

扭曲椭圆管在 MVR 系统降膜蒸发器上的应用研究

莫 逊, 朱冬生, 张洁娜

(中国科学院 广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要:传统降膜蒸发器的体积和质量过大, 耗材多, 实际应用效果差。文中通过理论计算与 CFD 数值模拟方法对比分析了扭曲椭圆管与直圆管在降膜式蒸发器中的差别, 使得这 2 种办法相互验证了结论的可靠性。文中主要分析采用扭曲椭圆管降膜蒸发器的管侧与壳侧的传热膜系数在不同关键参数影响下优于直圆管的现象, 并且剖析关键参数与传热膜系数之间的内在关系, 总结了扭曲椭圆管的应用规律。结果显示扭曲椭圆管的管侧传热膜系数与壳侧传热膜系数和整体压降均优于直圆管, 具有重要的工程应用价值。

关键词:降膜蒸发器; 扭曲椭圆管; CFD 数值模拟; 传热膜系数

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 1005-9954(2016)09-0024-05

DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2016.09.005

Practical research on twisted elliptical tube in the falling film evaporator of MVR system

MO Xun, ZHU Dong-sheng, ZHANG Jie-na

(Guangzhou institute of Energy Conversion, Chinese Academy of sciences, Guangzhou 510640,
Guangdong Province, China)

Abstract: The traditional falling film evaporators had excessive volume and mass, which consumed expensive materials and performed badly in practical application. By the method of theoretical calculation and CFD numerical stimulation, the coefficients of tube-side and shell-side heat transfer between the twisted elliptical tube and plain tube in the falling film evaporator were compared and analyzed. The reliability of the conclusion was verified by the above methods. The phenomenon that falling film evaporator with twisted elliptical tubes was better than the one with plain tube in terms of the heat transfer coefficients of shell-side and tube-side under various critical parameters was analyzed. Additionally, the internal relationship between critical parameters and heat transfer coefficients was also considered. Finally, the application rules of twisted elliptical tubes were summarized. The results show that the twisted elliptical tube are better than the circle tube on the heat transfer coefficient as well as the overall pressure drop of tube-side and shell-side heat transfer. In all, this kind of structure is valuable in the industrial application.

Key words: falling film evaporation; twisted elliptical tube; CFD numerical simulation; heat transfer coefficient

在 MVR 系统中的降膜蒸发器是一种换热机理非常复杂的换热器, 其作用原理^[1-2]是: 需蒸发的物料通过进料泵从降膜蒸发器顶部进入, 走蒸发管内(管程), 物料通过布膜器以膜状分布到换热管内, 物料在凭借引力流下管腔时被管外的蒸汽加热, 达

到蒸发温度后产生蒸发, 物料连同二次蒸汽从管内流下以薄膜的形式蒸发。二次蒸汽被蒸汽压缩机压缩后, 送入降膜加热室壳程做为加热蒸汽, 这样不断重复利用低品质的蒸汽经过加压升温成高品质蒸汽, 在这个过程当中只需普通少量的新鲜蒸汽, 就可

收稿日期: 2016-01-04

基金项目: 科技型中小企业创新基金专项(13C26214404587); 佛山市院市合作项目(2013HK100103); 广东省 2013 年“扬帆计划”引进创新创业团队

作者简介: 莫逊(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高效传热传质设备研究及产业化应用; 电话: 13922722528, E-mail: 4296651-651@163.com。

以满足工况要求,提高了 MVR 系统的效率。它涉及到换热工质的相变吸热、放热,管壁上的液膜流动情况,工况非常复杂,因此在 MVR 的系统中降膜蒸发器效率保证显得尤其重要。目前在 MVR 系统中大多数采用的是普通光管换热管子,而光管的换热效率低,耗材量大,体积庞大。并且采用光管的降膜蒸发器的故障率偏高,使得用户的日常维护费用水涨船高。由此可知采用一种高效的换热管作为降膜蒸发是非常具有行业意义的。本文将展开讨论采用扭曲椭圆管作为降膜蒸发器换热管的优点。

1 扭曲椭圆管的结构特征

扭曲椭圆管的结构如图 1 所示。SP 管的几何参数包括扭矩长 P ,椭圆截面的外长轴 A ,外短轴轴长 B ;内长轴 a 和内短轴长 b 。换热管两端保持圆形,以方便与管板的配装。

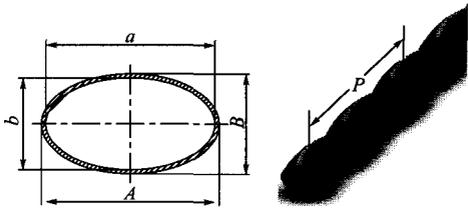


图 1 扭曲椭圆管结构示意图

Fig. 1 Sketch of twisted elliptical tube

降膜蒸发器的换热管束由图 1 所示的扭曲椭圆管组成,垂直于地面布置,代替原有的光管。经实践证明,由于管与管之间形成自支撑,因此可以用捆扎的形式让管束成整体结构,省掉普通换热器需要的折流板,不仅减轻设备重量,而且让蒸发器呈现纯逆流,提高换热温差,让流体在三维变空间中流动,形成剧烈的紊流,破坏管壁的边界层,挺高了换热效率。

2 扭曲椭圆管与光管传热对比分析

为了研究扭曲椭圆管与光管之间换热率提高的原因,本文采用同样的工艺参数条件,同样的结构参数为基准,展开了对这 2 种管型的传热对比分析。

2.1 立式降膜蒸发器传热计算

立式降膜蒸发器总传热膜系数^[3] K 可以按下式^[4] 计算:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_0} + R_0 + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \left(\frac{d_0}{d_m} \right) + R_i \left(\frac{d_0}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{d_0}{d_i} \right) \quad (1)$$

两污垢热阻 R_0, R_i 取决于换热器管壳侧流体的清洁度、流体在换热器中流速及换热器运行时长。为了方便比较,本文选择的传热流体均按理想状态选取,换热器假设为全新运行,从而可以忽略两侧污垢热阻。式(1)中等号右边第 3 项为换热管管壁热阻,该热阻取决于取换热管的材料,文中对比的降膜蒸发管均按碳钢材料设计,可以认为该部分热阻相等。因此,对比 2 种降膜蒸发器的传热效果只要对比其中最主要的影响热阻:传热壁面两侧由于流体对流传热而产生的传热膜热阻即可。

2.2 管侧传热比较

2.2.1 圆管竖直接管内降膜蒸发

传统降膜蒸发器料液侧平均传热膜系数 α_i 在工程上一般采用计算对应雷诺数 Re_i 与普朗特系数 Pr_i 后,根据这 2 个参数查 Dukler 算图^[4] 的方法求取。参考图 2,图中 ϕ 值计算参考式(2),料液侧的雷诺数参考式(3)。

$$\phi = \left(\frac{\eta^2}{\rho^2 g \lambda^3} \right)^{-1/3} \quad (2)$$

$$Re_L = \frac{4q_m}{\pi d \mu_L} \quad (3)$$

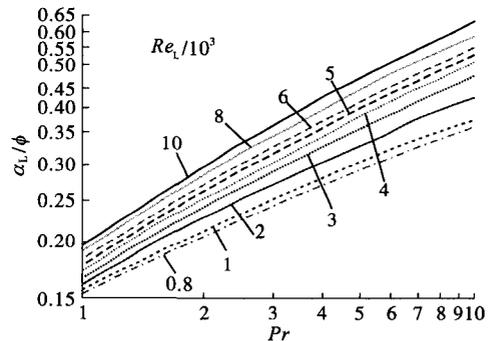


图 2 立式降膜蒸发器沸腾传热膜系数与 Pr 和 Re 的关系

Fig. 2 Boiling heat transfer film coefficient associated with Pr and Re of vertical falling film evaporator

2.2.2 扭曲椭圆管降膜蒸发

扭曲椭圆管管程降膜蒸发过程可以按照通过实验数据拟合得到的传热公式进行计算。

$$Nu_{L,tur} = 0.01452 Re_L^{0.2951} Pr_L^{0.4} \quad (4)$$

则管程降膜蒸发平均传热系数 α_L 。

$$\alpha_L = Nu_{L,tur} \cdot \frac{\lambda_L}{L} \quad (5)$$

式中: $L = (\nu^2/g)^{1/3}$ 。

2.2.3 对比分析

以常压饱和温度下的水为参考介质,采用查

Dukler 算图的办法对传统圆管降膜蒸发工艺计算了雷诺数 Re 从 2 000 到 10 000 变化过程中各雷诺数点所对应的料液侧传热膜系数 α_L 的值。然后对应该雷诺数范围绘制了扭曲椭圆管降膜蒸发工艺管程传热膜系数 α_L 的值进行比较,如图 3 所示。

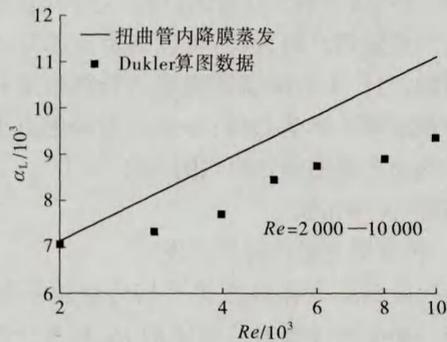


图 3 液膜传热膜系数 α_L 与雷诺数 Re 的关系
Fig. 3 Relationship of heat transfer coefficient α_L and Reynolds number Re

为分析扭曲降膜蒸发过程与普通圆管管型在不同 Pr 数下液膜传热效果之间的区别,选取雷诺数 $Re = 8 000$ 条件,对 2 种管型分别计算传热膜系数并进行了比较,因 Dukler 算图 Pr 数范围在 1—10 之间,对于高 Pr 数下降膜传热过程,选用 R. Numrich^[5] 针对圆管降膜传热推导得到的计算式(6)进行比较,如图 4 所示。

$$\alpha_L = 0.002484 \frac{\lambda_L}{L} Re_L^{0.44} Pr_L^{0.4/13} \quad (6)$$

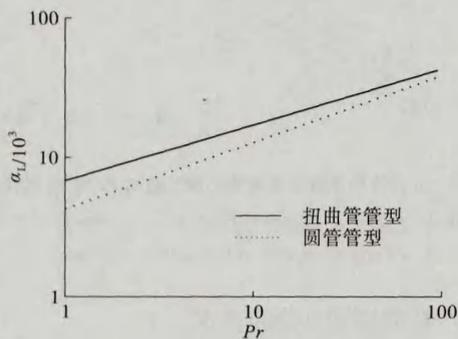


图 4 Pr 与液膜传热膜系数 α_L 关系比较
Fig. 4 Relationship of heat transfer coefficient α_L and Prandtl number Pr

由图 4 分析可以得出在湍流条件下,随着雷诺数的升高,扭曲椭圆管降膜蒸发侧传热膜系数与普通圆管降膜蒸发侧传热膜系数均呈上升趋势,扭曲椭圆管的降膜蒸发传热系数优于普通圆管类型;图 4 为 2 种管型管内液膜在普朗特数升高的过程中传

热膜系数的变化情况,在 2 种管型降膜传热过程中传热分系数都随普朗特数的上升而上升,但在普朗特数从 1—100 上升过程中,扭曲椭圆管降膜蒸发传热效果要优于普通圆管,随普朗特数的升高,2 种管型的传热膜系数逐渐趋同。

2.3 壳侧传热比较

壳侧的传热情况更为复杂,它涉及到了管外的液膜分布情况,流场的均匀情况,流体的紊流程度,流速对传热的影响。为了更好分析壳侧的传热,对壳侧的传热情况进行 CFD 数值模拟^[6-7],扭曲管的排列方式分为正三角和正方形两种,这 2 种排列方式组成的蒸发器称为扭曲椭圆管降膜蒸发器 A 和扭曲椭圆管降膜蒸发器 B,如图 5—7 所示。

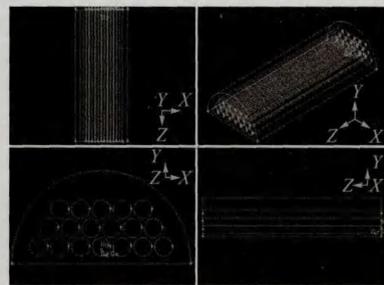


图 5 直圆管换热器物理模型图
Fig. 5 Physical model of plain tube heat exchanger

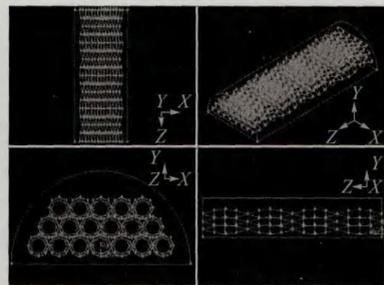


图 6 扭曲管换热器 A 的物理模型图
Fig. 6 Physical model of twisted elliptical tube heat exchanger A

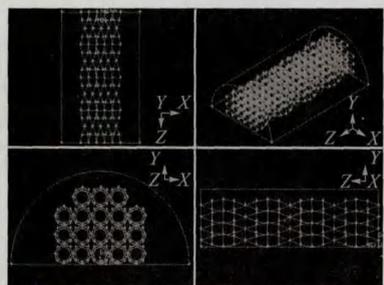


图 7 扭曲管换热器 B 的物理模型图
Fig. 7 Physical model of twisted elliptical tube heat exchanger B

图 8 及图 9 所示为 3 种不同的换热器壳程对流传热系数 α_0 和压降 Δp 随壳程雷诺数 Re 的变化曲线。从图中可以看出,在相同 Re 数下,扭曲椭圆管降膜蒸发器壳程对流传热系数与压降要明显大过对比的直圆管降膜蒸发器。在 $Re = 10\ 000$ 时,扭曲椭圆管降膜蒸发器壳程对流传热系数与压降相对于直圆管换热器分别提高了 30% 和 25% 左右。这主要是因为扭曲椭圆管降膜蒸发器中,扭曲管紧密接触的排列方式以及扭曲管结构的影响,使得其壳程中的流道为螺旋旋转的形状,流体在通过这种流道时,会产生明显的旋转流动,使得壳程流体的扰流程度大大增加,传热边界层被削薄,从而强化了壳程流体的传热。对比 2 种扭曲椭圆管降膜蒸发器,可以发现扭曲椭圆管降膜蒸发器 A 的传热性能优于扭曲椭圆管降膜蒸发器 B,表明扭曲管采用三角形的排列方式可以更好的强化壳程流体的绕流,使得壳程流体传热边界层减薄,场协同程度提高,从而强化了其壳程流体的换热。

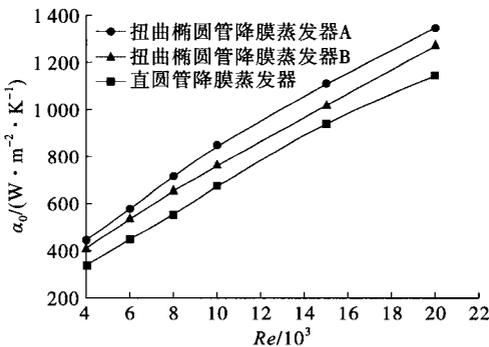


图 8 降膜蒸发器壳程 α_0 与 Re 的关系曲线

Fig. 8 Relationship between α_0 and Re of falling film evaporator

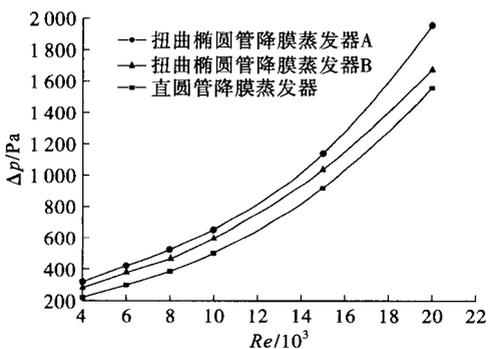


图 9 降膜蒸发器壳程压降 Δp 与 Re 的关系曲线

Fig. 9 Relationship between pressure drop Δp and Re of falling film evaporator

3 结论

(1) 管侧传热对比结果显示在雷诺数 $2\ 000 < Re < 10\ 000$ 变化范围内及普朗特数 $1 < Pr < 100$ 变化范围内,扭曲椭圆管降膜蒸发传热膜系数 α_L 均高于圆管降膜蒸发侧传热膜分系数,表明管型的压扁扭曲变化有利于降膜蒸发传热效果的提高。

(2) 壳侧传热对比结果显示在雷诺数 $4\ 000 < Re < 22\ 000$ 变化范围内,扭曲椭圆管降膜蒸发器壳程流体由于受到扭曲管结构及其特殊排列方式的影响,流体在壳程流动时会产生以纵向旋转和二次旋流为特点的扰流,从而提高了其壳程流体的湍流程度,使得其壳程流体强化传热效果较为明显,均高于普通直圆管降膜蒸发器。

(3) 扭曲管的排列方式对壳侧的换热有一定的影响,正三角排列的降膜蒸发器的壳侧传热效果优于正方形降膜蒸发器。

(4) 在同样流速的情况下,扭曲椭圆管降膜蒸发器比直圆管降膜蒸发器的阻力稍大。

符号说明:

- A 扭曲管管外长轴长, mm
- a 扭曲管管内长轴长, mm
- B 扭曲管管外短轴长, mm
- b 扭曲管管内短轴长, mm
- d 当量直径, mm
- d_i 圆管内径, mm
- d_m 圆管中径, mm
- d_o 圆管外径, mm
- g 重力加速度, m/s^2
- K 扭曲椭圆管降膜蒸发器总换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
- L 液膜蒸发特征长度, mm
- Nu 努塞尔数
- P 扭矩, mm
- Pr 普朗特数
- Δp 阻力降, Pa
- q_m 质量流量, kg/s
- R 污垢热阻, $W/(m^2 \cdot K)$
- Re 雷诺数
- α 传热膜系数, $W/(m^2 \cdot K)$
- μ 黏度, $Pa \cdot s$
- λ_L 液膜导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
- λ_w 材料的导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
- δ_w 管壁厚度, mm
- ϕ 查表系数

ρ 密度, kg/m^3
 ν 动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
 下标
 i 管侧
 O 壳侧
 L 液体
 w 管壁
 m 管子中径

参考文献:

[1] 何睦盈, 蔡宇凌. 机械蒸汽再压缩(MVR)技术的发展及应用[J]. 广东化工, 2013, 40(17): 115-116.

[2] 史晓平, 胡修慈. 竖管降膜蒸发器的布料装置[J]. 化学工程, 1990, 18(4): 14-18.
 [3] 夏清, 陈常贵. 化工原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005: 226-227.
 [4] E U 施林德尔. 换热器设计手册: 第三卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 85-89.
 [5] NUMRICH R. Heat transfer in turbulent falling films [J]. Chemical Engineering & Technology, 1995, 18: 171-177.
 [6] 孙凤丹. 换热器中单管流动和传热的 CFD 模拟[D]. 天津: 天津大学, 2012.
 [7] 郑伟业. 蒸发式冷却器传热传质的实验研究及数值模拟[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.

【上接第5页】

(3)随着停留时间的增长, 甲基橙分子逐渐被高能粒子降解, 在停留时间 160 min 时甲基橙被降解为 NO_3^- , $\text{HOOCCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3^-$, $(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ 等物质。

参考文献:

[1] 李长嘉, 潘成忠, 雷宏军, 等. 1992-2008 年我国工业废水排放变化效应[J]. 环境科学研究, 2013, 26(5): 569-575.
 [2] 林海波, 伍振毅, 黄卫民, 等. 工业废水电化学处理技术的进展及其发展方向[J]. 化工进展, 2008, 27(2): 223-230.
 [3] BIZANI E, FYTIANOS K, POULIOS I, et al. Photocatalytic decolorization and degradation of dye solutions and wastewaters in the presence of titanium dioxide[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 136(1): 85-94.
 [4] 任南琪, 周显娇, 郭婉茜, 等. 染料废水处理技术研究进展[J]. 化工学报, 2013, 64(1): 84-94.
 [5] 韩瑜, 闫丹阳, 潘婷婷. 染料废水处理的工艺技术分析 and 研究进展[J]. 科技视界, 2013(28): 15.
 [6] 张旋, 王启山. 高级氧化技术在废水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2009, 35(3): 18-22.
 [7] 陶亮, 陈砺, 严宗诚, 等. 介质阻挡放电等离子体技术处理难降解有机废水的研究进展[J]. 化工环保, 2009, 29(6): 509-513.
 [8] JIANG B, ZHENG J T, LU X, et al. Degradation of organic dye by pulsed discharge non-thermal plasma technology

assisted with modified activated carbon fibers[J]. Chemical Engineering Journal, 2013(215/216): 969-978.
 [9] HUANG F M, CHEN L, WANG H L, et al. Degradation of methyl orange by atmospheric DBD plasma: Analysis of the degradation effects and degradation path[J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70(1): 43-47.
 [10] MONICA M, NICOLAE B M, VASILE I P. Degradation of pharmaceutical compounds in water by non-thermal plasma treatment[J]. Water Research, 2015(81): 124-136.
 [11] 文凤, 何劲松, 王戎. 介质阻挡放电等离子体对雅格素红 3BF 的脱色处理研究[C]//2012 威士邦全国印染行业环保年会. 2012.
 [12] 赵菁, 张改, 马爱洁, 等. DBD 等离子体对蒽醌染料废水的脱色[J]. 净水技术, 2014, 33(5): 48-52.
 [13] 杨长河, 曹志荣, 丁蕉, 等. 介质阻挡放电等离子体处理酸性大红 GR 废水[J]. 水处理技术, 2012, 38(5): 48-52.
 [14] 童沈阳. 甲基橙在酸性溶液中的变色机理[J]. 化学通报, 1980, 3(8): 32-37.
 [15] HUANG F M, CHEN L, WANG H L, et al. Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 162: 250-256.
 [16] CHANDANA L, REDDY P M K, SUBRAHMANYAM C. Atmospheric pressure non-thermal plasma jet for the degradation of methylene blue in aqueous medium[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 282: 116-122.