



·研究堆应用技术专题·

板状燃料组件流道部分堵塞的安全边界研究*

丁文杰, 王少华, 高 娇, 郭海兵, 马纪敏, 刘志勇

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为掌握板状燃料组件内多个流道堵塞下的流动换热特性, 获得流动堵塞致传热恶化的触发边界, 以提高板状燃料反应堆的运行安全性, 以典型板状燃料堆 JRR-3M 的标准燃料组件为对象, 基于定性分析将流道堵塞事故分为非相邻流道堵塞与相邻流道堵塞两类, 采用计算流体动力学软件 ANSYS Fluent 对两类流道堵塞事故下的流动换热特性进行模拟。模拟结果表明: 非相邻流道完全堵塞或相邻流道最大堵塞率低于 35%, 流道内不会发生局部沸腾且燃料最高温度低于许用温度。基于上述结果, 可确定 JRR-3M 反应堆在堵流事故下的安全运行边界。

关键词: 板状燃料组件; 部分堵塞; 安全边界; 数值模拟; 流动换热

中图分类号: TL33

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210508

Safety boundary of flow channel partial blockage in plate-type fuel assembly

Ding Wenjie, Wang Shaohua, Gao Jiao, Guo Haibing, Ma Jimin, Liu Zhiyong

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: It is necessary to obtain the triggering boundaries of heat transfer deterioration by mastering the flow and heat transfer characteristics in plate-type fuel assembly with multiple channels blocked, to improve the operation safety of plate-type fuel reactors. Based on qualitative analysis, the flow channel partial blockage accidents can be divided into non-adjacent channel blockage accident and adjacent channel blockage accident for the standard fuel assembly of the typical plate-type fuel reactor JRR-3M. Furthermore, the simulations of the flow and heat transfer characteristics under the two types of accidents were carried out using the computational fluid dynamics software ANSYS Fluent. The simulation results show that local boiling will not occur in flow channels and the maximum fuel temperature will be lower than the allowable temperature when non-adjacent channels are completely blocked or the maximum blocking rate of adjacent channels is less than 35%. Therefore, the safety operation boundary of JRR-3M reactor under flow channel blockage accident can be determined.

Key words: plate-type fuel assembly, partial blockage, safety boundary, numerical simulation, flow and heat transfer

板状燃料组件具有结构紧凑、换热效率高、深燃耗等特点, 故被广泛应用在一体化反应堆和实验用研究堆中^[1]。然而, 板状燃料内的流道狭窄且各流道间不相互连通, 当外来异物进入堆芯, 极易引发流道堵塞事故(如 ETR 堵流事故^[2]、ORR 堵流事故^[3]等), 进一步导致传热性能恶化、燃料烧毁。因此, 通过分析流道堵塞后的流动换热特性, 确定传热性能恶化/燃料烧毁的触发边界, 对板状燃料堆的安全运行至关重要。随着对板状燃料流道堵塞问题的持续关注, 国内外已开展了大量的板状燃料堆流道堵塞事故的数值模拟分析。Martina Adorni^[4]采用 RELAP5/MOD3.3 程序对 IAEA 10 MW MTR 池式研究堆一盒标准燃料组件发生流道堵塞下的系统瞬态响应进行了分析; 李金才^[5]采用堆芯子通道热工水力分析程序 COBRA-IIIC/MIT-2 对 JRR-3M 20 MW 堆中冷却剂流速 4.5~7.5 m/s、流道堵塞率 0~80% 范围内的热工水力特性进行了分析计算; 郭玉川^[6-8]采用 RELAP5/MOD3.4 程序对 JRR-3M 20 MW 堆流道堵塞事故与失流事故叠加时的系统瞬态响应展开了分析; 宋磊^[1,9]、Amgad Salama^[10-12]等采用 Fluent 程序对 IAEA 10 MW MTR 堆的单通道堵塞情况进行了分析计算。由于板状燃料的换热与相邻两个流道均相关, 组件内不

* 收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2022-03-04

基金项目: 中国工程物理研究院核物理与化学研究所发展项目 (XX0206)

联系方式: 丁文杰, dwjcaep@163.com。

同流道堵塞情形下对应的换热性能存在明显差异,同时相邻流道堵塞率差异、堵塞物空间位置分布差异导致堵流问题存在多种可能性,故上述研究中采用三维分析方法通常仅对一个流道展开研究,而更多研究者采用集总参数分析方法将组件整体作为一个单通道进行分析,但该建模方法却又无法考虑相邻流道不同堵塞率以及堵塞物空间分布带来的影响。综上,目前尚缺乏基于三维分析方法对板状燃料多个流道同时堵塞问题的研究,为此,本文以典型板状燃料实验堆 JRR-3M 组件为对象,采用计算流体动力学软件 ANSYS Fluent 程序,对多个流道堵塞事故下的流动换热性能展开分析,进而确定流道堵塞后反应堆仍可安全运行的事故边界(简称“安全边界”)。

1 堵流事故分类与安全边界确定

如图 1 所示, JRR-3M 标准燃料组件由 21 块燃料板组成,每块燃料板由外侧 6061 铝包壳与 U_3Si_2 -Al 弥散型核燃料构成,每两块燃料板间距为 2.35 mm,其与周边的铝板共同构成冷却剂流道^[13]。

当外来异物流入堆芯, JRR-3M 狭长的流道结构导致其极易发生堵流,但堵塞物的形状及堵塞位置通常难以预判,导致有无数种堵塞的可能性,为简化分析,本研究将流道堵塞事故分为如下两类。

(1)非相邻流道堵塞事故。在某些事故工况下(如由于燃料元件的辐照肿胀导致流道堵塞),某个流道发生堵塞但其相邻两侧流道均未发生堵塞。当多个流道发生堵塞时,每两个堵塞流道中间至少相隔一个未堵塞的流道,显然,单个流道发生堵塞也属于该情形。对于非相邻流道堵塞事故,完全堵塞流道与未堵塞流道交替排布(后续简称“非相邻流道完全堵塞事故”)是该事故的极限工况,此时,若未堵塞流道内的冷却剂可带走正常工况下两倍的热量,组件内仍不会出现传热恶化现象。

(2)相邻流道堵塞事故。在某些事故工况下(如堆内材料碎片或异物堵塞组件冷却剂入口),导致至少存在两个相邻流道发生堵塞。对于相邻流道堵塞事故,组件内所有流道均发生完全堵塞是该事故的极限情况,显然,此时组件内必然会发生传热恶化现象。但考虑到组件内所有流道完全堵塞的发生几率较小,而部分相邻流道在不同位置出现不同堵塞率的发生几率较高,可对该事故的极限情况放宽,即将组件内所有流道均在最容易引发传热恶化的位置发生流道堵塞且各流道堵塞率均为最高流道堵塞率的情形(后续简称“相邻流道等份额堵塞事故”)作为该事故的极限工况。

考虑到汽液两相流动换热过程复杂且计算结果具有较大的不确定性,基于保守假定并参考文献[5]数据,将局部流体最高温度高于沸点 373.15 K 或燃料区(包括燃料芯体与铝包壳)最高温度高于 673.15 K 作为传热恶化现象的触发条件。当热组件中的最热通道堵塞事故达到极限工况仍未出现传热恶化,则尚未达到极限工况的流道堵塞事故必然不会出现传热恶化,因此,对两类事故的极限工况进行分析,最接近但尚未导致传热恶化出现的极限工况即为安全边界。

2 数值模型

2.1 几何模型

对于非相邻流道完全堵塞事故,当未出现传热恶化现象时,未堵塞的流道需带走两侧燃料板的所有热量,该情形可通过对单个流道建模并分别在核燃料上加载体热源外、燃料区对称面上加载等值热流量来实现。由于单个组件的流道堵塞并不会显著影响堆芯整体流动,即堆芯进出口压降始终保持恒定,则流道堵塞分析模型的进出口同样应采用压力边界,为充分考虑堆芯组件进出口以及堵塞物的局部形阻影响,在组件流道进出口分别增加了 300 mm 的流体域,并将该流体域壁面设置为自由滑移壁面,如图 2(a)所示。

对于相邻流道等份额堵塞事故,各流道堵塞情况相同,同样只需对单个流道建模。考虑到堵塞物所处位置不同带来的影响,需对不同堵塞位置分别进行分析。当 JRR-3M 正常运行时,强迫循环冷却系统开启,冷却剂从顶部

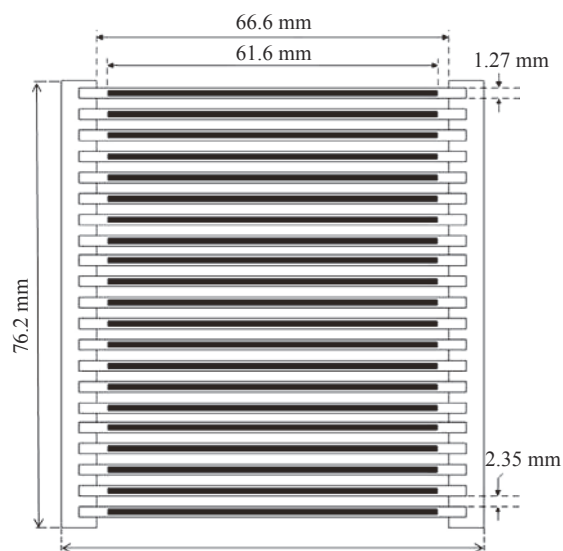


Fig. 1 Sectional view of JRR-3M standard fuel assembly

图 1 JRR-3M 标准燃料组件剖面图

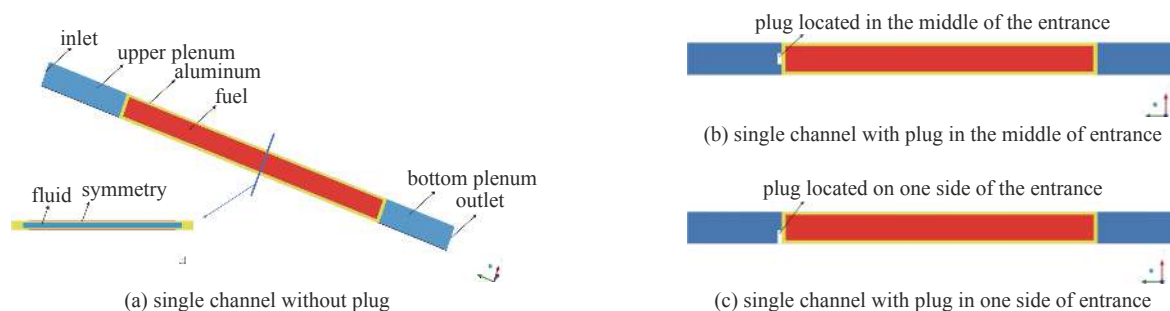


Fig. 2 Geometry model

图2 几何模型

向下流动,故堵塞物通常停留在入口位置。考虑到燃料板体释热率仅随轴向高度变化^[13],故堵塞物位于入口正中间与入口一侧为两种极端情况,见图2(b)(c)。本文将流道被堵塞面积与完整流道横截面积比值定义为堵塞率,则在相同堵塞率下,堵塞物处于两种极端情况之间的位置,其换热性能也将处于两种工况之间,故只需比较该两种极端情况分析结果。

2.2 参数设置

研究中采用单相流动换热模型,湍流模型采用 Realizable k- ϵ 模型,近壁面采用 Scalable 壁面函数。流体域水的定压比热取 $4182 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,其余热物性参数均为温度的函数,即

$$\rho = 150.99277 + 7.54409T - 0.02122T^2 + 1.82226 \times 10^{-5}T^3 \quad (1)$$

$$\lambda = -0.765 + 8.378 \times 10^{-3}T - 1.49 \times 10^{-5}T^2 + 7.5737 \times 10^{-9}T^3 \quad (2)$$

$$\mu = 0.02827 - 1.9941 \times 10^{-4}T + 4.729 \times 10^{-7}T^2 - 3.743 \times 10^{-10}T^3 \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; λ 为热导率; μ 为动力粘性; T 为绝对温度。

固体域材料的热物性参数如表1所示。

表1 固体域材料的热物性参数^[13-15]

Table 1 Thermophysical parameters of solid materials

material	density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	specific heat/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	thermal conductivity/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
6061Al	2700	896	170
$\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$	6000	406.7	32

参考文献[13]可知:堆芯平均入口温度 308.15 K,轴向功率峰因子 1.344,径向功率峰因子 1.66,局部功率峰因子 1.36,工程热通道因子 1.16,每块燃料板的体释热率仅是轴向位置的函数。参考文献[13]给出的堆芯轴向功率分布图,拟合为堆芯轴向归一化功率因子计算公式,即

$$F_a = \max(F_{a,1}, F_{a,2}, F_{a,3}) \quad (4)$$

式中: F_a 为轴向归一化功率因子; $F_{a,1}$ 、 $F_{a,2}$ 、 $F_{a,3}$ 为三条拟合曲线,其计算式为

$$F_{a,1} = -2.1452 \cdot L + 0.5614 \quad (5)$$

$$F_{a,2} = 13.153L^5 - 26.467L^4 + 13.524L^3 - 1.461L^2 + 1.647L + 0.361 \quad (6)$$

$$F_{a,3} = 2.6277L - 1.6026 \quad (7)$$

其中: L 为燃料区计算节点轴向方向距堆芯入口的相对位置。

分别采用 104466、200500、453855 网格量对平均组件(参考文献[13]可知,平均组件流道内部的流体平均流速为 5.84 m/s)进行模拟,计算结果如表2所示。从表2可看出,三套网格获得的平均组件进出口压降、平均对流换热系数以及燃料最高温度结果相一致,即计算结果具有网格无关性。

根据平均组件计算结果(表2)可知,堆芯进出口压降为 57.99 kPa,并以此设定堵流事故分析的进出口定压边界条件。为保证计算结果的保守性,所建立的单流道分析模型的加热功率均采用热通道功率值。根据 JRR-3M 热组件中的最热通道参数可知,其加热功率是堆芯平均功率的 2.619 倍。

表 2 不同网格量下的平均组件计算结果

Table 2 Average assembly calculation results under different grid sizes

number of grids	pressure drop/kPa	mean convective heat transfer coefficient / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	maximum fuel temperature /K
104 466	57.99	33 196.41	339.65
200 500	57.52	33 197.97	339.44
453 855	57.33	33 120.20	339.92

3 分析与讨论

3.1 非相邻流道完全堵塞事故分析

基于上述模型与边界条件,开展非相邻流道完全堵塞事故数值模拟,计算结果如图3所示。在该计算工况下,热通道入口温度为308.15 K,与堆芯入口温度相同,出口温度345.09 K,比堆芯平均出口温度高29.74 K。流体温度升高,其黏性降低,通道内流体平均流速比平均组件流速略有增加,为5.96 m/s。热通道与上下联箱交汇处的流通面积呈阶梯式变化,导致冷却剂流体在下联箱内出现回流区(见图3(a)),并在下联箱内形成局部的低压区(见图3(b)),但回流区与低压区均包含在下联箱内且下联箱出口位置流体已充分发展(见图3(a)(b)),表明模型上下联箱的高度选取是合理的。在该计算工况下,流体最高温度为351.64 K(见图3(c)),低于沸点温度,同时燃料区最高温度为395.87 K(见图3(d)),远低于许用温度,即非相邻流道完全堵塞事故发生后,未堵塞的流道冷却剂可带走两侧核燃料产生的所有热量,不会出现传热恶化现象,即非相邻流道完全堵塞是JRR-3M流道堵塞事故的一个安全边界。

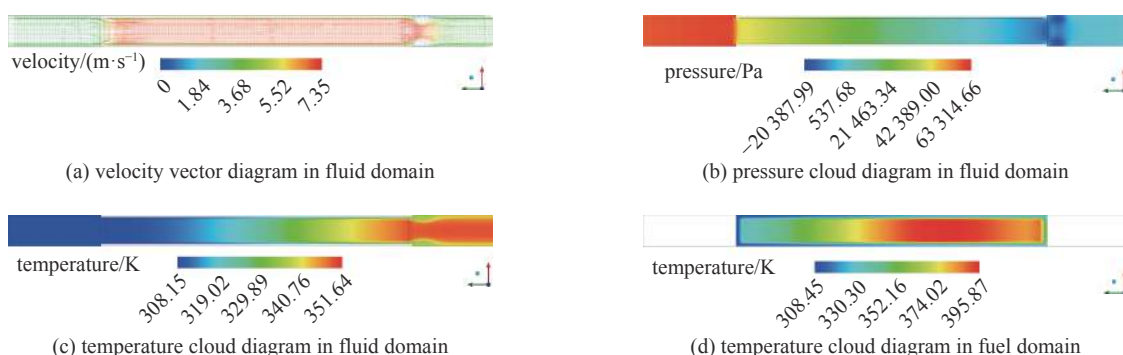


Fig. 3 Analysis results of non-adjacent channel complete blockage accident

图 3 非相邻流道完全堵塞事故分析结果

3.2 相邻流道等份额堵塞事故分析

图4给出了流道堵塞率为50%且堵塞物位于入口中间位置的分析结果。从图中可以看出,堵塞物的出现导致流通面积减小、局部形阻增大,流道内平均流速降低至4.39 m/s;流体在堵塞物下游形成回流区(见图4(a)),回流区范围约占通道长度的1/5,此后流体进入充分发展阶段。回流区内流体被加热后主要依靠流体间的扩散作用将热量导出,换热性能大幅下降,导致堵塞物下游的局部流体温度显著提升(对比图4(b)与图3(c));由于堵塞物下游回流区内的流体温度较高且流速较低,对应位置的燃料区温度大幅提升,在堵塞物下游形成了新的燃料高温区(对比图4(c)与图3(d))。在该工况中,冷却剂最高温度为358.15 K(低于沸点),燃料区最高温度为390.59 K(低于许用温度),即该工况下不会出现传热恶化现象。

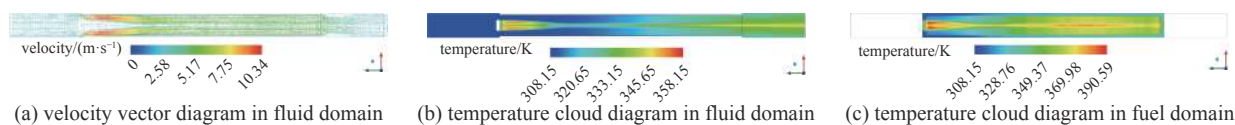


Fig. 4 Analysis results with plug in the middle

图 4 堵塞物位于中间的分析结果

图5给出了流道堵塞率为40%且堵塞物位于入口一侧的分析结果,与堵塞物位于中间位置不同,流体在堵塞物下游形成单向回流区(见图5(a)),流道内平均流速因堵塞物出现而降低至5.08 m/s。回流区内流体最高温度达387.61 K(见图5(b)),超过流体沸点温度,通道内流体将出现局部沸腾现象,即触发本研究假定的传热恶化条件。

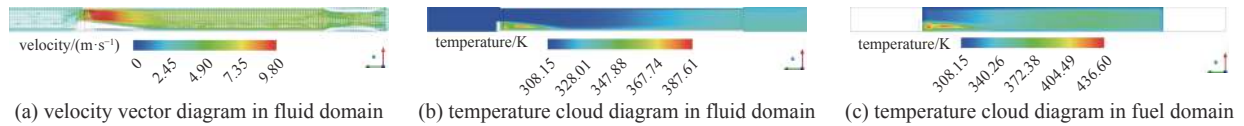


Fig. 5 Analysis results with plug in one side

图5 堵塞物位于一侧的分析结果

回流区内的流体换热能力下降使固体域的温度也随之上升,在堵塞物下游局部高温区域(见图5(c)),但该处的最高温度(436.60 K)仍远低于固体材料的许用温度。

基于以上分析,本文对不同流道堵塞率及堵塞位置工况进行了模拟,模拟结果见表3(表中, $T_{\text{fluid,max}}$ 为流体最高温度; $T_{\text{fuel,max}}$ 为燃料最高温度; V_{ch} 为流道内的流体平均流速; T_{out} 为出口平均温度)。可以看出,随着流道堵塞率的增加,通道内冷却剂平均流速不断下降,出口温度不断上升,但出口温度明显低于冷却剂的最高温度;另一方面,相同堵塞率下,堵塞物位于入口一侧的出口温度略低于堵塞物位于入口中间的出口温度,但其冷却剂及燃料区的最高温度偏高。不难看出,回流区是影响冷却剂与燃料区最高温度的主要因素,单回流区的换热性能要明显低于双回流区,而相同类型的回流区范围越大,冷却剂与燃料区的最高温度越高。由此可知,当堵塞物位于入口一侧最易引发传热恶化,同时根据表3结果可知,当流道堵塞率低于35%时,不会出现传热恶化,即低于35%堵塞率的相邻流道堵塞是 JRR-3M 流道堵塞事故的另一个安全边界。

表3 不同堵塞率及堵塞位置的分析结果

Table 3 Analysis results of different blockage rates and positions

No.	blockage rate/%	plug position	$T_{\text{fluid,max}}/\text{K}$	$T_{\text{fuel,max}}/\text{K}$	$V_{\text{ch}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	T_{out}/K
1	30	middle	337.82	365.61	5.29	329.12
2	35	middle	340.07	368.32	5.07	329.88
3	40	middle	343.56	371.82	4.89	330.68
4	45	middle	345.68	375.51	4.66	331.76
5	50	middle	358.15	390.59	4.39	333.14
6	55	middle	368.59	397.68	4.10	335.04
7	60	middle	383.58	413.68	3.75	337.67
8	30	side	345.35	402.03	5.44	328.44
9	35	side	369.32	415.48	5.29	329.13
10	40	side	387.61	436.60	5.08	330.02

4 结论

本文通过对 JRR-3 标准燃料组件几何特征的定性分析,将板状燃料流道堵塞事故分为非相邻流道堵塞事故与相邻流道堵塞事故两类,采用 Fluent 程序对 JRR-3M 热组件热通道的两类堵流事故进行了数值研究。通过模拟,得到如下结论:非相邻流道完全堵塞事故发生后,未堵塞的流道冷却剂可带走核燃料产生的所有热量,堆芯不会出现传热恶化现象;多个相邻流道发生堵塞事故后,若各通道的最大堵塞率低于35%,不会出现传热恶化现象。非相邻流道完全堵塞与低于35%堵塞率的相邻流道堵塞是 JRR-3M 流道堵塞事故的安全边界。本文提出的堵流事故分类方法及安全边界分析可以用于其它板状燃料堆堵流事故预测;但对于燃料板径向功率非均匀分布情形以及局部沸腾发生后的传热性能是否发生恶化,仍需进一步开展研究。

参考文献:

- [1] 宋磊, 郭赞, 曾和义. 板状燃料组件入口堵流事故下流场和温度场的瞬态数值计算[J]. 核动力工程, 2014, 35(3): 6-10. (Song Lei, Guo Yun, Zeng Heyi. Numerical analysis on transient flow and temperature field during inlet flow blockage accidents of plate-type fuel assembly[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(3): 6-10)
- [2] Keller F R. Fuel element flow blockage in the engineering test reactor[R]. IDO-16780, 1962.
- [3] Sims T M, Tabor W H. Report on fuel-plate melting at the Oak Ridge Research Reactor[R]. ORNL-TM-627, 1964.
- [4] Adomi M, Bousbia-Salah A, Hamidouche T, et al. Analysis of partial and total flow blockage of a single fuel assembly of an MTR research reactor core[J]. Annals of Nuclear Energy, 2005, 32(15): 1679-1692.

- [5] 李金才, 王平. COBRA-III C/MIT-2程序的改进及其在高通量研究堆中的应用[J]. 核科学与工程, 1996, 16(1): 35-41. (Li Jincai, Wang Ping. The improvement of COBRA III C/MIT-2 and its application to research reactor[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1996, 16(1): 35-41)
- [6] Guo Yuchuan, Wang Guanbo, Qian Dazhi, et al. Thermal hydraulic analysis of loss of flow accident in the JRR-3M research reactor under the flow blockage transient[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, 118: 147-153.
- [7] Guo Yuchuan, Wang Guanbo, Qian Dazhi, et al. Transient thermal-hydraulic analysis of single flow channel blockage in the JRR-3M 20-MW research reactor[J]. *Nuclear Technology*, 2018, 204(1): 15-24.
- [8] 郭玉川. 板状燃料元件堆流道堵塞事故分析[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019: 37-42. (Guo Yuchuan. Analysis of plate fuel element reactor channel blockage accident[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2019: 37-42)
- [9] 宋磊. 板状燃料组件堵流事故数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013: 8-12. (Song Lei. Numerical analysis of the flow blockage accidents in plate-type fuel assembly[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013: 8-12)
- [10] Salama A, El-Morshed S E D. CFD simulation of flow blockage through a coolant channel of a typical material testing reactor core[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2012, 41: 26-39.
- [11] Salama A. CFD investigation of flow inversion in typical MTR research reactor undergoing thermal-hydraulic transients[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, 38(7): 1578-1592.
- [12] Salama A, El-Morshedy S E D. CFD analysis of flow blockage in MTR coolant channel under loss-of-flow transient: hot channel scenario[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2012, 55: 78-92.
- [13] Albati M A, Al-Yahia O S, Park J, et al. Thermal hydraulic analyses of JRR-3: Code-to-code comparison of COOLOD-N2 and TMAP[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, 71: 1-8.
- [14] 韩华. 弥散型燃料元件的热稳定性实验研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2003: 13. (Han Hua. Experimental study on thermal stability of diffuse fuel element[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2003: 13)
- [15] 孙荣先. U_3Si_2 -Al弥散型燃料元件[J]. 核动力工程, 1990, 11(2): 69-74. (Sun Rongxian. U_3Si_2 -Al dispersion fuel element[J]. Nuclear Power Engineering, 1990, 11(2): 69-74)