

矿用减速器齿轮材料 18CrNiMo7-6 在粉尘污染润滑下摩擦学行为探究

赵佳鹏^{1,2} 庞新宇^{1,2} 马福文³ 贺一翔^{1,2} 吕凯波^{1,2} 张占东⁴

(1. 太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024)

(2. 煤矿综采装备山西省重点实验室, 太原 030024)

(3. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司, 太原 030001)

(4. 山西大同大学 机电工程学院, 大同 037003)

摘要:【目的】针对矿用减速器齿轮的润滑环境常受煤矿粉尘污染的问题,选取齿轮材料 18CrNiMo7-6 为研究对象,开展摩擦磨损试验,探究齿轮材料 18CrNiMo7-6 在粉尘污染润滑条件下的摩擦学行为。【方法】首先,选取 80 目煤粉、200 目煤粉、200 目二氧化硅、200 目二氧化硅与煤粉混合颗粒作为污染物,设置 0.5%、1.0%、3.0% 三种质量分数;然后,利用材料表面性能综合测试仪进行摩擦磨损试验,得到不同润滑环境下的摩擦因数与油温变化;最后,通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、共焦三维轮廓测量仪和能量色散谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)分析了齿轮材料的磨损机制。【结果】结果表明,除质量分数为 3.0% 的 80 目煤粉试验组外,在其余煤粉试验组中,煤粉颗粒均起到一定的减摩作用,磨痕表面光滑;在质量分数为 3.0% 的 80 目煤粉试验组中,煤粉颗粒诱发了接触面的黏附效应,导致黏着磨损加剧;二氧化硅对接触面油膜有严重的破坏作用,减弱了润滑油抗磨性能,随着润滑油中二氧化硅质量分数的增加,磨粒磨损加剧;在 200 目混合颗粒试验组中,煤粉并没有起到减摩作用,反而恶化了润滑环境,随着污染物质量分数的提高,磨损机制由磨粒磨损和疲劳磨损演变为严重磨粒磨损和严重黏着磨损。

关键词: 18CrNiMo7-6; 润滑油; 煤矿粉尘; 抗磨性能; 磨损机制

中图分类号: TH117 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.006

0 引言

在掘进机等煤矿设备减速器中,齿轮等重要传动零部件常选用 18CrNiMo7-6 作为基础材料。尽管在制造过程中已对齿轮表面进行了渗碳、喷丸^[1]等处理,其承载力和抗腐蚀性大大提高,但是井下环境恶劣,掘进过程中粉尘污染极其严重^[2],因此粉尘污染物对零件磨损的影响不可忽视。

为探究不同种类污染物对润滑油抗磨性能和零部件磨损状态的影响,研究人员做出了许多努力。张维果等^[3]进行相关研究后认为,煤矿设备典型零部件磨损失效和磨损机制主要为磨料磨损,包括微观切削、多次塑性变形和微观脆性断裂造成的磨损。何海波^[4]通过分析刮板输送机链环材料在不同因素下的磨损特性,发现磨料配比对材料磨损量的影响最为显著。王伟等^[5]通过对颗粒介质摩擦副摩擦学特性进行研究,结果显示较大粒径的颗粒具有更大的承载力和摩擦因数,更容易形成准直线形的强力链,导致摩擦

特性的随机现象和结构突变增加。盛晨兴等^[6-7]考察了不同金属颗粒物在不同浓度下对润滑油抗磨性能的影响,发现低浓度铁粉颗粒可以促进润滑,在一定硬度范围内,低硬度金属颗粒物易诱发摩擦振动。袁伟等^[8]深入剖析了在冲击载荷下三氧化二铝(Al_2O_3)颗粒对齿轮磨损机制的影响,表明润滑油中的硬质颗粒加速齿面磨损,使齿轮提前进入剧烈磨损阶段。张庆等^[9]揭示了矿物粉尘易黏附于具有润滑保护的矿井缠绕提升钢丝绳表面而影响其接触磨损过程的问题,证实高浓度的碳粉颗粒会发生黏附效应,导致材料表面剥层现象加剧。沈智予^[10]将碳粉作为润滑油污染物,证实碳粉颗粒可以在接触面中利用滚珠轴承效应,减小润滑油摩擦因数。唐斌等^[11]通过分析沙区铁路的列车制动摩擦磨损问题,发现砂粒的介入会破坏摩擦块表面的原始磨屑堆积层,进而改变界面接触状态及磨损特性。

上述研究成果对杂质污染物对机械设备损伤疲劳影响的研究发展具有重要的推动作用,然而,针对

收稿日期: 2024-11-27 修回日期: 2025-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175108); 山西省基础研究计划(自由探索类)第一批项目(202303021211325)

作者简介: 赵佳鹏,男,2000年生,河北邢台人,硕士;主要研究方向为机械故障诊断; E-mail: 2457793600@qq.com。

庞新宇(通信作者),女,1976年生,山西吕梁人,博士,教授;主要研究方向为机械故障诊断; E-mail: pangxinyu@tyut.edu.cn。

引用格式: 赵佳鹏,庞新宇,马福文,等. 矿用减速器齿轮材料 18CrNiMo7-6 在粉尘污染润滑下摩擦学行为探究[J]. 机械强度, 2026, 48(7):49-58.

Zhao Jiapeng, Pang Xinyu, Ma Fuwen, et al. Investigating the tribological behavior of 18CrNiMo7-6 gear material in mining reducers under dust-contaminated lubrication[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7):49-58.



免费获取

截割减速器常处于高浓度、多类别粉尘混合污染的特殊环境中这一问题,对相关机械零部件的磨损机制仍需进一步深入研究。基于此,本文针对截割减速器齿轮在工作过程中润滑环境常受粉尘颗粒污染的问题,选取了煤矿粉尘中含量较高的煤粉与二氧化硅(SiO_2)粉尘作为润滑油中的污染物颗粒。将截割减速器齿轮齿面切割成试样,在不同的润滑油介质中进行摩擦磨损试验,以探究矿物粉尘对润滑油性能的影响和齿轮材料在不同程度和种类粉尘污染润滑环境中摩擦学行为的演变规律。

1 试验部分

1.1 试验设备及材料

选用某矿掘进机截割减速器中的传动齿轮为试验对象,该齿轮为斜齿轮,材料为 18CrNiMo7-6。斜齿轮为线接触副,啮合过程中接触副的相对滑动是造成齿面磨损的主要原因,因此选取齿面试样与磨球进行往复滑动摩擦磨损试验。齿面试样为下试样,用线切割机将其切成形状为 15 mm×10 mm×3 mm 的薄片,硬度为 61.6 HRC,如图 1(a)所示。试验前,每组齿面试样均进行打磨抛光处理,并用酒精进行表面清洗。上试样为与齿面材料相同的 18CrNiMo7-6 磨球,直径为 5 mm,每次试验之后更换磨球,试验环境温度

为室温 20℃。

试验用润滑油为重负荷工业闭式齿轮油 L-

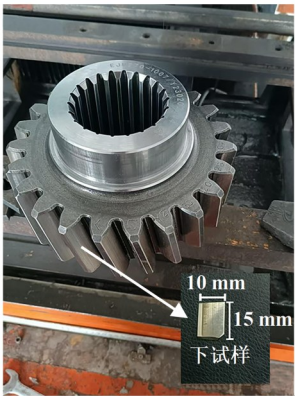
CKD220。煤矿井下粉尘主要包含煤粉和二氧化硅粉尘^[12],同时考虑减速器透气孔大小^[13],所以选取煤粉与二氧化硅作为润滑油中的污染物。对矿下截割减速器齿轮箱中不同污染程度的润滑油进行过滤处理,提取其中固体颗粒物进行分析,从而确定以 80 目和 200 目作为 2 种煤粉颗粒物粒径,其他颗粒物均选用 200 目颗粒粒径。将铁磁性颗粒进行剔除从而得到粉尘颗粒的浓度范围,结合实际污染物浓度范围,选取 0.5%、1.0%、3.0% 作为污染物的质量分数梯度来模拟不同污染程度的润滑油。磨损试验按润滑油中污染物配比的分组情况如表 1 所示。

表 1 摩擦磨损试验分组

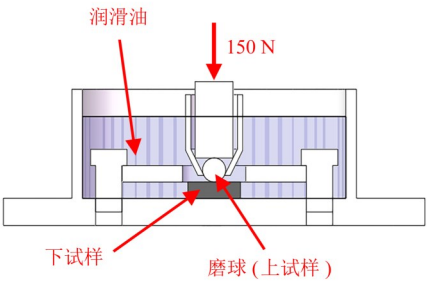
Tab. 1 Grouping for friction and wear test

油样编号(试验组编号)	污染物类型	质量分数/%
1,2,3	80 目煤粉	0.5,1.0,3.0
4,5,6	200 目煤粉	0.5,1.0,3.0
7,8,9	200 目二氧化硅	0.5,1.0,3.0
10,11,12	200 目二氧化硅+200 目煤粉(2:1)	0.5,1.0,3.0
13	无颗粒	

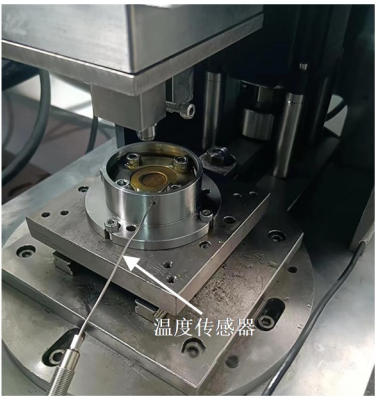
摩擦磨损试验均在 CFT-1 型材料表面性能综合测试仪上进行。摩擦副接触面在试验过程中要完全浸入润滑油中,储油池壁面安装 K 形热电偶,并使 K 形热电偶顶端完全浸入润滑油中,测量试验过程中油温变化,摩擦副及试验台分别如图 1(b)、图 1(c)所示。



(a) 下试样



(b) 摩擦副示意图



(c) 试验台

图 1 摩擦学试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tribological test

1.2 试验过程

摩擦磨损试验过程中,设置 150 N 法向载荷,试验台电动机以 800 r/min 的转速带动磨球作往复运动,运动距离为 3 mm,试验时长为 30 min,试验前使器材与样品达到室温。试验台上安装有传感器,可以实时测量摩擦副材料之间的摩擦力,并计算出摩擦因数。摩擦磨损试验结束后,先用石油醚、后用乙醇溶

液清洗下试样表面油渍,然后进行烘干备用。摩擦磨损试验完成后,使用 Focus SM-1000 型共焦三维轮廓测量仪测量下试样磨痕的三维轮廓和二维轮廓,并计算出磨损量;使用 VEGA 3 SBH 型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观测磨痕形貌与微观组织;通过能谱仪检测磨痕表面元素含量,并分析磨损机制。

2 试验结果与分析

2.1 摩擦磨损试验

2.1.1 摩擦因数和油液温度

图 2 所示为在不同程度与类型粉尘污染润滑下摩擦磨损试验时的摩擦因数与油液温度变化。前 2 min 为磨合期,各组摩擦因数呈快速下降趋势。在这一阶

段中,上、下试样接触面积逐步扩大,接触方式从点接触变为面接触,同时下试样表面原有微小凸起被逐渐削平,摩擦因数减小^[14]。磨合期的磨损率较高,生成的磨屑导致个别试验组摩擦因数在快速下降之后出现略微上升,最后趋于稳定。油液温度变化也分为迅速升温、缓慢升温 and 趋于稳定 3 个阶段,油液温度变化情况反映了磨损的剧烈程度。

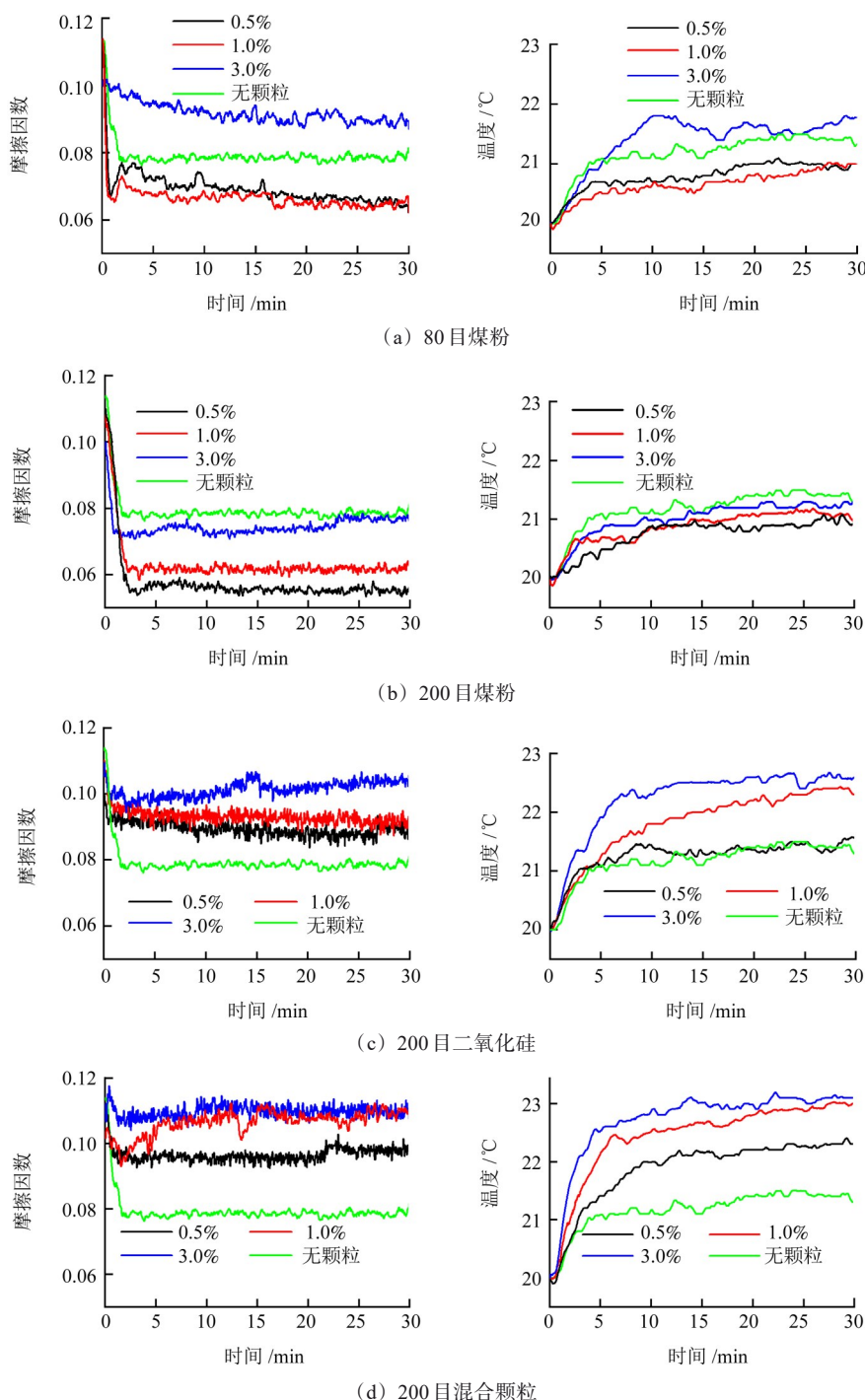


图 2 各试验组摩擦因数和油温变化曲线

Fig. 2 Friction coefficient and oil temperature variation curves for each test group

由图 2(a)可知,对照组(无颗粒组)在磨损稳定期的摩擦因数平均值为 0.079,最高油温为 21.5 °C; 0.5%、1.0%、3.0%的 80 目煤粉试验组在磨损稳定期

摩擦因数均值分别为 0.068、0.065 和 0.091,最高油温分别为 21.1、21.0 和 21.8 °C。在磨损稳定期内, 0.5%、1.0%的 80 目煤粉试验组摩擦因数均值相较于

对照组分别下降了 13.9% 和 17.7%, 而 3.0% 的 80 目煤粉试验组在磨损稳定期内的摩擦因数均值高出对照组 15.2%。这是由于煤粉颗粒硬度较低, 在摩擦过程中被挤压破碎成较小颗粒, 又在较大接触压力作用下被挤压成致密的片状结构, 覆盖在粗糙的摩擦表面, 起到一定润滑作用, 从而使摩擦因数减小^[15]、油温降低; 但是润滑油中的煤粉超过一定质量分数后, 过多的煤粉在滑移作用下会黏附在接触表面, 产生滑移阻力, 导致挤压黏附效应、摩擦因数增大。

由图 2(b) 可知, 0.5%、1.0%、3.0% 的 200 目煤粉试验组在磨损稳定期内的摩擦因数均值分别为 0.056、0.062 和 0.075, 最高油温分别为 20.9、21.2 和 21.3 °C, 相差较小。摩擦因数均值相较于对照组分别下降了 29.1%、21.5% 和 0.5%, 且在相同质量分数下, 200 目煤粉试验组摩擦因数波动幅度均小于 80 目煤粉试验组摩擦因数波动幅度。这是由于 200 目煤粉颗粒度小, 在摩擦过程中会被研磨成更小的颗粒, 填补了磨损初期出现的凹坑^[16]; 相较于 80 目的大颗粒, 200 目的小颗粒对表面的修补效果更佳, 而黏附作用却较弱, 在摩擦磨损过程中起到一定的缓冲作用, 所以摩擦因数较低, 波动幅度较小。但随着润滑油中颗粒物质量分数的升高, 摩擦因数有增大趋势, 说明在一定质量分数范围内, 200 目煤粉具有减摩作用, 但超过一定质量分数, 还是会导致黏附效应、增大摩擦力。

由图 2(c) 可知, 0.5%、1.0%、3.0% 的 200 目二氧化硅试验组在磨损稳定期的摩擦因数均值分别为 0.089、0.092 和 0.101, 相较于对照组分别提高 12.7%、16.5% 和 27.8%, 润滑油中二氧化硅质量分数与摩擦因数存在正相关, 最高油温分别为 21.6、22.4 和 22.7 °C。二氧化硅颗粒的莫氏硬度为 6~7, 质地较硬, 极易诱发接触面的磨粒磨损^[17]。特别是 3.0% 的试验

组, 试验开始 15 min 左右时, 摩擦因数出现约 1 min 的尖峰, 说明该段时间内出现了剧烈的磨粒磨损。200 目二氧化硅试验组的摩擦因数曲线波动幅度大于 200 目煤粉试验组, 这是由于二氧化硅颗粒降低了油膜的承载能力, 油膜局部破裂而产生黏滑现象^[18-19], 导致摩擦因数曲线波动幅度较大。二氧化硅试验组整体油温均大于对照组的油温, 且二氧化硅质量分数与油温也存在正相关。这是由于二氧化硅颗粒更易诱发磨粒磨损, 硬质二氧化硅颗粒在切削金属表面时产生更多热量, 使油温上升。

由图 2(d) 可知, 0.5%、1.0%、3.0% 的 200 目混合颗粒试验组在磨损稳定期内的摩擦因数均值分别为 0.096、0.107、0.110, 均大于对照组, 甚至各组摩擦因数均值均大于同质量分数下的二氧化硅试验组。这说明混合污染颗粒物中二氧化硅颗粒对摩擦因数的影响占主导地位, 少量煤粉颗粒对润滑油减摩性能的增强不足以弥补二氧化硅颗粒对油膜的破坏作用, 甚至加重了二氧化硅颗粒对油膜的撕裂, 恶化了润滑环境。最高油温分别为 22.3、23.0 和 23.2 °C, 均远大于对照组的油温峰值。煤粉与二氧化硅颗粒的共同作用加重了颗粒物对润滑油膜的破坏作用, 降低了润滑油的抗磨性能, 促使油温升高, 油温升高又导致润滑油黏度降低, 油膜厚度减小, 进一步降低润滑油抗磨性能, 导致恶性循环。

2.1.2 磨损量和磨损轮廓

图 3、图 4 和图 5 分别为各试验组下试样磨痕的二维轮廓、三维轮廓和磨损量, 磨痕深度与磨损量存在相同规律, 进一步说明不同种类、不同质量分数颗粒物对润滑油抗磨性能的影响。由此可以发现:

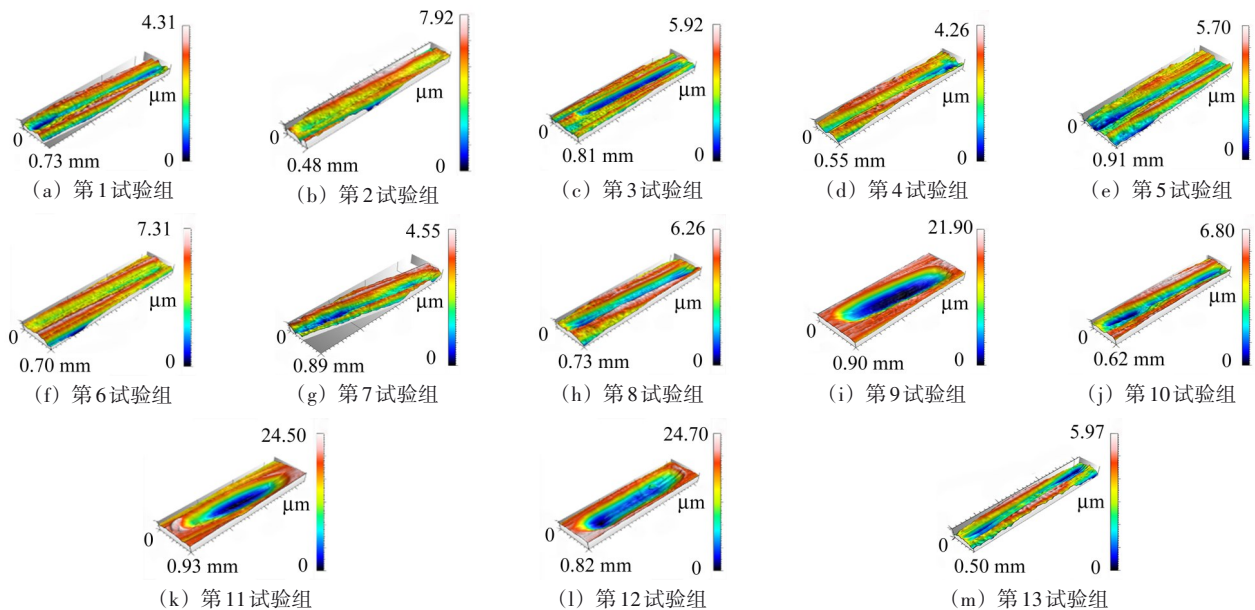


图 3 不同程度粉尘污染润滑下 18CrNiMo7-6 试样表面磨痕的三维轮廓

Fig. 3 Three-dimensional profile of surface wear marks of 18CrNiMo7-6 specimens under different dust pollution lubrication

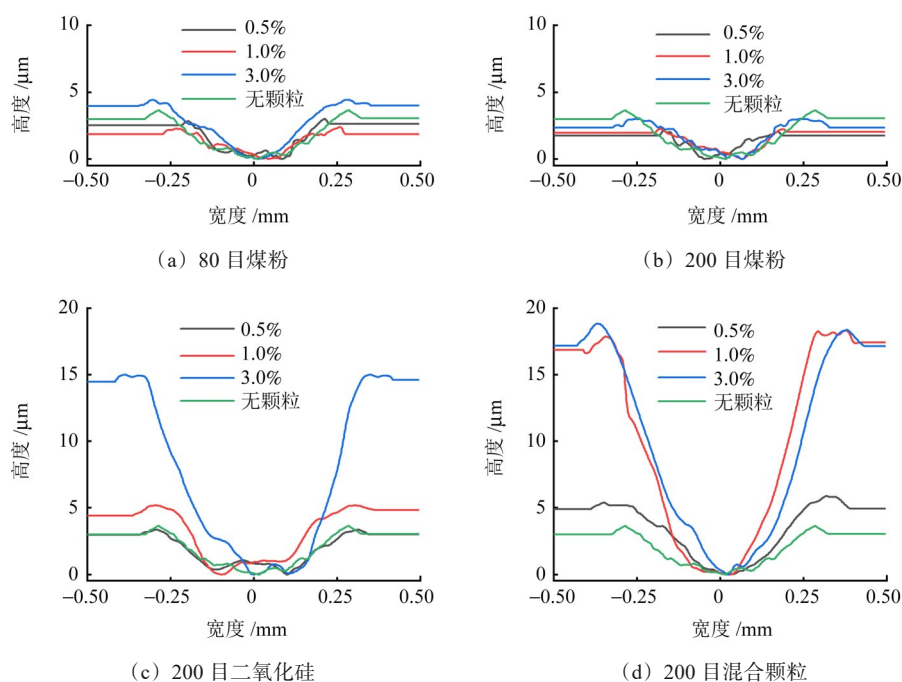


图 4 不同程度粉尘污染润滑下 18CrNiMo7-6 试样表面磨痕的二维轮廓

Fig. 4 Two-dimensional profile of surface wear marks of 18CrNiMo7-6 specimens under lubrication with different levels of dust pollution

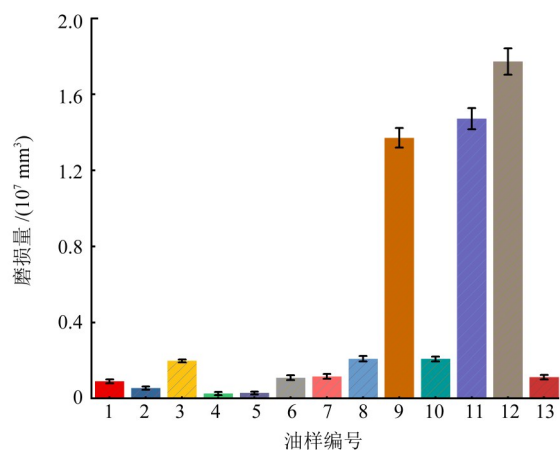


图 5 不同程度粉尘污染润滑下 18CrNiMo7-6 试样的磨损量

Fig. 5 Wear amount of 18CrNiMo7-6 specimens under lubrication with different levels of dust pollution

1) 在煤粉试验组中,除质量分数为 3.0% 的 80 目煤粉试验组外,其余各组的磨损量均小于对照组磨损量,质量分数为 3.0% 的 80 目煤粉试验组相较于对照组磨损量增加了 77.5%,而含二氧化硅的第 7~12 试验组磨损量均大于对照组。煤粉的修补抛光作用既降低了磨合期的磨损率,也减少了磨屑的生成;而二氧化硅颗粒硬度远大于煤粉,在摩擦过程中所受到的赫兹接触应力大,易对材料表面进行微切削,产生较多金属磨屑,二氧化硅颗粒与磨屑的共同作用进一步恶化润滑环境,导致磨损量增加。

2) 相同质量分数下,80 目煤粉试验组的磨损量略大于 200 目煤粉试验组。特别是质量分数为 0.5% 的 200 目煤粉试验组,相较于对照组磨损量下降了 77.7%,颗粒度小的煤粉的修补抛光作用更佳,润滑效

果更好。

3) 相同质量分数下,二氧化硅试验组的磨损量整体小于混合颗粒试验组,说明煤粉加重了二氧化硅和其他硬质磨屑对油膜的破坏。

4) 在颗粒物种类相同的情况下,随着颗粒物质量分数的增大,磨损量和磨痕深度均有增加的趋势,说明不管颗粒物种类如何,过多的颗粒污染物均会减弱润滑油的抗磨性能。

5) 3.0% 的 200 目二氧化硅试验组和 1.0%、3.0% 的 200 目混合颗粒试验组磨损量分别为对照组的 1 224.0%、1 314.0% 和 1 583.0%,且磨痕两侧有较高隆起。在磨损初期,润滑油中较高质量分数的二氧化硅颗粒物或煤粉与二氧化硅颗粒混合物对油膜的撕裂作用导致材料接触表面产生较多磨屑,这些磨屑又会进一步恶化润滑环境,致使接触面产生更多磨屑,进而形成恶性循环;硬质颗粒对材料表面的微切削使材料局部升温,进而诱发黏着磨损,一部分迁移的材料经过反复挤压和堆积形成隆起,大部分材料与基体脱离,导致磨损量上升、磨痕加深。

2.2 磨痕表面分析

图 6 所示为无污染油液润滑条件下试样磨痕表面形貌和表面能谱分析结果。表面能谱分析得到的碳含量占比远大于 18CrNiMo7-6 钢材的 0.15%~0.20% 含碳量,这是由于该试样表面经过渗碳处理。磨痕表面出现犁沟与少量点蚀凹坑,磨损机制主要为轻微疲劳磨损与磨粒磨损。

如图 7(a)、图 7(b) 所示,0.5% 的 80 目煤粉试验组

磨痕表面光滑,仅出现少量较浅犁沟与划痕,一些划痕向外扩展,形成剥落凹坑;1.0%的80目煤粉试验组表面仅出现少量剥落凹坑,麻点状的点蚀凹坑和少量浅划痕,整体较为光滑;2个试验组磨损机制均为轻微疲劳磨损和轻微磨粒磨损。

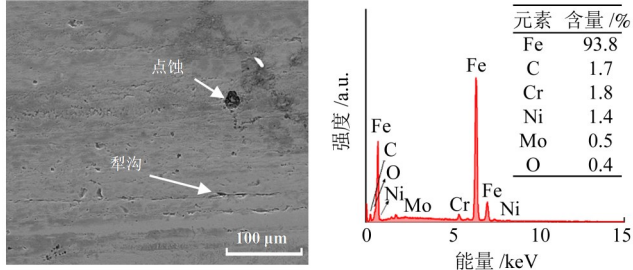
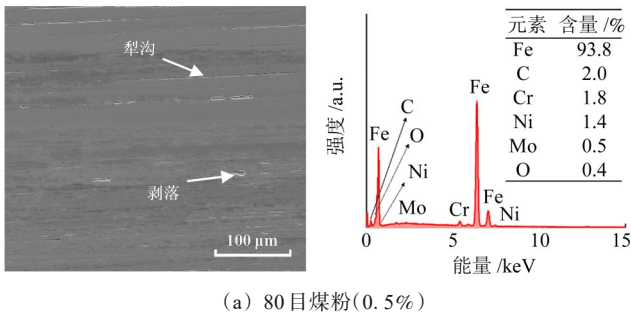
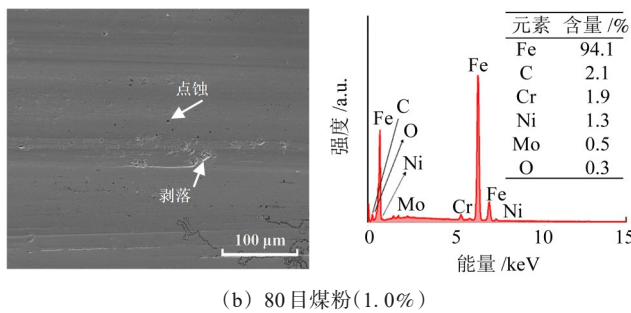


图6 无污染润滑油下的18CrNiMo7-6试样磨痕表面形貌与表面能谱分析

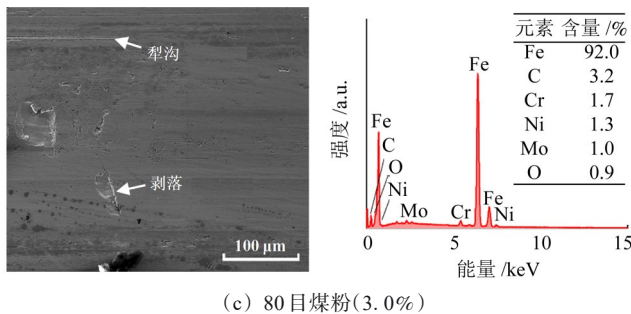
Fig. 6 Surface morphology and energy spectrum analysis of 18CrNiMo7-6 specimen grind marks under pollution-free oil lubrication



(a) 80目煤粉(0.5%)



(b) 80目煤粉(1.0%)



(c) 80目煤粉(3.0%)

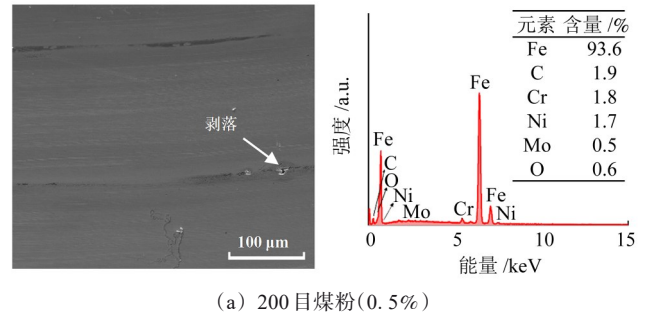
图7 80目煤粉污染油液润滑下的18CrNiMo7-6试样磨痕表面形貌与表面能谱分析

Fig. 7 Surface morphology and energy spectrum analysis of 18CrNiMo7-6 specimen grind marks under 80 mesh pulverized coal contaminated oil lubrication

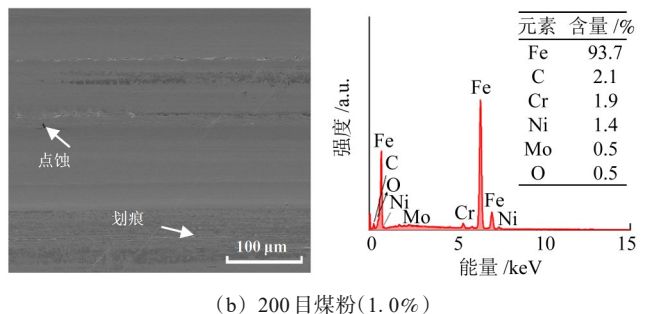
如图7(c)所示,3.0%的80目煤粉试验组磨痕表面出现大面积的黏着剥落区域和少量犁沟,磨损机制为严重黏着磨损。磨痕表面能谱分析显示,0.5%、1.0%、3.0%的80目煤粉试验组磨痕表面碳元素占比

分别为2.0%、2.1%和3.2%,均大于对照组的1.7%,说明少量的煤粉颗粒在摩擦过程中会起到修补抛光作用,但过多煤粉颗粒就会导致黏附,与摩擦因数的分析结果相印证。

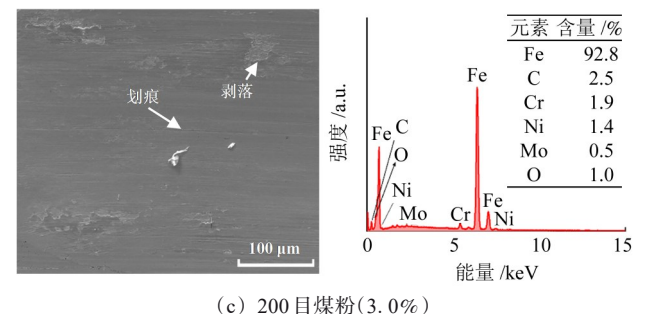
如图8(a)、图8(b)所示,0.5%的200目煤粉试验组磨痕表面只出现极少片剥落凹坑,表面光滑,磨损程度低;1.0%的200目煤粉试验组磨痕表面同样光滑,仅出现极少量点蚀凹坑和划痕,磨损机制均为轻微疲劳磨损和轻微磨粒磨损。如图8(c)所示,3.0%的200目煤粉试验组磨痕表面出现少量划痕和较大面积的浅层疲劳鳞剥,随着煤粉质量分数的增加,疲劳磨损加重。磨痕表面能谱分析显示,3.0%的200目煤粉试验组磨痕表面碳元素占比为2.5%,小于3.0%的80目煤粉试验组的3.2%,说明200目煤粉的表面附着率较低,主要表现为修补抛光作用^[20-21],黏附作用较弱,与上文分析结果一致。



(a) 200目煤粉(0.5%)



(b) 200目煤粉(1.0%)



(c) 200目煤粉(3.0%)

图8 200目煤粉污染油液润滑下的18CrNiMo7-6试样磨痕表面形貌与表面能谱分析

Fig. 8 Surface morphology and energy spectrum analysis of 18CrNiMo7-6 specimen grind marks under 200 mesh pulverized coal contaminated oil lubrication

如图9(a)所示,0.5%的200目二氧化硅试验组磨痕表面出现长且深的犁沟、大量麻点状点蚀凹坑和少量划痕,划痕上出现小片剥落,这是由于硬质磨粒在

法向载荷的作用下压入金属表面,在切向载荷作用下使表面切削,产生槽型犁沟。同时,硬质颗粒易在凹痕与犁沟周围出现集聚,导致这些部位出现应力集中,在法向载荷的作用下,硬质颗粒的挤压导致材料表面发生微观脆性断裂、裂纹扩展,形成条状剥落凹坑。磨损机制主要为磨粒磨损机制中的微观切削与挤压剥落,随着颗粒物质量分数的增加,1.0%的200目二氧化硅试验组表现出更为严重的微观切削和挤压剥落现象,如图9(b)所示。3.0%的200目二氧化硅试验组磨痕表面粗糙,磨损量大,且出现大量深犁沟与划痕,还有小面积的疲劳鳞剥,磨损机制主要为严重的磨粒磨损,如图9(c)所示。由此得出,润滑油中二氧化硅质量分数的增加会导致磨粒磨损的加剧。

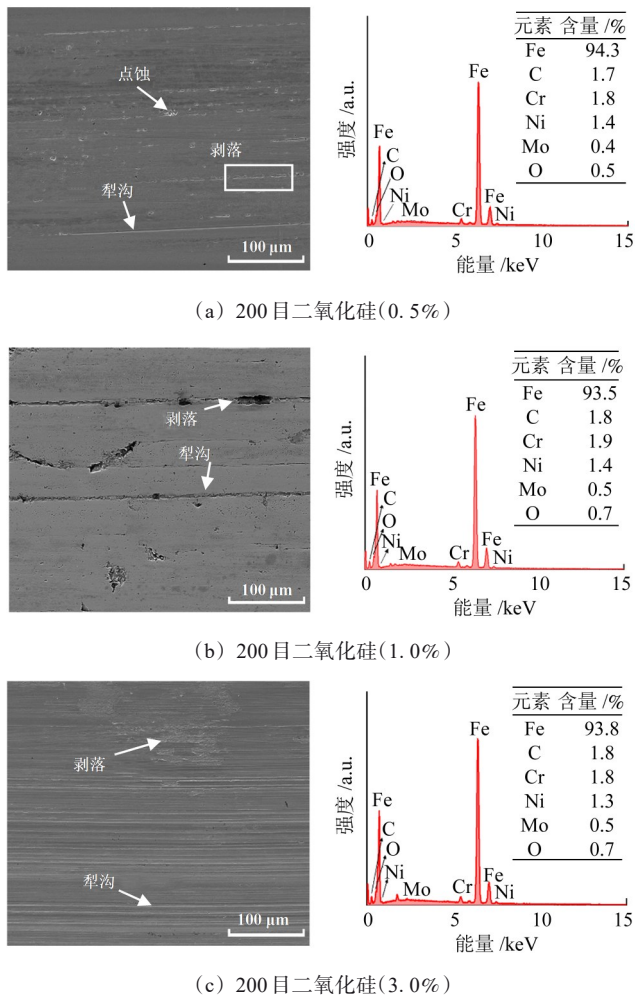


图9 200目二氧化硅污染油润滑下的18CrNiMo7-6试样磨痕表面形貌与表面能谱分析

Fig. 9 Surface morphology and energy dispersive spectroscopy analysis of 18CrNiMo7-6 specimen grind marks under 200 mesh SiO_2 contaminated oil lubrication

如图10(a)所示,0.5%的200目混合颗粒试验组磨痕表面出现成片聚集的疲劳点蚀凹坑和少量犁沟,一部分点蚀凹坑有向外扩展趋势,磨损机制为疲劳磨损与磨粒磨损。如图10(b)所示,1.0%的200目混合

颗粒试验组磨痕表面粗糙,出现大量较深的点蚀凹坑,且部分点蚀凹坑向外剥落扩展形成较小面积的剥落区域,凹坑中存在颗粒物的堆积。随着润滑油中颗粒物的增多,3.0%的200目混合颗粒试验组磨痕表面大量的点蚀凹坑向外剥落延伸,连接成片,发展成大面积剥落,同时还出现较多犁沟,磨损机制转变为磨损程度更剧烈的黏着磨损和严重的磨粒磨损,磨痕加深,磨损量增大,如图10(c)所示。磨痕表面能谱分析显示,1.0%和3.0%的200目混合颗粒试验组磨痕表面碳元素占比分别为3.3%和4.2%,远大于对照组。这是由于金属磨屑和二氧化硅等硬质颗粒在磨损过程中挤压材料表面,使材料表面出现剥落,形成凹坑,这些凹坑利于二氧化硅等硬质颗粒物和煤粉的聚集,导致材料表面碳元素含量增加,而硬质颗粒物的集聚又加剧了凹坑的向外剥落扩展,形成大面积剥落区域,使更多的硬质颗粒物聚集在凹坑,导致恶性循环。

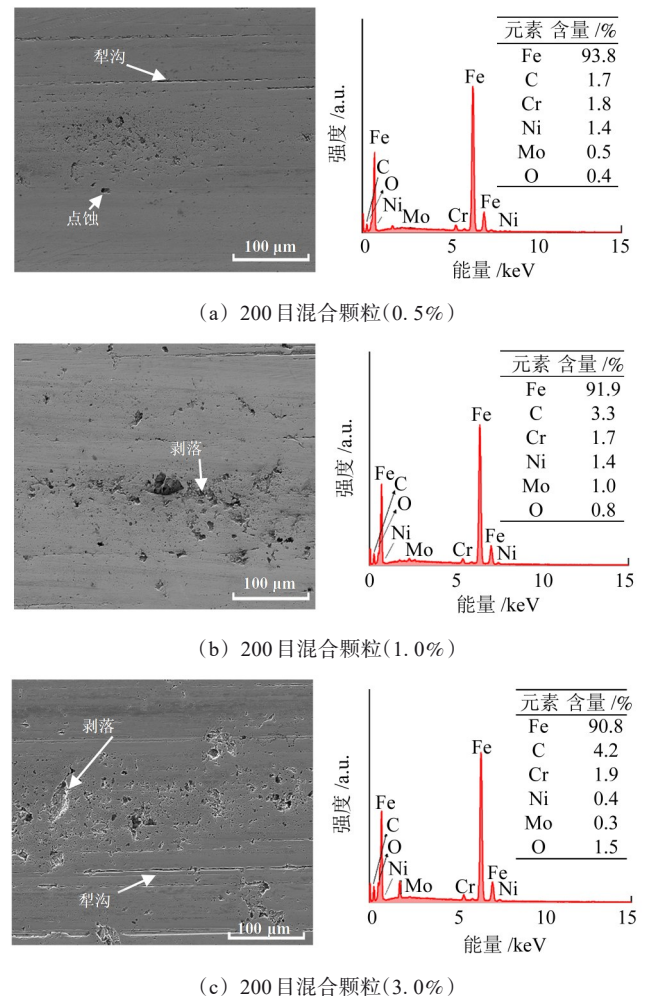


图10 混合颗粒(200目二氧化硅+200目煤粉)污染油润滑下的18CrNiMo7-6试样磨痕表面形貌与表面能谱分析

Fig. 10 Surface morphology and energy spectrum analysis of 18CrNiMo7-6 specimen grind marks under mixed particles (200 mesh SiO_2 +200 mesh pulverised coal) contaminated oil lubrication

2.3 磨损机制

不同程度和类型粉尘污染润滑下齿面材料 18CrNiMo7-6 的磨损机制如图 11 所示。当润滑油中煤粉颗粒含量较低时,煤粉颗粒被挤压剪切为小颗粒,填补材料表面凹坑,弱化了上、下摩擦面小凸起和凹陷坑的相互嵌套,起到了平整表面、修补抛光的作用,如图 11(a)所示。当润滑油中煤粉颗粒含量较高且颗粒度较大时,材料表面凹坑不足以容纳下全部煤粉颗粒,在一定循环载荷下,大部分煤粉颗粒在材料表面滑动或黏附,既破坏了油膜的形成,又增大了滑移阻力,导致材料表面发生塑性变形而形成凹坑,继而发生黏着磨损,如图 11(b)所示。如果润滑油中粉尘颗粒以二氧化硅为主,一部分二氧化硅颗粒滚动时

驱动力矩比抑制力矩增加更快,因此会从凹坑滚动而出,另一部分颗粒的抑制力矩增加更快,运动形式由滚动转变为滑动,在材料表面划出犁沟,且磨损产生的金属硬质颗粒也会与二氧化硅颗粒共同作用,加剧磨粒磨损,颗粒物浓度越高,磨损越剧烈,如图 11(c)所示。煤粉与二氧化硅同时出现在凹坑时,二氧化硅由于煤粉的包裹导致滚动抑制力矩增大,更易附着于凹坑,由于二氧化硅质地较硬,不易破碎,使凹坑处出现应力集中,在循环应力作用下,凹坑四周材料发生微观脆性断裂,出现裂纹的扩展,进而形成大面积剥落,如图 11(d)所示。另外,二氧化硅等硬质颗粒与煤粉的聚集导致接触面局部润滑失效,致使材料表面温度升高,诱发黏着磨损。

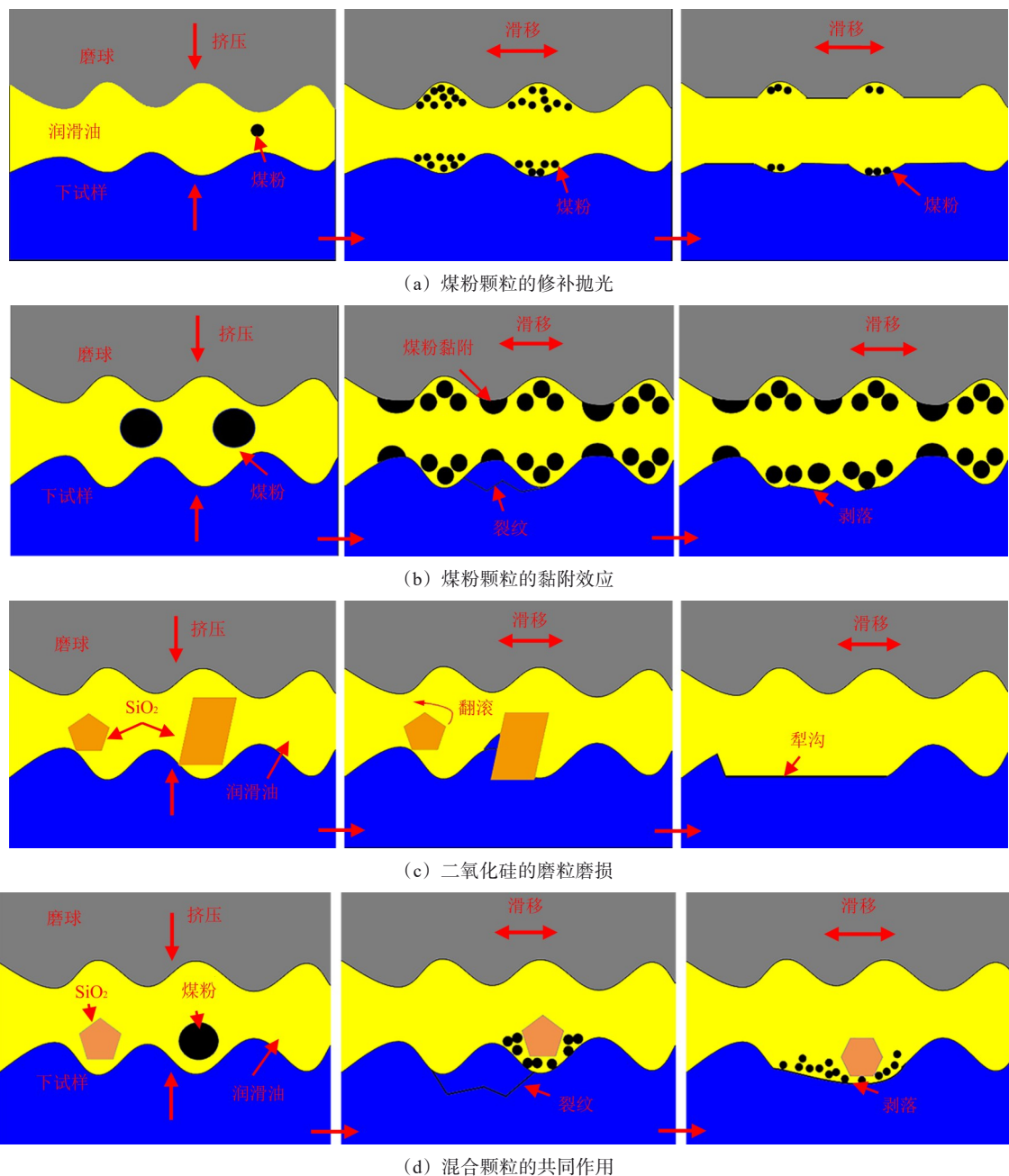


图 11 煤粉、二氧化硅、煤粉与二氧化硅混合颗粒在接触面间的干扰机制

Fig. 11 Interfering mechanism of pulverized coal, SiO_2 and mixed particles of pulverized coal and SiO_2 at the contact surface

3 结论

选取了煤矿粉尘中具有代表性的煤粉与二氧化硅作为润滑油中污染物颗粒,通过粉尘污染润滑下的摩擦磨损试验,从摩擦因数、油液温度、磨损量和磨痕表面特征入手,总结了不同颗粒物在不同质量分数下对油液的润滑性能和齿轮材料18CrNiMo7-6磨损机制的影响,得出以下主要结论:

1)当润滑油中污染物单纯为煤粉颗粒时,煤粉颗粒易碎,在摩擦过程中起到一定修补抛光作用,改善了润滑油的抗磨性能,特别是质量分数为0.5%的200目煤粉试验组,磨损量相较于对照组下降了77.7%,润滑效果明显,磨损机制主要为轻微疲劳磨损和轻微磨粒磨损。但当润滑油中出现超量的大颗粒煤粉时,煤粉颗粒也会导致摩擦过程中的黏附效应,造成较为剧烈的黏着磨损,质量分数为3.0%的80目煤粉试验组磨损量相较于对照组增加了77.5%。

2)当润滑油中污染物单纯为二氧化硅颗粒时,二氧化硅硬度高,在材料表面的挤压和剪切作用下会撕裂油膜,降低润滑油的抗磨性能,随着油液中颗粒物质量分数的提高,磨粒磨损加剧,特别是3.0%的200目二氧化硅试验组磨损量达到对照组的1 224.0%。

3)当润滑油中污染物为煤粉与二氧化硅混合颗粒时,煤粉颗粒非但不会减轻二氧化硅等硬质颗粒对材料表面的磨损,反而加剧了摩擦过程中的磨损程度,导致磨损量剧增,其中质量分数为1.0%和3.0%的混合颗粒试验组磨损量分别达到了对照组的1 314.0%和1 583.0%。因此,当润滑油中出现过量的二氧化硅等硬质颗粒时,需要及时过滤或更换油液,避免零件过度磨损,导致事故发生。

参考文献(References)

- [1] 王振,孙浩,崔义龙,等.表面复合强化对18CrNiMo7-6渗碳齿轮钢表面完整性的影响研究[J].机械强度,2025,47(8):36-47.
Wang Zhen, Sun Hao, Cui Yilong, et al. Study on the effect of surface composite strengthening on the surface integrity of 18CrNiMo7-6 carburized gear steel [J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(8): 36-47. (In Chinese)
- [2] 李发泉.掘进设备内喷雾技术研究现状[J].煤炭科学技术, 2017, 45(4): 89-92.
Li Faquan. Research status on internal spraying technology of gateway driving equipment [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 89-92. (In Chinese)
- [3] 张维果,王学成.浅谈煤矿机械磨料磨损机理[J].煤炭工程, 2010, 42(6): 76-78.
Zhang Weiguo, Wang Xuecheng. Comments on abrasion mechanism of abrasive material for mine machinery [J]. Coal Engineering, 2010, 42(6): 76-78. (In Chinese)
- [4] 何海波.刮板输送机链环在不同磨料条件下的耐磨性研究[J].煤炭工程, 2024, 56(7): 213-219.
He Haibo. Wear resistance of chain rings of scraper conveyor under different abrasive conditions [J]. Coal Engineering, 2024, 56(7): 213-219. (In Chinese)
- [5] 王伟,刘小君,刘焜.粒度及其分布对颗粒介质摩擦副摩擦学特性的影响[J].中国机械工程, 2012, 23(7): 757-761.
Wang Wei, Liu Xiaojun, Liu Kun. Influences of particle size and size dispersion on tribopairs lubricated by particulate media [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(7): 757-761. (In Chinese)
- [6] 盛晨兴,宁昶雄,张玉人,等.颗粒污染物对润滑油抗磨性能的影响试验研究[J].润滑与密封, 2017, 42(7): 7-13.
Sheng Chenxing, Ning Changxiong, Zhang Yuren, et al. Experimental study on the effect of particle contaminant on anti-wear performance of lubricating oils [J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(7): 7-13. (In Chinese)
- [7] 盛晨兴,王会扬,潘小飞.基于四球试验的润滑油颗粒污染物对摩擦振动的诱导关系研究[J].润滑与密封, 2017, 42(12): 1-5.
Sheng Chenxing, Wang Huiyang, Pan Xiaofei. Research on the friction vibration induced by debris in lubricant based on four-ball test [J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(12): 1-5. (In Chinese)
- [8] 袁伟,王昊天,郭前建,等.冲击载荷下 Al_2O_3 磨料对齿轮磨损行为的作用机理研究[J].摩擦学学报(中英文), 2023, 43(6): 682-691.
Yuan Wei, Wang Haotian, Guo Qianjian, et al. Action mechanism of Al_2O_3 abrasive on gear wear behavior under impact load [J]. Tribology, 2023, 43(6): 682-691. (In Chinese)
- [9] 张庆,郭永刚,彭玉兴.矿物粉尘环境下矿井缠绕提升钢丝绳振动磨损特性研究[J].摩擦学学报(中英文), 2024, 44(8): 1107-1124.
Zhang Qing, Guo Yonggang, Peng Yuxing. Vibration-worn characteristics of winding hoisting wire rope in mine under the environment of mineral dust [J]. Tribology, 2024, 44(8): 1107-1124. (In Chinese)
- [10] 沈智予.碳粉/润滑油固液复合润滑体系的摩擦学性能研究[D].重庆:重庆理工大学, 2024: 35-76.
Shen Zhiyu. Tribological performance of carbon powder/lubricant solid-liquid composite lubrication system [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024: 35-76. (In Chinese)
- [11] 唐斌,项载毓,范志勇,等.沙粒介入高速列车制动界面对摩擦块摩擦磨损行为的影响[J].摩擦学学报(中英文), 2024, 44(6): 789-799.
Tang Bin, Xiang Zaiyu, Fan Zhiyong, et al. The effect of sand particles entering the braking interface of a high-speed train on the friction and wear behavior of friction block [J]. Tribology, 2024, 44(6): 789-799. (In Chinese)
- [12] 王晓珍,蒋仲安,王善文,等.煤巷掘进过程中粉尘浓度分布规律的数值模拟[J].煤炭学报, 2007, 32(4): 386-390.
Wang Xiaozhen, Jiang Zhongan, Wang Shanwen, et al. Numerical simulation of distribution regularities of dust concentration during the ventilation process of coal roadway driving [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 386-390. (In Chinese)

- [13] 张小峰. 一种新型复合式透气塞[J]. 机床与液压, 2017, 45(4): 83-84.
Zhang Xiaofeng. A new type of composite air plug [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(4): 83-84. (In Chinese)
- [14] 赵虎成, 崔功军, 郭贺, 等. FeCrB-TiC 抗磨复合材料干摩擦学性能研究[J]. 机械强度, 2024, 46(5): 1168-1174.
Zhao Hucheng, Cui Gongjun, Guo He, et al. Study on dry tribological properties of wear resistant FeCrB-TiC composites [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46 (5) : 1168-1174. (In Chinese)
- [15] 冯小刚, 崔功军, 刘宇嵩, 等. FeNiC 合金的干摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2025, 50(2): 72-79.
Feng Xiaogang, Cui Gongjun, Liu Yusong, et al. Study on tribological properties of FeNiC alloy under dry sliding condition [J]. Lubrication Engineering, 2025, 50(2): 72-79. (In Chinese)
- [16] 宋伟, 李凯民, 马荣荣, 等. 浸渍石墨材料在不同法向载荷下的磨损性能研究[J]. 润滑与密封, 2024, 49(7): 58-66.
Song Wei, Li Kaimin, Ma Rongrong, et al. Study on wear properties of impregnated graphite materials under different normal loads [J]. Lubrication Engineering, 2024, 49 (7) : 58-66. (In Chinese)
- [17] 吕纯, 张培林, 吴定海, 等. 基于超声传感器的油液磨粒在线监测系统的研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(7): 73-75.
Lü Chun, Zhang Peilin, Wu Dinghai, et al. Research on online monitoring system for oil wear debris based on ultrasonic sensor [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(7): 73-75. (In Chinese)
- [18] Bustos V A, Furlong O J. Stick-slip friction: a Monte Carlo study [J]. Tribology International, 2016, 102: 355-360.
- [19] Tonazzi D, Massi F, Baillet L, et al. Experimental and numerical analysis of frictional contact scenarios: from macro stick-slip to continuous sliding [J]. Meccanica, 2015, 50(3): 649-664.
- [20] Liu G, Li X, Qin B, et al. Investigation of the mending effect and mechanism of copper nano-particles on a tribologically stressed surface [J]. Tribology Letters, 2004, 17(4): 961-966.
- [21] Sui T Y, Song B Y, Zhang F, et al. Effect of particle size and ligand on the tribological properties of amino functionalized hairy silica nanoparticles as an additive to polyalphaolefin [J]. Journal of Nanomaterials, 2015, 2015(1): 492401.

Investigating the tribological behavior of 18CrNiMo7-6 gear material in mining reducers under dust-contaminated lubrication

ZHAO Jiapeng^{1,2} PANG Xinyu^{1,2} MA Fuwen³ HE Yixiang^{1,2} LÜ Kaibo^{1,2} ZHANG Zhandong⁴

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Coal Mining Equipment in Shanxi Key Laboratory, Taiyuan 030024, China)

(3. ICCTEG Taiyuan Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030001, China)

(4. Mechanical and Electrical Engineering College, Shanxi Datong University, Datong 037003, China)

Abstract: [Objective] The lubrication environment of mining reducer gears is often contaminated by coal mine dust. The paper took the gear material 18CrNiMo7-6 as the research object and conducted friction tests. The tribological behavior of the gear material 18CrNiMo7-6 was investigated under dust-contaminated lubrication. [Methods] 80 mesh pulverised coal particles, 200 mesh pulverised coal particles, 200 mesh silicon dioxide particles, and 200 mesh mixed particles of silicon dioxide with pulverised coal were selected as pollutants. The mass fractions were set at 0.5%, 1.0%, and 3.0%. Friction and wear tests were conducted using the material surface property comprehensive tester. Friction coefficients and oil temperature changes under different lubrication environments were obtained. The wear mechanisms of the gear material were analyzed using the scanning electron microscope (SEM), confocal three-dimensional profilometer, and energy dispersive spectrometer (EDS). [Results] The results indicate that the pulverised coal particles in most pulverised coal test groups play a certain role in reducing friction, leading to a smooth wear surface. However, an exception is the test group featuring 80 mesh pulverised coal with a mass fraction of 3.0%. the pulverised coal particles in this test group trigger the adhesion effect on the contact surface, resulting in intensified adhesive wear. Silicon dioxide particles severely damage the oil film on the contact surface, thereby diminishing the anti-wear performance of lubricating oil. As the mass fraction of silicon dioxide particles in lubricating oil increases, abrasive wear intensifies. The pulverised coal particles in the 200 mesh mixed particle test group do not exhibit a friction-reducing effect, but instead exacerbate the lubrication environment. As the mass fraction of contaminants increases, the wear mechanism transitions from abrasive wear and fatigue wear to severe abrasive wear and severe adhesive wear.

Key words: 18CrNiMo7-6; Lubricating oil; Coal mine dust; Anti-wear performance; Wear mechanism

Corresponding author: PANG Xinyu, E-mail: pangxinyu@tyut.edu.cn.

Fund: National Natural Science Foundation of China (52175108); Shanxi Provincial Basic Research Program-Free Exploration Category (202303021211325)

Received: 2024-11-27 Revised: 2025-01-09

(编辑: 刘欢欢)