

# 粉-气混合流润滑试验装置及摩擦学特性

王家军, 刘小君, 王伟, 刘焜<sup>\*</sup>

(合肥工业大学机械与汽车工程学院 摩擦学研究所, 合肥 230009)

**摘要:** 为了研究粉气混合流在摩擦副间的润滑状况, 采用空气压缩机及油水分离器提供高压干燥空气, 并结合粉末流化和喷粉设备构建了向环块摩擦副间输送粉气混合流的粉末润滑试验装置。基于 Timken 摩擦磨损试验机, 用石墨粉末进行一系列润滑试验。结果表明: 此供粉装置能提供稳定持续的粉气混合流; 石墨粉气混合流能进入到环块摩擦副中, 使其保持良好的线接触并起到良好的润滑作用, 摩擦系数在载荷达到 450 N 时还不足 0.1, 并且随着载荷增大有减小趋势; 摩擦力随着载荷的提高而增大, 但总体上相对较小; 磨损量也比较小, 试件块的磨痕呈细细的条状; 石墨粉气流通过环块摩擦副时将环块表面间的摩擦转换为石墨颗粒间的摩擦, 并通过空气流将大部分热量带走, 从而有效降低摩擦副的温度。

**关键词:** 石墨粉气流, 干摩擦, 润滑, 磨损量

**中图分类号:** TH117.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-12-0080-04

王家军, 刘小君, 王伟, 等. 粉-气混合流润滑试验装置及摩擦学特性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 80-83.

Wang Jiajun, Liu Xiaojun, Wang Wei, et al. Establishment of experimental system and investigation of tribological properties of powder-gas flow lubrication[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 80-83.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

农业机械的工作环境往往存在着大量粉尘<sup>[1]</sup>, 这容易污染机械设备中的润滑油或润滑脂并引起噪音等问题。用固体润滑剂颗粒或粉末对摩擦副进行润滑能对恶劣环境有较强的适应能力, 同时能够在高温及重载条件下为机械设备提供有效润滑, 因此研究人员对粉末润滑产生极大兴趣。

Heshmet<sup>[2,3]</sup>等人用压缩空气将固体粉末润滑剂 TiO<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub> 注射到大滚滑比摩擦磨损试验机的盘-盘摩擦副中, 摩擦盘的材料分别为 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 SiC。在温度介于 22~650℃, 表面滑动速度高达 75 m/s 条件下, 绘制出干燥粉末的摩擦系数与滑动比的特征曲线, 并且发现干燥粉末润滑剂的摩擦系数、试件的磨损量都比较小, 以及干燥粉末对温度的敏感程度低。此后, 他又将 WS<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> 及 MoS<sub>2</sub> 喷入到滑动轴承及三轴瓦轴承的间隙中, 在转速高达 30000 r/min, 载荷为 236 N 的条件下, 进行大量试验。结果发现: WS<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub> 及 MoS<sub>2</sub> 粉气混合流能为摩擦副提供有效的润滑, 并在接触区域产生与润滑油相似的压力分布, 并具有类似流体动压润滑的特性<sup>[4-7]</sup>。Tsai 等人<sup>[8-10]</sup>研究了用粉末流润滑的有限宽轴承, 得出的试验结果与 Heshmat 的类似。

采用环形剪切试验装置, Yu<sup>[11,12]</sup>用粒径 0.5 mm 的颗

粒进行试验得出: 粉末润滑的本质特征与颗粒碰撞相接近。Elkholy, Khonsari<sup>[14]</sup>研究了平行盘间受剪颗粒材料的粘滑特性。结果发现: 摩擦系数、位移是旋转速度及载荷的函数; 低速状况下发生的粘滑能进一步证明两圆盘间发生滑动时颗粒能够形成抬升力<sup>[15]</sup>。

综上所述, 目前国外研究者开展的科研工作大都专注于某种具体试验装置, 例如有限宽(无限宽)平行板、剪切环、滑动轴承等。但也存在以下盲区: 固体粉末和空气在进入摩擦副之前, 如何实现两者的均匀混合; 如何避免喷出的粉末污染空气; 以及空气流的压力和粉末浓度是否可调。如果这些盲区不解决, 那么试验结果的量化程度就大打折扣。基于此背景下, 本文构建了向环块摩擦副间输送粉气混合流的粉末润滑试验装置。通过该装置可以实现粉末和空气流在进入摩擦副之前均匀混合; 用有机玻璃制作的罩子可以有效防止喷出的粉末污染空气, 并通过吸尘器将沉落在罩子里的粉末及时回收; 同时通过改变装置中的射粉、流化及旋流气压就可以调节进入到摩擦副中粉末的浓度。结合经过改造的 Timken 摩擦磨损试验机, 通过大量试验验证得知, 该粉末润滑试验装置可以长时间提供稳定而持续的粉末流。

## 1 试验装置

试验装置由两大部分组成: 粉气流供应装置及经数字化改造后的 Timken 摩擦磨损试验机, 如图 1 所示。

在粉气流供应装置中, 空气压缩机提供高压空气源, 出口气量 0.6 m<sup>3</sup>/min, 高压空气经过多级油水过滤器将空气中的水蒸气及从空压机里带进的油过滤掉, 进入到供粉装置控制系统 3, 将高压空气分为: 流化气流, 射粉气流, 旋流气流。

流化气流 2 通过流化桶 7 底部的微孔流化板使桶内粉末与空气均匀混合变为流体状态, 正常工作时粉桶里

收稿日期: 2008-05-30 修订日期: 2008-11-28

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)

作者简介: 王家军(1982-), 男, 河北张家口人。合肥 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 230009。

\*通讯作者: 刘焜(1963-), 男, 陕西汉中, 博士, 所长, 教授、博士生导师。合肥 合肥工业大学摩擦学研究所, 230009。

Email: liukun@mail.hf.ah.cn

面的粉末流化沸腾气压过大会引起粉末外溢，气压过小会引起喷枪出粉不均匀，或喷枪出粉雾化不良，一般调定为 0.04 MPa。

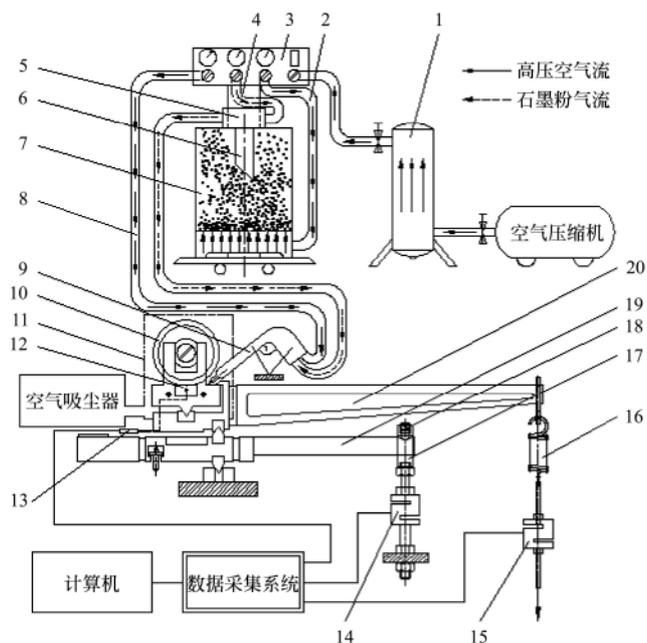
射粉气流 4 进入到吸粉泵 5 中，通过吸粉管 6 将流化好的粉末吸起来，输送到喷枪 9。射粉气流气压越大，出粉量越大，调控范围一般介于 0.2~0.4 MPa。

旋流气流 8 通过管路给喷枪提供稳定的气流，此气流对喷枪里的粉末有搅拌作用，改善喷枪的出粉情况，而且能够给喷枪内部散热，一般调定为 0.8 MPa。

为了减少环境污染，用有机玻璃试验罩子 11，罩在 Timken 摩擦磨损试验机上，将环块摩擦副罩起来，防止空气中的水蒸气混入到粉末流中，并且可以观察到试验过程中粉末气流进入到环块摩擦副中的状况。

在相对喷枪一侧罩子上开孔并安装一台空气吸尘器来降低密封罩子里的气体压强并将沉淀在罩子底部的石墨粉末及时吸走。

对 Timken 摩擦磨损试验机进行数字化改造后，加载时按下加载柜上电源按钮，由电动机带动并通过中间传动机构带动与弹簧 16 串联的传感器 15 上升(或下降)，通过弹簧的拉伸给试验加载，试环 10 与试块 12 间的试验力由传感器 15 测量。摩擦力杠杆 19 右侧串接拉力传感器 14，通过调节杆 17 及联结头 18 与摩擦力杠杆相连，摩擦力杠杆固定在联结头内随时保持在平衡状态。试验机工作时，试环与试块之间产生的摩擦力通过刀口传给摩擦力杠杆，使摩擦力杠杆受到逆时针方向的力矩作用，而固定在右端的摩擦力矩传递臂与传感器相接触，所以最终试环与试块间的摩擦力变化就反映在传感器上所受力的变化。



1.油水分离器 2.流化气流 3.供粉装置控制系统 4.射粉气流 5.吸粉泵  
6.吸粉管 7.流化桶 8.旋流气流 9.喷枪 10.试环 11.试验罩子 12.试块  
13.温度传感器 14.摩擦力传感器 15.加载力传感器 16.弹簧 17.调节杆  
18.联结头 19.摩擦力杠杆 20.载荷杠杆

图 1 试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

## 2 摩擦磨损试验

摩擦磨损试验在试验系统进行，试件块尺寸为 12 mm × 12 mm × 19 mm 的 Cr12 冷作模具钢，试件环材料为 φ49 mm—φ39 mm × 13 mm 的 GCr15，硬度 63HRC。第一阶段试验检验石墨粉气流能否有效进入到环—块摩擦副中，检验构建的试验系统的稳定性，分别做了 3 组干摩擦试验及石墨粉气流润滑试验，主轴转速 100 r/min，干摩擦载荷 155 N，试验过程中没有进行变载操作，石墨粉气流润滑的初始载荷 155 N 保持 4 min，随后加载至 300 N，每组试验时间为 12 min，室温 23℃。第二阶段试验：探讨在石墨粉气流润滑状态下，试件块的磨损量与载荷、摩擦力、温度、及摩擦系数间的关系。主轴转速 200 r/min，载荷分别为 150 N、300 N、450 N 下，每组试验重复 3 次，试验结果取算术平均值。每组试验时间设定为 20 min。试验前所有试件均用丙酮清洗干净，用 FA2004 型电子天平(精度为 0.1 mg)称量试件磨损前后的磨损质量损失，并以此评价石墨粉气流润滑状态下的摩擦磨损特性。供粉装置控制系统设定的射粉压力为 0.3 MPa，流化气压 0.04 MPa。

## 3 试验结果分析

### 3.1 石墨粉气流进入环块摩擦副的有效性检验

#### 3.1.1 摩擦参数

由图 2a 可知：在干摩擦状态下，摩擦力较大且有下降趋势，主要是由于加载系统存在机械振动及因磨损导致的环块接触间隙增大所引起的；在石墨粉气流润滑状态下，载荷 155 N 时，摩擦力非常小；随后加载至 300 N，摩擦力增加幅度仍然较小，说明石墨粉气流润滑能有效降低环块间的摩擦力。

由图 2b 可知：在干摩擦状态下，载荷为 155 N 时，温度上升较快；在石墨粉气流润滑状态下，载荷为 155 N 时，温度基本维持在室温；载荷加至 300 N 之后，温度上升的比较缓慢，可见石墨粉气流通过减少摩擦和气流导热能有效降低摩擦副间的温度。

由图 2c 可知：在干摩擦状态下，摩擦系数比较大，主要是由于环块摩擦副间的实际接触面积很小所导致的；在石墨粉气流润滑状态下，环块间的摩擦系数总体上比较小，在载荷达到 300 N 时，还不足 0.1，主要由于石墨粉末具有低的剪切强度，很容易产生滑移所致。可见石墨粉气流能有效进入到环块摩擦副，使环块间保持线接触状态，同时试件块的磨损量也明显减少。

#### 3.1.2 表面形貌

由图 3a 可知：在干摩擦状态下，试件块的磨痕呈凹坑状，主要是由于环块表面间的摩擦力较大使环块摩擦副由线接触状态迅速变为面接触；并且试件环的材料为 GCr15，其硬度远大于试件块的 Cr12，由凹坑表面细细的条纹可知，试件块表面上产生“犁沟”现象，在放大 100 倍的显微图 3b 中更为明显。由图 3c 可知：在石墨粉气流润滑状态下，试件块的磨痕呈细细条状，说明石墨粉末能有效进入到环块摩擦副中，将环块表面间的摩擦

转换为石墨粉末间的摩擦，从而使环块摩擦副长时间保持良好的线接触状态。在放大 100 倍的显微图 3d 中，磨

痕呈一条细细的沟槽，说明石墨粉气流在环块摩擦副间能起到良好的润滑作用。

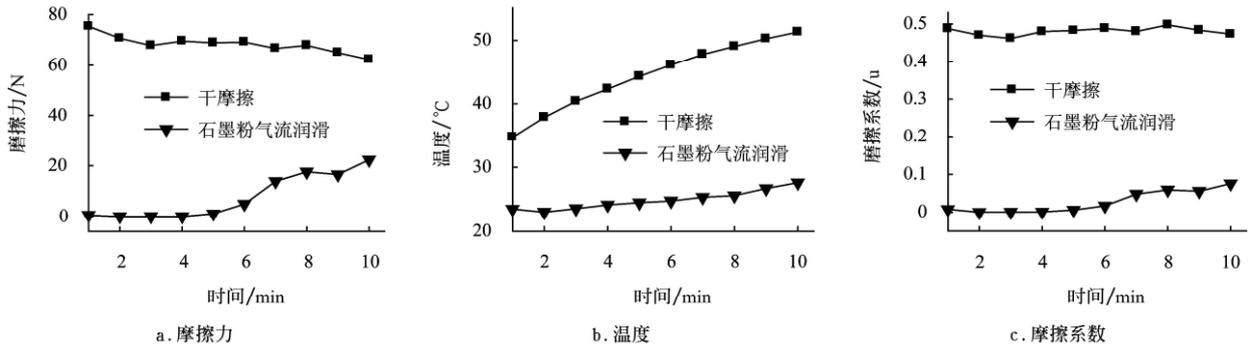


图 2 干摩擦与石墨粉气流润滑摩擦参数随时间变化

Fig.2 Changes of parameters of dry friction and graphite powder-gas flow lubrication friction with time

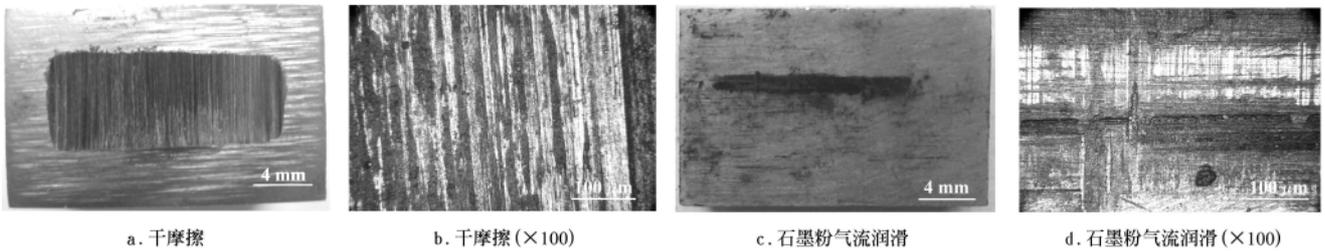


图 3 试件块表面磨痕图片 (a, c) 和放大 100 倍图片 (b, d)

Fig.3 Wear track (a, c) and 100 times enlargement (b, d) photographs of specimen blocks

### 3.2 环块摩擦副在石墨粉气流润滑状态下的摩擦磨损特性

由图 4a 可知：在恒速（200 r/min）状态下，试件块的磨损量及摩擦力随载荷的提高而增大；摩擦力波动幅度随着载荷的增大有增大趋势，由于在石墨粉气流润滑下，环块间保持线接触状态，随着载荷增大，在气体曳力作用下进入到环块摩擦副中的石墨粉末量有减小的趋势，使石墨颗粒间的摩擦过渡到环块表面间的直接接触，类似边界润滑作用。

由图 4b 可知：在石墨粉气流润滑状态下，环块间的摩擦系数总体上比较小，在载荷达 450 N 时，还不足 0.1。主要由于石墨粉末的剪切阻力很小，稍有外力，粉末间就会产生滑移，把环块表面间的摩擦转变为石墨粉末润滑剂间的摩擦。载荷 150 N 时，摩擦系数相对较大，主

要是因为试验开始阶段环块表面上微凸体接触变化剧烈导致摩擦力大所造成的，石墨粉末在此阶段主要存在于表面的凹坑处，因此没有起到明显的润滑效果；经过初始摩擦跑合后，环块表面粗糙峰逐渐磨平，实际接触面积逐渐加大，此阶段石墨粉气流能有效进入到环块实际接触区域，从而使其摩擦力减小；因此随着载荷增大，摩擦系数及其波动幅度减小。

由图 4c 可知：在石墨粉气流润滑状态下，随载荷的增加温度有所提高。相对传统固体润滑<sup>[10]</sup>或干摩擦而言，在粉气混合流润滑条件下，环块摩擦副间的温度比较低，在载荷达到 450 N 时，温度 < 50℃。除了石墨固体润滑剂良好的减摩作用外，高压空气吹入到环块接触间隙，直接起到冷却作用，另一侧的空气吸尘器及时吸走罩内空气，因此使试件块的温度比较低。

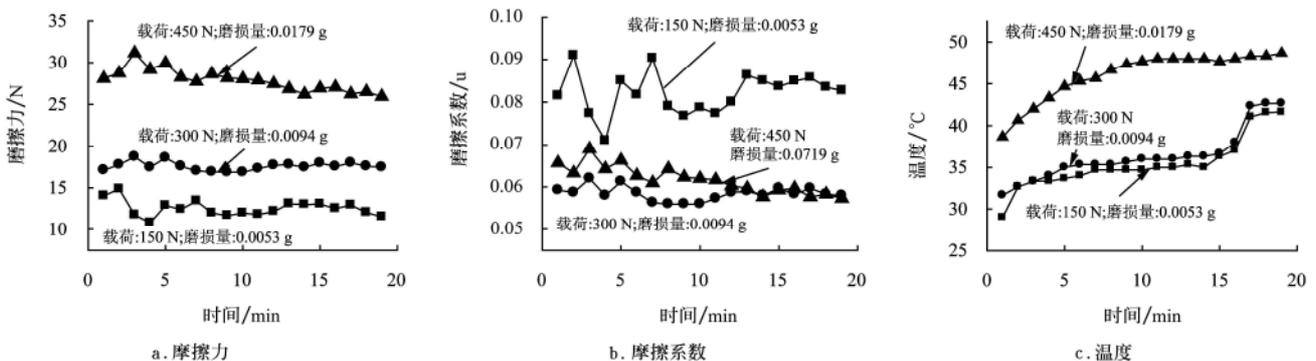


图 4 石墨粉气流润滑摩擦参数随时间变化曲线

Fig.4 Changes of parameters of graphite powder-gas flow lubrication friction with time

试验开始阶段的温升较快, 由于环块处于线接触状态, 环块表面间的摩擦不能有效的转换为石墨粉末间的摩擦所致。进入稳定磨损阶段, 石墨粉末具有良好的减摩作用及空气流导热使该阶段温度维持在一个相对稳定的范围内。

#### 4 结 论

1) 本研究中构建的喷粉试验装置是可行的, 能将粉气流持续稳定的输送到环块摩擦副中, 为研究粉末流润滑试验提供了有力保障, 进而为探索颗粒流润滑机理提供了条件。

2) 在石墨粉气流润滑状态下, 进入到环块摩擦副间的石墨粉末能够将环块表面间的摩擦转换为石墨颗粒间的摩擦, 起到良好的润滑作用。具体表现: 摩擦系数随着载荷增大有减小的趋势; 摩擦力随着载荷的提高而增大, 但总体上相对比较小; 磨损量也比较小, 试件块的磨痕呈细细的条状, 说明环块摩擦副在石墨粉气流润滑作用下能保持良好的线接触。

3) 由于石墨粉气流通过环块摩擦副时能将环块表面间的摩擦转换为石墨颗粒间的摩擦, 而石墨粉末具有良好的减摩作用使得环块间产生的摩擦热减少, 另外空气流的直接冷却作用使得环块摩擦副间的温度总体相对较低。因此本文对研究高温条件下如何有效降低摩擦副间的温度提供了一种试验依据。

#### [参 考 文 献]

- [1] 任 辉, 杨印生, 曹利江. 食品生命周期评价方法及其应用研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 19-22.
- [2] Heshmat H, Dill J F. Traction characteristics of high-temperature powder-lubricated ceramics( $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ )[J]. Trib Trans, 1992, 35(2): 360-366.
- [3] Heshmat H. Rolling and sliding characteristics of powder-lubricated ceramics at high temperature and speed[J]. Lubr

- Eng, 1993, 49(10): 791-797.
- [4] Heshmat H. The quasi-hydrodynamic mechanism of powder lubrication: part II -lubricant film pressure profile[J]. Lubr Eng, 1992, 48(5): 373-383.
- [5] Heshmat H, Brew D. Performance of powder-lubricated journal bearings with MoS<sub>2</sub> powder: experimental study of thermal phenomena[J]. ASME Tribol, 1995, 117(3): 506-512.
- [6] Heshmat H, Brew D. Performance of a powder lubricated journal bearings with WS<sub>2</sub> powder: experimental study[J]. ASME Tribol, 1996, 118(3): 484-491.
- [7] Kaur R G, Heshmat H. 100 mm diameter self-contained solid/powder lubricated auxiliary bearing operated at 30,000 rpm[J]. Lubr Eng, 2002, 58(6): 13-20.
- [8] Jeng Y R, Tsai H J. Grain-flow lubrication of finite-width slider bearings with rough surfaces[J]. Tribol Lett, 13(4): 219-232.
- [9] Tsai H J, Jeng Y R. Characteristics of powder lubricated finite-width journal bearings: A hydrodynamic analysis[J]. ASME Tribol, 2006, 128(2): 351-357.
- [10] Zhou L, Khonsari M M. Flow characteristics of a powder lubrication sheared between parallel plates[J]. ASME Tribol, 2000, 122(1): 147-155.
- [11] Yu C M, Tichy J. Granular collision lubrication [J]. Rheol, 1994, 38(4): 921-936.
- [12] Yu C M. Granular collisional lubrication: effect of surface roughness, particle size and solids fraction[J]. Trib Trans, 1996, 39(3): 537-546.
- [13] 王 伟, 刘小君, 刘 焜. 基于面接触的粉末润滑实验研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(11): 173-176.
- [14] Elkholy K N, Khonsari M M. Experimental investigation on the stick-slip phenomenon in granular collision lubrication[J]. ASME Tribol, 2008, 130(2): 021302.
- [15] Elkholy K N, Khonsari M M. Granular collision lubrication: experimental investigation and comparison to theory[J]. ASME Tribol, 2007, 129(4): 923-932.

## Establishment of experimental system and investigation of tribological properties of powder-gas flow lubrication

Wang Jiajun, Liu Xiaojun, Wang Wei, Liu Kun

(School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The purpose of this paper was to study the properties of powder-gas flow lubrication. An air compressor and oil-water separator were used to provide the high pressure dry air for the experimental equipment which was employed to transport powder-gas mixed flow to the tribo-pairs of a ring-block through a powder fluidization equipment. A series of lubrication experiments with the graphite powder as lubricant was performed based on Timken friction and wear tester. The results show that the device could provide stable and sustainable powder-gas mixed flow. The graphite powder-gas mixed flow injected into the tribo-pairs of a ring-block can make it keep good line contact and have a good lubrication function. Friction coefficient is below 0.1 while load is up to 450 N, and decreases with increasing of load. Friction force increases with the increase of load, but is relatively small. The wear is also relatively small, and wear track of the block presents fine strips. When passing the tribo-pairs of a ring-block, the graphite powder-gas mixed flow convert the friction between surfaces of ring and block into the friction between graphite particles, and most heat is taken away by means of the air current, thus the temperature of tribo-pairs is decreased effectively.

**Key words:** flow of graphite powder-gases, dry friction, lubrication, wear of materials