



厦门大学学报(自然科学版)
Journal of Xiamen University(Natural Science)
ISSN 0438-0479, CN 35-1070/N

《厦门大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 氦氘反应堆子通道交混系数研究
作者: 苏开放, 覃珖潭, 赵弟宏, 洪钢, 张尧立
收稿日期: 2021-10-14
网络首发日期: 2022-04-25
引用格式: 苏开放, 覃珖潭, 赵弟宏, 洪钢, 张尧立. 氦氘反应堆子通道交混系数研究[J/OL]. 厦门大学学报(自然科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20220425.1247.004.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

氦氙反应堆子通道交混系数研究

苏开放, 覃秘潭, 赵弟宏, 洪 钢[✉], 张尧立

(厦门大学能源学院, 福建 厦门 361102)

*通信作者 honggang@xmu.edu.cn

摘要 子通道分析是反应堆进行热工水力设计和安全分析的主要方法, 准确模拟通道中的湍流交混系数是子通道分析的关键。湍流交混系数主要与子通道的几何形状和冷却剂的流动状态有关, 常用经验关系式进行计算。已有的交混系数关系式大多基于水堆开发, 其是否适用于新型的氦氙反应堆还有待于研究。本研究基于计算流体力学方法开展氦氙反应堆子通道交混系数研究, 拟合出适用于氦氙反应堆的交混系数关系式。与现有交混系数关系式相比, 新拟合的交混系数关系式对中心通道温度的预测更加准确。

关键词 氦氙反应堆; 湍流交混系数; 子通道

中图分类号 TL 33 文献标志码 A DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202110016

Research on sub-channels mixing coefficient of helium-xenon reactor

SU Kaifang, QIN Bitan, ZHAO Dihong, HONG Gang[✉], ZHANG Yaoli

(College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract Sub-channel analysis is the main method for reactor thermal-hydraulic design and safety analysis. Accurately simulating the turbulence mixing coefficient in the channel is the key to sub-channel analysis. The turbulence mixing coefficient is mainly related to the geometry of the sub-channels and the flow state of the coolant, and is usually calculated by empirical relations. Most of the existing mixing coefficient relations are based on the development of water reactors, and whether they are suitable for new helium-xenon reactors remains to be studied. This study is based on the CFD method to study the mixing coefficient of the sub-channels of the helium-xenon reactor, and fits the relationship of the mixing coefficient suitable for the helium-xenon reactor. Compared with the existing mixing coefficient relations, the newly fitted mixing coefficient relations are more accurate in predicting the temperature of the central channel.

Key words helium-xenon reactor; turbulence mixing coefficient; sub-channel

1 引言

随着人类对空间的探索逐步走向深空, 太阳能由于其低功率限制, 已很难满足深空探索的需求。因此, 设计大功率的空间反应堆在空间探测方面的作用显得尤为重要。空间反应堆的能量转换方式有多种, 其中布雷顿循环是大功率空间反应堆常用的转换方式^[1]。布雷顿循环常使用二元惰性混合气体作为循环工质, 平均分子量为 40 的氦氙混合气体有良好的传热能力, 可直接将其作为反应堆的冷却剂。氦氙混合气体物性可根据文献^[2-4]中的公式计算获得。在反应堆设计阶段, 要想获得详细的堆芯和燃料棒的温度分布, 需要对反应堆堆芯进行热工水力分析。

反应堆在进行热工水力设计和安全分析时使用的主要方法是子通道分析。子通道分析时, 相邻的通道间存在着横向能量、动量和质量的交换。各通道内的流量和温度由于这种横向交混, 会沿轴向不断变化, 从而降低热通道冷却剂温度, 进而影响燃料元件温度。因此, 子通道分析的关键就是准确地模拟横向交混^[5]。由于横向交混的复杂性, 根据其影响因素的不同可以分成: 横流混合、湍流交混、

流动散射和流动后掠 4 种形式^[6]。在子通道分析中, 相邻通道的湍流交混起主要作用。

湍流交混本质上是一种自然交混, 它是流体在子通道间流动脉动自然涡湍扩散引起的非定向交混。湍流扩散是影响湍流交混的主要因素。可以类比分子的扩散定义湍流扩散模型^[7], 从而引入无量纲湍流交混系数 β 。其表达式如式 (1) 所示:

$$\beta = \frac{C_t}{\Delta y U} \quad (1)$$

式中: C_t 为等效湍流扩散系数; Δy 为相邻通道的中心距, 单位为 m; U 为通道主流平均流速, 单位为 m/s。

然而, 在子通道分析时, 一般使用湍流交混率 w 表征子通道间的湍流交混量, 湍流交混率的表达式如式 (2) 所示。它定义为相邻子通道间在主流方向单位长度上由湍流交混引起的质量流量, 单位为 kg/(m·s)。

$$w = \beta G S_{ij} \quad (2)$$

式中, S_{ij} 为相邻子通道间的宽度, 单位为 m; G 为通道平均质量流量, 单位为 kg/(m²·s), 由相邻通道平均获得。

目前湍流交混系数主要通过经验关系式计算, 其主要受子通道的几何因素和流动因素影响, 因此常用的单相交混系数的定义与雷诺数、子通道水力直径、相邻通道的间隙宽度、相邻子通道的中心距有关。由于不同关系式在开发中采用的实验条件和实验工质不同, 因此不同关系式的形式和系数有较大的差别。在实际应用相应的选择关系式时, 必须要考虑关系式对所用工况是否适用。目前, 现有的湍流交混系数关系式大多是基于水堆开发的, 而氦氘反应堆的结构与传统水堆不同, 其几何尺寸的与传统的水堆也不同, 氦氘堆的棒与棒之间的间隙只有 1.2 mm, 压水堆棒与棒之间的间隙一般大于 6 mm。多数湍流交混系数关系式的棒间距与棒径比值 (P/D) 与氦氘反应堆的 P/D 范围不一样, 且雷诺数使用范围也不一样, 从中很难找到适用于氦氘反应堆的湍流交混系数关系式。但是, 不同堆型对湍流交混系数的计算方法是一致的。对于氦氘反应堆这类的小型堆, 其交混效应可能小于大型堆。为给实际堆型设计提供参考, 需要进行交混系数量化结果的分析。因此需要拟合适用于氦氘反应堆的湍流交混系数的关系式来进行子通道精确计算。

随着计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的发展, 越来越多学者通过数值模拟来获得湍流交混系数。文献^[8]对现有的单相湍流交混系数的计算方法进行汇总, 总结了 8 种通过 CFD 获得交混系数的方法。每种方法都有其优缺点, 其中湍流间隙粘度法可以直接根据定义计算获得, 且能直接计算湍流的影响。在进行 CFD 计算时, 虽然可以通过 κ - ε 湍流模型的方法计算获得湍流交混系数, 但是由于 κ - ε 模型在计算时忽略了流动的各向异性, 计算得到的交混系数偏小, 计算精度较差。Ikeno^[7]使用各向异性湍流模型, 计算获得了交混系数, 精度可以得到提高。

本研究参照 Qin 等^[9]设计的兆瓦级空间反应堆, 保留其设计的棒束结构, 改变棒束的排列方式, 使用 fluent 中的一种各向异性湍流模型 (雷诺应力模型) 进行 CFD 计算, 获得适用于氦氘反应堆的湍流交混系数关系式。

2. 数值计算

2.1 计算模型和计算方法

目前国内外学者^[9-11]根据不同的需求设计了不同的空间反应堆, 但是空间堆大都处于概念设计, 故其棒束的排列方式和棒间距还有一定的不确定性。参考文献^[8], 本研究所采用的参数为: 燃料棒棒径 13 mm, 芯块外径 10 mm, 芯块内径 3 mm, 包壳内径 11 mm, 包壳厚度 1 mm。

在子通道分析时, 常以整个堆芯为目标进行分析, 在人为的划分子通道时, 常把堆芯内部由燃料棒直接围成的通道称为中心通道, 堆芯分析时也主要关注中心通道的参数变化。子通道分析软件中的湍流交混是两个通道的整体交混的平均值。因此在研究时常取堆芯中两个相邻的中心通道研究子通道的交混系数。

通过 ANSYS 软件建模获得棒间距分别为 14.2, 14.4 和 14.6 mm 时方形和三角形排列方式的相邻通道。然后划分网格, 使用 fluent 中的雷诺应力模型进行计算。根据定义式 (1), 把 C_t 与湍流交混粘度对应起来, 则有公式 (3)。通过计算可直接获得所需的参数, 代入湍流间隙粘度法的计算公式 (3), 可获得不同间隙、不同排列方式、不同雷诺数下的湍流交混系数。

$$\beta = \frac{\nu_{\text{turb}}}{\Delta y U} \quad (3)$$

其中 ν_{turb} 表示湍流粘度。 U 和 ν_{turb} 的值都可以通过 CFD 计算直接获得。

根据两种不同排列方式、不同间隙的交混系数随雷诺数变化的趋势, 拟合出相应的关系式。为保证拟合公式的准确性, 需把拟合得到的关系式用于子通道分析, 与现有的关系式和 CFD 计算结果相比较。其他主流堆型在使用 CFD 对交混系数进行研究时, 大都以 7 根棒或 9 根棒结构进行分析计算^[12-14]。在计算工况较多的情况下, 这种计算方式边壁的影响既在可接受范围内, 又不至于耗费巨大的计算资源。因此, 使用 CFD 计算方形排列的 9 根棒和三角排列的 7 根棒束通道进行公式验证。棒距壁面距离与棒间隙宽一致。几何模型及子通道划分如图 1 所示, 图中数字为通道编号, 前缀带 R 的为棒编号。

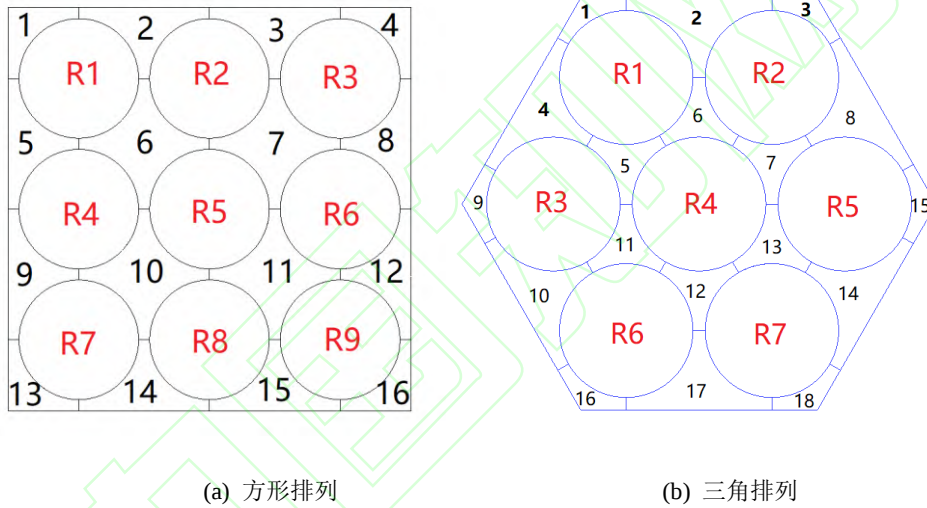


图 1 几何模型和子通道划分
Fig.1 Geometry model and sub-channel division

2.2 CFD 计算模型验证

根据文献[7]的计算, 需要考虑流动的各向异性。选用 RS- κ - ω 模型进行计算。为验证 CFD 计算方法的准确性, 需要把 CFD 方法计算结果与实验结果进行比较。Cheng 和 Tak^[15]提出可以用 CFD 计算雷诺应力来计算波动速度的方法, 此方法已经过多位学者^[13-14]进行验证, 可靠性较高。其根据雷诺应力的定义, 可知雷诺应力 $\overline{v'v'}$ 和速度波动 $\overline{v}$ 存在一定关系, 假设其速度分布符合高斯分布, 在此假设下可以推出公式 (4):

$$\overline{v} = \frac{\sqrt{\overline{v'v'}}}{\sqrt{\pi}} \quad (4)$$

根据湍流交混系数的定义, 可知交混系数等于横向速度波动和通道主流速度的比值, 即如公式 (5) 所示:

$$\beta = \frac{\overline{v}}{U} \quad (5)$$

Gu 等^[16]和 Shen 等^[17]采用同样的方法建立了超临界水冷堆和压水堆条件下的湍流交混模型。这种方法得到的交混系数虽然偏大, 但是可以对交混的趋势进行较好的验证。

Shen 等^[17]使用这种方法对 MATiS-H^[18]的实验结果进行了 CFD 准确性的验证,为此我们也选用 MATiS-H^[18]的实验结果作为验证对象。为了能准确模拟实验结果,采用与实验一致的条件进行模拟,实验工质和模拟工质都为水。由于后续计算棒束都为不带绕丝的光滑棒束,因此验证选择用文献^[18]的裸棒束数据,测量曲线与文献模拟数据测量曲线一致,都在棒间距的中心位置,几何坐标 x,y 以棒间距 P 归一化,速度波动 $\bar{v}$ 以主流流速 U 归一化。使用 CFD 模拟的几何条件和边界条件与实验条件相同。湍流模型选用 RS- κ - ω 模型,划分网格时保证 y^+ 小于 1,计算输入主要参数如表 1 所示。

表1 计算输入主要参数
Tab. 1 Main parameters used for calculation input

参数	值	参数	值
棒束排列	方形	入口质量流量/(kg·s ⁻¹)	24.2
棒径/mm	25.4	湍流模型	RS- κ - ω
棒间距/mm	33.12	入口温度/℃	35
棒长/m	2.184	网格单元数/10 ⁶	约 12
棒径比	1.30	压力/kPa	156.9

把本文的验证结果与 MATiS-H^[18]的实验值和 Shen 等^[17]的验证结果进行对比,结果如图 2 所示。经对比可知,本文 CFD 计算值与实验结果以及其他学者验证结果相比,基本趋势一致,本文计算值与实验值相比各位置处最大误差范围为-10%~13%,与文献[17]数据相比误差范围为-5%~16%,文献[17]与实验值的误差在 16%以内,可以说明计算的准确性。

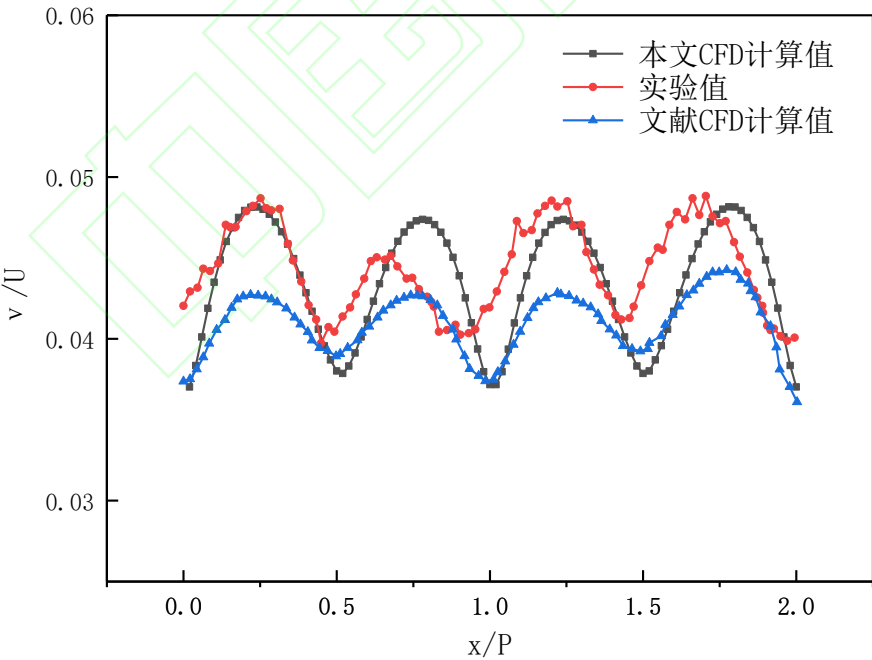


图 2 验证结果对比图
Fig.2 Comparison diagram of verification results

2.3 网格无关性分析

为保证网格质量,提高计算精度,对计算域进行结构化网格划分,间隙处加密处理。由于计算使用 $RS-\kappa-\omega$ 模型,在划分网格时需要对近壁面网格进行近壁面处理,且保证 y^+ 小于 1。图 3 所示的是方形排列和三角排列棒间距为 14.2 mm 的出口截面网格。

为保证计算的准确性,需要对划分的网格进行无关性分析。由于本文几何模型都以通道为基本单元,基本几何模型变化不大,且轴向长度不变,只需改变径向网格节点,获取合适尺寸的网格节点数进行计算。本文以三角形和方形排列棒间距为 14.2 mm 的几何模型为例进行网格无关性分析。分析时以出口面平均湍流粘度作为判据。使用同一几何模型划分 4 种不同数量的网格,三角形排列的 4 种网格单元数分别约为 150 万、272 万、460 万、730 万,方形排列的 4 种网格单元数分别约为 160 万、230 万、305 万、450 万。以入口温度为 1 100 K,入口流量为 398 kg/(m²·s),为主要输入参数为参考工况,计算结果如图 4 所示。由计算结果可知模拟计算值随网格单元数增大而增大,三角形排列模型在网格单元数大于 272 万时,模拟计算值间的相对误差小于 0.5%,因此可以认为网格数约为 272 万时,可以满足网格无关系分析要求。方形排列模型在网格单元数大于 305 万时,模拟计算值间的相对误差小于 0.7%,因此可以认为网格数约为 305 万时,可以满足网格无关系分析要求。其他几何模型划分网格时,根据几何模型的大小以此数量级为参考适当增加或减少径向结点数调整网格数量。

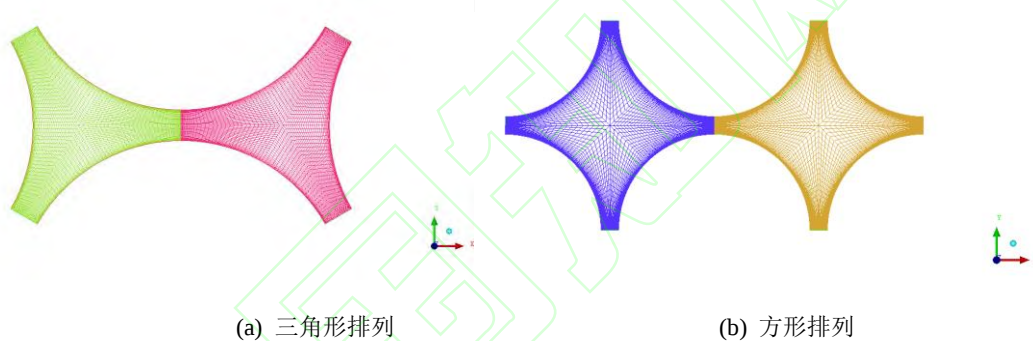


图 3 网格截面示意图
Fig.3 Schematic diagram of mesh section

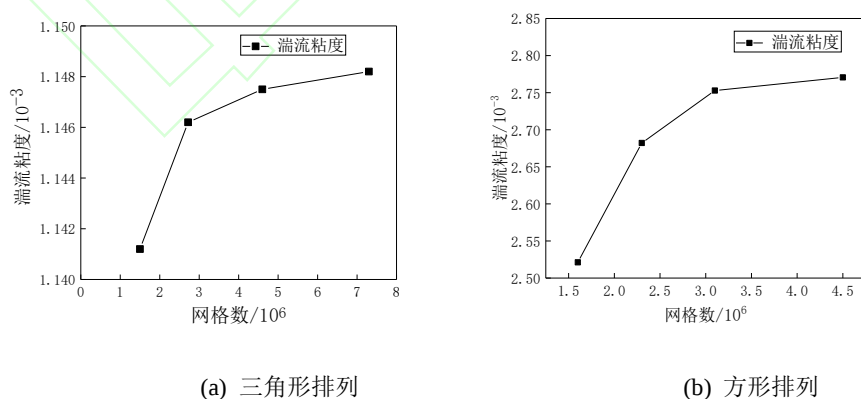


图 4 网格无关性分析结果图
Fig.4 Result diagram of mesh independence analysis

3. 结果和讨论

3.1 计算结果分析

在获得计算结果时需要通过对 CFD 计算结果的合理性进行分析。由于目前空间堆大都处于概念设计阶段,其棒束的排列方式和棒间距还有一定的不确定性,且目前现存堆型的棒束排列方式主要为方形和三角形排列。本文取三角形排列和方形排列棒间距为 14.2 mm 的工况进行分析。由于在计算湍流交混系数时要用到流体速度和湍流粘度,因此取其通道出口的速度云图和湍流粘度云图进行分析。在相同的质量流速下,方形通道的主流流速小于三角形通道,涡流粘度大于三角形通道。其通道出口速度分布云图如图 5 (a) 和 (c) 所示,分析可知其速度分布在通道中心处最高,越靠近壁面和通道间隙流速越低,符合流体流速分布规律。通道出口处涡流粘度分布云图如图 5 (b) 和 (d) 所示,可知涡流粘度分布与速度分布云图类似,在通道间隙处有明显交混现象。经分析可知计算结果合理可靠。

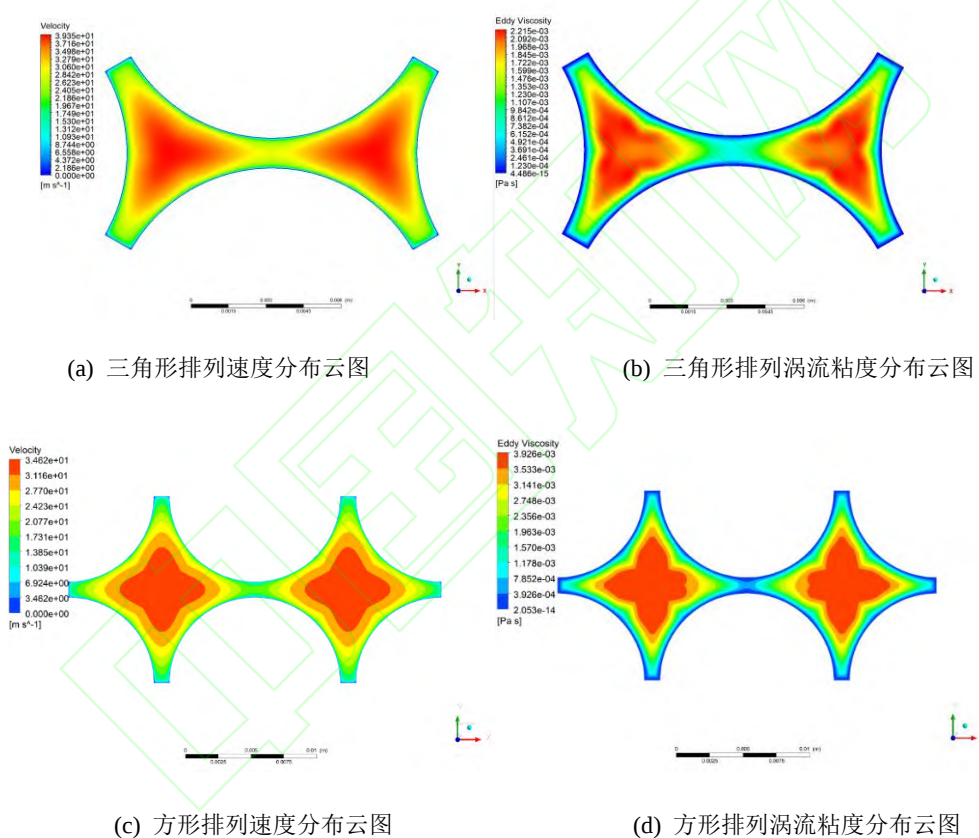


图 5 速度和涡流粘度分布云图
Fig.5 Velocity and eddy viscosity distribution contour

3.2 关系式拟合

根据模拟的结果,用公式(3)的计算可以得到的不同排列方式、不同棒间距下的湍流交混系数随雷诺数的变化规律。不同棒间距下方形通道交混系数与雷诺数关系如图 6 (a) 所示,不同棒间距下三角形通道交混系数与雷诺数关系如图 6 (b) 所示。

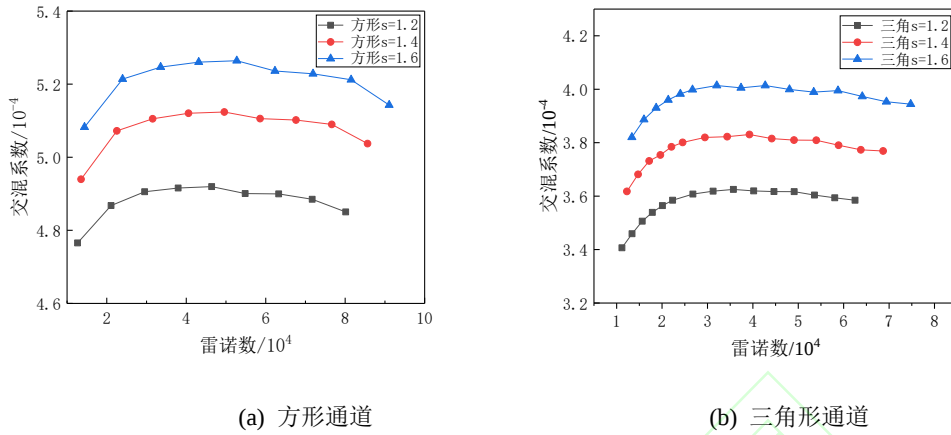


图6 不同棒间距下交混系数与雷诺数关系图
Fig.6 The relationship diagram between mixing coefficient and Reynolds number under different rod spacing

由图 6 (a) 和图 6 (b) 分析可知, 湍流交混系数随雷诺数的增加先增加后减小。这是因为子通道的交混效果与流量脉动有关, 雷诺数在较低范围内逐渐增加时, 流动脉动现象会逐渐增强, 从而使得通道间的交混效果变大, 因此, 在低雷诺数范围内, 湍流交混系数随雷诺数的增加而增加。但是, 一旦超过某个临界点, 即雷诺数大到一定程度时, 脉动现象会逐渐减弱或消失, 交混的效果也会随之逐渐变小, 因此在超过某一临界雷诺数后湍流交混系数随着雷诺数的增大而减小。这一现象与文献^[19]结果是一致的。文献[19]研究显示, 在小间隙的对称结构下, 间隙附近会出现流动脉动现象, 脉动的大小与雷诺数和 P/D 的值有关。

为了使拟合的公式便于在子通道分析程序中使用, 利用所得的数据拟合湍流交混系数关系式时按 COBRA 子通道程序中所给的 2 种常用形式进行拟合, 用 β_1 和 β_2 表示。常用湍流交混系数关系式形式如公式 (6) 和 (7) 所示。

$$\beta_1 = a Re^b \left(\frac{D_h}{s} \right)^c \quad (6)$$

$$\beta_2 = a Re^b \left(\frac{D_h}{4y} \right)^c \quad (7)$$

式中 a 、 b 、 c 为常数, Re 表示雷诺数, D_h 表示通道的水力直径, s 表示棒间隙。

拟合出适用于方形通道排列公式如公式 (8) 和 (9) 所示, 其中 $1.092 \leq P/D \leq 1.123$ 。

$$\beta_{1,sq} = \begin{cases} 4.7 \times 10^{-4} Re^{0.033} \left(\frac{D_h}{s} \right)^{-0.26} & (1 \times 10^4 \leq Re \leq 4 \times 10^4) \\ 7.3 \times 10^{-4} Re^{-0.0088} \left(\frac{D_h}{s} \right)^{-0.26} & (4 \times 10^4 \leq Re \leq 9 \times 10^4) \end{cases} \quad (8)$$

$$\beta_{2,sq} = \begin{cases} 4.4 \times 10^{-4} Re^{0.033} \left(\frac{D_h}{4y} \right)^{0.42} & (1 \times 10^4 \leq Re \leq 4 \times 10^4) \\ 4.4 \times 10^{-4} Re^{-0.0088} \left(\frac{D_h}{4y} \right)^{0.42} & (4 \times 10^4 \leq Re \leq 9 \times 10^4) \end{cases} \quad (9)$$

拟合出适用于三角形通道排列公式如公式 (10) 和 (11) 所示, 其中 $1.092 \leq P/D \leq 1.123$ 。

$$\beta_{1,tr} = \begin{cases} 5.7 \times 10^{-4} Re^{0.006} \left(\frac{D_h}{s} \right)^{-0.94} & (1 \times 10^4 \leq Re \leq 3.5 \times 10^4) \\ 1.3 \times 10^{-3} Re^{-0.0088} \left(\frac{D_h}{s} \right)^{-0.94} & (3.5 \times 10^4 \leq Re \leq 8 \times 10^4) \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta_{2,tr} = \begin{cases} 3.4 \times 10^{-4} Re^{0.006} \left(\frac{D_h}{4y} \right)^{0.68} & (1 \times 10^4 \leq Re \leq 3.5 \times 10^4) \\ 7.9 \times 10^{-4} Re^{-0.0088} \left(\frac{D_h}{4y} \right)^{0.68} & (3.5 \times 10^4 \leq Re \leq 8 \times 10^4) \end{cases} \quad (11)$$

拟合公式在所给范围内计算误差如图 7 (a) 和图 7 (b) 所示, 误差在 $\pm 3\%$ 以内。

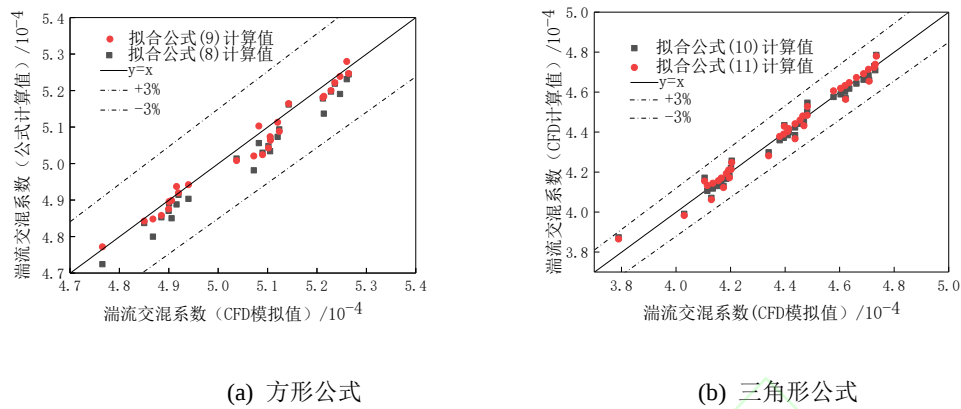


图 7 拟合公式误差图
Fig.7 Error diagram of fitting correlation

3.3 验证分析

为了验证拟合关系式的准确性，利用研发的空间堆子通道程序 ARSAP 对拟合的关系式和已有的关系式以及 CFD 计算结果进行验证对比，其中以 CFD 计算结果为参照。三角形的用 7 根棒模型进行验证，方形通道用 9 根棒模型进行验证，具体模型如图 1 所示。验证主要计算参数如表 2 所示。验证结果如图 8 (a) 和 (b) 所示。

表2 模拟计算参数
Tab. 2 Parameters used for the simulation

参数	值	参数	值
棒束排列	方形/三角形	入口质量流速/ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	798
棒径/mm	13	湍流模型	RS- κ - ω
棒间距/mm	14.2	入口温度/K	1100
棒长/mm	450	网格单元数/ 10^6	约 17
棒径比	1.0923	压力/MPa	3

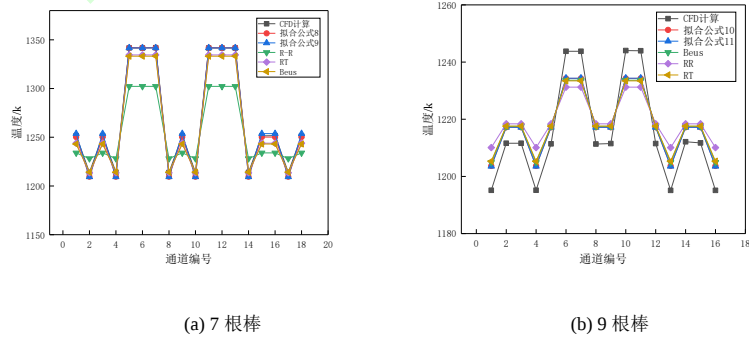


图 8 验证结果对比图
Fig.8 Comparison of verification results

经验证可知新拟合的关系式(8)、(10)和关系式(9)、(11)计算结果相近,这是因为棒间隙较小,所获得的湍流交混系数也较小,不同的公式形式所表现出来的差异性也较小。由于拟合公式所用的相邻通道也为中心通道,在堆芯分析中也是中心通道占多数,因此只详细对比中心通道温度的差异性。对于三角通道,新拟合关系式(8)和(9)计算的中心通道温度与CFD计算值相比差值分别为14.95和14.77 K,而RR、RT、Baus公式计算的中心温度与CFD计算值的差值分别为54.01、25.16和22.50 K,相比来说新拟合关系式计算的中心通道温度与CFD计算值差值最小。对于方形通道,新拟合关系式(10)和(11)计算的中心通道温度与CFD计算值相比差值分别为9.48和9.42 K,而RR、RT、Baus公式计算的中心温度与CFD计算值的差值分别为12.54、10.35和10.13 K。相比可知,本文关系式对正方形和三角形通道均能获得准确的预测结果。与已有关系式相比,本文关系式针对三角形通道和方形通道的预测结果均有所改进,其中针对三角形通道的预测结果有更加明显的改进。

4. 结 论

本文通过CFD计算拟合出适用于氦氙反应堆的交混系数关系式,量化分析了氦氙反应堆这类小型堆的交混效应。用研发的氦氙反应堆子通道分析软件(ARSAP)和CFD计算相结合的方式,验证并对比新拟合的湍流交混系数关系和现有常用的3种湍流交混系数关系式的适用性。经与现有关系对比可知,新拟合的关系式比常用的RR、RT、Baus关系式对氦氙反应堆的堆芯子通道分析适用性要更好。

参考文献:

- [1] EL-GRNK M S, TOURNIER J M. Noble-gas binary mixtures for closed-brayton-cycle space reactor power systems[J]. Journal of Propulsion & Power, 2007, 23(4):863-873.
- [2] TOURNIER J M, EL-GENK M, GALLO B. Best estimates of binary gas mixtures properties for closed brayton cycle space applications[C]// 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). USA, 2006, 10-12.
- [3] KESTIN J, KNIERIM K, MASON E A, et al. Equilibrium and transport properties of the noble gases and their mixtures at low density [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2010, 13(1):229-303.
- [4] HAIRE M A, VARGO D D. Review of helium and xenon pure component and mixture transport properties and recommendation of estimating approach for project prometheus (Viscosity and Thermal Conductivity)[R]. USA: Knolls Atomic Power Laboratory, 2007.
- [5] 刘余, 杜思佳, 李仲春. 子通道分析中的湍流交混研究综述[J]. 核动力工程, 2017(3): 132-136.
- [6] 朱瑞安, 赵兆颐. 棒束中的冷却剂交混[J]. 核动力工程, 1983(2): 59-64.
- [7] MARIA AVRAMOVA. Development of an innovative spacergrid model utilizing computational fluid dynamics within a subchannel analysis tool[D]. The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, PhD thesis. 2007.
- [8] LIU A G, YANG B W, HAN B, et al. Turbulent mixing models and other mixing coefficients in subchannel codes—a review part a: single phase[J]. Nuclear Technology, 2020, 206(9):1253-1295.
- [9] QIN H, ZHANG R, GUO K, et al. Thermal-hydraulic analysis of an open-rod megawatt gas cooled space nuclear reactor core[J]. International Journal of Energy Research, 2020(413):1-13.
- [10] MENG T, ZHAO F, CHENG K, et al. Neutronics analysis of megawatt-class gas-cooled space nuclear reactor design[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2019, 56(3):1-10.
- [11] MENG T, CHENG K, ZENG C, et al. Preliminary control strategies of megawatt-class gas-cooled space nuclear reactor with different control rod configurations[J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, 113:135-144.
- [12] 刘佳泰, 彭天骥, 苏兴康, 顾龙. 铅铋冷却快堆含绕丝燃料组件子通道程序开发与验证[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(11): 1950-1958.
- [13] 王树. 铅冷快堆单盒燃料组件子通道程序的研发[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [14] 刘洋, 喻宏, 刘一哲. 快堆燃料组件棒束通道内流动和传热现象分析与研究[J]. 原子能科学技术, 2014(1): 61-66.
- [15] CHENG X, TAK N I. CFD analysis of thermal-hydraulic behavior of heavy liquid metals in sub-channels[J]. Nuclear Engineering & Design, 2006, 236(18):1874-1885.
- [16] GU H Y, CHENG X, YANG Y H. CFD analysis of thermal-hydraulic behavior in SCWR typical flow channels [J]. Nuclear Engineering & Design, 2008, 238(12), 3348.
- [17] SHEN D, LIU X, CHENG X. A new turbulent mixing modeling approach for sub-channel analysis code[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 121:194-202.
- [18] SMITH B L, SONG C H, CHANG S K, et al. Report of the OECD/NEA-KAERI rod bundle CFD benchmark exercise. [R] NEA/CSNI/R, 2013.
- [19] LI R A, WANG C B, YAN B A. A criterion for the occurrence of large scale vortex structure in tight lattice bundle - ScienceDirect[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 148:107678.