



基于CFD的铅基快堆单盒燃料组件堵流事故分析

陈宝文, 邓 坚, 凌煜凡, 胡宝琰, 王天石, 朱恩平, 王 婷

Analysis of Blockage Accident of Lead-Based Fast Reactor Single-Box Fuel Assembly Based on CFD

Chen Baowen, Deng Jian, Ling Yufan, Hu Baolong, Wang Tianshi, Zhu Enping, and Wang Ting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0277>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小型自然循环铅冷快堆无保护最热组件局部堵流瞬态分析

Transient Analysis on Unprotected Partial Flow Blockage of Hottest Fuel Assembly for A Small Natural Circulation Lead-Cooled Fast Reactor

核动力工程. 2019, 40(1): 23-27

铅基快堆自然循环实验台架比例分析方法研究

Research on Scaling Analysis Method for Natural Circulation Test Facility of Lead-Based Fast Reactor

核动力工程. 2020, 41(6): 207-213

铅基快堆RBEC-M燃耗库制作方法研究及验证

Research and Validation of Burnup Library Processing for Lead Based Fast Reactor RBEC-M

核动力工程. 2019, 40(4): 60-64

基于CFD的池式快堆多物理耦合分析方法研究

Research on Multi-Physics Coupling Method of Pool Type Fast Reactor Based on CFD

核动力工程. 2020, 41(6): 36-44

VVER反应堆燃料组件流动传热特性CFD分析

CFD Investigation on Flow and Heat Transfer Characteristics of Fuel Assembly for VVER Reactor

核动力工程. 2018, 39(3): 6-9

基于ANSYS的燃料组件事故动力分析程序

Dynamic Analysis of Fuel Assembly for Accident Condition Based on ANSYS

核动力工程. 2018, 39(3): 40-44



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)04-0277-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.04.0277

基于 CFD 的铅基快堆单盒燃料 组件堵流事故分析

陈宝文¹, 邓 坚¹, 凌煜凡^{2*}, 胡宝珑², 王天石², 朱恩平², 王 婷²

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. 南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳, 421001

摘要: 铅基快堆在运行过程中产生的腐蚀产物有可能会在堆内沉积, 导致堵流事故的发生。基于计算流体力学 (CFD) 软件 Ansys Fluent 分析了不同堵块面积、堵块厚度、堵块类型以及堵块位置对堵流事故中传热以及流场性质的影响规律。结果显示, 堵块面积的增加会增加回流区域面积, 使得温度回落更慢, 传热恶化显著; 堵块厚度的增加将导致冷却剂和包壳最高温度上升, 极易导致包壳损坏; 多孔介质堵块内冷却剂以较低流速通过, 缓解了堵块造成的影响, 其危害小于实心堵块; 堵流发生在组件活性区中部与发生在活性区出、入口相比所造成的局部温升更加明显, 危害更大。

关键词: 铅基快堆; 堵流事故; 计算流体力学 (CFD)

中图分类号: TL364+.9 **文献标志码:** A

Analysis of Blockage Accident of Lead-Based Fast Reactor Single-Box Fuel Assembly Based on CFD

Chen Baowen¹, Deng Jian¹, Ling Yufan^{2*}, Hu Baolong²,
Wang Tianshi², Zhu Enping², Wang Ting²

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;
2. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China

Abstract: The corrosion products produced during the operation of the lead-based reactor may be deposited in the reactor, resulting in the occurrence of flow plugging accident. Based on the computational fluid dynamics software Ansys Fluent, the effects of different blockage area, thickness, type and position on the deterioration of heat transfer and the properties of flow field in current plugging accident are analyzed. The results show that the increasing of blockage area will increase the reflux area, which makes the temperature fall more slowly and the heat transfer worsen obviously; the increasing of the blockage thickness will lead to the increasing of the maximum temperature of coolant and cladding, which can easily lead to cladding damage; the coolant in the porous medium blockage passes at a lower flow rate, which alleviates the influence of blockage and does less harm than the solid blockage. The local warming caused by the blockage located in the middle of the active area is more obvious and more harmful than that caused by the blockage in the entrance and exit of the active area.

Key words: Lead-based fast reactor, Flow blocking accident, Computational fluid dynamics

0 引 言

铅基快堆中, 冷却剂对管路造成的腐蚀和冲

刷将产生大量的从几微米到几百微米不等的^[1]固相杂质沉积, 极易造成堵流事故。此外, 燃料棒

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-04-26

作者简介: 陈宝文 (1979—), 男, 高级工程师, 现从事热工水力与安全研究工作, E-mail: 403916795@qq.com

*通讯作者: 凌煜凡, E-mail: 1078665964@qq.com

的定位绕丝脱落至流道内，热膨胀和辐照肿胀引起的燃料棒变形^[1]等也是造成堵流的重要原因之一。当发生堵流事故后，冷却剂因堵块阻塞而产生回流区并导致传热恶化，可能威胁到包壳的完整性。为解决这一问题，国内外开展了大量的模拟研究。龚昊^[2]采用计算流体力学（CFD）方法对热功率为 10 MW 的铅铋冷快堆单盒燃料组件棒束入口段和中心段堵流工况进行了研究。赵鹏程等^[3]以 100 MW 小型模块化自然循环铅冷快堆（SNCLFR-100）为研究对象，采用 ATHLET MOD3.0A 系统程序开展堆芯功率最大组件局部堵流事故瞬态分析。刘天才等^[4]使用 RELAP5 程序模拟了中国先进堆（CARR）单盒燃料组件入口全堵后的反应性、压力、流量、温度、堆功率的变化。杨云等^[5-6]运用 CFD 程序模拟了堵块间隙率对反应堆堆芯带来的危害。尧俊等^[7]运用流体力学软件 STAR-CCM+ 对不同参数下 5 个堵流事故工况进行了计算分析，获得了各种堵块参数对堵流事故后传热恶化、流场性质的不同影响规律。DAVARI^[8]利用 Fluent 程序对德黑兰研究堆（TTR）因燃料元件发生弯曲变形而造成的堵流事故进行模拟，结果表明堵塞物会使冷却剂在各个流道之间发生再分配的现象。

为系统研究堵块面积、厚度、类型以及位置对流动传热的影响，本文以中国科学院设计的 10 MW 铅铋冷却快堆为对象，构建棒束为 19 根燃料棒的单盒燃料组件模型，并利用 CFD 软件 ANSYS Fluent 对堵流事故进行模拟分析。

1 堵流事故模拟

1.1 几何建模

表 1 给出了单盒燃料组件主要几何参数，基于 SolidWorks 软件对活性区流体区域进行几何模型构建。

1.2 材料物性

中国科学院所设计的 10 MW 铅铋快堆选用液态铅铋共晶体（LBE）为冷却剂，其物性随温度变化规律可参考铅铋合金手册，各物性公式如表 2 所示。

1.3 网格敏感性分析

为确保网格疏密程度不会对模拟结果产生较大影响，本文选取低密度网格数为 1.5×10^6 、中

表 1 单盒燃料组件主要参数

Tab. 1 Main Parameters of a Single-Box Fuel Assembly

参数名	参数值
棒束排列方式	三角形
燃料棒数量	19
燃料棒外径/mm	15
棒间距与棒径比	1.07
组件盒内对边距/mm	76.50
活性区长度/mm	800
芯块直径/mm	12.7
包壳-燃料芯块间隙/mm	0.25
包壳厚度/mm	0.9
包壳材料	316钢
燃料材料	UO ₂

表 2 液态金属 LBE 材料物性表

Tab. 2 Liquid Metal LBE Material Properties

参数名	参数值
定压比热容	$159 - 2.72 \times 10^{-2}T + 7.12 \times 10^{-6}T^2$
密度	$11096 - 1.1944T$
热导率	$9.2 + 0.011T$
粘性	$4.56 \times 10^{-3} - 7.03 \times 10^{-6}T + 3.61 \times 10^{-9}T^2$

T—温度

等密度网格数为 5.0×10^6 、高密度网格数为 1.0×10^7 的 3 种不同尺寸网格进行网格敏感性分析，最终采用的网格数为 5.0×10^6 。

1.4 堵块模拟分析

堵块一般是由高温下铅铋对结构材料、燃料包壳等腐蚀而产生的，目前关于堵块的材料特性尚无确切结论。一般情况下，较为通用的方法是人为选取特定的流道、位置、厚度的堵块进行模拟分析。对于实心堵块模拟，采用包壳和绕丝材料（316 钢）填充冷却剂流道实现堵流条件。对于多孔介质堵块的模拟，本文选用 ERGUN^[9] 多孔介质模型，该模型对标准的流体动量方程进行了处理，引入一个附加动量项：

$$-\nabla p = A \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu v}{\varepsilon^3 d_p^2} + B \frac{(1-\varepsilon) \rho v^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (1)$$

式中， p 为流体压强，Pa； v 为流体的来流速度，m/s； ε 为孔隙率，用于描述多孔介质空隙总体积和多孔介质总体积的比值，为无量纲数； μ 为动力粘度，Pa·s； d_p 为多孔介质内间隙颗粒直径，本文设置为 0.001 m； ρ 为流体的密度，kg/m³； A 、

B 为参数, 采用 Ergun 推荐值为 150 和 1.75。式 (1) 中等式右边为粘性损失项和惯性损失项。

1.5 湍流数值模型

常用的 CFD 软件的湍流模型有 3 种: 标准 (standard) 雷诺应力 ($k-\varepsilon$) 模型、切应力输运 (SST) $k-\omega$ 模型、可实现的 (Realizable) $k-\varepsilon$ 模型等。其中, Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型能很好地模拟管内流动和混合流的自由流动, 且尧俊等已利用 PACIO^[10] 的铅铋冷却回路实验数据验证此模型的适用性, 因此本文选用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型。

关于 CFD 数值离散方法和算法的选择, 选用较为通用的 SIMPLE 算法, 离散格式采用二阶迎风格式 (Second Order Upwind) 以提高计算精度。

1.6 边界条件

反应堆燃料组件轴向功率 $q(x)$ 分布如下式:

$$q(x) = 78122.8 \sin\left(\frac{\pi x}{0.8}\right) \quad (2)$$

式中, x 为高度, m。

将式 (2) 以函数形式导入 Ansys Fluent。其余边界条件设定见表 3。

表 3 计算输入
Tab. 3 Calculation Input

项目	条件
湍流模型	Realizable $k-\varepsilon$
冷却剂入口温度/K	533
冷却剂入口流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.123
燃料组件外壁面	绝热
出口设置	压力出口

1.7 堵流算例分析

计算工况如表 4 所示。

2 模拟结果分析

基于单一变量原则对以上工况进行分组, 用于分析堵块面积、堵块厚度、堵块类型和堵块位置对堵流事故后温度分布和流场特性的不同影响规律。

2.1 堵块面积的影响

为分析堵块面积对堵流事故所造成的影响, 选取堵流工况 P1、P2、P3, 其堵块面积分别为 6、

表 4 拟定的堵流工况

Tab. 4 Selected Cases of Blockage Accident

工况编号	堵块介质	堵块厚度/mm	子通道编号	堵块中心高度/mm	占总流道的面积/%
P1	实心堵块	10	1~6	400	11.6
P2	实心堵块	10	1~7、10、13、16、19、22	400	23.1
P3	实心堵块	10	1~24	400	46.4
P4	实心堵块	20	1~6	400	11.6
P5	实心堵块	40	1~6	400	11.6
P7	实心堵块	10	1~24	795	46.4
P8	实心堵块	10	1~24	5	6.4
B1	多孔介质 (30%孔隙率)	10	1~6	400	11.6

12、24 个子通道。通过 Ansys Fluent 后处理功能提取出 P1、P2、P3 工况的冷却剂温度, 结合理论计算得出燃料棒包壳温度数据并与正常工况进行对比分析 (图 1)。

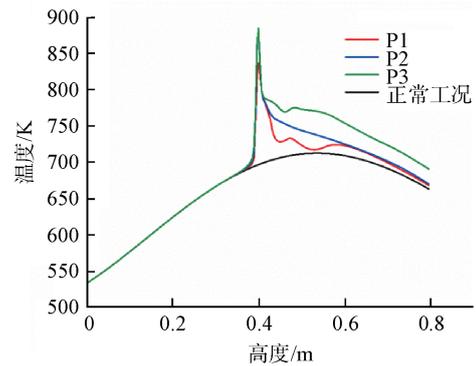


图 1 堵块面积影响 1 号燃料棒包壳轴向温度分布
Fig. 1 Block Area Affects Axial Temperature Distribution of No. 1 Fuel Rod Shell

从图 1 中可以看出, 堵块上游温度随堵块面积的增加而相应提升, 燃料棒包壳最高温度也不断上升。除此之外, 随着堵块面积的增加, 活性区燃料棒包壳出口温度也不断增加。这是由于堵块面积不同造成堵块后回流区面积不同, 回流速度也不同。随着堵块面积不断增加, 堵块后回流区面积和回流速度也不断增大。

分析表明, 冷却剂温度变化趋势与燃料棒包壳类似, 最高温度仍出现在堵块中心处, 且随着高度的提升, P2、P3 工况下温度趋于正常水平, 与正常工况的温差不断减小。

2.2 堵块厚度的影响

为分析堵块厚度对堵流事故的影响, 选取工

况 P1、P4、P5 开展对比分析 (图 2)。由图 2 可知, 由于堵块厚度不断增加, 堵块中心附近燃料包壳温度急剧上升, 其中 P5 工况下燃料包壳最高温度接近 1100 K, 极易引起包壳破损。

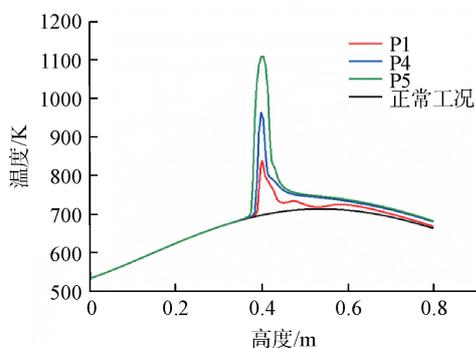


图 2 堵块厚度影响 1 号燃料棒包壳轴向温度分布
Fig. 2 Thickness of Block Affects Axial Temperature Distribution of No. 1 Fuel Rod Shell

随着堵块厚度的增加, 堵块后方的回流程度减少, 轴向速度接近于 0, 而堵块侧面的回流区未受影响, 其出现的位置都位于堵块起始点附近。

分析表明, 堵块厚度对 1 号子通道冷却剂的影响与其对燃料棒包壳温度分布影响类似。

2.3 堵块类型的影响

堵块按介质材料可分为实心堵块和多孔介质堵块 2 种类型。为分析堵块类型对堵流事故的影响, 选取 P1、B1 工况进行模拟分析, 并与正常工况进行对比 (图 3)。

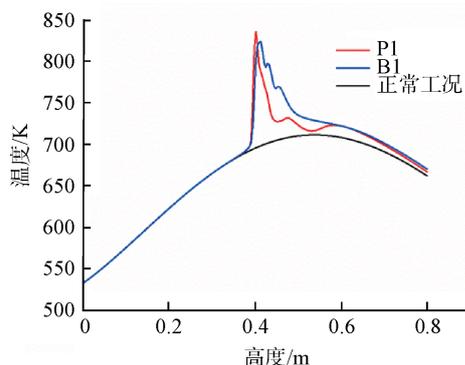


图 3 堵块类型影响 1 号燃料棒包壳轴向温度分布
Fig. 3 Block Type Affects Axial Temperature Distribution of No. 1 Fuel Rod Shell

由图 3 可见, 实心堵块比多孔介质堵块造成的影响更为严重, 且在堵块后方两者温度都出现

了小范围波动, 这是由堵块后方的回流区引起的。不同的是实心堵块的最高温度出现在堵块中心处, 而多孔介质堵块的最高温度向堵块中心点后方偏移。这是由于多孔介质堵块中有少量冷却剂以较低的流速穿过堵块内部, 带走了部分热量。在堵块下游, 实心堵块的温度回落更为明显, 而多孔介质堵块呈现出阶梯状回落。因此, 相较于多孔介质堵块而言, 实心介质堵块将会对堆芯材料造成更为严重的损坏。

此外, 多孔介质堵块引起的堵块侧面的回落区域小于实心堵块, 且堵块后方回落区域的形成滞后于实心堵块。这是由于堵块内部的低流速冷却剂缓解了堵块对冷却剂流速的影响。

2.4 堵块位置的影响

P3、P8 工况中堵块位置分别位于燃料棒活性区中部和活性区入口处, 对活性区影响较大, 提取冷却剂数据并计算燃料棒包壳温度 (图 4)。

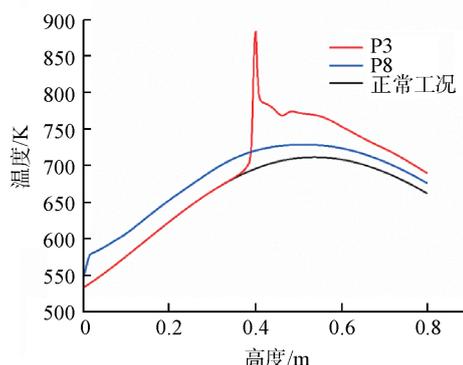


图 4 堵块位置影响 1 号燃料棒包壳轴向温度分布
Fig. 4 Block Position Affects Axial Temperature Distribution of No. 1 Fuel Rod Shell

由图 4 可见, 2 种堵流工况下包壳温度随高度变化趋势相同。P3 工况下, 由于堵块位于活性区中部, 组件热功率高, 升温更为明显并出现峰值。随后由于热功率的下降和冷却剂流量逐渐稳定, 燃料棒包壳温度出现回落; P8 工况下, 堵块位于通道入口造成局部温升, 致使该区域冷却剂流量下降从而导致 1 号燃料棒包壳温度整体高于正常工况下的温度。

P7 工况下堵块位于活性区出口处, 其热流密度小, 因此不会出现明显升温, 但堵块的存在会促进各流道直接的冷却剂流量交换, 导致活性区出口处冷却剂径向温度分布更为均匀。

3 结 论

本文主要基于 Ansys Fluent 程序对铅铋冷却快堆单盒燃料组件进行数值模拟,分析了堵块面积、厚度、类型和位置对燃料棒包壳温度的影响。得出主要结论如下:

(1) 堵块面积的增大会引起回流区的增大,导致堵块下游冷却剂温度普遍高于正常温度,且当堵块面积达到一定程度时,堵块面积的增加对燃料棒包壳、冷却剂最高温度的影响降低。

(2) 在一定堵块面积的基础上,堵块厚度的增加,会引起堵块、燃料棒包壳、冷却剂最高温度急剧上升,极易引起燃料棒包壳烧毁或者因热应力过大而导致燃料棒包壳破损。

(3) 实心堵块比多孔介质堵块所造成影响更为严重。实心堵块温度最高点都出现在堵块中心点,而多孔介质堵块最高温度出现位置较之堵块中心点向下偏移。相比于实心堵块,多孔介质堵块对流量的影响更小。

(4) 堵块位置的不同影响堵块附近冷却剂和包壳的升温速率和最大温度点所处位置,当堵块位于入口处时最高温度出现在活性区末端,且温度随着高度发展趋近于正常温度;当堵块位于活性区中部,最高温度出现在堵块内部,且升温速率明显,极易导致包壳损毁。

参考文献:

- [1] 徐铼,张东辉,任丽霞.快堆安全分析[M].北京:中国原子能出版传媒有限公司,2011:80-86.
- [2] 龚昊.铅铋冷却快堆单盒组件堵流事故分析研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.
- [3] 赵鹏程,刘紫静,于涛.小型自然循环铅冷快堆无保护最热组件局部堵流瞬态分析[J].核动力工程,2019,40(1):23-27.
- [4] 刘天才,金华晋,袁履正.中国先进研究堆堵流事故分析[J].核动力工程,2006(S2):32-35,44.
- [5] 杨云,赵磊,胡文军,等.单盒钠冷快堆燃料组件堵流事故的CFD分析[J].原子能科学技术,2019,53(12):2398-2404.
- [6] 杨云.基于数值模拟的钠冷快堆燃料组件堵流事故分析[D].上海:上海交通大学,2019.
- [7] 尧俊,张熙司,胡文军,等.铅铋冷却快堆堵流事故下堵块参数对流动传热的影响[J].核技术,2018,41(2):80-88.
- [8] DAVARI A, MIRVAKILI S M, ABEDI E. Three-dimensional analysis of flow blockage accident in Tehran MTR research reactor core using CFD[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015(85): 605-612.
- [9] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 1952, 48(2): 89-94.
- [10] PACIO J, DAUBNER M, FELLMOSE F, et al. Heavy-liquid metal heat transfer experiment in a 19-rod bundle with grid spacers[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014(273): 33-46.

(责任编辑:孙 凯)