

喷嘴及折流板结构对射流撞壁成膜形态的影响

林志超¹, 肖 颀², 黄崇海², 柴盈华², 沈平安¹, 徐启嘉¹, 傅祎林¹,
初炜钰¹, 邱 睿¹, 孟兆明¹

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 喷嘴成膜效果直接影响喷射式凝汽器的换热性能。为进一步提高喷射式凝汽器的工作效率, 基于自主搭建的实验系统, 利用高速摄影机拍摄液膜, 对喷嘴射流撞击平板的成膜特性进行研究。选取 1.3、1.9、2.5 m³/h 三个流量工况, 分析了喷嘴形状、喷嘴与挡板间距、挡板大小对喷嘴成膜面积与液膜形态的影响。结果表明: 喷嘴形状对喷嘴成膜影响明显, 方形喷嘴成膜面积小, 具有稳定的液膜边界; 中、大流量下, 喷嘴成膜面积随喷嘴与挡板距离减小而增加, 对比 1 cm 间距与 5 cm 间距, 最佳流量工况对应液膜面积可增大 13.02%; 中、大流量下, 喷嘴成膜面积随挡板面积增加而增加, 对比大喷嘴挡板与小喷嘴挡板, 最佳流量工况对应液膜面积可增加 31.37%; 小流量下, 喷嘴与挡板间距、挡板面积对喷嘴成膜面积影响不明显。

关键词: 能源与动力工程; 喷嘴成膜; 液膜面积; 液膜形态

中图分类号: TK264.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)06-058-09

Influence of Nozzle and Baffle Structure on the Film Formation Morphology of Jet Impingement

LIN Zhichao¹, XIAO Qi², HUANG Chonghai², CHAI Yinghua²,
SHEN Ping'an¹, XU Qijia¹, FU Yilin¹, CHU Weiyu¹,
QIU Rui¹, MENG Zhaoming¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang;

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, Hubei)

ABSTRACT: The film-forming effect of the nozzle directly affects the heat transfer performance of jet condensers. To further improve the efficiency of jet condensers, liquid films were photographed by using a high-speed camera and the film-forming characteristics of the jet hitting the flat plate were studied based on liquid films photographed by a high-speed camera equipped on an experimental system built by the paper. The influence of nozzle shape, the distance between the nozzle and the baffle, and the baffle size on the nozzle's film-forming area and liquid film mor-

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 热能动力技术重点实验室开放基金资助项目 (TPL2020B01)

第一作者: 林志超 (2002—), 男, 本科, 主要从事核反应堆热工水力研究。E-mail: linzhichao@hrbeu.edu

引用格式: 林志超, 肖颀, 黄崇海, 等. 喷嘴及折流板结构对射流撞壁成膜形态的影响[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (5): 58-66.

phology were analyzed under flow conditions of $1.3\text{ m}^3/\text{h}$, $1.9\text{ m}^3/\text{h}$ and $2.5\text{ m}^3/\text{h}$ respectively. Results showed that the nozzle shape significantly affects film formation, with square nozzles having smaller film-forming area and stable liquid film boundaries. At medium and high flow rates, the film-forming area increases as the distance between the nozzle and the baffle decreases. By comparing a 1 cm distance with a 5 cm distance, the liquid film area increases by 13.02% at the best flow condition. At medium and high flow rates, the film-forming area increases with an increase in baffle area. By comparing a large nozzle baffle with a small one, the film area increases by 31.37% at the best flow condition. At low flow rates, effects of nozzle-to-baffle distance and baffle area on the film-forming area are not significant.

KEYWORDS: energy and power engineering; nozzle film formation; liquid film area; liquid film morphology

液膜的概念由 Dombrowski^[1]正式提出, 并通过试验罗列出了产生液膜的方式。液膜在工程领域具有广泛的应用前景。在海勒空冷系统中, 喷射式凝汽器依靠喷嘴将冷却水喷出, 形成的液膜与汽轮机排汽完成热交换^[2]。目前, 对液膜的研究, 以射流撞壁成膜和喷雾冷却成膜为主。在斜射流撞壁成膜方向, 国内外已经进行了大量的研究, 唐亮等^[3]进行了斜射流撞击平板的研究, 得出了液膜的半经验公式; 林庆国^[4]对空间轨控发动机液膜在燃烧室内的形态变化进行研究, 分析了射流入射角、喷嘴孔径、压强、壁面曲率半径及壁面温度对液膜厚度分布、液膜形态的影响; 袁韦韦等^[5]研究了射流撞壁形成液膜的主要特征, 结果表明曲面和平面液膜长度和宽度均随射流速度增加而增加; 张国栋等^[6]进行了热态金属壁面下的液膜冷却实验与仿真, 分析了液膜形态的影响因素; 章宏宙等^[7]将平板斜射流液膜分为两个区域, 并分别建立模型, 提出半经验公式。针对喷射式凝汽器喷嘴的成膜特性研究相对较少的现状, 宫传瑶等^[8]进行了喷射式凝汽器喷嘴成膜实验, 得到两种喷嘴的成膜规律, 将液膜的形态划分为3个区。卜保生^[9]在不同冷却水流量和系统总压力下, 观察了喷射式凝汽器喷嘴成膜质量, 但对于喷嘴成膜的影响缺少系统性的研究。

喷射式凝汽器的传热效率受液膜面积、液膜厚度分布、蒸汽流量、冷却水量及空气泄漏量等因素的影响。因此, 研究喷嘴成膜规律有助于提高喷射式凝汽器的换热效率。实验采用高速摄影机拍摄不同工况下喷嘴射流撞击平板形成液膜的照片, 分析喷嘴成膜规律的影响因素, 包括喷嘴形状、喷嘴与挡板距离及挡板尺寸, 可为喷射式凝汽器的设计提供参考。

1 实验装置介绍

实验装置如图1所示, 主要包括液膜发生系统、水供应系统、图像采集系统和实验测量系统。液膜发生系统通过喷嘴射流撞击挡板产生液膜, 图像采集系统实时捕捉射流撞击产生的液膜及液膜破碎的过程, 记录并用于后续图像处理。

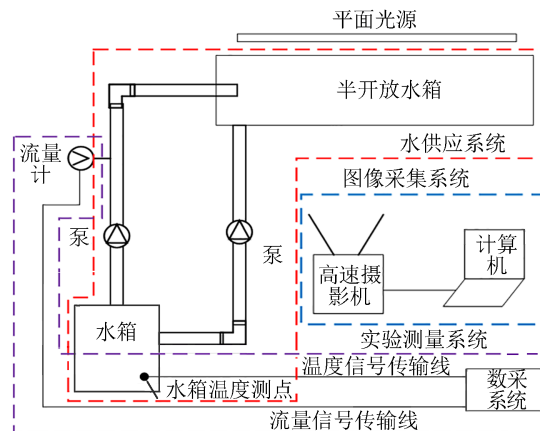


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental device

1.1 水供应系统

水供应系统主要包括储水箱、给水泵、排水泵与相关管路阀门。其中, 储水箱和给水泵的实物如图2所示。储水箱内的工质为自来水, 添加了一定浓度的黑色染色剂。给水泵将水从储水箱中抽出, 经管道送至喷嘴处; 排水泵将水箱中的水抽出, 经管道排回储水箱。

1.2 液膜发生系统

液膜发生系统主要由喷嘴、喷嘴挡板与半开放式水箱箱体组成。图3为喷嘴、挡板与背景光源

的相对位置,图4为半开放式水箱实物图。给水泵送来的水从喷嘴喷出,与挡板相撞形成液膜,落下的水被收集于下方水箱。其中,喷嘴截面形状的选取参考了常用喷嘴形状,包括圆形口喷嘴、方形口喷嘴与扁扩口形液膜喷嘴^[10]。本实验中选取了便于加工和理论计算的圆形口喷嘴和方形口喷嘴。参考喷嘴大小等比例设计了小、中、大3个尺寸的挡板,如图5所示。



图2 储水箱和给水泵

Fig. 2 Water storage tank and feedwater pump

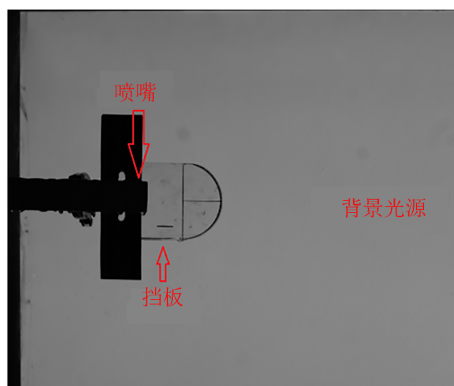


图3 喷嘴、喷嘴挡板与背景光源的相对位置

Fig. 3 Relative position of nozzle, nozzle baffle and background light source

1.3 图像采集系统

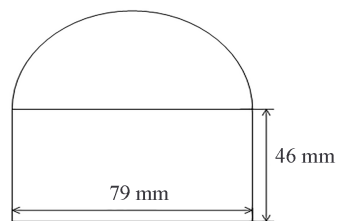
图像采集系统主要由矩形LED背景光源和Phantom 641高速摄像机组成。矩形LED背景光源长1.2 m,高0.8 m,竖直放置于挡板后方0.3 m处,同时保证白光能均匀稳定全面地照射在形成的液膜上。Phantom 641高速摄像机摆放在挡板正

前方,加以调整,使Phantom 641高速摄像机在计算机上显示的上边框与矩形LED背景光源上边框重合,并能包含挡板与形成的液膜,使液膜处于图像中间,保证能在不同工况下清晰拍摄形成的液膜。

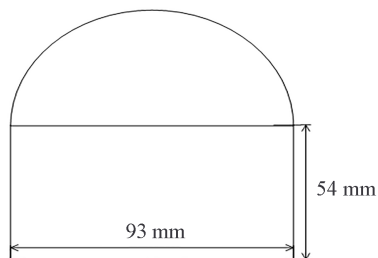


图4 半开放式水箱

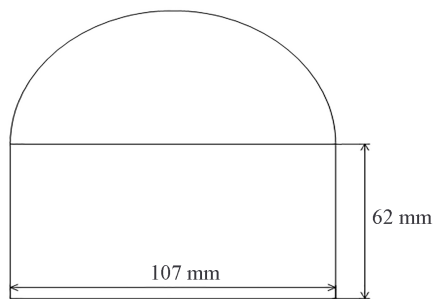
Fig. 4 Semi open water tank



(a) 小喷嘴挡板



(b) 中喷嘴挡板



(c) 大喷嘴挡板

图5 不同规格挡板尺寸

Fig. 5 Sizes of small, medium and large baffles

1.4 测量系统

测量系统主要包括涡轮流量计和压力传感器。涡轮流量计安装在给水泵和喷嘴之间的管道上,用于测量喷嘴水流量。压力传感器安装在进水管路末段靠近喷嘴入口处,用于测量喷嘴入口压力。

2 实验方案

2.1 实验工况设置

喷嘴形状研究采用 13 mm 口径圆形口喷嘴作为对照。为了研究圆形口喷嘴和方形口喷嘴的成膜特征区别，基于前期调研和自主测试，选取了圆形口喷嘴成膜效果最好时的水流量 1.9 m³/h。在这一流量工况下，圆形口喷嘴成膜面积最大。水流量在 1.9 m³/h 以下的工况中，圆形口喷嘴成膜面积呈现随流量增加而增加的趋势；水流量在 1.9 m³/h 以上的工况中，圆形口喷嘴成膜面积呈现随流量增加而减小的趋势。在此基础上，选取 1.3 m³/h 为小流量工况和 2.5 m³/h 为大流量工况作为补充和对照。喷嘴与挡板夹角设置为 30°。挡板距离指喷嘴出口截面中心至挡板平面的垂直距离。挡板距离的影响研究选用 13 mm 圆形口喷嘴和中喷嘴挡板。基于实际凝汽器喷嘴与挡板距离，选取了 1 cm、3 cm 和 5 cm 三个挡板距离进行实验，对比 1.3 m³/h、1.9 m³/h 和 2.5 m³/h 三个流量下挡板距离对喷嘴成膜效果的影响。挡板大小的影响研究同样选用 13 mm 圆形口喷嘴，喷嘴与挡板距离选取 3 cm，喷嘴与挡板夹角选取 30°。基于实际凝汽器喷嘴挡板大小，选取了小、中和大 3 个尺寸的喷嘴挡板进行实验，对比 1.3 m³/h、1.9 m³/h 和 2.5 m³/h 三个流量下挡板大小对喷嘴成膜效果的影响。

2.2 数据处理方法

本文重点关注喷嘴形状、喷嘴与挡板间距和挡板面积对喷嘴成膜面积及成膜形态的影响，采用图像处理的方式计算喷嘴成膜面积在不同工况下的变化。具体过程如图 6 所示：1) 首先测量挡

板实际尺寸，计算高速摄影机照片比例尺；2) 针对喷嘴形状、喷嘴与挡板距离、挡板面积和流量对喷嘴成膜的影响，在不同工况下进行实验，利用高速摄影机拍摄液膜；3) 选取液膜面积最大的一帧，分割液膜，计算液膜所占像素，通过 1) 中比例尺计算液膜实际面积。

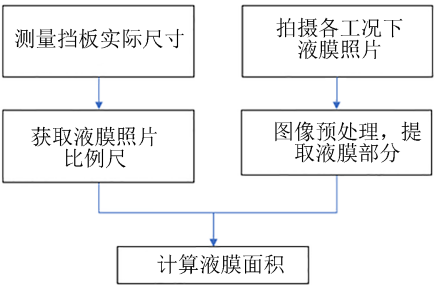


图 6 数据处理流程
Fig. 6 Data processing flow chart

3 实验结果及分析

3.1 喷嘴形状对成膜形态的影响

实验采用了较为常见的方形口喷嘴和圆形口喷嘴。并提取了不同喷嘴在不同工况下的液膜面积，依据像素计算对应大小，结果如表 1 所示。

根据表 1 数据，获得液膜面积随喷嘴形状及流量的变化，如图 7 所示。可以看出：在实验工况范围内，方形口喷嘴液膜面积随流量增大而增大，圆形口喷嘴液膜面积先增大后减小；不同形状喷嘴在液膜面积达到最大时，对应的最佳流量不同，方形口喷嘴在不同流量下，液膜面积均小于圆形口喷嘴；同流量下，圆形口喷嘴形成的液膜面积更大，液膜厚度更薄，受空气扰动的影响更加明显；随着流速增加，空气扰动形成的扰动波对液

表 1 喷嘴形状与液膜面积的实验数据
Tab. 1 Experimental data of nozzle shapes and liquid film areas

喷嘴形状	挡板距离/cm	挡板	流量/(m³·h ⁻¹)	压力/kPa	像素	液膜面积/cm²
方形口	3	中	1.3	103	178 827	341.505 2
方形口	3	中	1.9	210	352 923	673.975 6
方形口	3	中	2.5	350	554 740	1 059.385 0
圆形口	3	中	1.3	99	701 179	1 339.038 6
圆形口	3	中	1.9	212	980 962	1 873.339 0
圆形口	3	中	2.5	356	889 662	1 698.983 8

膜破碎有明显作用,液膜面积缩小。因此,在实验工况下,圆形口喷嘴成膜最佳流量为 $1.9 \text{ m}^3/\text{h}$,方形口喷嘴液膜厚度大,空气扰动影响小,成膜最佳流量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

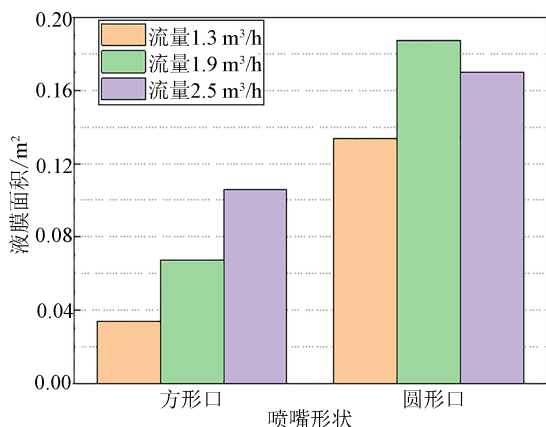


图 7 液膜面积随喷嘴形状及流量的变化

Fig. 7 Variations of liquid film areas with nozzle shapes and flow rates

液膜压力随喷嘴形状及流量的变化如图 8 所示。可以看出:不同流量下,不同形状的喷嘴进口压力非常相近,喷嘴截面形状对喷嘴进口压力几乎没有影响。

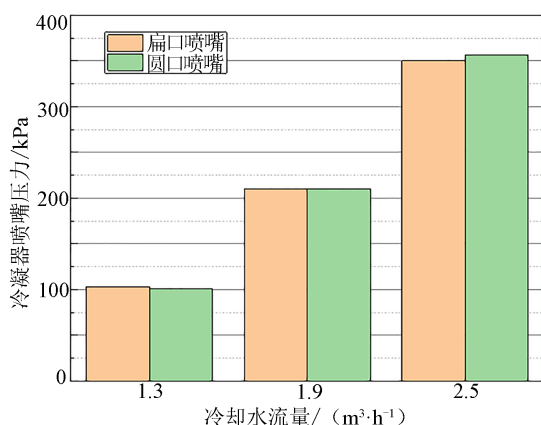
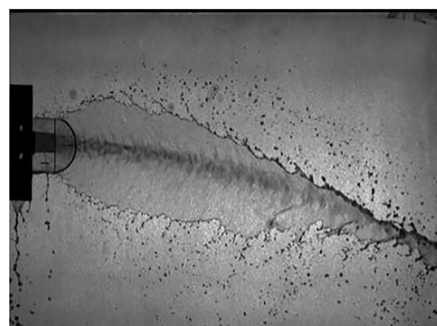


图 8 喷嘴压力随喷嘴形状及流量的变化

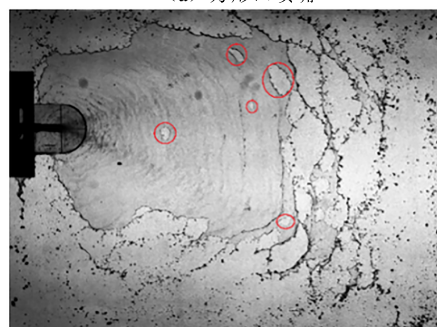
Fig. 8 Variations of nozzle pressures with nozzle shapes and flow rates

图 9 展示了不同喷嘴的成膜形态。比较两种喷嘴同种工况下所产生的液膜,方形口喷嘴成膜集中于水平方向,液膜形态狭长,沿轴线方向厚度明显大于两侧;圆形口喷嘴成膜呈现叶形,在大流量下,形态偏向圆形。由于喷嘴形状差异,方形口喷嘴射流沿喷嘴轴向动量大,垂直喷嘴方向动量小,造成垂直动量方向上的液膜发展明显弱于轴向上的液膜发展。方形口喷嘴成膜有稳定的

液膜边界,圆形口喷嘴成膜边界变化剧烈,边界不稳定。这是由于射流撞击挡板产生的表面波传播至整个液膜,从而导致液膜破碎。方形口喷嘴成膜面积小于圆形口喷嘴,但成膜厚度大于圆形口喷嘴成膜厚度,因此表面波对于方形口喷嘴成膜的影响小于圆形口喷嘴。圆形口喷嘴成膜在液膜中间部位因表面波产生孔洞(如图 9(b)标注所示),后受表面张力影响,液膜末端收缩破碎为液滴,形成不稳定的液膜边界。



(a) 方形口喷嘴



(b) 圆形口喷嘴

图 9 流量 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 下不同喷嘴的液膜

Fig. 9 Liquid films of different nozzles at a flow rate of $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$

3.2 挡板距离对成膜形态的影响

为了研究挡板距离对成膜形态的影响,选取圆形口喷嘴与挡板间距为 1 cm 、 3 cm 和 5 cm 。工况参数设定,以及不同工况下测量所成液膜面积大小等参数如表 2 所示。

根据表 2,对液膜面积随喷嘴与挡板距离以及流量的变化进行分析,得到图 10。可以看出,当流量为 $1.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,液膜面积随着与挡板距离的增大略有减小,流量为 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,挡板距离对液膜面积的影响不明显。这是由于在大流量下,射流撞击挡板产生撞击波,随着挡板距离增大,撞击对液膜影响更加剧烈。在流量为 $1.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 两个工况下,喷嘴与挡板间距增大使液膜更早破碎,成膜面积变小。因此,减小

表 2 圆形口喷嘴与挡板距离与液膜面积的实验数据
Tab. 2 Experimental data of circle nozzle-baffle distances and liquid film areas

挡板距离/cm	挡板	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	压力/kPa	像素	液膜面积/cm ²
1	中	1.3	99	818 870	1 563.792 6
1	中	1.9	211	1 059 594	2 023.502 2
1	中	2.5	361	1 041 283	1 988.533 8
3	中	1.3	101	701 179	1 339.038 6
3	中	1.9	210	980 962	1 873.339 0
3	中	2.5	357	889 662	1 698.983 8
5	中	1.3	96	794 240	1 516.756 8
5	中	1.9	210	937 495	1 790.330 3
5	中	2.5	356	833 323	1 591.393 4

喷嘴与挡板距离可增加喷嘴成膜面积。在 1.9 m³/h 的成膜最佳流量下，挡板距离喷嘴 1 cm 工况下的液膜面积相对挡板距离喷嘴 5 cm 工况下的液膜面积增加 13.02%。

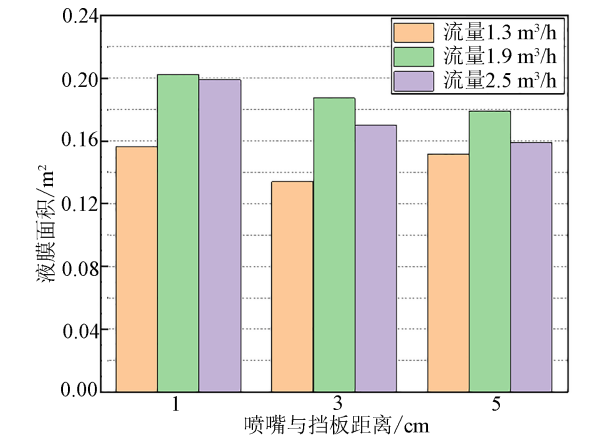


图 10 液膜面积随喷嘴与挡板距离以及流量的变化
Fig. 10 Variations of liquid film areas with nozzle-baffle distances and flow rates

图 11 展示了流量为 2.5 m³/h 时不同挡板距离下的液膜形态。对比 3 种喷嘴与挡板距离，喷嘴成膜及液膜破碎模式一致，液膜中部产生孔洞，受表面张力影响，液膜收缩破碎为液滴。随着喷嘴与挡板距离增加，液膜完整性下降，液膜产生孔洞数量增加，符合挡板距离变化对液膜面积的影响规律。

图 12 展示了流量为 2.5 m³/h 时不同挡板距离

下的液膜长度。液膜长度定义为射流撞击点与液膜开始破裂位置的距离，如图 11（a）所示。可以看出：随着喷嘴与挡板间距减小，液膜轴向破碎位置与喷嘴距离增加。

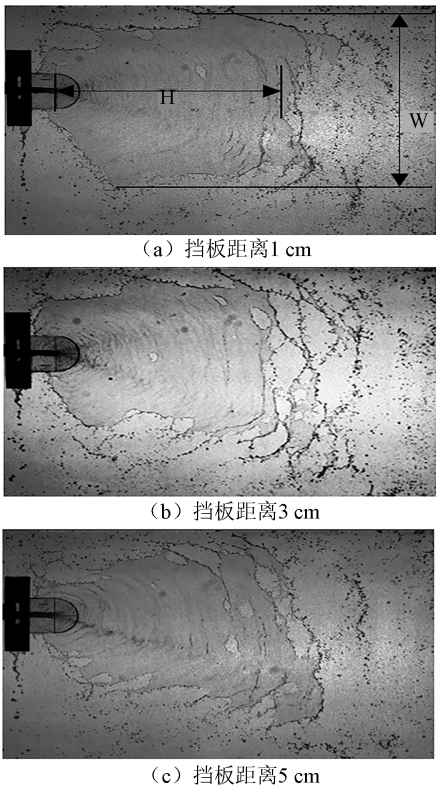


图 11 流量 2.5 m³/h 时不同挡板距离下的液膜形态
Fig. 11 Liquid film morphologies at different baffle distances at a flow rate of 2.5 m³/h

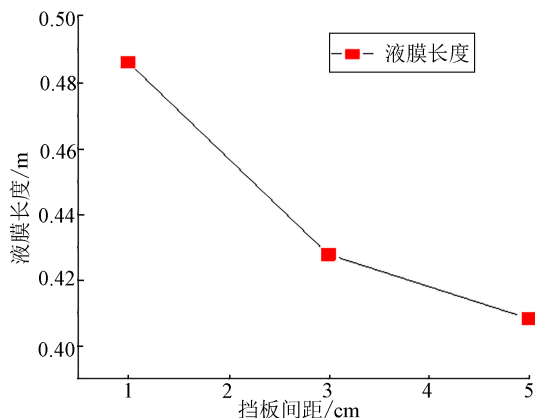


图 12 流量 2.5 m³/h 时不同挡板距离对应的液膜长度

Fig. 12 Liquid film length corresponding to different baffle distances at a flow rate of 2.5 m³/h

3.3 挡板尺寸对成膜形态的影响

表 3 展示了改变挡板尺寸后, 不同流量工况下圆形口喷嘴所形成的液膜面积等参数。

根据表 3 数据可以得到液膜面积随挡板大小以及流量的变化 (图 13)。可以看出: 1.3 m³/h 流量下 3 种挡板所成液膜面积相差很小; 1.9 m³/h 和 2.5 m³/h 流量下, 随着挡板面积增大, 所成液膜面积增大; 不同挡板出现最佳液膜时, 对应的流量有所区别; 小挡板和中挡板在流量为 1.9 m³/h 时, 液膜面积达到最大, 大喷嘴挡板在流量为 2.5 m³/h 时, 液膜面积达到最大; 在 2.5 m³/h 工况下, 大挡板液膜面积相较于小挡板液膜面积增大 31.37%。这是由于液膜在挡板上发展的过程中, 挡板对表面波有削弱作用。因此, 挡板尺寸增大有利于液

膜的稳定。

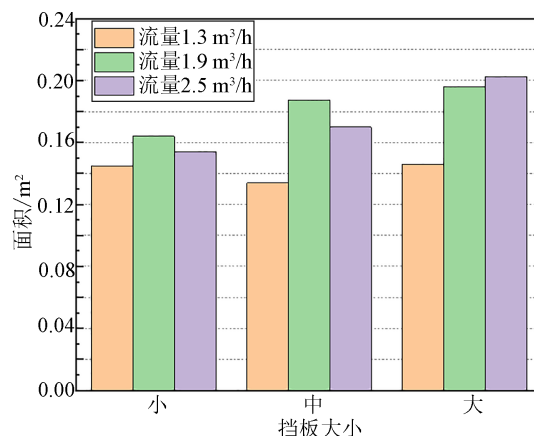


图 13 液膜面积随挡板大小以及流量的变化

Fig. 13 Variations of liquid film areas with baffle sizes and flow rates

图 14 展示了流量为 2.5 m³/h 时, 不同挡板所形成的液膜。对比 3 种挡板在流量 2.5 m³/h 时的液膜形态可知, 液膜破碎模式相似。比较图 14 (a)、(b)、(c) 可以看出: 液膜稳定性随挡板尺寸增大而增加; 在小喷嘴挡板和中喷嘴挡板工况下, 液膜产生孔洞多于大喷嘴挡板工况下的液膜, 并且破碎程度更剧烈。

图 15 展示了 2.5 m³/h 流量下不同挡板的液膜长度。在大喷嘴挡板工况下所形成的液膜长度大于小喷嘴挡板与中喷嘴挡板, 表明液膜破裂位置更远, 液膜发展良好, 符合液膜面积随挡板尺寸增加而增加的规律。

表 3 挡板面积与液膜面积的实验数据

Tab. 3 Experimental data of baffle areas and liquid film areas

挡板距离/cm	挡板	流量/(m³·h⁻¹)	压力/kPa	像素	液膜面积/cm²
3	小	1.3	100	757 805	1 447.177 0
3	小	1.9	208	858 604	1 639.672 5
3	小	2.5	358	806 153	1 539.507 0
3	中	1.3	101	701 179	1 339.038 6
3	中	1.9	210	980 962	1 873.339 0
3	中	2.5	357	889 662	1 698.983 8
3	大	1.3	99	764 510	1 459.981 5
3	大	1.9	212	1 026 343	1 960.002 9
3	大	2.5	356	1 059 018	2 022.402 2

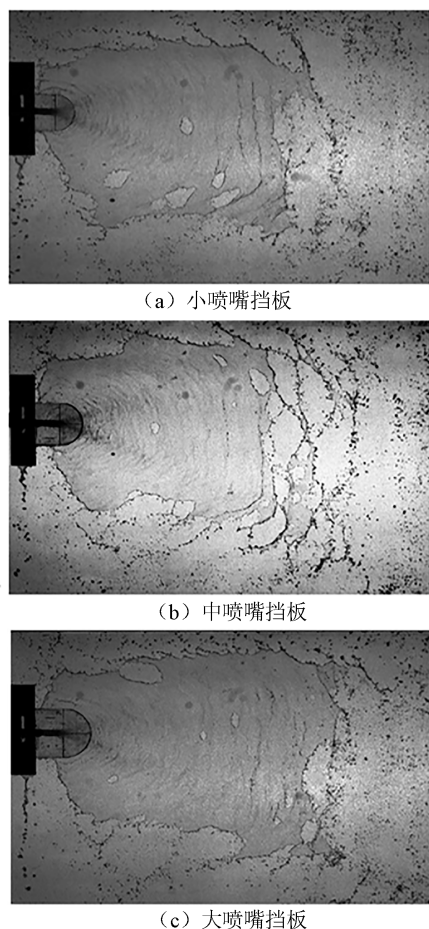


图 14 2.5 m³/h 流量下不同尺寸挡板所形成的液膜

Fig. 14 Liquid films formed by different baffles at a flow rate of 2.5 m³/h

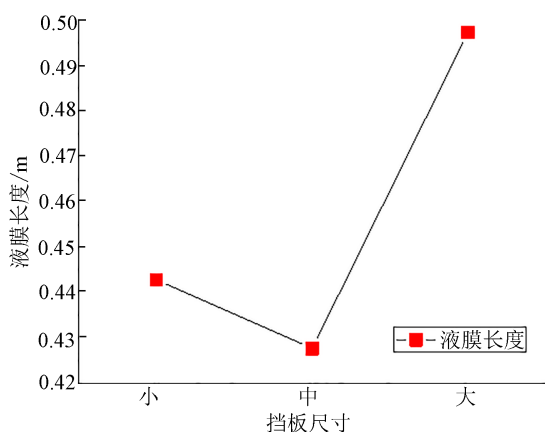


图 15 2.5 m³/h 流量下不同挡板尺寸对应的液膜长度

Fig. 15 Liquid film lengths corresponding to different baffle sizes at a flow rate of 2.5 m³/h

4 结论

本研究通过实验分析了喷嘴形状、喷嘴与挡板距离以及挡板尺寸对喷嘴成膜面积的影响, 基

于实验数据, 得到如下结论。

1) 由于方形口喷嘴对于射流动量在不同方向上的限制, 其成膜在喷嘴轴线方向上的发展良好, 形态狭长; 相同流量工况下, 圆形口喷嘴成膜面积较大, 但液膜容易发生破裂。

2) 喷嘴成膜面积受喷嘴与挡板距离大小的影响, 流量为 1.9 m³/h 和 2.5 m³/h 时, 液膜面积随着挡板距离的增大略有减小, 流量为 1.3 m³/h 时, 挡板距离对液膜面积的影响不明显。

3) 喷嘴成膜面积受挡板大小的影响, 流量为 1.3 m³/h 时, 3 种挡板所成液膜面积相差很小; 流量为 1.9 m³/h 和 2.5 m³/h 时, 随着挡板面积增大, 所成液膜面积增大。

综上所述, 在实际工程应用中, 为增大液膜面积, 应当采用圆形口喷嘴。在 3 种工况中, 液膜面积最大可增加 1 199.363 4 cm²。减小喷嘴与挡板距离、增大挡板尺寸有利于提高喷嘴射流成膜稳定性与成膜面积。在成膜最佳流量工况下, 挡板距离减小为 1 cm 时, 喷嘴成膜面积与挡板距离为 5 cm 时相比增加了 13.02%。在成膜最佳流量工况下, 选用大喷嘴挡板, 喷嘴成膜面积与小喷嘴挡板相比增加了 31.37%。因此, 在喷射式凝汽器设计中, 选用圆形口喷嘴、减小喷嘴与挡板间距离、增大挡板尺寸将有利于改善喷嘴成膜质量。

参考文献

- [1] DOMBROWSKI N, FRASER R P. A photographic investigation into the disintegration of liquid sheets[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1954, 247(924): 101-130.
- [2] 丁尔谋. 发电厂空冷技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 91.
- [3] 唐亮, 李平, 周立新. 液体火箭发动机液膜冷却研究综述[J]. 火箭推进, 2020, 46(1): 1-12.
TANG L, LI P, ZHOU L X. Review on liquid film cooling of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(1): 1-12.
- [4] 林庆国. 空间轨控发动机高效燃烧室仿真与试验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015: 28-37.
LIN Q G. Simulation and experiment research on the high efficient combustion chamber for space orbit maneuvering rocket engine[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015: 28-37.
- [5] 袁韦韦, 黄勇, 章宏宙, 等. 射流撞壁形成液膜的形态和厚度试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(11):

- 2524-2533.
- YUAN W W, HUANG Y, ZHANG H Z, et al. Experiment on shape and thickness of liquid film formed by impinging jets on solid walls[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(11): 2524-2533.
- [6] 张国栋, 罗宇翔, 李龙飞, 等. 热态壁面条件下的液膜冷却实验与仿真[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(1): 108-118.
- ZHANG G D, LUO Y X, LI L F, et al. Experimental and numerical study on liquid film cooling based on heated wall conditions[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(1): 108-118.
- [7] 章宏宙, 黄勇, 袁韦韦. 斜射流撞壁成膜的液膜形状半经验模型[J]. 航空动力学报, 2022, 37(11): 2534-2543.
- ZHANG H Z, HUANG Y, YUAN W W. Semi-empirical model for shape of liquid sheet formed by oblique jet impinging onto wall[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(11): 2534-2543.
- [8] 宫传瑶, 何瑞, 李夔宁, 等. 喷射式凝汽器喷嘴成膜特性实验研究[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(12): 76-80.
- GONG C Y, HE R, LI K N, et al. Experimental study on film forming characteristics of jet condenser nozzle[J]. Heilongjiang Science, 2023, 14(12): 76-80.
- [9] 卜保生. 凝汽器喷嘴成膜试验[J]. 内蒙古电力技术, 1995, 13(5): 70-72.
- BU B S. Film forming test of condenser nozzle[J]. Inner Mongolia Electric Power, 1995, 13(5): 70-72.
- [10] 柏美迪康环境工程(上海)股份有限公司. 一种扁扩口形液膜喷嘴: 201020132453.7[P]. 2010-11-24.