

熔盐圆管内湍流对流换热实验研究

陈玉爽^{1,2} 田 健¹ 朱海华¹ 傅 远¹ 王纳秀¹

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 本文依托高温熔盐(High Temperature Salt, HTS)热工实验回路开展了硝酸盐(KNO_3 -53%, NaNO_2 -40%, NaNO_3 -7%)熔盐圆管内的强迫对流换热特性研究,通过威尔逊修正法获得了熔盐在圆管内充分发展湍流的对流换热系数,将实验结果与公开文献中的5种熔盐的实验结果合并后拟合,获得 $10\,000 < Re < 50\,000$ 和 $4 < Pr < 26$ 范围下适用于高温熔盐工质的管内充分发展湍流的实验关联式。另外,为验证熔盐的换热特性是否仍然符合经典关联式的换热规律,将不同种类熔盐工质与经典关联式Dittus-Boelter关联式、Sieder-Tate关联式、Hausen关联式以及Gnielinski关联式进行比较分析,实验结果与经典关联式符合得较好,偏差在25%以内。

关键词 熔盐,湍流,强迫对流,对流换热,关联式

中图分类号 TL3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040601

Experimental study on turbulent convective heat transfer of molten salts in circular tubes

CHEN Yushuang^{1,2} TIAN Jian¹ ZHU Haihua¹ FU Yuan¹ WANG Naxiu¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] With advantages of large thermal capacity, good chemical stability, high temperature, molten salt has recently been widely used in concentrated solar thermal power plants, nuclear reactors, chemical engineering, and other fields. [Purpose] This study aims at the convective heat transfer characteristics and verifying the heat transfer laws of molten salt in a circular tube. [Methods] First of all, a thermal experimental loop of Nitrate (KNO_3 -53%, NaNO_2 -40%, NaNO_3 -7%) was built as basic experimental facility. The turbulent convective heat transfer coefficient of molten salt in circular tube for fully developed was obtained by Wilson's correction method. Then the experimental results combining with the experimental data of five kinds of molten salt in the open literature were fitted to get the experimental correlation of molten salt in the range of $10\,000 < Re < 50\,000$ and $4 < Pr < 26$ for the turbulent flow in the round tube. Finally, comparisons of different kinds of molten salt with classical correlation Dittus-Boelter correlation, Sieder-Tate correlation, Hausen correlation and Gnielinski correlation were conducted. [Results] The experimental data of molten salt agree well with the existing known relationship, and the deviation was below 25%. [Conclusion] The results show that the heat transfer characteristics of the molten salts still conform to the classical heat transfer relationship.

Key words Molten salt, Turbulent flow, Forced convection, Convective heat transfer, Correlation

中国科学院战略先导专项(No.XDA02010000)资助

第一作者: 陈玉爽, 女, 1984年出生, 2010年毕业于上海理工大学, 现为博士研究生, 主要研究核反应堆热工水力

通信作者: 田健, E-mail: tianjian@sinap.ac.cn; 王纳秀, E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn

收稿日期: 2019-01-14, 修回日期: 2019-03-04

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02010000)

First author: CHEN Yushuang, female, born in 1984, graduated from University of Shanghai for Science and Technology in 2010, doctoral student, focusing on the thermal hydraulics of nuclear reactor

Corresponding author: TIAN Jian, E-mail: tianjian@sinap.ac.cn; WANG Naxiu, E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn

Received date: 2019-01-14, revised date: 2019-03-04

熔盐作为传热蓄热的工质,具有使用温度范围广、工作压力低、传热性能好及化学性能稳定等特点,被认为是一种理想的高温传热工质,已在太阳能、先进核反应堆、油回收和生物质气化等领域得到了广泛的应用^[1-3]。特别是在核反应堆的应用上熔盐作为一种良好的传热蓄热工质具有很大的潜在利用价值。如美国的橡树岭实验室从20世纪50~70年代实施的熔盐反应堆实验(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)^[4]和熔盐增殖反应堆(Molten Salt Breeder Reactor, MSBR)^[5]项目均以熔盐作为传热工质;最近美国威斯康森大学为支持高温熔盐反应堆(Very High Temperature Reactor, VHTR)的概念计划也相继开展熔盐传热特性研究^[6-7]。

传热学界许多学者对空气、水、乙二醇、油、制冷剂工质的管内对流换热特性进行了大量的实验研究。1959年Hausen^[8]基于Sieder-Tate^[9]的实验数据对经典关联式进行了修正;1976年Gnielinski^[10]基于公开文献的实验数据发展了新的对流换热关联式。而国内外对熔盐工质的对流换热实验研究相对缺乏,美国橡树岭实验室Hoffman等^[11-12]从1952~1960年就一直从事熔盐对流换热特性研究,获得了LiF-NaF-KF和NaO₃-KNO₃-NaNO₂对流换热关联式;荷兰代尔夫特理工大学Vriesema^[13]研究了LiF-NaF-KF熔盐工质给出推荐的对流换热关联式;日本东北大学Chiba等^[14-16]对圆管内高普朗特数的熔盐的传热特性进行了研究,提出了推荐对流换热关联式;北京工业大学Wu等^[17-19]为研究熔盐的传热特性,采用LiNO₃工质对圆管内熔盐对流传热特性进行了实验研究,给出了拟合的对流换热关联式。综合以上各种对流换热关联式,都是针对实验所用熔盐的换热特性进行的总结描述,但这些对流换热关联式是否满足不同种类熔盐工质的换热特性有待进一步研究。本文除了开展三元硝酸盐熔盐圆管的换热特性研究主要对熔盐实验数据进行补充外,不仅对目前国内外可参考到的熔盐实验数据进行了调研,通过拟合得到适用于不同种类熔盐工质的对流换热关联式,而且从影响对流换热的雷诺数和普朗特数两方面将熔盐实验数据与经典传热关联式进行了比较分析。

1 实验装置与实验方法

1.1 实验装置

熔盐热工实验回路系统如图1所示,分为5个子系统:1)熔盐循环系统;2)熔盐制备与贮存系统;3)热工实验(油冷却回路)系统;4)气路系统;5)控制与

安全连锁系统。熔盐循环系统由循环泵、熔盐加热器、热工实验段(套管换热器)、管路和阀门、保温和预热(伴热)设备、温度、流量、液位测量仪表等组成。熔盐由循环泵驱动进入加热器,经加热升温达到熔盐实验设定的温度,然后进入热工实验段的套管换热器,经导热油吸收热量后降温,冷却后的熔盐再进入加热器升温,从而实现熔盐回路的循环。热工实验(油冷却回路)系统由油泵、油加热器、热工实验段、油冷却器、保温设备、温度、流量等测量仪表组成。导热油由油泵驱动进入油加热器,经加热升温达到导热油实验预定入口温度,然后流经热工实验段的套管换热器,经吸收熔盐的热量后再进入油冷却器降温,从而实现导热油回路的循环。

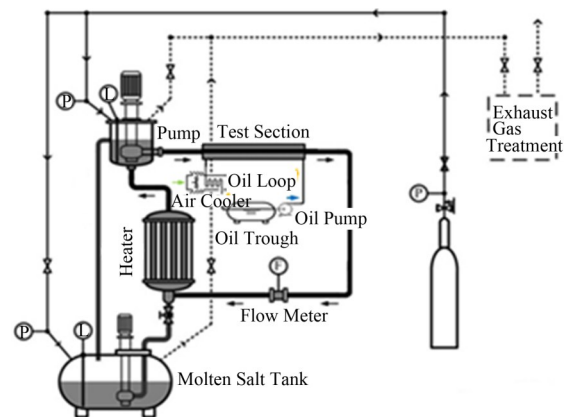


图1 熔盐强迫对流换热实验系统图

Fig.1 Experimental system diagram of forced convection heat transfer with molten salt

热工实验段是一种逆流式的套管换热器,外径为39 mm,内管直径为25 mm,壁厚为2.5 mm,换热实验管长约为1.2 m。本实验热工实验段前端的增强管长约40d,该实验段的总有效长度约为100d,试验结果表明^[20]:湍流时只要 $l/d > 60$,平均表面传热系数不受入口段的影响,因此可以忽略入口段的影响。另外,熔盐与导热油进出口分别布置混合室用来准确测量工质的温度。

1.2 实验方法

传热计算公式如下:

热流密度:

$$q_s = q_{\text{loss}} + q_o = q_{\text{loss}} + \frac{\rho_o C_{po} V (T_{\text{outoil}} - T_{\text{in oil}})}{\pi d L} = \frac{\rho_s C_{ps} V (T_{\text{outsalt}} - T_{\text{insalt}})}{\pi d L} \quad (1)$$

式中: q_s 、 q_o 为熔盐与导热油的热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; q_{loss} 为热流密度损失, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; ρ_s 、 ρ_o 为熔盐和导热油的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_p 为比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; V 为体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; d 为直径,m; L 为试验段管长度,m。

总传热系数：

$$K = \frac{q_s}{\Delta T_m} \quad (2)$$

式中： K 为总传热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ； ΔT_m 为对数平均温差， $^{\circ}\text{C}$ 。

对数平均温差：

$$\begin{aligned} \Delta T_m &= \frac{(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})}{\ln(\Delta T_{\max} / \Delta T_{\min})} \\ &= \frac{(T_{\text{insalt}} - T_{\text{outoil}}) - (T_{\text{outsalt}} - T_{\text{inoil}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{insalt}} - T_{\text{outoil}}}{T_{\text{outsalt}} - T_{\text{inoil}}}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

总传热热阻：

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} + \frac{d_i}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_i}{h_o d_o} \quad (4)$$

式中： h_i 为管内熔盐侧对流换热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ； h_o 为管外油侧对流换热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ； d_i 为内管内径， m ； d_o 为内管外径， m 。

当导热油流量保持不变，且处于湍流状态时，管外放热系数 h_o 即为常量，为了得到管内侧熔盐的 Re 、 Nu 和 Pr 如下形式的关系式，将管内熔盐对流换

热系数 h_i 转化为：

$$Nu_i = C Re_i^n Pr^m \Rightarrow h_i = C \frac{\lambda}{d_i} Re_i^n Pr^m \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)，得：

$$\frac{1}{K} = \frac{d_i}{C\lambda Pr^m} \frac{1}{Re_i^n} + \frac{d_i}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_i}{h_o d_o} \quad (6)$$

式(6)中共有4个未知参数，实验中，将导热油流量固定不变，熔盐的平均温度控制在一定范围内，通过调节熔盐侧流量，就可以得到 j 个如式(7)所示的传热热阻表达式。由于这个方程是非线性的，通过定义一个目标函数，采用最小二乘方法，就可以求得式中的常数。

$$f(c) = r_j^2(c) = \sum_j \left(c_1 Pr_j^{c_2} Re_{ij}^{c_3} + \frac{d_i}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + c_4 - K_j \right)^2 \quad (7)$$

实验达到热平衡后，通过测量熔盐与导热油流量、熔盐和导热油进出口温度及熔盐与导热油之间的换热量，得到套管换热器的总传热系数，最后拟合得到熔盐管内充分发展湍流的实验关联式。本实验的各实验测量范围及误差如表1所示。

表1 实验测量参数及误差分析
Table 1 The measured parameters and uncertainties

实验测量参数 Parameters	参数范围 Ranges	误差分析 Uncertainties
熔盐流速 Velocity of molten salt / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.89~5.08	$\pm 2.0\%$
熔盐入口温度 Inlet temperature of molten salt / $^{\circ}\text{C}$	197.8~302.5	± 0.5
熔盐出口温度 Outlet temperature of molten salt / $^{\circ}\text{C}$	196.0~294.2	± 0.5
油入口温度 Inlet temperature of oil / $^{\circ}\text{C}$	166.6~179.0	± 0.5
油出口温度 Outlet temperature of oil / $^{\circ}\text{C}$	168.1~180.5	± 0.5
总传热系数 Heat transfer coefficient / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1 477.08~2 704.86	2.93%
努赛尔数 Nusselt number	88~68	$\pm 7.81\%$

2 实验结果与讨论

2.1 HTS熔盐湍流传热性能

高温熔盐(High Temperature Salt, HTS)(KNO_3 -53%， NaNO_2 -40%， NaNO_3 -7%)圆管内湍流对流传热特性如图2所示。从图2可看出，HTS熔盐的努赛尔数随雷诺数而增加，当 Re 由 10 776 增加至 47 739 时， $Nu/Pr^{1/3}$ 由 51 增加至 162，且递增规律与 Dittus-Boelter 公式表示的规律相同。但在相同的雷诺数下，HTS 熔盐的实验结果略高于 Dittus-Boelter 公式约 20%，这主要是因为 Dittus-Boelter 公式并未考虑熔盐热物性剧烈变化对传热特性的影响，而主要适用于恒热流密度及温差在 30 K 内的传热工况。

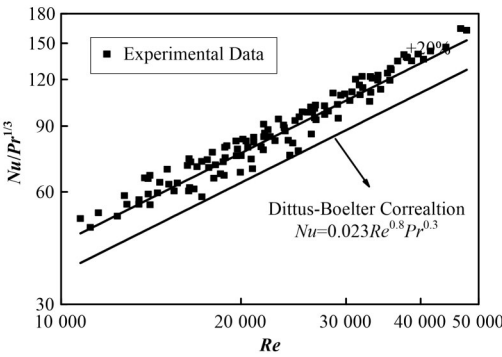


图2 HTS熔盐的湍流对流换热特性
Fig.2 Convective heat transfer characteristics of HTS in the turbulent region

2.2 雷诺数 Re 对充分发展湍流换热性能研究

传统的经典湍流强迫对流传热关联式 Dittus-

Boelter^[21-23]、Hausen^[8]、Gnielinski^[10]和 Sieder-Tate^[9]分别如下所示:

Dittus-Boelter:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$$

当加热流体时, $n=0.4$; 当冷却流体时, $n=0.3$ 。

$10\ 000 < Re < 1\ 200\ 000, 0.7 < Pr < 120, L/d \geq 60$ 。

Sieder-Tate:

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} (\mu_b/\mu_w)^{0.14}$$

$10\ 000 < Re, 0.7 < Pr < 16\ 700, L/d \geq 60$ 。

Hausen:

$$Nu = 0.037 (Re^{0.75} - 180) Pr^{0.42} [1 + (D/L)^{2/3}] (\mu_b/\mu_w)^{0.14}$$

$2\ 300 < Re < 1\ 000\ 000, 0.6 < Pr < 1\ 000$ 。

Gnielinski:

$$Nu = 0.012 (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} [1 + (D/L)^{2/3}] (Pr_b/Pr_w)^{0.11}$$

$2\ 300 < Re < 1\ 000\ 000, 0.6 < Pr < 100\ 000$ 。

将实验获得的 HTS 熔盐充分发展湍流的管内强迫对流换热实验数据 ($11 < Pr < 26, 10\ 000 < Re < 50\ 000$) 与表 2 所示公开文献中的 5 种熔盐 (Hitec、LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄、NaBF₄-NaF、FLiNaK、LiNO₃) 实验结果按照 Dittus-Boelter 关联式的形式拟合得到熔盐充分发展湍流的关联式:

$$Nu = 0.0191 Re^{0.8338} Pr^{1/3}$$

$10\ 000 < Re < 50\ 000, 4 < Pr < 26$ 。

表 2 公开文献中的 5 种熔盐的实验结果
Table 2 Experiment results of five molten salts in the open literature

熔盐种类 Molten salt type	雷诺数范围 Reynolds number	普朗特数范围 Prandtl number
Hitec ^[11-12]	15 349 < Re < 27 578	9.1 < Pr < 11.3
LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄ ^[11-12]	10 171 < Re < 28 499	4.9 < Pr < 9.2
LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄ ^[24]	11 560 < Re < 14 210	6.6 < Pr < 7.3
NaBF ₄ -NaF ^[24]	10 354 < Re < 44 965	4.9 < Pr < 5.6
FLiNaK ^[13]	13 956 < Re < 50 000	4.5 < Pr < 7.9
Lithium Nitrate ^[17-18]	18 182 < Re < 46 130	12.7 < Pr < 14.7

图 3 为拟合公式与公开文献中发表的各种熔盐实验结果比较图。由图 3, 实验结果与拟合公式符合得很好, Hoffman 开展的硝酸盐实验结果以及 Silverman 开展的 LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄ 和 NaBF₄-NaF 实验结果均出现在该图中作为比较, 除 Hoffman 个别的两个点在拟合曲线 $\pm 20\%$ 范围外, 其余各点均在拟合曲线的 $\pm 20\%$ 范围内, 而且拟合曲线中 Re 的指数 0.833 8 清晰地显示了熔融盐的湍流传热特性, 同时也验证了本次实验数据的合理性。

图 4 将国内外公开发表文献中的不同种类熔盐 (Hitec、LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄、NaBF₄-NaF、FLiNaK、

LiNO₃) 实验数据进行了归纳整理并与 HTS 实验数据 (图中黑色实心数据点所示) 进行比较, 验证了实验数据的合理性。同时, 将不同种类熔盐共计 239 个实验数据点分别与 Dittus-Boelter、Sieder-Tate、Hausen 和 Gnielinski 等经典关联式进行了比较, 从图 4 可看出, 实验数据与 Sieder-Tate、Hausen 和 Gnielinski 关联式均符合得较好, 大部分偏差在 $\pm 25\%$ 以内。由此更加验证了经典公式仍可以准确描述熔盐湍流对流换热特征。

2.3 普朗特数 Pr 对充分发展湍流换热性能研究

为了验证普朗特数对熔盐湍流传热特性的影响, 图 5 比较分析了不同种类熔盐 (HTS、LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄、NaBF₄-NaF、FLiNaK、LiNO₃) 的 Nu 与 Pr 的关系。从图 5 中可看出, Nu 随 Pr 而增加。同时与 Hausen 关联式的比较发现, 熔盐递增规律符合普朗特数 0.4 的指数变化规律, 与传统工质的变化规律相同, 且 98.41% 的实验数据偏差均在 $\pm 25\%$ 以内, 由此验证了不同种类熔盐 Pr 对湍流换热特性影响仍然符合经典关联式的换热规律。熔盐实验数据与传热经典关联式的偏差在 25% 以下。

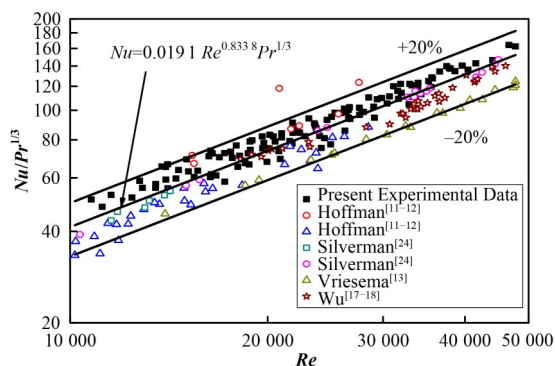


图 3 实验拟合曲线与文献中实验数据比较
Fig.3 Comparison of experimental fitting curve with experimental data in literature

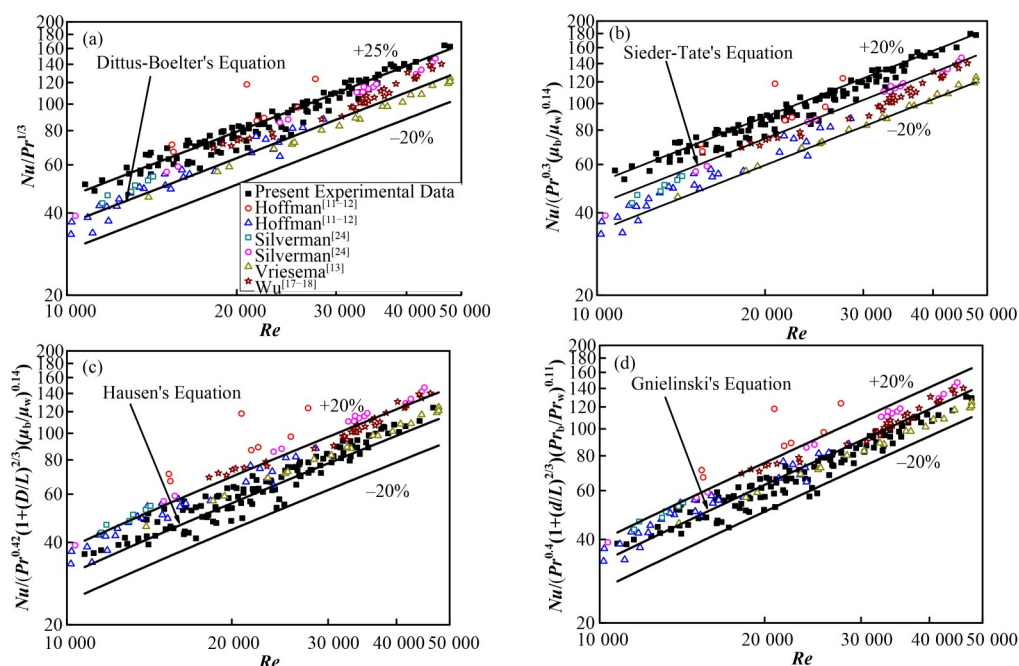


图4 实验数据和文献中实验数据与Dittus-Boelter (a)、Sieder-Tate (b)、Hausen (c)、Gnielinski (d)关联式比较

Fig.4 Comparison of present experimental data, existing data in literature with Dittus-Boelter (a), Sieder-Tate (b), Hausen (c), Gnielinski (d) correlation

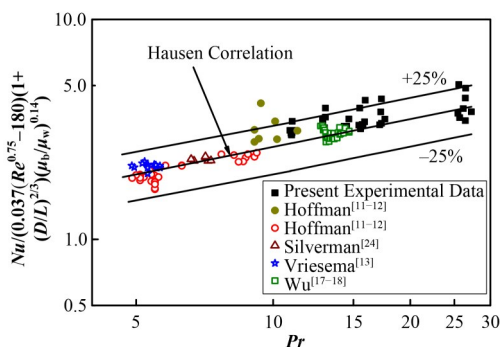


图5 各种熔盐工质充分发展湍流传热与 Pr 的关系曲线

Fig.5 Prandtl number dependence of turbulent convective heat transfer with molten salt in circular tubes

3 结语

本文搭建了 HTS (KNO_3 -53%、 NaNO_2 -40%、 NaNO_3 -7%) 熔盐热工实验回路,开展了 HTS 熔盐圆管内的强迫对流换热特性研究。主要结论如下:

1) 获得了 $10\,000 < Re < 50\,000$ 、 $11 < Pr < 26$ 范围内的 HTS 熔盐圆管内湍流对流换热实验数据。

2) 将 HTS 熔盐实验结果与公开文献中的 5 种熔盐的实验结果进行比较分析,获得 $10\,000 < Re < 500\,000$ 和 $4 < Pr < 26$ 范围内适用于高温熔盐工质的对流换热关联式。

3) 将不同种类熔盐 (HTS、 LiF - BeF_2 - ThF_4 - UF_4 、

NaBF_4 - NaF 、 FLiNaK 、 LiNO_3) 按照 Re 与 Pr 对熔盐湍流传热性能影响分析,一方面,验证了不同种类熔盐的对流换热特性仍然符合经典关联式的换热规律;另一方面,发现它们与传热经典关联式都符合得较好,且偏差在 25% 以下。

参考文献

- 1 Forsberg C W, Peterson P F, Pickard P S. Molten salt cooled advanced high temperature reactor for production of hydrogen and electricity[J]. Nuclear Technology, 2003, 144: 289-302. DOI: 10.13182/NT03-1.
- 2 Williams D F. Assessment of candidate molten salt coolants for the NGNP/NHI heat transfer loop[R]. Oak Ridge National Laboratory, Report No. ORNL/TM-2006/69, 2006: 1-32. DOI: 10.2172/136 0677.
- 3 Davis C B, Barner R B, Sherman S R, et al. Thermal-hydraulic analyses of heat transfer fluid requirements and characteristics for coupling a hydrogen productin plant to a high-temperature nuclear reactor[R]. Idaho National Laboratory, Report No. INL/EXT-05-0045, 2005: 1-77. DOI: 10.2172/910966.
- 4 Hoffman H W, Lones J. Fused salt heat transfer Part II: forced convection heat transfer in circular tubes containing NaF - KF - LiF eutectic[R]. Report No. ORNL-1777, 1955: 2-25. DOI: 10.2172/4016896.

- 5 Cooke J W, Cox B W. Forced-convection heat transfer measurements with a molten fluoride salt mixture flowing in a smooth tube[R]. Report No. ORNL-TM-4079, 1973: 1–22. DOI: 10.2172/4486196.
- 6 Sridharan K, Anderson M, Corradini M, *et al.* Molten salt heat transfer loop: materials corrosion and heat transfer phenomena[R]. Final Report under Nuclear Energy Research Initiative (NERI), Project No.04-154, 2008. DOI: 10.2172/934785.
- 7 Sabharwall P, Ebner M, Sohal M. Molten salts for high temperature reactors-university of wisconsin molten salt corrosion and flow loop experiments-issues identified and path forward[R]. Report No. INL/EXT-10-18090, 2010: 1–33. DOI: 10.2172/980798.
- 8 Hausen H. Neue Gleichungen für die wärmeübertragung bei freier oder erzwungener Stromung (new equations for heat transfer in free or forced flow) [J]. Allgemeine Wärmetechn, 1959, (4/5): 75–79.
- 9 Sieder E N, Tate G E. Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 1936, **28**(12): 1429–1435. DOI: 10.1021/ie50324a027.
- 10 Gnielinski V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow[J]. International Chemical Engineering, 1976, **16**(2): 359 – 368. DOI: 10.1021/i360060a018.
- 11 Hoffman H W, Lones J. Fused salt heat transfer Part II: forced convection heat transfer in circular tubes containing NaF-KF-LiF eutectic[R]. Report No. ORNL-1777, 1955. DOI: 10.2172/4016896.
- 12 Hoffman H W, Cohen S I. Fused salt heat transfer Part III: forced convection heat transfer in circular tubes containing the salt mixture $\text{NaNO}_2\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_3$ [R]. Report No. ORNL-2433, 1960. DOI: 10.2172/4181833.
- 13 Vriesema B. Aspects of molten fluorides as heat transfer agents for power generation[D]. WTHD No. 112, Delft University of Technology, Netherlands, 1979.
- 14 Chiba S, Omae M, Yuki K, *et al.* Experimental research on heat transfer enhancement for high prandtl-number fluid[J]. Fusion Science and Technology, 2005, **47**(3): 569 –573. DOI: 10.13182/FST05 -A746.
- 15 Satoh Tomoaki, Yuki Kazuhisa, Chiba Shin-ya. Heat transfer performance for high prandtl and high temperature molten salt flow in sphere packed pipes[J]. Fusion Science and Technology, 2007, **52**(3): 618 – 624. DOI: 10.13182/FST07-A1557.
- 16 Toda S, Chiba S, Yui K, *et al.* Experimental research on molten salt thermofluid technology using a high-temperature molten salt loop applied for a fusion reactor flibe blanket[J]. Fusion Engineering and Design, 2002, **63–64**: 405–409. DOI: 10.1016/S0920-3796(02)00195-3.
- 17 Wu Y T, Liu B, Ma C F, *et al.* Convective heat transfer in the laminar-turbulent transition region with molten salt in a circular tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, **33**(7): 1128–1132. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2009.07.001.
- 18 Liu B, Wu Y T, Ma C F, *et al.* Turbulent convective heat transfer with molten salt in a circular pipe[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, **36**(9): 912 – 916. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.003.
- 19 Wu Y T, Chen C, Liu B, *et al.* Investigation on forced convective heat transfer of molten salts in circular tubes[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, **39**: 1550 – 1555. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.09.002.
- 20 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4rd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 21 Colburn A P. A method of correlating forced convection heat transfer data and a comparison with fluid friction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1964, **7** (12): 1359–1384. DOI: 10.1016/0017-9310(64)90125-5.
- 22 Sieder E N, Tate G E. Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 1936, **28**(12): 1429 – 1435. DOI: 10.1021/ie50324a027.
- 23 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006.
- 24 Silverman M D, Huntley W R, Robertson H E. Heat transfer measurements in a forced convection loop with two molten-fluoride salts: $\text{LiF-BF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ and eutectic $\text{NaBF}_4\text{-NaF}$ [R]. Report No. ORNL/TM-5335, 1976: 16–21. DOI: 10.2172/7143311.