

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.04.013

GNPs 改性环氧 3D 编织复合材料导热特性研究

徐焜¹, 侯辰辉¹, 程云浦¹, 钱小妹¹, 严刚²

(1. 电子科技大学航空航天学院, 成都 611731; 2. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016)

摘要: 石墨烯纳米片 (Graphene nanoplatelets, GNPs) 改性 3D 编织复合材料将 GNPs 与编织物有机融合, 有望协同提高材料导热特性。然而, 3D 编织复合材料内胞和表胞呈现出不同的导热特性, 加之 GNPs 的协同改性作用, 增加了材料导热特性研究难度。本文紧扣 GNPs 改性 3D 编织复合材料细观结构特征, 以 GNPs 改性树脂等效热导率表征为基础, 基于周期性温度边界条件, 构建材料的多胞有限元热物理分析模型, 详尽研究了 GNPs 含量、编织角和纤维体积分数等各胞元热导率的影响规律。分析表明: 随着 GNPs 含量增加, 3D 编织复合材料导热特性逐步提升。随着编织角增加, GNPs 改性 3D 编织复合材料横向热导率迅速增加而纵向热导率下降; 同时, GNPs 改性 3D 编织复合材料热导率随纤维体积分数增加而提升。上述规律为 GNPs 改性 3D 编织复合材料导热性能设计提供了坚实的理论基础。

关键词: 3D 编织; 热导率; 石墨烯纳米片; 胞元分析; 有限元建模

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)04-0705-07

Study on Thermal Conductivity Coefficients of 3D Braided Composites Reinforced with Graphene Nanoplatelets

XU Kun¹, HOU Chenhui¹, CHENG Yunpu¹, QIAN Xiaomei¹, YAN Gang²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: 3D braided composites reinforced with graphene nanoplatelets (GNPs) contribute to improving the thermal conductivity coefficients of the composites. However, the microstructures of 3D braided composites are so complicated that the interior and surface unit cells have different thermal conductivity. Meanwhile, the synergistic reaction of GNPs further improves the challenge of predicting the thermal conductivity of the composites. This paper investigates the thermal conductivity of 3D braided composites reinforced with GNPs by finite element modeling based on multi-unit cell models. Firstly, the thermal conductivity of epoxy resin modified by GNPs is analyzed by 2D periodical unit cell models. Then a detailed multi-unit cell model is introduced to establish the finite element model for predicting the thermal conductivity. Meanwhile, the periodical thermal boundary conditions are also applied to the finite element models. Finally, the effectiveness of the multi-unit cell modeling is validated through two typical cases. The thermal conductivity for the interior, surface and integral unit cell models are analyzed, respectively. The results indicate the thermal conductivity of 3D braided composites is improved obviously with increasing GNPs mass fraction. With the braiding angle increasing, the transverse thermal conductivity of 3D braided composites gradually increases and the longitudinal thermal conductivity decreases almost linearly. Meanwhile, the thermal conductivity of

基金项目: 四川省自然科学基金 (2022NSFSC0313)。

收稿日期: 2024-04-10; **修订日期:** 2024-05-13

通信作者: 钱小妹, 女, 讲师, E-mail: xmqian@uestc.edu.cn。

引用格式: 徐焜, 侯辰辉, 程云浦, 等. GNPs 改性环氧 3D 编织复合材料导热特性研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(4): 705-711. XU Kun, HOU Chenhui, CHENG Yunpu, et al. Study on thermal conductivity coefficients of 3D braided composites reinforced with graphene nanoplatelets [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(4): 705-711.

the composites gradually increases with fiber volume fraction increasing. The results provide important theoretical basis for the design of the thermal conductivity of 3D braided composites reinforced with GNPs.

Key words: 3D braiding; thermal conductivity coefficient; graphene nanoplatelets (GNPs); unit cell analysis; finite element modeling

石墨烯纳米片(Graphene nanoplatelets, GNPs)改性3D编织复合材料,作为一种新颖的纳米改性纺织复合材料,以3D多向编织物和GNPs为增强体,有望协同提升材料力-热-电特性。目前,以3D编织复合材料细观结构研究为基础^[1-2],学者们重点关注了材料的力学性能研究^[3-5],有关纳米粒子改性3D编织复合材料的研究工作还较为有限。然而,评估GNPs改性3D编织复合材料热物理性能,揭示材料导热性能设计规律,对于拓展其应用范围具有重要意义。

3D编织复合材料导热特性研究,是揭示GNPs改性3D编织复合材料导热特性的重要基础。早期,Liu等^[6]开展了3D四向编织复合材料的热导特性研究。李典森等^[7]采用有限元方法分析了五向编织复合材料的导热性能。上述工作对胞元平行于热导方向平面采用了绝热边界条件。夏彪等^[8]基于施加周期性非绝热温度边界条件的内胞,研究了多向编织材料的导热性能和热膨胀特性。姜黎黎等^[9]采用实验方法,研究了3D编织复合材料的热物理性能。Tian等^[10]采用多尺度方法,研究了四向编织复合材料热导性能。然而,上述工作主要以3D编织内胞导热性能分析为主,暂未充分考虑3D编织“壳芯”结构特征对材料导热性能的影响。

GNPs作为典型碳基纳米粒子,具有优异的热-力特性,其面内热导率可达 $5\ 300\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,面内模量高达 $1\ \text{TPa}$ 。近年来,有关碳基纳米粒子改性树脂的热-力-电性能研究工作取得重要进展^[11-12]。鉴于GNPs改性3D编织复合材料具有复杂的多尺度特征,有关GNPs改性3D编织复合材料导热性能研究还鲜有文献报道。刘云龙^[13]基于内胞细观有限元模型,研究了GNPs/CNTs协同改性3D编织复合材料力-热等效性能。Abedi等^[14]以碳基纳米粒子协同改性3D编织杆为对象,研究了其作为损伤自检智能结构的可行性。

本文拟以GNPs改性环氧3D编织复合材料等效热导特性研究为目标,基于周期性温度边界条件,构建材料宏细观一体化多胞有限元模型,详尽分析编织角、纤维体积分数、GNPs体积含量等对材料热导特性的影响规律,以期揭示GNPs改性3D编织复合材料导热特征和规律,为进一步促进GNPs改性3D编织复合材料应用提供重要的理论依据。

1 GNPs改性3D编织复合材料热导率建模方法

1.1 GNPs改性环氧热导率预测

为降低3D数值建模工作量,基于GNPs随机分布算法和相干检测算法,以空间GNPs三维建模为基础,构建了随机分布GNPs的2D周期性胞元模型^[15],如图1所示。该模型能考虑GNPs各向异性热导特性,结合周期性热学边界条件,同时,采用平面三角形壳元,构建2D胞元有限元分析模型。该模型可保证2D胞元相对面对应节点温度相等且输入输出热量平衡。针对典型含量GNPs物理特性,经分析2D胞元尺度、GNPs随机分布样本数等对材料等效热学性能的影响规律,确定2D随机分布胞元面内尺度为 $8\ 000\ \text{nm}$ 、样本为60时,可以满足保证分析结果的数值收敛性^[15]。



图1 2D随机分布GNPs周期性胞元模型

Fig.1 2D periodic cell model of randomly distributed GNPs

1.2 3D四向编织复合材料胞元模型

3D编织复合材料具有显著的“壳芯”细观结构特征,其表胞和内胞纱线构型各异,致使材料拥有不同的导热特性。图2为3D四向矩形编织复合材料内胞、表胞纱线构型及其等效整体胞元^[3]。图2(a)为材料表胞及其纱线构型,综合包含了矩形截面材料的上、下表面胞元纱线;图2(b)为材料整体胞元;图2(c)为材料内胞及其纱线构型。材料细观胞元主要设计变量为^[16]

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} \tan \gamma \quad (1)$$

$$W_i = T_i = W_s = 4\sqrt{2} b \quad (2)$$

$$h = \frac{8b}{\tan \gamma} \quad (3)$$

$$\tan \theta = \frac{\tan \gamma}{3} \quad (4)$$

$$T_s = 2\sqrt{2} b + b \quad (5)$$

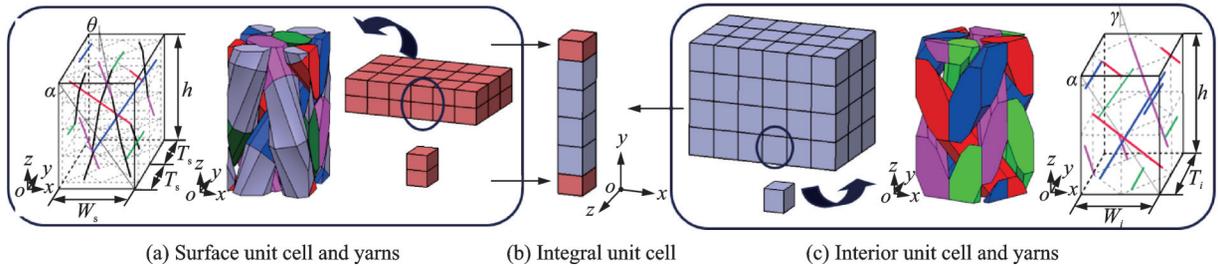


图 2 3D 四向编织复合材料胞元模型

Fig.2 Unit cell models of 3D four-directional braided composites

式中: α 为编织角, γ 为内部纱线编织角, θ 为表面编织角, W_i 和 T_i 分别为内胞宽度和厚度, W_s 和 T_s 分别为上下表胞宽度和厚度, h 为胞元花节高度, b 为八边形纱线内切椭圆半径短半轴长。

1.3 胞元纤维束等效热导率

图 2 所示内胞和表胞, 由各方向纱线束和 GNPs 改性树脂组成。基于 GNPs 改性树脂等效导热特性, 采用细观解析模型, 预测 GNPs 改性环氧碳纤维纱线束的等效导热特性。纱线束主方向热导率由混合定律求解, 而横向热导率通过 Hashin 公式求解^[17], 表达式为

$$\begin{cases} k_{11} = k_{11}^f \phi + k^m (1 - \phi) \\ k_{22} = k_{33} = k^m + \frac{\phi}{\frac{1 - \phi}{2k^m} + \frac{1}{k_{22}^f - k^m}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_{11} 、 k_{22} 、 k_{33} 分别为纱线束主轴 1、2 和 3 方向的等效热导率; k_{11}^f 、 k_{22}^f 分别为纤维纵向和横向热导率, k^m 为 GNPs 改性树脂等效热导率; ϕ 为纱线束的纤维体积分数。

1.4 基于周期性温度边界的胞元热导率预测

考虑到胞元材料纱线构型复杂, 模型网格离散时, 拟基于 ABAQUS 软件平台, 采用四面体实体单元离散内胞和表胞, 分别如图 3(a, b) 和图 3(c, d) 所示; 整体胞元由内胞和表胞等效性能表征, 采用六面体单元建模, 如图 3(e) 所示。

为获得合理的胞元材料导热特性, 胞元热传导建模时, 应施加周期性温度边界条件, 并分别在胞元 x 、 y 、 z 三个方向施加温差载荷, 以确保胞元热学边界条件的合理性^[13]。胞元 i 方向平均热流密度 \bar{q}_i 为

$$\bar{q}_i = \frac{S_{ik} \times \sum_{k=y,m} \bar{q}_{ik}}{\sum_{k=y,m} S_{ik}} \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

式中: k 代表组分材料, y 代表 GNPs 改性环氧纤维束, m 代表 GNPs 改性环氧树脂, S_{ik} 为 i 方向胞元表面对应组分的热流输出面积, \bar{q}_{ik} 为 i 方向胞元对应表面相应组分的平均热流密度。

根据周期性温度边界条件可知, 胞元在 i 方向

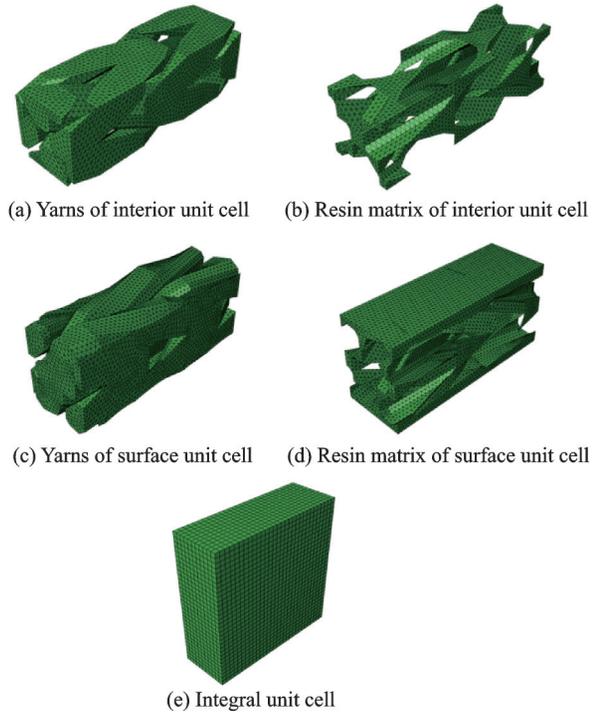


图 3 内胞、表胞与整体胞元有限元网格

Fig.3 Finite element meshing of interior, surface and integral unit cells

平均温度梯度 $\partial T / \partial x_i$ 为确定值, 用 $\nabla \bar{T}_i$ 代替, 即

$$\nabla \bar{T}_i = \frac{T_{i1} - T_{i0}}{L_i} \quad (8)$$

式中: $T_{i1} - T_{i0}$ 为 i 方向上载荷加载面温差, L_i 为胞元 i 方向长度。

由此, 胞元 i 方向平均热导率可表示为

$$k_i = -\frac{\bar{q}_i}{\nabla \bar{T}_i} \quad (9)$$

本文将基于上述胞元热分析策略, 构建 x 、 y 、 z 三个方向 GNPs 改性 3D 编织复材等效热导率有限元模型。首先, 建立内胞热导率分析模型; 然后, 建立表胞热导率分析模型; 最后, 将上述胞元等效热导率赋给整胞, 进而建立整体胞元等效热导率有限元分析模型, 如图 3(e) 所示。

2 分析与讨论

为验证本文模型的合理有效性, 设计了典型 GNPs 改性环氧 3D 四向编织复合材料热导特性分

析案例。矩形截面3D编织复合材料(横向携纱器 $m=5$),采用T300 12K碳纤维束织物与TDE-85环氧树脂复合成型,其热学参数为:碳纤维纵向热导率为 $9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,横向热导率为 $1.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;树脂热导率为 $0.18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

首先,以典型不含GNPs改性3D编织复合材料为例,对比分析本文模型、文献内胞模型^[18]及其实验结果,对比案例纱线束规格均为12K。案例1编织角 α 为 42° ,纤维体积分数 V_f 为 0.54 ,案例2编织角 α 为 42° ,纤维体积分数 V_f 为 0.53 。表1给出了本文基于内胞、表胞和整体胞元的横向热导率 k_y 预测结果,以及文献基于内胞的预测结果和实验值。由表1可知,3D编织复合材料壳芯结构内部胞元的导热系数较大,表胞最小,整胞居中,且整体胞元与文献内胞模型预测数据基本一致。分析其原因,内胞占据材料主体,且GNPs改性碳纤维束完全贯穿至内胞表面,具有较高导热效应;表胞因其表面附有一层低热导率的树脂,导致其总体热导率较小;整胞则能综合反映材料总体导热特性。可见,本文能详尽表征3D编织复合材料各胞元导热特性,证明了模型的有效性。

表1 典型试件横向热导率 k_y 对比

Table 1 Comparison of transverse thermal conductivity coefficient k_y of 3D braided specimens without GNPs

案例	W/(m·K)				
	本文内胞	本文表胞	本文整胞	文献内胞 ^[18]	实验 ^[18]
1	1.946	0.671	1.025	0.942	0.75
2	1.910	0.665	1.010	0.875	0.75

为展示本文周期性胞元分析结果,图4给出了材料编织角 α 为 30° 、纤维体积分数 V_f 为 50% 、GNPs质量分数为 2% 时, z 向施加 1°C 温度差时的热流密度分布。图4(a)为表胞的热流密度分布情况。可见,纤维束热流密度明显高于GNPs改性基体,且热流密度分布保持了周期性特征;图4(b)为内胞热流密度分布情况,其纤维束热流密度也明显高于改性树脂;图4(c)为嵌入上述等效热学本构的整胞热流分布图。

现基于下述设计案例,详尽研究GNPs质量分数 m_f 、编织角 α 、纤维体积分数 V_f 对3D编织复合材料等效热导率的影响规律。GNPs面内平均尺度为 3000 nm 、厚度为 8 nm ,其面内和厚度方向热导率分别为 3000 和 $6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。表2给出了不同质量分数GNPs改性环氧树脂的等效热导率,胞元纤维束等效热导率由式(6)计算。图5~7给出了当 $V_f=50\%$ 时,编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 对材料各胞元热导率的影响规律。

图5详尽给出了 V_f 为 50% 时,编织角 α 和

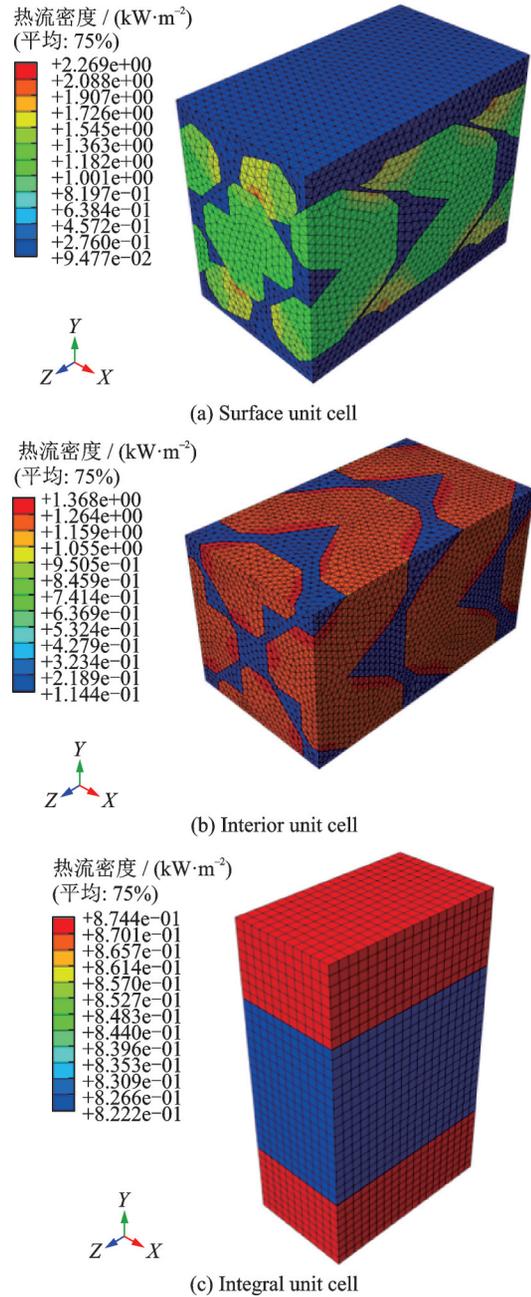


图4 胞元热流密度分布

Fig.4 Heat flux distribution of unit cells

表2 典型GNPs改性环氧等效热导率

Table 2 Equivalent thermal conductivity coefficients of typical GNPs reinforced epoxy

等效热导率	GNPs 质量分数 / %				
	0	1	2	3	4
$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.18	0.32	0.47	0.60	0.73
增幅 / %	0	80.2	160.2	234.1	305.7

GNPs质量分数 m_f 对基于内胞表征的3D编织复合材料热导率影响规律。图5(a)为内胞横向热导率 ($k_x=k_y$) 随编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 的变化规律。可见,随着 α 增加, k_x/k_y 迅速近似线性增加;同时,当 α 一定时,随着 m_f 增加, k_x/k_y 也逐步增加,但增幅逐步减弱。图5(b)给出了内胞纵向热导率 k_z 随编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 的变化情

况。可见,随着编织角 α 增加, k_z 近似线性减小,且幅度较大,表明 α 对 k_z 影响较大;同时,当 α 一定时,随着 m_f 增加, k_z 也逐步增加,但增幅逐步减弱。

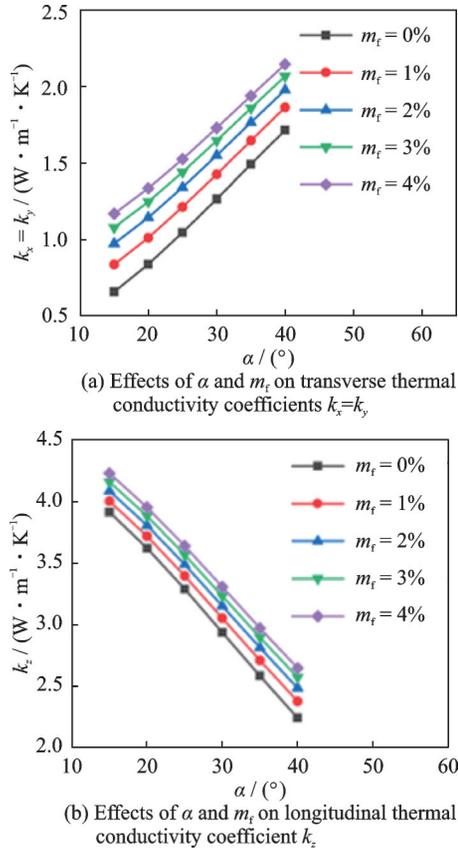


图5 编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 对内胞热导率影响
Fig.5 Effects of braiding angle α and GNPs mass fraction m_f on thermal conductivity coefficients of interior unit cell

图6给出了 V_f 为50%时,编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 对基于表胞表征的3D编织复合材料热导率影响规律。图6(a)为表胞横向热导率 k_x 随编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 的变化情况。可见,随着 α 增加, k_x 逐步增加,且增幅较为明显;同时,当 α 一定时,随着 m_f 增加, k_x 也逐步增加,但增幅逐步减弱。图6(b)给出了表胞横向热导率 k_y 随编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 的变化情况。可见,随着 α 增加, k_y 逐步增加,且幅度较为明显;同时,对于确定编织角胞元,随着 m_f 增加, k_x 也逐步增加,但增幅逐步减弱。图6(c)给出了表胞纵向热导率 k_z 随编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 的变化情况。可见,随着 α 的增加, k_z 迅速降低;同时,当 α 一定时,随着 m_f 的增加, k_z 也逐步增加,但增加幅度逐步减弱。

图7给出了 V_f 为50%时,编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 对基于整胞表征的3D编织复合材料热导率影响规律。图7(a)给出了整胞横向热导率 k_x 随编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 的变化情况。首先, k_x 各数值位于内胞和表胞之间;同时,随着 α 增

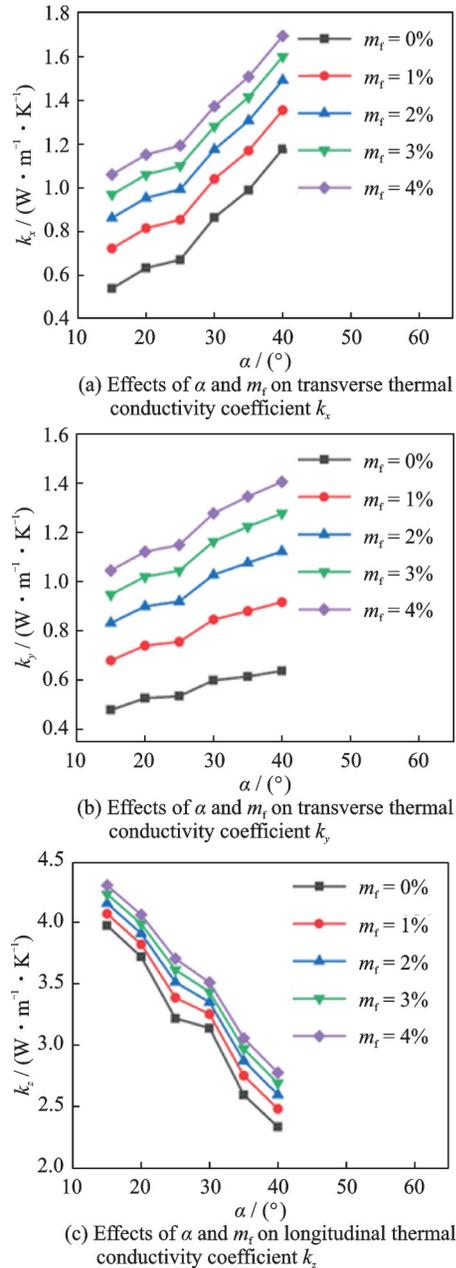


图6 编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 对表胞热导率影响
Fig.6 Effects of braiding angle α and GNPs mass fraction m_f on thermal conductivity coefficients of surface unit cell

加, k_x 迅速增加,且幅度较为明显;同时,当编织角一定时,随着 m_f 增加, k_x 也逐步增加,其中,当 m_f 小于2%时,增幅较大,当 m_f 大于2%时,增幅开始减弱。图7(b)给出了整胞横向热导率 k_y 随编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 的变化情况。由图可知, k_y 各数值位于内胞和表胞之间;随着 α 增加,整胞 k_y 逐步增加,近似呈线性且增幅较为明显;同时,当 α 一定时,随着 m_f 的增加,整胞 k_y 也逐步增加,而且,对于 α 大于30°左右时,总体增幅加大。图7(c)给出了整胞纵向热导率 k_z 随编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 的变化情况。 k_z 各数值位于内胞和表胞之间;当 α 增加时,整胞 k_z 迅速降低;同时,当 α 一定时,随着 m_f 的增加,整胞 k_z 也逐步增加,但增加幅度逐步减弱。

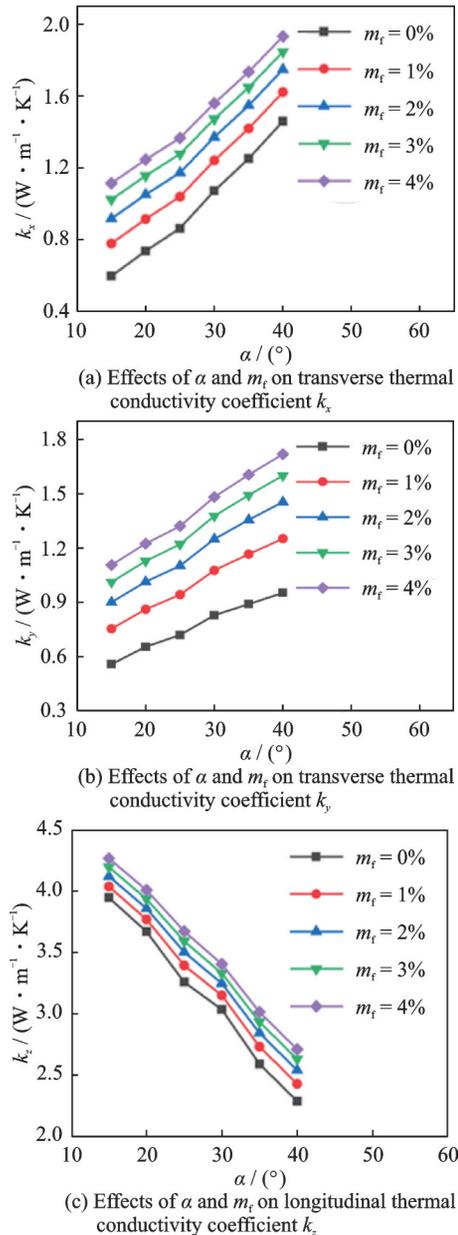
图7 编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 对整胞热导率影响

Fig.7 Effects of braiding angle α and GNPs mass fraction m_f on thermal conductivity coefficients of integral unit cell

由图5~7可知,编织角 α 和GNPs质量分数 m_f 对材料等效热导率具有显著影响,对 z 轴方向影响最为显著, x 方向次之, y 轴方向相对较弱;同时,本案例横向编织纱携纱器数 $m=5$,整体胞元因此包含上、下表胞和1.5个内胞情况。因材料厚度 y 方向内胞有限,表胞对材料总体热导性能的影响也较为显著,若对于厚度较小壁板结构,直接以内胞作为分析对象,将产生较大误差。

为进一步展示纤维体积分数 V_f 对材料热导率的影响规律,图8给出了GNPs质量分数分别为0%和2%时,材料整胞各向异性热导率随纤维体积分数 V_f 和编织角 α 的变化规律。如图8(a)所示,材料整胞横向热导率 k_x 随 V_f 增大而迅速增大,且

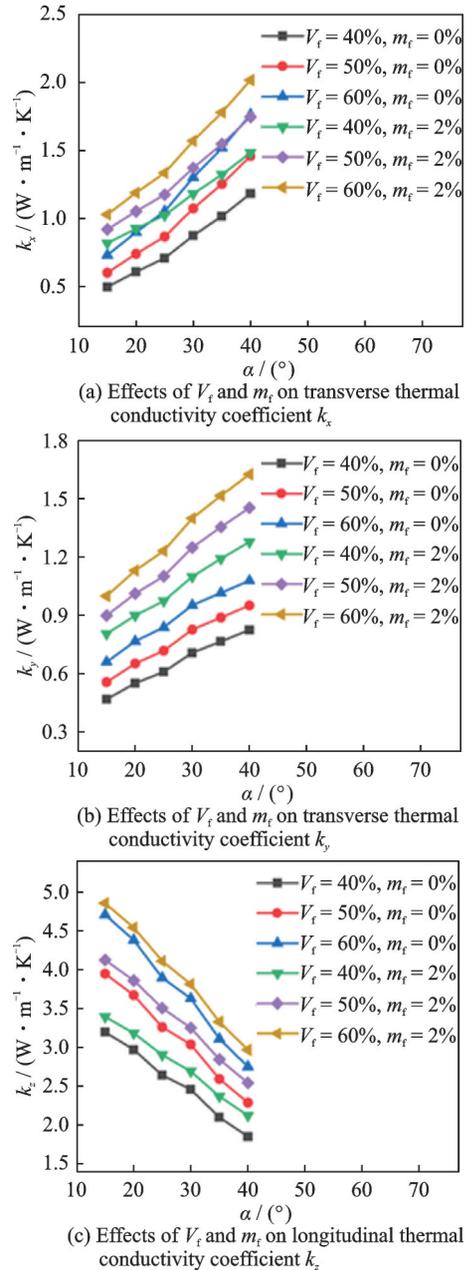
图8 纤维体积分数 V_f 与GNPs质量分数 m_f 对整胞热导率影响

Fig.8 Effects of fiber volume fraction V_f and GNPs mass fraction m_f on thermal conductivity coefficients of integral unit cell

GNPs也有显著影响;图8(b)展示了整胞 k_y 随 V_f 和 m_f 逐步增大的变化情况;图8(c)给出了整胞 k_z 随 V_f 和 m_f 的变化情况。编织角 α 一定时,当 V_f 和 m_f 增大时, k_z 均增加且增幅逐步减小。

3 结 论

以GNPs改性环氧3D编织复合材料为对象,基于周期性温度边界条件,构建了材料的多胞导热率有限元分析模型,详细研究了具有壳芯结构特征的3D编织复合材料热导率。经对比分析,验证了本文模型的合理有效性。

(1)3D编织复合材料表胞和内胞具有明显不

同的导热特性,内胞横向热导率明显大于表胞横向热导率,两者纵向热导率相似;同时,整体胞元因包含了材料所有纱线构型特征,能更为合理地表征材料的等效热导率。

(2)GNPs能提高3D编织复合材料的热导率。随着GNPs质量分数增加,GNPs改性环氧3D编织复合材料等效热导率均逐步增大,但增幅逐步降低。

(3)编织角和纤维体积分数对3D编织复合材料热导率影响显著。总体上,随着编织角增加,无论内胞、表胞,还是整胞,其横向热导率均逐步增大,但各胞元纵向热导率却快速下降。同时,随着纤维体积分数增加,3D编织复合材料各胞元热导率均逐步增大。

参考文献:

- [1] LIAO X, JIAO Y N, XIE J B, et al. Fiber-level modeling of 3D braided preforms using virtual braiding method[J]. *Composite Structures*, 2024, 334: 117988.
- [2] LIU X D, ZHANG D T, SUN J, et al. Refine reconstruction and verification of meso-scale modeling of three-dimensional five-directional braided composites from X-ray computed tomography data[J]. *Composite Structures*, 2020, 245: 112347.
- [3] XU K, QIAN X M, DUAN D H, et al. A novel macro-meso finite element method for the mechanical analysis of 3D braided composites[J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 126: 163-175.
- [4] LIU X D, GE J R, WANG X X, et al. Multiscale image-based modeling of progressive damage in 3D5D braided composites with yarn-reduction[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 270: 112236.
- [5] GONG J J, YANG Z Q, HUANG R Z, et al. An effective multiscale analysis for the mechanical properties of 3D braided composites considering pore defects[J]. *Acta Mechanica*, 2023, 234: 6629-6647.
- [6] LIU Z G, ZHANG H G, LU Z X, et al. Investigation on the thermal conductivity of 3-dimensional and 4-directional braided composites[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(4): 327-331.
- [7] 李典森, 卢子兴, 刘振国, 等. 三维五向编织复合材料导热性能的有限元分析[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(8): 1455-1460.
LI Diansen, LU Zixing, LIU Zhenguo, et al. Finite element analysis of thermal conductivity of three-dimensional and five-directional braided composites[J]. *Journal of Aero-Space Power*, 2008, 23(8): 1455-1460.
- [8] 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 Biao, LU Zixing. Finite element analysis on thermo-physical properties of 3D braided composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(6): 1040-1049.
- [9] 姜黎黎, 徐美玲, 李振国, 等. 三维编织复合材料热物理性能实验[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(12): 2734-2740.
JIANG Lili, XU Meiling, LI Zhenguo, et al. Experimental investigation on thermo-physical properties of 3D braided composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(12): 2734-2740.
- [10] TIAN W L, QI L H, FU M W. Multi-scale and multi-step modeling of thermal conductivities of 3D braided composites[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 228: 107466.
- [11] LI Y L, WANG Q, WANG S J. A review on enhancement of mechanical and tribological properties of polymer composites reinforced by carbon nanotubes and graphene sheet: Molecular dynamics simulations[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160: 348-361.
- [12] ZHANG X Q, ZHENG G H, SHEN L, et al. High-performance epoxy nanocomposites via constructing rigid structured interphase with epoxy-rich graphene oxide[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(45): 49402.
- [13] 刘云龙. 石墨烯/碳纳米管强化树脂基3D编织复合材料力-热性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
LIU Yunlong. Study on the mechanical and thermal properties of 3D braided composites with graphene nanoplatelets/carbon nanotubes reinforced resin matrix [D]. Chengdu: University Electronic Sciences and Technology of China, 2021.
- [14] ABEDI M, HASSANSHAHI O, BARRS J A O, et al. Three-dimensional braided composites as innovative smart structural reinforcements[J]. *Composite Structures*, 2022, 297: 115912.
- [15] 程云浦. 石墨烯改性3D编织复材力-热-电性能智能分析与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
CHENG Yunpu. Intelligent analysis and design of mechanical, thermal and electrical properties of graphene-modified 3D braided composite[D]. Chengdu: University Electronic Sciences and Technology of China, 2023.
- [16] XU K, QIAN X M. Microstructure analysis and multi-unit cell model of three dimensionally four-directional braided composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2015, 22(1): 29-50.
- [17] HASHIN Z. Analysis of composite materials—A survey[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50: 481-505.
- [18] 程伟, 赵寿根, 刘振国, 等. 三维四向编织复合材料等效热特性数值分析和试验研究[J]. *航空学报*, 2002, 23(2): 102-105.
CHENG Wei, ZHAO Shougen, LIU Zhenguo, et al. Thermal property of 3-D braided fiber composites experimental and numerical results[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2002, 23(2): 102-105.