

制冷系统中水平管降膜式蒸发器内部流动数值模拟

阮并璐, 刘广彬, 赵远扬, 李连生

(西安交通大学流体机械与压缩机国家工程研究中心, 710049, 西安)

摘要: 采用 FLUENT 两相流 VOF 模型, 对制冷系统中水平管降膜式蒸发器内部流场进行了数值模拟, 研究了蒸发器内部蒸发管的不同布管方式对蒸发器内部流场的影响. 计算结果表明: 由于蒸发器入口制冷剂液体的滴落速度较小, 而蒸发器内部气体流速相对较大且流场不均匀, 因此导致液体垂直下落过程中受流场的影响较大; 针对入口制冷剂流速不大的情况, 预留水平的气流通道有助于改善蒸发器内部流场; 较大宽度的气流通道有助于蒸发器内部流场的优化, 该研究中满液式蒸发所占的比重较大, 所以上部预留较小宽度, 下部预留较大宽度有利于整体流场的优化.

关键词: 降膜式蒸发器; 数值模拟; 制冷系统; 布管方式; 气流通道

中图分类号: TB657.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0318-05

Numerical Simulation of Flow Inside Falling Film Evaporator with Horizontal Tubes Refrigeration System

RUAN Binglu, LIU Guangbin, ZHAO Yuanyang, LI Liansheng

(National Engineering Research Center of Fluid Machinery and Compressor, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Simulation on the inner flow field of a horizontal tubes of falling film evaporator in a refrigeration system was performed using two-phase flow model VOF in FLUENT, and the influence of different tube arrangements on the flow field was examined. The results show that the large vapor velocity and the non-uniform flow field inside the evaporator affect the distribution of liquid droplets significantly because of the small refrigerant liquid velocity. When the velocity of the refrigerant flowing into the evaporator is small, it seems more suitable to adopt the tube arrangement with horizontal vapor passages. It is likely that the tube arrangement with smaller space in the upper portion and larger space in the lower portion is more reasonable because of the large proportion of the vapor from flooded refrigerant inside the bottom of the evaporator.

Keywords: falling film evaporator; numerical simulation; refrigeration system; tube arrangement; vapor passage

水平管降膜蒸发是一项高效节能的蒸发换热技术, 广泛地应用于化工蒸馏和吸收式制冷系统中. 将水平管降膜蒸发技术应用于蒸气压缩式制冷系统中, 会使制冷系统具有以下优点: 换热效率高; 设备体积小; 成本低; 制冷剂充注量少; 回油性能良好^[1]. 因此, 该技术研究已经成为制冷领域的一个新的研究方向.

水平管降膜蒸发器的核心技术是如何将制冷剂均匀地分配到蒸发管束上, 避免由于蒸发管局部“干

燥”而导致整体机组的性能下降. 研究将制冷剂均匀分配到管束, 除了蒸发管束上方制冷剂分配器的分配效果^[1-2]和制冷剂流量外^[3-4], 蒸发器内部的管束布置方式以及气流扰动情况也是影响均匀性的关键因素^[5-6].

本文采用数值模拟的方法, 通过改变蒸发器内部管阵排列方式来研究其内部流动特性, 并对不同布置方式进行了比较分析, 从而达到优化降膜蒸发器内部流场的目的. 通过对蒸发器内部管排的排列

方式和气流通道的布置方式进行数值模拟,使得下落液体更为均匀,从而达到优化流场的目的,在工程应用上具有重要的意义。

1 数值模拟

1.1 物理模型及网格划分

图1为水平管降膜式蒸发器的内部结构示意图。降膜式蒸发器主要是由壳体内部的管束和壳体上部的布液器组成。制冷剂以一定的速度从布液器下方的孔中滴淋到管束上,并在管外吸热蒸发。蒸发出的制冷剂气体从预留的气流通道中排至蒸发器壳体两侧后汇入蒸发器顶端出口,进入压缩机。水平管降膜式蒸发器的下部有部分蒸发管浸泡在制冷剂中,这部分蒸发管类似于满液式蒸发,且这部分工质含油量较大,泵以一定的方式将富油工质输送到压缩机内,以满足压缩机内部润滑的要求。

由于蒸发器内部左右对称,取图1中阴影部分的一半为研究对象。网格划分如图2所示,其中蒸发管附近区域进行网格加密。

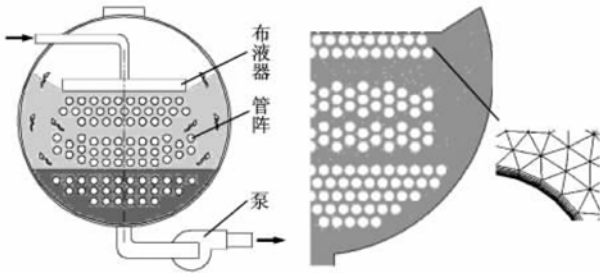


图1 水平管降膜式蒸发器示意图

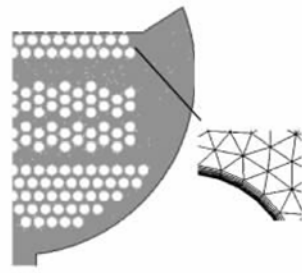


图2 研究区域的网格划分图

1.2 基本假设及控制方程组

本文采用对于计算时间依赖的VOF模型来跟踪穿过区域的每一部分流体的体积分数,从而模拟气液两相流场。对于网格的节点,则是利用隐式迭代求解代数方程组来进行计算。为了简化计算流场,基本假设如下:

(1)空间为二维直角坐标系统,且根据蒸发器端面对称的特性,只计算一半;

(2)流场为非稳态流场,按照层流计算;

(3)压力速度的耦合方式采用SIMPLE算法;

(4)考虑浮力的影响并满足Boussinesq近似。

降膜式蒸发器内部流场可用如下方程组描述。

连续方程

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

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + S_v \quad (3)$$

式中: μ 为流体黏性系数; S_u 和 S_v 分别为 u 方向和 v 方向动量方程的源项,源项包括质量力和体积力。

体积分数方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_1 u) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_1 v) &= \frac{S_{\varphi_1}}{\rho} \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_2 u) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_2 v) &= \frac{S_{\varphi_2}}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: φ_1 、 φ_2 分别为气相和液相的体积分数; ρ_1 、 ρ_2 分别为气相和液相的密度; S_{φ_1} 、 S_{φ_2} 分别为气相和液相体积分数方程的源项,对于两相流动系统需满足 $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$ 。

物性方程:在两相流系统中,出现在输运方程中的物性由存在于每一控制容积中的分相决定。对于每一个单元的密度有

$$\rho = \varphi_2 \rho_2 + (1 - \varphi_2) \rho_1 \quad (5)$$

诸如黏度等的其他属性也按照同样的方法来计算。

1.3 边界条件

1.3.1 液相制冷剂入口边界条件 假设进入计算区域的制冷剂全部为液相,给定通过布液器均匀布液后的制冷剂流速为0.03 m/s,此入口边界条件满足水平管降膜蒸发效果最好的柱状流动条件^[7]。

1.3.2 蒸发管壁面入口边界条件 薄膜蒸发的传热机理复杂,现有文献中尚无完整的计算模型,且本文研究目的是蒸发器内部流场分布情况,故做如下简化:将蒸发管壁设置为气体入口边界,并根据蒸发量来折算进入计算区域的气体质量,以此模拟管壁蒸发所产生的蒸气,并研究它对自上而下的液体的影响,具体折算方法如下

$$\dot{m}_{\text{film}} = h_{\text{film}} \Delta t_m A_o \quad (6)$$

$$v_{\text{in, film}} = \frac{\dot{m}_{\text{film}}}{\rho_v A_o} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{\text{flood}} = h_{\text{flood}} \Delta t_m A_o \quad (8)$$

$$v_{\text{in, flood}} = \frac{\dot{m}_{\text{flood}}}{\rho_v A_o} \quad (9)$$

式中: h_{film} 、 h_{flood} 分别为降膜式蒸发和满液式蒸发的换热系数; \dot{m}_{film} 、 \dot{m}_{flood} 分别为降膜式蒸发和满液式

蒸发单管的管壁气体质量流量; $v_{in, film}$ 、 $v_{in, flood}$ 分别为折算后的降膜式蒸发和满液式蒸发单管管壁的进气速度; Δt_m 为传热的对数平均温差; A_o 为蒸发管的外表面积; ρ_v 为气相制冷剂的密度.折算后的降膜式和满液式蒸发管管壁入口边界的气体速度分别为0.01和0.004 m/s.

1.3.3 制冷剂蒸气出口边界条件 采用压力出口边界条件.

1.3.4 液相制冷剂出口边界条件 为了模拟泵将底部富油制冷剂抽取到压缩机这一过程,并且使满液式蒸发部分的液位保持基本恒定,采取在X-Y平面上,给定出口面积与入口总面积相等,并且液相制冷剂出口与入口边界速度大小一致、方向相反的方法,即给定此制冷剂出口速度为-0.03 m/s.

2 计算结果及优化

本文通过模拟不同的管排布置方式实现对蒸发器内部流场的优化.

通常在蒸发器内部管阵中设置一定的气流通道,来引导气体从一定的方向流出管阵汇聚到蒸发器壳体两侧后流出蒸发器,从而能够尽可能小地扰动制冷剂液体的下落.气流通道的设置可以从通道角度和通道宽度2个方面来进行设计和优化.

2.1 不同气流通道角度的比较及优化

图3、图4为蒸发管个数相同、气流通道角度不同时管阵排列的计算结果图.

在图3a、图4a中气流通道与水平线的夹角 θ 为 $\arctan 1/2$,在图3b、图4b中,气流通道与水平线的夹角为0.由图3a、图4a可以看出,倾斜气流通道管阵的速度梯度较大,而水平气流通道管阵的速度梯度较小,流场相对均匀稳定.在气相体积分数(φ_1)云图中,白色部分为全气相,黑色部分为制冷剂液体.从图4a可以看出,制冷剂液体受气流扰动较大,不少管阵的中部管束出现“干燥”现象,这会导致局部管束换热能力的急剧下降,从而影响整个制冷机组的性能.图3b的布管方式相对较为合理,可以看到:几乎每根蒸发管上都有制冷剂液体的分布.这是由于倾斜的气流通道使得气体容易汇聚于气流通道并形成较大的蒸气速度,形成较为不均匀的流场;另一方面,蒸发器进口制冷剂液体的速度较小,更易受到不均匀流场的干扰.因此,针对入口制冷剂流速小的情况,要减小气流通道中产生局部速度偏大的可能性,需要平衡两方面因素:一方面,下部制冷剂蒸气

能够顺利地的气流通道中流出,从而较小地扰动到上部管束周围的气流;另一方面,气流通道中汇聚成股的蒸气要减小对下落制冷剂液体的扰动.针对本研究中的边界条件,预留水平气流通道有助于平衡以上两方面因素,有利于改善蒸发器内部流场.

2.2 不同宽度的气流通道比较

由于水平管降膜式蒸发器下部有部分管束浸泡在制冷剂液体中,同时参与蒸发换热,使整体蒸发器内部存在气体量较多或较少的局部,因此需要通过调整气流通道的宽度来更好地使流场趋于均匀.

图5、图6为4种不同气流通道流场的计算结果.其中,图5a、图6a设置2排气流通道,图5b~图5d、图6b~图6d设置3排气流通道,图5b、图6b的气流通道宽度相同,图5c、图6c的气流通道宽度从上而下依次递增,图5d、图6d的气流通道宽度从上而下依次递减.气流通道的宽度见表1,其值由蒸发器端面轴对称线上气流通道上下相邻的2个蒸发管的管间距来定义,并且将气流通道从上到下依次设定为①号、②号和③号.

表1 不同气流通道的宽度

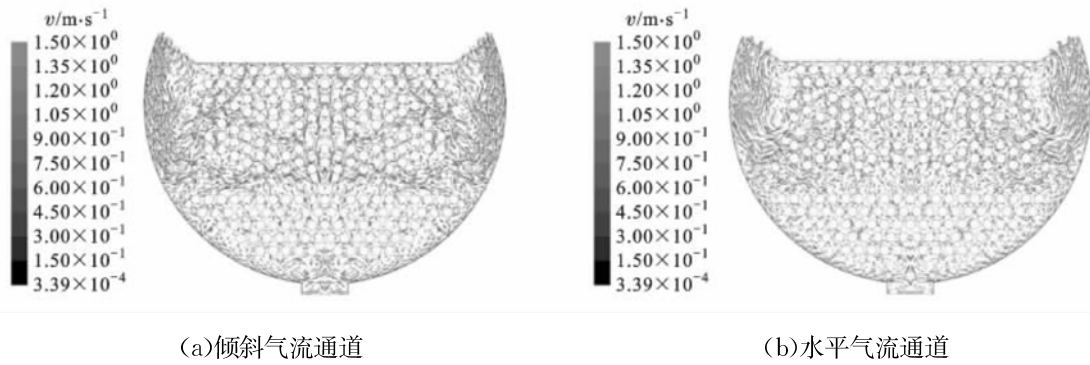
管阵	气流通道宽度		
	①号	②号	③号
(a)	3.158d	3.158d	
(b)	2.544d	2.544d	2.544d
(c)	1.579d	2.632d	3.421d
(d)	3.421d	2.632d	1.579d

注: d 为蒸发管的管径;(a)~(d)相对于图5、图6中(a)~(d)所示的管阵的排列方式.

从图4~图6可以看到,气流通道宽度对流场的影响虽然没有通道角度对流场的影响大,但随着通道宽度的变化,流场也有一定变化.其中,图5b、图6b的气流通道中气体速度较大,因此导致通道中下落的制冷剂液体受气流扰动较大,出现局部管阵“干燥”现象.由图6可以看出,管阵(a)、(c)、(d)的下落液体分布都较为均匀.图6d是由于上部较大宽度的气流通道使得有限的制冷剂蒸气气流通道中不易汇聚成速度大的蒸气流,从而对下落液体扰动较小.图6a中虽然只有2个气流通道,但由于蒸发器整体空间有限,其单个气流通道的宽度比设置3个气流通道管阵的宽度大,从而气流不容易汇聚成速度大的蒸气流.图6c由于上部气流通道宽度较小,下落液体来不及受到上升蒸气的扰动就已经滴淋到①号气流通道下的管束上,并且由于蒸发器下部满

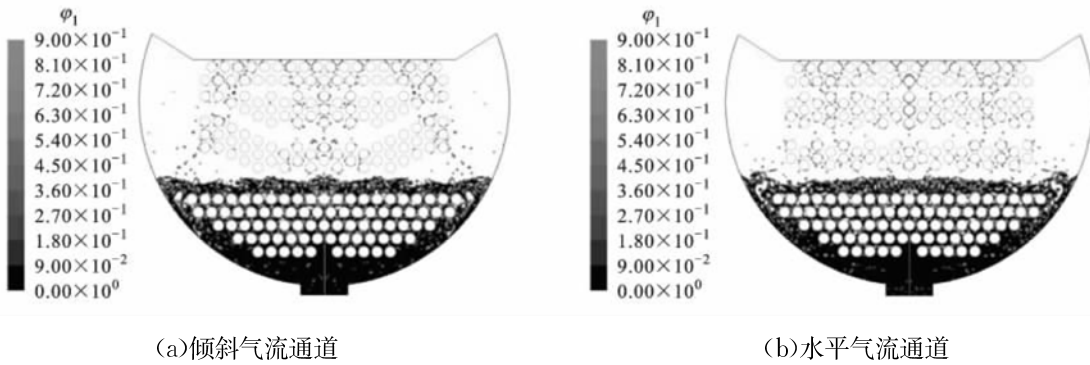
液式蒸发管间无气流通道,其产生的蒸气量较为集中,下部气流通道的宽度开设较大,有利于疏导此部分

蒸气流出蒸发器,故气流通道的此种开设方式相对更为合理。



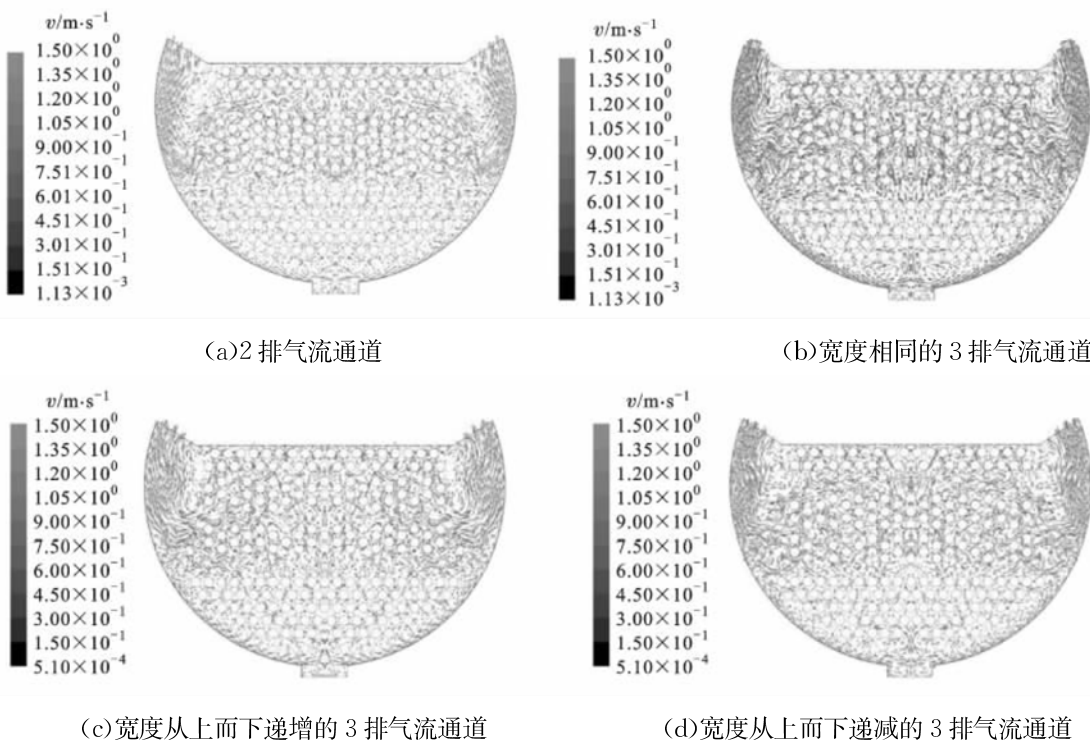
(a)倾斜气流通道 (b)水平气流通道

图3 不同角度气流通道的速度矢量图



(a)倾斜气流通道 (b)水平气流通道

图4 不同角度气流通道的气体体积分数云图



(a)2排气流通道 (b)宽度相同的3排气流通道
(c)宽度从上而下递增的3排气流通道 (d)宽度从上而下递减的3排气流通道

图5 不同宽度气流通道的速度矢量图

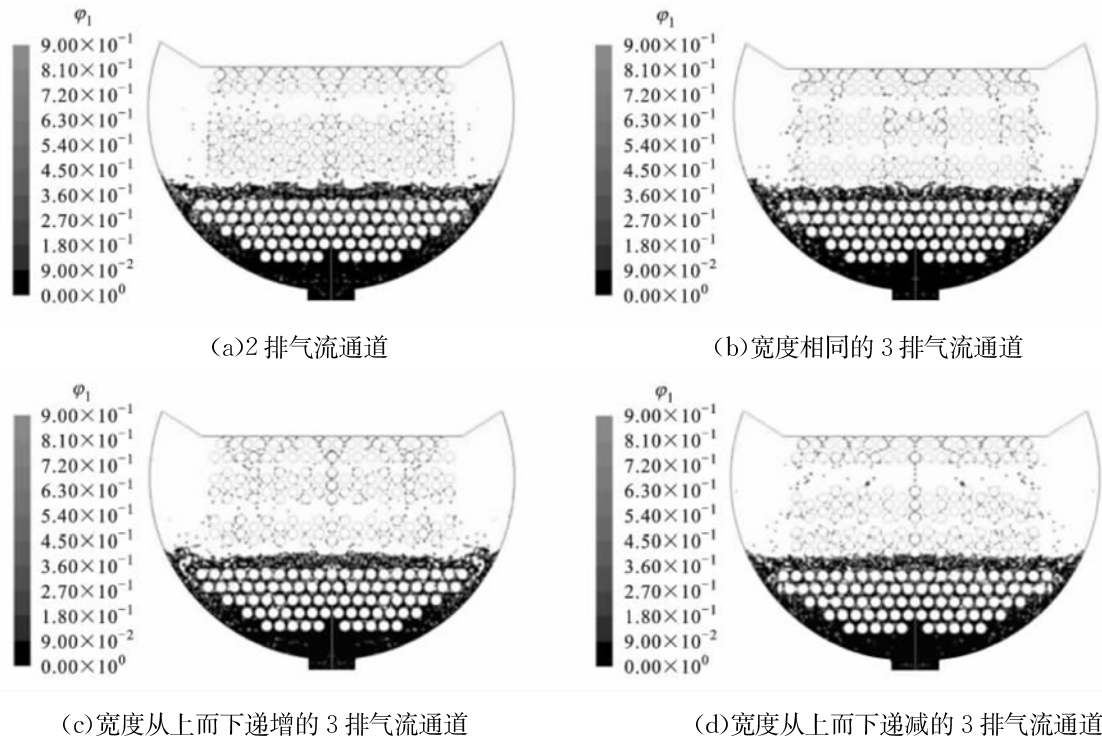


图6 不同宽度气流通道的气相体积分数云图

3 结论

(1)由模拟出的气相体积分数云图显示,由于蒸发器入口制冷剂液体的流速较小,加之蒸发器内部气体上升速度快,导致下落液体受上升蒸气影响大。

(2)从不同角度气流通道管阵流场的模拟结果图中可以看出,针对入口制冷剂流速不大的情况,水平气流通道有助于改善蒸发器内部流场,使得制冷剂液体均匀下落到管束。

(3)本文通过对4种不同宽度的气流通道的布管方式的研究发现,较大宽度的气流通道有助于获得均匀的流场。由于本研究中满液式蒸发的气量较为集中,且蒸发器内部空间有限,故上部预留较小宽度、下部预留较大宽度的气流通道有利于蒸发器内部整体流场的优化。

参考文献:

- [1] RIBATSKI G, JACOBI A M. Falling-film evaporation on horizontal tubes—a critical review [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28: 635-653.
- [2] FUJITA Y, TSUTSUI M. Experimental and analytical study of evaporation heat transfer in falling films on horizontal tubes [C]//Proceedings of the 10th interna-

tional heat transfer conference. Brighton, UK; IChem E, 1994:175-180.

- [3] MOEYKENS S A, HUEBSCH W W, PATE M B. Heat transfer of R-134a in single-tube spray evaporation including lubricant effects and enhanced surface results [J]. ASHRAE Trans, 1995, 101 (1):111-123.
- [4] HU X, JACOBI A M. The intertube falling film: mode effects on sensible heat transfer to a falling liquid film [J]. ASME J Heat Transfer, 1996, 118: 626-633.
- [5] MOEYKENS S A, NEWTON B J, PATE M B. Effects of surface enhancement film-feed supply rate, and bundle geometry on spray evaporation heat transfer performance [J]. ASHRAE Trans, 1995, 101 (2): 408-419.
- [6] CHANG T B, CHIOU J S. Spray evaporation of R-141b on a horizontal tube bundle [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1999, 42: 1467-1478.
- [7] ROQUES J F, THOME J R. Falling film transitions between droplet, column, and sheet flow modes on a vertical array of horizontal 19 FPI and 40 FPI Low-finned tubes [J]. Heat Transfer Engineering, 2004, 24: 40-45.

(编辑 王焕雪)