



高体积份额下包覆颗粒弥散燃料等效热学模型

李文杰, 余红星, 肖忠, 焦拥军, 陈平, 李垣明

An Effective Thermal Model of Coated Particle Dispersed Fuel with High Packing Fraction

Li Wenjie, Yu Hongxing, Xiao Zhong, Jiao Yongjun, Chen Ping, and Li Yuanming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0096>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

弥散型核燃料热导率计算模型研究

Study on Thermal Conductivity Model of Dispersion Fuel

核动力工程. 2020, 41(5): 40–43

TRISO燃料颗粒等效导热系数理论模型研究

Theoretical Research on Effective Thermal Conductivity of TRISO Particle

核动力工程. 2020, 41(6): 69–74

基于弦长抽样方法的弥散燃料蒙特卡罗中子输运模拟

Monte Carlo Neutron Transport Simulation for Dispersion Fuel Based on Chord Length Sampling Method

核动力工程. 2020, 41(6): 62–68

基于弥散燃料颗粒开裂的裂变气体释放模型

Releasing Model of Fission Gas Based on Dispersion Fuel Particle Cracking

核动力工程. 2019, 40(5): 85–91

金属基弥散微封装燃料中TRISO燃料颗粒的尺寸优化设计

Dimension Optimization Design of TRISO Fuel Particle in Metal Matrix Microencapsulated Fuels

核动力工程. 2019, 40(2): 176–179

金属基弥散燃料元件失稳肿胀的静态弹塑性模型

Static Elastoplastic Model of Metal Matrix Dispersion Fuel Element under Unstable Swelling Condition

核动力工程. 2021, 42(3): 74–80



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)04-0096-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.04.0096

高体积份额下包覆颗粒弥散 燃料等效热学模型

李文杰¹, 余红星¹, 肖忠², 焦拥军², 陈平¹, 李垣明¹

1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213; 2. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 准确预测核燃料的内部温度场分布, 对于多层包覆颗粒弥散核燃料元件的设计及筛选具有重要的指导意义。在多层包覆颗粒及其弥散块体的等效热导率模型基础上, 本文针对高体积份额情况分析建立了等效传热计算方法及其数值模型, 并研究了燃料颗粒的空间分布、颗粒尺寸、团聚等因素对核燃料元件温度场的影响。本研究有助于理解多层包覆颗粒弥散核燃料元件的微观-宏观传热机制, 为核燃料的设计、优化和安全分析提供了分析工具。

关键词: 模拟; 弥散燃料; 等效热导率

中图分类号: TL352.2² **文献标志码:** A

An Effective Thermal Model of Coated Particle Dispersed Fuel with High Packing Fraction

Li Wenjie¹, Yu Hongxing¹, Xiao Zhong², Jiao Yongjun², Chen Ping¹, Li Yuanming¹

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Accurate prediction of the temperature distribution in nuclear fuel is an important step for the design and screening of multi-coating particle dispersed nuclear fuel. This study aims to establish an effective thermal model and numerical solutions for macro scale heat transfer analysis by investigating the effective thermal properties of multi-coating particles and the dispersed fuel bulk. The effects of particle arrangement, sizes, clustering on temperature distribution inside nuclear fuel element was studied with the established effective model. This study helps clarify the micro- and macro- scale heat transfer mechanism of multi-coating particle dispersed fuel, and provides a guidance for the design, optimization and safety analysis of this type of fuel.

Key words: Simulation, Dispersion fuel, Effective thermal conductivity

0 引言

多层包覆颗粒弥散燃料被广泛用于研究堆、高温气冷堆, 近年来也被作为压水堆耐事故燃料的研发对象。多层包覆颗粒由燃料区和若干包覆层构成(如三向同性燃料颗粒 TRISO、UO₂-金属包覆层颗粒等), 然后弥散于金属或陶瓷基体中。典型的颗粒弥散燃料元件包括高温气冷堆所使用的核燃料球或燃料柱^[1], 以及美国橡树岭国家实

验室(ORNL)提出的全陶瓷微封装(FCMTM)燃料^[2-3]等。

为保障核燃料在反应堆运行期间的安全性, 需要准确预测燃料元件内部的温度场, 以确保多层包覆颗粒和基体的最高温度低于安全限值。同时, 燃料的局部温度与裂变产物迁移、释放紧密相关, 后者也会对燃料结构完整性产生影响。此外, 颗粒弥散燃料的温度也会对反应堆中子学行

收稿日期: 2020-05-21; 修回日期: 2020-10-17

作者简介: 李文杰(1986—), 男, 高级工程师, 现主要从事新型反应堆核燃料性能研究, E-mail: lwj04@tsinghua.org.cn

为产生影响^[4]。因此，关于多层包覆颗粒型弥散燃料的传热分析方法对于核燃料研发和反应堆安全分析都有重要的意义。

早期研究针对单个包覆颗粒开展了热力学性能分析^[5]。近年来，国内外研究者采用有限元法来分析预测颗粒弥散型核燃料内部温度场^[6-8]，然而这种分析方法需要精细化描述颗粒内部多层结构。如果用于分析元件级传热问题，因为颗粒数目庞大且网格尺寸变化大，导致计算规模和收敛性问题，难以适用于元件或更大尺度的传热学分析。为此，Stainsby^[9]和Folsom等人^[10-11]研究了高温气冷堆燃料（颗粒体积份额小于10%）的等效热导率模型，以建立一种近似热学模型来分析弥散燃料的宏观传热行为。然而，用于轻水反应堆的包覆颗粒弥散燃料的颗粒体积份额大于40%，这种情况下颗粒间距远小于颗粒尺寸，且辐照条件下，热流是从燃料核芯经过各包覆层向SiC基体传导，与等效热导率模型的外部热源假设不一致^[12-13]，因此上述等效热导率模型的适用性有待确认。此外，由于制造工艺无法保证弥散燃料包覆颗粒的均匀分布，局部的团聚和接触难以避免，因此还需要考虑颗粒随机分布对温度场的影响。

本文分为3个部分：首先，基于渐进均匀化方法推导了包覆颗粒和弥散燃料的等效热导率。然后，通过多种等效模型与精细化模型比较，建立了适用于高体积份额的等效热学模型。最后，研究颗粒尺寸、颗粒体积份额、颗粒空间分布方式、颗粒团聚等微观结构的随机性因素对等效热学性质的影响。

1 等效热导率

本节利用渐进均匀化方法^[5]推导了多层包覆颗粒和弥散燃料的等效热导率。假设一个有 N 层包覆层的燃料颗粒弥散在无穷大的基体中，其对无穷远处的温度扰动与一个单质颗粒的温度扰动相同，那么后者的热学性质可被视为前者的等效热学性质，从而将其传热行为简化为单质颗粒进行分析。

以TRISO颗粒($N=4$)为例，按照材料类型将颗粒和基体分为 $N+2$ 个区域，按照从内向外的顺序对每个区域进行编号。热学相关参数见表1。

第 i 区与距离颗粒中心距离 r 、方位角 Φ 处

表1 热学分析中包覆颗粒各区域参数

Tab. 1 Regional Parameters of Coated Particle in Thermal Analysis

编号	材料	内径	外径	热导率	温度
1	核芯	a_0	a_1	k_1	$T_1(r, \Phi)$
2	缓冲层	a_1	a_2	k_2	$T_2(r, \Phi)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$N+1$	最外层涂层	a_N	a_{N+1}	k_{N+1}	$T_{N+1}(r, \Phi)$
$N+2$	基体	—	a_{N+2}	k_{N+2}	$T_{N+2}(r, \Phi)$

“—”不适用

($a_{i-1} \leq r \leq a_i$) 的温度函数 $T_i(r, \Phi)$ 满足稳态固体导热方程：

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \Phi} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\sin \Phi \frac{\partial T_i}{\partial \Phi} \right) = 0 \quad (1)$$

在温度梯度 V 中第 i 区域温度的解为：

$$T_i(r, \Phi) = V(A_i r \cos \Phi) + B_i \frac{a_{N+1}^3 \cos \Phi}{r^2} \quad (2)$$

式中， $i=1, 2, \dots, N+2$ ； A_i 和 B_i 是未知的系数，可以利用连续性条件来确定。

根据温度和热流密度在区域界面($r=a_i$)的连续性，可以得到 $2(N+1)$ 个方程：

$$T_i(a_i, \Phi) = T_{i+1}(a_i, \Phi) \quad (3)$$

$$k_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r=a_i} = k_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial r} \Big|_{r=a_i} \quad (4)$$

式中， $i=1, 2, \dots, N+1$ 。

考虑到在原点（颗粒中心）处温度应当是有限值，以及在距离原点无限远处($r \rightarrow \infty_i$)的基体温度满足 $T_{N+2} \rightarrow Vr$ ，TRISO颗粒外部的温度为：

$$T_{N+2}(r, \Phi) = V \left(r + B_{N+2} \frac{a_{N+1}^3}{r^2} \right) \cos \Phi \quad (5)$$

式中， B_{N+2} 和 a_{N+1} 是式(2)的系数。

一个单质颗粒的温度分布，运用类似前面的方法获得其解析解（即 $N=1$ 的情况）为：

$$T_m(r, \Phi) = V \left[r - \left(\frac{k_p - k_m}{2k_m + k_p} \right) \frac{a^3}{r^2} \right] \cos \Phi \quad (6)$$

式中， k_p 为颗粒热导率； k_m 为基体热导率。

比较式(5)、式(6)，可以得到TRISO颗粒的等效热导率($k_{\text{eff-TRISO}}$)为：

$$k_{\text{eff-TRISO}} = \left(\frac{1 - 2B_{N+2}}{1 + B_{N+2}} \right) k_m \quad (7)$$

由于式(7)中包含基体热导率 k_m ，因此在渐进均匀化理论中颗粒与基体在传热过程中是相互影响的。

基于类似的推导方法, 假设弥散燃料块体 (L 个包覆颗粒及基体) 所产生的温度扰动与单质块体产生的温度扰动相同, 可以得到前者的等效热学性质。

$$k_{\text{eff-FCM}} = \left(\frac{1 - 2\alpha B_{N+2}}{1 + \alpha B_{N+2}} \right) k_m \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{L a_{N+1}^3}{a_{\text{max}}^3} = L \frac{4\pi a_{N+1}^3 / 3}{4\pi a_{\text{max}}^3 / 3}$$

式中, α 对应的是 L 个颗粒在“宏观”颗粒中的体积份额。

2 等效热学模型的建立

为了验证等效热导率在高体积份额下的适用性, 本节采用有限元法建立了多种有限元模型, 包括: 弥散燃料块体的局部精细化模型 (图 1)、采用包覆颗粒等效热导率的颗粒均匀化模型 (图 2)、单个包覆燃料颗粒模型 (图 3) 和采用块体等效热导率的块体均匀化模型 (图 4)。基于相同的热学输入条件 (表 2), 比较其温度场计算结果 (表 3)。

根据表 3 可知, 颗粒均匀化模型的最高温度扰动和单颗粒模型的最高温度扰动之和较接近精细化模型的最高温度扰动, 而块体均匀化模型的最高温度和单颗粒模型的最高温度扰动量之和明显低于精细化模型。平均温度也存在类似的关系。这说明, 可以利用颗粒均匀化模型和单颗粒模型作为精细化模型的近似。需要说明的是, 对于

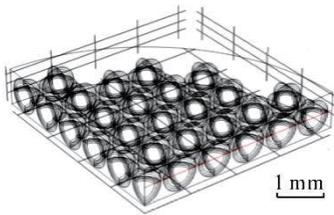


图 1 三维精细化模型
Fig. 1 Geometry of 3D Fine Model

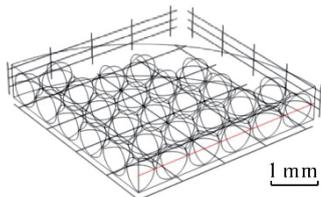


图 2 颗粒均匀化模型
Fig. 2 Geometry of Particle Homogenized Model

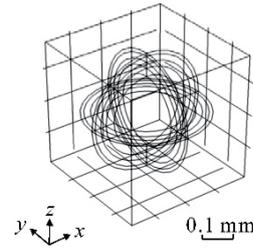


图 3 单个包覆颗粒模型
Fig. 3 Geometry of a Single Particle Model

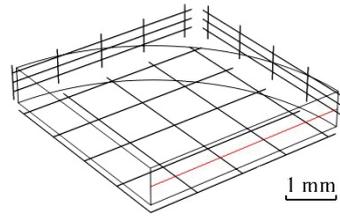


图 4 块体均匀化模型
Fig. 4 Geometry of Bulk Homogenized Model

表 2 验证计算所使用的热学输入条件

Tab. 2 Thermal Inputs for Verification Computation

参数名	参数值
初始温度/K	600
边界温度/K	600
燃料核芯功率密度/(W·mm ⁻³)	3.315
包覆颗粒功率密度/(W·mm ⁻³)	1.019
块体功率密度/(W·mm ⁻³)	0.3078

表 3 4 种模型的预测温度扰动

Tab. 3 Predicted Temperature Rises of Four Models

模型	最高温度扰动/K	平均温度扰动/K
精细化模型	155.79	60.4
颗粒均匀化模型	123.92	57.18
单颗粒模型	46.21	1.67
块体均匀化模型	66.37	33.24

温度扰动为局部或平均温度减去边界温度

颗粒体积份额和功率密度较低的高温气冷堆 (HTGR) 燃料, 块体均匀化模型仍然是适用的, 因为颗粒之间的距离较远、相互热影响较小。

在瞬态条件使用两相模型+单个颗粒精细模型的等效热学模型, 还需要获得等效热容。基于体积平均法计算颗粒或块体的等效热容:

$$\overline{(\rho c_p)} = \frac{\int \rho c_p dV}{V} \quad (9)$$

式中, ρ 为密度; c_p 为定压比热容。

利用前面 4 种模型，考察其在一个假设的瞬态过程中温度的变化规律——初始时刻 ($t=0$ s) 到 50 s, UO_2 核芯体积功率密度为 3.315 W/mm^3 , 从第 50 s 开始每秒功率密度增加 10%, 到第 60 s 开始保持在 6.630 W/mm^3 , 一直到 120 s, 初始和边界温度仍为 600 K。结果表明 (图 5), 尽管 4 种模型的最高温度随时间变化曲线并不相同, 但都在瞬态升功率结束后 50 s ($t=120$ s) 进入了新的稳态。不过有限元法求解并不是在所有时间步都有收敛解, 例如: Model 1 仅在 53.28、65.28、77.28、89.28 s 等时刻有解, 这些时刻之间的解都是插值法获得的。考虑到收敛解的时间间隔, 4 种模型的温度变化曲线在趋势 (时域分辨率为 10 s 量级) 上可以被认为是一致的。这初步说明, 采用体积平均法计算有效热容不会导致传热计算在时域上的变形。

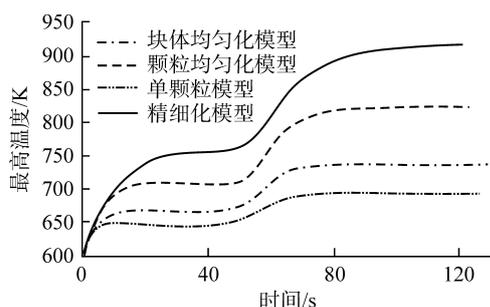


图 5 瞬态工况 4 种模型最高温度变化

Fig. 5 Peak Temperature Evolutions in a Transient by 4 Models

上述案例表明, 稳态和瞬态条件下均可利用计算量相对较小的颗粒均匀化模型和单颗粒模型替代三维精细化模型, 从而在分析全陶瓷耐事故燃料热学行为时提供一种快速等效解法。在计算效率上, 前者具有明显优势, 比后者快了 2 个量级。在弥散燃料元件的设计过程中, 由于需要对诸多设计参数进行敏感性分析, 并且弥散燃料的核热耦合分析也需要快速计算温度场, 因此快速等效热学模型在这些场景下具有重要的应用价值。

3 随机分布和团聚的影响

颗粒弥散燃料的制造工艺目前尚无法保证燃料颗粒在空间上的理想排布, 为了尽量使模拟接近真实情况, 因此本节分析了随机分布和局部颗粒团聚对传热的影响。为此, 在稳态下比较颗粒

随机 (尺寸+分布) 模型 (图 6) 与第 2 节颗粒均匀化模型的计算结果 (表 4)。可以看出, 随机模型的平均温度扰动较为稳定, 最高温度扰动有一定波动, 取多次分布的平均值后最高温度扰动比颗粒均匀化模型增加约 5 K, 平均温度扰动则减少约 7 K。

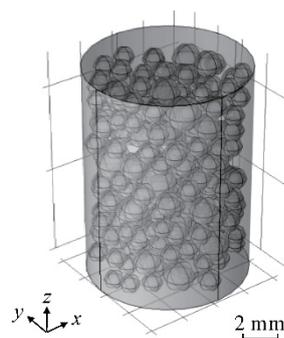


图 6 颗粒随机模型

Fig. 6 Geometry of Particle Stochastic Model

表 4 随机模型的预测温度扰动

Tab. 4 Predicted Temperature Rises of Particle Stochastic Models

模型	最高温度扰动/K	平均温度扰动/K
颗粒均匀化模型	123.92	57.18
随机模型1	128.14	50.70
随机模型2	126.28	50.61
随机模型3	132.23	50.19
平均值	128.9	50.5

颗粒弥散燃料的制造过程可能出现局部若干颗粒团聚, 作为热源的颗粒集中可能导致局部温度升高。考虑极端情况若局部出现多个颗粒以最密堆积方式排列, 通过等间距模型与密排模型比较来定量研究颗粒团聚效应。除了等间距模型的颗粒之间有 $100 \mu\text{m}$ 间隙, 其余输入条件与密排模型完全相同。计算结果 (表 5) 表明 2 者的平均温度基本相同, 密排模型的最高温度略微增加 3 K。因此, 颗粒团聚对最高温度升高的影响有限, 对平均温度的影响可以忽略。

表 5 等间距模型与密排模型的温度扰动

Tab. 5 Temperature Rises of Equally Distributed Compact Arranged and Models

模型	最高温度扰动/K	平均温度扰动/K
密排模型	77.24	24.47
等间距模型	74.24	24.48

综上所述,为了考虑颗粒随机分布对燃料温度场的影响,可以利用蒙特卡洛方法确定波动幅度,对等效热学模型进行修正。颗粒团聚对燃料最高温度场的影响较为有限,对平均温度的影响则可忽略。

4 结论

为了研究多层包覆颗粒弥散燃料的等效热学性质,利用渐进均匀化理论推导了颗粒和弥散燃料块体的等效热导率,然后基于4种不同精细程度的传热模型比较,发现可以利用颗粒均匀化模型+单个颗粒精确模型在稳态和瞬态条件下获得与精细化模型近似的温度扰动计算结果,从而显著提高了热学计算效率。对于仅关心热学性能的应用场景,例如验证辐照考验的燃料元件设计温度准则或某些反应堆事故分析中的燃料峰值温度,本文建立的等效热学模型提供了一种快速有效的分析手段。

需要说明的是,目前还缺乏验证本文所建等效热学模型的实验数据,主要困难在于堆外实验难以模拟包覆燃料颗粒核芯的产热,只有在堆内对多层包覆颗粒燃料进行热学测量。因此,未来需要设计开展内嵌热电偶的燃料堆内辐照试验,对本文所建或其他等效热学模型进行验证和确认,最终获得工程设计可用的热学分析方法。

参考文献:

- [1] KONINGS R J M. Comprehensive nuclear materials[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [2] SNEAD L L, TERRANI K A, VENNERI F, et al. Fully ceramic microencapsulated fuels: a transformational technology for present and next generation reactors-properties and fabrication of FCM fuel[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2011: 104.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] KNUDSON D L, MILLER G K, MILLER G K, et al. PARFUME theory and model basis report[R]. Idaho Falls: Idaho National Lab., 2009.
- [6] 刘振海,李文杰,陈平,等. FCM燃料热学性能分析[J]. *核动力工程*, 2016, 37(6): 150-154.
- [7] LIU M L, LEE Y, RAO D V. Development of effective thermal conductivity model for particle-type nuclear fuels randomly distributed in a matrix[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2018(508): 168-180.
- [8] SCHAPPEL D, TERRANI K, POWERS J J, et al. Modeling the performance of TRISO-based fully ceramic matrix (FCM) fuel in an LWR environment using BISON[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018(335): 116-127.
- [9] 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.
- [10] FOLSOM C P. Effective thermal conductivity of Tri-Isotropic (TRISO) fuel compacts[D]. Logan: Utah State University, 2012.
- [11] FOLSOM C, XING C H, JENSEN C, et al. Experimental measurement and numerical modeling of the effective thermal conductivity of TRISO fuel compacts[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015(458): 198-205.
- [12] 曹芳成. 碳化硅基包覆型核燃料颗粒的氧化行为和热导性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [13] 刘子平, 周彪, 孙俊. 包覆颗粒燃料等效导热系数理论分析[C]//第十六届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室2019年学术年会论文集. 惠州: 中国科学院近代物理研究所, 2019: 746-759.

(责任编辑: 张祚豪)