DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4015

石墨烯/Al 复合材料的显微组织和物理性能研究

李　雷[1],杨南鹏[1],黄　朴[1],许征兵[1,2,3]

(1. 广西大学 广西高校高性能结构材料及热表加工重点实验室,广西 南宁 530004;2. 广西大学 省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室,广西 南宁 530004;3. 广西大学 广西生态铝创新协同实验中心,广西 南宁 530004)

摘　要:铝基复合材料具有重量轻、高耐蚀性、热膨胀系数低、导电导热性能优异和加工性能优良等优点而成为当前轻金属基复合材料研究的主流,其中,石墨烯/Al 复合材料是目前研究的热点方向。为了研究石墨烯含量对石墨烯/Al 复合材料物理性能的影响,本文采用了冷压烧结法制备了石墨烯质量分数为 0%(纯铝)、0.3%、0.6%和 0.9%的石墨烯/Al 复合材料,采用光学显微镜、扫描电子显微镜及其自带的能谱仪分析石墨烯/Al 复合材料的微观形貌及化学成分,采用高精度固体密度仪、显微硬度计、高温 DSC 分析仪和激光导热系数测量仪测试分析石墨烯/Al 复合材料的密度、硬度、比热容、热扩散系数和导热系数,对比分析了不同石墨烯含量对石墨烯/Al 复合材料性能的影响机制。结果表明,石墨烯/Al 复合材料中石墨烯均匀的分布在铝基体中, 石墨烯的添加能够使基体产生明显的晶粒细化, 当石墨烯含量超过 0.6%时,在复合材料中出现石墨烯的团聚现象。随着石墨烯含量的增加,复合材料的密度和致密度逐渐减小,硬度值呈现先增大后减小的趋势,比热容逐渐降低,热扩散系数先增大后略微减小,导热系数缓慢上升。

关键词:石墨烯;铝基复合材料;冷压烧结;显微组织;物理性能

中图分类号:TB333　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)04-0363-06

Microstructure and Physical Properties of Graphene/Al Composites

LI Lei[1], YANG Nanpeng[1], HUANG Pu[1], XU Zhengbing[1,2,3]

(1. Key Laboratory of High-Performance Structural Materials and Thermo-Surface Processing, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-cycle Safety for Composite Structures, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Centre of Ecological Collaborative Innovation for Aluminum Industry in Guangxi, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Aluminum matrix composites have become mainstream in current research on light metal matrix composites because of their advantages, such as light weight, corrosion resistance, low thermal expansion coefficient, excellent electrical and thermal conductivity and excellent processing properties. Among them, graphene/Al composites are currently a hot research topic. To investigate the effect of graphene content on the physical properties of graphene/Al composites, graphene/Al composites with graphene mass fractions of 0% (pure aluminium), 0.3%, 0.6% and 0.9% were prepared via the cold press sintering method, and the micromorphology of the graphene/Al composites was analysed using optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffractometer. The density, hardness, specific heat capacity, thermal diffusion coefficient and thermal conductivity of the graphene/Al composites were tested and analysed using a high-precision solid densitometer, microhardness tester, high-temperature DSC analyser and laser thermal conductivity meter (LFA) to compare and analyse the mechanism of the influence of different graphene contents on the properties of the graphene/Al composites. The results show that the graphene in the graphene/Al composites is uniformly distributed in the aluminium matrix, and the addition of graphene results in obvious grain refinement in the matrix. When the graphene content is greater than 0.6 wt.%, the agglomeration of graphene is observed in the composites. With increasing graphene content, the density and densification of the graphene/Al composites gradually decrease, the hardness tends to increase and then decrease, the specific heat capacity gradually decreases, the thermal diffusion coefficient increases and then slightly

收稿日期:2024-01-14

基金项目:国家自然科学基金(51961008);广西自然科学基金(2020GXNSFAA297269)

作者简介:李　雷,1998 年生,硕士生.研究方向为金属基复合材料的性能研究.Email: 2115391031@st.gxu.edu.cn

通讯作者:许征兵,1979 年生,博士,副教授.研究方向为铝合金熔体处理方向的研究.Email: xuzhb@gxu.edu.cn

引用格式:李雷,杨南鹏,黄朴,等.石墨烯/Al 复合材料的显微组织和物理性能研究[J].铸造技术,2024, 45(4): 363-368.

LI Lei, YANG Nanpeng, HUANG Pu, et al. Microstructure and physical properties of graphene/Al composites[J]. Foundry Technology, 2024, 45(4): 363-368.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

decreases, and the thermal conductivity slowly increases.

Key words: graphene; aluminum matrix composite; cold press sintering; microstructure; physical properties

先进的复合材料由两种或多种材料复合而成，可最大限度地提高复合材料的强度，并赋予单一材料无法提供的卓越性能和功能。然而，航空航天、军工、交通运输等领域迅速发展，传统的金属材料越来越难以满足这些领域对材料性能的高要求，因此开发性能优良，价格低廉的新型复合材料已成为各国材料工业的重要目标[1-2]。铝基复合材料具有重量轻、高耐蚀性、热膨胀系数低、导电导热性能优异和加工性能优良等优点而成为当前轻金属基复合材料研究的主流[3]。铝基复合材料的研究经历了很长时间的发展，已经在社会生活中得到了广泛应用[4-5]。近年来，如何发展更加成熟有效的生产工艺和方法，提高复合材料加工性能是铝基复合材料的一个发展方向，结合不同增强相优点的混杂增强的铝基复合材料近年来也得到了一定的发展[6-7]。增强相的加入可以在复合材料成型的过程中改善基体金属的显微组织和弥补基体金属性能上的不足，从而影响着复合材料的综合性能。

石墨烯作为一种优质增强相能够显著提高复合材料的综合性能，常被用于 Al、Cu 等金属增强相[8-9]。石墨烯是由单层碳原子形成的二维蜂窝结构，石墨烯的高强度杨氏模量(E=1.1 TPa)、高断裂或破裂强度(σ=130 GPa)，是目前已知最坚硬的材料[10-11]。石墨烯的近室温导热系数在$(4.84\pm0.44)\times10^3$~$(5.30\pm0.48)\times10^3$ W/(m·K)范围，石墨烯中的 π 键使石墨烯具有电子传导性，并使石墨烯层之间产生较弱的相互作用[12]。石墨烯优异的综合性能来源于其本身奇妙的化学结构，使其具有大量的基础应用及商业用途，将石墨烯材料掺杂进金属材料并最大化的发挥其增强效应具有广阔的应用前景[13-14]。石墨烯/Al 复合材料的研究目前还在起步当中，但其广阔的应用前景使其成为近年研究的热点[15-16]。Yang 等[17]利用挤压浸渗的方法制备了石墨烯/Al 复合材料，复合材料没有产生 Al_4C_3 脆性相，界面结合良好。当石墨烯质量分数为 0.54%时，复合材料屈服强度和抗拉强度分别提高了 116%和 45%，经过二次加工热挤压后，复合材料屈服强度和抗拉强度分别提高了 228%和 93%。Zhang 等[18]采用传统的粉末冶金法制备了石墨烯/Al 复合材料，当石墨烯的含量为 0.3%时，相比于纯铝，其复合材料的导热系数提高了 15.4%，抗压强度提高了 25.6%。石墨烯/Al复合材料相对于其他复合材料的研究较少，且各研究方法直接石墨烯含量对复合材料微观组织和性能的影响存在偏差，因此，目前石墨烯/Al 复合材料的研究主要集中在开发更佳的加工工艺和搭配更优的石墨烯成分配比。

本文采用冷压烧结法制备了石墨烯质量分数为 0%(纯铝)、0.3%、0.6%和 0.9%的石墨烯/Al 复合材料，并对比分析了复合材料的微观形貌、密度、硬度、比热容、热扩散系数和导热系数，探究了石墨烯对铝基复合材料物理性能的影响机制。研究结果有助于石墨烯/Al 复合材料的成分优化并为铝基复合材料的研究和冷压烧结工艺优化提供实验依据。

1 实验材料与方法

选用石墨烯作为增强体，石墨烯来自于广西大学可再生能源材料协同中心。采用纯铝粉作为复合材料的基体，其纯度为 99.9%，平均粒径为 20 μm 左右，表 1 为铝粉及其杂质含量。采用超声波分散+高能球磨+冷压烧结的方法制备了石墨烯/Al 复合材料，图 1 为制备流程。其具体步骤为：将石墨烯和无水乙醇混合得到悬浊液，用超声波清洗仪进行超声波震荡处理 30 min 得到混合液；再将纯铝粉加入混合液中，放置于空气中干燥让无水乙醇挥发，得到润湿且无结块的石墨烯和铝粉的复合粉体；放入 BM6 行星式球磨仪进行高能球磨，球磨过程中产生的热量使无水乙醇挥发得到干燥的混合粉体；将混合粉体用 769YP-40C 粉末压片机进行冷压处理得到压制块，冷压压力为 30 MPa，保压时间 5 min，制得的样品直径为 20 mm，高度为 10 mm；最后将压制块在氩气保护气氛下进行烧结得到石墨烯/Al 复合材料样品，烧结温度为 630 ℃，升温速率为 10 ℃/min，烧结时间为 6 h。采用 Leica 光学金相显微镜和日立 S-3400 扫描电镜对石墨烯/Al 复合材料的微观组织进行分析，采用高精度固体密度仪、HVS-1000 显微硬度计、高温 DSC 分析仪和激光导热系数测量仪(LFA)测试分析石墨烯/Al 复合材料的密度、硬度、比热容、热扩散系数和导热系数。

表1 铝粉及其杂质含量
Tab.1 Chemical composition of aluminium powder
(mass fraction/%)

Element	Al	Fe	Si	Cu	N
Content	Bal.	≤0.06%	≤0.03%	≤0.005%	≤0.001%

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

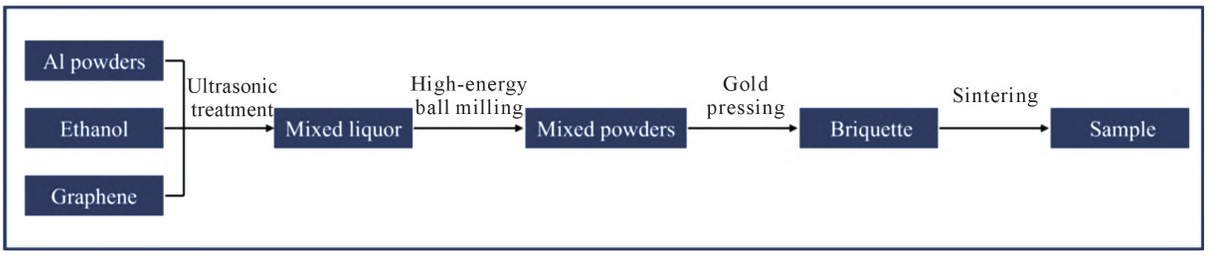

图 1　石墨烯 /Al 复合材料制备流程
Fig.1　The preparation process of graphene/Al composites

2　实验结果及讨论

2.1　石墨烯含量对复合材料显微组织的影响

图 2 是石墨烯/Al 复合材料的金相照片，其中图 2 a~d 分别代表石墨烯质量分数为 0%、0.3%、0.6%、0.9%的复合材料金相图片。当石墨烯的添加量为 0%，即纯铝基体时，图 2a 中出现了部分细小的等轴晶体，但是没有出现明显的晶界现象。当石墨烯的添加量为 0.3%时，从图 2b 中可以看出，晶界逐渐的明显起来，且晶粒出现明显的细化，石墨烯分布较均匀，此时石墨烯充当了“细化剂”角色。当石墨烯的添加量为 0.6%时，从图 2c 中可以明显看出，出现了粗大的等轴晶，且石墨烯出现轻微的团聚现象。当石墨烯含量达到 0.9%时，图 2d 可以看到，晶界越来越明显，部分晶粒得到明显的细化，不过此时石墨烯团聚现象严重，对材料的性能产生不利影响。

图 3 是石墨烯/Al 复合材料的 SEM 形貌。从图中可以看到基体表面分布着一些白色颗粒物质，这些是在冷压烧结过程中未能完全熔合而残留在基体上的铝颗粒。表 2 是图 3 中不同区域的化学成分，从 EDS 检测结果中可以看出，3 种复合材料均含有 Al、C、O 3 种元素，其中 Al 的含量基本维持在 97%以上，O 的含量基本维持在 2%左右，而 C 的含量只有不足 1%。此外由表 2 可知，在晶粒边界处 C 和 O 的含量较高，这说明在晶粒边界处形成了石墨烯的薄片，而 O 元素的存在是因为在烧结过程中基体 Al

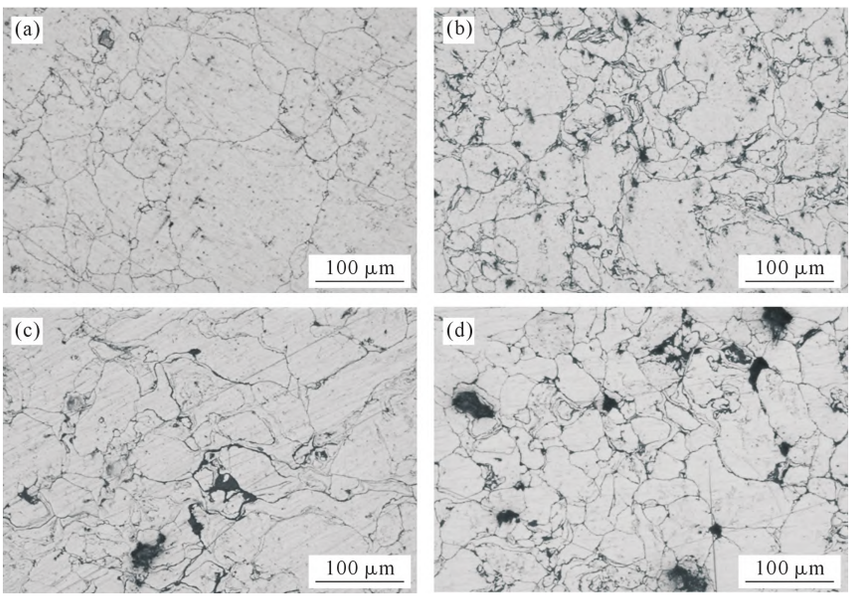

图 2　石墨烯/Al 复合材料金相组织：(a) 0%; (b) 0.3%; (c) 0.6%; (d) 0.9%
Fig.2　Metallographic structure of graphene/Al composites: (a) 0 wt. %; (b) 0.3 wt. %; (c) 0.6 wt. %; (d) 0.9 wt. %

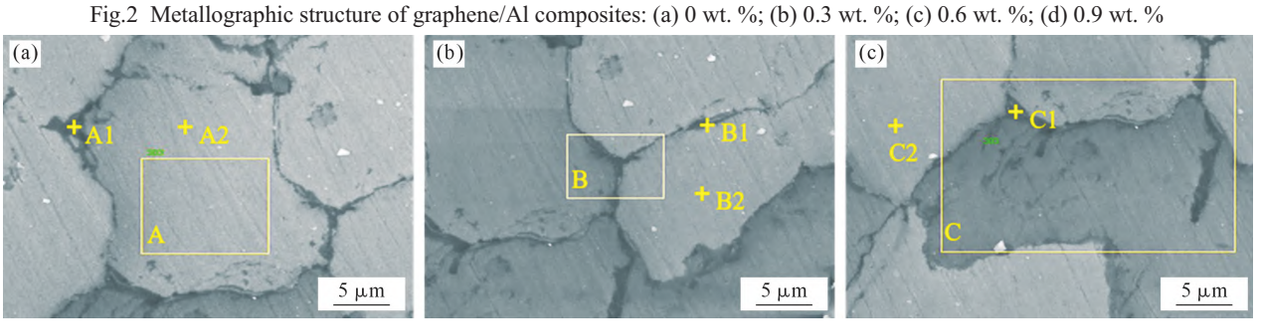

图 3　石墨烯 /Al 复合材料的 SEM 形貌：(a) 0.3%; (b) 0.6%; (c) 0.9%
Fig.3　SEM images of graphene/Al composites: (a) 0.3 wt. %; (b) 0.6 wt. %; (c) 0.9 wt. %

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 图3中不同区域的EDS检测结果
Tab.2 EDS results for different regions in Fig.3
(mass fraction/%)

Area	Al	C	O
A	97.93	0.29	1.78
A1	88.31	3.16	8.53
A2	100	0	0
B	97.57	0.61	1.82
B1	83.27	7.07	9.66
B2	100	0	0
C	97.33	0.90	1.77
C1	81.58	9.52	8.90
C2	100	0	0

不可避免的出现了氧化现象在局部生成了 Al_2O_3。图4是石墨烯/Al复合材料的XRD图谱，然而在XRD图谱中仅发现纯铝的衍射峰，并未发现C和 Al_2O_3 的衍射峰。这是因为石墨烯的添加量极少，超出了XRD检测的下限值，而复合材料中的 Al_2O_3 含量也极少并且只是出现在局部区域，故无法在XRD图谱中检测到明显的C和 Al_2O_3 衍射峰。

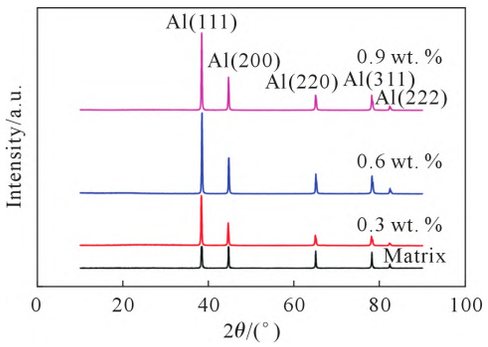

图4 石墨烯/Al复合材料的XRD图谱
Fig.4 XRD patterns of graphene/Al composites

2.2 石墨烯含量对复合材料物理性能的影响

图5是石墨烯/Al复合材料的密度变化曲线和硬度变化图，从图5a中可以看出，基体纯铝样品的密度为2.588 g/cm³，致密度为95.85%。当石墨烯的质量分数超过0.3%时，实际密度下降趋势更加明显；当达到0.9%时，复合材料密度为2.534 g/cm³，比铝基体下降了2.1%，此时复合材料的致密度达到最低值94.48 %。因为采用的是冷压烧结法而且石墨烯具有团聚倾向，所以制备的复合材料存在些许空隙孔洞在所难免。从图5b中可以看出，复合材料的硬度随着石墨烯的增加呈现先上升而下降的趋势，当石墨烯的质量分数为0.6%时，硬度达到最高值43.575 HV，比基体提高了21.6%。石墨烯质量分数为0.9%时，硬度值为41.725 HV，相比于最高值下降了4.2%。从结果可见，石墨烯的添加确实能够提高铝基体的硬度值，这是因为石墨烯本身的高强度的特性，在承受载荷时能够很好达到转移应力的作用[19]。另外石墨烯颗粒在材料变形时能够起到阻碍位错移动的作用，从而提升硬度。然而随着石墨烯添加量增加，当石墨烯质量分数为0.9%时，石墨烯在复合材料中形成团聚，降低了铝基体与石墨烯之间晶界的结合力，从而使硬度下降[20]。

图6为不同石墨烯含量的复合材料的比热容和热扩散系数随温度变化的曲线，从图6a中可以看出，随着温度的提高，复合材料的比热容呈现逐渐增长趋势。当温度超过120 ℃后，加入石墨烯的复合材料的比热容会有一个比较大下降，其原因可能是石墨烯的加入使得复合材料内部会有细小的孔洞，当温度上升到一定程度后，“孔洞”被作为复合材料的一部分用于比热容的计算，从而导致整体比热容的下降[21]。随着石墨烯的添加，复合材料的比热容呈下降的趋势。在温度为50 ℃时，纯铝的比热容为0.96 J/(g·K)，当石墨烯质量分数为0.9%时，比热容为0.74 J/(g·K)，相比铝基体降了22.9%。在温度分别为100 ℃，200 ℃时，石墨烯质量分数为0.9%的复合材料的比热容相比铝基体分别下降了20.9%和18.6%。因为纯铝的比热容大概在0.88 J/(g·K)左右，而碳的比热容在0.5 J/(g·K)左右，所以加入石墨烯后，复合材料的比热容会基本呈现下降的趋势。

从图6b中可以看出，随着温度的提高，复合材料的热扩散系数会呈现一个下降的趋势，而且当温

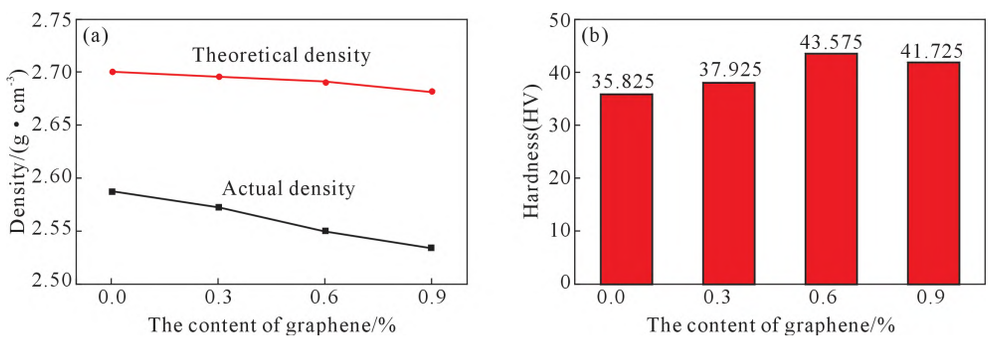

图5 石墨烯/Al复合材料的密度和硬度：(a) 密度变化曲线；(b) 硬度变化图
Fig.5 Density and hardness of graphene/Al composites with varying graphene content: (a) density; (b) hardness

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

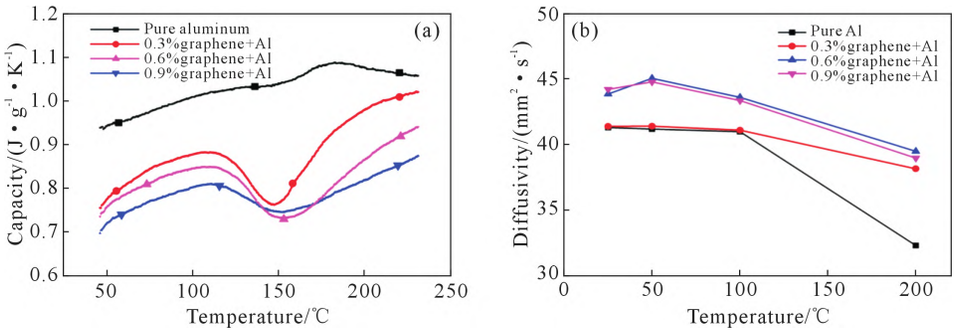

图 6 石墨烯/Al复合材料的比热容和热扩散系数：(a) 比热容；(b) 热扩散系数

Fig.6 Specific heat capacity and thermal diffusion coefficient of graphene/Al composites: (a) specific heat capacity; (b) thermal diffusion coefficient

度超过 100 ℃时，下降趋势会更加的明显。当温度为 200 ℃时，相比较于室温，不同石墨烯含量的复合材料的热扩散系数分别下降了 20.4%、6.0%、9.3%、7.0%。数据表明当温度上升至 200 ℃铝基体下降趋势要远远大于含石墨烯的复合材料，这是因为石墨烯具有高的热扩散性，石墨烯在铝基体中形成了更多的导热通道，石墨烯的加入改善了复合材料的热扩散性性能[22]。室温下，纯铝的热扩散系数为 41.53 $mm^2 \cdot s^{-1}$，随着石墨烯的加入，复合材料的热扩散系数会呈现一个初步上升的趋势，当石墨烯质量分数达到 0.6%时，热扩散系数为 44.1 mm^2/s，相比铝基体提高了 6.2%，当石墨烯的量继续增加到 0.9%时，此时的热扩散系数较 0.6%时并未有明显提高，可能是因为过量的石墨烯会在铝基体中形成团聚，造成基体空隙而对热扩散系数有所影响，而且石墨烯含量增大后会造成石墨烯从基体中脱落，影响复合材料力学性能和导热性能。上述结果表明石墨烯的适量添加能够提高复合材料的热扩散系数。

根据石墨烯/Al复合材料的热扩散系数 α，比热容 c 和密度 ρ，即可由式(1)计算复合材料的导热系数 λ[23]。

$$\lambda=\alpha\times\rho\times c \tag{1}$$

式中，λ 为导热系数，W/(m·k)；α 为热扩散系数，mm^2/s；c 为比热容，J/(g·K)；ρ 为密度，g/cm^3。

图 7 为不同温度下复合材料的导热系数随石墨烯质量分数增加而变化的曲线。从图中可以看出，随着石墨烯质量分数的增加，复合材料的导热系数整体呈现一个缓慢上升的趋势，当石墨烯质量分数为 0.9%时，导热系数达到最大值，在温度为 50 ℃、100 ℃和 200 ℃时，分别为 87.5 W/(m·K)、95.3 W/(m·K)、86.7 W/(m·K)，相比铝基体提高了 3.3%、3.8%、14.7%，表明石墨烯能在一定程度下提高复合材料的导热系数。而随着温度的提高，复合材料的导热系数呈现先上升后下降的趋势，当温度从 50 ℃升高到 100 ℃，导热系数会有比较大的提高，而温度从 100 ℃升高到 200 ℃后，导热系数会有一个比较大的下降。其直接原因是因为温度从 100 ℃升高到 200 ℃后复合材料的热扩散系数会有一个比较大的下降从而导致导热系数的下降。而根本原因在于，物体的导热传递依靠的是温度梯度差，当外部环境的温度升高到一定程度时，温度梯度差会变小，导热速率就会变慢，所以温度升高到 200 ℃时，样品的导热系数也会有所下降。

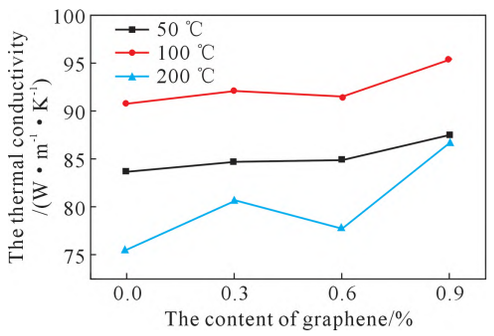

图 7 石墨烯/Al复合材料的导热系数变化曲线

Fig.7 Thermal conductivity of graphene/Al composites

3 结论

(1)石墨在石墨烯/Al复合材料中均匀分布，并起到晶粒细化的作用。当石墨烯的质量分数超过 0.6%时，在复合材料中开始出现石墨烯的团聚现象，当石墨烯含量过多，石墨烯团聚加剧时会对复合材料的性能产生影响。

(2)随着石墨烯含量的增加，复合材料的密度和致密度逐渐减小，硬度值呈先增大后减小的趋势，比热容逐渐降低，热扩散系数先增大后略微减小，导热系数缓慢上升。石墨烯质量分数在 0.6%时，复合材料达到最大硬度值 43.575 HV，石墨烯质量分数在 0.9%时，复合材料导热系数达到最大值 95.3 W/(m·K)。

参考文献：

[1] MORTENSEN A, LLORCA J. Metal matrix composites[J]. Annual Review of Materials Research, 2010, 40: 243-270.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2] KAINER K U. Basics of metal matrix composites[M]//KAINER K U. Metal matrix composites: Custom-made materials for automotive and aerospace engineering. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006: 1-54.

[3] 曹遴,陈彪,贾振东,等. 铝基复合材料研究进展及其航空航天应用[J]. 铸造技术,2023, 44(8): 685-705.
CAO L, CHEN B, JIA Z D, et al. Research progress and aerospace applications of aluminum matrix composite[J]. Foundry Technology, 2023, 44(8): 685-705.

[4] KIM C S, CHO K, MANJILI M H, et al. Mechanical performance of particulate-reinforced Al metal-matrix composites (MMCs) and Al metal-matrix nano-composites (MMNCs)[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52: 13319-13349.

[5] RAMNATH B V, ELANCHEZHIAN C, ANNAMALAI R, et al. Aluminium metal matrix composites-a review [J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2014, 38(5): 55-60.

[6] MOONA G, WALIA R, RASTOGI V, et al. Aluminium metal matrix composites: A retrospective investigation[J]. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 2018, 56(2): 164-175.

[7] SADHU K K, MANDAL N, SAHOO R R. SiC/graphene reinforced aluminum metal matrix composites prepared by powder metallurgy: A review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 91: 10-43.

[8] HIDALGO-MANRIQUE P, LEI X, XU R, et al. Copper/graphene composites: A review[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54 (19): 12236-12289.

[9] SEYED POURMAND N, ASGHARZADEH H. Aluminum matrix composites reinforced with graphene: A review on production, microstructure, and properties[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2020, 45(4): 289-337.

[10] MOON J S, GASKILL D K. Graphene: Its fundamentals to future applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(10): 2702-2708.

[11] ALLEN M J, TUNG V C, KANER R B. Honeycomb crbon: A review of graphene[J]. Chemical Reviews, 2010, 110(1): 132-145.

[12] 赵娟平,解念锁,王少华. 石墨烯的制备与应用研究进展[J]. 铸造技术,2018, 39(12): 2887-2890.
ZHAO J P, JIE N S, WANG S H. Study progress of preparation and application of graphene [J]. Foundry Technology, 2018, 39 (12): 2887-2890.

[13] GEIM A K. Graphene: Status and prospects[J]. Science, 2009, 324 (5934): 1530-1534.

[14] RAO C N R, BISWAS K, SUBRAHMANYAM K S, et al. Graphene, the new nanocarbon[J]. Journal of Materials Chemistry, 2009, 19(17): 2457-2269.

[15] ALI A M, OMAR M Z, HASHIM H, et al. Recent development in graphene-reinforced aluminium matrix composite: A review [J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2021, 60(1): 801-817.

[16] DU X, ZHENG K, LIU F. Microstructure and mechanical properties of graphene-reinforced aluminum-matrix composites[J]. Materiali in Tehnologije, 2018, 52(6): 763-768.

[17] YANG W S, ZHAO Q Q, XIN L, et al. Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplates reinforced pure Al matrix composites prepared by pressure infiltration method [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 732: 748-758.

[18] ZHANG L, HOU G M, ZHAI W, et al. Aluminum/graphene composites with enhanced heat-dissipation properties by in-situ reduction of graphene oxide on aluminum particles[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 748: 854-860.

[19] AYBARC U, DISPINAR D, SEYDIBEYOGLU M O. Aluminum metal matrix composites with SiC, Al_2O_3 and graphene-Review [J]. Archives of Foundry Engineering, 2023, 18(2): 2299-2944.

[20] GAO X, YUE H Y, GUO E J, et al. Preparation and tribological properties of homogeneously dispersed graphene-reinforced aluminium matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2018, 34(11): 1316-1322.

[21] KHAN M, DIN R U, BASIT M A, et al. Study of microstructure and mechanical behaviour of aluminium alloy hybrid composite with boron carbide and graphene nanoplatelets[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 271: 124936.

[22] ALAM M A, YA H B, AZEEM M, et al. Advancements in aluminum matrix composites reinforced with carbides and graphene: A comprehensive review [J]. Nanotechnology Reviews, 2023, 12 (1): 20230111.

[23] CHENG P, CHEN X, GAO H Y, et al. Different dimensional nanoadditives for thermal conductivity enhancement of phase change materials: Fundamentals and applications[J]. Nano Energy, 2021, 85: 105948.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net