

引用格式:黎昊为,左夏华,张岱凌,等. 内置转子圆管管内沸腾强化传热数值模拟研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 63–69.

LI HaoWei, ZUO XiaHua, ZHANG DaiLing, et al. Numerical simulation of the boiling heat transfer performance of a circular tube with inserted rotors[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2022, 49(3): 63–69.

# 内置转子圆管管内沸腾强化传热数值模拟研究

黎昊为 左夏华 张岱凌 温馨 阎华 杨卫民\*

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 利用 Fluent 软件中欧拉多相流模型下的 Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) 沸腾模型对内置单元组合转子换热管和光管在过冷沸腾工况下的传热过程进行数值模拟, 得到换热管内汽相分布、速度场、努赛尔数以及进出口压降等参数, 并通过综合评价因子 (PEC) 对内置转子换热管的综合传热性能进行评价。结果表明: 加装了组合转子后, 管内流体由单一的轴向运动变为复杂的螺旋运动; 在入口流速  $0.1 \sim 0.5 \text{ m/s}$  的模拟范围内, 随着入口流速的减小, 内置螺旋三叶片转子换热管的汽相体积分数比光管提高  $2.7\% \sim 25.8\%$ , 努赛尔数提高了约  $8.1\% \sim 10.79\%$ ; 在不同入口流速下螺旋三叶片转子和低流阻转子的 PEC 值均大于 1, 内置低流阻转子换热管的汽相体积分数比光管提高  $1.13\% \sim 13\%$ , 努赛尔数提高约  $3.6\% \sim 8\%$ 。螺旋三叶片转子和低流阻转子均具有强化传热效果, 且螺旋三叶片转子的强化传热效果要优于低流阻转子。

**关键词:** 组合转子; 过冷沸腾; 强化传热; 汽相体积分数

**中图分类号:** TK172 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2022.03.009

## 引言

蒸发器作为换热器的一种, 广泛应用于石油、化工和核电等工业领域。针对蒸发器的强化传热开展结构及其机理的研究对提高能源利用效率、降低投资成本具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。

换热管用于两种介质的热量交换, 是蒸发器的主要组成部件。根据强化传热方式的不同, 可以将强化传热技术分为异型管强化法和内插件强化法<sup>[2]</sup>, 研究人员对这两种技术在沸腾传热过程中的表现进行了研究。党高健等<sup>[3]</sup>以煤油和水为工质, 对不同流速下波纹管和光管的沸腾传热性能进行实验研究, 发现当工质为煤油时波纹管的管内沸腾传热系数是光管的  $2 \sim 4$  倍, 当工质为水时, 波纹管的管内沸腾强化传热系数是光管的  $7 \sim 14$  倍。李豪<sup>[4]</sup>通过数值模拟的方法研究了波节管的沸腾传热性能, 结果表明波节管在沸腾过程中的表面换热系数

明显高于光管, 并且其沸腾恶化点相较于光管滞后。刘萍等<sup>[5]</sup>发现在光管内插入纽带后, 其管内沸腾传热系数比光管提高了  $6\% \sim 90\%$ 。牛志愿<sup>[6]</sup>采用在管内插入金属丝网管的方式进行了管内水流动沸腾的可视化研究, 结果表明金属丝网管可提高部分流型的局部传热系数, 最大强化沸腾传热系数可提高 3 倍以上。总体上来看, 异型管强化法相较于内插件强化法具有适应性强、压降损失小等优势, 但是其内表面污垢难以清理, 加工难度较大。内插件强化法虽然会导致压降的增加, 但是具有成本低、易安装、可在线清洁等优势<sup>[2]</sup>, 更适用于蒸发器内沸腾工况下易结垢的环境。

组合转子是一种内插件式强化传热技术, 相较于螺旋纽带, 其强化传热性能与阻垢性能有明显提升<sup>[7-8]</sup>。本课题组已通过实验和数值模拟的方式, 对内置单元组合转子换热管的综合传热性能及阻垢特性进行了一系列研究<sup>[9-13]</sup>。但是以往的研究尚未涉及到管内沸腾相变的工况。换热器管管内沸腾是指管中液体在流经换热管管壁时, 与管壁产生热交换从而发生的沸腾现象, 沸腾过程中产生的气泡无法自由上浮, 而是与管中的液体发生混合, 随着加

收稿日期: 2021-08-27

第一作者: 男, 1997 年生, 硕士生

\* 通信联系人

E-mail: yangwm@mail.buct.edu.cn

热过程的进行,其流动形式以及换热模式也会发生一定的变化<sup>[14-15]</sup>。与无相变的对流换热相比,沸腾伴随着潜热的吸收,两者的换热系数有较大差别。本文通过 Fluent 中的 Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) 沸腾模型对内置组合转子换热管的管内沸腾传热进行模拟,主要探究了不同流速下内置螺旋三叶片转子以及低流阻转子管内的汽相体积分数以及传热性能,以期为进一步的研究工作乃至工业应用提供借鉴。

## 1 数值计算

### 1.1 物理模型的建立

内置组合转子换热管结构如图 1 所示。转子通过转轴串起并用挂件固定于换热管两端,数个转子通过限位件的方式被分成不同的组,转子在管内水流的冲击作用下转动并悬浮于管中,转子的旋转带动周围流体做螺旋运动,加剧了管内介质的湍流程度,大大减薄边界层,在强化传热的同时具有在线除垢的功能。

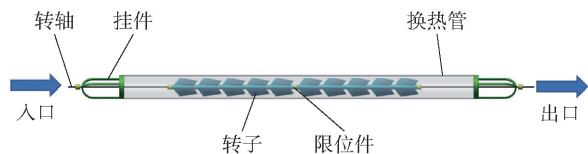


图 1 内置转子换热管结构示意图

Fig. 1 Structure of the circular tube with inserted rotors

利用 Solidworks 软件建立内置转子换热管模型,由于限位件、挂件、转轴对管内流动与传热的影响较小,为简化计算过程,在所用模型中予以删除,并忽略换热管壁厚。选取 5 个转子组成为转子串,转子外径为 17 mm,导程为 200 mm,换热管管长为 200 mm,内径为 19 mm,模型如图 2 所示。采取相同方法建立内置低流阻转子换热管模型,低流阻转子结构如图 3 所示,转子外径为 10 mm。采用四面体网格对模型进行划分,以进出口压降来考核网格的独立性,网格独立性检验结果如图 4 所示,综合考虑精度与计算时间,分别选取 1 133 018 和 1 410 812 作为内置螺旋三叶片转子换热管模型和内置低流阻转子换热管模型的网格数。

### 1.2 计算模型的选择

由于管内的沸腾过程涉及液态水向水蒸汽的相变过程,是典型的两相流动,所以需选用多相流模型。本文选取欧拉多相流模型中的 RPI 沸腾模型,同时选用 Ishii 模型来模拟沸腾状态下两相间的相



图 2 内置组合转子换热管模型

Fig. 2 Model of the circular tube with inserted rotors

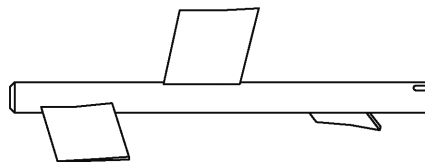


图 3 低流阻转子结构示意图

Fig. 3 Structure of the low flow resistance rotor

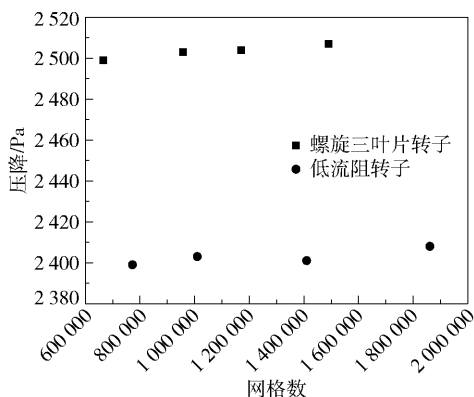


图 4 网格独立性检验结果

Fig. 4 Grid independence test results

互作用<sup>[16]</sup>。RPI 模型将加热面传递给流动介质的热通量  $q_w$  分成了 3 个部分,分别为液相对流传热通量  $q_c$ 、蒸发传热通量  $q_E$  和气泡脱离处由于液体冲击壁面引起的激冷传热  $q_Q$ ,关系式如下。

$$q_w = q_c + q_Q + q_E \quad (1)$$

$$q_c = h_c (T_w - T_1) A_1 \quad (2)$$

$$q_E = \pi d_w^3 N_w \rho_v i_{fg} f / 6 \quad (3)$$

$$q_Q = \frac{2k_1}{\sqrt{\pi \lambda_1 t}} (T_w - T_1) \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{t} = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_v)}{3\rho_l d_w}} \quad (5)$$

式中,  $h_c$  为单相对流传热系数,  $T_w$  为换热管壁面温度,  $T_1$  为液体温度,  $k_1$  为液相导热系数,  $t$  为气泡等

待的时间周期,  $f$  为气泡脱离频率,  $\lambda_1$  为扩散系数,  $d_w$  为根据关系式计算得出的气泡脱离直径,  $N_w$  为气化核心密度,  $\rho_v$  为气体密度,  $i_{fg}$  为产生蒸汽的汽化潜热,  $A_1$  为壁面上液相所占面积分数,  $A_2$  为壁面上汽相所占的面积分数, 二者关系为

$$A_1 = 1 - A_2 \quad (6)$$

$$A_2 = \min \left( 1, \frac{N_w D_w^2 \pi}{4} \right) \quad (7)$$

其中  $D_w$  为管壁直径。

湍流模型选用对瞬变流和流线弯曲影响预测能力较好的重整化群(renormalization group, RNG)  $k-\varepsilon$  模型, 并选择标准壁面方程。

### 1.3 边界条件的设置

本文模拟过程的边界条件如下。

1) 入口边界采用速度进口条件, 进口速度分别取 0.1、0.2、0.3、0.4 m/s 和 0.5 m/s, 入口流体全部为水, 流体温度为 370.15 K, 蒸发温度为 373.15 K。

2) 出口设置为压力出口边界条件。

3) 壁面采用恒壁温加热条件, 设置温度为 378.15 K。

4) 设置重力方向沿管轴线向下, 即管子竖直放置, 流体由下端进入, 向上流动。

### 1.4 求解器的设置

本文选用压力基求解器, 压力速度耦合采用 Coupled 算法, 对湍流动能的离散格式采用一阶迎风差分格式, 动量以及湍流耗散率方程的离散格式采用二阶迎风差分格式, 体积分数方程采用 Quick 格式。管中汽相体积分数不再变化, 且连续性方程、动量方程和能量方程的残差分别达到  $10^{-4}$ 、 $10^{-6}$ 、 $10^{-6}$  时即认为收敛。

## 2 结果与讨论

### 2.1 入口速度对汽相体积分数的影响

内置单元转子换热管和光管在不同入口流速下的汽相体积分数对比如图 5 所示。由图 5 可知, 无论是光管还是强化管, 其管中汽相体积分数都随入口流速的增大而减小, 这是由于随着入口处冷流体流速的增加, 冷流体与换热管壁的换热时间减少, 无法得到充分的加热并沸腾, 导致管中的汽相体积分数减小。此外, 不同入口流速下内置单元转子换热管中的汽相体积分数均大于光管的汽相体积分数; 在入口流速为 0.1~0.5 m/s 范围内, 随着流速的降低, 内置螺旋三叶片转子换热管内汽相体积分数较

光管增大 2.7%~25.8%, 内置低流阻转子换热管内汽相体积分数较光管增大 1.13%~13%, 说明加装单元组合转子后换热管的沸腾效果有所提升。

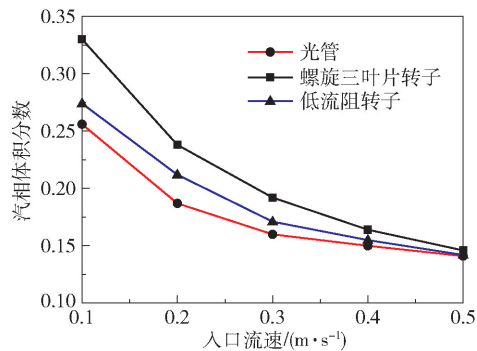


图5 汽相体积分数随入口流速变化的关系曲线

Fig. 5 Variation in vapor volume fraction with inlet velocity

### 2.2 不同位置处汽相体积分数的对比

图 6 给出了在入口流速为 0.3 m/s 时汽相体积分数沿轴线距入口处位置的变化情况。可以看出, 随着流体与管壁换热过程的进行, 管中流体的温度逐渐升高, 3 种管的汽相体积分数沿轴线方向呈递增的趋势。对于加装单元组合转子的换热管, 在入口段过渡区的汽相体积分数与光管的差别较小, 但在 0.04 m 之后, 流体抵达组合转子的作用区, 内置螺旋三叶片转子换热管内的汽相体积分数相对于光管有 11%~27.8% 的提升, 内置低流阻转子换热管内的汽相体积分数相对于光管提高约 5.1%~13.2%。

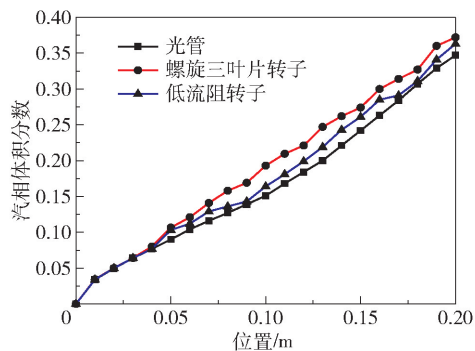


图6 汽相体积分数随轴向位置的变化曲线

Fig. 6 Variation in vapor volume fraction with position

### 2.3 典型截面分析

图 7 给出了入口流速为 0.3 m/s 时 3 种管在同一位置截面处的汽相体积分数分布云图。在加装螺旋三叶片转子后, 管壁处生成的换热系数较小的蒸汽在旋流扰动下脱离壁面, 并被转子裹挟至管中心区域, 壁面附近的换热系数较大的液态水得以更充



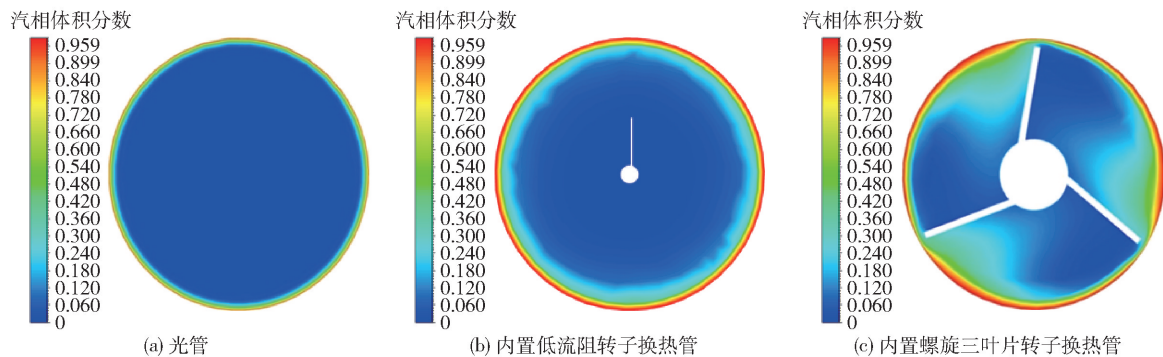


图 7 3 种管的汽相体积分数分布云图

Fig. 7 Distribution contours of the vapor phase volume fraction for three kinds of tubes

分地与壁面进行热交换,极大地促进了沸腾过程的进行。低流阻转子由于叶片尺寸较小,作用范围小,其对蒸汽的裹挟作用不及螺旋三叶片转子明显,但相较于光管还是可以很明显地看出在管壁附近汽相分布更加均匀。

图 8 所示为 3 种管沿管长方向纵向截面的汽相体积分数分布云图。水自下而上以一定过冷度进入换热管。可以看出,水在内置转子换热管中起始沸腾点的出现位置均先于光管,内置转子换热管的起始沸腾点约在第一个转子的作用区附近;且相较于低流阻转子,螺旋三叶片转子的扰动作用更加剧烈,其沸腾起始点的出现位置更早。从整体来看,可以发现加装转子后管中蒸汽的分布更均匀,水汽混合更加充分,由此可以说明沸腾工况下,组合转子对于汽液两相流的传质有提升作用。

图 9 所示为 3 种管在同一截面处流场的速度云图。可以看出在加装了转子后,靠近叶片处流场的流速有了极大的提升,形成较强的旋流,旋流的产生对速度边界层造成破坏,从而增强了流体与壁面间的换热。

图 10 为内置螺旋三叶片转子换热管与光管的

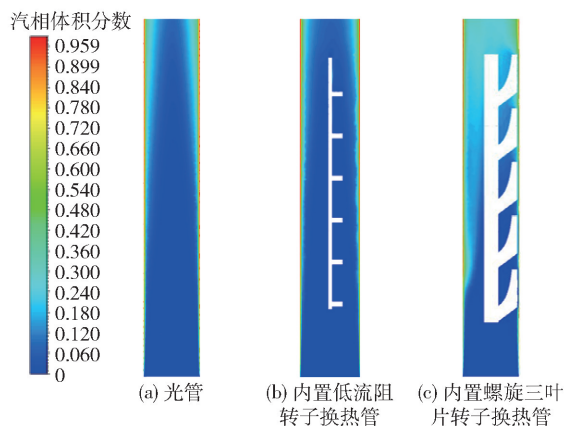


图 8 3 种管沿管长方向纵向截面的汽相体积分数云图

Fig. 8 Contours of the vapor phase volume fraction for three kinds of tubes (longitudinal section along the pipe length)

流场流线图。通过对比可以看出,流体在进入加装转子的换热管后,很快便开始了螺旋运动,流体既具有径向速度也具有轴向速度,在径向流和轴向流的共同作用下,冷热流体得到了充分的热交换,加速了对流换热。从光管的流线图可以看出,其内部仅有轴向流,难以对边界层造成扰动。

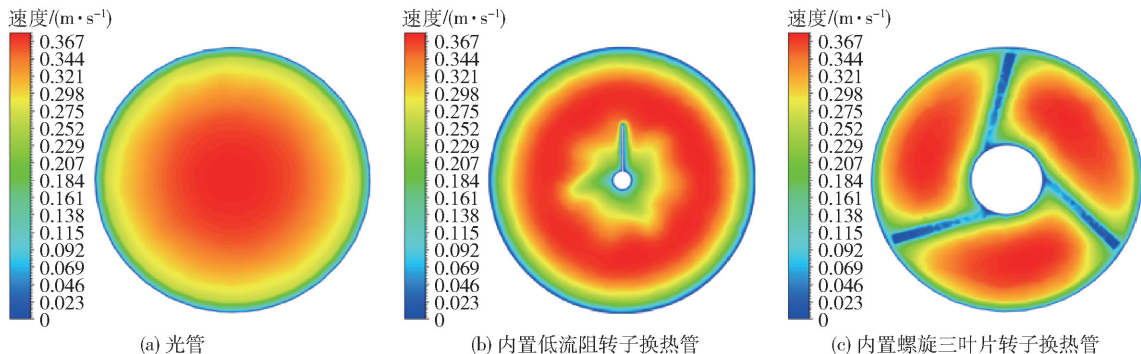


图 9 3 种管流场速度云图

Fig. 9 Contours of the velocity field for three kinds of tubes

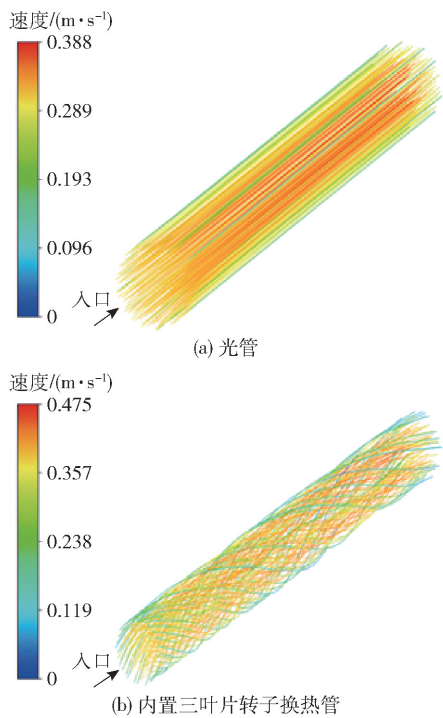


图 10 两种管的流场流线图

Fig. 10 Flow field streamline diagrams for two kinds of tubes

2.4 强化传热综合性能评价

图 11 是内置单元组合转子换热管和光管在不同入口流速条件下的努赛尔数  $Nu$  的变化情况对比。由图可见,在不同的入口流速下,内置螺旋三叶片转子换热管的  $Nu$  明显高于光管,提高幅度约在 8.1% ~ 10.79%,内置低流阻转子换热管相较于光管其  $Nu$  提高约 3.6% ~ 8%,说明单元组合转子对传热有一定的强化作用。这是由于内置单元组合转子后,管中的流体在转子叶片的作用下被甩向壁面,破坏了边界层,湍流程度大大提高,加剧了中心部位的流体与换热管壁的热交换<sup>[17]</sup>,从而提升了传热效率。

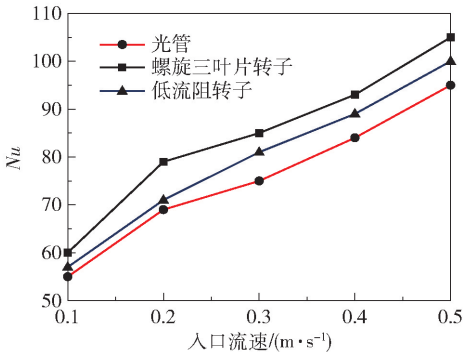


图 11 3 种管的  $Nu$  对比曲线

Fig. 11 Comparison of  $Nu$  for three kinds of tubes

比。由图可见,内置单元组合转子换热管和光管的进出口压降均随着入口流速的增大而提高,且内置螺旋三叶片转子换热管的压降要远远高于光管压降;内置低流阻转子换热管的压降低于内置螺旋三叶片转子换热管,并且两种强化管内的压降上升更快。这是由于转子的旋转带动周围的流体形成二次流,令边界层附近流速较低的流体与中心处的流体混合,增大了摩擦阻力所做的耗散功,同时流通面积的减小也会使得阻力增大<sup>[18]</sup>。

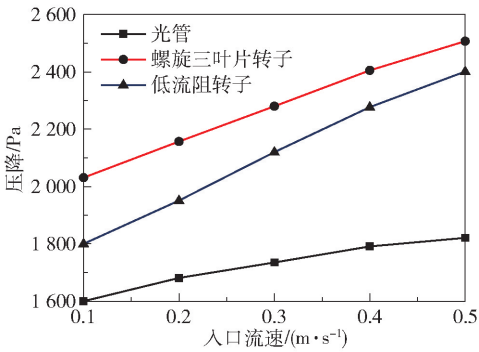


图 12 3 种管的压降对比曲线

Fig. 12 Comparison of pressure drops for three kinds of tubes

综上所述,内置单元组合转子后,在换热管传热能力增大的同时,也增大了进出口压降,引入了更大的流动阻力,因此以综合评价因子  $F(PEC)$  为指标对换热管的传热效果及节能效果进行衡量<sup>[19]</sup>

$$F = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)}$$

式中,  $Nu$ 、 $f$  分别表示内置单元组合转子换热管的努塞尔数和阻力系数,  $Nu_0$ 、 $f_0$  分别表示光管的努塞尔数和阻力系数。两种内置单元组合转子换热管的  $PEC$  结果如图 13 所示。

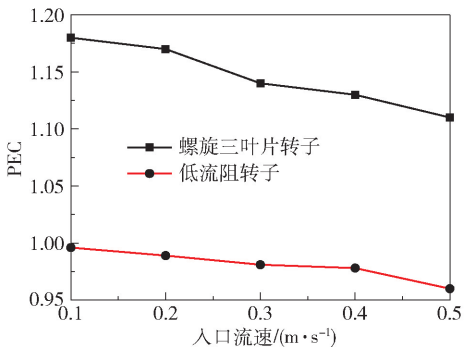


图 13 内置单元组合转子换热管的综合评价因子

Fig. 13 PEC of tube with inserted rotors

图 12 是 3 种管在不同流速下的进出口压降对

由图可知,在模拟范围内内置螺旋三叶片转子

换热管的 PEC 值均大于 1, 内置低流阻转子换热管的 PEC 值均小于 1, 因此综合比较而言, 螺旋三叶片转子的强化传热性能更优。

### 3 结论

(1) 本文模拟范围内, 内置螺旋三叶片转子换热管、内置低流阻转子换热管相较于光管在过冷沸腾工况下, 其管内汽相体积分数分别提高了约 2.7% ~ 25.8% 和 1.13% ~ 13%, 在入口流速为 0.3 m/s 时, 沿管轴线处的汽相体积分数有 11% ~ 27.8% 和 5.1% ~ 13.2% 的提升。对几种换热管典型截面的汽相分布云图进行分析后发现, 在内置单元组合转子后, 汽液两相流的传质效果有明显提升。

(2) 内置转子后, 换热管管内流体的流动方式发生了明显的变化, 由简单的轴向流动转变为复杂的螺旋运动, 使边界层得到了充分扰动。

(3) 两种强化管的努塞尔数相较于光管均有一定的提高, 其中内置螺旋三叶片转子换热管的努塞尔数大于内置低流阻转子换热管; 此外, 加装转子会引入更大的阻力, 低流阻转子带来的阻力要低于螺旋三叶片转子。通过综合评价因子对两种强化管的换热性能进行衡量, 发现在模拟范围内内置螺旋三叶片转子换热管的 PEC 值均大于 1, 内置低流阻转子换热管的 PEC 值均小于 1, 因此螺旋三叶片转子的强化传热性能更优。

### 参考文献:

- [1] 徐鹏, 肖延勇. 壳管式换热器强化传热技术研究进展[J]. 机电设备, 2020, 37(4): 72-76.  
XU P, XIAO Y Y. Research progress on heat transfer enhancement technology of shell and tube heat exchanger[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2020, 37(4): 72-76. (in Chinese)
- [2] 曹洸, 杨辉, 杨卧龙, 等. 蒸发器管内沸腾传热强化方法研究进展[J]. 现代化工, 2021, 41(2): 55-60.  
CAO S, YANG H, YANG W L, et al. Research progress on enhancement methods for in-tube boiling heat transfer in evaporator[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(2): 55-60. (in Chinese)
- [3] 党高健, 罗毓珊, 陈听宽, 等. 波纹管强化管内沸腾传热的试验研究[J]. 化学工程, 2008, 36(8): 13-16.  
DANG G J, LUO Y S, CHEN T K, et al. Enhancement of boiling heat transfer in corrugated tubes[J]. Chemical Engineering(China), 2008, 36(8): 13-16. (in Chinese)
- [4] 李豪. 基于有机朗肯循环余热回收系统的换热器结构数值研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
LI H. Numerical study of heat exchanger structure based on organic Rankine cycle of waste heat recovery system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015. (in Chinese)
- [5] 刘萍, 丁文龙, 靳海波. 非均匀加热条件下内插扭带管强化传热模拟分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2021, 41(2): 167-173.  
LIU P, DING W L, JIN H B. Simulation analysis of enhanced heat transfer of tube with twisted tape inserts under non-uniform heating[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2021, 41(2): 167-173. (in Chinese)
- [6] 牛志愿. 采用流型调控原理强化水平管内沸腾传热的实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
NIU Z Y. Experimental investigations on heat transfer enhancement of flow boiling inside a horizontal tube based on flow pattern modulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014. (in Chinese)
- [7] 何长江, 关昌峰, 张震, 等. 不同位置转子组对组合转子强化传热性能影响[J]. 化学工程, 2015, 43(5): 30-34.  
HE C J, GUAN C F, ZHANG Z, et al. Effect of different location rotors on heat transfer enhancement performance of assembled rotors[J]. Chemical Engineering(China), 2015, 43(5): 30-34. (in Chinese)
- [8] 范永钊, 关昌峰, 阎华, 等. 管内换热元件基于数值模拟与实验对比的研究[J]. 节能, 2011(3): 30-33.  
FAN Y Z, GUAN C F, YAN H, et al. Comparing heat exchanger components in a tube based on numerical simulation and experimental study[J]. Energy Conservation, 2011(3): 30-33. (in Chinese)
- [9] 刘鑫, 阎华, 关昌峰, 等. 组合转子阻垢特性的实验研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 76-80.  
LIU X, YAN H, GUAN C F, et al. Experimental study of the anti-fouling characteristics of assembled rotors[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2017, 44(3): 76-80. (in Chinese)
- [10] 刘鑫. 组合转子抑垢性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.  
LIU X. Study on the anti-fouling characteristics of assembled rotors[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 何立臣. 组合转子强化管内传热传质及混合特性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.  
HE L C. Research on the enhancement performance of

- heat and mass transfer and mixing in circular tube with assembled rotors [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] 何长江, 关昌峰, 张震, 等. 内置左右旋螺旋叶片转子换热管强化传热实验[J]. 石油化工, 2014, 43(12): 1410–1414.
- HE C J, GUAN C F, ZHANG Z, et al. Experimental study on heat transfer enhancement performance of the tube insertead with left-right helical blade rotors[J]. Petrochemical Technology, 2014, 43(12): 1410–1414. (in Chinese)
- [13] 张震. 组合转子强化传热机理及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- ZHANG Z. Research on heat transfer enhancement mechanism and performance of assembled rotors[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] 张承虎, 魏继宏, 王欣, 等. 定壁温条件下竖直管内沸腾传热特性研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(4): 625–632.
- ZHANG C H, WEI J H, WANG X, et al. Study on heat transfer characteristics of vertical tube boiling under constant wall temperature[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(4): 625–632. (in Chinese)
- [15] 沈月芬, 邹峥, 曹子栋, 等. 分离式热管蒸发段流动特性的研究[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(5): 117–121.
- SHEN Y F, ZOU Z, CAO Z D, et al. Investigation of flow characteristics of separate type heat pipe vaporization section[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(5): 117–121. (in Chinese)
- [16] 刘长海, 杨博, 张莹光. 再沸器单根换热管外围壳程流场沸腾传热的数值模拟[J]. 化工机械, 2020, 47(2): 187–191, 235.
- LIU C H, YANG B, ZHANG Y G. Numerical simulation of flow field boiling heat transfer in the shell side of single heat exchanger tube of reboiler[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2020, 47(2): 187–191, 235. (in Chinese)
- [17] 蒋晨, 丁玉梅, 张震, 等. 内置组合转子换热管综合传热性能的数值模拟研究[J]. 机械设计与制造, 2013(12): 164–167.
- JIANG C, DING Y M, ZHANG Z, et al. Numerical simulation research of the comprehensive heat transfer performance of tubes with rotor assembly inserts[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(12): 164–167. (in Chinese)
- [18] 邢程, 孟继安, 李志信. 螺旋转子的结构参数对管内换热影响的数值研究[J]. 化工学报, 2009, 60(12): 2969–2974.
- XING C, MENG J A, LI Z X. Numerical study on influence of structural parameters of spiral rotor internal insert on heat transfer[J]. CIESC Journal, 2009, 60(12): 2969–2974. (in Chinese)
- [19] WEBB R L. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24(4): 715–726.

## Numerical simulation of the boiling heat transfer performance of a circular tube with inserted rotors

LI HaoWei ZUO XiaHua ZHANG DaiLing WEN Xin YAN Hua YANG WeiMin\*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A Rensselaer Polytechnic Institute(RPI) boiling model based on Euler multiphase flow model in Fluent software has been established to simulate the boiling heat transfer processes in a circular tube with inserted rotors and a plain tube. Parameters such as vapor volume fraction,  $Nu$  number, inlet and outlet pressure drop were obtained. Performance evaluation criteria(PEC) were introduced to evaluate the comprehensive heat transfer performance of the tube with inserted rotors. The simulations show that in the range of inlet velocity from 0.1 m/s to 0.5 m/s, as the inlet velocity decreases, the vapor volume fraction of the circular tube with inserted rotors increases by 2.7%–25.8% compared with the plain tube. The  $Nu$  number was 8.1%–10.79% higher than for the plain tube and the PEC was greater than one, which indicates that insertion of the rotors affords an enhanced heat transfer performance.

**Key words:** assembled rotors; subcooled boiling; enhancement of heat transfer; vapor volume fraction

(责任编辑: 吴万玲)