

文章编号: 1007-4627(2018)02-0216-08

铅基反应堆燃料组件间隙横流周期性研究

范旭凯^{1,2}, 彭天骥¹, 范大军^{1,2}, 朱彦雷¹, 蔡义林¹, 顾龙^{1,†}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730030;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 燃料组件内冷却剂的横流对反应堆堆芯的换热有很大影响, 为研究铅基反应堆燃料组件内冷却剂的横向速度分布, 对 CiADS 反应堆燃料组件局部的 7, 19 棒束的单螺距及多螺距多种几何进行建模和 CFD(Computational Fluid Dynamics) 模拟, 并对其间隙内横向速度进行分析。研究表明: 19 棒束组件内通道、角通道的相邻间隙内横向速度的分布在组件轴向和横向上有明显周期性, 横向上根据两个内通道间隙平移旋转的位置关系由一个间隙的结果经过平移一定相位角度可以得到另一个间隙分布结果, 沿轴向多螺距模型每个螺距长度内横向速度分布一致。7 棒束组件在相同类型通道内横向速度分布大小及趋势与 19 棒束一致。少棒束单螺距组件结果进行横向及轴向的周期性延拓可以得到多棒束多螺距模型间隙内的横流分布。

关键词: CiADS; 铅基快堆; 绕丝; 横流; CFD

中图分类号: TL33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.02.216

1 引言

2002 年, GIF(Generation IV International Forum) 选取了六种最具有潜力的反应堆堆型作为第四代核能系统的参考堆型, 铅基冷却快堆以其良好的核燃料增值能力、核废料嬗变能力以及较高的安全性与经济性等优点位列其中^[1, 2]。作为第四代主力堆型, 铅基快堆的堆芯热工水力学特性备受国内外学者重视。其燃料棒在组件内常采用金属绕丝固定, 绕丝能搅混冷却剂使组件内温度分布均匀, 但也使组件内流场更复杂, 准确描述冷却剂在组件内的流动以及换热成为研究铅基堆燃料组件的重点及难点。近年来众多学者应用 CFD(Computational Fluid Dynamics) 等方法对其进行了很多研究^[2-13], 主要关注组件内冷却剂流场、温度场分布及沿程压降等。但大部分结果计算网格粗糙或者仅针对较小的 7 棒束单螺距模型, 结果的准确性和小模型结果的扩展性有待验证。

为研究铅基堆组件内冷却剂的横流分布特性, 以加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)反应堆的燃料组件为例^[14], 对比 19 棒束组件及 7 棒束组件间隙内横流的规律、相似性和周期性, 本文利用 STAR-CCM+ 软件^[15]对组件局部的几种模型进行精细化建模, 用 ANSYS FLUENT 软件^[15]进行流动模拟。

2 计算模型

2.1 燃料组件

CiADS 燃料组件内含有 60 根燃料棒和 1 根不锈钢棒, 呈正三角形排列, 利用金属绕丝进行定位, 燃料棒直径为 13.1 mm, 燃料棒中心距为 15.1 mm, 长度 1340 mm, 绕丝直径 2 mm, 螺距 144 mm。对上述多棒束真实尺寸组件划分高质量的网格, 计算量难以接受, 本文保持 CiADS 组件燃料棒直径、绕丝直径、螺距、棒间距等尺寸, 选用 7 棒束、19 棒束此类少棒束单螺距及多螺距组件进行计算, 具体几何参数如表 1 所列。

表 1 4 种组件几何参数

组件	棒束规模/ 根	组件长度/ mm	组件盒边长/ mm
CiADS 组件	61	1340	70.7
7 棒束组件	7	180	25.3
19 棒束单螺距 组件	19	180	40.4
19 棒束多螺距 组件	19	612	40.4

2.2 计算网格及边界条件

燃料棒与绕丝之间相切存在尖角, 不利于网格生成, 所以将绕丝与燃料棒径向距离缩进 0.1 mm, 尖

收稿日期: 2018-03-02; 修改日期: 2018-04-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11705255, 11505258); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划资助项目(29Y728010)

作者简介: 范旭凯(1992-), 男, 山东滨州人, 硕士, 从事反应堆热工水力学研究; E-mail: fanxk2016@impcas.ac.cn

† 通信作者: 顾龙, E-mail: gulong@impcas.ac.cn.

角处倒 0.5 mm 半径圆角, 以获得优质的网格。利用 STAR-CCM+ 软件对上述组件进行四面体网格划分。

由于不涉及传热, 使用 673 K 下铅铋的定常物性参数进行计算^[16]。液态铅铋合金 (Lead-Bismuth Eutectic, LBE) 在组件内沿 z 轴正向流动, 不开启重力选项。入口及出口边界设置为速度入口和压力出口, 其他表面均设置成无滑移壁面。

3 模型检验

3.1 网格无关性

通过对比归一化横向速度 U_t 在间隙内的轴向分布来对网格进行无关性判定。 U_t 由式 (1) 定义^[4, 5]。

$$U_t(z) = \frac{u_r(z)}{\bar{u}(z)} = \frac{1}{\bar{u}} \left(\frac{1}{l} \int_0^l u \cdot n dl \right) \quad (1)$$

式中: \bar{u} 为面均轴向速度; $u_r(z)$ 为 z 处的间隙内线均横向速度; z 为距离入口的轴向高度; l 为 z 处间隙的宽度。

19 棒束组件间隙内横向速度方向及间隙编号如图 1 所示, 将图中间隙界面上的箭头方向定义为横流速度正方向, α 为绕丝中心与 y 轴正向夹角。将 19 棒束组件 6 个间隙分为 3 组: 第一组间隙包括 1#、2#、4#、

11#、22# 和 44#; 第二组间隙包括 5# 和 55#; 第三组间隙包括 3# 和 33#。

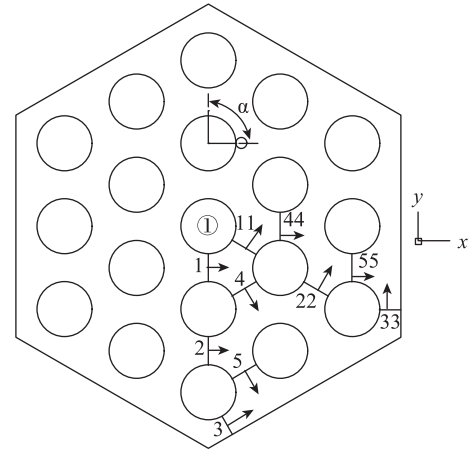


图 1 19 棒束组件间隙内横向速度方向及间隙编号

对 19 棒束单螺距组件几何模型, 边界层绝对尺寸和其他设置保持一致, 利用 STAR-CCM+ 软件生成 3 套基础尺寸分别为 1, 0.6 与 0.3 mm 的网格, 其网格数量分别为 4 400 万、7 460 万与 1.377 亿, 3 套网格最小正交质量 (minimum Orthogonal Quality) 均大于 0.2, 符合计算要求^[12]。网格细节如图 2 所示。

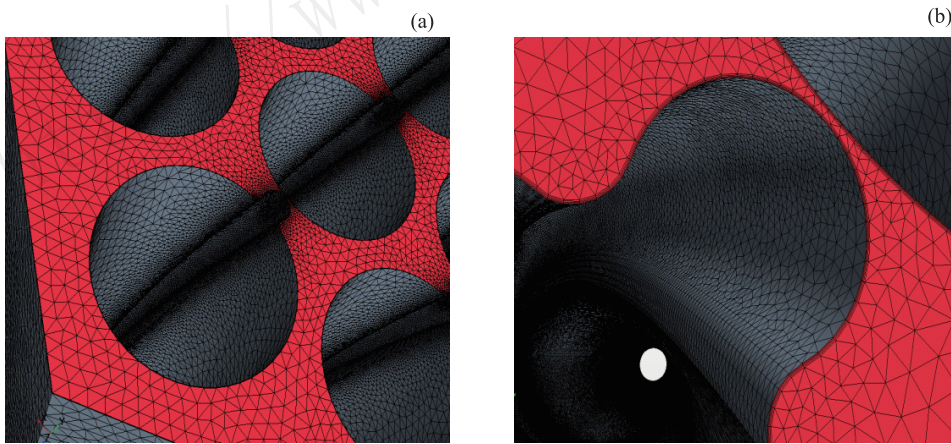


图 2 (在线彩图) 局部网格图

将入口平均雷诺数设置为 15 000, 入口和出口湍流设置水力直径为 5.67 mm, 湍流强度为 4.8%, 选取组件内不同位置的 3 个点的速度和压力来判断收敛情况。使用配置如表 2 所列的高性能计算机进行计算, 单个工况计算耗时 2 h, 所有守恒方程的收敛限值设置为 10^{-6} , 收敛时监测点的速度与压力的波动相对值均在 10^{-4} 量级。

选取图 3 中的 3 条轴向直线, 对比线 1 与线 2、线 2 与线 3 之间的压差, 如图 4 所示, 3 套网格的大部分结

果偏差在 10% 以内。再选取 2# 及 4# 间隙内 U_t 的分布进行对比, 结果如图 4 所示, 1.0 mm 与 0.6 mm 尺寸的网格结果偏差较大, 而 0.6 mm 与 0.3 mm 网格结果偏

表 2 计算机配置

参数	数值
CPU 主频	2.3 GHz
CPU 核心数	36
CPU 线程数	72
内存	512 GB

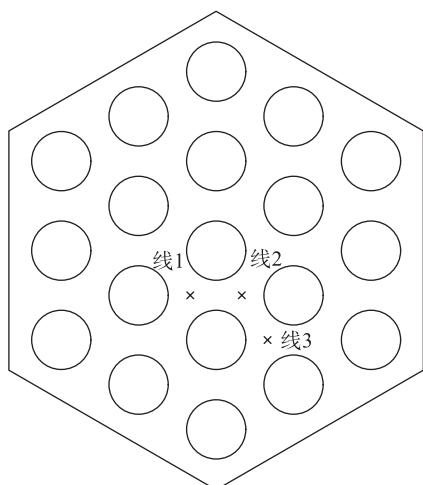


图 3 19 棒束组件内 3 条周向直线

差较小。考虑到计算的经济性以及准确性，最终选用 0.6 mm 尺寸网格进行后续计算。

3.2 湍流模型

根据几何模型的网格分布与对间隙内冷却剂横流分布的高分辨率要求，结合调研文献的湍流模型选取经验^[3-5]，选用 SST- $k\omega$ ^[17]及 Standard- $k\omega$ ^[17]两种湍流模型进行模拟，其轴向面均压降分布与简化 Cheng&Todreas (CTS)^[18, 20]和 Rehme^[19, 20]两种压降的经验模型计算结果对比如图 5 所示。Standard- $k\omega$ 模型的结果相比 SST- $k\omega$ 模型更接近于两个经验公式，且与 CTS 模型偏差在 20% 以内，与 Rehme 模型偏差在 5.5% 以内，结果可信度较高，因此选用 Standard- $k\omega$ 模型进行后续计算。

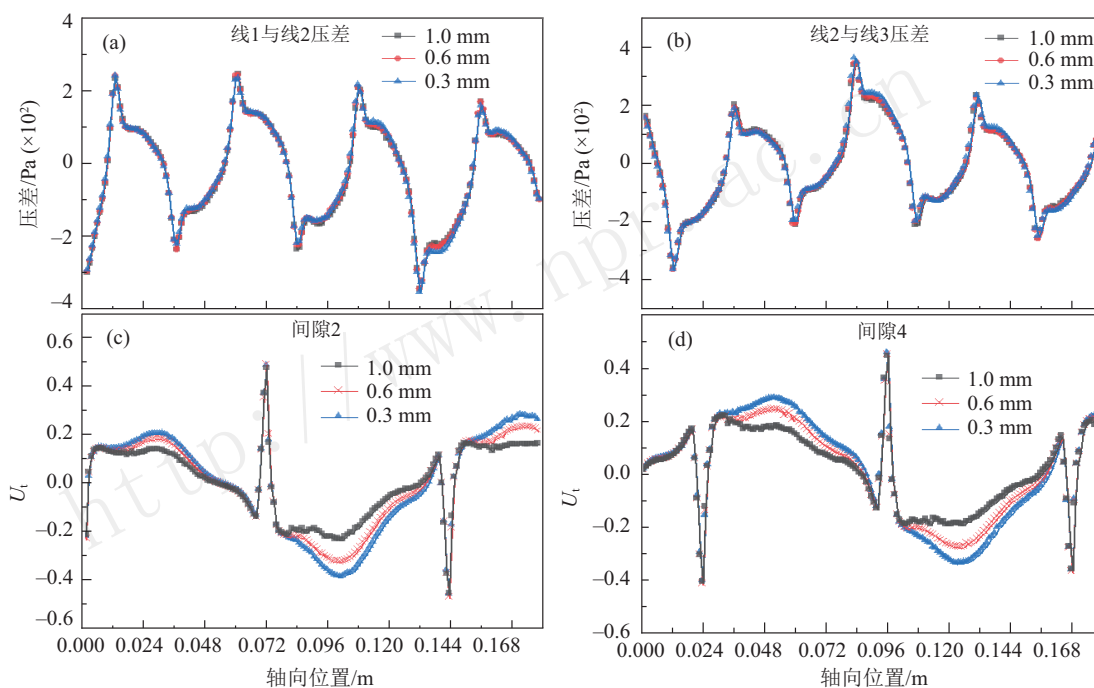


图 4 (在线彩图) 网格无关性验证

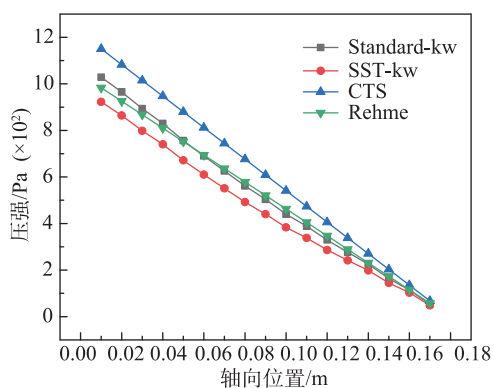


图 5 (在线彩图) CFD 结果与经验公式轴向面均压降分布对比

4 横流的横向周期性

4.1 棒束组件内横流分布特性

以入口平均雷诺数设置为 15000 对 19 棒束单螺距组件内冷却剂流动进行计算，根据图 1 所示间隙编号及速度方向，3 组间隙内轴向的横流分布如图 6 所示。绕丝经过间隙时会影响间隙宽度进而影响横流分布，绕丝在燃料棒周向所占角度为 15.2° 。绕丝经过时，间隙内流通面积减小，导致速度突变， U_t 分布对应形成尖峰。图 6 中垂直点线间为速度分布峰的宽度，宽度大小为 15.2° ，与几何变化相对应。

第一组间隙为内通道间隙， U_t 在 α 为 $120^\circ, 180^\circ$,

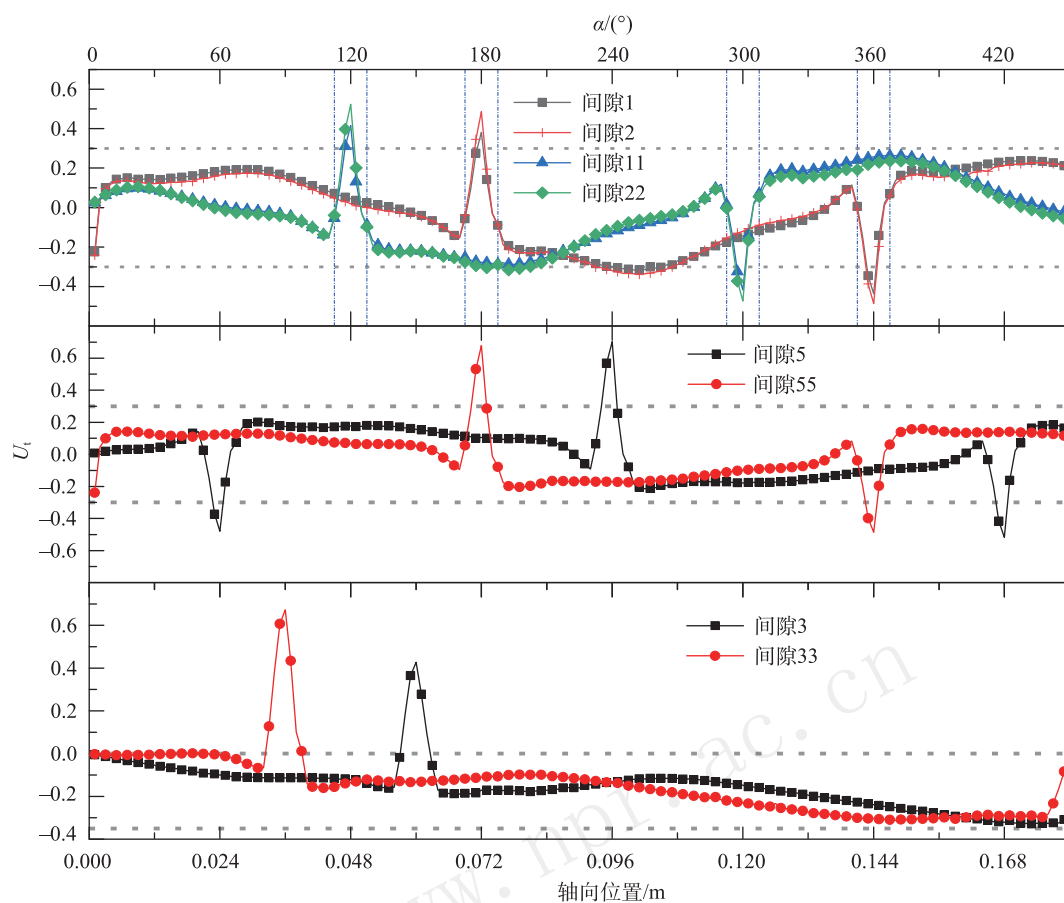


图 6 (在线彩图) 19 棒束 3 组间隙内归一化横流速度轴向分布

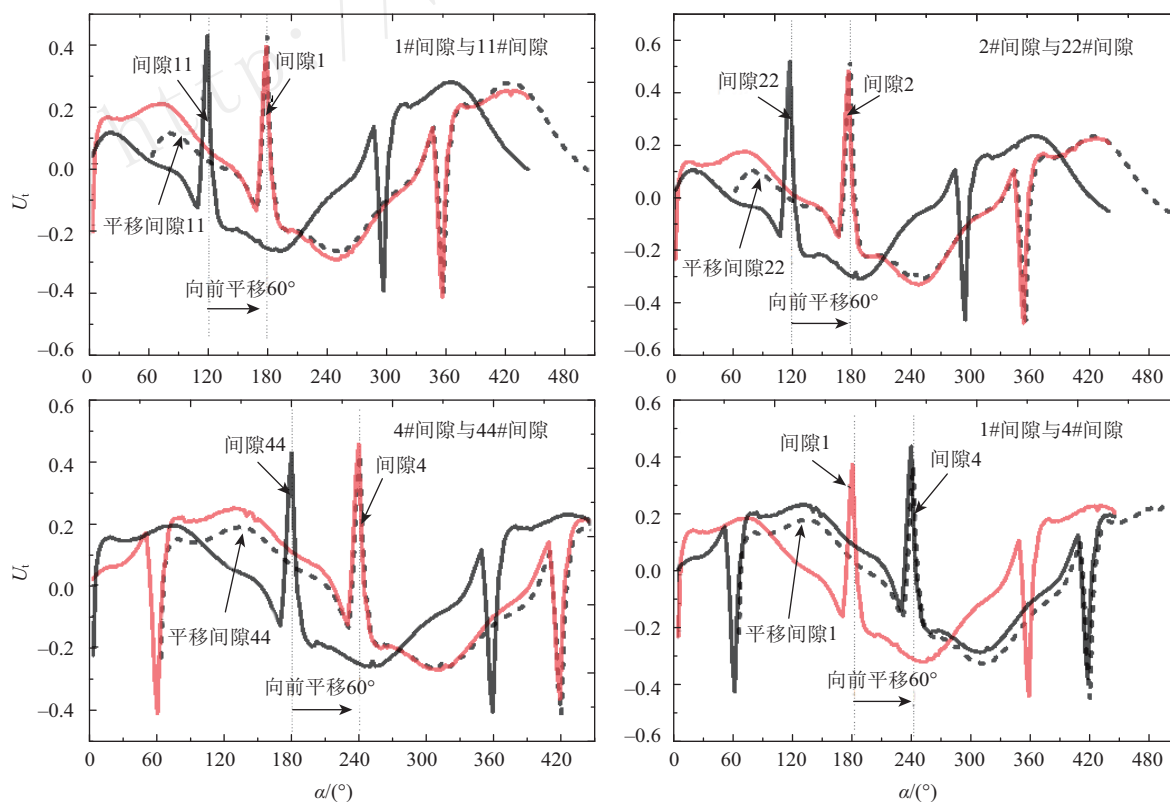


图 7 (在线彩图) 19 棒束内通道间隙内 U_t 分布相位平移

300°, 360° 绕丝经过时形成尖峰, 其余位置 U_t 整体分布受绕丝沿轴向螺旋的影响呈正弦曲线分布, 数值在 $-0.3 \sim 0.3$ 之间, 峰值出现在绕丝经过后 $70^\circ \sim 80^\circ$ 的位置。间隙 2# 的分布与 1# 分布一致, 没有因为 2# 更靠近组件盒而产生较大差异。第二组间隙为边通道与内通道间隙, U_t 分布与第一组间隙趋势相近。与前两组不同的是, 只有一根绕丝经过第三组边通道与内通道间隙, 所以分布中只存在一个尖峰, U_t 数值在 $-0.35 \sim 0$ 之间, 说明在没有绕丝经过时第三组间隙内冷却剂流动方向沿 y 轴负向。

4.2 内通道间隙横流横向周期性

由图 6 发现, 1# 与 11# 间隙以及 2# 与 22# 间隙内分布趋势及大小基本一致, 两间隙间因为均围绕 1 号燃料棒有一定角度关系而存在相位差, 说明内通道间隙内的 U_t 分布在横向上存在一定周期性。

如图 7 所示, 除去入口及出口效应引入的一定数据偏差, 平移一定相位后, 四组间隙的结果与另一间隙吻合得较好。1# 与 11#、2# 与 22# 以及 4# 与 44# 三组内两个间隙围绕 1 号燃料棒有 60° 夹角, 1# 与 4# 间隙绕 5# 燃料棒有在 60° 夹角, 其 U_t 分布出现对应的 60° 相位差, 所以在横向上内通道间隙内 U_t 分布存在周期

性, 可由一个间隙的结果根据角度关系延拓得到其他位置内通道间隙中的 U_t 分布。

4.3 7 棒束与 19 棒束横流对比

如图 8 所示, 7 棒束组件间隙与 19 棒束组件分组类似, 第一组间隙包括 1# 与 11#, 第二组包括 2# 与 22#, 第三组间隙包括 3# 与 33#。计算 7 棒束单螺距组件入口平均雷诺数为 15000 时 LBE 的流动, 与 19 棒束 3 组间隙内 U_t 分布对比如图 9 所示。

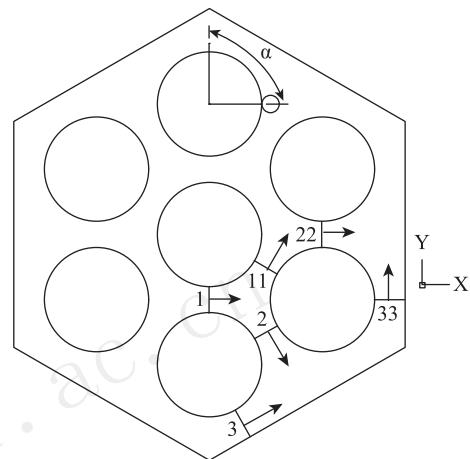


图 8 7 棒束组件间隙内横向速度方向及间隙编号

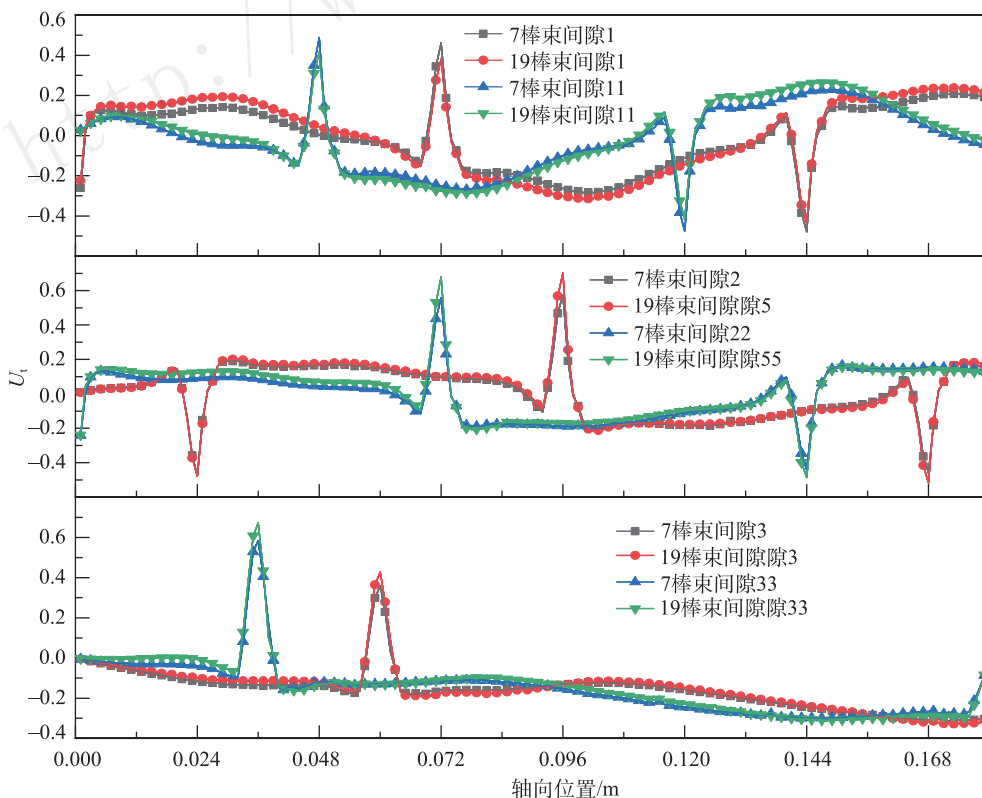


图 9 (在线彩图) 7 棒束与 19 棒束 3 组间隙内归一化横向速度对比

对比 7 棒束与 19 棒束组件相同类型间隙内的 U_t 分布, 相同类型间隙中 7 棒束与 19 棒束 U_t 沿轴向分布特性与大小关系基本一致。分析发现 U_t 分布中尖峰个数取决于经过间隙的绕丝数量, 而尖峰出现的位置以及正弦分布的峰值位置主要受绕丝的相对位置影响, 且 7 棒束组件内通道间隙没有因为更靠近组件盒而与 19 棒束内通道间隙的分布结果产生数值及分布趋势上的差异。综上所述, 可以通过 7 棒束组件的横流分布在横向上进行周期延拓以得出更多棒组件相同类型间隙的横流分布

结果。

5 横流的轴向周期性

轴向上 7 棒束与 19 棒束几何有相似的周期性几何结构, 因此采用 19 棒束多螺距几何进行横流在轴向周期性特性的研究。设置入口雷诺数为 15 000, 进行对 19 棒束多螺距几何进行计算, 1# 和 2#、5# 以及 3# 三组间隙内轴向 U_t 分布如图 10 所示。

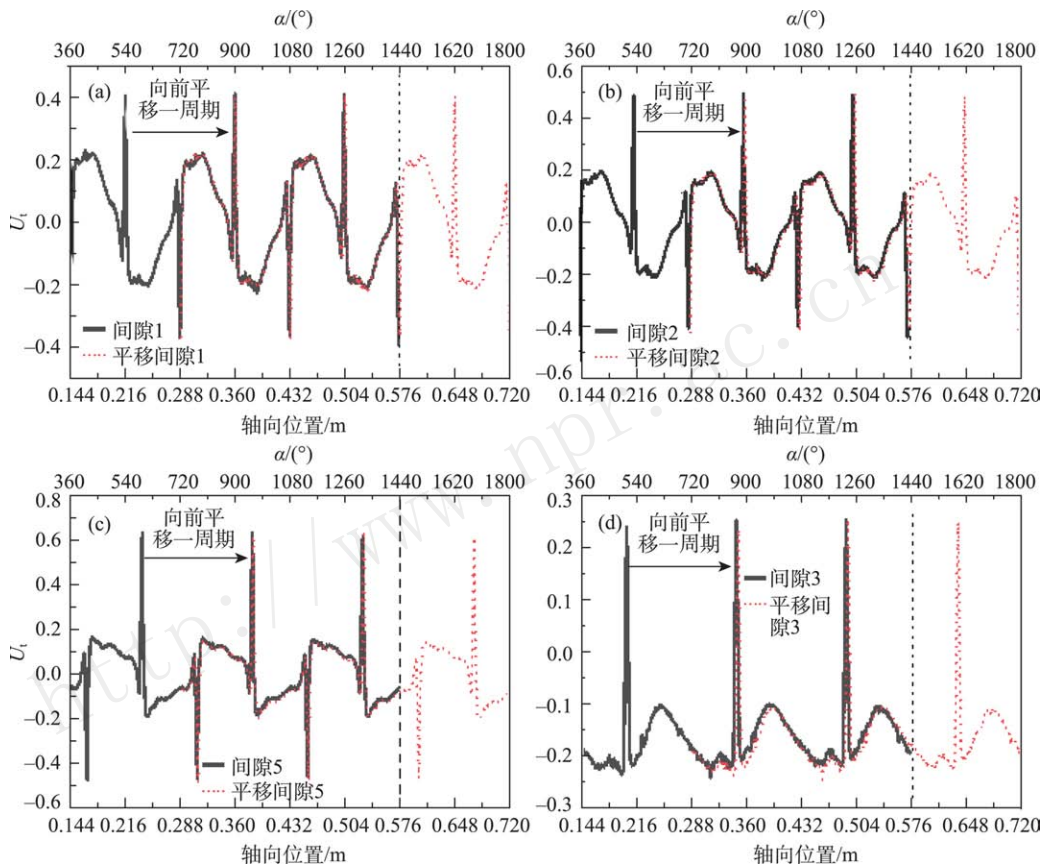


图 10 (在线彩图) 19 棒束多螺距组件轴向周期性结果

多螺距组件几何的轴向长度为 612 mm, 去除入口及出口效应影响后选取 144~576 mm 的 3 个螺距长度进行研究。如图 10 所示, 3 组间隙内 U_t 分布在轴向上都出现明显的周期性, 分布结果向前平移一个周期长度后与下个周期结果基本一致。与单螺距组件结果相似, 除去绕丝经过时出现的尖峰, 所有间隙中 U_t 在轴向上呈正弦分布, 单个周期内结果与单螺距组件结果在分布和数值上一致, 所以多个螺距组件的结果可以由单螺距组件几何模型的结果进行轴向延拓后得到。

6 结论

利用 CFD 方法计算模拟 CiADS 燃料组件局部多种

几何模型内 LBE 的流动, 对比 7 棒束与 19 棒束、单螺距组件与多螺距组件间隙中横向速度的轴向分布得到以下结论:

- (1) 19 棒束组件内通道间隙内横流的分布在组件横向和轴向上有明显的周期性;
- (2) 相同种类间隙中 19 棒束与 7 棒束组件内横流有相同的分布特性;
- (3) 由于横流分布的周期性, 可将少棒束组件作为多棒束组件的一个窗口, 来得到多棒束多螺距组件通道间隙内的横流分布结果。

参考文献:

- [1] ZHANG Dalin, LIU Limin, LIU Minghao, *et al.* *International Journal of Energy Research*, 2018, **42**: 1834.
- [2] LV Kefeng. Study on the Thermal-hydraulic Behaviors of a Wire-wrapped Rod Bundle Cooled with Lead Bismuth Eutectic[D]. Heifei: University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
(吕科锋. 液态铅铋合金在带统丝棒束组件内热工水力行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.)
- [3] GAJAPATHY R, VELUSAMY K, SELVARAJ P, *et al.* *Nuclear Engineering & Design*, 2009, **239**(11): 2279.
- [4] MERZARI E, FISCHER P, YUAN H, *et al.* *Nuclear Engineering & Design*, 2016, **298**: 218.
- [5] ZHAO P, LIU J, GE Z, *et al.* *Nuclear Engineering & Design*, 2017, **317**: 146.
- [6] JEONG J H, SONG M S, LEE K L. *Nuclear Engineering & Design*, 2017, **313**: 470.
- [7] ROLFO S, PÉNIGUEL C, GUILLAUD M, *et al.* *Nuclear Engineering & Design*, 2012, **243**: 251.
- [8] RAZA W, KIM K Y. *Nuclear Engineering & Design*, 2008, **238**(6): 1332.
- [9] RAZA W, KIM K Y. *Journal of Nuclear Science & Technology*, 2008, **45**(7): 653.
- [10] CHEN J, ZHANG D, SONG P, *et al.* *Annals of Nuclear Energy*, 2018, **113**: 256.
- [11] LYU Kefeng, CHEN Liuli, YUE Chenchong, *et al.* *Nuclear Power Engineering*, 2015(6): 27. (in Chinese)
(吕科锋, 陈刘利, 岳晨冲, 等. *核动力工程*, 2015(6): 27.)
- [12] ZHOU Zhenwei. Numerical Study of Flow Behavior of Lead-bismuth in Fuel Assembly with Wire Spacer[D]. Heifei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
(周振慰. 含绕丝燃料组件内铅铋冷却剂流动特性的数值分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.)
- [13] GE Zengfang, ZHOU Tao, BAI Yunqing, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, **49**(S1): 167. (in Chinese)
(葛增芳, 周涛, 柏云清, 等. *原子能科学技术*, 2015, **49**(S1): 167.)
- [14] PENG Tianji, GU Long, WANG Dawei, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, **51**(12): 2235. (in Chinese)
(彭天骥, 顾龙, 王大伟, 等. *原子能科学技术*, 2017, **51**(12): 2235.)
- [15] ZOU Y, ZHAO X, CHEN Q. *Building Simulation*, 2017, **11**(1): 1.
- [16] CHEN Fei. Numerical Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics between Liquid Lead Bismuth Eutectic and Helium[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
(陈飞. 液态铅铋合金—氦气流动换热特性数值研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.)
- [17] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT 17.2 Theory Guide[M]. ANSYS Inc, Canonsburg, 2016.
- [18] CHEN S K, TODREAS N E, NGUYEN N T. *Nuclear Engineering & Design*, 2014, **267**(2): 109.
- [19] CHENG S K, TODREAS N E. *Nuclear Engineering & Design*, 1986, **92**(2): 227.
- [20] REHME K. *Nuclear Technology*, 1973, **17**(1): 15.

Study on Periodicity of Cross Flow in Gaps of a Lead-based Fast Reactor Fuel Assembly

FAN Xukai^{1,2}, PENG Tianji¹, FAN Dajun^{1,2}, ZHU Yanlei¹, CAI Yilin¹, GU Long^{1,†}

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730030, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Cross flow of a coolant in fuel assembly had a great impact on the heat transfer of a reactor core. In order to study the characteristics of the cross flow in lead-based fast reactor assemblies, the CiADS fuel assemblies were used as research object. Fine geometric models and CFD simulation of 7 and 19 pin bundle and multi-pitch length assemblies based on CiADS fuel assemblies were carried out. The distribution of the cross flow velocity in several geometric models was compared and analyzed. The results show that the distribution of the cross flow velocity in gaps of interior and corner channel in 19 pin bundle has obvious periodicity in both axial and horizontal direction. In the horizontal direction, the results of one gap can be translated by a certain phase angle to obtain another gap distribution result according to the positional relationship of the translational rotations of the two internal channel gaps. The distribution of cross flow velocity is uniform in each pitch length of multi-pitch model in the axial direction. And the distribution of transverse flow in gaps of 7 pin bundle is similar to the distribution in the same kind of gaps in 19 pin bundle. The results of fewer pin bundle with single pitch length can be periodically extended in axial and transverse direction to obtain the characteristics of cross flow in geometric models with multi-pitch length and more rods.

Key words: CiADS; lead-based fast reactor; wire; cross flow; CFD

Received date: 2 Mar. 2018; **Revised date:** 4 Apr. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11705255, 11505258); CAS “Light of West China” Program (29Y728010)

† **Corresponding author:** GU Long, E-mail: gulong@impcas.ac.cn.