

基于有限元方法的惰性基弥散燃料传热性能研究

卢志威 张永栋 李 雷 刘 彤 薛佳祥

(中广核研究院有限公司 事故容错燃料研发项目部 深圳 518026)

摘要 惰性基弥散燃料芯块(Inert Matrix Dispersion Pellet, IMDP)以高温气冷堆燃料技术为基础,采用惰性材料作为三重各向同性型(Tristructural Isotropic, TRISO)燃料颗粒的弥散基体,相比传统的 UO_2 燃料,其最典型特征是具备高热导率。采用通用有限元软件 ABAQUS,结合其二次开发功能,建立有限元计算模型,研究了温度、燃耗以及燃料颗粒与惰性基体间热阻对 IMDP 燃料有效热导率影响规律,并与 UO_2 陶瓷燃料进行对比。结果表明:IMDP 有效热导率随燃耗及温度的增加而减小,且在不同寿期及不同温度下,IMDP 有效热导率均明显高于 UO_2 热导率;反应堆正常运行工况下,相比 UO_2 芯块,IMDP 较高的热导率会使芯块中心温度显著降低;此外,燃料颗粒与惰性基体间热阻在 $0\sim 4\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 范围内对 IMDP 的有效热导率影响程度最为敏感。

关键词 事故容错, 惰性基, 核燃料, 传热

中图分类号 TL33

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.090604

Heat transfer performance of inert matrix dispersion pellet based on finite element analysis

LU Zhiwei ZHANG Yongdong LI Lei LIU Tong XUE Jiaxiang

(Nuclear Fuel Research and Development Center, Department of ATF R&D, Shenzhen 518026, China)

Abstract [Background] Inert matrix dispersion pellet (IMDP), based on the fuel technology of high temperature gas cooled reactor, a type of accident tolerant fuel, takes inert material as matrix, has high thermal conductivity compared to UO_2 . [Purpose] In this study, effect of temperature, burnup, thermal barrier between tristructural isotropic (TRISO) and matrix on the effective thermal conductivity (ETC) of the IMDP is studied by finite element analysis (FEA) method. [Methods] A FEA model is developed by ABAQUS combined its secondary development function. [Results] The ETC of IMDP decreases as temperature and burnup increases. Under normal operation condition, the centerline temperature of IMDP is 400°C or more lower than UO_2 . When the thermal barrier between TRISO and matrix increases from 0 to $4\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$, the ETC of IMDP decreases approximately 16% and 19% respectively at beginning of life (BOL) and middle of life (MOL). [Conclusions] IMDP has superior heat transfer performance than UO_2 . Thermal barrier between TRISO and matrix has more significant impact on BOL IMDP than MOL IMDP. Thermal barrier between 0 to $4\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ has more significant impact on ETC of IMDP than other values.

Key words Accident tolerant, Inert matrix, Nuclear fuel, Heat transfer

2011 年日本福岛发生的地震及海啸最终致使日本福岛核电站发生严重事故,进而导致大规模放

射性物质释放,该事故的发生说明轻水堆的安全性还需继续提升。因此,增强核燃料的事故容错能力

国家重大专项(No.2015ZX06004-001)资助

第一作者: 卢志威,男,1985 年出生,2011 年于西安交通大学获硕士学位,研究领域为核燃料设计

通信作者: 刘彤, E-mail: liutong@cgnpc.com.cn

收稿日期: 2017-10-26, 修回日期: 2018-05-16

Supported by National Major Special Projects (No.2015ZX06004-001)

First author: LU Zhiwei, male, born in 1985, graduated from Xi'an Jiao Tong University with a master's degree in 2011, focusing on nuclear fuel design

Corresponding author: LIU Tong, E-mail: liutong@cgnpc.com.cn

Received date: 2017-10-26, revised date: 2018-05-16

进而提高核电站的安全裕量成为核工业界的焦点。目前, 能够抵御反应堆事故工况的事故容错燃料 (Accident Tolerant Fuel, ATF) 已成为后福岛时代国际燃料界一个新的研究方向。ATF 可通过降低燃料运行温度、减小氢气产生速率以及强化裂变产物包容能力等方面来提高抗事故性能^[1]。

惰性基弥散燃料芯块 (Inert Matrix Dispersion Pellet, IMDP) 作为事故容错燃料的备选技术路线之一, 相比传统的 UO_2 陶瓷燃料, 其最典型的特征是具备高热导率, 因此可以大幅降低运行状态下的燃料热储能。IMDP 燃料的详细结构如图 1 所示, 将含有裂变材料核心的三重各向同性型 (Tristructural Isotropic, TRISO) 燃料颗粒弥散于惰性基体中, 然后压实并烧结成柱状芯块, 最后封装于金属或陶瓷包壳中。IMDP 芯块因为基体的高热导率而使得芯块整体具有较高的热导率, 从而可显著降低芯块运行温度; 此外, 因为使用了 TRISO 技术, 所以裂变产物包容能力相比 UO_2 芯块有大幅度提升; 因此, IMPD 芯块是目前各核电发达国家在 ATF 芯块方面的主攻方向之一。

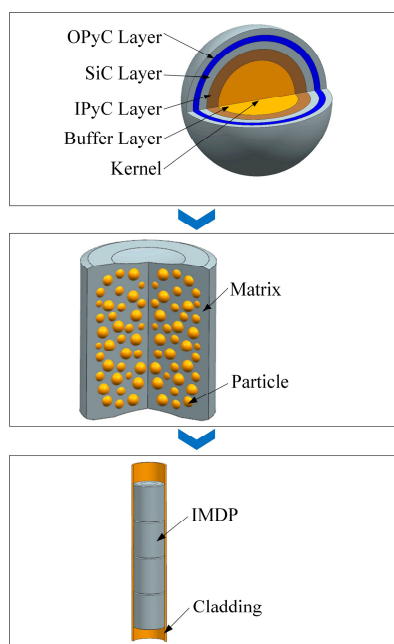


图 1 IMPD 燃料概念
Fig.1 Concept of IMPD

采用适当的热导率等效处理方法, IMPD 芯块的安全性已经过相关学者大量论证。Lee 等^[2-3]采用双温度均匀化传热模型研究了 IMPD 芯块在稳态及瞬态工况下的热学性能; Wu 等^[4]采用 IMPD 热导率近似于基体的方法研究了其在严重事故工况下相比 UO_2 燃料具有优异的性能。此外, Lee 等^[5]采用试验的方法研究制备工艺、燃料颗粒封装比等参数对

IMDP 热导率的影响规律, 并与 Maxwell 经验公式进行了对比; 此外, Kou^[6]采用数值方法对简单立方排列的两项复合材料的有效热导率进行了研究。

本文将采用通用有限元软件 ABAQUS, 结合其二次开发功能, 基于目前已经完成的 IMPD 芯块结构方案尺寸, 建立 IMPD 芯块的精细化多组分有限元分析模型, 详细研究温度、燃耗以及燃料颗粒与惰性基体间热阻对 IMPD 燃料有效热导率 (Effective Thermal Conductivity, ETC) 影响规律, 并与传统 UO_2 陶瓷燃料进行温度分布对比。

1 计算模型

1.1 程序架构

精细化有限元模型的开发程序架构如图 2 所示。因模型几何重复性较强, 故使用脚本语言进行自动建模。采用三维几何建模软件建立 IMPD 芯块等部件几何体, 然后采用 ABAQUS 专用脚本语言 Python 编制脚本将几何体转换为 ABAQUS CAE 部件; 采用 MATLAB 编程生成燃料颗粒的不同类型的分布坐标, 包括随机坐标及规律坐标, 用以研究燃料颗粒分布形式的影响规律; 然后分别采用 Python 脚本基于分布坐标通过 ABAQUS CAE 生成计算组件; 设置适当的材料属性、边界条件、接触属性及网格划分参数后, 通过 ABAQUS Standard 求解; 最后再次采用 Python 脚本求解得到有效热导率。

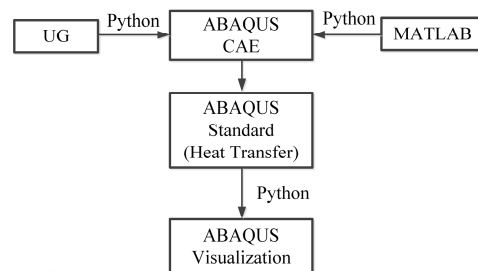


图 2 程序架构
Fig.2 Program architecture

1.2 计算模型

本次计算的几何模型如图 3 所示。在保证计算结果合理的前提下, 为减小计算规模, 结合研究目的, 忽略芯块上下端面的倒角以及碟形, 取直径为 8.192 mm 且高度为 12 mm 的柱状 IMPD 芯块为分析区域。

为减小边界条件影响, 准确提取 IMPD 芯块上、下表面温度进行有效热导率计算, 分别在 IMPD 芯块的上方和下方建立导热连接块。

计算模型下方设置热流边界条件，上方设置温度边界条件，导热连接块与 IMDP 芯块之间通过绑定约束进行连接，其他边界设置为绝热边界。

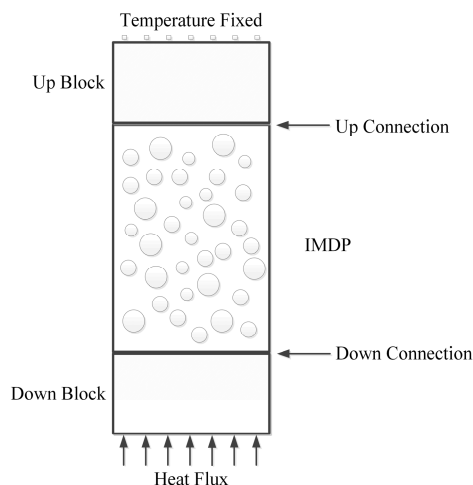


图3 计算模型
Fig.3 Calculation model

1.3 计算方法

根据傅里叶定律，IMDP 芯块的有效热导率可由式(1)进行计算：

$$k_e = \frac{Lq}{(T_1 - T_2)S} \quad (1)$$

式中： k_e 为有效热导率； L 为 IMDP 芯块高度； q 为 IMDP 芯块下表面的热流； T_1 为 IMDP 芯块下表面温度； T_2 为 IMDP 芯块上表面温度； S 为 IMDP 芯块横截面积。

2 模型验证

将基于经典的复合材料有效热导率经验公式对有限元计算模型的准确性进行验证。

2.1 经验模型

目前，有多个计算两项复合材料有效热导率的经验模型，其中最为经典的是 Maxwell 公式^[7]，Maxwell 模型的基本假设是第二项颗粒之间必须足够远，防止第二项颗粒附近温度场之间发生干涉^[8]，从而导致 Maxwell 模型只能用于较小的第二项体积百分比模型的有效热导率预测。

作为 Maxwell 模型的改进型，Chiew & Glandt 模型考虑了第二项颗粒间的干涉效应，故可以很准确地预测第二项颗粒体积百分比在 0.15%~0.85% 之间的复合材料有效热导率，如式(2)所示^[9]：

$$\frac{k_e}{k_m} = \frac{1 + 2\beta\phi + (2\beta^3 - 0.1\beta)\phi^2 + \phi^3 0.05 \exp(4.5\beta)}{1 - \beta\phi} \quad (2)$$

式(2)中， β 由式(3)计算得出：

$$\beta = \frac{k_p / k_m - 1}{k_p / k_m + 2} \quad (3)$$

本文将采用 Chiew & Glandt 模型对有限元计算模型的准确性进行验证。

2.2 数据验证

如图 4 所示，本文首先建立燃料颗粒规则分布的 IMDP 芯块模型来验证计算模型的准确性；然后采用更接近实际 IMDP 芯块结构的燃料颗粒随机均匀分布形式，燃料颗粒坐标由 MATLAB 中的 Rand 函数产生；通过以上两种燃料颗粒分布形式的验证，可同时评估燃料颗粒的分布形式对 IMDP 芯块有效热导率的影响规律。

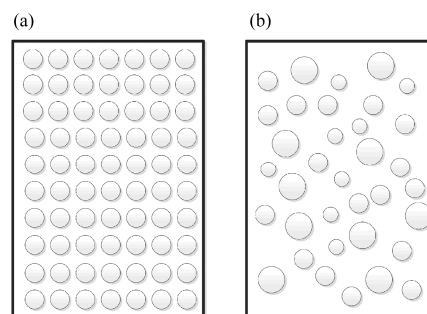


图4 燃料颗粒分布形式 (a) 规则分布, (b) 随机均匀分布
Fig.4 Fuel particle distribution form
(a) Regular distribution, (b) Random uniform distribution

因为燃料颗粒自身结构存在 5 种组分，而 § 2.1 所述的经验模型全部用于两项复合材料，为使经验公式能够应用于有限元模型，需对燃料颗粒进行简化。

参考 Stainsby 等^[10]的研究结果，将燃料颗粒等效为均匀材料，并采用燃料颗粒的有效热导率 $4.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，对应的燃料颗粒参数如表 1 所示。

表 1 燃料颗粒结构尺寸及材料物性
Table 1 Structure and material of fuel particle

材料 Material	热导率 Thermal conductivity / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	外径 Outer diameter / mm
基体 Matrix	30	—
燃料核心 Kernel	3.7	0.50
缓冲层 Buffer	0.5	0.69
IPy 层 IPy layer	4.0	0.77
SiC 层 SiC layer	16	0.84
OPy 层 OPy layer	4.0	0.92

验证结果如图 5 所示, 从图 5 可以看出, 对于规则分布形式, 计算结果与经验模型结果吻合很好, 有限元计算结果稍大, 最大误差为 0.68%; 对于更接近实际 IMDP 芯块结构的随机均匀分布形式, 其结算结果与经验模型结果吻合也很好, 只是在燃料颗粒体积比 18% 时有 0.78% 最大误差, 在其他燃料颗粒体积比时的最大误差也仅为 0.45%。

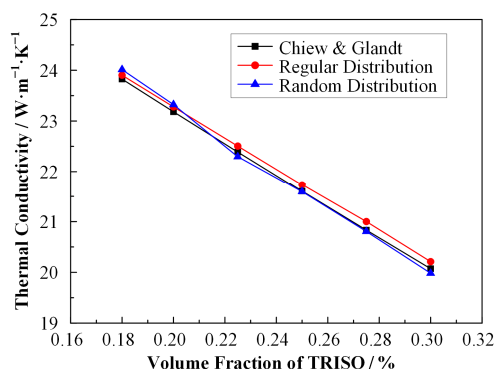


图 5 数据验证结果
Fig.5 Verification results

从以上分析可以得出, 已建立的有限元计算模型可以准确地预测两项简化 IMDP 芯块的有效热导率; 在以上验证的基础上, 建立完整燃料颗粒几何模型, 结构及材料物性采用表 1 中的值, 经计算, 在燃料颗粒体积比为 25% 且随机均匀分布情况下, 其有效热导率经计算为 $21.600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 而采用两项简化 IMDP 芯块模型的计算结果为 $21.593 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 两者几乎一致。综上所述, 说明采用完整燃料颗粒几何结构的有限元模型可以准确预测 IMDP 芯块的有效热导率。此外, 从图 5 还可以看出, IMDP 芯块中燃料颗粒的分布形式对其有效热导率影响基本可以忽略。

3 传热性能研究

将采用上述有限元模型建立方法, 针对已经完成的 IMDP 芯块结构方案, 对温度、燃耗以及燃料颗粒与惰性基体间热阻对 IMDP 燃料有效热导率影响规律进行研究, 并与传统 UO_2 陶瓷燃料进行温度分布对比。

IMDP 的基体材料选择为 SiC, 燃料核心材料选择 UO_2 。考虑目前的制备工艺因素, 燃料颗粒封装体积百分比确定为 40%。此外, 综合压水堆堆芯物理、燃料性能, 完成的适用于压水堆的 IMDP 芯块结构方案设计参数如表 2 所示。

表 2 IMDP 方案设计参数
Table 2 IMDP parameters

参数 Parameter	数值 Value
基体材料 Matrix material	SiC
燃料核心外径 Kernel outside diameter / mm	0.7
缓冲层外径 Buffer outside diameter / mm	0.8
IPy 层外径 IPy layer outside diameter / mm	0.87
SiC 层外径 SiC layer outside diameter / mm	0.94
OPy 层外径 OPy layer outside diameter / mm	0.98
TRISO 封装百分比 TRISO packing fraction	40%

3.1 温度及燃耗影响

IMDP 使用的燃料核心材料—— UO_2 陶瓷燃料的热导率受燃耗及温度的影响; 为了获得较高的 SiC 基体热导率, 国际上目前较多的采用纳米渗透与瞬态共晶项 (Nano-infiltration and Transient Eutectic-phase, NITE) 成型工艺^[11], 同时研究发现, SiC 材料经过中子辐照后热导率会显著降低, 并会在较低的中子注量下出现饱和现象。以上材料组成的特性会导致 IMDP 的有效热导率受温度及燃耗的影响。 UO_2 在不同温度及燃耗下的热导率通过式(4)计算得出^[3]; SiC 基体与燃料颗粒的 SiC 层的热导率采用如图 6 所示的 Terrani^[11] 研究结果; 燃料颗粒中缓冲层及热解碳层的热导率则采用 Powers^[12] 的研究结果, 分别取 $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

$$K_{\text{UO}_2} = \left[\frac{1}{0.1148 + 0.0035 \cdot B + 2.475 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 0.00333 \cdot B) \cdot T} + 0.0132 \cdot e^{0.00188 \cdot T} \right] \cdot \frac{1}{100} \quad (4)$$

式中: K 为热导率, $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; B 为燃耗, MWD/kgUO_2 ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

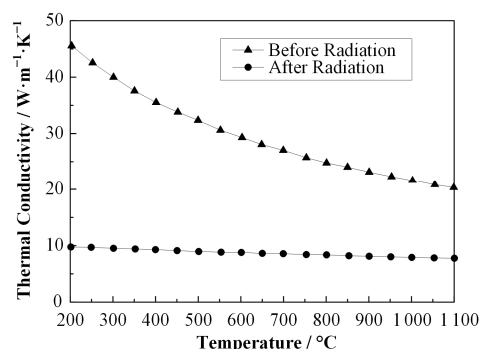


图 6 SiC 的热导率
Fig.6 Thermal conductivity of SiC

图 7 给出了寿期初(Beginning of Life, BOL)、寿期中(Middle of Life, MOL)及寿期末(End of Life, EOF)的 IMDP 芯块和 UO_2 芯块的热导率随温度变化

的趋势对比。可以看出,即使 SiC 基体在辐照后热导率会显著下降,但在整个寿期内,IMDP 芯块的有效热导率仍显著高于 UO_2 ; 特别是在寿期初,因 SiC 基体的热导率还未因辐照而下降,IMDP 的有效

热导率高达 UO_2 热导率的 500%以上; 在寿期中后期,因 SiC 基体受辐照而使热导率大幅下降,IMDP 的有效热导率仍维持在 UO_2 热导率的 200%以上。

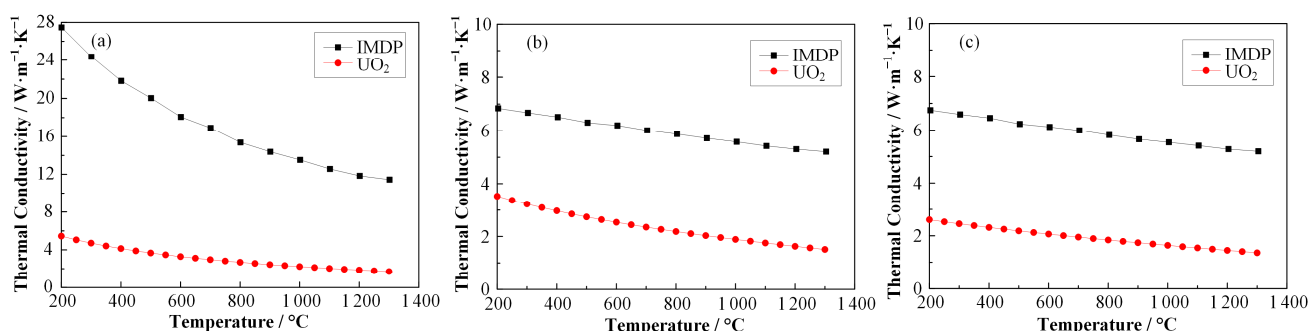


图7 IMDP 与 UO_2 有效热导率对比 (a) 寿期初, (b) 寿期中, (c) 寿期末
Fig.7 Comparison of ETC of IMDP and UO_2 (a) BOL, (b) MOL, (c) EOL

此外,被辐照后的 IMDP 有效热导率会急剧下降 50%以上; 相比寿期和寿期末,寿期初的 IMDP 的有效热导率随温度变化更为敏感。以上现象主要因 SiC 基体材料的辐照前后的导热特性所致。

3.2 传热性能

为验证 IMDP 芯块有效热导率在压水堆稳态运行时所能带来的收益,采用 § 3.1 的 IMDP 有效热导率数据,以典型压水堆燃料设计及运行工况参数为基础,计算 IMDP 芯块的温度分布,并与 UO_2 芯块进行对比。

采用的典型燃料棒参数如表 3 所示。因研究重点在芯块部分的传热性能,所以忽略芯块-包壳间隙热导率的变化; 根据典型的压水堆的正常运行工况参数,燃料棒线功率取 $186 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}$,包壳的外表面温度取 340°C 。

图 8 给出了寿期初、寿期中及寿期末的 IMDP 芯块和 UO_2 芯块在稳态运行工况下的径向温度分布对比,综合对比下可以看出,在相同的运行参数条件下,在整个燃料寿期内,IMDP 的中心温度均显著低于 UO_2 燃料。

表 3 燃料棒参数
Table 3 Parameters of fuel rod

参数 Parameter	值 Value
芯块外径 Fuel OD / mm	8.192 ^[13]
包壳外径 Cladding OD / mm	9.5 ^[13]
包壳内径 Cladding ID / mm	8.36 ^[13]
间隙热导率 Gap thermal conductivity / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.36 ^[2]
包壳热导率 Cladding thermal conductivity / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	16.76 ^[14]

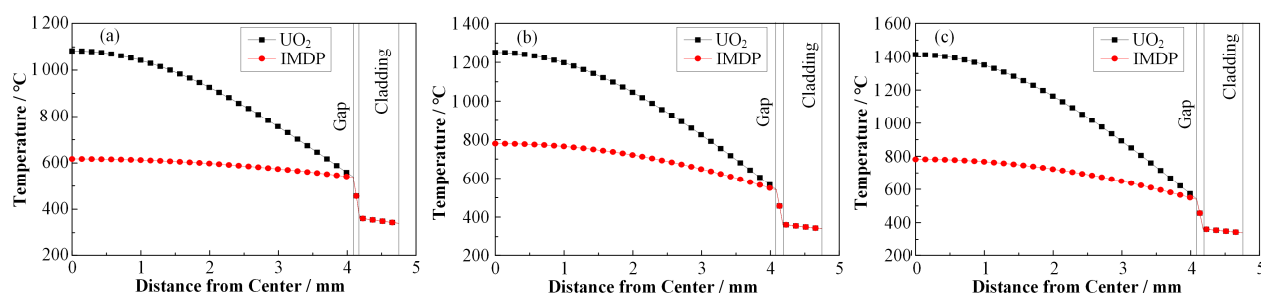


图8 IMDP 与 UO_2 芯块径向温度分布对比 (a) 寿期初, (b) 寿期中, (c) 寿期末
Fig.8 Comparison of radial temperature of IMDP and UO_2 (a) BOL, (b) MOL, (c) EOL

在图 8(a)中,寿期初期因 IMDP 的基体热导率并未因辐照而下降,故较高的热导率导致其芯块中心温度仅维持在 600°C 左右,较 UO_2 芯块低 400°C 以上。

图 8(b)中,因辐照导致 IMDP 热导率显著下降,其中心温度会升高到 800°C 左右,但辐照同时也会使 UO_2 热导率下降,故 IMDP 的中心温度优势仍维持在 400°C 以上。

在图 8(c)中,因 UO_2 随燃耗增加热导率持续下降,而 IMDP 在较低的燃耗下就会发生饱和,因此 IMDP 在寿期末时的中心温度优势扩大到近 600°C 。

相比 UO_2 燃料,IMDP 运行温度显著降低,意味着 IMDP 具有较低的热储能、较低的裂变气体释放率、较小的热应力等,以上特性会显著提高 IMDP 的事故容错能力,提高反应堆的安全运行裕量。

3.3 热阻影响

鉴于 TRISO 燃料技术已经在高温气冷堆上应用多年,其制备工艺相对成熟,IMDP 芯块的工艺难点在于将 TRISO 颗粒弥散于 SiC 基体的制备工艺探索。通过对 TRISO 弥散工艺的探索和研究,得到具有更强传热性能的 IMDP 芯块。因此有必要对 TRISO 颗粒与 SiC 基体的接触热阻对 IMDP 有效热

导率的影响规律展开研究,进而指导制备工艺的探索。

图 9 给出了寿期初和寿期中 TRISO 颗粒与基体间热阻对 IMDP 有效热导率的影响规律。从图 9 可以看出,热阻范围在 $0\sim 4\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 内对有效热导率的影响最为敏感,随着热阻的增加,有效热导率明显降低;而当热阻大于 $4\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 后,热阻对辐照前 IMDP 有效热导率的影响几乎消失,对辐照后 IMDP 有效热导率的影响敏感度则有所降低。

当热阻从 0 增加到 $4\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 时,在 400°C 、 700°C 和 1000°C 情况下:在寿期初,有效热导率分别降低 15.5%、17.5%和 15.9%;在寿期中,有效热导率分别降低 20%、19.6%和 18.8%;以上情况说明 TRISO 颗粒与基体间热阻对辐照后的 IMDP 有效热导率影响更为敏感。

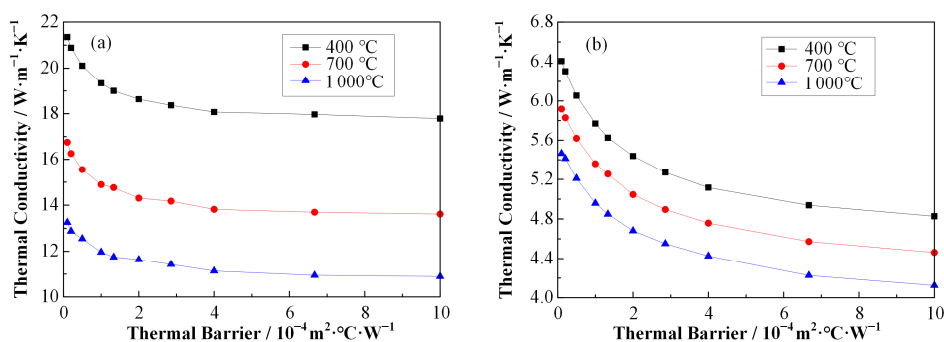


图 9 TRISO 颗粒与基体间热阻的影响 (a) 寿期初, (b) 寿期中
Fig.9 Effect of thermal barrier between TRISO and matrix (a) BOL, (b) MOL

4 结语

本文通过有限元方法对 IMDP 芯块的传热性能进行了研究,并与 UO_2 芯块的传热性能进行了对比,结果表明:

- 1) IMDP 有效热导率随燃耗及温度的增加而减小,且在不同寿期及不同温度下,IMDP 有效热导率均明显高于 UO_2 热导率;
- 2) 在反应堆正常运行工况下,IMDP 芯块的中心温度相比 UO_2 芯块低 400°C 以上;
- 3) TRISO 颗粒与惰性基体间热阻在 $0\sim 4\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 范围内对 IMDP 的有效热导率影响程度最为敏感;且该热阻对辐照后的 IMDP 有效热导率影响更为敏感。

参考文献

- 1 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.
- 2 Lee Y, Cho N Z. Three-dimensional single-channel thermal analysis of fully ceramic microencapsulated fuel via two-temperature homogenized model[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, **71**: 254-271. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.03.039.
- 3 Lee Y, Cho N Z. Steady and transient state analyses of fully ceramic microencapsulated fuel loaded reactor core via two-temperature homogenized thermal conductivity model[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, **76**: 283-296. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.09.027.
- 4 Wu X L, Li W, Wang Y, *et al.* Preliminary safety analysis of the PWR with accident tolerant fuels during severe accident conditions[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, **80**: 1-13. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.02.040.
- 5 Lee H G, Kim D, Lee S J, *et al.* Thermal conductivity analysis of SiC ceramics and fully ceramic microencapsulated fuel composites[J]. Nuclear

- Engineering and Design, 2017, **311**: 9–15. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.11.005.
- 6 Kou H S, Lu K T, Yu C C. Effective thermal conductivity of composite material with spherical inclusions in orthorhombic structure[J]. Computer & Structures, 1994, **53**(3): 569–577.
- 7 Maxwell J C. A treatise on electricity and magnetism[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 111.
- 8 Carson J K, Lovatt S J, Tanner D J, *et al.* Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, **48**(11): 2150–2158. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.032.
- 9 Gonzo E E. Estimating correlations for the effective thermal conductivity of granular materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, **90**(3): 299–302. DOI: 10.1016/S1385-8947(02)00121-3.
- 10 Stainsby R, Grief A, Worsley M, *et al.* Investigation of local heat transfer phenomena in a pebble bed HTGR core (NR001/RP/002R01)[R]. United Kingdom: Amec Foster Wheeler - Nuclear, 2009.
- 11 Terrani K A, Snead L L, Gehin J C. Microencapsulated fuel technology for commercial light water and advanced reactor application[J]. Journal of Nuclear Materials, 2012, **427**(1–3): 209–224. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2012.05.021.
- 12 Powers J J. Fully ceramic microencapsulated (FCM) replacement fuel for LWRs (TM-2013/173)[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 2013.
- 13 Cheon J S, Lee B H, Koo Y H, *et al.* Evaluation of a pellet-clad mechanical interaction in mixed oxide fuels during power transients by using axisymmetric finite element modeling[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, **231**(1): 39–50. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2004.02.009.
- 14 MacDonald P E, Thompson L B. MATPRO: a handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior[R]. Version 09. USA: Idaho National Engineering Laboratory, 1976.