

石墨烯/PLA吸波复合材料等效传热性能分析

刘文君^{1,2}, 韩海涛^{1,2*}, 鲁芹^{1,2}, 高俊杰^{1,2}, 聂榕序^{1,2}

(1. 中国航空气动力技术研究院, 北京 100074; 2. 中国航天科技集团有限公司 航天飞行器气动热防护实验室, 北京 100048)

摘要: 基于细观力学理论, 运用代表性体积单元方法研究石墨烯填充聚乳酸(PLA)复合材料导热性能。根据显微照片分析复合材料细观结构特征并构建二维随机分布模型, 利用有限元方法求解复合材料等效导热系数, 并通过实验结果验证模型正确性和有效性。通过参数化分析研究各细观结构参数对复合材料导热性能的影响规律, 并通过传热路径分析其影响机制。结果表明: 所建随机模型数值模拟结果与实验结果拟合较好; 随石墨烯质量分数增加, 复合材料传热性能增强, 且石墨烯的长厚比与取向对复合材料整体导热性能有较大影响; 同时, 石墨烯与基体之间的界面接触热阻显著降低了复合材料整体导热性能。

关键词: 石墨烯; PLA; 随机模型; 导热性能; 数值模拟

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2022.000072

中图分类号: V254; V259

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2023)02-0075-08

Analysis of equivalent heat transfer performance of graphene /PLA absorbing composites

LIU Wenjun^{1,2}, HAN Haitao^{1,2*}, LU Qin^{1,2}, GAO Junjie^{1,2}, NIE Rongxu^{1,2}

(1. China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China; 2. Aerospace Aircraft Aerodynamic Thermal Protection Laboratory, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on the theory of micromechanics, the thermal conductivity of poly(lactic acid) (PLA) composites filled with graphene (GR) sheets was studied by representative volume element method. According to the micrographs, the microstructure characteristics of the composite were analyzed, and a two-dimensional random model was established. The equivalent thermal conductivity of GR composite was calculated by finite element method, and the accuracy of the model was verified by experimental results. The influences of the microstructure parameters to the thermal conductivity of the composite were studied by parametric analysis, and its heat transfer mechanism was analyzed. The results show that the numerical results of the random model are in good agreement with the experimental results. With the increase of graphene mass fraction, the heat transfer performance of the composite is enhanced. The aspect ratio and orientation of graphene in the composites have great influence on the overall thermal conductivity of the GR composite. At the same time, the interfacial contact thermal resistance between graphene and matrix also has great influence on the overall thermal conductivity of the composites. The present model and the parametric analysis results can provide reference for optimal design of the absorbing materials.

Key words: graphene; PLA; random model; thermal conductivity; numerical simulation

石墨烯(graphene)是一种优良的介电损耗型吸波材料, 其电磁损耗机制主要包括界面极化弛豫、偶极极化弛豫和电导损耗^[1], 在电磁场作用下, 石墨烯的缺陷和基团中正负电荷聚集形成偶极子并

产生定向旋转, 界面处的电子聚集并重新排列, 导致弛豫损耗, 吸收和耗散电磁能, 同时石墨烯可形成导电网络, 带来很强的电导损耗^[2]。基于石墨烯优良的介电损耗性能, 结合细观组分设计可获得宽

频高效吸波复合材料。Ren等^[3]以环氧树脂/氰酸酯树脂共混物为基体,石墨烯纳米片为吸波剂制备了吸波复合材料,当石墨烯质量分数为3%时,复合材料在5.8~6.6 GHz频率范围内,材料对电磁波的吸收率在90%以上。邢垒^[4]制备了石墨烯/纳米 Fe_3O_4 /聚乳酸吸波复合材料,实现在12.4~16.0 GHz频率范围内,材料对电磁波的吸收率在90%以上。胡正浪等^[1]通过将石墨烯、铁镍合金添入聚乳酸,制备出石墨烯/铁镍合金/聚乳酸复合材料,最小反射损耗(reflection loss, RL)为-40.5 dB,反射损耗小于-10 dB的频率范围为13.28~18 GHz。然而,研究表明,介电损耗型吸波材料的吸波性能受到工作温度的影响较大^[5-7],一方面,材料中可移动电荷的移动能力受温度影响较大,材料复介电常数的改变将直接影响到材料吸波性能,同时,温度的升高可能导致石墨烯等导电损耗碳质材料的电导率显著增加,产生电磁屏蔽效应,增加反射率^[8-9]。穆阳等^[10]研究了温度对KD-I和SLF SiC两种纤维吸波性能的影响,从室温升至700 °C, KD-I纤维的电磁反射率逐渐增大, SLF纤维的反射率则逐渐减小。Hou等^[9]研究了温度对还原氧化石墨烯/氮化硅复合材料吸波性能的影响,发现材料厚度为4.3 mm时,323 K温度下,复合材料最低反射损耗约为-16.5 dB,温度上升到873 K,最低反射损耗上升到约-14 dB,且在800、1000、1200 °C和1400 °C下制得的石墨烯,其最低反射损耗分别为-4、-21、-13 dB和-14.7 dB,吸波性能随温度波动较大。Yin等^[11]研究发现,5 mm厚的SiC/ZrO₂复合材料,室温下的有效吸波带宽为5 GHz,800 °C时,吸波带宽提升为5.9 GHz;另一方面,对于聚合物基吸波复合材料,高温条件下的基体热解、石墨烯氧化等也将改变其吸波性能,甚至造成材料破坏。如以聚二甲基硅氧烷、石蜡以及有机硅树脂为基体的电磁吸收材料,它们只能在低于673 K的温度下工作,高于673 K则失去吸波能力^[12]。Valapa等^[13]研究了石墨烯/PLA复合材料的热稳定性,发现温度高于400 °C以后,材料发生分解,失去吸波能力^[12]。可见,研究吸波复合材料的传热性能与温度响应,对其综合性能优化设计具有重要的工程意义。

针对复合材料的导热性能分析,当前有实验方法、理论方法和数值方法等,其中基于细观特征建模的有限元单胞模型方法在近些年获得了广泛应用。针对填充型复合材料的几何周期性特点,通过选取合适尺寸,采用代表性体积单元即能模拟复合材料整体导热性能。由于有限元单胞方法可以对

材料内部复杂的细观结构直接建模,有效模拟材料内部细观传热路径,因此能够获得较为准确的传热性能预测结果。张晓光等^[14]建立了碳纤维/橡胶复合材料有限元单胞模型,研究了碳纤维对橡胶复合材料导热性能的影响,模型模拟值与实验结果符合较好。高俊杰等^[15]依据树脂基烧蚀材料细观特征,建立了不同尺度的材料导热率预测模型,并对其传热机理进行了分析,等效导热系数预测值与实验结果吻合较好。罗文等^[16]建立了空心玻璃微球填充环氧树脂基体随机单胞模型,分析了复合泡沫塑料中的温度场分布及热流矢量传递情况。夏彪等^[17]采用周期性的非绝热温度边界条件加载于三维编织复合材料单胞,计算了三维四向和五向编织复合材料的整体等效导热系数,研究了编织角、纤维体积分、编织结构等参数对材料热物理性能的影响规律。

当前研究中,对石墨烯/PLA吸波复合材料导热性能的细观建模及数值分析较少,本工作建立石墨烯/PLA吸波复合材料模型,对其等效传热性能进行分析。基于细观力学理论,通过显微照片对复合材料细观结构特征进行统计分析,采用代表性体积单元方法构建细观结构随机模型,探讨石墨烯/PLA吸波复合材料细观结构参数对导热性能的影响规律,为吸波材料综合性能分析各优化设计提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

Jiang等^[18]将石墨烯添加到PLA基体中,制得了宽频吸波石墨烯/PLA吸波复合材料,石墨烯原材料和复合材料微结构分别如图1和图2所示。石墨烯/PLA复合材料以PLA(牌号:4032D, Nature Work(USA) LLC)为基体,石墨烯(牌号:SE1430,

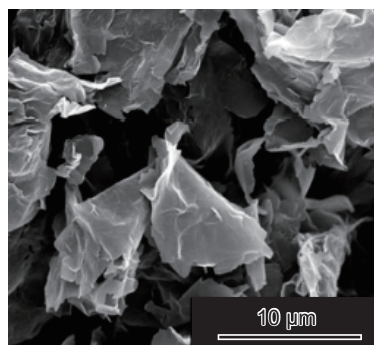


图1 纯石墨烯微观形貌结构^[18]

Fig. 1 Micromorphological structure of pure graphene^[18]

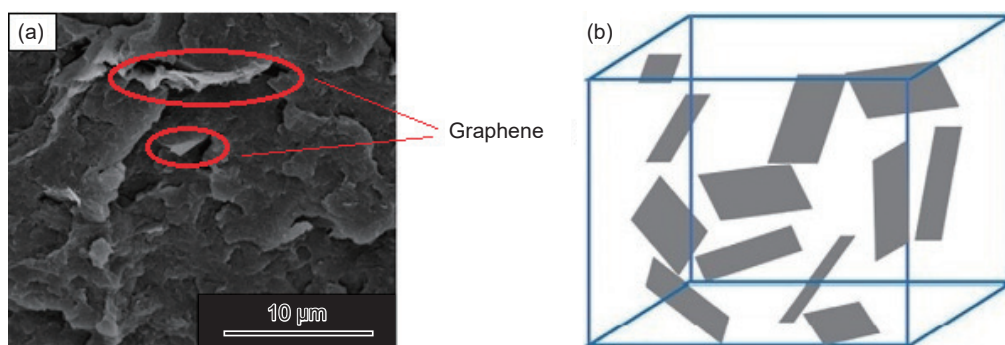


图2 石墨烯/PLA 复合材料断面微观形貌(a)和石墨烯分布示意图(b)^[18]

Fig. 2 Sectional micro-morphology (a) and schematic diagram of graphene distribution (b) of graphene/PLA composites^[18]

The Sixth Element (Changzhou) Materials Technology Co, Ltd) 为填料, 表1所示为各组分材料参数。本研究选取石墨烯填料的质量分数分别为0.5%、1%、2%、3%和4%。单层石墨烯的理想热导率高达 $5300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 随着石墨烯层数的增加, 石墨烯的热导率逐渐趋近于石墨($2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)^[19], 因此, 本工作石墨烯的热导率取为 $2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

表1 石墨烯/PLA 复合材料各组分材料参数^[18-20]

Table 1 Material parameters of component of graphene/PLA composites^[18-20]

Component	Thermal conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	C_p / ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Density / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
PLA	0.205	2.04	1.24
Graphene	2000	2	2.2

1.2 实验方法

1.2.1 建立随机单胞模型

根据材料细观特征生成二维随机模型, 构建具有代表性的体积单元, 以该体积单元为研究对象进行模拟分析, 在构建代表性体积单元时, 假设体积单元在空间分布具有周期性。根据体视学原理^[21], 二维模型中物相面积分数与三维材料的体积分数

相同, 将其作为模型中物相百分含量的控制依据。本工作选取随机单胞尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。由图1石墨烯原材料显微照片可见, 石墨烯呈现较为均匀的薄片状结构, 特征长度不超过 $10 \mu\text{m}$ ^[18]。图2(a)为石墨烯/PLA吸波复合材料断面SEM图, 可见PLA基体均匀连续, 内部无明显孔隙, 而石墨烯与基体界面呈现不连续接触, 存在明显随机界面孔隙。近似狭长长方形的石墨烯薄片随机分布于PLA基体中, 如图2(b)所示, 由于体积含量较低, 石墨烯片层之间几无接触, 未形成大面积桥联现象。石墨烯复合材料的细观结构吸波机制如图3所示, 可见入射电磁波在材料内部经过石墨烯多次反射, 传播路径显著延长, 使得电磁波被多次吸收损耗, 从而降低了电磁波的反射能量。石墨烯质量分数为7%, 石墨烯/PLA复合材料实心平板厚度为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mm}$ 时, 在 $9.5 \sim 15 \text{ GHz}$ 频率范围内, 复合材料的反射损耗小于 -10 dB , 最低反射损耗可达 -14 dB , 达到良好的吸波效果^[22]。

根据以上统计信息生成随机参数并控制模型生成, 根据石墨烯填充率是否达到指定体积分数判断模型生成是否结束。其中, 体积分数 ϕ_f 与质量分数 w_f 的转换关系可由下式描述^[23]:

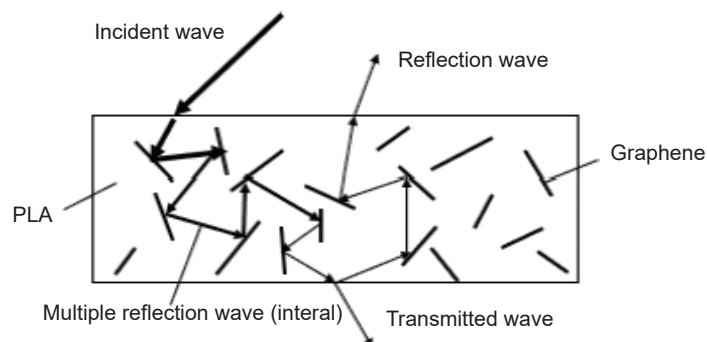


图3 石墨烯/PLA 复合材料吸波机制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the absorption mechanism of graphene/PLA composites

$$\phi_f = \frac{W_f}{W_f(1-\chi) + \chi} \quad (1)$$

式中: $\chi = \rho_f / \rho_m$, 其中 ρ_f 和 ρ_m 分别为填料和基体的密度, 本工作中, $\rho_f = 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\rho_m = 1.24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

图 4 所示为建立的不同质量分数石墨烯填充 PLA 基体随机模型, 接触界面局部放大图如图 5 所示。其中, 采用石墨烯周围紧邻的一层单元模拟材

料触界面, 接触不连续部位即存在界面孔隙部位, 单元导热性能取为空气导热系数; 接触紧密部位即无界面孔隙部位, 单元取为 PLA 基体导热系数; 界面单元中孔隙所占比率定义为界面孔隙率, 用于表征材料界面的接触状态。同时, 由于除石墨烯与 PLA 的接触界面外, 基体材料中不存在明显孔隙且温度较低, 因此不考虑材料内部孔隙对流和辐射传热。

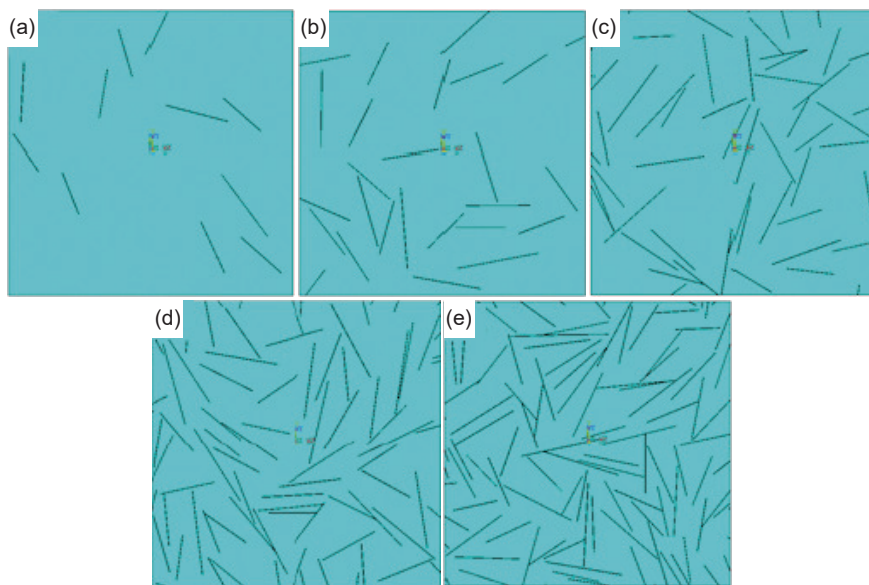


图 4 不同质量分数石墨烯填充 PLA 基体随机模型 (a)0.5%; (b)1%; (c)2%; (d)3%; (e)4%

Fig. 4 Random model of PLA matrix filled with graphene of different mass fractions (a)0.5%; (b)1%; (c)2%; (d)3%; (e)4%

1.2.2 加载边界条件

在单胞模型左右侧边加载周期性边界条件 $T(x, y) - T(x + L, y) = 0$, 保持热量输入与输出平衡, 在单胞上下表面加载温差边界条件 $T(x, y + L) - T(x, y) = \Delta T$, 进行传热过程模拟, 不失一般性, 可取温差 ΔT 为 20°C , 具体加载方法可参考文献 [17], 边界条件加载示意图如图 6 所示。

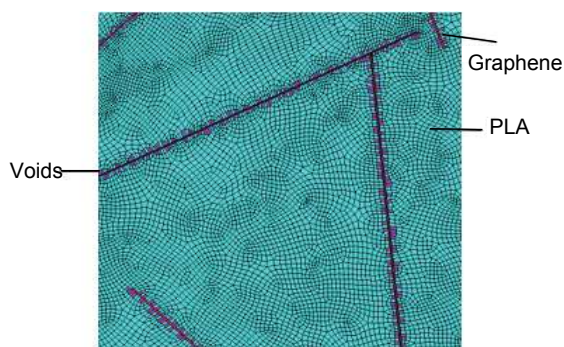


图 5 石墨烯与 PLA 基体接触界面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of contact interface between graphene and PLA matrix

采用稳态热分析法模拟材料内部导热性能。由 Fourier 定律计算热流的公式:

$$q = -k \frac{dT}{dn} \quad (2)$$

式中: q 为热流密度; k 为导热系数; dT/dn 表示温度梯度。在二维随机模型中, 热流密度 q 与热流量 Q 、边界长度 L 的关系为:

$$|q| = \frac{Q}{L} \quad (3)$$

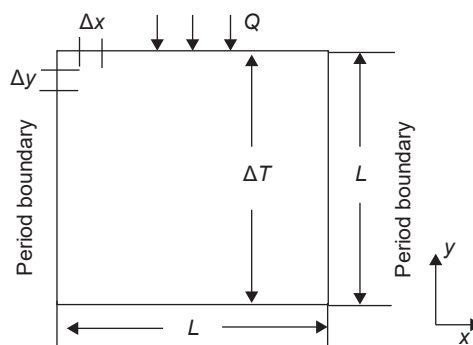


图 6 边界条件加载示意图

Fig. 6 Boundary condition loading schematic

温度梯度可由下式(4)获得:

$$\frac{dT}{dn} = \frac{\Delta T}{L} \quad (4)$$

结合式(2)、(3)、(4), 推导得到等效导热系数 $k = \frac{Q}{\Delta T}$ 。式中: Q 表示模型计算域上边或下边的热流量, 通过提取计算结果中 y 方向, 即研究方向热流输出面上所有节点输出的热量之和获得; L 为模型边长; ΔT 为温差。

通过建立多个随机模型进行求解, 模拟可能的随机分布从而具有统计特征, 并将多个模型结果进

行平均, 得到最终的等效导热系数值。

1.2.3 随机模型验证

不同质量分数石墨烯填充 PLA 基体随机模型温度云图结果如图 7 所示, 导热系数模拟值与 Jiang 等^[18] 的实验值对比如图 8 所示, 可见除石墨烯含量为 0.5% 外, 数值模拟值与实验测量值偏差小于 3.2%, 二者吻合较好, 验证了所建模型的正确性。同时, 可见复合材料导热系数随石墨烯质量分数的增加而提高, 当石墨烯质量分数为 4% 时, 复合材料导热系数为 $0.58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 约为纯 PLA 的 2.8 倍。

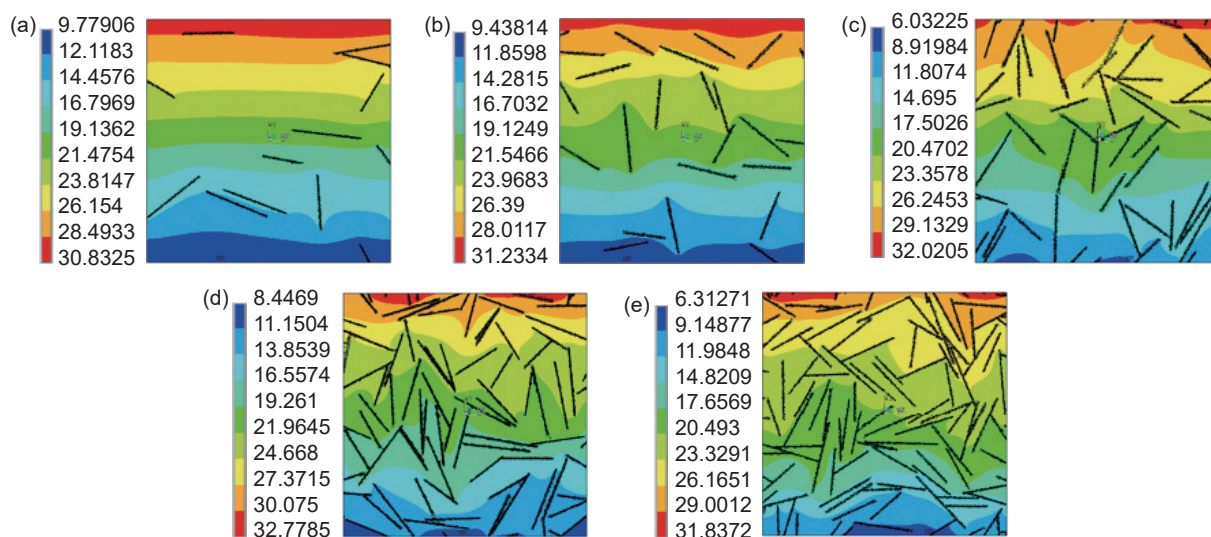


图 7 不同质量分数石墨烯填充 PLA 基体随机模型温度云图 (a)0.5%; (b)1%; (c)2%; (d)3%; (e)4%

Fig. 7 Temperature cloud map of random model of PLA matrix filled with graphene of different mass fractions (a)0.5%; (b)1%; (c)2%; (d)3%; (e)4%

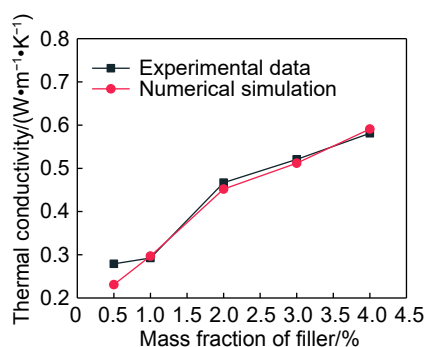


图 8 数值模拟结果与实验值的对比

Fig. 8 Comparison of numerical simulation results with experimental data

2 结果与讨论

2.1 石墨烯长厚比对复合材料导热性能的影响

图 9 为石墨烯质量分数为 0.5% 时, 复合材料导热系数随石墨烯长厚比变化的模拟结果, 可见复

合材料导热系数随石墨烯长厚比的增大而明显提高。由图 10 热流矢量图可见, 热流主要沿石墨烯片长度方向传递。保持石墨烯质量分数与厚度不变, 提高石墨烯片长度, 或保持石墨烯质量分数与长度不变, 提高石墨烯厚度, 其模拟结果分别如

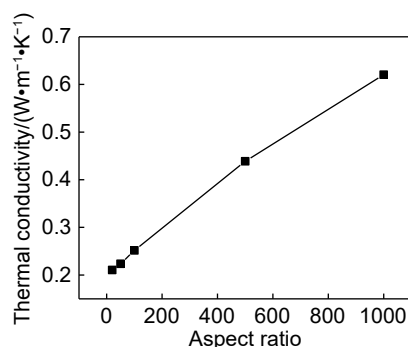


图 9 导热系数随石墨烯片长厚比变化关系

Fig. 9 Relationship between thermal conductivity and aspect ratio of graphene sheets

图 11 和图 12 所示,可见复合材料导热系数随石墨烯长度增加而提高,随厚度增加而降低,并且随着长度与厚度的分别增加,影响逐渐减小,这一变化趋势与 Hajilar 等^[24]、李茂源^[25]和吴晨光等^[26]的研究结论吻合。这是因为,石墨烯为二维纳米平面材料,面内导热系数比面外方向大 1~2 个数量级^[27-28],即沿石墨烯长度方向的导热系数与石墨烯厚度方向的导热系数大小存在数量级差异,因此,热流主要沿石墨烯长度方向传递,如图 10 所示。同时,由于石墨烯超高的导热系数,在复合材料内

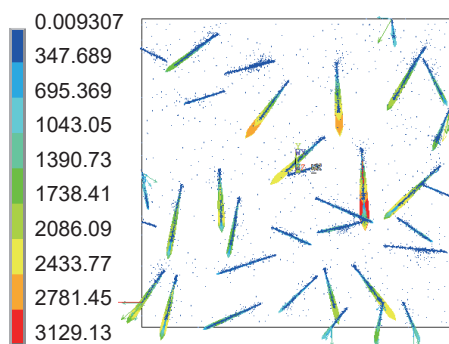


图 10 随机模型热流矢量图

Fig. 10 Random model heat flow vector

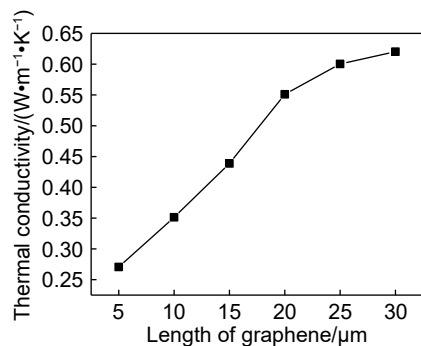


图 11 导热系数随石墨烯长度变化关系

Fig. 11 Relationship between thermal conductivity and graphene length

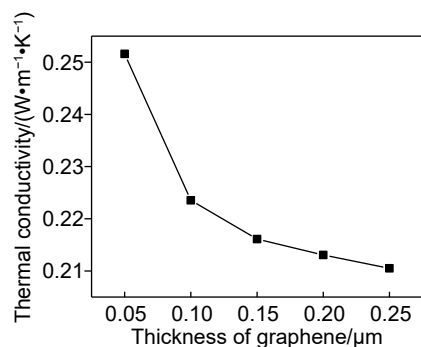


图 12 导热系数随石墨烯厚度变化关系

Fig. 12 The relationship between thermal conductivity and graphene thickness

部相当于快速导热通路,热流可通过石墨烯片迅速传递,石墨烯片越长,复合材料内部快速导热通路越长,对复合材料导热性能的提升越大,同时,石墨烯片越长,各石墨烯片相互接触的概率越大,越有利于在复合材料内部形成快速导热网络,提高复合材料的导热能力。

2.2 石墨烯取向对复合材料导热性能的影响

图 13 为复合材料导热系数随石墨烯取向的变化关系,其中 θ 为石墨烯长度方向与 y 轴,即温度梯度方向的夹角,如图 14 所示。由图 13 可知,石墨烯片层在材料内部的取向分布会对复合材料导热性能产生较大影响,复合材料导热系数随 θ 的增大而降低,这是由于石墨烯为特殊的二维平面结构,面内方向具有超高的热导率,当石墨烯片长度方向与热流方向夹角较小时,热量将沿石墨烯平面方向实现快速运输,从而增强复合材料的传热性能^[26,29-30]。

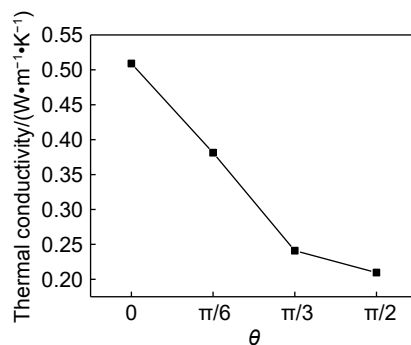


图 13 导热系数随石墨烯取向变化关系

Fig. 13 Relationship between thermal conductivity and graphene orientation

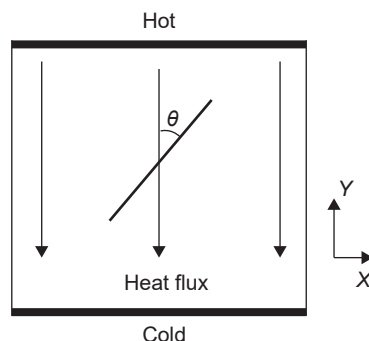


图 14 石墨烯取向示意图

Fig. 14 Schematic diagram of graphene orientation

2.3 界面接触热阻对复合材料导热性能的影响

图 15 所示为石墨烯质量分数为 2% 时,复合材料导热系数随界面孔隙率的变化关系,可见界面孔隙率增大引起界面热阻增加,使得复合材料导热

性能降低,尤其当界面孔隙率达到总体积的 3.42% 时,导热系数下降程度尤为剧烈,复合材料导热系数较界面无孔隙(理想接触)时降低了 29%,这是因为石墨烯与 PLA 基体界面处存在的大量孔隙,在材料内部形成导热断路,降低了石墨烯向周围基体的快速导热能力,使得接触热阻急剧增加,同时延长了热量传输路径,降低了石墨烯复合材料的导热性能。

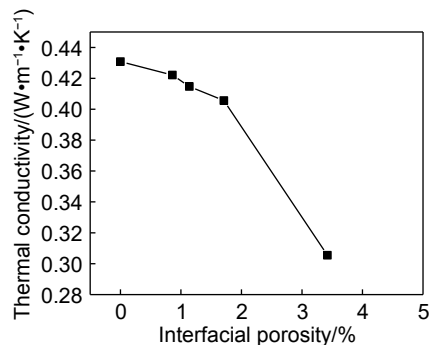


图 15 复合材料导热系数随界面孔隙率变化关系

Fig. 15 Relationship between thermal conductivity of composites and interface porosity

3 结论

(1) 基于材料细观结构建立的代表性体积元模型对复合材料导热性能的模拟结果与实验值吻合较好,验证了所建模型的正确性。

(2) 石墨烯质量分数一定时,石墨烯薄片的长宽比(三维状态下石墨烯长度与厚度之比),对复合材料的导热性能影响较大,长宽比越大,复合材料导热系数越大,且随着长度或者厚度的增加,长度与厚度对复合材料导热性能的影响逐渐减小。

(3) 石墨烯片取向对复合材料导热能力影响较大,石墨烯取向与热流方向夹角越小,复合材料导热系数越大。

(4) 界面接触热阻对复合材料整体导热性能影响较大,界面结合较差时,界面热阻较大,对复合材料导热性能产生明显影响。

参考文献:

[1] 胡正浪, 吴海华, 杨增辉, 等. 石墨烯-铁镍合金-聚乳酸复合材料的制备及其吸波性能[J]. 复合材料学报, 2021, 39(7): 3303-14.
HU Z L, WU H H, YANG Z H, et al. Preparation of graphene-iron-nickel alloy-polylactic acid composites and their microwave absorption properties[J]. Acta Materialia

Compositae Sinica, 2021, 39(7): 3303-14.

- [2] 疏金成, 曹茂盛. 石墨烯基电磁功能材料[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 29-40.
SHU J C, CAO M S. Graphene-based electromagnetic functional materials[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 29-40.
- [3] REN F, ZHU G, WANG Y, et al. Microwave absorbing properties of graphene nanosheets/epoxy-cyanate ester resins composites[J]. Journal of Polymer Research, 2014, 21(11): 1-7.
- [4] 邢垒. 石墨烯 3D 打印复合线材制备及其吸波性能研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
XING L. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the master's degree of mechanical engineering[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020.
- [5] YUAN J, YANG H J, HOU Z L, et al. Ni-Decora-Ted Sic powders: enhanced high-temperature dielectric properties and microwave absorption performance[J]. Powder Technology, 2013, 237: 309-313.
- [6] SHI X L, CAO M S, FANG X Y, et al. High-temperature dielectric properties and enhanced temperature-response attenuation of Beta-MnO₂ nano-rods[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(22): 223112.
- [7] SONG W L, CAO M S, HOU Z L, et al. High dielectric loss and its monotonic dependence of conducting-dominated multiwalled carbon nanotubes / silica nanocomposite on temperature ranging from 373 to 873 K in X-band[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(23): 233110.
- [8] LUO H, CHEN W, ZHOU W, et al. Carbon fiber/Si₃N₄ composites with SiC nanofiber interphase for enhanced microwave absorption properties[J]. Ceramics International, 2017, 43(15): 12328-12332.
- [9] HOU Z, YIN X, XU H, et al. Reduced graphene oxide/silicon nitride composite for cooperative electromagnetic absorption in wide temperature spectrum with excellent thermal stability[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(5): 5364-5372.
- [10] 穆阳, 邓佳欣, 李皓, 等. 两种连续 SiC 纤维的高温介电及吸波性能对比[J]. 无机材料学报, 2018, 33(4): 427-433.
MU Y, DENG J X, LI H, et al. Comparison of high-temperature dielectric and microwave absorbing property of two continuous SiC fibers[J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(4): 427-433.
- [11] YIN X, XUE Y, ZHANG L, et al. Dielectric, electromagnetic absorption and interference shielding properties of porous yttria-stabilized zirconia/silicon carbide composites[J]. Ceramics International, 2012, 38(3): 2421-2427.
- [12] YIN X, KONG L, ZHANG L, et al. Electromagnetic properties of Si-C-N based ceramics and composites[J]. International Materials Reviews, 2014, 59(6): 326-355.

- [13] VALAPA R B, PUGAZHENTHI G, KATIYAR V. Effect of graphene content on the properties of poly (lactic acid) nanocomposites[J]. *Rsc Advances*, 2015, 5(36): 28410-28423.
- [14] 张晓光, 张宝库, 何燕. 碳纤维随机填充橡胶复合材料导热性能的数值模拟[J]. *材料导报*, 2016, 30(24): 148-151.
ZHANG X G, ZHANG B K, HE Y. Numerical simulation of thermal conductivity of rubber composite with randomly distributed carbon fibers[J]. *Materials Reports*, 2016, 30(24): 148-151.
- [15] 高俊杰, 俞继军, 韩海涛, 等. 树脂基烧蚀材料细观传热特性预测[J]. *航空学报*, 2017, 38(增刊1): 166-173.
GAO J J, YU J J, HAN H T, et al. Prediction of meso-heat transfer characteristics of resin-based ablative materials[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(Suppl 1): 166-173.
- [16] 罗文, 黄志雄, 黄赤, 等. 复合泡沫塑料等效导热系数的数值模拟[J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37(12): 12-16.
LUO W, HUAN Z X, HUAN C, et al. Numerical simulation of effective thermal conductivity of syntactic foams based on ansys[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37(12): 12-16.
- [17] 夏彪, 卢子兴. 三维编织复合材料热物理性能的有限元分析[J]. *航空学报*, 2011, 32(6): 1040-1049.
XIA B, LU Z X. Finite element analysis on thermophysical properties of 3D braided composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(6): 1040-1049.
- [18] JIANG J, YANG S, LI L, et al. High thermal conductivity polylactic acid composite for 3D printing: synergistic effect of graphene and alumina[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2020, 31(6): 1291-1299.
- [19] 李岳, 李炯利, 朱巧思, 等. 石墨烯导热材料研究进展[J]. *材料工程*, 2021, 49(11): 1-13.
LI Y, LI J L, ZHU Q S, et al. Research progress in graphene based thermal conductivity materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(11): 1-13.
- [20] 张来, 张文霞, 蔡广楠, 等. PLA 热性能参数的研究[J]. *塑料工业*, 2012, 40(1): 68-71.
ZHANG L, ZHANG W X, CAI G N, et al. Study on the thermal property parameters of PLA[J]. *China Plastics Industry*, 2012, 40(1): 68-71.
- [21] 余永宁, 刘国权. 体视学: 组织定量分析的原理和应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
YU Y N, LIU G Q. Stereology: the principle and application of quantitative tissue analysis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.
- [22] 吴海华, 刘力, 蔡宇, 等. 磁/电介质复合材料结构型吸波体制备及吸波性能[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(5): 34-41.
WU H H, LIU L, CAI Y, et al. Microwave structural absorbers preparation and absorbing properties of magnetic/dielectric composite[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(5): 34-41.
- [23] LIANG J Z, LI R K Y. Measurement of dispersion of glass beads in PP matrix[J]. *Journal of reinforced plastics and composites*, 2001, 20(8): 630-638.
- [24] HAJILAR S, SHAFEI B. Multiscale investigation of interfacial thermal properties of n-octadecane enhanced with multilayer graphene[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(38): 23297-23305.
- [25] 李茂源. 石墨烯/环氧树脂复合材料的力学与热学性能模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
LI M Y. A simulations of the mechanical and thermal properties of graphene/epoxy nanocomposites [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [26] 吴晨光, 李蓓. 石墨烯取向对石墨烯/硝酸盐复合材料传热性能影响的分子动力学模拟[J]. *复合材料学报*, 2021, 39(5): 2495-2503.
WU C G, LI B. Effect of graphene orientation on heat transfer properties of graphene/nitrates composites by molecular dynamics simulation[J]. *Acta Compositae Materiae Sinica*, 2021, 39(5): 2495-2503.
- [27] 于伟, 谢华清. 氧化石墨烯膜各向异性热传输特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(9): 1609-1611.
YU W, XIE H Q. Anisotropic thermal transport in graphene oxide films[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(9): 1609-1611.
- [28] RENTERIA J D, RAMIREZ S, MALEKPOUR H, et al. Strongly anisotropic thermal conductivity of free-standing reduced graphene oxide films annealed at high temperature[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(29): 4664-4672.
- [29] LI Q, GUO Y, LI W, et al. Ultrahigh thermal conductivity of assembled aligned multilayer graphene/epoxy composite[J]. *Chemistry of Materials*, 2014, 26(15): 4459-4465.
- [30] RENTERIA J, LEGEDZA S, SALGADO R, et al. Magnetically-functionalized self-aligning graphene fillers for high-efficiency thermal management applications[J]. *Materials & Design*, 2015, 88: 214-221.

收稿日期: 2022-05-09; 修订日期: 2023-02-23

通讯作者: 韩海涛(1982—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为气动热与热防护技术, 联系地址: 北京市 7201 信箱 16 分箱(100074), E-mail: han_ht@139.com

(责任编辑: 曹茂生)