

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.10.006

# 受限颗粒体对运动副摩擦力-速度关系的影响研究

苏灿春, 王伟, 鄢晓宇

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**在运动过程中受粉尘、碎屑等颗粒的影响,运动副动力学特性会产生复杂变化。针对此类问题,文章开展了弹簧-滑块-传送带摩擦实验,通过将二氧化硅、金刚石、氧化铁等受限颗粒体引入铝质滑块-橡胶传送带,探究摩擦力-速度关系、摩擦非线性-速度关系的变化。研究发现:不同载荷、颗粒材料、颗粒粒径对速度摩擦力-速度等关系会产生不同影响;随着载荷增加,滑块的摩擦力均值和标准差随之增大;加入二氧化硅颗粒后,摩擦力均值呈现减小趋势,摩擦力标准差呈现先减小后增大的趋势;加入金刚石、氧化铁颗粒后,摩擦力均值呈现增大趋势,摩擦力标准差呈现减小的趋势;随着粒径的增大,滑块受到的平均摩擦力及标准差呈现增大的趋势。该研究对含受限颗粒体的运动副的动力学特性有一定的指导意义。

**关键词:**受限颗粒体;摩擦力;摩擦非线性;滑块;运动副

**中图分类号:**TH117.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)10-1337-06

## Study on the influence of confined particles on friction-velocity relationship of kinematic pair

SU Canchun, WANG Wei, YAN Xiaoyu

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Kinematic pair will be affected by dust, debris and other particles during motion, and its kinetic properties will undergo more complex changes. To address this problem, the spring-slider-conveyor belt friction experiment was carried out, and the changes of the friction-velocity relationship and friction nonlinearity-velocity relationship were investigated through the introduction of confined particles such as silica, diamond and iron oxide into the aluminum slider-rubber conveyor belt. It is found that different loads, particle materials and particle sizes have different effects on friction-velocity relationship. With the increase of the load, the mean friction and the standard deviation of the friction of the slider increase. After adding the silica particles, the mean friction tends to decrease, while the standard deviation of the friction tends to decrease first and then increase slightly. After adding diamond and iron oxide particles, the mean friction tends to increase, while the standard deviation of the friction tends to decrease. With the increase of particle size, the mean friction and the standard deviation of the friction of the slider tend to increase. This study has some implications for the kinetic properties of kinematic pairs containing confined particles.

**Key words:** confined particles; friction; friction nonlinearity; slider; kinematic pair

摩擦非线性是摩擦系统的天然属性<sup>[1-2]</sup>,在干摩擦和乏油润滑状态下,机械传动系统中表现尤

为明显。摩擦力-速度关系是摩擦非线性重要的表现形式<sup>[3]</sup>,探讨各工况条件对两者关系的影响,

收稿日期:2021-12-17;修回日期:2022-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875154)

作者简介:苏灿春(1997—),男,湖南桃江人,合肥工业大学硕士生;

王伟(1976—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: wangwe@gmail.com.

能对滑块-导轨等运动副的设计及应用提供一定的指导。多数专家学者对摩擦力-速度关系的理论模型进行了有益探索,提出了相关的理论模型。Stribeck 模型描述了油润下摩擦力与速度之间的非线性关系。在油润滑状态下,摩擦副两摩擦界面的摩擦力大小与两摩擦表面之间的润滑油膜厚度有关,摩擦界面的油膜厚度受到界面相对速度的影响。而 LuGre 模型认为摩擦副接触面在微观上是粗糙、不规则的,并假设成两组弹性鬃毛之间的接触<sup>[4]</sup>。这些理论模型被运用到多数关于黏滑、摩擦非线性的摩擦学实验及仿真工作中。文献[5]分析了丝杠未磨损和磨损区域的摩擦曲线,结果表明丝杠磨损后中低速阶段呈现强烈摩擦非线性;文献[6]对不同工况下的液压缸往复运动摩擦特性进行测试,提出改进的稳态摩擦模型和动态摩擦模型;文献[7]研究了三轴稳定平台的环架结构及各轴角速度和转动惯量的耦合关系。这些摩擦模型在研究工作中都得到广泛的应用,但基于真实实验数据获得的摩擦力-速度关系才是提升摩擦模型的预测精度的重要环节。

正常运行的机械部件存在着形状各异、理化性质多样的颗粒集体,其存在形式可能为表面磨损颗粒、外来杂质、转移膜颗粒和固体润滑材料等<sup>[8-10]</sup>。这些受限颗粒体将伴随整个摩擦过程并对摩擦副的摩擦学特性带来重要影响<sup>[11-12]</sup>。早在 20 世纪中期,学者已研究证明在摩擦过程中产生的微米量级的球形和圆柱形颗粒能够降低静摩擦系数且随着粒径的增大而减小<sup>[13]</sup>。近年来专家学者研究了膜厚比<sup>[14]</sup>、颗粒粒径<sup>[15]</sup>、颗粒形状<sup>[16]</sup>、颗粒质量分数、颗粒材料<sup>[17]</sup>、颗粒层厚度等不同的受限颗粒体参数对摩擦系统的动力学特性影响,如颗粒体的承载情况、摩擦力变化、颗粒层破坏过程<sup>[18-19]</sup>以及摩擦系统振动噪声<sup>[20]</sup>等。学者还研究了特定摩擦系统的摩擦力特性。文献[21]研究了颗粒对活塞环缸套系统摩擦学特性的影响,当颗粒粒径大于最小膜厚时,颗粒对最小膜厚、颗粒承载力和摩擦力有明显影响;文献[22]研究了页岩在干燥石英砂颗粒上的滑动摩擦情况,其接触摩擦系数随名义应力呈现近似的线性关系;文献[23]研究了不同的氧化铁颗粒颗粒层厚度对车轮铁轨表面摩擦和粘附力的影响;文献[8]研究了砂土条件下冲洗工具与套管的摩擦行为。

这些研究工作为探索受限颗粒体对滑块导轨系统摩擦学特性的影响机制提供了有利的支撑。现有的研究大多集中于受限颗粒体的磨粒磨损或

润滑效应,受限颗粒体如何影响摩擦力-速度关系的研究却较为少见。因此,本文通过实验重点研究受限颗粒体对运动副的摩擦力-速度、摩擦力标准差-速度关系的影响。

## 1 实验原理

根据弹簧-滑块模型来设计实验机的基本结构,实验台示意图及其实物图如图 1 所示。弹簧-滑块模型是一个经典的动力学模型,该模型在 1967 年由 R. Burridge 和 L. Knopoff 最先提出,用以解释地震大小分布的古滕贝格-里奇特定律<sup>[24]</sup>。该模型的基本参数包括质量、弹簧刚度、弹簧阻尼及外加载荷。

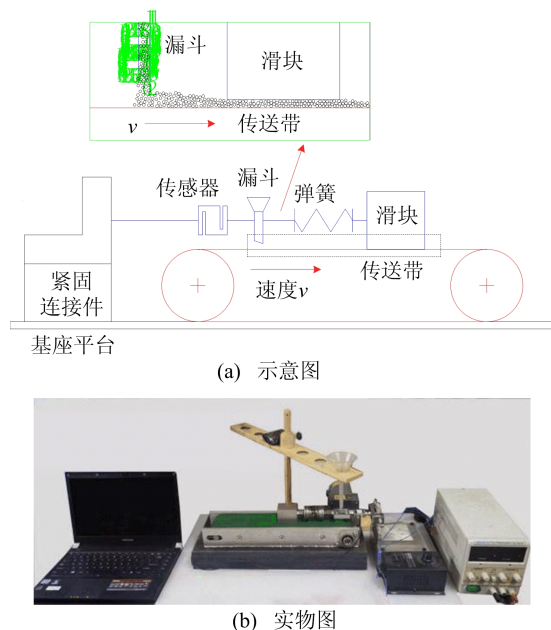


图 1 实验台示意图及其实物图

模型的基本动力学方程式为:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + A \frac{dx}{dt} + F + Kx = 0 \quad (1)$$

实验采用滑块-传送带实验台来研究直线运动摩擦副的摩擦非线性现象。实验台结构能够保证稳定的单向长程摩擦运动。滑块与传送带之间形成摩擦副,通过摩擦界面条件的改变,探究各项参数对摩擦副摩擦非线性的影响。采用单向运动的传送带可实现长行程的摩擦实验,更利于观察摩擦力的时变特性。实验台由 4 部分组成:① 传送带、滑块弹簧结构、直流电机、直流调速器等传动部分;② 力传感器、变送器、数据采集卡、计算机测量部分;③ 基座及紧固装置;④ 漏斗、振动器颗粒添加装置。

实验选用铝块作为上试件材料,选择橡胶作为传送带材料。实验选用二氧化硅、金刚石、氧化铁等颗粒开展实验,颗粒参数见表 1 所列。

表 1 不同颗粒参数

参数	二氧化硅	金刚石	氧化铁
状态	白色粉末	喷剂	红色粉末
粒径/ $\mu\text{m}$	1	1	110 100
真密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 660	3 520	5 240
莫氏硬度	6.5	10.0	6.0
添加方式	漏斗	喷剂喷洒	漏斗

实验主要研究相对速度、颗粒硬度、颗粒粒径、接触载荷等参数变化对摩擦非线性的影响。实验数据分析方法为相同条件下 5 次实验得到 5 个摩擦力的平均值  $f$  和标准差  $R$ ,分析各参数对  $f$  和  $R$  的影响,同时分析摩擦力  $F$  的时变特性。标准差  $R$  为一个往复运动时间内的摩擦力取方差的算术平方根。

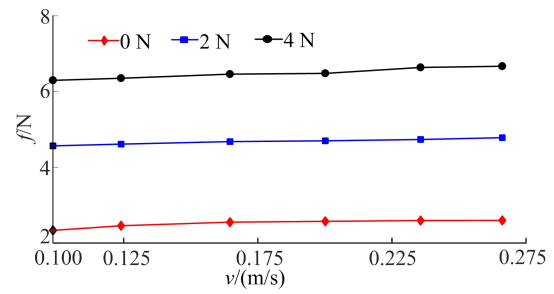
## 2 结果分析

研究表明,摩擦力均值-速度关系、摩擦力标准差-速度关系受诸多因素的共同影响,包括外部载荷、颗粒刚度、颗粒粒径等;它们之间存在着非简单的线性关系。外部因素的变化会改变摩擦界面内部的各种微观性质,如颗粒实际接触面积、接触应力、颗粒间摩擦系数、接触方式甚至造成界面结构的破坏,在宏观上表现为摩擦非线性、黏滑等摩擦学现象。本文着重阐述受限颗粒体对滑块-导轨系统的摩擦力-速度的影响。

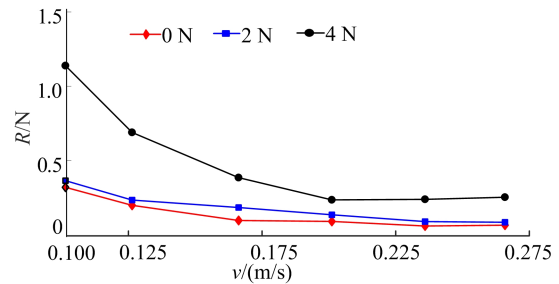
### 2.1 载荷对摩擦力-速度关系的影响

上试件为铝块,下试件为橡胶传送带,实验速度  $v$  分别为 0.100、0.125、0.165、0.200、0.235、0.265 m/s,载荷分别为 0、2、4 N,干摩擦室温条件,实验时间近 1 min,每组测试 3 次。载荷对摩擦力均值-速度、摩擦力标准差-速度关系的影响如图 2 所示, $v=0.200$  m/s 时的摩擦力时变情况如图 3 所示。

由图 2a 可知,不同载荷条件下,滑块的摩擦力均值、摩擦力标准差有不同变化趋势。较低载荷时,摩擦力标准差-速度关系呈减小趋势;较高载荷时,摩擦力标准差-速度关系呈现先减小后缓慢增大的趋势。而随着载荷的增加,滑块的摩擦力均值和标准差随之增大。

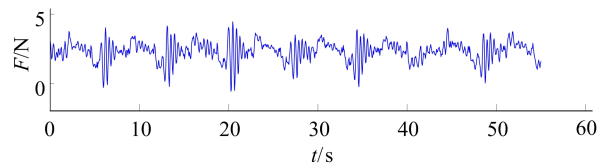


(a) 摩擦力均值-速度关系

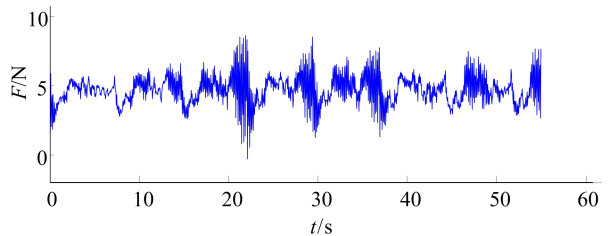


(b) 摩擦力标准差-速度关系

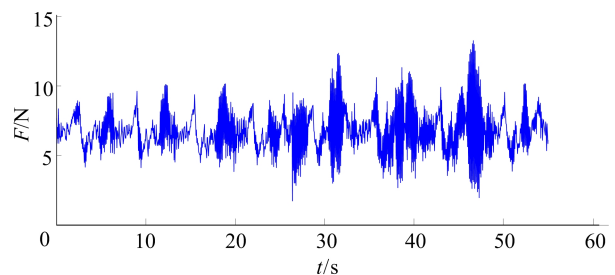
图 2 不同载荷对摩擦学特性的影响



(a) 无载荷



(b) 载荷 2 N



(c) 载荷 4 N

图 3 不同载荷下的摩擦力时变情况

在较低载荷时,摩擦副表面之间的微凸体接触时只发生弹性形变,运动较为平顺,摩擦界面的黏滑现象较弱导致滑块的摩擦力标准差较小。在较高载荷时,滑块之间的摩擦力增大,微凸体不仅存在弹性形变还有塑性形变,使得微凸体之间的实际接触面积增大,在接触界面滑动的距离变长,加剧表面微凸体的磨损甚至破裂产生碎屑,在界

面中翻滚碰撞,这些在滑动时都会增加摩擦力的波动,导致滑块的摩擦力标准差增大。

由图 3 可知,  $v=0.200$  m/s、无载荷时,滑块的摩擦力时变曲线波动比较平缓,周期性规律较强,摩擦力的标准差较小。随着载荷的增大,摩擦力均值增大,同时摩擦力时变曲线波动幅度增大,导致滑块的摩擦力标准差增大。

## 2.2 颗粒材料对摩擦力-速度关系的影响

室温条件下,上试件材料为铝块,下试件为橡胶传送带,传送带速度  $v$  分别为 0.100、0.125、0.165、0.200、0.235、0.265 m/s,载荷分别为 0、2、4 N,颗粒分为二氧化硅、金刚石、氧化铁 3 组,实验时间近 1 min,每组进行 3 次实验。载荷为 4 N 时,颗粒材料对摩擦力均值-速度、摩擦力标准差-速度关系的影响如图 4 所示,载荷为 4 N、 $v=0.165$  m/s 时的摩擦力时变情况如图 5 所示。

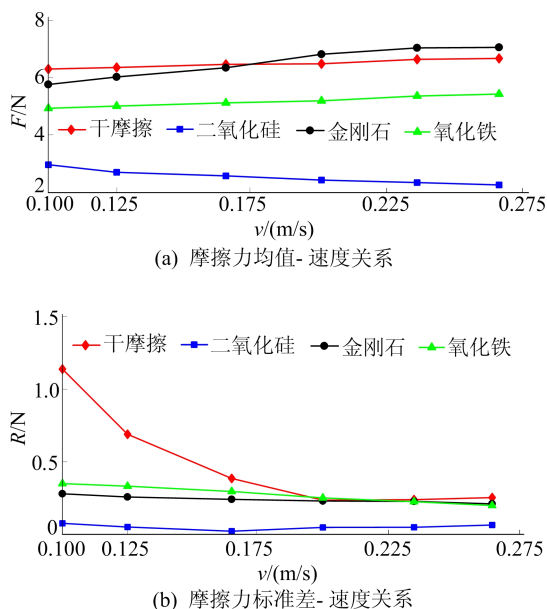


图 4 颗粒材料对摩擦力-速度关系的影响

由图 4 可知,在不同颗粒作用下,由于颗粒本身的硬度等理化性质的差异,不同颗粒对摩擦力-速度关系有不同的影响。

界面加入二氧化硅颗粒后,摩擦力均值-速度曲线呈现减小趋势,而摩擦力标准差-速度曲线呈现先减小后略微增大的趋势。与干摩擦情况相比,摩擦力均值及标准差均有大幅度的减小。随着二氧化硅的引入,两摩擦界面的微凸体之间形成颗粒层,减小了表面之间的直接接触面积,使得界面摩擦由二体摩擦向二体-三体混合摩擦转变。随着速度的增加,颗粒层变得更加致密,摩擦界面直接接触面积进一步减少,从而使得摩擦力减小。

从图 5 可以看出,二氧化硅的摩擦力曲线波动幅度较小,周期性规律性较强,曲线较为平稳。

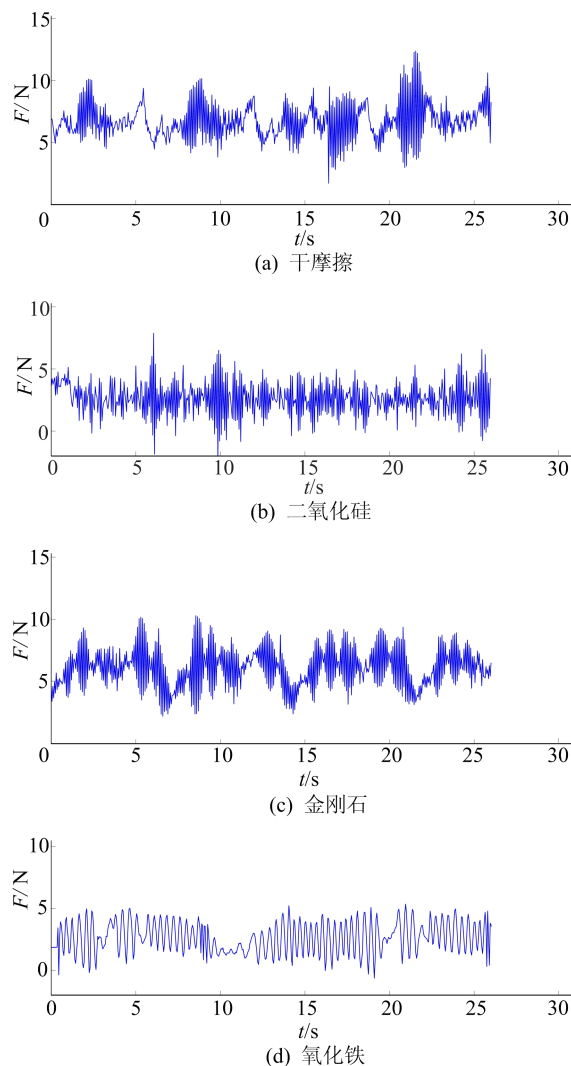


图 5 颗粒材料对摩擦力时变的影响

界面加入金刚石颗粒后,摩擦力均值-速度曲线呈现增大趋势,而摩擦力标准差-速度曲线呈现减小的趋势。与干摩擦情况相比,摩擦力均值变化不大,而摩擦力标准差在低速阶段减少较快,高速阶段相差不大。界面加入氧化铁颗粒后,摩擦力均值-速度曲线呈现略微增大趋势,而摩擦力标准差-速度曲线呈现减小趋势。同时与干摩擦情况相比,摩擦力均值减小幅度多,而摩擦力标准差在低速阶段减小幅度多,高速阶段相差不大。

综合比较 3 种颗粒,二氧化硅及氧化铁颗粒能降低滑块的摩擦力均值。以  $v=0.165$  m/s 时为例,干摩擦时摩擦力为 6.2 N,二氧化硅存在时为 2.7 N,氧化铁颗粒存在时为 4.9 N。同时,在所测速度区间,二氧化硅颗粒能有效降低滑块的摩擦力标准差。当速度分别为 0.100、0.235 m/s

时,干摩擦时标准差分别为 1.141、0.237 N,二氧化硅存在时标准差分别为 0.075、0.048 N,标准差下降幅度均超过 30%。

由图 4b 可知,氧化铁颗粒及金刚石颗粒有明显的速度特性,低速时能降低滑块的摩擦力标准差,如  $v=0.100$  m/s 时,干摩擦时标准差为 1.141 N,氧化铁及金刚石存在时分别为 0.239、0.349 N。高速时差别不大,如  $v=0.235$  m/s 时,干摩擦时标准差为 0.237 N,氧化铁及金刚石存在时分别为 0.227、0.225 N。

### 2.3 颗粒粒径对摩擦力速度关系的影响

实温条件下,上试件为铝块,下试件为橡胶传送带,传送带速度  $v$  分别为 0.100、0.125、0.165、0.200、0.235、0.265 m/s,载荷分别为 0、2、4 N,颗粒为氧化铁颗粒,粒径分别为 1、10、100  $\mu\text{m}$ ,实验时间近 3 min,每组进行 3 次实验。不同粒径对摩擦力均值-速度、摩擦力标准差-速度关系的影响如图 6 所示,载体为 2 N、 $v=0.125$  m/s 时的摩擦力时变情况如图 7 所示。不同粒径对摩擦力标准差影响如图 8 所示。

由图 6a 可知,随着颗粒粒径的增大,滑块的摩擦力均值-速度、摩擦力标准差-速度曲线的变化趋势并未改变。滑块的摩擦力均值-速度曲线呈现正相关性,滑块的摩擦力标准差-速度曲线呈现负相关性。同时,随着颗粒粒径的增大,滑块受到的平均摩擦力及滑块摩擦力的标准差都呈现增大的趋势。

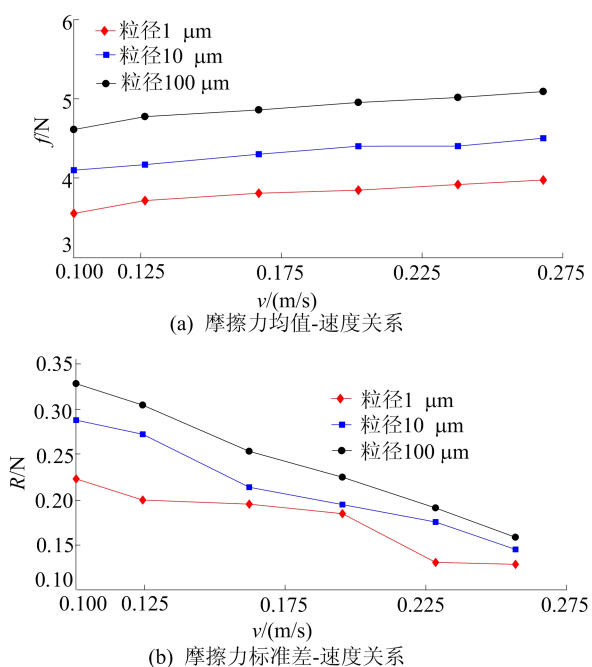


图 6 不同粒径对摩擦学特性的影响

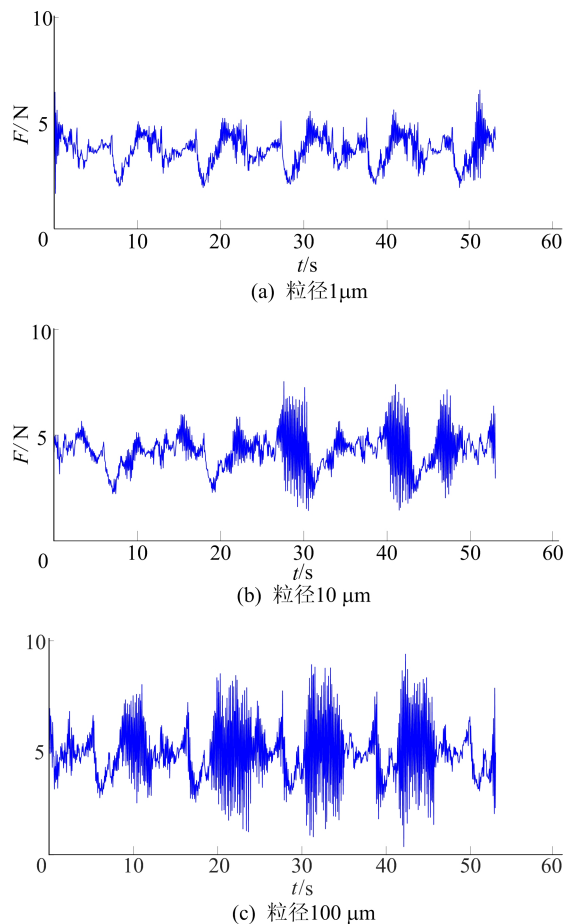


图 7 不同粒径对摩擦力时变的影响

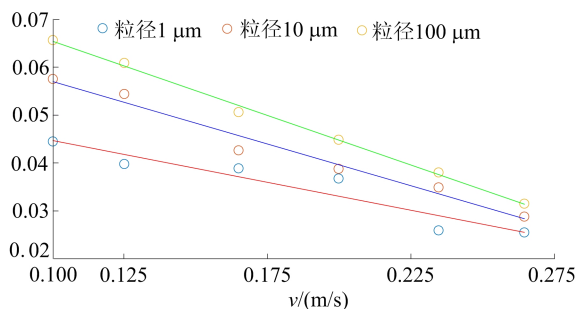


图 8 不同粒径对摩擦力标准差的影响

其原因在于,单个小粒径的颗粒体积小,在一定空间里数量多,在受限摩擦界面之间形成了更加致密、稳定的颗粒层,嵌入滑块表面的微凸体中,形成更稳定的铝-氧化铁-橡胶的三体摩擦,具有减少摩擦,降低摩擦力的波动,减小滑块的摩擦力标准差。而大粒径颗粒的体积较大,受限空间颗粒数目少,形成的颗粒层空隙多,颗粒之间的碰撞增多,颗粒非稳态增加,使得滑块的摩擦力标准差增大。

由图 8 可知,颗粒粒径的增大,速度对滑块导轨系统摩擦力标准差的影响增加,即摩擦力标准

差-速度曲线斜率变大。此外,由图 6b 可知,小粒径对摩擦力标准差-速度关系的影响不均匀,低速时,摩擦力的非线性变化剧烈,而高速时变化较为平稳。

### 3 结 论

本文搭建了弹簧滑块传送带实验机,通过下料系统将 SiO<sub>2</sub>、PVC 粉末、铁粉等多种颗粒体引入传送带铝块摩擦界面,开展受限颗粒体的单向摩擦实验,得出主要结论如下:在轻载工况下,速度的增大,会降低系统的摩擦非线性,重载时,高于一定临界速度反而会增加系统的摩擦非线性;不同硬度的颗粒引入,对滑块导轨系统的摩擦学特性有不同的影响;随着引入的颗粒粒径的增大,滑块导轨系统的摩擦力标准差将会加大。

本文研究有助于分析受限颗粒体对摩擦界面承载机制、速度适应机制的影响。基于实验、仿真等手段,构建综合考虑颗粒、表面形貌、乏油润滑的混合摩擦理论模型,微观层面研究了颗粒的理化性质、表面形态的改变对界面的动力学性质的影响,也是今后工作的一个方向。

### 【参 考 文 献】

- [1] 宋保江, 阎绍泽. 界面黏滑摩擦现象的研究进展[J]. 中国机械工程, 2017, 28(13): 1513-1522.
- [2] BILKAY O, ANLAGAN O. Computer simulation of stick-slip motion in machine tool slideways[J]. Tribology International, 2004, 37(4): 347-351.
- [3] 鄢晓宇, 王伟, 刘小君. 受限颗粒体引发混合摩擦非线性的研究现状与展望[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 148-154.
- [4] HAESSIG D A, FRIEDLAND B. On the modeling and simulation of friction [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1991, 113(3): 354-362.
- [5] 陈文平, 潘捷. 丝杠磨损对数控机床进给系统摩擦特性的影响研究[J]. 工具技术, 2020, 54(10): 55-58.
- [6] 李毅波, 曾云龙, 潘晴, 等. 考虑压力效应的液压缸摩擦模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 418-426.
- [7] 赵磊. 三轴稳定平台的滑模变结构控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [8] YANG L, WANG D G, GUO Y B. Frictional behaviors of iron based tools-casing with sand deposition[J]. Tribology International, 2018, 123: 180-190.
- [9] XU J Y, MO J L, HUANG B, et al. Reducing friction-induced vibration and noise by clearing wear debris from contact surface by blowing air and adding magnetic field[J]. Wear, 2018, 408: 238-247.
- [10] WANG W, LIU X J, LIU K. Surface observations of a powder layer during the damage process under particulate lubrication[J]. Wear, 2013, 297(1/2): 841-848.
- [11] IBRAHIM R A. Friction-induced vibration, chatter, squeal and chaos-part I: mechanics of contact and friction[J]. Applied Mechanics Reviews, 1994, 47(7): 209-226.
- [12] NIKAS G K. A state-of-the-art review on the effects of particulate contamination and related topics in machine-element contacts[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2010, 224(5): 453-479.
- [13] KOMANDURI R, LAKSHMIPATHY S, SHAW M C. The role of spherical particles as friction reducers in sliding contact[J]. Wear, 1976, 39(2): 389-392.
- [14] 王超, 孔俊超, 王伟. 考虑软三体接触的粗糙界面混合润滑模型研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 113-119.
- [15] 陈亚军, 马刘洋, 李晨, 等. 石墨粒径大小对铜基石墨复合材料摩擦学性能的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(3): 317-321.
- [16] 孙珊珊, 苏勇, 季顺迎. 颗粒滚动-滑动转换机制及摩擦系数的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 1): 110-115.
- [17] 孟凡净, 刘焜. 颗粒流润滑系统力传输行为的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(6): 645-651.
- [18] 孔俊超, 王伟, 王伟, 等. 粉末润滑界面的原位观察及润滑机制[J]. 中国机械工程, 2018, 29(8): 971-978.
- [19] 张毅, 史超, 王伟. 粉末润滑条件下铝合金拉延过程爬行现象研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 155-160.
- [20] WANG D W, MO J L, ZHU Z Y, et al. Debris trapping and space varying contact via surface texturing for enhanced noise performance[J]. Wear, 2018, 396: 86-97.
- [21] LI T Y, LU X Q, ZOU D Q. Frictional behaviors in piston ring-cylinder liner system of diesel engine with solid particles considered[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(9): 1345-1360.
- [22] ZHANG H J, LIU S H, XIAO H P. Sliding friction of shale rock on dry quartz sand particles[J]. Friction, 2019, 7(4): 307-315.
- [23] ZHU Y. The influence of iron oxides on wheel-rail contact: a literatur review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2018, 232(3): 734-743.
- [24] SANDOR B, JARAI-SZABO F, TEL T, et al. Chaos on the conveyor belt[J]. Physical Review E, 2013, 87(4): 0429207.

(责任编辑 胡亚敏)