

# 摩擦学学报

TRIBOLOGY



## 界面闪温对ZDDP反应膜生成特性的研究

石伟, 蒲伟, 卫朋冲, 杨佳隆

### Effect of Flash Temperature on the Formation of ZDDP Reaction Film

SHI Wei, PU Wei, WEI Pengchong, YANG Jialong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020053>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 考虑界面粗糙度动态变化的点接触弹流润滑特性研究

Surface Roughness Effect on Elastohydrodynamic Lubrication Point Contact Considering Dynamic Change of Interface Roughness

摩擦学学报. 2021, 41(1): 47 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019138>

##### 剂量对润滑条件下氮离子注入316L不锈钢摩擦学行为的影响

Effect of Dose on Tribological Performance of N<sup>+</sup>-Implanted Stainless Steel under Lubrication Conditions

摩擦学学报. 2019, 39(1): 43 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018128>

##### 不同滑滚比下润滑油膜流变特性试验观察与数值模拟

Experimental Observation and Numerical Simulation of Rheological Properties of Lubricating Films under Different Sliding-Rolling Ratios

摩擦学学报. 2020, 40(2): 158 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019100>

##### 滑动速度对磷酸盐激光玻璃摩擦磨损性能的影响

Effects of Sliding Velocity on the Friction and Wear Behaviors of Phosphate Laser Glass

摩擦学学报. 2018, 38(2): 196 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.02.010>

##### 牵引模式下球环点接触高速弹流润滑行为机理分析

Analysis for Mechanism of EHL Behavior at High Speeds in Ball-on-Ring Contacts in Tractive Rolling Mode

摩擦学学报. 2018, 38(6): 619 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018055>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2020053

# 界面闪温对ZDDP反应膜生成特性的研究

石伟, 蒲伟\*, 卫朋冲, 杨佳隆

(四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)作为最常见的发动机润滑油添加剂, 通常认为ZDDP摩擦膜在较高的宏观环境温度下产生, 而忽视了局部区域的闪温变化对于膜生长的影响. 本文作者结合应力促进的热活化理论和润滑界面闪温计算模型, 以球-盘滑滚摩擦试验研究为主, 进行了界面闪温对ZDDP摩擦膜生成特性的分析. 在载荷和环境温度恒定的条件下, 计算了不同界面滑滚比的闪温大小与分布, 采用球-盘试验测得了常温下不同滑滚比的ZDDP润滑剂摩擦系数变化趋势, 并与计算得到的闪温模型对照, 得到闪温对ZDDP反应膜生长的影响规律; 为了改善ZDDP薄膜导致的高摩擦, 测试了硬脂酸钙与ZDDP的协同减摩效果. 结果表明: 界面闪温的升高同样可以促进一定厚度的ZDDP摩擦膜生长; 硬脂酸钙润滑剂与ZDDP共同生成的边界膜可以有效地降低ZDDP带来的高摩擦力, 可以用于改善ZDDP摩擦膜的摩擦性能.

**关键词:** 二烷基二硫代磷酸锌; 闪温; 滑滚比; 摩擦膜; 硬脂酸钙

**中图分类号:** TH117.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2021)06-0946-07

## Effect of Flash Temperature on the Formation of ZDDP Reaction Film

SHI Wei, PU Wei\*, WEI Pengchong, YANG Jialong

(School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Sichuan Chengdu 610065, China)

**Abstract:** As the most common additive of engine lubricating oil, zinc Dialkyldithiophosphate (ZDDP) has not yet found a suitable substitute. It is generally considered that ZDDP film is produced at a higher macro environment temperature, while the influence of local flash temperature change on the growth of ZDDP friction film is ignored. Based on the thermal activation theory of stress promotion and the calculation model of lubrication interface flash temperature, this paper focused on the ball-disk slip-rolling friction experimental research, and conducted the analysis of interface flash temperature on the ZDDP friction film formation characteristics. The flash temperature and its distribution under different interface slip roll ratios were calculated under the condition of constant load and ambient temperature. At room temperature the variation of friction coefficient of ZDDP lubricant with different slip roll ratios was measured by ball-on-disk experiment at room temperature, and compared with the calculated flash temperature model, the effect of flash temperature on the growth of ZDDP reaction film can be obtained. In order to improve the high friction caused by ZDDP film, the synergistic effect of calcium stearate and ZDDP was tested. The results showed that the increase of interfacial flash temperature can also produce ZDDP friction film of a certain thickness. The synergistic friction reduction experiments of calcium stearate lubricant and ZDDP showed that calcium stearate lubricant improved the friction performance of ZDDP friction film, and the boundary film formed by calcium stearate lubricant and ZDDP effectively reduced the high friction caused by ZDDP.

Received 2 April 2020, revised 22 November 2021, accepted 24 December 2020, available online 28 November 2021.

\*Corresponding author. E-mail: Pwei@scu.edu.cn, Tel:+86-15902851638.

The project was supported by the National Science Foundation of China (51875369) and the Chongqing key industry general key technology innovation special major R & D projects (cstc2017zdcy-zdxxX0001).

国家自然科学基金项目(51875369)和重庆市重点产业共性关键技术创新专项重大研发项目(cstc2017zdcy-zdxxX0001)资助.

**Key words:** zinc dialkyl dithiophosphate; flash temperature; slip roll ratio; friction film; calcium stearate

二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)作为兼具抗磨、抗氧和抗腐蚀多种功能的添加剂,在汽车润滑油中应用非常广泛. ZDDP已经使用了70多年,至今仍然是发动机润滑油的关键成分,尚未找到适合的替代品,很多研究工作都聚焦于ZDDP的摩擦膜生长机理和抗磨性能.

在ZDDP反应膜的生成机理研究方面,通常认为其在摩擦表面上形成反应膜,主要成分为固体无定形磷酸盐<sup>[1-2]</sup>,反应膜主要性能取决于磷酸盐种类<sup>[3]</sup>. 反应膜通过限制两个摩擦表面的直接接触来控制磨损,从而防止表面产生粘附并减少滑动过程中的瞬态接触应力. 由于摩擦工况的复杂性,现有ZDDP反应膜形成机理的研究主要通过在实验室中用球-盘试验机分析反应膜的摩擦磨损特性与成形机理. 环境温度和压力已经被证实是影响ZDDP降解和摩擦膜形成的主要因素,而应力促进的热活化理论已被普遍认可<sup>[4]</sup>. 近年来,Spikes等<sup>[5-8]</sup>系统研究了往复运动、滑滚比、剪切应力以及时间对ZDDP反应膜生长的影响,发现在接触压力和环境温度相同的情况下,剪切应力的增加也将会显著提升ZDDP反应膜的生长速率,而往复运动频率和滑滚比对摩擦膜的生长影响很小,基本可以忽略.

本文作者基于应力促进的热活化理论,建立了ZDDP反应膜生长的理论模型,理论研究发现在一定的条件下,界面闪温会显著影响反应膜的生长速率<sup>[9]</sup>. 进一步可以推测,存在一定的工况范围,即使载荷和环境温度恒定,改变界面滑滚比也有可能显著影响摩擦膜的生长;或者即使在较低的环境温度下(例如20℃,文献的试验温度通常在100℃以上),通过调整滑滚比使界面闪温升高,仍然可能实现ZDDP反应膜的生成.

在ZDDP反应膜摩擦特性研究方面,有学者发现不同的工况环境和ZDDP成分不同配比,会不同程度地影响反应膜的摩擦系数<sup>[6,10]</sup>,但边界摩擦系数总体处于0.13~0.18左右. 为了降低摩擦能耗,美国阿贡国家实验室曾提出了以碳基摩擦反应膜替代ZDDP膜的制备技术,可以将摩擦系数减小为0.08<sup>[11]</sup>. 同时,许多学者也研究了不同材料的协同减摩效果,例如,Campen等<sup>[12]</sup>发现硬脂酸可以在常温下有效降低油酸和反油酸的边界润滑摩擦系数,付景国等<sup>[13]</sup>发现石墨烯与ZDDP共混物作为润滑油添加剂时可改善摩擦副间的摩擦学性能. 因此,进一步探索油润滑状态下硬脂酸盐与ZDDP反应膜的协同减摩效果,对工程实践具有一定的指导意义.

鉴于此,本文作者在前期理论研究的基础上,采用球-盘试验与理论建模相结合的方式,在相同接触载荷和环境温度下,通过构建滑滚比界面的混合润滑闪温分析模型,获得不同滑滚比下界面的闪温大小和分布,从试验角度研究不同界面闪温对ZDDP反应膜生长的影响,并进一步测试硬脂酸盐与ZDDP反应膜的协同减摩效果.

## 1 闪温模型计算及试验部分

ZDDP摩擦膜的生长速率服从热-应力活化理论,如公式(1)所示.

$$\Gamma_{\text{growth rate}} = \Gamma_0 \exp\left(-\frac{\Delta U_{\text{act}} - \sigma \Delta V_{\text{act}}}{k_B T}\right) \quad (1)$$

式中: $\Gamma_0$ 是前因子, $\Delta U_{\text{act}}$ 是内部活化能, $\Delta V_{\text{act}}$ 表示活化体积, $\sigma$ 表示应力大小,一般可用最大赫兹压力, $k_B$ 是玻尔兹曼常数, $T$ 表示反应温度<sup>[8]</sup>.

可以看到温度和压力是影响ZDDP降解和摩擦膜形成的主要因素. 研究表明,宏观环境温度对摩擦膜的生长具有显著影响,Spikes等<sup>[5]</sup>通过在一定工况范围内的试验认为滑滚比对摩擦膜的生长影响很小,可以忽略. 本文旨在进一步探究滑滚比变化导致的瞬态闪温(闪温时间很短,通常小于0.000 1 s)是否如宏观环境温度一样对摩擦膜的生长有明显影响. 首先采用界面闪温理论对润滑界面温升进行预测,以指导试验的设计. 试验中ZDDP摩擦膜通过球盘间的摩擦生成,摩擦膜的生长将会显著增大界面的摩擦系数,因此,通过观察摩擦系数的变化就可以直观判定界面是否有ZDDP摩擦膜的产生. 同时,为了避免磨损对摩擦系数的干扰,界面的润滑油膜必须具有一定的厚度,使球盘处于全膜润滑状态. 为了研究界面闪温对ZDDP摩擦膜形成的影响,接触区域的闪温可以通过控制卷吸速度和相对滑动速度来改变,设定固定的卷吸速度,改变滑滚比从而使闪温出现明显的变化,并将闪温和观测到的摩擦系数变化进行对比.

### 1.1 闪温模型计算

润滑条件下点接触摩擦闪温计算基本方程组如下所示.

界面的压力分布可采用等温Reynolds方程求解<sup>[14]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho}{12\eta^*} h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho}{12\eta^*} h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = u_e \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (2)$$

膜厚方程为

$$h = f(x, y, t) + \delta_1(x, y, t) + \delta_2(x, y, t) + V_e(x, y, t) \quad (3)$$

其中:  $f(x, y, t)$  为接触区域的综合接触间隙,  $\delta_1(x, y, t)$  和  $\delta_2(x, y, t)$  分别为为刚球与盘的表面粗糙度,  $V_e(x, y, t)$  为接触表面的弹性变形, 表达式如下:

$$V_e(x, y, t) = \frac{2}{\pi E'} \iint_{\Omega} \frac{p(\xi, \varsigma, t)}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\varsigma)^2}} d\xi d\varsigma \quad (4)$$

密度压力关系采用Dowson-Higginson方程:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right) \quad (5)$$

ZDDP润滑剂的黏度压力关系采用Barus方程:

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (6)$$

载荷平衡方程为

$$w(t) = \iint_{\Omega} p(x, y, z) dx dy \quad (7)$$

根据Bair-Winer流变模型<sup>[15]</sup>, 对点接触的摩擦力和接触表面温度进行计算, 因为此时接触区的剪应力与剪切速率不再成正比, 所以必须通过黏弹性非牛顿流体模型求解润滑油膜中的切应力, 见式(8).

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G_{\infty}} - \frac{\tau_L}{\eta} \ln \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_L} \right) \quad (8)$$

其中:  $G_{\infty}$  为极限剪切弹性模量,  $\tau_L$  为极限剪切应力. 对该非线性方程进行求解, 计算出整个求解域上的剪切应力的分布, 积分计算出润滑油膜的摩擦力.

由于润滑剂的极限剪切应力是温度的函数, 界面摩擦明显受表面温度影响; 而摩擦又决定界面处的热量生成, 因此反过来对表面闪温有显著影响. 摩擦与闪温二者相互依存.

根据混合润滑中半无限体的移动热源公式<sup>[16]</sup>, 则可计算ZDDP润滑剂间球盘的表面闪温:

$$T_1(\zeta) = T_{b1} + \left( \frac{1}{\pi \rho_1 C_1 u_1 k_1} \right)^{0.5} \int_{-x}^{\zeta} \left\{ \frac{k_f}{h} [T_2(\xi) - T_1(\xi)] + \frac{q(\xi)}{2} \right\} \frac{d\xi}{(\zeta - \xi)^{0.5}} \quad (9)$$

$$T_2(\zeta) = T_{b2} + \left( \frac{1}{\pi \rho_2 C_2 u_2 k_2} \right)^{0.5} \int_{-x}^{\zeta} \left\{ \frac{k_f}{h} [T_1(\xi) - T_2(\xi)] + \frac{q(\xi)}{2} \right\} \frac{d\xi}{(\zeta - \xi)^{0.5}} \quad (10)$$

对于式(2~10)方程组的数值求解过程, 此前已做过详细的研究, 具体内容参考文献[12-13].

## 1.2 试验材料

试验采用的材料分别为二类60N基础油; 二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP), 质量分数为99%; 黏度等级为6的聚 $\alpha$ 烯烃, 即PAO-6. 清洗溶液采用去离子水、丙酮和无水乙醇. 清洗设备采用超声波清洗机, 保存样品采用真空干燥箱.

在二类60N基础油中加入质量分数为10%的ZDDP, 用超声波震荡1 h, 使添加的ZDDP充分分散, 制得润滑剂样品, 测得其各项指数列于表1中.

表1 60N+ZDDP润滑剂的各项指数  
Table 1 Indexes of 60N+ZDDP lubricant

| Material | Kinematic viscosity at 40 °C/(mm <sup>2</sup> /s) | Viscosity/(Pa·s) | Flash point /°C | Pour point/°C | Specific gravity |
|----------|---|------------------|-----------------|---------------|------------------|
| 60N+ZDDP | 10.02   | 90               | 177             | -33           | 0.834            |

## 1.3 试验设备和方法

ZDDP摩擦膜的生成试验通过球-盘滑滚摩擦试验平台进行, 图1为高性能滑滚摩擦试验台的结构示意图, 试验过程中球和盘均以设定的转速工作, 通过传感器测量试件上施加的载荷和摩擦阻力, 以此得到摩擦系数. 施加载荷分别为300和500 N, 测试卷吸速度为1 m/s, 将摩擦试件分别在不同滑滚比下进行试验, 测试时间为3 000 s, 每组试验进行3次取平均值, 每次试验前先用丙酮超声波清洗球-盘摩擦副20 min, 以从圆盘和球上除去附着的ZDDP残留添加剂. 再使用无水乙醇将球-盘摩擦副清理干净并吹干, 固定在试验平台上进行试验. 钢球直径为38 mm, 材质为轴承

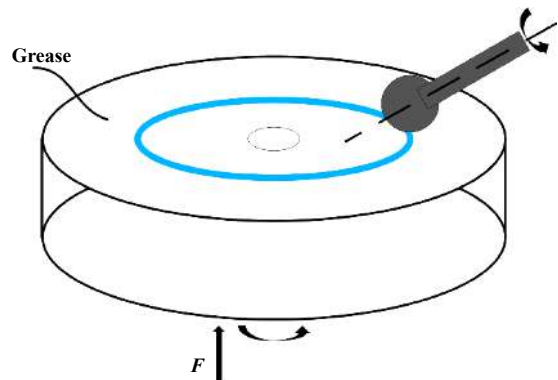


Fig. 1 Structure sketch of high performance sliding and rolling friction test-bed

图1 高性能滑滚摩擦试验台结构简图

钢球(购买于日本NSK公司,  $R_a = 0.016 \mu\text{m}$ ). 钢盘直径为150 mm, 材质为Cr12钢,  $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 摩擦闪温计算分析

球盘的点接触闪温分析选取的钢盘表面微观形貌如图2所示, 钢球的表面十分光滑, 在算例中以光滑表面表示, 求解域为  $-3.1 \leq X \leq 1.3$  和  $-1.3 \leq Y \leq 1.3$ , 网格为  $256 \times 256$ , 接触载荷300 N, 滑滚比分别为0.2、0.6和1.0, 通过调整滑滚比得到不同的界面闪温. 经过上述界面闪温模型计算, 不同滑滚比和不同载荷下的点接触表面闪温分布图如图3所示.

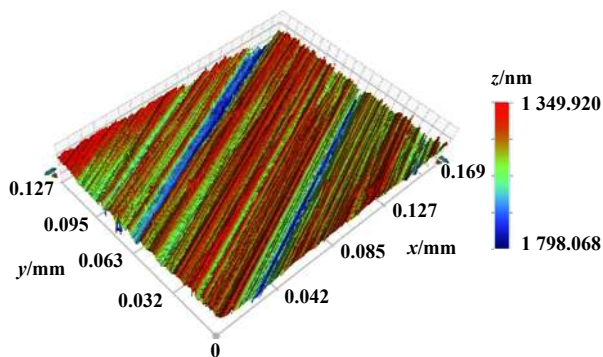


Fig. 2 Surface profile of steel disk  
图2 钢盘表面轮廓图

从图3中可以看到, 在滑滚比较低时, 钢盘粗糙表面的界面温升非常小, 随着滑滚比的逐渐增大(载荷为300 N), 表面温升也逐渐变大, 当滑滚比增大到1.0时, 界面闪温增大到70~80 °C. 在最大滑滚比的基础上, 维持卷吸速度不变, 将载荷增大到500 N, 得到

了更高的点接触界面闪温. 因此在相同卷吸速度下, 改变滑滚比可以有效增大摩擦接触界面的闪温, 通过增大滑滚比和载荷来调节闪温, 就可以在常温下满足ZDDP反应膜产生所需要的环境.

### 2.2 不同闪温下摩擦膜生成速率的影响

为了研究不同滑滚比(对应不同表面闪温)是否对ZDDP摩擦膜的生长仍然具有促进作用, 本文作者采用球-盘试验在相同接触载荷和环境温度下, 测试不同滑滚比下球、盘间摩擦系数随时间变化的规律, 以验证界面闪温对ZDDP摩擦膜生长的影响.

试验环境温度为20 °C, 60N+ZDDP作为润滑剂, 采用喷油润滑可以使润滑油始终保持在室温环境下工作. 试验过程中, 球盘卷吸速度的取值为1 m/s, 滑滚比分别为0.2、0.6和1.0, 施加在盘上的载荷为300 N, 对应的最大赫兹接触压力为1.28 GPa, 所有摩擦系数的测量均从载荷到达设定值并稳定后开始, 每组试验重复3次取均值. 不同滑滚比和不同载荷下60N+ZDDP润滑剂的摩擦系数随时间变化的曲线如图4所示. 根据图4显示的摩擦系数曲线, 可以明显地观测到相同卷吸速度下, 不同滑滚比的ZDDP润滑剂的摩擦系数随时间呈现不同的变化趋势, 这是因为闪温不同, 在摩擦副表面形成了厚度不一的ZDDP摩擦膜, 且摩擦膜生长速率也不同, 这导致了不同滑滚比下润滑剂摩擦系数变化趋势的差异.

由图4可以观测到, 当滑滚比较低时(滑滚比为0.2和0.6时), 此时球盘间的相对滑动速度较小, ZDDP润滑剂的摩擦系数几乎没有发生变化, 这说明在此滑滚比下ZDDP润滑剂没有发挥效果, 此时摩擦接触区域的闪温温升较低(处于30~40 °C之间), 没有生成

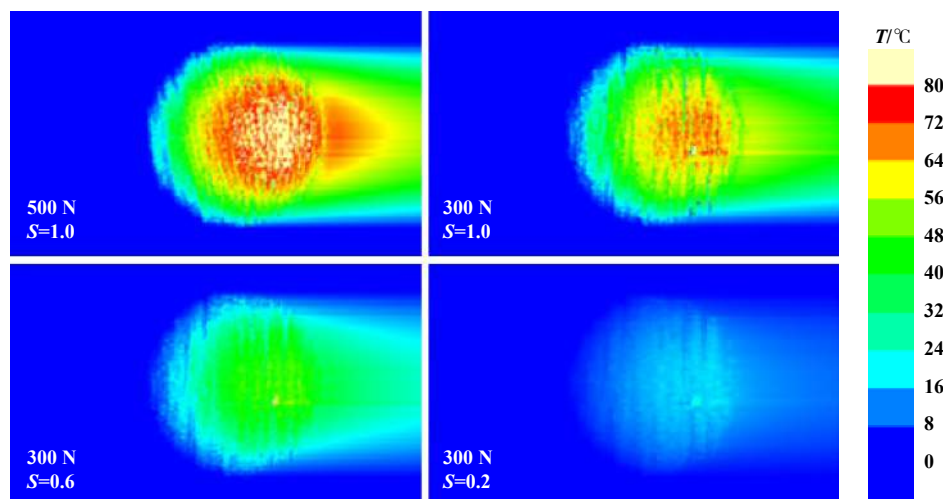


Fig. 3 Surface flash temperature under different load and rolling-to-sliding ratio  
图3 不同载荷和滑滚比下界面的闪温分布

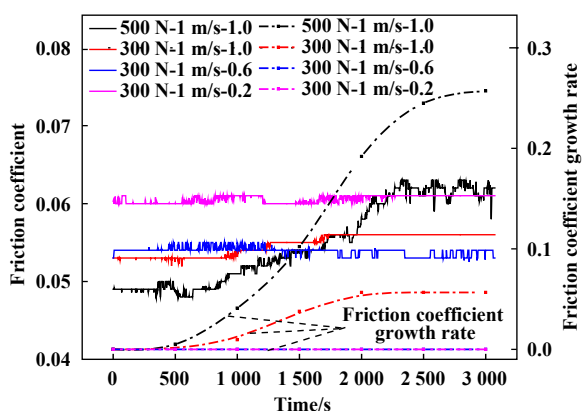


Fig. 4 Friction coefficient and growth rate of ZDDP lubricants with slip-to-roll ratio and load

图4 不同载荷下不同滑滚比的ZDDP润滑剂的摩擦系数曲线和生长速率曲线

ZDDP摩擦膜。当滑滚比增大到1.0时,球盘间的相对滑动速度较高,在摩擦区域产生了较高的闪温,摩擦系数起初没有变化,随着滑动试验进行,在第1 000 s时,ZDDP润滑剂的摩擦系数开始缓慢增大,从0.053增大到约0.056并逐渐趋于稳定,根据图3的闪温分布图,可以看到摩擦接触区域产生了约70 °C的闪温温升(考虑到室温20 °C,因此界面瞬态温度达到了90 °C),接近通常ZDDP起作用的环境温度,说明摩擦区域产生了少量的ZDDP摩擦膜。

图4中虚线比较了相同速度不同载荷下ZDDP润滑剂的摩擦系数增大率随时间变化的曲线,可以看到当载荷增大至500 N时,ZDDP润滑剂的摩擦系数从0.049增大到0.062,增长百分比达到30%,ZDDP摩擦膜的生长更为明显。载荷增大使得摩擦区域的闪温急剧增大,更多的摩擦热导致ZDDP摩擦膜的生长速率也更快,接触区域ZDDP摩擦膜的厚度增大,从而引起的摩擦系数增大更为明显。当然,载荷的增大也会在一定程度上促进摩擦膜的生长,但通过应力活化理论的指数方程,部分载荷的变化,其影响的幅度仍然有限,此时温度的影响仍然占主导作用<sup>[8]</sup>。

由上述可知,在一定的工况范围,即使载荷和环境温度恒定,改变界面滑滚比仍能显著影响摩擦膜的生长,即使在较低的环境温度下,通过调整滑滚比以使界面闪温升高,仍然可能实现ZDDP反应膜的产生。

### 3 硬脂酸钙与ZDDP的协同减摩效果

ZDDP通过形成固体磷酸盐膜赋予摩擦件抗磨损特性,但较为粗糙的固体ZDDP摩擦膜会抑制油膜的流动,导致滑动摩擦系数增大,而摩擦改性剂硬脂酸有较好的边界减摩效果,具有降低其他摩擦改性剂摩

擦系数的能力<sup>[10]</sup>,因而测试了硬脂酸及其盐在边界润滑下的摩擦学性能,硬脂酸盐为硬脂酸钙、硬脂酸镁及硬脂酸钡。试验中发现质量分数为0.2%的硬脂酸及盐就可以取得很好的减摩效果,测得的Stribeck曲线如图5所示。

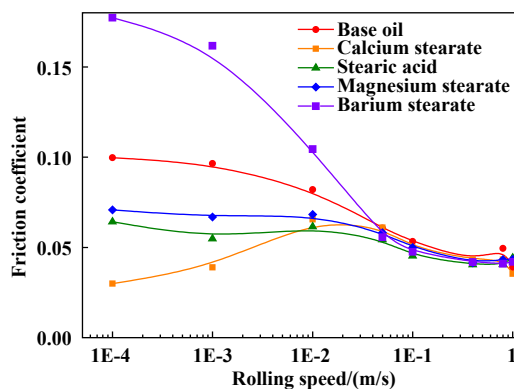


Fig. 5 Stribeck curves of lubricants with different stearates (load =200 N)

图5 不同硬脂酸盐的润滑剂的Stribeck曲线(载荷为200 N)

如图5所示,添加硬脂酸钙的润滑剂在边界润滑下有极低的摩擦系数,其摩擦系数随滑动速度的对数先增大后减小,拥有比硬脂酸更好的润滑效果。硬脂酸钙可以在摩擦表面形成致密光滑的边界膜,形成的分子膜有降低摩擦系数的效果,推测其可以弥补ZDDP反应膜粗糙度较高的缺陷,为此研究了硬脂酸钙与ZDDP的协同减摩效果。设计了1组试验,配置了两种不同添加剂组合的润滑剂,分别为10% ZDDP和10% ZDDP+0.2%硬脂酸钙,测试其在一定速度和载荷下的摩擦力随时间变化曲线。考察了硬脂酸钙润滑剂和ZDDP混合溶液在全膜润滑下对摩擦力的影响,摩擦系数随时间变化的曲线如图6所示。可以看到在高转

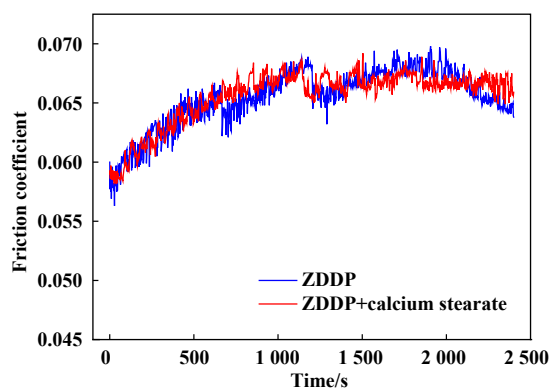


Fig. 6 Curves of calcium stearate lubricant and ZDDP on friction coefficient at 1.3 m/s

图6 速度为1.3 m/s硬脂酸钙润滑剂和ZDDP对摩擦力的影响曲线

速下,其与单独ZDDP溶液的摩擦系数增长情况基本相同,这说明两种润滑油中摩擦膜的生长速度是一致的,硬脂酸钙润滑剂并不影响ZDDP反应膜的生成和抗磨损效果。

之前研究表明ZDDP反应膜更容易在高温、高速和高载荷下生成,而在低速下生成较慢,因此为了测试低速下的协同减摩效果,分别用10% ZDDP和10% ZDDP+0.2%硬脂酸钙作为润滑剂在1.3 m/s的滑动速度下进行滑滚摩擦试验并持续40 min,以在轨道上快速生成完整的摩擦反应膜;在此基础上进行第二步试验,以两组试验的轨道在0.1 m/s的滑动速度下继续进行滑滚摩擦试验,载荷为300 N,以研究硬脂酸钙与ZDDP的协同减摩效果,载荷加到设定值并稳定后开始计时.两组试验的摩擦力随时间变化曲线如图7所示。

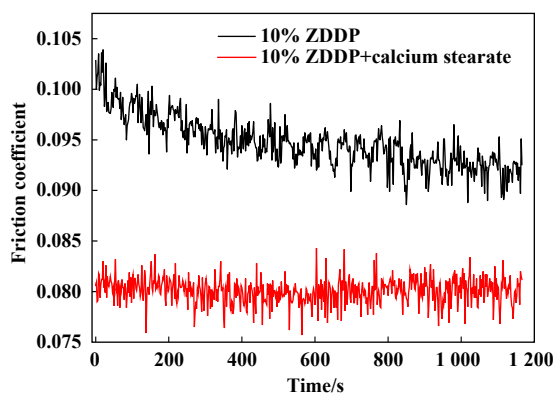


Fig. 7 Friction coefficients of calcium stearate lubricant and ZDDP at 0.1 m/s

图7 速度为0.1m/s硬脂酸钙润滑剂和ZDDP对摩擦力的影响曲线

由图7可以看出在添加硬脂酸钙润滑剂后,摩擦系数相比单独ZDDP润滑剂明显减少,摩擦系数降低约10%. 10%ZDDP润滑剂的摩擦系数随时间逐渐降低并趋于稳定,这是因为ZDDP摩擦膜在滑动中被逐渐消耗且在低速下生成缓慢难以及时补充,10% ZDDP+0.2%润滑剂的摩擦系数随时间推移逐渐稳定,且摩擦系数总是低于单独的ZDDP润滑剂,这是因为在硬脂酸钙与ZDDP的混合润滑剂中,硬脂酸钙润滑剂形成的边界膜取代部分生成缓慢的ZDDP膜,并改善了粗糙ZDDP膜的表面状态,发挥了一定的减摩作用.以上结果表明,在低速的边界润滑下,硬脂酸钙可以有效改善ZDDP膜表面状况,降低ZDDP导致的高摩擦,改善其摩擦特性。

## 4 结论

a. 采用界面闪温理论对点接触模型界面温升进

行了预测,计算了常温环境下不同滑滚比和载荷下点接触模型的表面闪温分布,闪温模型显示通过增大滑滚比和载荷来调节闪温,就可以在常温下达到满足ZDDP摩擦膜产生所需要的环境。

b. 对比球-盘试验测得常温下不同滑滚比的ZDDP润滑剂摩擦系数变化趋势并计算得到闪温模型,结果表明,闪温对ZDDP摩擦膜的产生有非常显著的影响,在较低的环境温度下,只要界面的闪温达到一定的程度,仍然可以促进摩擦膜的产生,且反应膜的生长速度随闪温温升指数增大.这一发现在一定程度上丰富了ZDDP膜的生长机理,同时,也为ZDDP润滑剂应用在一些界面闪温较高的常温工况摩擦副中提供了可能。

c. 研究了硬脂酸钙减摩剂与ZDDP的协同减摩效果,硬脂酸钙与ZDDP共同形成的边界吸附膜相比单独ZDDP摩擦膜减摩效果更好,混合润滑剂相比ZDDP润滑剂摩擦系数可减小约10%。

## 参考文献

- [1] Martin J M, Grossiord C, Le Mogne T, et al. The two-layer structure of Zndtp tribofilms: Part I: AES, XPS and XANES analyses[J]. Tribology International, 2001, 34(8): 523-530. doi: 10.1016/S0301-679X(01)00029-9.
- [2] Liu E, Kouame S D. An XPS study on the composition of zinc dialkyl dithiophosphate tribofilms and their effect on camshaft lobe wear[J]. Tribology Transactions, 2014, 57(1): 18-27. doi: 10.1080/10402004.2013.835014.
- [3] Li Xingliang, Yue Wen, Wang Chengbiao, et al. Tribochemical mechanisms of W/Mo films in the presence of ZDDP[J]. Tribology, 2015, 32(2): 183-189 (in Chinese) [李星亮, 岳文, 王成彪, 等. ZDDP作用下钨/钼膜的摩擦化学润滑机理研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 32(2): 183-189]. doi: 10.16078/j.tribology.2015.02.009.
- [4] Gosvami N N, Bares J A, Mangolini F, et al. Mechanisms of antiwear tribofilm growth revealed *in situ* by single-asperity sliding contacts[J]. Science, 2015, 348(6230): 102-106. doi: 10.1126/science.1258788.
- [5] Shimizu Y, Spikes H A. The influence of slide-roll ratio on ZDDP tribofilm formation[J]. Tribology Letters, 2016, 64(2): 19. doi: 10.1007/s11249-016-0738-z.
- [6] Dawczyk J, Morgan N, Russo J, et al. Film thickness and friction of ZDDP tribofilms[J]. Tribology Letters, 2019, 67(2): 34. doi: 10.1007/s11249-019-1148-9.
- [7] Shimizu Y, Spikes H A. The tribofilm formation of ZDDP under reciprocating pure sliding conditions[J]. Tribology Letters, 2016, 64(3): 46. doi: 10.1007/s11249-016-0776-6.
- [8] Zhang Jie, Spikes H A. On the mechanism of ZDDP antiwear film formation[J]. Tribology Letters, 2016, 63(2): 24. doi: 10.1007/s11249-016-0706-7.

- [9] Pu Wei, Zhang Qin, Zhang Wang, et al. Flash temperature and anti-wear tribofilm growth mechanisms by asperity contact in top-ring/liner conjunction of IC engines[J]. *Tribology International*, 2020, 146: 106186. doi: [10.1016/j.triboint.2020.106186](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106186).
- [10] Wang Wen, Li Wei, Li Guoliang, et al. Experimental study on frictional properties of ZDDP in 250N base oil under different test conditions[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(5): 55–59 (in Chinese) [王稳, 李维, 李国良, 等. 不同试验条件下ZDDP在250N基础油中的摩擦性能试验研究[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(5): 55–59]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2020.05.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2020.05.009).
- [11] Erdemir A, Ramirez G, Eryilmaz O L, et al. Carbon-based tribofilms from lubricating oils[J]. *Nature*, 2016, 536(7614): 67–71. doi: [10.1038/nature18948](https://doi.org/10.1038/nature18948).
- [12] Campen S, Green J, Lamb G, et al. On the increase in boundary friction with sliding speed[J]. *Tribology Letters*, 2012, 48(2): 237–248. doi: [10.1007/s11249-012-0019-4](https://doi.org/10.1007/s11249-012-0019-4).
- [13] Fu Jingguo, Zhu Jiaqi, Zhu Xinhe, et al. Tribological properties of graphene and ZDDP as compound lubricant additives[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2020, 46(2): 114–119 (in Chinese) [付景国, 朱嘉琪, 朱新河, 等. 石墨烯与ZDDP作为复配润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. *大连海事大学学报*, 2020, 46(2): 114–119]. doi: [10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2020.02.014](https://doi.org/10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2020.02.014).
- [14] Zhu Dong, Wang Jiaxu, Ren Ning, et al. Mixed elastohydrodynamic lubrication in finite roller contacts involving realistic geometry and surface roughness[J]. *Journal of Tribology*, 2012, 134(1): 011504. doi: [10.1115/1.4005952](https://doi.org/10.1115/1.4005952).
- [15] Pu Wei, Zhu Dong, Wang Jiaxu, et al. Rolling-sliding contact fatigue of surfaces with sinusoidal roughness[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 90: 57–68. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2016.04.007](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.04.007).
- [16] Zhu D, Cheng H S. An analysis and computational procedure for EHL film thickness, friction and flash temperature in line and point contacts[J]. *Tribology Transactions*, 1989, 32(3): 364–370. doi: [10.1080/10402008908981901](https://doi.org/10.1080/10402008908981901).