第 48 卷第 6 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 6
2020 年 6 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　June，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20190778

莫来石含量及粒径对铜铁基复合材料摩擦学性能的影响

侯宝强，郭海霞，朱宇璇，王　波，杨建锋

(西安交通大学，材料强度国家重点实验室，西安 710049)

摘　要：采用粉末冶金方法制备了含莫来石的铜铁基复合材料，通过分别添加 0~25%(体积分数)工业莫来石和高纯莫来石，对比两者含量对复合材料基本特性及摩擦磨损性能的影响，研究了石墨含量对摩擦系数的调节作用，分析了莫来石粒度对复合材料摩擦性能的影响。结果表明：随着莫来石添加量的增加，复合材料致密度降低、硬度上升、弯曲强度下降。复合材料摩擦系数均在两莫来石含量为 15%时最大，磨损率均在莫来石含量为 5%时最小。相比高纯莫来石，粒度分布宽、颗粒形态多样的工业莫来石对复合材料的弯曲强度和磨损率均产生不利影响。石墨含量为 15%(体积分数)时，含工业莫来石(15%)复合材料的摩擦系数在 0.3~0.4，且磨损率较低。分级筛选后的大尺寸工业莫来石颗粒有利于增大摩擦系数，球磨细化后的小尺寸工业莫来石颗粒对增大摩擦效果有限，且磨损率较高。

关键词：粉末冶金；铜铁基复合材料；莫来石；摩擦磨损
中图分类号：TF125　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)06–0794–09
网络出版时间：2020–05–08



Effects of Mullite Contents and Particle Size on Tribological Properties of Copper-iron Matrix Composites

HOU Baoqiang, *GUO Haixia*, *ZHU Yuxuan*, *WANG Bo*, *YANG Jianfeng*
(State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi′an Jiaotong University, Xi′an 710049, China)

Abstract: Copper-iron matrix composites containing mullite were prepared by powder metallurgy. By adding 0–25% (volume fraction) industrial mullite and high purity mullite respectively, the effects of mullite contents on the mechanical properties and tribological performances of the composites were compared. Furthermore, the influences of graphite content and mullite particle size on the friction performance of the composite were studied as well. With the increase of mullite content, the relative density and bending strength of the composites decreased, although the hardness increased. The coefficient of friction (COF) rose to the highest when mullite content was 15% and the wear rate showed smallest when mullite content was 5%. Compared with high-purity mullite, industrial mullite with wide particle size distribution and various particle shapes had a negative impact on the bending strength and wear rate of the composites. With 15% (volume fraction) graphite addition, the friction coefficient of the composite containing 15% industrial mullite was 0.3–0.4, with a lower wear rate. The industrial mullite with large particle size after sieving selection were beneficial to increase the friction coefficient. However, the industrial mullite with small particle size after ball milling had little effect on increasing the friction, and the wear rate was higher.

Keywords: powder metallurgy; copper–iron matrix composites; mullite; friction and wear

铜铁基摩擦材料因具有导热高、耐热性好，以及优异的摩擦磨损性能而被广泛应用于制动材料[1–5]。制动性能与摩擦材料的成分、组织密切相关。磨料作为制动材料的主要组成相，在提高摩擦系数、清洁接触面、控制摩擦膜厚等方面具有重要作用。磨料硬度过高时，容易产生噪音、摩擦波动和对摩擦副材料的损伤。在满足摩擦性能要求的同时，应选择相对柔和的磨料。莫来石具有密度低

收稿日期：2019–12–11。　修订日期：2020–02–24。
基金项目：国家自然科学基金(51672209, 51872223)资助；中央高校基本科研业务费专项资金(xzy012019014)；陕西省创新团队项目(2018TD-031)。
第一作者：侯宝强(1988—)，男，博士研究生。
通信作者：杨建锋(1965—)，男，博士，教授。

Received date: 2019–12–11.　**Revised date:** 2020–02–24.
First author: HOU Baoqiang (1988–), male, Doctoral candidate.
E-mail: hpq.89@163.com
Correspondent author: YANG Jianfeng(1965–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: yang155@mail.xjtu.edu.cn

(3.2 g·cm^{-3})、弹性模量高(140~160 GPa)、热膨胀系数小(4×10^{-6}~5×10^{-6}/K)、硬度适中(Mohs 硬度 7)、抗热震性好、高温稳定、制备成本低等优点，因而广泛应用于耐火材料、防护涂层及具有特殊功能的结构器件[6–9]。

莫来石在多相陶瓷材料、有机及无机复合材料、涂层材料中同样表现出优良的摩擦学特性。由于形状不规则的莫来石更易和金属基体形成结合性强的互锁界面，能够有效抑制裂纹扩展，含钼的莫来石金属陶瓷可以有效降低体系磨损率[10]。莫来石纤维和晶须所具有的增韧、桥接特性亦被用于改善陶瓷基和树脂基摩擦材料的力学及摩擦学性能[11–12]。含3%莫来石的树脂基多元制动复合材料表现出良好的耐磨性[13]。10%的莫来石不仅可以提高树脂基摩擦材料的抗压强度和比热容，而且能够降低摩擦材料对载荷和速度的敏感性[14]。在 350 ℃时，含莫来石的有机摩擦材料具有良好的抗热衰退性，使摩擦系数稳定在 0.3~0.4[15]。高速滑动(25 m·s^{-1})条件下，含 10%莫来石的铁基复合材料的磨损率比添加相同含量氧化硅降低约 30%[16]。A356 铝合金与 23.5%粉煤灰莫来石构成的双连续复合材料，其磨损率比原合金减小 50%以上[17]。4%的 SiC 或 6%的 SiO_2 与 Al_2O_3 原位反应获得的纳米氧化铝/莫来石复合材料，Al_2O_3 基体中的晶内莫来石纳米颗粒因热失配存在的残余应力，有利于裂纹偏转，其断裂韧性和耐磨性均优于氧化铝[18]。Si_3N_4/SiC 复相陶瓷中加入 30%的莫来石，在促进烧结的同时，可以有效降低磨损率，相比于 95Al_2O_3、99Al_2O_3 和 3Y-ZrO_2，加入莫来石复相陶瓷磨损率降低了 80%~85%，且密度只有 Al_2O_3 的 76%、3Y-ZrO_2 的 48%[19]。等离子喷涂制备的莫来石增强氧化钛生物玻璃，其断裂强度和耐磨性亦得到显著改善[20]。

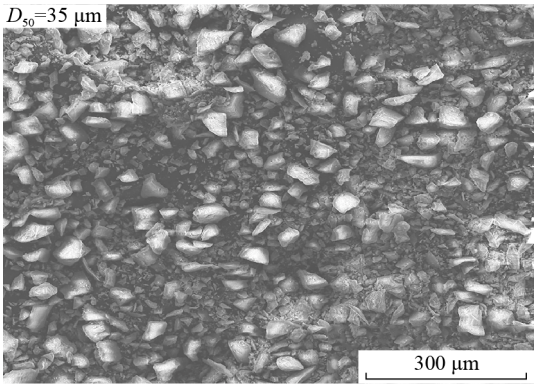
莫来石在摩擦材料设计中逐步获得关注，而关于莫来石对铜铁基复合材料摩擦学性能影响的研究较少。本工作以 Cu–Fe 为复合基体，莫来石为增强相，使用热压法制备含莫来石的铜铁基复合材料。分别采用颗粒较粗、纯度较低的工业莫来石和颗粒较细、纯度较高的莫来石微粉，对比研究莫来石的类型和含量对铜铁基复合材料烧结性、力学性能、摩擦磨损性能的影响，同时研究了石墨对含工业莫来石复合材料摩擦系数的调节作用，探究了工业莫来石粒度分级筛选和球磨细化后颗粒尺寸对复合材料摩擦性能的影响。

1　实验

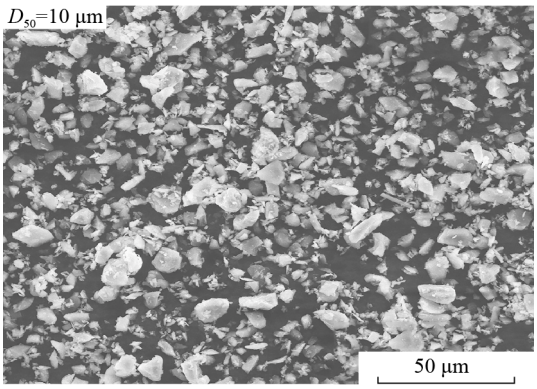
1.1　原料及制备

原料为 Cu 粉(粒度 1~2 μm，纯度>99.5%)、Fe 粉(粒度 3~5 μm，纯度>99.5%)、Zn 粉(粒度 2~5 μm，纯度>99.99%)、工业莫来石[记作 M1(平均粒径约 35 μm，莫来石含量约为 70%，其余成分主要为 SiO_2)]、高纯莫来石[记作 M2(平均粒径约 10 μm，莫来石含量大于 95%，Alfa Aesar 公司)]。实验中两种莫来石的颗粒形貌如图 1 所示。由图 1 可以看出，工业莫来石颗粒尺寸大，且颗粒存在较为锋利的棱角。

在研究石墨对含莫来石 M1 复合材料摩擦系数调节时，加入的石墨包含天然片状石墨(约 500 μm)和人造颗粒石墨(约 300 μm)，且两种石墨体积比为 1:1。在探究莫来石粒度对复合材料摩擦性能影响时，一方面对莫来石 M1 进行 300~500 目(筛孔尺寸为 30~50 μm)的筛选，记作 M1(300–500)。另一方面，对莫来石 M1 进行了 20 h 的球磨处理，转速为 400 r/min，球料比为 10:1，磨球为氧化锆球，记作 M1(Milling)。



(a) Mullite M1



(b) Mullite M2

图 1　M1、M2 两种莫来石颗粒形貌

Fig. 1　Particle morphologies of mullite M1 and M2

研究莫来石(M1、M2)含量(体积分数)对铜铁基复合材料性能影响，首先按表 1 所列配方称量各种粉末，加入约 5%的无水乙醇，预混合后在滚筒混料机上混合 6~8 h。之后混合粉末装入石墨磨具内预压，预压压力为 30 MPa，保压 60 s。然后经 900~950 ℃真空热压烧结 2 h 炉冷，可制得尺寸为 φ30×6 mm 的试样。热压压力约 15 MPa，升温速率为 6~8 ℃/min。烧结试样表面经不同号水磨砂纸打磨，直到表面粗糙度小于 1 μm 时，用无水乙醇清洗、真空烘干。

表 1 铜铁基复合材料配方

Table 1 Chemical composition of copper–iron matrix composites

v(Mullite)/%	*v*(Cu):*v*(Fe)	*v*(Zn)/%
0	2.5:1.0	3
5	2.5:1.0	3
10	2.5:1.0	3
15	2.5:1.0	3
20	2.5:1.0	3
25	2.5:1.0	3

v—Volume fraction.

1.2 样品表征

用 Archimedes 排水法测试了试样的体密度和孔隙率。用 HB3000 型 Brinell 硬度计(山东烟台华银实验仪器有限公司)测试了复合材料的硬度，测试条件：载荷 750 kg，钢球直径 5 mm，保压时间 30 s。用 JEOL JSM–6460 型扫描电子显微镜观察了莫来石颗粒形态及复合材料的组织形貌。用 CFT–I 型球–盘往复摩擦试验仪(兰州中科凯华科技开发有限公司)测试了复合材料室温下的摩擦学特性，测试条件：对磨球材料 GCr 15，正向载荷为 50 N，滑动速率 0.08 m·s^{-1}，单次实验累积滑动长度约 150 m。用 KEYENCE VK–9710 型 3D 激光共聚焦显微镜观测了不同粒度莫来石复合材料磨损面形貌和磨损深度。

2 结果与讨论

2.1 烧结特性与显微组织

图 2 为复合材料相对密度随莫来石含量的变化曲线。由图 2 可见，陶瓷相含量增加，复合材料的可压缩性降低[21]，进而削弱了复合材料致密化收缩，因此随着两种莫来石含量的增加，复合材料相对密度略有降低，但相对密度均在 98%以上。当莫来石含量大于 15%时，与添加莫来石 M1 相比，含莫来石 M2 的复合材料相对密度下降的更为明显。这与莫来石 M2 粒径较小、复合材料中陶瓷/金属界面数量多、可压缩性小，密切相关。

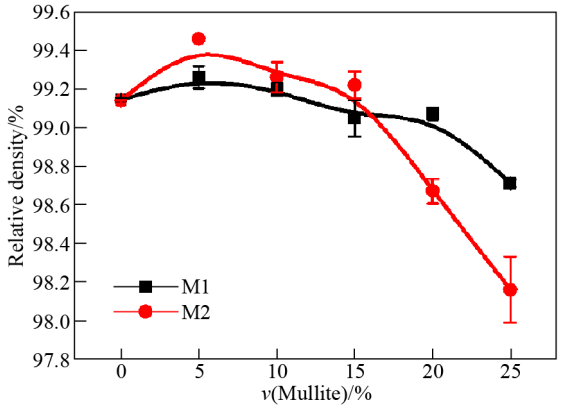


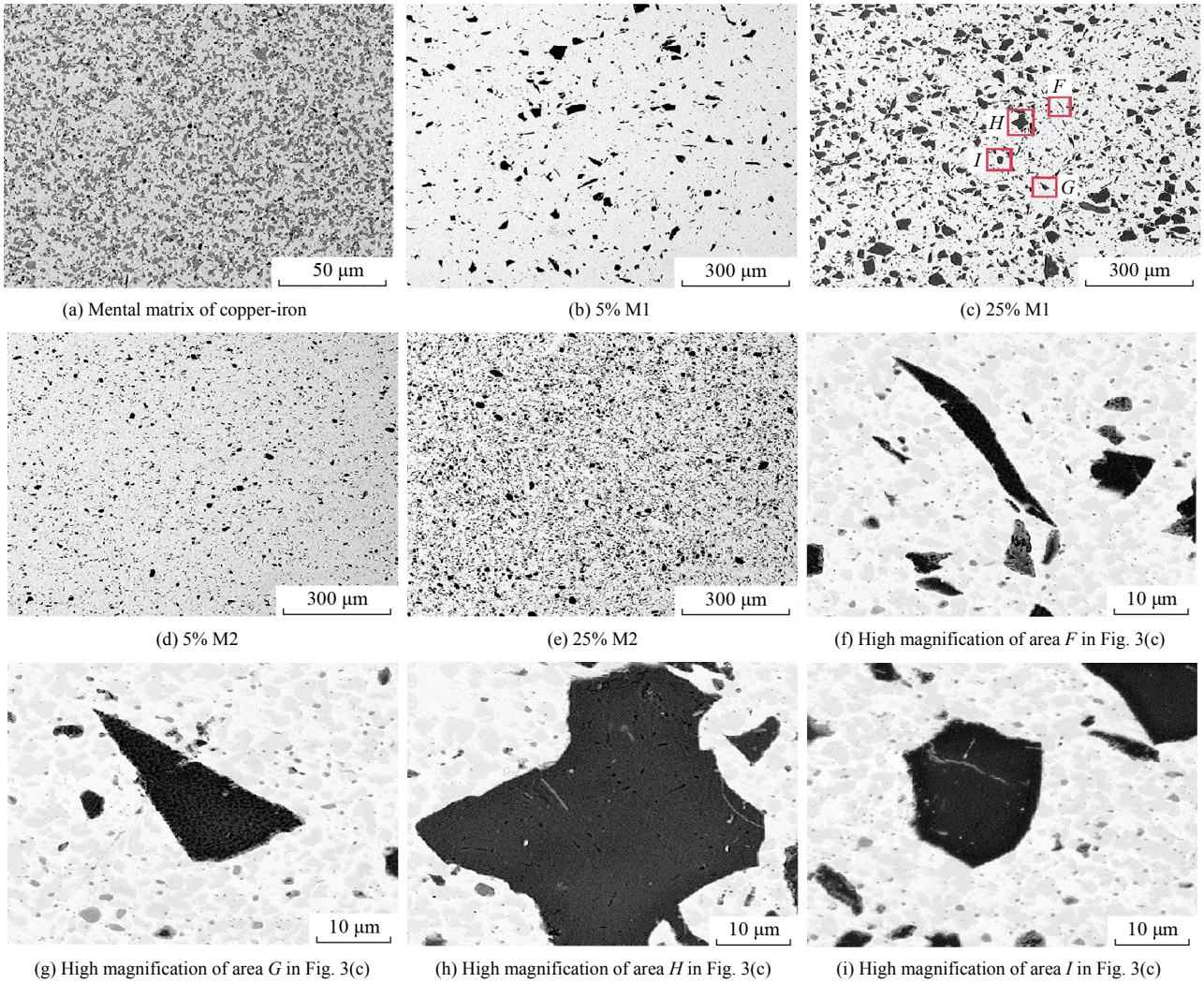
图 2 复合材料致密度随莫来石 M1、莫来石 M2 含量变化

Fig. 2 Relative density variations of the composites with the content of mullite M1 and M2 respectively

图 3 为复合材料显微组织的背散射照片。由图 3 可见，图 3a 为高放大倍数下的铜铁基体组织，暗灰色为铁，浅灰色为铜，铜铁两相分布的均匀性良好。图 3b、图 3c 分别为莫来石 M1 含量为 5%、25%的组织形貌，其中点状黑色相为莫来石颗粒，亮灰色连续相为铜铁基体。图 3d、图 3e 为添加莫来石 M2 复合材料的组织形貌，其分别与图 3b、图 3c 含量相同。图 3f~图 3i 为图 3c 中莫来石 M1 的颗粒形态，两种莫来石在复合材料组织中的分布相对均匀。采用 Image pro–Plus 6.0 软件对复合材料组织中的莫来石颗粒进行粒度统计，发现基体中莫来石 M1 即包含大尺寸颗粒，又包含细小尺寸颗粒，其具有明显的双峰，甚至多峰粒度分布，而基体中莫来石 M2 的粒径小且尺寸分布窄，如图 4 所示。另一方面，从图 3f~图 3i 可以看出，M1 莫来石颗粒形态在较大尺寸范围(20~30 μm)内存在多样性，其既具有针状形态，又具有棱角分明的多边形(多面体)形态。

2.2 硬度与弯曲强度

图 5 为复合材料硬度、抗弯强度随莫来石含量的变化。由图 5 可见，两种莫来石对复合材料硬度和抗弯强度的影响规律相同。随着莫来石含量增加，复合材料硬度逐渐升高，抗弯强度逐渐减小。复合材料硬度与各组成相体积分数的加权平均硬度成正相关[22]。由于陶瓷相的硬度远高于金属基体，莫来石体积分数增加，复合材料硬度也随之升高。含量相同时，添加不同品质的莫来石对复合材料的硬度影响较小，数值差异小于 5%。然而，含莫来石 M2 复合材料的抗弯强度高于对应含量下添加莫来石 M1 复合材料的 15%~20%。颗粒尺寸较小的莫来石 M2 对金属基体有更好的强化作用；另一方面，莫来石 M1 颗粒不规则的尖角形态容易引起应力集



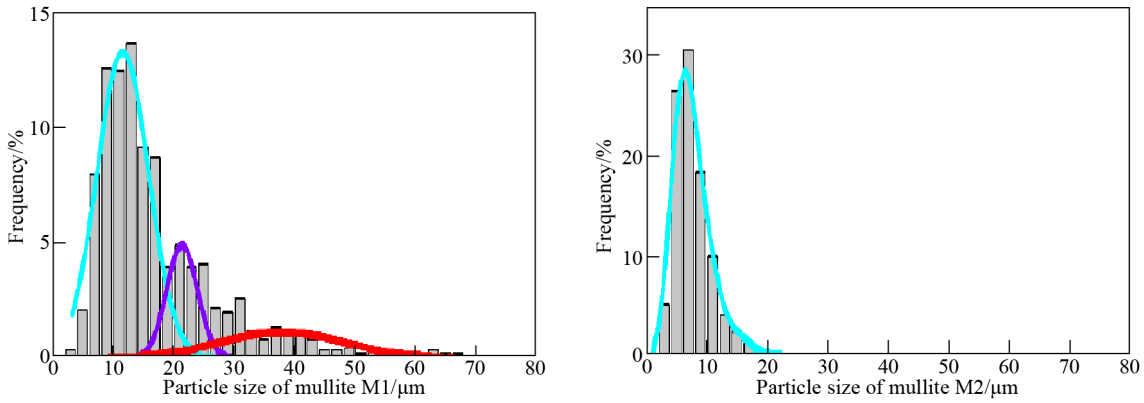
(a) Mental matrix of copper-iron　(b) 5% M1　(c) 25% M1

(d) 5% M2　(e) 25% M2　(f) High magnification of area *F* in Fig. 3(c)

(g) High magnification of area *G* in Fig. 3(c)　(h) High magnification of area *H* in Fig. 3(c)　(i) High magnification of area *I* in Fig. 3(c)

图 3　含莫来石铜铁基复合材料组织形貌和背散射照片

Fig. 3　Microstructures and BSE image of the composites with different mullite contents



(a) Particle size distribution of mullite M1　(b) Particle size distribution of mullite M2

图 4　两种复合材料中莫来石粒径分布

Fig. 4　Size distribution of two kinds of mullite particles

中，加剧金属/陶瓷界面裂纹源的产生，导致复合材料抗弯强度降低。

2.3　摩擦磨损性能

图 6 为莫来石含量不同的复合材料的平均摩擦系数和对应莫来石含量下的部分摩擦曲线。从图 6a 可以看出，莫来石含量为 15%时，添加莫来石 M1 或 M2 的复合材料，其平均摩擦系数均获得极大值。相同含量下，莫来石 M1 对于提高复合材料的摩擦

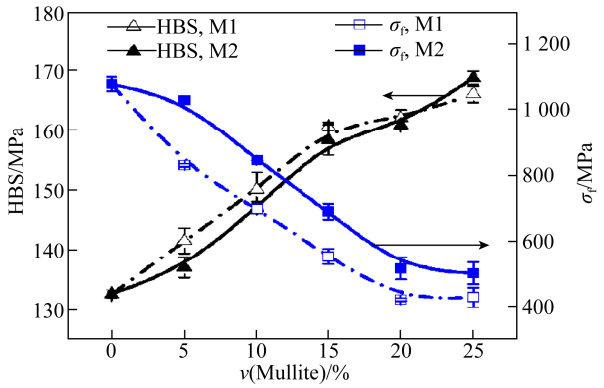
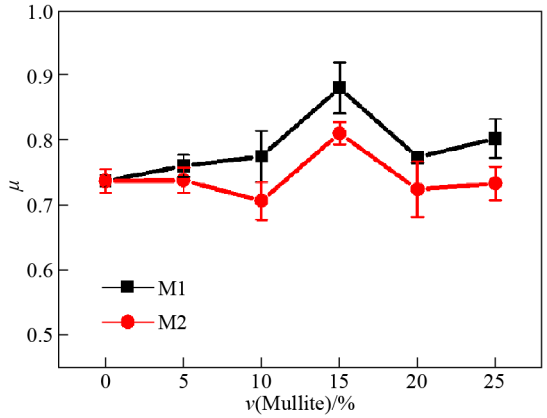
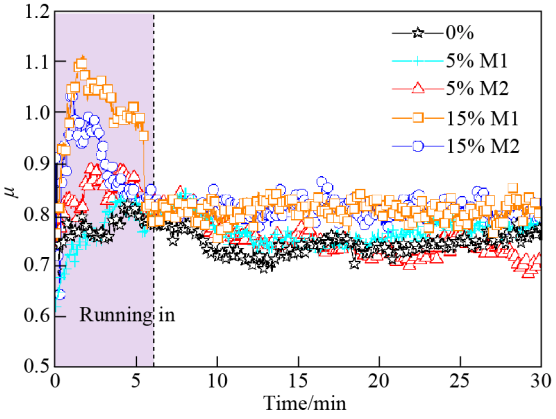


图 5 不同莫来石含量的铜铁基复合材料硬度及弯曲强度变化

Fig. 5 Variations of hardness (HBS) and flexural strength (σ_f) of the composites with different mullite contents



(a) Average friction coefficient



(b) Friction curves

图 6 复合材料平均摩擦系数随莫来石 M1、M2 含量变化与摩擦系数–时间曲线

Fig. 6 Average friction coefficient (μ) variations with the content of mullite M1 and M2 and the corresponding friction curves

系数作用更显著。莫来石 M1 颗粒具有双峰(或多峰)分布特征，存在的大尺寸颗粒更有利于提高复合材料的摩擦系数[23–24]。颗粒较为锋利的尖角形态也会增强接触面内的犁沟作用，从而提高摩擦系数。图 6b 是莫来石含量分别为 5%和 15%时，复合材料的单次摩擦曲线。可以看到在竖直虚线之前的磨合期内，随着莫来石含量的增加，摩擦波动加剧。磨合期过后，含莫来石的复合材料摩擦稳定性提高。不含莫来石的铜铁复合材料，无明显的磨合过渡期，但摩擦系数在摩擦开始后的较长时间内波动明显。

图 7 为复合材料(disk)及对磨球(ball)磨损率随莫来石含量变化曲线。随着莫来石含量的增加，复合材料磨损率先降低后逐渐升高。莫来石含量在 5%时，添加莫来石 M1 或莫来石 M2 的复合材料其磨损率均具有极小值。相同含量下，添加莫来石 M1 的复合材料的磨损率高于含莫来石 M2 的复合材料，特别是当莫来石含量大于 10%时，两者差异更为明显。这主要与莫来石 M1 颗粒形态的多样性有关。针状、棒状形态的磨料更易于折断、剥落[25–26]。具有锋利尖角形态的磨料在增强摩擦面内犁沟作用的同时，也会加剧因自身破碎引起的磨粒磨损的程度。随着莫来石含量的增加，对磨钢球的磨损率轻微升高。与复合材料相比，对磨钢球的磨损率小了一个数量级。且两种莫来石对对磨钢球磨损率的影响，差异较小。

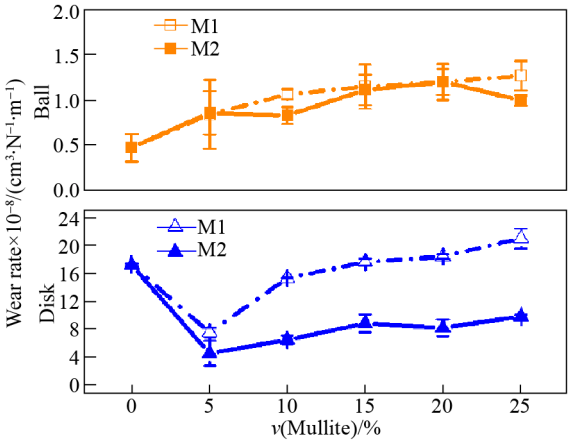


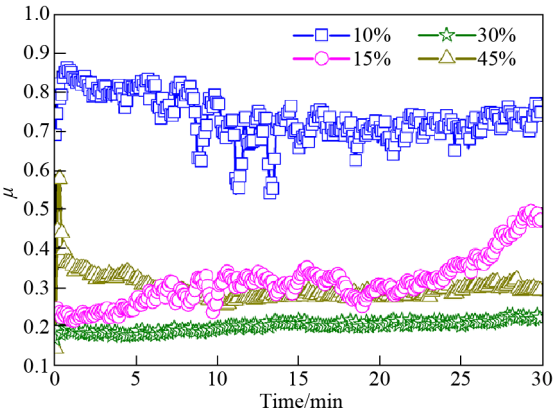
图 7 复合材料及摩擦副磨损率随莫来石含量变化曲线

Fig. 7 Wear rate variations of the composites (disk) and the counterparts (ball) with different mullite contents

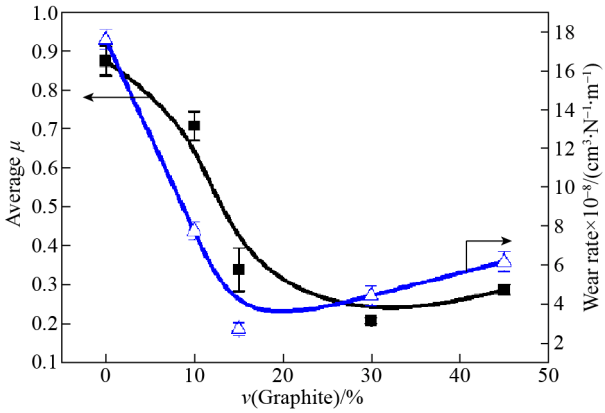
2.3.1 摩擦系数调控 实际应用中，制动复合材料的摩擦系数通常要求在 0.35~0.45。MoS_2、石墨(Gr)等固体润滑剂常常用来调控摩擦系数，改善复合材料的摩擦稳定性，减小接触面内黏着磨损等。因此在增摩效果显著的莫来石含量(15%)下，研究了石墨含量对 15% M1 复合材料摩擦性能的影响。由于添加的石墨存在一定的孔隙率，随石墨含量的增加，实验制得的复合材料的致密度从 99%降低至 96%。

图 8 为 15% M1 复合材料中石墨含量不同时的摩擦系数曲线和与之对应的平均摩擦系数和磨损率

变化曲线。从图 8a 可以看出，随石墨含量的增加摩擦曲线的波动性减小，对应图 8b 中 15% M1 复合材料的平均摩擦系数逐渐减小并趋于稳定。磨损率则随石墨含量先减小，之后有所增大。原因在于：石墨含量较低时，石墨润滑、减摩效果显著，有利于降低复合材料的磨损率；而石墨含量较高时，摩擦系数变化趋于稳定，石墨破碎、剥落程度加剧，使得复合材料磨损率增加。当石墨含量在 15%时，15% M1 复合材料的摩擦系数在 0.3~0.4，且磨损率较小。



(a) Friction curves of the composites

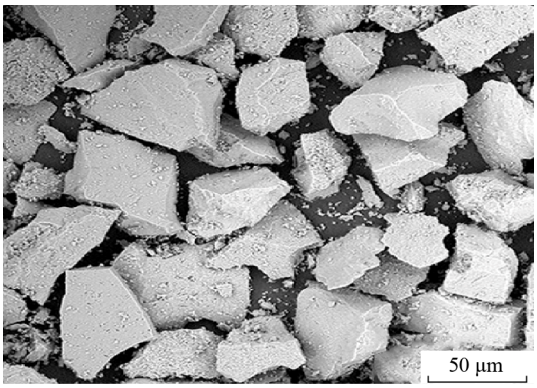


(b) Average friction coefficient and wear rate

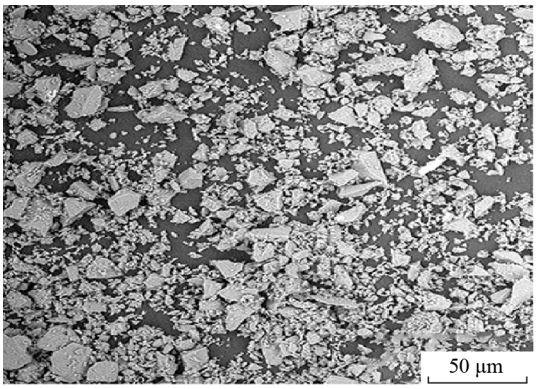
图 8　复合材料(15% M1)摩擦曲线、平均摩擦系数和磨损率随石墨含量的变化

Fig. 8　Variations of the friction curves, average friction coefficient and wear rate of the composites (15% M1) with graphite content

2.3.2　粒度对摩擦性能的影响　　由于莫来石 M1 粒径分布宽，为了进一步研究粒径差异对复合材料摩擦性能的影响，一方面对莫来石 M1 进行筛选，筛选后的颗粒 M1(300–500)形貌如图 9a 所示。另一方面对莫来石 M1 进行了 20 h 的球磨，球磨后的莫来石 M1(Milling)颗粒形貌如图 9b 所示。可以看到图 9a、图 9b 中的莫来石颗粒尺寸差异显著，莫来石 M1(300–500)的粒径在 30~50 μm，莫来石 M1(Milling)中除了少量粒径约 20 μm 的颗粒外，含有大量粒径小于 5 μm 的小颗粒。



(a) Mullite M1(300–500)



(b) Mullite M1(Milling)

图 9　莫来石 M1 筛选(300–500)和球磨后的颗粒形貌

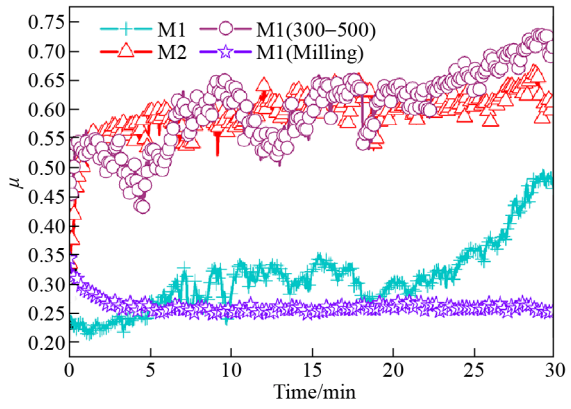
Fig. 9　Morphologies of mullite particles after sieving selection (300–500) and ball milling respectively

图 10a、图 10b 分别为不同莫来石磨料制备的铜铁基复合材料的摩擦系数曲线和平均摩擦系数、磨损率变化，复合材料中莫来石含量为 15%，石墨含量亦为 15%。由图 10a、图 10b 可以看出，含莫来石 M1(300–500)复合材料的摩擦系数显著高于含莫来石 M1(Milling)的复合材料，且前者耐磨性良好。由赫兹接触模型可知，在正压力和弹性模量相同时，最大切应力深度与接触面内微凸体曲率半径的立方根成正比[27]，即：

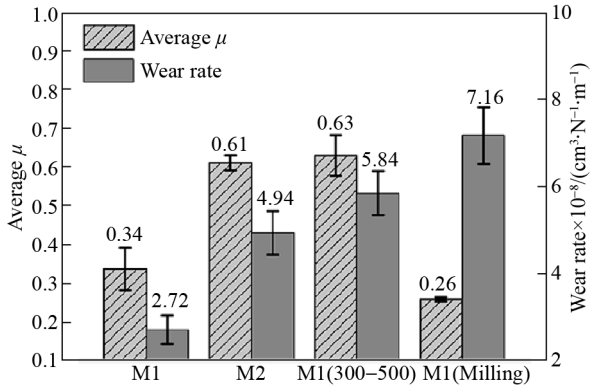
$$Z \propto R^{\frac{1}{3}}$$

其中：Z 为最大切应力所处接触面以下的深度；R 为微凸体曲率半径。摩擦过程中小颗粒更易于剥落，导致磨粒磨损加剧；而接触面内大颗粒不易剥落，犁沟作用更为显著，有利于增大摩擦，降低磨损率。莫来石 M1 具有宽的粒径分布，其摩擦系数在含上述两种不同粒径莫来石复合材料之间。但从磨损率可以看出，含双峰分布莫来石 M1 复合材料具有良

好的耐磨性。主要原因在于细小颗粒可以强化金属基体，而大颗粒又具有支撑载荷的作用，两者协同作用下提高了复合材料的耐磨性[24]。此外，添加石墨后含莫来石 M1 复合材料摩擦系数显著减小与双峰磨料促进石墨摩擦膜的形成有关。石墨磨屑容易在大颗粒台阶处堆积、压实，成为摩擦膜[28]。但如果基体容易塑变，则摩擦膜难以稳定持久存在，其将随基体的塑变而破碎、剥落，膜周期性地形成、脱落即表现为材料的磨损。M1 中细小颗粒可以强化基体，减弱塑性变形，对于在大颗粒边缘台阶处形成稳定摩擦膜具有促进作用。对比含 M2 和含 M1(300–500)的复合材料，可以发现，虽然 M2 的粒径(10 μm)小于 M1(300–500)的粒径(30~50 μm)，但由于粒径尺寸差异较小，两复合材料的摩擦系数接近，且含莫来石 M2 复合材料的磨损率小于后者。这主要与前面提到的颗粒形态有关，莫来石 M1(300–500)源于莫来石 M1 的分级筛选，其颗粒依然具有不规则棱角，摩擦过程中的犁沟作用和破碎、剥落倾向均大于形貌较为圆整的莫来石 M2。因此其摩擦系数和磨损率均稍高于含莫来石 M2 的复合材料。另一方面，这与莫来石纯度也有一定关系，莫来石 M2 纯度高，磨料的弹性模量更高，更具耐磨性。



(a) Friction curves of the composites



(b) Average friction coefficient and wear rate

图 10 含不同类型莫来石的复合材料(15%莫来石–15%石墨)摩擦曲线、平均摩擦系数和磨损率变化

Fig. 10 Variations of friction curves, average friction coefficient and wear rate of the composites (15%mullite–15%Gr) with different kinds of mullite

图 11 为对应图 10 中添加不同粒径莫来石复合材料的磨损面形貌及磨面深度轮廓线。从图 11b、图 11c 可以看出，含莫来石 M2 及 M1(300–500)的磨损面内存在的犁沟尺寸宽而且深，而图 11d 中含莫来石 M1(Milling)磨面内的犁沟相对细小，磨面平整。此外，图 11a 中含莫来石 M1 磨面内亮灰色摩擦膜的连续性较好，而图 11d 中含莫来石 M1(Milling)的磨面内没有明显的摩擦膜。这与测得的复合材料的摩擦系数、磨损率具有对应性。结合图 11e 可看出，虽然含大尺寸莫来石的试样磨面内均存在不同程度的剥落坑，且含莫来石 M1(300–500)磨面最为恶劣，但大粒径莫来石有利于阻碍磨损深度的进一步增加；而小尺寸莫来石更易随整个磨面同步磨损，使得磨损深度增加，磨损率增大。

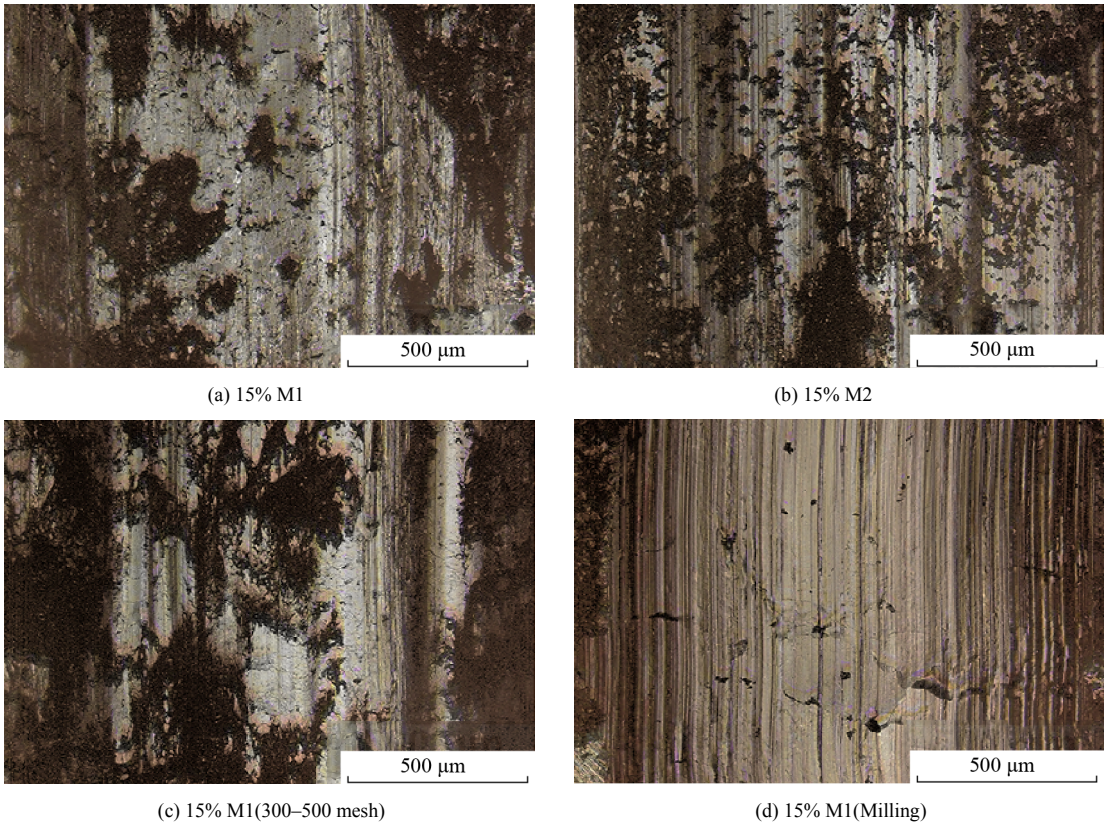
摩擦材料需要在满足一定摩擦系数的前提下，控制体系的磨损率。颗粒尺寸大的莫来石 M1(300–500)可有效提高复合材料的摩擦系数，具有双峰(多峰)分布粒径的莫来石 M1 可有效降低复合材料的磨损率。细小颗粒的莫来石 M1(Milling)对复合材料摩擦系数的贡献有限，且磨损率较高。选择颗粒尺寸大、颗粒圆整度好，且纯度高的莫来石有利于复合材料增大摩擦系数，减小磨损率。

3 结论

1) 随着莫来石含量的增加，复合材料致密度、抗弯强度逐渐下降，硬度逐渐升高；复合材料烧结特性、硬度受莫来石纯度和粒度的影响较小，而抗弯强度受粒度尺寸和形态影响较为显著，工业莫来石存在的锋利尖角易对复合材料弯曲强度产生不利影响。

2) 随着莫来石含量的增加，复合材料摩擦系数先增大后减小，磨损率先降低后增加；复合材料摩擦系数在莫来石含量为 15%时具有极大值，莫来石添加量为 5%时，可以有效减小复合材料的磨损率。

3) 颗粒尺寸大、颗粒形态圆整且纯度高的莫来石有利于增大复合材料的摩擦系数，降低磨损率；颗粒细小的莫来石对复合材料的摩擦系数贡献有限，且磨损率较高。



(a) 15% M1　(b) 15% M2

(c) 15% M1(300–500 mesh)　(d) 15% M1(Milling)

(e) Depth profile of the worn surfaces

图 11　含不同粒径莫来石复合材料的磨损面形貌和磨损面深度轮廓线

Fig. 11　Morphologies of the worn surfaces of the composites with different mullite particle sizes and the depth profile of the corresponding worn surfaces

参考文献:

[1] CUI G J, REN J, LU Z X. The microstructure and wear characteristics of Cu–Fe matrix friction material with addition of SiC[J]. Tribol Lett, 2017, 65(3): 1–8.

[2] ZHAO X, GUO L C, ZHANG L, et al. Influence of nano-Al2O3-reinforced oxide-dispersion-strengthened Cu on the mechanical and tribological properties of Cu-based composites[J]. Int J Miner, Metall Mater, 2016, 23(12): 1444–1451.

[3] GYIMAH G K, HUANG P, CHEN D. Dry sliding wear studies of copper-based powder metallurgy brake materials[J]. J TRIBOL–T ASME, 2014, 136(4): 1–6.

[4] MERIE V V, CANDEA V C, BIRLEANU C. The influence of titanium dioxide on the tribological characteristics of a Fe-based friction composite material[J]. J Compos Mater, 2014, 48(2): 235–243.

[5] FERRER C, PASCUAL M, BUSQUETS D, et al. Tribological study of Fe–Cu–Cr-graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique[J]. Wear, 2010, 268(5–6): 784–789.

[6] SCHNEIDER H, SCHREUER J, HILDMANN B. Structure and properties of mullite-A review[J]. J Eur Ceram Soc, 2008, 28(2): 329–344.

[7] MEDVEDOVSKI E. Alumina–mullite ceramics for structural applications[J]. Ceram Int, 2006, 32(4): 369–375.

[8] CAO X Q, VASSEN R, STOEVER D. Ceramic materials for thermal barrier coatings[J]. J Eur Ceram Soc, 2004, 24(1): 1–10.

[9] AKSAY I A, DABBS D M, SARIKAYA M. Mullite for structural,

Electronic, and optical applications[J]. J Am Ceram Soc, 1991, 74(10): 2343–2358.

[10] KAMEO K, FRIEDRICH K, BARTOLOME J F. Sliding wear of ceramics and cermets against steel[J]. J Eur Ceram Soc, 2003, 23(15): 2867–2877.

[11] WANG F H, LIU Y. Mechanical and tribological properties of ceramic-matrix friction materials with steel fiber and mullite fiber[J]. Mater Des, 2014, 57: 449–455.

[12] JI Z J, LUO W Y, ZHOU K K, et al. Effects of the shapes and dimensions of mullite whisker on the friction and wear behaviors of resin–based friction materials[J]. Wear, 2018, 406: 118–125.

[13] KUMAR V V, KUMARAN S S, DHANALAKSHMI S, et al. Tribological performance evaluation of fused mullite-reinforced hybrid composite brake pad for defence application[J]. J Braz Soc Mech Sci Eng, 2019, 41(4): 1–9.

[14] CAI P, WANG Y M, WANG T M, et al. Improving tribological behaviors of friction material by mullite[J]. Tribolo Int, 2016, 93: 282–288.

[15] HOU G H, WANG Z H, CUI Y C. A new idea for improving heat fade performance of organic based friction materials[J]. Adv Eng Mater, PTS 1–3, 2011, 194–196: 359–362.

[16] PRABHU T R, VARMA V K, VEDANTAM S. Effect of reinforcement type, size, and volume fraction on the tribological behavior of Fe matrix composites at high sliding speed conditions[J]. Wear, 2014, 309(1–2): 247–255.

[17] ZHU J B, YAN H. Fabrication of an A356/fly-ash-mullite interpenetrating composite and its wear properties[J]. Ceram Int, 2017, 43(15): 12996–13003.

[18] LIMPICHAIPANIT A, TUNKASIRI T. Reaction sintering of alumina/mullite nanocomposites from nano–sized starting powders[J]. Adv Appl Ceram, 2016, 115(6): 349–353.

[19] 潘波, 倪菁, 殷波, 等. Mullite–Si_3N_4/SiC 复相陶瓷的制备及性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(9): 1259–1264.
PAN B, NI J, YIN B, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(9): 1259–1264.

[20] BSAT S, HUANG X. Mechanical properties of plasma–sprayed mullite–reinforced titania–bioglass composite[J]. Int J Appl Ceram Technol, 2016, 13(6): 1074–1083.

[21] BOZ M, KURT A. The effect of Al_2O_3 on the friction performance of automotive brake friction materials[J]. Tribolo Int, 2007, 40(7): 1161–1169.

[22] MUMM D R, MARSHALL D B, GRIFFIN A. Hardness Variations in Multilayered ZrO_2–Al_2O_3 Composites[J]. J Am Ceram Soc, 1996, 79(5): 1416–1418.

[23] SHEN M J, WANG X J, LI C D. Effect of bimodal size SiC particulates on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium matrix composites[J]. Mater Des, 2013, 52: 1011–1017.

[24] PRABHU T R. Effect of bimodal size particles reinforcement on the wear, friction and mechanical properties of brake composites[J]. Tribol-Mater, Surf Interfaces, 2016, 10(4): 163–171.

[25] SAKA N, SZETO N K, ERTURK T. Friction and wear of fiber–reinforced metal matrix composites[J]. Wear, 1992, 157(2): 339–357.

[26] PERRIN C, RAINFORTH W M. The effect of alumina fiber reinforcement on the wear of an Al–4.3–percent–Cu alloy[J]. Wear, 1995, 181: 312–324.

[27] 刘正林, 摩擦学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 42–43.

[28] CHO K H, JANG H, HONG Y S, et al. The size effect of zircon particles on the friction characteristics of brake lining materials[J]. Wear, 2008, 264(3–4): 291–297.