

光管和斜槽管降膜吸收数学模型及实验研究

王美霞¹, 刘存芳², 周强泰¹

(1. 东南大学 动力工程系, 江苏 南京 210096; 2. 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 建立了光管与低肋斜槽管降膜吸收的数学模型, 采用数值计算方法求解光管与低肋斜槽管外层数学模型, 而斜槽管内层的速度、温度以及浓度方程用解析法求解。将计算结果与实验结果进行比较, 结果的趋势一致, 误差都在 10% 以下, 并分析出现误差的原因。结果表明, 斜槽管是一种适合吸收器使用的强化管。

关 键 词: 斜槽管; 吸收; 数值计算; 数学模型

中图分类号: TK124; O414 文献标识码: A

1 前 言

吸收式热泵系统具有环保、节约电能等优点, 应用广泛。对于溴化锂吸收式制冷机, 目前需要解决的问题是如何提高机组的性能, 使机组效率更高。吸收器的性能好坏直接影响到机组的造价和运行的经济性, 吸收器的传热面积占到整个冷机传热面积的 40% 以上^[1]。溶液的吸收效果是影响吸收器性能的主要因素。因此, 吸收器内复杂的传热和传质过程成为近几十年的研究热点^[1~6]。采用强化传热管是提高吸收器内降膜吸收效果的主要手段。本文分别以溴化锂吸收器中使用较多的光管和斜槽管为研究对象, 采用理论分析和数值计算相结合的方法, 分别建立了光管与低肋斜槽管降膜吸收的数学模型。利用 SIMPLE 方法对光管和低肋斜槽管的传热和传质性能进行计算, 计算结果表明, 低肋斜槽管的吸收量比光管提高了 35%, 与文献中的数据有一定的可比性^[3]。计算值与实验值的比较发现二者吻合较好。

2 光管计算模型

吸收器中单管吸收过程的计算模型如图 1 所示。取传热管外切方向为 x 轴方向, 半径方向为 y 轴方向, 则管壁上任意点的半径方向与垂直方向的夹

角 $\theta = x/R$ 。由于流动和传热传质的对称性, 只研究传热管的右半部分即可。根据经典的传热传质理论以及吸收器内的具体情况, 做出基本假设^[9], 得到光管传热传质计算的数学模型。

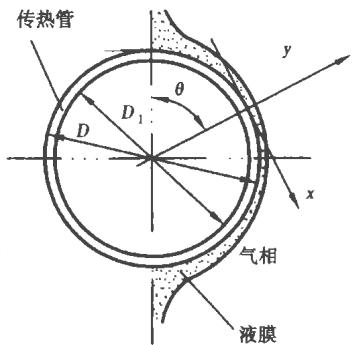


图 1 单管的计算模型

连续方程:

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

动量方程:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \rho g \sin \theta \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho_{cp} u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_{cp} v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (3)$$

质量方程:

$$u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[D_m \frac{\partial \xi}{\partial y} \right] \quad (4)$$

边界条件:

$$x = 0; u = \sqrt{2gs}; v = 0; T = T_{in}; \xi = \xi_{in}; \quad (5)$$

$$y = 0; u = 0; v = 0; \frac{\partial \xi}{\partial y} = 0;$$

$$\lambda_s \left[\frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{T - T_h}{R_t + R_h}; \quad (6)$$

$$y = \delta; \frac{\partial u}{\partial y} = 0; f(T_e, \xi_e, Pa) = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = - \Delta h \frac{\rho D_m}{\xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad (7)$$

其中: u 、 v 分别为液膜内溶液的周向和径向速度, T 、 ξ 分别为溶液的温度和浓度, R_t 、 R_h 分别为单位管长的管壁导热热阻和管内冷却水侧放热热阻, λ 、

ρ 、 μ 和 c_p 分别为溶液的导热系数、密度、动力粘度和定压比热, s 为喷嘴至传热管顶部的距离, T_{in} 、 ξ_{in} 分别为溶液的入口温度和浓度, δ 为液膜厚度, T_e 、 ξ_e 分别为溶液的饱和温度和饱和浓度, Pa 为吸收器中的压力, $D_m = 3.1 \times 10^{-9}$ 为溶液的扩散系数。

3 斜槽管计算模型

以低肋斜槽管的任一截面为研究对象来讨论其在吸收器中的传热传质特性。假设该截面是边长为 a 的等边三角形, 肋片的高度一般小于 0.5 mm , 因此整个肋片均在液膜的覆盖之下。这时传热管外部流动的液膜可以看成是由两部分组成, 一部分在肋片之间的流道内流动, 另一部分则在肋片的外部流动, 在两部分的交界处, 溶液的各参数值保持连续, 并且满足光滑过渡的条件。需要根据这两部分不同的流动特点分别建立不同的计算模型。为了叙述方便, 把三角形流道之内的区域定义为内层, 把三角形流道之外的区域定义为外层, 如图 2 所示。

3.1 外层模型

在外层中, 流体的流动情况和光管外液膜的流动情况类似。不同之处有两点: (1) 在这一区域内, 与最里层溶液相接触的不是壁面而是具有一定流速、温度和浓度的溶液, 所以外层的边界条件和光管壁面处的边界条件不同; (2) 由于斜槽管的斜槽与壁面切线方向成夹角 φ , 动量方程中的重力项 $\rho g \sin \theta$ 应作相应变更。

选取斜槽管外管壁圆周的斜槽方向为 x 方向, 管外表面的法线方向为 y 方向。斜槽管外层液膜的连续方程、能量方程和质量方程与光管相同, 而动量方程变为:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \rho g \sin \frac{x}{R} \cos \varphi \quad (8)$$

式中: R 为传热管肋片根部的半径。

边界条件为:

$$x = 0; u = \sqrt{2gs}; v = 0; T = T_{in}; \xi = \xi_{in}; \quad (9)$$

$$y = H; u = u_0; v = 0; \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=H^-}$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial y} \Big|_{y=H^-}; \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H^-} \quad (10)$$

$$y = \delta; \frac{\partial u}{\partial y} = 0; f(T_e, \xi_e, Pa) = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = - \Delta h \frac{\rho D_m}{\xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad (11)$$

其中: $\frac{\partial \xi}{\partial y} \Big|_{y=H^-}$; 和 $\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H^-}$; 分别为内外层交界处内层的浓度梯度和温度梯度。

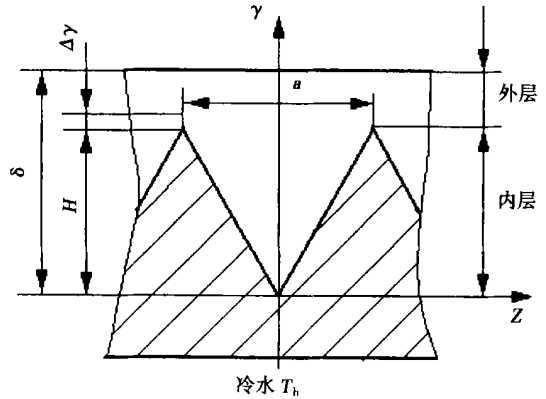


图 2 内层计算时的坐标选取

3.2 内层模型

如图 2 所示选取坐标, 在斜槽内流动的溶液由于流动速度比较小, 惯性项可以忽略不计。所以在任意 x 处, 流道内的动量方程可以简化为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = - \frac{\rho g \sin(x/R) \cos \varphi}{\mu} \quad (12)$$

边界条件为:

$$y = \sqrt{3}z; u = 0; \quad (13)$$

$$y = \frac{\sqrt{3}a}{2}; \bar{u} = u_1; \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{u_2 - u_1}{\Delta y} \quad (14)$$

其中: u_1 、 u_2 分别为外层流体在第一、第二节点处的速度, Δy 为 y 方向上的网格划分宽度, \bar{u} 为斜槽管三角形流道内任意 y 处速度 u 的平均值。 u_1 可由三角形流道内速度分布求解计算得到, 即:

$$u_1 = \frac{12au_2\mu + \sqrt{3}\rho ga^2\Delta y\sin(x/R)\cos\varphi}{24\sqrt{3}\mu\Delta y + 12a\mu} \quad (15)$$

式(15)为外层速度计算的边界条件, 其中 u_2 用 3.1 节外层计算时前一次数值计算的结果, 用 Simple 程序反复求解, 直到外层各节点上的速度都满足精度要求为止。

与上面讨论类似, 流速较小时, 流道内的能量方程可简化为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (16)$$

边界条件: $y = \frac{\sqrt{3}a}{2}, \bar{T} = T_1; \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta y} \quad (17)$

其中:

$$T_1 = \frac{5R\lambda_s T_2 + \sqrt{3}aT_2 + 10\Delta y T_h}{5R\lambda_s + \sqrt{3}a + 10\Delta y} \quad (18)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为外层流体在第一节点、第二节点处的温度, Δy 为计算步长, T_h 为管内冷却水的温度。式(18)作为外层温度计算时的边界条件。

同样, 流道内的质量方程可简化为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial \xi}{\partial z^2} = 0 \quad (19)$$

边界条件为:

$$y = \frac{\sqrt{3}a}{2}, \bar{\xi} = \xi_1; \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial y} = \frac{\xi_2 - \xi_1}{\Delta y} \quad (20)$$

其中:

$$\xi_1 = \frac{6\Delta y \xi_{in} + \sqrt{3}a\xi_2}{6\Delta y + \sqrt{3}a} \quad (21)$$

式(21)作为外层浓度计算时的边界条件。

4 计算方法

光管的计算模型用 SIMPLE 方法求解。在求解前需要根据所求问题, 把计算区域分成许多不重叠的子区域, 确定各计算点在子区域中的位置及所代表的容积, 划分网格, 如图 3 所示。图中, 将 x 方向上

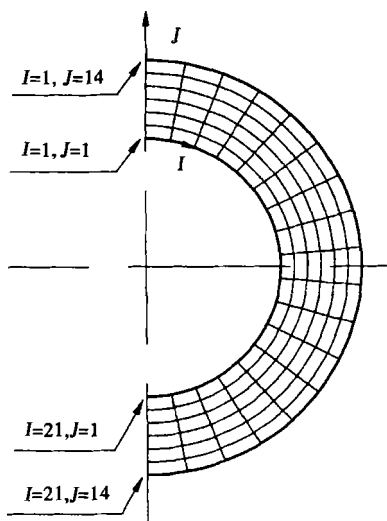


图 3 液膜内的网格划分

的区域划分成 21 个网格, y 方向上的区域划分为 14 个网格。 x 方向上的第 1 个节点在传热管的最顶部, 第 21 个节点位于传热管的最下部; y 方向上的第 1 个节点位于靠近传热管壁面处的液膜内表面上, 第 14 个节点位于汽液界面上。

整个 SIMPLE 程序比较复杂, 有许多子程序供使用者调用。本计算的主程序以及部分子程序均用 FORTRAN 语言编写, 其中结构参数、单值性条件、输入输出量、物性参数以及其它参数的计算均由自编的子程序完成, 主程序与子程序之间以及子程序与子程序之间数据的传递均采用 COMMON 语句实现。另外, 在主程序中设置数据文件, 存储原始数据和计算结果, 以便查用。计算时, 在自编的主程序中给定

计算区域的尺寸、节点个数、边界条件、扩散系数以及源项, 调用 SIMPLE 程序求出液膜中的速度、温度和浓度分布, 进而求出传热系数、传质系数、冷却水温度以及传热量等等。计算中用到的液膜内每个节点上溶液的物性参数均用自编的主程序进行计算。

需要说明的是, 在计算过程中冷却水的温度需要先假设然后进行校核计算。即根据假设的冷却水出口温度, 计算出吸收量和传热量以后, 再根据传热量的大小进行校核计算, 如果不满足计算精度, 再以校核后的冷却水温度作为新的假设值重新进行计算, 直到满足计算精度为止。

低肋斜槽管外层的计算模型也用 SIMPLE 方法求解, 计算的关键是如何处理内层和外层交界处的边界条件。在交界处, 先假设一个外层 y 方向第二个节点上的速度、温度和浓度值, 用式(15)、式(18)和式(21)分别计算边界面上的速度、温度和浓度值, 作为外层计算时的边界条件, 代入 SIMPLE 程序求外层的数值解, 在求解的过程中, 每求解一次, 就把数值解的 y 方向第二个节点上的结果代入式(15)、式(18)和式(21)对边界条件进行修正, 直到满足精度要求(10^{-4})为止。

5 结果和讨论

为了验证计算结果与实际吸收结果的吻合情况, 建立了吸收器实验台^[9]。实验台采取开式循环系统, 蒸汽发生器与吸收器处于同一个壳体之中, 蒸汽发生器位于中央, 吸收器对称放于蒸发

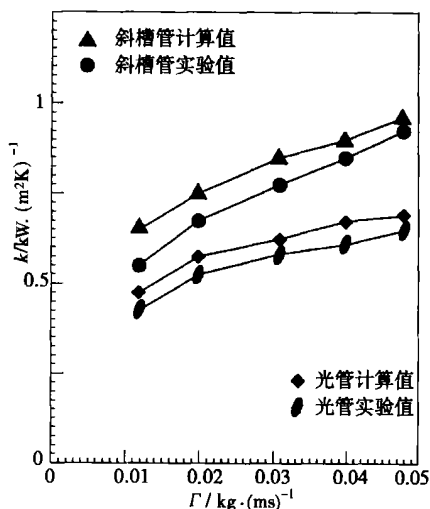


图 4 传热系数计算与实验结果对比

器两侧, 便于进行两种传热管的对比测试, 减少由于条件不同而带来的误差。在本实验系统中, 可以在环境状态下进行溶液的加热、浓缩和冷却等处理, 比重、温度和浓度等参数均可以直接测量和控制。与

闭式系统相比, 开式系统具有测试精度高、操作简单和成本低等特点。在实验台上分别进行了光管管组和斜槽管管组的吸收实验。

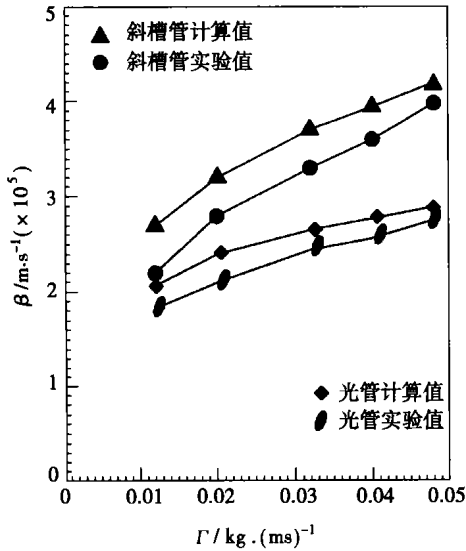


图 5 传质系数计算与实验结果对比

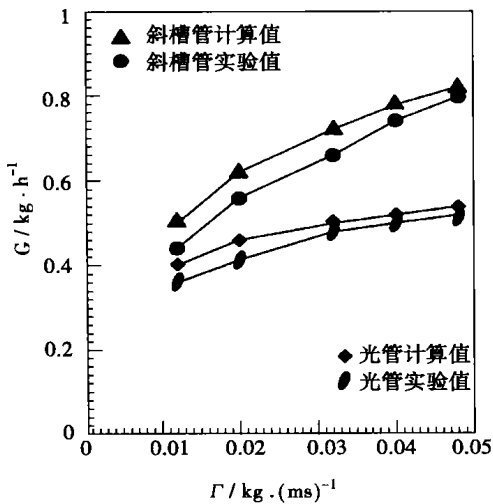


图 6 吸收量计算与实验结果对比

吸收器内传热传质的实验结果与计算结果的比较如图 4~6 所示。从图中可以看出斜槽管的传热传质性能明显高于光管, 斜槽管与光管相比较, 吸收器传热量和传热系数可以提高 35%, 传质系数和吸收量可提高 40%。并且在吸收器中适当增加溶液的喷淋量, 可以改善吸收器内的传热传质情况。

另外, 从图中还可以看出, 对强化管管组和光管管组而言, 计算结果与实验结果基本一致, 误差一般都在 10% 以内, 且计算结果均比实验结果稍大。出

现误差的原因分析如下:

(1) 实验时, 并不是所有的传热管都能被溴化锂溶液均匀覆盖, 喷淋密度 Γ 大时传热管基本被全部覆盖, 但喷淋密度较小时, 传热管表面可以发现部分干块。计算程序中并没有考虑传热管表面覆盖不均匀产生的影响。从图中也可以看出, 当喷淋密度比较小时误差较大。

(2) 在蒸汽发生器中产生的水蒸气, 难免会夹带一些小的水滴, 从而使得实验所得的传热系数和传质系数偏小。

(3) 实验装置的散热损失以及测量误差都会对实验结果产生影响, 导致实验结果与计算结果之间的差异。

6 结 论

应用本文建立的数学模型, 分别计算出光管与斜槽管的传热传质系数以及吸收量与喷淋密度的关系, 并将结果与实验结果进行比较。可以看出数学模型的计算结果与实验结果的趋势一致, 误差都在 10% 以下, 表明该模型具有较高的精度。理论计算和实验结果证明, 斜槽管的传热传质性能明显高于光管, 是一种性能优良的强化传热传质管, 适合在吸收器中使用。

参考文献:

- [1] DENG S M, MA W B. Experimental studies on the characteristics of an absorber using LiBr/H₂O solution as working fluid[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22: 293-301.
- [2] WASSENAAR R H, WESTRA J J W. Dynamic model of a film absorber with coupled heat and mass transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1992, 35(1): 87-99.
- [3] CONLISK A T. Analytical solutions for the heat and mass transfer in a falling film absorber[J]. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50(4): 651-660.
- [4] TSAI BOR-BIN, HORACIO PEREZ-BLANCO. Limits of mass transfer enhancement in lithium bromide-water absorbers by active techniques [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(15): 2409-2416.
- [5] 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.
- [6] 刘存芳. 换热器中的传热传质及强化研究[D]. 南京: 东南大学, 1996.
- [7] PATANKAR S V. 传热和流体流动的数值方法[M]. 郭宽良, 译. 合肥: 安徽科学出版社, 1984.

(辉 编辑)

The heat resistance losses of working mediums in high and low temperature-side heat exchangers, regenerative heaters and intercoolers have been taken into account for an endoreversible closed Brayton cycle under constant-temperature heat source conditions. With power output serving as an objective of optimization the authors have optimized the distribution of thermal conductivity values and intermediate pressure ratios for the above-mentioned items. Through the use of numerical calculations analyzed is the impact of several main cycle characteristic parameters on the distribution of maximum power, corresponding magnitudes of thermal conductivity, intermediate pressure ratios and the double maximum power. **Key words:** finite time thermodynamics, Brayton cycle, intercooling and regenerative heating, power optimization

光管和斜槽管降膜吸收数学模型及实验研究 = **Mathematical Model for and Experimental Study of the Falling Film Absorption of Bare Tubes and Skewed-slot Low-ribbed Tubes** [刊, 汉] / WANG Mei-xia, ZHOU Qiang-tai (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), LIU Cun-fang (College of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 486 ~ 489

A mathematical model dealing with the falling film absorption of bare tubes and skewed-slot low-ribbed tubes has been set up. A numerical calculation method was used to solve for the outer layer model of bare tubes and skewed-slot low-ribbed tubes while an analytical method employed to solve for the velocity, temperature and concentration equation of the inner layer of the above-mentioned tubes. The calculated results were compared with those of tests, revealing a basic agreement between them with all errors being assessed at less than 10%. Causes leading to the errors were analyzed. It is concluded that the skewed-slot low-ribbed tubes can serve as intensification tubes suitable for use in absorption devices. **Key words:** skewed-slot low-ribbed tube, absorption, mathematical model, numerical calculation

热力学焓函数的基本微分关系与特征函数 = **The Basic Differential Equations of Thermodynamics Exergy Function and Its Characteristic Functions** [刊, 汉] / HAN Guang-ze, WANG Xiao-wu, XIE Xin-an, et al (Department of Applied Physics, South China University of Science & Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 490 ~ 492, 511

Proceeding from a universal expression of exergy, the authors have derived the first and second basic differential equations for the exergy function of a thermodynamics system. These two equations make it possible to change the exergy unfit for direct measurement into a function of measurable parameter. Through the use of basic differential relations the characteristics of system exergy function can be studied by experimental means. Moreover, it is also feasible to solve for the exergy function of a system. After a proper selection of free variables the exergy function of a system can serve as a characteristic function, from which all other thermodynamic functions may be determined. **Key words:** thermodynamics, exergy, basic differential equation, characteristic function

一种新型锅炉给水除氧器的研究 = **A Study of a New Type of Boiler Feedwater Deaerator** [刊, 汉] / ZHANG Lin-hua (College of Environmental Engineering under the Xi'an University of Architectural Science & Technology, Xi'an, China, Post Code: 710055), CUI Yong-zhang, QU Yun-xia, et al (Department of Air Conditioning & Refrigeration Engineering, Shandong Institute of Architectural Engineering, Jinan, China, Post Code: 250014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 493 ~ 496

The study results of an innovative boiler feedwater deaerator, which removes oxygen by a process of hydrogenation, are presented. Its operation principles and main components are described and compared with those of other deaeration methods. The factors affecting deaeration effectiveness are analyzed. Tests have shown that the hydrogenated deaerator features a stable and reliable operation and high deaeration effectiveness with the content of residual dissolved oxygen in the outgoing water fully complying with boiler feedwater quality standards. Such deaerators can be widely used in boiler feedwater systems and for supplying make-up water to hot water boilers and heat supply systems. **Key words:** deaeration, deaerator, catalysis, hydrogenation, dissolved oxygen

循环流化床锅炉 J 形返料阀的设计 = **Design of a J-shaped Refeed Valve for a Circulating Fluidized Bed Boiler**