

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.008

# 基于VOF模型的水平管蒸发器液膜流动数值研究

丁鑫, 陈晔, 贾可俊

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

**摘要:**在水平管降膜蒸发器液体分布器的设计中,布液管结构参数影响着液体的成膜质量,为了简化设计计算,提出了利用有限元数值计算软件研究开孔间距与其他结构参数的关系。开孔间距的大小与液膜在蒸发管外壁面形成的宽度有关。而影响蒸发管外壁面液膜宽度的主要因素有2个:布液孔孔径和布液孔穿孔流速。因此,课题组采用VOF模型,模拟蒸发管外壁面液膜流动形态,探讨不同孔径和穿孔流速下的液膜宽度值,利用中心复合实验得出液膜宽度 $L_m$ (开孔间距 $l$ )关于穿孔流速 $v$ 和孔径 $d$ 的关系式。结果表明:通过得到的关系式可以建立三者之间的内在关系,计算出不同孔径和穿孔流速下的开孔间距值。该关系式能够简化液体分布器布液管各结构参数的设计和计算,具有一定的参考和应用价值。

**关键词:**水平管蒸发器;液体分布器;液膜宽度;VOF模型

中图分类号:TQ051.62 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)05-0040-06

## Numerical Analysis of Liquid Film Flow of Horizontal-Tube Evaporator Based on VOF Model

DING Xin, CHEN Ye, JIA Kejun

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

**Abstract:**In the design of the liquid distributor of the horizontal-tube falling-film evaporator, film forming quality is influenced by several structural parameters of the liquid distribution tube. The relationship between opening spacing and other structural parameters was studied by using the finite element numerical calculation software to simplify the design calculation. The distributor orifice spacing is related to the width of the liquid film formed on the outer wall of the evaporation tube. There are two main factors affecting the width of the liquid film on the outer surface of the evaporation tube: distributor orifice diameter and perforation velocity. Therefore, VOF model was used to simulate the flow pattern of liquid film on the outer wall of the evaporator tube. The width of the liquid film was calculated under different distributor orifice diameters and perforation velocities. The regression equation of the liquid film width  $L_m$  (distributor orifice spacing  $l$ ), which described by distributor orifice diameters  $d$  and perforation velocities  $v$  was obtained by means of central composite experiment. The results show that the relationship between the three can be established by the obtained formula and the distributor orifice spacing of different distributor orifice diameters and perforation velocities can be calculated. This formula can simplify the design and calculation of various structural parameters of the liquid distributor, and has certain reference and application value.

**Keywords:**horizontal-tube evaporator;liquid distributor;liquid film width;VOF(volume of fluid) model

水平管降膜蒸发器因其具有蒸发效率高,传热温差小,以及对介质发泡、结焦不敏感等优点,被广泛应用于热敏性、易发泡,含盐量较高物料的蒸发浓缩<sup>[1]</sup>。

作为蒸发器最重要的组成部分,液体分布器的作用是将物料通过布液管均匀喷洒到水平蒸发管外壁面上,其管外壁液膜的质量成为评价该液体分布器性能优劣

收稿日期:2018-05-18;修回日期:2018-07-16

第一作者简介:丁鑫(1992),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要研究方向为高效节能与环保装备技术。通信作者:陈晔(1972),男,江苏无锡人,博士,教授,主要研究方向为高效节能与环保装备技术。E-mail: njutgasket@163.com

的重要依据<sup>[2]</sup>。在进行液体分布器布液管的结构设计时,不能脱离蒸发管外壁面成膜状态而臆测,两者相互影响,相互制约。根据液膜的膜厚和铺展距离可以确定布液管的结构参数,而合适的布液管结构参数有利于获得更加均匀,成膜性更好的液膜<sup>[3]</sup>。

影响蒸发管外壁液膜质量的布液管结构参数主要有4个:布液管管径 $D$ 、开孔间距 $l$ 、布液孔孔径 $d$ 和布液管穿孔流速 $v$ 。在进行数值模拟或结构设计时,较多的影响因素会使得计算量增加,如果能够找出某些结构参数之间的内在关系,就可以简化计算。液柱在蒸发管上形成的液膜宽度 $L_m$ 可以近似等于布液孔开孔间距 $l$ ,而液膜宽度 $L_m$ 与布液管穿孔流速 $v$ 和孔径 $d$ 存在一定的函数关系,故开孔间距 $l$ 也与布液管穿孔流速 $v$ 和孔径 $d$ 存在一定的函数关系。

课题组主要对蒸发管外壁液膜流动状态进行三维数值计算,分析不同穿孔流速 $v$ 、不同孔径 $d$ 对单孔成膜液膜宽度 $L_m$ 的影响。利用两因素三水平中心复合实验对 $L_m$ 与 $v$ 和 $d$ 之间的关系进行计算,拟合得到 $L_m=f(v,d)$ 的关系式,进而得到 $l=f(v,d)$ 的关系式,为布液管的数值模拟和结构设计提供一定的参考。

## 1 液体分布器相关参数范围的选择

在液体分布器布液管的设计制造中,布液孔孔径的取值不能太大,当 $d \geq 5$  mm时,液体的穿孔流速和流量过大,在蒸发管外壁面易形成液体飞溅和液膜波动,影响液体成膜性和传热系数。而当 $d < 2$  mm时,基本达到了常见机械加工方法的加工极限,因此孔径 $d$ 的取值范围选在2~4 mm之间。

赵龙陆等<sup>[4]</sup>通过实验对不同喷淋密度下,蒸发管外的传热系数进行了研究,在水介质条件下,布液管孔间距 $l=23$  mm,孔径 $d=3$  mm,喷淋高度 $H=20$  mm的实验条件下,在喷淋密度为 $0.05 \sim 0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内进行实验,结果表明:在 $\Gamma=0.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,管外壁传热系数取得最大值,液膜状态也趋于稳定。同时,给出了该实验条件下最佳的喷淋密度范围是 $0.12 \sim 0.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,计算出实验条件下最佳的穿孔流速为 $0.391 \sim 0.586 \text{ m/s}$ 。故在进行数值模拟时,相应的将该穿孔流速的范围扩大一些,取 $0.3 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 。

## 2 液膜流动三维计算模型的建立

考虑到液膜在蒸发管间流动时,不仅沿管壁面周向流动,还会沿蒸发管轴向横向铺展。因此,为了能够更加清晰准确客观地描述液膜在蒸发管外壁面流动状态,选择三维模型进行数值模拟计算。

## 2.1 数值计算模型和求解方法的选择

液膜在蒸发管壁面流动状态的研究,属于特定求解区域内气液两相流动的变化问题。在FLUENT软件多相流求解模型中,选择VOF(volume of fluid)模型来动态捕捉气液两相交界面,以获得气液交界面上的液相流动边界。VOF模型是通过计算每一个网格中某一种相的体积分数比来定义气液交界。网格中某一相的体积分数范围在0到1之间,通过几何界面重构法将不同体积分数的网格重构成一条边界线,虽然界面重构法会导致一定的界面失真,但基本能够重构出实际的液膜边界线<sup>[5]</sup>。

对于数值模型求解方法的选择,在FLUENT软件中关于压力速度耦合方程的就有PISO和SIMPLE等算法。课题组选择PISO求解算法进行计算,相较于SIMPLE算法,该算法能够同时对速度场和压力场进行修正,并代入下次的迭代计算中,具有网格适应性好,更易收敛的优点<sup>[6]</sup>。

## 2.2 物理模型与网格划分

考虑到蒸发管对称结构,沿蒸发管模型进行2次切割,即沿蒸发管轴向垂直切割和沿中心线切割,取1/4模型进行模拟计算,几何模型如图1所示。其中,蒸发管管径 $D=30$  mm;选取的模型管长 $l_2=50$  mm,相邻蒸发管间距取10 mm,故 $l_1=25$  mm。

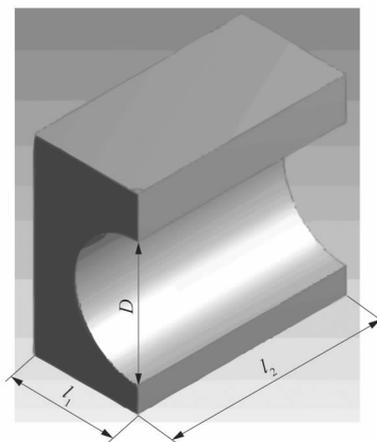


图1 几何模型

Figure 1 Geometric model

在网格划分时,在边界层处,特别是气液两相接触的区域,如在圆管壁面区域,划分精度达不到要求,需要对其进行网格加密,插入Inflation边界层网格,共15层。最终网格划分结果如图2所示。

## 2.3 假设简化与物性参数

在对蒸发管外壁液膜的模拟之前,需要对蒸发管

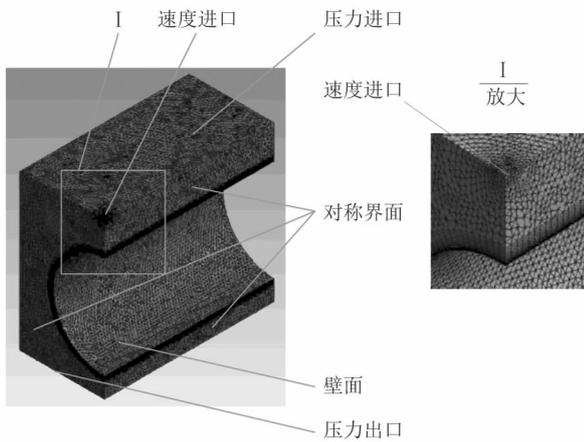


图2 几何模型网格划分

Figure 2 Geometric model grid partition

外壁实际液膜流动状态进行假设和适当的简化<sup>[7]</sup>:

- ① 默认蒸发物料为牛顿流体,连续不可压缩,在降膜过程中其物性参数为常数,不会发生改变;
- ② 不考虑壁面蒸发和传热,只对液膜流动状态进行研究;
- ③ 默认液相水之外的所有空间都是气相;
- ④ 蒸发管外壁面为无滑移壁面边界。

蒸发管外为常压环境,液体为 100 °C 水,气体为 100 °C 水蒸气,该温度下物料的物理参数如表 1 所示。

表1 物性参数

Table 1 Physical parameters

物料	密度 $\rho /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏度 $\mu \times 10^{-5} /$ ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	表面张力 $\sigma /$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )
100 °C 水	958.400	28.250	0.058 8
100 °C 水蒸气	0.598	1.269	

## 2.4 边界定义与条件设置

定义单元模型上界面与两对称界面交界处为速度进口界面,进口速度根据模拟情况而定;定义上界面和后侧面为压力进口界面,压力差为 0;定义下界面为压力出口界面,压力差也为 0;蒸发管外管壁为壁面;定义其他 4 个界面为对称界面。

在进行有限元计算时,对管外液膜流动状态的模拟选择体积分数模型(VOF),液体流动为层流流动。采用非定常方法进行计算,有利于观察整个液膜流动的过程,时间步长为  $10^{-5}$  s,总时间设定为 5 s,收敛精度选择  $10^{-3}$ 。

## 3 液膜宽度模拟结果与分析

为了研究各因素对液膜在蒸发管壁的流动的影响,

对不同穿孔流速和孔径下的流动状态进行数值模拟,每个影响因素取 3 个水平,共 9 组。前面已经分析了穿孔流速的取值范围为 0.30 ~ 0.60 m/s,故 3 个水平取值分别为 0.30,0.45 和 0.60 m/s。孔径的取值范围为 2 ~ 4 mm,故 3 个水平取值分别为:2,3 和 4 mm。

### 3.1 液膜宽度的数值模拟结果

图 3 所示为穿孔流速  $v=0.60$  m/s,孔径  $d=2$  mm 条件下,由单孔流出模型计算得到的蒸发管外壁面的液膜形成过程。

图 3(a)中,当  $t=0.02$  s 时,液柱从布液孔流出,还未接触到壁面。图 3(b)中,当  $t=0.04$  s 时,液柱接触壁面,并开始壁面上形成液膜。从图 3(c)~(e)中,可以看出,随着流动的进行,液膜在壁面沿轴向和周向方向同时延伸。当液膜在管壁上半部分流动时,轴向上由于液柱下落时的冲击力较大,较快的流速使液膜向两边迅速流动,液膜覆盖区域的范围不断扩大,但在周向上,由于重力的分力较小,液膜向下流动的速度明显慢于向两边扩展的速度,开始形成“马鞍形”。当液膜流到管壁下半部分时,由于速度冲击力减弱,表面张力和壁面黏性力的作用加强,使得液膜在轴向上的速度逐渐减小,而重力方向上的分力增加,故液膜沿周向上流动的速度增加,中间液膜流速明显大于两边。图 3(f)中,可以看出在  $t=0.24$  s 时,液膜已经流到蒸发管底部,但不会立刻下落,而是在管壁底部开始堆积。图 3(g)中,可以看出在蒸发管底部,随着液体越积越多,有向两边扩展的趋势。图 3(h)中,在  $t=0.5$  s 时,重力作用大于液体表面张力和黏性力时,液体开始下落。图 3(i)中,在  $t=0.58$  s 时,液体呈柱状流流出,至下一根蒸发管壁,一个液膜流动的周期结束。

从液膜形成过程,尤其是图 3(i)中可以明显地看出,液膜在管壁面流动时,其在蒸发管轴向上铺展达到一定距离后就几乎不再变化,且顶部的液膜铺展距离大于底部。而铺展距离决定了布液管上两孔之间的孔间距。在布液管孔间距的判断中,由于必须保证布液管相邻两孔的孔口出流在蒸发管外壁上所形成的液膜之间有一定的重叠,否则在蒸发管液膜区域内一定会存在未被液膜覆盖的区域,形成“干烧”现象<sup>[8]</sup>。因此,可将这种液体流动时所形成液膜在蒸发管底部形成的铺展距离定义为液膜宽度  $L_m$ ,如图 4 所示。

利用 CFD-Post 后处理软件,测量不同布液孔径和穿孔速度下,液膜流动稳定后的液膜宽度,结果如表 2 所示。

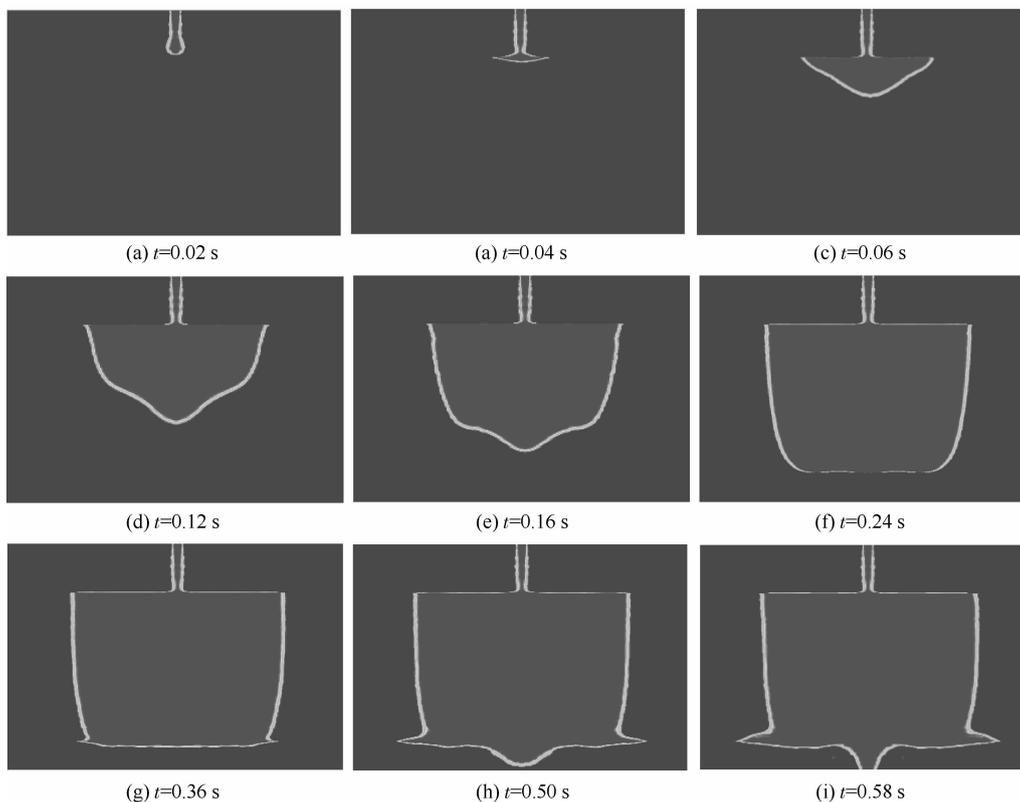


图3 液膜的形成过程

Figure 3 Formation process of liquid film

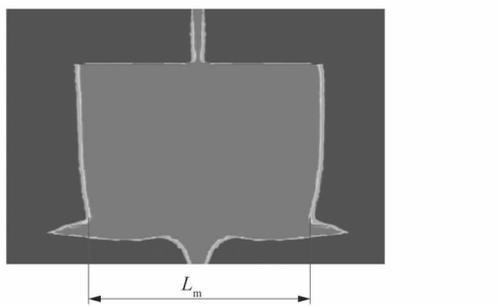


图4 液膜宽度

Figure 4 Liquid film width

表2 不同工况下的液膜宽度  $L_m$  值

Table 2 Width of liquid film under different conditions  $L_m$

穿孔流速 $v$ / ( $m \cdot s^{-1}$ )	液膜宽度 $L_m$ /mm		
	孔径 $d$ /mm		
	2	3	4
0.30	32.2	43.3	56.6
0.45	36.1	48.2	62.2
0.60	44.6	60.0	71.0

不同工况条件下的液膜宽度如图5所示。从图5

可知,  $L_m$  值随着穿孔流速和孔径的增加而增大。这是因为穿孔流速和孔径的变化会直接影响布液孔的穿孔流量, 穿孔流量越大, 液膜在管壁面上的铺展区域随之增大, 液膜宽度也就越大。

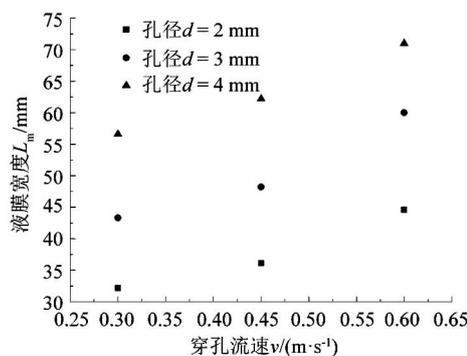


图5 不同工况条件下的液膜宽度

Figure 5 Liquid film width under different operating conditions

### 3.2 液膜宽度的中心复合分析

利用中心复合设计对液膜宽度进行两因素三水平的中心复合实验分析<sup>[9]</sup>, 表3给出了中心复合实验方案 and 不同工况下液膜宽度的三维数值模拟结果。

表 3 中心复合实验设计方案及实验结果

Table 3 Design scheme and experimental results of central composite experiment

组编号	区组	孔径 $d/\text{mm}$	穿孔流速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	液膜宽度 $L_m/\text{mm}$
1	1	2.00	0.300	32.20
2	1	2.00	0.600	44.60
3	1	4.00	0.300	56.60
4	1	4.00	0.600	71.00
5(c)	1	3.00	0.450	48.23
6(c)	1	3.00	0.450	48.25
7	2	1.59	0.450	36.10
8	2	4.41	0.450	62.20
9	2	3.00	0.298	43.30
10	2	3.00	0.712	60.00
11(c)	2	3.00	0.450	48.21
12(c)	2	3.00	0.450	48.24

表 4 方差分析表

Table 4 Table of ANOVA

因素	方差平方和	自由度	均方差	F 值	p 值	显著性
区组	4.307	1	4.307 0	95.71	0.010 287	*
$d_L$	961.652	1	961.651 9	21 370.04	0.000 047	***
$d_Q$	5.846	1	5.846 4	129.92	0.007 609	**
$v_L$	241.742	1	241.742 0	5 372.05	0.000 186	**
$v_Q$	6.078	1	6.078 0	135.07	0.007 322	**
穿孔流速和孔径交互项	1.000	1	1.000 0	22.22	0.042 174	*

利用中心复合分析得到各项回归系数,故液膜宽度  $L_m$  值、孔径  $d$  和穿孔流速  $v$  的二次表达式为:

$$L_m = 18.687 + 3.739d + 0.954d^2 - 6.709v + 40.807v^2 + 3.333vd. \quad (1)$$

拟合相关度  $R = 0.977 1$ , 其计算值与模拟值的对比如图 6 所示。

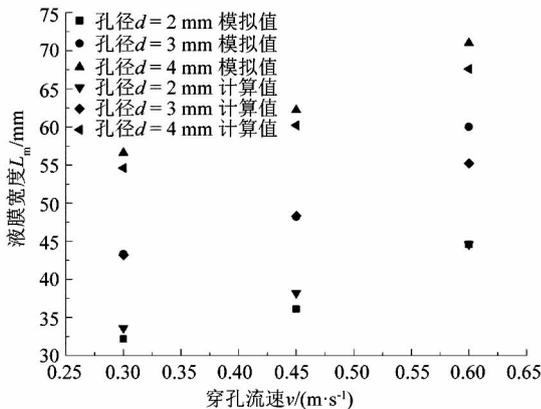


图 6 液膜宽度  $L_m$  计算值与模拟值

Figure 6 Calculated and simulated values of liquid film width  $L_m$

其中,第 5,6,11 和 12 组为增加的中心试验,对该工况下进行 4 次实验,可以估计随机实验的可靠性,检验残差的显著性。第 7,8,9 和 10 组中各因素和水平值在原来的水平上乘以二次回归旋转组合设计参数值  $\gamma$ ,当因素值为 2 时,  $\gamma = \sqrt{2} = 1.414$ ,但仍按照原来的水平进行实验。

利用 STATISTICA 软件进行中心复合设计分析,方差分析结果如表 4 所示。

从表 4 中  $p$  值一栏可以看出,孔径的一次项  $d_L$  对液膜宽度的影响高度显著 ( $p < 0.000 1$ );孔径的二次项  $d_Q$ 、穿孔流速的一次项  $v_L$  和二次项  $v_Q$  对液膜宽度的影响显著 ( $p < 0.01$ );穿孔流速和孔径的交互项对液膜宽度的影响较显著 ( $p < 0.05$ )。孔径和穿孔流速对液膜宽度的影响排序为:孔径  $d >$  穿孔流速  $v$ 。

从图 6 可见,式(1)计算值与数值模拟值基本吻合。其中,在孔径 3 mm,穿孔流速 0.6 m/s 工况下,两者之间的最大偏差值  $\eta = 8.1\%$ 。说明式(1)在布液管孔径  $d = 2 \sim 4$  mm,穿孔流速  $v = 0.3 \sim 0.6$  m/s 的范围内,可以获得较好的计算精度。

式(1)给出了液膜宽度  $L_m$  与布液管孔径  $d$ 、穿孔流速  $v$  之间的函数关系式,前面已经分析出液膜宽度  $L_m$  可以近似等于布液管开孔间距  $l$ ,故开孔间距  $l$  与布液管孔径  $d$ 、穿孔流速  $v$  之间的函数关系式为:

$$l = 18.687 + 3.739d + 0.954d^2 - 6.709v + 40.807v^2 + 3.333vd. \quad (2)$$

在布液管的设计中,只需给出孔径和穿孔流速,就可以利用该式计算出开孔间距的值,为水平管降膜蒸发器液体分布器的设计提供一定的参考。

#### 4 结语

1) 采用 VOF 模型对不同穿孔流速和不同孔径条件下液膜在蒸发管外壁面的流动过程进行了三维数值模拟。通过模拟结果可以看出,在整个流动周期中,液膜受到各种力的作用,在不同时刻呈现出不同的流动

(下转第 52 页)