http://pmse.scu.edu.cn

碳纤维/六方氮化硼/三元乙丙橡胶复合材料导热性能及其数值模拟

刘泽宏[1]，蒋兴华[1,2]，郭建华[2,3]

（1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院，广东 广州 510640；2. 中山市华南理工大学现代产业技术研究院，广东 中山 528400；
3. 华南理工大学 材料科学与工程学院，广东 广州 510640）

摘要：5G通讯、消费电子和新能源汽车领域的快速发展对导热材料的需求日益增长，高性能导热复合材料逐渐成为研究热点。由于导热硅胶垫片存在小分子硅油渗出和高温挥发的缺点，不适合用于高洁净度要求的应用场景。文中采用液体三元乙丙橡胶（EPDM）为基体，以碳纤维（CF）和六方氮化硼（h-BN）为导热填料，制备了不渗油且无VOC排放的柔性导热复合材料，并采用有限元仿真模拟了不同体积比和体积分数的混合填料填充复合材料的导热行为，预测了复合材料的导热系数，并将导热系数的模拟值与实测值进行对比，二者误差在10%以内，吻合度较高。该研究为混合填料填充柔性导热复合材料的导热性能模拟和预测提供了新途径。

关键词：碳纤维；六方氮化硼；液体三元乙丙橡胶；导热系数；数值模拟
中图分类号：TB332 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）07-0085-09

随着电子产品不断向小型化、便携化、集成化方向的快速发展，其功率密度逐渐增大，器件温度不断升高，严重影响了电子产品的工作效率和使用寿命。因此，实现电子产品的高效散热至关重要。橡胶基导热复合材料由于具有绝缘性好、密度低等优点，成为电子产品广泛使用的一种导热材料[1~3]。

当前，主要是在橡胶中添加导热填料来提高橡胶基复合材料的导热性能，其中导热填料类型、结构和用量等对复合材料的导热性能有显著影响[4, 5]。此外，学者们还建立了相关数学模型来预测不同形状和用量的导热填料填充橡胶基复合材料的导热系数。一般认为，麦克斯韦（Maxwell）模型[6~8]是现有各种导热模型的源头，该模型可预测球形导热填料填充复合材料的导热系数，认为导热填料在基体中随机分布，但未考虑导热颗粒形状、颗粒之间的相互作用以及基体与填料之间界面热阻（ITR）的影响。因此，Maxwell模型不能精确预测复合材料的有效导热系数。Hashin和Shtrikman等[9]提出改进的Maxwell模型，考虑了导热填料的形状因素以预测有效导热系数，扩大了导热系数的预测范围。Bruggement等[10, 11]也改进了Maxwell模型，首先利用微分表示导热填料的最小用量，然后得到导热填料在特定体积分数下的积分方程，从而计算复合材料在高填充量下的导热系数。Hatta和Taya等[12]考虑了导热填料的形状及填料之间的相互作用，设计了4种不同填料形状的导热模型以预测复合材料的有效导热系数，提高了预测的准确性。

然而，现有导热模型主要是计算得出复合材料的有效导热系数，但难以对复合材料的整体导热行为和导热机制进行更全面的分析，而有限元仿真（FEM）不仅可以对填充不同形状和尺度导热填料的复杂体系进行导热行为的仿真分析，同时还可以根

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0135
收稿日期：2023-08-24
基金项目：广东省重点研发计划项目（2024B0101040003）；技术领域基金项目（2023-JCJQ-JJ-0080）；中山市科技计划（2020AG022）
通讯联系人：郭建华，主要从事导热吸波、电磁屏蔽材料方面的研究，E-mail: psjhguo@scut.edu.cn

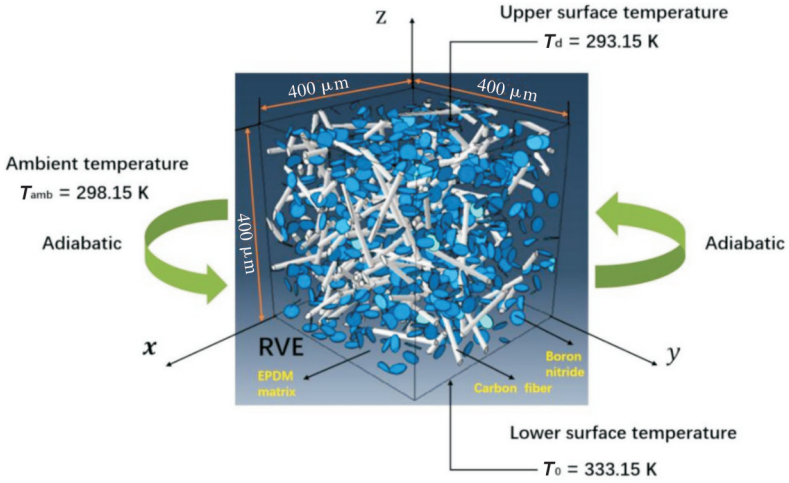


Fig. 1 Finite element RVE model and boundary condition setting for CF/h-BN/EPDM composites

Tab. 1 Basic parameters of carbon fiber, hexagonal boron nitride and liquid EPDM

Material	Thermal conductivity/(W·m^{-1}·K^{-1})	Specific heat capacity/(J·kg^{-1}·K^{-1})	Density/(g·cm^{-3})
Carbon fibre	900	1000	2.22
Hexagonal boron nitride	300	840	2.25
Liquid EPDM rubber	0.20	1700	1.00

据材料热传导方程对复合材料进行建模和计算，分析预测不同类型填料及其结构、用量对复合材料导热系数的影响[13, 14]，最终可以通过图形界面分析，从微观上对材料内部传热的演变过程进行观察，探究复合材料的热传导机制[15, 16]。总之，FEM仿真是预测具有复杂微结构的复合材料导热性能的高效方法[1, 17, 18]。

由于碳纤维（CF）和氮化硼（h-BN）具有高导热系数，常用作复合材料的导热填料[19, 20]。与常用的聚硅氧烷基体不同，液体三元乙丙橡胶（EPDM）[21]具有无小分子硅油挥发和渗出的优点，特别适合用作高洁净度要求的电子产品的导热材料。因此，本文采用高导热填料CF、h-BN与液体EPDM混合制备CF/h-BN/EPDM导热复合材料，研究了CF和h-BN不同填充比和体积分数对复合材料导热系数的影响。此外，本文基于随机顺序吸附法（RSA）建立三维随机填料的代表性体积单元模型（RVE）[22,23]，利用有限元均质化方法模拟不同导热填料的体积比和体积分数对复合材料导热系数的影响[24, 25]，将导热系数模拟值与实测值进行比较，探究复合材料的导热机制。

1 数值模拟和实验部分

1.1 数值模拟

1.1.1 *有限元模型*：CF/h-BN/EPDM复合材料的三维微观模型如Fig.1所示。Fig.1中模型尺寸为400 μm×400 μm×400 μm，白色棒状填料代表碳纤维，其平均长度为150 μm，平均直径为10 μm；蓝色圆片代表六方氮化硼，其平均直径为30 μm、平均厚度为1.5 μm。为了实现填料颗粒的随机分布，在ABAQUS中通过编程将碳纤维和氮化硼片层的中心坐标移动投放至EPDM的立方体中，填料颗粒之间不发生相互干涉，可以在立方体内生成一系列三维随机分布的填充颗粒。

1.1.2 *初始条件及边界条件*：采用COMSOL Multiphysics 5.6软件进行有限元仿真。在有限元计算设置中，初始温度条件为293.15 K，基体四周为绝缘热边界，温度为298.15 K，上表面为低温边界，温度为293.15 K，下表面为高温边界，温度为333.15 K。原料的基本参数包括导热系数、比热容和密度3个参数，如Tab.1所示。

Fig.1是CF/h-BN/EPDM复合材料的有限元仿真

边界条件设定。立方体上表面保持在T_d=293.15 K,下底面保持在T_0=333.15 K,研究复合材料在Z轴方向上的稳态热流,上下表面温度由式(1)和式(2)[26]确定,

$$T(z)|_{z=Lz}=293.15\ \mathrm{K}(0\leqslant y\leqslant L_y,\ 0\leqslant x\leqslant L_x) \quad (1)$$

$$T(z)|_{z=0}=333.15\ \mathrm{K}(0\leqslant y\leqslant L_y,\ 0\leqslant x\leqslant L_x) \quad (2)$$

式中:L_x,L_y和L_z——分别表示立方体沿方向x,y和z的长度,绝缘热边界条件施加在立方体所有4个侧边界上,绝缘传热边界条件同时满足式(3)和式(4)[26],

$$-k\frac{\partial T}{\partial t}|_{x=0,x=Lx}=0(0\leqslant y\leqslant L_y,\ 0\leqslant z\leqslant L_z) \quad (3)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial t}|_{y=0,y=Lx}=0(0\leqslant x\leqslant L_x,\ 0\leqslant z\leqslant L_x) \quad (4)$$

通过式(3)和式(4)可将热流限制在一个方向上,以实现稳态热传导。假设填料边界为连续热通量边界,由于填料尺寸为微米级,因此可忽略界面边界效应的影响[26]。

1.1.3 有效导热系数计算:在稳态下,材料内部温度不随时间变化,传热主要通过热传导。当没有外部热源时,其传热控制方程如式(5)[16]所示,

$$\nabla^2T=\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2T}{\partial z^2}=0 \quad (5)$$

式中,T——热力学温度场,单位K。根据傅里叶定律可知,复合材料有效导热系数的计算可由式(6~8)计算得出[27],

$$q(i)=-k(i)\nabla T \quad (6)$$

$$q_z=\sum_{i=1}^{n}\frac{q(i)\cdot VOL(i)}{V_{\mathrm{total}}} \quad (7)$$

$$\lambda_{\mathrm{eff}}=\frac{q_z\cdot d}{T_d-T_0} \quad (8)$$

式中:$q(i)$——材料点的热通量;∇T——温度梯度;VOL(i)——材料每个积分点的体积;V_{total}——RVE材料的总体积;q_z——沿Z方向的热通量密度,W·m^{-2};d——立方体沿Z方向上的厚度,d=400 μm,根据式(6~8)即可求得复合材料的有效导热系数(λ_{eff})[27]。

1.2 实验部分

1.2.1 实验原料:液体三元乙丙橡胶(EPDM):数均分子量为5万,胜浩塑胶原料有限公司;碳纤维(CF):平均长度为250 μm,平均直径为10 μm,福建联合新材料科技有限公司;六方氮化硼(h-BN):平均片径为30 μm,平均厚度为1.5 μm,安徽科润纳米科技有限公司;硫化剂双叔丁基过氧化二异丙基苯(BIPB,纯度98%)、交联助剂三烯丙基异氰脲酸酯(TAIC,纯度70%):工业级,广州金昌盛科技有限公司。

1.2.2 材料制备与测试:将总体积分数分别为3%和9%的CF和h-BN、0.8%硫化剂双叔丁基过氧化二异丙基苯(BIPB)和0.5%助交联剂三烯丙基异氰脲酸酯(TAIC)采用均质机(ZYMC-180HV,深圳中毅科技有限公司)混合均匀,将混合填料放入60 ℃的烘箱中加热15 min,使硫化剂BIPB熔融,然后在混合填料中加入液体三元乙丙橡胶,用均质机混合均匀,得到混炼胶。采用平板硫化机(KSH-100T,东莞市科盛实业有限公司)于50 ℃硫化40 min,得到CF/h-BN/EPDM硫化胶,最后采用热常数分析仪Hotdisk(TPS2005s)测量样品的导热系数,采用单面法,样品厚度为6 mm。

2 结果与讨论

2.1 CF/h-BN体积比对复合材料导热性能影响的数值模拟

当CF/h-BN的总体积分数为3%,且CF:h-BN的体积比分别为3:1,2:1,1:1,1:2和1:3时,在ABAQUS中分别建立相应的模型,进而在COMSOL中采用热稳态方式进行导热性能数值模拟,得到填料温度场和热流线分布图,如Fig.2所示。

如Fig.2(a~e)所示,填料总体积分数为3%时,CF/h-BN/EPDM复合材料中CF和h-BN的体积比分别为3:1,2:1,1:1,1:2和1:3时,分别得出ABAQUS有限元模型。根据Fig.2(f~j)温度场可知,模型下部的颜色逐渐由蓝色变为红色,表明模型内部由下至上导热填料的温差逐渐减小。当红色区域范围越大,蓝色区域范围越小时,温差变化就越明显,复合材料的导热性能也越好。

Fig.2(k~o)对应CF和h-BN不同体积比的热流线分布图。图中红色的高热通量主要集中在碳纤维上,即大部分的热流都通过碳纤维传输,一方面是因为碳纤维具有比氮化硼更高的导热系数,在导热填料之间相互接触时,热通量更容易经过导热系数更

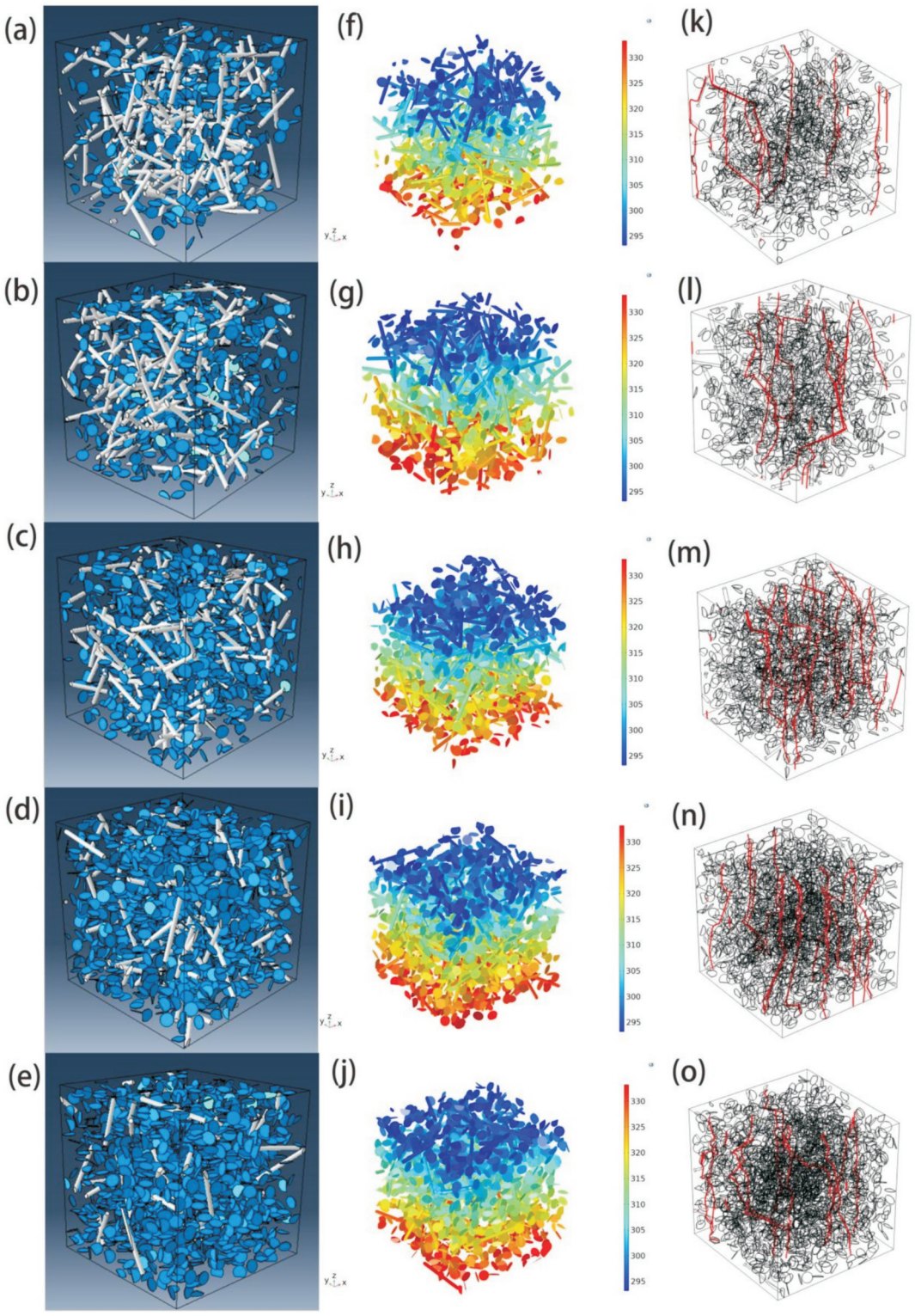


Fig. 2 When the total volume fraction of fillers is 3% and volume ratio of CF: h-BN is 3: 1, 2:1, 1:1, 1:2 and 1:3 respectively, (a~e) depict ABAQUS finite element model diagrams, (f~j) represent the COMSOL temperature nephograms, and (k~o) show the COMSOL heat flow charts

高的导热粒子;另一方面,较长的碳纤维比氮化硼更容易桥接获得更长的导热通路,削弱声子散射并增强面内导热,且随着碳纤维含量的增多,有效导热网络密度明显增加,从而提高了导热效率。

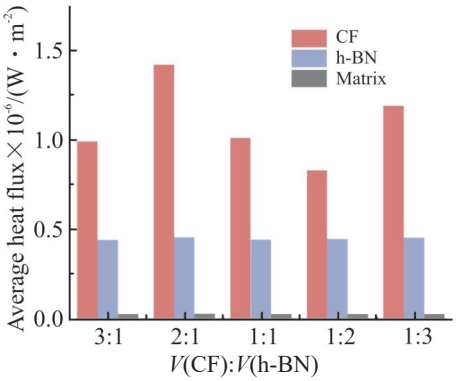


Fig. 3 Average heat flux for carbon fiber and boron nitride with different volume ratios

Fig.3是碳纤维和氮化硼不同体积比时对应的热流密度。如Fig.3所示,当填料的总体积分数为3%,且CF和h-BN的体积比从3:1变化至1:3时,热流经过碳纤维的平均热流密度均大于氮化硼的平均热流密度,且远远大于EPDM基体的热流密度,表明碳纤维对导热通路的贡献起主要作用。同时,当CF和h-BN的体积比为2:1时,流经CF的热流密度最高,达到1.42×10^6 W/m^2。

2.2 CF/h-BN用量对复合材料导热性能影响的数值模拟

当CF与h-BN的体积比为2:1时,CF/h-BN的不同体积分数(5%~9%)对复合材料导热系数影响的数值模拟如Fig.4(a~c)所示。随着混合填料体积分数的增大,图中白色棒状颗粒和蓝色片也逐渐增多。

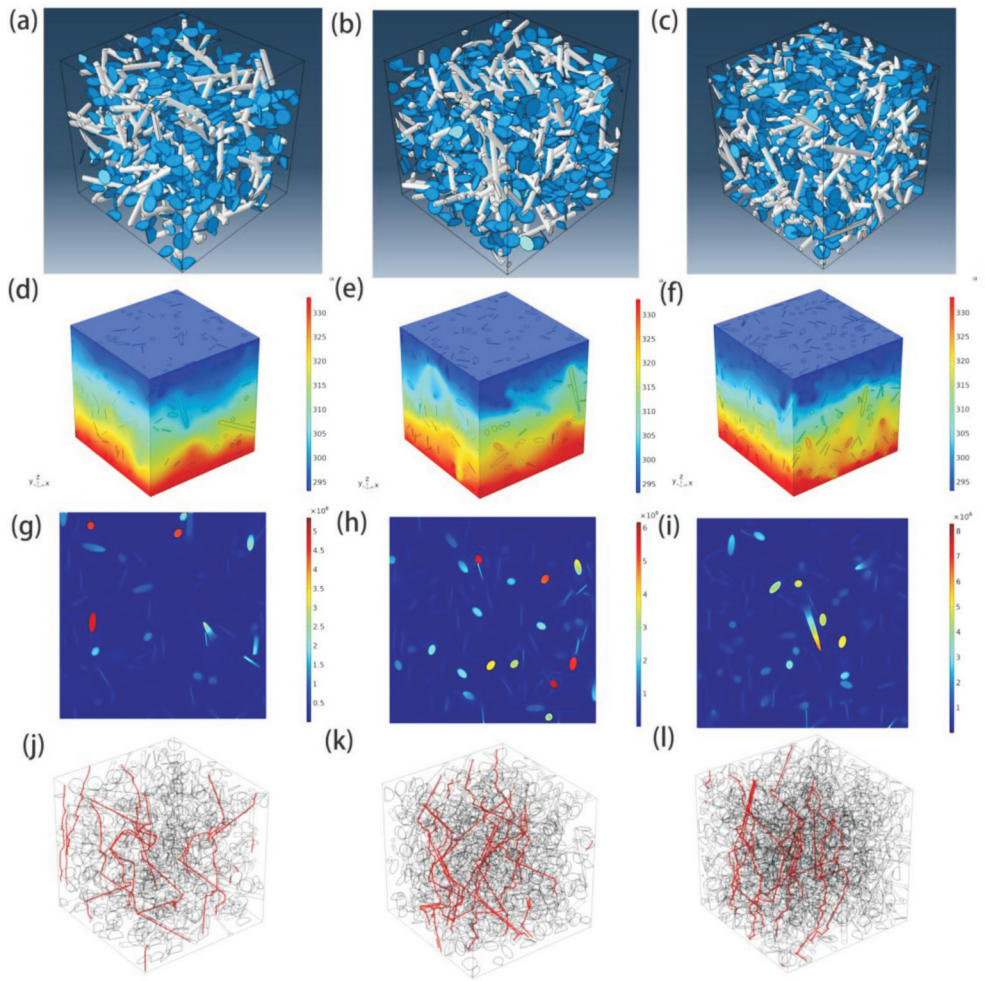


Fig. 4 When the volume ratio of CF and h-BN is 2: 1 and the total volume fraction of fillers is 5%, 7% and 9% respectively, (a~l) show the Abaqus model diagrams, (d~f) depict the Comsol temperature nephograms, (g~i) show the nephograms of heat-flow density, and (j~l) represent the heat flow diagrams

Fig.4(d~f)中，热量从高温的下边界传递到低温的上边界，对应复合材料的温度场颜色逐渐从初始的蓝色转变成红色，且红色区域范围逐渐变大，表明复合材料的温度梯度变化更明显，材料的导热性能随着填料用量的增加而增大。

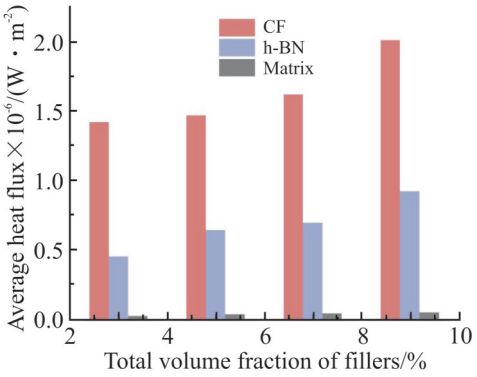


Fig. 5 Average heat flux density of carbon fiber, boron nitride and EPDM matrix with different volume fractions

Fig.4(g~i)是热通量分布图。随着导热填料的含量增多，填料颗粒的颜色变化更明显，即由初始的蓝色变为深红色，这是由于热量集中从碳纤维上传导，从而显示的导热填料颜色比基体颜色更深，表明复合材料的导热性能随导热填料的增多而增强。这是因为微观上通过碳纤维的热通量远大于基体的热通量，因而热传导过程中，热通量主要流经碳纤维。此外，随着混合填料体积分数的增大，填料颗粒之间的距离减小，填料相互接触形成导热通路的概率增加，因此材料的导热性能提高。

Fig.4(j~l)是热流线分布图。其中碳纤维在氮化硼填料之间起到了很好的导通作用，而氮化硼也可以将部分碳纤维连接在一起。当碳纤维和氮化硼之间达到合适的体积比时，形成的导热通路也越高效，材料的导热性能也越好。

Fig.5是碳纤维、氮化硼和三元乙丙橡胶基体在不同体积比时的平均热流密度。当CF和h-BN的体积比为2:1时，随着混合填料的体积分数逐渐增加，碳纤维和氮化硼的热流密度呈现明显升高的趋势，表明随着填料用量的增加，有利于形成更密集的导热通路，从而导致平均热流密度更高。

2.3 复合材料导热系数的模拟值与实测值对比

为了进一步验证模型的准确性和实用性，选取导热填料的实际总体积分数和体积比与模拟参数保持一致，然后将数值计算所得的模拟导热系数与实测导热系数进行对比，发现仿真结果与实测结果吻合度较高，从而验证数值计算的准确性。根据式(6~8)可得数值模拟的结果。

Fig.6是不同体积比的CF:h-BN对应复合材料导热系数模拟值与实测值的对比。Fig.6(a)中，当填料的总体积分数为3%时，不同体积比的CF和h-BN对应的导热系数模拟值与实测值非常接近，误差在5%以内，具有较高的可信度。Fig.6(b)中，当填料的总体积分数为9%时，不同体积比的CF和h-BN对应导热系数的模拟值与实测值之间的误差在10%以内，这是因为填料在模拟模型中是随机分布，而在复合材料中实际无法达到理想的随机分布。此外，在有限元模拟过程中也对模型进行了简化，因而导热系数的实测值与模拟值存在一定的偏差。

即当CF和h-BN的体积比为2:1时，在3%和9%的总体积分数时均获得最高的导热系数，这是由于

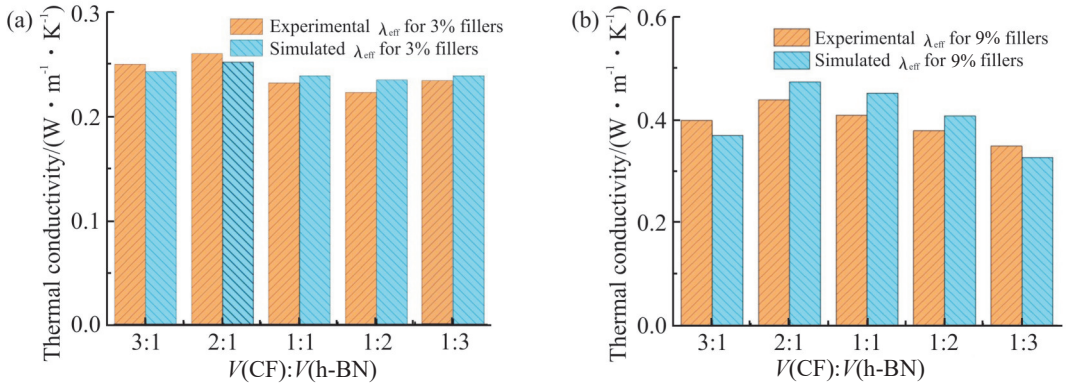


Fig. 6 Comparison of the simulated and measured thermal conductivity of CF and h-BN with different volume ratios as the total volume fraction of hybrid fillers is (a) 3% and (b) 9%, respectively

碳纤维和氮化硼的体积比合适,因而碳纤维和氮化硼的空间利用效果较好,氮化硼能较多地填充到碳纤维之间的空隙,提高了颗粒间的接触效果,因而构建了较完善的导热通路。因此,设定CF和h-BN的体积比为2:1,研究填料的总体积分数对复合材料导热系数的实测值和模拟值的影响,如Fig.7所示。

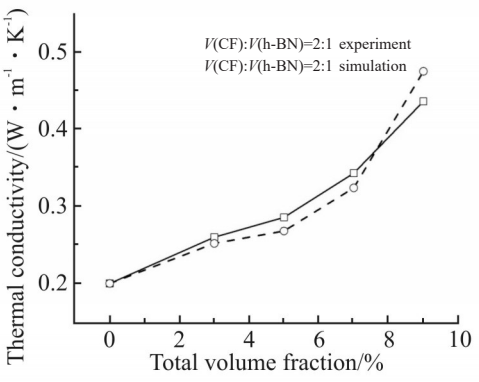


Fig.7　Comparison of the simulated and measured thermal conductivity with different volume fractions of CF and h-BN at a fixed volume ratio of 2:1

Fig.7中,在不同的体积分数下,复合材料的导热系数模拟值与实测值比较吻合,可见仿真结果具有较高的可信度。当填料总体积分数低于8%时,导热系数实测值略高于模拟值,这是因为导热填料在低填充率时,填料的实际分散均匀性较好,导热系数的实测值和模拟值非常接近。但是当填料的总体积分数高于8%时,混合填料在基体中实际发生部分团聚,导热填料的利用率变低,而模拟过程中仍然认为填料处于均匀分散的理想状态,导热网络保持相对完善,因而导热系数的模拟值逐渐明显高于实测值。

3　结论

(1)随着CF与h-BN的体积比从3:1变化到1:3时,CF/h-BN/EPDM复合材料的导热系数模拟值呈先增大后减小,当体积比为2:1、总体积分数为9%时,导热系数的模拟值为0.47 W/(m·K)。

(2)CF/h-BN/EPDM复合材料的导热系数实测值随着CF与h-BN的体积比从3:1变化到1:3,呈现先增大后减小的变化。随着填料体积分数从3%增加到9%,复合材料的导热系数实测值从0.26 W/(m·K)。增加到0.44 W/(m·K)。

(3)通过改变不同导热填料的微结构和排列方式,构建合理的三维导热模型,计算得出不同维度导热填料复配时的导热系数,有利于优化复合材料导热通路设计,探究复合材料的导热机理,提高导热材料的研发效率。

参考文献:

[1] Su Y, Ma Q, Liang T, *et al.* Optimization of effective thermal conductivity of thermal interface materials based on the genetic algorithm- driven random thermal network model[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021,13: 45050-45058.

[2] An F, Li X, Min P, *et al.* Vertically aligned high-quality graphene foams for anisotropically conductive polymer composites with ultrahigh through-plane thermal conductivities[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018,10:17383-17392.

[3] Shen Z, Feng J. Highly thermally conductive composite films based on nanofibrillated cellulose in situ coated with a small amount of silver nanoparticles[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10: 24193-24200.

[4] Sun H, Ji T, Bi H, *et al.* Synergistic effect of carbon nanotubes and wood-derived carbon scaffold on natural rubber-based high-performance thermally conductive composites[J]. Composites Science and Technology, 2021, 213: 108963.

[5] Song J, Zhang K, Guo Z, *et al*. h-BN orientation degree on the thermal conductivity anisotropy of their silicone rubber composites: a quantitative study[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 166: 107389.

[6] Maxwell J C. A treatise on electricity and magnetism[M]. [S.l.]: Clarendon Press, 1873.

[7] Agari Y, Uno T. Estimation on thermal conductivities of filled polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1986, 32: 5705-5712.

[8] Xu J Z, Gao B Z, Kang F Y. A reconstruction of Maxwell model for effective thermal conductivity of composite materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 972-979.

[9] Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials[J]. Journal of Applied Physics, 1962, 33: 3125-3131.

[10] Hasselman D P H. Thermal diffusivity and conductivity of composites with interfacial thermal contact resistance[M]// Hasselman D P H, Thomas J R. Thermal conductivity 20.

Boston, MA: Springer, 1989: 405-413.

[11] Nan C, Birringer R, Clarke D R, *et al*. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81: 6692-6699.

[12] Hatta H, Taya M, Kulacki F A, *et al*. Thermal diffusivities of composites with various types of filler[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26: 612-625.

[13] Yin X, Yang C, Tang Y. Multi- scale simulation revealing low thermal conductivity origins of melt- compounded HDPE/ MWCNTs nanocomposites[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 139: 350-361.

[14] Yang X S, Zhou L, Liu K Y, *et al*. Finite element prediction of the thermal conductivity of GNP/Al composites[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35: 825-838.

[15] Zeneli M, Malgarinos I, Nikolopoulos A, *et al*. Numerical simulation of a silicon- based latent heat thermal energy storage system operating at ultra- high temperatures[J]. Applied Energy, 2019, 242: 837-853.

[16] Wu J, Song X, Gong Y, *et al.* Analysis of the heat conduction mechanism for Al_2O_3/Silicone rubber composite material with FEM based on experiment observations[J]. Composites Science and Technology, 2021, 210: 108809.

[17] Zhai S, Zhang P, Xian Y, *et al*. Effective thermal conductivity of polymer composites: theoretical models and simulation models [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117: 358-374.

[18] Tian W, Chao X, Fu M W, *et al.* New numerical algorithm for the periodic boundary condition for predicting the coefficients of thermal expansion of composites[J]. Mechanics of Materials, 2021, 154: 103737.

[19] Zhao Y, Zhang Z, Cai C, *et al.* Vertically aligned carbon fibers-penetrated phase change thermal interface materials with high thermal conductivity for chip heat dissipation[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120807.

[20] Li S, Liu B, Jia X, *et al*. Numerical simulation on the optimization of the anisotropic thermal conductivity of hexagonal boron nitride/nanofiber composite films[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62: 3183-3193.

[21] Cao M, Shu J, Chen P, *et al*. Orientation of boron nitride nanosheets in CM/EPDM co-continuous blends and their thermal conductive properties[J]. Polymer Testing, 2018, 69: 208-213.

[22] Bahmani A, Nooraie R Y, Willett T L, *et al.* A sequential mobile packing algorithm for micromechanical assessment of heterogeneous materials[J]. Composites Science and Technology, 2023, 237: 110008.

[23] Song X, Xue X, Qi W, *et al.* Research on the compound optimization method of the electrical and thermal properties of SiC/EP composite insulating material[J]. Polymers, 2021, 13: 3369.

[24] Tian W, Qi L, Su C, *et al.* Effect of fiber transverse isotropy on effective thermal conductivity of metal matrix composites reinforced by randomly distributed fibers[J]. Composite Structures, 2016, 152: 637-644.

[25] Tian W, Fu M W, Qi L, *et al.* Interphase model for FE prediction of the effective thermal conductivity of the composites with imperfect interfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 145: 118796.

[26] Saini A, Unnikrishnakurup S, Krishnamurthy C V, *et al*. Numerical study using finite element method for heat conduction on heterogeneous materials with varying volume fraction, shape and size of fillers[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 159: 106545.

[27] Meng T, Peng C, Wang R, *et al.* Effective thermal conductivity of ellipsoidal inclusion- reinforced composites: theoretical model and numerical simulation[J]. Composite Structures, 2023, 308: 116654.

Thermal Conductivity of CF/h-BN/EPDM Composites and Numerical Simulation of Their Thermal Conductivity

Zehong Liu [1], Xinghua Jiang [1,2], Jianhua Guo [2,3]

(*1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Zhongshan South China University of Technology Modern Industrial Technology Research Institute, South China University of Technology, Zhongshan 528400, China; 3. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

ABSTRACT: With the rapid development of 5G communication, electronics and new energy vehicles, there is an increasing demand for thermal conductivity materials. Consequently, high-performance thermal conductivity composites have emerged as a prominent area of research. Considering the limitations associated with seepage and high-temperature volatilization of small molecule silicone oil in thermal conductive silicone rubber gaskets, they are not suitable for some applications requiring high cleanliness. Therefore, this study employed liquid ethylene-propylene-diene monomer rubber (EPDM) as matrix, and incorporated carbon fiber (CF) and hexagonal boron nitride (h-BN) as thermal conductive fillers to fabricate flexible thermal conductive composites without silicone oil leaking and VOC emission. Finite element simulation was utilized to simulate the thermal conductive behavior of the composites and predict the thermal conductivity of the composites filled with hybrid fillers at different volume ratios and fractions. The results demonstrate that the discrepancy between simulated and measured thermal conductivities is less than 10%, indicating good agreement between them. This study presented a novel approach for simulating and predicting the thermal conductivity of flexible thermal conductive composites filled with hybrid fillers.

Keywords: carbon fiber; hexagonal boron nitride; liquid ethylene-propylene-diene monomer rubber; thermal conductivity; numerical simulation