

基于分形理论对石墨烯增强铝硅基复合材料摩擦磨损性能研究

毛宇新, 张建壮, 王业懿, 水 丽

(沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁沈阳 110159)

摘要: 采用粉末冶金的方法, 制备了石墨烯/Al-15Si复合材料, 研究了石墨烯/Al-15Si复合材料的微观组织形貌对摩擦磨损性能的影响, 并运用分形理论, 借助于Matlab软件分析复合材料中硅颗粒相形貌特征。结果表明, 随着石墨烯添加量的改变, 石墨烯/Al-15Si复合材料有不同的分形维数; 分形维数反映了复合材料中硅颗粒分布状态, 分形维数越大, 硅颗粒分布越均匀细小, 材料的硬度越高; 分形维数可以间接反映复合材料的抗磨损性能, 分形维数越大, 材料的摩擦系数越低, 耐磨损性能越好。

关键词: 石墨烯铝硅基复合材料; 组织形貌; 分形维数; 摩擦磨损

在硅含量超过共晶点的铝硅合金中, 硅颗粒弥散分布在铝基体中明显提高了合金的力学性能, 使其具有高强度、低密度、耐摩擦、体积稳定性高的特征, 成为摩托车、汽车、工程机械的动力设备用材^[1]。其中, 发动机活塞类零件在服役过程中承受很高的热负荷和机械负荷, 在活塞失效机制中, 因磨损造成的损坏占较大比例, 改善摩擦副的抗磨损性能对发动机活塞类零件更新换代具有重要的意义^[2-3]。

近年来, 石墨烯增强铝基复合材料在摩擦副减摩减阻的应用研究方面得到了快速发展^[4-5]。研究表明, 石墨烯铝硅复合材料不仅具有良好的力学性能, 而且具有优异的热稳定性和抗磨损性能^[6]。随着石墨烯在铝基复合材料中的逐渐推广应用, 制备工艺及其微观组织形态演化一直是研究的关键问题, 石墨烯的添加量对复合材料微观组织结构、强化相形态及其摩擦磨损性能有直接的影响。

分形几何是一种新型研究方法, 目前在材料科学中的应用处于发展与探索阶段。在石墨烯复合材料微观组织形貌特征的较多研究中^[7-8], 研究者大多借助于扫描电镜观察石墨烯复合材料微观组织形貌, 定性描述分析组织形貌特征对其力学性能的影响, 不够准确也不方便进行深入的理论化研究。本研究通过Matlab软件, 用分形理论盒维数法表征石墨烯增强铝硅复合材料中的不规则初生硅相形态, 计算材料微观组织形貌的分形维数, 分析、建立分形维数与材料摩擦磨损性能的联系。对预测材料摩擦磨损性能及优化制备复合材料的工艺参数具有现实意义。

1 试样制备与方法

1.1 试样制备

采用粉末冶金方法, 将超细铝硅粉 (Al-15% Si粉的粒径为20 μm , 纯度为99.9%) 和适量铜、镁粉和石墨烯按不同比例装入球磨铝料罐中, 粉料经过充分混合后, 在ZR-6-8Y真空钼丝炉内进行烧结, 烧结温度为570 $^{\circ}\text{C}$, 烧结时间为2.5 h, 保温1 h, 随后水循环冷却至炉温低于200 $^{\circ}\text{C}$ 后, 进行随炉冷却, 试验所用少层石墨烯为某公司生产的BP-02型产品, 厚度为2.5 nm, 比表面积501 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 石墨烯的碳原子层数约为10。测试所用的4组试样的化学成分如表1所示。在ZEISS A-2光学显微镜下观察4组试样的微观组织形貌。

作者简介:

毛宇新 (1999-), 男, 本科生, 机械电子工程专业。

通讯作者:

水 丽, 女, 教授, 博士。
电话: 15940239684, E-mail: shuilisy@163.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2019)

11-1210-05

基金项目:

沈阳科技计划项目 (17-231-1-32); 2018 辽宁省大学生创新项目 (201810144058)。

收稿日期:

2019-05-18 收到初稿,
2019-08-14 收到修订稿。

1.2 摩擦磨损试验

把4组复合材料用线切割方法加工成尺寸为40 mm × 15 mm × 4 mm的片状摩擦磨损试样。用HVS-50型数显维氏硬度计测试复合材料显微硬度。在MDW-02摩擦磨损试验机上进行干摩擦磨损试验, 试验选用的参数如表2所示, 将摩擦磨损后的样品, 在超声波仪器里清洗干净并在JEM场发射电镜下观察磨痕形貌。

2 试验结果分析

2.1 石墨烯/Al-15Si复合材料的微观组织形貌

图1为添加不同含量石墨烯的石墨烯/Al-15Si复合材料的微观组织形貌。观察图1a-d微观组织, 石墨烯的添加范围为0~0.8%, 图中显示复合材料组织结构主要由铝基体、初生硅颗粒和微量的金属化合物颗粒组成(Al_2Si)。初生硅作为主要的强化相, 其形态和尺寸分布是影响石墨烯/Al-15Si复合材料力学性能的主要因素。由图1a可以看出, 未添加石墨烯的铝硅复合材料中初生硅颗粒约1~2.5 μm , 颗粒不规则且形状各异, 分布不均。由图1b、c可以看出, 随着石墨烯含量的增加, 初生硅颗粒形态发生显著变化, 硅颗粒在铝基体中尺寸相对减小。当石墨烯添加量达到0.6%时, 初生硅颗粒大小约1~1.5 μm , 硅颗粒弥散均匀地分布在铝基体中, 形状较为规则。从图1d可以看出, 当石墨烯含量为0.8%时, 硅颗粒在铝基体的分布比较均匀, 但硅颗粒尺寸较石墨烯含量为0.6%略有增大。无法在光学显微镜下观察到纳米级少层石墨烯的形貌,

C-Si元素间具有较强亲和力, 片状褶皱石墨烯易于成为Si颗粒团聚长大的衬底, 则石墨烯在基体中分布愈弥散, 愈会促进硅颗粒在基体中均匀弥散分布^[9]。

表3为不同石墨烯含量的4组复合材料的硬度测试结果。可知, 随着石墨烯含量的增加, 复合材料的硬度先增大后减小。可以看出, 石墨烯/Al-15Si复合材料的硬度与硅颗粒在铝基体分布的均匀性有关, 当石墨烯含量为0.6%时, 硅颗粒弥散分布, 复合材料的测试硬度值最大。

2.2 分形维数在石墨烯/Al-15Si复合材料微观组织形貌分析中的应用

由于金相拍摄的图片会随着选取位置的变化存在形貌上的差别, 加之初生硅颗粒形貌的不规则以及颗粒尺寸大小不一, 只能定性分析复合材料微观形貌对

表1 石墨烯/Al-15Si复合材料化学成分
Table 1 Chemical composition of Gr/Al-Si composite $w_B/\%$

样品编号	石墨烯	Si	Cu	Mg	Al
a	0	15	2.0	1.0	余量
b	0.4	15	2.0	1.0	余量
c	0.6	15	2.0	1.0	余量
d	0.8	15	2.0	1.0	余量

表2 摩擦磨损试验参数
Table 2 Fraction and wear test parameters

载荷/N	行程/mm	滑移速度/($m \cdot min^{-1}$)	摩擦力量程/N
80	40	500	0~800

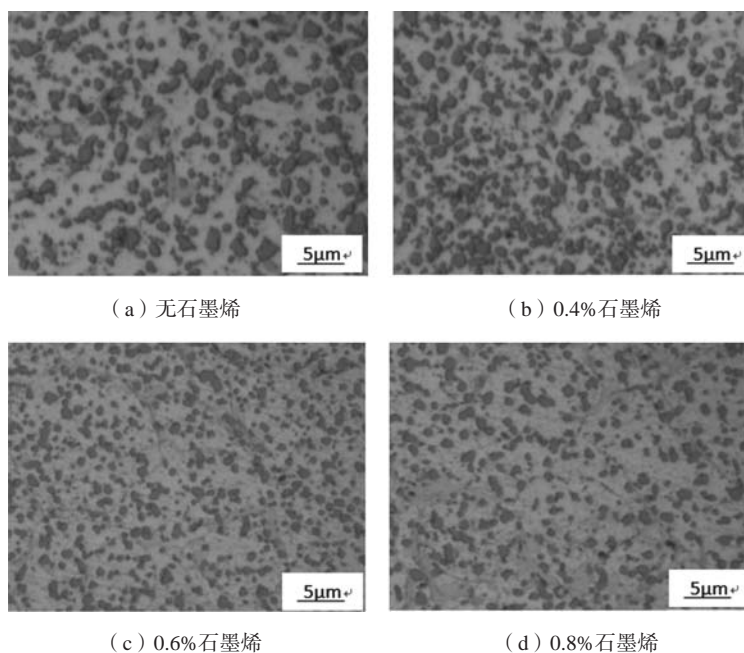


图1 石墨烯/Al-15Si复合材料微观组织形貌

Fig. 1 Microstructure morphologies of Gr/Al-15Si composites with different contents of graphene

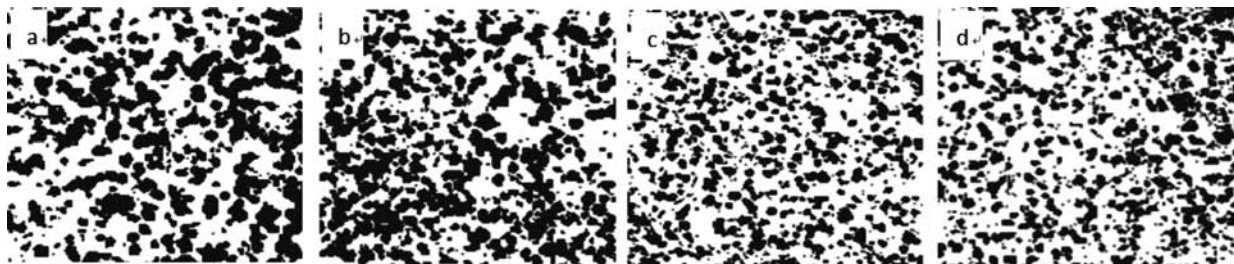
其力学性能的影响。分形理论盒维数法在材料微观形貌表征方面的应用为定量分析复合材料微观形貌提供了新的方法。何振娟等^[10]通过验证,表明基于Matlab的盒维数法能比较准确区分颗粒分布的均匀性和颗粒形态的复杂程度,且均匀性区分度明显。本研究基于分形理论利用Matlab软件,用盒维数法计算图1a-d的分形维数,具体步骤如下。①选取典型区域截取 500×500 像素的SEM图像;②对截取的图像进行预处理,包括灰度调整和滤波处理;③将预处理图像转化成二值图像;④通过Matlab软件中Fraclab工具箱的盒维数计算模版,导入二值化图像数据进行计算,得出其分形维数。

图2是图1a-d经过上述4步骤处理转化后的二值图像,图3是采用Matlab软件中Fraclab工具箱的盒维数计

算模版,分别将二值图像数据载入,得到的分形拟合双对数曲线。Fraclab是Matlab软件中一个基于分形和多重分形方法的工具箱,胡钟元等^[10]通过使用Kock雪花曲线对该Fraclab工具箱的盒维数计算的精确度进行检验,理论值与计算值相对误差低于8%,表明盒维数

表3 石墨烯/Al-15Si复合材料的硬度
Table 3 Hardness of Gr/Al-15Si composites

试样编号	石墨烯含量/%	硬度值HV
a	0	98
b	0.4	107
c	0.6	112
d	0.8	105



(a) 无石墨烯

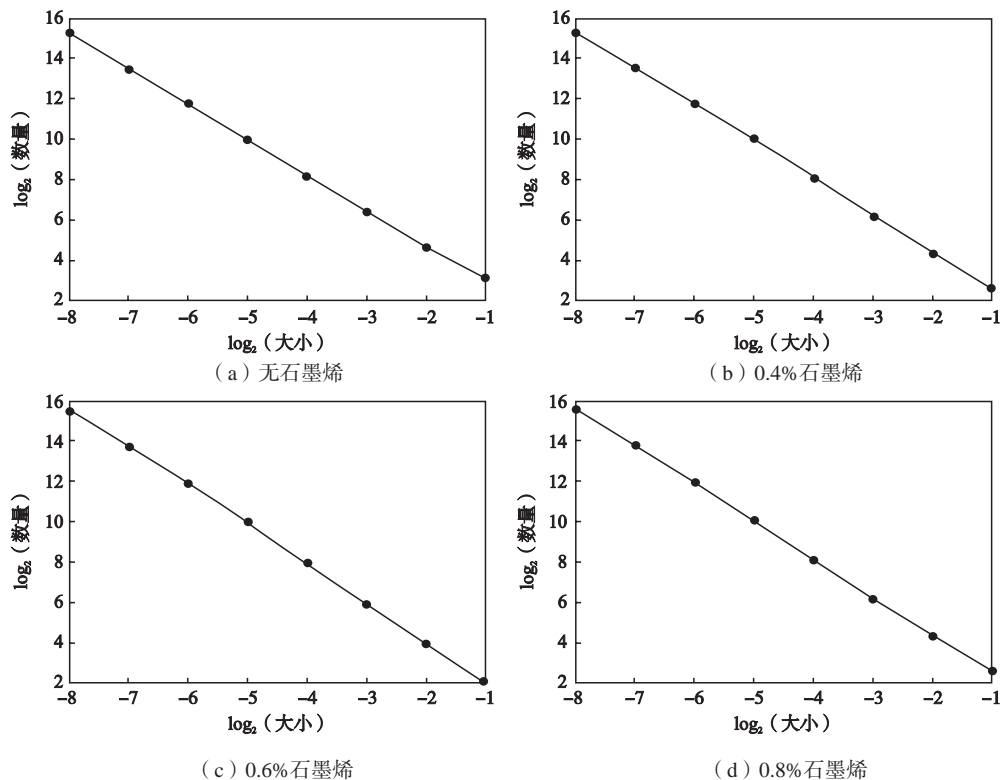
(b) 0.4%石墨烯

(c) 0.6%石墨烯

(d) 0.8%石墨烯

图2 组织形貌图像处理后的二值化图像

Fig. 2 Binary images of microstructure morphologies in Fig. 1



(a) 无石墨烯

(b) 0.4%石墨烯

(c) 0.6%石墨烯

(d) 0.8%石墨烯

图3 双对数图

Fig. 3 Double logarithmic graph

计算法可以准确表征图像的复杂程度和第二相（强化相）颗粒的分布。

通过双对数曲线斜率，得到石墨烯/Al-15Si复合材料初生硅相形貌的分形维数，其中，添加0、0.4%、0.6%和0.8%石墨烯的复合材料分形维数分别为1.751、1.827、1.944、1.876。根据何振娟等^[11]盒维数法评价复合材料第二相颗粒在基体中分布的均匀性准确性高，颗粒理想分布的分形维数值为2，计算的分形维数值越接近2，代表颗粒分布越均匀弥散。当石墨烯添加量为0.6%时，初生硅相形貌的分形维数值1.944接近2，说明硅颗粒在铝基体中弥散分布。

2.3 石墨烯/Al-15Si复合材料的摩擦磨损机理研究

表4列出了4组试样摩擦磨损测试结果，随着石墨烯含量的增加，复合材料的摩擦系数先减小后增大。当石墨烯含量增加到0.6%时，摩擦系数最小为0.46，复合材料的抗磨损性能最好。当石墨烯含量为0.8%时，复合材料摩擦系数有所增大，这可能与石墨烯在局部区域出现团聚有关，导致硅颗粒分布均匀性下降。

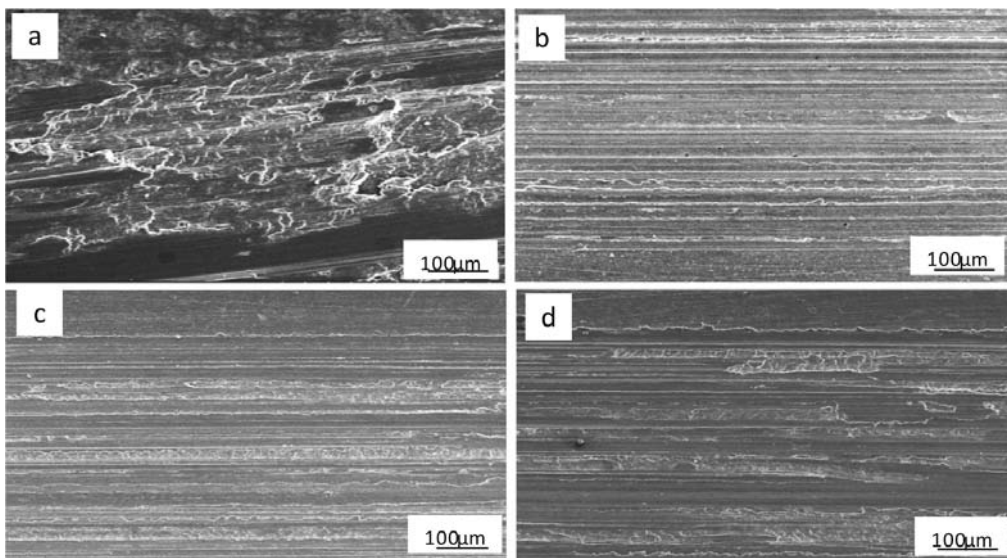
图4为4组石墨烯/Al-15Si复合材料干摩擦后的表面磨痕形貌。图4a为未添加石墨烯复合材料的磨痕形貌，可以看出，材料表面磨痕较深，鳞片状片层脱落较为严重，出现犁沟和卷翘唇边，其磨损机制主要是以粘着磨损为主，伴随有轻微磨粒磨损；随着石墨烯含量的增加（4b、c），摩擦试样表面形貌发生明显变化，磨痕深度变浅，其形貌特征主要为直线划痕和少

量的犁沟，此时的磨损机制是磨粒磨损为主，伴随发生微弱的粘着磨损。当石墨烯含量为0.8%（4d），复合材料表面形貌为直线划痕和犁沟，伴随有鳞片状片层脱落，其磨损机制是磨粒磨损和粘着磨损的综合作用。

可以看出，硅颗粒形貌的分形维数与复合材料摩擦系数随石墨烯含量变化而改变，二者的变化趋势相反。当石墨烯含量由0增加到0.6%时，分形维数达到最大1.944，硅颗粒在铝基体中弥散分布，材质均匀，平均硬度升高，此时摩擦系数最小为0.46，复合材料的耐磨性最好。通过以上分析，表明复合材料的摩擦系数与石墨烯复合材料中硅颗粒强化相形貌的分形维数之间存在对应关系。铝基体硬度较低，硅颗粒镶嵌在基体中，在摩擦实验过程中，局部棱角尖锐的硅颗粒易于从表面剥落，以磨粒的形式刮擦表面形成犁沟，导致摩擦系数升高。通过计算硅颗粒形貌分形维数，可以推测石墨烯铝硅复合材料的耐磨损性能，并为确定复合材料中石墨烯的合适添加量提供理论依据。

表4 不同石墨烯含量石墨烯Al-15Si复合材料的摩擦系数
Table 4 Friction coefficients of Gr/Al-15Si composites

试样编号	石墨烯含量/%	摩擦系数
a	0	0.67
b	0.4	0.6
c	0.6	0.46
d	0.8	0.53



(a) 无石墨烯；(b) 0.4%石墨烯；(c) 0.6%石墨烯；(d) 0.8%石墨烯

图4 石墨烯/Al-15Si复合材料的磨损SEM图

Fig. 4 SEM images of worn surfaces of Gr/Al-15Si composites with different contents of graphene

3 结论

(1) 在相同制备工艺条件下, 石墨烯添加量的改变使石墨烯/Al-15Si中初生硅相有不同的分形维数。石墨烯含量为0~0.8%时, 分形维数为1.751~1.944。分形维数的大小直接反映初生硅相形貌的分布均匀性和形态的复杂程度。分形维数越大, 石墨烯/Al-15Si中初生硅相的分布越弥散均匀。

(2) 石墨烯/Al-15Si复合材料中硅颗粒相形貌的分形维数可以反映复合材料的耐磨损性能, 分形维数越大对应摩擦系数越低。硅颗粒弥散均匀分布, 有利于提高复合材料的硬度, 降低材料的摩擦系数, 石墨烯含量从0上升至0.6%, 材料的摩擦磨损方式从粘着磨损为主逐步转化为磨粒磨损为主。

参考文献:

- [1] 孙晓东, 郭建, 黄小婷, 等. 过共晶铝硅合金的研究进展 [J]. 铸造技术, 2017, 38(4): 758-761.
- [2] 郭领军, 李贺军, 石振海. 内燃机活塞材料的研究及应用述评 [J]. 铸造, 2003(9): 657-660.
- [3] 白亚平, 刘萌萌, 李建平, 等. 柴油发动机活塞用铝基材料研究进展及失效分析 [J]. 表面技术, 2018, 47(6): 161-168.
- [4] 燕绍九, 陈翔, 洪起虎, 等. 石墨烯增强铝基纳米复合材料研究进展 [J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 57-70.
- [5] LI J F, ZHANG L, XIAO J K, et al. Sliding wear behavior of copper based composites reinforced with graphene nanosheets and graphite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3354-3362.
- [6] 徐运超. 石墨烯/Al-18Si复合材料摩擦磨损及切削特性的研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2018.
- [7] 杜艳红. 分形几何及其在材料科学中的应用 [J]. 科技视界, 2018, 33: 122-124.
- [8] 文洪杰, 彭达岩, 王资江, 等. 分形理论在材料研究中的应用和发展 [J]. 钢铁研究学报, 2000(5): 70-73.
- [9] 李泽华, 冯志军, 石飞. 机械搅拌制备SiC_p/AlSi₇Mg₂复合材料性 [J]. 铸造, 2018, 67(2): 125-130.
- [10] 胡钟元, 欧阳的华, 付凯城, 等. 一种基于分形的RDX感度计算方法 [J]. 火工品, 2016(3): 39-42.
- [11] 何振娟, 王录全, 庾正伟, 等. 基于MATLAB和分形理论的复合材料第二相颗粒分布均匀性评价方法 [J]. 中国粉体技术, 2014, 20(3): 76-79.

Tribological-Wear Behavior of Graphene Reinforced Al-15Si Matrix Composites Based on Fractal Theory

MAO Yu-xin, ZHANG Jian-zhuang, WANG Ye-yi, SHUI Li

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shengyang 110159, Liaoning, China)

Abstract:

Graphene/Al-15Si composites were prepared by powder metallurgy method, and the study was carried out on the effect of the microstructure of graphene/Al-15Si composite on the friction and wear properties. Fractal theory was used to analyze the morphology characteristics of primary crystalline silicon phase with the help of Matlab software. The results show that the graphene/Al-15Si composites have different fractal dimensions with the change of graphene addition. Fractal dimension reflects the distribution uniformity of silicon particles in composite materials. The larger the fractal dimension, the more uniform the distribution of silicon particles, and the higher the hardness of the material. Fractal dimension can reflect indirectly the wear resistance of composite materials. The higher the fractal dimension, the lower the friction coefficient of the material, and the better the wear resistance.

Key words:

graphene/aluminum-silicon matrix composite; morphology; fractal dimension; tribological-wear