

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2025.06.003

刮膜蒸发器内液膜更新作用对蒸发性能的影响

王少平¹, 顾鑫强², 石超伟², 彭倚天^{2*}

(1. 郑纺机纺织机械股份有限公司, 河南 郑州 450001; 2. 东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要:为探究刮膜蒸发器(Agitated Thin Film Evaporator, ATFE)刮擦作用导致的液膜状态变化对蒸发器蒸发性能的影响,课题组引入液膜更新频次这一概念,针对刮板列数与刮板转速对液膜的影响进行研究。模拟采用Lee相变模型来描述液膜的蒸发过程;对液膜在相同更新频次下4种刮板列数时的蒸发速率进行探究;采用蒸发环境压比量化水蒸气压力与水蒸气温度对蒸发速率的影响。结果表明:在同一更新频次下,刮板列数为16时的蒸发器蒸发能力高于刮板列数为4时;增加刮板列数,水蒸气蒸发环境压比逐渐降低,壁面液膜分布更加均匀,促进了蒸发速率的提升;增大更新频次,液膜蒸发速率先上升后下降,表明存在最优更新频次。模拟结果为刮膜蒸发器刮板列数与刮板转速的配置优化提供了理论基础和参考。

关键词:刮膜蒸发器;液膜更新频次;非牛顿流体;刮板列数;蒸发速率

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2025)06-0016-09

Influence of Liquid Film Renewal on Evaporation Performance in Agitated Thin Film Evaporator

WANG Shaoping¹, GU Xinqiang², SHI Chaowei², PENG Yitian^{2*}

(1. Zhengfangji Textile Machinery Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to explore the impact of the liquid film state alteration caused by the wiping action of Agitated Thin Film Evaporator (ATFE) on evaporation performance of the evaporator, the concept of liquid film renewal frequency was introduced by the research group. The effects of the number of scraper columns and rotational speed of scraper on the liquid film were studied. The Lee phase change model was used to simulate the evaporation process of the liquid film. The study explored the evaporation rates for four kinds of scraper columns configurations under the same renewal frequency. Additionally, the influence of vapor pressure and vapor temperature on the evaporation rate was quantified using the evaporation environment pressure ratio. The results show that, under the same renewal frequency, the evaporation capacity of the evaporator when the number of scraper columns is 16 is higher than that when the number of scraper columns is 4. Increasing the number of scraper columns reduces the evaporation environment pressure ratio of water vapor, leads to a more uniform liquid film distribution on the wall surface, and promotes the increase of the evaporation rate. Furthermore, as the renewal frequency increases, the liquid film evaporation rate first rises and then declines, indicating the existence of an optimal renewal frequency. The simulation results provide a theoretical foundation and reference for optimizing the configuration of scraper columns numbers and the scraper rotational speed in ATFE.

Keywords: ATFE (Agitated Thin Film Evaporator); liquid film renewal frequency; non-Newtonian fluid; number of scraper columns; evaporation rate

收稿日期:2025-03-05;修回日期:2025-09-08

第一作者简介:王少平(1979)男,学士,主要研究方向为流体机械。通信作者:彭倚天(1977),男,博士,教授,主要研究方向为纺织装备。E-mail:yitianpeng@dhu.edu.cn

刮膜蒸发器(Agitated Thin Film Evaporator, ATFE)作为一种高效的蒸发设备,与降膜蒸发器不同,该设备是通过刮板对物料的刮擦作用在内壁面上形成薄膜进而提高传热和传质速率^[1],以达到快速蒸发的目的。在现代化工、医药和食品等领域中,存在大量高黏度、热敏以及易结垢等特性物料,降膜蒸发设备难以满足蒸发要求,而刮膜蒸发器具有传热系数高、适用物料范围广以及蒸发性能好等特点,已被广泛应用^[2]。自20世纪40年代刮膜蒸发器问世以来,学者们对其流动机理、液膜厚度、停留时间和蒸发传热特性等进行了大量的实验和数值模拟研究^[3-6]。

在研究中,学者们发现刮板对液膜的扰动作用十分明显。有学者通过监测液膜湍动能与耗散率分布发现,在刮板刮擦作用下,蒸发器的蒸发能力显著上升。周怒潮等^[7]对刮膜蒸发器内气、液两相液膜流场进行数值模拟,发现增加刮板的列数会增大圈形波内的平均速度,湍动效应增强;然而,也会明显增加液膜飞溅现象,并减少圈形波内发生回流的区域。柳斌等^{[8]13}对液膜分布进行了一定研究,发现随着刮板转速增加,液膜更新更加充分,流场湍动能增加,液膜分布更加均匀。Pawar等^[9]通过CFD软件创建了刮膜蒸发器的三维模型,着重讨论了刮擦作用对物料流动状态的影响。在蒸发器运行时,层流对传热的削弱作用一直是需要解决的问题。研究发现环形转子的剪切速度比带刮板转子低10~100倍;同时刮板前端动能耗散率要远大于其他区域,这也说明刮膜蒸发器内部的湍流主要是由刮擦作用导致的。

刮擦作用对蒸发器蒸发能力的影响不容忽视。皮丕辉^[10]以黏性流体甘油为物料,对内冷刮板式刮膜蒸发器进行了探索,发现总传热系数和液膜传热系数均随刮板转速增加而增大,且低转速区域的传热系数增大幅度大,达到一定刮板转速后,2个系数的增加幅度减小。柳斌等^{[8]9}同样对刮板的刮擦作用进行了研究,发现刮擦作用能促使物料向下流动,增大了壁面与液膜间的传热系数;同时研究还发现了液膜波动的波峰与波谷出现在2个刮板中间,过大的刮板转速会导致物料飞溅和越过转子扰流,使蒸发壁面处的物料含量减少,因此在确定刮板转速时,应将液膜波动这一因素考虑进去。在对刮板蒸发器的进一步的研究中,学者

们开始关注刮板转速与刮板列数对蒸发器换热性能的影响。Juyal等^[11]在改变刮板列数时发现,当刮板列数从2增加到6时,液膜换热系数提高了80.6%。虽然刮板转速的提高同样会对液膜换热系数的提高有一定促进作用,但其效果要小于刮板列数的改变,且过高或过低的刮板转速都会导致较低的传热效率。综合考虑刮板列数与转速对蒸发的影响,学者们认为从第1个刮板经过液膜上的某一点开始,到下1个刮板经过该点结束,这段时间为液膜的相对稳定时间,即液膜上该点被刮板刮擦的周期^[12],进而液膜上该点每秒被刮擦的次数则为相对稳定时间的倒数,即液膜上该点的更新频次。

需要注意的是上述关于刮擦作用对液膜的影响主要集中在刮板转速或刮板列数单参数的影响上,对于2者的综合作用,仅是提出了相关概念,并未进行深入探讨,且研究中假设物料为牛顿流体。事实上,对于非牛顿流体,刮板转速与列数会影响其黏度的分布,液膜出现剪切稀化区域,使得蒸发情况更加复杂。为此,针对非牛顿流体,课题组通过改变刮板列数与转速,并将其与液膜更新频次联系,进而分析更新频次对蒸发效率的影响。首先,对比分析了不同刮板转速下液膜的状态,并据此进一步阐述了蒸发器的工作机制;然后,利用液膜更新频次这一概念将刮板列数与转速的变化结合,分析发现即使是在同一更新频次下,其蒸发效率也不尽相同。根据上述现象改变刮板列数与转速以提升蒸发效率,并通过内部水蒸气分布及蒸发环境压比等信息研究了其内在原因。

1 模型介绍

1.1 物理模型创建

课题组采用FLUENT软件进行数值模拟,刮膜蒸发器模型主要尺寸^[13]为:高度为100.0 mm,内径为120.0 mm,外径为164.0 mm,刮板宽度为2.0 mm,刮板与蒸发器壁面的间距为0.5 mm。因模型具有对称性,为简化计算,采用1/4的三维周期网格模型,计算区域有限元网格采用四面体填充^[14]。对壁面和刮板前端部分区域进行了局部加密。经网格无关性验证,当网格最小尺寸为0.4 mm,网格总数为 3.28×10^6 时,数据较为稳定,且所需计算资源较少。刮膜蒸发器模

型与1/4网格模型如图1所示。

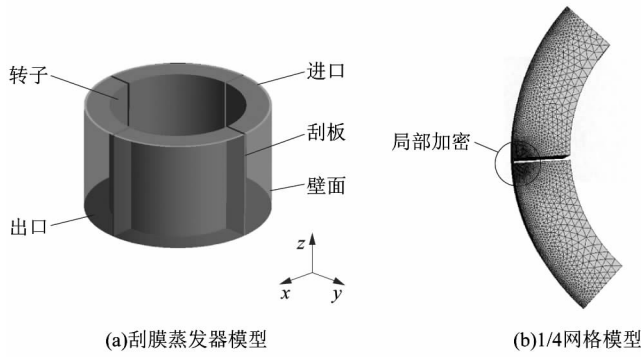


图1 刮膜蒸发器模型与1/4网格模型

Figure 1 Model and 1/4 grid model of ATFE

1.2 求解设置与控制方程

由于蒸发过程主要是由温差驱动的,综合考虑刮膜蒸发器内气、液两相的流动情况,采用VOF模型进行模拟计算,假设流体为不可压缩流体^[15]。物料以0.41 g/s的质量流率从进口流入,出口采用压力出口,采用单参考系(Single Reference Frame,SRF),即流体域转速为120 r/min,转子相对于流体域的转速为0 r/min,外壁面绝对速度为0 r/min。

在计算中,需要考虑动量守恒方程、连续性方程以及能量方程。动量守恒方程可以描述为^[16]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; \mathbf{v} 为速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为时间, s ; p 为静态压力, Pa ; $\rho \mathbf{g}$ 为重力体积力, N ; \mathbf{g} 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; \mathbf{F} 为外力体积力, N ; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量。

旋转轴平行于 z 轴,相对速度计算公式为:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{v}_r 为流体微元相对于旋转坐标系的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\boldsymbol{\Omega}$ 为角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; \mathbf{r} 为旋转坐标系中的位置, m 。

在旋转坐标系中,连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_r) = 0 \quad (3)$$

在刮膜蒸发器内流体的热交换不可忽略,因此需要考虑能量方程。能量方程可以表述为一个系统单位时间内总能量的改变等于单位时间内进入系统的净热

流量加上外界对系统做的功,即^[17]:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} T) = \text{div}\left(\frac{\beta}{c_p} \text{grad } T\right) + s_{\text{liq}} \quad (4)$$

式中: T 为流体温度, K ; \mathbf{v} 为速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; c_p 为流体比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; β 为传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; s_{liq} 为流体机械能转化为热能的部分, W 。

由于笔者在本研究中假设液体的黏性作用不会将流体机械能转化为热能,并且流体内部没有热源,因此将 s_{liq} 设为零。

考虑到刮膜蒸发器内存在复杂的剪切流和旋转流,所以采用 $\kappa\text{-}\omega$ SST低雷诺数湍流模型能够比其他计算模型得到更准确的计算结果^[18]。该模型能够准确地处理壁面边界层问题,在近壁面区域具有更好的精度和算法稳定性,该模型在实际工程领域得到广泛应用^[19-20]。

1.3 模拟介质与传热模型

模拟介质采用马铃薯悬浊液,为假塑性流体^[21]。其主要特征是:在受到剪切力时,会发生剪切稀化现象,即黏度会迅速下降至无穷剪切黏度;而当剪切力消失后,黏度又会恢复至零剪切时的状态。该模拟介质流变特性服从幂律模型,方程为:

$$\mu = k \cdot \gamma^{(n-1)} \quad (5)$$

$$\mu_\infty < \mu < \mu_0 \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_\infty &= \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \mu; \\ \mu_0 &= \lim_{\gamma \rightarrow 0} \mu. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: μ 为流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_∞ 为流体受到无穷大剪切力时的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_0 为流体不受剪切力时的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; γ 为剪切速率, s^{-1} ; k 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$,与剪切速率无关^[22]; n 为非牛顿指数,为无量纲量,其调控非牛顿性质, $n < 1$ 时为剪切稀化, $n > 1$ 时为剪切稠化。

模拟介质马铃薯悬浊液的主要参数如表1所示。

表1 模拟介质马铃薯悬浊液的主要参数

Table 1 Main parameter of potato suspension for simulation medium

本构模型	稠度系数 $k/(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	非牛顿 指数 n	$\mu_0/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\mu_\infty/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
幂律模型	4.74	0.38	5.0	0.0

为简化计算,忽略黏温特性与物料浓度的影响,设

置壁面温度为 110.00 °C,进料温度为 96.00 °C,物料饱和温度为 100.00 °C^[23]。由于蒸发主要受温差驱动力的影响,因此采用 Lee 相变模型来描述其蒸发过程,其方程如下^[24]:

$$S_v = \lambda \cdot \frac{\alpha_l \rho_l (T_l - T_{sat})}{T_{sat}}, T_l \geq T_{sat}; \quad (8)$$

$$S_l = \lambda \cdot \frac{\alpha_v \rho_v (T_{sat} - T_v)}{T_{sat}}, T_v < T_{sat} \circ \quad (9)$$

式中: S_v 为蒸发过程中的传质速率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$; α_l 为液相体积分数; ρ_l 为液相密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; T_l 为液相温度, °C; T_{sat} 为饱和温度, °C; S_l 为冷凝过程中的传质速率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$; α_v 为气相体积分数; ρ_v 为气相密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; T_v 为气相温度, °C; λ 为控制蒸发过程剧烈程度的蒸发系数, s^{-1} , 在蒸发和冷凝的实际应用中, λ 的取值范围一般为 $0.1 \sim 1.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 而在蒸发沸腾算例中, λ 常常选用较小的值^[25], 故这里采用 0.1 s^{-1} , 并在流场稳定后进行蒸发模拟。

2 仿真结果与分析

2.1 液膜周向更新理论分析

在刮膜蒸发器运行过程中,液膜由于受到刮板的充分剪切且紧贴壁面,所以其整体温度较高,而远离壁面的圈形波的温度则较低。图 2 所示为蒸发器中液相体积分数分布云图,从图中可以发现物料在刮板的刮擦作用下分为圈形波与液膜 2 部分。图 3 所示为不同刮板转速下的物料温度与液膜体积占比,从图中可以发现圈形波温度低于液膜温度,2 者温度随着刮板转速的提高均呈下降趋势。在刮板转速为 120 r/min

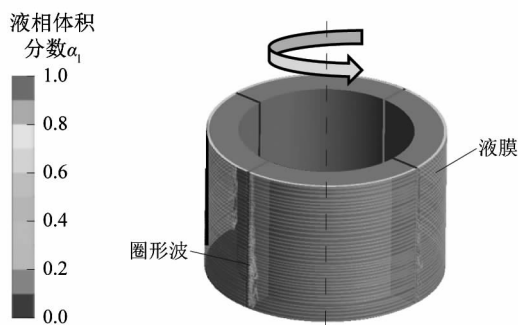


图 2 蒸发器中液相体积分数分布云图

Figure 2 Cloud chart of liquid phase volume fraction distribution in ATFE

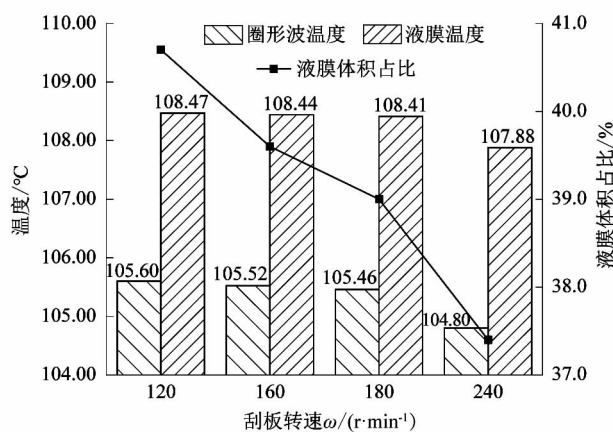


图 3 不同刮板转速下的物料温度与液膜体积占比
Figure 3 Material temperature and liquid film volume ratio under varied scraper rotational speeds

时,液膜温度为 105.60 °C,在刮板转速为 240 r/min 时,液膜温度出现明显下降,为 104.80 °C,这是因为当刮板转速增大时,壁面液膜的更新率提高,液膜的受热时间减小,导致其温度下降。同时可以观察到随着刮板转速的增大,液膜体积占比逐渐下降,当刮板转速为 120 r/min 时,液膜体积占比为 40.7%,当刮板转速为 240 r/min 时,液膜体积占比为 37.4%,液膜体积占比出现明显下降。

为了进一步探究蒸发器内蒸发情况以及液膜体积占比下降的原因,提取了不同刮板转速下刮板附近 90° 区域内液膜黏度分布情况,如图 4 所示。可以发现:随着刮板转速的提高,液膜受到的刮擦与剪切作用增强,液膜黏度逐渐下降,且黏度在刮板前端处最低,这是因为该处液膜受到的剪切作用最为明显,发生了剪切稀化现象,而液膜在发生短暂的剪切稀化后,黏度开始逐渐升高;同时,刮板转速对剪切稀化区域大小有一定影响,在刮板转速为 240 r/min 时,其剪切稀化区域较刮板转速为 120 r/min 时明显增大,黏度的下降使物料更容易被刮擦成膜,膜团更新充分,液膜更加均匀,不易发生物料堆积现象,进而降低了液膜体积占比。图 5 所示为蒸发器内物料的吸热量分布云图,可以发现液膜处的吸热量要远大于圈形波处,这与牛顿流体下的结论是类似的。上述结果进一步表明蒸发器中蒸发的主体是液膜部分^[26],圈形波主要起物质交换作用,不参与蒸发。在蒸发器内任意一点的液膜都会

在刮板的刮擦作用下周期性地与圈形波发生物质交换,进而完成了液膜的更新,实现了高效蒸发。

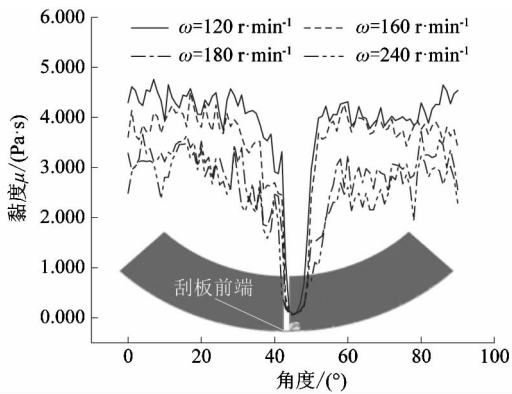


图4 不同刮板转速下液膜黏度分布

Figure 4 Distribution of liquid film viscosity under varied scraper rotational speeds



图5 蒸发器内物料吸热量分布云图

Figure 5 Cloud chart of material heat absorption distribution in ATFE

2.2 更新频次对液膜的影响

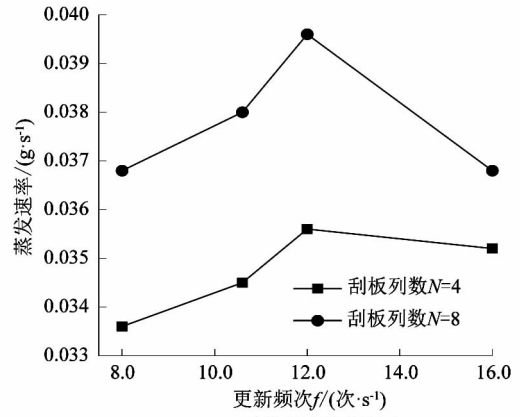
在刮膜蒸发器中,液膜的更新同时受到刮板转速与列数的影响。为统一计算,采用更新频次来衡量液膜更新情况,其计算公式为:

$$f = (\omega \cdot N) / 60. \quad (10)$$

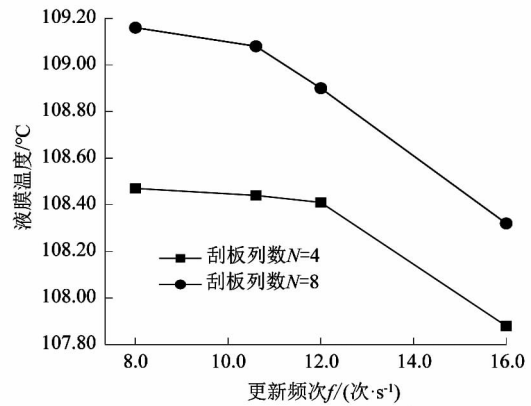
式中:ω为刮板转速,r/min;N为刮板列数。

更新频次对蒸发器蒸发效率的影响不容忽视。图6(a)所示为更新频次和刮板列数对蒸发速率的影响。由图可以发现:更新频次的提高会在一定程度上促进液膜的蒸发,但在一定更新频次后蒸发速率开始下降;在同一更新频次下,刮板列数N为8时的蒸发器蒸发速率要高于刮板列数N为4时。图6(b)所示为更新频次和刮板列数对液膜温度的影响,由图可以观察到:刮板列数N为8时的液膜温度要大于刮板列数N为4

时,且随着更新频次的提高,液膜温度呈下降趋势。当温度过低时,出现供热能力下降的情况,致使液膜的蒸发能力下降,所以蒸发速率出现下降拐点。



(a)对蒸发速率的影响



(b)对液膜温度的影响

图6 更新频次对蒸发速率和液膜温度的影响

Figure 6 Effects of renewal frequencies on evaporation rates and liquid film temperature

为了探究液膜温度变化与蒸发速率的关系,分析了更新频次和刮板列数对物料速度与液膜黏度分布的影响,如图7所示。由图7(a)和图7(b)可以发现:圈形波的轴向速度远大于液膜的轴向平均速度,且刮板列数N为8时的圈形波轴向速度低于刮板列数N为4时,这是因为在进料速度相同时,较多列刮板时刮板前端的圈形波所分得的物料量减少,轴向速度降低,液膜在壁面上停留的时间更长,吸热更加充分,因此多列刮板的液膜温度较高;进一步地,圈形波的轴向速度与液膜的轴向平均速度存在数量级上的差异,这也表明了液膜是蒸发器内蒸发的主体;同时随着更新频次的上升,液膜与圈形波的混合更加剧烈,圈形波的轴向速度上

升,在与液膜更新的过程中,赋予了液膜更高的轴向速度,液膜在轴向与周向上的更新速率的提高,使得液膜温度开始降低,且当更新频次达到一定值(如更新频次为16次/s)时,由于液膜温度过低,抑制了蒸发,从而蒸发能力下降。由图7(c)可知:即使在相同更新频次下,液膜的黏度也有差异,刮板列数为8时的液膜黏度要远低于刮板列数为4时,液膜黏度低,更容易吸热升温,因此较多刮板下液膜的温度与蒸发速率较高。

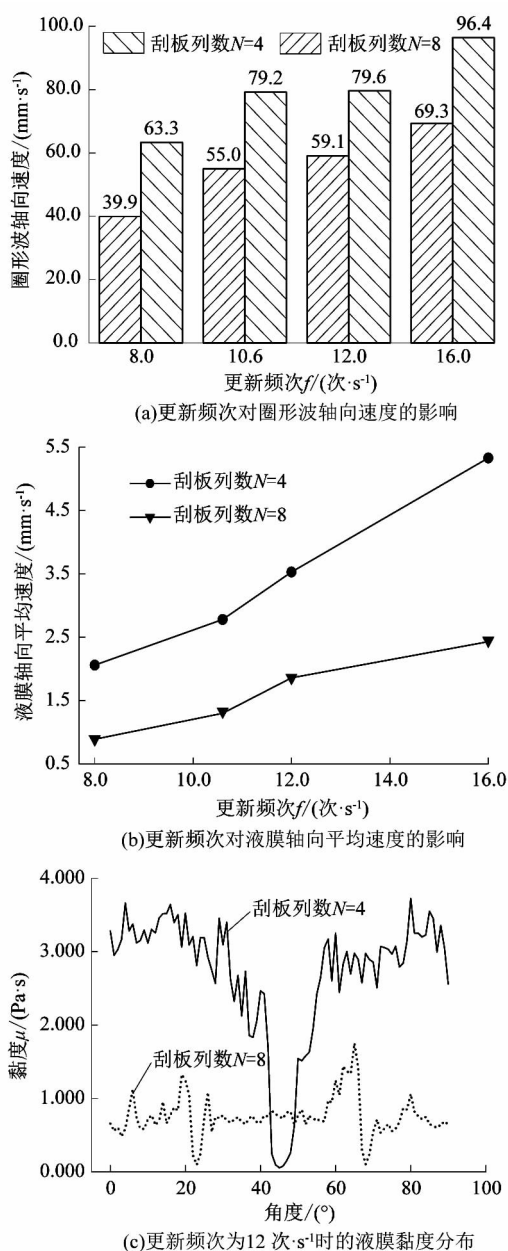


图7 更新频次对物料速度和液膜黏度分布的影响
Figure 7 Effects of renewal frequencies on material velocity and distribution of liquid film viscosity

2.3 刮板列数对液膜蒸发的影响

在相同更新频次下,刮板列数的不同会导致蒸发器的蒸发能力出现差异。为进一步分析蒸发速率随刮板列数变化规律,课题组更改刮板转速和刮板列数,同时保持液膜更新频次均为8次/s,进行了模拟实验。具体刮板转速与刮板列数的参数搭配如表2所示。

表2 液膜更新频次为8次/s时刮板转速与刮板列数的参数搭配

Table 2 Parameter combination of scraper rotational speed and number of columns at liquid film update frequency of 8 times/s

$\omega = 120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$	$\omega = 90 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$	$\omega = 60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$	$\omega = 45 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$
$N = 4$	$N = 8$	$N = 12$	$N = 16$

图8所示为不同刮板列数下的蒸发速率以及单个刮板所受压力。从图中可以发现:随着刮板列数的增加,液膜的蒸发速率上升,单个刮板所受的压力降低。这表明刮板列数的增加不仅提高了刮膜蒸发器的蒸发效率,同时可以增加其结构强度,使蒸发器适用物料黏度范围更广。图9所示为不同刮板列数下的液膜黏度与轴向平均速度,从图中可以发现:随着刮板列数增加,液膜的轴向平均速度逐渐降低,这增加了液膜在壁面上的停留时间,使得液膜受热更加充分;而液膜黏度则在刮板列数达到8后变化很小,在刮板列数为8时液膜黏度为1.610 Pa·s,而在刮板列数为12时,液膜黏度为1.608 Pa·s,可以得出增加刮板列数后液膜黏度的变化对蒸发速率的影响较小的结论。

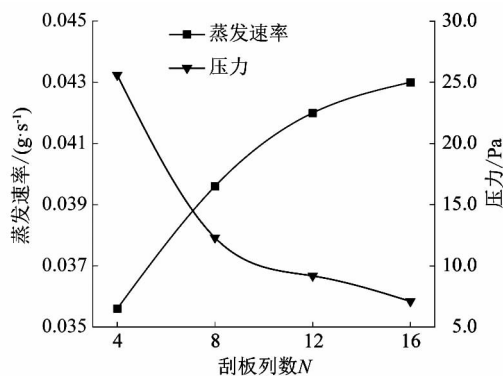


图8 不同刮板列数下的蒸发速率与单个刮板所受压力

Figure 8 Evaporation rates and individual scraper pressure under different numbers of scraper columns

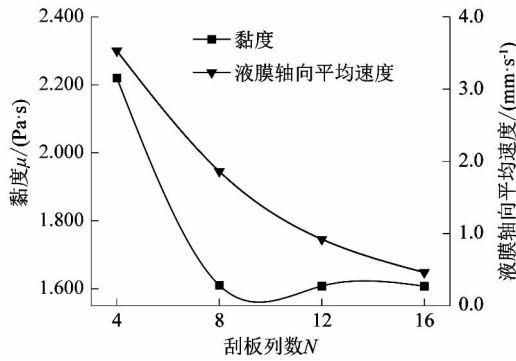


图 9 不同刮板列数下的液膜黏度与轴向平均速度
Figure 9 Liquid film viscosity and axial average velocity under different numbers of scraper columns

在刮膜蒸发器运行时,刮板列数的增多势必会影响其内部水蒸气的状态。为进一步探究刮板列数对蒸发速率的影响,提取了不同刮板列数(1/4 模型)下的水蒸气压力与水蒸气温度的分布云图,分别如图 10 和图 11 所示。从图中可以发现:液膜附近的水蒸气压力随刮板列数的增加而逐渐下降,而水蒸气温度随刮板列数的增加而上升,同时可以在圈形波附近的水蒸气温度较高。为量化水蒸气压力与温度对液膜蒸发速率的影响,采用蒸发环境压比这一概念来描述,即水蒸气实际压力与水蒸气温度对应的饱和压力之比。图 12 所示为刮板列数对蒸发环境压比与蒸发速率的影响,可以发现:随着刮板列数的增多,液膜附近蒸发环境压比逐渐下降,蒸发速率逐渐上升,这与现有研究结论是相符合的。

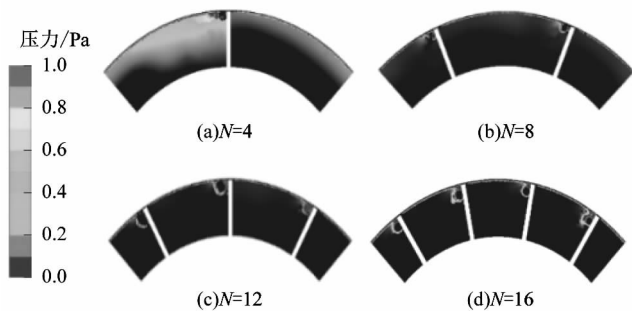


图 10 不同刮板列数下水蒸气压力分布云图
Figure 10 Cloud chart of water vapor pressure distribution under different numbers of scraper columns

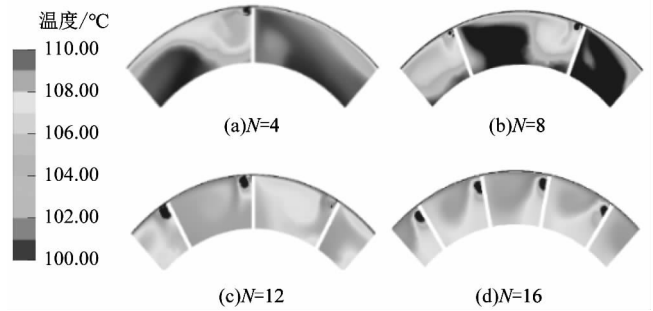


图 11 不同刮板列数下水蒸气温度分布云图
Figure 11 Cloud chart of water vapor temperature distribution under different numbers of scraper columns

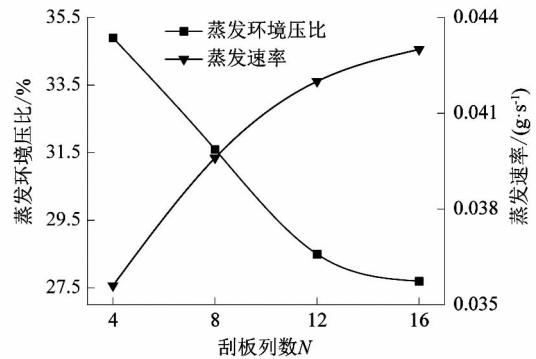


图 12 刮板列数对蒸发环境压比与蒸发速率的影响

Figure 12 Influence of number of scraper columns on evaporation environment pressure ratio and evaporation rate

蒸发器内的气体运动状态会对液膜产生扰动进而影响蒸发速率。如图 13 所示为不同刮板列数下的气体流动轨迹云图,在保持更新频次不变的情况下,随着刮板列数的增多,液膜附近气体的速度降低,且形成了涡流。虽然较快的气体速度可以加快水蒸气从液态到气态的转变速率,但在刮板高速旋转时,水蒸气易发生堆积,从而增加了液膜附近的蒸发环境压比;同时刮板列数的增多使得液膜附近的涡流分布更加规律,对液膜的扰动更加均匀。图 14 所示为不同刮板列数下的铺膜占比与液膜厚度方差,从图中可以发现:随着刮板列数的增多,液膜厚度方差减小,说明液膜更加均匀,且铺膜占比得到提高,蒸发面被充分利用,极大地提高了蒸发速率。

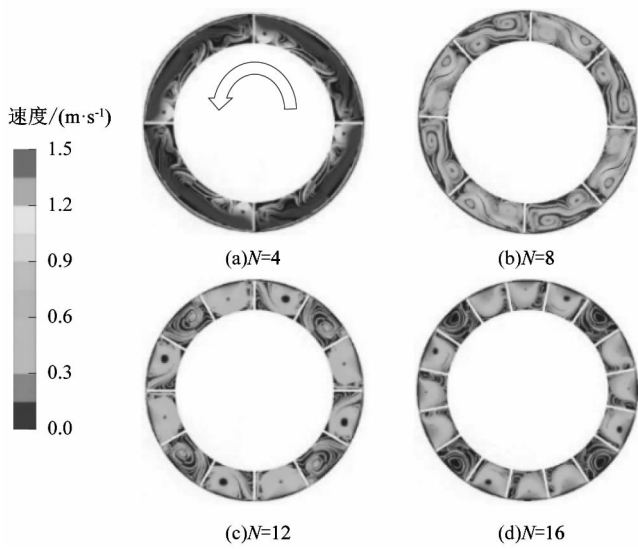


图 13 不同刮板列数下的气体流动轨迹云图
Figure 13 Cloud chart of gas flow trajectory under different numbers of scraper columns

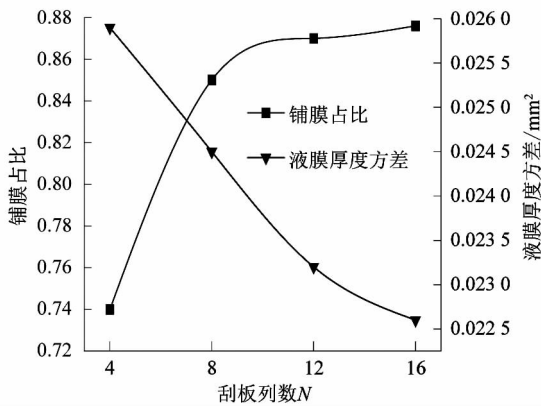


图 14 不同刮板列数下的铺膜占比与液膜厚度方差

Figure 14 Proportion of film spreading and liquid film thickness under different numbers of scraper columns

为进一步分析其液膜均匀的原因,提取了更新频次为 8 次/s 时不同刮板列数(1/4 模型)下的物料径向速度,如图 15 所示。可以发现圈形波处的物料径向速度变化要远大于液膜处,这表明该处发生了剧烈的物质混合。同时随着刮板列数的增多,其液膜处的径向速度变化趋弱,这说明液膜所受的径向扰动减小,液膜更均匀地铺展在壁面上,对蒸发器的蒸发性能起到了促进作用。

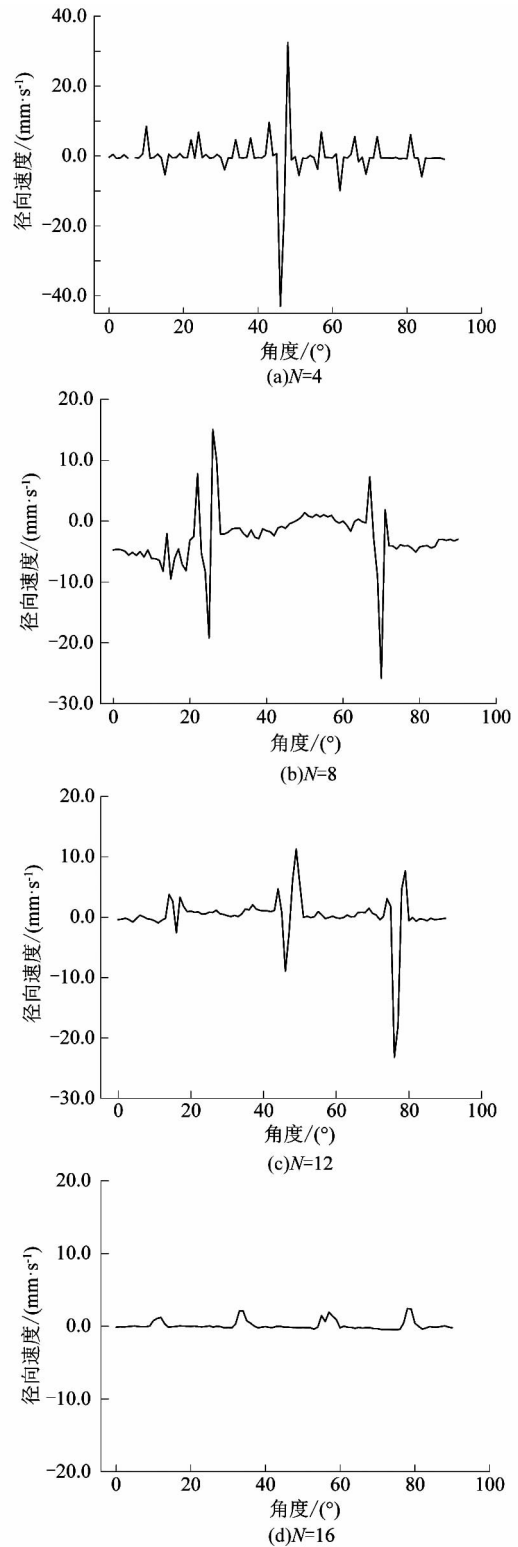


图 15 更新频次为 8 次/s 时不同刮板列数下的物料径向速度分布

Figure 15 Radial velocity distribution of material under different numbers of scraper columns at renewal frequency of 8 times/s

3 结语

课题组基于 CFD 技术采用, Lee 相变蒸发模型, 研究了不同更新频次和刮板列数下刮膜蒸发器的蒸发性能, 可以得出以下结论:

1) 蒸发器内蒸发的主体是液膜, 刮板的刮擦作用使液膜周期性地与圈形波发生物质交换, 进而完成液膜的更新, 实现高效蒸发。

2) 当液膜更新频次一致时, 随着刮板列数的增加, 液膜附近的水蒸气蒸发环境压比逐渐降低, 同时液膜的分布更加均匀, 有利于蒸发器蒸发性能的提升。

3) 同一刮板列数下, 增大更新频次, 液膜蒸发速率先上升后下降, 存在刮板列数与刮板转速的最优搭配。

4) 液膜附近有规律的涡流提高了蒸发速率, 然而关于涡流的形态对蒸发速率的影响仍待进一步研究。

该研究为刮膜蒸发器刮板列数与转速的配置设计提供了重要的参考。

参考文献:

- [1] BOTT T R, ROMERO J J B. Heat transfer across a scraped surface [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1963, 41(5): 213-219.
- [2] 郑所生, 黄瑶, 邹赜, 等. 刮膜蒸发器内非牛顿流体流场特性数值模拟[J]. 物理学报, 2022, 71(5): 197-208.
- [3] APPELHAUS D, JASCH K, JAHNKE S, et al. A new approach to simulate the fluid dynamics in a wiped film evaporator using Modelica [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 161: 115-124.
- [4] JASCH K, GRÜTZNER T, ROSENTHAL G, et al. Experimental investigation of the residence time behavior of a wiped film evaporator [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 165: 162-171.
- [5] PAWAR S B, MUJUMDAR A S, THORAT B N. Flow pattern and heat transfer in agitated thin film dryer [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2011, 50(7): 687-693.
- [6] 汪蕊, 贺小华. 薄膜蒸发器内流体流动模拟[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2004(1): 72-77.
- [7] 周怒潮, 邵虎跃, 贺小华. 刮板结构对薄膜蒸发器内气液两相液膜流场影响分析[J]. 压力容器, 2013, 30(4): 29-34.
- [8] 柳斌, 张俊梅, 林龙龙, 等. 刮膜式分子蒸馏技术精制山茶油的数值模拟[J]. 化学工程, 2021, 49(4): 7-13.
- [9] PAWAR S B, MUJUMDAR A S, THORAT B N. CFD analysis of flow pattern in the agitated thin film evaporator [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012, 90(6): 757-765.
- [10] 皮丕辉. 内冷式刮膜薄膜蒸发器传热蒸发与应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2003: 120-121.
- [11] JUYAL D, SAWHNEY I K, DODEJA A K, et al. Design aspect of scraper blade assembly for enhancing film heat transfer coefficient of scraped surface heat exchanger [J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 40(2): e12408.
- [12] 王珂鑫. 刮膜蒸发过程建模及其控制技术研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2015: 13-14.
- [13] GU X Q, HUANG Y, ZOU K, et al. Influence of liquid film shape on evaporation performance of agitated thin film evaporator [J]. Chinese Physics B, 2024, 33(8): 084701.
- [14] 王志文, 陈入领, 黄瑶, 等. 薄膜蒸发器内流场分布与传输特性数值模拟研究 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 77-84.
- [15] 谭大鹏, 杨涛, 赵军, 等. 自由汇流旋涡 Ekman 抽吸演化机理 [J]. 物理学报, 2016, 65(5): 166-177.
- [16] YATAGHENE M, PRUVOST J, FAYOLLE F, et al. CFD analysis of the flow pattern and local shear rate in a scraped surface heat exchanger [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47(9/10): 1550-1561.
- [17] 高智博. 釜式蒸发器传热传质特性数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019: 29-30.
- [18] 闫展帅, 徐进良. 超临界压力 CO₂ 在水平圆管内流动传热数值分析 [J]. 物理学报, 2020, 69(4): 136-145.
- [19] KUMMITHA O R, KUMAR R V, KRISHNA V M. CFD analysis for airflow distribution of a conventional building plan for different wind directions [J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2021, 8(2): 559-569.
- [20] 俞佳阳, 员康, 韩向东, 等. 不同沙粒质量分数对离心泵内空化流动发展的影响 [J]. 机电工程技术, 2024, 53(6): 11-15.
- [21] 汪师帅, 邹慧, 王菁, 等. 脱乙酰魔芋葡甘聚糖对马铃薯淀粉糊化及流变性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 74-77.
- [22] 张天亮. 聚酯熔体流变特性及其对纺丝组件内流场的影响研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2021: 8-9.
- [23] ŽITNÝ R, ŠESTÁK J, TSIAPOURIS A, et al. Modelling of thermal pressure forming of starch-based materials [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(4): 375-385.
- [24] JI W T, MAO S F, CHONG G H, et al. Numerical and experimental investigation on the condensing heat transfer of R134a outside plain and integral-fin tubes [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159: 113878.
- [25] 骆洋. 歧管式微通道内气液流动沸腾换热的数值模拟与实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 42-43.
- [26] KOMORI S, TAKATA K, MURAKAMI Y. Flow structure and mixing mechanism in an agitated thin-film evaporator [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1988, 21(6): 639-644.