

# 栅径比对环形燃料外周向温度分布 不均匀性影响

曾付林 唐锚 赵鹏程 向钊才  
(南华大学核科学技术学院 衡阳 421001)

**摘要** 环形燃料采用紧密栅结构,燃料棒束内沿周向的温度分布存在明显不均匀性现象。本文基于 ANSYS FLUENT 建立了环形燃料组件计算流体力学分析模型,分析不同栅径比下正方形与六边形环形燃料组件流动换热特性,研究组件内环形燃料外周向温度分布不均匀性。研究发现:适当增大栅径比有利于环形燃料外周向温度的展平,正方形组件栅径比在 1.07~1.09 之间较为合适;六边形组件环形燃料外周向温度分布不均匀性略低于正方形组件,栅径比可选择在 1.06~1.09 之间。增大栅径比对棒间隙处温度的均匀性改善最明显,对近壁面处的温度均匀性改善次之。研究结果可为环形燃料的优化设计提供参考。

**关键词** 环形燃料, 周向温度分布, 栅径比, 子通道分析, 计算流体力学

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090601

## Influence of the pitch-to-diameter ratio on the circumferential non-uniformity of annular fuel outer temperature distribution

ZENG Fulin TANG Mao ZHAO Pengcheng XIANG Zhaocai

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract** [Background] The annular fuel has a closely arranged structure, and the coolant flow at both the gap between the stringers and the near wall surface is small, which is unfavorable to the coolant mixing between the subchannels and the uniform circumferential temperature distribution. [Purpose] This study aims to explore the effect of the ratio of gate spacing to gate diameter on the distribution of temperature along the circumference direction. [Methods] Based on the software code ANSYS FLUENT, a computational fluid dynamics (CFD) analysis model for annular fuel assemblies was established. Then, the calculations in hydromechanics and the numerical simulation using operating parameters of typical pressurized water reactor (PWR) were performed to analyze the coolant flow and heat transfer characteristic when the annular fuels in square or hexagonal arrangement under different grid ratios. The circumferential non-uniformity of annular fuel outer temperature distribution was investigated under circumstances of various pitch-to-diameter ratio. [Results] Computational results show that an appropriate increase of grid ratio is beneficial to the uniform circumferential temperature distribution of stringers.

国家自然科学基金(No.U21B2059)、国防科工局核能开发科研项目(cosSYST等热工水力计算分析软件的自主化研发与示范应用)资助

第一作者: 曾付林, 男, 2002年出生, 现就读于南华大学核科学技术学院, 研究领域为先进核能系统热工水力分析

通信作者: 赵鹏程, E-mail: pengcheng.zhao@usc.edu.cn

收稿日期: 2022-10-20, 修回日期: 2023-01-19

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U21B2059), Nuclear Energy Development Research Project of State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense (Independent development and demonstration application of thermal hydraulic calculation and analysis software such as cosSYST)

First author: ZENG Fulin, male, born in 2002, currently studying at the School of Nuclear Science and Technology, University of South China, focusing on thermal-hydraulic analysis of advanced nuclear power systems

Corresponding author: ZHAO Pengcheng, E-mail: pengcheng.zhao@usc.edu.cn

Received date: 2022-10-20, revised date: 2023-01-19

The appropriate grid ratio of square component is between 1.07 and 1.09, and the non-uniformity of circumferential temperature distribution of triangle component is slightly lower than that of square component. Therefore, the appropriate grid ratio is between 1.06 and 1.09. [Conclusions] The temperature distribution at the bar gap is improved most obviously by increasing the grid ratio and the improvement in the near surface takes the second. The results of this study provide a reference for the subsequent optimization design of the grid ratio of annular fuel.

**Key words** Annular fuel, Circumferential temperature distribution, Pitch to diameter ratio, Subchannel analysis, Computational fluid dynamics

环形燃料采用内、外冷却流道增大了冷却能力,相较于传统棒状燃料元件,降低了燃料芯块的最大温度,可以在保持或改进现有反应堆安全裕量的前提下,提升反应堆功率密度20%~50%,具有优良的安全性与经济性,已成为压水堆先进燃料元件的重要发展趋势之一<sup>[1-2]</sup>。其自从MIT研究者提出以来,中国、美国、韩国以及伊朗等国家均已对其做了大量的热工水力性能分析<sup>[2-5]</sup>,且环形燃料棒束直径明显大于传统棒状燃料直径,因此更加地稳定,不容易产生振动,只要保持合理的压降即可将棒束间间隙降低到1 mm<sup>[6]</sup>。中国原子能科学研究院初步明确了环形燃料组件概念设计以AFA-3G组件为参考,在保持原有组件几何尺寸和“水铀比”不变的情况下,综合考虑堆芯物理、热工水力以及元件性能等因素,采用13×13的排列结构<sup>[2]</sup>。因此,目前大多数已有试验将环形燃料栅径比设置为1.07,且对环形燃料外径尺寸的设置一般在15.3~15.6 mm,通过栅径比、栅距、燃料外径以及棒束间间隙宽度之间的关系可计算得棒束间间隙宽度仅有1.1~1.2 mm。这种紧密栅组件与栅径比较大的燃料组件相比,其直观的特征是燃料棒之间的间距较小,导致流动与换热沿燃料棒周向存在明显的不均匀性,使得包壳温度沿燃料棒周向分布不均,进而容易导致包壳在热应力下发生形变甚至破损,对反应堆的安全性存在隐患。在燃料组件内,换热沿周向存在不均匀性,且不均匀性随着栅径比的减小而急剧增大<sup>[7]</sup>,通常认为栅径比大于1.3时这种不均匀性可以忽略,因此,对于大多应用于沸水堆及压水堆的传统棒状燃料无须考虑周向温度的分布,而对于紧密排列的环形燃料而言,其周向不同角度处的温度可能差异很大,并且中心通道、边通道、角通道的换热规律并不相同,需要分别进行考虑。

Cheng等<sup>[8]</sup>对正方形、六边形组件典型子通道热工水力行为进行模拟,发现紧密栅棒束中,尤其是正方形组件,存在强烈的周向传热不均匀性。Subbotin等<sup>[9]</sup>对紧密排列的七棒束模型进行实验研究,也观测到了温度沿周向分布的不均匀性,并提出了包壳表面温度关于角度的半经验公式。Krauss

等<sup>[10-11]</sup>对紧密栅内流动和传热的物理量进行测算,发现了燃料棒间隙处流体流速和温度存在周期性波动。杨婷<sup>[12]</sup>对紧密栅燃料组件进行分析,提出影响温度分布不均的主要无量纲数是栅径比,并提出确定描述传热沿周向不均匀性的经验关系式。魏君翰等<sup>[13]</sup>对环形燃料冷却剂流动特性进行数值模拟时发现两环形燃料棒间隙处存在局部高温区。以上多数研究均基于棒状燃料的紧密栅组件,针对双面冷却的环形燃料组件其周向温度分布的研究还较为有限。

本文建立环形燃料组件计算流体力学分析模型,分析不同栅径比下正方形与六边形环形燃料组件流动换热特性,研究组件内环形燃料外周向温度分布不均匀性。通过归一化分析各类型子通道处的环形燃料外周向温度,分别得出正方形、六边形环形燃料组件的最佳栅径比范围。

## 1 分析模型建立

本文讨论不同栅径比下正方形与六边形环形燃料组件的周向温度分布,不考虑定位格架等的影响,建立3×3的正方形组件以及19棒束六边形组件的光棒模型,其横截面示意图分别如图1(a)、(b)所示。参考相关试验<sup>[14]</sup>,对单根燃料棒的几何尺寸参数的设置如表1所示,并基于该尺寸参数建立栅径比为1.03、1.06、1.09、1.12的3×3正方形和19棒束六边形燃料组件模型。

为节约计算资源,本文基于燃料组件为径向无限大棒束的假设,根据几何模型的对称性,采用1/8正方形燃料组件和1/12六边形燃料组件构建环形燃料热工水力分析模型。由于燃料组件中心通道与靠近壁面处的壁面通道冷却剂流动特征和换热规律均存在差异,按图2所示,将环形燃料模型的外通道划分为中心通道、边通道以及角通道。以距离入口0.25 m、0.50 m以及0.75 m处最具代表性的三个截面来反映不同高度处周向温度分布的差异,在各截面中的 $\theta$ 范围内沿外包壳外表面每隔3°~4°取一个温度测点,正方形排布棒束各子通道均取了15个温度测点,六边形排布棒束各子通道选取10个温度测

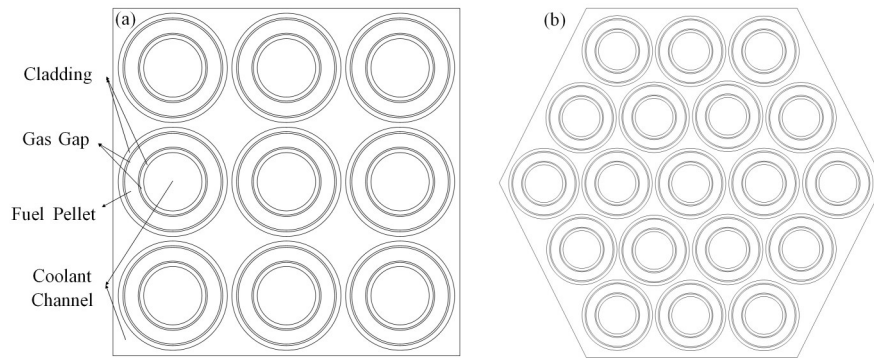


图1 燃料棒束横截面 (a) 正方形组件, (b) 六边形组件  
Fig.1 Cross-section of the fuel rod bundle (a) Square component, (b) Hexagonal component

表1 环形燃料几何尺寸设计参数  
Table 1 Ring fuel geometry design parameters

几何尺寸参数 Geometric dimension parameters	数值 Numeric value / mm
内包壳内径 Inner diameter of the internal cladding	8.33
内包壳外径 Outer diameter of the internal cladding	9.48
燃料芯块内径 Fuel pellet inner diameter	9.60
燃料芯块外径 Fuel pellet outer diameter	13.75
外包壳内径 Inner diameter of the outer cladding	13.88
外包壳外径 Outer diameter of the outer cladding	15.52
有效加热长度 Effective heating length	1 000

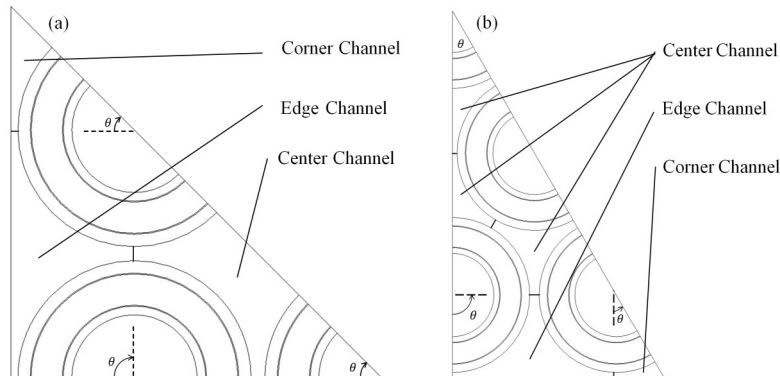


图2 燃料组件计算域 (a) 正方形组件, (b) 六边形组件  
Fig.2 Component computing area of fuel assembly (a) Square component, (b) Hexagonal component

点,并提取该处的温度作为各子通道周向温度的分布。

## 2 网格划分及网格敏感性分析

利用 ANSYS 中的 Mesh 模块对模型进行全结构化网格划分,将内、外流体区域、气隙区域以及不同材料的固体区域通过交界面进行连接,交界面网格尺寸相同,以保证不同区域的网格节点完全重合,提高计算的准确性。关闭自动清除特征功能,以避免狭小气隙的特征尺寸在网格划分时被清除。由于燃料模型截面存在较多的圆弧线,不利于高质量网格的生成,因而设置精细的捕获曲率,此时在有曲率变化处网格会自动加密,以控制曲面处网格的变

化,使转角处的曲边网格细化。对边缘尺寸进行精细调整,根据不同材料的厚度调整网格数量,分别对内包壳设置3层网格、对外包壳设置4层网格、对芯块设置8层网格、内外气隙分别设置一层网格。对内通道采用全三角形的扫掠方法,包壳、芯块、气隙以及外通道采用全四边形的扫掠方法,生成的网格如图3所示。

生成的网格质量均大于0.6,不同栅径比的正方形组件网格数量在1 588 000~1 708 000之间,六边形组件网格数量在3 032 000~3 263 000之间。

将栅径比为1.06的正方形和六边形组件的网格数量分别增至5 232 000和8 245 854,通过计算外通道压降的变化进行网格敏感性分析。正方形组件在

网格加密前的外通道压降为 74.109 kPa, 进行网格加密后为 73.778 kPa, 仅变化了 0.45%; 六边形组件在网格加密前后的外通道压降分别为 150.802 kPa、151.872 kPa, 仅变化了 0.71%, 可认为数值解在未进行网格加密前已逐渐收敛。为节省计算量与计算时间, 选取初始网格数进行计算。

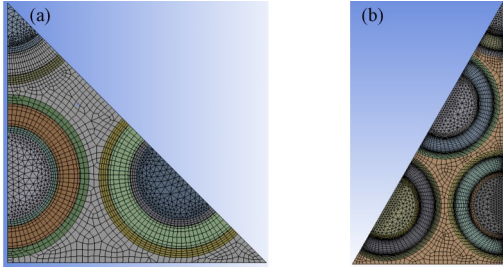


图3 组件网格划分 (a) 正方形组件, (b) 六边形组件  
Fig.3 Mesh partitioning of the components  
(a) Square component, (b) Hexagonal component

### 3 求解条件设置

本文参考典型压水堆的运行参数<sup>[15]</sup>, 设置材料物性参数及计算工况分别如表 2、3 所示。

表2 材料物性参数  
Table 2 Physical properties of the material

	间隙 Interval	芯块 Fuel pellet	包壳 Cladding
材料 Material	氦气 Helium	烧结 UO <sub>2</sub> sintered uranium dioxide	Zr-4 合金 Zr-4 alloy
密度 Density / kg·m <sup>-3</sup>	2.54	10 460	6 512
导热系数 Thermal conductivity / W·(m·K) <sup>-1</sup>	0.24	4.26	16.74
比热容 Specific heat capacity / J·(kg·K) <sup>-1</sup>	5 191	307	328
黏度 Viscosity / Pa·s	3.78× 10 <sup>-5</sup>		

表3 单棒模型运行参数  
Table 3 Operating parameters for a single fuel rod model

参数 Parameter	参数值 The parameter value
燃料棒平均线功率 Average line power density of fuel rods / kW·m <sup>-1</sup>	74.3
入口温度 Temperature at the entrance / K	567.87
参考压力 Reference pressure / MPa	15.5
总流量 Total traffic / kg·s <sup>-1</sup>	0.783 57

基于计算流体力学程序 ANSYS FLUENT 开展模拟分析, 参考国内外相关学者研究结论, 采用 SST  $k-\omega$  湍流模型<sup>[16-18]</sup>, 使热功率沿轴向呈余弦分布, 设置冷却剂、包壳、气隙、芯块之间的接触面为耦合传热面, 并设置为无滑移界面, 组件外壁及顶、底部均与外界绝热, 组件对称分割面设置为对称面, 各物理量在该面处法向梯度为零。内、外通道入口设置为质量流入口, 质量流量按横截面积的大小比例进行分配, 出口均为压力出口, 所有方程的离散格式采用较高精度的二阶迎风格式, 设置计算的迭代步数为 200, 所有计算的物理量都能在 200 步以内收敛, 且残差均小于 10<sup>-5</sup>。

## 4 结果分析及讨论

### 4.1 温度、角度及不均匀系数的归一化

为便于对不同栅径比、不同子通道类型, 以及不同排布的燃料组件周向温度分布进行比较, 将所取得的温度数值及其对应的角度进行 min-max 归一化, 令归一化温度为:

$$T' = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (1)$$

角度的归一化与此类似, 将温度与角度的值均固定在 0~1 之间以得到不同角度处归一化的温度分布。

并且为了更加准确、直观地描述温度分布的不均匀性, 引入颗粒分析方法中的筛分法<sup>[19]</sup> 计算不均匀系数  $C_u$ , 对不均匀系数  $C_u$  的说明如下:

定义一个数列:  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  以及两个阈值  $C_{10}$ 、 $C_{80}$ , 将所有满足  $x_i \leq C_{10}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) 的  $x_i$  进行求和, 使其求得的和恰好不大于数列  $X$  之和的 10%; 将所有满足  $x_i \leq C_{80}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) 的  $x_i$  进行求和, 使其求得的和恰好不大于数列  $X$  之和的 80%, 得到数列的不均匀系数:

$$C_u = \frac{C_{80}}{C_{10}} \quad (2)$$

不均匀系数越大, 则数据分布的不均匀性越大, 不均匀系数越接近于 1, 则数据分布的不均匀性越小。

对不同栅径比下各子通道外包壳周向温度分布及其不均匀系数进行整理后观察到如下现象。

### 4.2 正方形组件中心通道周向温度分布

将不同栅径比的各个正方形组件相同高度处的外包壳表面温度以及对应的角度作 min-max 归一

化,得到如图4所示的正方形组件中心通道周向温度分布图。由图4发现,外包壳周向温度分布数据点存在些许震荡与跳动,相关研究表明,外包壳周向温度分布的不均匀性主要取决于流道局部水力直径的变化<sup>[20]</sup>,并且与冷却剂的横向流动有关<sup>[21]</sup>,因此可认为其是由紧密栅内环形燃料棒束中复杂的流动特征以及强烈的交混所造成的。进一步可看出正方形组件中心通道处周向温度分布的均匀性受栅径

比的影响较大,两燃料棒的间隙处温度较高,而随着 $\theta$ 角的增大,温度逐渐降低,当栅径比为1.03时,中心通道处周向温度分布最不均匀,而将栅径比增大至1.06后,中心通道处周向温度分布的均匀性得到了明显的改善,当栅径比增大至1.09,此时的周向温度分布与栅径比等于1.12时的十分相近,此后若继续增大栅径比对周向温度分布不均匀性的改善意义不大。

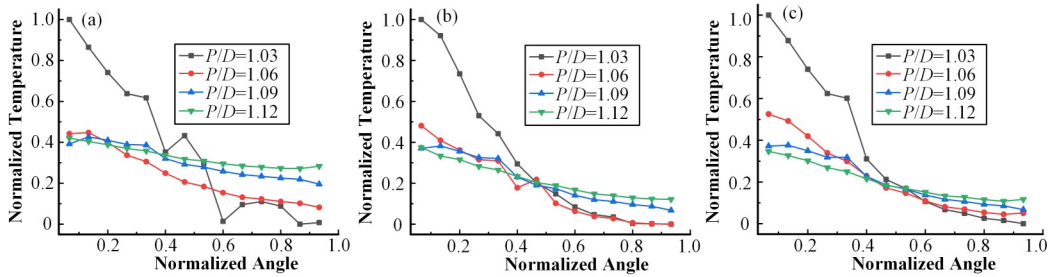


图4 正方形组件中心通道周向温度分布 (a) 距入口0.25 m处,(b) 距入口0.50 m处,(c) 距入口0.75 m处  
Fig.4 The central channel temperature of a square component distributed along the circumference (a) 0.25 m from the entrance, (b) 0.50 m from the entrance, (c) 0.75 m from the entrance

计算出所有组件三个子通道的三个典型高度处周向温度分布的不均匀系数,并对其作min-max归一化,将正方形组件中心通道的归一化不均匀系数展示如图5。可以看出,随着高度的增大,归一化不均匀系数也随之增大,冷却剂逐渐成为充分发展流,流道较窄处冷却剂流量逐渐减小,较宽处冷却剂流量逐渐增大。而随着栅径比的增大,归一化不均匀系数随之减小,栅径比从1.03增至1.06时,归一化不均匀系数减小幅度最大,在0.25 m、0.50 m、0.75 m高度处分别由0.46减小到0.14、0.60减小到0.30、0.80减小到0.34,而将栅径比从1.09增大到1.12时,归一化不均匀系数的减小量均低于0.1。基于对中心通道的分析,可以认为,目前大多数环形燃料试验将栅径比设置为1.07是合理的。

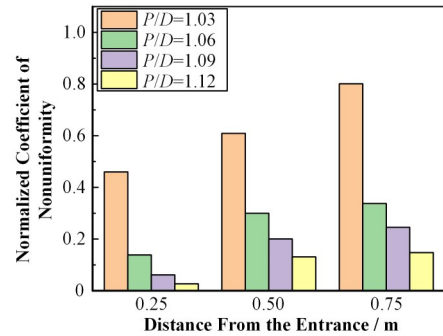


图5 正方形组件中心通道归一化不均匀系数  
Fig.5 Normalized coefficient of nonuniformity of the center channel of the square component

### 4.3 正方形组件边通道周向温度分布

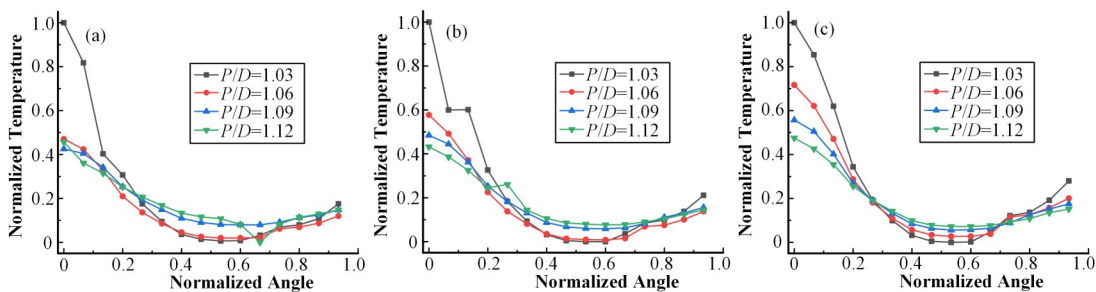


图6 正方形组件边通道周向温度分布 (a) 距入口0.25 m处,(b) 距入口0.50 m处,(c) 距入口0.75 m处  
Fig.6 The side channel temperature of a square component distributed along the circumference (a) 0.25 m from the entrance, (b) 0.50 m from the entrance, (c) 0.75 m from the entrance

使用§4.2中相同的方法得出正方形组件边通道归一化周向温度分布如图6所示,并将其归一化不

均匀系数展示如图7所示。由边通道温度分布可以看出,燃料棒靠近壁面的区域与两燃料棒间隙处温

度均较高,其中靠近壁面处温度比间隙处温度高出不少,边通道周向温度分布的不均匀性主要由燃料棒与壁面距离决定,因此其周向温度分布的不均匀性较中心通道的大。通过观察发现,栅径比越小的组件其棒束间隙处及近壁面处温度越高,外通道流道较宽处温度越低,由此可以推得栅径比越小其外流道较窄处和较宽处冷却剂流量分配差异越大。

由图6可以看出,栅径比从1.03增至1.06时周向温度分布仍有较大的改善,其0.25 m、0.50 m、0.75 m高度处的归一化不均匀系数分别从0.33减小到0.25、0.66减小到0.48、1减小到0.61,但降低程度较中心通道的小。

#### 4.4 正方形组件角通道周向温度分布

沿用上述方法得到归一化周向温度分布展示如图8所示,归一化不均匀系数展示如图9所示。由角通道周向温度分布可以看出,燃料棒靠近壁面处温度较高,其温度分布仅受壁面距离的影响,且分布趋势与边通道归一化角度在0~0.5范围内一致。由图8可看出,栅径比从1.03增至1.06时,周向温度分布不均匀性大幅改善,其0.25 m、0.50 m、0.75 m高度

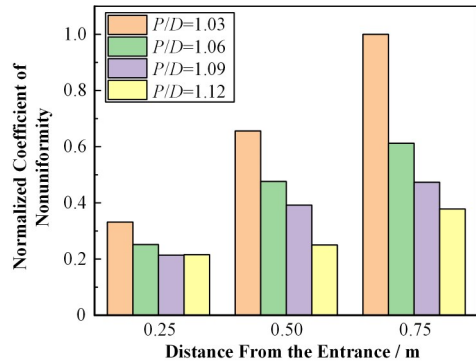


图7 正方形组件边通道归一化不均匀系数  
Fig.7 Normalized coefficient of nonuniformity of the side channel of the square component

处的归一化不均匀系数分别从0.23减小到0.20、0.46减小到0.29、0.77减小到0.51,但改善程度均小于中心通道和边通道,而栅径比从1.06增至1.09时,周向温度分布的不均匀性几乎不变,这是由于此时增大栅径比时仅增大了少许燃料棒与壁面间的距离,导致靠近壁面处的温度仅有少许下降,对周向温度的展平效果有限,与边通道类似,可通过增大壁面距离对其进行改善。

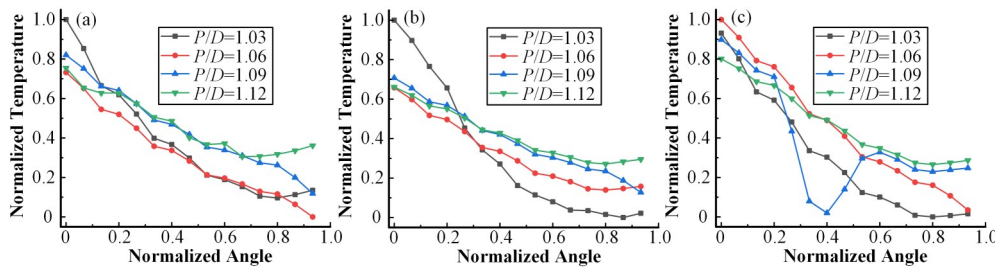


图8 正方形组件角通道周向温度分布 (a) 距入口0.25 m处,(b) 距入口0.50 m处,(c) 距入口0.75 m处  
Fig.8 Angular channel temperature of a square component distributed along the circumference  
(a) 0.25 m from the entrance, (b) 0.50 m from the entrance, (c) 0.75 m from the entrance

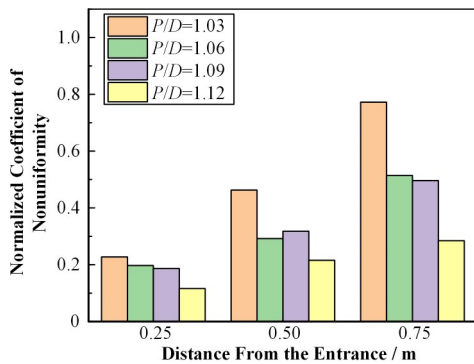


图9 正方形组件边通道归一化不均匀系数  
Fig.9 Normalized coefficient of nonuniformity of the angular channel of the square component

#### 4.5 六边形组件各子通道周向温度分布

按照上述方法得到六边形组件中心通道、边通道以及角通道的三个典型高度处归一化周向温度分布分别如图10~12所示,并将计算得的不均匀系数展示如图13所示。六边形组件各子通道外包壳的周向温度的分布规律与正方形组件的类似,且将栅径比从1.06增大至1.09后对周向温度的展平效果均不明显。但与正方形组件不同的是,其栅径比从1.03增大至1.06时,中心通道、边通道以及角通道的归一化不均匀系数分别下降了0.21~0.37、0.16~0.24以及0.09~0.42,各子通道对栅径比的敏感性从大到小依次为角通道、中心通道、边通道,这是由于六边形组件角通道面积太小造成的。在同一栅径比下,六边形组件各子通道的周向温度分布均比正方形组

件的均匀,各栅径比下中心通道、边通道和角通道的归一化不均匀系数分别比正方形组件各子通道归一化不均匀系数平均低了0.12、0.13和0.1,这主要是由于六边形组件各子通道水力直径较小,各子通道

的间隙区与中心区流道宽度差异不如正方形组件的大。综合上述考虑可将六边形组件栅径比设在1.06~1.09之间。

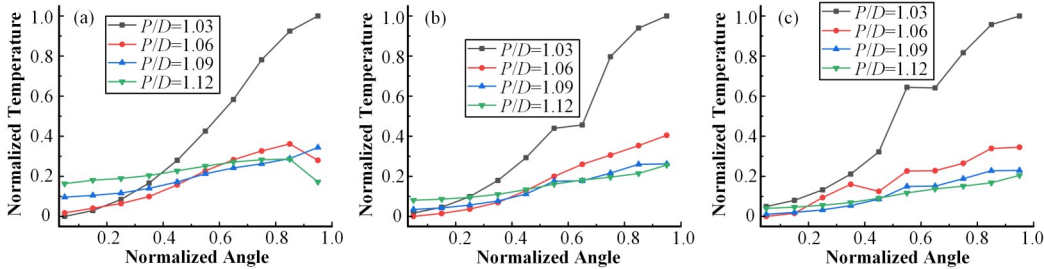


图10 六边形组件中心通道周向温度分布 (a) 距入口0.25 m处, (b) 距入口0.50 m处, (c) 距入口0.75 m处  
 Fig.10 Central channel temperature of a hexagonal component distributed along the circumference (a) 0.25 m from the entrance, (b) 0.50 m from the entrance, (c) 0.75 m from the entrance

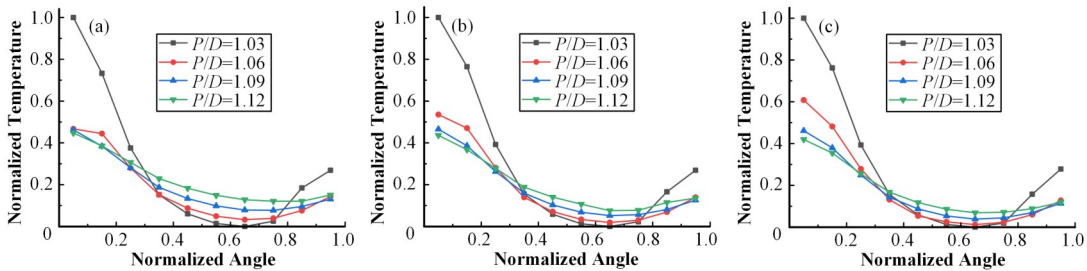


图11 六边形组件边通道周向温度分布 (a) 距入口0.25 m处, (b) 距入口0.50 m处, (c) 距入口0.75 m处  
 Fig.11 Side channel temperature of a hexagonal component distributed along the circumference (a) 0.25 m from the entrance, (b) 0.50 m from the entrance, (c) 0.75 m from the entrance

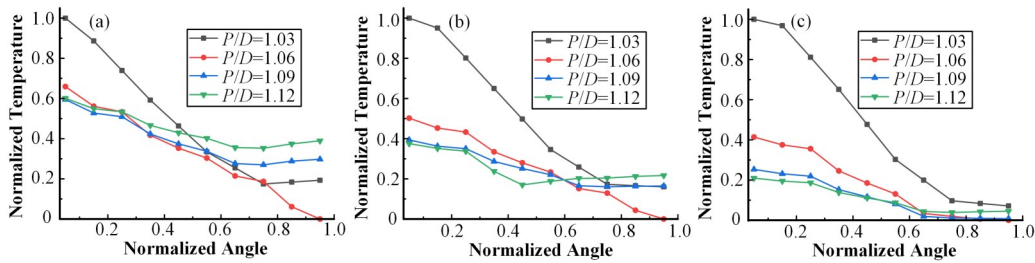


图12 六边形组件角通道周向温度分布 (a) 距入口0.25 m处, (b) 距入口0.50 m处, (c) 距入口0.75 m处  
 Fig.12 Angular channel temperature of a hexagonal component distributed along the circumference (a) 0.25 m from the entrance, (b) 0.50 m from the entrance, (c) 0.75 m from the entrance

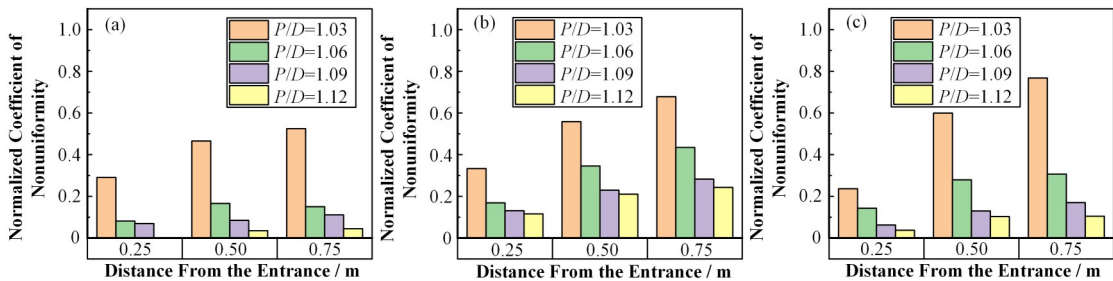


图13 六边形组件温度分布不均匀系数 (a) 中心通道, (b) 边通道, (c) 角通道  
 Fig.13 Normalized coefficient of nonuniformity of temperature distribution of hexagonal components (a) Central channel, (b) Side channel, (c) Angular channel

## 5 结语

本文基于 ANSYS FLUENT 建立环形燃料组件计算流体力学分析模型,分析不同栅径比下正方形与六边形环形燃料组件流动换热特性,研究组件内环形燃料外周向温度分布不均匀性,并分别得出正方形、六边形环形燃料组件的最佳栅径比范围。基于不同功率密度、流量大小会对包壳温度大小进行影 响,本文在仅有栅径比不同的条件下,对温度结果分别进行了 min-max 归一化的处理,最终得出无量纲温度分布趋势,因此本文结论在不同功率密度以及流量大小情况下仍然成立,主要结论如下:

1)增大栅径比有利于对环形燃料外周向温度进行展平,对正方形组件而言,栅径比在 1.07~1.09 之间较为合适,对于六边形组件而言,其外周向温度分布不均匀性略低于正方形组件,栅径比可选择在 1.06~1.09 之间。

2)增大栅径比对燃料棒间隙处温度的改善最为明显,对近壁面处温度的改善次之,对正方形组件而言,中心通道的环形燃料棒外周向温度分布对栅径比最为敏感,其次是边通道,最后是角通道;对六边组件而言,角通道周向温度分布对栅径比最为敏感,其次是中心通道,最后是边通道。

**作者贡献声明** 曾付林负责起草文章,分析/解释数据;唐锚负责实施研究,采集数据;赵鹏程负责获取研究经费,对文章的知识性内容作批评性审阅,指导;向钊才负责支持性贡献。

## 参考文献

- 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.
- 季松涛,何晓军,张爱民,等.压水堆核电站采用环形燃料元件可行性研究[J].原子能科学技术,2012, **46**(10): 1232 - 1236.  
JI Songtao, HE Xiaojun, ZHANG Aimin, *et al.* Study on feasibility of annular fuel applied in PWR nuclear power plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, **46**(10): 1232 - 1236.
- Kazimir M. High performance fuel design for next generation PWRs: Final report, MIT-NFC-PR-082[R]. US: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- Shin C H, Chun T H, Oh D S, *et al.* Thermal hydraulic performance assessment of dual-cooled annular nuclear fuel for OPR-1000[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, **243**: 291 - 300. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.12.010.
- Zaidabadi M, Ansarifar G R, Esteki M H. Thermal hydraulic analysis of VVER-1000 nuclear reactor with dual-cooled annular fuel using  $k-\omega$  SST turbulence model [J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, **101**: 118 - 127. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.09.027.
- Zhao J Y, No H C, Kazimi M S. Mechanical analysis of high power internally cooled annular fuel[J]. Nuclear Technology, 2004, **146**(2): 164 - 180. DOI: 10.13182/NT04-A3496.
- Gu H Y, Cheng X, Yang Y H. CFD analysis of thermal-hydraulic behavior in SCWR typical flow channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, **238**(12): 3348 - 3359. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2008.06.010.
- Cheng X, Tak Ni. CFD analysis of thermal-hydraulic behavior of heavy liquid metals in sub-channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, **236**(18): 1874 - 1885. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2006.02.001.
- Subbotin V I, Ushakov P A, Gabrianovich B N, *et al.* Heat exchange during the flow of mercury and water in a tightly packed rod pile[J]. The Soviet Journal of Atomic Energy, 1961, **9**(6): 1001 - 1009. DOI: 10.1007/BF01487460.
- Krauss T, Meyer L. Characteristics of turbulent velocity and temperature in a wall channel of a heated rod bundle [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1996, **12**(1): 75 - 86. DOI: 10.1016/0894-1777(95)00076-3.
- Krauss T, Meyer L. Experimental investigation of turbulent transport of momentum and energy in a heated rod bundle[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, **180**(3): 185 - 206. DOI: 10.1016/S0029-5493(98)00158-7.
- 杨婷.紧密栅内燃料棒周向传热不均匀性研究[D].上海:上海交通大学,2015.  
YANG Ting. Study on circumferential non-uniformity of heat transfer in tight lattice[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- 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: 11. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.047877.  
WEI Junhan, ZHAO Minfu. Numerical simulation of coolant flow in annular fuel rod bundles[C]//Proceedings of the 16th National Reactor Thermal Fluid Academic Conference and the 2019 Academic Annual Conference of the China Nuclear Reactor Thermo-Hydraulic Technology Key Laboratory. 2019: 11. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.



- 047877.
- 14 代启东, 夏兆东, 朱庆福. 百万千瓦级环形 MOX 燃料堆芯设计[J]. 原子能科学技术, 2015, **49**(12): 2205 - 2211. DOI: [10.7538/yzk.2015.49.12.2205](https://doi.org/10.7538/yzk.2015.49.12.2205).  
DAI Qidong, XIA Zhaodong, ZHU Qingfu. Core design for 1 000 MWt annular MOX fuel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, **49**(12): 2205 - 2211. DOI: [10.7538/yzk.2015.49.12.2205](https://doi.org/10.7538/yzk.2015.49.12.2205).
- 15 胡立强, 季松涛, 杨立新, 等. 流量分配比对环形燃料芯块传热特性影响数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2021, **55**(4): 647 - 653. DOI: [10.7538/yzk.2020.youxian.0757](https://doi.org/10.7538/yzk.2020.youxian.0757).  
HU Liqiang, JI Songtao, YANG Lixin, *et al.* CFD evaluation of heat transfer characteristic with change of flow distribution ratio for annular fuel pellet[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, **55**(4): 647 - 653. DOI: [10.7538/yzk.2020.youxian.0757](https://doi.org/10.7538/yzk.2020.youxian.0757).
- 16 Hamman K D, Berry R A. A CFD simulation process for fast reactor fuel assemblies[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, **240**(9): 2304 - 2312. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2009.11.007](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.11.007).
- 17 Merzari E, Fischer P, Yuan H, *et al.* Benchmark exercise for fluid flow simulations in a liquid metal fast reactor fuel assembly[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, **298**: 218 - 228. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2015.11.002](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.11.002).
- 18 Roelofs F, Gopala V R, Jayaraju S, *et al.* Review of fuel assembly and pool thermal hydraulics for fast reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, **265**: 1205 - 1222. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2013.07.018](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.07.018).
- 19 吴世亮, 倪晋仁, 李振山. 沙漠沙的筛分粒径与粒径计粒径的比较实验[J]. 泥沙研究, 2002(1): 60 - 65. DOI: [10.16239/j.cnki.0468-155x.2002.01.009](https://doi.org/10.16239/j.cnki.0468-155x.2002.01.009).  
WU Shiliang, NI Jinren, LI Zhenshan. Comparison of desert sand particle sizes obtained from sieving and settling approaches[J]. Journal of Sediment Research, 2002(1): 60 - 65. DOI: [10.16239/j.cnki.0468-155x.2002.01.009](https://doi.org/10.16239/j.cnki.0468-155x.2002.01.009).
- 20 Chen J Y, Gu H Y, Xiong Z Q, *et al.* Experimental investigation on heat transfer behavior in a tight 19 rod bundle cooled with supercritical R134a[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, **115**: 393 - 402. DOI: [10.1016/j.anucene.2018.02.010](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.02.010).
- 21 Gou J L, Ishiwarari Y, Oka Y, *et al.* CFD analyses in tight-lattice subchannels and seven-rod bundle geometries of a Super Fast Reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, **241**(5): 1656 - 1666. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2011.02.013](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.02.013).