

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.01.010

不同形态石墨对铜/石墨复合材料 自润滑膜形成规律的影响

张地, 解挺, 张俊龙

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为研究不同形态石墨对铜/石墨复合材料摩擦过程中固体自润滑膜形成的影响,文章以雾化纯铜粉作为基体材料,片状石墨粉和球状石墨粉分别作为固体润滑相,利用常规粉末冶金法制备样品;并研究了石墨形态对铜/石墨复合材料的力学、自润滑膜覆盖率以及摩擦学性能的影响。结果表明:加入片状石墨的复合材料比加入球状石墨的复合材料的摩擦系数低,但磨损量高;加入片状石墨,可使自润滑膜覆盖率增大,但因复合材料的硬度较差,耐磨性变低;加入球状石墨,虽然自润滑膜覆盖率略少,但复合材料的硬度较高,耐磨性更好。

关键词:铜/石墨复合材料;石墨形态;自润滑膜;摩擦学性能

中图分类号: TB331

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)01-0065-04

Effect of different shapes of graphite on the formation of self-lubricating film of copper/graphite composites

ZHANG Di, XIE Ting, ZHANG Junlong

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

Abstract: In order to study the effect of different shapes of graphite on the formation of solid self-lubricating film in the friction process of copper/graphite composites, the samples were prepared by conventional powder metallurgy method with atomized pure copper powder as matrix material, flake graphite powder or spherical graphite powder as solid lubricating phase. The effect of graphite shapes on the mechanical properties, self-lubricating film coverage and tribological properties of copper/graphite composites was studied. The results show that the friction coefficient of the composite with flake graphite is lower than that of the composite with spherical graphite, but its wear is higher. The addition of flake graphite can increase the coverage of self-lubricating film, but the wear resistance of the composite is poor due to the poor hardness of the composite. With the addition of spherical graphite, although the coverage of self-lubricating film is slightly less, the hardness of the composite is higher and the wear resistance is better.

Key words: copper/graphite composite; graphite shape; self-lubricating film; tribological properties

铜/石墨复合材料以铜作为基体,石墨作为填充项,通过合适的选取和搭配,经过一系列工艺制备而成,其凭借着自身优良的综合性能和良好的

摩擦学性能,被广泛应用于滑动轴承、电触头等零部件中^[1]。

长期以来,铜/石墨复合材料中石墨的形态、

收稿日期:2023-03-20;修回日期:2023-05-16

基金项目:科技部中小企业创新基金资助项目(11C26213401950)

作者简介:张地(1996—),男,安徽淮北人,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.

含量、尺寸以及表面状态等对复合材料的力学性能和摩擦学性能的影响受到广泛关注。固体润滑相石墨的形态对铜/石墨复合材料摩擦接触面石墨自润滑膜的形成具有关键影响。文献[2]研究天然石墨和致密石墨对铜基粉末冶金摩擦材料摩擦性能的影响,结果表明石墨能在摩擦表面形成一层润滑石墨膜,且天然石墨产生的石墨膜更加完整稳定,天然石墨与致密石墨相比摩擦因数基本持平,摩擦温升降低约 3 °C;文献[3]研究表明,相比片状石墨粉,相同粒径的球状石墨粉有利于提高复合材料的致密度,获得更优异的力学性能,其抗压强度可以提高近 65 MPa;文献[4]研究表明,片状石墨的润滑性优于球状石墨,降低了摩擦系数,但由于其硬度较弱导致磨损率大,稳定性差。试验发现当 5%片状石墨和 5%球状石墨混合加入复合材料时,可以得到最优的综合摩擦性能。由此可见,不同形态的石墨对铜/石墨复合材料的摩擦学性能有明显的影响。已有研究表明,铜/石墨复合材料的减摩性能主要取决于摩擦过程中形成的石墨自润滑膜的状态^[5],但大多数的研究只是对石墨自润滑膜给出了定性的描述,没有给出定量的分析。

本文采用定量的方法研究片状石墨和球状石墨 2 种不同形态石墨对铜/石墨复合材料自润滑膜成膜特性的影响规律,以期对高性能铜/石墨复合材料的优化设计提供有益的参考。

1 试 验

1.1 复合材料的制备

复合材料以粒径为 43 μm 铜粉作为基体,以片状石墨(FG)和球状石墨(SG)2 种不同形态石墨材料作为润滑相加入其中,混合而成。其中,片状石墨和球状石墨的尺寸为 8 μm ,体积分数为 8%。

样品配料前需要对试验所用的各种粉末烘干处理,使粉末处于干燥状态,以防止粉末结块。使用 101-2B 型电热恒温干燥箱,设定温度为 70 °C,烘干时间为 6 h。

烘干完毕后,按照试验设计方案称取相应的粉末配料。配料完毕后进行混料,使用轴式混粉机,设置混料时间为 6 h,速度为 600 r/min。对混料冷压成型,选用 WE-600 型液压式试验机,为了减少成型后样品中的孔隙,先对样品预压 5 次,使粉末均匀分布在模具中,并排除模具中的空气。接着对混料加压至 400 MPa,保压 5 min,再缓慢

释放压力取出样品。

压制过后进入烧结阶段,选用 JHN-1 烧结炉,烧结过程中采用氢气气氛保护,防止样品在高温中被氧化。设定氢气的流速为 500 mL/min,烧结炉温度从常温以 4 °C/min 速率升至 300 °C,保温 30 min 后同速率升至 960 °C,保温 120 min,再以 5 °C/min 降温速率降至室温,即制得所需样品,试样的尺寸为 31 mm×5 mm×5 mm。

1.2 试验方法

试验选择宣化材料试验机厂的 M-200 摩擦磨损试验机,摩擦副接触形式为环-块接触(块为试样固定不动,环为对偶件进行旋转运动)。试验条件如下:室温、干摩擦,载荷 90 N,时间 15 min,相对滑动速度分别为 0.52 m/s(250 r/min)、0.63 m/s(300 r/min)、0.73 m/s(350 r/min)、0.84 m/s(400 r/min)。摩擦形式为环-块结构,选择对磨件为 45 # 钢,外径 $\phi 40$ mm,内径 $\phi 16$ mm,厚度 10 mm,硬度为 HRC(30±2),圆周表面粗糙度 Ra 为 1.6 μm 。摩擦过程中试验机自动记录摩擦系数,磨损量以磨损后损失质量表示。

试验中选用阿基米德排水法测量试样的密度;选用 MH-3L 型维氏硬度仪测量样品的维氏硬度,压入材料表面的载荷为 0.49 N;用光学显微镜对样品表面观察分析金相组织;用 JSM-6701F 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观测和分析试样表面磨痕及自润滑膜形貌。选用的色度分析方法^[6]对铜/石墨复合材料自润滑膜进行定量评价。

2 结果与讨论

2.1 铜/石墨复合材料金相组织

2 种复合材料的金相组织如图 1 所示。

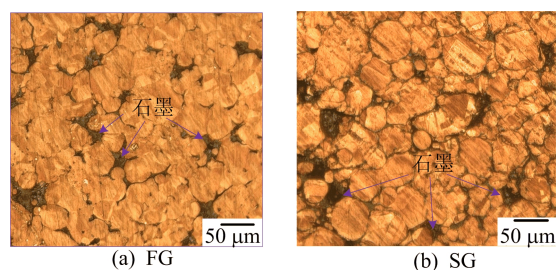


图 1 2 种复合材料的金相组织

图 1 中灰色的不规则形状是石墨,可见基体的完整性、连续性好,一致性强。相比于片状石墨,加入球状石墨的连续性和界面结合更好,由于球状石墨粒度较粗,经压制易变形,与基体结合更

紧密,而片状石墨的复合材料孔隙较多,制样过程片状石墨易脱落离开基体^[7]。

2.2 铜/石墨复合材料力学性能

2种复合材料的密度和硬度见表1所列,从表1可以看出,片状石墨比球状石墨的密度略高,因为在压制过程中加入片状石墨粉的复合材料中层间原子间的结合能力好、层与层之间结合能力弱,层与层之间受压力时摩擦阻力较小,易产生相对滑动,使样品更容易成型,所以其密度较高^[8]。球状石墨比片状石墨的硬度略高,因为球状石墨粉相比于片状石墨粉粒度更粗,压制过程中,在力的作用下,复合材料中球状石墨粉产生变形,使其与铜粉之间的机械咬合能力得到提高,从而与铜基体结合更紧密,所以其硬度较高。

表 1 2种复合材料的密度和硬度

样品	密度/(g/cm ³)	硬度/(N/mm ²)
FG	6.896	42.7
SG	6.581	44.1

2.3 铜/石墨复合材料摩擦学性能

不同相对滑动速度下,2种样品的摩擦系数和磨损量如图2、图3所示。

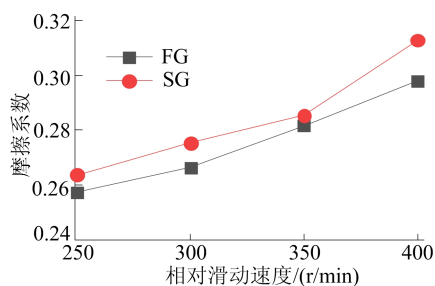


图 2 2种样品摩擦系数

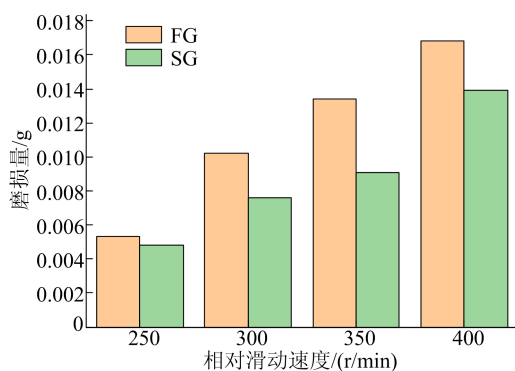


图 3 2种样品磨损量

从图2可以看出,FG样品的摩擦系数略小于SG样品,这是由于加入片状石墨的铜碳复合材料摩擦面形成的自润滑膜面积更大,起到更好

的润滑作用,从而使摩擦系数更小。从图3可以看出,FG样品的磨损量大于SG样品,这是由于加入球状石墨的铜碳复合材料的基体硬度优于加入片状石墨的铜碳复合材料^[9]。

2.4 铜/石墨复合材料自润滑膜的形成

2.4.1 自润滑膜表面形貌

2种样品的自润滑膜表面形貌光学照片及通过色度分析法提取自润滑膜部分的处理图像如图4所示。铜/石墨复合材料在摩擦过程中材料表面会形成一层石墨润滑膜,从图4可以看出,2种试样的表面已经形成自润滑膜,且FG比SG自润滑膜范围广,由色度分析法可以得到2种试样的自润滑膜覆盖率(其中灰黑色部分为自润滑膜),FG、SG对应的自润滑膜覆盖率分别为39.43%、32.57%。

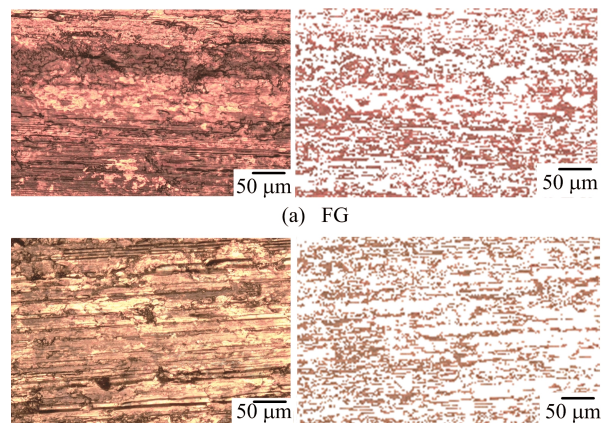


图 4 2种样品自润滑膜表面形貌

2.4.2 不同石墨形态下的成膜特性

2种样品的自润滑膜覆盖率如图5所示。从图5可以看出,FG比SG自润滑膜覆盖率高,这是由于FG摩擦时片状石墨中层与层结合力弱,受剪切力易滑动;而球状石墨在压制时易被压碎导致和基体结合更好,因此加入片状石墨的FG产生的自润滑膜更多。

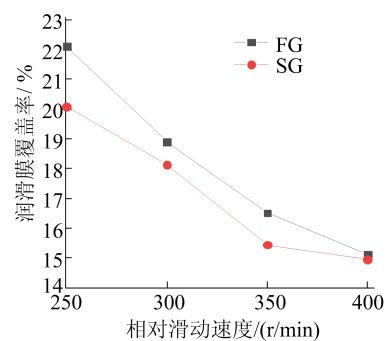


图 5 2种样品自润滑膜覆盖率

2.4.3 不同石墨形态下的摩擦表面形貌

2 种样品摩擦表面磨损的 SEM 照片如图 6 所示。从图 6a 可以看出,片状石墨复合材料的表面较光滑、平整,裂纹、凹坑较少,有较浅的划痕,由于加入片状石墨的复合材料,片状石墨更容易从基体内迁移出来,层与层的结合力弱,受剪切力易滑移,润滑减摩效果好^[10]。从图 6b 可以看出,球状石墨复合材料部分区域光滑、平整,划痕较浅,部分区域有凹坑和裂纹。对于球状石墨铜基复合材料,在制备压制过程中由于球状石墨粒度较粗、易变形,与基体结合更紧密,迁移至表面所需时间更久^[11]。

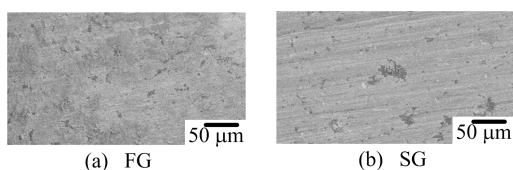


图 6 2 种样品摩擦表面磨损的 SEM 照片

2.5 自润滑膜对摩擦学性能的影响

铜/石墨复合材料的自润滑膜覆盖率为摩擦系数影响较大,随着自润滑膜覆盖率逐渐增大,摩擦系数逐渐减小。这是由于自润滑膜改变了摩擦面的接触形式,由铜-钢接触转变为铜-自润滑膜-钢接触^[12]。铜/石墨复合材料的自润滑膜覆盖率对磨损量的影响较小,随着自润滑膜覆盖率的增大,没有发现磨损量明显减少或者增多。磨损量受到复合材料硬度的制约较大,硬度较差的复合材料在摩擦过程中表面材料易脱落,已形成的自润滑膜也会随之脱落,从而加大了磨损量。

3 结 论

本文通过考察碳材料对铜碳复合材料力学性能、摩擦学性能以及自润滑膜覆盖率的影响,得出以下结论:

1) 加入球状石墨的复合材料比加入片状石墨的复合材料的密度低、硬度高。

2) 加入球状石墨的复合材料比加入片状石墨的复合材料磨损量小、耐磨性好。

3) 通过色度分析法分析的润滑膜覆盖率可知,加入片状石墨的复合材料比加入球状石墨的复合材料自润滑膜覆盖略高。

4) 铜/石墨复合材料的自润滑膜覆盖率对摩擦系数影响较大,自润滑膜覆盖率增大,摩擦系数减小;自润滑膜覆盖率对磨损量影响较小,磨损量与复合材料的硬度息息相关,一般硬度大的复合材料的磨损量小。

[参 考 文 献]

- [1] 杨晓萍. 石墨/锡青铜复合材料制备技术及摩擦磨损性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2013.
- [2] 张发厅. 不同种类石墨及碳纤维对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响[J]. 粉末冶金工业,2018,28(5):41-45.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 温恒,解挺,李晨,等. 基于色度分析方法对铜基石墨材料摩擦表面自润滑膜的评价分析[J]. 中国表面工程,2021,34(3):75-82.
- [7] 葛月鑫,杨正海,孙乐民,等. 烧结温度对铜-石墨复合材料性能的影响[J]. 材料热处理学报,2019,40(2):8-14.
- [8] 孙杏因,谈萍,崔永福. 影响铜-石墨材料密度的工艺因素[J]. 材料工程,1999(9):43-45.
- [9] YIN Y, LI R, ZHANG G, et al. Tribological properties of FeS/Cu-Bi copper-based bearing materials fabricated by mechanical alloying [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2019, 71(10):1152-1157.
- [10] 杨金花. 片状纳米石墨和碳质中间相作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[D]. 上海:华东理工大学,2014.
- [11] 付传起,王宙. 石墨/铜铁基自润滑复合材料的摩擦学性能研究[J]. 表面技术,2010,39(4):11-14.
- [12] 陈垚,丁兰,李红伟,等. 铜基体上类石墨膜结合强度评价及其与干摩擦性能关系[J]. 热加工工艺,2019,48(6):151-155,160.

(责任编辑 张 镛)