

基于有限元法的 IGBT 模块复合材料等效导热率计算研究

张蓊方¹, 罗锦², 陈映秀¹, 吴建雪¹, 李月¹, 江浩¹

(1. 国网四川省电力公司遂宁供电公司, 四川 遂宁 629000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 在柔性直流输电飞速发展驱使下, IGBT 模块日益小型化, 其内部发热问题愈加严重, 因此, 对 IGBT 模块内部散热问题的研究具有很实际的价值。针对现有材料导热率研究的计算均有相应的局限性问题, 采取有限元分析方法建立 ANSYS 有限元分析模型, 研究了复合材料等效导热率计算的方法, 对比 Maxwell-Eucken 方程、文献中的试验数据以及所提方法的计算结果, 说明所提方法的可行性。最后利用所提方法, 得出了考虑填料的形状、大小、体积分数、填料颗粒导热率、填料颗粒团聚等因素对复合材料等效导热率的变化规律。

关键词: 柔性直流输电; IGBT; 复合材料; 导热率; 有限元法

中图分类号: TQ314 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)02-0041-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.02.009

Research on Calculation Method for Equivalent Thermal Conductivity of Polymeric Composites of IGBT Modules Based on Finite Element Method

Zhang Rufang¹, Luo Jin², Chen Yingxiu¹, Wu Jianxue¹, Li Yue¹, Jiang Hao¹

(1. State Grid Suining Electric Power Supply Company, Suining 629000, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to adapt to the development of flexible HVDC transmission technology, IGBT modules are becoming smaller, but the internal heating problem of IGBT modules is becoming more and more prominent. Therefore, the issues related to thermal dissipation of IGBT module packages for further exploration have an important guiding significance and practical value. The numerical calculation has its own scope of application and limitation, and the experimental studies are reliable but high cost. At present, ANSYS finite element method to calculate equivalent thermal conductivity of polymeric composites is seldom reported. Then, the method to calculate equivalent thermal conductivity of polymeric composites is studied based on finite element method. The comparison of Maxwell-Eucken equations, experimental results of reference and the obtained results shows the feasibility of this method. Finally, The change regulations of equivalent thermal conductivity of composites considering the factor of filler shape, size, volume fraction, the thermal conductivity of filler particles, particles agglomeration are obtained.

Key words: VSC-HVDC; IGBT; polymeric composites; thermal conductivity; finite element method

0 引言

在柔性直流输电技术飞速发展的驱使下, 作为柔性直流输电换流阀开关器件的 IGBT 模块日益小型化。在同样的功率情况下, IGBT 体积的减小会导致电流密度增大, 内部发热增加。如果模块材料散热性能不好, 会直接导致内部热量的堆积, 温度不断的升高会引起热应力变形严重; 如果器件长期在此条

件下运行, 轻者缩短 IGBT 的寿命, 重者影响其运行可靠性, 进而有造成大面积停电的可能; 因此, IGBT 模块材料的导热性研究俨然已经成为其发展的一个重心, 如何改善 IGBT 模块材料的导热性能成为现阶段的重点工作。

IGBT 在柔性直流输电中的应用受到其封装材料及其导热性能的制约。为了得到性能优良的 IGBT 模块封装复合材料, 近年来越来越多的研究者致力于复合材料导热性能的研究^[1], 结果表明, 在基体中加入

高导热率的填料可以改善复合材料的导热性能。国内外学者也有很多致力于对材料导热率的理论计算模型进行研究,取得了相应的成果与进展^[2-9],但各计算模型也都有有一定的局限性,并且适用范围也有限。现有研究中,利用有限元分析方法对 IGBT 模块复合材料的导热性能进行的研究相对较少^[10-14]。

为了提高材料导热性能,下面采用有限元分析方法,在 ANSYS 软件中建立材料的微观模型并对材料的等效导热率进行仿真计算。同时考虑各种可能的因素,如填料的新装、大小、填料的导热率等对负荷材料导热性能的影响,仿真计算得出各影响因素对复合材料的变化规律,大大节省时间和成本。所提方法对 IGBT 模块复合材料导热性能研究及 IGBT 在柔性直流输电中的应用具有十分重要的意义。

1 等效导热率计算方法

1.1 固体热传导

热传导是指发生在物质本身各部分之间或直接接触的物质之间热量传递的现象^[15]。由热力学相关定律可以知道,热量是物质运动的一种形式,从微观的角度来看,当粒子的能级轨道发生变化,其能量就会发生相应的改变,由此就会引起物质能量的改变。

由傅里叶公式有:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta l} \quad (1)$$

式中: q 为稳态热流量, W; λ 为导热率, W/(m·K); ΔT 为热流方向上的温度差, K; Δl 在热流方向上的垂直距离, m。

由式(1)可以得到导热率的计算式为

$$\lambda = -\frac{q \times \Delta l}{\Delta T} \quad (2)$$

1.2 等效导热率理论预测模型(Maxwell - Eucken 方程)

填充型复合材料的导热性能与基体和填料的导热率有关,同时也与填料颗粒的形状、大小、体积分数、填料颗粒导热率、填料在基体中的分布状态等因素有关^[16]。

Maxwell 等人^[5]提出了基于微粒是孤立存在,彼此之间不存在相互作用的假设的材料导热率计算模型,其模型为

$$\lambda = \lambda_1 \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 + 2V(\lambda_2 - \lambda_1)}{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2V(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (3)$$

式中: V 为填料颗粒的体积分数; λ 为复合材料的导热率; λ_1 为基体材料的导热率; λ_2 为填料颗粒的导热率。

在微粒之间相互独立的假设下,得到了 Maxwell - Eucken 数学模型。从数学表达式可以看出,复合材料的导热率受到填料的体积分数、基体及填料导热率的影响。并且试验表明:当 V 很小时,复合材料导热率 λ 的实际值与模型计算值能很好吻合;当 V 较高时,复合材料导热率 λ 的实际值与该模型的预测值就相差甚远。因此,Maxwell 等人提出的 Maxwell - Eucken 模型有一定的局限性,只能在填料体积分数较低时才适用。

1.3 基于有限元法的等效导热率预测模型

这里基于有限元分析软件 ANSYS 对复合材料等效导热率的计算方法进行研究,建立模型并与理论预测模型以及文献[17]进行对比分析。对比结果见表1: Vol. % 为体积百分数; D 为颗粒的平均直径; λ_1 为基体的导热率; λ_2 为填料的导热率; λ' 为文献[17]计算的等效导热率; λ'' 为理论模型计算出来的等效导热率; λ 为所提有限元方法计算出来的等效导热率。由表1可以看出,所提方法的计算结果与 Maxwell - Eucken 模型理论值以及文献[17]的试验结果吻合度很高。由此可见,所采用 ANSYS 的仿真计算方法是可行的。

2 基于有限元法的等效导热率预测方法

2.1 有限元 ANSYS 介绍

在没有内热源、稳态条件下,温度 t 的分布遵循导热方程^[18]为

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

要求解此方程,有3类边界条件,分别为:

表1 导热率结果对比

单位: W/(m·K)

复合材料	(Vol. %) /%	$D/\mu\text{m}$	λ_1	λ_2	λ'	λ	λ''
ER - Al ₂ O ₃	31.2	4	0.17	20 ~ 30	0.70 ~ 0.71	0.67	0.61
ER - SiO ₂	45.0	20	0.17	0.7 ~ 1.7	0.46 ~ 0.87	0.72	0.69

1) 规定边界上的温度值 t 为一个恒定常数。

$$t = \text{const} \quad (5)$$

2) 规定边界上的热流密度值为一个恒定常数。

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \text{const} \quad (6)$$

式中: n 为表面的法向量; λ 为材料的导热系数。

3) 规定周围流体的温度、材料与流体间导热系数。

下面的仿真过程中 仅仅只涉及前两种边界条件。

2.2 建模与边界条件设置

在有限元分析软件 ANSYS 中建立复合材料模型: 基体是边长为 300 nm 的正方体; 填料颗粒平均分布 27 个颗粒, 颗粒形状为球体、正方体。

边界条件: 微观模型相对两面的壁面温度分别为 100 °C 和 0 °C, 另外 4 个面绝缘。

仿真考虑了: 填料颗粒的形状为球体、正方体; 填料颗粒的体积分数为 5%、10%、15%、20%、30%、40%; 填料颗粒的导热率为 10 W/(m·K)、20 W/(m·K)、30 W/(m·K); 填料颗粒的团聚等因素对复合材料等效导热率的影响。

经过建立模型、设置材料参数、划分网格并求解。求解后 根据模型温度场的分布 按公式对复合材料等效导热率进行计算。

2.3 有限元法对复合材料等效导热率预测

图 1 为用 ANSYS 建立的模型, 其中填料颗粒均匀分布在基体材料内部。边界条件为微观模型左、右壁面温度分别为 100 °C 和 0 °C, 另外 4 个面绝缘。

图 2 至图 4 均为球形颗粒均匀分布, 在体积分数为 10% 情况下的结果。图 2 是温度场分布图, 其中: 图 2(a) 是基体材料的温度分布; 图 2(b) 是填料颗粒的温度分布; 图 2(c) 是中间 9 个填料颗粒的温度分布。由图 2 可以得出 温度沿着 x 轴依次减小, 热流量方向是由 x 负向指向 x 正向。

图 3 和图 4 分别是热梯度分布和热通量分布图。填料颗粒附近的热梯度和热通量比基体材料的热梯度和热通量大, 因为填料颗粒的导热率大于基体的导热率。

根据模型温度场的分布, 对复合材料等效导热率进行分析计算。

$$\lambda = \left| \frac{q \times \Delta l}{\Delta T} \right| = \left| \frac{\sum q_i \times \Delta l}{\Delta T} \right| = 0.2635 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (7)$$

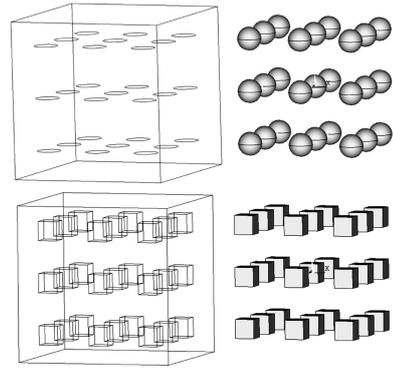
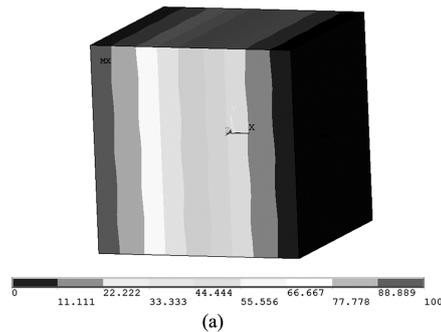
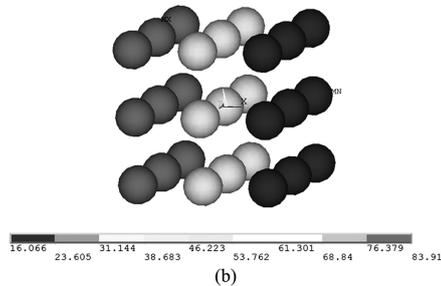


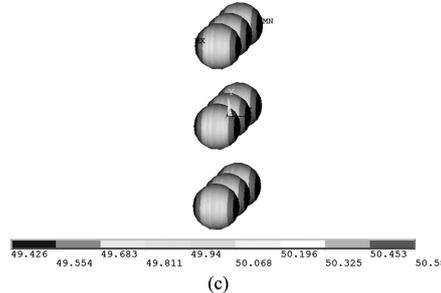
图 1 均匀分布模型



(a)



(b)



(c)

图 2 温度场分布

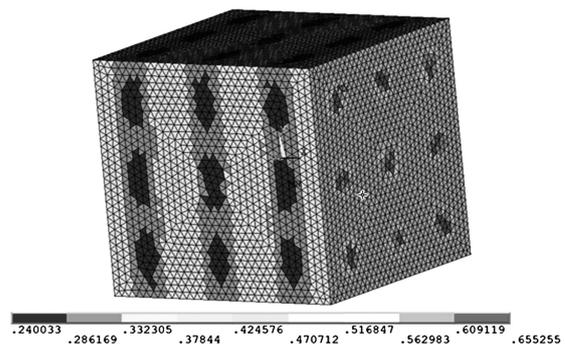


图 3 热梯度分布

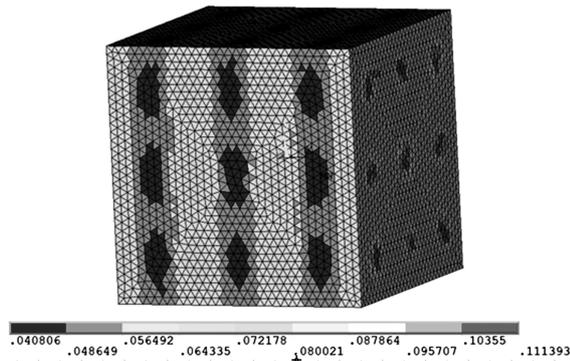


图4 热通量分布

用 Maxwell - Eucken 理论模型计算体积分数为 10% 球形颗粒均匀分布时,复合材料等效导热率为 0.223 6 W/(m·K)。用有限元方法得到复合材料等效导热率为 0.249 8 W/(m·K),与 Maxwell - Eucken 理论值的误差为 11.72%,进一步说明有限元方法预测复合材料等效导热率是可行的。

3 复合材料等效导热率的影响因素

复合材料的导热性能最终取决于填料及其在基体的分布情况^[16]。当填料含量较低时,其对材料导热性能的贡献并不大;当填料含量较多时,复合材料的力学性能受到影响,其含量增至某一值时,填料微粒之间相互作用并形成一定的链状和网状。当热流的方向与链条的方向一致时,材料的热阻最小,宏观反应就是导热率高,导热性能好;反之则导热性能差。

填充型复合材料导热性能的影响因素^[16]有:聚合物基体的种类、特性;填料的导热率、形状、大小、体积分数、分布情况等。

3.1 填料颗粒导热率的影响

为了得到更好导热性能的复合材料,可以向基体材料中添加高导热率的填料颗粒来提高复合材料的等效导热率^[7]。采用所提方法计算的结果见表2和表3,表中的填料1、填料2、填料3的导热率分别为 10 W/(m·K)、20 W/(m·K)、30 W/(m·K)。图5中4幅图分别是体积分数为 10%、20%、30%和 40%时,复合材料等效导热率与填料颗粒导热率的关系。从图5中可以看出随着填料颗粒的导热率增加,复合材料的导热率也增加。

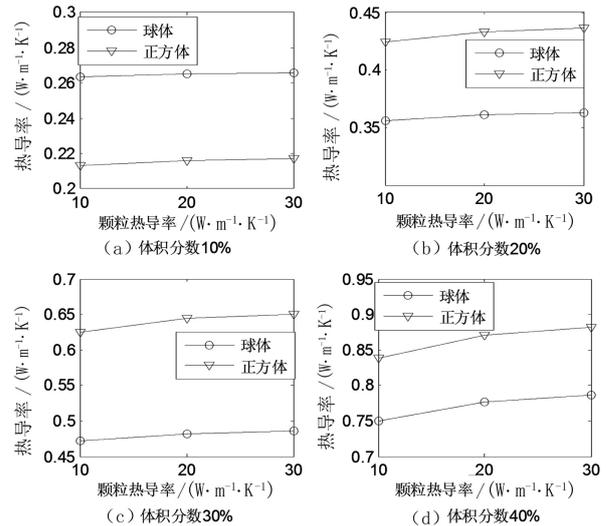


图5 复合材料等效导热率与填料颗粒导热率的关系
表2 球状颗粒对复合材料导热率的影响

体积分数	复合材料导热率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)		
	填料1	填料2	填料3
1%			
5	0.231 2	0.232 0	0.232 0
10	0.263 5	0.265 3	0.265 3
15	0.357 6	0.361 8	0.361 8
20	0.356 1	0.361 1	0.361 1
30	0.471 3	0.481 6	0.481 6
40	0.749 2	0.776 3	0.776 3

表3 正方体颗粒对复合材料导热率的影响

体积分数	复合材料导热率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)		
	填料1	填料2	填料3
1%			
5	0.165 0	0.166 5	0.167 0
10	0.213 3	0.216 1	0.217 1
15	0.297 3	0.302 3	0.304 1
20	0.424 2	0.433 3	0.436 5
30	0.625 3	0.643 9	0.650 4
40	0.838 3	0.870 9	0.882 5

3.2 填料颗粒体积分数的影响

在基体材料中添加高导热率的填料颗粒,这种方法提高了复合材料的等效导热率。但随着填料的增加对复合材料的热性能到底有什么影响,还需要用仿真来进行验证。

图6中的3条曲线代表填料颗粒的导热率 λ₂ 分别为 10 W/(m·K)、20 W/(m·K)和 30 W/(m·K)时不同体积分数下的导热率变化情况。从图6可以看出,无论是球状颗粒还是正方体颗粒,复合材料的

导热率随着填料颗粒体积分数的增加而增加,但非线性的关系。

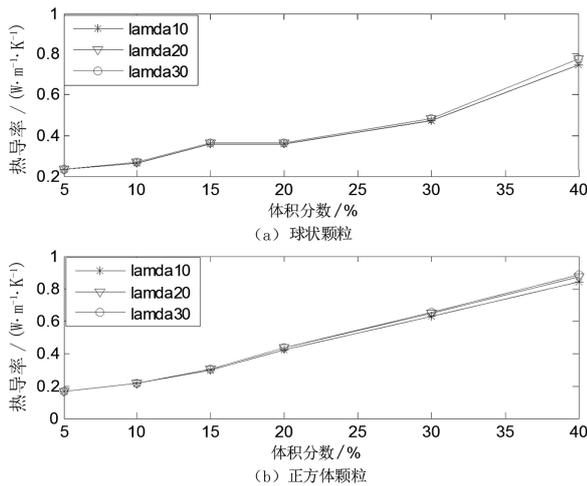


图6 复合材料等效导热率与填料体积分数的关系

3.3 填料颗粒形状的影响

研究表明,填料颗粒的形状对复合材料的导热率有一定的影响^[17,19-21]。由图7可以看出填料体积分数在15%~20%区间,方形填料和球形填料的复合材料导热率有一个交叉点A:

当体积分数 $V < A$ 时,球形填料复合材料的等效导热率大于方形填料;

当体积分数 $V > A$ 时,方形填料复合材料的等效导热率大于球形填料。

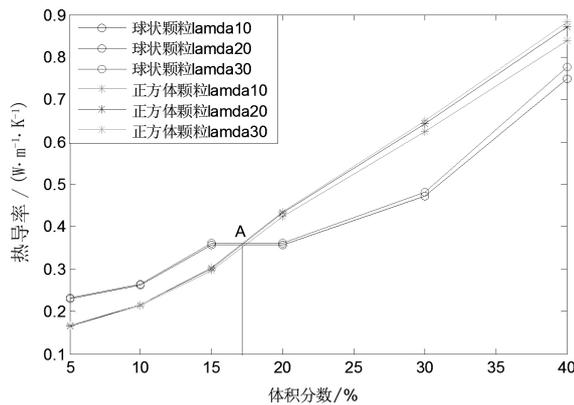


图7 复合材料等效导热率与填料颗粒形状的关系

3.4 粒子群的影响

实际情况中,复合材料的填料不论是方形还是球形,都不可能均匀分布在基体材料中,为此建立了填料有粒子团聚的模型与填料粒子均匀分布模型(见图8),在填料颗粒导热率为 $10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,分别计算复合材料的等效导热率并进行对比,得到的结果见表4和图9。

从表4和图9的计算结果表明,有粒子团聚的

填料与均匀分布的填料相比,复合材料的等效导热率差别微乎其微,甚至可以说几乎没有影响,由此就说明粒子团聚现象几乎对复合材料等效导热率没有影响。同时,这个结论与文献[20]中得到的试验结论相吻合。

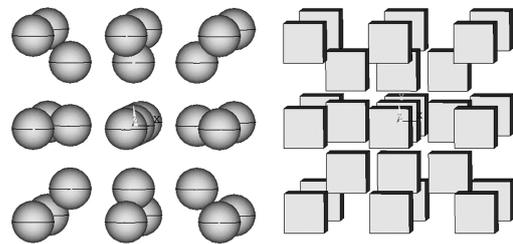


图8 ANSYS 颗粒团聚模型

表4 $\lambda_2 = 10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,不同颗粒形状对等效导热率的影响

体积分数 / %	球状颗粒		正方体颗粒	
	均匀	团聚	均匀	团聚
5	0.231 2	0.260 8	0.165 0	0.162 9
10	0.263 5	0.267 3	0.213 4	0.209 0
15	0.357 6	0.367 9	0.297 3	0.280 4
20	0.356 1	0.367 2	0.424 2	0.423 7
30	0.471 3	0.470 7	0.625 3	0.635 8
40	0.749 2	0.749 1	0.838 3	0.839 8

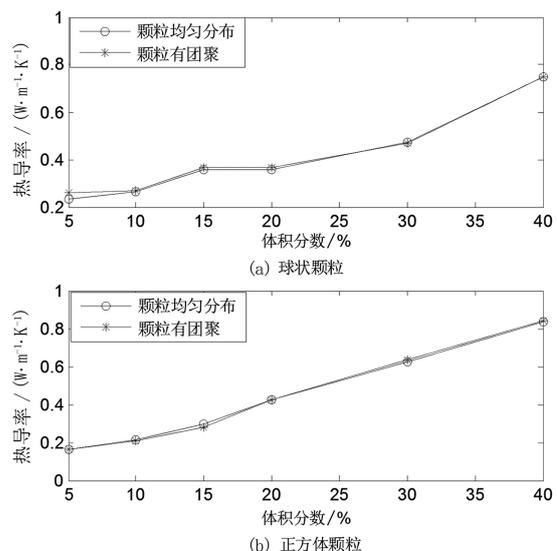


图9 复合材料中填料均匀分布与有粒子团聚对比

4 结 语

基于现有文献研究的基础上对 IGBT 封装复合材料的导热率进行的研究,利用先进的有限元数值

分析方法,同时考虑实际情况,分别分析了填料的大小、形状、体积分数等因素对复合材料导热率的影响规律,进而对复合材料的导热性能进行有效的预测,得到以下结论:

1) 对比 Maxwell - Eucken 模型、参考文献中的试验数据以及所提有限元法对有效导热率的计算结果,三者结果一致,说明有限元法仿真计算的可行性。

2) 填料的形状、大小、体积分数、填料颗粒导热率等对复合材料导热率的影响:随着体积分数的增加,复合材料导热率增加;复合材料在填料体积分数很低时,添加球状颗粒的复合材料等效导热率大于添加正方体颗粒的复合材料;在体积分数较高时,添加正方体颗粒的复合材料等效导热率大于添加球状颗粒的复合材料;随着填料颗粒的导热率增加,复合材料的导热率增加。

3) 粒子团聚现象几乎对复合材料等效导热率没有影响。

参考文献

- [1] 曾俊. 环氧树脂封装材料的导热模拟与导热性能[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [2] 叶宏, 徐斌, 王军, 等. 陶瓷微球填充型隔热涂料的有效导热系数[J]. 中国科学技术大学学报(自然科学版), 2006, 36(4): 361 - 363.
- [3] 陈则韶, 钱军, 叶一火. 复合材料等效导热系数的理论推算[J]. 中国科学技术大学学报(自然科学版), 2004, 34(4): 417 - 423.
- [4] 刘祥宽, Mehari Salomon, 胡献国, 等. 基于球型填充相复合材料有效导热系数的计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008, 31(9): 1378 - 1381.
- [5] 王璞玉, 胡旭晓, 周洁, 等. 聚合物基复合材料导热模型的研究现状及应用[J]. 材料导报: 综述篇, 2010, 24(5): 108 - 112.
- [6] 刘金世, 薛庆忠. 碳纳米管复合材料的有效导热率[J]. 石油大学学报, 2004, 28(5): 142 - 144.
- [7] 闵新民, 安继明, 饶宝林, 等. 聚合物基纳米复合材料导热率计算[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(7): 26 - 29.
- [8] 周远翔, 郭绍伟, 聂琼, 等. 纳米氧化铝对硅橡胶空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1605 - 1611.
- [9] 徐晓英, 王世安, 王辉. 复合导电高分子材料微观网络结构及导电行为仿真分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2221 - 2229.
- [10] Kumlutas D, Tavman I H. A Numerical and Experimental Study on Thermal Conductivity of Particle Filled Polymer Composites [J]. Journal of Thermoplastics Composite Materials, 2006, 19(4): 441 - 455.
- [11] Atila M. Optimization of High Pin Count Cavity - up Enhanced Plastic Ball Grid Array (EPBGA) Packages for Robust Design [C]. In: Pacific Rim/ASME International Intersociety Electronic and Photonic Packaging Conference, INTERPACK'97, New York: IEEE, 1997: 376 - 388.
- [12] Yin Y, Tu S T. Thermal Conductivities of PTFE Composites With Random Distributed Graphite Particles [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, 21(18): 1619 - 1627.
- [13] Tu S T, Cai W Z, Yin Y, et al. Numerical Simulation of Saturation Behavior of Physical Properties in Composites with Randomly Distributed Second - phase [J]. Journal of Composite Materials, 2005, 39(7): 617 - 631.
- [14] 张朝晖. ANSYS 热分析工程与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [15] 杨强生, 浦保荣. 高等传热学: 热传导和对流传热与传质[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
- [16] V. J. Ervin, J. W. Klett, C. M. Mundt. Estimation of the Thermal Conductivity of Composites [J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(14): 3545 - 3553.
- [17] R. Kochetov. Thermal and Electrical Properties of Nanocomposites, Including Material Processing, Ph. D. Degree Dissertation [D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2012.
- [18] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 北京高等教育出版社, 2006.
- [19] Z. Han, J. W. Wood, H. Herman, et al. Thermal Properties of Composites Filled with Different Fillers [C]. Conference Record of the IEEE International 2008: 497 - 501.
- [20] W. Evans, R. Prasher, J. Fish, et al. Effect of Aggregation and Interfacial Thermal Resistance on Thermal Conductivity of Nanocomposites and Colloidal Nanofluids [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 1431 - 1438.
- [21] I. A. Tsekmes, R. Kochetov, P. H. F. Morshuis, et al. Modeling the Thermal Conductivity of Polymeric Composites Based on Experimental Observations [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 412 - 423.

作者简介:

张蕾芳(1989), 硕士研究生、工程师, 主要从事电力设备高压及油化试验工作。

(收稿日期: 2019 - 01 - 28)