

液态金属在堆芯子通道内的湍流换热

葛志浩 彭勇升 吕逸君 邓维平 赵平辉

(中国科学技术大学 核科学技术学院 合肥 230027)

摘要 采用 Speziale-Sarkar-Gatski (SSG)雷诺应力模型对液态金属在堆芯子通道内的流动、传热过程进行计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟,研究雷诺数(Re)、分子普朗特数(Pr)、格拉晓夫数(Gr)、节径比(P/D)等无量纲参数对湍流换热的影响。比较无量纲对流换热系数(Nu)可以看出,CFD 预测值与实验值及经验关系式符合得较好。对各种不同无量纲参数下的计算结果进行分析发现:在 P/D 和 Re 数相同条件下,三角形子通道的壁面温度分布比方形更均匀,换热情况更好;提高 Re 数,增大 P/D ,选用 Pr 数大的冷却剂,可有效改善温度和换热的周向分布不均情况;在 Re 数大于 10 000 的条件下,浮力对液态金属换热的影响可忽略不计。

关键词 液态金属, SSG, 子通道, 湍流换热

中图分类号 TL33

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090603

液态金属作为性能优良的冷却剂,被广泛用于各类快中子反应堆系统中。2002 年公布的 6 种第四代反应堆设计中就包括铅冷和钠冷两种快堆^[1];加速器驱动的次临界反应堆也使用液态铅铋合金作为冷却剂^[2]。因此对堆芯子通道内液态金属湍流换热的研究就尤其重要。

液态金属在棒束内流动的实验报道不多,具有代表性的有 Maresca 等^[3]的水银实验,Graber、Rieger 以及 Zhukov 的钠钾合金实验等^[4]。国内早期主要研究液态金属钠在圆管^[5]和环管内^[6-7]的流动换热特性,而近年来建成的 DRAGON 系列锂铅回路平台可以从事多种复杂的实验研究^[8]。

受实验装置和测量手段的限制,目前国内外对液态金属在堆芯内的流动及换热特性研究多采用数值模拟的方法。张贵勤等^[9]对液态金属钠在环管进口段的传热及周向导热问题给出了合适的计算模型;王美等^[10]通过数值计算发现湍流程度对于液态金属钠在环管中的传热影响主要集中在流道前半段,后半段分子扩散的影响逐渐凸显出来;马在勇等^[11]创新地将液态金属在等边三角形布置的棒束间传热问题转化为同心环管的传热问题,引入各项修正后得到了全新的三角形布置的棒束传热关系式;Cheng 等^[12-13]在铅铋合金圆管和子通道内部流动传热方面做了很多数值模拟研究,比较了不同的湍流模型、湍流普朗特数等因素的影响,发现

Speziale-Sarkar-Gatski (SSG)雷诺应力模型在模拟液态金属流动传热方面表现突出^[12,14-15]。

虽然对于液态金属在堆芯子通道内的流动传热特性国内外已经开展了相关的数值模拟研究工作,但还缺少更多条件下的计算结果分析及验证。本文采用 SSG 雷诺应力模型开展堆芯方形和三角形子通道内液态金属的湍流换热数值模拟,通过对不同无量纲参数雷诺数(Re)、分子普朗特数(Pr)、格拉晓夫数(Gr)、节径比(P/D)下的温度场、换热速率等计算结果进行比较分析,研究液态金属在各种条件下的湍流对流换热特性,并与相关实验数据及经验关系式进行比较,验证计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法的可行性。

1 研究方法

1.1 控制方程

定常不可压缩流的雷诺平均 Navier-Stokes 控制方程如下:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\nu S_{ij} + \tau_{ij}] + \beta g_i (T - T_{\text{ref}}) \quad (2)$$

国家自然科学基金(No.51006095)、国家高校青年创新基金(No.WK2090130019)资助

第一作者:葛志浩,男,1991 年出生,2013 年毕业于中国科学技术大学,研究领域为反应堆热工水力

通讯作者:赵平辉, E-mail: phzhao@mail.ustc.edu.cn

收稿日期:2015-02-02, 修回日期:2015-03-29

$$u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \quad (3)$$

式中， $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ 为应变率张量；

$\tau_{ij} = 2\nu_t S_{ij} + \frac{2}{3} k \delta_{ij}$ 为雷诺应力张量； k 为湍流动能； ν_t 为湍流粘度，由湍流模型计算得出； $\alpha = \nu / Pr$ 为分子热扩散系数； $\alpha_t = \nu_t / Pr_t$ 为湍流热扩散系数； Pr_t 为湍流普朗特数，由于液态金属的动量传递和热量传递不能采用雷诺相似假设，所以对 Pr_t 需要作特别研究。浮力的影响采用 Boussinesq 假设， $\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_{ref})]$ ， β 为冷却剂的热膨胀率。

1.2 湍流模型

由于子通道内部流场复杂性以及 Cheng 等^[12-13]的研究结果，本文选择了各向异性的雷诺应力 SSG 湍流模型^[16]进行计算。

表 1 模拟所用参考值
Table 1 Reference values for simulation.

变量 Variable	范围 Range	参考值 Reference values
节径比 Pitch-to-diameter ratio	1.1-2.0	1.2
雷诺数 Re Reynolds number	19 000-400 000	80 000
湍流普朗特数 Pr_t Turbulent Prandtl number	0.9-5.0	1.0
湍流模型 Turbulence model	$k-\varepsilon$, RNG, SST, SSG, RSO	SSG
网格尺寸 y^+ Mesh size y^+	1-90	11.5

2 计算结果分析

2.1 网格独立性分析

选取方形子通道，采取表 2 所示的网格划分方式，比较了充分发展段处壁面温度的差异。

图 2(a)是 Case 1 情况下不同 y^+ 下的壁面温度分布，可看出在 y^+ 小于 10 以内，近壁面尺寸造成的偏差很小。图 2(b)是在 $y^+=10$ 的情况下不同网格划分方式和网格数量下的壁面温度分布，发现几乎没有影响。考虑到计算成本，最终选择 Case 1 ($y^+=10$) 的方案进行网格划分。

1.3 几何模型

燃料组件中子通道类型有多种^[17]，本文选择最常见的方形和三角形结构的子通道，如图 1 所示。

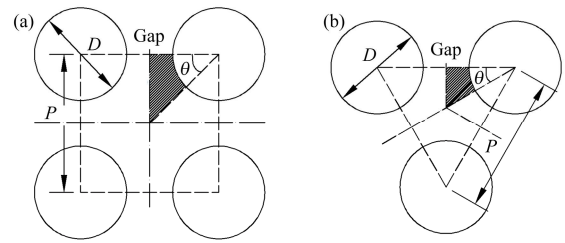


图 1 方形子通道(a)和三角形子通道(b)计算域示意图
Fig.1 Schematic diagram of computational domains in square (a) and triangular (b) sub-channels.

为节省计算机资源，考虑到结构的对称性，故选择如图 1 所示阴影部分作为计算域。三个对称面设置为 symmetry，与燃料棒接触的面设置为 wall，采用 scalable 壁面函数。入口设置为速度入口，出口设置为压力出口。具体参数的设置如表 1 所示。

表 2 网格划分方式
Table 2 Meshing method.

	周向×径向×轴向 Circumferential ×Radial ×Axial	网格数量 Mesh quantity	y^+
Case 1	20×20×400	160 000	1, 5, 10, 15, 40
Case 2	40×30×400	480 000	10
Case 3	30×20×800	480 000	10

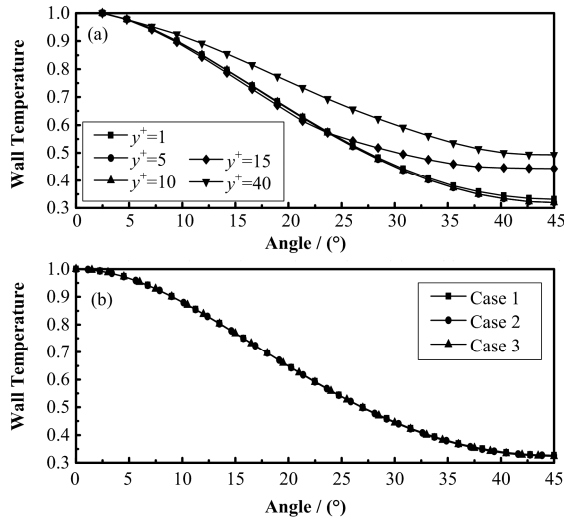


图2 网格划分对壁面温度的影响
(a) Case 1, (b) $y^+=10$
Fig.2 Effects of meshing on wall temperature.
(a) Case 1, (b) y^+ equals 10

本文中壁面温度均采用归一化的壁面温度： $T^*=(T_{\text{wall}}-T_{\text{bulk}})/(T_{\text{gap}}-T_{\text{bulk}})$ ，其中， T_{wall} 表示壁面温度； T_{bulk} 表示流体的平均温度； T_{gap} 表示图 1 所示 gap 区域 0° 角所对应的壁面温度。

2.2 湍流普朗特数的选取

Pr_t 表征湍流流动的一种属性，是湍流动量扩散与热扩散的比值。 Pr_t 的精确值对计算液态金属流动的湍流传热有重要影响。液态金属的 Pr_t 有多种经验关系式去描述，范围在 0.85–4.12^[13]。为简化模拟，

根据现有的实验数据，选取一个合适的常数 Pr_t 来进行数值模拟是十分必要的。

图 3 给出了由常数 Pr_t 得到的模拟结果与实验数据^[3] 的比较。从图 3 中可以看到， Pr_t 为 1.0 时与数据点吻合较好， Pr_t 为 1.5 时，在低贝克莱 Pe 数段略偏大而高 Pe 数段偏小。所以本文选用 Pr_t 为 1.0 模拟液态金属的换热情况。

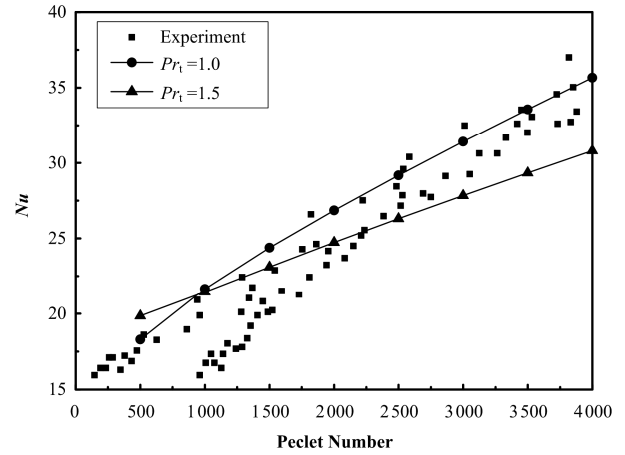


图3 常数 Pr_t 下壁面 Nu 数与实验数据的比较
Fig.3 Wall Nu number at constant Pr_t compared with experimental data.

2.3 计算结果与经验关系式的比较

关于液态金属子通道内流动的 Nu 数经验关系式有不少^[4]，文献[18]推荐了几个比较好的经验关系式如表 3 所示。

表3 推荐的经验关系式
Table 3 Recommended empirical correlations.

名称 Name	相关性 Correlations	$x=P/D$
Ushakov	$Nu=7.55x-20/(x^{13})+(0.041/(x^2))Pe^{0.56+0.19x}$	Δ 1.3–2.0
Graber&Riager	$Nu=0.25+6.2x+(0.032x-0.007)Pe^{0.8-0.024x}$	Δ 1.25–1.95
Zhukov	$Nu=7.55x-14x^{-5}+0.007Pe^{0.64+0.246x}$	$\square$ 1.2–1.5
Mikityuk	$Nu=0.047(1-e^{-3.8(x-1)})(Pe^{0.77}+250)$	$\Delta\square$ 1.1–1.95

注: $Pe=Re \times Pr$

Note: $Pe=Re \times Pr$.

图 4 是壁面 Nu 数与 Pe 数的关系比较，总体趋势与经验关系式一致。方形子通道中，模拟值平均比 Mikityuk 关系式偏大约 10%；三角形子通道中，模拟值平均比 Graber&Riager 关系式偏大约 16%，但在高 Pe 数段与经验关系式的拟合较好。

图 5 是壁面 Nu 数与节径比的关系比较，在节径比 P/D 较大区域，两种子通道的模拟值与经验关

系式拟合程度很好，在 P/D 较小区域，尤其是在三角形子通道内，模拟值整体略偏大。

采用最新的铅铋合金子通道流动换热实验研究^[19]对基于以前实验数据拟合出的 Mikityuk 关系式进行评估，发现整体趋势符合很好，数值上实验数据平均要比关系式大 10%。所以本文的模拟结果与最新实验结果是基本一致的。

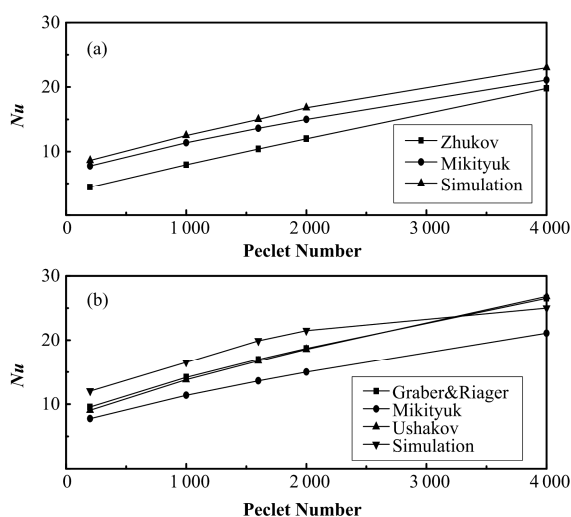


图 4 方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面 Nu 数与 Pe 数的关系比较

Fig.4 Comparison between wall Nu number and Pe number in square (a) and triangular (b) sub-channels.

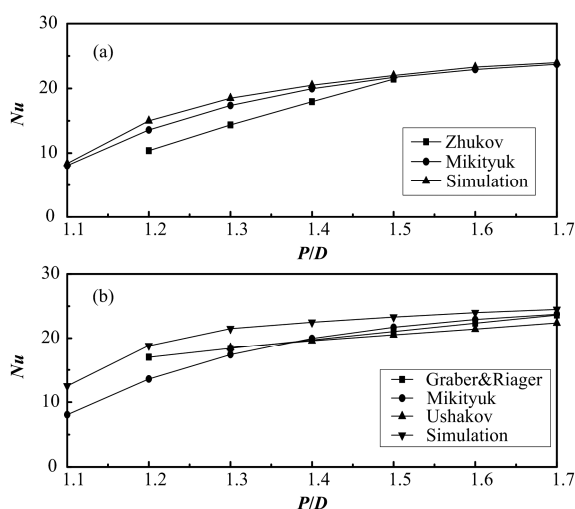


图 5 方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面 Nu 数与 P/D 的关系比较

Fig.5 Comparison between wall Nu number and P/D in square (a) and triangular (b) sub-channels.

2.4 雷诺数的影响

Re 数对湍流场的流动与换热有重要影响, 本节研究不同进口 Re 数条件下, 液态金属在方形和三角形子通道内的流动及换热状况。

图 6 给出 Re 数对壁面温度分布的影响。从图 6 可以明显看出, 温度周向分布不均匀情况, 并且方形子通道中这种不均匀情况更严重, 这对反应堆堆芯设计是不利因素, 应尽量使温度分布平缓。增大 Re 数, 可以改善子通道内的温度分布不均匀情况。

图 7 给出 Re 数对壁面 Nu 数分布的影响。可以看到, 相同的 P/D 和 Re 数情况下, 三角形子通道的换热情况要比方形好。这是因为 P/D 相同时三角

形子通道的水力直径小, 而 Re 数又相同, 所以三角形子通道内的流速更高, 换热会更好。 Re 数的增大可以显著增强换热效果。

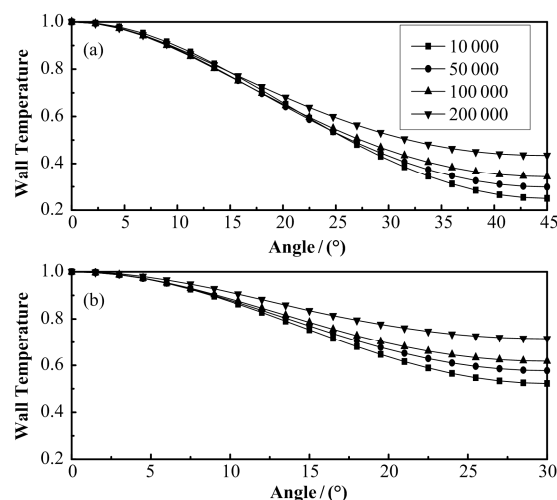


图 6 Re 数对于方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面温度的影响

Fig.6 Effect of Re number on wall temperature in square (a) and triangular (b) sub-channels.

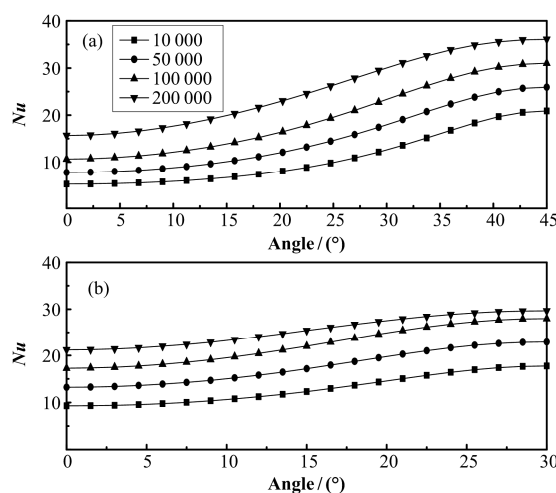


图 7 Re 数对于方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面 Nu 数的影响

Fig.7 Effect of Re number on wall Nu number in square (a) and triangular (b) sub-channels.

2.5 分子普朗特数的影响

Pr 数是冷却剂分子粘性扩散系数与分子热扩散系数的比值。液态金属冷却剂不同于水、空气等一般流体, 其分子传热速率要远大于动量传递速率, 所以液态金属的 Pr 数比 1 小很多, 见表 4。其传热特性与一般流体有很大差别, 需要研究不同分子 Pr 数的液态金属对流换热特性。本节研究不同的 Pr 数条件下, 液态金属在方形和三角形子通道内的流动及换热状况。

表 4 450 °C 时液态金属冷却剂物性^[20-21]
Table 4 Coolant properties of liquid metals at 450 °C^[20-21]

	Na	NaK	Bi	Pb	Pb-Bi
Pr	0.015	0.006	0.012	0.017	0.015
$\beta / 10^{-4} \text{ K}^{-1}$	2.4	2.77	1.24	1.14	1.3

图 8 给出 Pr 数对壁面温度的影响。随着 Pr 数的减小，周向温度分布的不均匀性增大，这主要是因为随着分子 Pr 数的减小，分子热扩散速率增大，湍流换热速率相对减小，此时流体对流换热速率在流道截面上的分布与流道的几何结构有较大关系。由于子通道几何结构的不规则，使得温度分布的不均匀性增大。

图 9 给出 Pr 数对壁面 Nu 数的影响。由图 9 可以看到，壁面 Nu 数随着 Pr 数而减小，但实际的对流换热系数 $h=Nu \cdot k/D_h$ 随着分子 Pr 数的减小而增大，这是因为 Pr 数小的流体热导率 k 很大。

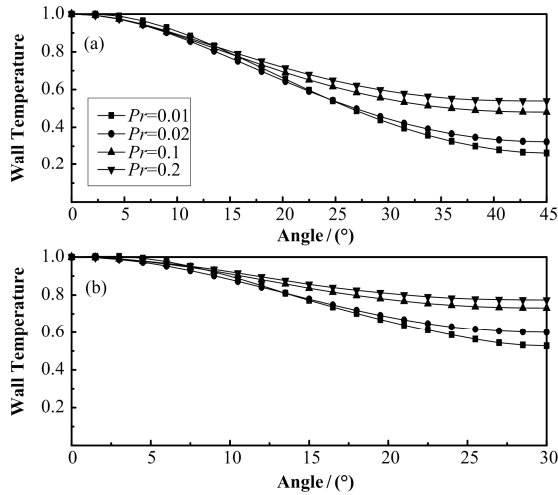


图 8 Pr 数对于方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面温度的影响

Fig.8 Effect of molecular Pr number on wall temperature in square (a) and triangular (b) sub-channels.

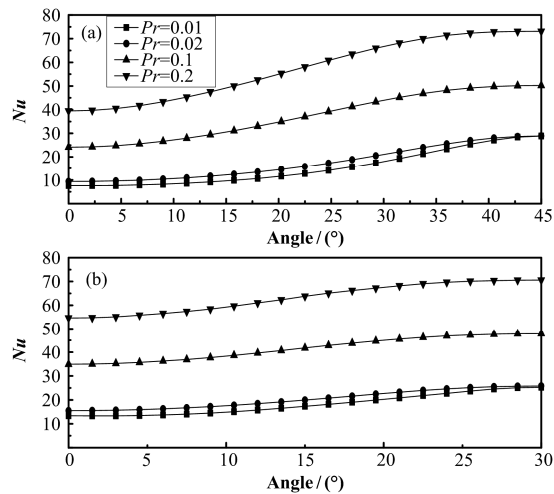


图 9 Pr 数对于方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面 Nu 数的影响

Fig.9 Effect of molecular Pr number on wall Nu number in square (a) and triangular (b) sub-channels.

2.6 格拉晓夫数的影响

Gr 数可以视为流体浮力与粘性力的比值，它的大小表征了自然对流的重要性：

$$Gr = g\beta\Delta T D_h^3 / \nu^2 \quad (4)$$

式中， ΔT 是温升； D_h 是特征长度； ν 是流体的动力粘度。对于混合对流，评价浮力的影响可以用无量纲浮力参数表示， $\Omega = Gr/Re^2$ ，当 Ω 大于 1，浮力对流动作用很强，反之浮力的影响可以忽略。为尽量体现浮力的影响，本节选取低 Re 数 10 000 进行研究。并通过改变热膨胀系数 β ，使其为原来的 0、1、5、10 倍，研究不同 Gr 数条件下，液态金属在方形和三角形子通道内的流动及换热状况。

图 10 和 11 分别给出了 Gr 数对于壁面温度和 Nu 数的影响。改变 Gr 数对三角形子通道的换热几乎没有影响。当方形子通道 Gr 数增大到原来的 5 倍， Nu 数出现增大，说明浮力的作用能够一定程度上改善子通道的换热情况。但从表 4 可以看出，常见的液态金属热膨胀系数很相近，难以达到 5 倍的差距，并且实际正常情况下强迫对流 Re 数的也不会很低，所以在正常的液态金属子通道强迫对流换热计算中，由重力带来的浮力影响可忽略。

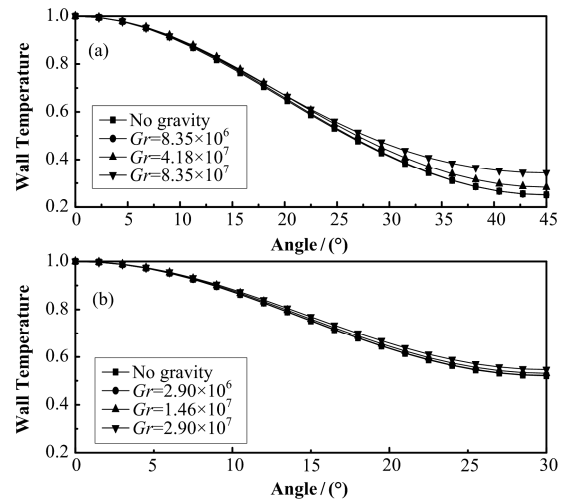


图 10 Gr 数对于方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面温度的影响

Fig.10 Effect of Gr number on wall temperature in square (a) and triangular (b) sub-channels.

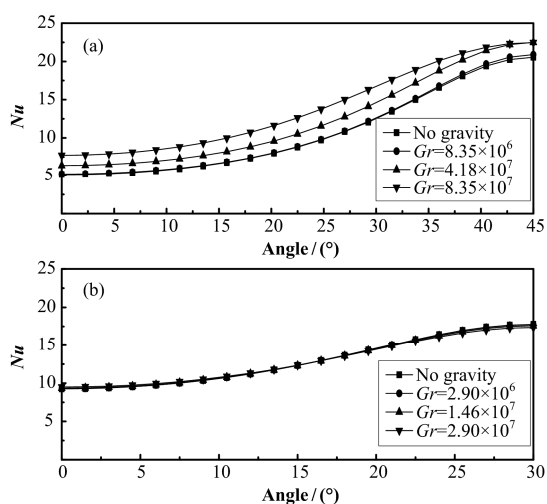


图 11 Gr 数对方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面 Nu 数的影响

Fig.11 Effect of Gr number on wall Nu number in square (a) and triangular (b) sub-channels.

2.7 节径比的影响

流场的结果依赖于几何结构, 本节研究不同的子通道节径比 P/D 下液态金属的流动及换热状况。

图 12 给出 P/D 对于壁面温度的影响。 P/D 在小于 1.2 的时候周向温度分布差别很大, Gap 区域温度很高, 中心区域温度很低, 尤其是在方形子通道之中。随着 P/D 的增大, 壁面温度分布趋于平缓。

图 13 给出 P/D 对于壁面 Nu 数的影响。在 $P/D=1.1$ 时, 壁面 Nu 数的最大值是最小值的 10 倍之多, $P/D=1.2$ 时, 两者之比也将近两倍。因此选用液态金属作为冷却剂, 在设计堆芯组件紧密排布方式时, 需详细考虑温度和换热周向分布不均这个重要问题。

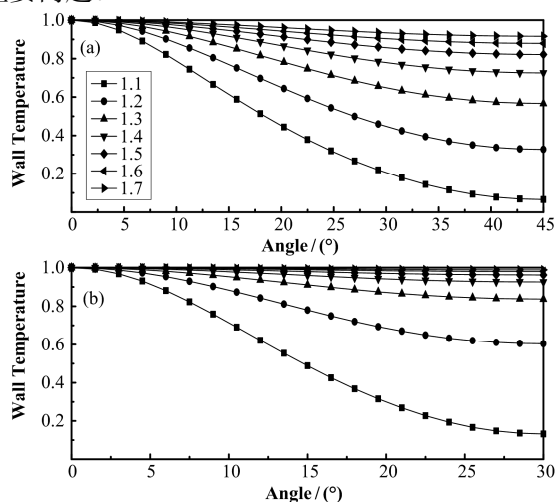


图 12 P/D 对于方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面温度的影响

Fig.12 Effects of P/D on wall temperature in square (a) and triangular (b) sub-channels.

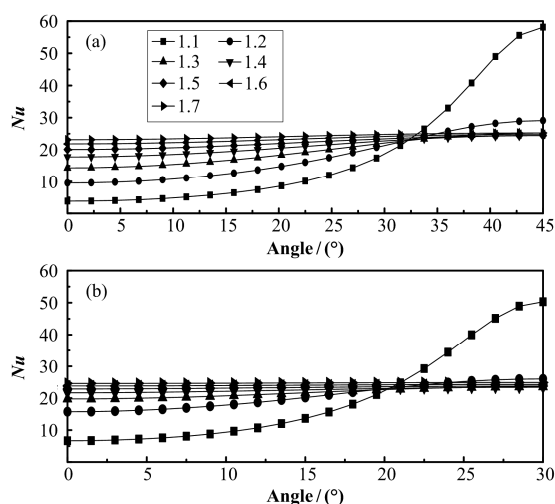


图 13 P/D 对方形子通道(a)和三角形子通道(b)壁面 Nu 数的影响

Fig.13 Effect of P/D on wall Nu number in square (a) and triangular (b) sub-channels.

3 结语

本文使用 SSG 雷诺应力模型, 对液态金属在两种不同的子通道中的流动换热情况进行 CFD 数值模拟, 研究各种无量纲参数的影响, 得到以下结论:

(1) 液态金属的雷诺数(Re)、分子普朗特数(Pr)和节径比(P/D)在 $Re=10\,000\sim20\,000$ 、 $Pr=0.01\sim0.20$ 、 $P/D=1.1\sim1.7$ 范围内, 使用 SSG 模型模拟的湍流换热系数与实验及相关经验关系式符合得较好, 说明 CFD 方法能够比较准确地模拟液态金属子通道内的换热情况。

(2) 在节径比(P/D)和入口 Re 数相同条件下, 三角形子通道的壁面温度分布更均匀, 换热情况更好。提高 Re 数, 增大 P/D , 选用 Pr 数大的冷却剂, 可以有效改善温度和换热的周向分布不均情况。

(3) Re 数大于 10 000 的情况下, 对于常见的液态金属对流换热, 由重力带来的浮力影响可以忽略。

(4) P/D 在 1.2 以下子通道壁面温度和换热不均匀现象严重, 需要开展更精确的流场和温度场分析。

参考文献

- 1 哈琳. 六种第四代核反应堆概念[J]. 国外核新闻, 2003, 34(1): 15-19
HA Lin. Six kinds of fourth generation nuclear reactor concept[J]. Foreign Nuclear News, 2003, 34(1): 15-19
- 2 詹文龙, 徐珊珊. 未来先进核裂变能-ADS 嬗变系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 375-381. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.017
ZHAN Wenlong, XU Hushan. Advanced fission energy

- program-ADS transmutation system[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3): 375–381. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.017
- 3 Maresca M W, Dwyer O E. Heat transfer to mercury flowing in-line through a bundle of circular rods[J]. Journal of Heat Transfer, 1964, **86**(2): 180–186. DOI: 10.1115/1.3687091
- 4 Mikityuk K. Heat transfer to liquid metal: review of data and correlations for tube bundles[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, **239**(4): 680–687. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.12.014
- 5 石双凯, 张振灿, 张永积, 等. 液态金属钠在圆管和套管内的传热实验研究[J]. 工程热物理学报, 1981, **2**(2): 173–180
SHI Shuangkai, ZHANG Zhencan, ZHANG Yongji, *et al.* Experimental study of heat transfer to liquid metal sodium flowing in circular tube and annuli[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1981, **2**(2): 173–180
- 6 张贵勤, 向明忠, 周学智. 液态金属钠在环管热进口段的紊流换热实验研究[J]. 化工学报, 1990, **51**(3): 346–352
ZHANG Guiqin, XIANG Mingzhong, ZHOU Xuezhi. Experimental investigation of turbulent heat transfer to liquid sodium in the thermal entrance region of an annulus[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1990, **51**(3): 346–352
- 7 张贵勤, 单建强, 肖泽军, 等. 高温低 Pe 数与低温高 Pe 数液钠在环管中的换热研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, **29**(6): 76–81
ZHANG Guiqin, SHAN Jianqiang, XIAO Zejun, *et al.* Study of heat transfer to liquid sodium with high temperature and low Pe number and with low temperature and high Pe number in an annulus[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, **29**(6): 76–81
- 8 朱志强, 黄群英, 章毛连, 等. 中国 DRAGON 系列液态金属锂铅回路及实验研究[C]. 第三届反应堆物理与核材料学术研讨会, 北京, 2007
ZHU Zhiqiang, HUANG Qunying, ZHANG Maolian, *et al.* Chinese DRAGON series liquid metal LiPb loop and experimental study[C]. The 3rd Reactor Physics and Nuclear Materials Symposium, Beijing, 2007
- 9 张贵勤, 向明忠, 单建强. 液态金属在环管进口段的传热以及轴向导热的影响[J]. 化工学报, 1994, **45**(5): 560–566
ZHANG Guiqin, XIANG Mingzhong, SHAN Jianqiang. Heat transfer to liquid metal in thermal entrance region and the effect of axial heat conduction[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1994, **45**(5): 560–566
- 10 王美, 巫英伟, 田文喜, 等. 液态金属钠在环管中湍流传热特性研究[J]. 核动力工程, 2013, **34**(4): 53–57
WANG Mei, WU Yingwei, TIAN Wenxi, *et al.* Turbulent heat transfer characteristics of liquid sodium flow in an annular tube[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, **34**(4): 53–57
- 11 马在勇, 仇子钺, 王美, 等. 液态金属棒束传热的理论分析[J]. 原子能科学技术, 2011, **45**(12): 1478–1483
MA Zaiyong, QIU Zicheng, WANG Mei, *et al.* Theoretical analysis of heat transfer for liquid metal through tube bundles[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, **45**(12): 1478–1483
- 12 Cheng X, Tak N I. 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
- 13 Cheng X, Tak N I. Investigation on turbulent heat transfer to lead-bismuth eutectic flows in circular tubes for nuclear applications[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, **236**(4): 385–393. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2006.09.006
- 14 Tóth S, Aszódi A. CFD analysis of flow field in a triangular rod bundle[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, **240**(2): 352–363. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.08.020
- 15 Yu Y Q, Yan B H, Cheng X, *et al.* Simulation of turbulent flow inside different subchannels in tight lattice bundle[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, **38**(11): 2363–2373. DOI: 10.1016/j.anucene.2011.07.018
- 16 Horvath A, Dressel B. Numerical simulations of square arrayed rod bundles[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, **247**: 168–182. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.03.004
- 17 Gou J, Shang Z, Ishiwarari Y, *et al.* CFD analysis of heat transfer in subchannels of a super fast reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, **240**(7): 1819–1829. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.03.013
- 18 Chandra L, Roelofs F. CFD analyses of liquid metal flow in sub-channels for Gen IV reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, **241**(11): 4391–4403. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.01.023
- 19 Pacio J, Daubner M, Fellmoser F, *et al.* Heavy-liquid metal heat transfer experiment in a 19-rod bundle with

- grid spacers[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 273: 33–46. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.02.020
- 20 徐銖. 钠冷快堆的安全性[J]. 自然杂志, 2013, 35(2): 79–84. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2013.02.001
- XU Mi. Safety on sodium cooled fast reactor[J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(2): 79–84. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2013.02.001
- 21 OECD/NEA Nuclear Science Committee. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal-hydraulics and technologies[R]. Issy-les-Moulineaux, France: OECD Nuclear Energy Agency, 2007

Turbulent heat transfer of liquid metal inside the sub-channels of reactor core

GE Zhihao PENG Yongsheng LYU Yijun DENG Weiping ZHAO Pinghui

(School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract Background: Liquid metal has been proposed as the coolant of the fourth generation nuclear reactor and the accelerator driven sub-critical system. Due to its low molecular Prandtl number (Pr), liquid metal differs from other coolants like water or gas in heat transfer. **Purpose:** This study aims to investigate the character of heat transfer of liquid metal inside the reactor core. **Methods:** Speziale-Sarkar-Gatski (SSG) Reynolds stress model was applied to the Computational Fluid Dynamics (CFD) prediction of liquid metal flow and heat transfer inside the sub-channels of the reactor core. Effect of different dimensionless parameters, e.g. Reynolds number (Re), Pr , Grashof number (Gr) and pitch-to-diameter ratio (P/D) on the turbulent heat transfer calculated results was investigated. **Results:** The dimensionless convective heat transfer coefficient (Nu), predicted by the CFD method, agrees well with the experimental data and the empirical relations. **Conclusion:** Based on the analysis of various dimensionless parameters, it is found that the heat exchange performs better in triangular fuel assembly sub-channels than that in square sub-channels, under the same condition of P/D and Re . The inhomogeneous circumferential distributions of temperature and heat transfer can be effectively improved by increasing Re and P/D or choosing coolants with large Pr . When Re is larger than 10 000, the buoyancy effect on liquid metal heat transfer could be ignored.

Key words Liquid metal, Speziale-Sarkar-Gatski (SSG), Sub-channels, Turbulent heat transfer

CLC TL33