

颗粒流润滑的现状和展望

王 伟, 刘 焜

(合肥工业大学 摩擦学研究所, 安徽 合肥 230009)

摘要: 颗粒流润滑的思路是将固体材料以颗粒(粉末)状态直接导入摩擦副,使摩擦间隙充满固体颗粒,利用微小颗粒的摩擦、变形、碰撞、挤压和滑滚等微观运动,减少作相对运动两表面微凸体的直接接触,从而达到减少摩擦和保护表面的目的。总结了颗粒流润滑在航天磁悬浮备用轴承、径向轴承、制动器、磨削加工、压铸加工等工程领域中的研究和应用现状。分析和对比了已有的颗粒流润滑理论如类流体润滑理论、碰撞动理学润滑理论、离散单元和元胞自动机理论,指出摩擦间隙中颗粒流行为和颗粒接触模型是颗粒流润滑理论的关键问题。最后,从多尺度特性、非连续特性、环保等角度对颗粒流润滑在未来的进一步发展进行了展望。

关键词: 颗粒流; 粉末; 润滑; 摩擦副; 非连续

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2008)06-0567-09

目前固体润滑剂已在许多机械产品中应用^[1-3],有效地实现了特殊、严酷工况条件下的润滑,为航天航空、兵器、船舶及核技术领域所必不可少的技术,已先后发展了多种材料和润滑应用。但是,自润滑复合材料的摩擦系数不够低、机械性能不够高、无冷却作用;固液二相润滑受液相的制约,适用的温度仍然局限于 $-60 \sim +350$,且固相的团聚与沉积往往还带来负作用;而固体润滑膜的寿命又较短,膜破坏后无法修复和重建。所以,固体润滑领域仍然有许多工作有待开展。

近年来,直接将固体润滑剂干粉或者其它种类的固体颗粒持续不断地导入摩擦副,使摩擦间隙中充满固体颗粒第三体,进而实现润滑的方式越来越引起人们的重视^[4-6]。

1 颗粒流润滑界定

颗粒材料是大量离散固体粒子的聚集,颗粒流是指颗粒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^[7-8]。一般地讲,颗粒聚集体的间隙充满气体或液体物质,因此,严格而言颗粒流是多相流。但是,如果粒子为密堆积或者比间隙流体稠密得多,则描述流动时可以忽略间隙流体效应(非流态化),颗粒材料流通常指这种狭义上说的颗粒流动^[7]。当摩擦间隙中存在大量的颗粒态固体

物质作为润滑介质作用时,借鉴颗粒学中的颗粒流概念称其为颗粒流润滑可以较好地体现其润滑机理的内涵。

颗粒流润滑的思路是将固体材料以颗粒(粉末)状态直接导入摩擦副,使摩擦间隙充满固体颗粒,利用微小颗粒的摩擦、变形、碰撞、挤压和滑滚等微观运动,减少作相对运动两表面微凸体的直接接触,从而达到减少摩擦和保护表面的目的。几乎所有种类的固体颗粒都可以根据实际情况选择作为颗粒流润滑介质。传统方法一般使用较软的固体润滑剂干粉,通过粉末与表面的粘附,或颗粒的变形承载和低剪切应力实现润滑^[9-12]。但是与传统固体润滑材料不同的高剪切强度、高硬度的固体颗粒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^[13-16]。当然使用高硬度颗粒的前提是它产生的磨粒磨损远远小于不使用时摩擦副可能产生的磨损。它与固体润滑剂干粉润滑在颗粒材料物性、润滑机理、摩擦副机械设计方法上有较大不同。

颗粒流润滑具有自身的特点,相对而言,它的优点在于:首先,它具有传统固体润滑低摩擦、宽温度范围、无油、耐特种环境等特点;其次,干颗粒导入时的载体空气或特种气氛可以用来实现气体对流散热;第三,因为颗粒的可补充性,可能实现自补充和

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775060);合肥工业大学校基金(070204F)和研究生创新基金资助项目。

收稿日期:2007-11-19,修回日期:2008-08-08 联系人刘焜, e-mail: liukun@mail.hf.ah.cn

作者简介:刘焜,男,1963年生,博士,教授,博士生导师,目前主要从事摩擦学和表面工程研究。

表面修复,形成类似流体润滑的长寿命的颗粒流润滑;最后,利用润滑中颗粒相种类或成分的调整,可以适应润滑状态的改变,也可能实现磨损表面的修复和再生。颗粒流润滑的主要缺点在于:首先,有时需要粉、气输送装置,增加了系统的复杂度;其次,在开放式系统中,需要控制微小颗粒的弥漫污染问题;第三,必要时需要采取特殊措施增加颗粒的导入性。

总体而言,颗粒流润滑有可能实现低摩擦系数、宽温度范围、有冷却、长寿命、润滑膜可修复的有效固体润滑。对它的研究可以拓展固体材料在润滑领域的应用,为润滑方法提供一种新选择。

2 工程应用探索

锁孔生了锈,将铅笔芯的粉末灌入锁孔里作为润滑剂,试开几次,就能开关自如。这是生活中经典的粉末润滑实例。但在工程中粉末润滑的应用研究还刚刚起步,一些学者在高性能发动机、铸造加工、切削加工等领域开展了工程应用探索。

美国高性能汽轮引擎项目(HPTET)要求涡轮发动机润滑部件工作在 600 ℃以上,他们资助 Heshmat开展了应用颗粒流润滑的试验探索。在航空发动机上,备用轴承在磁悬浮轴承发生故障时要能支承高速旋转的转子,而且需要工作 30 min 以上。Heshmat^[17]利用 MoS_2 压制的棒与轴摩擦形成的转移膜润滑,应用于 DN 值[主轴轴承的平均直径(mm)与主轴的极限转速(r/min)的乘积]为 300 万、载荷为 445 N 的磁悬浮轴承的辅助轴承上,测得摩擦系数为 0.3,并推论 MoS_2 粉末膜具有类似流体动压润滑的剪切和承载特性。为了验证涡轮发动机粉末润滑轴承的可行性, Heshmat 和 Brewe 使用 MoS_2 ^[18] 和 WS_2 ^[19] 粉末在三瓦径向轴承上进行了喷粉润滑试验,结果表明:随着载荷和转速的增加,摩擦系数和摩擦转矩保持在一个稳定的值;特定工况下的摩擦副可以达到热平衡;测试 18 h 后,摩擦副表面未见明显的摩擦损伤。因为 MoS_2 和 WS_2 颗粒特性的不同,两项研究中摩擦系数有轻微差别。为验证在涡轮发动机的转子轴承系统制动器中粉末润滑的可行性, Heshmat 还开展了温度 800 ℃和速度 10 000 r/min 的基于试验台架的制动器喷粉润滑试验。试验证明粉末的介入产生了两个良好的效应:磨损大幅降低,制动器的寿命显著延长;摩擦间隙中的粉末改善了能量耗散机制^[3]。

针对传统的切削液大量使用造成的污染问题,印度的 Reddy^[10,20] 和 Gopal^[21] 分别将粒径为 2 μm

和 1 μm 的石墨粉连续导入磨削加工面,并与传统的切削液进行了对比,结果证明粉末润滑在磨削 AISI 1045 钢和 SiC 陶瓷的过程中,表现出更好的加工性能,减少了摩擦,改善了切削液对环境的污染,提高了工件的表面质量,同时更加经济和可靠。

日本的 Kimura^[22-23] 等研发了一套利用粉气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:除了实现润滑的功能外,固体粉末的无挥发性和绝热性很好地改善了工作环境并减少了铸造中的局部固化。他们使用的颗粒包括滑石、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和聚乙烯腊剂。Toshiba 压铸设备公司应用类似的系统与传统油雾润滑的对比说明,该系统提高了生产率,改善了工作环境。Hanano^[24-25] 实现了压铸机套筒的粉末润滑以及相应的粉末输送系统,并申请了专利。加拿大的 Pinheiro^[26-27] 也研究了粉末润滑对铸造钢坯的热效应和表面质量的影响,并与油润滑进行了对比,结果表明粉末润滑使模具的热传导降低了 50%。Johnston 就铸造干粉润滑剂的配方申请了专利,他的配方是:48%醋酸钠、13%醋酸铅、21%油酸钠、12%石墨粉、6%氯化钠^[28]。

为了克服绝热内燃机的高温润滑难题和水煤浆内燃机的高磨损率问题, Heshmat^[29-30] 利用多组分的固体润滑剂开展了粉末润滑试验,对粉末组分、活塞环截面设计、活塞环和缸套的材料等都开展了对比研究,提出了一些内燃机活塞环缸套粉末颗粒润滑的摩擦学设计准则,并申请了专利^[31]。前苏联的研究者为了寻求长寿命的特种条件下的润滑,探索将固体润滑剂粉末(70%~95%)与磁粉(5%~30%)混合润滑齿轮箱和轴承,颗粒直径为 2~5 μm 。他们观察到摩擦副表面形成了固体润滑膜,在运行 550 h 后也只有轻微的磨损^[32-35]。

这些实践证明,在关键设备中将固体润滑材料以干颗粒状态直接导入摩擦副,使摩擦间隙中处于固体颗粒流状态,利用颗粒流润滑实现低摩擦系数、宽温度范围、有冷却、长寿命、可补充的固体润滑或者固气两相润滑,是一种有潜力的固体润滑方式。

3 理论研究和仿真

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^[5]。目前,由于颗粒物质和颗粒流的复杂性^[36],颗粒流润滑研究还处于起步阶段,人们对颗粒流润滑机理的掌握还没有获得质的突破,还不能准确的预测和控制它的

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。

3.1 摩擦间隙中颗粒流行为和颗粒接触模型

当颗粒以某种方式从外部导入摩擦副,它将在摩擦间隙中承载,并适应第一体的速度差异,起到隔离摩擦副、降低磨损和摩擦的作用。边缘泄漏的颗粒和从摩擦间隙出口导出的颗粒可以再利用,形成颗粒流的循环使用^[5]。摩擦间隙中的颗粒流在摩擦间隙入口区域会粘附或涂敷在表面上,在中间区域的颗粒流以挤压、滑动、滚动、碰撞等行为为主,相对软和小的颗粒以粘附承载和类似流体剪切的粉末介质剪切为主,相对大而硬的颗粒以滑动、滚动、碰撞为主^[6]。

单个颗粒虽然以固体形态存在,但颗粒流的集体行为却跨越了固体、液体和气体的界限,目前还很难用固体、液体或气体的性质予以描述。压力会影响流态,试验研究^[30]表明压力从兆帕到吉帕的过程中,固体粉末流的行为变化非常明显。粒径会影响流态,Heshmat^[37]基于平均粒径为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的 TiO_2 粉末的研究和 Iordanoff^[38]基于平均粒径为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 粉末的研究分别显现出类流体和类固体行为。颗粒接触也会影响流态,Iordanoff^[39]的离散元仿真研究表明粒径和颗粒接触模型对颗粒流动形态具有显著影响,他认为 Hertz 模型比 JKR 模型接近类流体态,大颗粒比小颗粒更接近流体态。从速度适应性机制上来看,当颗粒流处于类流体态时,颗粒流沿整个厚度方向的剪应变恒定。对类固体态,剪应变将发生变化,在边界层处数值较大,在颗粒流内部较小;速度适应机制又将影响颗粒间的接触持续时间,从而影响颗粒间相互作用情况。

颗粒聚集体具有一定的强度,颗粒体的强度是由于颗粒间接触点上具有摩擦力和内聚力而形成的。在颗粒聚集体从静止到开始变形直至形成流动的过程中,是摩擦力和内聚力与促使颗粒体变形流动的力相对抗。颗粒接触特性对摩擦力和内聚力影响显著,是颗粒流润滑特性的决定性因素,因而接触模型也是颗粒流润滑仿真的关键。干颗粒模型是接触的两圆球间在法切向相对运动时接触力和局部变形的拟静态关系。湿颗粒接触模型是两刚性圆球间存在液桥或浸渍态时,两球对心相对运动时的液桥表面张力和流体黏性产生的挤压力,与切向相对运动时的阻力之间的关系。无论是干颗粒还是湿颗粒模型,接触力和变形关系都是非线性的^[40-41]。

3.2 类流体润滑理论

Heshmat 使摩擦副间隙处于富 TiO_2 ^[3] 和 MoS_2 ^[18] 粉末状态,通过试验发现了粉末颗粒流有类似流体动压润滑的承载压力形态^[42]。并参照非牛顿流体流变特性,建立了粉末颗粒第三体的五阶剪切流变本构方程,引入流体力学中的连续方程和动量方程,提出了类流体动压粉末润滑理论^[43]。该理论认为颗粒流沿厚度方向存在速度梯度,并且压力分布与流体动压润滑压力分布类似。

类流体润滑理论代表了颗粒流润滑理论初期的成果,它从统计平均的角度,借鉴了基于 Reynolds 方程的流体动压润滑理论,可以用于非流态化、类流体颗粒流的润滑,计算简单。为从连续介质的角度了解颗粒流润滑的宏观特性起到了积极的作用。但是,该理论忽略颗粒个体性质,过分依赖于高度简化、规定性质的本构方程,将颗粒流系统考虑为均一系统,无法体现颗粒流的非连续特性,对微观机理的解释也不够。

3.3 碰撞动理学理论

随着研究的深入,一些学者用多相流体力学中的动理论 (Kinetic Theory) 进一步发展了颗粒流润滑连续介质模型,Jang^[15,44] 和 Khonsari 等^[45-48] 利用动理论推导了颗粒流润滑的 Reynolds 型方程,仿真了颗粒流速、伪温度、体积分布等特性和轴承间隙中的压力承载。Higgs^[49] 基于薄的颗粒剪切流,考虑应力流变本构关系、传导、耗散等建立了颗粒动理学润滑 (GKL) 模型。Yu^[50-51] 和 Sawyer^[52] 对平板间的颗粒碰撞润滑开展了理论和实验研究,并将理论与实验结果进行了对比。Tsai 和 Jeng 进一步探讨了表面粗糙度的影响^[16,53],并针对滑动轴承摩擦副开展了应用探索^[14,54]。这些模型运用流态化颗粒流体理论,开始将颗粒流润滑理论推向微观层次,对颗粒尺寸、碰撞、分布及与表面粗糙度的耦合作用都有一定涉及,发展了颗粒流动理学润滑理论 (Kinetic Theory of Granular Flow)。

颗粒流动理学理论的基本思想是将固体颗粒比拟为气体分子,假定固体颗粒的速度分布函数,类比稠密气体的分子运动学理论而建立颗粒相的运动方程。它把颗粒间的碰撞看成是瞬时的、二元的弹性碰撞,并提出用“颗粒温度”的概念来反映颗粒相速度脉动^[55-56]。利用多相流体力学中的动理论,在保持宏观守恒和稳态解的基础上引入了一定的简化原理来研究颗粒的微观行为,其缺点是没有考虑颗粒的物性参数、大小分布以及多颗粒相互作用的影响,同时

其应用前提要求满足连续介质假设、颗粒处于悬浮状态. 该理论对高速流态化颗粒流润滑非常适用, 但不适用低速、重载、颗粒紧密、多体接触的情况. 它对颗粒间接触变形、摩擦、粘结没有考虑^[37], 同时试验研究极其匮乏.

3.4 基于非连续介质力学的颗粒流润滑理论

实际上可能同时存在着多颗粒间的相互作用, 碰撞也并非瞬时的完全弹性碰撞. 颗粒技术领域的学者发展了一种称为软颗粒接触的方法, 在该类方法中, 颗粒不被看成是完全刚性的, 颗粒间的接触也不是瞬态的, 可以有一定的有限接触时间, 而且允许一个颗粒和多个颗粒同时接触. 在这类方法中, 最引人注目的是最近从研究岩石变形发展起来的可以考虑粒子流中多个颗粒间相互作用的离散单元法^[41, 57-59] (Discrete/ distinct Element Method). DEM把离散体看作有限个离散单元的组合, 目前一般的颗粒元模型是基于圆盘和圆球颗粒模型发展起来的, 适用于颗粒数较多的场合.

离散单元法中颗粒的运动学计算原理是: 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, 位移后的颗粒与所接触的颗粒产生所谓的“叠加”, 根据力-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.

鉴于对摩擦第三体动态行为观测以及单一参数考察和控制的困难, Jordanoff等^[13, 60]应用 DEM 尝试克服这个难题. 文献[39]仿真了颗粒粘附行为和颗粒尺寸对宏观润滑特性的影响, 对比了 Hertz 和 JKR 两种颗粒接触模型. 他们侧重对大量磨损颗粒组成的颗粒流动态行为进行仿真研究, 结果表明 DEM 对摩擦间隙中三体行为的研究非常有效, 能克服连续介质理论的不足.

基于非连续介质力学的方法非常适合颗粒流物质, 可以用于仿真分析颗粒流润滑的各种现象, 但计算量偏大, 颗粒间接触模型的选择对该类理论非常重要. 除了 DEM 外, Jasti^[61]还尝试了使用格子元胞机法对颗粒流润滑开展研究.

4 不足和展望

4.1 颗粒流非理想状态的研究

颗粒流润滑时, 由于润滑间隙中可能存在的粉

末压实、结集、缺粉、摩擦副碰摩等现象, 会导致该润滑系统处于非理想状态, 产生结构突变, 结构的突变可能会导致灾难性的后果^[62]. 已有的基于流体润滑^[42, 43]或者动理学^[15, 44, 49]的研究都将系统假设为稳态和理想的, 显然不符合实际. 颗粒流还具有时间和空间上的不均匀性, 其基本特征表现为颗粒浓度、颗粒速度等在轴向、径向的非均匀分布^[63]. 非均匀结构的存在使得系统在不同尺度上表现出不同的动力学行为和传递特性. 显然, 只有了解颗粒流结构的非均匀性和其中的动态变化, 才能精确预测颗粒流润滑的摩擦学特性, 它们对颗粒流润滑理论提出了新的要求.

4.2 宏观-微观-多尺度

颗粒流润滑摩擦学系统属于复杂系统^[36, 62], 在宏观上需要研究承载特性、摩擦系数、温度特性等, 在介观尺度上需要研究颗粒团聚、颗粒分布、颗粒流动、摩擦副表面破坏, 在微观尺度上需要研究颗粒碰撞、颗粒变形、颗粒破裂等. 当前的相关研究还是基于单一尺度, 用统一的规律描述润滑方程, 但颗粒流润滑系统的复杂性和尺度效应是复杂流动中动态结构的多尺度性质所决定的, 仅从微观上描述这些结构即使可能也是不经济的, 而仅从宏观上描述显然也是不够的. 基于单一尺度的模型不仅会掩盖所考虑尺度之下的结构效应也会抹平大尺度上的结构, 从而造成显著的误差; 用平均参数难以反映系统的内在机理, 更不易真正实现颗粒流润滑过程的定量预测. 可行的途径是先分析各过程及某一尺度的、独立的变化规律, 然后综合考虑不同过程之间的耦合和不同尺度之间的关联, 构成对系统的总体认识. 这样多尺度方法就自然成为处理这种复杂性的切实手段.

在摩擦学领域, Wu^[64]运用多尺度方法揭示了薄膜润滑的机理; Bucher^[65]实现了轮轨干摩擦接触的多尺度仿真; Biggerelle^[66]分析了研磨过程磨损的多尺度特性; 王维^[67]利用小波理论对刀具磨损的状态信号进行了多尺度分解. 多尺度方法大致有三种类型^[68]: 描述型、关联型、变分型. 但近来尝试最多的还是描述型方法, 即在同一模拟的不同时空区域采用不同尺度的描述. 如分子动力学 (MD) 模拟与有限元计算相结合描述材料中裂纹的发展^[69], 应用离散和连续建模方法模拟粉末压实过程^[70]等, 这些研究成果对颗粒流润滑有很强的借鉴意义. 因此, 将颗粒流润滑复杂摩擦学系统理论从单一尺度推动到跨尺度关联是内在发展的需要, 而在这个过程中建立集

量子力学、分子动力学、离散描述、准连续描述、粗粒化技术、网格技术以及有限元方法等其中几种层次模型为一体的统一表述和跨层次运算是科学发展的趋势。

4.3 连续力学 散体力学

目前,对颗粒流润滑的初步理论研究^[15, 42-44, 49]基本都是连续介质模型,它们忽略颗粒个体性质,过分依赖于高度简化的、规定性质的本构方程。颗粒体本身是散体,它不连续、种类多、各向异性,其力学特征可概括为“散”和“动”,前者指颗粒物性、粒度和形状分散性,后者指运动的瞬态、波动、碰撞、颗粒凝聚以及聚团的破裂,上述散、动特征常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。而基于流态化颗粒流的动理学模型^[15, 44, 49]对颗粒流低密度、高速度碰撞等的前提要求,使该理论仅适用于低承载、高速下的气体主导的润滑工况,对高密度、高承载、中低速流动、包含多体作用的颗粒流润滑仿真无能为力。所以,进一步的研究必须突破连续介质力学的束缚,包含非流态化的颗粒流工况,同时考虑颗粒流系统状态多值性、结构突变性和结构非均匀性,从而实现对颗粒流润滑机理的全面解释和仿真。目前把非连续介质力学引入到研究颗粒流润滑问题还是一个全新的研究领域。力学领域的相关成果也说明离散方法在处理颗粒流问题时的有效性^[41, 71]。因此,离散方法是目前研究类似问题的一个有效方法。

在非连续介质力学研究颗粒物质的领域, Satake^[72]研究了散体材料本构关系的数学表达; Walton研究了散体纯剪切问题^[73]; Thornton研究了软颗粒的剪切问题^[74];徐泳等^[41]导出了任意球体间挤压力的连续积分表达式并提出很精确的拟合公式;黄文彬等^[75]还分析了有滑移时两球间幂律流体的挤压流动并导出了相应公式。通过以上研究,初步形成以固体接触力学和流体力学为基础、颗粒细观力学为体、颗粒技术为用的具有交叉特征的计算散体力学学科。这些成果被应用于粉体在复杂物理场作用下的复杂动力学行为的研究^[76];求解连续介质及连续介质向非连续介质转化的力学问题^[77];工业和采矿过程的固体颗粒混合及研磨过程^[78]等。由于研究对象的一致,所以它们也可用于仿真颗粒流润滑中的颗粒动特性,颗粒流及摩擦材料在冲击、侵彻等动载荷作用下产生的损伤和破坏等。故此,非连续介质力学的成果有望为颗粒流润滑理论带来突破性的进展。

4.4 微米 纳米 多组分颗粒

纳米微粒是指由极细晶粒组成,特征维度尺寸在纳米级(1~100 nm)的固态微粒。其具有小尺寸效应、表面界面效应、量子效应、量子隧道效应等不同于传统材料的独特性能,使得它们在催化、滤光、医药等领域有着广泛的应用。近年来,摩擦学领域对纳米颗粒开展了大量的研究,发现纳米金刚石、 WS_2 、 MoS_2 等颗粒减小摩擦,降低磨损的主要机理有增黏、微滚动、表面膜理论^[11, 79-81]。沈明武和雒建斌^[82]认为纳米金刚石颗粒通过增黏效应使润滑剂的油膜增厚,并且纳米微粒尺寸较小,可以认为近似于球形,在摩擦副间可像鹅卵石一样自由滚动,起到“微轴承”作用,对摩擦表面进行抛光和强化作用,并支撑负荷,使承载能力提高,摩擦系数降低。另外一些学者^[79, 80, 83]认为纳米金刚石颗粒可渗入到摩擦表面形成极薄的固体润滑膜,有效阻止摩擦表面的直接接触,从而降低摩擦系数,而且还能对摩擦表面进行一定程度的填补和修复。另外,纳米微粒具有较高的扩散能力和自扩散能力,容易在金属表面形成具有极佳抗摩性能的渗透层或扩散层,从而表现出原位摩擦化学原理。目前颗粒流润滑的研究中主要以微米、毫米级颗粒为对象,但未来引入纳米颗粒,或者耦合多种颗粒的多组分颗粒,是一项值得期待的工作。

4.5 颗粒导入的研究

颗粒能否进入摩擦副对颗粒流润滑非常重要。颗粒的导入有多种方式,国标^[84]中定义了:喷粉润滑(Gas-entrained lubrication)——用气体将固体润滑剂吹入摩擦面的润滑方式;粉浴润滑(Dusting bath lubrication)——使摩擦副处于飞扬固体润滑剂粉末状态的润滑方式;转移膜润滑(Transfer film lubrication)——利用固体润滑的压制物的磨损产物转移到摩擦面上起润滑作用的润滑方法。Heshmat^[85]、Sawyer^[9]等利用粉气混合流体将颗粒导入摩擦副,也就是将粉未经流化后,通过压缩气体输送至摩擦间隙。粉气混合流体导入方式具有较好的导入性,在高速、重载、高温的场合效果良好,但需要增加压缩空气供给和粉末喷射装置。Tsal^[14]、Reddy^[10, 20]和 Gopal^[21]利用粉末自身流动导入颗粒,同样需要粉末供给装置,同时粉末流动的均匀性需要控制。利用压实的粉末块状物与轴摩擦产生转移膜导入也被一些研究者所采用^[17]。还有一些学者探索了利用静电吸附^[86]和磁性吸附^[32-35]将粉末颗粒导入摩擦间隙。但是,目前颗粒流的导入方向、浓度、强度等对润滑特

性的影响并没有得到充分的研究,基础理论匮乏,试验和使用中参数的设定比较盲目。

4.6 环保的润滑方式

纽约商品交易所 (NYMEX) 原油在 2008 年中创下了 147 美元/桶的历史新高,高油价激发了美国、中国、日本等世界各国对石油替代工程的研究。固体润滑材料已经开始在越来越多的场合取代液体润滑油,相信它在未来还会发挥更加重要的作用。颗粒流润滑采用的是固体颗粒,无挥发性,可以循环使用,因此,使用颗粒流润滑具有环保意义。Sawyer^[9]利用对环境无害的硼酸颗粒研究了喷粉润滑特性,指出了其环保润滑潜力。Kimura^[22-23]等和 Toshiba 压铸设备公司利用粉末润滑封闭腔式压铸系统的研究表明:固体粉末所具有的无挥发性和绝热性能能够很好地改善了工作环境,减少了污染。Reddy^[10,20]和 Gopal^[21]也指出粉末润滑减少了摩擦和切削过程中润滑油和切削液对环境的污染。

5 结束语

诸多的工程实践表明颗粒流润滑具有自身的特色,能够很好地解决部分特殊的润滑难题。但是,颗粒流润滑的理论还不成熟,仍然有大量的应用和理论上的难点有待克服。温诗铸院士指出:颗粒(粉体)摩擦学是研究颗粒物质的密集、流动和与界面的交互作用,从摩擦学角度来看该研究尚属空白^[87]。故,如果能够通过系统的摩擦学研究,建立起充分发挥固体颗粒流优点的、可指导应用的润滑理论,相信颗粒流润滑将在理论研究和工程应用中凭借自身的特色占有一席之地。

参考文献:

- [1] 严晓华,陈国需. 固体润滑技术的研究现状及展望[J]. 能源研究与信息, 2005, 21(2): 6.
Yan X H, Cheng G X. Current development and future prospects on solid lubricating techniques[J]. Energy Research and Information, 2005, 21(2): 6.
- [2] 薛群基,吕晋军. 高温固体润滑研究的现状及发展趋势[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(1): 91-96.
Xue Q J, Lu J J. Research status and developing trend of solid lubrication at high temperatures[J]. Tribology, 1999, 19(1): 91-96.
- [3] 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.
- [4] Khonsari M M. On the modeling of multi-body interaction problems in tribology[J]. Wear, 1997, 207(1-2): 55-62.
- [5] 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.
- [6] Womiyoh E Y A, Jasti V K, Higgs I C F. A review of dry particulate lubrication: Powder and granular materials[J]. Journal of Tribology, 2007, 129: 438-449.
- [7] Campbell C S. Rapid granular flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1990, 22(1): 57-90.
- [8] Jaeger H M, Nagel S R. Physics of the granular state[J]. Science, 1992, 255(5051): 1 523-1 531.
- [9] Sawyer W G, Ziegert J C, Schmitz T L, *et al*. In situ lubrication with boric acid: Powder delivery of an environmentally benign solid lubricant[J]. Tribology Transactions, 2006, 49(2): 284-290.
- [10] Reddy N S K, Rao P V. Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(2): 189-198.
- [11] Rapoport L, Leshchinsky V, Lvovsky M, *et al*. Superior tribological properties of powder materials with solid lubricant nanoparticles[J]. Wear, 2003, 255: 794-800.
- [12] Heshmat H, Heshmat C A. The effect of slider geometry on the performance of a powder lubricated bearing[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(3): 640-646.
- [13] 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.
- [14] Tsai H J, Jeng Y R. Characteristics of powder lubricated finite-width journal bearings: A hydrodynamic analysis[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2006, 128(2): 351-357.
- [15] 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.
- [16] Jeng Y R, Tsai H J. Grain flow for rough surfaces considering grain/g(r)ain collision elasticity[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2005, 127(4): 837-844.
- [17] Kaur R G, Heshmat H. 100mm diameter self-contained solid/powder lubricated auxiliary bearing operated at 30,000 rpm[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(1): 76-84.
- [18] Heshmat H, Brewe D. Performance of powder-lubricated journal bearings with MoS₂ powder—experimental study of thermal phenomena[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 1995, 117(3): 506-512.
- [19] Heshmat H, Brewe D E. Performance of a powder lubricated journal bearing with WS₂ powder: Experimental study[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 1996, 118(3): 484-491.
- [20] 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.
- [21] Gopal A V, Rao P V. Performance improvement of grinding of sic using graphite as a solid lubricant[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2004, 19(2): 177-186.
- [22] 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.
- [23] Kimura R, Yoshida M, Sasaki G, *et al*. Influence of abnormal structure on the reliability of squeeze castings[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 130: 299-303.
- [24] Hanano T, Shibuya H. Sleeve lubricating method and sleeve lubricating mechanism[P]. USP 6039108, 2000.
- [25] Hanano T. Powder lubricant for plunger device[P]. USP 5154839, 1992.
- [26] Pinheiro C A M, Samarasekera I V, Brinacombe J K, *et al*. Mould heat transfer and continuously cast billet quality with mould flux lubrication-part 2 quality issues[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2000, 27(2): 144-159.
- [27] Pinheiro C A M, Samarasekera I V, Brinacombe J K, *et al*. Mould heat transfer and continuously cast billet quality with mould flux lubrication-part 1-mould heat transfer[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2000, 27(1): 37-54.
- [28] Johnston W G, Milz W C. Dry powder lubricant[P]. USP 3962103, 1976.
- [29] Heshmat H. Wear reduction systems for coal-fueled diesel-engines 1. The basics of powder lubrication[J]. *Wear*, 1993, 162: 508-517.
- [30] Heshmat H. Wear reduction systems for coal-fueled diesel-engines 2. Experimental results and hydrodynamic model of powder lubrication[J]. *Wear*, 1993, 162: 518-528.
- [31] Heshmat H. Powder-lubricant piston ring for diesel engines[P]. USP 5085185, 1992.
- [32] Dроздов Y N. Friction units with magnetically active powder lubricant[J]. *Soviet Engineering Research*, 1986, 6(9): 13-16.
- [33] Dроздов Y N. A magnetic powder method of lubricating rolling bearings[J]. *Soviet Engineering Research*, 1982, 2(5): 18-20.
- [34] Vaisfeld L O. Work performance of gear transmissions with magnetic powder lubrication under various external conditions[J]. *Russian Engineering Journal*, 1979, 59(3): 8-10.
- [35] Pavlov V G. Assessment of contact stresses and of film thickness during magnetic powder lubrication of gears[J]. *Russian Engineering Journal*, 1979, 59(2): 3-7.
- [36] 鲍德松, 张训生. 颗粒物质与颗粒流[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2003, 30(514): 514-517.
- Bao D S, Zhang X S. Granular matter and granular flow[J]. *Journal of Zhejiang University (Sciences Edition)*, 2003, 30(514): 514-517.
- [37] Heshmat H, Godet M, Berthier Y. On the role and mechanism of dry triboparticulate lubrication[J]. *Lubrication Engineering*, 1995, 51(7): 557-564.
- [38] Iordanoff I, Khonsari M M. Granular lubrication: Toward an understanding of the transition between kinetic and quasi-fluid regime[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2004, 126(1): 137-145.
- [39] Iordanoff I, Seve B, Berthier Y. Solid third body analysis using a discrete approach: Influence of adhesion and particle size on macroscopic properties[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2002, 124(3): 530-538.
- [40] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法研究的评述[J]. *力学进展*, 2003, 33(4): 483-490.
- Liu K X, Gao L T. A review on the discrete element method[J]. *Advances In Mechanics*, 2003, 33(4): 483-490.
- [41] 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 Y, Sun Q C. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. *Advances In Mechanics*, 2003, 33(2): 251-259.
- [42] Heshmat H. The quasi-hydrodynamic mechanism of powder lubrication 2. Lubricant film pressure profile[J]. *Lubrication Engineering*, 1992, 48(5): 373-383.
- [43] Heshmat H. The quasi-hydrodynamic mechanism of powder lubrication 3. On theory and rheology of triboparticulates[J]. *Tribology Transactions*, 1995, 38(2): 269-276.
- [44] Jang J Y, Khonsari M M. On the granular lubrication theory[J]. *Proceedings of the Royal Society Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2005, 461(2062): 3 255-3 278.
- [45] Pappur M, Khonsari M M. Flow characterization and performance of a powder lubricated slider bearing[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2003, 125(1): 135-144.
- [46] Zhou L, Khonsari M M. Flow characteristics of a powder lubricant sheared between parallel plates[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2000, 122(1): 147-155.
- [47] McKeague K T, Khonsari M M. An analysis of powder lubricated slider bearings[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1996, 118(1): 206-214.
- [48] McKeague K T, Khonsari M M. Generalized boundary interactions for powder lubricated couette flows[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1996, 118(3): 580-588.
- [49] Higgs C F, Tichy J. Granular flow lubrication: Continuum modeling of shear behavior[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2004, 126(3): 499-510.
- [50] Yu C M, Tichy J. Granular collisional lubrication: Effect of surface roughness, particle size and solids fraction[J]. *Tribology Transactions*, 1996, 39(3): 537-546.
- [51] Yu C M, Craig K, Tichy J. Granular collision lubrication[J]. *Journal of Rheology*, 1994, 38(4): 921-936.
- [52] Sawyer W G, Tichy J A. Lubrication with granular flow: Continuum theory, particle simulations, comparison with experiment[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2001, 123(4): 777-784.
- [53] Tsai H J, Jeng Y R. An average lubrication equation for thin film grain flow with surface roughness effects[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2002, 124(4): 736-742.
- [54] Jeng Y R, Tsai H J. Grain-flow lubrication of finite-width slider bearings with rough surfaces[J]. *Tribology Letters*, 2002, 13(4): 219-232.
- [55] Savage S B, Jeffrey D J. The stress tensor in a granular flow at high shear rates[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 110

- (SEP): 255-272
- [56] Jenkins J T, Savage S B. A theory for the rapid flow of identical, smooth, nearly elastic, spherical particles[J]. Journal of Fluid Mechanics 1983, 130: 187-202
- [57] Cundall P A. Formulation of a 3-dimensional distinct element model I. 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
- [58] Cundall P A, Strack O D L. Discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29 (1): 47-65
- [59] 王泳嘉. 离散单元法及其在岩土力学中的应用 [M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.
- [60] Fillard N, Brdanoff I, Berthier Y. Simulation of wear through mass balance in a dry contact[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2005, 127 (1): 230-237.
- [61] Jasti V K, Higgs C E. A lattice-based cellular automata modeling approach for granular flow lubrication[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2006, 128 (2): 358-364.
- [62] 李静海, 欧阳洁, 高士秋. 颗粒流体复杂系统的多尺度模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [63] 欧阳洁, 李静海. 循环流化床中宏观非均匀结构的计算机模拟 [J]. 化工冶金, 1999, 20 (2): 144-149.
- Ou Y J, Li J H. Simulation for macroscopic heterogeneous structure in circulating fluidized beds[J]. Engineering Chemistry & Metallurgy, 1999, 20 (2): 144-149.
- [64] Wu Z B, Diestler D J, Zeng X C. Multiscale treatment of thin-film lubrication[J]. Molecular Simulation, 2005, 31 (12): 811-815.
- [65] Bucher F, Dmitriev A I, Ertz M, *et al* Multiscale simulation of dry friction in wheel/rail contact[J]. Wear, 2006, 261 (7-8): 874-884.
- [66] Bigerelle M, Najjar D, Iost A. Multiscale functional analysis of wear: a fractal model of the grinding process[J]. Wear, 2005, 258 (1-4): 232-239.
- [67] 王维, 么健石, 唐宗军. 异型螺杆铣削过程刀具磨损状态检测研究 [J]. 中国机械工程, 2004, 15 (23): 2081-2084.
- Wang W, Yao J S, Tang Z J. Research on condition test of tool wear for milling special shaped spiral rod[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15 (23): 2081-2084.
- [68] 葛蔚, 麻景森, 张家元. 复杂流动多尺度模拟中的粒子方法 [J]. 科学通报, 2005, 50 (9): 841-853.
- Ge W, Ma J S, Zhang J Y. Particle method in multi scale simulation of complex flow[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50 (9): 841-853.
- [69] Curtin W A, Miller R E. Atomistic/continuum coupling in computational material science[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2003, 11: R33-R68.
- [70] Ransing R S, Gethin D T, Khoei A R. Powder compaction modeling via the discrete and finite element method[J]. Materials & Design, 2000, 21: 263-269.
- [71] 傅巍, 蔡九菊. 颗粒流数值模拟的现状 [J]. 材料与冶金学报, 2004, 3 (3): 172-175.
- Fu W, Cai J J. Current status of numerical simulation of granular flow[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2004, 3 (3): 172-175.
- [72] Satake M. A discrete-mechanical approach to granular materials [J]. International Journal of Engineering Science, 1992, 30 (10): 1525-1533.
- [73] Walton O R, Braun R L. Stress calculations for assemblies of inelastic spheres in uniform shear[J]. Acta Mechanica, 1986, 63 (1-4): 73-86.
- [74] Thomson C, Antony S J. Quasi-static shear deformation of a soft particle system [J]. Powder Technology, 2000, 109 (1-3): 179-191.
- [75] 黄文彬, 徐泳, 练国平. 存在滑移时两圆球间的幂律流体挤压流动 [J]. 应用数学和力学, 2002, 23 (7): 722-728.
- Huang W B, Xu Y, Lian G P. Squeeze flow of a power-law fluid between two rigid spheres with wall slip[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2002, 23 (7): 722-728.
- [76] Tsuji Y. Activities in discrete particle simulation in Japan [J]. Powder Technology, 2000, 113: 278-286.
- [77] Sawamoto Y, Tsubota H, Kasai Y, *et al* Analytical studies on local damage to reinforce concrete structures under impact loading by discrete element method[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 179: 157-177.
- [78] Cleary P W, Sinnott M, Morrison R. Prediction of slurry transport in sag mills using sph fluid flow in a dynamic DEM based porous media[J]. Minerals Engineering, 2006, 19 (15): 1517-1527.
- [79] 于鹤龙, 徐滨士, 许一. 纳米铜添加剂改善钢-铝摩擦副摩擦磨损性能的研究 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26 (5): 433-438.
- Yu H L, Xu B S, Xu Y. Friction and sliding wear behavior of steel-aluminum tribopair improved by nanocopper additive [J]. Tribology, 2006, 26 (5): 433-438.
- [80] 刘维民. 纳米颗粒及其在润滑油脂中的应用 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23 (4): 265-267.
- Liu W M. Application of nanoparticles in lubricants [J]. Tribology, 2003, 23 (4): 265-267.
- [81] Greenberg R, Halperin G, Etsion I, *et al* The effect of WS₂ nanoparticles on friction reduction in various lubrication regimes [J]. Tribology Letters, 2004, 17 (2): 179-186.
- [82] Shen M W, Luo J B, Wen S Z, *et al* Nano-tribological properties and mechanisms of the liquid crystal as an additive [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (14): 1227-1232.
- [83] 曲建俊, 宋宝玉, 齐毓霖. 含超细颗粒固液二相流对 PSZ 陶瓷与钢摩擦磨损特性的影响 [J]. 润滑与密封, 2000, (6): 44-46.
- Qu J J, Song B Y, Qi L L. Influence of superfine particle additives in bi-phase lubricants on sliding friction and wear properties of PSZ Ceramic-GCr15 steel [J]. Lubrication Engineering, 2000, (6): 44-46.
- [84] GB/T 17754-1999. 摩擦学术语 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [85] Heshmat H S, Dill J F. Traction characteristics of high-temperature powder-lubricated ceramics (Si₃N₄/α-SiC) [J]. Tribology

- Transactions, 1992, 35 (2) : 360-366
- [86] Jiang W P, Malshe A P, Brown W D. Physical powder deposition of solid lubricant nanoparticles by electrostatic spray coating (esc) [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 177: 671-675
- [87] 温诗铸. 我国摩擦学研究的现状与发展 [J]. 机械工程学报, 2004, 40 (11) : 1-6
- Wen S Z Existing state and development of tribology research in China[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40 (11): 1-6

Review and Prospect of Particulate Lubrication

WANG Wei, LIU Kun

(Hefei University of Technology, Institute of Tribology, Hefei 230009, China)

Abstract: The idea of particulate lubrication is introduced and discussed. In particulate lubrication, the solid particles are directly led into interface of tribopairs and abound in it. By utilizing friction, deformation, collision, crash, slide and rolling of these solid particles, the direct contact of two moving surface were minimized, and so the damage of surface was avoided. The research and application status of particulate lubrication in space magnetic backup bearing, brake, milling, casting, etc. are analyzed. The existing particulate lubrication model, such as quasi-fluid theory, kinetic theory, discrete element method theory and cellular automata theory, are explained and compared, and suggested. Current key problems are particles flow behavior and particle contact model. Future research direction, which includes multi-scale, non-linear, environmental protection, etc., of particulate lubrication are proposed.

Key words: particle flow, powder, lubrication, tribopairs, non-linear

Author: LIU kun, male, born in 1963, Professor, e-mail: liukun@mail.hf.ah.cn