

DOI: 10.3901/JME.2009.07.101

# 滑块运动和形位参数对颗粒流润滑特性的影响规律\*

王伟 刘小君 焦明华 刘焜  
(合肥工业大学摩擦学研究所 合肥 230009)

**摘要:** 针对机械工程中的典型摩擦学研究对象—斜面滑块摩擦副, 基于非连续介质力学的离散单元法建立非流态颗粒流润滑的模型。通过研究颗粒膜厚度、斜面倾角、运动速度三个运动和形位变量, 探讨它们对承载分布、摩擦因数等的影响。同时以颗粒和多体接触点为对象, 考察颗粒流润滑中平均接触力、体功、接触摩擦功和颗粒总动能的微观特性。研究认为颗粒流润滑承载量与滑块的倾角、速度成正比关系, 与颗粒膜厚度成反比。颗粒流润滑的压力峰出现在楔形的入口区。适度减小斜面倾角和颗粒膜厚度, 有利于减少摩擦。相对而言, 滑块速度对摩擦因数的影响不大。

**关键词:** 颗粒流 粉末 承载量 多体接触

**中图分类号:** TH117.2

## Influences of Several Slider's Parameters on Particles Flow Lubrication Characteristics

WANG Wei LIU Xiaojun JIAO Minghua LIU Kun  
(Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

**Abstract:** Aiming at the slider plane tribopairs which is a typical research object of tribology in mechanical engineering, the non-fluidized particles flow lubrication model is built on the basis of the discrete element method of non-continuum mechanics. The effects of the clearance, angle and speed of the slider on load capacity, load profile and friction coefficient are investigated. At the same time, taking particles and contact point as object, the micro-properties including average contact force, body energy, contact friction energy and particle kinetic energy of particle flow lubrication are studied. The results show that the total load capacity is directly proportional to the slider's angle and speed, and is inversely proportional to friction clearance. Appropriate decrease of slider's angle and clearance is advantageous to frictional characteristics, and the variation of slide speed has relatively small effects on friction coefficient.

**Key words:** Particle flow Powder Load capacity Multi-body contact

## 0 前言

近年来, 越来越多的学者开始研究和应用固体颗粒来解决一些传统润滑方式无法克服的极端工况润滑难题<sup>[1]</sup>。美国的 HESHMAT 等<sup>[2]</sup>将 TiO<sub>2</sub> 固体粉末颗粒用压缩空气输送至飞机汽轮引擎的阻尼器中, 用于实现高温高速下的无油润滑。印度的 REDDY 等<sup>[3]</sup>将 2 μm 的石墨粉连续的流动导入磨削

加工面, 与传统的切削液进行了对比, 结果证明粉末润滑在一些工况下实现了更好的加工性能, 同时还避免了切削液对环境的污染。日本的 KIMURA 等<sup>[4]</sup>研发了利用粉末润滑取代传统水基和油基润滑的封闭腔式压铸系统, 在工厂的应用表明: 该系统不但实现了压铸件的拔模润滑, 还提高了产品质量。

粉末材料是大量离散固体粒子的聚集, 颗粒流指的就是粉末材料在外力作用和内部应力状况变化时发生的类似于流体的运动状态<sup>[5]</sup>。如果粒子是密堆积的或比间隙流体稠密得多, 则描述流动时可以

\* 国家自然科学基金(50775060)、合肥工业大学校基金(070204F)和研究  
生创新基金资助项目。20080817 收到初稿, 20090406 收到修改稿

忽略间隙流体效应(非流态化), 颗粒材料流通常指这种狭义上的颗粒流动<sup>[6]</sup>。颗粒流润滑是将固体材料以颗粒(粉末)状态直接导入摩擦副, 使摩擦间隙中处于充满固体颗粒状态, 利用微小颗粒的摩擦、粘附、变形、碰撞、挤压和滑滚等微观运动, 减少作相对运动两表面的接触, 保护表面免于损伤。几乎所有种类的固体粉末都可以根据实际情况选择作为颗粒介质, 传统使用较软的固体润滑剂干粉, 通过与表面的粘附、承载变形和低的切应力实现润滑<sup>[1-4]</sup>。但是与固体润滑材料不同的高剪切强度、高硬度的固体粉末材料也可用于颗粒流润滑, 通过硬质、不粘附的微球形颗粒的碰撞、弹性变形、滑滚实现润滑<sup>[7-8]</sup>。

由于颗粒物质和颗粒流的复杂性<sup>[9]</sup>, 人们对颗粒流介质润滑机理的掌握还没有获得质的突破, 还不能准确地预测和控制它的摩擦学特性, 理论研究的滞后也阻碍了这项技术在工程上的推广和使用。当一定量的固体颗粒存在于摩擦间隙中时, 它的承载机制、速度适应机制、本构方程与传统的流体润滑理论和固体摩擦理论既相似又不同<sup>[10]</sup>。那么, 在颗粒流润滑机制下, 如何去确定合适的工况, 如何进行摩擦副的机械设计? 首先就要探讨摩擦副的运动和位置特性, 如滑块的运动速度、颗粒膜厚度、斜面倾角等, 对摩擦副的颗粒流润滑特性的影响。

因为对摩擦动态过程中颗粒流润滑介质润滑特性的试验非常困难<sup>[11]</sup>, HESHMAT 等<sup>[12-13]</sup>利用连续介质模型对颗粒流润滑的机理和颗粒微观行为进行了一定的探讨, 推动了颗粒流润滑理论的发展。但这些理论忽略了颗粒个体性质, 过分依赖于高度简化的、规定性质的本构方程。事实上颗粒体本身是散体, 它不连续、种类多、各向异性, 与连续体力学理论的均匀、连续等假定冲突, 导致理论与实际的偏离。所以, 进一步的研究必须突破连续介质力学的束缚, 重点探讨非流态化的颗粒流工况, 从而实现对颗粒流润滑机理的全面解释和仿真。本文利用基于非连续介质力学的离散单元法, 用离散的球体单元仿真粉末颗粒, 以充满非流态粉末颗粒的滑块摩擦单元为对象, 进行了仿真研究。针对滑块的运动速度、颗粒膜厚度、斜面倾角等因素的摩擦学影响进行了分析。

## 1 颗粒流润滑的理论模型

### 1.1 物理模型

楔形滑块是摩擦学研究中最典型的摩擦副, 通过对它的分析不仅有助于了解润滑的基本特性, 而

且也是轴承设计的基础。本文的研究对象如图 1 所示, 摩擦副下表面水平且固定不动, 上表面以速度  $U$  水平向右运动, 定义水平方向为  $x$  轴, 从底面开始的向上的颗粒膜厚度方向为  $y$  轴。颗粒膜入口高度为  $\delta_1$ , 出口高度为  $\delta_0$ , 斜面与水平线夹角为  $\alpha$ , 滑块总宽度为  $b$ ,  $L$  代表滑块宽度方向上的位置, 用于表达在滑块不同位置处的承载和摩擦阻力。假设滑块为无限长, 从而可以忽略端泄。摩擦间隙中的球体代表粉末颗粒, 在计算的时候是离散单元法的一个计算单元。球和球之间有多体的接触和摩擦, 球和摩擦副表面间也存在弹性接触和摩擦。当上表面运动时, 颗粒流介质的球-球、球-墙之间发生接触、挤压、摩擦, 从而对上表面产生法向和切向作用力, 分别代表颗粒膜的承载和摩擦阻力。图 1 中两种颜色的颗粒体在物理特性上, 没有任何区别。在仿真的开始, 它们的交界线是垂直于水平线的一条直线, 用来考察颗粒的微观运动, 图 1 是仿真过程中的一张截图。

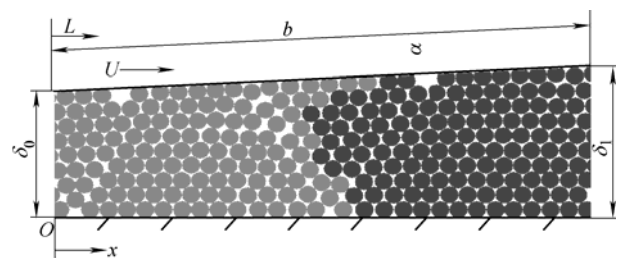


图 1 颗粒流润滑楔形滑块摩擦副

### 1.2 颗粒流理论

颗粒流不满足连续性的假设, 使得建立在传统的连续介质力学基础上的有限元等数值方法难以直接使用。20 世纪 70 年代初由 CUNDALL 等<sup>[14]</sup>首先提出的离散元法在颗粒散体研究方面显示出巨大的生命力。基本思想是将颗粒视为非连续球体元素的集合, 初始时各个颗粒在空间有其固定的位置, 处于力平衡状态。当所考虑范围内的作用力系或边界条件发生变化时, 某些颗粒在重力及外力的作用下产生一定的加速度和相应的位移, 使得颗粒的空间状态发生变化, 位移后的颗粒与其他颗粒接触, 根据接触模型可以计算力—位移关系, 产生新的作用力系状态, 使得更多的颗粒由于作用力的传递而产生新的运动和位移。离散元方法允许单元间的相对运动, 不一定要满足位移连续和变形协调条件, 计算速度快, 所需存储空间小, 尤其适合求解大位移和非线性的问题<sup>[14-15]</sup>。

力—位移定律把相互接触的颗粒之间或者颗粒和壁面之间的力与位移联系起来, 在接触处起作用。根据接触点的位置来描述, 可把接触力  $F_i$  分解

为沿法线的法向矢量  $\mathbf{F}_i^n$  和沿切线的切向矢量  $\mathbf{F}_i^s$ , 即

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i^n + \mathbf{F}_i^s \quad (1)$$

式中  $i=1, 2, 3$  分别代表三维空间的三个坐标轴。

再通过接触处的法向刚度和切向刚度将接触力分量与法向位移和切向位移联系起来。

法向力分量可按式(2)计算

$$\mathbf{F}_i^n = k_n \mathbf{U}_i^n \quad (2)$$

式中  $k_n$  为接触点法向刚度,  $\mathbf{U}_i^n$  为法向接触位移矢量。

切向接触力用增量的形式计算, 当接触形成时, 总的切向接触力初始化为 0, 以后的相对切矢量位移引起的弹性切向接触力累加到现值上

$$\Delta \mathbf{F}_i^s = -k_s \Delta \mathbf{U}_i^s \quad (3)$$

式中,  $\Delta \mathbf{U}_i^s$  为接触位移增量,  $\Delta \mathbf{F}_i^s$  为弹性接触力切向增量,  $k_s$  为接触点切向刚度。通过叠加求出切向接触力分量为

$$\mathbf{F}_i^s \leftarrow \mathbf{F}_i^s + \Delta \mathbf{F}_i^s \leq \mu \mathbf{F}_i^n \quad (4)$$

式中  $\mu$  是摩擦因数。

法向和切向接触力的计算方法根据不同的接触模型而不同, 本文采用 HERZ-MINDLIN 接触模型<sup>[16-17]</sup>。获取所有接触的法向和切向接触力后, 可以获得合力和合力矩。

如果作用于颗粒上的合力与合力矩不等于零, 则不平衡力和不平衡力矩使得颗粒按照牛顿第二定律运动。运动方程由合力与线性运动的关系和合力矩与旋转运动的关系表示, 单个颗粒的运动是由作用于其上的合力和合力矩决定, 可以用颗粒内一点的线速度与颗粒的角速度来描述。所以, 首先在时步  $\Delta t$ , 建立球颗粒的平动和转动的运动方程

$$\begin{cases} \mathbf{F}_i = m(\Delta \dot{\mathbf{x}}_i / \Delta t - \mathbf{g}_i) \\ \mathbf{M}_i = I \Delta \dot{\boldsymbol{\omega}}_i / \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

求解运动方程, 可得平动速度和转动角速度, 进而得该球的新位置

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + \dot{\mathbf{x}}_i \Delta t \\ \boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}_i + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

式中  $m$  为颗粒总质量,  $\dot{\mathbf{x}}_i$  和  $\Delta \dot{\mathbf{x}}_i$  为颗粒平动速度和增量,  $\mathbf{g}_i$  为颗粒体力加速度矢量(如重力),  $\mathbf{M}_i$  为合力矩,  $I$  为转动惯量,  $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$  和  $\Delta \dot{\boldsymbol{\omega}}_i$  为角速度和增量。

由各球的新位置坐标可决定相邻颗粒是否接触或原接触点是否脱离。相互接触的球会产生假性重叠(弹塑性变形), 再由力—位移关系根据接触模

型求出所有接触的接触力, 获得合力和合力矩, 返回运动方程迭代。

HERZ-MINDLIN 接触模型是根据 MINDLIN & DERESIEWICH<sup>[17]</sup>和 CUNDALL<sup>[16]</sup>理论近似得出的一种非线性接触模型, 由两个接触球体的切变模量  $G$  和泊松比  $\nu$  来定义。对于颗粒—颗粒相互接触, 其弹性常数为平均值, 对于颗粒—墙体接触, 假定墙为刚性, 所以直接取球的弹性常数。

接触法向刚度为

$$k_n = \left[ \frac{2\tilde{G}\sqrt{2\tilde{R}}}{3(1-\tilde{\nu})} \right] \sqrt{U_i^n} \quad (7)$$

接触切向刚度为

$$k_s = \left[ \frac{2(\tilde{G}^2 3(1-\tilde{\nu})\tilde{R})^{1/3}}{2-\tilde{\nu}} \right] |\mathbf{F}_i^n|^{1/3} \quad (8)$$

式中  $\tilde{G}$  为等效弹性切变模量,  $\tilde{\nu}$  为等效泊松比,  $\tilde{R}$  为等效半径。

### 1.3 参数说明

当滑块水平运动时, 颗粒膜受到剪切和挤压作用, 对滑块产生反作用。垂直向上的作用力, 体现了膜的承载能力, 定义为颗粒流润滑膜的承载量; 与滑块运动方向相反的水平阻力, 体现了颗粒膜的抗剪阻力, 定义为滑块的摩擦阻力。摩擦阻力与承载量之间的比值是颗粒流润滑时作用在滑块摩擦面上的摩擦因数。平均接触力是所有接触点接触力的平均值。

体力表示所有颗粒体的重力、外力和力矩等体力的累积做功。在每一时步中

$$W_b = \sum_{N_p} ((m\mathbf{g}_i + \mathbf{F}_i) \Delta \mathbf{U}_i + \mathbf{M} \Delta \theta) \quad (9)$$

式中  $N_p$  为颗粒数目,  $\Delta \mathbf{U}_i$  为计算位移增量,  $\mathbf{M}$  为外部力矩矢量,  $\Delta \theta$  为计算转角增量。  $\mathbf{F}_i$ 、 $\mathbf{M}$  在每个计算时步中数值不变。  $W_b$  可能为正也可能为负, 一般认为体力在球上做的功为正。

接触摩擦功是所有接触点, 包括颗粒和颗粒之间、颗粒和摩擦副表面之间, 互相摩擦所消耗的功。在每一时步, 接触摩擦功

$$W_f = \sum_{N_c} (\mathbf{F}_i^s \Delta \mathbf{U}_i^s) \quad (10)$$

式中  $N_c$  为接触的数目。

颗粒总动能是所有颗粒动能的总和, 既包括平动也包括转动。在每一时步, 颗粒总动能

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{N_p} (m\dot{\mathbf{x}}^2 + m\dot{\mathbf{y}}^2 + I\dot{\boldsymbol{\omega}}) \quad (11)$$

式中  $\dot{\mathbf{x}}$ 、 $\dot{\mathbf{y}}$  代表颗粒在两个坐标轴方向的速度。

## 2 理论模型的数值计算

离散元法的求解过程使用显式解法, 显式解法用于动力问题的求解或动态松弛法的静力求解。动态松弛法是把非线性静力学问题化为动力学问题求解的一种数值方法, 其实质是在逐步积分过程中加入了临界阻尼。通过质量阻尼和刚度阻尼来吸收系统的动能, 收敛于静态值。显式算法无需建立像有限元法那样的大型刚度矩阵, 只需将单元的运动分别求出, 计算比较简单, 数据量较少, 并且允许单元发生很大的平移和转动, 可以用来求解一些含有复杂物理力学模型的非线性问题。

在计算的开始, 先在下表面通过重力堆积产生厚  $200\ \mu\text{m}$ 、长  $10\ \text{mm}$  的粉末膜。与传统固体润滑膜不同的是, 这层颗粒膜与表面之间以及颗粒与颗粒之间没有任何的粘结方式, 处于完全的松散堆积状态。然后滑块以指定的高度和速度运动(图 1), 此时滑块上表面将运动和力传递至颗粒膜, 改变了颗粒组合体的边界条件。该过程中颗粒的动态行为通过离散单元法计算, 记录平均接触力、摩擦力、载荷、体功、接触摩擦功、颗粒总动能等的变化。主要的数值计算流程见图 2, 计算过程中的参数见表

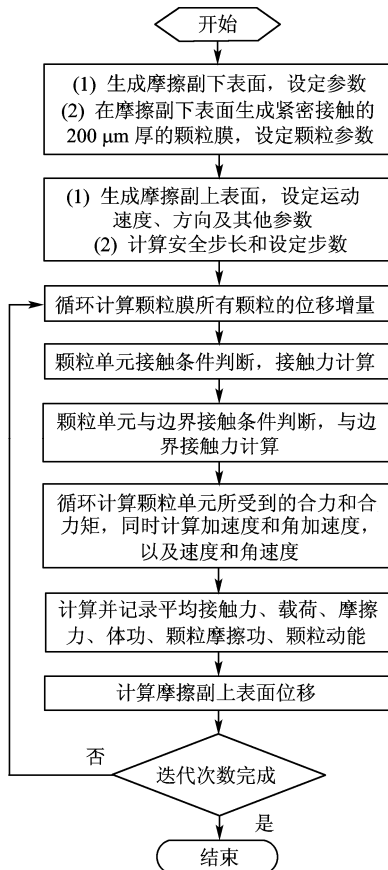


图2 数值计算流程图

1, 其中颗粒特性是基于典型的中间参数选择的。算例 1~10 分别使用了不同上表面入口高度、运动速度、倾角, 参数值的缺省值分别为  $200\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \text{m/s}$ 、 $4.5^\circ$ , 具体见表 2。为了讨论中对比的方便, 算例 2、5、9 是相同的。

表1 数值计算中使用的常量参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
颗粒半径 $R/\mu\text{m}$	10	颗粒摩擦因数 $\mu_1$	0.1
颗粒数目 $N_p$	5 200	表面摩擦因数 $\mu_2$	0.2
颗粒密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	4 500	滑块总长度 $B/\text{mm}$	1.5
颗粒切变模量 $G/\text{MPa}$	30	计算时步长度 $\Delta t/\text{ns}$	50
颗粒泊松比 $\nu$	0.5		

表2 不同算例中的变量值

算例	入口高度 $\delta_1/\mu\text{m}$	运动速度 $U/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	倾角 $\alpha/(\text{^\circ})$
1	200	10	3.0
2	200	10	4.5
3	200	10	6.0
4	220	10	4.5
5	200	10	4.5
6	180	10	4.5
7	160	10	4.5
8	200	5	4.5
9	200	10	4.5
10	200	20	4.5

## 3 计算结果和讨论

### 3.1 总承载和载荷分布

运动和形位参数对总承载的影响见图 3, 其中总承载与斜块倾角、速度成正比关系, 与入口高度成反比关系。这个趋势与斜面滑块流体动压润滑的楔形效应、动压效应、挤压效应相似, 说明了颗粒流所具有类流体特性。可以认为, 如果颗粒流保持良好的流动性, 那么在润滑中会产生类流体动压润滑的效果, 这与 HESHMAT 的试验结论<sup>[12]</sup>相同。从沿滑块宽度方向的载荷分布图(图 4)可见, 颗粒流润滑最高的压力峰出现在靠近入口的区域, 不同算例的具体位置略有不同, 出口区的承载较小。这是因为颗粒流与摩擦副表面的湿润性、黏附性、颗粒流自身的流动性远远不如液体润滑剂, 在由楔形入

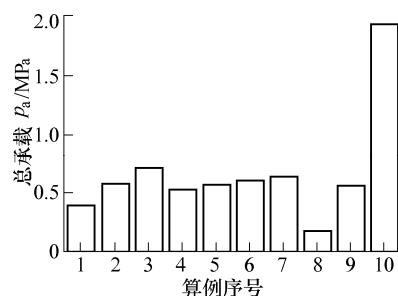


图3 不同算例中总承载的变化

口向出口挤压流动的过程中，出口的颗粒流量比流体润滑中液体流量少，入口区会有较多的堆积，体现为入口区承载的增加。可见，颗粒流的类流体性质使得总承载的表现与流体润滑相似，但载荷分布又体现出颗粒散体的类固体特性。提高承载能力需要提高颗粒与摩擦副表面的黏附性和颗粒的流动性。

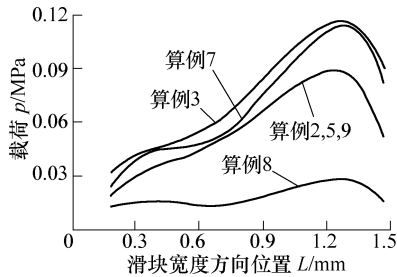


图4 沿滑块宽度方向的载荷分布

### 3.2 摩擦阻力和摩擦因数

总摩擦阻力分布见图5，将纵坐标定义为滑块表面的位置，使摩擦阻力的位置和方向与图1中实际的物理模型位置和方向一致，有利于对比分析。从图5可见，最大的摩擦阻力来自于颗粒流的入口附近，出口区的摩擦力相对较低。摩擦因数是滑块总摩擦阻力与总承载的比值，相关参数对摩擦因数的影响见图6。随着斜块倾角、速度、入口高度的变化，摩擦因数的变化趋势相当多样。摩擦因数与斜块倾角的关系仍然是正比关系，相对速度和入口高度的影响而言，斜块倾角对摩擦因数影响最显著。原因是倾角的增大使颗粒在入口和楔形中的堆积很快，从出口流出的速度却较慢，形成比较多的堆积。此时导致摩擦阻力的增加大大超过承载的增加，使摩擦因数上升较快。说明斜块倾角的增加虽然可以增加承载，但是同样会带来摩擦阻力的增加，摩擦因数比较高，所以机械设计中，该值宜小不宜大。滑块入口高度减小的作用恰恰相反，所导致的摩擦阻力的增加小于承载的增加，从而摩擦因数有减小的趋势，可以起到良好的减摩作用。但要注意过小的滑块高度会增加摩擦副接触的可能。相对而言，速度变化对摩擦因数的影响较小。

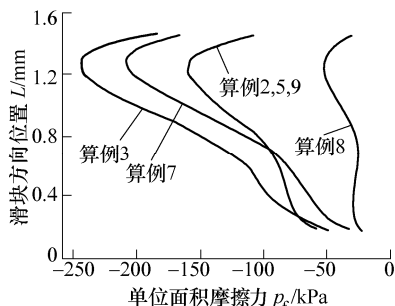


图5 沿滑块宽度方向单位面积摩擦力分布

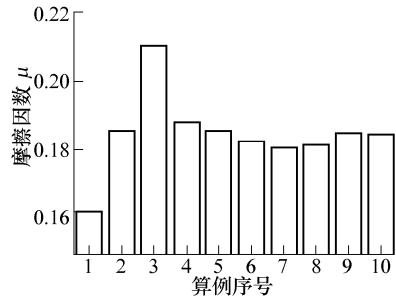


图6 不同算例中摩擦因数的变化

### 3.3 颗粒体微观力和能量特性

平均接触力、体功、接触摩擦功和颗粒总动能四个参数，是以接触点或者单一颗粒为对象，反映力、接触、摩擦和功耗特性，体现了颗粒流润滑中的微观特性。在颗粒流润滑中，颗粒和颗粒之间、颗粒和摩擦副表面之间存在许多接触点，这些点的接触力体现了颗粒体受力、挤压、变形的程度。图7对比了相关参数对平均接触力的影响，该值的变化趋势与总承载相似，因为承载量在微观上就是由许多的接触点所承担并传递的，符合实际情况。体功受斜面倾角和滑块高度的影响明显大于受滑块速度的影响(图8)，当斜面倾角加大、或滑块高度降低时，颗粒体的重力、外力和力矩等体力的累积做功会显著增加，体现出颗粒体运动的加剧。图9是相关参数对接触摩擦功的影响，所有接触点所消耗的摩擦功随速度增加而增加，与总承载和摩擦阻力的趋势类似。接触摩擦功随滑块高度的降低而减少，与摩擦因数相同，再次验证了滑块高度降低的减摩

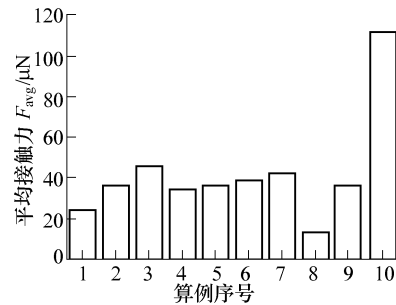


图7 相关参数对平均接触力的影响

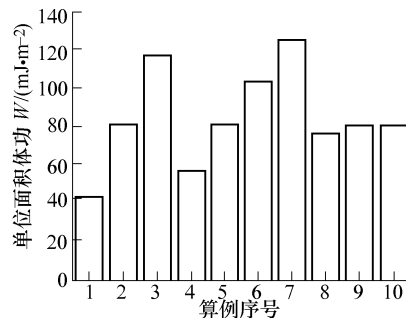


图8 相关参数对体功的影响

特性。斜面倾角最大时, 接触摩擦功却并非最大, 说明斜面倾角  $6^\circ$  时的高摩擦因数(图 6), 并非完全由于斜面和颗粒体的摩擦产生, 应该有很大一部分来源于颗粒堆积和挤压导致的滑块阻力。颗粒总动能体现了颗粒运动的活跃程度, 由图 10 可见, 在载荷、平均接触力、摩擦阻力较大时, 颗粒的运动更加剧烈。

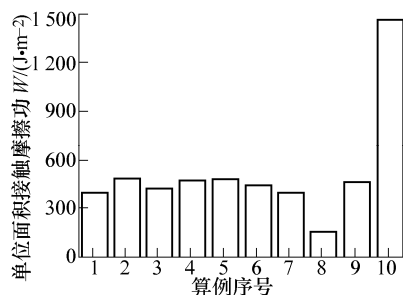


图 9 相关参数对接触摩擦功的影响

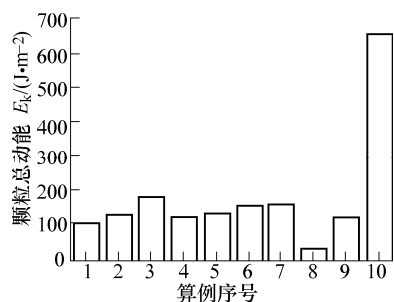


图 10 相关参数对颗粒总动能的影响

## 4 结论

(1) 颗粒流润滑的承载量与滑块倾角、速度成正比关系, 与滑块高度成反比, 体现了颗粒流润滑所具有类流体特性。与流体动压润滑不同的是, 颗粒流润滑的压力峰出现在楔形的入口区。

(2) 在不导致摩擦副接触和保证合适承载能力的前提下, 适度较小斜面倾角、降低滑块高度, 有利于减少摩擦。相对而言, 滑块速度对摩擦因数的影响不大。

(3) 颗粒体微观运动的活跃度和受力情况, 与滑块高度、斜面倾角、运动速度有密切的关系, 是从微观分析颗粒流润滑机理的有力工具。

(4) 颗粒体自身的物理特性, 如粒度、粒度分布、硬度、密度等, 也会对颗粒流润滑产生极大的影响, 有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] WORNIOH E Y A, JASTI V K, HIGGS C F. A review of dry particulate lubrication: Powder and granular materials[J]. Journal of Tribology, 2007, 129: 438-449.
- [2] HESHMAT H, WALTON J F. High-temperature powder-lubricated dampers for gas-turbine engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(2): 449-456.
- [3] REDDY N S K, RAO P V. Performance improvement of end milling using graphite as a solid lubricant[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2005, 20(4): 673-686.
- [4] KIMURA R, YOSHIDA M, SASAKI G, et al. Characterization of heat insulating and lubricating ability of powder lubricants for clean and high quality die casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130: 289-293.
- [5] JAEGER H M, NAGEL S R. Physics of the granular state[J]. Science, 1992, 255(5 051): 1 523-1 531.
- [6] CAMPBELL C S. Rapid granular flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1990, 22(1): 57-90.
- [7] KABIR M A, LOVELL M R, HIGGS C F. Utilizing the explicit finite element method for studying granular flows[J]. Tribology Letters, 2008, 29(2): 85-94.
- [8] ELKHOLY K N, KHONSARI M M. Experimental investigation on the stick-slip phenomenon in granular collision lubrication[J]. Journal of Tribology, 2008, 130(2): 1-7.
- [9] 鲍德松, 张训生. 颗粒物质与颗粒流[J]. 浙江大学学报, 2003, 30(5): 514-517.  
BAO Desong, ZHANG Xunsheng. Granular matter and granular flow[J]. Journal of Zhejiang University, 2003, 30(5): 514-517.
- [10] IORDANOFF I, BERTHIER Y, DESCARTES S, et al. A review of recent approaches for modeling solid third bodies[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2002, 124(4): 725-735.
- [11] FILLOT N, IORDANOFF I, BERTHIER Y. Modelling third body flows with a discrete element method-a tool for understanding wear with adhesive particles[J]. Tribology International, 2007, 40(6): 973-981.
- [12] HESHMAT H. The quasi-hydrodynamic mechanism of powder lubrication 2: Lubricant film pressure profile[J]. Lubrication Engineering, 1992, 48(5): 373-383.
- [13] JANG J Y, KHONSARI M M. On the role of enduring contact in powder lubrication[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2006, 128(1): 168-175.
- [14] CUNDALL P A, STRACK O D L. Discrete numerical-model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [15] 徐泳, 孙其诚. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展,

2003, 33(2): 251-259.

XU Yong, SUN Qicheng. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(2): 251-259.

- [16] CUNDALL P A. Formulation of a 3-dimensional distinct element model 1: A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, 25(3): 107-116.

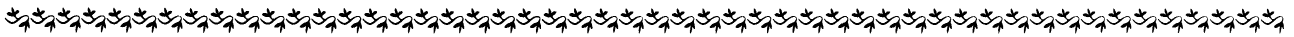
- [17] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces[J]. J. Appl. Mech., 1953, 20(3): 327-344.

作者简介: 王伟, 男, 1976年出生, 博士研究生。主要研究方向为摩擦学和表面工程。

E-mail: wangwe@gmail.com

刘焜, 男, 1963年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为摩擦学和表面工程。

E-mail: liukun@mail.hf.ah.cn



## 太原科技大学简介

太原科技大学(原太原重型机械学院)位于中国历史文化名城——山西省省会太原市, 是一所具有鲜明办学特色和光荣办学传统的多科性大学, 是我国重大技术装备领域重要的人才培养和科学研究基地。

目前, 学校设有机电工程学院、材料科学与工程学院、电子信息工程学院、计算机科学与技术学院、应用科学学院、经济管理学院、化学与生物工程学院、成人教育(职业技术)学院 8 个二级学院, 人文社科系、法学系、外语系、艺术系、体育系 5 个直属系。为满足高等教育大众化的要求, 经教育部批准创办了独立学院性质的太原科技大学华科学院。学校现设有 42 个本科专业。机械设计及理论、材料加工工程 2 个二级学科具有博士学位授予权, 5 个一级学科具有硕士学位授予权, 32 个二级学科具有硕士学位授予权, 在 5 个工程领域具有工程硕士专业学位授权资格。拥有机械设计及理论学科和材料加工工程学科 2 个省重点学科, 5 个省重点建设学科, 1 个省重点扶持学科。拥有 1 个教育部工程研究中心、1 个省重点实验室, 7 个省级工程技术研究中心。现有教师 1 099 人, 其中, 教授 122 人, 副教授 238 人。

秉承“负重奋进, 笃行求实”的办学理念, 太原科技大学十分注重人才培养的质量, 五十多年来为国家培养了近 4 万名各类人才。目前, 学校已形成学士—硕士—博士完整的高水平人才培养体系, 拥有各类在校学生 20 492 人, 其中研究生 985 人, 本科生 8 846 人, 专科生 4 914 人, 并有成人教育学生 5 747 人。学校现总占地面积 77.2 万 m<sup>2</sup>, 建筑面积 46.9 万 m<sup>2</sup>, 教学仪器设备总值为 11 320 万元, 图书馆纸质藏书 116.9 万余册, 电子资源库 20 余种, 各类电子图书总计 28.6 万册。

太原科技大学科研工作坚持“立足优势, 结合需求, 注重应用, 强化转化”的原则, 围绕重大技术装备设计、制造的关键技术, 积极开展科学研究和技术开发, 科研数量和质量不断上升。近年来承担国家和省部级科研项目、大型企业项目近 500 项, 荣获国家、省部级科技奖 41 项, 其中国家科技进步二等奖和发明二等奖各一项。发表学术论文近 4 000 篇, 其中被 SCI、EI 等收录 421 篇, 出版学术专著和教材 182 部。学校非常重视产学研和科技成果转化工作, 2000 年, 学校与中国二重集团、太重集团、柳工集团、徐工集团等全国 40 多家企事业单位和政府经贸管理部门共同成立了“太原科技大学产学研董事会”, 大大增强了服务地方经济和行业技术发展的能力。