

文章编号: 0258-0926(2017)01-0029-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2017.01.0029

乏燃料溶解器燃料棒随机分布建模方法

李 航, 周 琦, 朱庆福

中国原子能科学研究院, 北京, 102413

摘要: 利用 Matlab 商用数学软件对乏燃料溶解器中剪切后的燃料段随机分布建立模型, 使用蒙特卡罗粒子输运程序 MCNP 和 MONK9a 对模型进行验证, 并针对不同成分及长度的燃料段进行临界计算, 分析随机分布模型的稳定性。

关键词: 乏燃料溶解器; 燃料棒; 随机分布; 建模方法

中图分类号: TL24 文献标志码: A

Modeling Method for Random Arrays of Rod in Spent Fuel Dissolver

Li Hang, Zhou Qi, Zhu Qingfu

China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413, China

Abstract: The model for random arrays of shearing rod in spent fuel dissolver was built using Matlab commercial mathematical software. The model verification was tested using Monte Carlo neutron transport program MCNP and MONK9a and then the criticality calculation with different fuel components and length shearing rod was done. The stability of the random model is also analyzed.

Key words: Spent fuel dissolver, Fuel rod, Random distribution, Modeling method

0 引言

乏燃料溶解器是乏燃料后处理厂中的关键设备, 是影响整个后处理工艺流程的生产瓶颈, 作为后处理过程中的第一个核临界安全控制点, 其处理能力、处理时间、溶解过程核临界安全控制等都直接决定整个后处理厂乏燃料年处理能力和安全性^[1]。在以往乏燃料溶解器的临界安全分析和设计中, 由于缺乏准确的模型和临界数据支持, 只能通过限制乏燃料处理量和减小设施尺寸来保证临界安全, 同时添加中子吸收体以提高处理量^[2], 增加了乏燃料处理难度, 降低了处理效率, 制约了经济性^[3]。

目前, 国内外通过大量假设和实验对乏燃料溶解器进行研究, 如日本的不均匀堆芯临界安全实验^[4]、法国的新燃料假设、英国的燃耗信任制等^[5], 都未涉及剪切后的燃料段(简称燃料段)随机分布问题, 国内基本采用质量控制或几何控制, 并以棒栅排布方式模拟溶解过程, 但燃料段在溶解器中的随机分布研究尚未展开。同时, 临

界安全计算, 如程序 MCNP、KENO 也未涉及该方面内容, 英国 MONK 程序只能对长度和成分完全相同的燃料段进行分析。

本文以使用“切断-浸取法”的乏燃料作为研究对象^[6], 针对燃料段在间歇式溶解器中的随机分布建立模型。燃料成分可具体到单根燃料段, 摆脱传统棒栅排布的研究方式从而降低保守性; 对模型进行拓展以近似模拟真实情况下的剪切和燃耗问题。

1 模型建立

使用商用数学软件 Matlab 程序对乏燃料溶解器中的乏燃料段随机分布状态建立数学模型^[7]。具体描述为: 在确定大小的溶解空间(大圆柱容器)中放置随机分布且不相交的乏燃料段(小圆柱体)。

模型建立需要满足: 相同长度小圆柱在大圆柱容器中随机分布且不与大圆柱相交; 随机分布的小圆柱互不相交。

收稿日期: 2016-03-02; 修回日期: 2016-06-21

作者简介: 李 航(1990—), 男, 研究实习员, 现从事核临界安全研究

对确定高度 h 和半径 r 的小圆柱, 随机生成底部中心点 $C(x, y, z)$ 和中心轴单位向量 $W(dx, dy, dz)$, 并确认小圆柱最高点及最低点位于容器高度范围内, 上下端面投影位于容器底圆中, 从而得到位于大圆柱中的小圆柱随机分布位置信息。对该位置信息进行迭代判断以确定小圆柱间是否相交。

确定是否相交的过程为: 先后输入小圆柱 A 和 B, 以小圆柱 B 建立坐标系 (x', y', z') 对小圆柱 A 进行坐标变换得到 A' ; 2 个小圆柱不相交需同时满足 2 个条件: A' 的 2 个端面圆高度的最大值和最小值 (Z_{1max}, Z_{2max}) 和 (Z_{1min}, Z_{2min}) 必须具备 $Z_{1min} > h$ 且 $Z_{2min} > h$ 或 $Z_{1max} < 0$ 且 $Z_{2max} < 0$; 将 A' 轴上小圆柱高度 h 划分为 N 份, 得到轴上点与 Z' 轴的距离 $d = \sqrt{(Xa')^2 + (Ya')^2}$, (其中 X, Y 为 A' 小圆柱中心轴上坐标点, a' 为该坐标点到 Z' 轴的距离) 若 $d > 2r$, 则不相交。

通过上述迭代分析得到大圆柱中多个小圆柱的随机坐标信息, 迭代过程如图 1 所示。以该坐标信息在 MCNP 程序中建立的模型如图 2 所示。经分析, 随着乏燃料段数量的增多, 燃料段占据溶解器的体积比上升, 计算时间呈指数性增加。

2 模型验证

自定义模型尺寸, 使用不同计算程序进行重复计算以验证模型的稳定性与准确性。对模型进行拓展, 用以模拟不同长度、不同富集度下乏燃料段随机分布问题, 以证明本模型比 MONK9a 程序的应用范围更广, 更贴近真实情况。

2.1 3 种计算模型比较

对特定尺寸乏燃料溶解器中的燃料段产生随机分布坐标 (简称: 分布 F), 使用 3 种模型对分布 F 进行分析: 使用 MCNP 程序进行计算 (简称 MC); 使用 MONK 程序进行计算 (简称 MO); 使用 MONK 程序 RANDROD 命令语句进行模拟分析 (简称 RA)。

随机建立 100 个分布样本, 使用 3 种模型分别进行计算, 结果如图 3 所示。MO 和 MC 模型为使用本文方法获得, 其几何分布相同, 有效增殖因数 k_{eff} 曲线变化趋势相同, 且波动范围较小, 满足真实情况下的随机分布特性; RA 模型的计算语句 RANDROD 经 MONK 研发公司优化, 模型偏差较小, 曲线浮动变化小。

对 3 种模型计算结果进行统计分析, 结果见

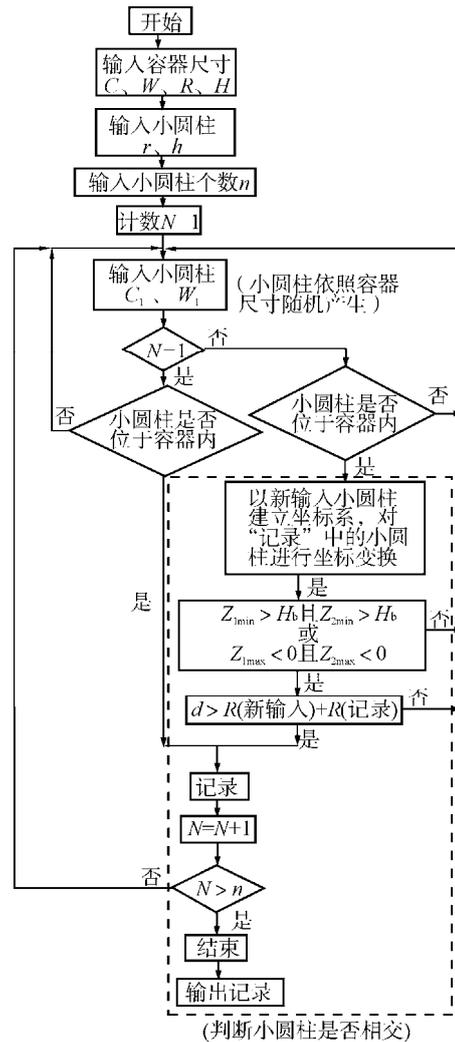


图 1 迭代计算过程

Fig. 1 Process of Iterative Computation
R——容器半径; H——容器高度; H_b——新输入小圆柱高度

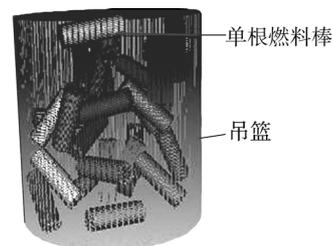


图 2 模型示意图

Fig. 2 Diagram of Model

表 1。MO 和 MC 模型使用相同几何模型, 其计算结果标准差近似相同; MO 模型与 RA 模型使用相同计算程序和数据库, 其结果近似, 且标准差处在同一量级, 可用于后续计算。

2.2 高低富集度燃料段混合计算

真实溶解过程中, 因燃料燃耗不同, 燃料棒

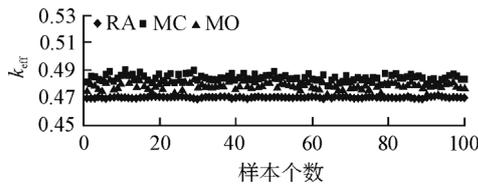


图3 3种模型计算结果

Fig. 3 Calculation Results of Three Models

表1 3种模型 k_{eff} 计算结果分析Table 1 Calculation Analysis of k_{eff} of Three Models

模型	计算偏差	平均值	标准偏差
MC	1×10^{-3}	0.48446	2.5421×10^{-3}
MO		0.47902	2.6976×10^{-3}
RA		0.47016	1.1100×10^{-3}

所处位置不同,从而造成各燃料段中燃料成分不同,本文分别以相同长度的25根高、低富集度 UO_2 燃料段为例对该情况进行模拟。

随机建立10个分布样本,使用MC和MO模型分别对25根20%和25根90%富集度的 UO_2 燃料段混合模型进行计算。结果示于图4。MC模型与MO模型的计算结果和变化趋势近似相同;使用RA模型分别对50根富集度分别为20%和90%的 UO_2 燃料段进行计算,其结果可对混合计算结果进行包络,证明混合计算结果可信,本模型可用于不同富集度的混合计算研究。不同富集度混合计算可克服MONK9a程序无法模拟燃料段中填充不同燃料成分的缺陷。

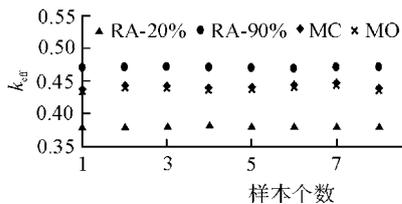


图4 高低富集度混合计算

Fig. 4 Hybrid Computation with High and Low Enrichment

2.3 不同长度燃料段混合计算

真实溶解过程中,因剪切误差而导致乏燃料溶解器中燃料段长度并不完全相同。保持富集度和总燃料棒长度不变,以2 cm和5 cm长度的燃料段混合分布为例进行模拟。

随机建立10个分布样本,使用MO模型对15根2 cm和12根5 cm燃料段进行分析,结果示于图5。燃料段随机性分布导致 k_{eff} 在一定范围内波动。使用RA模型进行临界计算分析,结果

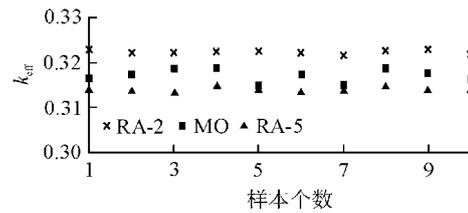


图5 不同剪切长度混合计算

Fig. 5 Hybrid Computation with Different Shearing Length

显示:45根2 cm燃料段的RA-2 cm模型较其他模型离散性更好、慢化更充分,因此 k_{eff} 相对较大;18根5 cm燃料段的RA-5 cm模型燃料离散性最差, k_{eff} 较小。不同长度燃料段的混合模型结果可被RA-2 cm和RA-5 cm结果包络,证明混合计算结果可信,本模型可用于不同长度燃料段的混合计算研究。不同长度燃料段混合计算可克服MONK9a程序无法模拟燃料段长度不同的缺陷,因此更贴近真实分布情况。

3 结论

(1) 建立间歇式乏燃料溶解器中乏燃料段的随机分布模型,其计算效率满足指数关系,且迭代计算时间随燃料段数目的增加而上升。

(2) 基于随机分布的MO模型,其计算结果偏差较小且稳定性高,可用于不同长度,不同富集度的燃料段混合分布情况的计算分析。

本文中MO模型可用于后续乏燃料溶解器的临界安全计算,本文可作为真实乏燃料溶解计算的先导性分析。

参考文献:

- [1] 任凤仪,周镇兴. 国外核燃料后处理[M]. 北京:原子能出版社,2006.
- [2] 姜圣阶,任凤仪. 核燃料后处理工学[M]. 北京:原子能出版社,1995.
- [3] 阮克强. 核临界安全[M]. 北京:原子能出版社,2005.
- [4] Yoshinori Miyoshi, Toshihiro Yamamoto. Critical experiment program of heterogeneous core composed of LWR fuel rods and low enriched uranyl solution[R]. Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195, Japan, ICNC, 2003.
- [5] Brady Raap M, DeHart M. Advances in applications of burnup credit to enhance spent fuel transportation, storage, reprocessing and disposition[R]. Vienna: IAEA, 2007.
- [6] 黄昌泰,李光鸿,魏连生. 核电站燃料后处理[M]. 北京:原子能出版社,1996.
- [7] EBERLY D. Intersection of cylinders [M/OL] Geometric Tools LLC. (2010)[2014-6-12]. <http://www.geometrictools.com/>.

(责任编辑:张明军)