

Numerical Simulation of the Effect of Sliding Speeds on Tribological Properties of Copper Matrix Graphite Composite

Liuyang Ma, Yajun Chen, Ting Xie

Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui
Email: 2597051397@qq.com

Received: May 27th, 2020; accepted: Jun. 10th, 2020; published: Jun. 17th, 2020

Abstract

It was studied that effect of sliding velocity on the dynamic evolution of graphite on the friction surface and tribological behavior of copper matrix graphite composite by discrete element software. The sliding friction model has been established between the copper matrix graphite composite with 45 steel. It is showed that graphite particles on the friction surface undergo two stages of formation and stabilization. The higher the sliding speed is, the faster the number of graphite particles on the friction surface reaches the dynamic stability state. Under the higher speed, the graphite lubrication layer is difficult to form effectively on the worn surface, accelerating the process of its shedding. As a final result, the friction coefficient is bigger and the wearing capacity is more.

Keywords

Sliding Speed, Copper Matrix Graphite Composite, Discrete Element, Graphite, Wear

滑动速度对铜基石墨复合材料摩擦特性影响的数值模拟

马刘洋, 陈亚军, 解 挺

合肥工业大学摩擦学研究所, 安徽 合肥
Email: 2597051397@qq.com

收稿日期: 2020年5月27日; 录用日期: 2020年6月10日; 发布日期: 2020年6月17日

摘要

采用离散元软件建立了铜基石墨复合材料与45钢滑动摩擦模型,研究了滑动速度对摩擦面上石墨动态演变和铜基石墨复合材料摩擦学行为的影响。结果表明:摩擦面上石墨颗粒经历形成和稳定二个阶段,滑动速度越大,摩擦面上石墨颗数越快达到动态稳定状态。滑动速度增大,石墨润滑层难以在磨损表面有效形成,加速了其脱落的进程,导致摩擦因数增大,磨损量增加。

关键词

滑动速度,铜基石墨复合材料,离散元,石墨,磨损

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铜基石墨复合材料具有优良的力学性能、抗氧化、耐腐蚀和耐磨损等特性,在机械、电气、航空航天等领域得到广泛应用[1] [2] [3]。研究表明,摩擦过程中石墨可以在摩擦面上形成润滑膜,降低摩擦界面剪切强度,减少材料磨损[4]。石墨含量、粒度等条件改变对铜基石墨复合材料的摩擦学性能造成较大影响[5] [6] [7]。此外载荷、速度也会影响材料的摩擦学行为,相同载荷下,较高的滑动速度可能会破坏石墨润滑膜,加剧材料磨损[8]。

摩擦界面的性质直接影响材料的耐磨性[9]。目前对铜基石墨复合材料摩擦磨损的研究多采用试验法,难以直接观察摩擦面上石墨的演变过程,滑动速度与摩擦界面性质的关系也研究较少[10]。这些可以通过数值模拟的方法进行探讨。本文拟采用离散元方法,建立铜基石墨复合材料与45钢摩擦模型,研究高速、中速和低速三种滑动速度对摩擦面上石墨的动态演变以及成膜的影响,这对于优化复合材料设计及其摩擦学性能具有很好的指导意义。

2. 数值模型建立

2.1. 滑动模型建立

选择10vol%石墨填充量的铜基石墨复合材料为上试样(其中黄色颗粒是铜,黑色颗粒是石墨,粒径均为 $30\ \mu\text{m}$),尺寸为 $2.5\ \text{mm} \times 1.2\ \text{mm}$;下试样为45钢,由半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的蓝色颗粒紧密排列形成,尺寸为 $7.8\ \text{mm} \times 0.8\ \text{mm}$,滑动模型如图1所示。上试样在水平方向运动受到限制,受到一个竖直向下的5 MPa外加载荷,载荷通过50个粉红色刚性颗粒组成的颗粒体边界施加。下试样45钢作均速往复运动。这样就构成本文摩擦系统:上试样在竖直向下压力下,相对于下试样作水平匀速往复摩擦运动。

2.2. 模型参数的选择

与连续介质分析方法将材料视为均匀地各项同性或各项异性材料不同,由于铜与石墨性质差异大,模型分别对基体铜颗粒和润滑相石墨颗粒赋予不同的性能参数,设置颗粒与颗粒间的粘结强度,将独立的颗粒“粘”成一个整体,通过颗粒间的综合作用来体现宏观材料的性质。为了获得模型参数,利用离

散元软件的双轴实验程序模拟材料, 采取逆向模拟, 获得与实际材料基本一致的力学性能[11]。铜、石墨和 45 钢颗粒的参数如表 1 所示, 表中铜颗粒间的法向和切向粘结强度分别为 200 MPa、157 MPa; 石墨颗粒间的法向和切向粘结强度分别为 60 MPa 和 16.1 MPa。离散元中不同颗粒间存在粘结键时一般取接触的两颗粒粘结强度的平均值, 粉末冶金铜基石墨复合材料中由于采用加压、烧结、复压、复烧等工艺提高了铜与石墨的结合强度, 经双轴实验参数标定程序确定铜与石墨颗粒间粘结键的法向和切向粘结强度分别为 180 MPa 和 141 MPa。

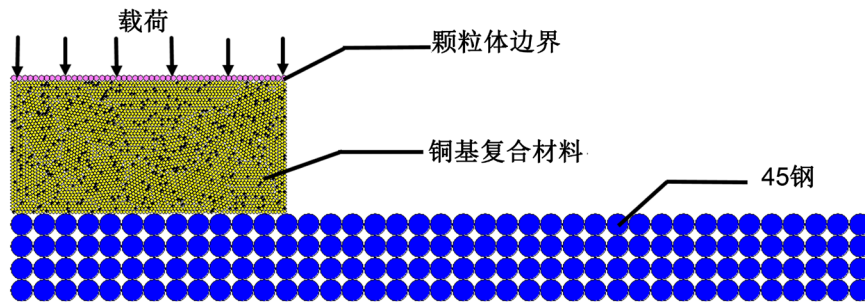


Figure 1. Numerical model of copper matrix graphite composite sliding against 45 steel
图 1. 铜基石墨复合材料与 45 钢滑动数值模型

Table 1. Microparameters of Cu particles, graphite particles and 45 steel

表 1. 铜颗粒、石墨颗粒和 45 钢的参数

颗粒参数	铜颗粒	石墨颗粒	45 钢	铜与石墨颗粒
密度/(kg·m ⁻³)	8700	2200	7800	-
法向接触刚度/(N·m ⁻¹)	6e10	1e10	2e11	-
切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	6e10	8.8e9	2e11	-
法向粘结强度/MPa	200	60	-	180
切向粘结强度/MPa	157	16.1	-	141
摩擦系数	0.5	0.1	0.5	-
空隙率	0.12	-	-	-

3. 模拟结果与讨论

3.1. 摩擦速度对摩擦磨损的影响

图 2 为三种滑动速度下摩擦面上石墨颗粒数与磨损颗粒数变化曲线图, 由于模型中铜颗粒与石墨颗粒粒径相同, 此处使用磨损颗粒数等效表示磨损量。可以看出, 摩擦面上石墨颗粒数和磨损颗粒数初始增速较快, 随后增速变缓并处于波动状态。这主要与摩擦面上石墨颗粒的聚集成润滑层有关。两块材料滑动时石墨颗粒移动到摩擦面覆盖在材料的磨损表面, 就会起到减摩的作用。摩擦初始阶段, 铜基石墨复合材料与 45 钢滑动直接接触, 磨损较严重。随着摩擦进行, 铜基石墨复合材料中润滑相石墨在摩擦挤压力作用下不断向摩擦界面运动, 摩擦面上石墨颗粒增多, 石墨的润滑减摩效果增强, 材料的磨损速度减弱, 摩擦面上石墨颗粒数增速变缓。磨损中后期石墨薄膜基本形成, 基体中迁移到摩擦表面的石墨不断补充磨损中被破坏的石墨膜, 使得摩擦面内石墨颗粒数处于动态稳定状态, 铜基石墨复合材料的磨损也进入稳定磨损阶段, 磨损速率基本不变。

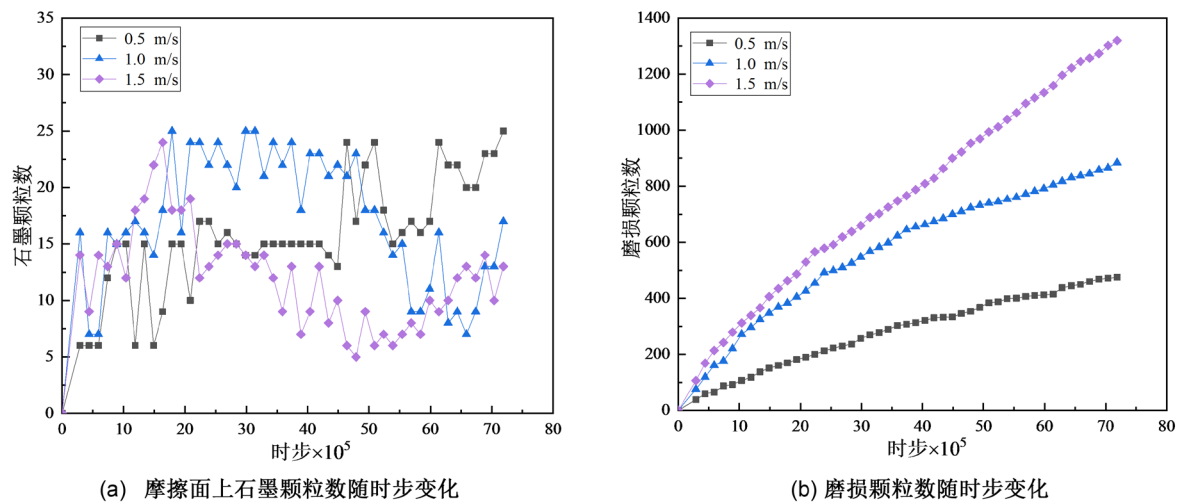


Figure 2. Number of graphite particles in the friction surface and wear particles of the copper based graphite composite at different sliding speeds

图 2. 不同滑动速度下摩擦面上石墨颗粒数与铜基石墨复合材料磨损颗粒数

图 2(a)为摩擦面上润滑相石墨颗粒数随时步的变化趋势,可以看出,随着滑动速度增大,摩擦面上石墨颗粒数达到稳定状态的速度较快,低速下(0.5 m/s)需要花费更多的时间(5×10^6 时步以后)摩擦面上石墨颗粒数才能达到相对稳定状态。这是因为相同时间内,相对滑动速度小的摩擦副滑动距离近,磨损量相对较小,摩擦面上石墨颗粒数也较少,形成完整石墨润滑膜需要的时间也就越长。图中也可以看出摩擦面上石墨层形成后,随着滑动速度增大,摩擦面上石墨颗粒数减少。这是因为铜基石墨复合材料在 45 钢表面微凸体的作用下发生磨损,磨屑覆盖在摩擦界面,摩擦界面中颗粒经过反复滑动挤压,形成一层含石墨的润滑层。滑动速度提高,加速了铜-石墨摩擦面上颗粒的脱落,使得摩擦面上石墨含量减少。

图 2(b)为磨损颗粒数随时步的变化趋势。可以看出,滑动速度增大,导致铜基石墨复合材料磨损量的增加。分析认为相对滑动速度增大,使得磨损颗粒易于从摩擦界面中脱落,摩擦面上颗粒数减少,使得摩擦副间直接接触增加,使得磨损量增加。此外,摩擦面上石墨颗粒数减少,造成石墨润滑效果的减弱,使得材料磨损速度增大,磨损量增加。

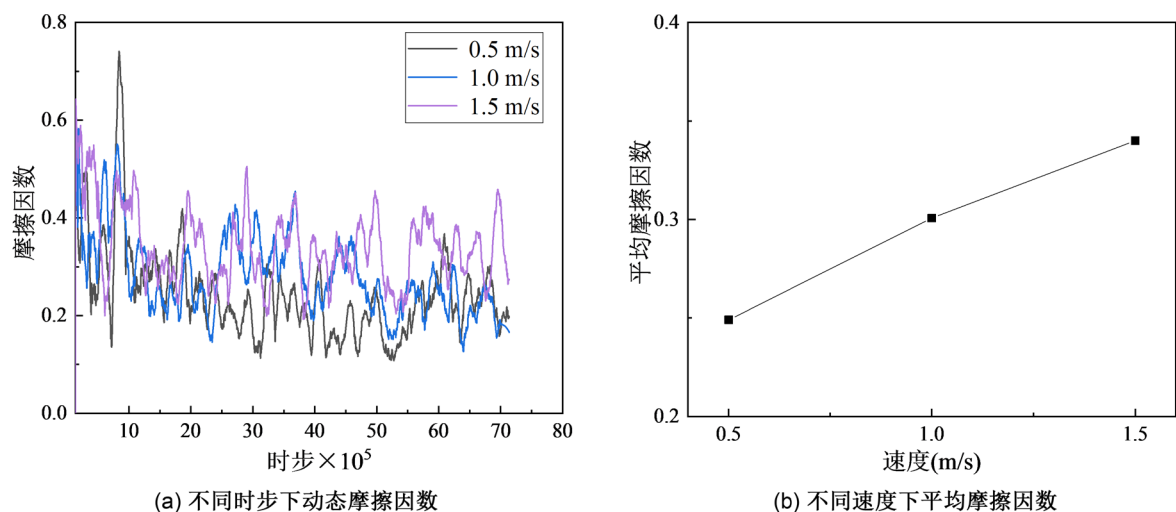


Figure 3. Friction coefficients at different sliding speeds

图 3. 不同滑动速度下摩擦因数

3.2. 滑动速度对摩擦因数的影响

图 3 为不同滑动速度下的摩擦因数, 其中图 3(a)为不同时步下动态摩擦因数, 图 3(b)为不同速度下平均摩擦因数。图 3 中可以看出滑动速度增大, 摩擦因数波动较大, 平均摩擦因数也随着增大。这主要由于滑动速度增大, 一方面造成摩擦面上石墨含量减少, 石墨润滑效果的减弱, 使得平均摩擦因数增大; 另一方面较高的滑动速度使得铜基石墨复合材料的磨损加剧, 造成摩擦副接触面的粗糙度增大, 摩擦因数发生较大波动, 使得平均摩擦因数增大。

4. 研究结论

1) 摩擦面上石墨颗粒经历过渡和稳定状态两个阶段, 滑动速度越大, 摩擦面上石墨颗数越快达到相对稳定状态。

2) 滑动速度增大, 导致石墨润滑层难以在材料磨损表面形成, 加速润滑颗粒的脱落, 使得摩擦面上达到稳定状态的石墨颗粒数减少, 降低了石墨的润滑减摩效果, 使得摩擦因数增大, 造成磨损量的增加。

基金项目

央校基本科研业务费“应用成果培育计划项目”(JZ2019YYPY0292)。

参考文献

- [1] 邹芹, 黄洪涛, 王明智. 金属基滑动轴承材料研究进展[J]. 燕山大学学报, 2016, 40(1): 1-8.
- [2] 陈爱华, 闫晨, 孟志立. 铜基复合材料制备及研究新进展[J]. 中国冶金, 2019, 29(2): 7-11.
- [3] 刘林, 朱林英, 易茂中, 等. 镀铜石墨粉含量对 Cu/C 复合材料组织和性能的影响[J]. 碳素技术, 2017, 36(6): 29-33.
- [4] 商剑, 张越, 刘亮. 含石墨转移层对铜-二氧化硅/钢摩擦磨损行为的影响[J]. 润滑与密封, 2015, 40(6): 46-49.
- [5] 陈如诗, 肖柱, 戴杰, 等. 铜-石墨复合材料性能与石墨形状和粒径的相关性研究[J]. 有色金属材料与工程, 2019, 40(5): 1-7.
- [6] Moustafa, S.F., El-Badry, S.A., Sanad, A.M., *et al.* (2002) Friction and Wear of Copper-Graphite Composites Made with Cu-Coated and Uncoated Graphite Powders. *Wear*, **253**, 699-710. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00038-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00038-8)
- [7] 冉旭, 黄显峰, 段利利, 等. 铜-石墨复合材料的摩擦学性能和磨损机理[J]. 材料导报, 2012, 26(8): 33-38.
- [8] Ma, W.L. and Lu, J.J. (2011) Effect of Sliding Speed on Surface Modification and Tribological Behavior of Copper Graphite Composite. *Tribology Letters*, **41**, 363-370. <https://doi.org/10.1007/s11249-010-9718-x>
- [9] Berthier, Y., Descartes, S., Busquet, M., *et al.* (2004) The Role and Effects of the Third Body in the Wheel-Rail Interaction. *Fatigue Fracture of Engineering Material Structure*, **27**, 423-436. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2004.00764.x>
- [10] 陈伟东, 邹芹, 李艳国, 等. 自润滑轴承摩擦学性能数值模拟的研究进展[J]. 轴承, 2019(10): 58-67.
- [11] Users' Manual for Particle Flow Code in 2 Dimensions (PFC2D). Version 3.1. CG Itasca-Minnesota.