



载荷和纳米 MoS_2 添加剂含量对圆形锤头-棒料的摩擦磨损特性及其机理分析

张立军 韩琳 张德潇 李增辉 张军伟 金永山 王早祥

Friction and Wear Characteristics and Mechanism Analysis of Load and Nano MoS_2 Additive on Circular Hammerhead-Bar

ZHANG Lijun HAN Lin ZHANG Dexiao LI Zenghui ZHANG Junwei JIN Yongshan WANG Hanxiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

载荷对 MoS_2/C 复合薄膜摩擦学行为的影响

Effect of Load on Tribological Behavior of MoS_2/C Composite Films

摩擦学学报. 2018, 38(1): 51 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.01.007>

花状 O-MoS_2 添加剂的制备及摩擦学性能研究

Preparation and Tribological Performance of O-MoS_2 Nanoflowers as an Effective Lubricant Additive

摩擦学学报. 2017, 37(5): 631 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.010>

石墨烯/二硫化钼复合纳米添加剂的制备及摩擦学性能研究

Preparation and Tribological Performance of RGO/MoS_2 as Composite Nano-Additives

摩擦学学报. 2019, 39(2): 140 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018154>

C/N共掺 MoS_2 复合薄膜的微结构及其摩擦特性研究

Microstructure and Tribological Properties of C/N Co-Doping MoS_2 Composite Film

摩擦学学报. 2017, 37(4): 537 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.04.016>

不同调制周期 MoS_2/DLC 多层薄膜结构及摩擦学性能

Structure and Tribological Properties of MoS_2/DLC Multilayer Films with Different Modulation Periods

摩擦学学报. 2017, 37(1): 35 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.01.005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2019128

载荷和纳米MoS₂添加剂含量对圆形锤头-棒料的摩擦磨损特性及其机理分析

张立军*, 韩琳, 张德潇, 李增辉, 张军伟, 金永山, 王早祥
(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 针对精密下料中圆形锤头与棒料之间弧状接触面剧烈的摩擦磨损问题, 借助WTM-2E型可控气氛摩擦磨损试验机, 利用GCr15钢块-45钢柱摩擦副在纳米MoS₂添加剂质量分数为0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%和0.7%等七种润滑工况下, 重点对不同载荷下摩擦磨损试验进行分析; 采用扫描电子显微镜观察了GCr15钢块磨损表面形貌, 采用能量色散谱仪(EDS)分析了GCr15钢块磨损表面成分, 并探讨了其润滑抗磨及自修复机理. 结果表明: 随着载荷增加, 摩擦接触应力变大, 摩擦系数和磨损量呈上升趋势, 磨损表面形态由轻微磨粒磨损转变为黏着磨损. 同时加入的MoS₂添加剂的质量分数并非越高越好, 摩擦系数和磨损量随MoS₂添加剂质量分数的升高呈现先减小后增大趋势, 且MoS₂添加剂质量分数在0.1%~0.3%范围内时减摩抗磨效果较好. 通过对比不同润滑条件下摩擦副因摩擦磨损而产生的噪声、振动速度和温升, 进一步定量确定出纳米MoS₂添加剂质量分数为0.1%时, 可以最大程度地降低摩擦副的损耗.

关键词: 精密下料; 圆形锤头-棒料摩擦副; 纳米MoS₂添加剂; 减摩抗磨; 载荷

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0777-09

Friction and Wear Characteristics and Mechanism Analysis of Load and Nano MoS₂ Additive on Circular Hammerhead-Bar

ZHANG Lijun*, HAN Lin, ZHANG Dexiao, LI Zenghui, ZHANG Junwei,
JIN Yongshan, WANG Hanxiang

(College of Electromechanical Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China)

Abstract: Aiming at solving the wear problem of the arc-shaped contact surface between the circular hammerhead and the bar in precision blanking, the tribological performance of GCr15 steel block-45 steel column tribo-pair was determined on a WTM-2E controllable atmosphere micro-friction and wear tester, under lubrication of oils containing nano-MoS₂ additive (mass fraction of 0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.7%), focusing on the friction and wear results under different loads. The worn surface of GCr15 steel was observed by scanning electron microscopy and analyzed by energy dispersive spectrometer. The possible mechanisms of lubrication and self-repair were discussed. The results show that increasing the applied load increased the contact stress, friction coefficient and wear. The wear regime varied from mild abrasive wear to adhesive wear. Friction coefficient and wear first decreased and then increased as the mass fraction of MoS₂ additive increased. Oil with the mass fraction of MoS₂ additive of 0.1% to 0.3% provided good lubrication. By comparing the noise, vibration speed and temperature rise of the tribo-pair, oil with 0.1% nano-MoS₂ additive showed the best tribological performance.

Key words: precision cropping; circular hammerhead-bar friction pair; nano MoS₂ additive; antifriction and antiwear; load

Received 29 January 2019, revised 25 April 2019, accepted 15 May 2019, available online 28 November 2019.

*Corresponding author. E-mail: zlj-2@163.com, Tel:+86-15666485538.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China(51575532) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(15CX08007A).

国家自然科学基金项目(51575532)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(15CX08007A)资助.

下料是指确定制作某种产品所需的材料形状和数量后,从整个或整批材料中取下一定形状和数量材料的加工过程。其中棒管材的分离断料是下料工序的一种,广泛应用于航空航天、石油石化和内燃机配件等行业中,通常是机械制造领域金属成型加工工艺的第一道工序。目前众多生产中的下料方法主要有:金属切削机床下料、剪切下料和特种切割下料等^[1-2]。实践证明,这些下料方法不同程度地存在着下料效率低、原材料浪费严重、刀具寿命短等不足,无法满足绿色制造的要求。因此,一种基于断裂设计的高效低应力下料应运而生^[3-4]。低应力下料是首先通过在棒料表面产生1个微裂纹,然后控制外部加载和环境条件使得裂纹朝着期望的路径扩展,最终使得材料以低应力脆断形式分离^[4]。然而现有下料模具中圆形锤头和棒料直接接触,挤压磨损较严重,这不仅导致下料模具寿命低,每隔一段时间需要更换新的圆形锤头。同时,剧烈的摩擦磨损还会引起较大的摩擦热、冲击振动和噪声,使机器动力损耗增加。因此分析不同因素变化对圆形锤头与棒料接触表面的摩擦磨损机理至关重要。

目前,许多学者针对不同工况中出现的摩擦磨损现象进行了深入研究。肖鹏等^[5]采用模拟列车刹车制动方法研究了C/C-SiC复合材料在不同制动速度下的摩擦磨损性能,结果表明,随着制动速度提高,磨屑被碾磨更细,磨损量随之增大,但摩擦系数呈先升高而后降低的趋势。王秀飞等^[6]研制了一种适应高速列车制动的铜基摩擦材料,考察了ZrO₂的质量分数对其摩擦性能的影响。结果表明,添加质量分数8%ZrO₂的铜基摩擦材料在高速下的摩擦系数较高,磨损率较小且变化平稳,摩擦性能最好,且随着速度的增加,磨损逐渐从以黏着磨损为主转变为以剥层脱落和氧化磨损的混合机制为主。王云鹏等^[7]针对在直升机起落架、齿轮和精密模具等中广泛使用的18Ni(300)钢进行了高速干滑动摩擦磨损特性研究,结果表明,18Ni(300)钢-GCr15钢摩擦副的摩擦系数随载荷和速度的增加而下降,磨损机制由黏着磨损转变为严重的氧化磨损。

另外,本课题组为减小在低应力下料中的摩擦磨损,采用正交试验法,研究了在低应力下料中圆形锤头上开槽形状、开槽个数、开槽深度和槽间距等槽参数对圆形锤头-棒料摩擦副的减摩抗磨效果的影响^[8],结果表明:对耐磨轴承-棒料摩擦副的摩擦系数影响最大的因素是槽型,对磨损量影响最大的因素是槽数。为探寻不同变量变化对磨损效果的影响,课题组还研究了不同转速和不同质量分数纳米MoS₂添加剂对

GCr15钢块-45钢柱摩擦副的摩擦磨损性能^[9],结果表明,随着转速的升高,摩擦系数和磨损量呈降低趋势,磨损表面形态由黏着磨损转变为磨粒磨损,纳米MoS₂添加剂质量分数为0.5%时,其减摩抗磨效果最佳。但多次下料试验结果表明,载荷对摩擦磨损也有很大影响。为此,用GCr15钢块-45钢柱摩擦副模拟下料中圆形锤头-棒料摩擦副,研究在载荷和纳米MoS₂添加剂共同耦合作用下的摩擦学性能,重点对摩擦系数、磨损量和磨损表面形貌等进行研究,提出基于试验中所产生的振动响应值、噪声值和温度值等参数来定量确定纳米MoS₂颗粒的最佳质量分数。

1 低应力下料基本原理

低应力下料的基本原理就是利用V型槽的应力集中效应,将开有V型槽的棒料一端放入下料模具中的圆形锤头内,另一端固定在夹具中,通过施加适宜的载荷造成对棒料断裂较为敏感的应力状态,使裂纹按照预定的方式稳定扩展,从而实现材料连续界面的快速和低能耗的分离,完成下料。下料模具主要包括轴头、滑块和可替换式圆形锤头等,如图1(a)所示,圆形锤头与棒料的工作关系如图1(b)所示。下料模具作为下料机中的主要磨损部件与棒料的直接接触,挤压磨损剧烈,不仅导致摩擦副表面温度过高,棒料端面产生明显的损伤和磨损变形,而且使棒料V型槽处产生破坏,如图2(a~b)所示。在以往的下料试验中使用普通轴承充当圆形锤头进行下料时发现,普通轴承所承受载荷小,可能导致裂纹始终不起裂或扩展缓慢,致使生产效率低;若施加的载荷过大,可能由于裂纹的瞬间扩展而使棒材瞬断,导致下料品质差、振动和噪声大^[10]。这不仅会使普通轴承损坏无法继续使用[见图2(c)],而且很大程度上影响了下料机的使用性能与寿命。因此,为研究载荷变化时圆形锤头-棒料摩擦副的润滑问题,通过在试验中改变载荷的大小和润滑油中MoS₂添加剂质量分数,研究其对摩擦系数、磨损量和磨损表面形貌等的影响。在此基础上,提出利用GCr15钢块-45钢柱摩擦副试验过程中因摩擦磨损而产生的噪声、振动速度和温升等参数来定量确定出不同载荷下最佳纳米MoS₂添加剂的质量分数。

2 圆形锤头-棒料摩擦副的试验部分

本试验中所用的基础油为60 N,添加剂选用由上海润立得公司生产的纳米MoS₂。将纳米MoS₂颗粒以不同质量百分比添加到基础油60 N中,并放在超声波

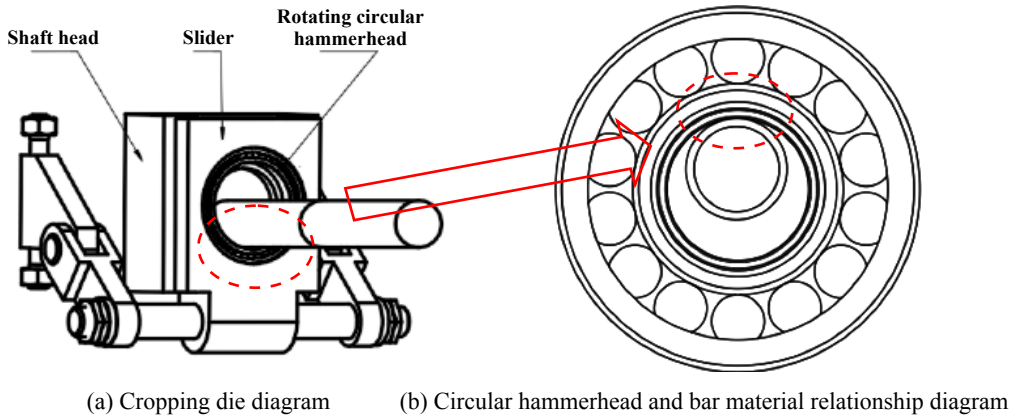


Fig. 1 Working principle diagram of cutting die

图 1 下料模具工作原理图



(a) Wear on the end of the bar (b) Damage on the V-shaped groove



(c) Damaged bearing

Fig. 2 Effect of severe wear on bars and common bearings

图 2 严重的摩擦磨损对棒料与普通轴承的影响

振荡仪中振荡30 min使其混合均匀, 从而制备出含有不同比例, 分布均匀弥散的油样^[9-10].

改变载荷的大小和润滑油中MoS₂添加剂的质量分数, 借助WTM-2E型可控气氛微型摩擦磨损试验仪进行摩擦磨损试验, 试验台如图3所示. 载荷设定为5、8和11 N, MoS₂添加剂的质量分数设定为0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%和0.7%. 用经过热处理后耐磨性好、接触疲劳强度高的GCr15钢块作为摩擦试验中的下试样, 代替下料中的圆形锤头. 试验转速 n 取1 500 r/min, 下试样GCr15钢块固定不动, 上试样45钢柱标准件旋转, 旋转半径为6 mm, 时长10 min, 两者摩擦工作原理见图4, 两者摩擦系数由摩擦磨损试验仪自动记录; 在试验过程中对反映摩擦副润滑状况和磨损状态的噪声、振动速度和温升值进行采集测量, 搭

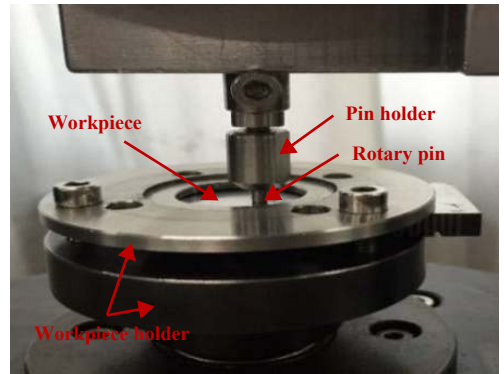


Fig. 3 Friction and wear test bench

图 3 摩擦磨损试验台

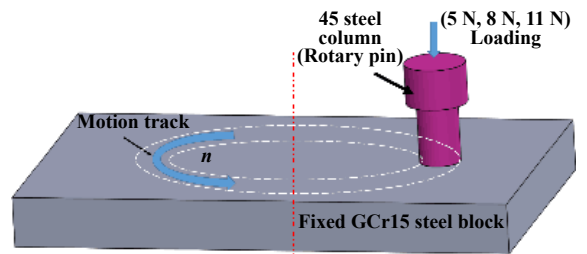


Fig. 4 Working principle diagram

图 4 工作原理示意图

建的试验台主要包括红外线测温仪、噪声测试仪和工作测振仪(S908). 试验首先采用纯60 N基础油润滑, 启动试验仪, 使其在转速一定, 载荷分别设置为5、8和11 N的工况下开始运行, 并在运转直至趋于稳定时测量记录每种载荷下的振动响应值、噪声值和温度升高值. 然后把润滑系统中的纯60 N润滑油换成含有质量分数为0.1%、0.2%、0.3%、0.5%和0.7%的纳米MoS₂颗粒的60 N润滑油, 按相同的步骤记录试验仪试验过程中的噪声值、振动响应值和温度升高值. 国际标准中通常选用振动速度作为衡量振动激烈程度的参量. 振动

速度的有效值是振动速度的均方根值, 直接反映振动的能量. 试验中所采用的振动传感器如图5所示. 振动传感器的一头通过电缆与主机相连, 另一头通过磁座固定在摩擦磨损试验仪上试样旋转销的地方, 这种传感器外置型的工作方式, 有效地保证了测量的安全性与精准性. 试验结束后, 用丙酮超声清洗试验后的高碳铬轴承钢试样, 再放在FA1004电子天平上称重, 计算试样磨损前后的质量差, 并用扫描电镜观察磨斑表面形貌, 使用能量色散谱仪(EDS)分析GCr15钢块磨损表面的元素成分.

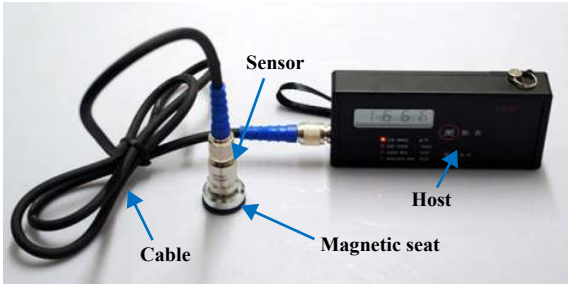


Fig. 5 Vibration measuring instrument
图5 振动测量仪图

3 载荷对摩擦系数、磨损量及磨损表面的影响机理分析

3.1 载荷与纳米添加剂对摩擦系数、磨损量的影响

图6所示为GCr15钢块-45钢柱摩擦副在5、8和11 N 载荷条件下, 随着纳米MoS₂添加剂质量分数不同时摩擦系数和磨损量变化图; 在加入的MoS₂质量分数较低时, 摩擦系数和磨损量明显低于不添加MoS₂的基础油工况, 这表明加入少量的纳米MoS₂可以改善润滑效果, 提高润滑油的减摩抗磨性能, 从而降低其摩擦系

数与磨损量. 当MoS₂添加剂质量分数分别为0.1%、0.2%和0.3%时, 与基础油相比, 其摩擦系数平均降低19%、14.1%和8.7%, 磨损量平均降低22.7%、21.3%和15.1%左右. 当纳米MoS₂质量分数在0.4%和0.5%时, 摩擦系数和磨损量与基础油条件下无明显变化. 继续增至0.7%, 摩擦系数和磨损量便高于基础油的工况. 这表明质量分数过高的纳米添加剂反而不利于润滑油性能的提高, 这是因为一是随着纳米颗粒质量分数增多, 基础油的黏度增大, 在摩擦过程中与金属磨屑颗粒之间相互碰撞使摩擦阻力加大^[11]; 二是纳米颗粒质量分数过高不仅会影响润滑油膜的形成和润滑剂的分散稳定性, 而且相互团聚会导致形成较大的颗粒, 在所受压力的作用下, 纳米颗粒会对摩擦副产生犁沟作用^[12], 最终表现为摩擦系数和磨损量的升高.

3.2 载荷对磨损表面的影响

图7表示在不同载荷条件下, 扫描电镜观察到的GCr15钢块试件磨损表面形貌的照片. 随着载荷增加, 摩擦系数和磨损量逐渐升高, 磨损表面也由犁沟较浅的光滑状态转变成轻微黏着磨损. 图7(a)为5 N时扫描电镜下的磨损表面, 此时摩擦接触表面光滑、平整, 仅存在微小的犁沟现象, 部分磨屑在应力作用的反复碾压下被压在磨斑表面形成了图中的A处; 图7(b)显示为8 N时的磨斑表面, 可见沿滑动方向上存在连续粗糙且较深的犁沟和划痕现象, 犁削作用严重, 是典型的磨粒磨损; 图7(c)显示在载荷升至11 N时, 整个磨损表面存在少量光滑的地方, 呈现粗糙的黏着特征且零散分布着细长的擦伤凹槽. 这是因为在相对滑动过程中随着载荷升高, 接触表面的摩擦接触应力升高^[14-15], 硬度较高的表面微凸体急剧碰撞发生破碎, 与少数团聚在一起的硬质添加剂颗粒一起压入摩擦副的表面层内, 致使接触面的金属破坏而形成犁沟和黏着现象.

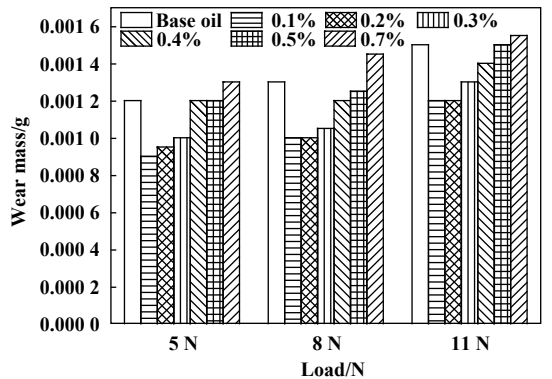
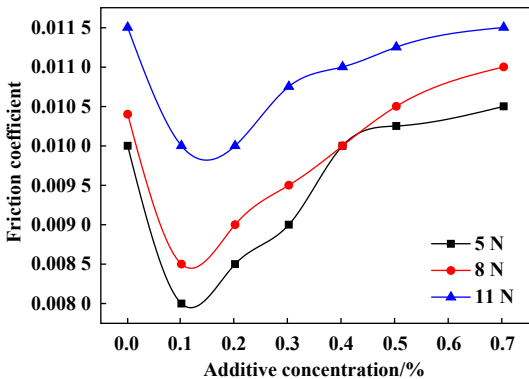


Fig. 6 Effects of load on friction coefficient and wear under different working conditions

图6 不同工况下载荷对摩擦系数和磨损量的影响

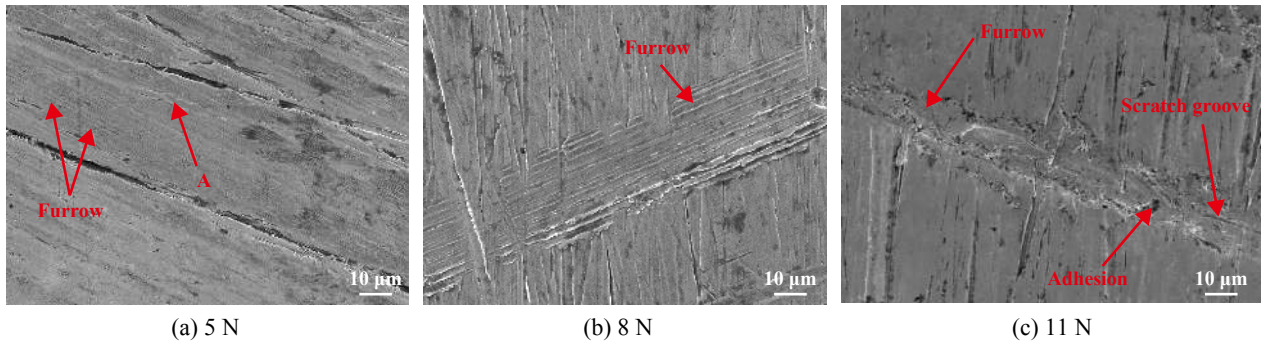


Fig. 7 Wear surface topography under different loads

图7 不同载荷下磨损表面形貌图

4 纳米MoS₂添加剂的减摩抗磨机理分析

4.1 MoS₂颗粒的减摩抗磨性能分析

纳米MoS₂颗粒在摩擦过程中所发挥的减摩抗磨作用如图8所示. 分散在润滑油中的纳米MoS₂颗粒在油的流动过程中可以随之进入对磨表面的微坑与凹区, 并嵌入到摩擦副表面粗糙的凹谷中, 填补凹处, 如图8(a)所示. 当两表面受到压力持续摩擦时, 表面凸峰率先接触^[16]; 当达到材料的屈服极限时被磨掉的凸峰与细小的MoS₂颗粒在反复碾压下形成薄层状混合物, 粘附在摩擦表面形成1层比原表面更强韧、更光滑的

摩擦保护膜起到自修复作用^[17-18], 如图8(b)所示. 随着试验的持续进行, 越来越多的表面凸峰被磨掉, 磨屑被挤压成修复膜, 填平金属表面的凹处和损伤部位, 如图8(c)所示, 同时类似于球状的纳米颗粒在摩擦副间作微滚动^[19], 即微滚动效应. 这不仅在微观上变滑动摩擦为滚动和滑动复合摩擦, 而且使得两粗糙的摩擦副表面不直接接触, 起到支撑负荷的作用, 而且二硫化钼是片层状结构, 除了可以填平凹坑外, 还能在微凸体表面形成可滑移的二硫化钼吸附膜, 起到润滑作用.

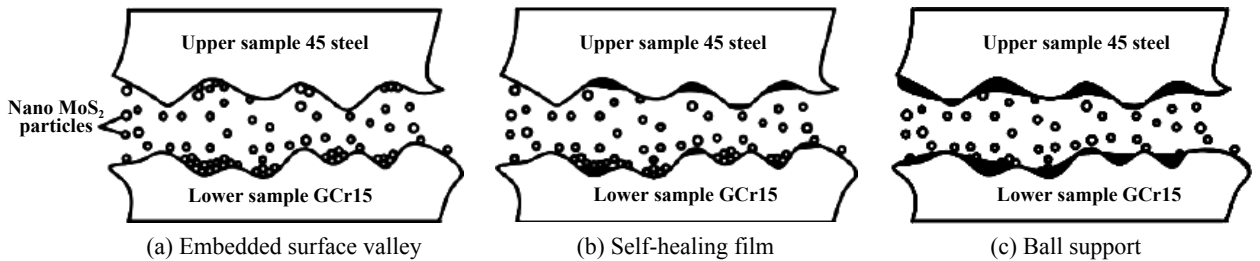


Fig. 8 Anti-friction and anti-wear mechanism of nanometer molybdenum disulfide particles

图8 纳米MoS₂颗粒减摩抗磨原理图

表1列出了基础油工况和含纳米MoS₂添加剂的润滑工况下磨损试样表面元素组成的EDS测定结果. 通过对比可以发现, 基础油工况下含有微量的S元素, Mo元素质量分数为0; 而含MoS₂添加剂润滑工况下的磨损表面S元素含量增加, Mo元素质量分数从0%增至0.2%, 其中S元素部分来自于基体材料, 但是Mo元素只来自于MoS₂添加剂. 同时, 图9显示了含MoS₂添加

剂工况下的Gcr15钢磨损表面分布着Mo元素. 因此, MoS₂添加剂在磨损过程中能够填补表面凹坑沉积成膜, 起到一定的润滑作用.

4.2 纳米MoS₂添加剂使用量的分析

不同载荷下的摩擦系数、磨损量与纳米MoS₂添加剂质量分数的关系如图10所示. 随着基础油中纳米MoS₂添加剂质量分数的增多, 摩擦系数与磨损量的值

表1 不同工况下磨损表面元素组成测定结果

Table 1 Determination of the chemical composition of worn surface under different working conditions

Worn surface	w(Mo)/%	w(S)/%	w(Cr)/%	w(C)/%	w(Fe)/%
Base oil	0	0.01	1.34	12.63	Balance
Nano MoS ₂	0.2	0.03	1.32	13.26	Balance

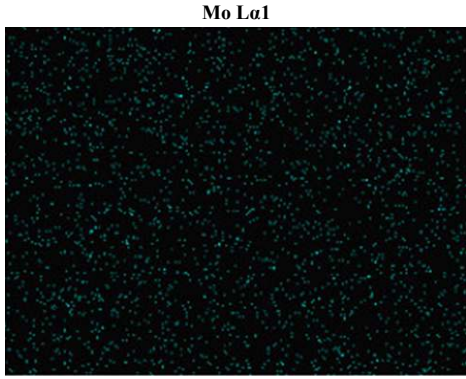


Fig. 9 Mo element distribution on the worn surface

图9 磨损表面Mo元素分布图

呈现先下降后上升的变化趋势. 基础油中加入合理质量分数的纳米MoS₂添加剂可以改善耐磨减摩效果, 增强对摩擦表面的摩擦学特性. 当质量分数在0.1%~0.3%范围时, 减轻摩擦、降低磨损的效果较好. 当纳米MoS₂添加剂质量分数升高至0.5%时, 抗磨损效果与基础油工况相差无几; 当质量分数继续升高至0.7%时, 减摩抗磨效果反而低于基础油工况. 结果显示, 摩擦系数和磨损量等的值并不总能确定出最佳的纳米添加剂质量分数, 只能确定出1个较优的纳米MoS₂添加剂质量分数的范围.

4.3 最佳纳米MoS₂添加剂质量分数的确定

4.3.1 噪声、振动速度和温升与含纳米MoS₂润滑剂的摩擦磨损关联分析

在精密下料中, 鉴于圆形锤头-棒料摩擦副剧烈的摩擦磨损, 下料机在工作过程中产生的较大噪声和振动冲击速度不仅影响下料机各组成部件的使用性能与工作平稳性, 还会影响下料机和下料模具的使用寿命. 而下料过程中释放出的摩擦热则会影响到下棒料的质量. 因此, 为得到最佳的润滑工况, 极大程度地

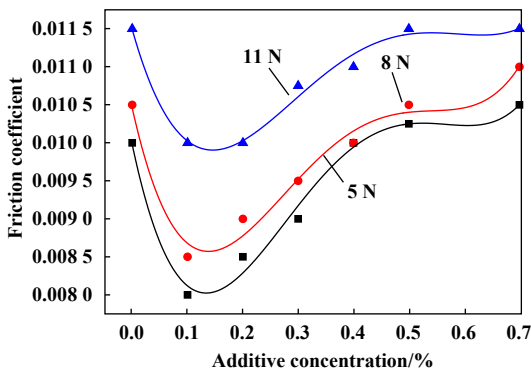
提高磨损面的摩擦学性能, 降低磨损过程中产生的噪声、振动速度和温升值, 本文作者提出通过处理分析对摩擦表面在摩擦磨损过程中所产生的噪声、振动速度和温升值等参数, 来进一步定量确定出纳米MoS₂添加剂的最佳质量分数.

影响噪声、振动和摩擦热的原因既有宏观的, 也有微观的, 如施加的载荷、润滑状况、滑动速度及时间、基体材料和表层特性、表面形貌等因素, 其中任一因素的变化均会对噪声、振动和摩擦热产生影响, 表现为数值大小的变化. 摩擦副表面在微观上存在着凸峰和凹谷, 在摩擦过程中凸峰之间率先接触发生碰撞与剪切作用, 导致部分凸峰破碎引起噪声与振动; 同时伴随着能量的释放与转换, 一部分能量转化成摩擦热使摩擦副间的温度升高. 纳米MoS₂颗粒由于尺寸小且呈片层结构, 不仅可以填补凹谷, 还可以在微凸体表面形成摩擦保护膜, 减少凸峰之间的接触, 从而降低摩擦过程产生的噪声、振动和摩擦热. 因此, 对摩擦表面产生的噪声、振动和摩擦热的变化规律能够间接反映摩擦副间的润滑状况和磨损状态^[20].

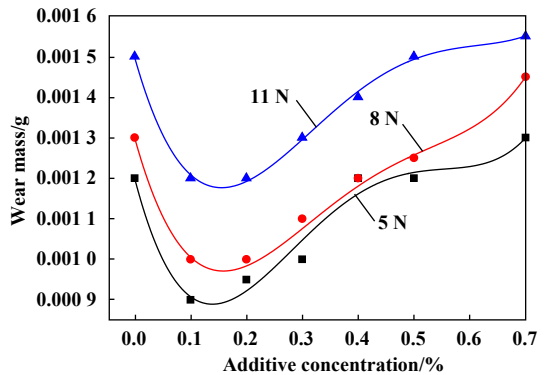
4.3.2 纳米MoS₂添加剂质量分数对噪声影响

测量过程的声场环境和测量安装位置要求应符合GB/T17248.3-1999的规定^[21], 测点高度与工作台的水平面相持平, 测点位置见图11, 待机器运转稳定后于同一位置处重复测量3次取中间值.

由图12可知, 随着试验过程中载荷从5 N提高到11 N, 测量到的由于摩擦接触产生的噪声值明显升高. 当载荷较低为5 N时, 噪声值的变化随纳米MoS₂添加剂质量分数的变化幅度更大, 噪声值的上升趋势较为明显. 比较不同的润滑状态可以看出, 在载荷较小为5 N时, 使用纯基础油润滑产生的噪声较小; 在载荷为8和11 N时, 使用含有质量分数为0.1%纳米二硫化钼的



(a) Friction coefficient



(b) Wear

Fig. 10 Friction coefficient and wear under different loads

图10 不同载荷下摩擦系数和磨损量的变化曲线

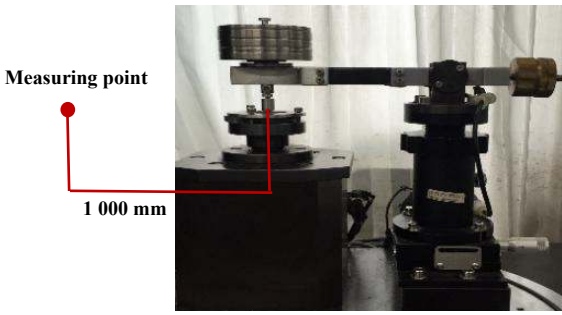


Fig. 11 Noise measurement point distribution
图 11 噪声测量测点分布

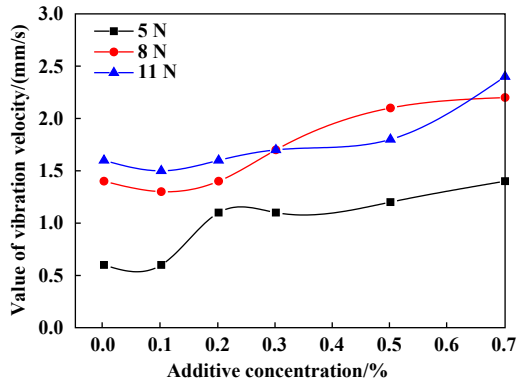


Fig. 13 Diagram of load and vibration speed under different lubrication conditions

图 13 不同润滑工况下载荷和振动速度关系图

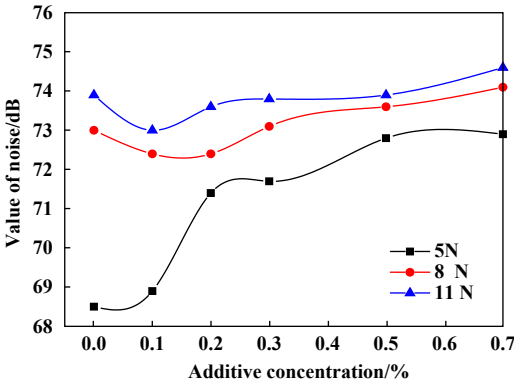


Fig. 12 Diagram of load and noise under different lubrication conditions

图 12 不同润滑工况下载荷和噪声关系图

60 N基础油润滑时, 试验仪产生的噪声普遍低于其他工况。

4.3.3 纳米MoS₂添加剂质量分数对振动速度影响

试验仪在工作状态运转至稳定状态后, 测量由于磨损表面相互摩擦产生的振动速度有效值, 待示数稳定后进行读数, 测量3次, 取中间值为最佳。如图13所示, 当工作载荷升高至8和11 N时, 此时的振动速度的值相接近, 数值相差最大处为0.3 mm/s, 平均相差0.2 mm/s左右。随着基础油中纳米MoS₂添加剂质量分数的升高, 振动速度有效值整体呈现平缓上升的趋势, 但在0.1%附近有微小的先减小后上升的变化, 因此纳米MoS₂添加剂质量分数为0.1%时, 振动速度的值较小, 即此时磨损表面由于摩擦磨损引起的振动较低。

4.3.4 纳米MoS₂添加剂质量分数对温升影响

摩擦磨损试验仪在不同载荷和润滑工况下运转, 每次试验运转 10 min, 当运行稳定后开始测量温升直至试验结束, 测点位于GCr15钢块-45钢柱摩擦副的工作区域内且靠近二者摩擦接触的部位, 图14显示的是试验前后摩擦副间的温度变化量。

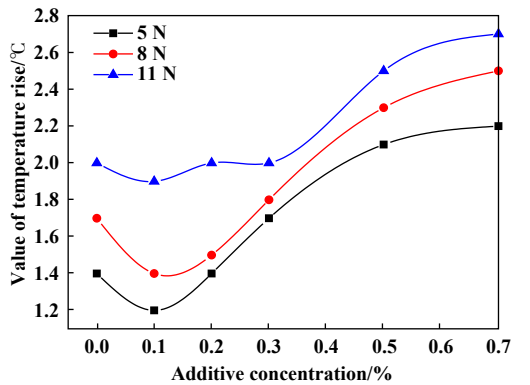


Fig. 14 Diagram of load and temperature rise under different lubrication conditions

图 14 不同润滑工况下载荷和温升关系图

如图14所示, 试验仪摩擦接触处温升值随着试验仪施加载荷的提高而升高。在不同润滑状态下温升值的变化趋势比较接近, 呈现在纳米MoS₂添加剂质量分数为0.1%处温升值最小。当纳米MoS₂添加剂质量分数为0.3%时, 此时与使用基础油润滑工况下的温升值相接近; 当超过0.3%, 温升值持续升高, 反而劣于基础油润滑的状态。

5 结论

a. 针对低应力精密下料中圆形锤头与棒料弧状接触面处剧烈的摩擦磨损问题, 分析了载荷和添加剂共同耦合作用下摩擦副的润滑抗磨及自修复机理。研究结果显示, 随着载荷的增加, 接触表面的摩擦接触应力升高, 且磨损表面由轻微的磨粒磨损转变为黏着磨损。

b. 纳米MoS₂添加剂的添加量并不是越高越好, 具有合理质量分数的纳米MoS₂添加剂能有效降低材料的摩擦系数与磨损量。当载荷变化时, 纳米MoS₂添加剂的质量分数为0.1%~0.3%时具有良好的减摩抗磨效

果且明显优于基础油的工况,当润滑油中纳米 MoS_2 添加剂质量分数大于0.5%,润滑效果反而劣于基础油的工况。

c. 随着施加载荷的增大,噪声、振动速度和温度等性能参数的数值也逐渐升高。综合考虑对降低摩擦副因摩擦磨损而产生的噪声、振动速度和温升的影响,含有质量分数为0.1%纳米 MoS_2 颗粒的60 N基础油润滑工况,可以最大程度地降低GCr15钢块-45钢柱摩擦副在工作过程产生的噪声、振动速度和温升。

参考文献

- [1] Yao Fusheng. Advanced manufacturing technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011(in Chinese) [姚福生. 先进制造技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011].
- [2] Hu Yamin, Hua Lin. Forging process and mold design[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, Peking University Press, 2006(in Chinese) [胡亚民, 华林. 锻造工艺过程及模具设计[M]. 北京: 中国林业出版社, 北京大学出版社, 2006].
- [3] Zhang Lijun, Zhang Depei, Wang Hanxiang, et al. Research on variable frequency-loading curve in precision cropping system with high speed and centrifugal action[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5): 2969–2978.
- [4] Zhang Lijun, Chen Xianfeng, Wang Hanxiang, et al. Research on critical loading force in precision cropping system based on hydraulic compensation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 142–143: 44–50. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.04.039.
- [5] Xiao Peng, Xiong Xiang, Ren Yunyun. Effect of braking speed on friction and wear properties of C/C-SiC composites[J]. Journal of Tribology, 2006, 26(1): 12–17 (in Chinese) [肖鹏, 熊翔, 任芸芸. 制动速度对C/C-SiC复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(1): 12–17]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.2006.01.003.
- [6] Wang Xiufei, Xu Guisheng, Han Juan, et al. Effect of ZrO_2 addition on friction and wear properties of copper-based friction materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2013, 31(1): 22–27 (in Chinese) [王秀飞, 许桂生, 韩娟, 等. 添加 ZrO_2 对铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2013, 31(1): 22–27]. doi: 10.3969/j.issn.1001-3784.2013.01.005.
- [7] Wang Yunpeng, Sun Kun, Yang Size, et al. Study on high speed dry sliding friction and wear characteristics of 18Ni(300) steel[J]. Journal of Tribology, 2017, 37(2): 218–224 (in Chinese) [王云鹏, 孙琨, 杨思泽, 等. 18Ni(300)钢高速干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(2): 218–224].
- [8] Zhang Lijun, Han Lin, Zhang Junwei, et al. Analysis of anti-friction and antiwear effects of wear-resistant bearing-bar friction pair in low stress materials[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(3): 308–314 (in Chinese) [张立军, 韩琳, 张军伟, 等. 低应力下料中耐磨轴承-棒料摩擦副的减摩抗磨效果分析[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(3): 308–314]. doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2019.03.045.
- [9] Zhang Lijun, Han Lin, Zhang Dexiao, et al. Analysis of tribological properties of circular hammer-bar friction pair in precision cutting[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(1): 1–8 (in Chinese) [张立军, 韩琳, 张德潇, 等. 精密下料中圆形锤头-棒料摩擦副摩擦学性能分析[J]. 中国机械工程, 2019, 30(1): 1–8].
- [10] Zhang Lijun, Zhao Shengdun, Lei Jing. Effect of bar material geometric parameters on stress concentration factor of v-groove bottom of prefabricated surface[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(1): 66–71 (in Chinese) [张立军, 赵升吨, 雷净. 棒料几何参数对其预制表面V型槽槽底应力集中系数的影响规律[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(1): 66–71]. doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2007.01.015.
- [11] Ruan Tinggang, Zhou Guiyuan, Xie Xiandong, et al. Comparison of anti-friction, antiwear and self-repair properties of titanium-based nano-lubricating additives[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 47–53 (in Chinese) [阮亭纲, 周桂源, 谢先东, 等. 钛基纳米润滑添加剂的减摩抗磨及自修复特性对比[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 47–53]. doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.04.006.
- [12] Han Xiaoming, Fu Rong, Gao Fei, et al. Effect of SiO_2 content on the friction behavior of copper-based friction materials[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(10): 1848–1853 (in Chinese) [韩晓明, 符蓉, 高飞, 等. SiO_2 质量分数对铜基摩擦材料摩擦行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(10): 1848–1853]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0609.2009.10.022.
- [13] Han Xiaoming, Gao Fei, Song Baoyun, et al. Effect of friction speed on friction and wear properties of copper-based friction materials[J]. Journal of Tribology, 2009, 29(1): 89–96 (in Chinese) [韩晓明, 高飞, 宋宝韞, 等. 摩擦速度对铜基摩擦材料摩擦磨损性能影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 89–96]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.2009.01.015.
- [14] Ma Hongshuai, Liang Guoxing, Lv Ming, et al. Study on dry sliding friction and wear characteristics of AISI 4340 steel[J]. Journal of Tribology, 2018, 38(1): 59–66 (in Chinese) [马红帅, 梁国星, 吕明, 等. AISI 4340钢干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 59–66]. doi: 10.16078/j.tribology.2018.01.008.
- [15] Zhu Gongzhi, Gao Yuzhou, Liu Shiyong, et al. Anti-wear self-repairing mechanism of lubricating oil additive of magnesium hydroxysilicate composite powder on steel-steel friction pair[J]. Tribology, 2012, 32(2): 183–188 (in Chinese) [朱公志, 高玉周, 刘世永, 等. 羟基硅酸镁复合粉体润滑油添加剂对钢-钢摩擦副的抗磨自修复机理[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(2): 183–188]. doi: 10.16078/j.tribology.2012.02.013.
- [16] Li Hongqi, Liu Meihua, Wang Jing. Study on antiwear and anti-friction mechanism of nanoparticles[C]. National Conference on Nanomaterials and Technology Applications. Nanjing, China, 2003: 327–330(in Chinese) [李鸿琦, 刘美华, 王静. 对纳米颗粒抗磨减摩机理的研究[C]. 全国纳米材料和技术应用会议. 中国 南京, 2003: 327–330].

- [17] Liu Meihua, Li Xiuzhen, Wang Shuren, et al. Comparison of antiwear and antifricition mechanisms between traditional antiwear additives and nanoparticles[J]. *Journal of Synthetic Lubricants*, 2002, 29(2): 19–22 (in Chinese) [刘美华, 李秀珍, 王树人, 等. 传统抗磨添加剂与纳米粒子的抗磨减摩机理分析比较[J]. *合成润滑材料*, 2002, 29(2): 19–22]. doi: [10.3969/j.issn.1672-4364.2002.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4364.2002.02.005).
- [18] Tang Yang, Liu Liguang, Wang Zeyu, et al. Friction and wear properties of 45[#] steel in 18[#] gear oil containing micron-sized molybdenum disulfide[J]. *Journal of Clothing Research*, 2014, 13(1): 76–79 (in Chinese) [唐扬, 刘利国, 王泽宇, 等. 45[#]钢在含有微米级二硫化钼的18[#]齿轮油中的摩擦磨损性能[J]. *江南大学学报(自然科学版)*, 2014, 13(1): 76–79].
- [19] Yuan Xiaodong, Ni Li, Zhang Jianfeng, et al. Antiwear and friction reduction mechanism of materials[J]. *Lubricant*, 2011, 26(2): 5–10 (in Chinese) [袁晓东, 倪丽, 张建锋, 等. 材料的抗磨减摩机理探讨[J]. *润滑油*, 2011, 26(2): 5–10].
- [20] Zheng Hua. Discussion on the relationship between friction noise and wear scar morphology under metal reciprocating sliding condition[D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2004(in Chinese) [郑华. 金属往复滑动条件下摩擦噪声与磨痕形貌关系的探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2004].
- [21] He Qiang, Liu Hongzhao, Ye Jun. Tribological properties of nano-Cu as an additive for N32 lubricating oil[J]. *Journal of Tribology*, 2010, 30(2): 145–149 (in Chinese) [何强, 刘宏昭, 叶军. 纳米铜作为N32润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(2): 145–149]. doi: [10.16078/j.tribology.2010.02.012](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2010.02.012).