

【特约稿】

粉末润滑界面边界层状态微观形态观察和分析

田明, 王超, 杨斌, 刘焜

(合肥工业大学 机械工程学院, 合肥 230009)

摘要: **目的** 粉末润滑边界层状态预示着润滑条件的优劣。粉末颗粒以其良好的润滑性能和承载能力以及对极端工况的适应性, 被广泛应用于诸多领域, 因此需对粉末润滑界面的摩擦润滑性能展开深入研究。**方法** 利用 UMT-2 多功能摩擦磨损测试仪, 结合形状测量激光显微系统对粉末润滑界面边界层的微观形态进行观察和机理分析。重点研究载荷 (1、2、4、6 MPa)、速度 (2、4、8、16 r/min)、粉末层厚度 (1.5、3.5、5.5、7.5 μm) 以及表面粗糙度 (0.389、0.745、1.751、3.112 μm) 等工况条件对粉末润滑的影响机制。**结果** 较大的接触载荷有利于形成致密的边界层, 提高润滑性能。在速度较低时, 不利于形成完整、致密的边界层, 润滑较差, 甚至产生爬行现象, 随着速度的增加, 润滑效果改善, 但过大的速度又会加快粉末耗散。适量的粉末层厚度能够使摩擦界面间形成完整、厚实的边界层, 提供良好的润滑能力。粗糙度适当的表面有利于粉末润滑剂存储、边界层的形成以及润滑作用的维持。**结论** 合理选择接触载荷、速度、粉末层厚度以及试样表面粗糙度有助于提高粉末颗粒的润滑性能。

关键词: 粉末; 润滑界面; 边界层; 爬行; 摩擦; 微观形态

中图分类号: TH117.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0015-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.003

Microscopic Morphology Observation and Analysis of Boundary Layer State of Powder Lubrication Interface

TIAN Ming, WANG Chao, YANG Bin, LIU Kun

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

ABSTRACT: The boundary layer state of powder lubrication indicates the merits and weakness of the lubrication conditions. Powder particles with better lubrication performance and carrying capacity, as well as the good adaptability to extreme conditions, are widely used in many areas. Therefore, the friction and lubrication performance of the powder lubrication interface need studied deeply. With the use of UMT-2 friction and wear tester, the microscopic morphology of boundary layer state of the powder lubrication interface is observed and analyzed combined with shape measurement of laser microscopy. The influence mechanism of load condition (1, 2, 4, 6 MPa), velocity (2, 4, 8, 16 r/min), powder layer thickness (1.5, 3.5, 5.5, 7.5 μm) and surface roughness (0.389, 0.745, 1.751, 3.112 μm) on powder lubrication is studied emphatically. The larger contact load is favorable to form a dense boundary layer, improve the lubrication performance. In the low speed, is not conducive to the formation of a complete dense boundary layer, poor lubrication and even produce crawling phenomenon. With the increase of speed, lubrication effect improved, but too much speed will accelerate the powder dissipation. The appropriate amount of powder layer

收稿日期: 2017-05-15; 修订日期: 2017-06-05

Received: 2017-05-15; Revised: 2017-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51475135, 11472096)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51475135, 11472096)

作者简介: 田明 (1964—), 男, 工程师, 主要研究方向为摩擦学与表面工程。

Biography: TIAN Ming (1964—), Male, Engineer, Research focus: tribology and surface engineering.

thickness can form a complete thick boundary layer between the frictional interfaces, providing good lubrication ability. The surface with appropriate roughness is favorable for the powder lubricant storage, the formation of the boundary layer and the maintenance of the lubrication action. Reasonable choice of contact load, speed, powder layer thickness and sample surface roughness helps to improve the lubrication performance.

KEY WORDS: powder; lubrication interface; boundary layer; crawling; friction; microscopic morphology

摩擦界面的固体颗粒润滑很早就得到国内外学者的关注。针对严酷工况,如高温、高负荷、超低温、强氧化或还原气氛、强辐射等环境条件下,传统的油脂已不能实现有效润滑,甚至失去润滑能力,固体颗粒润滑的优点则显得十分突出。随着研究的深入,人们发现可以将干粉等固体颗粒润滑剂或者其他形式的固体颗粒导入摩擦副,使摩擦副间隙充满固体颗粒,利用微小颗粒的摩擦、变形、碰撞、挤压和滑滚等微观运动,减少做相对运动两表面上微凸体间的直接接触,从而达到减少摩擦磨损和保护表面的目的^[1-7]。此后,学者又对颗粒流润滑进行深入研究,对粒径较小、硬度相对较软、考虑粘附作用的一类颗粒展开探索。这种颗粒通过表面覆盖效应和类流体的速度适应机制减少摩擦磨损和保护表面,称之为粉末润滑^[8-11]。

建立试验装置研究外界参数条件变化对粉末润滑过程的影响,是探索粉末颗粒润滑机理的有效途径。学者们为探究粉末润滑剂的摩擦磨损性能做了大量的实验研究。Descartes 等^[12]设计了一台特殊的试验装置,研究在极低温下粉末颗粒的摩擦磨损行为,发现极低温下的摩擦系数较常温下稍高,在 123 K 时,材料的磨损寿命是常温下的 0.1 倍,在无氧气氛中,温度对摩擦值影响较小。Zeng 等^[13]研究了剪切粉末层电的转移能力。刘骅利^[14]为系统研究刹车片和制动盘摩擦副界面间第三体的成分对摩擦副润滑机理的影响,在 Q235 钢和 H13 钢组成的摩擦副间添加铜粉、铁粉、铝粉和 SiO₂ 等,分别研究了压力和速度对摩擦副摩擦磨损性能的影响。王伟^[15,16]等分别使用石墨、聚四氟乙烯、二硫化钼作为润滑剂,在不同材料、滑动速度、接触压力和颗粒粒径等参数条件下研究粉末润滑特性,结果表明,不同种类粉末的润滑效果不一,这与其本身性质有关。

目前对颗粒体在介微观尺度的作用机理的研究工作和成果较少,即边界层行为。粉末润滑界面中大量微空间的受限颗粒体,它们团聚、受剪、承载、迁移等行为使其在润滑界面的流动速度介于流体和固体表面之间,对摩擦学行为影响明显。本文对粉末润滑状态下载荷、速度等不同工况条件对界面润滑性能的影响机理展开了深入研究,着重对润滑界面边界层状态的典型微观形态进行观察与分析,为颗粒介质润

滑的应用提供依据。

1 试验

试验所选用的试验机是美国布鲁克公司生产的 UMT-2 多功能材料摩擦磨损测试仪,如图 1 所示。根据夹具特点,上试样被设计成直径为 6.22 mm 的圆柱销,材料为 45 钢,试验表面经过淬火处理,测得硬度可达到 54HRC,根据结构尺寸,加工成实物试件。下试样被制备成直径为 62 mm、厚为 5 mm 的铸铁圆饼,两表面经过磨床加工,平行度可达到 0.02 mm,铸铁型号为 HT250。

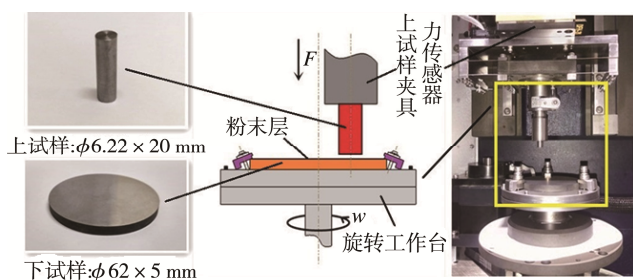


图 1 试样装夹示意图

Fig.1 Schematic diagram of tester

由图 1 可知,上试样放置在相应夹具中,两侧用紧定螺钉固定,上端连着力传感器,可以实时测量载荷及摩擦力大小,整个结构可随 Z 轴上下移动。下试样通过三个均匀分布的夹紧结构固定在旋转工作台上,旋转工作台的下端通过同步带连接伺服电机输出端。每次试验前,用相同型号的砂纸打磨上、下试件,并用丙酮清洗,喷涂一定厚度的石墨粉末,通过 Z 轴向下移动挤压高强刚片形成加载。试验后,利用形状测量激光显微系统(VK-X100K/X200K)对下试件摩擦表面的边界层状态进行重点观察。

本试验选用了美国 CRC 工业公司生产的干性耐高温喷罐装石墨润滑剂。该润滑剂石墨颗粒均匀,与溶剂充分混合,即喷即用且使用量容易控制,简单方便。当润滑剂喷涂到金属材料表面后,溶剂会自动溢平且快速挥发,干燥的石墨粉末将均匀地附着在材料表面。每喷涂一次,能够形成一层厚度约为 1.5 μm 的粉末层,喷涂多次可以达到一定厚度。另外,该润滑剂还具有不污染环境、容易被丙酮擦除及清洗等特

点。图 2 为利用激光粒度分析仪对石墨润滑剂的颗粒粒径进行测量所得的颗粒粒径分布图。

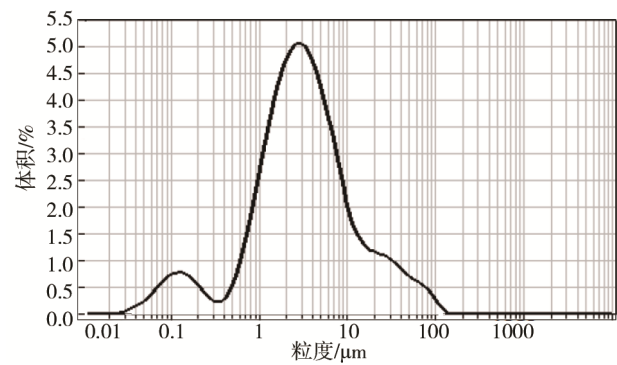


图 2 粉末颗粒粒径分布图
Fig.2 Size distribution of graphite particle

2 工况条件对试验后边界层微观典型形态的影响

2.1 接触载荷的影响

边界层即由石墨构成的松软粉末膜,在试验中隔离

了上下试件基体表面,在摩擦界面润滑方面起到了重要作用。图 3 为不同接触载荷下边界层的典型微观形态。由图 3a 可知,载荷较小时,下试样表面被粉末层完全覆盖,粉末层上出现成片类似于补丁一样的重叠区域,此为运动带过来的石墨在此处被压平后留下的痕迹,也存在石墨被运动带走后留下的凹坑以及石墨随运动向前蠕滑的痕迹。上述现象表明,在较低的载荷作用下,挤压形成的粉末层较为松弛,石墨粉很容易随着运动发生转移、堆叠,形成厚度不均且时刻变化的粉末层,不稳定的粉末层状态严重影响了颗粒的润滑性能。

当接触载荷逐步加大时,如图 3b 所示,下试样表面基本上仍被粉末层覆盖,其上类似于补丁状的重叠粉末层面积明显减少,且粉末层整体上较为平坦。这说明在相对较大的载荷作用下,挤压形成的粉末层较为致密,不易随运动转移,整体状态较为稳定,但存在小面积的石墨随运动滑移或堆叠现象。当接触载荷进一步加大至 6.0 MPa 时,挤压形成的粉末层更加致密光滑,其上有清晰划痕,粉末层与下试样的粘附更紧密,摩擦界面间形成了一层稳定的润滑膜,在摩擦润滑方面发挥了重要作用。

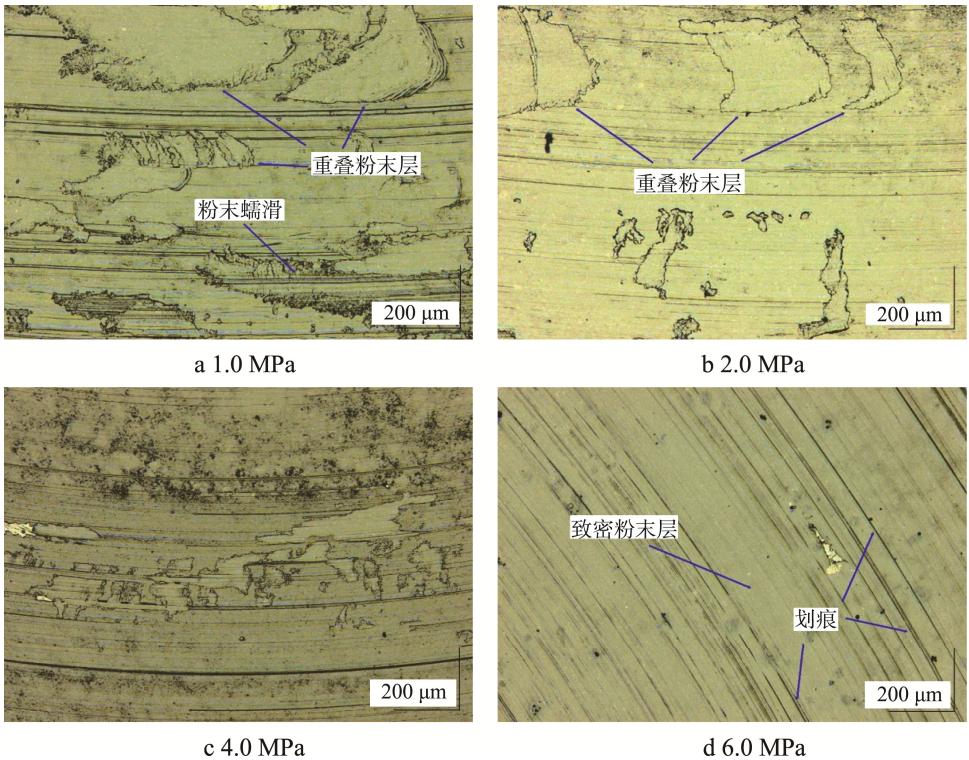


图 3 不同接触载荷下试验后边界层微观形态
Fig.3 Microscopic morphology of boundary layer after testing under different load

2.2 速度的影响

图 4 为不同转速下试验后下试件表面边界层典型状态的微观图。由图 4a 可知,当速度较低时,下试件表面边界层出现较多明显的纵向条状断痕及金

属基体裸露现象,这是摩擦界面发生粘着、滑行交替运动时留下的爬行痕迹,在粘结与滑行的跃迁瞬间石墨粉被带走,造成边界层突然断裂,爬行现象的出现说明此时摩擦问题较严重。图 4b 是速度为 4 r/min 时的微观图,在边界层表面可以观察到轻微的爬行痕

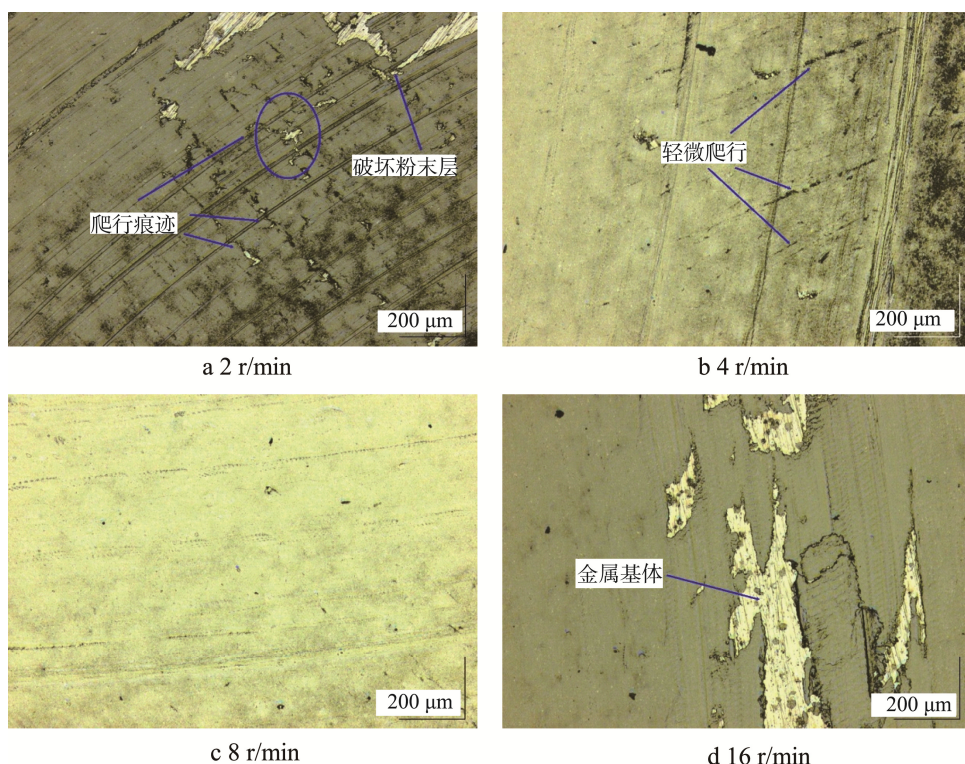


图4 不同转速下试验后边界层微观典型形态

Fig.4 Microscopic morphology of boundary layer after testing under different speed

迹,此时边界层较完整,均匀而平坦。当速度继续增大,如图4c所示,下试件表面形成了完整、致密的边界层,石墨粉在摩擦界面的剪切作用中发挥了良好的润滑作用,但仍有少许划痕现象。较大的速度有利于形成良好边界层,但同时也会加快粉末的耗散,如图4d中出现的片状边界层破坏,基体金属裸露,使得摩擦磨损问题严重。

2.3 粉末层厚度的影响

图5为不同粉末层厚度下试验后下试件表面边界层典型状态的微观图。由图5a可知,下试件边界层上观察到了清晰的条形纹理状爬行痕迹,部分区域出现点斑或块状金属基体裸露现象,说明边界层很薄;此外可以看到明显且较深的划痕,有的已触及基体,这可能是表面较大微凸体或粒径大的硬质颗粒在运动中团聚粉末颗粒所为。随着粉末层增厚,在载荷作用下,下试件表面形成了一层具有一定厚度的致密边界层,其覆盖了金属表面,整体较为平坦,状态稳定,良好的边界层在润滑方面起到关键作用,如图5b所示。

随着粉末层继续增加至 $5.5\text{ }\mu\text{m}$,由于粉末层脆性增加,粉末内部结合紧密性下降,边界层表面出现了明显的断裂,局部大面积粉末发生被向前挤压、断裂,甚至转移现象,如图5c所示,给提高摩擦界面的润滑能力埋下了隐患。图5d中石墨层厚度达到 $7.5\text{ }\mu\text{m}$,

粉末层发生明显脆性断裂,产生了大面积块状运动滑移、堆积现象,部分裸露出金属基体,因为较厚的边界层本身的脆性进一步提高,在载荷作用下,边界层内部的应力状况复杂多变,使得边界层极易被破坏,造成润滑条件变差。以上现象表明,适当的粉末层可以提供良好的润滑和承载能力。

2.4 试样表面粗糙度影响

图6为不同粗糙度下试验后下试件表面边界层典型状态的微观图。由图6a可知,表面粗糙度较小时,边界层状况较为复杂,表面有较多明显的划痕,这可能是粒径较大的硬质颗粒在粉末层上嵌滑,聚集粉末滑动留下的痕迹,有的甚至触及到金属基体。此外边界层很薄,可隐约看到下试件基体,说明粗糙度较小表面微凸体间隙很难储存粉末,难以维持边界层存在,较薄的粉末层很容易被破坏,最终导致润滑性能消失。当粗糙度增加到 $0.745\text{ }\mu\text{m}$ 时,边界层依然较薄,表面有清晰的划痕。

随着粗糙度达到 $1.751\text{ }\mu\text{m}$ 时,如图6c所示,边界层厚度明显增加,划痕也有所变浅,说明具有一定粗糙度的表面有利于粉末润滑剂的储存,从而维持边界层的存在,提供良好的润滑性能。图6d中粗糙度为 $3.112\text{ }\mu\text{m}$,图中有颜色较深和较浅的区域,并有明显的爬行痕迹。较深的黑色区域是运动未接触到,较浅的灰色是较高的区域接触摩擦形成的,说明摩擦界

面凹凸不平，因粗糙度较大，摩擦界面的真实接触面积较小，摩擦界面的运动主要发生在接触变形的粗糙峰之间，严重时产生爬行现象，出现局部边界层随试

件突然向前跃迁留下的脆性断裂痕迹。由此可见，粗糙度适当的表面对粉末润滑剂存储、边界层的形成、润滑作用的维持是有利的。

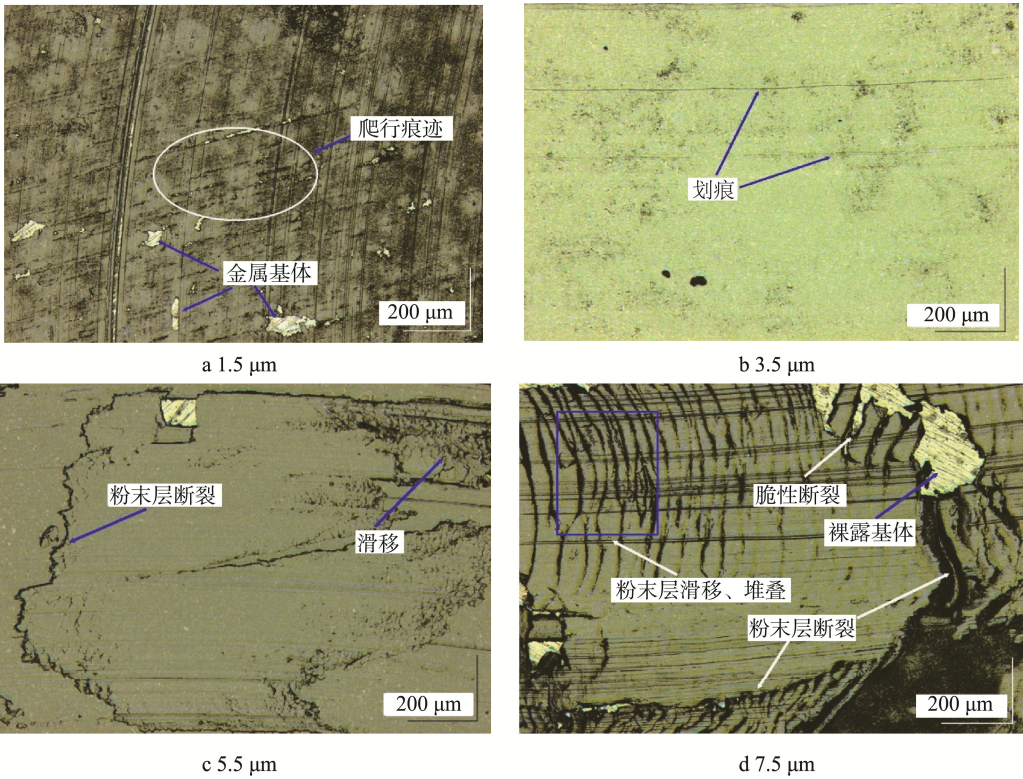


图 5 不同粉末层厚度下试验后边界层微观典型形态
Fig.5 Microscopic morphology of boundary layer after testing under different powder thickness

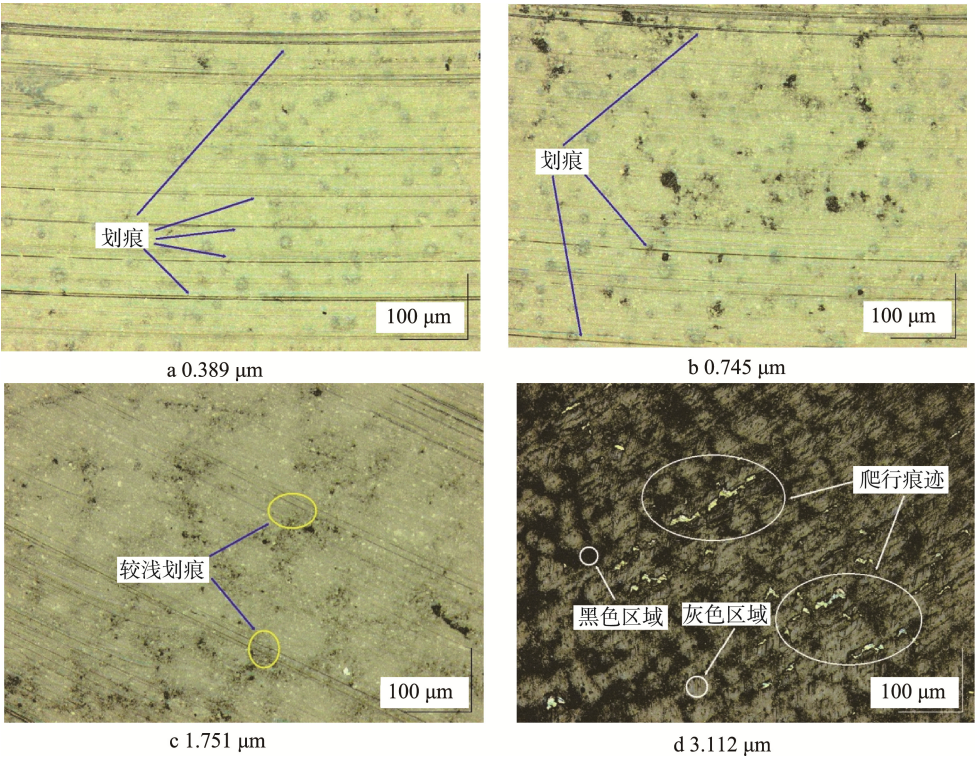


图 6 不同粗糙度下试验后边界层表面微观典型形态
Fig.6 Microscopic morphology of boundary layer after testing under different surface roughness

3 结论

1) 在较大的接触载荷作用下,形成的边界层较为致密,润滑性能较好。速度较低时,边界层状态复杂,发生粘着、滑行交替的爬行现象。速度增大,有助于提高边界层表面质量和润滑能力,但速度过大时,会加快粉末耗散,产生严重的摩擦磨损问题。

2) 适当的粉末层能提供良好的润滑能力,提高承载能力。较薄的粉末层无法形成有效润滑膜,会产生爬行现象;较厚粉末层形成的边界层较厚,脆性增加,极易被破坏,润滑性能较差。

3) 在粗糙度较小时,相对较大的粉末不易在表面储存,无法形成有效润滑层;在粗糙度过大时,突出的微凸体最先接触变形,破坏边界层,严重影响粉末的润滑性能。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(2): 1345—1360.
- [3] 邹济林. 二硫化铂在机械设备润滑和机械加工中的应用[J]. 表面技术, 1998, 27(5): 36—40.
ZOU Ji-lin. Application of Platinum Disulfide in Mechanical Equipment Lubrication and Machining[J]. Surface Technology, 1998, 27(5): 36—40.
- [4] ERDEMIR A. Crystal Chemistry and Solid Lubricating Properties of the Monochalcogenides Gallium Selenide and Tin Selenide[J]. STLE Tribol Trans, 1994, 37(3): 471—478.
- [5] HESHMAT H, GODET M, BERTHIER Y. On the Role and Mechanism of Dry Triboparticulate Lubrication[J]. Lubr Eng, 1995, 51(7): 557—564.
- [6] HIGGS C F, HESHMAT H. Characterization of Pelletized MoS₂ Powder Particle Detachment Process[J]. Journal of Tribology, 2001, 123: 455—461.
- [7] 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.
- [8] WANG W, LIU Y, ZHU G Q, et al. Using FEM-DEM Coupling Method to Study Three-body Friction Behavior[J]. Wear, 2014, 318(1/2): 114—123.
- [9] JIN X L, ZHANG L C. A Statistical Model for Material Removal Prediction in Polishing[J]. Wear, 2012, 274/275(1): 203—211.
- [10] 韩晓明, 高飞, 符蓉. 三体摩擦体系中材料摩擦特性的研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(2): 8—13.
HAN Xiao-ming, GAO Fei, FU Rong. Recent Progress in Tribological Theories Involving the Behavior of the Third Body[J]. Materials China, 2009, 28(2): 8—13.
- [11] ESMAEILIAN B, BEHDAD B. The Evolution and Future of Manufacturing: A Review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 39: 79—100.
- [12] DESCARTES S, GODEAU C, BERTHIER Y. Friction and Lifetime of a Contact Lubricated by a Solid Third Body Formed from an MoS_{1.6} Coating at Low Temperature[J]. Wear, 2015, s330/331: 478—489.
- [13] ZENG C, RENOUF M, BERTHIER Y, et al. Numerical Investigation on the Electrical Transmission Ability of a Shearing Powder Layer[J]. Granular Matter, 2016, 18(2): 1—7.
- [14] 刘骅利. 外源第三体对材料摩擦性能的影响[D]. 大连: 大连交通大学, 2012.
LIU Hua-li. Effect of Exogenous Third Body Powders on the Friction Properties of Brake Pad[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2012.
- [15] WANG W, LIU X, XIE T, et al. Effects of Sliding Velocity and Normal Load on Tribological Characteristics in Powder Lubrication[J]. Tribology Letters, 2011, 43(2): 213—219.
- [16] YANG B, WANG W, LIU K, et al. Observation and Analysis of Micro-behavior Characteristics and Element Contents during Boundary Layer Evolution under Powder Particulate Lubrication[J]. Tribology Letters, 2016, 64(1): 2.