

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.09.007

# 基于离散元研究石墨对铜基石墨复合材料摩擦磨损性能的影响

孟响, 解挺, 陈堃, 张龙肖, 徐建, 李文博

(合肥工业大学机械工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要:**文章利用离散元二维颗粒流程序(PFC2D)建立铜基石墨复合材料和45#钢摩擦副数值模型,基于环-块滑动接触方式,研究摩擦过程中摩擦界面动态变化规律及石墨粒径和体积分数对复合材料摩擦磨损性能的影响。结果表明:复合材料和45#钢摩擦过程中,在摩擦表面逐渐形成石墨润滑层,使得摩擦副的接触由金属与金属接触逐渐转变为石墨与金属接触;随着时步数增加,材料摩擦系数整体下降并达到稳定;石墨粒径增加,摩擦系数增大,磨损量先减少后增多,石墨粒径为 $18\mu\text{m}$ 时,磨损量最少为 $1.65\times 10^{-8}\text{m}^3$ ;石墨体积分数增多,材料摩擦系数降低,磨损量先减少后增多,石墨体积分数为12%时,磨损量最少为 $1.61\times 10^{-8}\text{m}^3$ 。

**关键词:**离散元;铜基石墨复合材料;石墨粒径;石墨体积分数;摩擦磨损性能

**中图分类号:** TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)09-1191-06

## Effect of graphite on friction and wear properties of copper matrix graphite composites based on discrete element method

MENG Xiang, XIE Ting, CHEN Kun, ZHANG Longxiao, XU Jian, LI Wenbo

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

**Abstract:** The numerical model of copper matrix graphite composite and 45# steel friction pair was established by two-dimensional particle flow code (PFC2D). Based on the ring-block sliding contact mode, the dynamic change law of friction interface during friction process and the influence of graphite particle size and volume fraction on the friction and wear properties of the composite material were studied. The results showed that the graphite lubrication layer was gradually formed on the friction surface of the composite material and 45# steel during the friction process, and the contact between the friction pair was gradually transformed from metal and metal contact to graphite and metal contact. With the increase of time steps, the friction coefficient of the material decreased as a whole and reached a stable fluctuation. With the increase of graphite particle size, the friction coefficient increased, and the wear amount first decreased and then increased. When the graphite particle size was  $18\mu\text{m}$ , the minimum wear amount was  $1.65\times 10^{-8}\text{m}^3$ . With the increase of the graphite volume fraction, the friction coefficient of the material decreased, and the wear amount first decreased and then increased. When the graphite volume fraction was 12%, the minimum wear amount was  $1.61\times 10^{-8}\text{m}^3$ .

**Key words:** discrete element; copper matrix graphite composite; graphite particle size; graphite volume fraction; friction and wear properties

收稿日期:2022-05-13;修回日期:2022-05-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575151)

作者简介:孟响(1995—),男,安徽宿州人,合肥工业大学硕士生;

解挺(1963—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: txie@hfut.edu.cn.

铜基石墨复合材料具有良好的机械性能、导热性、耐磨性和耐腐蚀性等综合性能,在机械、轨道交通、航空航天等领域得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。长期以来,石墨对铜基石墨复合材料摩擦磨损性能的影响受到广泛关注<sup>[5-8]</sup>。学者关于石墨粒径和含量对铜基石墨复合材料的影响进行了较多研究。文献[9]研究石墨含量及粒度对铜-镀铜复合材料摩擦性能的影响,结果表明随着石墨含量的增多,材料密度减小,石墨粒度小的复合材料的致密度较高,而粒度大的复合材料具有更好的摩擦性能;文献[10]研究表明,材料的性能随石墨粒径的增大存在一个最佳状态,石墨粒径为 30  $\mu\text{m}$  时,材料的磨损量最少,硬度和密度达到最大值;文献[11]研究发现,随着石墨粒径由 4  $\mu\text{m}$  增大到 19  $\mu\text{m}$ ,铜-石墨复合材料摩擦系数、硬度和致密度均逐渐升高,磨损量逐渐减少;文献[12]研究结果表明,石墨含量增加,铜基体的连续性有所降低,磨损量和动摩擦系数均先增加后减小,石墨质量分数为 16% 时,具有最好的摩擦性能;文献[13]研究发现适当含量石墨的加入可以提高摩擦系数的大小和稳定性,然而过量颗粒石墨的加入可使摩擦系数显著下降;文献[14]研究表明,石墨含量增加,磨损率表现为先降低再升高的趋势,摩擦系数逐渐下降,石墨含量为 6% 时,磨损率最小。

上述研究结果表明,石墨粒径及含量均存在一个最佳值,合理选择石墨粒径和含量可使材料具有良好的摩擦学特性。以上学者研究石墨对复合材料的影响采用摩擦磨损实验的方式进行探究,主要研究的是复合材料宏观的摩擦性能,关于其重要的自润滑机理的分析只是根据最终结果进行推测,而其自润滑膜的动态形成过程无法了解。鉴于实验研究方法在这方面的不足,利用数值模拟可以很好地分析其动态过程,这对于优化材料性能至关重要。常见的数值模拟研究方法主要包括有限单元法、离散单元法、分子动力学方法等<sup>[15-17]</sup>。利用粉末冶金制备的铜基石墨复合材料由颗粒体系组成,比较适合选用离散元方法<sup>[18]</sup>。文献[19]利用离散元方法在这方面开展初步研究,其基于往复式滑动摩擦形式研究石墨含量对铜基滑动轴承材料摩擦学性能的影响。

鉴于铜基石墨复合材料多用作滑动轴承材料时的接触形式为环-块滑动接触,为了更贴合实际,本文采用环-块式滑动接触模型。此外,本文采用石墨颗粒团聚体大小来模拟石墨的尺寸大小,至今相关报道不多。因此,本文采用离散元方

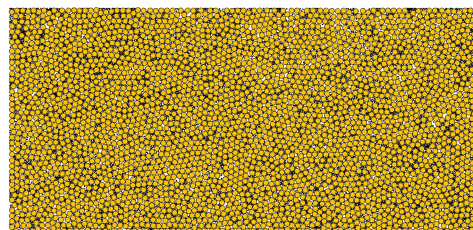
法建立铜基石墨复合材料/45# 钢环-块滑动接触数值模型,探究摩擦过程中摩擦表面石墨润滑层的动态演变规律以及石墨粒径和体积分数对铜基石墨复合材料摩擦磨损性能的影响,对优化复合材料的设计和提高了其摩擦学性能具有重要意义。

## 1 数值模型的建立

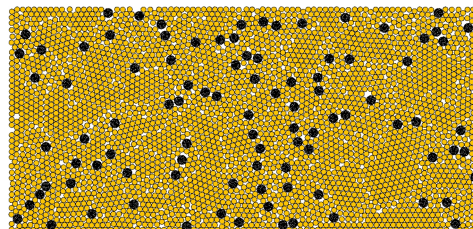
### 1.1 铜基石墨复合材料模型的建立

为了更加贴合实际,用石墨的团聚体大小来模拟试样中石墨的尺寸大小,石墨团聚体由若干个粒径为 6  $\mu\text{m}$  石墨颗粒组成,本文提及的石墨粒径即为该石墨团聚体。

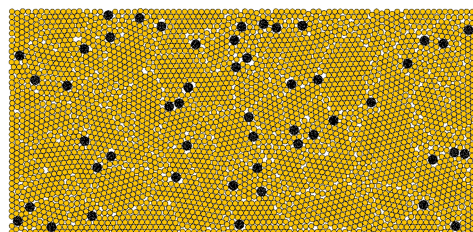
在模型建立中,选择石墨粒径  $R$  分别为 6、18、30、42、54  $\mu\text{m}$ ,石墨体积分数  $\varphi$  分别为 6%、8%、10%、12%、14% 对铜基体进行填充,铜颗粒是粒径为 30  $\mu\text{m}$  的刚性颗粒体,石墨颗粒在铜基体中随机均匀分布,接触模型采用平行黏结模型,复合材料模型生成采用半径放大法,如图 1 所示。



(a)  $\varphi=10\%$ ,  $R=6\ \mu\text{m}$



(b)  $\varphi=10\%$ ,  $R=54\ \mu\text{m}$



(c)  $\varphi=6\%$ ,  $R=54\ \mu\text{m}$

图 1 铜基石墨复合材料模型

图 1 中:黑色颗粒为石墨颗粒;黄色颗粒为铜颗粒。从图 1a、图 1b 可以看出,石墨粒径越大,石墨聚集现象越明显。从图 1b、图 1c 可以看出,石墨体积分数越多,石墨分布越密集。铜基石墨复合材料模型建立后进行粉末冶金数值模拟,以

获得更贴近真实的数值模型。

### 1.2 滑动摩擦副模型的建立

基于环-块滑动接触特征,选取摩擦接触表面区域最小单元作为研究对象建立模型。建立铜基石墨复合材料与45#钢的滑动摩擦副模型,如图2所示。上试样为45#钢。由于模型中45#钢粒径过大时,计算时间长;45#钢粒径过小时,不能充分反映摩擦界面动态变化。为了体现材料本身粗糙度<sup>[20]</sup>,经过多次模拟尝试,最终选择130个粒径为1mm的灰色颗粒在直径10mm的圆上环形等距排列所组成,粗糙度 $R_z$ 为14.6 $\mu\text{m}$ 。在模拟中,上试样被施加恒定的速度 $v$ 和载荷 $F$ ,作逆时针旋转运动。在模拟中不考虑45#钢的磨损。

下试样为铜基石墨复合材料,尺寸大小为2.5mm $\times$ 1.2mm,下试样位置保持不动。因此建立滑动摩擦副模型的运动系统,即45#钢被施加恒定载荷和速度,相对于铜基石墨复合材料作逆时针转动,实现摩擦副间的滑动。

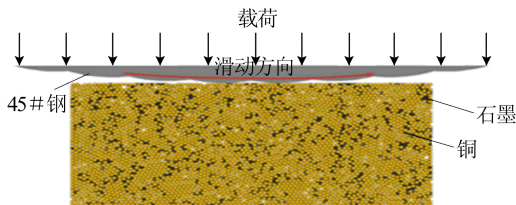


图2 摩擦副模型

### 1.3 微观参数的确定

二维颗粒流程序(PFC2D)中模型细观参数式通过双轴压缩试验来完成<sup>[21-22]</sup>。当模拟所建模型通过双轴压缩试验得到的应力-应变曲线能够很好地反映真实试验条件下样品的应力-应变曲线时,可将该微观参数建立的模型来模拟材料真实的力学行为<sup>[23]</sup>。铜、石墨和45#钢的细观力学参数见表1所列。

表1 铜、石墨和45#钢细观力学参数

颗粒参数	铜	石墨	45#钢
颗粒密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	8 700	2 200	7 800
颗粒半径/ $\mu\text{m}$	15	3	500
摩擦系数	0.20	0.10	0.36
颗粒有效模量/( $10^9$ Pa)	100	15	200
平行黏结模量/( $10^9$ Pa)	100	15	
黏结刚度比	2.10	1.56	
颗粒刚度比	2.10	1.56	
切向黏结强度/MPa	160	40	
法向黏结强度/MPa	200	54	

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 摩擦磨损的动态演变过程

不同时步条件下,45#钢/铜基石墨复合材料相对滑动摩擦磨损动态演变过程如图3所示。该模拟条件选择45#钢滑动速度0.2m/s、施加载荷10N、石墨粒径30 $\mu\text{m}$ 以及石墨体积分数10%。

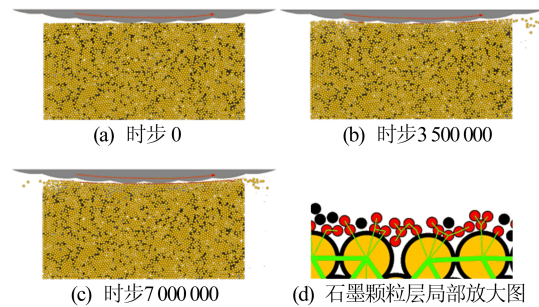


图3 不同时步下摩擦磨损动态演变过程

从图3a可以看出,石墨颗粒随机均匀地分布于复合材料内部,颗粒与颗粒间的黏结键未发生断裂,摩擦副的接触主要是金属与金属的接触。从图3b可以看出:摩擦界面处复合材料颗粒间的黏结键发生断裂,材料内部石墨颗粒逐渐向摩擦表面运动,摩擦表面磨损颗粒数与石墨颗粒数逐渐增多;由于摩擦副力的作用,石墨在摩擦表面形成新的接触;由于石墨本身具有润滑特性,该红色石墨颗粒层具有减摩润滑性能;一旦石墨颗粒与材料表面形成黏结力(图3d),即为石墨润滑层,石墨颗粒便会变成红色颗粒,该红色颗粒能够明显地与基体内石墨本身的颜色进行区分,以便研究石墨润滑层的状态,最终在摩擦界面形成不完整的石墨润滑层。由图3a、图3b可知,摩擦副的接触由金属与金属接触转变为石墨颗粒与金属接触,但仍存在部分铜颗粒与45#钢接触。从图3c可以看出,材料内颗粒间的黏结键进一步断裂,摩擦表面的磨损颗粒数和石墨颗粒数逐渐增多,最终在摩擦表面形成完整的石墨润滑层。与图3b相比,红色石墨颗粒增多,摩擦界面处石墨颗粒层几乎将材料与45#钢隔开,摩擦副的接触转变为石墨颗粒与金属接触。从图3d可以看出,黄色颗粒为铜颗粒,黑色颗粒为未与复合材料表面形成黏结键的石墨颗粒,成为磨屑颗粒。对于以上演变过程分析认为,由于摩擦力与外力的作用,颗粒间的黏结键发生断裂,具有黏结键较弱的石墨颗粒在内部颗粒间的相互挤压作用逐渐向摩擦表面运动,最终部分石墨颗粒与材料表面形成黏结力,

石墨颗粒转变为红色颗粒,形成石墨润滑层。事实上,由于摩擦物理、摩擦机械以及摩擦化学等的综合作用,使得石墨在材料摩擦表面附着并扩散,最终在材料摩擦表面形成较均匀完整石墨润滑层,上述的综合作用采用颗粒间的黏结力来表征<sup>[24]</sup>。实验研究表明,铜基石墨复合材料在摩擦过程中,石墨在摩擦接触面聚集并形成一层石墨润滑层,该石墨润滑层具有润滑减摩性能<sup>[25-27]</sup>。

## 2.2 石墨粒径对材料摩擦学性能的影响

不同石墨粒径下铜基石墨复合材料的摩擦学性能如图 4 所示。该模拟条件选择石墨粒径为 6、18、30、42、54  $\mu\text{m}$ ,石墨体积分数为 10%,施加载荷为 10 N,45 # 钢滑动速度为 0.2 m/s,模拟时步为 10 000 000。

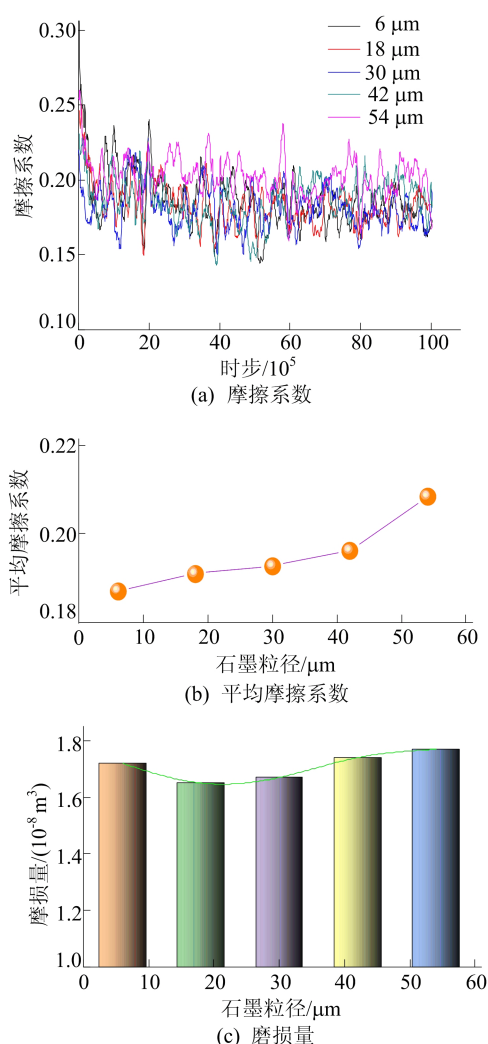


图 4 不同石墨粒径下复合材料的摩擦学性能

从图 4a 可以看出,随着时步数的增加,复合材料的摩擦系数整体降低并趋于稳定,其中石墨粒径为 54  $\mu\text{m}$  时,摩擦系数在很长时步内保持较

高的数值。随着摩擦进行,摩擦副的接触由金属与金属接触逐渐转变为石墨颗粒与金属接触,由于石墨的润滑减摩特性,摩擦系数表现为下降的趋势。时步数为 6 000 000 时,完整的石墨润滑层形成,摩擦系数维持在一定数值范围内波动。从图 4b 可以看出,随着石墨粒径的增加,复合材料的摩擦系数逐渐增大。由于石墨颗粒与相邻接触颗粒的黏结强度弱,在摩擦力以及外力作用下,石墨颗粒黏结易断裂。在颗粒间挤压作用下,基体内部石墨颗粒运动至摩擦表面。填充相同体积分数的石墨,石墨粒径越小,石墨团聚体数量越多,从而割裂了基体的连续性,使复合材料内颗粒的黏结强度降低,更便于石墨颗粒从材料内部向摩擦表面运动,摩擦表面的石墨颗粒数逐渐增多,有利于形成石墨润滑层,使材料减摩性能越好,摩擦系数较低。从图 4c 可以看出,当石墨粒径逐渐增大时,磨损量呈现先减少后增多的趋势。当石墨粒径较小时,分布在铜基体中的石墨团聚体数量越多,割裂铜基体的连续性较强,复合材料的颗粒黏结力较弱,使颗粒间的黏结键更容易断裂,磨损量较多。当石墨粒径较大时,石墨在材料内部有团聚,割裂铜基体的连续性较弱,颗粒间的黏结力较强,不易发生断裂,从而不利于材料内部石墨颗粒向摩擦表面运动,摩擦力增大,磨损量较多。数值模拟中石墨粒径为 18  $\mu\text{m}$  时,磨损量最少为  $1.65 \times 10^{-8} \text{m}^3$ 。

## 2.3 石墨体积分数对摩擦学性能的影响

不同石墨体积分数下铜基石墨复合材料的摩擦学性能如图 5 所示。该模拟条件选择石墨体积分数为 6%、8%、10%、12%、14%,石墨粒径为 30  $\mu\text{m}$ ,施加载荷为 10 N,45 # 钢滑动速度为 0.2 m/s,模拟时步为 10 000 000。

由图 5a 可知,在不同石墨体积分数下复合材料摩擦系数整体随着时步数的增加逐渐下降并达到稳定。由于石墨的自润滑特性,随着时步数的增加,颗粒间的黏结键断裂,材料内石墨颗粒向摩擦表面运动,在摩擦界面处聚集,逐渐形成完整的石墨润滑层,使材料的摩擦系数降低并趋于稳定波动。由图 5b 可知,随着石墨体积分数的不断增多,材料的整体平均摩擦系数表现为下降的趋势。石墨作为一种固体润滑剂,在受到变形挤压作用时,石墨颗粒会向摩擦表面运动,摩擦表面的石墨颗粒逐渐增多,形成石墨润滑层。石墨与相邻颗粒的黏结力较弱,石墨体积分数增多,使得材料颗粒间的黏结键更容易断裂,有助于摩擦表面石墨

润滑层的形成以及提高石墨润滑层的连续性与完整性,进而使摩擦副减摩效果较好,摩擦系数减小。由图5c可知,磨损量随着石墨体积分数的增多表现为先减少后增多的趋势。复合材料中石墨体积分数较少时,铜颗粒间的黏结力强,黏结键不易断裂,不利于石墨向摩擦界面运动,使得石墨在摩擦表面聚集的颗粒较少,不易形成石墨润滑层,润滑减摩效果弱,磨损量较多。石墨体积分数较多时,石墨随机均匀地分布于材料内部,对材料中铜基体的连续性造成破坏,颗粒间的黏结键易发生断裂,材料承载能力下降,导致磨损量较多。数值模拟中石墨体积分数为12%时,磨损量最少为 $1.61 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 。

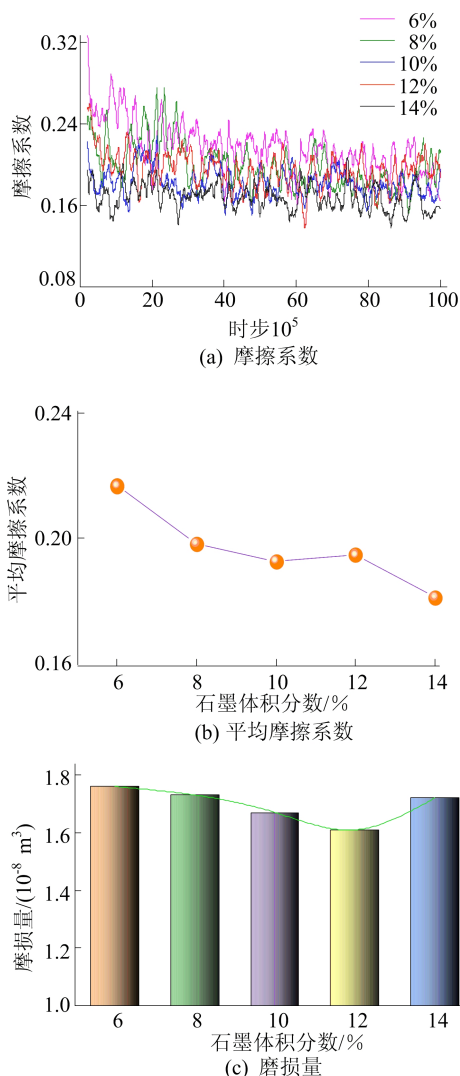


图5 不同石墨体积分数下复合材料的摩擦学性能

### 3 结 论

本文基于离散元二维颗粒程序(PFC2D)数值模拟方法对铜基石墨复合材料和45#钢摩

擦磨损过程进行建模与模拟,研究了摩擦磨损过程的动态演变过程以及石墨粒径和体积分对复合材料的摩擦系数、磨损量的影响,得到以下结论:

1) 摩擦过程中,颗粒间的黏结键发生断裂,石墨颗粒从材料内部向摩擦界面运动,在摩擦表面形成石墨润滑层,使摩擦副的接触由金属与金属接触逐渐向石墨与金属接触转变。

2) 随着时步数的增加,复合材料的摩擦系数整体降低并趋于稳定。石墨粒径减小,复合材料内石墨团聚体数量增多,材料摩擦系数逐渐减小。石墨体积分数增多,摩擦系数降低。

3) 复合材料内石墨粒径增大或石墨体积分数增多,磨损量均先减少后增多。石墨粒径为 $18 \mu\text{m}$ 时,磨损量最少为 $1.65 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 。石墨体积分数为12%时,磨损量最少为 $1.61 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 。因此,石墨粒径对材料磨损量的影响较大。

### [参 考 文 献]

- [1] 胡艳艳,刘耀,张建波,等. 金属基固体自润滑复合材料研究现状及展望[J]. 有色金属材料与工程, 2016, 37(4): 165-170.
- [2] GRANDIN M, WIKLUND U. Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact[J]. Tribology International, 2018, 121: 1-9.
- [3] WANG M, LI M, JIANG K, et al. Full density graphite/copper-alloy matrix composite fabricated via hot powder forging for pantograph slide [J]. Materials Research Express, 2021, 8(6): 066504.
- [4] SAUMS D L, HAY R A. Developments for copper-graphite composite thermal cores for PCBs for high-reliability RF systems[C]//CIPS 2014 8th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. [S. l. : s. n. ], 2014: 1-6.
- [5] 蒋娅琳,朱和国. 铜基复合材料的摩擦磨损性能研究现状[J]. 材料导报, 2014, 28(3): 33-36.
- [6] YANG H J, LUO R Y, HAN S Y, et al. Effect of the ratio of graphite/pitch coke on the mechanical and tribological properties of copper-carbon composites [J]. Wear, 2010, 268: 1337-1341.
- [7] 张翔,李克智,李贺军,等. 石墨粒度对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 无机材料学报, 2011, 26(6): 638-642.
- [8] WANG P, ZHANG H B, YIN J, et al. Wear and friction behaviours of copper mesh and flaky graphite-modified carbon/carbon composite for sliding contact material under electric current[J]. Wear, 2017, 380: 59-65.

(下转第1223页)

- [8] 汤玲英,刘雯,杨东,等. 基于面向对象方法的 Sentinel-1A SAR 在洪水监测中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3):377-384.
- [9] 吴文会,王丽欣,马卓. 基于 Sentinel-1B SAR 数据的洪水提取和监测[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(4): 110-111,118.
- [10] 栾玉洁,郭金运,高永刚,等. 基于 Sentinel-1B SAR 数据的 2018 年寿光洪水遥感监测及灾害分析[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(2):168-175.
- [11] 周晗. 基于 Sentinel1/2 的斯里兰卡洪涝淹没范围提取研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所),2018.
- [12] 贾诗超,薛东剑,李成绕,等. 基于 Sentinel-1 数据的水体信息提取方法研究[J]. 人民长江,2019,50(2):213-217.
- [13] 王晓航. 基于数据驱动的机器学习水体提取算法研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
- [14] 曾玲方,李霖,万丽华. 基于 Sentinel-1 卫星 SAR 数据的洪水淹没范围快速提取[J]. 地理信息世界, 2015, 22(5): 100-103,107.
- [15] 国土资源部. 土地利用现状分类: GB/T 21010—2017[S]. [出版地不详:出版者不详],2017:5-13.
- [16] 陈水森,柳钦火,陈良富,等. 粮食作物播种面积遥感监测研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(6):166-171.
- [17] 李宝,胡阳,汪光胜,等. 江淮分水岭区农作物干旱时空变化特征[J]. 水土保持研究,2017,24(6):227-232,237.
- [18] 薛仓生,金菊良,丁峰,等. 淮河流域安徽省 2007 年的暴雨洪水特性分析[J]. 灾害学,2009,24(1):86-91.

(责任编辑 张淑艳)

## (上接第 1195 页)

- [9] 张国玺. 石墨含量及粒度对铜镀铜石墨复合材料性能的影响[J]. 粉末冶金技术,2016,34(3):196-198,204.
- [10] 陈亚军,马刘洋,解挺,等. 石墨粒径大小对铜基石墨复合材料摩擦学性能的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(3):317-321.
- [11] 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.
- [12] 胡铮,张楠,张万昊,等. 石墨含量对铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 粉末冶金技术,2020,38(6):409-413.
- [13] ZHANG P, ZHANG L, WEI D, et al. Effect of graphite type on the contact plateaus and friction properties of copper-based friction material for high-speed railway train[J]. Wear,2019,432:202927.
- [14] 郭秀艳. 碳/铜复合材料摩擦磨损性能的研究[J]. 热加工工艺,2007(14):24-26.
- [15] YUE T, WAHAB M A. Finite element analysis of fretting wear under variable coefficient of friction and different contact regimes[J]. Tribology International, 2017, 107: 274-282.
- [16] 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.
- [17] ZHONG J, SHAKIBA R, ADANS J B. Molecular dynamics simulation of severe adhesive wear on a rough aluminum substrate[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013,46(5):055307.
- [18] 王爽. 离散单元法在金属粉末高速压制成形过程中的应用研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [19] 马刘洋,解挺,陈亚军,等. 石墨含量对铜基滑动轴承材料摩擦特性影响的数值模拟[J]. 轴承,2021(3):26-30,35.
- [20] XIE T, LAI J, YANG H. Simulation of effect of counterface roughness on the friction transfer and wear of PTFE sliding against steel[J]. Industrial Lubrication and Tribology,2019,71(9):1086-1092.
- [21] 周健,池毓蔚,池永,等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报,2000(6):701-704.
- [22] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2004,41(8):1329-1364.
- [23] 李猛. 研石充填材料力学行为及控制岩层移动机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
- [24] 石崇,张强,王盛年. 颗粒流数值模拟技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [25] 尹延国. 铜基石墨自润滑材料及其摩擦学研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
- [26] LIU X, CAI Z, SHEN M, et al. Fretting wear behavior of brass/copper-graphite composites as a contactor material under electrical contact[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2020,184:105703.
- [27] XU E, HUANG J, LI Y, et al. Graphite cluster/copper-based powder metallurgy composite for pantograph slider with well-behaved mechanical and wear performance[J]. Powder Technology,2019,344:551-560.

(责任编辑 张 镛)