

低雷诺数条件下钠冷快堆的数值模拟

李美军, 李永华

华北电力大学(保定), 河北 保定
Email: liyonghua@126.com

收稿日期: 2021年2月3日; 录用日期: 2021年3月16日; 发布日期: 2021年3月23日

摘要

钠冷快堆的自然循环过程是在低雷诺数条件下进行的, 所以研究在低雷诺数条件下钠冷快堆的流动特性是非常有必要的。利用计算流体力学软件对钠冷快堆带绕丝棒束进行了数值模拟, 结果表明, Rehme关系式与模拟的结果是吻合较好的。燃料组件的入口距离是小于一个螺距的距离, 且出口效应对摩擦阻力系数影响不大。

关键词

钠冷快堆, 带绕丝棒束, 低雷诺数

Numerical Simulation of Sodium-Cooled Fast Reactor under Low Reynolds Number

Meijun Li, Yonghua Li

North China Electric Power University, Baoding Hebei
Email: liyonghua@126.com

Received: Feb. 3rd, 2021; accepted: Mar. 16th, 2021; published: Mar. 23rd, 2021

Abstract

The natural cycle of sodium-cooled fast reactors is carried out under low Reynolds number conditions, so it is necessary to study the flow characteristics of sodium-cooled fast reactors under low Reynolds number conditions. The numerical simulation of the wire-wrapped rod bundle of the sodium-cooled fast reactor is carried out by using computational fluid dynamics software. The results show that the Rehme relationship is in good agreement with the simulation results. The inlet distance of the fuel assembly is less than a pitch, and the outlet effect has little effect on the friction resistance coefficient.

Keywords

Sodium-Cooled Fast Reactor, Wire-Wrapped Rod Bundle, Low Reynolds Number

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钠冷快堆在完全丧失电源的情况下, 紧急停堆后要依靠一回路和事故余热排放系统进行冷却。其中经过堆芯建立的一回路自然循环是堆芯燃料冷却的唯一方式。由于钠冷快堆组件采用绕丝缠绕棒束的固定方式, 使得冷却剂通道变得狭窄紧凑。这种布置方式加强了冷却剂的横向交混, 增强了燃料棒与冷却剂之间的换热, 但是这种布置方式增加了流道的阻力。燃料组件棒束的阻力占了整个循环回路的 90% 以上, 所以对燃料棒束阻力的研究对于自然循环过程中换热的关键。很多的学者进行了一系列的试验研究, 提出了带绕丝燃料组件的摩擦阻力系数关联式; 如 Cheng 与 Todreas、Rehme、Engel 根据实验得出计算带绕丝棒束摩擦阻力系数的经验关联式[1] [2] [3]。早期由于计算机技术不发达, 对快堆的研究只能用实验来完成, 这使得完成一项工作需要耗费很大的成本。随着计算机技术的发展, 可以使用计算流体力学工具来完成对快堆的研究。如 Kurt 完整地演示了使用 CFD 软件模拟快堆燃料棒束的全过程[4]; Govindha 等利用 CFD 软件对快堆带绕丝燃料组件棒束进行了模拟研究[5]。但是大多的 CFD 模拟研究都是在高雷诺数条件下进行的, 很少有学者在低雷诺数条件下进行研究[6] [7] [8]。近些年来我国火力发电总比重持续下降, 非化石能源在电力生产能源中的占比在持续提升, 能源结构不断得到优化。但是风力发电、太阳能和水力发电对自然资源都有着较高的要求, 导致其电力生产环节稳定性较差, 而核电因为其用核资源作为燃料供给, 运行功率和电力供给水平稳定具有较强优势[9] [10] [11]。低雷诺数的流动工况对于快堆运行安全也是很重要的, 层流和过渡流在快堆停堆后会出现。本文利用 CFD 软件 STAR-CCM+对快堆燃料棒束进行低雷诺数下的水力特性分析。

2. 几何建模及网格划分

2.1. 几何模型

在钠冷快堆燃料组件中棒束是按照三角形格栅的形式排列, 利用金属绕丝固定, 组装在一个六角形套管中。复杂的绕丝结构给建模带来很大的困难, 主要体现在绕丝与其接触的棒束是线接触, 且与棒束相切, 这就很难做出适合这种结构的网格。通常情况下都要对绕丝结构作简化, 使线接触变成面接触, 简化前后的结构如图 1(a)所示。本文选取 37 棒燃料组件作为研究对象, 单棒总长度为 2700 mm, 燃料棒直径 7 mm、节距 8.6 mm; 绕丝直径 1.5 mm、绕丝螺距 H 为 150 mm; 由于计算资源的限制, 本次 CFD 模拟选择 37 棒的加热段作为研究对象, 长度为 1000 mm, 图 1(b)~(d)为 37 棒带绕丝燃料组件, 图 1(d)为计算流体体积模型。

2.2. 网格划分

STAR-CCM+生成的网格结构被归类为自动非结构化网格, 生成的网格如图 2(a)所示, 从图可以看到在绕丝靠近组件壁处的网格密集; 图 2(b)显示的是绕丝与棒束相交之处的网格, 获得这样高质量的网格

是很有挑战的。以进出口压降作为选择网格的衡量指标, 选择网格数在 3407 万与 13,110 万之间作一个网格无关性研究, 从图 3 可以发现在网格数为 9636 万之后的压降变化很小, 考虑到现有的有限计算资源, 所以选择网格数为 9636 万的燃料组件作为研究对象来进行计算研究。

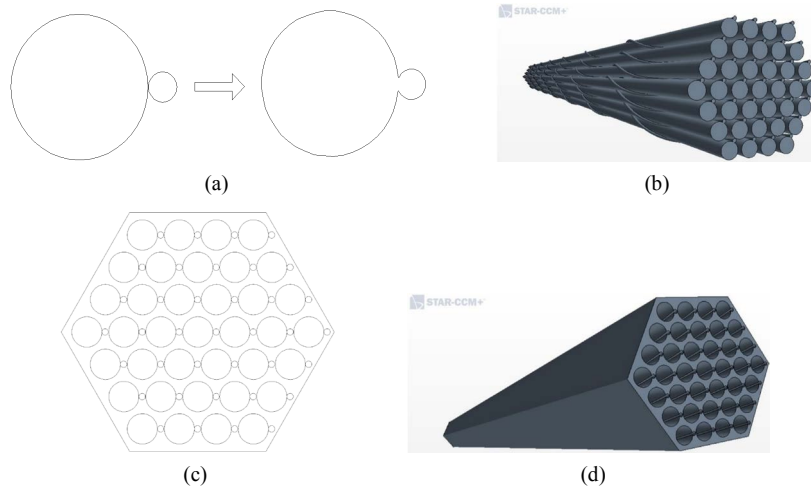


Figure 1. Schematic diagram of the calculation model
图 1. 计算模型的示意图

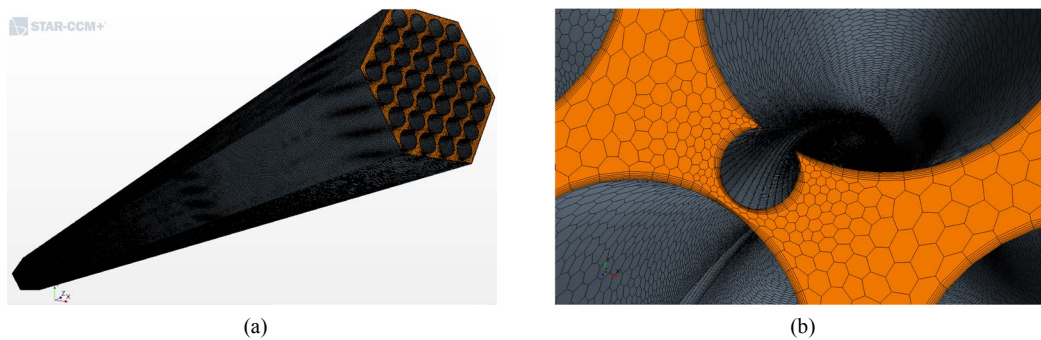


Figure 2. Schematic diagram of the grid
图 2. 网格的示意图

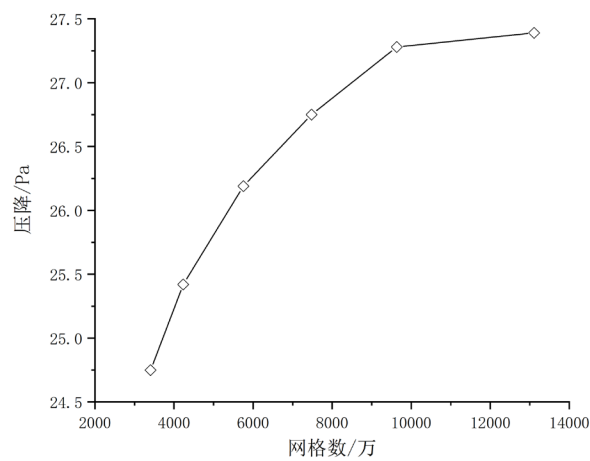


Figure 3. Grid sensitivity analysis
图 3. 网格敏感性分析

2.3. 边界条件和计算模型设置

本次模拟采用液态钠为冷却剂, 在计算中使用表 1 中所示的钠物性参数。

Table 1. Physical properties of liquid sodium (T in K)

表 1. 液态钠物性参数(T 为开尔文温度)

属性	公式	单位
密度	$\rho = 950.8037 - 124.15 \times 10^{-3} \times (1.8(T - 273.15) + 32) - 4.6 \times 10^{-6} \times (1.8(T - 273.15) + 32)^2 + 0.9659 \times 10^{-9} \times (1.8(T - 273.15) + 32)^3$ $(T_m \leq T \leq 866.15)$	kg/m ³
热导率	$\lambda = 93.92657 - 3.248 \times 10^{-2} \times (1.8(T - 273.15) + 32) + 3.61724 \times 10^{-6} (1.8(T - 273.15) + 32)^2$ $(T_m \leq T \leq 1643.15)$	W/(m·K)
定压比热容	$c_p = 1630.34 - 4630.6 \times 10^{-4} \times 1.8T + 1.00977 \times 10^{-4} \times (1.8T)^2$ $(T_m \leq T \leq 1173.15)$	J/(kg·K)
动力粘度	$\eta = e^{-6.4406 - 0.3958 \ln(T) + (556.835/T)} \quad (371 \text{ K} \leq T \leq 2500 \text{ K})$	Pa·s

在计算等温流动时, 冷却剂为液态钠, 入口温度为 280℃, 不同雷诺数对应不同的流量; 出口压力设置为 0 Pa。计算时采用层流和湍流模型分别计算, 计算结果作比较。自然循环情况下, 组件内的冷却剂流动为层流, 但是在绕丝存在的情况下, 会形成局部的湍流或者过渡流。所以选择层流和湍流模型分别进行计算。

3. 计算结果及分析

计算结果与公开的 Cheng 经验公式、Rehme 经验公式和 Engel 经验公式作对比, 从而得到与实际情况比较接近的模型。

简化的 Cheng 与 Todreas 经验关系式如下:

层流:

$$f = \frac{C_{fL}}{Re} \quad Re \leq Re_L \quad (1)$$

湍流:

$$f = \frac{C_{fT}}{Re^{0.18}} \quad Re \geq Re_T \quad (2)$$

过渡流动:

$$f = \frac{C_{fL}}{Re} (1 - \psi)^{1/3} + \frac{C_{fT}}{Re^{0.18}} \psi^{1/3} \quad Re_L \leq Re \leq Re_T \quad (3)$$

其中:

$$\log\left(\frac{Re_L}{300}\right) = 1.7\left(\frac{P_t}{D_r} - 1.0\right)$$

$$\log\left(\frac{Re_T}{10000}\right) = 0.7\left(\frac{P_t}{D_r} - 1.0\right)$$

$$\psi = \frac{\log(Re) - (1.7(P_t/D_r) + 0.78)}{2.52 - (P_t/D_r)}$$

$$C_{fL} = \left(-974.6 + 1612.0 \left(\frac{P_t}{D_r} \right) - 598.5 \left(\frac{P_t}{D_r} \right)^2 \right) \times \left(\frac{H}{D_r + D_w} \right)^{0.06 - 0.085(P_t/D_r)}$$

$$C_{fT} = \left(0.8063 - 0.9022 \log \left(\frac{H}{D_r + D_w} \right) + 0.3526 \left(\log \left(\frac{H}{D_r + D_w} \right) \right)^2 \right) 1.7$$

$$\times \left(\frac{P_t}{D_r} \right) \left(\frac{H}{D_r + D_w} \right)^{1.78 - 2(P_t/D_r)}$$

式中: C_{fL}, C_{fT} 分别为层流和湍流关联式的系数; Re_L, Re_T 分别为层流临界雷诺数和湍流临界雷诺数; D_r, D_w 分别为棒束直径和绕丝直径, 单位: m; P_t 为棒-束栅格距。

Rehme 经验关系式如下:

$$f = \left(\frac{64}{Re} F^{0.5} + \frac{0.0816}{Re^{0.133}} F^{0.9335} \right) \frac{N_r \pi (D_r + D_w)}{S_t} \quad (4)$$

其中:

$$F = \left(\frac{P_t}{D_r} \right)^{0.5} + \left[7.6 \frac{D_r + D_w}{H} \left(\frac{P_t}{D_r} \right)^2 \right]^{2.16}$$

式中: D_r, D_w 分别为棒束直径和绕丝直径, 单位: m; P_t 为棒束栅格距, 单位: m; N_r 为燃料棒数; S_t 为湿润周长, 单位: m; H 为螺距, 单位: m。

Engel 经验关联式如下:

层流:

$$f = \frac{110}{Re} \quad Re < 400 \quad (5)$$

湍流:

$$f = \frac{0.55}{Re^{0.25}} \quad Re > 5000 \quad (6)$$

过渡流:

$$f = \frac{110}{Re} (1 - \psi)^{0.5} + \frac{0.55}{Re^{0.25}} \psi^{0.5} \quad 400 \leq Re \leq 5000 \quad (7)$$

其中:

$$\psi = \frac{Re - 400}{4600}$$

3.1. 等温流动计算结果分析

37 棒带绕丝棒束组件摩擦阻力系数计算结果示于图 4。从图 4 中可以看出, 利用层流模型计算的结果和利用 k- ω 湍流模型计算的结果非常的接近, 两者的差距都小于 0.05% 以内。在 Re 小于 600 时, 模拟的结果与 Cheng 经验关系式的结果比较接近, 偏差小于 13.21%; 当 Re 在 600~3000 时, 模拟结果与 Rehme

关系式的计算结果较接近, 偏差小于 13%; 而 Engel 关系式计算结果整体与模拟的结果偏差较大。所以在计算类似 CFR600 燃料组件的带绕丝燃料棒束组件时, 使用 Rehme 经验关系式来进行低 Re 条件下的阻力系数计算准确度较高。图 5 显示了轴向摩擦阻力系数的分布情况。从图 5 可以看出, 摩擦阻力系数在入口区域的值要远远大于发展段的值, 并且在距入口 150 mm 处时的摩擦阻力系数已经与充分发展段的值相差无几, 说明在一个螺距之后摩擦阻力系数回复正常值, 入口段效应消除; 在出口处, 摩擦阻力系数有明显的下降, 但是变化的数值不是很大, 是微小的变化, 所以出口段对于摩擦阻力系数的影响是小的。同时也可以看出, 在 Re 增大的过程中, 入口段摩擦阻力系数的差距也越来越小。

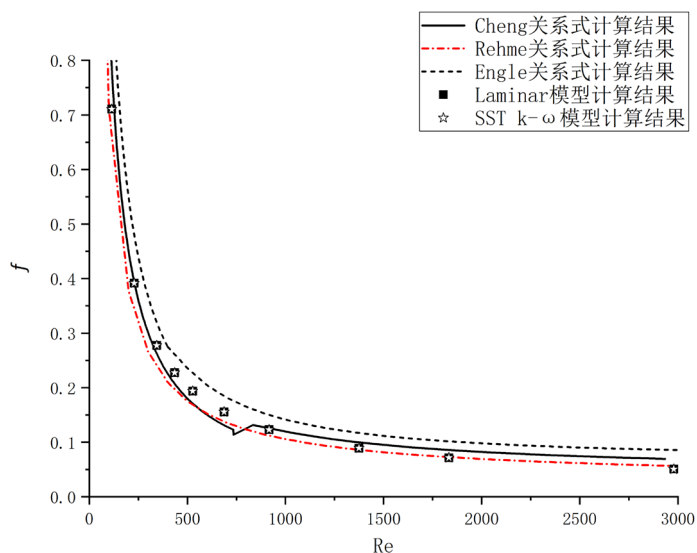


Figure 4. Comparison of the CFD calculation results of the friction resistance coefficient of the 37-bar-tape-wire-wound assembly with various relational expressions

图 4. 37 棒带绕丝组件摩擦阻力系数 CFD 计算结果与各关系式的比较

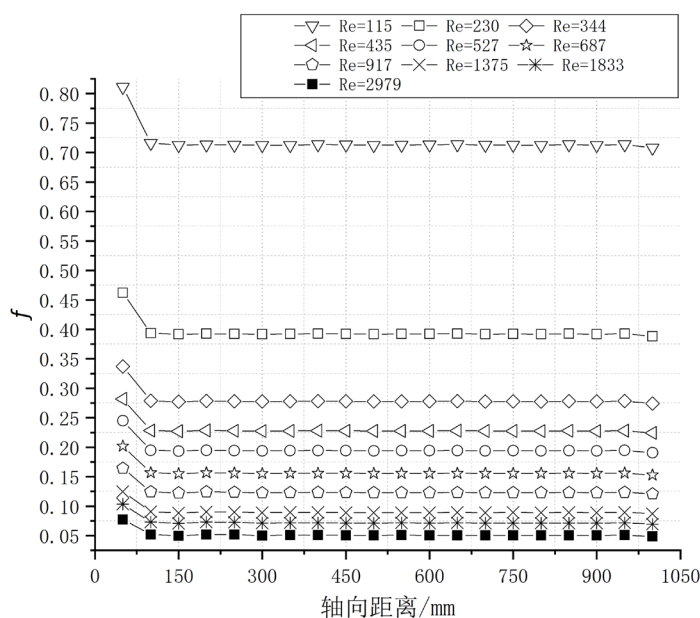


Figure 5. The distribution of the axial friction coefficient of the 37-rod fuel assembly with wound wires

图 5. 带绕丝 37 棒燃料组件轴向摩擦系数分布

3.2. 棒束内部流场分析

以 $Re = 435$ 为例进行内部流场分析。图 6 显示了在加热条件下绕丝棒束在前两个螺距范围内, 每隔 $1/6$ 螺距的距离取得截面的速度分布云图。观察图中速度的分布情况, 发现在第一段绕丝距离内, 速度的峰值在 $0.0793\sim 0.0866$ m/s 之间; 而在第二段绕丝距离内, 峰值速度在 $0.0796\sim 0.0818$ m/s 之间, 速度的波动变化较小。在 75 mm 之后的速度分布图, 整体的分布都可以认为是前一个速度分布图顺时针旋转 30° 得到的, 可以认为入口距离是要小于一个螺距的距离, 即从 150 mm 处开始冷却剂进入充分发展段。从图中可以很明显的看出, 出现最大速度的位置与绕丝和六角形壁面相对位置有关, 绕丝与壁面的距离较近, 则速度较大, 相反速度就较小。边子通道的流速要远高于中间子通道的速度值, 这主要由于边子通道比中间子通道的流通面积较大, 流动阻力较小, 流体流入组件后因个子通道的流动阻力不同产生再流

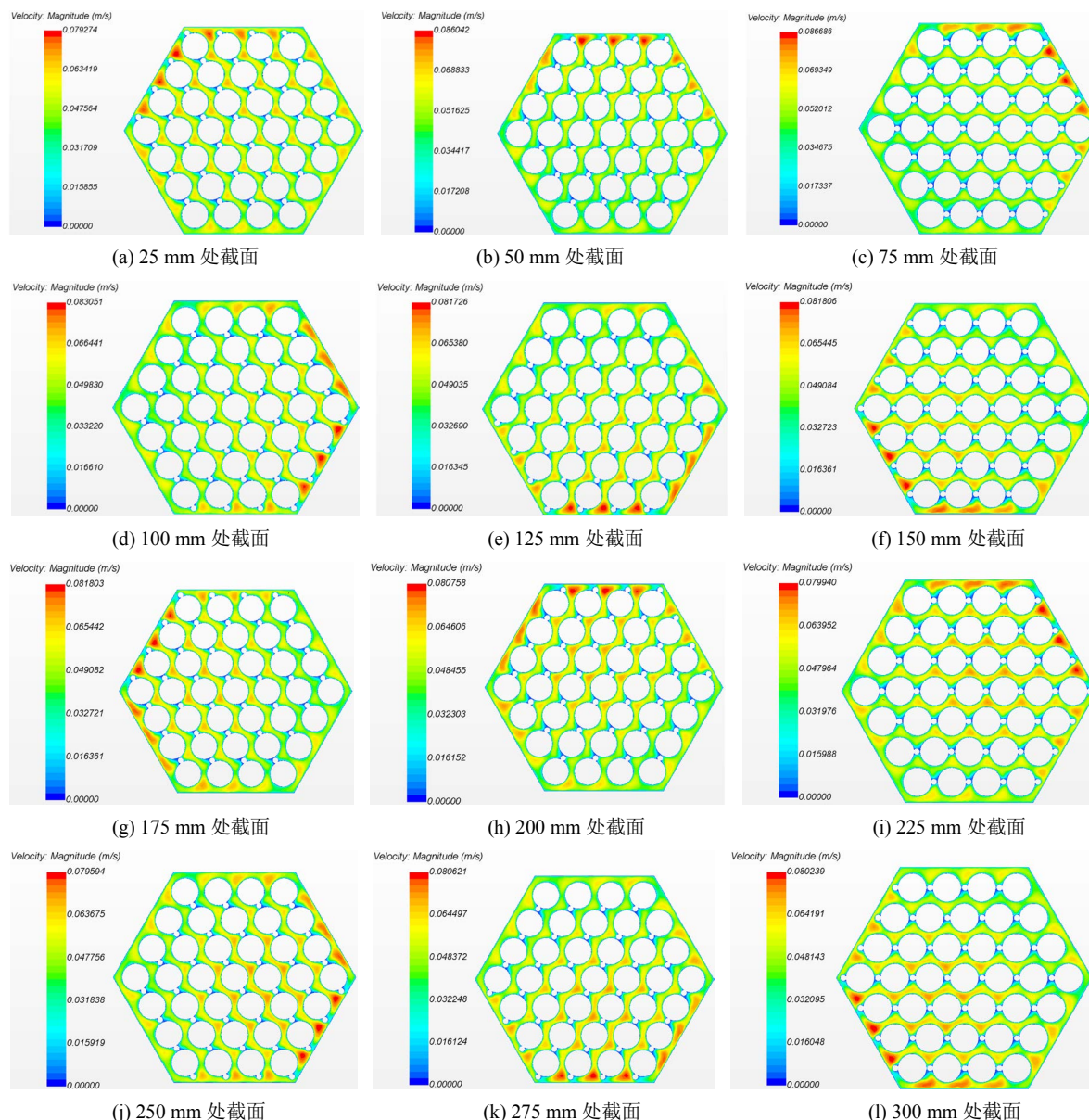


Figure 6. Cloud diagram of velocity distribution of wire rod bundle
图 6. 绕丝棒束速度分布云图

量分配, 进而导致边子通道的流体流速高于中间子通道。此外, 在绕丝的横向扰流的作用下, 组件内的流体流动将会随着绕丝的缠绕方向呈周期性螺旋上升, 靠近绕丝的子通道流动会被增强, 因此六个边子通道中离螺旋绕丝最近的子通道流速最大。从图中可以看出每一截面的整体速度分布都是由低到高逐渐递增的, 方向是跟随绕丝缠绕方向。峰值速度出现在外围的 7 根棒周围, 而相对侧的棒则出现低流速。

4. 结论

本研究主要进行了钠冷快堆单盒组件的数值模拟, 对钠冷快堆在自然循环条件下的流动特性有了初步的认识, 得出如下结果:

1) 通过不同雷诺数计算得出的摩擦阻力系数与现存的经验关系式进行对比发现, 在 Re 小于 600 时, 模拟的结果与 Cheng 经验关系式的结果比较接近, 偏差小于 13.21%; 当 Re 在 600~3000 时, 模拟结果与 Rehme 关系式的计算结果较接近, 偏差小于 13%; 而 Engel 关系式计算结果整体与模拟的结果偏差较大。所以在计算类似 CFR600 燃料组件的带绕丝燃料棒束组件时, 使用 Rehme 经验关系式来进行低 Re 条件下的阻力系数计算准确度较高。

2) 通过分析燃料组件轴向摩擦阻力系数分布情况发现, 摩擦阻力系数在入口区域的值要远远大于发展段, 在 150 mm 之后也就是第一个螺距之后摩擦阻力系数恢复了正常值; 出口段对于摩擦阻力系数的影响较小。

3) 通过分析不同位置的速度分布云图发现, 入口距离是要小于一个螺距的距离; 出现最大速度的位置与绕丝和六角形壁面相对位置有关, 绕丝与壁面的距离较近, 则速度较大, 相反速度就较小。

参考文献

- [1] Cheng, S.K. and Todreas, N.E. (1986) Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles-Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters. *Nuclear Engineering and Design*, **92**, 227-251. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(86\)90249-9](https://doi.org/10.1016/0029-5493(86)90249-9)
- [2] Rehme, K. (1973) Pressure Drop Correlations for Fuel Element Spacers. *Nuclear Technology*, **17**, 15-23. <https://doi.org/10.13182/NT73-A31250>
- [3] Engel, F.C., Markley, R.A. and Bishop, A.A. (2017) Laminar, Transition, and Turbulent Parallel Flow Pressure Drop across Wire-Wrap-Spaced Rod Bundles. *Nuclear Science and Engineering*, **69**, 290-296. <https://doi.org/10.13182/NSE79-A20618>
- [4] Hamman, K.D. and Berry, R.A. (2010) A CFD Simulation Process for Fast Reactor Fuel Assemblies. *Nuclear Engineering & Design*, **240**, 2304-2312. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.11.007>
- [5] Gajapathy, R., Velusamy, K., Selvaraj, P., et al. (2007) CFD Investigation of Helical Wire-Wrapped 7-Pin Fuel Bundle and the Challenges in Modeling Full Scale 217 Pin Bundle. *Nuclear Engineering and Design*, **237**, 2332-2342. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.05.003>
- [6] 刘洋, 喻宏, 周志伟. 钠冷快堆燃料组件热工水力特性数值模拟与分析[J]. 原子能科学技术, 2014(10): 1790-1796.
- [7] 李淞, 杨红义, 周志伟, 等. 快堆组件稠密棒束数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(4): 41-45.
- [8] Nina, Y., Dalin, Z., Jing, C., et al. (2018) The Development and Validation of the inteRwrapper Flow Model in Sodium-Cooled Fast Reactors. *Progress in Nuclear Energy*, **108**, 54-65. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.05.007>
- [9] 刘亮. 从“十三五”规划看电力转型发展[J]. 大众用电, 2019, 34(4): 3-4.
- [10] 赵成昆. 中国核电建设进入全新时代[J]. 中国电力企业管理, 2019(4): 37-39.
- [11] 曹殿鹏, 邹树梁, 唐德文, 肖魏魏, 于洁. 三种核燃料循环方案的综合效益比较[J]. 核科学与工程, 2019, 39(5): 809-820.