

# 铅铋快堆单盒环形燃料组件典型堵流 事故分析

陈琪 凌煜凡 赵鹏程 赵亚楠 于涛  
(南华大学核科学技术学院 衡阳 421001)

**摘要** 铅铋冷却环形燃料组件具有许多安全性优势,但在其运行过程中由于铅铋冷却剂的腐蚀作用,易发生堵流事故而导致传热恶化,从而危及第一道屏障的完整性,为此,亟须开展铅铋快堆环形燃料组件堵流事故研究。建立5×5单盒环形燃料组件模型,基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件Fluent对内外通道不同堵塞面积、堵块厚度,以及堵块轴向位置下的堵流工况进行模拟分析,分析了内外包壳温度分布、堵块附近流场的轴向速度分布、通道质量流量变化、堵塞处燃料元件径向温度分布以及热量分配,并与正常工况下计算结果进行对比。结果表明:随堵塞面积增加,堵塞区域包壳温度显著上升,回流区域范围扩大,燃料芯块最高温度点位置向堵块侧偏移,堵块侧热流密度减小;当堵塞份额较大时,随堵块厚度增加,各参数变化与上述结论类似;堵块位于入口处时包壳局部温升较堵块位于中心处时更小;且随堵塞面积、厚度的增加以及堵块位置向活性区入口的不断靠近,内通道流量损失程度明显增大,而外通道流量几乎不受影响,因此,内通道发生堵流事故时危害更为严重。

**关键词** 铅铋快堆, 环形燃料, 堵流事故, 计算流体力学

**中图分类号** TL364.4

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110602

## Analysis of typical flow blockage accidents of single annular fuel assembly for lead-bismuth cooled fast reactor

CHEN Qi LING Yufan ZHAO Pengcheng ZHAO Yanan YU Tao  
(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract** [Background] The annular fuel assembly of lead-bismuth cooled fast reactor has many safety advantages, but during its operation, due to the corrosive effect of lead-bismuth coolant, it is prone to blockage accidents, resulting in deterioration of heat transfer and jeopardizing the integrity of the first barrier. Therefore, it is urgent to research and analyze the blockage accident for the annular fuel assembly of the lead-bismuth-cooled fast reactor. [Methods] A 5×5 single annular fuel assembly model was established, and numerical simulations for blockage of the inner and outer channel were carried out with different blockage areas, blockage thicknesses, and axial position of the blockage based on the computational fluid dynamics (CFD) software Fluent. The temperature distribution of the claddings, the flow field distribution near the blockage, the mass flow change of the channel, the radial temperature distribution, and the heat distribution of the fuel element at the blockage are compared with the

核反应堆系统设计技术重点实验室运行基金(No.KFKT-05-FW-HT-20220014)资助

第一作者: 陈琪,女,2001年出生,现就读于南华大学核科学技术学院,研究领域为快堆热工水力分析

通信作者: 赵鹏程, E-mail: zhaopengcheng1030@163.com

收稿日期: 2022-06-18, 修回日期: 2023-02-08

Supported by Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory (No.KFKT-05-FW-HT-20220014)

First author: CHEN Qi, female, born in 2001, currently studying at the School of Nuclear Science and Technology, University of South China, focusing on thermal-hydraulic analysis of fast reactor

Corresponding author: ZHAO Pengcheng, E-mail: zhaopengcheng1030@163.com

Received date: 2022-06-18, revised date: 2023-02-08

result in no-blockage case. **[Results]** Simulation results indicate that the increase in the blockage area leads to a significant increase in the cladding temperature of the blockage area, an expansion of the scope of the recirculation area expands, the position of the highest temperature point of the fuel pellet shifts to the blockage side, and the heat flux density on the blockage side decreases. When the blockage fraction is large, the changes of parameters are similar to the above conclusions as the blockage thickness increases; when the blockage is located at the entrance, the local temperature rise of the cladding is smaller than that when the blockage is located at the center; with the increase of the blockage area and thickness and as the blockage position gets closer to the entrance of the active zone, the flow loss of the inner channel increases significantly, while the flow of the outer channel is almost unaffected.

**[Conclusions]** Therefore, the damage is more serious when the blockage accident occurs in the inner channel.

**Key words** Lead-bismuth cooled fast reactor, Annular Fuel, Flow blockage accidents, Computational fluid dynamics

双面冷却环形燃料元件作为一种新型燃料结构,采用内、外双通道冷却的方式增加了冷却面积,提高了冷却能力,降低了燃料芯块最高温度<sup>[1-3]</sup>。在保持或提高安全裕度的情况下,大大提升了堆芯功率密度。由于铅铋冷却剂具有较大腐蚀性,易腐蚀结构材料,从而引发堵流事故<sup>[4-6]</sup>,进而导致传热恶化,最后使得包壳破损甚至堆芯熔化现象。因此,研究铅铋快堆环形燃料堵流事故对确保反应堆安全具有重大意义。

国内外学者针对铅冷快堆堵流事故分析开展了一定研究,赵鹏程等<sup>[7]</sup>采用 ATHLETMOD3.0A 系统程序对热功率为 100 MW 小型模块化自然循环铅冷快堆 SNCLFR-100 (Small Modular Natural Circulation Lead-cooled Fast Reactor-100 MWth) 开展了堆芯功率最大组件局部堵流事故瞬态分析。石康丽等<sup>[8]</sup>采用 RELAP5 程序对 SNCLFR-100 堆芯功率最大组件不同堵塞面积、堵塞轴向位置及堵塞发展时间的堵流工况进行了研究分析,罗晓等<sup>[9]</sup>采用 KMC-FB 子通道程序对液态金属冷却快堆进行了堵流事故分析,德国 KIT (Karlsruhe Institute of Technology) 的陈学农等<sup>[10]</sup>以欧洲工业嬗变设施 EFIT (European Facility for Industrial Transmutation) 单盒组件为研究对象,采用 SIMMER-III 程序对瞬时全堵事故进行模拟分析,分析探讨了单盒组件瞬时全堵发生后对周围组件的影响。龚昊<sup>[11]</sup>采用 ANSYS CFX 程序对热功率为 10 MW 的铅铋冷却快堆单盒燃料组件棒束入口段和中心段不同面积与不同位置的堵流工况进行了研究。尧俊<sup>[12]</sup>针对中国原子能科学研究院小型铅铋冷却快堆堆芯的单盒燃料组件,采用商用计算流体力学软件 STAR-CCM+ 开展了堵流事故的模拟分析,得出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。陈宝文<sup>[13]</sup>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,并利用计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 软件 ANSYS Fluent 对堵流事故进行分析,讨论不同堵流工况对堵流事故中传热以及流场性质的影响规律。孙畅等<sup>[14]</sup>针对带有绕丝结构的 19 棒束铅铋组件,采用 STAR-CCM+ 软件探究了质量流动、功率等边界条件对燃料组件内部流动传热特性的影响。以上研究仅针对传统燃料元件,而环形燃料由于其结构特殊性,内、外通道发生堵塞时其现象和规律与传统燃料元件所得结论不同<sup>[15-16]</sup>。因此,亟须开展铅铋快堆环形燃料组件堵流事故分析。

本文构建铅铋快堆 5×5<sup>[17]</sup> 矩形排列单盒环形燃料组件分析模型,并使用 CFD 软件 Fluent<sup>[18]</sup> 对堵流事故进行模拟分析,分析了不同参数堵块对燃料棒的包壳温度分布、燃料芯块径向温度分布、内外流道流量分配以及内外流道热量分配的影响。

## 1 堵流模型构建

### 1.1 CFD 建模

使用 SolidWorks<sup>[19]</sup> 建立环形燃料组件几何模型如图 1 所示。表 1 为环形燃料组件设计参数。为研究堵块对内、外通道冷却剂流量的影响,本文几何建模对象为单盒燃料组件的活性区部分的流体域,并在活性区上游建立一个长度为 20 mm 的腔室,建模后的子通道编号如图 2 所示。

### 1.2 物性参数与功率分布

在铅铋冷却快堆环形燃料组件的计算域中,主要有 4 种结构材料:液态铅铋共晶体 (Lead-Bismuth Eutectic, LBE)、包壳 316L 不锈钢,氦气气隙和氧化铀钚 (MOX) 燃料。本文计算时所采用的各结构材料的物性参数如表 2 所示。

图 3 为环形燃料元件线功率密度的轴向分布,

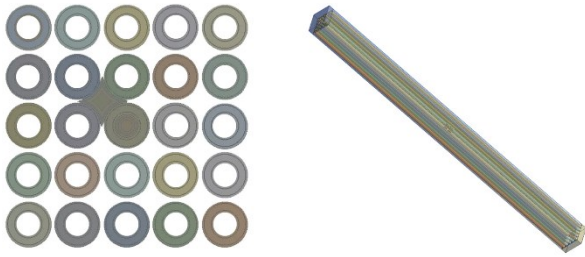


图1 几何模型  
Fig.1 Geometric structure

表1 环形燃料组件设计参数

参数 Parameter	数值 Values
燃料棒数量 Rod number	25
内包壳内径 Inner diameter of inner cladding / mm	3.643
内包壳外径 Outer diameter of inner cladding / mm	4.243
燃料芯块内径 Inner diameter of fuel pellet / mm	4.393
燃料芯块外径 Outer diameter of fuel pellet / mm	6.427
外包壳内径 Inner diameter of outer cladding / mm	6.577
外包壳外径 Outer diameter of outer cladding / mm	7.177
活性区长度 Length of active region / mm	1 200
栅径比 Pitch to diameter ratio	1.070

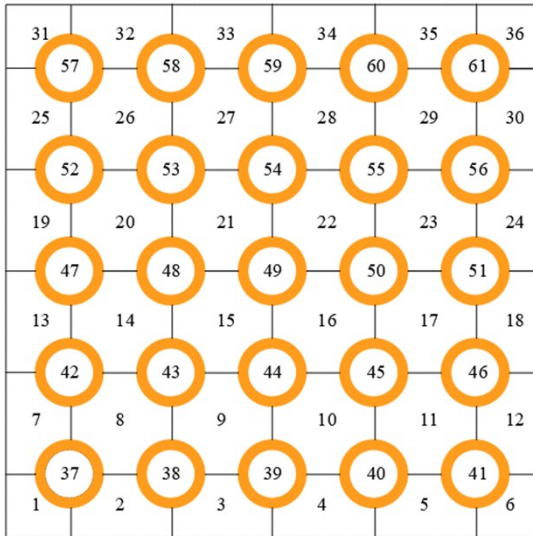


图2 子通道编号示意图  
Fig.2 Schematic diagram of sub-channel numbering

反应堆燃料组件轴向功率 $q(y)$ 分布如下:

$$q(y) = 267\,584\,000 \sin(1.606y + 0.5728) \quad (1)$$

式中: $y$ 为高度,m.

### 1.3 湍流数值模型和边界条件

本文选用剪应力传输(Shear Stress Transfer, SST)湍流模型,能够较为准确地模拟环形燃料元件内外通道冷却剂的高雷诺数流动换热现象<sup>[20]</sup>,在计

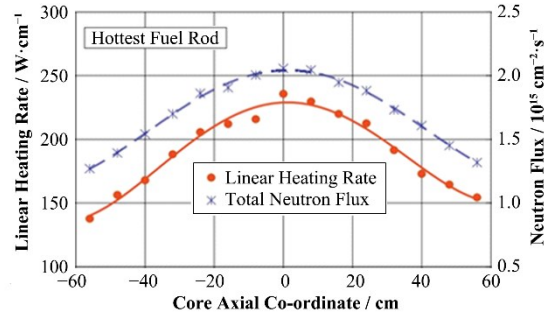


图3 燃料元件线功率密度  
Fig.3 Distribution of liner power of fuel element

表2 材料物性  
Table 2 Material properties

结构材料 Structural material	参数 Parameter	数值 Values
液态铅铋合金 LBE	比热容 Specific heat	$159 - 2.72 \times 10^{-2} T + 7.12 \times 10^{-6} T^2$
	密度 Density	$1.1367 - 1.1944T$
	热导率 Thermal conductivity	$9.2 + 0.0117T$
	粘性 Viscosity	$4.56 \times 10^{-3} - 7.03 \times 10^{-6} T + 3.61 \times 10^{-9} T^2$
包壳 Cladding	比热容 Specific heat	509.61
	密度 Density	7 959.8
	热导率 Thermal conductivity	14.646
气隙 Gap	比热容 Specific heat	5 191
	密度 Density	2.425
	热导率 Thermal conductivity	0.51
氧化铀钚 MOX	比热容 Specific heat	307
	密度 Density	10 994
	热导率 Thermal conductivity	3.919 2

算流体力学领域得到广泛应用,故本文选用该湍流模型进行模拟.求解采用 simple 算法计算离散方程,离散格式采用二阶迎风格式.

单盒环形燃料组件的运行参数见表3,选择质量流量作为入口边界条件,出口则设定为压力初始

表3 运行参数  
Table 3 Operating parameters

参数 Parameter	数值 Values
冷却剂类型 Type of coolant	LBE
冷却剂进口温度 Coolant inlet temperature / K	673.15
质量流量 Mass flow rate / kg·s <sup>-1</sup>	54.8



值为0 MPa的边界条件。由于相邻燃料组件热功率几乎相同,故将组件盒外套管壁面和固体计算区域的上、下端均设置为绝热条件以忽略相邻组件间的热传递。

### 1.4 网格敏感性分析

使用Fluent mesh对几何模型进行网格划分,生成多面体网格。为验证本文所选网格数量计算的准确性,在计算分析之前,分别选取网格数量为 $7.5 \times 10^6$ 、 $1.1 \times 10^7$ 、 $1.5 \times 10^7$ 的三种尺寸网格进行灵敏度分析,结果如图4所示。

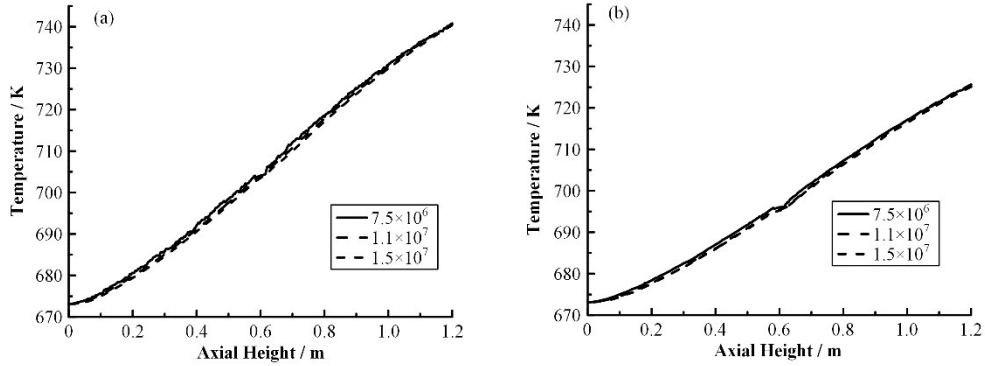


图4 网格敏感性分析 (a) 子通道49, (b) 子通道21  
Fig.4 Mesh sensitivity analysis (a) Subchannel 49, (b) Subchannel 21

图4为三种尺寸网格的49号与21号子通道中心轴向温度。从图4可知,温度随高度变化趋势相同,出口温度相同,但网格数量 $7.5 \times 10^6$ 的计算结果连续性较差,不利于分析局部流场与温度场。因此,本文选用网格数量 $1.1 \times 10^7$ 的网格进行后续分析。

属性尚无明确定论,但堵块一般是由于腐蚀产物在堆内堆积或绕丝脱落断裂而形成,本文主要研究反应堆结构材料在铅铋的腐蚀冲刷之下,腐蚀产物附着在燃料包壳上从而引发的堵流事故,故将其材料定义为包壳材料——316L不锈钢,堵块的几何形状如图5所示。

## 2 堵流工况的模拟与分析

### 2.1 堵块工况设置

堵块的形成原因有多种,因而堵流物质的材料

为研究不同堵块参数对内、外通道堵塞以及堵流事故中传热及流场性质的影响规律。本文拟定了16种工况,如表4所示,同时模拟了正常工况,用于对比分析。

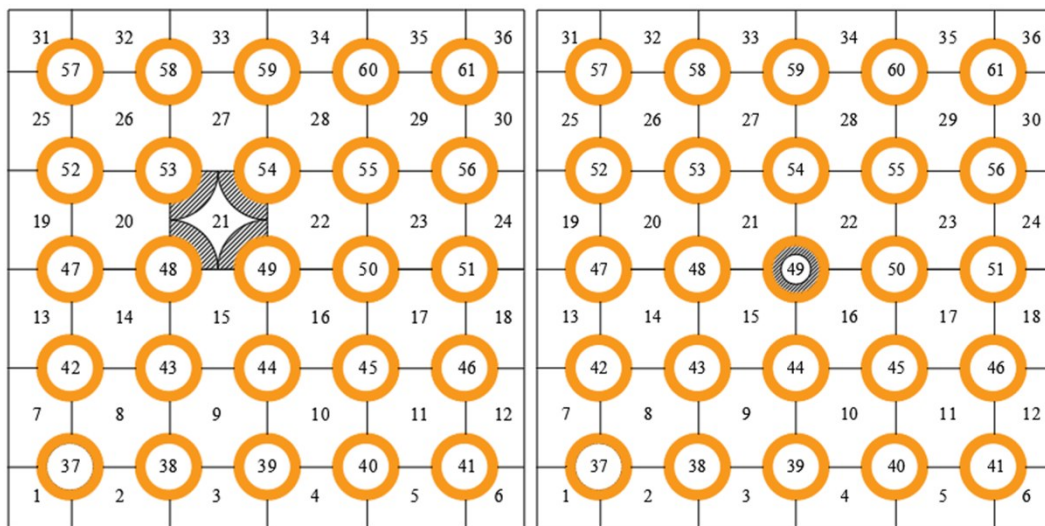


图5 堵块几何形状示意图  
Fig.5 Schematic diagram of the block geometry

### 2.2 堵塞面积的影响分析

为研究不同堵塞面积对内外通道传热的影响,

提取A2、A3、A4、B2、B3、B4堵流工况以及正常工况的包壳温度数据,结果如图6所示。

表4 拟定的堵流工况  
Table 4 Selected cases of blockage accident

工况编号 Case No.	堵块厚度 Thickness / mm	子通道编号 Subchannel number	堵块起始高度 Start / mm	占通道面积比例 Area percentage / %
A1	10	49	0	25
B1	10	21	0	25
A2	10	49	595	25
B2	10	21	595	25
A3	10	49	595	50
B3	10	21	595	50
A4	10	49	595	75
B4	10	21	595	75
A5	20	49	590	25
B5	20	21	590	25
A6	20	49	590	75
B6	20	21	590	75
A7	30	49	585	25
B7	30	21	585	25
A8	30	49	585	75
B8	30	21	585	75

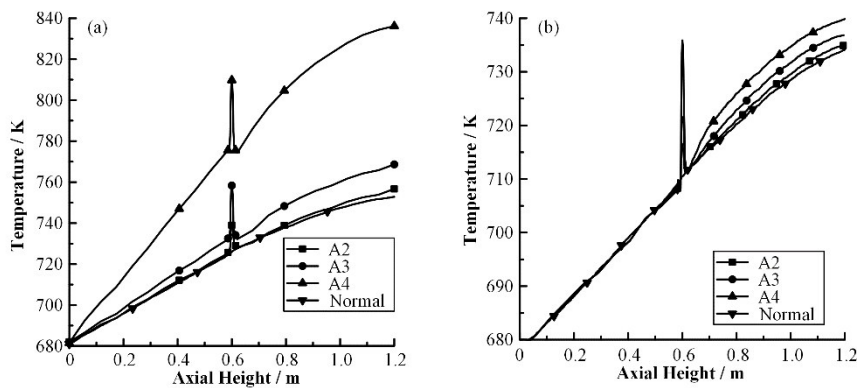


图6 堵塞面积对包壳轴向温度的影响 (a) 内通道, (b) 外通道  
Fig.6 Effect of blockage area on axial cladding temperature (a) Inner channel, (b) Outer channel

从图6可以看出,随着堵塞面积增大,堵塞区域包壳温升迅速增大,容易产生较大热应力导致包壳破损,同时堵块后方区域温度也有所上升。这是由于堵塞面积增大导致堵块后方回流区域的回流程度和回流范围不断扩大,如图7所示,严重影响了冷却剂与包壳间的对流换热过程,且堵塞面积直接影响着冷却剂流通面积的大小,堵塞面积增大导致冷却剂冷却能力减弱。随堵塞面积增加,包壳温升区域几乎相同。包壳最大温升位置均位于堵块域内部,且包壳温度在堵块下游迅速回落而平稳上升。

值得注意的是,内通道堵塞工况下,随堵塞面积增加,温度变化曲线斜率明显增加,包壳温度整体上升;而外通道堵塞工况下,曲线斜率不变,仅有堵块及其后方区域包壳温度有所增加,且外通道堵塞造成的局部温升小于内通道。这是由于外通道为开式

通道,冷却剂在外通道受到阻塞后,向周围通道迁移,随后在堵块下游区域重新汇聚,单一子通道出现堵流时,对整个外通道流量影响较小;内通道为封闭的圆形通道,各通道间互不流通,不存在横向交混,内通道冷却剂流量损失较大,如表5所示。

图8给出了堵塞处燃料元件径向温度分布,可见,随堵塞面积增加,堵块侧包壳外表面温度上升,燃料芯块最高温度点位置逐渐向堵块侧偏移,燃料温度梯度发生改变。由于环形燃料存在热量分配,燃料芯块温度的变化将导致两侧的热流密度发生改变。由表5可知,随堵塞面积增大,堵块侧热量份额减小,热流密度减小;远离堵块侧热量份额增大,热流密度增大。这在一定程度上缓解了堵流所造成的危害。

结合相应堵流工况下包壳最高温度以及通道流

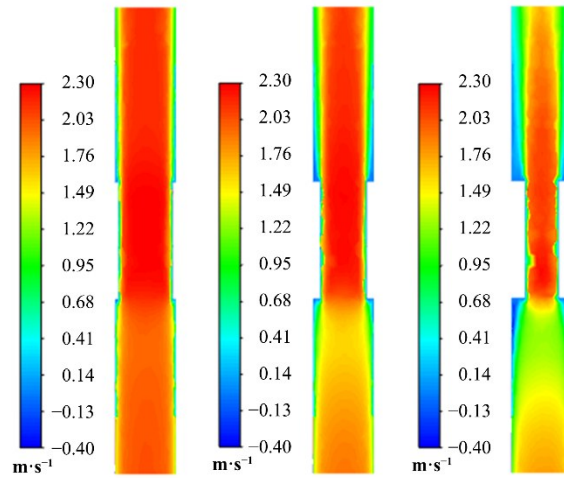


图7 B2、B3、B4工况堵块附近流场的轴向速度分布  
Fig.7 Distribution of axial velocity field around blockage of case B2, B3, B4

表5 堵塞面积对内外通道流量、热量分配的影响  
Table 5 Effect of blockage area on mass flow and heat split in inner and outer channel

子通道编号 Subchannel number	堵塞面积 Area percentage / %	工况编号 Case No.	流量 Mass flow / kg·s <sup>-1</sup>	流量损失 Mass flow loss / %	外通道热量份额 Outer channel heat share / %	内通道热量份额 Inner channel heat share / %
49	0	正常工况 Normal	0.744 363 40	0	60	40
	25	A2	0.716 657 13	3.722 1	62.5	37.5
	50	A3	0.592 132 28	20.451 2	66	34
	75	A4	0.260 966 99	64.940 9	73.7	26
21	0	正常工况 Normal	36.233 992	0	60	40
	25	B2	36.233 344	0.06	59.2	40.8
	50	B3	36.213 120	0.05	55.7	44.3
	75	B4	36.188 448	0.13	54.2	45.8

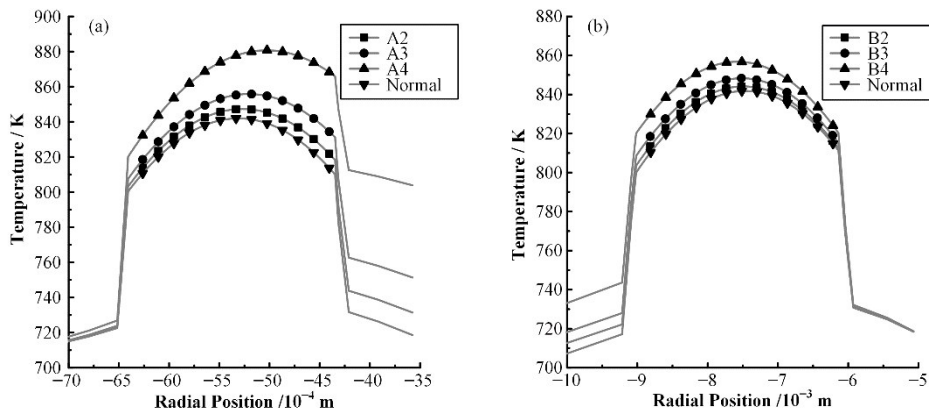


图8 堵塞处燃料元件径向温度分布 (a) 内通道, (b) 外通道  
Fig.8 Radial temperature distribution at blockage (a) Inner channel, (b) Outer channel

量的变化可知内通道发生堵流事故时影响更为严重, A4 工况下包壳最高温度已超过温度限值 823.15 K, 反应堆第一道安全屏障的完整性受到严重威胁。

### 2.3 堵块厚度的影响分析

为研究不同堵块厚度对内外通道传热的影响, 提取通道 21、49 中心处不同堵块厚度的堵流工况的包壳温度数据, 结果如图 9 所示。从图 9 可知, 堵塞面积为 25% 时, 随堵块厚度增加, 堵塞区域包壳温

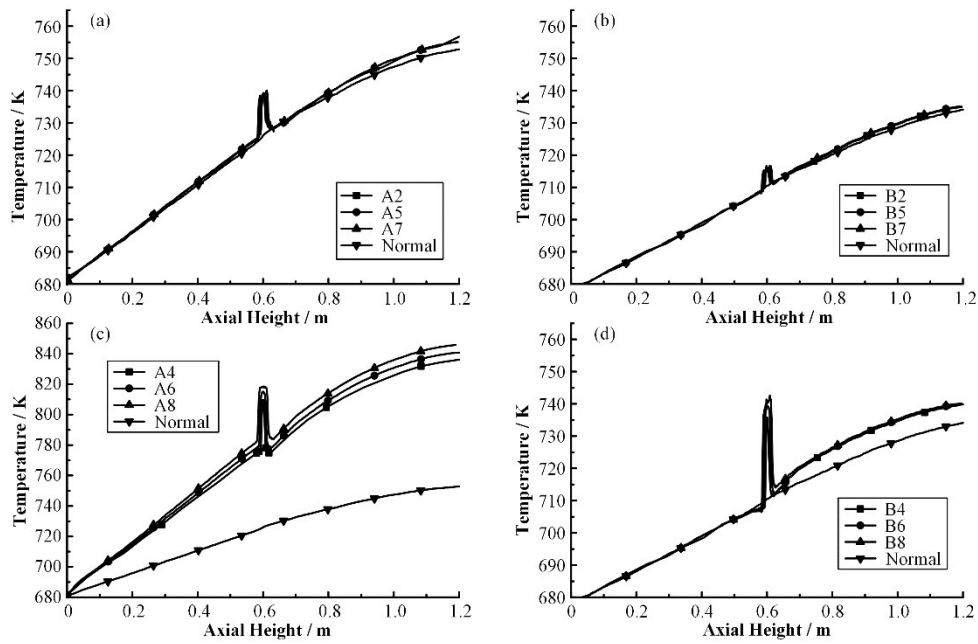


图9 堵块厚度对包壳轴向温度的影响

(a) 内通道堵塞面积25%, (b) 外通道堵塞面积25%, (c) 内通道堵塞面积75%, (d) 外通道堵塞面积75%

Fig.9 Effect of blockage thickness on axial cladding temperature (a) 25% blockage of inner channel, (b) 25% blockage of outer channel, (c) 75% blockage of inner channel, (d) 75% blockage of outer channel

升没有明显变化,堵块后方区域温度几乎相同,堵塞处包壳温升区域有所扩大,这与杨云等<sup>[21]</sup>研究结果

相吻合,但尧俊<sup>[12]</sup>在分析研究中得出堵块位置处包壳温升随厚度增加而显著增加这一结论。

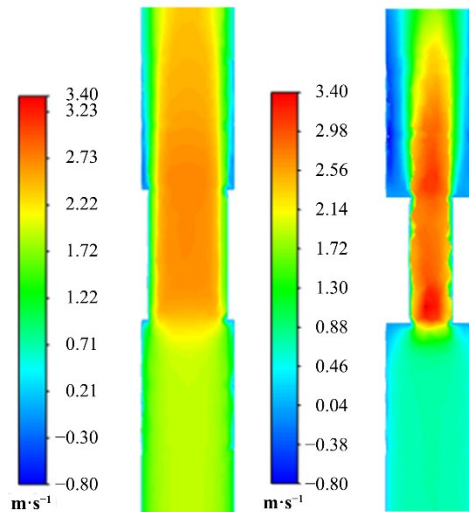


图10 A2、A4工况堵块附近流场的轴向速度分布

Fig.10 Distribution of axial velocity field around blockage of case A2, A4

因此,提取堵块附近流场的轴向速度分布进行进一步分析发现,25%堵塞面积下,堵块后方回流区范围较小,堵块对流动影响较小,如图10所示。结合目前相关研究发现,部分堵流事故分析结论是在堵塞份额足够大,且存在明显回流区的条件下所得出的,堵块厚度的增加能否明显改变堵塞处包壳最高温度可能与堵塞份额有关。

从图9还可看出,堵塞面积为75%时,随堵块厚

度增加,堵塞区域的包壳温升明显增加,每增加10 mm厚度温升约为6 K,这与前文论述相符。此外,随着堵块厚度增加,堵塞处包壳温升区域同样有所扩大,包壳最大温升位置仍位于堵块域内部,包壳温度在堵块下游出现回落后继续上升。分析堵块厚度对内外通道流量的影响,由表6可知,当堵塞份额较大时,随着堵块厚度增加,内通道流量明显减小,通道内冷却剂冷却能力减弱,堵塞区域包壳温升增



加,堵块后方区域包壳温升增加,而外通道流量变化不明显,堵块后方区域包壳温升不明显。

图 11 和表 6 给出了堵塞处燃料元件径向温度分布以及堵塞处热量分配,可以发现,当堵塞份额较小时,堵块厚度的增加不会使燃料芯块最高温度点位

置及内外通道热量分配出现明显变化;而当堵塞份额较大时,包壳厚度的增加更易使上述参数发生变化,随着堵块厚度的增加,燃料芯块最高温度点位置向着堵块侧移动,同时堵块侧热流密度降低。

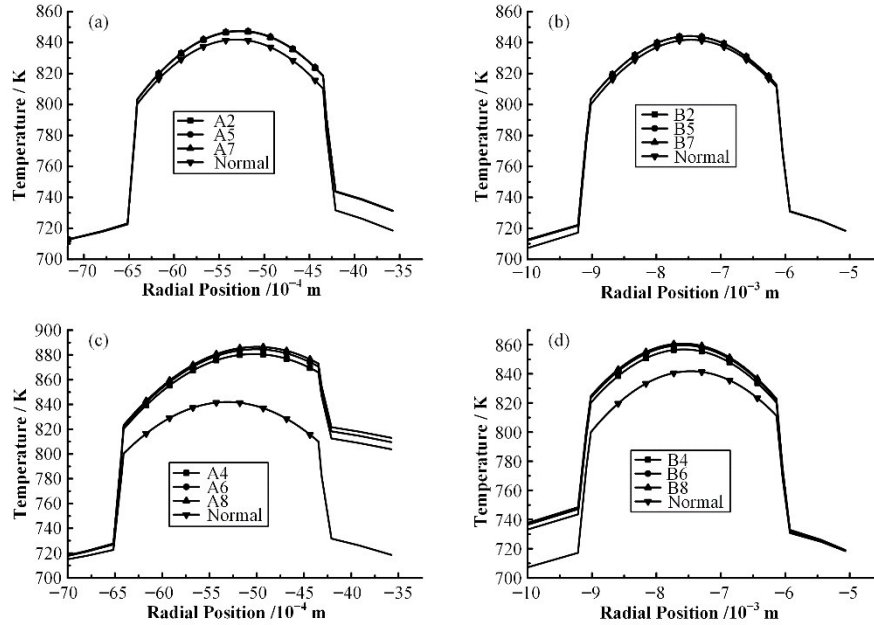


图 11 堵塞处燃料元件径向温度分布

(a) 内通道堵塞面积 25%, (b) 外通道堵塞面积 25%, (c) 内通道堵塞面积 75%, (d) 外通道堵塞面积 75%

Fig.11 Radial temperature distribution at blockage (a) 25% blockage of inner channel, (b) 25% blockage of outer channel, (c) 75% blockage of inner channel, (d) 75% blockage of outer channel

表 6 堵块厚度对内外通道流量、热量分配的影响

Table 6 Effect of blockage thickness on mass flow and heat split in inner and outer channel

子通道编号 Subchannel number	堵塞面积 Area percentage / %	工况编号 Case No.	流量 Mass flow / kg·s <sup>-1</sup>	流量损失 Mass flow loss / %	外通道热量份额 Outer channel heat share / %	内通道热量份额 Inner channel heat share / %	
49	0	正常工况 Normal	0.744 363 4	0	60	40	
		25	A2	0.716 657 0	3.722	62.5	37.5
			A5	0.713 416 3	4.157	62.6	37.4
		A7	0.713 340 0	4.167	62.8	37.2	
	75	A4	0.260 966 99	64.940 9	73.7	26.3	
		A6	0.247 804 44	66.709 0	73.8	26.2	
A8		0.235 041 71	68.424 0	74	26		
21	0	正常工况 Normal	36.233 992	0	60	40	
		25	B2	36.233 344	0.001 78	59.2	40.8
			B5	36.220 002	0.038 00	59.1	40.9
	B7		36.218 691	0.042 00	58.9	41.1	
	75	B4	36.188 448	0.13	54.2	45.8	
		B6	36.171 942	0.17	53.3	46.7	
		B8	36.167 840	0.18	52.4	47.6	



## 2.4 堵块轴向位置的影响分析

为研究不同位置堵块对内外通道传热的影响,提取A1、A2、B1、B2工况的包壳温度数据,结果如图12所示。由图12可知,与正常工况相比,4种堵流工况下包壳温度随高度变化总体趋势相同,堵块位于活性区入口时,堵塞区域包壳温升较小;位于活性区中部时,堵塞区域包壳温升更明显,这是由于燃料棒

中心处热功率更高。从图12发现,在内通道堵塞工况下,堵块位于活性区入口时,包壳温度整体上升,且出口处包壳温度较堵块位于中心处时更大;而B1、B2工况下,虽入口处堵块同样造成包壳温度整体上升,但2种工况下出口处包壳温度几乎相同,且内通道堵塞区域包壳温升大于外通道。这是因为内通道冷却剂流量损失程度更大,且入口处堵块造成流量损失大于中心处,如表7所示。

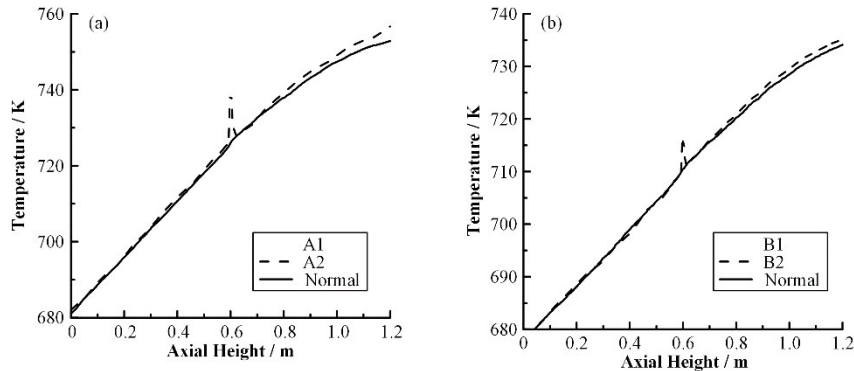


图12 堵块轴向位置对包壳轴向温度的影响 (a) 内通道, (b) 外通道

Fig.12 Effect of axial position of the blockage on axial cladding temperature (a) Inner channel, (b) Outer channel

表7 堵块轴向位置对内外通道流量的影响

Table 7 Effect of axial position of the blockage on mass flow in inner and outer channel

子通道编号 Subchannel number	堵塞面积 Area percentage / %	堵块厚度 Blockage thickness / mm	工况编号 Case No.	流量 Mass flow / kg·s <sup>-1</sup>	流量损失 Mass flow loss / %
49	0	10	正常工况 Normal	0.744 363 4	0
			A1	0.702 245 92	5.645 1
			A2	0.716 657 13	3.722 1
21	0	10	正常工况 Normal	36.233 992	0
			B1	36.227 118	0.68
			B2	36.233 344	0.001

## 3 结语

本文使用计算流体力学软件Fluent对铅铋快堆环形燃料组件进行了数值模拟,计算了不用堵块参数下内外通道的堵塞事故并对其结果进行分析,具体得到以下结论:

1)堵塞面积的增加会增加回流区的回流量和回流范围,显著提高堵塞区域包壳温升,导致燃料芯块最高温度点位置向堵块侧偏移,堵块侧热流密度减小。

2)当堵塞份额为25%时,堵块厚度的增加并不会明显改变包壳温度、冷却剂流量、燃料芯块最高温度点位置以及内外通道的热量分配;当堵塞份额为75%时,堵块厚度的增加将明显改变以上参数。

3)堵块位于入口处时包壳局部温升较堵块位于中心处时更小,但流量损失程度更大。

4)由于内通道为闭式通道,随堵塞面积、厚度的增加以及堵块位置向活性区入口的不断靠近,内通道流量损失程度明显增大;而外通道为开式通道,堵块参数变化几乎不会对外通道流量造成影响,因此,内通道发生堵流事故时危害更为严重。

**作者贡献声明** 陈琪负责实施研究,文章撰写;凌煜凡负责采集数据,分析/解释数据;赵鹏程负责指导,支持性贡献,获取研究经费;赵亚楠负责对文章的知识性内容作批评性审阅;于涛负责行政、技术或材料支持,指导。

## 参考文献

- 1 曾付林, 唐锚, 赵鹏程, 等. 栅径比对环形燃料外周向温度分布不均匀性影响[J]. 核技术, 2023, **46**(9): 090601. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090601](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090601).  
ZENG Fulin, TANG Mao, ZHAO Pengcheng, *et al.* Influence of the pitch-to-diameter ratio on the circumferential non-uniformity of annular fuel outer temperature distribution[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(9): 090601. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090601](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090601).
- 2 陈钊, 肖英杰, 赵鹏程, 等. 环形燃料栅元有效温度计算方法研究[J]. 核技术, 2022, **45**(12): 120603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120603).  
CHEN Zhao, XIAO Yingjie, ZHAO Pengcheng, *et al.* Research on effective temperature calculation method of annular fuel cell[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(12): 120603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120603).
- 3 Hejzlar P, Kazimi M S. Annular fuel for high-power-density pressurized water reactors: motivation and overview[J]. Nuclear Technology, 2007, **160**(1): 2–15. DOI: [10.13182/NT160-2-15](https://doi.org/10.13182/NT160-2-15).
- 4 魏诗颖, 王成龙, 田文喜, 等. 铅基快堆关键热工水力问题研究综述[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(2): 326 – 336. DOI: [10.7538/yzk.2018.youxian.0335](https://doi.org/10.7538/yzk.2018.youxian.0335).  
WEI Shiyong, WANG Chenglong, TIAN Wenxi, *et al.* Research progress in key thermal-hydraulic issue of lead-based fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(2): 326 – 336. DOI: [10.7538/yzk.2018.youxian.0335](https://doi.org/10.7538/yzk.2018.youxian.0335).
- 5 Zhang J. A review of steel corrosion by liquid lead and lead-bismuth[J]. Corrosion Science, 2009, **51**(6): 1207–1227. DOI: [10.1016/j.corsci.2009.03.013](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.013).
- 6 徐铄. 快堆安全分析[M]. 中国原子能出版传媒有限公司, 2011.  
XU Mi. Fast reactor safety analysis[M]. China Atomic Energy Publishing & Media Co., LTD., 2011.
- 7 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. DOI: [10.13832/j.jnpe.2019.01.0023](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2019.01.0023).  
ZHAO Pengcheng, LIU Zijong, YU Tao. Transient analysis on unprotected partial flow blockage of hottest fuel assembly for a small natural circulation lead-cooled fast reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, **40**(1): 23 – 27. DOI: [10.13832/j.jnpe.2019.01.0023](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2019.01.0023).
- 8 Shi K L, Li S Z, Zhang X L, *et al.* Partial flow blockage analysis of the hottest fuel assembly in SNCLFR-100 reactor core[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(1): 16. DOI: [10.1007/s41365-017-0351-3](https://doi.org/10.1007/s41365-017-0351-3).
- 9 Luo X, Cao L K, Feng W P, *et al.* Development of a subchannel code for blockage accidents of LMFRs based on the 3D fuel rod model[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(3): 27. DOI: [10.1007/s41365-022-01010-4](https://doi.org/10.1007/s41365-022-01010-4).
- 10 Liu P, Chen X N, Rineiski A, *et al.* Transient analyses of the 400 MWth-class EFIT accelerator driven transmuter with the multi-physics code: SIMMER-III[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, **240**(10): 3481 – 3494. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2010.05.023](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.05.023).
- 11 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.  
GONG Hao. Analysis of blockage accident for single assembly of LBE-cooled fast reactor[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- 12 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): 020604. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.020604](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.020604).  
YAO Jun, ZHANG Xisi, HU Wenjun, *et al.* Effect of block parameter on fluid flow and heat transfer in LBE-cooled fast reactor under blockage accident[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(2): 020604. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.020604](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.020604).
- 13 陈宝文, 邓坚, 凌煜凡, 等. 基于CFD的铅基快堆单盒燃料组件堵流事故分析[J]. 核动力工程, 2021, **42**(4): 277 – 281. DOI: [10.13832/j.jnpe.2021.04.0277](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0277).  
CHEN Baowen, DENG Jian, LING Yufan, *et al.* Analysis of blockage accident of lead-based fast reactor single-box fuel assembly based on CFD[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, **42**(4): 277 – 281. DOI: [10.13832/j.jnpe.2021.04.0277](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0277).
- 14 孙畅, 焦守华, 柴翔, 等. 基于CFD方法的铅铋冷却燃料棒束的热工水力特性分析[J]. 原子能科学技术, 2020, **54**(8): 1386–1394. DOI: [10.7538/yzk.2019.youxian.0652](https://doi.org/10.7538/yzk.2019.youxian.0652).  
SUN Chang, JIAO Shouhua, CHAI Xiang, *et al.* Thermal hydraulic analysis of LBE-cooled rod bundle based on CFD method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, **54**(8): 1386–1394. DOI: [10.7538/yzk.2019.youxian.0652](https://doi.org/10.7538/yzk.2019.youxian.0652).
- 15 Xia H, Wu Y, Tian W, *et al.* Development of thermal hydraulic analysis code of annular fuel under flow blockage condition[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, **151**: 107962. DOI: [10.1016/j.anucene.2020.107962](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107962).

- 16 丁丽, 骆贝贝, 花晓, 等. 板状燃料元件流道堵塞事故预防与探测技术研究[J]. 核技术, 2020, **43**(4): 040002. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.040002](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.040002).  
DING Li, LUO Beibei, HUA Xiao, *et al.* Research on prevention and detection technology of flow channel blockage accident of plate-type fuel elements[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(4): 040002. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.040002](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.040002).
- 17 Wang Y J, Wang M J, Ju H T, *et al.* CFD simulation of flow and heat transfer characteristics in a 5×5 fuel rod bundles with spacer grids of advanced PWR[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, **52**(7): 1386–1395. DOI: [10.1016/j.net.2019.12.012](https://doi.org/10.1016/j.net.2019.12.012).
- 18 Guo Y, Wang G, Qian D, *et al.* Accident safety analysis of flow blockage in an assembly in the JRR-3M research reactor using system code RELAP5 and CFD code FLUENT[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, **122**: 125–136. DOI: [10.1016/j.anucene.2018.08.031](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.08.031).
- 19 杨勇. 基于 SolidWorks 的 CFD 前后处理软件的设计与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
YANG Yong. Design and implement of a CFD pre/post process software based on SolidWorks[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- 20 魏君翰, 赵民富. 环形燃料棒束冷却剂流动的数值模拟研究[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. 2019: 1311–1321. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2019.047877](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2019.047877).  
WEI Junhan, ZHAO Minfu. Numerical simulation study on the flow of annular fuel rod bundle coolant[C]//16th National Conference on Thermal Fluids for Nuclear Reactors and Papers of Key Laboratory of Thermal Hydraulic Technology for Nuclear Reactors in 2019. 2019: 1311–1321. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2019.047877](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2019.047877).
- 21 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. DOI: [10.27307/d.cnki.gsytu.2019.002014](https://doi.org/10.27307/d.cnki.gsytu.2019.002014).  
YANG Yun. Numerical simulation and analysis on flow blockage accident of fuel subassembly for sodium cooled fast reactor[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. DOI: [10.27307/d.cnki.gsytu.2019.002014](https://doi.org/10.27307/d.cnki.gsytu.2019.002014).