

强化管表面结构对竖管降膜流动特性的影响

张天娇, 马良栋, 张吉礼, 张继谊

(大连理工大学建设工程学部, 116024, 辽宁大连)

摘要: 为了研究强化管表面结构对竖管降膜流动特性的影响, 搭建了竖管降膜流动冷态实验台, 利用光谱共焦位移传感器和高速摄像仪对强化管和光管进行了对比研究。实验中, 降膜流量通过调节高位水箱内静液柱高度 H 和布液器环隙间距 Δd 控制, 使降膜雷诺数 Re 在 $0 \sim 4\,500$ 变化。测试结果表明: 当 $0 < Re \leq 2\,000$ 时, 强化管与光管液膜厚度一致, 但当 $Re > 2\,000$ 时, 强化管的液膜厚度逐渐高于光管, 且随着 Re 的增大, 二者差值越趋增大; 相对于光管, 强化管润湿管壁的最小流量约为光管的 $1/3$, 明显小于光管, 表明强化管有利于液膜的铺展; 当降膜流动处于层流时, 在入口段强化管与光管的降膜波动特性无明显差别, 但光管较先进入充分发展区, 随后波动强度逐渐小于强化管; 当降膜流动呈湍流时, 强化管的波动强度明显高于光管, 当 Re 达到 $4\,200$ 时, 在测试范围内强化管的平均波动强度较光管高出约 8% , 说明强化管的表面结构增强了液膜的扰动, 更利于降膜蒸发过程传热传质。以上结论可为强化管用于竖管降膜蒸发器的研究提供有益参考。

关键词: 强化管; 竖管降膜流动; 液膜厚度; 润湿特性; 界面波动

中图分类号: TK172 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202004007 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0053-08



OSID 码

Effects of Surface Structure Outside the Enhanced Tube on Flow Characteristics of Vertical Falling Film

ZHANG Tianjiao, MA Liangdong, ZHANG Jili, ZHANG Jiye

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: An experimental platform is established to study the effects of surface structure outside the enhanced tube on flow characteristics of vertical falling film. A comparative study of an enhanced tube and a smooth tube is experimentally carried out by using a spectral confocal displacement sensor and a high-speed camera. Falling film flow rate is controlled by adjusting the height level H of a hydrostatic column in the higher water tank and the annular gap Δd of distributor. The Reynolds number of working fluid varies from 0 to 4 500 in the experiments. Test results show that the liquid film thickness of the enhanced tube is the same as that of the smooth tube when the Reynolds number ranges from 0 to 2 000. However, when the Reynolds number is greater than 2 000, the liquid film thickness of the enhanced tube is gradually larger than that of the smooth tube, and the difference gradually increases with the increase of the Reynolds number. Besides, it is found that the minimum flow rate for wetting the wall of the enhanced tube is about $1/3$ of that of the smooth tube, indicating that the enhanced tube is beneficial to the spread of liquid film. Furthermore, when falling film is in laminar flow, there is

no significant difference on falling film fluctuation characteristics between the enhanced tube and the smooth tube in the entrance region. But the falling film of the smooth tube enters to the full development region earlier, and then the fluctuation intensity of the smooth tube is gradually lower than that of the enhanced tube. When the falling film is in turbulent flow, the fluctuation of the enhanced tube is obviously higher than that of the smooth tube. When Reynolds number of the falling film reaches 4 200, the average fluctuation intensity of the enhanced tube is about 8% higher than that of the smooth tube, which shows that the surface structure of the enhanced tube raises the disturbance of the liquid film and is more conducive to heat and mass transfer in falling film evaporation. These results will provide a useful reference for the study of the enhanced tube used in vertical falling film evaporator.

Keywords: enhanced tube; vertical falling film flow; liquid film thickness; wetting characteristics; interface fluctuation

降膜蒸发是液体在管子表面受重力、表面张力等作用而形成的薄膜流动,管壁的热量传递给液膜使其蒸发的过程,具有流量小、温差小、传热传质系数高和热流密度高等优势,该技术已被广泛应用于石油、化工、能源、食品及制冷等领域^[1]。根据液膜流动方式的不同,降膜蒸发可分为水平降膜蒸发和竖管降膜蒸发。相比水平降膜蒸发,竖管降膜蒸发的主要特点是占地面积小,且每根管子的上端均装有独立的布液器,布液效果不会受到其他换热管的影响,在同样的工作环境下,竖管降膜蒸发的传热传质性能优于水平管^[2-5],因此,竖管降膜设备具有广阔的应用前景。

对于竖管降膜设备,液膜分布问题一直是制约其发展的一个重要因素^[6],改善液膜的流动和分布对于提高降膜设备的性能具有重要意义。近年来,随着强化传热技术的发展,强化管逐渐被应用于降膜蒸发器中^[7]。Moeykens 等对降膜蒸发进行了大量实验,以光管、翅片管、Gewa-T 型管等进行对比,发现强化管表面的传热性能要优于光滑管,而改变管外表面的沟槽形状能对液膜的流动及换热产生正向影响^[8-9];Mohamed 等对不同结构的螺旋槽管进行了实验研究,结果表明节距为 3 mm 的螺旋槽管的液膜厚度较光滑管降低了 9%,同时 Nu 提高了 45%^[10];郭磊等针对降膜蒸发设计了 TJX、EX 两种强化管,并进行了实验研究,发现具有网格槽道设计的 EX 型管的换热效果强于 TJX 型管型^[11];Ji 等对 3 种强化管的池沸腾换热进行了研究,指出当热流密度小于 200 kW/m^2 时,强化管的蒸发传热系数较光管提高了近 3 倍^[12-13];Eichinger 等通过对螺旋槽管的研究发现,其表面凹槽结构对润湿速率和薄膜扩散均有一定的影响,同时也可以提高降膜流动在

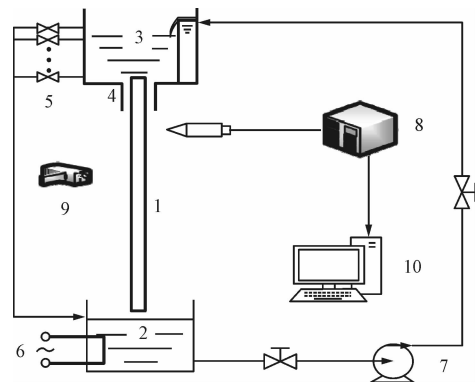
竖直方向的稳定性^[14]。这些研究成果说明:强化管不仅可以显著地提高换热性能,而且恰当的表面结构能够改善管外表面的液膜分布,提高工质的润湿和散布能力,使液膜更薄且更均匀,这对降膜蒸发具有重要的理论意义和应用价值。但目前对于强化管用于降膜蒸发的研究大多是基于水平管,而针对竖管降膜的研究却鲜有报道。

为了研究强化管表面结构对竖管降膜流动的影响,本文搭建了可视化的实验平台,选用针对降膜蒸发设计的新型三维强化管进行实验,研究了竖管外液膜分布及波动特性,以期为强化管用于竖管降膜蒸发器的研究提供参考。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

竖管外降膜流动实验台如图 1 所示。实验中,工质通过循环水泵从低位水箱不断地被输送到高位水箱,高位水箱由工作腔和溢流腔两部分构成,



1—实验管段;2—低位水箱;3—高位水箱;4—布液器;
5—溢流管;6—恒温加热器;7—循环水泵;8—光谱共
焦位移传感器;9—高速摄像仪;10—数据采集器。

图1 实验系统示意图

工质先进入溢流腔,然后流入工作腔,这样可减小工作腔内液位波动对布液造成的影响。工作腔安装有 15、40、65、90 及 115 mm 等不同高度的溢流管,通过调节溢流管上阀门的开闭使水箱中液位稳定在不同的高度,从而满足实验中不同入口的压力需求。

1.2 实验管型

选用外径 19.0 mm、壁厚 1.07 mm 的新型降膜蒸发管进行实验,它是在光管表面二次加工成型的,其表面结构如图 2 所示,总长度为 600 mm,其中包含 100 mm 的光滑段。从布液器出口处开始每隔 50 mm 设置一个测点,共设置了 11 个测点,有效测试长度为 500 mm。为了测试强化管对降膜流动特性的影响,选取相同材质的外径 19.0 mm 的光滑铜管进行对比分析,表 1 给出了 2 种管型的详细结构参数。

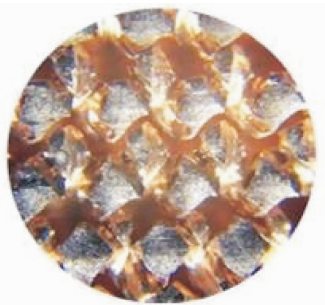


图 2 强化管的表面结构(放大比例为 10:1)

表 1 实验用测试管的结构参数

管型	<i>L</i> /mm	<i>d</i> /mm	<i>h</i> /mm	<i>p</i> /mm
光管	600	19.0		
强化管	600	19.0	0.55	0.47

注:*L* 为实验管的总长度;*d* 为实验管的外径;*h* 为强化管的外肋高度;*p* 为肋间距。

1.3 布液器

为了保证工质在管外有良好的布膜效果,确保工质沿管壁流动,实验设计了如图 3 所示的布液器。

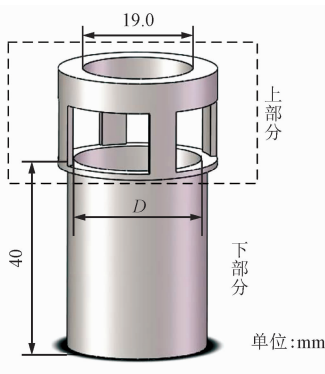


图 3 布液器的结构示意图

该布液器分为上下两部分,上部分与测试管径相同,为 19.0 mm,对测试管段起到固定和对中的作用,保证测试管段严格居中穿过布液器;下部分则起到导流作用,长度为 40 mm,孔径大于测试管段,与实验管之间可形成一定间距的导流环隙,通过拆换布液器改变环隙间距的大小。布液器的尺寸参数如表 2 所示。实验时,工质在自身重力作用下从环隙流出,在实验管外侧形成均匀的液膜。

表 2 布液器尺寸参数

参数	数值
<i>D</i> /mm	19.6, 20.0, 20.4, 20.8
Δd /mm	0.3, 0.5, 0.7, 0.9

注:*D* 为布液器的内径尺寸; Δd 为布液器与实验管的环隙间距。

1.4 实验测试方法

1.4.1 流量测试 在降膜流动中,降膜雷诺数是一个关键参数,定义为

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu} \tag{1}$$

式中: μ 为动力黏度; Γ 为降膜流量,其定义为管壁单位周长上的质量流量,公式为

$$\Gamma = \frac{Q_m}{\pi d} \tag{2}$$

其中, Q_m 为质量流量,kg/s。

降膜流量通过布膜环隙和高位水箱内的静液柱高度共同调节。静液柱高度指的是高位水箱内的液位到水箱底部的高度,可通过溢流管上的阀门调节,当液位稳定不变时视为实验工况稳定,此时开始记录流量。流量采用称重法计量,即在稳定工况下,测量液体在一定时间内流入称重容器的质量,将计算值作为该液位工况下的实际流量。实验所使用的电子秤的量程为 3 kg,精度为 0.1 g,计时器的精度为 0.01 s。每次计量时间为 1 min,测试 3 次取平均值作为最终流量。降膜流量 Γ 和降膜雷诺数 Re 的变化范围如图 4 所示。

1.4.2 膜厚测试 由于降膜流动受到表面波的影响,膜厚的测量变得十分复杂。目前常用的测试手段包括光学测量、电导测量、电容测量以及荧光法等^[15-18]。在这些测量手段中,光学法的测量精度最高,且测量过程不会影响液膜的流场分布,通常是研究降膜流动特性的首选方法,因此,本文采用光谱共焦位移传感器进行测量。光谱共焦位移传感器是一种高精度、非接触式的光电位移传感器,由控制器和测头组成,如图 5 所示。测头被固定在夹具上,可沿竖直方向上下调节,测头选用 OPE-F4 型号,测量量

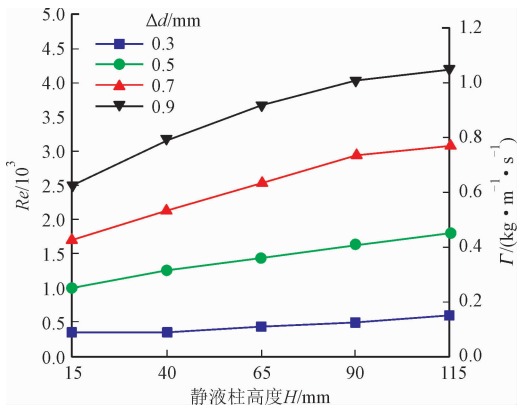


图 4 降膜流量 Γ 和降膜雷诺数 Re 随静液柱高度的变化

程为 $\pm 2\text{ mm}$, 精度可达 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。测试时, 采样频率为 1 000 Hz , 采样时间为 10 s , 每组工况采集 10 000 个数据点, 取平均值作为该位置处的液膜厚度。

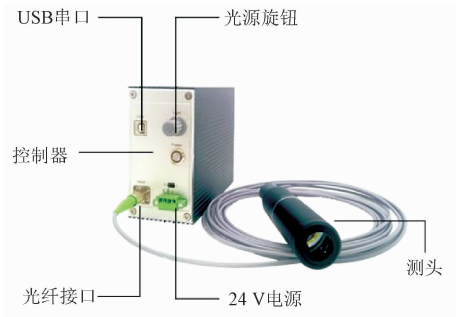


图 5 光谱共焦位移传感器

为了保证液膜能够均匀地润湿管壁, 在每组工况数据采集前, 先在出口相同高度处取周向 6 个角度进行测量, 使不同方位处的膜厚测试偏差在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 以内, 此时开始记录数据。以布液器环隙间距 0.3 mm 、静液柱高度 15 mm 、测点距离入口 100 mm 时的工况为例, 验证结果如图 6 所示。

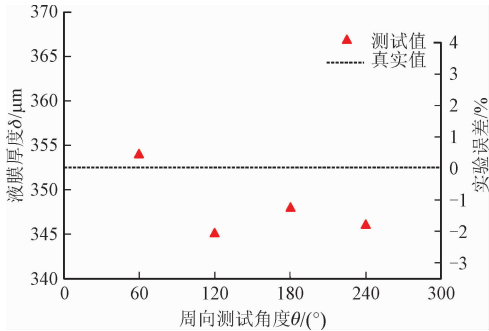


图 6 膜厚测试可靠性验证

1.4.3 最小润湿流量测试 为了得到润湿管壁的最小给流量, 采用 Phantom 高速摄影仪对实验段拍照记录。由于工质的流动速度相对较小, 实验采用 1 000 Hz 帧频率进行拍摄记录。实验时, 选定环隙间距为 0.3 mm 的布液器进行布液, 关闭所有溢流

管上的阀门, 通过调节进水管上的阀门控制进入高位水箱的流量, 使高位水箱内的液位缓布上升, 稳定在不同的静液柱高度, 每个高度保持 10 s 的润湿时间。通过图像回放可以清楚观察到从湍流到均匀薄膜流型间的转变, 多次重复实验, 记录流型转变时高位水箱内的静液柱高度, 此时所对应的流量即为最小润湿流量 $\Gamma_{\min}$ 。

1.5 工质及误差分析

选用水作为实验工质, 实验前打开低位水箱内的恒温加热器, 将水加热至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 控制精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。工质物性参数如表 3 所示。

表 3 流体力学参数 (水) 的物性参数

温度 $t/$ $^{\circ}\text{C}$	密度 $\rho/$ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	动力黏度 $\mu/$ $(\text{mPa}\cdot\text{s})$	表面张力 $\sigma/$ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$
20	998.2	1.004	728

实验所涉及的主要参数有降膜流量 Γ 、降膜雷诺数 Re 和液膜厚度 δ , 根据误差传递原则, 各测试参数的测量范围和实验误差见表 4。

表 4 测试参数的测量范围和实验误差

测试参数	测量范围	实验误差/ $\%$
Γ	$0.03\sim 1.0\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$	± 2
Re	$0\sim 5\text{ 000}$	± 2
δ	$0\sim 2.0\text{ mm}$	± 5

2 实验结果及分析

2.1 实验系统可靠性验证

为了验证实验系统的可靠性, 有必要将实验得到的平均膜厚与其他文献中的降膜实验数据进行比较。选用目前广泛应用的 Nusselt 理论预测模型来衡量液膜厚度测试的可靠性, 计算公式如下^[19]

$$\delta = \left(\frac{3}{4}\right)^{1/3} Re^{1/3} \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3} \tag{3}$$

如图 7 所示, 通过与 Nusselt 的预测模型对比可知, 实验测得的光管膜厚值偏差落在预测模型的 $\pm 10\%$ 以内, 符合校验标准, 因此可以证明该实验方法是可靠的。

2.2 强化管表面结构对液膜厚度的影响

降膜流动一般分为 3 种情况: 当 $Re\leq 20$ 时, 流动为层流; 当 $20<Re\leq 1\text{ 000}$ 时, 流动呈波动的层流; 当 $Re>1\text{ 000}$ 时, 为湍流状态^[20]。图 8 给出了 4 种典型 Re 下液膜厚度沿竖直方向的变化。从图中可以看出, 当 $Re=356$ 和 $Re=1\text{ 260}$ 时, 在竖直方向

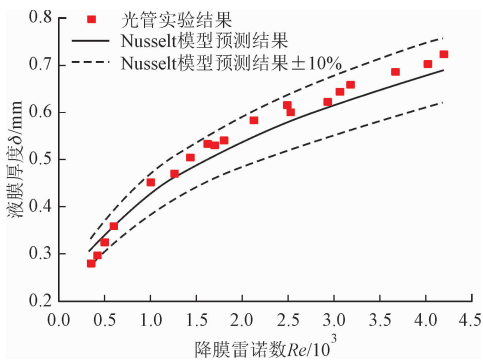


图 7 光管膜厚实验结果与 Nusselt 模型预测结果的比较

光管和强化管的液膜厚度基本保持不变,且在同一位置处,两种管型的液膜厚度也保持较好的一致性;随着 Re 的增大,两种管型的液膜厚度沿竖直方向均有减小,且 Re 越大,膜厚减小趋势越明显,这是降膜流量增大、流速加快引起的。

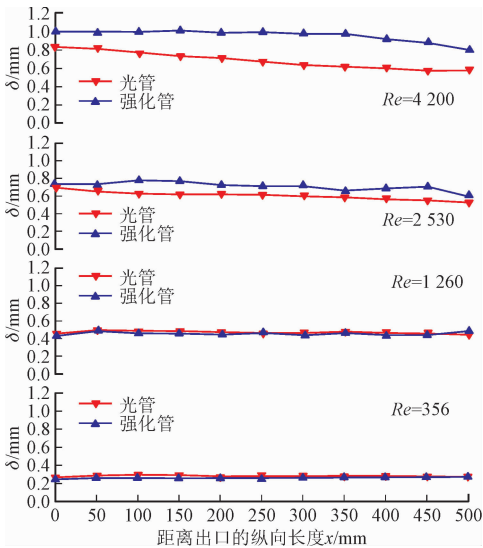


图 8 不同 Re 下光管和强化管膜厚沿竖直方向的变化

为了更清晰地观察强化管表面结构对液膜厚度的影响,图 9 给出了强化管和光管膜厚测量的比较结果,该膜厚值为测试长度范围内的平均膜厚。从图 9 可以看出,总体上光管和强化管的液膜厚度均随 Re 的增加而增大;当 $0 < Re \leq 2\,000$ 时,即在层流或波动层流区,两种管型的膜厚值保持较好的一致性;当 $Re > 2\,000$ 时,强化管的膜厚值逐渐高于光管,且随着 Re 的增大,二者差值逐渐增大,当 $Re = 4\,200$ 时,强化管膜厚值较光管增加 24%。分析产生上述结果的原因,当 Re 较小时,液膜表面呈层流或波动层流流动,此时液膜厚度仅与 Re 有关,而与壁面粗糙度无关;随着 Re 的增大,液膜流动进入湍流区,此时强化管的表面粗糙度对液膜流动作用逐渐增强,壁面剪切力增大,流速降低,导致膜厚逐渐

高于光管,这也与流体的动力学特性相吻合。

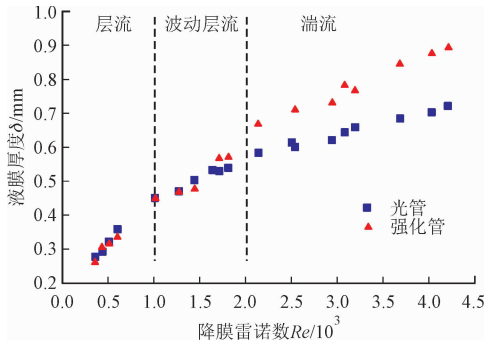
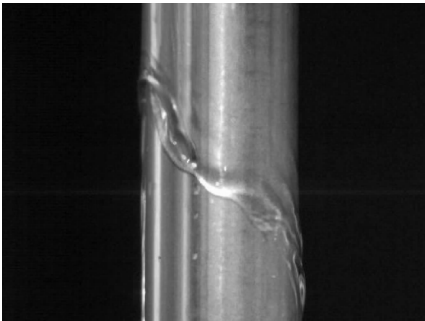


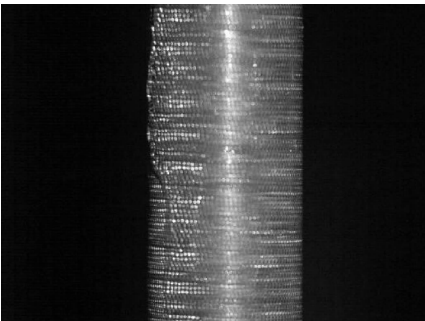
图 9 强化管和光管膜厚测量值的比较

2.3 强化管表面结构对润湿特性的影响

由于表面张力的作用,当降膜流量较小时,工质在实验管表面仅可形成滴状流或溪状流;随着流量的增加,工质在表面逐渐完全润湿形成均匀的膜状流。通过高速摄像仪的录像回放,可清楚地观察到润湿管壁的变化过程。图 10 即为光管和强化管的润湿临界状态。通过多次实验测量得到光管的最小润湿流量为 $0.379 \sim 0.435 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,而强化管的最小润湿流量为 $0.123 \sim 0.150 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,约为光管的 1/3,显然强化管的最小润湿流量远小于光管。这是由于强化管表面的凹槽结构使管表面的接触角降低,加快了表面润湿速度,使其表面更易形成均匀的膜状流,同时这种特殊的表面结构为向下流动的



(a) 光管



(b) 强化管

图 10 光管与强化管的润湿临界状态

液膜提供了一个特殊的引角,更利于液膜的铺展,减弱了流体表面张力对降膜的影响。因此,强化管对竖管的降膜布液起到了积极的促进作用。

2.4 强化管表面结构对降膜波动特性的影响

对于竖管降膜,沿管壁下降的液膜可分为入口段和流动充分发展段,液膜波动的强弱程度用相对标准差 σ 表示,计算公式为

$$\sigma = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2 \right)^{1/2} / \bar{\delta} \times 100\% \quad (4)$$

式中: n 为样本数; δ_i 为瞬时液膜厚度; $\bar{\delta}$ 为平均液膜厚度。

图 11 为 $Re=356$ 时光管和强化管的表面波动的纵向发展过程,对应的液膜波动强度如图 12,其中 x 表示距离布液器出口处的纵向距离。 $Re=356$ 时,液膜处于层流流动,在入口处 $x=0$ mm 时光管和强化管的液膜波动曲线均较为平滑,近似为直线状,此时波动较小,波幅分别为 0.02 和 0.03 mm,波动强度在 1%~3%;在 $x=100$ mm 处,两种管型的界面出现了密集的小幅波动,波幅迅速增加至 0.2 mm 左右,波动强度增至 10%;随着入口距离的增加,光管和强化管的液膜波动频率逐渐增大,波动强度也随之增加,直至 $x=300$ mm 处光管开始出现相对较为规则的大幅独立波,波幅为 0.45 mm,波动频率降低,此时光管已进入充分发展段,波动强度

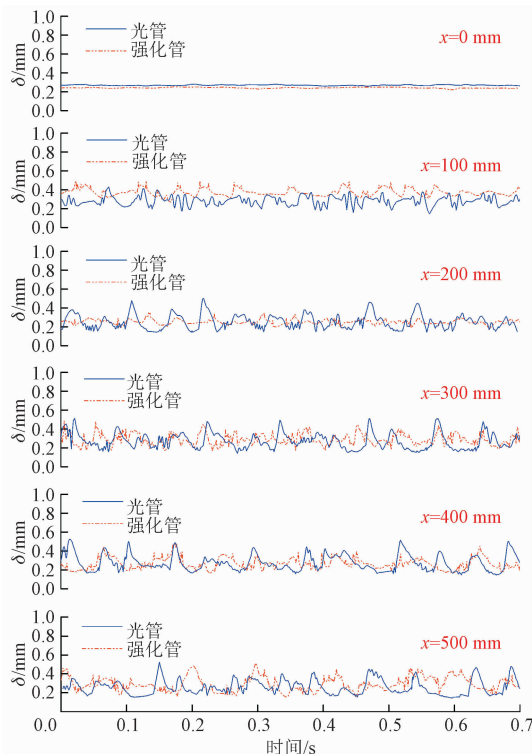


图 11 $Re=356$ 时光管和强化管表面波动的纵向发展过程

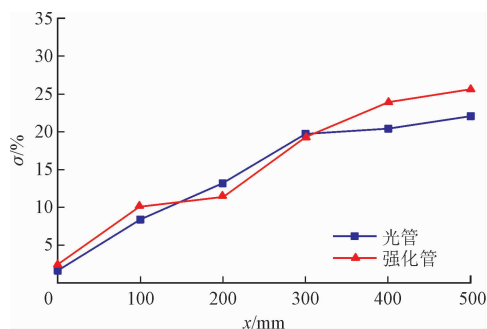


图 12 $Re=356$ 时光管和强化管的液膜波动强度

逐渐趋于平缓,在测试长度范围内,光管的最大波动强度为 22.1%,而强化管的入口段长度则明显大于光管;在 $x=500$ mm 处液膜波动才开始趋于稳定,出现了大幅独立波,此时的波动强度为 25.5%。由图 11 和图 12 还可以看出,强化管的大振幅波中仍然叠加着许多小振幅的波,这是强化管特殊的表面结构导致其层流底层上始终滑动着许多细小的波,当大幅波经过时便会出现这种现象,而光管的黏性底层较为平滑,则无此现象。

$Re=4\ 200$ 时光管和强化管表面波动的纵向发展过程如图 13 所示,对应的液膜波动强度如图 14。 $Re=4\ 200$ 时降膜流动呈湍流,与 $Re=356$ 时的层流波动特性有明显不同。在 $x<300$ mm 范围内,光管的液膜波动曲线一直较为平滑,波幅小于 0.2

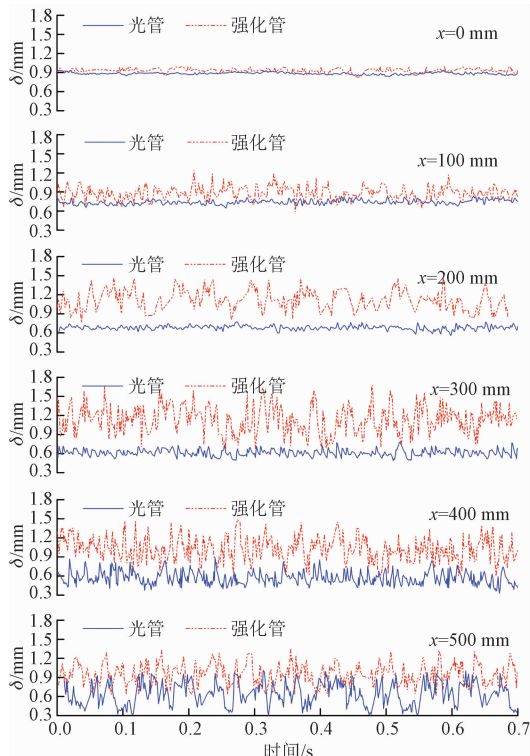


图 13 $Re=4\ 200$ 时光管和强化管表面波动的纵向发展过程

mm,波动强度处于1%~10%,说明此范围内液膜一直处于入口区,其长度明显高于 $Re=356$ 时的入口区长度,表明 Re 增大导致光管入口段的长度增加;从 $x=400$ mm处开始液膜的波动显著增强,波动频率增大;在 $x=500$ mm处液膜的波动强度达到27%。而强化管的波动强度则明显高于光管,在 $x=100$ mm处开始波动就得到显著增强,入口区长度小于光管,至 $x=500$ mm位置时波动强度已达到33%,在测试范围内强化管的平均波动强度较光管高出约8%,说明强化管的表面结构对液膜有增强扰动的作用,更利于降膜蒸发过程中传热传质的进行。

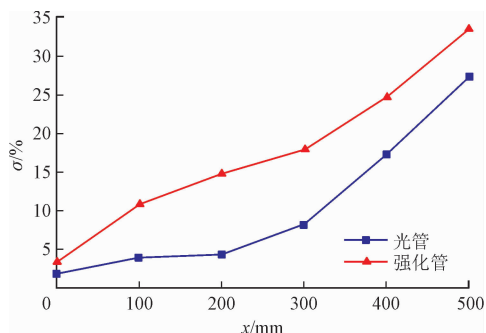


图14 $Re=4200$ 时光管和强化管的液膜波动强度

3 结 论

本文以水为研究对象,通过对竖直管和光管外降膜流动特性的研究,得出以下结论。

(1)通过对液膜厚度的测量发现,随着 Re 的增加,光管和强化管的液膜厚度均呈现增加趋势。当 $0 < Re \leq 2000$ 时,即在层流和波动层流区域,强化管与光管的液膜厚度实验值较为接近;当 $Re > 2000$ 时,强化管的膜厚值逐渐高于光管,这是由于强化管的表面结构导致壁面剪切力增加引起的。

(2)通过对降膜润湿特性的观测发现,光管润湿管壁的最小流量为 $0.379 \sim 0.435$ kg/(m·s),而强化管为 $0.123 \sim 0.150$ kg/(m·s),约为光管的1/3,明显小于光管,说明强化管的表面结构可减弱表面张力对降膜的影响,有利于工质润湿壁面,对降膜均匀布液具有改善作用。

(3)通过对降膜波动特性的研究发现,当降膜流动呈层流时,光管和强化管表现出了相似的波动特性,但光管能够较快进入充分发展区,降膜波动强度略小于强化管;当降膜流动呈湍流时,强化管的入口段长度明显小于光管,波动逐渐增强,当 Re 达到4200时,在测试范围内强化管的平均波动强度较光管高出约8%,说明强化管的表面结构对降膜流动

起到了增强扰动的作用。

参考文献:

- [1] 蒋章焰,马同泽,赵嘉琪,等. 垂直管外降液膜的流动和传热特性[J]. 工程热物理学报, 1988, 9(1): 70-74.
JIANG Zhangyan, MA Tongze, ZHAO Jiaqi, et al. The flow and heat transfer characteristics outside the vertical tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1988, 9(1): 70-74.
- [2] SHI Chengming, XU Canjun, HU Huili. Study on falling film generation heat transfer of lithium bromide solution in vertical tubes [J]. Journal of Thermal Science, 2009, 18(3): 241-245.
- [3] SHI Chengming, CHEN Qinghua, JEN T, et al. Heat transfer performance of lithium bromide solution in falling film generator [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(15): 3372-3376.
- [4] KIM K J, AMEEL T A, WOOD B D. Performance evaluations of LiCl and LiBr for absorber design applications in the open-cycle absorption refrigeration system [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1997, 119(2): 165-173.
- [5] LUO Chao, MA Weibin, GONG Yulie. Design of single vertical tube falling-film evaporation basing on experiment [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(5): 695-698.
- [6] 郝丽,肖晓明,张吕鸿,等. 竖直管降膜蒸发器流动与传热过程的数值模拟[J]. 化学工业与工程, 2014, 31(2): 60-65.
HAO Li, XIAO Xiaoming, ZHANG Lühong, et al. Numerical simulation of the flow and heat transfer process of vertical tube falling film evaporator [J]. Chemical Industry and Engineering, 2014, 31(2): 60-65.
- [7] ABED A M, ALGHOUL M A, YAZDI M H, et al. The role of enhancement techniques on heat and mass transfer characteristics of shell and tube spray evaporator: a detailed review [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75(22): 923-940.
- [8] MOEYKENS S A, PATE M B. The effects of nozzle height and orifice size on spray evaporation heat transfer performance for a low-finned, triangular-pitch tube bundle with R-134a [J]. ASHRAE Transactions, 1995, 101(2): 420-433.
- [9] MOEYKENS S A, NEWTON B J, PATE M B. Effects of surface enhancement, film-feed supply rate, and bundle geometry on spray evaporation heat trans-

- fer performance [J]. ASHRAE Transactions, 1995, 101(2): 408-419.
- [10] MOHAMED A M I. Experimental study of heat transfer and flow characteristics of liquid falling film on a horizontal fluted tube [J]. Heat and Mass Transfer, 2010, 46(8/9): 841-849.
- [11] 郭磊, 李敏霞, 马一太, 等. 制冷系统用新型水平管降膜蒸发 [J]. 化工学报, 2013, 64(11): 3894-3902. GUO Lei, LI Minxia, MA Yitai, et al. Falling film evaporation on new horizontal tube in refrigeration system [J]. Journal of Chemical Industry, 2013, 64(11): 3894-3902.
- [12] JI Wentao, ZHAO Chuangyao, ZHANG Dingcai, et al. Pool boiling heat transfer of R134a outside reentrant cavity tubes at higher heat flux [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1364-1371.
- [13] JI Wentao, ZHAO Ertao, ZHAO Chuangyao, et al. Falling film evaporation and nucleate pool boiling heat transfer of R134a on the same enhanced tube [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 113-121.
- [14] EICHINGER S, STORCH T, GRAB T, et al. Investigations of the spreading of falling liquid films in inclined tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 119: 586-600.
- [15] YEONG K K, GAVRIILIDIS A, ZAPF R, et al. Characterisation of liquid film in a microstructured falling film reactor using laser scanning confocal microscopy [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006, 30(5): 463-472.
- [16] ZHANG J T, WANG B X, PENG X F. Falling liquid film thickness measurement by an optical-electronic method [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(4): 1883-1886.
- [17] DU Wangfang, LU Yanghui, ZHAO Ruichuang, et al. Film thickness of free falling water flow on a large-scale ellipsoidal surface [J]. Progress in Nuclear Energy, 2018, 105: 1-7.
- [18] LEL V V, AL-SIBAI F, LEEFKEN A, et al. Local thickness and wave velocity measurement of wavy films with a chromatic confocal imaging method and a fluorescence intensity technique [J]. Experiments in Fluids, 2005(5): 856-864.
- [19] NUSSELT W. Die oberflächenkondensation des wasserdampfes [J]. Ver Deut Ing, 1916, 60: 541-596.
- [20] 阎维平, 叶学民, 李洪涛. 液体薄膜流的流动和传热特性 [J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 59-65. YAN Weiping, YE Xuemin, LI Hongtao. Hydrodynamics and heat transfer of liquid thin films [J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 59-65.

[本刊相关文献链接]

- 高中华, 兰海平, 潘辉, 等. 小通道内高参数火箭煤油流动传热特性研究. 2020, 54(1): 108-115. [doi:10.7652/xjtuxb202001014]
- 王瑞琴, 晏鑫, 何坤. 带肋板尾缘开缝叶片内的流动传热性能研究. 2020, 54(1): 150-161, 183. [doi:10.7652/xjtuxb202001019]
- 侯伟韬, 王新军, 李炎栋. 接收孔周向倾角对预旋静盘腔流动特性的影响. 2019, 53(11): 27-33. [doi:10.7652/xjtuxb201911004]
- 王会, 郭烈锦, 刁永发. 梯度渗透率金属泡沫管内的流动与传热特性分析. 2019, 53(11): 85-90. [doi:10.7652/xjtuxb201911012]
- 罗炜, 贺静, 罗兵, 等. 截面形状对微通道流动沸腾影响的数值研究. 2019, 53(11): 101-111. [doi:10.7652/xjtuxb201911015]
- 姜世杰, 李志刚, 李军. 凹槽状小翼对涡轮动叶叶顶气动和传热性能的影响. 2019, 53(9): 7-14, 41. [doi:10.7652/xjtuxb201909002]
- 马登骞, 张元桥, 李军, 等. 考虑刷丝变形的后夹板结构对刷式密封泄漏和传热特性影响的研究. 2019, 53(9): 15-25. [doi:10.7652/xjtuxb201909003]
- 于婷, 王雅, 齐宝金, 等. Sierpinski 亲/疏水分形图案表面气泡分布及强化换热研究. 2019, 53(5): 100-108. [doi:10.7652/xjtuxb201905014]
- 谢福寿, 雷刚, 邱一男, 等. 求解滑移流区外掠圆柱体气流流动与传热特性的数值模型. 2019, 53(1): 25-32. [doi:10.7652/xjtuxb201901004]
- 张赞坚, 刘朝晖, 潘辉, 等. 低流阻火箭煤油的超临界压力流动与换热特性. 2019, 53(1): 129-134, 156. [doi:10.7652/xjtuxb201901017]
- 唐上朝, 胡浩威, 牛东, 等. 大量不凝性气体存在时不同润湿性管束对流冷凝传热实验研究. 2016, 50(5): 24-31. [doi:10.7652/xjtuxb201605004]

(编辑 亢列梅)