

运动副硬颗粒磨损力学机制^{*}

程鹏飞^{1,2}, 武正权¹

(1. 河南工学院 机械工程学院, 河南 新乡 453003;

2. 新乡市机电产品数字化设计与制造重点实验室, 河南 新乡 453003)

摘要:以煤炭及三氧化二铝颗粒为例,进行了运动副界面颗粒摩擦磨损实验,探讨了其运动副表面的磨损力学机制。同时利用离散元方法建立了平行板剪切滑移颗粒流动力学仿真模型,分析了运动副表面磨损特性与煤炭与三氧化二铝颗粒力链特征的关联机理。研究表明,煤炭颗粒副表面的磨损形貌主要以压痕磨为主,而三氧化二铝颗粒副表面以刮痕为主。其原因因为煤炭颗粒表面的粘性及摩擦因数较大,容易发生剪切膨胀现象,为此在运动副与强力链的结合处产生了较大的赫兹接触应力,使表面出现了压痕特征;而三氧化二铝颗粒硬度高,表面粘性及摩擦因数较小,不易发生剪切膨胀现象,在运动副与强力链的结合处更容易产生刮擦磨痕。

关键词:运动副;硬颗粒;磨损形貌;力链

中图分类号:TH121

文献标识码:A

文章编号:2096-7772(2023)06-0001-05

0 引言

颗粒磨损问题广泛存在于机械摩擦与密封等工程领域,如煤炭破碎机、球磨机、金属硬密封等。设备运行过程中,硬颗粒不可避免地介入到运动副内,使运动副表面发生快速磨损,造成设备过早损坏,是机械工程领域中亟待解决的问题之一^[1,2]。

杨树君等^[3]发现密封界面间硬颗粒介入运动副界面是设备密封失效的主要原因之一,这对界面摩擦与密封意义重大。徐克宝等^[4]研究了摩擦副颗粒磨损机理及轨迹,指出此过程对某一具体颗粒来说是局部或微小的,而对于无数的颗粒来说则是宏观、巨大的。郑金鹏等^[5]研究了 Al_2O_3 硬质颗粒尺寸对其橡胶—金属界面摩擦行为的影响,结果表明大尺寸硬颗粒会加速橡胶的磨损,小尺寸颗粒介入反而能减缓橡胶的磨损速度。尽管界面颗粒磨损研究意义明显,但限于实验条件的制约,此方面的研究仍有很多不足之处。

离散元(Discrete Element Method, DEM)是研究粉末颗粒物质内部力学特性的有效方法之一。通过 PFC 软件平台不仅可以得到颗粒间力传递路径,

还可以可视化其力链分布特征,目前已成为颗粒介质力学机理研究的主要技术手段。Xiu 等^[6]利用平行板颗粒流剪切模型分析了颗粒剪切膨胀对其力链演变的影响,结果表明颗粒剪切膨胀存在三阶段,当其力链方向倾向于 y 轴时工件表面磨损加剧。Meng 等^[7]利用平行板颗粒剪切模型研究了轴承颗粒流润滑力学机制,结果表明力链的稳定性与颗粒流动状态密切关联,力链波动越显著则颗粒润滑效果越差。Dai 等^[8]通过剪切试验分析了颗粒摩擦与颗粒尺寸对其力学机制的影响,结果表明大尺寸颗粒剪切膨胀现象更为剧烈。Zhang 等^[9]采用离散元方法分析了粉末压实过程中的力链特性,结果表明强力链大多位于摩擦力大的颗粒上。张炜与孟凡净等^[10,11]的研究结果表明,颗粒间摩擦与颗粒—侧壁摩擦会对铁粉压制力链特征的演化存在明显影响。

尽管界面颗粒介质力学机制研究文献较多,然大多集中于颗粒润滑方向,运动副硬颗粒磨损力学机制的研究目前仍鲜有报道。为此,本文将摩擦学实验与离散元仿真相结合,对运动副界面硬颗粒磨损机理及力学机制进行探索,以为机械摩擦与密封装置的性能提升奠定理论与技术基础。

^{*} 收稿日期:2023-08-20

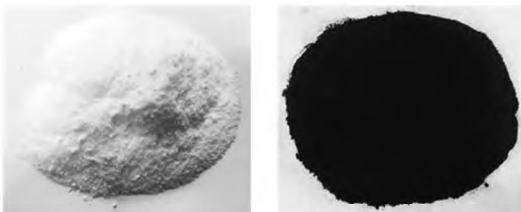
基金项目:河南省科技攻关计划项目(212102210432)

第一作者简介:程鹏飞(1976—),男,山西晋中人,副教授,硕士,主要从事机械设计及理论研究。

1 摩擦实验与数值仿真

1.1 硬颗粒材料选择

煤炭是我国的主要一次性能源,电力主要依靠燃烧煤炭来获得。为了提高煤炭的燃烧效率,通常对煤炭进行破碎筛分。破碎过程中煤炭颗粒极易进入运动副间,造成破碎设备过早失效。为了研究颗粒硬度、摩擦因数等参数对运动副表面磨损的影响,在此选择了不同硬度的煤炭及三氧化二铝颗粒进行研究,实验颗粒如图 1 所示。



(a)三氧化二铝 (b)煤炭
图 1 硬颗粒介质

1.2 摩擦磨损实验

摩擦实验在 MWF-500 往复式摩擦磨损试验机(MWF-500,济南华兴试验设备有限公司,济南)上进行,下试样为 65Mn 试件,用石蜡固定于摩擦试验机载物槽内。上试件为氧化锆陶瓷球,直径 6.5mm。实验前在摩擦副界面间填充一定厚度的煤粉与三氧化二铝颗粒(直径约为 $28\mu\text{m}$),摩擦行程 6mm,速度为 5mm/s,法向载荷 30N,试验时间 10min。摩擦系数由试验机软件测量给出,试样重复实验 3 次,取其平均值作为最终实验结果。实验完成后用超景深显微镜(Leica DM2500 徕卡显微系统,德国)对表面磨损形貌进行观测,目镜倍数 $10\times$,物镜倍数 $4\times-1000\times$ 。

1.3 离散单元法仿真

离散元(Discrete Element Method,DEM)是研究粉末颗粒物质力学机理的最有效方法之一,在此利用已有 PFC2D 软件建立了平行板剪切滑移硬颗粒磨损仿真模型,如图 2 所示。

模拟采用 Hertz-Mindlin 接触模型,模型宽 0.85mm、长 1.7mm,三体颗粒数量 1300 个,颗粒粒径 $21-41\mu\text{m}$ 。颗粒在模型中均布,无黏性接触。一体施加 x 向与旋转约束,沿 y 轴负方向施加法向载荷。二体为无限长线性墙体,施加 x 轴正方向匀速剪切驱动。为保证颗粒能够以同样的速度与位置出现在模型另一侧,模型边界采用周期性条件。一体材料为 65Mn,二体材料为陶瓷,三体颗粒分别为

三氧化二铝与煤炭颗粒。一体法向载荷为 2.5MPa,与颗粒接触摩擦系数则通过初始化试验进行确定,三体颗粒间摩擦系数则是通过 DEM 模型与摩擦学试验综合确定。

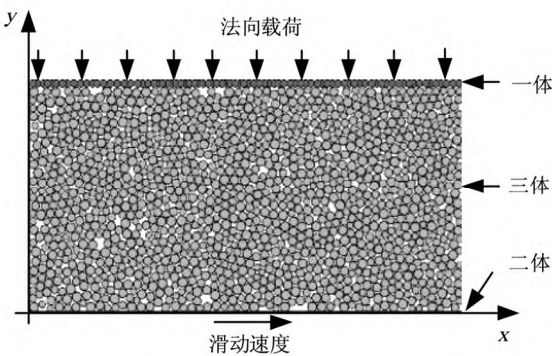


图 2 平行板剪切滑移硬颗粒磨损模型
表 1 一体、二体材料力学特性

一体参数名称	数值	二体参数名称	数值
剪切模量 GPa	77.2	摩擦系数	0.7
密度 kg/m^3	8190	剪切速度 m/s	0.5
泊松比	0.3		
摩擦系数	0.2		

表 2 三体材料力学特性

三氧化二铝颗粒参数	数值	煤炭颗粒参数	数值
剪切模量 GPa	31.2	剪切模量 GPa	0.2
密度 kg/m^3	2400	密度 kg/m^3	1500
泊松比	0.17	泊松比	0.3
摩擦系数	0.3	摩擦系数	0.8

2 实验结果与分析

2.1 运动副界面摩擦系数

摩擦系数是界面摩擦学特性的主要衡量指标之一,直接反应界面间的硬颗粒接触状态与流动状态。为此,采集了硬颗粒界面间的摩擦系数数据,见图 3 所示。

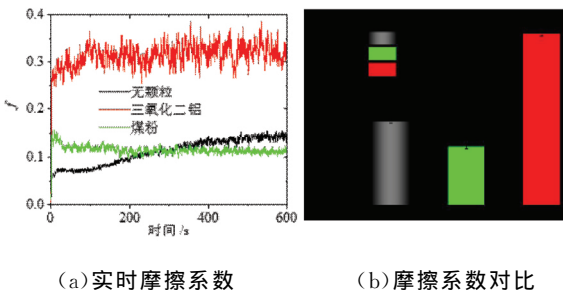


图 3 硬颗粒界面摩擦系数

由图 3 可以看出,界面间硬质颗粒介质不同,其界面摩擦系数也不相同。煤炭颗粒界面的摩擦系数为 0.109,三氧化二铝颗粒界面的摩擦系数为

0.318。表明颗粒介质特性对界面摩擦系数有着明显的影响,煤炭颗粒硬度较低,界面摩擦系数较小,而三氧化二铝颗粒硬度较高,界面摩擦系数明显增大。

2.2 运动副表面磨损

磨损量是运动副摩擦学特征的另一主要衡量指标,直接决定零件的磨损寿命。在此采集了运动副表面磨损形貌,结果如图4所示。

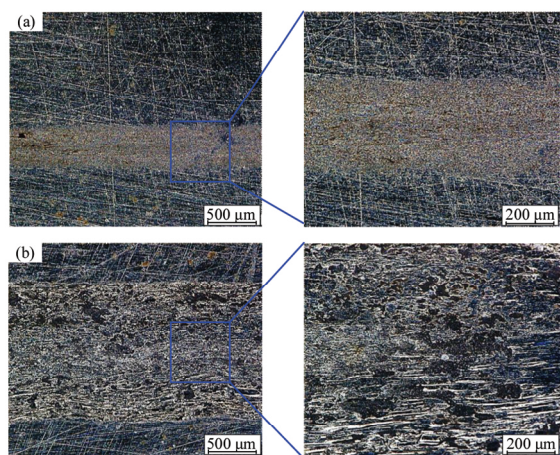


图4 煤炭与三氧化二铝硬颗粒表面磨损形貌

可以看出界面间硬颗粒介质不同,其表面磨损程度也不相同。煤炭颗粒的表面磨痕深度较浅,磨损程度低。三氧化二铝颗粒磨痕宽度较大,磨损程度高。再者,两种颗粒介质的磨痕特性也不相同,煤炭颗粒副表面磨痕具有类点蚀状特征,也就是说表面主要以压痕为主,刮擦划痕很少;而三氧化二铝颗粒的表面磨痕以刮擦磨痕为主,表明颗粒与摩擦副表面存在相对的滑动,硬颗粒在运动副表面产生了微切削效果。

综上所述可以判定,运动副界面间两种硬颗粒的流动形态存在差异。煤炭颗粒的滑移流动形态较弱,而三氧化二铝颗粒以滑移流动为主。产生上述结果的原因因为煤炭颗粒硬度低,表面粘性大,在运动副界面间不易流动;而三氧化二铝颗粒硬度高,表面粘性小,容易形成滑移流动形态。为了验证此推论,本文利用离散元方法进行了硬颗粒剪切滑移的力链特性研究。

3 数值仿真结果与分析

3.1 力链分布形态

图5为煤炭与三氧化二铝颗粒的力链特性数值仿真结果,图5(a)为三氧化二铝颗粒的力链分布特性,图5(b)为煤炭颗粒的力链分布特性,可以看出

两种硬质颗粒的力链分布形态存在明显差异。

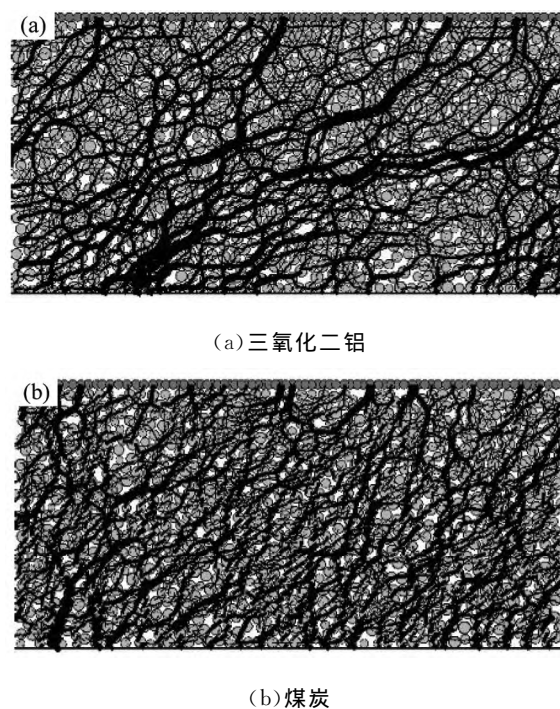


图5 颗粒介质力链分布特性

三氧化二铝颗粒的力链分布相对集中,力链网络结构整体呈 x 轴倾斜状态。煤炭颗粒的力链分布相对分散,大体方向偏向于 y 轴,力链网络结构整体呈 y 轴倾斜状态。这主要是由于三氧化二铝颗粒的硬度较高,表面粘性较小,颗粒间的接触偏向于惯性运动,其系统运动偏向于 x 轴方向,处于快速流动力学状态。而煤炭颗粒的硬度较低,表面粘性较大,偏向于粘弹性接触,致使颗粒系统运动偏向于 y 轴堵塞动力学状态。

3.2 颗粒剪切膨胀现象

图6、图7为煤炭与三氧化二铝颗粒剪切膨胀数值仿真结果,图6为三氧化二铝颗粒,图7为煤炭颗粒。

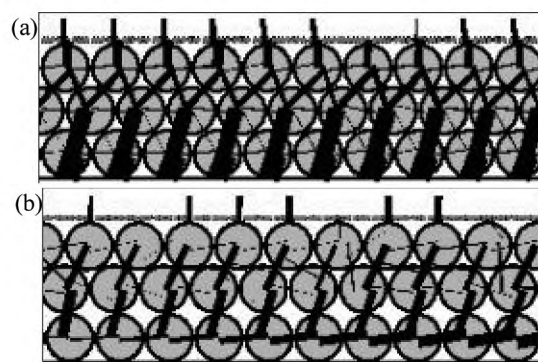


图6 三氧化二铝颗粒剪切膨胀现象

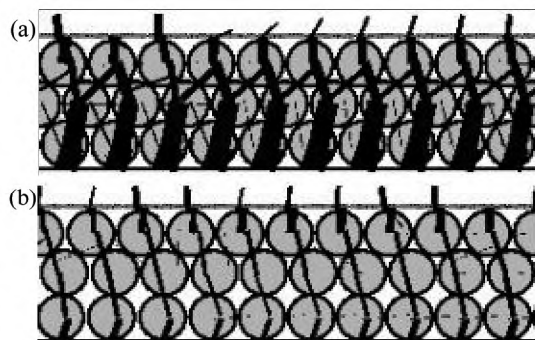


图7 煤炭颗粒剪切膨胀现象

离散元中将颗粒“翻越”的过程称为剪切膨胀现象,并且剪切膨胀过程具有周期性,能够在颗粒系统剪切过程中不断地发生。可以看出两种硬质颗粒均出现了剪切膨胀现象,在剪切膨胀过程中力链的演变规律同时发生变化。在图6(a)和图7(a)的颗粒上升阶段中,三氧化二铝颗粒系统横向的力链相比煤炭颗粒系统更多,颗粒之间形成了稳定的三角形状力链结构,而煤炭颗粒系统则形成“Y”状力链结构。在图6(b)和图7(b)的最高点阶段中,三氧化二铝颗粒系统的竖向力链偏向于流动方向,而煤炭颗粒系统的竖向力链方向与流动方向相反。说明了煤炭颗粒的剪切膨胀现象更明显,其稳定性较差。

3.3 驱动面法向力

硬颗粒与驱动面的法向作用力直接影响运动副表面的摩擦与磨损,为进一步分析硬颗粒介质对运动副表面的作用,在此提取了驱动面法相载荷,见图8所示。

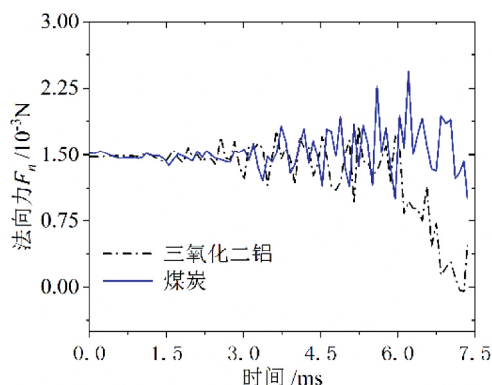


图8 驱动板所受法向力

可以看出,尽管两种颗粒数值仿真模型所施加的法向载荷相同,但颗粒介质对驱动面的法向反力却相差较大。三氧化二铝颗粒在剪切膨胀的最高点时法向力具有较大的波动,但剪胀颗粒在下降过程中法向力会降到很低的水平。煤炭颗粒在剪切膨胀的最高点时法向力相对稳定,但剪胀颗粒在下降过

程中的法向力要明显大于同阶段的三氧化二铝颗粒。煤炭颗粒法向力整体处于较高水平,而三氧化二铝的法向力虽小,但是在剪切膨胀的最高点时法向力波动较大。为此,堵塞的煤碳颗粒在高表面粘性的作用下凝聚成块,在其剪切膨胀过程中硬化并对运动副表面产生了类点蚀状磨痕。而三氧化二铝硬度高,表面能低,在其快速稳定的流出摩擦副时,产生了刮擦磨痕。

4 结论

本文利用实验与数值仿真相结合的方法对两种硬度颗粒的运动副表面磨损力学机制进行了研究,得到了界面摩擦系数、磨损形貌、颗粒硬度与其力链特性的关联规律,通过分析所得主要结论如下:

1)两种颗粒介质的硬度对运动副界面摩擦系数与表面磨损形貌均有影响,三氧化二铝颗粒的硬度较高,则界面摩擦系数与表面磨损量较大。煤炭颗粒的硬度较低,其磨损量较小且表面形貌特征也不同。煤炭颗粒主要为类点蚀磨损为主,而三氧化二铝则为刮擦磨损为主。

2)煤炭颗粒在运动副间更容易发生剪切膨胀现象,其流动为堵塞动力学状态。堵塞的煤碳颗粒在高表面粘性的作用下凝聚变硬,从而在运动副表面产生了类点蚀状磨痕;而三氧化二铝颗粒呈现惯性运动形态,在其快速稳定地流动时,产生了刮擦磨痕。

(责任编辑 吕春红)

参考文献:

- [1] 孙其诚,王学谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 肖文波,胡林,武玉琴. 颗粒物质中滑动摩擦力的变化规律[J]. 应用力学学报, 2005, 22(4): 643-646.
- [3] 杨树君,樊滨,刘剑. 固体颗粒介质用球阀的故障原因分析及解决方案[J]. 冶金/矿山通用机械, 2014(2): 61-63.
- [4] 徐克宝,黄存定,王杰,等. 摩擦副颗粒磨损机理及其轨迹化处理[J]. 内燃机配件, 2004(5): 8-10.
- [5] 郑金鹏,沈明学,厉淦,等. 丁腈橡胶在硬质颗粒环境下的摩擦磨损特性[J]. 材料工程, 2015, 43(10): 79-84.
- [6] XIU T X, WANG W, LIN K, et al. Characteristics of force chains in frictional interface during abrasive flow machining based on discrete element method[J]. Advances in Manufacturing, 2018, 6(4): 355-375.
- [7] MENG F J, LIU H B, HUA S Z, et al. Force chain characteristics of dense particles sheared between parallel-plate friction system [J]. Results in Physics, 2021, 25: 104328.
- [8] DAI B B, YANG J, ZHOU C Y. Observed Effects of Interparti-

- cle Friction and Particle Size on Shear Behavior of Granular Materials[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(1): 4015011.
- [9] ZHANG W, ZHANG S, TAN J J, et al. Investigation on the Friction Mechanism and Its Relation to the Force Chains during Powder Compaction[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2020, 89(12): 124602.
- [10] 张炜, 谈健君, 张帅, 等. 基于颗粒物质力学的铁粉末压制中摩擦特性对力链演化影响[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(2): 386-395.
- [11] 孟凡净, 刘焜, 秦涛. 颗粒流润滑力链演变及动力学状态的研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(9): 106-111.

Interfacial Wear Mechanical Mechanism of Hard Particle Between Kinematic Pairs

CHENG Pengfei^{1,2}, WU Zhengquan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Xinxiang Engineering Technology Research Center for Digital Design and Manufacturing of Electromechanical Equipment, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Taking coal and aluminum oxide particles as the research projects, a tribological test of it was carried out with the reciprocating tribological wear tester, in which the surface wear mechanism of kinematic pairs was investigated. Moreover, the simulation model of parallel plate shear and slipping with hard particles was also established using PFC2D software platform. The correlation mechanism between surface wear morphology of kinematic pairs and force chain distribution characteristics of simulation model was summarized and analyzed. The experimental results indicate that the surface morphology with coal particles is indentation wear, and it of aluminum trioxide particles is scratch wear. The numerical simulation results indicate that the shear expansion phenomenon is more occurred for coal particles with the higher frictional coefficient and surface tack. Thus, the density and hardness of granular media are bigger than that of other area which produce higher Hertz contact stress. So, the indentation wear marks on the metal pairs surface are produced. For aluminum trioxide particles, the shear expansion phenomenon is not easily occurred due to the higher hardness, low frictional coefficient, and surface tack. So, the scratch wear morphology is obtained as a result of sliding friction.

Key words: kinematic pairs; hard particles; wear morphology; force chain