

文章编号:0253-4339(2016)05-0112-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2016.05.112

低温流体在竖直通道中降膜蒸发研究进展

万智华^{1,2} 厉彦忠² 周媛媛²

(1 江苏建筑职业技术学院建筑设备与市政工程学院 徐州 221116; 2 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

摘 要 降膜蒸发作为一种高效传热传质技术,已经在空分领域得到了应用。本文介绍了空分膜式主冷凝蒸发器的原理和特点,从波状特性和破断特性方面阐述了下降液膜的动态特性,总结了入口流量、壁面结构、工质组分和热流密度因素对传热传质的影响,重点介绍了低温液氮在大空间平板上降膜过程的临界热流密度规律和过热壁面再湿润动态特性,并对现有竖直通道内降膜蒸发过程换热关联式进行了归纳。由于低温工质物性和通道结构的特殊性,已有的常温工质换热关联式应用于空分膜式主冷凝蒸发器的传热设计还存在较大差距。最后指出小传热温差条件下,复杂狭窄通道内低温流体降膜蒸发过程需要进一步研究。

关键词 空分;冷凝蒸发器;降膜;蒸发;传热传质

中图分类号:TB657.5; TK124; TQ051.6

文献标识码: A

Research Progress of Falling Film Evaporation of Cryogenic Fluid in Vertical Channels

Wan Zhihua^{1,2} Li Yanzhong² Zhou Yuanyuan²

(1. School of Construction Equipment and Municipal Engineering, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou, 221116, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract Falling film evaporation, which is one efficient technology of heat and mass transfer, has been used in air separation field. The principles and characteristics of the main downflow condenser/reboiler in air separation are analyzed, the dynamic characteristics of falling film are illustrated from the aspects of the wave characteristics and breakdown characteristics, the influence of inlet flow rate, wall structure, components of working medium and heat flux density on the heat and mass transfer are reviewed in this paper. The occurrence regularity of critical heat flux and the dynamic characteristics of the superheated surface rewetting with liquid film for the progress of falling film of cryogenic liquid nitrogen in the large space plate are emphasized, some available heat transfer correlations for the progress of falling film evaporation in the vertical channels are concluded. Due to the speciality of physical property and channel structure, there is a significant gap applying the existing heat transfer correlations of working medium with normal temperature to the main downflow condenser/reboiler in air separation field. At last, it is pointed out that the further study of falling film evaporation of cryogenic fluid in the complex narrow channel under the small heat transfer temperature difference is needed.

Keywords air separation; condenser/reboiler; falling film; evaporation; heat and mass transfer

由于薄膜蒸发在流量低和温差小的情况下具有良好的传热传质性能,膜式主冷凝蒸发器已经在空分装置中得到一定程度的应用。在能源紧张的今天,膜式主冷凝蒸发器的突出节能效果对客户的吸引力将会越来越大。目前,国际一流的空分制造商已经掌握了膜式主冷凝蒸发器的应用技术,也积累了一些运行经验^[1]。由于国内对于膜式主冷凝蒸发器核心技术的认识和研究并不深入,使得该技术并没有得到广泛应用,掌握竖直通

道内低温流体的流动和传热传质特性是解决上述问题的关键。

由于降膜蒸发器在化工等领域应用较广,有大量学者研究了竖直圆管和光滑平板上的降膜蒸发过程^[2-3]。Ohara J 等^[4]研究了竖直锯齿形通道内制冷剂降膜蒸发过程。目前国内外公开的关于板翅式换热器通道内流体降膜蒸发研究比较少,特别是采用低温流体工质进行研究的就更少了。这主要是因为采用低温工质做降膜蒸发实验需要考虑

很好的保温隔热,实验条件比较复杂苛刻。由于空分膜式主冷凝蒸发器两侧流动的是标准沸点低于 120 K 的低温工质液氧和氮气,其物性和常温工质存在较大差异^[5],导致常温工质的传热传质规律无法适用,因此有必要研究低温工质的降膜蒸发特性。为了便于学者进行研究,笔者对国内外流体(以低温流体为主)在竖直通道中降膜蒸发过程的研究现状进行综述,并指出目前存在的问题和将来需要进一步研究的方向。

1 膜式主冷凝蒸发器

如图 1 所示的一种空分流程,主冷凝蒸发器是空分装置中连接上、下塔的关键换热设备^[6]。它的作用是使来自上塔的液氧和下塔的氮气发生相变换热,液氧蒸发,氮气冷凝,以获得氧气和液氮产品。由于板翅式换热器的换热效率高、结构紧凑,常作为膜式主冷凝蒸发器的换热器形式。图 2 所示为一种板翅式膜式主冷凝蒸发器的示意图。

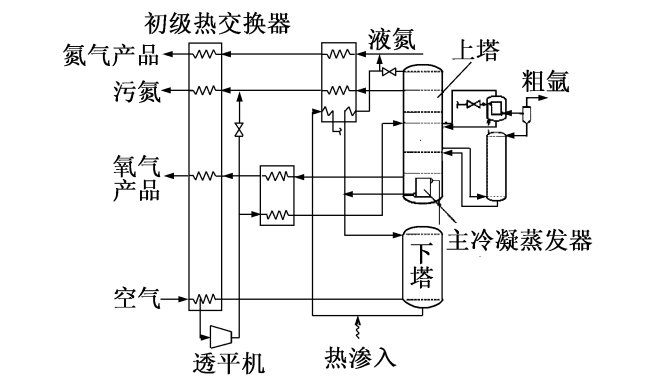


图 1 一种空分流程图^[6]
Fig. 1 Air separation plant flowsheet^[6]

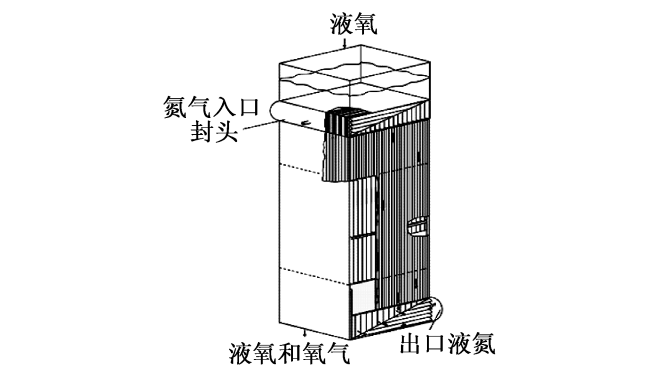


图 2 板翅式膜式主冷凝蒸发器
Fig. 2 Plate-fin main downflow condenser/reboiler

根据冷凝蒸发器浸液方式的不同,可以将其分为浴式冷凝蒸发器和膜式冷凝蒸发器,分别如图 3 和图 4 所示。传统的主冷凝蒸发器一般采用浴式,即将整

个换热器浸在液氧里,由于液氧存在一定液柱(高度可达 2 m),下端的液氧处于过冷状态,沸点升高,需要升温到饱和温度后才会蒸发,因此降低了传热效率。膜式主冷凝蒸发器中液氧通过重力的作用成膜状沿着壁面向下流动,不存在液氧的液位,沸点不会升高,氮气侧和液氧侧的换热温差可以保持恒定。一般空分用浴式冷凝蒸发器的传热温差控制在 1.3 ~ 2 ℃,而膜式为 0.7 ~ 0.8 ℃,传热温差的降低可以使得空压机的能耗降低 2% ~ 2.8%,这对于一个大型的空分设备来说是非常可观的。因此膜式主冷凝蒸发器具有广泛的应用前景^[7]。

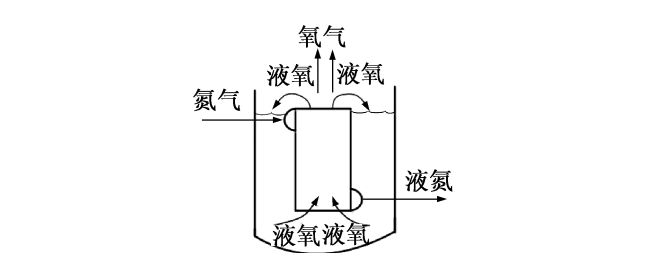


图 3 浴式冷凝蒸发器
Fig. 3 Thermosiphon condenser/reboiler

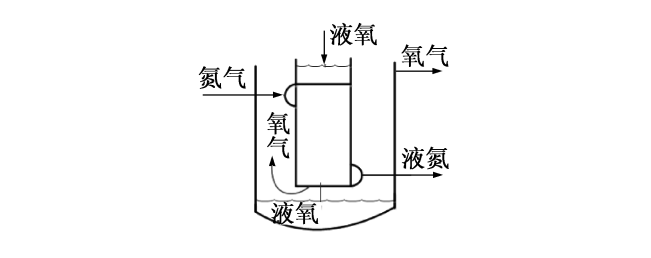


图 4 膜式冷凝蒸发器
Fig. 4 Downflow condenser/reboiler

2 动态特性

2.1 波动特性

根据垂直下降管中两相流动沸腾过程流型的分类,薄膜流动类似于环状流。在工业领域中,薄膜流动主要是湍流状态,气液界面上产生的表面波对传热和传质具有一定影响^[8],因此研究液膜表面波特性有助于分析降膜蒸发的传热传质机制。Pavlenko A 等^[9]研究表明,由液膜波动导致的对流换热作用比较微弱,但是波动会导致孤立波之间的液膜底层厚度减小,进而降低传热热阻,起到强化传热的作用。

Ohara J 等^[10]通过高速摄像的方法观察了锯齿形通道内 R123 降膜蒸发的流型,并绘制出了如图 5 所示的流型图。通过观察发现,主要存在五种流型,分别为:光滑流、波状流、滴状流、雾状流和干斑流。

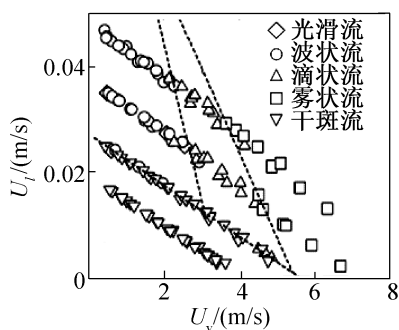


图 5 流型图^[10]

Fig. 5 Flow pattern map^[10]

2.2 破断特性

液膜在壁面上能否均匀分布决定了降膜蒸发过程的传热传质性能。但是当液膜出现破断时,壁面会产生干斑或干区,进而降低壁面和流体之间的换热系数,甚至导致换热设备的破坏。因此,为安全起见,应该避免液膜出现破断现象。

导致液膜出现破断现象的原因主要包括以下四个方面:液膜的蒸发导致孤立波之间的液膜底层逐渐变薄^[9];气相运动导致液膜的分离^[11];混合物组分中浓度梯度或液膜表面的温度梯度导致的热扩散和热毛细应力^[12];液膜温度达到临界热流密度(CHF)时,这一临界对应点又称为沸腾临界点^[13-15]。

3 传热传质影响因素

降膜蒸发是一种复杂的两相流动,影响其传热传质的因素很多,主要可以分为运行参数(如液膜流量、热流密度、入口温度、操作压力、工质种类、表面张力等)和结构参数(如壁面形式、通道尺寸、液体分布器结构等)。

3.1 入口流量的影响

当液相流量较小时,液膜易出现干斑甚至是烧干现象。例如,抚顺某化工厂 6 000 m³/h 空分塔发生爆炸事故与液氧液面过低而造成的干蒸发问题有一定关系^[7],因此液膜的流量不能太小。但是过大的流量会导致液膜厚度增加,进而增加传热热阻,降低壁面的传热性能,因此合理控制液膜的入口流量显得尤为重要^[16]。

3.2 壁面结构的影响

Aviles M L 等^[17-18]实验研究了水和乙二醇水溶液降膜蒸发过程,研究结果表明,与光滑管相比,开有沟槽的竖直平板可以提高传热性能。这是因为,开有沟槽的平板上表面液膜的波幅较高,孤立波之间的底层液膜厚度较小,减小了传热热阻。但是上述规律还

受到工质的物性的影响。另外,Aviles M L 等^[17-18]还指出,纵向开槽表面会增大临界热流密度,并阻止干斑在横向方向的扩散。

3.3 工质组分的影响

Ohara J 等^[4]研究了 R123 和 R134a 混合制冷剂在垂直矩形通道内的降膜蒸发特性,文中研究的试验工况范围为:质量通量为 28 ~ 70 kg/(m²·s),热流密度为 30 ~ 50 kW/m²,操作压力为 100 ~ 260 kPa。研究结构表明,当质量通量大于 55 kg/(m²·s)时,在干度大于 0.3 的区域,增加低沸点组分 R134a 的质量分数会降低换热系数。分析原因主要有两点:首先,当低沸点组分工质较多时,大量产生的蒸气导致通道内的压力增大,进而抑制了气体的流速,减小了气液表面间的切应力,降低了液膜的湍动效果;其次,生成的蒸气增大了气液界面的质量扩散阻力,使得液膜蒸发变得更加困难。对于干度大于 0.8 的区域,换热系数迅速降低,这是因为壁面已经出现了干斑现象,导致壁面传热性能恶化。Palen J 等^[19]研究了乙烯和丙二醇二元混合物的降膜蒸发过程,试验工况是在大气压条件下,热流密度为 3 000 ~ 25 000 W/m²,液膜雷诺数为 300 ~ 3 000,沸腾温度最高达 55 ℃。研究结果表明,二元混合物的降膜蒸发的有效换热系数比单组分的有效换热系数低 80% 多,并指出壁面过热度 and 液膜雷诺数对混合物的换热系数影响很小,主要是工质组分的影响。

3.4 热流密度的影响

根据壁面热流密度是否变化可分为定热流工况和变热流工况。但是,在实际的实验环境中,由于壁面局部换热系数分布不均匀,要做到绝对的等壁温和等热流边界条件是不可能的。Pavlenko A 等^[9]认为采用导热性好的厚壁面加热可近似等同于等壁温条件,采用导热性差的薄壁面加热可以近似等同于等热流条件。图 6 所示为当等壁温加热时,液氮降膜蒸发过程的无量纲换热系数 h' 随无量纲热流密度 q' 的变化。其中 $h' = h/h_{\text{evap}}$ 和 $q' = q/q_{\text{d,s}}$, h 和 q 分别为液氮降膜蒸发实验测出的换热系数和热流密度, $q_{\text{d,s}}$ 是形成稳定干斑时的热流密度, h_{evap} 是文献[20]采用水和制冷剂 R11 在低热流密度下降膜蒸发得出的换热系数。在热流密度达到 $q_{\text{d,s}}$ 之前,降膜蒸发换热系数随着热流密度的增加而增加,这与液膜厚度降低和液膜波动有一定关系^[9, 16, 21-23]。从图 6 还可以看出,除了热流密度为 $q_{\text{d,s}}$ 时,液氮降膜蒸发的换热系数均比常温工质的要高,这说明已有常温工质的降膜蒸发换热经验关联式并不适用于低温工质。

为了研究流动方向不同壁面位置处(壁面上端、

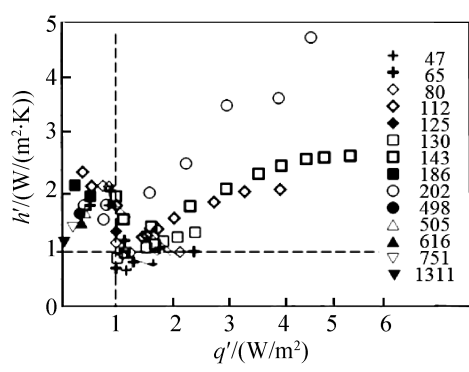


图 6 在不同雷诺数条件下 h' 随 q' 变化^[9]
Fig. 6 h' vs. q' for different Reynolds^[9]

中间和下端)的换热系数,Matsekh A 等^[11]采用长度为 64 mm 的厚铝合金平板作为加热壁面,研究了入口雷诺数为 620 时,流动方向不同位置处液膜换热系数随热流密度的变化,结果如图 7 所示。图中的 $q_{b,b}$ 、 $q_{d,s}$ 和 $q_{c,r}$ ($q_{b,b} < q_{d,s} < q_{c,r}$) $q_{b,b}$ 是充分发展泡状沸腾时的热流密度, $q_{d,s}$ 是形成稳定干斑时的热流密度, $q_{c,r}$ 是临界热流密度。在热流密度达到 $q_{b,b}$ 之前,不同壁面处的换热系数区别不大,且不随热流密度变化。当热流密度大于 $q_{b,b}$ 之后,换热系数逐渐增大,但是三个位置处换热系数增长速率并不相同。在热流密度为 $q_{b,b}$ 时,下端壁面的换热系数最大,但是随着热流密度的增加,下端壁面换热系数增长的速率在三个位置中最小,当热流密度达到 $q_{d,s}$ 时,其换热系数迅速降低,这是因为随着加热的不断进行,液膜沿着流动方向不断蒸发,液膜达到壁面下端时出现了“蒸干”现象,导致传热性能的恶化。通过实验观察发现壁面下端约有 60% 的壁面没有液膜覆盖。在热流密度介于 $q_{d,s}$ 和 $q_{c,r}$ 过程中,中间壁面处换热系数迅速超过上端和下端,当热流密度超过 $q_{d,s}$ 之后,换热系数出现了略微的下降,并低于上端的换热系数。这可能是因为中间壁面处也出现了干斑现象。与此同时,上端壁面的换热系数一直随着热流密度的增大而增大,并在临界热流密度时达到最大值。

Pavlenko A N 等^[24]指出逐渐增加热流密度情况下液体池内沸腾的临界热流密度与定热流密度下的情况有明显的不同。在一些换热器中,如配料热交换器、混合器、专业采样器等,换热器的热负荷会出现波动。为了确保传热过程的安全和稳定,有必要研究变热流密度下的低温流体降膜蒸发特性,Pavlenko A 等^[13-15, 24-27]进行了逐渐递增或周期性变化热流密度下液氮降膜蒸发的实验研究。研究指出,在逐渐增大热流密度时,当波状层流液膜逐渐消失时,壁面会出现类似“舌状”的结构,即液体射流和非湿润区域

同时存在的亚稳态结构,射流液体之间的距离与雷诺数和热流密度有关。图 8 所示为入口雷诺数为 847,热流密度为 60 kW/m²、时间为 0.362 s 时,通过高速摄像机拍摄到亚稳态结构的图像。从图中可以清楚看到 5 条明显类似“舌状”液体射流,射流之间的壁面为没有液膜覆盖的非湿润区域。

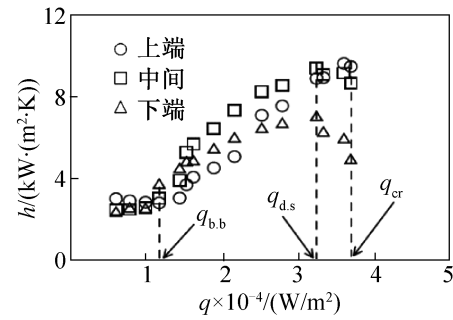


图 7 不同热流密度条件下换热系数随流动方向的分布^[11]
Fig. 7 Heat transfer coefficient distribution along the stream as a function of heat flux density^[11]



图 8 亚稳态结构^[15]
Fig. 8 Metastable regular structures^[15]

液膜降膜蒸发还应用于冷却有散热的电子设备、高性能的图像处理机、原子核反应堆、空间电子设备等,液膜冷却性能的好坏决定了上述设备的运行性能和耐用性能。Pavlenko A N 等^[28]研究了液氮冷却过热金属表面的过程,称为再湿润过程。当壁面温度从 80 K 加热升温到 200 K 左右之后停止加热,采用液氮冷却过热壁面,入口雷诺数为 554。当液氮从壁面流过时,壁面温度开始逐渐下降,壁面温度变化如图 9 所示,图中的正方形点代表壁面温度的变化,图中的直线 2 代表仅在自然对流条件下壁面温度随时间变化的直线,直线的斜率代表壁面的冷却速率。根据壁面冷却速率的变化快慢可以将整个过程划分为三个阶段。第一阶段:当时间 $t < t_{char}$ (t_{char} 是指过热壁面达到的有限过热温度 T_{lim} (对于一个大气压下的液氮, T_{lim} 近似为 110 K) 的时间),壁面冷却的速率比较低,基本上与自然对流条件下壁面的冷却速率相吻

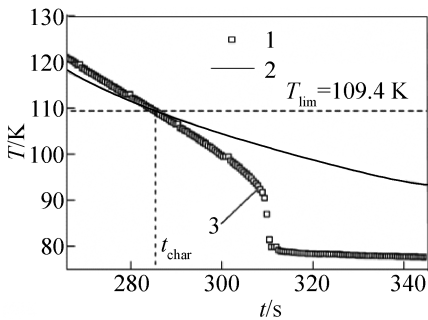


图 9 壁面温度随时间的变化^[28]

Fig. 9 Surface temperature changing with time^[28]

合,说明此时的换热系数并不是很高。通过实验观察发现,流动在前面的液膜迅速沸腾蒸发,只有靠近壁面上端被液膜湿润。第二阶段:当壁面温度达到有限过热温度 T_{lim} 时,下端壁面开始逐渐被液膜湿润,壁面温度加速降低并偏离直线 2。第三阶段:当壁面温度达到临界温度 T_{lim} (如图中点 3,温度约为 92 ℃) 之后,壁面温度出现急剧降低随后保持恒定。此时,整个壁面被液膜湿润,壁面换热以核态沸腾和蒸发为主。Pavlenko A N 等^[28] 指出整个壁面再湿润速率和

临界温度受雷诺数和初始壁面温度的影响。在数学物理模型方面,Starodubtseva I 等^[29-30] 建立过热壁面下低温流体再湿润的数学模型,经验证该模型可以计算液膜前端湿润速率及加热壁面的温度随时间和位置的变化。

4 换热关联式

为了更好地计算降膜蒸发过程传热量的大小,必须获得降膜蒸发的换热关联式。大量学者通过实验的方法得到了许多常温工质在竖直圆管(管内和管外)的降膜蒸发换热关联式,而平板和锯齿形通道内降膜蒸发过程的换热关联式研究较少,有关低温流体的研究就更少了。笔者将其中具有代表性的换热关联式列于表 1,为低温流体降膜蒸发换热关联式的研究提供参考。从表中可以看出,不同工质在不同通道结构中的降膜蒸发换热关联式的形式和适用范围存在较大差异,考虑到空分用膜式主冷凝蒸发器的运行工况和结构特点,有必要研究并提出适用于低温液体降膜蒸发过程的换热关联式,以便于进行工程传热设计计算。

表 1 不同文献的换热关联式
Tab. 1 Heat transfer correlations in different articles

通道形式	换热关联式	研究工况(使用范围)	文献
管外	$h = KI^{\Pr} \mu^{\Pr} \mu$, 其中 $K = 201$, $Pr = 0.26 \pm 0.12, Pr_{\mu} = -0.41 \pm 0.05$	纸浆黑液,蒸气加热, 固体质量分数 0.25 ~ 0.55	Johansson M 等 ^[31]
管外	$h = KI^{\Pr} \mu^{\Pr} \mu$, 其中 $K = 489$, $Pr = 0.089 \pm 0.16, Pr_{\mu} = -0.23 \pm 0.06$, 当 $\mu = 0.57$ 时, $K = 558$, $Pr = 0.073 \pm 0.11, Pr_{\mu} = -0.21 \pm 0.04$	纸浆黑液,蒸气加热, $10 < Pr_L < 2\,800$	Karlsson E 等 ^[2]
管内	$h = 1.6636 Re_L^{-0.2648}$ $Pr_L^{0.1592} (\rho_L^3 \lambda_L^3 g / \mu_L^2)^{1/3}$	蔗糖水,蒸气加热, $1\,500 < Re_L < 3\,000$, $2.5 < Pr_L < 200$	Prost J S 等 ^[32]
管内	$h = 14009.87 q_w^{0.0764} Re_L^{-0.5391}$	溴化锂溶液,电加热,内径 21 mm,加热 长度 760 mm,热流密度 q_w 介于 5 000 ~ 30 000 W/m ² , $Re_L < 500$	石程名等 ^[33]
管内	$h = 77.3469 W_{in}^{-0.8058} q_w^{0.2422}$	溴化锂溶液,电加热,内径 21 mm,加热长度 760 mm,溶液浓度 W_{in} 介于 50% ~ 58%,热流 密度 q_w 介于 10 ~ 25 kW/m ² , $Re_L < 500$	宫世吉 ^[34]
微通道平板	$h = 0.012 Re_L^{0.46} Pr_L^{0.33} \lambda_L / d$	酒精,电加热, $1.7 < Re_L < 4.6, Pr_L = 7.24$, 壁面和流体传热温差介于 8 ~ 14 ℃,热流密 度 q_w 介于 574 ~ 1 565 W/m ²	Monnier H 等 ^[3]
锯齿形通道	$h = 32(1.2 \times 10^{24} Re_{LO}^{-8.8} +$ $X_{tt}^{-6.5})^{0.1} h_{LO}$	制冷剂 R123,电加热,式中 h_{LO} 和 Re_{LO} 分别为 单相液体流过的换热系数和雷诺数, X_{tt} 为 Lockhart-Martinelli 数	Ohara J 等 ^[4]

5 结论与展望

目前,有关低温工质降膜蒸发研究报道并不多,主要研究的是大空间平板上低温液氮的临界热流密度规律及过热壁面再湿润过程,但是这两种工况与空分膜式主冷凝蒸发器蒸发侧的流动工况存在较大差距,例如:上述工况中壁面和液膜之间存在较大的换热温差,而后的温差一般控制在 $0.7 \sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,属于小温差换热过程;前者研究的是大空间光滑平板上的开式降膜过程,而后者是狭窄封闭复杂结构通道内的降膜过程。因此,为了掌握膜式主冷凝蒸发器降膜蒸发过程的机制及规律,还需要从以下几个方面作进一步研究:首先,研究低温流体在锯齿形、打孔形、波纹形等复杂结构通道内的降膜蒸发特性,利用可视化技术观察液膜的分布情况和破断规律,分析环境漏热、轴向导热、壁面材料对传热传质的影响;其次,研究小温差换热时低温流体降膜蒸发过程传热特性,并提出相应的换热关联式;最后,完善已有的竖直通道内低温流体降膜蒸发数学理论模型,分析降膜蒸发过程的机制。为降低低温流体降膜蒸发实验的成本和周期,可以利用计算流体力学(CFD)软件模拟低温流体降膜蒸发过程的流场和温度场,并进行结构优化设计,提出冷凝蒸发器的改进结构,为空分膜式主冷凝蒸发器的设计提供理论依据。

本文受江苏建筑职业技术学院校级课题(JYA315-13)项目资助。(The project was supported by the university project of Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology (No. JYA315-13).)

参考文献

- [1] 杨涌源. 氧化亚氮对空分主冷凝蒸发器安全运行的影响[J]. 深冷技术, 2001(1): 1-5. (YANG Yongyuan. Influence of nitrogen monoxide on safety operation of main condenser/reboiler of an air separation plant[J]. Cryogenic Technology, 2001(1): 1-5.)
- [2] Karlsson E, Gourdon M, Olausson L, et al. Heat transfer for falling film evaporation of black liquor up to very high Prandtl numbers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65(5): 907-918.
- [3] Monnier H, Portha J F, Kane A, et al. Intensification of heat transfer during evaporation of a falling liquid film in vertical microchannels-experimental investigations [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 75(25): 152-166.
- [4] Ohara J, Koyama S. Falling film evaporation of binary refrigerant mixture in vertical rectangular minichannels consisting of serrated-fins [C]//Proceedings of the ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels collocated with the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting. Chicago, Ulinois, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [5] 齐守良, 张鹏, 王如竹. 液氮流动沸腾换热研究综述[J]. 低温与超导, 2006, 34(6): 417-423. (QI Shouliang, ZHANG Peng, WANG Ruzhu. Review of liquid nitrogen flow boiling heat transfer[J]. Cryogenics & Superconductivity, 34(6): 417-423.)
- [6] Chakravarthy V S, Jibb R, Royal J, et al. Developments in falling film type (downflow) reboilers in the air separation industry [C]//Proceedings of the Proceedings of Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, Engineering Conferences International, Hoboken, NJ, USA, 2005: 264-272.
- [7] 陈桂林. 大型空分膜式冷凝蒸发器的应用评述[J]. 深冷技术, 2003(6): 1-3. (CHEN Guilin. An overview on applications of film condenser/reboilers used in large ASUs [J]. Cryogenic Technology, 2003(6): 1-3.)
- [8] Karimi G, Kawaji M. Flow characteristics and circulatory motion in wavy falling films with and without counter-current gas flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(6): 1305-1319.
- [9] Pavlenko A, Matsekh A, Pecherkin N, et al. Heat transfer and crisis phenomena with intense boiling in the falling wave liquid films[J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2006, 13(1): 85-96.
- [10] Ohara J, Koyama S. Falling film evaporation of pure refrigerant HCFC123 in a plate-fin heat exchanger[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2012, 19(4): 301-311.
- [11] Matsekh A, Pavlenko A. New type of dry out crisis in free falling boiling liquid films[J]. Microgravity-Science and Technology, 2007, 19(3): 69-70.
- [12] Ito A, Masunaga N, Baba K. Marangoni effects on wave structure and liquid film breakdown along a heated vertical tube[J]. Multiphase Flow, 1995: 255-265.
- [13] Pavlenko A, Surtaev A. Development of crisis phenomena in falling wavy liquid films at nonstationary heat release [J]. Microgravity Science and Technology, 2010, 22(2): 215-221.
- [14] Surtaev A, Pavlenko A. Crisis phenomena in falling liquid films at periodic heat loads[J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2009, 16(3): 459-468.
- [15] Pavlenko A, Starodubtseva I, Surtaev A. Features of dry spot evolution at the film flow of cryogenic liquids at non-stationary heat release [J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2007, 14(4): 505-513.

- [16] Cherif A, Jabrallah S B, Corriou J P, et al. Intensification of the liquid film evaporation in a vertical channel[J]. Desalination, 2010, 250(1): 433-437.
- [17] Aviles M L. Experiments on falling film evaporation of a water-ethylene glycol mixture on a surface with longitudinal grooves [M]. Berlin: Technische Universität Berlin, 2007.
- [18] Aviles M L, Iversen V, Auracher H, et al. A needle probe technique for film thickness measurements of evaporating wavy films on enhanced surfaces[C]//Proceedings of the Proc of the 3rd International Berlin Workshop on Transport Phenomena with Moving Boundaries, 6th-7th October, 2005.
- [19] Palen J, Wang Q, Chen J. Falling film evaporation of binary mixtures[J]. AIChE Journal, 1994, 40(2): 207-214.
- [20] Gimbutis G. Heat transfer at gravitation flow of a liquid film[M]. Mokslas, Vilnius, 1988.
- [21] Badr H, Habib M, Anwar S, et al. Turbulent natural convection in vertical parallel-plate channels[J]. Heat and Mass Transfer, 2006, 43(1): 73-84.
- [22] Jabrallah S B, Cherif A, Dhifaoui B, et al. Experimental study of the evaporation of a falling film in a closed cavity[J]. Desalination, 2005, 180(1): 197-206.
- [23] Pavlenko A, Koverda V, Reshetnikov A, et al. Disintegration of flows of superheated liquid films and jets[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 22(3): 174-193.
- [24] Pavlenko A N, Surtaev A S, Matsekh A. Transient processes in falling films of liquid under conditions of unsteady-state heat release[J]. High Temperature, 2007, 45(6): 826-836.
- [25] Pavlenko A N, Surtaev A S, Chernyavskii A N. Breakdown of a falling wave liquid film during nonstationary heat release[J]. Heat Transfer Research, 2008, 39(6): 509-517.
- [26] Pavlenko A N. Flow dynamics, crisis phenomena and decay of falling wavy liquid films during boiling incipience and evaporation at nonstationary heat release[J]. International Journal of Fluid Mechanics Research, 2012, 39(2): 101-124.
- [27] Surtaev A, Pavlenko A. Observation of boiling heat transfer and crisis phenomena in falling water film at transient heating[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 74(5): 342-352.
- [28] Pavlenko A N, Surtaev A S, Tsoi A N, et al. Dynamics of a superheated surface rewetting with a falling liquid film[J]. High Temperature, 2014, 52(6): 861-868.
- [29] Starodubtseva I, Pavlenko A, Volodin O, et al. The features of rewetting dynamics of the overheated surface by a falling film of cryogenic liquid[J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2012, 19(2): 307-316.
- [30] Starodubtseva I, Pavlenko A. Features of the dynamics of development and the thermal stability of dry spots in flowing-down liquid films[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2007, 80(6): 1210-1215.
- [31] Johansson M, Vamling L, Olausson L. An implementation-oriented heat transfer model for black liquor evaporation [C]//Proceedings of the Proceedings of the International Chemical Recovery Conference 2007. Canada, 2007.
- [32] Prost J S, González M T, Urbicain M J. Determination and correlation of heat transfer coefficients in a falling film evaporator[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(4): 320-326.
- [33] 石程名, 宫世吉, 徐灿君, 等. 竖管内溴化锂溶液降膜发生实验研究[J]. 制冷学报, 2008, 29(3): 43-46. (SHI Chengming, GONG Shiji, XU Canjun, et al. Experiment research on lithium bromide solution falling film generation in vertical tube [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(3): 43-46.)
- [34] 宫世吉. 不同浓度溴化锂溶液层流降膜传热性能实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.

通信作者简介

厉彦忠,男,博士,教授,西安交通大学能源与动力工程学院, (029)82668738, E-mail: yzli-epe@mail.xjtu.edu.cn。研究方向: 制冷与低温系统循环及热物理过程、低温流体流动与传热规律研究。

About the corresponding author

Li Yanzhong, male, Ph. D., professor, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, +86 29-82668738, E-mail: yzli-epe@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: cycle of refrigeration and cryogenic system and process of thermal physical, research for the law of flow and heat transfer of cryogenic fluid.