文章编号: 1001 - 2060(2016) 05 - 0022 - 07

# 水平管外降膜厚度分布规律的数值模拟研究

蔡 振 周一卉 毕明树 任婧杰

(大连理工大学 化工机械与安全学院 辽宁 大连 116024)

摘 要: 液膜厚度分布规律对水平管降膜蒸发过程有重要的 影响。本研究建立了水平管外降膜流动的 CFD 模型,通过 模拟不同入口流速、管径大小的液膜厚度来研究冷态情况下 管外液膜厚度的影响因素及其沿环向角的分布规律。模拟 结果表明: 对于固定管径,液膜厚度随着入口速度的增大而 增大; 在入口速度一定时,管外液膜厚度在管顶区域较大,在 周向105°附近达到最小值; 且液膜厚度随着管径的增大而 缓慢减小,当入口速度减小到一定程度时,管壁会出现"干 涸"现象。

关 键 词:水平管降膜流动;液膜厚度;入口速度;管径;环 向角

中图分类号: TK125 文献标识码: A

DOI: 10. 16146/j. cnki. rndlgc. 2016. 05. 004

引 言

水平管降膜蒸发广泛应用于海水淡化、工业废 水处理等领域中。在蒸发过程中,换热管外壁面液 膜过薄可能会出现结垢、烧焦,甚至"干涸"等现象, 而管外液膜过厚则可能出现因传热量不足而不能充 分传热,导致传热恶化的情况。因此对换热管外液 体成膜形态及液膜厚度的分布规律的研究具有重要 的意义。

有学者对水平管外降膜流动及蒸发传热进行了 大量的实验研究和理论研究<sup>[1~3,5]</sup>。文献[6]通过 实验研究了水平管转动情况下转速对管外液膜厚度 及喷淋孔间的无因次波长的影响关系;文献[7]采 用摄像测量和数字图像处理技术,进行管外降膜厚 度测量的实验研究;文献[8]提出了经典的表征冷 凝液膜厚度的解析解,在方程中仅考虑了质量流量 *Γ*与周向角度β对液膜厚度的影响,并认为在周向 角为90°时液膜厚度取到最小值;文献[9]研究对比 虽然前人对于水平管外成膜形态的研究较多, 但研究者针对的研究影响因素各有不同,并对某些 参数带来的影响产生了分歧,得出了不同的结论。 主要争论为液膜厚度沿水平管外最小值的环向位 置,及管外液膜厚度随管径变化的改变趋势。本研 究主要针对这两方面进行数值模拟的研究并分析其 产生的原因。研究降膜流动状态的影响因素和液体 成膜厚度的分布规律对于从理论上进一步揭示管外 壁蒸发传热机理、提高其传热效率具有重要意义。

# 1 模型建立与验证

#### 1.1 模型的建立

水平管降膜蒸发器内部结构模型如图 1 所示, 管束为等边三角形排列方式,换热管上方布有分布 器。换热管顶部正对分布器的开孔中心。几何参数 如下:分布器开孔孔径 d、布液器底端平面到第一排 蒸发管顶端所在平面的间距 H(即喷淋高度)、蒸发 管直径 D、蒸发管间间距 L/2。

文献 [12] 模拟了不同布液高度和管间距对液 膜厚度的影响,因此本模拟中取成膜状态良好情况 下的布液高度和管间距,即布液高度与管径之比 (*H/D*=0.5)、管间距与管径之比(*L/D*=1.5)进行 模拟对比。据文献 [6] 报道,同一时间沿管长方向 不同位置处液膜厚度分布与同一位置处液膜厚度分 布均匀为相同的随机分布。因此,可以选择垂直于

了不同 Re 情况下 不同管间距液膜厚度沿环向角的 变化情况; 文献 [10]研究了结构参数和膜雷诺数对 液膜厚度分布的影响,并根据实验数据得出了预测 膜厚度的新的关联式; 文献 [11]采用 VOF 多相流模 型对水平管降膜蒸发进行数值模拟。

收稿日期:2015-05-19; 修订日期:2015-07-06

作者简介:蔡 振(1991-),女 黑龙江鹤岗人,大连理工大学硕士研究生.

通讯作者:周一卉(1974-),女,大连理大学副教授.

管长方向,过布液器开孔中心的任意纵剖面作为研 究截面。由于蒸发器内部横截面左右对称所以只取 两圆管的一半为计算区域,网格模型采用二维对称 计算模型。计算网格应用 ICEM 绘制,采用四边形 单元,为了便于气液界面的追踪,在管壁面附近进行 了局部加密,网格模型示意图如图 2 所示。



图1 蒸发器内部结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure inside an evaporator



图 2 网格模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a grid-produced model

上边界取为两排管所对应的两喷淋孔所在的中 心线上,两端为速度入口边界条件,其余上边界设为 压力入口边界条件;下边界为两排管横向中心线之 间,设为压力出口边界条件;两侧边设为对称边界条 件;传热管壁面设为壁面边界条件。

模拟中流体介质采用液态水 流动状况为常压。 假定液相水之外的空间充满气相空气 ,同时假定流 体的介质物性为常数。数值模拟中流体的介质物性 如表1所示。

#### 表1 数值模拟中流体的介质物性

Tab. 1 Physical properties of the fluid serving as the working medium for use in numerical simulation

物性参数	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	粘度 $\mu/kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	表面张力 $\sigma/N•m^{-1}$
液相水	998.200	$1.000 \times 10^{-3}$	$1.000 \times 10^{-3}$
气相空气	1.225	$1.789 \times 10^{-4}$	

采用 VOF 多相流模型来跟踪气液交界面。对 于网格的节点,则是采用非耦合隐式迭代求解代数 方程组进行计算。为了简化计算流场,基本计算方 法:(1) 空间为二维直角坐标系,流场为瞬态模拟; (2) 压力 – 速度的耦合采用 PISO 方法 压力项离散 方式选用 Presto 算法,质量和动量方程离散化均选 为二阶隐式格式,气 – 液界面追踪方法选用精度较 高 Geo – Reconstruct 格式;(3) 考虑重力和表面张 力的影响。利用控制方程对流动现象进行了数学 描述。

连续性方程:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} = 0$$
 (1)

式中: u、v — x、y 方向的速度 ,m/s。

动量守恒方程:  

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u \nu)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial(\rho u \nu)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \, \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial \rho}{\partial x} + S_u \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho\nu)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\nu u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\nu\nu)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial\nu}{\partial x}\right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \, \frac{\partial \nu}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{\nu} \tag{3}$$

VOF 算法来追踪动态气 – 液相自由界面的流动情况。跟踪两相之间的界面是通过求解这两相体 积分数的连续性方程完成的。

体积分数控制方程为;

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + u \operatorname{div}(\alpha_2) = 0 \tag{4}$$

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 \tag{5}$$

$$\rho = \alpha_2 \rho_l + (1 - \alpha_2) \rho_g \tag{6}$$

式中:  $\alpha_1$  一气相空气的体积分数;  $\alpha_2$  一液相水的体积分数;  $\rho_g$  一气相空气的密度  $kg/m^3$ ;  $\rho_1$  一液相水的密度  $kg/m^3$ 。

1.2 模型的验证

为了验证模型的可靠性,将本研究的模拟值与

文献 [9] 的实验值进行对比。分别比较了管径为 12、16、19 mm 的蒸发管在入口速度为 0.075 和 0.125 m/s时管外环向液膜厚度的分布,如图 3、图 4 所示。实验中实验管上有布液管和布膜板以实现喷 淋液沿管两侧均匀分配,模拟中采用二维对称结构 作为计算区域,当液体从速度入口沿对称轴下落到 管壁时,满足液体沿管测均匀分配的条件。实验中 操作工况的改变、操作环境的影响以及测量不可避 免产生一定的误差。从图 3、图 4 可知,虽然有些模 拟值与实验值。







虽然有一定的偏差,但管外的成膜形态和液膜 厚度沿环向角的分布规律是一致的。以模拟值为基 准与实验值作比较,绘出误差对比散点图,如图5所 示。从图5可知,模拟值相对计算值的偏差范围基 本在 - 20% ~ +16%范围内,这个范围里包含了 90%的模拟值散点,因此应用本模型研究液膜厚度 的分布规律和影响因素是可靠的。

2 结果与讨论

考虑到 Nusselt 提出的经典冷凝液膜厚度的经 典公式中液体的喷流量对厚度的影响较大及实验中 常用的管径的大小和管外成膜的流动状态(入口流 速小于 0.05 m/s 时未成膜)<sup>[8~10]</sup> 因此模拟了 5 种 管径下(12、16、19、25、32 mm) 以及 5 种单孔流速下 (0.05、0.075、0.1、0.125、0.15 m/s) 液膜沿管壁圆 周的膜厚度的变化 来研究管外膜厚的分布规律。





Fig. 4 Distribution of the thickness of the annular liquid film when the velocity at the inlet

v = 0.125 m/s



#### 图 5 模型数据验证



设定蒸发管顶部中心线处为 0°,计算了管壁液 相体积分数为 0.8,沿环向依次取 30°、45°、60°、 75°、105°、120°、135°、150°处各液膜的厚度,结果如 表 2 所示,以上表中的数据反映出了管外水膜厚度 与入口速度 ν、管径 D、管外环向角 θ 的关系。

2.1 单孔流速对液膜厚度的影响 喷淋孔入口流速的大小影响管壁表面液膜的铺 展形态,对于管壁"干涸"现象的出现起着至关重要的作用。取管径为12、16、19、25、32 mm 及分别相 对应的喷淋高度和管间距作为计算模型。分别改变 其单孔入口流速 v,观察液体沿管壁面流动成膜情 况。为了更直观地研究膜厚与各因素之间的关系, 以9个环向角为主要研究变量(横坐标),如表2所 示绘制5个不同管径条件下的水膜厚度模拟值曲 线,如图[6~10]所示。

表2	Î	<b>箮</b> 外기	く膜層	夏度		
Tab. 2 Thickness	of	water	film	outside	the	tube

管径/mm	入口速度									
	$v / m \cdot s^{-1}$	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°
12	0.050	0.2880	0.2616	0.2448	0.2278	0.2250	0.2102	0.2110	0.2220	0.2420
	0.075	0.5020	0.39400	0.3891	0.3390	0.3260	0.3210	0.3310	0.3320	0.3440
	0.100	0.5620	0.4228	0.4006	0.3910	0.3760	0.3300	0.3940	0.4620	0.4228
	0.125	0.6178	0.5656	0.4665	0.4555	0.4341	0.3934	0.4041	0.4101	0.4210
	0.150	0.6180	0.5982	0.5796	0.5279	0.5260	0.4670	0.4753	0.4952	0.5240
16	0.050	0.3630	0.3050	0.2740	0.2620	0.2390	0.2310	0.2340	0.2390	0.2710
	0.075	0.5070	0.3970	0.3560	0.3220	0.2810	0.2700	0.2750	0.2770	0.2930
	0.100	0.5940	0.4960	0.4320	0.3930	0.3510	0.34300	0.3550	0.3610	0.3730
	0.125	0.67630	0.5720	0.5380	0.4860	0.4440	0.3920	0.4080	0.4090	0.4270
	0.150	0.7760	0.6850	0.5910	0.5400	0.5300	0.4860	0.4670	0.4670	0.4670
19	0.050	0.2717	0.2610	0.2620	0.2410	0.2300	0.2100	0.2110	0.2390	0.2710
	0.075	0.4852	0.3600	0.3310	0.2790	0.2610	0.2590	0.2440	0.2450	0.2920
	0.100	0.4652	0.4230	0.3960	0.3810	0.3510	0.3300	0.3310	0.3320	0.3320
	0.125	0.6019	0.5412	0.4654	0.4130	0.3940	0.3820	0.3890	0.3950	0.4122
	0.150	0.6119	0.5580	0.5460	0.4640	0.4630	0.4040	0.4127	0.4201	0.4256
25	0.050	0.3260	0.3200	0.3220	0.3230	0.3230	0.3210	0.3240	0.3240	0.3240
	0.075	0.3530	0.3210	0.2880	0.2710	0.2630	0.2500	0.2530	0.2640	0.2730
	0.100	0.4060	0.3840	0.3570	0.3330	0.3110	0.2920	0.3000	0.3070	0.3130
	0.125	0.5060	0.4410	0.4110	0.3940	0.3840	0.3540	0.3570	0.3630	0.3730
	0.150	0.5460	0.5320	0.4910	0.4460	0.4040	0.3940	0.3990	0.4060	0.4130
32	0.050	0.2970	0.2780	0.2470	0.2320	0.2300	0.2110	0.2350	0.2410	0.2540
	0.075	0.3890	0.3350	0.2890	0.2800	0.2710	0.2610	0.2760	0.2780	0.2800
	0.100	0.4290	0.3990	0.3690	0.3430	0.3110	0.2910	0.2990	0.3060	0.3140
	0.125	0.5090	0.4420	0.4000	0.3940	0.3610	0.3540	0.3570	0.3630	0.3740
	0.150	0.5290	0.46900	0.4120	0.3950	0.3710	0.3540	0.3570	0.3770	0.3890

由图 [6~10]可看出,液膜厚度随着入口速度 的增大而增大,这是因为入口速度增大,液体流量也 增大,促使液膜增厚。以换热管中心线为起点,沿管 壁圆周顺时针方向,液膜厚度先由厚变薄,再由薄变 厚。在105°附近达到最小值。在管子顶部,由于表 面张力的作用,管顶部液膜的转角弧度变小,壁面对 液膜有撞击作用,流体堆积,液膜厚度达到最大值, 随后液膜沿着管壁沿圆周方向逐渐铺展,液膜厚度 随之减小;在管底附近,由于重力的切向分量逐渐减 少,液膜流动的驱动力减小,而管壁摩擦力几乎没有 减小,从而导致流体流动速度减小,进而使流体在管 底附近液膜厚度变大。此外,在0°~90°内,液膜厚 度沿圆周方向降低幅度比较大;90°~120°内,液膜 厚度降低幅度最小;模拟中发现对于不同管径当入 口速度减小到一定值时,管壁面液膜厚度非常薄,如 果入口速度继续减小则管壁面液体不会铺展成膜, 管壁呈现出液滴流动的趋势,液膜厚度分布不均匀 因而对于不同的管径都存在一个使其液膜分布均 匀的最小入口速度值,实际工程操作中,应使入口速 度大于其对应的最小值,以免管壁发生"干斑"的现 象影响传热。





Fig. 6 Distribution of the thickness of the annular liquid film when the diameter of the tube D = 12 mm







### 2.2 管径大小对液膜厚度的影响

为了研究管径对成膜厚度的影响,进一步对管 径为38、45 mm 管外液膜厚度进行模拟,参照表2 数据以管径为主要变量(横坐标)研究水膜厚度,将 9个环向角下水膜厚度取平均值绘制成曲线图,如





图 8 管径 D = 19 mm 时环向液膜厚度分布

Fig. 8 Distribution of the thickness of the annular liquid film when the diameter of the tube D = 19 mm



图 9 管径 D = 25 mm 时环向液膜厚度分布 Fig. 9 Distribution of the thickness of the annular liquid film when the diameter of the tube D = 25 mm

从图 11 可以看出管外液膜厚度随着管径的增 大而减小,液体沿小管径流动时,管壁液膜厚度较 大,这与许莉和陈子琪同样在冷态条件下得出的实 验结果不相同,许莉得出的结论是:液膜厚度不随管 径大小的变化而变化<sup>[6]</sup>;陈子琪得出的结论是:管 外液膜厚度随着管径的增大而单调增加<sup>[9]</sup>。液体 沿大管径流动时,管壁液膜的减小幅度趋于平缓,这 是因为管径较大时,液体从管子顶部流动到特定环 向位置是所经过的弧长较长,摩擦阻力作用的时间 较长,流动动能损失较大,因此液膜厚度在管径较大 范围内分布较均匀,变化幅度较小;在小管径范围 内,管壁液膜厚度变化幅度较大,说明管径越小,液 膜波动程度加强。原因是随着管外直径的减小,液 膜流动的曲率半径变大,液膜流动的变化加快。此 外管径越小,管径周向的面积越小,单位面积上流过 的液体流量也就越大,因此液膜厚度也越大。



# 图 10 管径 D = 32 mm 时环向液膜厚度分布

Fig. 10 Distribution of the thickness of the annular liquid film when the diameter of the tube D = 32 mm







以入口速度为主要变量(横坐标)研究水膜厚 度 将9个环向角下水膜厚度取平均值绘制成曲线 图 加图 12 所示。从图 12 可知:在管径大小一定的 工况下 ,管外同一位置处的液膜厚度随着入口速度 的增大而增大。在入口速度一定的工况下 ,管径越 小 ,管外同一位置处的液膜厚度越大。且这种增大 的趋势随着入口速度的增大而越明显。对于工程 实际来说,某一固定的入口速度,管径过大管外液 膜波动程度相对较弱且容易出现"干涸"现象,管径 过小液膜厚度越大,导致热边界层厚度增加不利于 导热,所以应根据实际情况选取一个适当的管外 直径。



### 图 12 膜入口速度对液厚度的影响



## 3 结 论

本研究建立了水平管外降膜流动的 CFD 模型, 针对换热管外液膜分布规律的问题,分析了不同喷 淋孔入口流速、不同管径大小对管外成膜的影响及 沿环向角液膜厚度的分布规律。

结果表明:

(1)以管顶中心线为起点,沿管壁圆周顺时针 方向,管壁液膜厚度先减小在增大。在0°~90°内, 液膜厚度随着管壁周向方向的变化幅度较大;90°~ 120°内,液膜厚度降低幅度最小;在105°附近达到 最小值。

(2)随着入口速度的减小,同一位置处的液膜 厚度随之变薄。当入口速度减小到一定程度时,管 壁表面液体呈现出液滴流动的趋势,导致管壁液膜 厚度分布不均匀,管壁面出现局部"干涸"现象。

(3) 在入口速度一定时, 管径越小, 管外液膜厚度越大。同时,随着管径的增大, 管外液膜厚度分布变化幅度趋于平缓; 而小管径范围内, 管外液膜厚度分布的变化幅度较大。

#### 参考文献:

- [1] Bustamante J G Garimella S. Dominant flow mechanisms in fallingfilm and droplet-mode evaporation over horizontal rectangular tube banks [J]. International Journal of Refrigeration ,2014 ,43: 80 - 89
- [2] Gonda A ,Lancereau P ,Bandelier P ,et al. Water falling film evaporation on a corrugated plate [J]. International Journal of Thermal Sciences 2014 81: 29-37.
- [3] Kouhikamali R Noori Rahim Abadi S M A Hassani M. Numerical investigation of falling film evaporation of multi-effect desalination plant [J]. Applied Thermal Engineering , 2014 , 70 (1): 477 -485.
- [4] Hou H ,Bi Q ,Zhang X. Numerical simulation and performance analysis of horizontal-tube falling-film evaporators in seawater desalination [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer 2012 39(1): 46-51.
- [5] Zhang X Liu Z Liu W. Numerical studies on heat transfer and flow characteristics for laminar flow in a tube with multiple regularly spaced twisted tapes [J]. International Journal of Thermal.
- [6] Mohamed A M I. Flow behavior of liquid falling film on a horizontal rotating tube [J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2007,

31(4): 325 - 332.

- [7] Chen Z. The thickness measurement and heat transfer experiment of falling film outside the horizontal tube [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology 2013.
- [8] Dhir K ,Lienhard J H. Laminar Film Condensation on Plane and 2 Axisymmetric Bodies in Nonuniform Gravity [J]. Journal of Heat Transfer 1973 93(1):97-100.
- [9] Gstoehl D ,Roques J ,C risinel P ,et al. Measurement of Falling Film Thickness Around a Horizontal Tube Using a Laser Measurement Technique [J]. Heat Transfer Engineering 2004 25(8): 28 - 34.
- [10] Ou H ,Bi Q ,Ma H ,et al. Distribution characteristics of falling film thickness around a horizontal tube [J]. Desalination ,2012 ,285: 393 - 398.
- [11] Abraham R ,Mani A. Effect of flame spray coating on falling film evaporation for multieffect distillation system [J]. 2012 ,285: 393 - 398.
- [12] Shen T. Numerical simulation on flow and heat transfer characteristics of falling film evaporation outside a horizontal tube [D]. Dalian: Dalian University of Technology 2013.

(刘 瑶 编辑)

```
ु
टू
क्रिस्ट्रस्ट्रस्ट्रस्ट्र
क्रू 新技术्मरू
```

، ہے. ہے. ہے. ہے. ہے. ہے. ہے، پ

# 斯塔特韦尔克基尔订购 190 MW 冷热电联产装置

据《Gas Turbine World》2015 年 7~8 月刊报道 德国斯塔特韦尔克基尔城市公用事业公司已经选择 GE 和总承包者 Alpiq 在基尔市建设 CHP( 冷热电联产) 电厂。

该项目将配备 20 台 GE Jenbacher J920 FleXtra 燃气发动机,这是在该公司历史上最大一笔订单。天然 气发动机装置将代替燃煤装置 提供 190 MW 电力给电网和 192 MW 热能给区域热网。该电厂总效率将超 过90%,并且发电效率达45%。

GE称,该联产装置不仅确保地区电热供应,而且还保证运行经济性。与以往燃煤电站比较,CO2排放从 180 万吨减至 54 万吨左右。

鉴于风电占该区域电网的绝大部分,运行灵活性是斯塔特韦尔克基尔市冷热电联产电厂的首要要求。 Jenbacher J920 FleXtra 燃气发动机可以很好地补偿风力发电产生的波动,确保区域的供电和供热。

计划于 2016 年 5 月开始该燃气发动机冷热电联产装置的建造工作。

(吉桂明 摘译) performance of a stepped heat exchange ORC system. **Key words**: heat source flow division ,stepped heat exchange organic Rankine cycle critical temperature ,nearing critical point

水平管外降膜厚度分布规律的数值模拟研究 = Numerical Simulation Study of the Law Governing the Distribution of the Falling-film Thickness Outside a Horizontal Tube [刊] 汉]CAI Zhen ZHOU Yi-hui ,BI Mingshu ,REN Jing-jie (College of Chemical Machinery ,Dalian University of Science and Technology ,Dalian ,China , Post Code: 116024) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 31(5). - 22 ~ 28

The law governing the distribution of the liquid film thickness exercises an important influence on the falling film evaporation process outside a horizontal tube. A CFD model for the falling film flow outside a horizontal tube was established and through simulating the liquid film thickness at various inlet speeds and different sizes of the diameter of the tube *t*he factors influencing the liquid film thickness outside the tube in the cold state and the law governing its distribution along the circumferential angle were studied. The simulation results show that for a constant diameter of the tube *t*he liquid film thickness will increase with an increase of the inlet speed. When the inlet speed is constant *t*he liquid film thickness outside the tube will be relatively big in the zone at the top of the tube and arrive at its minimum around a place at a circumferential angle of 105 degrees. Moreover *t*he liquid film thickness will gradually decrease with an increase of the tube diameter. When the inlet speed decreases to a certain extent *t*he "dry-up" phenomenon will appear on the tube wall. **Key words**: falling film flow outside a horizontal tube *t*liquid film thickness *i*nlet speed *t*ube diameter *c*ircumferential angle

关于新型喷射-吸收式热变换器性能的分析 = Analysis of the Performance of a Novel Jet-absorption Type Heat Convertor [刊 汉]WANG Zi-biao, YANG Bo (College of Municipal and Environmental Engineering Sheny-ang Architectural University Shenyang China Post Code: 110168) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 31(5). - 29~33

In the light of the low temperature rise in the traditional heat convertor systems proposed was a new type jet-absorption heat convertor system with two generators. Compared with the traditional heat convertors a low pressure generator and jet ejector was introduced into the system in question: the jet ejector was driven by the high-pressure refrigerant vapor from the evaporator and the low pressure in the low pressure generator was maintained by the jet ejector , thus leading to a drop of the pressure of the lithium bromide solution in the whole system and a rise of the concentration difference in the system. An analysis of the thermal model for the system under discussion shows that the