

液膜破裂对 PCCS 降膜的影响*

朱思文¹, 刘玉岚^{1,2}, 王彪², 丁鹏¹

1. 中山大学航空航天学院, 广东 广州 510006
2. 中山大学中法核工程与技术学院, 广东 珠海 519082

摘要: 液膜的流动、分叉和溪流等物理过程与核电站安全壳非能动冷却系统 (PCCS) 等诸多实际工程问题密切相关, 近来备受研究者的关注。文章针对 AP600 的 PCCS 液膜流动问题, 利用数值方法计算液膜破裂对覆盖率的影响。采用一维欧拉液膜模型计算 PCCS 液膜流动, 并利用 EI-Genk 和 Saber 模型模拟液膜破裂过程。结果表明, PCCS 液膜厚度在装置顶部变化较大, 容易发生液膜破裂和溪流。通过研究液膜覆盖率与 PCCS 流量的关系, 给出了符合安全标准的流量。

关键词: 液膜流动; 液膜破裂; 溪流; PCCS

中图分类号: TB126 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 03-0099-06

Effect of breakup on the falling film in PCCS

ZHU Siwen¹, LIU Yulan^{1,2}, WANG Biao², DING Peng¹

1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China
2. Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

Abstract: Physical processes of liquid film, such as flow, breakup, and rivulets, are closely related to lots of practical engineering issues such as the passive containment cooling systems (PCCS) of nuclear power. Researchers have been paying more and more attentions on these physical processes recently. As for the PCCS liquid film flow of AP600, the numerical methods were applied in this paper to calculate the influences of liquid film breakup on coverage rate. In this study, the one-dimensional Eulerian liquid film model was adopted to calculate the PCCS liquid film flow, and the EI-Genk and Saber models were adopted to simulate the liquid film breakup process. The results show that the thickness of the PCCS liquid film varies a lot at the upper dome of the facility, which could easily induce liquid film breakup and rivulets. By studying the relationship between liquid film coverage and PCCS flow rate, the flow rate meeting safety standards is obtained.

Key words: film flow; film breakup; rivulets; PCCS

液膜沿着竖直壁面或斜面流动, 在很多工程技术领域中都有着很重要的应用, 如热交换机、核电安全壳外壁面非能动冷却系统 (PCCS) 和微

流体等。近来, 液膜的流动、分叉和溪流等物理过程与 PCCS 等诸多实际工程问题密切相关, 成为研究者们关注的焦点^[1-3]。

* 收稿日期: 2020-01-10 录用日期: 2020-02-27 网络首发日期: 2021-01-07

基金项目: 国家自然科学基金 (11232015, 11572355)

作者简介: 朱思文 (1991 年生), 男; 研究方向: 安全壳严重事故分析; E-mail: 370535010@qq.com

通信作者: 刘玉岚 (1962 年生), 女; 研究方向: 工程力学; E-mail: stsllyl@mail.sysu.edu.cn

在 PCCS 中, 当流体在竖直壁面或斜面上流动时, 液膜受到壁面和空气摩擦力的影响, 其厚度和速度也会发生改变。Anderson 等对西屋 AP600 中的 PCCS 系统液膜流动进行了相关的实验研究^[4]。数值研究方面, Broxtermann 等基于集总参数法程序 COCOSYS 计算模拟 AP1000 的非能动安全壳冷却系统^[5]。Kennedy 等基于集总参数法 Westinghouse-GOTHIC 程序研究 PCCS, 并与 AP600 的实验数据进行对比^[6]。由于集总参数方法无法得到具体液膜厚度演化, 所以部分研究基于 CFD 方法计算壁面液膜流动问题。Wang 利用 VOF 方法针对斜板液膜流动过程, 研究不同的液膜流速和流体粘性对液膜厚度的影响^[2]。Sun 等利用瞬态液膜追踪模型研究液膜流动的厚度、速度以及温度, 并对 AP600 的 PCCS 实验进行了数值研究^[7]。

此外, 如图 1 所示, 液膜破裂对冷却水的壁面覆盖率有很大影响, 从而降低 PCCS 的冷却能力, 所以液膜破断是 PCCS 系统需要尽可能避免的情况。在液膜沿壁面流动过程中, 由于液膜受重力和表面张力的影响, 当质量流量减小时, 液膜厚度随之减小, 液膜自由面不稳定, 会产生液膜破裂。一般保持水膜完全覆盖的最小质量流速称为最小润湿速率 MWR (Minimum Wetting Rate)。研究液膜破断行为的一个重要意义, 就是控制非能动安全壳冷却系统降膜的质量流速维持在 MWR 可以更大效用地利用有限的水资源, 延长非能动安全壳冷却系统提供冷却能力的时间, 为进一步采取能动的缓解事故措施争取时间^[9]。由于液膜的破裂机理十分复杂而且受诸多因素的影响, 目前的研究大多基于 3 种常见的理论模型 (力平衡模型^[10-11]、最小能原理模型^[12] 和表面扰动模型^[13]) 进行分析。叶学明采用力平衡模型分析了界面切应力对液膜破裂的影响^[14-16]。李振基于长波近似方法研究了基底变形对液膜破裂的作用^[17]。由于缺少相关实验, 大部分的液膜破裂关系式和判别标准都没有经过验证^[18]。

目前, 预测 PCCS 的液膜破裂的位置和覆盖率的研究相对较少。而在工业应用中, 液膜破裂、分叉和溪流过程对 PCCS 冷却效果影响很大。因此, 本文采用欧拉液膜模型和最小能量原理得到液膜破裂模型, 并针对 AP600 的 PCCS 实验进行数值计算和分析。

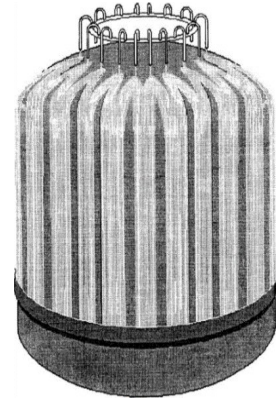


图 1 PCCS 示意图^[8]

Fig. 1 Schematic diagram of the PCCS^[8]

1 数值模型

1.1 欧拉液膜模型

由于 PCCS 系统中外侧液膜的轴向对称性, 所以外侧液膜采用一维欧拉液膜模型。该模型考虑了液膜的运动、自然对流和液膜蒸发等物理过程。如图 2 所示, 在重力作用下, 液膜沿着安全壳壁面流动, x 为液膜流动方向, 液膜流动时受到膜壁间黏性剪切力和气膜间黏性剪切力的作用。

该模型假设液膜完全覆盖在安全壳表面上, 液膜速度 u 沿着厚度方向为抛物线分布, 液膜温度

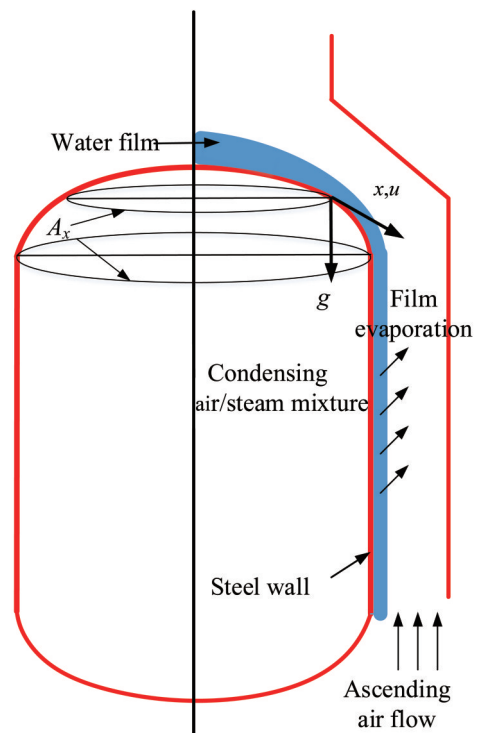


图 2 PCCS 欧拉液膜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the Eulerian liquid film model in PCCS

T_f 沿着厚度方向为线性分布。下面介绍液膜模型中厚度 δ 、速度 u_f 和温度 T_f 的控制方程

$$A_f \frac{\partial \delta}{\partial t} + \nabla \cdot (A_f \delta u_f) = \frac{\dot{m}_{f-g}}{\rho_f}, \quad (1)$$

$$A_f \frac{\partial \delta u_f}{\partial t} + \nabla \cdot (A_f \delta u_f u_f) = -A_f \frac{\delta \nabla P_{\text{gas}}}{\rho_f} + A_f \delta g_\tau + \frac{3}{2\rho_f} \tau_s - \frac{3\nu_f}{\delta} u_f, \quad (2)$$

$$A_f \frac{\partial \delta T_f}{\partial t} + \nabla \cdot (A_f \delta u_f T_f) = \frac{1}{\rho_f C_p} (\dot{q}_{\text{con, gas}} + \dot{q}_{\text{con, wall}} + \dot{q}_{\text{mass}}), \quad (3)$$

其中 \dot{m}_{f-g} 为液膜蒸发质量变化率或水蒸气冷凝率, g_τ 为重力加速度沿壁面分量, ρ_f 为液膜水密度, A_f 为液膜的环向周长, P_{gas} 为气体压力, τ_s 为气膜间黏性剪切力, ν_f 为液膜黏性系数。(2)式右四项分别代表气体压力, 重力在膜方面分量, 气膜间黏性剪切力和膜壁间黏性剪切力的影响。 C_p 为液膜比热, $q_{\text{con, gas}}$ 为液膜对流换热, $q_{\text{con, wall}}$ 为壁面传热, q_{mass} 为液膜质量变化率导致的热量传递。

气膜间黏性剪切力采用壁面函数方法进行计算。壁面剪切力计算关系式为

$$\tau_s = \rho u_*^2, \quad (4)$$

其中 τ_s 为气膜间黏性剪切力, u_* 为气膜间剪切速度。壁面函数需要知道第一层边界网格到壁面的

距离 y_c 和局部雷诺数 $Re_x = \frac{y_c |u_c|}{\nu}$, 壁面函数如下:

(1) 当 $Re_x \geq 130$ 时, 边界层单元处于湍流区, 基于Brodkey的 $\frac{1}{7}$ 次方关系得到

$$\frac{|u_c|}{u_*} = 2.19 \ln \left(\frac{y_c |u_c|}{\nu} \right) + 0.76, \quad (5)$$

(2) 当 $Re_x < 130$ 时, 边界层单元处于层流区, 壁面函数不再适用, 程序中采用层流关系式

$$\frac{|u_c|}{u_*} = \left(\frac{y_c |u_c|}{\nu} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

其中壁面两侧采用的 ν 分别为混合气体粘性 ν_g 和液膜流体粘性 ν_f 。

1.2 液膜破裂和溪流模型

当液膜厚度降低到最小稳定厚度 δ_{\min} 时, 连续液膜会发生破裂。液膜破裂之后, 竖直板或斜板上会形成稳定的溪流。本文利用最小能量原理(MTE)得到破裂临界厚度和最小湿润流率。根据

EI-Genk和Saber的模型^[12], 假设溪流表面平滑, 液膜无波动。溪流示意图见图3, 稳定时的溪流系统总能量 e 等于动能 e_k 、液体与固体的界面能 $e_{\sigma, ls}$ 和液体与气体的界面能 $e_{\sigma, lv}$ 之和, 即

$$e = e_k + e_{\sigma, ls} + e_{\sigma, lv}. \quad (7)$$

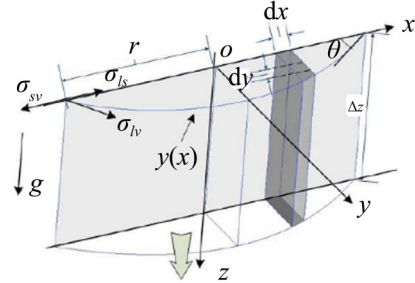


图3 溪流示意图^[12]

Fig. 3 Schematic diagram of the rivulets^[12]

在溪流液膜中选取响应的微元, 单位长度的溪流动能为

$$e_k = 2 \int_0^b \left(\int_0^{\phi} \left(\frac{\rho_1}{2} u_1^2 \right) dy \right) dx, \quad (8)$$

其中 u_1 为溪流速度, 利用Ritz方法求解得到速度分布

$$u_1 = u_{00} + \varepsilon u_{11}, \quad (9)$$

其中 u_{00} 为溪流的零阶近似速度, u_{11} 为一阶近似速度

$$u_{00} = \frac{g\rho_l}{\mu_l} \left(y\phi - \frac{1}{2} y^2 \right), \quad (10)$$

$$u_{11} = \frac{g\rho_l}{\mu_l} \left(y\phi - \frac{1}{2} y^2 + y\phi\phi'^2 + \frac{1}{2} y\eta^2\phi'' - \frac{1}{6} y^3\phi'' \right). \quad (11)$$

单位长度的液体与气体的界面能 $e_{\sigma, lv}$ 为

$$e_{\sigma, lv} = 2 \int_0^b \left(\sigma_{lv} \sqrt{1 + (d\phi/dx)^2} \right) dx. \quad (12)$$

单位长度的液体与固体的界面能 $e_{\sigma, ls}$ 为

$$e_{\sigma, ls} = 2 \int_0^b \left(\sigma_{sv} - \sigma_{lv} \cos \theta_0 \right) dx, \quad (13)$$

其中 ϕ 为液膜-空气界面分布, θ_0 为接触角。

由于速度求解采用的是数值方法, 为了简化, 破裂临界厚度无量纲数采用以下经验关系式

$$\Delta_{\min} = (1 - \cos \theta_0)^{0.22}. \quad (14)$$

同理, 最小湿润流率 Γ_{\min} 采用以下关系式

$$\Gamma_{\min} = 0.674 \Delta_{\min}^{2.83} + 0.264 \Delta_{\min}^{9.51}. \quad (15)$$

2 结果验证和分析

本文主要研究液膜破裂对 PCCS 液膜的影响, 在此之前首先验证欧拉液膜模型、液膜破裂和溪流模型的准确性。本文根据 AP600 装置的 PCCS 实验, 结合 Ponter 和 Munakata 的竖直圆管液膜实验的数据进行分析。该算例采用小尺寸整体实验进行数值研究。实验装置为实际 AP600 安全壳的 1/8。AP600 的安全壳具有上下两部分, 即圆顶和圆底, 以及中间部分的圆柱钢壳^[19]。实验装置的圆柱钢壳高 3 m, 半径 1.5 m。在圆柱安全壳外侧有圆柱体的空气挡板, 空隙长度为 0.2 m。初始环境为 25 °C 和 1 atm。PCCS 的冷却水流量为 500 g/s, 温度为 300 K, 从装置上圆顶沿壁面流下。蒸汽通过圆底正中的喷口竖直射入钢壳内, 温度为 140 °C, 质量流量为 0.1 kg/s。25 °C 的空气以 2 m/s 的速度通过挡板空隙向上吹入, 从圆顶上方半径 0.65 m 的通气口流出。

2.1 液膜厚度验证

因缺少相关实验数据, 将本文模型与通过西屋 AJM500 PCCS 小型试验数据验证的美国阿贡国家实验室 COMMIX 模型的液膜数据^[19] 进行对比。图 4 展示了欧拉液膜模型和 COMMIX 模型关于 AP600 的 PCCS 液膜计算值的对比。从图中可以看出, 液膜厚度从顶部的 0.08 cm 迅速降低到约 0.019 cm。这是因为液膜沿着其运动方向的重力不断增大, 而且顶部处液膜的接触面积随着高度也迅速变大。在装置圆柱钢壳外侧, 液膜受到气体摩擦力和水的黏性剪切力, 其厚度也在 0.019 cm 附近。对比结果说明本文所采用的欧拉液膜模型可以很好地预测 PCCS 的液膜厚度分布。

2.2 液膜破裂和溪流验证

目前, 对最小破断膜厚的预测与实际的实验数据还存在不小的误差, 主要原因是理论模型基于溪流表面平滑无波动等理想的假设与实际不符。鉴于最小破裂膜厚和最小润湿速率的实验值有限, 下面结合 Ponter 等^[20] 和 Munakata 等^[21] 的实验数据进行分析。

图 5 是 EI-Genk 和 Sabe 模型^[12] 的计算值与实验值的对比。计算值来源为 (14) 和 (15) 式。从图中可以得出, 降膜与平板的接触角是影响降膜破断的主要因素, 而且液膜破裂发生时接触角在 30°~40°, 液膜形成稳定的干区或溪流时, 接触角的范围为 70°~90°。最后, 本文所采用的经验关系式 (14) 和 (15) 与实验数据吻合得较好。

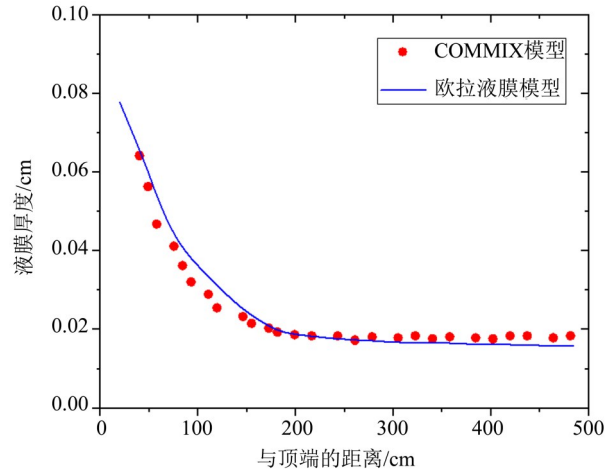


图 4 稳态后液膜厚度计算值

Fig. 4 The liquid film thickness via the present model and COMMIX model at steady stage^[18]

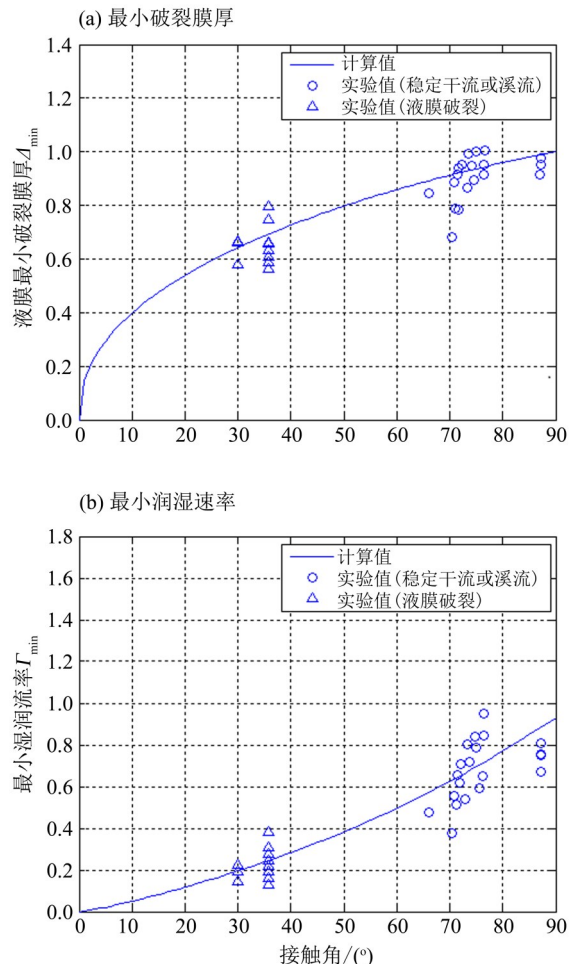


图 5 破裂液膜和稳态干区液膜最小破裂膜厚和最小润湿速率

Fig. 5 Minimum liquid film thickness (MLFT) and minimum wetting rate (MWR)

2.3 液膜破裂对 AP600 安全壳 PCCS 液膜分布的影响

假设液膜破裂时, 接触角为 40° ; 而稳定溪流时, 接触角为 80° 。在本文工况中, 算例假设忽略液膜破裂到稳定溪流过程中的过渡区。将接触角度代入式 (14) 和 (15) 并考虑量纲算得液膜的临界破裂厚度 $\delta_{critical} = 0.0277 \text{ cm}$, 而稳定溪流液膜厚度 $\delta_s = 0.0364 \text{ cm}$ 。如图 6 所示, 液膜变化率最大的区域在实验装置顶部, 当液膜厚度降低到 $\delta_{critical}$, 破裂位置在距离顶部 148 cm 处, 以下的区域中, 液膜覆盖率为 36.8%, 严重影响 PCCS 的冷却能力。

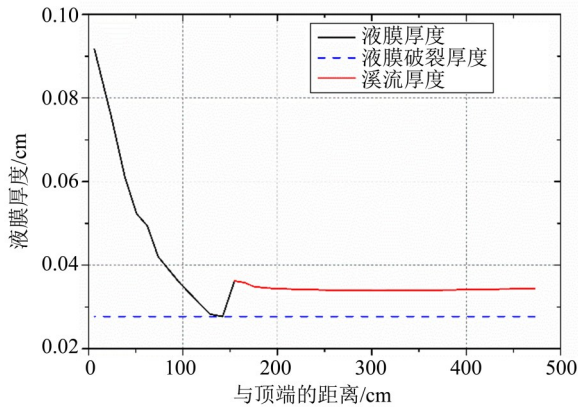


图 6 液膜破裂对 PCCS 液膜厚度的影响

Fig. 6 The effect of film breakup on PCCS liquid film thickness

PCCS 的冷却水质量流量会影响液膜厚度。当流量足够大时, PCCS 所形成的液膜不会发生破裂。随着冷却水的流量减少, 当液膜厚度小于临界破裂厚度时, 液膜的覆盖率迅速减少。根据于意奇的研究工作^[9], 当质量流量改变, 液膜覆盖率也会相应改变, 此过程共分为 ABC 三个阶段。如图 7 所示, 在阶段 C, 降膜的膜厚随质量流速的下降而快速减小, 但降膜的膜厚并没有到达破断的临界膜厚 $\delta_{critical}$, 降膜的覆盖率变化并不显著。B 区域相对于 A、C 两个区域窄很多, 降膜在达到临界膜厚以后, 覆盖率迅速减小。当 PCCS 质量流量小于 780 g/s , 液膜发生破裂, 而且随着质量流量减少, 液膜覆盖率迅速降低到 50%。降膜破断进入阶段 A, 降膜在宽度和膜厚尺度上都将稳定减小, 降膜在平板上的覆盖率将同样下降。

参考文献:

[1] SHA W T, SOO S L. Instability of flow of liquid film over a heated surface [C]// 3rd International Symposium on Multiphase Flow, 1994.

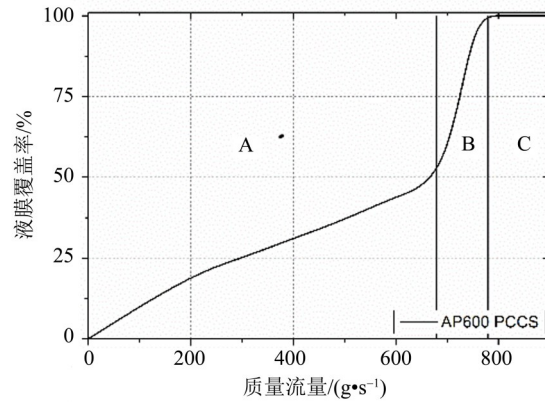


图 7 液膜覆盖率与 PCCS 流量的关系

Fig. 7 The coverage rate vs. PCCS mass rate

3 结论

本文针对 AP600 的 PCCS 液膜流动, 考虑液膜破裂对覆盖率的影响, 利用欧拉液膜模型、EI-Genk 和 Saber 的模型分别计算 PCCS 液膜流动和液膜破裂, 主要结论如下:

1) 通过计算 AP600 的 PCCS 算例, 并与 COM-MIX 模型进行对比分析, 发现: 本文采用的欧拉液膜模型可以准确地预测液膜厚度变化情况。利用 Ponter 和 Munakata 的实验值, 并与 EI-Genk 和 Saber 的模型^[12]进行对比, 发现本文所采用的液膜破裂模型比较合理。

2) 对于 PCCS 液膜流动, 由于沿着液膜流动方向, 液膜与装置顶部的接触面积增大, 以及重力影响不断增大, 液膜厚度迅速减少。在圆柱侧面上, 液膜厚度基本保持不变。

3) 由于 PCCS 液膜厚度在顶部变化较大, 在文中工况下, PCCS 的冷却水质量流量为 0.5 kg/s 、破裂接触角为 40° 时, 液膜破裂发生在距离顶部 1.48 m 处。为了保证 PCCS 完全覆盖装置安全壳, 冷却水质量流量至少为 0.78 kg/s 。

接触角和温度都会影响液膜的临界破裂厚度。真实情况下, 接触角与液体材料、固体材料、以及质量流量相关, 需要实验和模型进一步的确认。温度会影响冷却水的粘性和表面张力。当液膜的温度增大时, 液膜的临界破裂厚度增大, 增强了液膜的稳定性。在以后的工作中, 我们将对影响液膜破碎的多种因素作进一步的研究。

[2] WANG Y, HAN L. Study on the simulation for the passive containment cooling system of the advanced PWR in China [C]// 8th International Symposium on Multiphase

- Flow, 2011.
- [3] HUANG X, CHENG X. Modification and application of water film model in COCOSYS for PWR's passive containment cooling[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 280:251-261.
- [4] ANDERSON M H, HERRANZ L E, CORRADINI M L. Experimental analysis of heat transfer within the AP600 containment under postulated accident conditions [J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 185 (2/3) : 153-172.
- [5] BROXTERMANN P, ALLELEIN H J. Simulation of AP1000's passive containment cooling with the German containment code system COCOSYS [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 261:326-332.
- [6] KENNEDY M D, WOODCOCK J, WRIGHT R F, et al. Westinghouse-Gothic comparisons with passive containment cooling tests using a one-to-ten-scale test facility [J]. Nuclear Technology, 1996, 113(1):14-20.
- [7] SUN J G, CHIEN T H, DING J, et al. Validation of COMMIX with Westinghouse AP-600 PCCS test data [R]. IL (United States):Argonne National Lab, 1993.
- [8] HUANG X. Study on water film cooling for PWR's passive containment cooling system [D]. Karlsruhe: Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), 2015.
- [9] 于意奇. 大尺度平板水膜流动行为的数值模拟和试验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- YU Y Q. Experimental and numerical study on film flow behavior on large scale flat plate [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [10] HARTLEY D E, MURGATROY D W. Criteria for the break-up of thin liquid layers flowing isothermally over solid surfaces[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1964, 7(9):1003-1015.
- [11] ZUBER N, STAUB F W. Stability of dry patches forming in liquid films flowing over heated surfaces[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1966, 9 (9):897-905.
- [12] EL-GENK M S, SABER H H. Minimum thickness of a flowing down liquid film on a vertical surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44 (15):2809-2825.
- [13] JOO S W, DAVIS S H, BANKOFF S G. Long-Wave instabilities of heated falling films: two-dimensional theory of uniform layers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 230(1):117-146.
- [14] 叶学民,姜凯,沈雷,等. 含表面活性剂超薄液膜演化过程的稳定性研究[J]. 力学学报, 2013, 45(5): 681-689.
- YE X M, JIANG K, SHEN L, et al. Stability of ultra-thin liquid film evolution with surfactant [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(5): 681-689.
- [15] 叶学民,李春曦,王松岭. 界面剪切力作用下波状液膜流的水动力稳定性[J]. 力学学报, 2009, 41(3): 307-312.
- YE X M, LI C X, WANG S L. Hydrodynamic stability of a liquid wavy film with interfacial shear [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(3): 307-312.
- [16] 叶学民,李春曦,阎维平. 切应力协同下受热过冷层流液膜的破断特性[J]. 力学学报, 2011, 43(3): 461-467.
- YE X M, LI C X, YANG W P. Breakdown of locally heated and subcooled laminar films with interfacial shear [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(3): 461-467.
- [17] 李振,胡国辉,周继杰,等. 基底弹性对蒸发超薄液膜去润湿过程的影响[J]. 力学学报, 2011, 43(4): 699-706.
- LI Z, HU G H, ZHOU J J, et al. Effects of elasticity of substrate on dewetting process of evaporating ultra-thin liquid film [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(4): 699-706.
- [18] 臧丽叶,田瑞峰,孙兰昕,等. 横掠气流作用下波形板壁降膜破裂分析[J]. 化工学报, 2014, 65(3): 862-869.
- ZANG L Y, TIAN R F, SUN L X, et al. Breakdown of liquid films driven by horizontal gas flow in wave-plate channel [J]. CIESC Journal, 2014, 65(3): 862-869.
- [19] SUN J G, SHA W T, CHEN Y S. Development of liquid-film tracking models for analysis of AP-600 passive containment cooling system [R]. Argonne National Lab, 1993.
- [20] PONTER A B, DAVIES G A, ROSS T K, et al. The influence of mass transfer on liquid film breakdown [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1967, 10(3):349-352.
- [21] MUNAKATA T, WATANABE K, MIYASHITA K. Minimum wetting rate on wetted-wall column [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1975, 8(6): 440-444.

(责任编辑 王海蓉)