

# 翅片管熔盐对流传热特性研究

樊奇伟<sup>1,2,3</sup> 朱海华<sup>1</sup> 陈玉爽<sup>1</sup> 王纳秀<sup>1,2</sup> 朱志远<sup>1,2,3</sup>

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

3 (上海科技大学 上海 201210)

**摘要** 高温熔盐在熔盐堆和太阳能等能源领域有广泛的应用前景。为研究熔盐在强化换热管中的强化传热效果,本文基于三元硝酸盐  $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2\text{-NaNO}_3$  (摩尔分数比为 53%-40%-7%) 与导热油的对流传热实验装置,根据相似理论使用导热油代替熔盐,对翅片换热管湍流区的对流传热特性开展了测量,流体雷诺数( $Re$ )变化范围 10 000–60 000。通过威尔逊分离法获得翅片管中湍流区的对流传热系数( $h_o$ )和努赛尔数( $Nu$ ),基于实验数据与 Dittus-Boelter 公式,拟合翅片管湍流区的对流传热关联式,实验数据与拟合公式的误差在-7.1%–7.5%之间。与传统对流传热关联式 Dittus-Boelter 公式对比进行强化传热效果评估,结果表明,翅片管的强化传热效果为光滑管的 2.32–3.63 倍。

**关键词** 对流传热, 湍流, 翅片管

中图分类号 TK124

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.070602

## Heat transfer characteristics of molten salt in finned tube

FAN Qiwei<sup>1,2,3</sup> ZHU Haihua<sup>1</sup> CHEN Yushuang<sup>1</sup> WANG Naxiu<sup>1,2</sup> ZHU Zhiyuan<sup>1,2,3</sup>

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

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

3(ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

**Abstract Background:** High-temperature molten salt has been considered as medium for heat transfer in molten salt reactors and energy storage in solar power due to its excellent thermal physical properties. **Purpose:** This study aims at the heat transfer characteristics of molten salt and the enhanced heat transfer effect in finned tube. **Methods:** Based on the convective heat transfer experimental apparatus of  $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2\text{-NaNO}_3$  (53%-40%-7%) molten salt and heat transfer oil, the heat transfer characteristics of turbulent region in finned tube was studied. The convective heat transfer characteristics of molten salt in finned tube were analyzed on the basis of experimental data, and a new correlation was proposed by the least squares fitting method. Furthermore, the effect of enhanced heat transfer of finned tube was discussed based on above analysis. **Results and Conclusion:** The error between the experimental data and the fitting formular is in the range of -7.1% and 7.5%. The Dittus-Boelter convective heat transfer correlation is used to evaluate the effect of heat transfer, and it shows that the enhanced convective heat transfer effect of the finned tube is 2.32–3.63 times of that of smooth tube.

**Key words** Heat transfer, Turbulent region, Finned tube

中国科学院战略性先导科技专项(No.XD02040100)资助

第一作者: 樊奇伟, 男, 1992 年出生, 2014 年毕业于哈尔滨工程大学, 现为硕士研究生, 研究方向为反应堆热工水力

通信作者: 朱志远, E-mail: zhuzhiyuan@sinap.ac.cn

收稿日期: 2017-04-23, 修回日期: 2017-05-02

Supported by Strategic Pilot Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences (No. XD02040100)

First author: FAN Qiwei, male, born in 1992, graduated from Harbin Engineering University in 2014, master student, focusing on nuclear reactor thermal-hydraulic

Corresponding author: ZHU Zhiyuan, E-mail: zhuzhiyuan@sinap.ac.cn

Received date: 2017-04-23, accepted date: 2017-05-02

熔盐作为高品质传热蓄热的工质, 具有使用温度范围广、工作压力低、热转化效率高及化学性能稳定等特点, 已成功应用于太阳能发电<sup>[1-2]</sup>和核能工程<sup>[3-4]</sup>等各种高温工程中。在工程系统中熔盐换热器是不可缺少的工艺设备。因此研究熔盐介质的强化换热技术对熔盐换热器的设计和改进有指导意义。

美国橡树岭国家实验室的 Hoffman 和他的团队<sup>[5-6]</sup>研究了混合熔盐 LiF-NaF-KF 和 NaNO<sub>2</sub>-KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub> 通过具有均匀热通量的光滑管的对流传热, 并给出了混合熔盐对流传热系数。Silverman 等<sup>[7]</sup>通过实验手段对 LiF-BaF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> 和 NaBF<sub>4</sub>-NaF 在光滑圆管内强制对流传热进行了研究, 结果表明, 对于充分发展的湍流在雷诺数( $Re$ )>15 000 时, 实验数据与 Sieder-Tate 对流传热关联式具有良好的一致性, 并在实验数据和 Sieder-Tate 对流传热关联式的基础上获得了 LiF-BaF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> 和 NaBF<sub>4</sub>-NaF 对流换热关联式。吴玉庭等<sup>[8-10]</sup>进行了熔融盐与导热油对流传热实验, 并建立了熔盐在光滑管内层流、过渡流以及湍流区域的对流传热关联式。Allman 等<sup>[11]</sup>采用异型管和内插管强化熔盐的传热, 并将应用到太阳能的蒸汽发生器中, 以提高太阳能的热电转换效率。文玉良等<sup>[12-14]</sup>针对横纹管和螺旋槽管内的湍流和过渡流熔盐对流传热进行了研究, 并建立起对流传热关联式。Chen 等<sup>[15]</sup>通过实验对熔盐在具有不同结构参数的横纹管中的传热和阻力特性进行了研究, 建立横纹管内对流传热和阻力的无量纲准则关联式, 并对横纹管的强化传热效果进行了评估。

本文利用中国科学院钍基熔盐堆核能系统研制的三元硝酸盐 KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>2</sub>-NaNO<sub>3</sub> (摩尔分数比为 53%-40%-7%) 热工实验回路 (简称 HTS) 与导热油的对流传热实验装置, 对翅片换热管湍流区的对流传热特性进行了测量, 研究翅片管的强化传热并评估强化传热的效果, 给出翅片管侧湍流区的对流传热计算关联式。

## 1 实验装置

HTS 熔盐热工实验回路是一个完整的预热、加热、循环、散热功能的熔盐系统, 如图 1 所示。系统由熔盐循环回路和油循环回路组成<sup>[16]</sup>, 主要包括熔盐罐、泵、加热器、实验段、导热油油箱、导热油泵、空气冷却器、管道和气体系统等设备。HTS 回路和部件都用保温层包裹以降低系统到周围环境的漏热损失。在熔盐循环回路中通过调整熔盐泵的频率改变熔盐的流量; 通过设置目标温度系统自动控制调节熔盐的温度。在导热油回路中, 主要通过导热油泵变化频率调节导热油的流量; 通过油箱和空气冷却器调节导热油的温度。表 1 列出实验中回路主要参数及调节范围。在一个工况中, 首先设置目标温度调整熔盐进入套管换热器的温度; 然后通过控制熔盐泵和导热油泵的频率, 改变熔盐和导热油在换热管内的流速; 最后通过调节油箱和空气冷却器将导热油的温度稳定在目标温度, 工况稳定后, 采集记录实验数据。

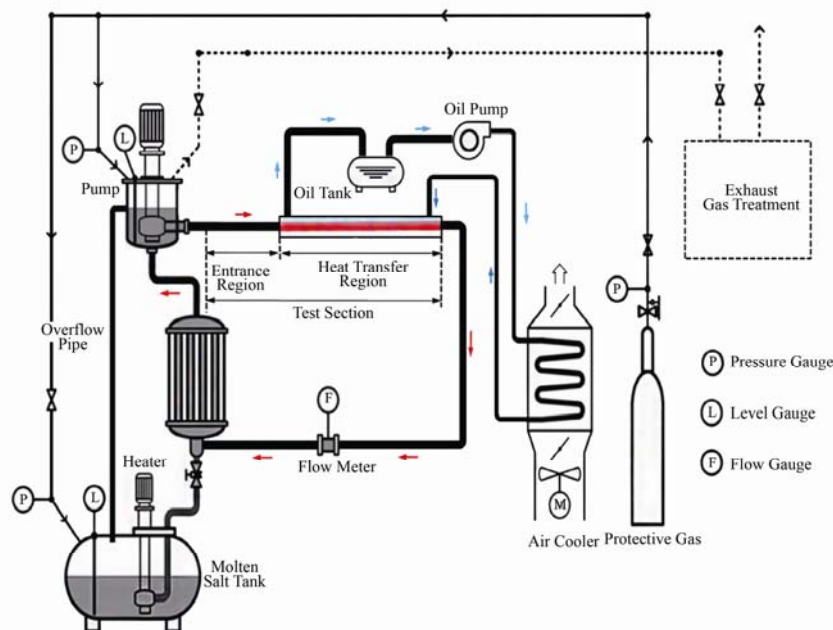


图 1 HTS 熔盐实验回路图  
Fig.1 Schematic diagram of HTS loop.

表 1 回路主要参数  
Table 1 Main parameters of the loop.

回路主要参数 Main parameters of the loop	调节范围 Range
HTS 熔盐流量 The flow rate of HTS molten salt / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.21–6.54
导热油流量 The flow rate of heat transfer oil / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	5.00–12.96
HTS 熔盐加热器温度 The temperature of HTS molten salt heater / K	473–673
导热油箱温度 The temperature of heat transfer oil tank / K	273–473
空气冷却器频率 The frequency of the air cooler / Hz	0–50

实验对象为套管式换热器（图 2），实验段水平放置在实验装置中，其中内管为翅片管，高温 HTS 熔盐在内管中流动，低温导热油将在外侧流动。实验段管长  $L=1\ 000\ \text{mm}$ ，翅片管基管内径  $d_i=20\ \text{mm}$ ，翅片管基管外径  $d=27\ \text{mm}$ ，翅片管的翅高  $H=15\ \text{mm}$ ，外套管的内径  $Z=70\ \text{mm}$ 。入口区域的长度  $L_e=700\ \text{mm}$ ，约为翅片管基管内径的 25 倍，其目的是在进入传热区域之前，使熔盐的流动充分发展。如图 2 所示，实验中需要测量的物理量主要有熔盐进出实验段的温度为  $T_{s,i}$ 、 $T_{s,o}$ ；导热油进出实验段的温度为  $T_{o,i}$ 、 $T_{o,o}$ ；熔盐的体积流量为  $V_s$ ；导热油的体积流量为  $V_o$ 。翅片管以及翅片管的参数如图 3 所示。

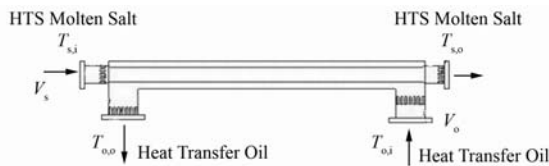


图 2 实验段示意图  
Fig.2 Schematic diagram for heat transfer region of test section.

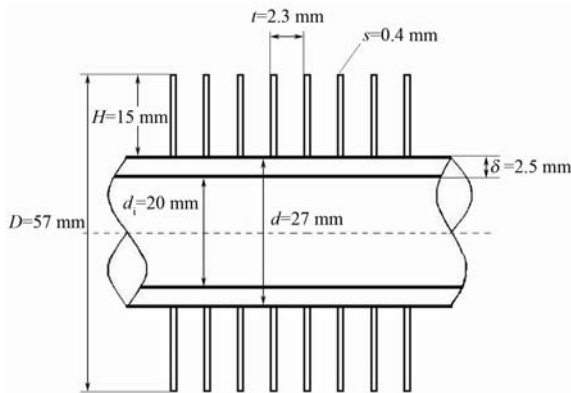


图 3 翅片管的示意图  
Fig.3 Schematic of the finned tube.

## 2 实验原理与方法

### 2.1 实验原理

实验主要研究湍流区的对流传热特性，无论是导热油还是熔盐在翅片管中流动，都属于同类现象，并且单值性条件相似。在对流传热实验研究时， $Re$  和普朗特数( $Pr$ )是已定的特征数，实验中通过调节流速使导热油与熔盐在翅片管中  $Re$  相同。根据导热油物性参数、FLiNaK 熔盐物性参数和 FLiBe 熔盐物性参数<sup>[17]</sup>计算得到导热油、FLiNaK 熔盐和 FLiBe 熔盐的  $Pr$  与温度的关系，如图 4 所示。导热油 418 K 的  $Pr$  (30)与 FLiNaK 熔盐 753 K 的  $Pr$  (30)和 FLiBe 熔盐 793 K 的  $Pr$  (30)相同。综上所述，根据相似原理<sup>[18]</sup>，使用导热油代替熔盐，开展熔盐的对流传热实验。

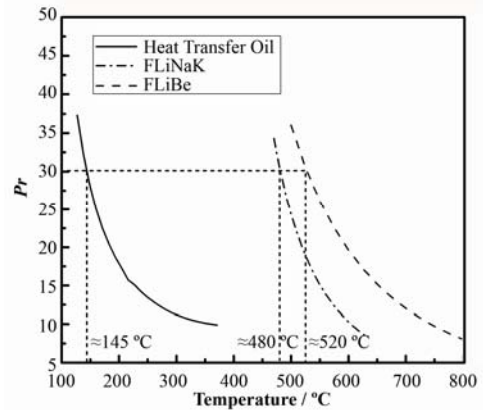


图 4 普朗特数与温度的关系  
Fig.4  $Pr$  as function of temperature.

实验中采集数据的主要依据是热平衡原理，即管内熔融盐放出的热量与外管导热油获得的热量基本相等时采集数据。判断两侧流体换热达到热平衡的根据就是通过数据采集系统监视流体进出换热器温度，当换热管两侧流体进出口温差基本保持恒定时就可判断此时已经达到热平衡。

在实验中，通过控制 HTS 熔盐加热器的功率，改变 HTS 熔盐进入换热器的温度，HTS 熔盐进入换热器温度从 498 K 到 548 K，HTS 熔盐的流速保持恒定值为  $(5.28 \pm 0.20)\ \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。实验中研究导热油湍流区的对流传热特性，导热油进入换热器的温度设定为 418 K，导热油的流量由导热油泵控制，调整频率的大小改变导热油的体积流量从  $5.26\ \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  到  $12.96\ \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。实验中熔盐和导热油的物性参数使用平均温度计算。

## 2.2 数据处理方法

### 2.2.1 基本换热过程

根据实验中熔盐进出口温度、熔盐的流量、导热油进出口温度以及导热油的流量计算得到传热量:

$$Q_s = m_s c_{ps} \Delta T_s = \rho_s V_s c_{ps} (T_{s,i} - T_{s,o}) \quad (1)$$

$$Q_o = m_o c_{po} \Delta T_o = \rho_o V_o c_{po} (T_{o,o} - T_{o,i}) \quad (2)$$

$$Q_s = Q_{\text{loss}} + Q_o \quad (3)$$

$$Q_{\text{loss}} = Q_c + Q_r$$

$$= h_{co} A (T_w - T_a) + C_0 \left[ \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \quad (4)$$

式中:  $Q_s$  为熔盐失去的热量;  $Q_o$  为导热油获得的热量;  $Q_{\text{loss}}$  为实验损失的热量;  $Q_c$  为对流损失热量;  $Q_r$  为辐射损失热量;  $C_0$  代表黑体辐射系数。

与熔盐失去的热量和导热油获得的热量相比, 实验损失的热量很小, 可忽略不计。则实验中换热量为:

$$Q = \frac{(Q_s + Q_o)}{2} \quad (5)$$

根据传热量与逆流布置的对数平均温度计算得到总传热系数  $K$  为:

$$K = \frac{Q}{A_i \Delta T_m} \quad (6)$$

式中:  $Q$  为总传热量;  $A_i$  为内表面的面积;  $\Delta T_m$  为对数平均温度。对数平均温度的计算公式为:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{\text{min}}}{\ln(\Delta T_{\text{max}} / \Delta T_{\text{min}})} \quad (7)$$

通过翅片管式换热管的传热过程:

$$\begin{cases} Q = h_s A_i (T_{fi} - T_{wi}) \\ Q = \frac{\lambda}{\delta} A_1 (T_{wi} - T_{wo}) \\ Q = h_o A_1 (T_{wo} - T_{fo}) + h_o \eta_f A_2 (T_{wo} - T_{fo}) \\ = h_o \eta_o A_o (T_{wo} - T_{fo}) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\eta_o = (A_1 + \eta_f A_2) / A_o$ 。式(9)中消去  $T_{wi}$  和  $T_{wo}$ :

$$Q = \frac{T_{fi} - T_{fo}}{\frac{1}{h_s A_i} + \frac{\delta}{\lambda A_1} + \frac{1}{h_o \eta_o A_o}} \quad (9)$$

总传热系数为:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_s} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{A_i}{h_o \eta_o A_o} \quad (10)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_s} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_o \beta \eta_o} \quad (11)$$

式中:  $\beta = A_o / A_i$ , 为肋化系数, 即加肋后的总外表面积与内表面积之比;  $h_s$  为管内熔盐侧的对流传热系数;  $h_o$  为管外导热油侧的对流传热系数;  $\lambda$  为基管金属导热系数;  $\delta$  为基管壁厚;  $\eta_f$  为翅片效率;  $\eta_o$  为翅片壁面总效率;  $A_o$  为基管外表面传热面积;  $A_1$  为基管外无翅片部分传热面积;  $A_2$  为基管外翅片部分表面传热面积。

实验中没有测量管壁温度, 无法直接获得对流传热系数。采用威尔逊分离法<sup>[19]</sup>, 通过总传热系数确定换热管表面的对流传热系数。在研究导热油在翅片管外的对流传热系数时, 在同一温度工况下, 管内熔盐的流速不变, 使得  $h_s$  不变, 根据威尔逊分离法,  $h_o$  正比于导热油流速  $v_o$  的  $n$  次幂, 即:

$$h_o = C v_o^n \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 为:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{C} \left( \frac{1}{v_o} \right)^n + B \quad (13)$$

式中:  $B$ 、 $n$  和  $C$  为常数, 通过实验数据  $1/K$  和  $1/v_o$  幂函数拟合得到。因此, 通过威尔逊分离法可以计算  $h_o$  和  $Nu$ , 并进一步评估  $Nu$ 、 $Re$  和  $Pr$  之间的关系。

### 2.2.2 不确定性分析

实验中采用 PT100 热电偶测量熔盐与导热油的温度, 测温范围在 273–673 K, 测量精度为  $\pm 0.5\%$ ; 使用超声波流量计测量熔盐的流量, 测量范围是  $0-10.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 测量精度为  $\pm 1\%$ ; 使用耐高温的涡街流量计测量导热油的流量, 测量范围是  $0-15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 测量精度为  $\pm 2\%$ 。

实验结果受各种来源误差的影响, 例如测量技术、实验设施的限制、仪器的准确度和环境变化等。不确定性分析过程中忽略物性参数所带来的误差。因此基于熔盐和导热油温度的不确定性以及流量的不确定性, 可以间接获得其它参数的不确定性<sup>[20]</sup>。详细的不确定性见表 2。

表 2 实验测量参数和不确定性  
Table 2 Measured parameters and uncertainties.

参数 Parameters	值和范围 Values and range	不确定性 Uncertainty / %
HTS 熔盐入口温度 The inlet temperature of HTS molten salt / K	498.50–550.30	±0.68
HTS 熔盐出口温度 The outlet temperature of HTS molten salt / K	497.00–548.22	±0.68
导热油入口温度 The inlet temperature of heat transfer oil / K	416.16–421.31	±0.81
导热油出口温度 The outlet temperature of heat transfer oil / K	424.25–432.20	±0.80
HTS 熔盐流量 The flow rate of HTS molten salt / m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	5.08–5.48	±1.97
导热油流量 The flow rate of heat transfer oil / m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	5.26–12.96	±5.70
导热油侧对流传热系数 Heat transfer coefficient of heat transfer oil / W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>	1 410.04–3 534.20	±6.36
导热油的雷诺数 Reynolds number of heat transfer oil	12 154.45–57 535.38	±7.65
导热油的努赛尔数 Nusselt number of heat transfer oil	550.77–1 380.82	±8.09

### 3 结果与讨论

#### 3.1 翅片管湍流区的基本传热特性

$h_o$ 、 $Q$  与  $v_o$  的关系如图 5 所示。在相同温度下， $h_o$  和  $Q$  随着  $v_o$  而增加， $v_o$  从 0.48 m·s<sup>-1</sup> 到 2.14 m·s<sup>-1</sup>， $h_o$  从 1 410.04 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup> 增长到 3 534.20 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>， $Q$  从 9 101.07 W 增长到 45 616.96 W。

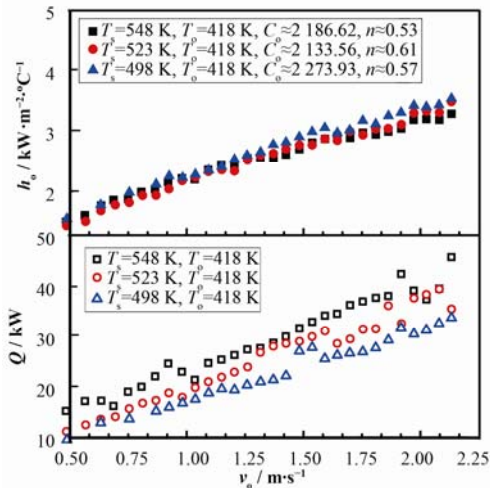


图 5  $h_o$ 、 $Q$  随  $v_o$  的变化  
Fig.5 Variations of  $h_o$  and  $Q$  vs.  $v_o$ .

为了研究翅片管的强化传热，将导热油的  $Nu$  与  $Re$  的关系与 Dittus-Boelter 公式进行对比，如图 6 所示。实验数据表明导热油的  $Nu$  随着  $Re$  的增加具有明显的增加， $Re$  从 12 154.45 到 57 535.38， $Nu$  从 550.77 增加到 1 380.82。实验数据与光管 Dittus-Boelter 公式进行对比结果表明，导热油的  $Nu$  远大于  $Nu_{D-B}$ ，在  $Re \approx 30 000$  时，实验点的  $Nu$  约为 Dittus-Boelter 公式的 2.9 倍，因此翅片管具有良好的强化换热效果。

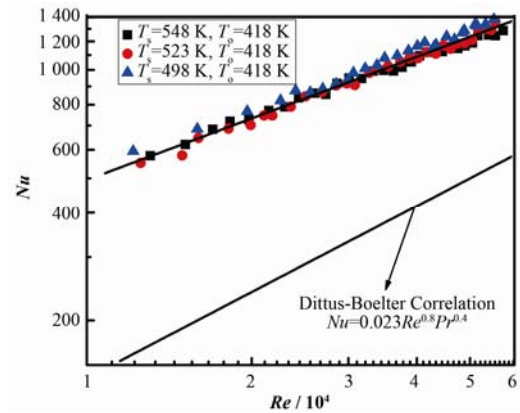


图 6 在湍流区导热油的  $Nu-Re$  实验值  
Fig.6 Convective heat transfer experimental data of heat transfer oil in the turbulent region.

#### 3.2 翅片管湍流对流传热关联式

导热油在翅片管外侧被加热，根据传统对流传热关联式，取  $Pr$  的指数为 0.4。在实验数据和传统对流传热关联式的基础上，利用最小二乘法拟合翅片管侧的湍流的对流传热关联式：

$$Nu = 0.69 Re^{0.57} Pr^{0.4} \quad (10\ 000 \leq Re < 60\ 000) \quad (14)$$

图 7 为实验数据点与拟合对流传热关联式的关系图，从图 7 中可以看出，拟合后对流传热关联式和实验数据点有良好的一致性，其中对流传热关联式与实验数据的相对误差分别为 +7.5% 与 -7.1%。

#### 3.3 翅片管的强化换热效果

翅片管是在换热面上添加几何尺寸较大的翅片结构，其强化传热的机理分为两个方面：一是增加翅片，增加对流传热的换热面积；二是翅片的凸起破坏壁面附近的边界层。通过与传统对流传热关系式 Dittus-Boelter 公式对比，利用  $Nu/Nu_{D-B}$  的比值评估翅片管强化换热的效果。图 8 为各实验工况下，导热油的  $Nu/Nu_{D-B}$  随  $Re$  的变化关系。从图 8 可以

看出,随着导热油  $Re$  从 12 154.45 增加到 57 535.38,  $Nu/Nu_{D-B}$  的比值从 3.63 降低到 2.32, 其主要原因为翅片管的翅片效率<sup>[21]</sup>:

$$\eta_f = \frac{th(mH')}{mH'} \quad (15)$$

式中:  $mH'$  为无因次肋高;  $H'$  为当量翅高。

$$H' = H(1 + 0.35 \ln \phi) \quad (16)$$

式中:  $H$  为翅片高度;  $\phi = D/d$ ,  $D$  和  $d$  分别为翅片管外径和翅片管基管外径;  $m$  的定义为:

$$m = \sqrt{\frac{2h_o}{\lambda s}} \quad (17)$$

式中:  $s$  是翅片厚度。根据式(15), 翅片管的翅片效率随着  $h_o$  增大而降低。所以实验随着  $Re$  的增大,  $h_o$  增大, 但翅片效率反而降低。由此可见, 翅片管在低  $Re$  下的强化效果高于在高  $Re$  的强化效果。

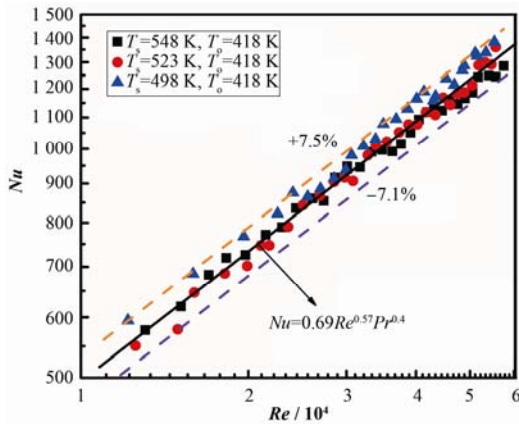


图 7 翅片管对流传热关联式  
Fig.7 Correlated correlation between  $Nu$  and  $Re$  for finned tube.

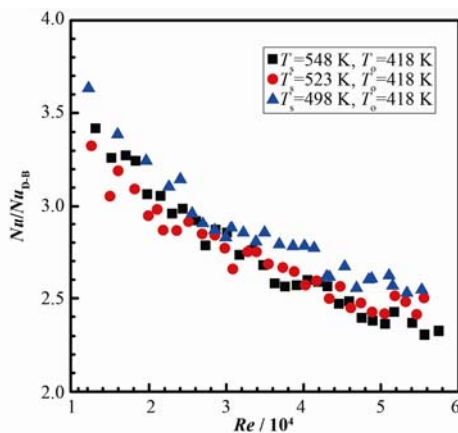


图 8 翅片管强化传热  
Fig.8 Evaluation of the enhanced effect in finned tube.

## 4 结语

利用 HTS 熔盐与导热油的对流传热实验, 根据相似原理, 采用导热油替代熔盐研究了流体在翅片换热管湍流区的对流传热特性, 利用威尔逊分离法得到导热油在翅片管翅片侧的  $Nu$ , 进一步拟合得到翅片侧湍流区的对流传热关联式。在实验数据和 Dittus-Boelter 对流传热关联式的基础上, 采用  $Nu/Nu_{D-B}$  的方法评估强化传热, 结果表明在本实验中翅片管有 2.32–3.63 倍的强化传热效果。

## 参考文献

- 1 Wu Y T, Liu S W, Xiong Y X, *et al.* Experimental study on the heat transfer characteristics of a low melting point salt in a parabolic trough solar collector system[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, **89**: 748–754. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.054.
- 2 Bellan S, Alam T E, Gonzalez-Aguilar J, *et al.* Numerical and experimental studies on heat transfer characteristics of thermal energy storage system packed with molten salt PCM capsules[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, **90**: 970–979. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.07.056.
- 3 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能——TMSR核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016. JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
- 4 Cheng M S, Dai Z M. Development of a three dimension multi-physics code for molten salt fast reactor[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(1): 010601. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.010601.
- 5 Hoffman H W, Lones J. Fused salt heat transfer Part II: forced convection heat transfer in circular tubes containing NaF-KF-LiF eutectic[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, No.ORNL-1777, 1955.
- 6 Hoffman H W, Cohen S I. Fused salt heat transfer Part III: forced convection heat transfer in circular tubes containing the salt mixture NaNO<sub>2</sub>-KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub>[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, No.ORNL-2433, 1960.
- 7 Silverman M D, Huntley W R, Robertson H E. Heat transfer measurements in a forced convection loop with two molten-fluoride salts: LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> and eutectic NaBF<sub>4</sub>-NaF[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, No.ORNL-TM-5335, 1976.

- 8 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**: 912–916. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.003.
- 9 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**: 1128–1132. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2009.07.001.
- 10 Chen Y S, Wang Y, Zhang J H, *et al.* Convective heat transfer characteristics in the turbulent region of molten salt in concentric tube[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **98**: 213–219. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.023.
- 11 Allman W A, Smith D C, Kakarala C R. The design and testing of molten salt steam generator for solar application[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1988, **110**(1): 38–44. DOI: 10.1115/1.3268235.
- 12 文玉良, 丁静, 杨晓西, 等. 高温熔盐横纹管传热特性与强化机理研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, **31**(1): 113–115.  
WEN Yuliang, DING Jing, YANG Xiaoxi, *et al.* Heat transfer characteristic and enhanced mechanism of high-temperature molten salt transverse corrugated tube[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, **31**(1): 113–115.
- 13 沈向阳, 丁静, 陆建峰, 等. 高温熔盐在螺旋槽管内传热特性的试验研究[J]. *石油机械*, 2010, **38**(3): 5–8.  
SHEN Xiangyang, DING Jing, LU Jianfeng, *et al.* Heat transfer characteristic of high-temperature molten salt in spiral groove tube[J]. *Petroleum Machinery*, 2010, **38**(3): 5–8.
- 14 Lu J F, Sheng X Y, Ding J, *et al.* Transition and turbulent convective heat transfer of molten salt in spirally grooved tube[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, **47**: 180–185. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.01.014.
- 15 Chen C, Wu Y T, Wang S T, *et al.* Experimental investigation on enhanced heat transfer in transversally corrugated tube with molten salt[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, **47**: 108–116. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.01.006.
- 16 Chen Y S, Zhu H H, Tian J, *et al.* Convective heat transfer characteristics in the laminar and transition region of molten salt in concentric tube[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **117**: 682–688. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.070.
- 17 Williams D F, Toth L M, Clarno K T. Assessment of candidate molten salt coolants for the advanced high-temperature reactor (AHTR)[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2006.
- 18 戴锅生. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 114–116.  
DAI Guosheng. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 114–116.
- 19 Rose J W. Heat-transfer coefficients, Wilson plots and accuracy of thermal measurements[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, **28**: 77–86. DOI: 10.1016/S0894-1777(03)00025-6.
- 20 Kannadasan N, Ramanathan K, Suresh S. Comparison of heat transfer and pressure drop in horizontal and vertical helically coiled heat exchanger with CuO/water based nano fluids[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, **42**: 64–70. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.03.031.
- 21 刘训海, 张华. 工程计算中关于翅片效率的一个问题[J]. *制冷与空调*, 2008, **8**(2): 25–28. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8402.2008.02.005.  
LIU Xunhai, ZHANG Hua. A problem of fin efficiency in engineering calculation[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2008, **8**(2): 25–28. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8402.2008.02.005.