

# 钠冷快堆小栅板联箱压降 对组件流量分配影响研究

林超, 高鑫钊\*, 周志伟, 余新太

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 钠冷快堆堆芯采用大栅板联箱、小栅板联箱和组件的三级流量分配方式, 小栅板联箱的压降影响组件的流量分配, 进而影响堆芯的安全, 因此进行钠冷快堆小栅板联箱压降对组件流量分配影响研究具有重要意义。根据小栅板联箱压降造成组件流量分配偏差的机理, 提出了理论计算模型和堆芯组件优化设计的方法, 并针对中国实验快堆(CEFR)堆芯进行了组件压降的优化设计, 通过优化设计降低了CEFR燃料组件流量分配负偏差。结果表明, 在进行钠冷快堆堆芯热工水力设计时, 需要结合实际堆芯布置分析组件压降设计值的优化方向, 并进行敏感性分析, 以确定组件的最优设计压降, 将小栅板联箱压降对组件流量分配影响降低到最低程度。本文结果可为钠冷快堆堆芯热工水力设计提供参考。

**关键词:** 钠冷快堆; 堆芯; 小栅板联箱; 热工水力; 流量分配

中图分类号: TL333

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)09-1859-07

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0287

## Effect of Distribution Header Pressure Drop on Flow Distribution of Assembly for Sodium-cooled Fast Reactor

LIN Chao, GAO Xinzhao\*, ZHOU Zhiwei, YU Xintai

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** China is accelerating the development of sodium-cooled fast reactor technology. For nuclear reactors, whether it is a pressurized water reactor or a fast reactor, core flow distribution is a key concern, which directly determines whether the reactor can operate safely and reliably. Sodium-cooled fast reactor core adopts a three-stage flow distribution method consisting of diagrid, distribution headers and assemblies. Distribution headers are installed on diagrid, and various types of assemblies are installed on distribution headers. Pressure drop of the core is composed of distribution header pressure drop and assembly pressure drop. The distribution header pressure drop itself affects the flow distribution of the assemblies, thereby affecting the safety of the core. Therefore, it is of great significance to study the impact of distribution header pressure drop on the flow distribution of assemblies for the sodium-cooled fast reactors. In order to reduce the flow distribution deviation of assemblies caused by the distribution header pressure drop, it is necessary to carry out a reasonable assembly pressure drop design. Based on the mechanism of flow distribution deviation of assemblies caused by distribution header pressure drop, a theoretical calculation model was proposed, and an

optimized design of assembly pressure drop was carried out for the China Experimental Fast Reactor (CEFR) core. Based on the actual layout of CEFR core, the maximum deviation of flow distribution of fuel assemblies was obtained, and the optimization direction of nominal assembly pressure drop was determined, indicating that optimization design of nominal assembly pressure drop should be carried out for the first five rings. After adjusting the nominal pressure drop of the first five rings of assemblies from 250 kPa (the original nominal pressure drop) to 249 kPa, 248.5 kPa, and 248 kPa, respectively, the maximum deviation of flow distribution of fuel assemblies firstly decreases from  $-0.99\%$  to  $-0.95\%$ , and then increases to  $-1.02\%$  and  $-1.08\%$ , which indicates that nominal assembly pressure drop should be elaborately determined to obtain a minimum flow distribution deviation of fuel assemblies. In conclusion, when conducting core thermal hydraulic design for sodium-cooled fast reactors, it is necessary to analyze the optimization direction of nominal assembly pressure drop based on actual core layout, and sensitivity analysis should be conducted to finally determine the nominal assembly pressure drop to reduce the impact of distribution header pressure drop on flow distribution of assemblies to the lowest extent.

**Key words:** sodium-cooled fast reactor; reactor core; distribution header; thermal hydraulics; flow distribution

钠冷快堆作为核能系统国际论坛(GIF)提出的6种第4代核电站堆型之一,具有核能的可持续发展、更高的安全性和可靠性、更高的经济性、防止核扩散等优点。与压水堆相比,钠冷快堆能将铀资源的利用率由1%提高到60%以上<sup>[1]</sup>。基于上述优点,我国确立了“压水堆-快堆-聚变堆”三步走的核能发展战略,正在大力发展钠冷快堆技术。目前,我国已建成中国实验快堆(CEFR)<sup>[2]</sup>,并正在策划建造中国商用快堆(CFR1000)。

钠冷快堆堆芯一般包括小栅板联箱和各类组件。不同小栅板联箱上安插了不同流量区的组件,这导致小栅板联箱有多种流量。然而,堆芯内所有小栅板联箱的结构都是相同的,因此不同流量小栅板联箱自身的压降也不相同。堆芯的压降为小栅板联箱压降叠加组件压降,由于整个堆芯的压降是一致的,因此小栅板联箱的压降会影响组件的压降,进而影响组件的流量分配。

为了补偿不同流量小栅板联箱的压降对堆芯组件流量分配的影响,在进行钠冷快堆堆芯热工水力设计时,一般结合组件流量分区将组件压降设置为若干类。组件压降设计值设置是否合理,直接影响堆芯流量分配的精度,对反应堆的安全运行具有重要的意义。本文对钠冷快堆小栅板联箱压降对堆芯流量分配的影响进行研究,获得组件压降设计的方法,为钠冷快堆堆芯热工水力设计提供参考。

## 1 钠冷快堆堆芯流量分配设计概述

钠冷快堆堆芯流量采用大栅板联箱-小栅板联箱-组件的三级分配方法<sup>[3-4]</sup>。大栅板联箱是高压联箱,冷却剂被一回路泵加压之后通过压力管进入大栅板联箱,完成第一级流量分配。小栅板联箱安插在大栅板联箱之上,冷却剂通过小栅板联箱管脚开孔进入小栅板联箱,完成第二级流量分配。组件安插在小栅板联箱之上,冷却剂通过组件管脚开孔进入组件,最终完成第三级流量分配。小栅板联箱的进口和组件出口均可以视作等压面,因此堆芯所有小栅板联箱和其上安插组件的压降之和都是一致的,即整个堆芯的压降是一致的。大栅板联箱上安插的小栅板联箱数目和堆芯布置有关,从几十盒到上百盒不等;而1个小栅板联箱上安插组件的数目为固定的7盒。

小栅板联箱分为强迫取钠型和非强迫取钠型。强迫取钠型直接从大栅板联箱取钠,而非强迫取钠型不和大栅板联箱联通。只有强迫取钠型小栅板联箱压降才会对组件流量分配产生影响。如果没有特殊说明,本文出现的小栅板联箱均代表强迫取钠型小栅板联箱。

钠冷快堆堆芯组件按照冷却方式可以分为两种类型:1)强迫循环冷却组件,包括燃料组件、转换区组件、控制棒组件等,这些组件的发热量较大,通过一次钠泵提供足够的冷却剂流量对其进行冷却;2)自然分流冷却组件,包括乏燃料组件、

钢组件反射层和碳化硼组件, 这些组件的发热量较小, 所需冷却剂的流量也较小, 无需泵提供强迫循环流量, 而是依靠其自身发热产生温差驱动流体进入组件内部对其进行冷却<sup>[5]</sup>。其中强迫循环冷却组件只能安插在强迫取钠型小栅板联箱之上, 而自然分流冷却组件既能安插在强迫取钠型小栅板联箱之上, 又能安插在非强迫取钠型小栅板联箱之上。

对于强迫循环冷却组件, 不同组件之间的热功率差别非常大, 如控制棒组件和转换区组件的热功率可能只有燃料组件的 1/100 左右。考虑到上述原因, 钠冷快堆堆芯组件采用带有盒壁的形式<sup>[6]</sup>, 每盒组件的冷却流道都是封闭的, 不同组件之间不存在冷却剂的横向交混。组件带盒壁的优点是能够根据组件的发热功率, 为每盒组件分配合理的冷却剂流量, 在保证组件冷却的前提下尽量提高每盒组件的平均进出口温度, 进而提高堆芯冷却剂的平均出口温度, 以提高整个反应堆的热效率。反之, 如果组件不带盒壁, 那么只能在组件底部设置流量分配板来实现一定的流量分配; 然而组件之间存在着横向交混, 随着流体的流动, 组件底部流量分配板的流量分配效果会逐渐降低, 导致堆芯流量存在较大的浪费。

结合堆芯的功率分布, 在进行钠冷快堆堆芯热工设计时, 一般将堆芯各类组件划分为 10 余个流量区, 最多不超过 20 个。如印度的 PFBR 反应堆的堆芯共有 15 个流量区<sup>[7]</sup>, 俄罗斯的 BN1200 反应堆的堆芯共有 16 个流量区<sup>[8]</sup>。每个流量区内组件的流量都是相同的。组件的流量通过设置在管脚的节流装置来控制。节流件由节流孔和节流板组成, 通过改变节流孔的孔径和节流板的高度来改变管脚的阻力特性, 从而实现流量的控制。管脚节流件的最终尺寸需要通过组件堆外单体水力特性试验来确定。

钠冷快堆堆芯组件流量分区布置较为复杂, 小栅板联箱上可能安插不同流量区的组件, 因此不同小栅板联箱的流量不是完全一致的。考虑到工程的可实现性, 所有的小栅板联箱的结构都是一致的, 这导致了不同小栅板联箱本身的压降是不相同的。由于整个堆芯的压降是一致的, 因此小栅板联箱的压降会影响组件的压降, 进而影响组件的流量分配。

为了保证小栅板联箱压降不会对堆芯流量分配造成影响, 理论上可以采用以下方法: 1) 结合不同流量小栅板联箱的压降, 为其上安插的组件设置相应的压降, 即让组件压降配合小栅板联箱压降; 2) 在小栅板联箱上设置节流装置, 保证不同流量小栅板联箱的压降一致。然而, 堆芯内小栅板联箱流量种类繁多, 一般有 10 种以上甚至 20 多种, 采用上述两种方法都将大大增加工程的复杂度, 导致堆外水力试验工作量非常大、堆芯防插错设计非常复杂。因此上述做法都是不合理的。

为了补偿不同流量小栅板联箱的压降对组件流量分配的影响, 合理的做法是结合小栅板联箱压降和流量分区布置, 将组件压降设置为若干类, 在不增加工程复杂度的前提下, 尽量降低小栅板联箱压降对组件流量分配的影响。

## 2 计算方法

为了研究小栅板联箱压降对组件流量分配的影响, 需要进行相应的理论计算分析, 计算模型如图 1 所示。可以将整个堆芯看作两级并联流道: 1) 每个小栅板联箱流道加上其上安插的 7 盒组件均为堆芯并联流道, 因此每个小栅板联箱和其上安插的组件的压降之和均为堆芯总压降; 2) 单个小栅板联箱上安插的组件均为组件并联流道, 因此单个小栅板联箱上安插的组件的压降相等。根据堆芯的两级并联多通道模型, 可以得出小栅板联箱压降对组件流量分配影响的计算公式。

对于编号为  $i$  的小栅板联箱, 其上安插了  $m$  盒组件 ( $m \leq 7$ ):

$$\begin{cases} Q_{i-小栅板} = \sum_{j=1}^m Q_{ij} \\ dp_{i1} = dp_{i2} = \dots = dp_{im} = dp_{i-组件} \\ \text{对于 } j \in [1, m], dp_{ij} = f_{ij}(Q_{ij}) \\ dp_{i-小栅板} = k(Q_{i-小栅板}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $j$  为组件编号;  $f_{ij}$  为小栅板联箱  $i$  上各组件  $j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) 的压降和流量的关系, 通过水力试验得出;  $k$  为小栅板联箱压降和流量的关系, 通过水力试验得出;  $Q_{ij}$  为小栅板联箱  $i$  上各组件  $j$  的流量, kg/s;  $dp_{ij}$  为小栅板联箱  $i$  上各组件  $j$  的压降, Pa;  $Q_{i-小栅板}$  为小栅板联箱  $i$  的总流量, kg/s;  $dp_{i-小栅板}$  为小栅板联箱  $i$  自身的压降, kPa;  $dp_{i-组件}$  为小栅板联箱  $i$  上安插的所有组件的压降, kPa。

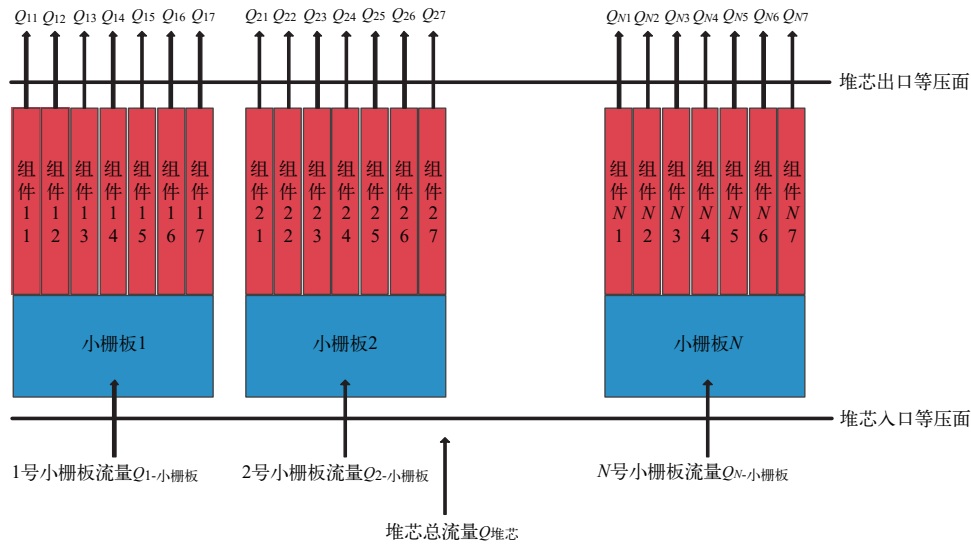


图1 堆芯流量分配理论计算模型

Fig. 1 Theoretical calculation model for core flow distribution

对于堆芯各个小栅板联箱,连同其上安插的组件视为堆芯的1个通道,整个堆芯共有 \$N\$ 个通道:

$$\begin{cases} Q_{堆芯} = \sum_{i=1}^N Q_{i-小栅板} \\ dp_{i-通道} = dp_{i-组件} + dp_{i-小栅板} \\ dp_{堆芯} = dp_{1-通道} = dp_{2-通道} = \dots = dp_{N-通道} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$Q\_{堆芯}\$ 为堆芯总流量, kg/s; \$dp\_{i-通道}\$ 为小栅板联箱 \$i\$ 的总压降(包含小栅板联箱本身压降以及其上安插组件的压降), kPa; \$dp\_{堆芯}\$ 为堆芯总压降, kPa。

根据式(1)和式(2)即可构建方程组,结合各类组件的水力特性、小栅板联箱的水力特性可以获得各组件的流量分配理论值。采用式(3)将计算得到的流量理论值(\$Q\_{计算}\$)与设计值(\$Q\_{设计}\$)进行对比,可以得到小栅板联箱的压降对组件流量分配的影响。

$$\delta = \frac{Q_{计算} - Q_{设计}}{Q_{设计}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, \$\delta\$ 为小栅板联箱压降导致的各类组件流量与设计值之间的相对偏差。

\$\delta\$ 是小栅板联箱压降对组件流量分配影响的判别指标。\$\delta\$ 的绝对值越大则代表小栅板联箱压降对组件流量分配影响越大,反之亦然。在设计过程中不希望出现较大的负偏差,否则该组件温度会比设计结果更高,甚至超过设计限值。

组件在堆内的流量分配受到诸多因素影响,而本文主要研究小栅板联箱压降这单一因素对组件流量分配的影响,通过研究得出定量数据。研

究过程中需要排除其他因素的干扰,因此不考虑诸如加工公差导致阻力特性发生变化、小栅板联箱混流腔导致的流量分配不均<sup>[9-10]</sup>、组件管脚漏流等因素对组件流量分配的影响。

### 3 小栅板联箱压降对流量分配的影响

本文以 CEFR 为研究对象,研究小栅板联箱压降对堆芯组件流量分配的影响,并研究 CEFR 组件压降设计值优化的可能性。

#### 3.1 CEFR 堆芯介绍

在平衡态堆芯布置下,CEFR 堆芯组件分为 5 类共 712 盒,其中 127 盒组件为强迫循环冷却组件,包括燃料组件 81 盒、控制棒组件 8 盒、中子源组件 1 盒和 II 型不锈钢组件 37 盒。在额定工况下,全堆芯冷却剂总流量为 301 kg/s,强迫循环冷却组件流量约占堆芯总流量的 90%。根据组件盒功率的大小将燃料区 81 盒组件设计成 4 个流量区:燃料 1~4 区;其余循环冷却组件,包括中子源组件、补偿棒组件、安全棒组件、调节棒组件和 II 型不锈钢组件,各为 1 个流量区<sup>[11-12]</sup>。CEFR 强迫循环冷却组件布置如图 2 所示,组件的流量设计值和压降设计值如表 1 所列。在平衡态堆芯布置下,共有 7 圈强迫循环冷却组件。

由表 1 可看出,在进行 CEFR 堆芯热工水力设计时,考虑了小栅板联箱压降对堆芯流量分配的影响。对于这 7 圈强迫循环冷却组件而言,前 5 圈组件的流量相对较大,因此所处小栅板联箱

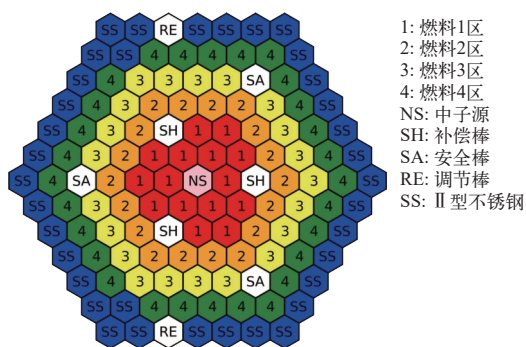


图2 CEFR 强迫循环冷却组件布置

Fig. 2 Layout of forced circulation assembly of CEFR

表 1 CEFR 强迫循环冷却组件设计参数

Table 1 Design parameter of forced circulation assembly of CEFR

组件类型	流量区号	额定流量/(kg/s)	组件盒数	额定压降/kPa
燃料组件	1	3.94	15	250
燃料组件	2	3.52	18	250
燃料组件	3	3.16	21	250
燃料组件	4	2.80	27	270
SH	5	0.55	3	250
SA	6	0.25	3	250
RE	7	0.25	2	270
NS	8	0.25	1	250
SS	9	0.15	37	270

的流量也相对较大,小栅板联箱的压降也相对较大;后两圈组件的流量相对较小,因此所处小栅板联箱的流量也相对较小,小栅板联箱的压降也相对较小。考虑到上述原因,前5圈组件的压降设计值为250 kPa,后两圈组件的压降设计值为270 kPa,即前5圈组件的额定压降要略小于后两圈,一定程度上补偿了小栅板联箱压降的差异。

CEFR 堆芯装载了37盒强迫取钠型小栅板联箱,其中25盒安插了强迫循环冷却组件,另外12盒安插了自然分流冷却组件。安插了强迫循环冷却组件的小栅板联箱的布置如图3所示,这些小栅板联箱的流量和组件装载情况如表2所列。图3中的透明六边形代表1个小栅板联箱,其所覆盖的组件即为其上安插的组件;小栅板联箱内的数字代表小栅板联箱类型,与表2第1列相对应。

根据 CEFR 小栅板联箱单体水力特性试验结果,得到了小栅板联箱压降  $dp_{\text{小栅板}}$  与钠质量流量  $Q$  的关系<sup>[12]</sup>:

$$dp_{\text{小栅板}} = 48.532Q^{1.987} \quad (4)$$

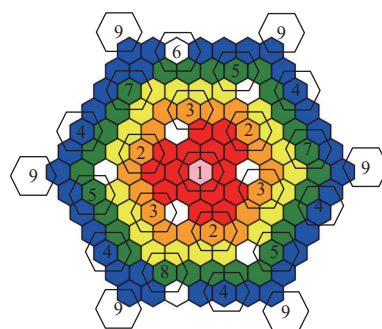


图3 安插强迫循环组件的小栅板联箱布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of distribution header with forced circulation assembly installed

表 2 安插强迫循环组件的小栅板联箱的流量和组件装载情况

Table 2 Flow rate and loading of distribution header with forced circulation assembly installed

小栅板联箱类型	数目	小栅板联箱上各流量区组件数目									总流量/(kg/s)
		1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	9区	
1	1	6								1	23.89
2	3	2	3	2							24.76
3	3	1	3	2		1					21.37
4	5				2					3	6.05
5	3			1	3		1			2	12.11
6	1				2			1		2	6.15
7	2			2	2					3	12.37
8	1			2	2			1		2	12.47
9	6									1	0.15

根据表2,单个小栅板联箱最大流量为24.76 kg/s,结合小栅板联箱水力特性试验结果,可以得出额定工况下最大流量的小栅板联箱的压降约为30 kPa。最大流量的小栅板联箱上安插组件的额定压降为250 kPa,因此 CEFR 堆芯总压降为280 kPa。

### 3.2 计算结果

首先进行现有设计下 CEFR 小栅板联箱压降对组件流量分配的影响分析,获得流量分配计算值与设计值之间的偏差;然后研究改变组件压降设计值是否能够降低组件流量分配的最大负偏差,探究组件压降设计优化的可能性。由于设计过程中最关心燃料组件流量分配情况,因此讨论以燃料组件为重点。

#### 1) 原始堆芯

根据 CEFR 堆芯热工水力设计结果,可以获得全堆芯强迫循环冷却组件流量的偏差,如图4所示,各类型小栅板联箱上安插组件流量的偏差

如表3所列。

由计算结果可得到,CEFR小栅板联箱压降造成燃料组件流量分配的相对偏差为-0.99%~3.18%。燃料组件流量分配最大负相对偏差为-0.99%,出现在流量最大的小栅板联箱上(第2类小栅板联箱),这是由该小栅板联箱压降最大所导致。即使已经考虑了降低大流量小栅板联箱上组件的压降设计值,还是不能完全避免负的流量分配偏差。如果1个小栅板联箱上安插了两种不同压降的组件(如第5、7类小栅板联箱),那么组件将出现“抢流量”现象,额定压降较低的组件分配到的流量比设计值要大,而额定压降较高的组件分配到的流量比设计值要小。计算得到的堆芯总压降为273 kPa,略小于设计压降280 kPa。

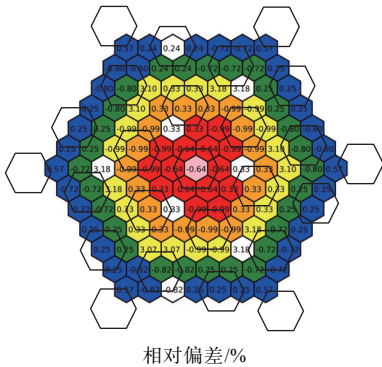


图4 堆芯强迫循环冷却组件流量的偏差

Fig. 4 Flow rate deviation of forced circulation assembly

表3 各类型小栅板联箱上组件流量的偏差

Table 3 Flow rate deviation of forced circulation assemblies for various types of distribution headers

参数	不同小栅板联箱类型下的参数值								
	1型	2型	3型	4型	5型	6型	7型	8型	9型
流量区	1	1	1	4	3	4	3	3	9
δ/%	-0.64	-0.99	0.33	0.25	3.18	0.24	3.1	3.07	0.57
流量区	8	2	2	9	4	7	4	4	
δ/%	-0.64	-0.99	0.33	0.25	-0.72	0.24	-0.8	-0.82	
流量区		3	3		6	9	9	7	
δ/%		-0.99	0.33		3.18	0.24	-0.8	-0.82	
流量区			5		9			9	
δ/%			0.33		-0.72			-0.82	

2) 优化设计

组件压降优化设计的方法是针对流量偏差最大的组件,研究导致流量偏差的原因,确定压降优化的方向,并进行敏感性分析。本文针对CEFR

进行优化研究,探讨降低燃料组件流量分配最大负偏差的可能性。

对于CEFR原始堆芯,小栅板联箱压降导致燃料组件流量分配的最大负相对偏差为-0.99%。根据原始堆芯计算结果,燃料组件流量分配最大负偏差是由流量最大小栅板联箱上组件的压降设计值过大、与小栅板联箱压降不匹配所导致。因此可以考虑进一步降低前5圈组件的压降设计值。表4~6列出前5圈组件设计压降由250 kPa分别下降至249 kPa、248.5 kPa和248 kPa时组件流量分配的偏差。

表4 前5圈压降为249 kPa时组件流量分配的偏差

Table 4 Flow rate distribution deviation when pressure drop of assemblies in the first 5 cycles is 249 kPa

参数	不同小栅板联箱类型下的参数值								
	1型	2型	3型	4型	5型	6型	7型	8型	9型
流量区	1	1	1	4	3	4	3	3	9
δ/%	-0.58	-0.94	0.38	0.12	3.25	0.11	3.17	3.14	0.44
流量区	8	2	2	9	4	7	4	4	
δ/%	-0.58	-0.94	0.38	0.12	-0.85	0.11	-0.93	-0.95	
流量区		3	3		6	9	9	7	
δ/%		-0.94	0.38		3.25		-0.93	-0.95	
流量区			5		9			9	
δ/%			0.38		-0.85			-0.95	

表5 前5圈压降为248.5 kPa时组件流量分配的偏差

Table 5 Flow rate distribution deviation when pressure drop of assemblies in the first 5 cycles is 248.5 kPa

参数	不同小栅板联箱类型下的参数值								
	1型	2型	3型	4型	5型	6型	7型	8型	9型
流量区	1	1	1	4	3	4	3	3	9
δ/%	-0.56	-0.91	0.41	0.05	3.28	0.04	3.2	3.18	0.37
流量区	8	2	2	9	4	7	4	4	
δ/%	-0.56	-0.91	0.41	0.05	-0.91	0.04	-0.99	-1.02	
流量区		3	3		6	9	9	7	
δ/%		-0.91	0.41		3.28	0.04	-0.99	-1.02	
流量区			5		9			9	
δ/%			0.41		-0.91			-1.02	

由表4~6可看出:前5圈组件额定压降为249 kPa时,燃料组件流量分配最大负相对偏差较原始堆芯有所降低,从-0.99%下降至-0.95%;随着前5圈组件额定压降继续下降,燃料组件流量分配最大负相对偏差较原始堆芯反而逐渐增加,从-0.95%上升至-1.02%和-1.08%。这3种情况

表6 前5圈压降为248 kPa时组件流量分配的偏差  
Table 6 Flow rate distribution deviation when pressure drop of assemblies in the first 5 cycles is 248 kPa

参数	不同小栅板联箱类型下的参数值								
	1型	2型	3型	4型	5型	6型	7型	8型	9型
流量区	1	1	1	4	3	4	3	3	9
$\delta/\%$	-0.53	-0.89	0.44	-0.01	3.32	-0.02	3.24	3.21	0.31
流量区	8	2	2	9	4	7	4	4	
$\delta/\%$	-0.53	-0.89	0.44	-0.01	-0.98	-0.02	-1.06	-1.08	
流量区		3	3		6	9	9	7	
$\delta/\%$		-0.89	0.44		3.32	-0.02	-1.06	-1.08	
流量区			5		9		9		
$\delta/\%$			0.44		-0.98		-1.08		

下, 流量分配最大负偏差组件所处的位置也由原前5圈变为第6圈。一方面, 随着前5圈组件额定压降降低, 进一步补偿了大流量小栅板联箱的大压降, 因此前5圈燃料组件的最大流量分配负偏差逐渐减小; 另一方面, 随着前5圈组件额定压降的降低, “抢流量”效应更加明显, 因此第6圈燃料组件最大流量分配负偏差逐渐增大。

#### 4 结论

本文对钠冷快堆小栅板联箱压降对组件流量分配的影响进行了研究, 探讨了小栅板联箱压降对组件流量分配影响的机理和理论计算模型, 给出了堆芯组件压降设计的优化方法, 并针对CEFR堆芯进行了组件压降的优化设计, 通过优化设计降低了CEFR燃料组件流量分配负偏差。结果表明, 在进行钠冷快堆堆芯热工水力设计时, 需要结合实际堆芯布置分析组件压降设计值的优化方向, 并进行敏感性分析, 以确定组件的最优设计压降, 将小栅板联箱压降对组件流量分配影响降低到最低程度。

#### 参考文献:

[1] 苏著亭, 叶长源, 阎凤文, 等. 钠冷增值快堆[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.  
[2] 张东辉, 杨洋, 赵佳宁. 中国实验快堆的主要技术创新和工程经验[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(增刊): 194-198. ZHANG Donghui, YANG Yang, ZHAO Jianing. Main technical innovation and engineering experience of China Experimental Fast Reactor[J]. Atomic Energy Science

and Technology, 2020, 54(Suppl.): 194-198(in Chinese).  
[3] 冯预恒, 胡文军, 乔雪冬, 等. CEFR小栅板联箱及其节流件数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(增刊): 463-467. FENG Yuheng, HU Wenjun, QIAO Xuedong, et al. Numerical simulation of CEFR small grid header and its throttle[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(Suppl.): 463-467(in Chinese).  
[4] 郑怡姍, 冯预恒. 示范快堆大栅板联箱水力特性数值模拟[C]/第十五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学术年会. [出版地不详]: [出版者不详], 2017.  
[5] 林超, 杨红义, 周志伟. 钠冷快堆自然循环组件子通道程序初步研发[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(3): 423-431. LIN Chao, YANG Hongyi, ZHOU Zhiwei. Preliminary development of sub-channel code for natural convection assembly of sodium cooled fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(3): 423-431(in Chinese).  
[6] 杨红义. 快堆热工水力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2022.  
[7] ROYCHOWDHURY D G, VINAYAGAM P P, RAVICHANDAR S C, et al. Thermal hydraulic design of PFBR core, LMFR core thermohydraulics: Status and prospects[R]. Vienna: IAEA, 2000.  
[8] KOVALEV N V, PROKOSHIN A M, KUDINOV A S, et al. Use of remix spent mixed fuel plutonium in the BN-1200 reactor[J]. Nuclear Energy and Technology, 2023, 9(2): 131-136.  
[9] 刘少华. 快堆小栅板联箱内七盒组件流量分配特性实验研究与数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.  
[10] 李淞, 周志伟, 冯预恒. CEFR堆芯组件安装方式对组件间流量分配的影响[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(2): 207-211. LI Song, ZHOU Zhiwei, FENG Yuheng. Impact of CEFR core assembly installation on flow rate distribution among core assemblies[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(2): 207-211(in Chinese).  
[11] 刘一哲, 薛秀丽, 许义军, 等. 中国实验快堆全堆芯流量分配计算与试验[J]. 核动力工程, 2012, 33(增刊1): 100-103. LIU Yizhe, XUE Xiuli, XU Yijun, et al. Calculation and test of flow distribution in the whole core of China Experimental Fast Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(Suppl.1): 100-103(in Chinese).  
[12] 中国实验快堆最终安全分析报告[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2008.