AlN/碳纤维混合填充橡胶复合材料的导热性能

张晓光, 盖鹏兴, 张宝库, 唐元政, 何燕*

青岛科技大学机电工程学院, 青岛 266061

* 联系人, E-mail: heyang_sd@163.com

2017-12-15 收稿, 2018-03-11 修回, 2018-03-12 接受, 2018-07-31 网络版发表

国家自然科学基金(51676103)和绿色轮胎与橡胶协同创新中心开放课题(2015GTR0019)资助

摘要 高导热橡胶复合材料由于其具有耐腐蚀、电绝缘等优点, 被广泛应用于航空、航天、电子等需散热的工业领域中. 在橡胶基体中填加高导热填料是提高复合材料导热性能的最有效、最常用的方法, 通常采用单一填料如炭黑、金属粒子、碳纤维、碳纳米管等填充橡胶基体, 但单一填料填充时往往需要高填充量来获得高导热性能, 造成工艺复杂、生产成本高等问题. 本文采用两种混合填料填充橡胶基体, 考虑填充型复合材料的微观结构形态与填料空间位置的随机性, 基于随机顺序添加算法与均匀化理论, 建立球形氮化铝(AlN)和碳纤维(Nippon CN-90)混合填料填充复合材料的三维随机代表体单元RVE(representative volume element)模型. 运用ANSYS软件对其进行数值模拟研究, 讨论了两种填料空间分布、体积配比以及填料含量对复合材料导热性能的影响. 结果表明, 由于碳纤维具有明显的取向性, 混合填充复合材料各方向上的热导率表现出差异性, 各方向热导率的平均值可宏观表征复合材料的热导率; 球形AlN和碳纤维混合填充复合材料时, 碳纤维对复合材料热导率起主导作用, 复合材料热导率与填料体积配比大致呈线性增长关系; 碳纤维填充体积分数一定时, 球形AlN含量增加, 复合材料热导率缓慢增大, 球形AlN填充体积分数一定时, 碳纤维含量增加, 复合材料热导率迅速增大; 混合填充可以在较低碳纤维体积分数情况下获得更高导热性能的复合材料.

关键词 混合填料, 复合材料, 导热性能, 数值模拟, 氮化铝, 碳纤维

橡胶复合材料的发展与现代科学技术的发展密切相关, 橡胶复合材料以其高比强度、高比模量、耐腐蚀、抗疲劳性及高度的可设计性等优越性能, 被广泛应用于航天、航空、汽车、兵器、电子等行业^[1]. 在电子产品中, 要求橡胶复合材料具有良好的绝缘性及散热性能^[2,3]; 在航空领域内, 要求复合材料具有一定的强度及导热性能, 另外还要起到密封减震等作用^[4,5]. 因此, 高导热性能的橡胶复合材料的需求对研究人员提出了更高的挑战.

随着电子计算机的发展, 数值模拟技术被广泛地应用于橡胶复合材料的研究中. 在填充型复合材料的数值模拟研究中, 学者们大多研究单一填充物

对橡胶复合材料的影响, 阙玉龙等人^[6]采用有限元方法对SiC/Al复合材料进行传热数值模拟; Jin等人^[7]用数值模拟的方法研究了粒径、体积分数和配比方式对复合材料导热性能的影响; 刘加奇等人^[8]基于两种不同的算法, 模拟研究了颗粒填充橡胶时的导热性能与微观结构的关系. Kaddouri等人^[9]模拟研究了在二维平面上, 夹杂物形状对复合导热性能的影响; Wang和Zhang^[10]通过数值计算的方法探究了较高含量的填料在基体中随机分布对复合材料有效导热系数的影响.

对于混合填料填充橡胶复合材料的研究工作相对较少, Pak等人^[11]通过实验方法改善多壁碳纳米管

引用格式: 张晓光, 盖鹏兴, 张宝库, 等. AlN/碳纤维混合填充橡胶复合材料的导热性能. 科学通报, 2018, 63: 2403–2410

Zhang X G, Gai P X, Zhang B K, et al. Thermal conductivity of rubber composite materials with a hybrid AlN/carbon fiber filler (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2403–2410, doi: 10.1360/N972017-01319

的表面特性,提高多壁碳纳米管和氮化硼混合填料的协同程度,进而提高聚苯硫醚复合材料导热性能;何春霞^[12]利用实验的方法研究了载荷对纳米SiO₂, TiO₂, Al₂O₃与石墨混合填充PTFE复合材料摩擦磨损性能的影响; Nam等人^[13]研究了功能化氧化石墨烯和多壁碳纳米管的三维氢键网链对复合材料强度的增强效果. 本研究同时将球形氮化铝(AIN)和碳纤维(Nippon CN-90)填料填充到橡胶基体中,构建直观体现混合填料空间分布的三维随机代表体积单元RVE(representative volume element)模型,研究在较低填充体积分数的情况下,混合填料对橡胶复合材料导热性能的影响.

1 模型建立

为研究混合填料填充复合材料的导热性能,建立模型时,基于随机顺序添加算法及均匀化理论选取三维随机代表体积单元RVE模型来预测复合材料整体的导热性能^[14]. 对模型做了一定的简化和假设:(1) 填料与橡胶基体之间没有缝隙,即不存在接触热阻;(2) 填料与填料之间互不接触,不存在相互作用;(3) 采用稳态导热模型,选取传热温差为20℃,高温边界温度为40℃,低温边界温度为20℃,不考虑辐射换热;(4) 采用均匀化理论,选取的RVE模型包含了所有微观特性;(5) 研究中选取填料填充体积分数较低,避免填料粒子的团聚现象.

选择模型尺寸为40 μm×40 μm×40 μm,图1为混合填料填充复合材料的RVE模型.

在数值计算中,对于球形AIN和碳纤维填料混合填充的橡胶复合材料,本文建立的RVE模型应用周期性边界条件,部分碳纤维填料在模型边界被切断,部分球形AIN填料在边界处被切分. 图2为混合填料填充复合材料模型的网格划分结果,模型的计算区域为填料及基体形成的代表性体积单元所占区域. 数值模拟中,分别沿X, Y, Z三个方向上施加温差为20℃的温度边界条件,得到RVE模型沿温度梯度方向上的热流量,进而求得模型沿3个方向的热导率.

2 材料属性

(1) 本文模型中选择三元乙丙橡胶作为复合材料基体,球形AIN和碳纤维为填料,3种材料的具体属性如表1所示.

(2) 在本研究中,球形AIN为各项同性填料,由

于碳纤维填料具有明显的取向性,因此在球形AIN和碳纤维混合填充的复合材料RVE模型中,单一方向上的热导率并不能代表其模型的导热性能. 本文对混合填充复合材料模型X, Y, Z三个方向上的热导率进行研究. 为避免模拟结果的偶然性,得到具有代表性的复合材料热导率,本文在每种工况下研究了5组RVE模型的热导率.

3 结果与讨论

3.1 混合填料空间分布对复合材料导热性能的影响

对于混合填充型复合材料,球形AIN和碳纤维两种填料在基体中都是随机分布的,填料的空间分布对复合材料导热性能有一定的影响. 本文研究了同一工况下,混合填料5种不同空间分布的RVE模型热导率的平均值作为复合材料的热导率. 图3为填料总体积分数为10%、两种填料配比为5:5、球形AIN填充个数为20个、长径比为15的碳纤维填充根数为25根的5组不同RVE模型的数值模拟结果.

从图3中可以看出,每组RVE模型在相同的边界条件下,沿X, Y, Z三个方向上的热导率差异较为明显,但每组模型3个方向热导率的平均值变化较小. 其中,第4组模型各方向上热导率的平均值最大,约为0.790 W/(m K);第3组模型各方向上热导率的平均值最小,约为0.706 W/(m K);5组模型热导率平均值约为0.755 W/(m K),最大值、最小值与平均值分别相差4.64%, 6.49%. 每组RVE模型3个方向上的热导率围绕平均值上下波动, RVE模型3个方向热导率的平均值具有一定代表性. 目前,实验中使用的导热仪大多仅从单一方向测量材料的导热系数,对明显取向性填料填充复合材料导热性能的测量结果偶然性较大、误差较为明显. 本文选取RVE模型3个方向热导率的平均值宏观描述复合材料导热性能,避免了模拟结果的偶然性,得到具有代表性的复合材料导热性能.

虽然5组模型热导率平均值相差不大,但每组模型3个方向上热导率最大值和最小值相差比较明显. 其中第1组模型下,复合材料沿3个方向上的热导率差异最为明显,当温度梯度沿X方向时, RVE模型热导率最大,约为1.005 W/(m K);当温度梯度沿Y方向时, RVE模型热导率约为0.691 W/(m K);当温度梯度

图 1 (网络版彩色)AlN/碳纤维混合填充模型. (a) 橡胶基体模型; (b) 体积分数为 5%的球形AlN填料; (c) 体积分数为 5%的碳纤维填料; (d) 复合材料有限元模型

Figure 1 (Color online) The model hybrid filled with AlN/carbon fibers. (a) Rubber matrix model; (b) spherical AlN filler with a volume fraction of 5%; (c) carbon fiber filler with a volume fraction of 5%; (d) the RVE model of composite material

图 2 (网络版彩色)RVE模型网格划分

Figure 2 (Color online) Meshing of the RVE model

表 1 材料属性

Table 1 The properties of materials

材料	密度 (g/cm ³)	比热容 (kJ/(kg K))	导热系数 (W/(m K))
橡胶基体	0.87	2.2	0.26
球形AlN	3.28	0.75	270
碳纤维	2.19	0.71	500

沿Z方向时, RVE模型热导率最小, 约为0.656 W/(m K). RVE模型沿X方向热导率约为Z方向热导率的1.53倍. 为探究其差异原因, 取第1组模型温度云图进行分析, 如图4所示. 其中, 图4(a1)和(a2), (b1)和(b2), (c1)和(c2)分别为第1组模型下温度梯度沿X, Y, Z三个方向的温度分布云图及导热网链示意图.

图3 (网络版彩色)空间分布对复合材料导热性能的影响
Figure 3 (Color online) Effect of space distribution on thermal conductivity of the composites

从温度分布云图中可以看出,在X方向上,多数碳纤维填料轴向基本与温度梯度方向平行,即碳纤维填料轴向与温度梯度方向夹角相对较小,有利于形成数量较多的导热网链,如图4(a2)所示,热流从高温端流向低温端的热阻较小,因此RVE模型沿X方向上的热导率较大.在Z方向上,仅有少量碳纤维填料轴向与温度梯度方向平行,由于碳纤维自身具有明显取向性,其沿轴向方向的导热性能远高于径向方向,造成沿Z方向上形成的导热网链数量较少,导热热阻较大,导致沿Z方向的热导率较低.该组RVE模型沿X方向上的热导率最大,沿Y方向上的热导率次之,沿Z方向上的热导率最小.因此,对于球形AlN和碳纤维填料混合填充型复合材料,合理调配碳纤维的空间分布和取向有利于复合材料导热性能的提高.

3.2 混合填料体积对比对复合材料导热性能的影响

在一定总体积分数下,混合填料体积对比对复合材料导热性能具有一定的影响.研究中,本文选定球形AlN和碳纤维的总体积分数为10%,球形AlN填充个数为20个,长径比为15的碳纤维填充根数为25根.研究了球形AlN与碳纤维填料体积配比分别为10:0, 8:2, 6:4, 5:5, 4:6, 2:8, 0:10七种工况下,复合材料RVE模型的热导率.图5为混合填料在不同体积配比下,复合材料热导率沿3个方向平均值的数值模拟结果.

从图5可以看出,在混合填料总体积分数一定时,

填料体积配比不同,复合材料热导率变化较为明显.随着碳纤维比重的增加,复合材料的导热率大致呈直线变化趋势.单独添加球形AlN填料时,复合材料热导率约为0.362 W/(m·K),约为纯橡胶基体热导率的1.39倍;球形AlN与碳纤维体积配比为5:5时,复合材料的热导率约为0.755 W/(m·K),约为单独添加球形AlN填料复合材料热导率的2.09倍;单独添加碳纤维时,橡胶复合材料的热导率约为1.384 W/(m·K),约为球形AlN与碳纤维体积配比为5:5时复合材料热导率的1.83倍.

由于碳纤维填料本身的热导率高于球形AlN的热导率,在碳纤维和球形AlN混合填充橡胶复合材料时,碳纤维对复合材料导热性能的提高起主导作用.球形AlN和碳纤维长径比及填充数量不变,随着碳纤维比重的增大,球形AlN粒径减小,碳纤维填料直径、长度不断增大,即碳纤维比表面积增大,由碳纤维主导的填料之间协同作用增强,填料之间形成良好的导热网链,有利于复合材料导热性能的提高.

另一方面,表2为球形AlN和碳纤维体积配比为10:0, 6:4, 4:6, 0:10四种工况下,5组模型各方向上热导率的平均值.由表中可以看出,随着碳纤维比重的增加,RVE模型沿各方向上热导率的最大值与最小值之间的差值越来越大.由于碳纤维自身存在明显取向性,随着碳纤维比重增加,RVE模型沿各方向形成的导热网链各不相同,造成各方向上热导率的差异性越来越大.因此实际应用中,若需提高橡胶复合材料各方向上的导热性能,混合填充橡胶复合材料的效果会更佳;若需利用复合材料某一方向上的导热性能,则应适当提高碳纤维比重并合理调控其空间取向.

3.3 混合填料含量对复合材料导热性能的影响

为了探究各填料含量对复合材料导热性能的影响,控制一种填料的体积分数为5%,研究复合材料热导率随另一种填料体积分数的变化规律.选定球形AlN填充个数为20个、长径比为15的碳纤维填充根数为25根,模拟碳纤维和球形AlN体积分数变化对复合材料热导率的影响,并将模拟结果与经典Nielsen-Lewis^[15]理论模型数值结果进行对比, Nielsen-Lewis理论模型公式为

$$\lambda = \lambda_1 \frac{1 + ABV}{1 - B\phi V}, \quad (1)$$

图4 (网络版彩色)填料温度云图与导热网链示意图. (a1), (a2) 模型温度梯度沿X方向的温度分布云图及导热网链示意图; (b1), (b2) 模型温度梯度沿Y方向的温度分布云图及导热网链示意图; (c1), (c2) 模型温度梯度沿Z方向的温度分布云图及导热网链示意图

Figure 4 (Color online) Temperature distribution and thermal network chains of fillers. (a1) and (a2) are temperature distribution and network chains of fillers when temperature gradient along the X direction; (b1) and (b2) are temperature distribution and network chains of fillers when temperature gradient along the Y direction; (c1) and (c2) are temperature distribution and network chains of fillers when temperature gradient along the Z direction

图5 (网络版彩色)不同配比下复合材料的热导率

Figure 5 (Color online) Thermal conductivity under different ratio of hybrid fillers

表2 不同配比模型沿X, Y, Z方向的导热系数

Table 2 Thermal conductivity of X, Y and Z of different models in ratio of hybrid fillers

热导率 (W/(m K))	10:0	6:4	4:6	0:10
X方向	0.356	0.777	0.792	1.149
Y方向	0.364	0.617	1.003	1.201
Z方向	0.365	0.693	0.926	1.802
Max-min	0.009	0.160	0.201	0.653

其中 $A=K_E-1$, K_E 是爱因斯坦系数, 与分散颗粒的形状、

聚集状态等有关; $B = \frac{\lambda_2/\lambda_1 - 1}{\lambda_2/\lambda_1 + A}$; $\varphi = 1 + \frac{(1-V_m)}{V_m^2} V$,

V_m 为填料的体积堆砌系数,与粒子的形状、尺寸有关, λ_1 为填料粒子的热导率, λ_2 为新基体的热导率, V 为填料粒子的体积分数.

本文选用球形AlN填料对应的 A 和 V_m 分别为1.5和0.637,碳纤维填料对应的 A 和 V_m 分别为8.38和0.52.两种工况下复合材料热导率的数值模拟值与理论计算值对比结果如图6所示.

从图6中可以看出,数值模拟结果与理论计算结果的变化趋势一致,模拟结果围绕理论计算结果上下波动,且碳纤维填料体积分数变化时波动较大.在球形AlN体积分数为5%时,复合材料热导率随着碳纤维含量的增加迅速增大.碳纤维含量为5%时,复合材料热导率为0.755 W/(m K);碳纤维含量为9%时,复合材料热导率为1.401 W/(m K),约为碳纤维含量5%时复合材料热导率的1.86倍.由于碳纤维填充个数及长径比保持不变,随其含量的增加,碳纤维填料的直径、长度均增大,由碳纤维主导的填料之间的协同作用增强,填料之间易形成良好的导热网链,有利于热量从高温端沿导热网链流向低温端,复合材料热导率迅速增大.由于碳纤维自身明显的取向性,导致不同体积分数下RVE模型模拟结果波动较大.在碳纤维填充分数为5%时,随着球形AlN含量的增加,复合材料热导率缓慢增大.球形AlN含量由5%增加到9%时,复合材料热导率由0.755 W/(m K)增大到0.893 W/(m K).由于球形AlN填充个数不变,随着其含量的增加,球形AlN填料的体积增大,填料间相互

作用加强,但由于球形填料不存在取向性,其含量的增加并不能明显改变复合材料内部的导热网链,复合材料热导率增加缓慢.因此,碳纤维含量的增加,更有利于复合材料导热性能的提高.

此外,比较图5和6可以发现,体积分数为9%的碳纤维和5%的AlN混合填料填充复合材料的热导率为1.402 W/(m K),比体积分数为10%的碳纤维填料单独填充时热导率(1.384 W/(m K))更高,说明混合填充可以在降低碳纤维填充量的情况下获得更高导热性能的复合材料,降低高导热复合材料的制备成本.

4 结论

本文基于随机顺序添加算法与均匀化理论,建立球形AlN和碳纤维混合填料填充复合材料的RVE模型,讨论了两种填料空间分布、体积配比以及填料含量对复合材料导热性能的影响,探究了两种混合填料在橡胶基体中的微观结构对复合材料导热性能的影响,为高导热性能复合材料的制备提供理论基础.具体结论如下.

(1) 混合填料在橡胶基体中随机分布,碳纤维具有明显的取向性,复合材料的热导率沿 X 、 Y 、 Z 三个方向上具有明显差异,但3个方向导热率的平均值变化不大,因此RVE模型3个方向的热导率平均值可以宏观描述复合材料的热导率;对于球形AlN和碳纤维填料混合填充型复合材料,合理调配碳纤维的空间分布和取向有利于复合材料导热性能的提高.

(2) 在两种填料不同体积配比填充复合材料时,碳纤维对复合材料热导率起主导作用;随着碳纤维和球形AlN体积配比的增大,复合材料热导率随之增大,复合材料热导率的增大与二者体积配比大致呈线性增长关系.因此,在填料总体积分数一定的情况下,适当增大碳纤维的填料配比,有利于复合材料导热性能的增加.

(3) 两种填料混合填充橡胶复合材料时,碳纤维体积分数一定,球形AlN含量增加时,复合材料热导率增加缓慢;球形AlN体积分数一定,碳纤维含量增加时,复合材料热导率迅速增大.虽然球形AlN与碳纤维混合填料填充复合材料时,碳纤维占主导地位,但混合填料之间的协同作用增强,依此对复合材料结构进行设计时,可以在较低碳纤维填充量的情况下获得更高导热性能.

图6 (网络版彩色) 填料体积分数变化时复合材料的热导率
Figure 6 (Color online) Thermal conductivity of the composites with different fillers contents

参考文献

- 1 Liu E L, Liu Y. Conductive properties of polymer composites filled with two kinds of carbon materials and calculating model of its percolation threshold (in Chinese). *J Funct Polym*, 2011, 24: 248–255 [刘恩隆, 刘煜. 两种碳材料混合填充聚合物复合材料的导电特性及渗流阈值的计算模型. *功能高分子学报*, 2011, 24: 248–255]
- 2 Ren P G, Di Y Y. Study on ultra high molecular weight polyethylene conductive composites filled with graphene/multi walled carbon nanotubes (in Chinese). In: *National Conference on Polymer Research*. Beijing: Chinese Chemical Society, 2011 [任鹏刚, 狄莹莹. 石墨烯/多壁碳纳米管混合填充超高分子量聚乙烯导电复合材料的研究. 见: 全国高分子学术论文报告会. 北京: 中国化学会, 2011]
- 3 Liu H, Wu H W. Research progress of thermal conductive polymer composites with fillers (in Chinese). *China Plast Ind*, 2011, 39: 10–13 [刘汉, 吴宏武. 填充型导热高分子复合材料研究进展. *塑料工业*, 2011, 39: 10–13]
- 4 Li W, Guo Q F. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields (in Chinese). *Chin Opt*, 2011, 4: 201–212 [李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用. *中国光学*, 2011, 4: 201–212]
- 5 Shen J, Xie H Q. Development of research and application of the advanced composite materials in the aerospace engineering (in Chinese). *Mater Sci Tech*, 2008, 16: 737–740 [沈军, 谢怀勤. 先进复合材料在航空航天领域的研发与应用. *材料科学与工艺*, 2008, 16: 737–740]
- 6 Que Y L, Hua X Z, Zou A H, et al. Finite element analysis of the thermal property of SiCp/Al composites with different volume fraction of SiC (in Chinese). *J Nanchang Hangkong Univ*, 2013, 27: 32–36 [阙玉龙, 华小珍, 邹爱华, 等. 不同颗粒含量 SiCp/Al 复合材料导热性能的有限元分析. *南昌航空大学学报*, 2013, 27: 32–36]
- 7 Jin Z L, Chen X, Wang Y, et al. Thermal conductivity of PTFE composites filled with graphite particles and carbon fibers. *Comp Mater Sci*, 2015, 102: 45–50
- 8 Liu J Q, Zhang L Q, Yang H B, et al. Numerical investigation of the thermal property of particle filled polymer matrix composite (in Chinese). *Acta Mater Compos Sin*, 2009, 26: 36–42 [刘加奇, 张立群, 杨海波, 等. 粒子填充聚合物基复合材料导热性能的数值模拟. *复合材料学报*, 2009, 26: 36–42]
- 9 Kaddouri W, Moumen A, Kanit T, et al. On the effect of inclusion shape on effective thermal conductivity of heterogeneous materials. *Mech Mater*, 2016, 92: 28–41
- 10 Wang X J, Zhang L Z. A randomly distributed filler model for heat conductivity prediction in filled composite materials considering fillers aggregation. *Heat Transfer Eng*, 2015, 36: 929–936
- 11 Pak S Y, Kim H M, Kim S Y, et al. Synergistic improvement of thermal conductivity of thermoplastic composites with mixed boron nitride and multi-walled carbon nanotube fillers. *Carbon*, 2012, 50: 4830–4838
- 12 He C X. Friction and wear properties of PTFE composites filled with different mix materials made of nanocrystalline and graphite (in Chinese). *Acta Mater Compos Sin*, 2002, 19: 111–115 [何春霞. 不同纳米材料与石墨混合填充 PTFE 复合材料摩擦磨损性能. *复合材料学报*, 2002, 19: 111–115]
- 13 Nam K H, Yu J, You N H, et al. Synergistic toughening of polymer nanocomposites by hydrogen-bond assisted three-dimensional network of functionalized graphene oxide and carbon nanotubes. *Compos Sci Tech*, 2017, 149: 228–234
- 14 Sun Y Y, Chen L, Xu H F, et al. Derivation of thermal conductive equation of hybrid filled composites (in Chinese). *Ciesc J*, 2015, 66: 359–364 [孙颖颖, 陈林, 徐鸿飞, 等. 混合填充复合材料热导率方程的推导. *化工学报*, 2015, 66: 359–364]
- 15 Nielsen L E. The thermal and electrical conductivity of two-phase systems. *Ind Eng Chem Fundam*, 1974, 13: L9–L12

Summary for “AlN/碳纤维混合填充橡胶复合材料的导热性能”

Thermal conductivity of rubber composite materials with a hybrid AlN/carbon fiber filler

Xiaoguang Zhang, Pengxing Gai, Baoku Zhang, Yuanzheng Tang & Yan He*

College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China

* Corresponding author, E-mail: heyansd@163.com

Composite materials with high thermal conductivity have the advantages of corrosion resistance, fatigue resistance, easy processing, and electrical insulation and hence are widely used in industries concerned with high heat dissipation, such as aviation, aerospace, and electronics. Adding fillers with high thermal conductivity, such as carbon black, metal particles, carbon fiber, and carbon nanotubes, to rubber matrix materials is recognized as an efficient method to improve the thermal conductivity of the resulting composite materials. However, when single filler is used, the content of the fillers often must be improved to obtain high thermal conductivity, which entails a complicated process and high production cost. In this study, a hybrid filler of spherical aluminum nitride (AlN) and carbon fiber is added to rubber matrix materials. These hybrid filler particles greatly influence the thermal conductivity of the composite materials. To explore the effects of the hybrid fillers on the thermal conductivity of the composite materials, a three-dimensional random representative volume element (RVE) model filled with both spherical AlN and carbon fiber was developed using a random sequential addition method and homogenization theory. The size of the RVE model was $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$. To prevent the formation of “larger fillers” by the aggregation of small fillers, a lower volume fraction of filler was investigated in this study. ANSYS software was used to simulate the influence of the space distribution, volume ratio, and filling fraction of the two fillers on the thermal conductivity of the composite material with hybrid fillers. A steady-state heat conduction model was adopted, and a temperature gradient from 20 to 40°C was applied in the X , Y , and Z directions. The results showed that the thermal conductivity was different in the three directions due to the difference in the orientation of the carbon fibers. It can be seen from the temperature distribution clouds that there are many thermal network paths in the direction of higher thermal conductivity. The average thermal conductivity in all directions could macroscopically characterize the thermal conductivity of the composite materials. Carbon fiber plays a dominant role in the thermal conductivity of the composite material, and the thermal conductivity increases linearly with the ratio of the fillers. When the volume fraction of the carbon fibers is constant, the thermal conductivity of the composite material increases slowly with the increase in the AlN fraction. In comparison, when the volume fraction of AlN is constant, the thermal conductivity of the composite material increases rapidly with the increase of in the carbon fiber fraction. Because of enhanced synergistic effects between the fillers in the matrix, a lower filling fraction of carbon fibers could be used to obtain higher thermal conductivity when designing the structure of composite materials. The results of this study provide a theoretical basis for the preparation of composite materials with high thermal conductivity.

hybrid fillers, composite materials, thermal conductivity, numerical simulation, spherical AlN, carbon fibers

doi: 10.1360/N972017-01319