擦因数在不同法向载荷和滑动速度下的变化规律见图 2。在一定滑动速度下，MoS₂ 薄膜的摩擦因数随法向载荷的增加而减小，这与文献[10]的研究结果相一致。

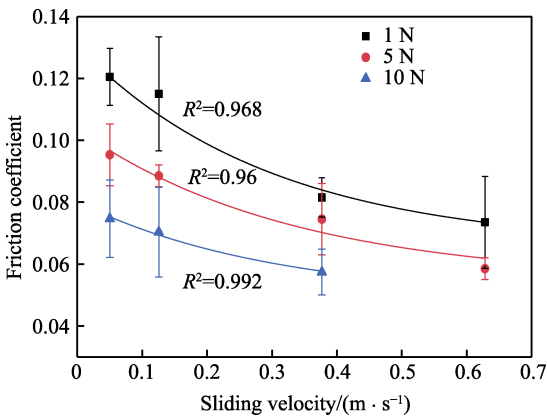


图 2 不同法向载荷和滑动速度下 MoS₂ 薄膜摩擦因数的变化规律
Fig.2 Change law of MoS₂ film under different normal loads and sliding velocity

对于 MoS₂ 薄膜，Roberts^[6]根据赫兹接触理论，得到平均摩擦因数与法向载荷之间的关系式，见式 (2)。

$$\bar{\mu} = \tau \left(\frac{3R}{4E^*} \right)^{2/3} F_n^{-1/3} \tag{2}$$

式中： τ 为薄膜的剪切强度； R 为对磨钢球半径； E^* 为摩擦副的等效弹性模量。

当法向载荷一定时，MoS₂ 薄膜的摩擦因数随着滑动速度的增加而减小，文献[5]中也有类似的结果。对图 2 中的实验数据进行指数关系拟合，拟合曲线与实验摩擦因数吻合得较好。根据文献[19]，摩擦模型中与滑动速度相关的指数形式可由式 (3) 给出。

$$\bar{\mu} = \mu_0 + c^{-av} \tag{3}$$

式中： μ_0 为静摩擦因数； a 为衰减系数。

根据库仑定律，摩擦因数的数学表达式为：

$$\mu = F_f / F_n = \tau / p \tag{4}$$

Donnet 等^[20]认为滑动速度是影响 MoS₂ 薄膜界面剪切强度 τ 的一个重要因素。MoS₂ 薄膜的 τ 与环境湿度有关，当滑动速度提高时，摩擦热随之增加，MoS₂ 薄膜中的水含量减少，从而导致 τ 减小。由于 MoS₂ 具有类石墨的层状六边形结构，其层间的弱范德华力是低剪切力的起源。当外加法向载荷增加时，层间距会减小，层间库仑势增加，会导致剪切强度 τ 降低^[10]。由此可见，滑动速度和法向载荷是影响摩擦因数和摩

摩擦力的2个关键因素。

2.1.2 摩擦因数模型的建立

在滑动摩擦中,摩擦力可由式(5)进行计算。

$$F_f = \tau \cdot A \quad (5)$$

式中: A 为真实接触面积。 A 随着 F_n 的增加而增加,而滑动速度影响着界面剪切强度 τ 。据文献[21]报道,由式(5),当摩擦因数正比于 F_n^d (d 为常数),同时摩擦因数与滑动速度为幂指数关系时 ($\bar{\mu} \propto v^{kv}$, k 为常数),可以得到摩擦因数与法向载荷和滑动速度的关系,见式(6)。

$$\bar{\mu} = \lambda \cdot F_n^d \cdot v^{kv} \quad (6)$$

式中: λ 为常数。

由于 MoS_2 薄膜的摩擦因数正比于 $F_n^{-1/3}$ (式(2)),同时其摩擦因数与滑动速度的关系为 $\bar{\mu} \propto v^{-0.849}$ (式(3)),因此可依据式(6),建立 MoS_2 薄膜摩擦因数与法向载荷 F_n 和滑动速度 v 的关系,见式(7)。

$$\bar{\mu} = c \left(\frac{3R}{4E^*} \right)^{2/3} \cdot F_n^d \cdot v^{kv} \quad (7)$$

结合式(2),令 $\lambda = c \left(\frac{3R}{4E^*} \right)^{2/3}$, c 为常数。对式(7)两边取自然对数,得到式(8)。

$$\ln \bar{\mu} = kv + \ln \left[c \left(\frac{3R}{4E^*} \right)^{2/3} \cdot F_n^d \right] \quad (8)$$

在不同载荷下, $\ln \bar{\mu}$ 与 v 的关系见图3。通过最小二乘法拟合,得到线性方程在不同载荷下的斜率为 k_i ($i=1, 5, 10$)。通过式(9),可以得出 $k=-0.849$ 。

$$k = \partial \ln \bar{\mu} / \partial v = (k_1 + k_5 + k_{10}) / 3 \quad (9)$$

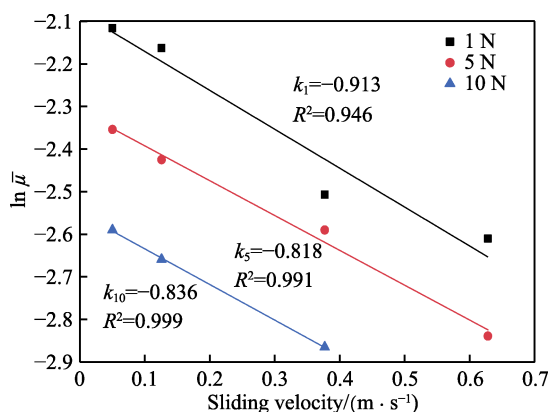


图3 不同载荷下摩擦因数对数和滑动速度的关系
Fig.3 Relationship between logarithm of friction coefficient and sliding velocity under different normal loads

将 k 值代入式(7),得到式(10)。

$$\bar{\mu} = c \left(\frac{3R}{4E^*} \right)^{2/3} \cdot F_n^d \cdot v^{-0.849} \quad (10)$$

根据实验条件, R 和 E^* 为已确定参数,采用非线性指数方程拟合 $\bar{\mu}$ 和 F_n ,得到 $c=1.71 \times 10^8$, $d=-0.169$ 。

将 c 和 d 值代入式(10), MoS_2 薄膜的平均摩擦因数 $\bar{\mu}$ 与法向载荷 F_n 和滑动速度 v 的函数关系可由式(11)表示。

$$\begin{aligned} \bar{\mu} &= 1.71 \times 10^8 \left(\frac{3R}{4E^*} \right)^{2/3} F_n^{-0.169} v^{-0.849} \\ &= 0.126 F_n^{-0.169} v^{-0.849} \end{aligned} \quad (11)$$

2.1.3 摩擦因数模型的验证

不同工况条件下, MoS_2 薄膜摩擦因数 $\bar{\mu}$ 的预测值与实验值的对比见图4,相对误差结果见表3。可以发现,摩擦因数模型的预测结果与实验数据在趋势和大小上都趋于一致。第3组预测实验中的相对误差较大,达到12.02%,其余预测结果的误差均小于10%。由于 MoS_2 薄膜的摩擦因数模型根据赫兹接触理论得到,而赫兹接触理论适用于弹性接触,因此在高接触压力下,薄膜会发生塑性变形,导致产生误差。

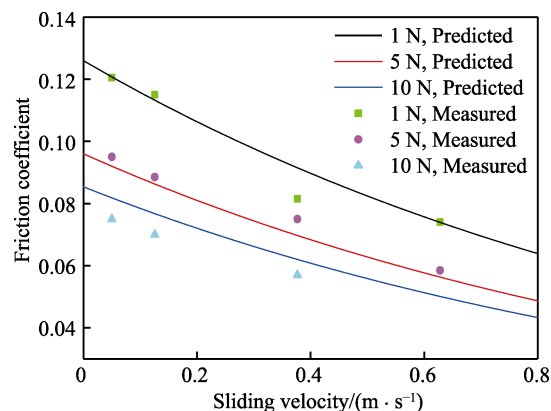


图4 MoS_2 薄膜摩擦因数预测和实验数据
Fig.4 Predicted data and test data of friction coefficient of MoS_2 film

表3 MoS_2 薄膜摩擦因数的预测误差
Tab.3 Prediction error of friction coefficient of MoS_2 film

No.	Predicted friction coefficient	Measured friction coefficient	Error (Pred-Meas)/%
1	0.1206	0.1205	0.08
2	0.1130	0.1150	-1.74
3	0.0913	0.0815	12.02
4	0.0738	0.0735	0.41
5	0.0918	0.0953	-3.67
6	0.0861	0.0885	-2.71
7	0.0695	0.0745	-6.71
8	0.0562	0.0585	-3.93
9	0.0816	0.0747	9.24
10	0.0765	0.0703	8.82
11	0.0618	0.0574	7.67

2.2 MoS_2 薄膜磨损与摩擦耗散能量的关系

MoS_2 薄膜磨损体积与摩擦耗散能量的关系见图5。通过最小二乘法拟合发现,磨损体积与摩擦耗散能成

正比关系。当置信度为 95% 时, 置信带的范围如图 5 中阴影部分所示。如果已知摩擦耗散能量 W , 可以根据 MoS₂ 薄膜磨损量与 W 的关系, 预测 MoS₂ 薄膜的磨损体积 V , 见式 (12)。

$$\begin{aligned} V &= 8.134 \times 10^{-5} W + 6.696 \times 10^{-4} \\ &= 8.134 \times 10^{-5} \bar{\mu} F_n vt + 6.696 \times 10^{-4} \end{aligned} \tag{12}$$

由于在实际摩擦过程中, 法向载荷、滑动速度和运行时间容易被获得, 只需测量摩擦副的摩擦因数, 就可以计算出摩擦耗散能量, 从而预测 MoS₂ 薄膜的磨损量。

MoS₂ 薄膜的摩擦因数通常采用实验法确定, 获得 $\bar{\mu}$ 值需要在相同的测试条件下重复测量多次以计算平均值。通过 2.1 节建立的摩擦因数计算模型 (式 (11)), 在法向载荷和滑动速度确定的情况下, 可以直接计算得到 $\bar{\mu}$, 从而预测 MoS₂ 薄膜的磨损体积。

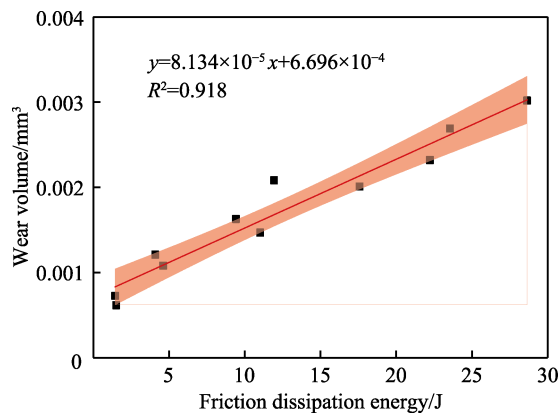


图 5 MoS₂ 薄膜磨损体积与摩擦耗散能量的关系
Fig.5 Relationship between wear volume and friction dissipation energy of MoS₂ film

2.3 干摩擦时 MoS₂ 薄膜的磨损预测模型

根据 2.2 节的分析可知, 干摩擦时, MoS₂ 薄膜的磨损量与摩擦耗散能存在显著的线性关系, 因此将计算摩擦因数的式 (11) 代入式 (12), 可得 MoS₂ 薄膜的磨损模型, 如式 (13) 所示。

$$V = 1.025 \times 10^{-5} \times F_n^{0.831} e^{-0.849v} \times vt + 6.696 \times 10^{-4} \tag{13}$$

不同法向载荷和滑动速度下, MoS₂ 薄膜实测磨损量与预测结果的对比见图 6。可以发现, 预测结果与实验数据基本吻合。表 4 给出了 MoS₂ 薄膜磨损模型预测值与实测值的相对误差。

目前, 磨损模型的计算值与实验值一般都存在较大偏差^[22]。根据摩擦耗散能方法建立的 MoS₂ 薄膜磨损模型的误差较小, 只有第 1 组预测实验中的误差相对较大, 达到 28.84%。实验值与计算值之间存在差异的主要原因是在摩擦过程中磨损机制发生了变化。虽然移除单位体积材料所需的能量一定, 但在不同磨损机制下, 磨损过程移除材料的方式不同, 所需的能量将发生改变。

MoS₂ 薄膜的磨痕形貌见图 7, 可以观察到摩擦

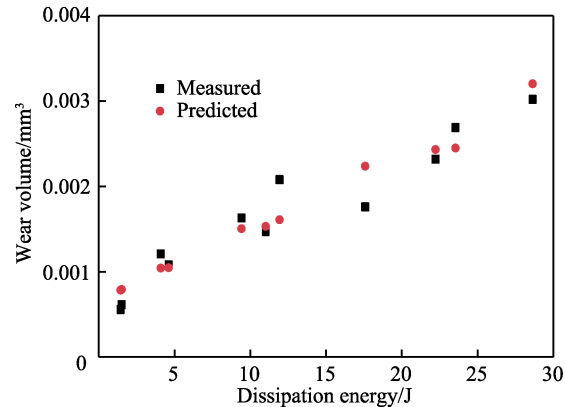


图 6 MoS₂ 薄膜磨损预测值与实测值的比较
Fig.6 Comparison between predicted and measured wear of MoS₂ film

表 4 MoS₂ 薄膜磨损模型的预测误差
Tab.4 Prediction error of wear model of MoS₂ film

No.	Predicted wear/mm ³	Measured wear/mm ³	Error (Pred-Meas)/%
1	0.000 79	0.000 62	28.84
2	0.000 79	0.000 73	8.17
3	0.001 04	0.001 21	-14.05
4	0.001 05	0.001 08	-2.78
5	0.001 51	0.001 63	-7.36
6	0.001 61	0.002 08	-22.60
7	0.002 43	0.002 32	4.74
8	0.002 45	0.002 69	-8.92
9	0.001 53	0.001 47	4.08
10	0.002 24	0.002 01	11.46
11	0.003 20	0.003 02	5.96

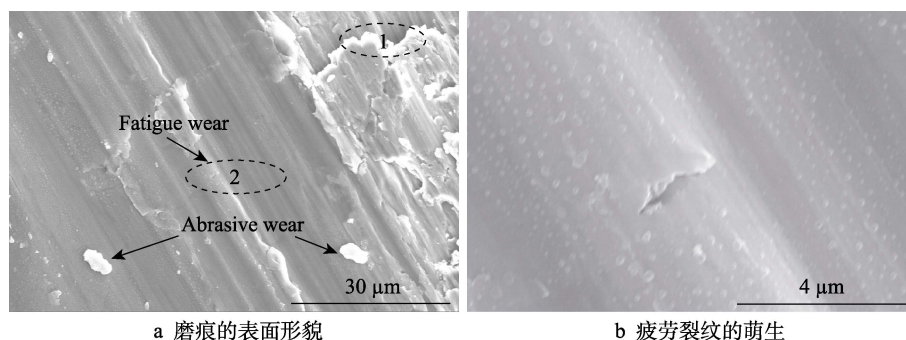
接触区内分布有大小不等的磨粒, 且磨痕表面存在明显的犁沟效应。此外, 在图 7a 的区域 1 中, 可观察到磨损掉的磨屑再次被压实 in 接触表面上。对图 7a 中的区域 2 进行局部放大, 发现存在疲劳磨损裂纹 (图 7b), 由此可知 MoS₂ 薄膜摩擦过程中的主要磨损机理是磨粒磨损和疲劳磨损。由于 MoS₂ 薄膜摩擦过程中伴随有多种磨损机制, 所以文中建立的磨损模型存在一定预测误差。文中研究 MoS₂ 薄膜摩擦学性能的前提条件: 磨粒磨损和疲劳磨损为主要磨损机理。

根据经典的 Archard 模型对 MoS₂ 薄膜的磨损体积进行预测, 计算见式 (14)^[23]。

$$V = k_s F_n x \tag{14}$$

式中: k_s 为磨损系数。

表 5 列出了 Archard 模型的预测值和实测结果, 可以发现 Archard 模型预测的磨损体积远低于实验值^[23-24]。这主要是由于 Archard 模型没有考虑摩擦因数的影响, 当工况条件发生改变时, 摩擦因数发生变化, 会导致磨损量也发生改变。据文献[25]报道, 磨合阶段中摩擦因数较大, 磨损情况较严重, 而 Archard 模型未考虑磨合阶段的影响, 使其预测的磨损量远低于实测值。

图7 MoS₂薄膜磨损表面的SEM形貌Fig.7 SEM images of wear tracks of MoS₂ film: a) Microstructure of wear track; b) Initiation of fatigue crack表5 Archard 磨损模型的预测与实测结果
Tab.5 Predicted wear of Archard model
and measured wear

No.	Predicted wear/mm ³	Measured wear/mm ³	Error (Pred-Meas)/%
1	0.000 06	0.000 62	-90.09
2	0.000 06	0.000 73	-91.60
3	0.000 24	0.001 21	-79.84
4	0.000 30	0.001 08	-71.77
5	0.000 61	0.001 63	-62.59
6	0.000 61	0.002 08	-70.68
7	0.001 22	0.002 32	-47.43
8	0.001 52	0.002 69	-43.33
9	0.000 91	0.001 47	-37.78
10	0.001 22	0.002 01	-39.32
11	0.002 44	0.003 02	-19.23

与 Archard 模型的分析结果相比,新的磨损模型误差较小,能较准确地预测磨损损失。由于基于能量法的磨损模型考虑了摩擦因数的演化,因此比 Archard 模型更具有优势。

3 结论

通过球-盘摩擦实验,根据赫兹接触理论,建立了 MoS₂ 薄膜摩擦因数的数学模型。此模型可同时考虑法向载荷和滑动速度的影响,且预测结果与实测结果误差较小,相对误差最大为 12.02%。在滑动摩擦过程中,MoS₂ 薄膜的磨损量与系统的摩擦耗散能量呈显著的线性关系。基于摩擦耗散能法,结合新的 MoS₂ 薄膜摩擦因数模型,建立了 MoS₂ 薄膜的磨损模型,可预测不同工况下 MoS₂ 薄膜的磨损量。新的磨损模型预测精度较高,最大相对误差为 28.84%,适合应用于工程实践。

参考文献:

- [1] VELLORE A, ROMERO GARCIA S, WALTERS N, et al. Ni-Doped MoS₂ Dry Film Lubricant Life[J]. Advanced Materials Interfaces, 2020, 7(22): 2001109.
- [2] 李忠建, 肖金涛, 鞠鹏飞, 等. 铝合金不同氧化处理工艺对其表面溅射 MoS₂ 膜层耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 23-29.
LI Zhong-jian, XIAO Jin-tao, JU Peng-fei, et al. Effect of Different Aluminum Oxidation Treatments on Abrasion Resistance of MoS₂ Film Prepared by Magnetron Sputtering[J]. Surface Technology, 2020, 49(12): 23-29.
- [3] 张耕培. 基于表面形貌的滑动磨合磨损预测理论与方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 85-87.
ZHANG Geng-pei. Study on Prediction of Sliding Running-in Wear Based on Surface Topography[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013: 85-87.
- [4] 周晖, 桑瑞鹏, 温庆平, 等. 非平衡磁控溅射沉积 MoS₂-Ti 复合薄膜的结构与真空摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(4): 374-378.
ZHOU Hui, SANG Rui-peng, WEN Qing-ping, et al. Study of Structure and Tribological Properties in Vacuum of MoS₂-Ti Composite Coatings Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering System[J]. Tribology, 2009, 29(4): 374-378.
- [5] 孙晓军, 汪晓萍, 孙嘉奕, 等. MoS₂ 基共溅射薄膜摩擦学性能的研究[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(1): 20-24.
SUN Xiao-jun, WANG Xiao-ping, SUN Jia-yi, et al. Tribological Behavior of MoS₂ Based Cosputtered Film[J]. Tribology, 1998, 18(1): 20-24.
- [6] ROBERTS E W. Ultralow Friction Films of MoS₂ for Space Applications[J]. Thin Solid Films, 1989, 181(1/2): 461-473.
- [7] MENG H C, LUDEMA K C. Wear Models and Predictive Equations: Their Form and Content[J]. Wear, 1995, 181-183: 443-457.
- [8] MENG H C. Wear Modeling: Evaluation and Categorization of Wear Models[D]. Michigan: The University of Michigan, 1994: 6-18.
- [9] ARCHARD J F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.
- [10] 蔡胜, 郭鹏, 左潇, 等. 载荷对 MoS₂/C 复合薄膜摩擦学行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 51-58.
CAI Sheng, GUO Peng, ZUO Xiao, et al. Effect of Load on Tribological Behavior of MoS₂/C Composite Films[J]. Tribology, 2018, 38(1): 51-58.

(下转第 75 页)