

事故容错燃料结构对导热性能影响的计算

张海青 卢林远 王 鹏 严 超 林 俊

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 事故容错热导率增强型核燃料的研究关注点主要在于制备工艺的优化和导热性能的改善,而微观结构的调控是改善导热性能的主要手段之一。目前国内外提出的事故容错燃料,主要是在基体颗粒中添加高热导率的颗粒以提高容错燃料的热导率。本文建立了事故容错燃料的三有限元模型,采用Ansys Workbench对不同容错燃料热导率进行数值模拟,计算分析了二氧化铀基体中添加氧化铍颗粒时,颗粒的形状、空间取向、排列方式、大小等对热导率的影响,获得了热导率随氧化铍颗粒形状、空间取向、排列方式、大小等变化的规律。

关键词 事故容错燃料, 热导率, 热流密度, 界面热阻

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.030602

Evaluation of influence of fault tolerant fuel structure on thermal conductivity

ZHANG Haiqing LU Linyuan WANG Peng YAN Chao LIN Jun

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract [Background] The research focus of accident tolerant enhanced thermal conductivity nuclear fuel mainly lies in the optimization of the preparation process and the improvement of the thermal conductivity whilst the control of microstructure is one of the main means to improve the thermal conductivity. So far the fault tolerant fuel in the world is mainly adding high thermal conductivity particles into the matrix particles to improve the thermal conductivity of fault tolerant fuel. [Purpose] This study aims to evaluate the influence of fault-tolerant fuel structure on thermal conductivity. [Methods] First of all, a three-dimensional finite element model of fault-tolerant fuel was established. Then, based on Ansys Workbench and this model, thermal conductivities of different fault-tolerant fuel were calculated by simulation. Effects of the shape and space of the beryllium oxide particles added to uranium dioxide matrix on thermal conductivity were analyzed. [Results & Conclusions] The variations of thermal conductivity with the shape, spatial orientation and allocation of beryllium oxide particles are obtained. It provides a reference for the selection of fault tolerant fuel.

Key words Fault tolerant fuel, Thermal conductivity, Heat flux, Interfacial thermal resistance

在核反应堆发展历程中,二氧化铀(UO_2)核燃料由于具有熔点高(3 138.15 K)、非裂变组合元素氧的热中子俘获截面低($<0.0002\text{ b}$)、在化学和结构方面具有较高的辐照稳定性,且制造费用较低等优

上海市自然科学基金面上项目——多孔石墨作为熔盐相变储热载体的协同传热储热机制研究(No.20ZR1468800)、甘肃省自然科学基金一般项目——高效相变储热元件的封装技术及应用研究(No.20JR5RE639)

第一作者: 张海青, 女, 1981年出生, 2011年于中国原子能科学研究院获博士学位, 研究领域为核燃料

通信作者: 林俊, E-mail: linjun@sinap.ac.cn

收稿日期: 2020-11-16, 修回日期: 2020-12-30

Supported by Natural Science Foundation of Shanghai, Study on Cooperative Heat Transfer and Heat Storage Mechanism of Graphite Foam as Phase Change Materials Carrier of Molten Salt (No.20ZR1468800), Natural Science Foundation of Gansu Province, Packaging Technology and Application of High Efficiency Phase Change Heat Storage Element (No.20JR5RE639)

First author: ZHANG Haiqing, female, born in 1981, graduated from China Institute of Atomic Energy with a doctoral degree in 2011, focusing on nuclear fuel

Corresponding author: LIN Jun, E-mail: linjun@sinap.ac.cn

Received date: 2020-11-16, revised date: 2020-12-30

势^[1],是轻水反应堆核电站广泛应用的核燃料。 UO_2 作为核燃料的显著缺点是导热性能较差($7.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 300 K)^[2],仅为金属铀的十几分之一,这就降低了燃料芯块到冷却剂间的能量输出效率。这意味着它的工作温度相当高,约 $2\,273.15 \text{ K}$ 。2011年日本福岛核电站事故揭露了 UO_2 核燃料低热导率引发的核安全隐患^[3]。在福岛核事故后,为提高核反应堆中燃料元件抵抗严重事故的能力,美国能源部发起了“研制和开发事故容错核燃料(Accident Tolerant Fuel, ATF)计划”^[3],这种燃料与标准的轻水反应堆 UO_2 燃料锆合金包壳相比,在保持或提高反应堆正常运行工况下燃料性能的同时,当堆芯主动冷却系统功能丧失后,维持冷却状态的时间更长,安全裕度更高。

中国在响应国家安全高效发展核电的政策下,也启动了相关的研发计划,旨在通过研发事故容错 UO_2 核燃料来推动新一代核燃料元件的开发与应用。此类燃料是通过在 UO_2 燃料基体中添加高热导率的物质,如氧化铍(BeO)^[4]、碳纳米管^[5]或碳化硅(SiC)纤维^[6]等,来提高其热导率,降低其工作温度。此类燃料体系的优势在于对工业制造体系的改动小、制造成本低。

目前,国内外关于事故容错热导率增强型 UO_2 核燃料的研究关注点主要在于制备工艺的优化和导热性能的改善。而微观结构的调控是改善导热性能的主要手段之一。Pan等^[7]研究了短纤维填充橡胶复合材料中相邻两根短纤维之间的相互作用对应力分布产生的影响;金泉等^[8]主要对颗粒和纤维混合填充橡胶材料进行了研究,得出了平行于加载方向的增强体受了很大的应力,随着纤维和加载方向之间夹角的增大应力减小;文献[9-10]研究表明,粒子间距是决定空间填料分布的一个重要参数,随着粒子间距离的增大,导热系数呈指数衰减;文献[11]研究了橡胶基体的填料粒子对复合材料热导率的影响。

实际上,复合材料的有效导热系数由许多因素决定,如颗粒的类型和形状、颗粒的排列方式、体积大小以及填料与基体之间的接触热阻。一般来说,用单纯的实验方法很难区分这些因素的影响。因此,模拟计算对于指导更好的热应用复合材料的设计和制造至关重要。本文将利用商用有限元软件Ansys Workbench,采用三维有限元分析的方法,通过模拟填充粒子的复合材料体积单元在特定温度边界条件下的温度、热流分布情况,分析在 UO_2 燃料中添加 BeO 纤维后,填料的几何形态、空间位置取向及填料空间堆积方式、颗粒大小等对热导率的影响。

为事故容错燃料制备工艺的优化和导热性能的改善提供理论依据。

1 模型建立

1.1 热传导方程

对于各向同性材料,不考虑热源的稳态热传导方程为^[12]:

$$k \nabla^2 T = 0 \quad (1)$$

式中: k 为热导率,又叫导热系数,热传导系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为温度, K 。热传导问题的边界条件有三种:

$$T = f(x, y, z) \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = f(x, y, z) \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_e) \quad (4)$$

式中: h 为热交换系数; T_e 为环境温度。式(2)表示边界的温度值已知;式(3)表示边界的外法向热流密度值已知;式(4)表示热交换边界条件。

1.2 热导率

未经辐照、致密的燃料颗粒热导率 k_0 为^[13]:

$$k_0 = \frac{1}{0.0375 + 2.165 \times 10^{-4} T} + \left(\frac{4.715 \times 10^9}{T^2} \right) \exp \left(\frac{16\,361}{T} \right) \quad (5)$$

综合考虑燃料、孔隙度和裂变产物的影响,辐照下的颗粒热导率为:

$$k = k_0 F_D F_P F_M F_R \quad (6)$$

$$F_D = \left(\frac{1.09}{B^{3.265}} + \frac{0.0643}{\sqrt{B}} \sqrt{T} \right) \times \arctan \left[\left(\frac{1.09}{\frac{1.09}{B^{3.265}} + \frac{0.0643}{\sqrt{B}} \sqrt{T}} \right)^{-1} \right] \quad (7)$$

$$F_P = 1 + \left(\frac{0.019B}{3 - 0.019B} \right) \times \left[\frac{1}{1 + \exp(12 - 0.01T)} \right] \quad (8)$$

$$F_M = \frac{1 - P}{1 + (s - 1)P} \quad (9)$$

$$F_R = 1 - \frac{0.2}{1 + \exp(0.0125T - 11.25)} \quad (10)$$

式中: F_D 和 F_P 分别为溶解和沉淀的裂变产物的影响因子; F_M 为孔隙度影响因子; F_R 为辐照效应影响因子; B 为燃料(已裂变原子数与总可裂变原子数的比

值),%; P 为孔隙度,%; s 为孔的形状因子。

燃料颗粒和基体的热导率^[14]为:

$$k = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2}T - 1.45 \times 10^{-5}T^2 + 7.67 \times 10^{-9}T^3 \quad (11)$$

1.3 有限元模型

UO₂颗粒在基体中的分布,可以近似为均匀分布,有限元模型可以将均匀分布设置成周期性分布的模型,即只需选取一个代表性体积单元来研究。根据均匀化理论,选取等效体积单元(Representative Volume Element, RVE)^[6],进而得到复合材料的均匀化参数。本文采用的是 Ansys Workbench 稳态热分析模块,对于颗粒填充体系进行导热模拟研究。为提高其模拟的精确度选择 3D 模型最佳。本文基体材料均为 UO₂,填料粒子均为 BeO 的复合材料,其中 UO₂和 BeO 的热导率见文献[15]单胞上下面各施加不同的温度载荷,四周绝热。

因为模型中含有曲率的曲面,所以网格划分的总体尺寸控制采用曲率尺寸函数 Curvature,并且经过检测网格质量在 Element Quality 规则下处在好水平范围内。

用 Ansys 对上述稳态传热问题进行求解后,可读出热流密度和热传导方向上模型两端的温度,从而计算出模型的热导率;

根据傅里叶稳态热传导规律,通过模型的热流密度 q 为^[11]:

$$q = k_{\text{eff}} \Delta T / \Delta z \quad (12)$$

式中: k_{eff} 为模型的等效热导率; Δz 为单元体边长; ΔT 为热传导方向上的温差。因而模型的热导率 k_{eff} 为:

$$k_{\text{eff}} = q \Delta z / \Delta T \quad (13)$$

因为多数燃料在制作过程中填料颗粒是近似均匀的随机排列在基体中的,为了验证周期排列的适用性,结合 MATLAB 软件,编程生成随机小球,将包含随机小球的几何图形导入 Ansys Workbench 中,施加和周期排列情况相同的边界条件,运用同样的热导率算法,计算了随机排列小球的热导率,取多次随机模型的平均值,并和周期排列结果做了比较。

2 结果与讨论

2.1 填料的几何形状对事故容错燃料热导率的影响

为了研究 BeO 填料几何形状对事故容错燃料导热性能的影响,本文分别选取了球体、正方体、不同长径比的圆柱体,以及与圆柱体长度相等、两端面

为正方形的长方体作为填料分别分布在尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的基体中,并且根据填料在 UO₂基体中的体积分数为 5% 分别算出球状填料的半径、正方体的边长及不同长径比圆柱体的直径和长度,再利用 Ansys Workbench 软件模拟稳态传热过程。初始条件:顶面和底面施加相应的温度,单元体四周绝热。参考中国科学院上海应用物理研究所熔盐堆运行温度大概是 924.15 K,计算了该温度时材料的热导率。

表 1 给出了 BeO 颗粒占 UO₂基体中的体积分数为 5% 时,事故容错燃料在常温 300 K 时热导率随填料形状的变化,其中 $D:L$ 为圆柱体直径与长度的比。从表 1 可以看出,填料的形状对热导率有显著影响。其中圆柱体填料长径比不同时,热导率也不同。圆柱体 1 直径为 $100 \mu\text{m}$,和基体单元边长相同,圆柱体 2~8,圆柱体直径逐渐减小,长度逐渐增加,到圆柱体 9,直径最小,长度最大,为 $100 \mu\text{m}$ 。在这个过程中,热导率先下降后增加,与文献[11]结论稍有不同,是文献[8]的补充。圆柱体 1 和圆柱体 9 两种极限情况,热导率都比球体、正方体及与圆柱体长度相等的长方体要大,所以事故容错燃料的 BeO 填料颗粒,建议选用直径和长度比大于等于 3 或者接近 1/3.96 的圆柱体。

2.2 圆柱体 BeO 填料纤维的空间取向和热导率的关系

为了验证圆柱体 BeO 填料纤维的空间取向和热导率的关系,分别计算了 §2.1 中圆柱体 1、3、4、5、6、9 在温度为 300 K、BeO 填料颗粒旋转 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 80° 、 90° (以圆柱轴的方向垂直于温度加载方向为旋转起始点,旋转到平行于温度加载方向时,为旋转 90°) 时的热导率,结果见图 1。

由图 1 可以看出,当圆柱体直径与长度的比为 1.5:1 时,旋转角度几乎不影响(如图 1 中圆柱 4),但对于直径与长度的比值大于 1.5:1 的圆柱体(圆柱体 1、3),起始点热导率最高,随着旋转角度的变大,热导率逐渐减小,当轴向与温度加载方向(z 轴)一致时,热导率最低。而对于直径与长度的比值小于 1.5:1 的圆柱体(圆柱体 5、6、9),情况恰好相反:随着旋转角度的增大,热导率逐渐变大,当轴向与温度加载方向(z 轴)一致时,热导率最大,导热性能最好。

综合表 1 和图 1 可以看出,当圆柱体轴长和基体单元边长相等时,及 $D:L=1:3.96$,并且轴的方向和温度加载方向一致时(图 2(d)),热导率最大。

目前工业生产的纤维填料在基体中往往是随机取向的,由模拟值发现纤维取向对体系的导热性能影响显著。因此为了追求良好的导热性能,制造过

表1 300 K时ATF的热导率随填料颗粒形状的变化
Table 1 The thermal conductivity of the ATF with different shape of packing at 300 K

	圆柱体 $D:L$ Cylinder $D:L$	热导率 Thermal conductivity / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
球体 Ball	—	9.019 8
正方体 Square	—	8.701 8
圆柱体1/长方体1 Cylinder 1/ Cuboid 1	15.71:1	20.495/ 13.965
圆柱体2/长方体2 Cylinder 2/ Cuboid 2	3:1	9.708 4/ 9.299 9
圆柱体3/长方体3 Cylinder 3/ Cuboid 3	2:1	8.874 9/ 9.051 3
圆柱体4/长方体4 Cylinder 4/ Cuboid 4	1.5:1	8.827 1/8.825 6
圆柱体5/长方体5 Cylinder 5/ Cuboid 5	1:1	8.614 6/ 8.807 1
圆柱体6/长方体6 Cylinder 6/ Cuboid 6	1:2	8.496 3/ 8.530 1
圆柱体7/长方体7 Cylinder 7/ Cuboid 7	1:3	8.466 3/ 8.581 8
圆柱体8/长方体8 Cylinder 8/ Cuboid 8	1:3.67	8.529 5/ 8.490 5
圆柱体9/长方体9 Cylinder 9/ Cuboid 9	1:3.96	9.026 6/ 8.997 3

程中就应该使纤维的直径小于长度,并且轴向取向与热流传导方向一致或者夹角尽量小。

2.3 球体 BeO 填料颗粒的排列方式和体积大小对热导率的影响

2.3.1 BeO 填料颗粒的排列方式对热导率的影响

我们分别采用了 MATLAB、COMSOL 软件和 Ansys Workbench 相结合的随机排列方式和单独使用 Ansys Workbench 的规则排列方式,随机排列方式的边长为 $50\text{ }\mu\text{m}$,包覆颗粒体积占比为 4.8%,共有 30 个球,半径为 $3.63\text{ }\mu\text{m}$,见图 2(a);规则排列的方法是:1)确定一个基本的栅元;2)用该栅元按照一定的

方式填充给定的体积。常用到的基本几何栅元可以是简单立方体栅元(Simple Cubic lattice, SC)、体立方体栅元(Body Centred Cubic lattice, BCC)、面立方体栅元(Face Centred Cubic lattice, FCC)(表 2)。本文选取的基本栅元中球的半径和随机排列模型的相同,为 $3.63\text{ }\mu\text{m}$,包覆颗粒体积占比为 4.8%。三种填充方式的有限元模型见图 2(b~d)。图 3 给出不同堆积方式下的热导率值随温度的变化。

由图 3 可见,填充体积份额相同时,在常温 $300\sim 1\text{ }100\text{ K}$ 的范围内,无论是随机排列,还是三种周期排列,等效热导率的值都非常接近。因此,排列方式对等效热导率的影响可以忽略。

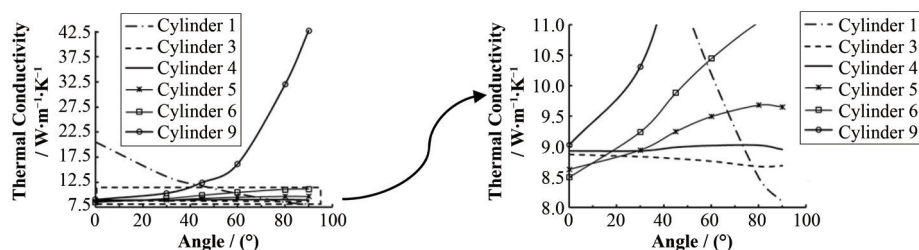
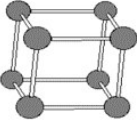
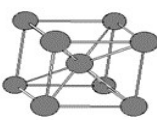
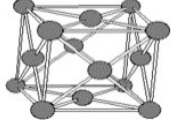


图1 热导率随圆柱体 BeO 填料颗粒旋转角度的变化(右边为左边方框处的放大图)

Fig.1 Changes of thermal conductivity with the rotation angle of cylindrical BeO packing particles (the picture on the right is an enlarged one of which on the left)

表2 基本栅元的特性和栅元内球数
Table 2 Characteristics of basic lattice and number of balls

栅元类型 Lattice type	SC	BCC	FCC
示意图 Sketch map			
最大体积填充率 Maximum volume filling rate	≈52%	≈68%	≈74%
基本栅元内球数 Number of balls in the basic lattice	$Z=1$	$Z=2$	$Z=4$

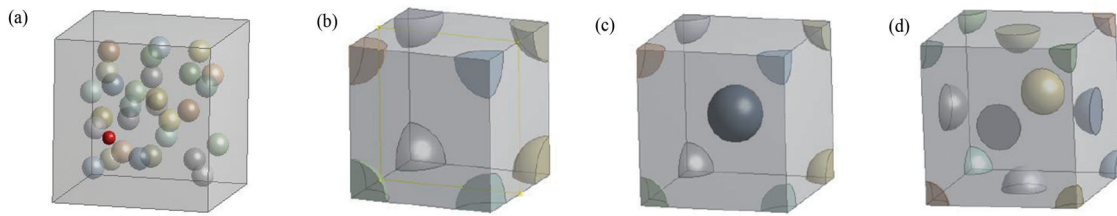


图2 三种填充方式的有限元模型 (a) 随机排列, (b) SC 排列, (c) BCC 排列, (d) FCC 排列

Fig.2 Three different filling formats of finite element model

(a) Random Arrangement, (b) SC Arrangement, (c) BCC Arrangement, (d) FCC Arrangement

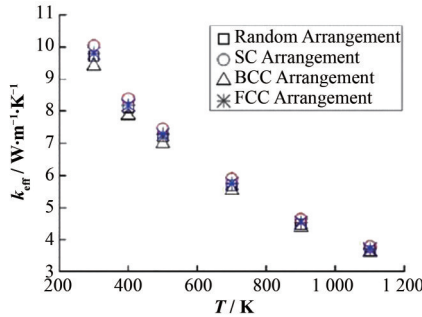


图3 300~1100 K 下填料堆积方式对事故容错燃料热导率的影响

Fig.3 Influence of packing stacking mode on thermal conductivity of ATF (for 300~1100 K)

2.3.2 BeO 填料颗粒的大小对热导率的影响

为了研究 BeO 填料颗粒的体积大小对热导率的影响,必须考虑接触热阻和界面热阻的影响。

接触热阻是由于接触表面的粗糙度,使有效接触面积小于表面重叠面积。对于尺寸为几微米的颗粒,接触颗粒-颗粒表面的表面粗糙度无关紧要,对于颗粒-基体接触,我们可以假设聚合物基体与颗粒完全接触。因此,接触热阻很小,可以忽略不计。另一方面,界面热阻是由于粒子和基体的性质不匹配造成的。粒子和基体由不同的材料制成,具有不同的密度、德拜温度、频率和声速,在它们之间的边界处为声子流动提供阻力。由于我们在基体中有数千个粒子,这种阻力对声子的流动非常重要,从而降低了复合材料的有效导热系数。

如果粒子比较大,界面热阻的影响可以忽略。有时实际上需要在基体中加入更小的粒子,因为当颗粒越小,界面越致密,界面热阻越大。因此,对于固定的界面热阻,有一个临界直径,用 d_0 表示。当颗粒直径大于 d_0 时,颗粒能提高复合材料的导热系数,反之则会降低复合材料的导热系数。所以,需要对颗粒填充复合材料界面热阻的影响进行分析。

界面热阻 R_{if} , 又叫 Kapitza 热阻, 计算方程如下^[16]:

$$\frac{1}{R_{if}} = \frac{1}{2} C_m \frac{\rho_m^2 g_m^4 \rho_p}{g_p (\rho_m g_m + \rho_p g_p)^2} \quad (14)$$

式中: ρ 为材料密度; g 为声子速度; 下标 p 和 m 分别代表颗粒与基体; C_m 为基体等压热容。

本文分别计算了低体积分数的 BeO 填料颗粒体积分分数分别为 5% 的 SC、FCC 模型) 和高体积分数的 BeO 填料颗粒体积分分数为 52% 的 SC 模型和 74% FCC 模型) 的球形 BeO 填料颗粒复合材料, 结果如图 4 所示, 有效热导率 k_{eff} 首先随着 R 而显著增加, 然后达到饱和, 达到饱和的点随 BeO 填料颗粒体积分数而增大, 即对于颗粒体积分数为 5% 的复合材料来说, 当颗粒直径为 100 μm 时, 达到饱和, 再增大直径, 热导率将保持不变。对于 BeO 填料颗粒体积分数为 52% 的模型, 达到饱和的点为 300 μm , 对于 BeO 填料颗粒体积分数为 74% 的模型, 达到饱和的点为 1000 μm 。图 4 中黑色直线为基体 UO_2 的热导率, 与其他 4 条线的交点分别为 51 nm、51 nm、50.3 nm、50.3 nm, 即 BeO 填料颗粒体积分分数分别为 5% 的 SC、FCC 模型, d_0 值均为 51 nm; 体积分数为 52% 的 SC 模型和 74% FCC 模型, d_0 值均为 50.3 nm, 两组数值的偏差为 1.4%, 由此可知 BeO 填料颗粒体积分数对 d_0 值的影响可以忽略不计。当颗粒直径小于临界点 d_0 值时, 复合材料的 k_{eff} 低于基体热导率, 在 d_0 到饱和点的范围内, 随着球半径的增加, k_{eff} 显著增加, 当球半径大于饱和点后, k_{eff} 不再增加。

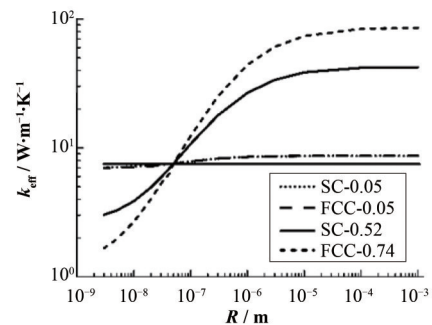


图4 复合材料热导率随球形填充颗粒半径的变化

Fig.4 The effective thermal conductivity of composites as a function of the radius of spherical filling particles

2.3.3 与理论值的比较

关于颗粒复合材料的等效热导率的公式, 前人做了大量的工作, Verma^[17]、Maxwell^[18]、Babanov^[19]、

Brailsford^[20]、Singh^[21]等给出的结果分别如下,其中 ϑ 为颗粒的体积百分比含量:

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_2 \left\{ k_1 + \exp \left[- \left(k_2 / k_1 \right)^{1/3} \right] (1 - \vartheta) (k_2 - k_1) \right\}}{k_1 - \left\{ 1 - \exp \left[- \left(k_2 / k_1 \right)^{1/3} \right] (1 - \vartheta) (k_2 - k_1) \right\}} \quad (15)$$

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_2 [2k_2 + k_1 - 2\vartheta(k_2 - k_1)]}{2k_2 + k_1 + \vartheta(k_2 - k_1)} \quad (16)$$

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_2 [k_2 + \vartheta^{2/3}(k_1 - k_2)]}{k_2 + \vartheta^{2/3}(k_1 - k_2)(1 - \vartheta^{1/3})} \quad (17)$$

$$k_{\text{eff}} = \frac{1}{4} \left\{ (2 - 3\vartheta)k_2 + (3\vartheta - 1)k_1 + \sqrt{8k_1k_2 + [(2 - 3\vartheta)k_2 + (3\vartheta - 1)k_1]^2} \right\} \quad (18)$$

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_2 [k_2 + 0.806\vartheta^{2/3}(k_1 - k_2)]}{k_2 + 0.806\vartheta^{2/3}(k_1 - k_2)(1 - 1.204\vartheta^{1/3})} \quad (19)$$

通过式(15)~(19)计算不同颗粒体积含量和导热率情况下的等效导热率的理论值,并和有限元的计算值进行比较。图5为颗粒体积含量不同时,等效导热率的理论值和计算值的结果对比。从图5可以看出,当颗粒体积含量较小时,各理论值和计算值的差值相对较小,随着体积份额的增大,5个理论公式值之间的差距越来越大,其中Babanov、Singh与计算值的偏差都在20%以上,Brailsford在 $\vartheta > 20\%$ 以后,偏差也大于20%。Verma、Maxwell在 $\vartheta \leq 45\%$ 时和计算值比较接近,但是大于45%时这两个公式也不适用了。结果表明:高填充体积分数BeO的有效导热系数对填充量的变化非常敏感。即使是少量的额外填料,导热率的提高也是显著的。为了得到更适合颗粒体积含量较大时的公式,对本工作的有限元法(Finite Element Method, FEM)计算结果进行了拟合,得到了 UO_2 基、BeO为填料颗粒的复合材料的等效导热率公式如下:

$$k_{\text{eff}} = 4.9569 \times 10^{-11} \exp(\vartheta/0.01941) + 10.19318 \exp(\vartheta/0.39753) - 0.16496 \quad (20)$$

3 结语

本文在借鉴了国内外对事故容错燃料的设计和导热性能研究的基础上,针对不同的结构设计方案进行了分析比较。具体得出以下几个方面的结论:

1)事故容错燃料的BeO填料颗粒,建议选用直径和长度的比大于等于3或者接近1/3.96的圆柱体。

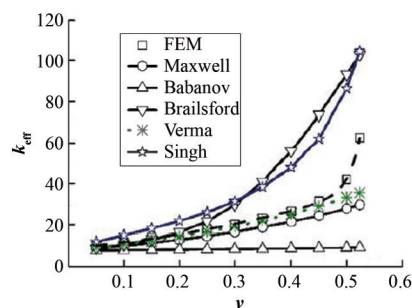


图5 半径相同时等效导热率与体积分数的关系
Fig.5 Relationship between equivalent thermal conductivity and volume fraction with the same radius

2)当圆柱体BeO填料颗粒 $D:L=1.5$ 时,方向对导热率几乎无影响;当 $D:L$ 大于1.5时,轴的方向与温度加载方向夹角越大,导热率越高,当垂直于温度加载方向时,导热率最大;当 $D:L$ 小于1.5时,轴的方向与温度加载方向夹角越小,导热率越高,当平行于温度加载方向时,导热率最大。

3)有效导热率 k_{eff} 首先随着颗粒直径 R 而显著增加,然后达到饱和。当颗粒直径小于临界点 d_0 值时,复合材料的热导率低于基体热导率;在 d_0 到饱和点的范围内,随着球半径的增加,热导率显著增加;当到达饱和点后,随着BeO填料颗粒半径的增加,复合材料热导率将保持不变。

4)Verma、Maxwell给出的经验公式在 $\vartheta \leq 45\%$ 时和计算值比较接近,但是大于45%时这两个公式也不适用了。本文给出了 UO_2 基、BeO为填料颗粒的复合材料在 ϑ 大于45%时依然适用的等效导热率公式。

参考文献

- 1 李冠兴, 武胜. 核燃料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. LI Guanxing, WU Sheng. Nuclear fuel[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- 2 Fink J K. Thermophysical properties of uranium dioxide[J]. Journal of Nuclear Materials, 2000, 279(1): 1 - 18. DOI: 10.1016/S0022-3115(99)00273-1.
- 3 Zinkle S J, Terrani K A, Gehin J C, et al. Accident tolerant fuels for LWRs: a perspective[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 448(1 - 3): 374 - 379. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.12.005.
- 4 Ishimoto S, Hirai M, Ito K, et al. Thermal conductivity of UO_2 -BeO pellet[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1996, 33(2): 134 - 140. DOI: 10.1080/18811248.1996.9731875.
- 5 Nan C W, Shi Z, Lin Y. A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites[J]. Chemical Physics Letters, 2003, 375(5 - 6): 666 - 669.

- DOI: 10.1016/s0009-2614(03)00956-4.
- 6 Solomon A, Revankar S, McCoy J K. Enhanced thermal conductivity oxide fuels[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2005. DOI: 10.2172/862369.
 - 7 Pan Y, Iorga L, Pelegri A A. Analysis of 3D random chopped fiber reinforced composites using FEM and random sequential adsorption[J]. Computational Materials Science, 2008, **43**(3): 450 - 461. DOI: 10.1016/j.commatsci.2007.12.016.
 - 8 金泉, 覃继宁, 张荻, 等. 颗粒和纤维混杂增强复合材料力学性能的三维有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2006, **23**(2): 14 - 20. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3851.2006.02.003. JIN Quan, QIN Jining, ZHANG Di, *et al.* 3D FEM simulation of mechanical property of composites reinforced by both particles and fibers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, **23**(2): 14 - 20. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3851.2006.02.003.
 - 9 刘加奇, 卢咏来, 杨海波, 等. 粒子空间分布与复合材料导热性能关系的模拟研究[J]. 复合材料学报, 2011, **28**(5): 12 - 19. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00242. LIU Jiaqi, LU Yonglai, YANG Haibo, *et al.* Numerical investigation of the effect of particle spatial distribution on the thermal conductivity of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, **28**(5): 12 - 19. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00242.
 - 10 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[J]. 复合材料学报, 2009, **26**(1): 36 - 42. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3851.2009.01.007. LIU Jiaqi, ZHANG Liqun, YANG Haibo, *et al.* Numerical investigation of the thermal property of particle filled polymer matrix composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, **26**(1): 36 - 42. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3851.2009.01.007.
 - 11 徐瑾, 何燕, 张晓光. 填料粒子对复合材料导热性能影响的数值模拟[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2015, **36**(4): 418 - 422. DOI: 10.16351/j.1672-6987.2015.04.013. XU Jin, HE Yan, ZHANG Xiaoguang. Numerical simulation of influence of filler particles on thermal conductivity of thermal conductivity of composites[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, **36**(4): 418 - 422. DOI: 10.16351/j.1672-6987.2015.04.013.
 - 12 姜馨, 丁淑蓉, 霍永忠. 弥散型燃料元件等效热传导系数的有限元模拟[J]. 核动力工程, 2010, **31**(3): 45 - 49. DOI: 10.1016/S1876-3804(11)60004-9. JIANG Xin, DING Shurong, HUO Yongzhong. Finite element simulation for effective thermal conductivity coefficient of dispersion fuel element[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, **31**(3): 45 - 49. DOI: 10.1016/S1876-3804(11)60004-9.
 - 13 Lucuta P G, Matzke H, Hastings I J. A pragmatic approach to modelling thermal conductivity of irradiated UO₂ fuel: review and recommendations[J]. Journal of Nuclear Materials, 1996, **232**(2 - 3): 166 - 180. DOI: 10.1016/s0022-3115(96)00404-7.
 - 14 Babanov A A. Method of calculation of thermal conduction coefficient of capillary porous material[J]. Soviet Physics Technical Physics, 1957, **2**: 476 - 484.
 - 15 Latta R, Revankar S T, Solomon A A. Modeling and measurement of thermal properties of ceramic composite fuel for light water reactors[J]. Heat Transfer Engineering, 2008, **29**(4): 357 - 365. DOI: 10.1080/01457630701825390.
 - 16 严彪杰. 基于有限元模拟和机器学习的 UO₂-SiC/UO₂-Mo 复合燃料热导率优化研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2020. YAN Biaojie. Optimization research of thermal conductivity of UO₂-SiC/UO₂-Mo composite fuel based on finite element simulation and machine learning[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2020.
 - 17 Verma L S, Shrotriya A K, Singh R, *et al.* Thermal conduction in two-phase materials with spherical and non-spherical inclusions[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1991, **24**(10): 1729 - 1737. DOI: 10.1088/0022-3727/24/10/006.
 - 18 Maxwell J C. A treatise on electricity and magnetism [M]. Oxford: Clarendon Press, 1873. DOI: 10.1088/0022-3727/24/10/006.
 - 19 Babanov A A. Method of calculation of thermal conduction coefficient of capillary porous material[J]. Soviet Physics Technical Physics, 1957, **2**: 476 - 484. DOI: 10.1088/0022-3727/24/10/006.
 - 20 Brailsford A D, Major K G. The thermal conductivity of aggregates of several phases, including porous materials [J]. British Journal of Applied Physics, 1964, **15**(3): 313 - 319. DOI: 10.1088/0508-3443/15/3/311.
 - 21 Singh K J, Singh R, Chaudhary D R. Heat conduction and a porosity correction term for spherical and cubic particles in a simple cubic packing[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, **31**(14): 1681 - 1687. DOI: 10.1088/0022-3727/31/14/011.