

半周加热下集热管内液态铅铋传热特性研究

吴闽强^{1,2}, 朱志强¹, 黄望哩¹, 柏云清¹

(1. 中国科学院核能安全技术研究所, 中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室, 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230027)

摘 要: 建立液态铅铋合金在太阳能高温集热管内对流传热数值计算模型。采用 Fluent 软件, 通过求解三维 N-S 方程及能量方程, 研究半周加热半周绝热边界条件下集热管内液态铅铋合金的传热性能。研究表明: 构建湍流普朗特数模型的方法可用于半周加热半周绝热下集热管内液态铅铋传热性能的数值模拟; 液态铅铋的质量流量对换热性能的影响较大, 热流密度大小对换热性能影响较小, 绝热面努塞尔数 Nu 始终高于加热面; 相比传统熔盐介质, 液态铅铋传热性能更佳, 在提高系统工作温度、降低集热管热量损失方面具有潜力。

关键词: 太阳能; 槽式集热管; 半周热流密度; 液态铅铋

中图分类号: TK519

文献标识码: A

0 引 言

太阳能作为一种理想的可再生能源具有价格低廉、资源丰富、无污染等优点受到世界各国的重视^[1,2]。在众多太阳能发电系统中, 槽式和塔式太阳能热发电系统技术相对成熟、发展最为迅速, 已实现商业化运行^[3]。集热管是槽式和塔式太阳能热发电系统实现太阳能转化为热能的关键部件。经聚光镜聚焦并反射到太阳能集热管表面的太阳辐射热流密度可达 $50\sim 1500\text{ kW/m}^2$ 且分布极不均匀, 集热管周向及轴向常存在较大的温度梯度, 由此造成的集热管变形或损坏严重影响电站的稳定运行^[4]。为此, 国内外许多学者进行了研究^[5-9]。

随着太阳能光热技术的发展, 为提高太阳能光热电站系统效率, 具有优良热物理性能及化学活性(不与空气和水等反应)的液态铅铋合金(lead-bismuth eutectic, LBE)作为下一代太阳能光热电站传热介质的概念被提出来^[10-14]。在液态 LBE 关键技术研究, 中国科学院核能安全技术研究所 FDS 团队在液态 LBE 热工水利、材料腐蚀、回路设计等

技术领域已进行大量研究并取得一系列进展^[15-17]。

鉴于液态 LBE 优良的传热性能以及非均匀热流分布对光热电站安全运行的重要影响, 本文在上述研究的基础上采用数值模拟的方法, 分析研究半周加热半周绝热条件下液态 LBE 质量流量、入口温度及热流密度与其传热性能的关系, 并对比分析了液态 LBE 与熔盐对流换热性能。

1 物理模型与计算方法

1.1 集热管传热模型

太阳能集热管工作时管内传热介质处于稳定的湍流状态, 管壁吸收的太阳辐射能通过导热与对流换热传递给管内传热介质。为模拟实际工作状态下 LBE 在集热管内的对流换热过程, 建立了如图 1 所示的物理计算模型, 并设定集热管左半周为加热面接收均匀恒定的热流密度, 右半周保持绝热。图 1 中, L 为集热管长, θ 为圆周角, q_{\max} 为热流密度。集热管结构材料为 316L 不锈钢, 导热系数为 $18.4\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; 集热管管长 1500 mm 、管外径 20 mm 、壁厚 2 mm 。

收稿日期: 2016-11-29

基金项目: 国家国际科技合作项目(2015DFG62120); 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2014GB112002); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA03040000)

通信作者: 朱志强(1978—), 男, 博士、副研究员, 主要从事包层技术及液态金属综合实验平台研制与相关关键技术方面的研究。
zhiqiang.zhu@fds.org.cn

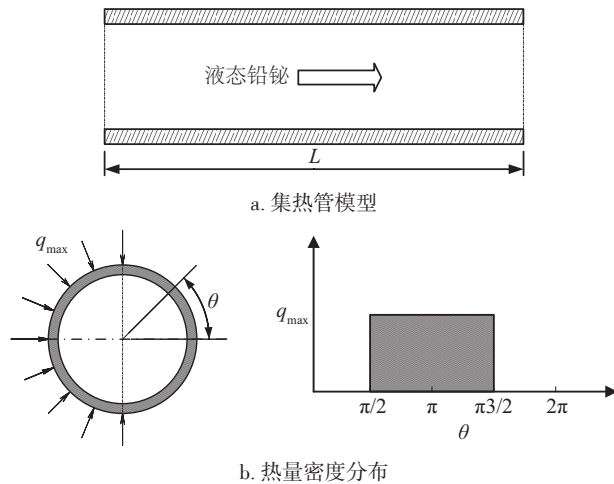


图1 集热管计算模型

Fig. 1 Calculate model of receiver tube

1.2 液态LBE的热物性

在实际工作中,槽式集热管表面的热流密度会随时间及外部环境的变化而发生改变,受此影响,LBE的热物性也会随之产生变化。为提高整个集热管计算结果的准确性和实用性,在数值计算过程中液态LBE必须为变物性。模拟中LBE的热物性采用OECD/NEA出版的热物性手册^[18]推荐的表达式。

1.3 液态LBE的湍流普朗特数模型

与传统传热介质例如空气和水相比,液态LBE的分子普朗特数 Pr 十分低(10^{-2} 量级),即使在充分发展的湍流中,热扩散机制也以分子传导为主,大量的实验及理论分析证明,常规流体的雷诺比拟方法已不适用于液态LBE传热的模拟计算^[19]。针对液态LBE低 Pr 的特点,国内外学者进行了大量的研究,并给出了相应的湍流普朗特数(Pr_t)模型^[20-22]。文献[19]通过数值模拟的方法对多种 Pr_t 模型进行了对比分析,结果表明 Pr_t 对液态LBE湍流传热数值模拟的结果有重要影响,其中采用文献[23]推荐的 Pr_t 模型的模拟结果与实验结果最为接近。因此在本文的研究中,采用文献[23]推荐的 Pr_t 模型。

$$\begin{cases} Pr_t = 4.12, & Pe \leq 1000 \\ Pr_t = \frac{0.01Pe}{[0.018Pe^{0.8} - (7.0 - A)]^{1.25}}, & 1000 < Pe \leq 6000 \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \begin{cases} 5.4 - 9 \times 10^{-4} Pe, & 1000 < Pe \leq 2000 \\ 3.6, & 2000 < Pe \leq 6000 \end{cases} \quad (2)$$

式中, Pe ——无量纲佩克莱特数。

1.4 网格与求解

采用Gambit软件对计算区域进行建模与网格划分。集热管内壁增加边界层,壁面和管内采用六面体网格,液态LBE入口处网格加密,计算中逐步细化网格至计算结果与网格数无关。

数值计算中的控制方程为三维流动的N-S方程与能量方程,采用有限体积法对控制方程进行离散,动量、湍动能、能量和耗散率采用2阶迎风格式,湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型,采用SIMPLE算法处理速度与压力的耦合,近壁面流动计算采用标准壁面函数方法,所有近壁面无量纲数 y^+ 取在30~65之间。计算中参考文献[23]推荐的湍流普朗特数模型,通过Fluent的用户自定义功能(user defined functions,UDF)修改软件默认的 $Pr_t = 0.85$ 。计算收敛的标准为连续性方程、动量方程和能量方程的残差均小于 10^{-6} 。

2 计算结果与讨论

2.1 计算程序验证及温度与流场特性

由于实验条件与测量方法的限制以及实验中液态LBE物性参数数据库的差异等问题,导致现阶段关于液态LBE管内湍流传热的实验数据很少且差异巨大,非均匀热流密度下液态LBE管内湍流传热研究更是鲜见报道^[13]。值得一提的是熔盐、导热油、水、蒸汽及汽水两相混合物等相关实验和数值模拟结果均显示,均匀热流密度下管内湍流传热的经验公式同样适用于非均匀热流密度下的管内湍流传热能力计算^[7,13]。为验证计算程序,采用文献[23]推荐的液态LBE管内湍流传热经验公式作为计算程序的验证依据。数值计算中圆管左半周加热面施加热流密度 $q_w = 3.5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 的恒定热流密度,右半周绝热;入口质量流量范围为0.5~3.0 kg/s,入口温度为500 K,对比结果见图2。可看出数值计算结果与经验公式整体偏差较小且变化趋势一致,除在低 Pe 下误差稍大外,其他 Pe 下的误差均小于7%,因此可认为该计算程序适用于半周热流下管内液态LBE湍流传热问题的计算分析。

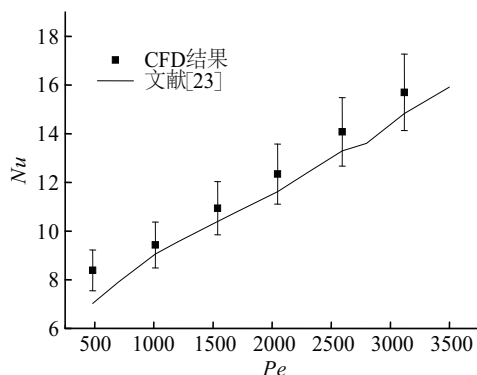
图2 Nu 的数值计算结果与经验公式对比Fig. 2 Comparison of numerical results Nu and theoretical correlation results

图3为集热管 x 轴向 $\theta=180^\circ$ 剖面温度分布图,由图可见集热管内液态LBE温度沿轴向逐渐增加且分布及其不均匀。主要原因是集热管加热侧受热后温度急剧升高后经对流换热将能量传递至管内液态LBE,其余部分能量经管壁导热传递至绝热面。由于液态LBE的传热性能较强,经对流换热作用传递至管内的能量远高于经管壁导热传递至绝热侧的能量。受此影响加热侧温度上升较快,且管壁温度始终高于同侧液态LBE的温度,而绝热侧温度上升则相对缓慢。

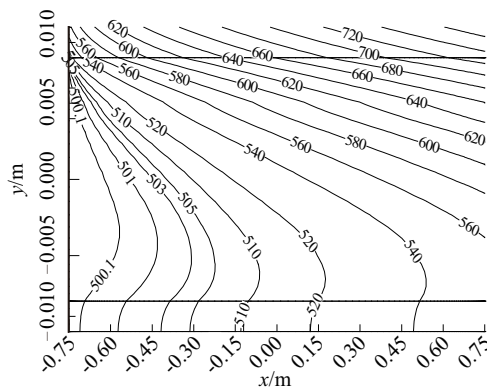
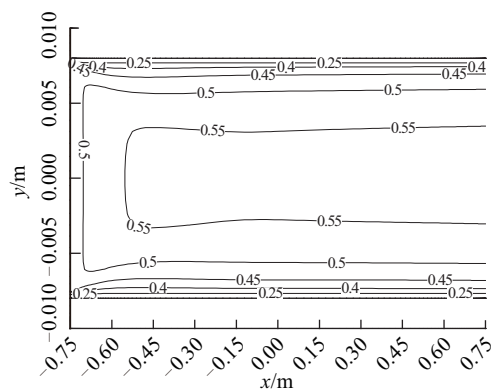
图3 管内 x 轴剖面温度分布(K)

Fig. 3 Axial temperature distribution of circular tube(K)

图4为集热管 x 轴向 $\theta=180^\circ$ 剖面液态LBE速度分布图,由图可见,入口处管内流体速度整体保持一致,受液态LBE黏性的影响,管壁处流体速度最小,管内中心处的速度达到最大,充分发展段后管内流速分布整体维持稳定。与管内温度分布相比,流速分布相对均匀,说明半周加热对管内流体速度分布影响较小。

图4 管内 x 轴剖面速度分布($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)Fig. 4 Axial velocity distribution of circular tube($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

2.2 液态LBE换热性能

2.2.1 入口温度对传热特性的影响

集热管加热面热流密度 $q_w=3.5\times 10^5 \text{ W/m}^2$,液态LBE入口质量流量 Q_m 范围为 $0.5\sim 3.0 \text{ kg/s}$,入口温度分别为 $500, 600$ 和 700 K 时,集热管加热面和绝热面传热特性如图5所示。管壁 Nu 随 Pe 的增加而增大,换热性能得到加强。不同温度下集热管加热面和绝热面处的传热性能无明显差异。3种入口温度下绝热面的 Nu 均大于相应温度下加热面的 Nu ,主要原因是加热面处部分热量通过管壁的导热传递至绝热面,使绝热面温度上升并与液态LBE进行对流换热。但经由管壁传导至绝热面的热量十分有限,绝热面处管内液态LBE温度低于加热面处液态LBE的温度,即绝热面处液态LBE的 Pe 高于加热面处的 Pe ,因此绝热面的 Nu 高于加热面。在实际应用中,绝热面处的对流换热作用应予以充分的重视。

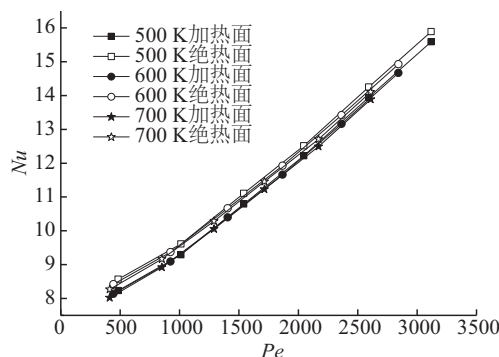


图5 初始温度对传热性能的影响

Fig. 5 Influence of inlet temperature on heat transfer characteristics

2.2.2 流量对传热及流阻特性的影响

集热管加热面热流密度 $q_w=3.5\times 10^5\text{ W/m}^2$, 液态 LBE 入口温度为 500 K, 质量流量分别为 1.0、2.0 和 3.0 kg/s 时, 集热管轴向局部 Nu 分布见图 6。图 6 中 L 为管长, l 为入口至集热管轴向某一位置处的距离。从图中可看出, 同一热流密度下管壁局部 Nu 随质量流量的增加而增大, 管壁局部 Nu 在入口处达到最大后沿管壁轴向逐渐减小至趋于稳定。主要由于高质量流量下的湍流换热增强, 使得管壁局部 Nu 得到提高; 入口处液态 LBE 的热边界层较薄, 湍流脉动对传热的贡献明显高于充分发展段, 使得局部 Nu 呈现先减小后趋于稳定的特点。

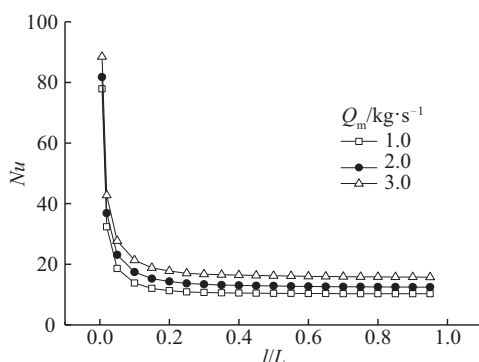


图6 质量流量对传热特性的影响

Fig. 6 Influence of mass flow rate on heat transfer characteristics

图 7 给出了入口温度为 500 K 时液态 LBE 压降随质量流量的变化曲线。由图 7 可见在相同进口温度条件下集热管内液态 LBE 压降随质量流量的增大而显著增加。考虑到质量流量增大对液态 LBE 换热性能的积极影响, 在实际工程应用中需要综合传热及流阻两方面的特性进行考虑。

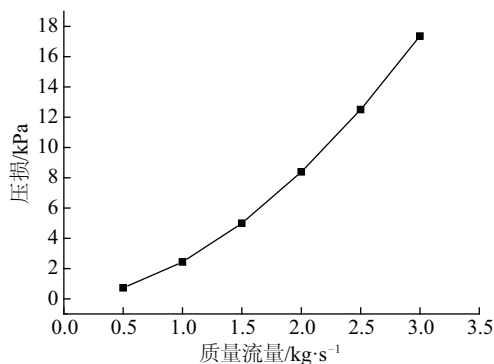


图7 质量流量对压损的影响

Fig. 7 Influence of mass flow rate on pressure loss

2.2.3 热流密度对传热特性的影响

液态 LBE 入口温度为 500 K, 质量流量范围为 0.5~3.0 kg/s, 集热管加热面热流密度 q_w 分别为 1.0×10^5 、 3.5×10^5 和 $5.0\times 10^5\text{ W/m}^2$ 时, 集热管传热特性如图 8 所示。随着 Pe 的增加, 不同热流密度下的集热管壁面的 Nu 无明显变化, 说明仅改变壁面热流密度无法提高换热性能。

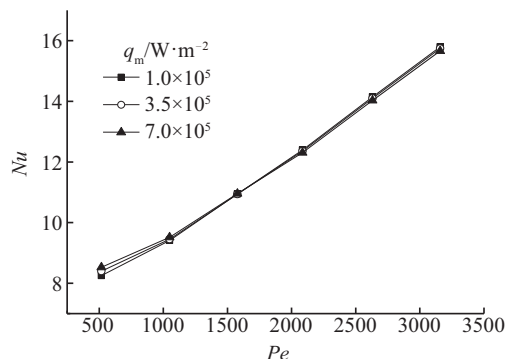


图8 热流密度对传热特性的影响

Fig. 8 Influence of heat flux on heat transfer characteristics

2.3 液态 LBE 与熔盐传热性能对比

为直观地反映液态 LBE 作为传热介质在太阳能光热领域中应用的优势, 这里将液态 LBE 与熔盐 (53% KNO_3 、40% NaNO_2 和 7% NaNO_3 混合物质量分数)^[24] 的传热性能进行对比分析。由于液态 LBE 和熔盐的热物性差异巨大, 仅比较相同雷诺数 Re 下的 Nu 没有实际意义。考虑到集热管内传热介质工作温度对系统效率的重要影响, 这里采用控制入口速度及热流密度改变入口温度的方式对比研究集热管内液态 LBE 和熔盐平均温度与其传热性能的关系。为确保所采用的传热介质物性参数的有效性, 数值模拟中集热管加热面热流密度 $q_w=3.5\times 10^5\text{ W/m}^2$, 液态 LBE 和熔盐的入口速度同为 1 m/s, 入口温度范围分别为 400~900 K 和 450~650 K。对比结果如图 9 所示。从图 9 中可看出液态 LBE 的对流换热系数范围在 9500~11200 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 之间, 且随平均温度升高而增大, 主要原因是液态 LBE 的导热系数随温度的升高而增加, 尽管平均温度升高的同时液态 LBE 的 Pe 减小, 但其对流换热系数逐渐增大; 熔盐的对流换热系数范围在 1500~2650 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 之间, 其随温度的升高先增加后减小, 其中熔盐出口温度在 700 K 附近时对流换热系数达到最大值, 主要受熔盐的导热系数、运动粘度

及比热容随温度变化的综合影响所致。在熔盐的工作温度范围内,液态 LBE 的对流换热系数远高于熔盐,因此相比于熔盐,液态 LBE 作为传热介质应用在太阳能光热领域具有优势。

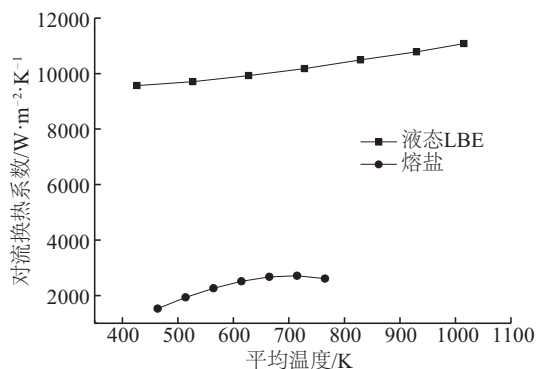


图9 液态LBE和熔盐平均温度与对流换热系数的关系对比

Fig. 9 Comparison of heat transfer coefficients of LBE and molten salt as function of average temperature

3 结 论

采用数值模拟的方法对半周热加热下集热管内液态 LBE 的传热性能进行模拟,并与熔盐的传热性能进行对比,得出以下结论:

1)采用修改 Pr_i 的方法模拟得到的半周加热下集热管内液态 LBE 传热特性结与推荐的均匀热流下液态 LBE 传热性能经验公式相吻合。

2)管内 Nu 随 Pe 的增加而增大, Pe 越高换热效果越好;入口温度和热流密度对 Nu 的影响较小; Nu 及压损随液态 LBE 质量流量的增加而增大;集热管绝热面的 Nu 始终大于加热面。

3)相比于熔盐,液态 LBE 在相同平均温度下具有更高的对流换热系数,有助于提高 CSP 系统的工作温度及系统效率。

致 谢:本工作是在 FDS 团队的帮助下开展的,工作中得到了 FDS 其他成员的帮助,特此感谢。

[参考文献]

[1] Pitz-Paal R, Dersch J, Milow B, et al. Development steps for parabolic trough solar power technologies with maximum impact on cost reduction [J]. Solar Energy Engineering, 2007, 129(4): 371—377

[2] 何梓年. 太阳能热利用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.

[2] He Zinian. Solar thermal utilization [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.

[3] Tao Tao, Zheng Hongfei, He Kaiyan, et al. A new trough solar concentrator and its performance analysis [J]. Solar Energy, 2011, 85(1): 198—207.

[4] Litwin R Z. Receiver system: lesson learned from Solar Two[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, SAND2002-0084, 2002.

[5] Benoit H, Spreafico H, Gauthier D, et al. Review of heat transfer fluids in tube-receiver used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 198—315.

[6] Jeter S. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation [J]. Solar Energy, 1986, 37(5): 335—345.

[7] 常 春, 张强强, 李 鑫. 周向非均匀热流边界条件下太阳能高温吸热管内湍流传热特性研究[J]. 中国机电工程学报, 2012, 32(17): 104—109.

[7] Chang Chun, Zhang Qiangqiang, Li Xin. Turbulent heat transfer characteristics in solar thermal absorber tubes with circumferentially non-uniform heat flux boundary condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 32(17): 104—109.

[8] 杨敏林, 杨晓溪, 丁 静, 等. 半周加热半周绝热的熔盐吸热管传热特性研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(8): 1007—1012.

[8] Yang Minlin, Yang Xiaoxi, Ding Jing, et al. Heat transfer research on molten salt receiver with semi-circumstance heat[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2009, 30(8): 1007—1012.

[9] 沈向阳, 丁 静, 陆建峰. 轴向非均匀热流下熔盐吸热管的传热性能[J]. 当代化工, 2015, 44(8): 1965—1968.

[9] Shen Xiangyang, Ding Jing, Lu Jianfeng. Heat transfer performance of molten salts in receiver tube with axial nonuniform heat flux[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(8), 1965—1968.

[10] 陈德明, 舒 杰, 李戡洪, 等. 用于太阳能热发电的

- 铅-铋合金传热特性分析[J]. 动力工程, 2008, 28(5): 812—815.
- [10] Chen Deming, Shu Jie, Li Jianhong, et al. Analysis on heat transfer characteristics of lead-bismuth eutectic alloy applied in solar thermal power generation[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(5): 812—815.
- [11] Pacio J, Werzel T H. Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems[J]. Solar Energy, 2013, 93: 11—22.
- [12] Pacio J, Fritsch A, Singer C, et al. Liquid metals as efficient coolants for high- intensity point- focus receivers: Implications to the design and performance of next generation CSP systems [J]. Energy Procedia, 2014; 49: 647—655.
- [13] Maroco L, Cammi G, Flesh J, et al. Numerical analysis of a solar tower receiver tube operated with liquid metals [J]. International Journal of Thermal Science, 2016, 105: 22—35
- [14] Frazer D, Stergar E, Cionea D, et al. Liquid metal as heat transfer fluid for thermal solar power applications [J]. Energy Procedia, 2014, 49: 627—636.
- [15] Wu Yican, Bai Yunqing, Song Yong, et al. Development strategy and conceptual design of China Lead-based research reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 87: 511—516.
- [16] Wu Yican. Design and R&D progress of China lead-based reactor for ADS research facility[J]. Engineering, 2016, 2(1): 124—131.
- [17] Wu Y, Chen Z, Hu L, et al. Identification of safety gaps for fusion demonstration reactors [J]. Nature Energy, 2016, 1(12): 16154.
- [18] Fazio C, Sobolev V, Aerts A. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal-hydraulic and technologies (2015 Edition) [R]. Organization for Economic Co- Operation and Development, 2015.
- [19] Chen Fei, Huai Xiulan, Cai Jun, et al. Investigation on the applicability of turbulent-Prandtl-number models for liquid lead-bismuth eutectic [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 257: 128—133.
- [20] Aoki S. A consideration of the heat transfer in liquid metal[J]. Bulletin of Tokyo Institute Technology, 1963, 54: 63—73.
- [21] Reynolds A J. The prediction of turbulence Prandtl and Schmidt numbers[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1975, 18(19): 1055—1069.
- [22] Jischa M, Rieke H B. About the prediction of turbulence Prandtl and Schmidt numbers from transport equations [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1979, 22(11): 1547—1555.
- [23] Cheng Xu, Tak Nam-II. Investigation on turbulent heat transfer to lead-bismuth eutectic flows in circular tubes for nuclear applications[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236: 385—393.
- [24] Siegel N, Bradshaw R, Cordaro J B, et al. Thermophysical property measurement of nitrate salt heat transfer fluids[A]. Proceedings of the ASME 2011 5th international conference on energy sustainability [C]. Washington, DC, USA, 2011.

CONVECTIVE HEAT TRANSFER OF LEAD-BISMUTH EUTECTIC IN A CIRCULAR TUBE WITH HALF CYCLE HEAT FLUX

Wu Minqiang^{1,2}, Zhu Zhiqiang¹, Huang Wangli¹, Bai Yunqing¹

(1. Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A numerical model of convective heat transfer of lead-bismuth eutectic (LBE) in the receiver tube with nonuniform heat flux was built. Fluent software was utilized to investigate the heat transfer property of LBE in the receiver tube with nonuniform heat flux through solving the three dimension N-S equation and energy equation. The simulation results of this study show that modeling of turbulent prandtl number is applicable to calculate the heat transfer of LBE in the receiver tube with nonuniform heat flux. The heat flux of LBE has little influence on Nusselt number (Nu) while the mass flow rate of LBE is of crucial importance in Nu . Furthermore, Nu of adiabatic is higher than that of the heating side. Compared to the molten salt, LBE has advantages in reducing the energy loss of the receiver pipe by virtue of exceptional heat transfer performance.

Keywords: solar energy; parabolic trough collector; semi-circumference heat flux; lead-bismuth eutectic