

板壳式降膜蒸发器结构及性能研究

吴金星 董其伍 刘敏珊 魏新利 王学生

(郑州工业大学热能工程研究中心)

摘要 结合板壳式换热器和板式蒸发器的结构特点,在高效水平管喷淋式降膜蒸发器的基础上,开发一种新型板壳式降膜蒸发器,理论分析和实验结果均表明,以椭圆腔板束为蒸发内件的新型蒸发器,蒸发速度快,传热效率高。

关键词 板壳式;降膜;蒸发器;椭圆腔板束;传热性能

中图分类号 TQ051.62

1 概述

吸收式热泵系统是近年来发展起来的以工业废热为动力的节能设备。系统中的蒸发器(包括溶剂蒸发器和溶液发生器)金属耗量占整个系统的 60% 以上,并且是回收废热的关键设备。因此,提高蒸发器的传热效率,减小设备体积,对于节能降耗及吸收式热泵系统的推广应用,都具有重要意义。

水平管喷淋式降膜蒸发器(Horizontal Spray Falling Film Evaporator 以下简称 HSFFE)是美国 Aqua-Chem 公司^[1]在 60 年代后期开发的一处高效蒸发设备。其结构主要由壳体、水平换热管束、液体分布器三部分组成,如图 1 所示。工作时,溶液由液体分布器均匀地喷洒到水平管束上,沿管束两侧向下流动形成液膜,液膜吸收管内蒸汽冷凝放出的热量而部分蒸发,未蒸发部分借助重力流向下一排管子,最终汇集到底部液室,这部分溶液与进料溶液一起经循环泵打回分布器进行再次蒸发。二次蒸汽从蒸发室顶部排出。同时,加热蒸汽进入换热管内冷凝,冷凝液从管子的另一侧排出。这是一个管外溶液蒸发、管内蒸汽冷凝的双侧相变传热过程。

据文献^[2,3]报道,HSFFE 与传统的蒸发器相比较,具有传热系数高,有效温差损失小,溶液分布均匀等多项优点,尤其在小热流密度和小温差下,仍然具有很高的传热系统。其传热系数比浸没式池式沸腾高 3~5 倍,比垂直管降膜蒸发器高 1 倍左右,因而倍受国内外学者的关注。国外已应用于海水淡化、化学工程、制冷工程和低品位余热利用等方面^[4,5]。

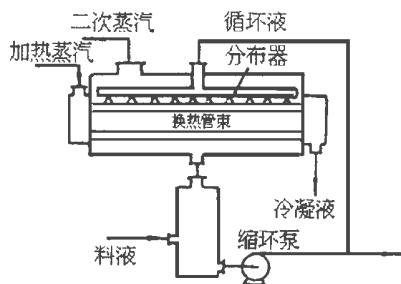


图 1 水平管喷淋式降膜式蒸发器示意图

收稿日期:1997-08-21

第一作者 男 1968 年 6 月生 硕士学位

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

板式蒸发器是由许多块金属波纹板并列组装而成,加热介质和蒸发介质通过板片间隙进行间壁传热,板间距很小,蒸发介质在板面上呈膜状流动,特别适用于粘度小、不易结垢的物料的蒸发。它具有传热效率高,结构紧凑,蒸发强度大,能耗低,金属耗量少,节约管材,造价低廉,容易清洗等诸多优点。

新型板壳式降膜蒸发器吸取了板式蒸发器的上述优点,在水平管喷淋式降膜蒸发器的基础上,以新型传热元件——椭圆腔板束代替圆管束作为蒸发内件,从而改善了管外降膜蒸发过程中液膜的流动状况,同时也提高了管内蒸汽的冷凝速率,增大了传热量。因此,有效地提高了蒸发效率。

2 实验装置说明

2.1 实验目的

为了进一步提高 HSFFE 的传热性能,减小设备体积,国内、外许多学者进行了多方面的研究,主要包括强化传热和探索最佳结构参数及操作条件两个方面。图 2 为新型板壳式降膜蒸发器实验流程简图。主要由三部分组成:(1) 降膜蒸发器,为实验装置的主体部分;(2) 料液供应部分;(3) 蒸汽冷凝液收集测量部分。实验板束内采用蒸汽加热,加热蒸汽由锅炉提供,进料液通过锅炉提供的加热蒸汽进行预热。实验时,取喷淋密度、热通量和进料温度等参数为变量,根据测量数据和传热基本方程,借助计算机可求算出不同进料量或不同热通量下的蒸发传热系数 h_e 、冷凝传热系数 h_c 和总传热系数 K 。

2.2 新型板壳式降膜蒸发器的结构说明

新型板壳式降膜蒸发器是根据薄膜传热理论,结合板壳式换热器和板式蒸发器的结构特点,在水平管喷淋式降膜蒸发器的基础上,开发出来的一种新型高效、节能蒸发浓缩设备。其结构主要由壳体、椭圆腔板束和液体分布器三部分组成,如图 3 所示。

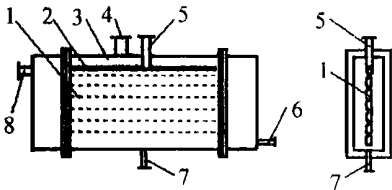


图 3 新型板壳式降膜蒸发器结构简图

- 1 蒸发内件,2 液体分布器,3 蒸发室
- 4 二次蒸汽出口,5 料液进口管
- 6 加热蒸汽出口管,7 料液出口管
- 8 加热蒸汽进口管

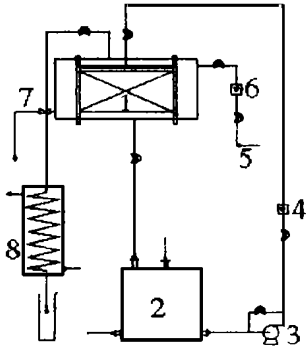


图 2 实验流程简图

- 1 新型蒸发器,2 料液贮槽,
- 3 供液泵,4 转子流量计,
- 5 加热蒸汽进口,6 蒸汽流量计,
- 7 疏水器,8 冷凝器

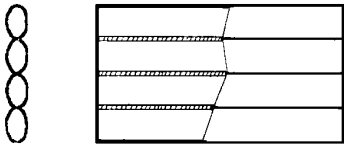


图 4 椭圆腔板束结构简图

新型板壳式降膜蒸发器与水平管喷淋式降膜蒸发器的主要区别在于:用新型传热元件——椭圆腔板束代替了水平圆管束。椭圆腔板束是以金属平板为基础,将平板轧制成半椭圆形

波纹，两块波纹板成双组对并将上下两道接口焊接在一起，中间接触处进行定距离点焊，从而形成一系列上下管相连的椭圆腔板束，相当于管壳式的管束。其结构如图 4 所示。

2.3 新型蒸发器的工作原理

该蒸发器摒弃了目前国内普遍使用的管式蒸发器那种蒸汽走管外，被蒸发介质走管内的工艺，而采用板状加热元件，让蒸汽走板腔内，被蒸发介质自上而下降膜在板面上的工艺。工作时，被蒸发介质由泵送至板束上部的液体分布器，由分布器将液体均匀地喷洒在加热板上形成液膜，液膜在板片上向下流动过程中吸收板腔内蒸汽冷凝放出的热量部分蒸发，剩余部分汇集到底部液室得到浓溶液。蒸发介质在降膜流动过程中，吸热蒸发产生的汽体不断汇集上升经除沫器由二次蒸汽管排出。

3 椭圆腔板束降膜蒸发传热机理分析

如果椭圆腔的曲率半径减小，腔壁曲率就相应增大，最终与圆管的曲率相似，反之腔壁曲率减小，最终与平板的曲率相似。本文把圆管和平板作为椭圆腔壁的极限形式，在综合分析圆管和平板的结构及其传热机理的基础上，从而说明椭圆腔板束用于降膜蒸发的优越性。

溶液由分布器喷淋到圆管顶部，呈薄膜状沿管两侧流下，直到管底汇成液滴流到下一排管子上，如图 5 所示。设液膜在圆管外表面作定常层流运动，在单位管长的液膜内取微元体，忽略二次蒸汽对液膜剪切力的作用，可认为液体流动的推动力是重力沿管外壁面的切向分力；阻力主要是粘滞力，其作用方向与液体流动方向相反，对于作用在微元体上的重力和粘滞力沿 X 方向建立平衡方程：

$$R \cdot d\varnothing \cdot \delta \cdot l \cdot \rho \cdot g \cdot \sin\varnothing = R \cdot d\varnothing \cdot l \cdot \mu \frac{du}{dy}$$
 (1)

边界条件：

当 $y=0$ 时, $u=0$
当 $y=\delta$ 时, $u=u_0$ (2)

对 (1) 式积分并结合边界条件可得降膜流动速度分布：

$$u = \frac{\rho g \delta \sin\varnothing}{\mu} y$$
 (3)

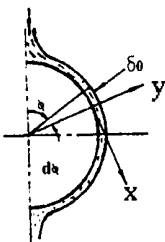


图 5 圆管束上降膜流动物理模型

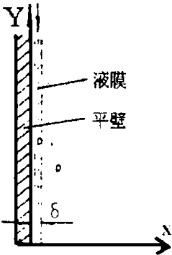
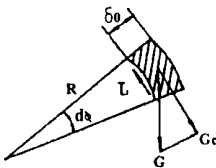


图 6 垂直平壁上降膜流动状况

由速度表达式 (3) 可以看出，液膜在一定曲率的曲面上流动时，流动速度与液体的粘度成反比，与液体的密度成正比。当液体的性质确定时，液膜的流动速度与管壁的曲率有关。在 $\varnothing = \pi/2$ 处及其附近区域，作用在液体上的重力切向分力大，流速高，液膜薄，这些条件都有

利于蒸发,因而传热效率较高。

如果改变圆管的截面形状,使相同传热面积上传热效率高的区域增大,一定能提高整个管子的传热系数。Sideman 和 D·Moalem 等理论分析^[5~7]发现,椭圆截面形状因子 $E > 1$ 的椭圆管可达到上述目的,并用实验方法进行了验证。若设最大蒸发传热膜系数为 h_{em} ,把 $h_e > 0.9h_{em}$ 的区域定义为 B 区。圆管的 B 区占整个半周长的 54%,而形状因子 $E = 2$ 的椭圆管 B 区约占半周长的 75%,因而具有更高的传热系数。

椭圆腔板束在结构上也优于圆管管束。因为椭圆腔板束相当于一列上下相连的椭圆管,不仅结构上更加紧凑,而且,上排管子两侧流下的液膜到达管子底部不再汇集成液滴,而是直接流向下一排管子两侧,这样,液膜流动速度快,流程较长,对蒸发非常有利。椭圆腔板束的凹槽对液膜有强烈的扰动作用,能促使汽泡运动和脱离液面;还能有效地消除液体偏流的影响,使流膜分布更加均匀。

喷淋在垂直平壁上的液体在重力作用下沿平壁呈膜状向下流动,如图 6 所示。由于喷淋密度变化,使得液膜的流动状态也随之改变。喷淋密度较小时,液膜流动一般为层流,随着喷淋密度增大,液膜逐渐呈现波动层流、湍流,最后达到波动湍流状态。设液体密度为 ρ ,气体的密度为 ρ_g ,液膜厚度为 δ 对于层流流动,由剪应力 τ 可得单位体积流体粘性力为 $\frac{\partial \tau}{\partial x} = \mu \frac{d^2 v}{dx^2}$,混合流体受到的重力为 $(\rho - \rho_g)g$,则可建立液膜自由降落动量方程:

$$(\rho - \rho_g)g + \mu \frac{d^2 v}{dx^2} = 0 \quad (4)$$

液膜层流流动的边界条件为:

$$\text{当 } x = 0 \text{ 时, } v = 0 \text{ 时, } \mu = \frac{dv}{dx} = 0$$

$$\text{当 } x = \delta \text{ 时, } \mu = \frac{dv}{dx} = 0$$

(5) (4) 式和 (5) 式联立,可求得液膜纵向流动沿 X 方向的速度分布为:

$$v = \frac{\rho - \rho_g}{\mu} g \delta x - \frac{\rho - \rho_g}{2\mu} g x^2 \quad (6)$$

由此可见,尽管液体在平板上流动速度有一定的波动,但总体上与圆管相比,能形成均匀的薄液膜。由于平板的光滑表面对液膜的湍动程度不够,直接用作传热元件必然造成热效率不高。所以,在实际应用和研究中的板片都具有表面强化结构。本文开发的椭圆腔板束也属于表面强化结构。

4 几点结论

4.1 理论分析和实验研究均表明,新型传热元件——椭圆腔板束用于降膜蒸发时,无论是结构上还是传热性能上均优于圆管束,是一种非常具有发展前途的管型。在本实验条件的范围内,与圆管束为蒸发内件的蒸发器相比,在相同的热通量或喷淋密度下,其蒸发传热膜系数可提高 29.6%,总传热系数可提高 22.2%。

4.2 在本文的实验条件下,液体雷诺数为 $Re = 500 \sim 1200$,热通量为 $q = 10 \sim 30 \text{ kW/m}^2$,对两种椭圆腔板束($E = 2, 3$)的降膜蒸发实验结果进行因次分析,回归得到了降膜蒸发

传热膜系数关联式：

$$h_e = 1.55 \times 10^{-4} \cdot \left[\frac{gk^3}{v} \right]^{1/3} \cdot E^{0.25} \cdot R_{el}^{0.18} \cdot R_{ev}^{0.51} \cdot P_r^{0.65}$$

(7)

4.3 当热通量恒定时,蒸发传热膜系数随着喷淋密度(即液体雷诺数)的增大而增大,而总传热系数随喷淋密度变化不明显,如图 7 所示。

4.4 随着热通量增大,管外蒸发传热膜系数也增大,液体的粘度随之减小,因此,液膜的流动更加均匀而稳定。但由于蒸发量增大,液体的临界喷淋密度相应提高。当热通量较大而喷淋密度低于临界值时,易造成局部“干壁”现象。

4.5 热通量变化对总传热系数影响不大。但热通量增大使管内蒸汽冷凝膜系数显著减小,而管外蒸发侧膜系数随热通量增加略有增大。蒸发传热膜系数较冷凝传热膜系数低得多,是整个传热过程的控制因素,如图 8 所示。

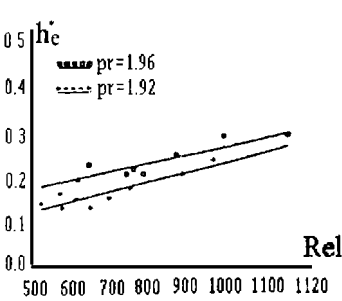


图 7 无因次传热膜系数与液体雷诺数的关系曲线

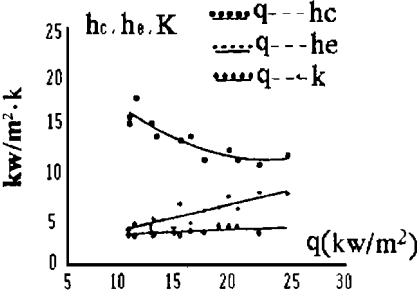


图 8 传热系数与热通量的关系曲线

参 考 文 献

1 Aqua-chem, Inc. Research and development on the horizontal spray film evaporator, O.S.W.Rept. 209, November, 1966

2 陈砺,陈仲言.水平椭圆多孔管外降膜沸腾传热的研究进展.化学工程,1990.3

3 W.H.Parken and L.S.Fletcher, Heat Transfer through Falling film Evaporation and Boiling of Horizontal Tubes, Journal of Heat Transfer, Vol. 112, 1990

4 郭宜祐,沈吟秋,宫作霖.水平管喷淋式降膜蒸发器的传热性能及其应用.纯碱工业 1986.3.4

5 D.Moalem and S.Sideman, Theoretical analysis of a horizontal condenser-evaporator tube Int.J. Heat Mass Transfer. Vol. 19, p259-270. 1976

6 S.Sideman, D.Moalem and R.Semlat, Performance improvement of horizontal evaporator-condenser desalination units; Desalination. 1977. 21. p221-233

7 D.Moalem and S.Sideman, Theoretical Analysis of a Horizontal Condenser-Evaporator Elliptical Tube; Journal of Heat Transfer. 1975

The Study on Structure and Characteristics
of the Shell-plate Falling Film Evaporator

Wu Jinxing Dong Qiwu

Liu Minshan Wei Xinli Wang Xuesheng

(The Research Center of Heat Energy Engineering, Zhengzhou University of Technology)

Abstract In this paper, based on efficient horizontal circular tube spray falling film e-
vaporator, a new kind of shell-plate falling film evaporator has been developed, which has
combined with the structural characteristics of the shell-plate heat exchanger and the plate
type evaporator. Theoretical analysis and experimental results show that the evaporator
which owned the Elliptical Cavity Plate-Bundle (Abbr.: ECPB) as the evaporating compo-
nent has faster evaporating speed and higher heat transfer efficiency.

Keywords shell-plate; falling film; evaporator; elliptical cavity plate-bundle; heat
transfer characteristic

符号说明

- G, G_c —液膜受到的重力及切向分力(N)

R —圆管外半径(m)

u —沿 X 坐标方向的速度分布(m/s)

h_e —蒸发传热膜系数(W/m^2K)

Re_l —液体雷诺数

Pr —普朗特数

δ —液膜厚度(mm)

ρ —液体密度(kg/m^3)

μ —液体动力粘度($N \cdot s/m^2$)
- g —重力加速度(m/s^2)

E —椭圆形状因子(即长、短轴之比)

v —沿 Y 坐标方向的速度分布(m/s)

h_c —冷凝传热膜系数(W/m^2K)

Re_v —汽体雷诺数

q —热通量(W/m^2)

τ —液膜剪切应力(N/m^2)

ρ —汽体密度(kg/m^3)

ν —液体运动粘度(m^2/s)