

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.016

不同微肋表面横管外降膜吸收过程中传热特性分析

王 天, 谷雅秀, 赵润青, 屈长杰

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 在溴化锂吸收式制冷系统中, 吸收器的换热性能在很大程度上影响着整个机组的制冷性能, 故研究如何提高吸收器的性能很有必要。本文在理论分析光滑横管外降膜吸收传热特性的基础上, 对管外缠绕不同丝径金属丝网的强化管进行理论分析与数值模拟。研究表明: 随着周向角的增加, 换热管表面液膜厚度先减小后增大, 热边界层厚度逐渐增大, 局部传热系数逐渐减小; 光滑横管外包敷金属丝网后, 吸收器的换热性能大大提高, 但丝径过小或过大都会影响换热效果; 当强化管丝径为 0.2mm 时, 最有利于吸收器换热。

关键词: 吸收式制冷; 降膜吸收; 强化管; 数值模拟

中图分类号: TB651⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)03-0343-06

Analysis of heat transfer properties in falling-film absorption process of different micro fin surfaces out horizontal tubes

WANG Tian, GU Yaxiu, ZHAO Runqing, QU Changjie

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In the Lithium Bromide (LiBr) absorption refrigeration system, the heat transfer performance of the absorber largely influences the heat transfer performance of the entire refrigeration system, so it is necessary to explore how to improve the absorption effect of the absorber. Based on the analysis of heat transfer properties in falling-film absorption outside the smooth tubes, the theoretical analysis and numerical simulation are carried out about the heat transfer enhanced tubes wrapped with a stainless-steel wire-mesh screen to hold up more liquid film in this paper. The research results show that with an increase of the radius angle, the liquid film thickness decreases first and then increases with the thermal boundary layer thickness increasing and the local heat transfer coefficient decreasing. The measurement of wrapping the horizontal tube with a wire-mesh screen can enhance the heat and mass transfer performance in absorber. But if the wire diameter is too big or too small, it will have a bad influence on the heat and mass transfer performance. When the wire diameter is equaling to 0.2mm, the heat transfer performance and the absorption effect are the best.

Key words: absorption refrigeration; falling film absorption; heat transfer enhanced tube; numerical simulation

溴化锂吸收式制冷系统由蒸发器、冷凝器、吸收器、发生器、节流装置等组成^[1]。吸收器是最重要的部件之一。因为液膜有流量小且传热效率高的优点, 故大多数吸收器的设计都借鉴化学工业中气体吸收设计经验——采用降膜吸收形式, 其中以喷

淋管束式为主^[2]。目前, 吸收器传热传质大多采用卧式降膜, 管内冷却的横管外降膜吸收被广泛地应用于吸收式制冷系统的吸收器中。降膜吸收过程的传热效率直接影响着吸收器的换热效率乃至整个制冷机组的制冷性能。故研究如何提高降膜吸收过程

收稿日期: 2015-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106014)

作者简介: 王天, 女, 硕士生, 研究方向为吸收式制冷系统传热传质性能研究及其优化。E-mail: 495442001@qq.com

通讯作者: 谷雅秀, 女, 副教授, 博士, 研究方向为暖通空调与制冷系统中的强化传热传质。E-mail: guyx2007@chd.edu.cn

中的传热效率很有必要。

近年来,国内外学者们针对溴化锂水溶液的降膜吸收过程建立了各种模型。与此同时,随着计算机技术的日益发展,降膜吸收的(CFD)方法被越来越多的应用于研究中。Sutalo等^[3]针对沿着倾斜板降膜流动的非牛顿流体进行了CFD分析,并将有关液膜厚度的分析与实验结果相对比,且二者良好吻合。Yoshida等^[4]对Moran等^[5]的实验进行了三维CFD模拟,得到了降膜表面波形态与液膜厚度概率密度分布。于意奇等^[6]对降膜流动分别进行了二维与三维CFD模拟,得出三维模拟可以更准确的描述液膜厚度与速度分布,但三维CFD低估了降膜的波动幅度。

综上,国内外学者的研究大多集中在光滑横管的降膜吸收过程上,对于强化管的降膜吸收研究较少。董冲^[7]提出一种新的方法建立低肋斜槽管的管外降膜吸收数学模型,通过理论计算得出了速度与温度与浓度分布的解,并讨论了肋片高度与肋片倾角对传热传质性能的影响。冀洋锋^[8]探求了水平螺旋槽管在降膜吸收中的强化传热传质机理,建立了与之相对应的数学模型,求解了液膜厚度等数值解,并分析了不同参数对于传热传质性能的影响。胡德福^[9]将锯齿形翅片管应用于吸收器中,并进行了实验研究,认为该强化管的传热性能远远高于光管。

本文提出一种在光滑横管外缠绕金属网管的强化换热管模型,并分析其不同丝径下的传热特性。通过这种增强表面粗糙度的方式,加大降膜吸收过程中的横管管外的持液率,延长溶液在管外的停留时间,从而强化传热,大幅提高吸收器效率。

1 光滑横管外降膜传热特性理论分析

溴化锂横管外降膜吸收过程的传热特性与液膜厚度 δ 、热边界层厚度 δ_t 有很大关联。流动边界层和热边界层的状况决定了边界层内的温度分布和热量传递过程^[10]。将降膜吸收过程的数学模型进行适当简化后,可以推导出降膜吸收过程的控制微分方程组:

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho_1 u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_1 v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \rho_1 g(x) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

能量方程:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3)$$

组分方程:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (4)$$

忽略压力、惯性对动量的影响且忽略横向速度 v ,则式(2)可以简化为:

$$\rho_1 g \sin\theta + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

假设管壁上液膜流速为0,液膜表面的相界面处无剪切作用力,则当 $y=0$ 时, $u=0$;当 $y=\delta$ 时,

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

将式(6)带入式(5)中,得:

$$u = \frac{g\rho_1}{2\mu} \sin\theta (2\delta y - y^2) \quad (7)$$

沿管外任意 x 处,通过单位宽度的液体质量流量为:

$$\Gamma_1 = \int \rho_1 u(y) dy \quad (8)$$

把式(7)带入式(8)并积分得到液膜厚度 δ :

$$\delta = \left[\frac{3\mu\Gamma_1}{(\rho_1 - \rho_v)^2 g \sin\theta} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

文献[11]通过建立横管外降膜吸收液膜边界层能量积分方程并求解,给出了光滑横管外降膜吸收过程热边界层厚度 δ_t 的计算公式:

$$\delta_t = \left[\frac{ax\mu^{\frac{2}{3}}}{8(\rho_1 - \rho_v)^{\frac{1}{3}} g^{\frac{2}{3}} (3\Gamma_1)^{\frac{1}{3}} \sin^{\frac{2}{3}}\left(\frac{x}{R}\right)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

又由:

$$k_x = \frac{\lambda}{\delta_t} \quad (11)$$

进而可以得到横管外降膜吸收过程中任意周向角的传热系数 k_x ,即:

$$k_x = \frac{\lambda}{\left[\frac{ax\mu^{\frac{2}{3}}}{8(\rho_1 - \rho_v)^{\frac{1}{3}} g^{\frac{2}{3}} (3\Gamma_1)^{\frac{1}{3}} \sin^{\frac{2}{3}}\left(\frac{x}{R}\right)} \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (12)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho_1 c} \quad (13)$$

式中, x 为任意周向角所对应的管壁弧长, y 为膜厚方向长度, u 、 v 为溴化锂溶液在 x 、 y 方向速度, ρ_1 为溴化锂溶液密度, p 为流体微元体上压力, $g(x)$ 为重力在 x 方向上分量, ρ_v 为水蒸气密度, μ 为溴化锂溶液动力粘度, T 为溴化锂溶液温度, C 为溴化锂溶液浓度, D 为质量扩散系数, a 为溴化锂热扩散率, g

为重力加速度, θ 为降膜吸收过程中的任意周向角, Γ_1 为单侧横管的喷淋密度, R 为降膜横管的外径, λ 为溴化锂溶液导热系数。

由式(9)~(11)并结合 origin 绘图软件绘制雷诺数 $Re=60$ 时, δ 、 δ_t 、 k_x 随 θ 的变化分布图, 如图 1 所示。

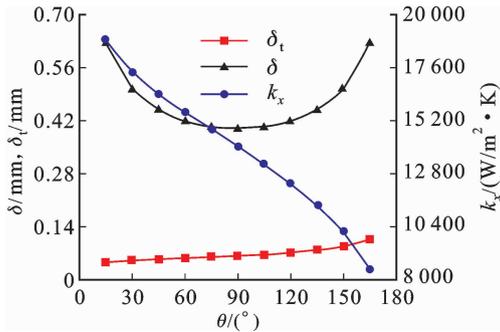


图 1 当 $Re=60$ 时, δ 、 δ_t 、 k_x 随 θ 的变化分布图
Fig. 1 The distribution of δ , δ_t , k_x with the variation of θ when Re is equal to 60

从图 1 可以看出, 光管外降膜吸收过程中, 液膜厚度与热边界层厚度的变化规律并不相同。随着周向角的增加, 液膜厚度先减小后增大, 热边界层厚度逐渐增大, 局部传热系数逐渐减小, 而且热边界层厚度远远小于液膜厚度; 此外, 热边界层厚度与局部传热系数成反比关系, 即热边界层越薄, 局部传热系数越大, 越有利于吸收器换热。

2 不同微肋表面传热特性数值模拟及其分布规律

本文提出的强化管模型是在光滑的横管外缠绕一层金属丝网。它通过增强换热管表面的粗糙度、增大降膜吸收过程中溶液的持液率来达到强化传热的目的。

该强化管模型在二维情况下可以抽象简化成管外带有矩形肋片的传热管, 其矩形肋片的肋高即为金属丝的丝径, 两个肋之间的肋距即为金属网孔的孔径。本文分别选用丝径为 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm 的金属丝网缠绕横管, 进而对不同微肋表面传热特性进行数值模拟。

由于 Fluent 是一个广为应用的 CFD 分析软件, 有强大的几何模型及网格生成前处理功能和流场特性分析的后处理功能, 其用户自定义函数可以根据需要定制, 从而实现设置边界条件、材料属性、改进现有模型等功能^[12]。因此, 本文采用 Fluent 软件模拟降膜吸收过程, 分析横管外热边界层厚度的分布规律, 进而得出最有利于传热的条件。保持横

管管径与金属丝网目数不变, 统一取横管外径为 10 mm, 肋距为 2 mm (10 目) 时, 各种丝径下横管截面尺寸如图 2 所示。

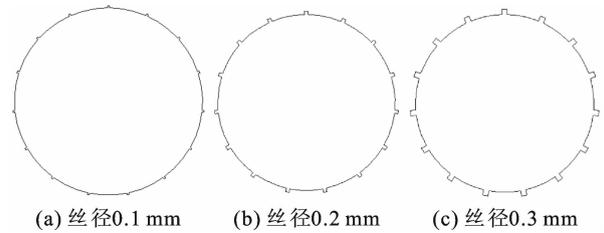


图 2 不同丝径横管截面图
Fig. 2 The sectional view of horizontal tubes with different wire diameters

用 Fluent 软件对缠绕金属丝网后的溴化锂溶液降膜流动吸收过程进行数值模拟。由于模拟的流体雷诺数均较小, 因此可假定流体均处于稳定层流的状态, 故粘性模型选用层流模型 (Laminar)。溴化锂溶液降膜吸收流动过程中, 紧贴管外壁的流体是溴化锂溶液, 与溴化锂溶液进行热量与质量交换的是水蒸气, 故该模型为气-液两相流动模型, 属于多相流模型。

Fluent 软件提供了三种多相流模型 (Multiphase Model), 它们分别是 VOF (Volume of Fluid) 模型、混合 (mixture) 模型、欧拉 (Eulerian) 模型。流体体积 VOF 模型, 是一种在固定欧拉网格下的表面跟踪方法, 适用于有自由表面的流动问题、需要追踪自由界面的问题和求解分层流的问题; 混合模型是一种简化的多相流模型, 常用于模拟各相粒子广泛分布于流场各处的多相流; 欧拉模型常用于模拟各相分离但仍相互作用的多相流。因此, 应根据需模拟的具体情况进行分析, 然后确定需采用的多相流模型。经分析, 水平管外降膜吸收过程为气液两相流动, 降膜表面包含气膜和液膜, 且存在相界面, 其中气相为水蒸气, 为可压缩流体, 故适用于水平管外降膜吸收过程模拟的多相流模型为 VOF 模型, 本文采用 VOF 模型进行模拟。

模型边界条件的设置如图 3 所示, 入口为速度入口及压力入口, 出口为压力出口, 以及对称界面及壁面。整个模拟过程有水蒸气 (气相) 及溴化锂溶液 (液相) 两相参与计算模拟, 故在边界条件的设置上, 需要根据相态的不同分别进行设置。

分析溴化锂溶液降膜流动吸收过程的体积分布及温度分布, 放大液膜及热边界层附近区域, 并用 Fluent 后处理软件进行分析。图 4 为丝径不同时液膜厚度随周向角变化分布图, 图 5 为丝径不同时溴化锂溶液体积分布图。

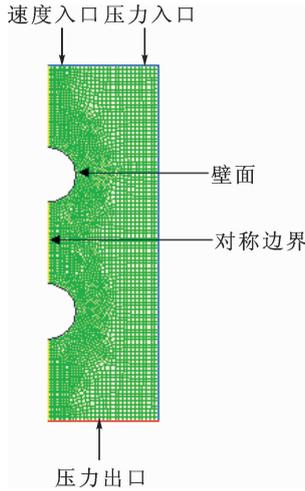


图3 计算区域边界条件

Fig. 3 The boundary conditions of the computational domain

结合图4、图5可以看出,在光滑横管外缠绕不同丝径的金属丝网后,当周向角从 0° 向 180° 增大时,

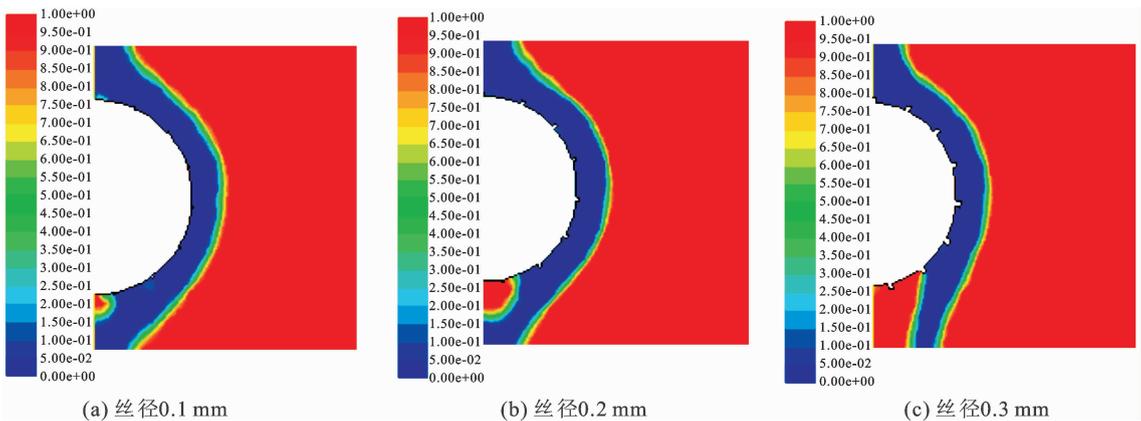


图5 不同丝径时溴化锂溶液体积分布

Fig. 5 The volume distribution of LiBr solution under the condition of different wire diameters

图6为丝径不同时热边界层厚度随周向角变化分布情况。图7为丝径不同时热边界层温度分布情况。

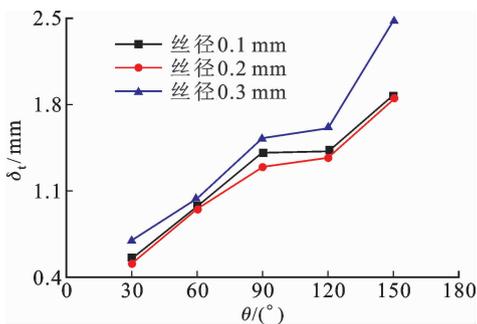
图6 丝径不同时 δ_t 随 θ 的变化分布

Fig. 6 The distribution of δ_t with the variation of θ under the condition of different wire diameters

丝径不变时,热边界层厚度的变化规律与光管相同。在三种丝径中,当丝径为 0.2 mm 时,热边界层厚度最小, 0.3 mm 时厚度最大, 0.1 mm 时厚度

液膜厚度变化的总体趋势仍是先减小后增大。随着丝径的增加,在同一周向角处,液膜厚度总体上是增大的。丝径越大,溴化锂溶液在流动的过程中越早脱离管壁。图4中,当丝径为 0.3 mm ,周向角为 150° 时,液膜厚度没有具体值,这是因为此时溶液已脱离管壁,所以无法测量液膜厚度的值。

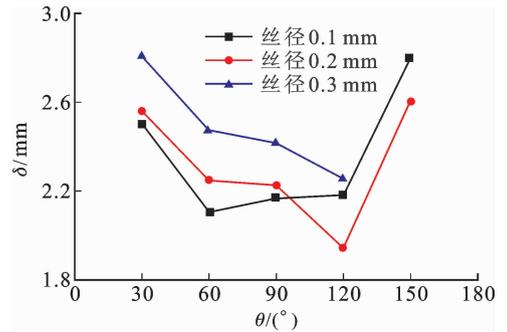
图4 丝径不同时 δ 随 θ 变化分布图

Fig. 4 The distribution of δ with the variation θ under different wire diameters

介于两者之间。由式(11)可知,传热系数与热边界层厚度成反比,则丝径为 0.2 mm 时的传热系数最大,丝径为 0.1 mm 时的传热系数次之,丝径为 0.3 mm 时的传热系数最小。

缠绕金属网后,横管表面形成一层极薄的液膜,并且增加了溶液的持液率,使溶液在横管外停留时间更长,换热更充分。丝径 0.1 mm 没有丝径 0.2 mm 换热好是由于丝径太小,管壁类似于光管,不能保证持液率,所以在一定程度上影响了换热效率。

丝径过大时,两肋之间的沟槽就会变深,此时降膜流动过程中流动阻力就会变大,溶液流动更加缓慢,液膜变厚影响换热效率。

当丝径为 0.3 mm ,周向角为 150° 时,热边界层厚度很大,溴化锂溶液降膜流动时较早进入了尾流区,溶液脱离了管壁,这时边界层流动被破坏,所以 150° 时的热边界层很厚。

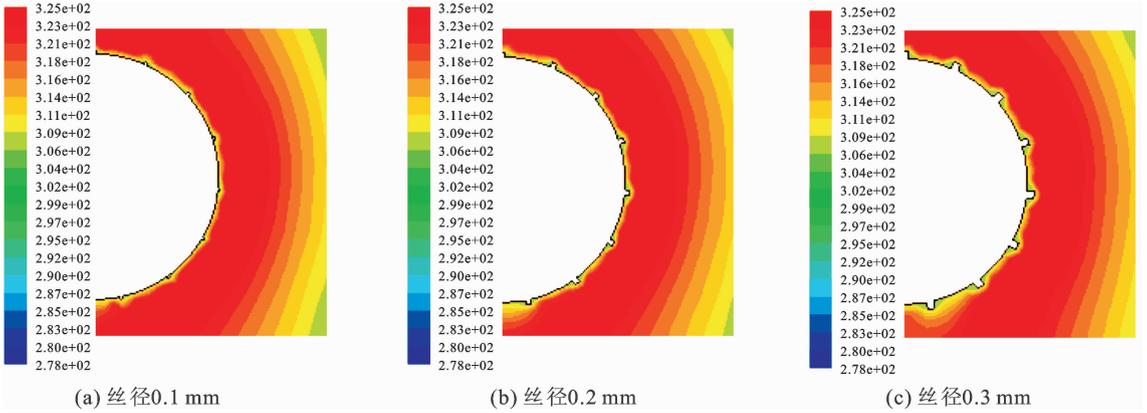


图7 不同丝径下热边界层温度分布

Fig. 7 The temperature distribution of thermal boundary layer under the condition of different wire diameters

3 不同微肋表面对吸收器整体换热效果的影响

分别建立光管及缠绕金属网丝径分别为 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm 时的吸收器模型进行数值模拟分析。对吸收器模拟采用降膜横管叉排排列,为简化模型使用 5 排横管,横管外径为 10 mm,溴化锂浓溶液布液管位于横管正上方。吸收器左侧上部和下部各有一个制冷剂蒸气入口,下部中间有一个

溴化锂稀溶液的出口。

经过模拟计算,可得到各情况下的温度场,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在横管没有缠绕金属网时,温度场的中温区很小;当缠绕金属网后,中温区域明显变大;当丝径为 0.2mm 时,中温区域最大,说明此时换热性能最好;当丝径为 0.3mm 时,中温区域减小,换热性能减弱。这也与上述结论基本一致。

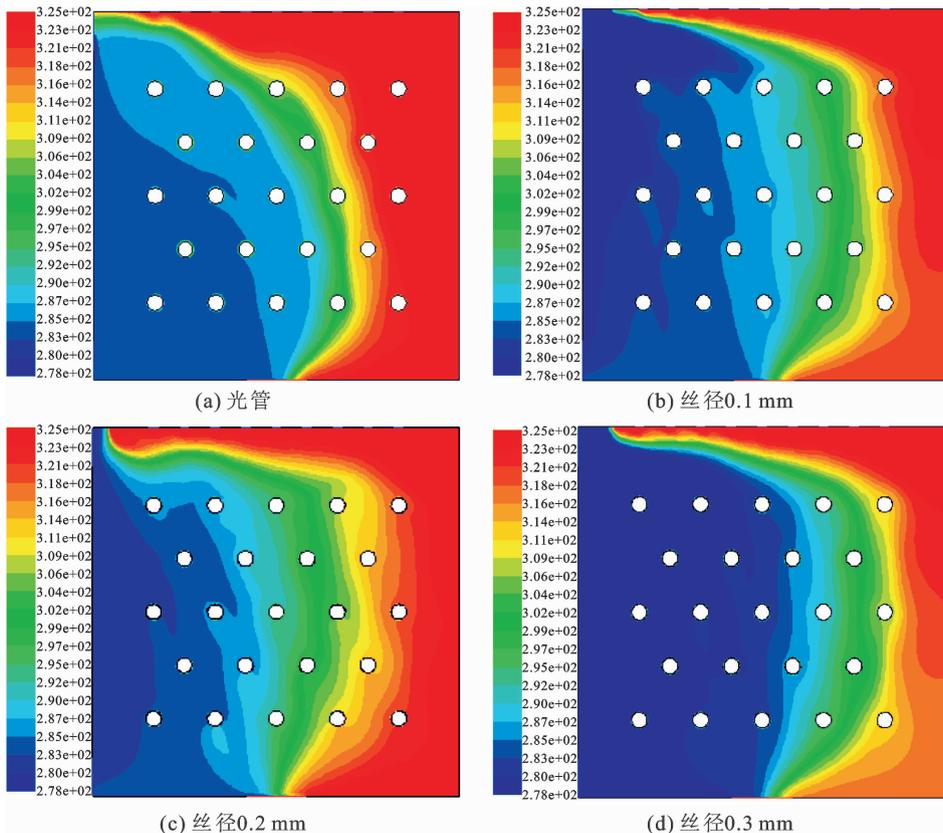


图8 丝径不同时吸收器内的温度场

Fig. 8 The temperature field in the absorber under the condition of different wire diameters

4 结 论

1) 在光滑横管外,液膜厚度随着周向角的增大是先减小后增大,而热边界层厚度是逐渐增大,局部传热系数是逐渐减小。

2) 表面缠绕金属丝网的强化管有利于换热,但选择丝径的大小很重要。丝径太小类似于光管,无法保证持液率,因而无法显著改善换热效果。丝径太大会使溴化锂溶液降膜流动过程中产生过大的阻力,使溶液流动过于缓慢,影响换热效果。

3) 强化管的丝径为 0.2 mm 时最有利于换热,此时管壁周围热边界层最薄,传热系数最高。

参考文献:

- [1] 彦启森,石文星,田长青,等. 空气调节用制冷技术[M]. 第4版. 北京:中国建筑工业出版社,2011:185-187.
- [2] 崔晓钰,徐之平,蔡祖恢,等. 从热工学角度探讨国产吸收式制冷机的发展方向[J]. 能源研究与信息,2000,16(4):9-14.
CUI Xiaoyu, XU Zhiping, CAI Zuhui, et al. Discussion on the development direction of domestic absorption refrigerating machine from the angle of thermal engineering[J]. Energy Research and Information, 2000, 16(4): 9-14.
- [3] SUTALO I D, BUI A, RUDMAN M. The flow of non-newtonian fluids down inclines[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2006, 136(1): 64-75.
- [4] YOSHIDA H, TAMAI H, OHNUKI I A, et al. Current status of thermal/hydraulic feasibility project for reduced-moderation water reactor (2): development of two-phase flow simulation code with advanced interface tracking method[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2006, 38(2): 119-128.
- [5] MORAN K, INUMARU J, KAWSJI M. Instantaneous hydrodynamics of a laminar wavy liquid film[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(5): 731-755.

- [6] 于意奇,杨燕华,程旭,等. 降膜流动行为的数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(10): 1207-1211.
YU Yiqi, YANG Yanhua, CHENG Xu, et al. Numerical simulation on falling film behavior[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(10): 1207-1211.
- [7] 董冲. 低肋斜槽管单管外降膜吸收的传热传质模型及计算[J]. 流体机械, 2005, 33(增刊): 297-302.
DONG Chong. The model of heat and mass transfer and the calculation in falling film absorption outside of low finned pipe chute[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(S): 297-302.
- [8] 冀洋锋. 溴化锂溶液在水平螺旋槽管壁面降膜吸收过程的数值研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2007.
JI Yangfeng. A numerical study of LiBr-H₂O falling film absorption on a spirally fluted horizontal tube [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [9] 胡德福. 溴化锂吸收式制冷机高效传热管应用技术研究[J]. 船舶工程, 1998, 5: 21-24.
HU Defu. Study on application of efficient heat transfer tube in lithium bromide absorption refrigerator[J]. Ship Engineering, 1998, 5: 21-24.
- [10] 章熙民,任泽霖,梅飞鸣,等. 传热学[M]. 第5版. 北京:中国建筑工业出版社, 2007: 115.
- [11] 张琴. 溴化锂吸收式制冷机蒸发器与吸收器强化传热传质的研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
ZHANG Qin. The research of heat and mass transfer improvement on evaporator and absorber of lithium bromide absorption chiller[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [12] 李国栋,哈岸英,钟小彦,等. 基于 FLUENT 的渗流场数值模拟分析[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(3): 317-320.
LI Guodong, HA Anying, ZHONG Xiaoyan, et al. Numerical simulation of seepage field based on FLUENT[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(3): 317-320.

(责任编辑 周 蓓)