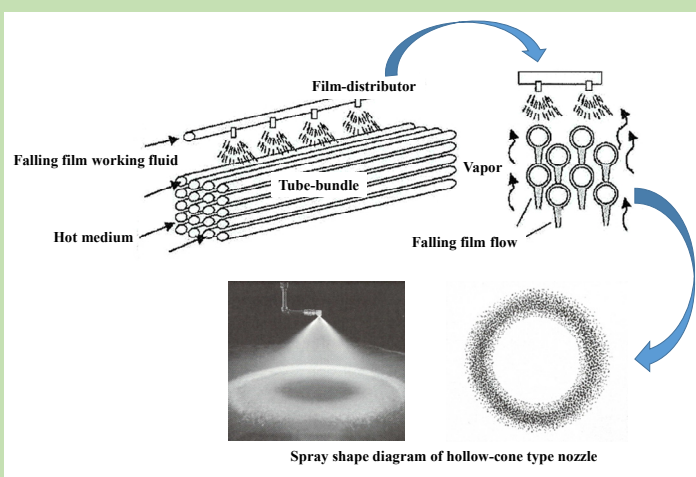


## Experimental investigation on spray characteristics of hollow nozzle for liquid distribution

Liang ZHAO, Juanjuan JIAO, Peng WANG, Xiaojing ZHU, Qinggang QIU, Shengqiang SHEN\*

Key Laboratory of Seawater Desalination of Liaoning Province, School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract:** In order to uniform distribution of liquid in the large horizontal-tube low temperature multi-effect distillation (MED) desalination, the spray characteristics of a hollow nozzle were studied experimentally. A centrifugal nozzle spray characteristic test-bed and a radial spray density measurement device were designed and built independently. The spray cone angles of the nozzles were obtained by marking the spray edge with the spray photographs taken by the high-speed camera. The variations of flow rate, spray cone angle and radial spray density versus spray pressure, as well as



the radial spray density versus spray height were the main focus of the present work. The experimental results showed the export flow rate with the increase of inlet pressure, and the growth rate of flow rate tended to be slower. In normal experiment conditions, the spray cone angle was determined by the angle of the divergent section at the nozzle outlet, while it shrank the inner edge of the circular liquid film due to the loss of power under gravity, and the spray of the hollow nozzle exhibited a regular annular shape. As the inlet pressure increased, the effective spray area extended to the center as a whole, and the peak value of spray density also increased obviously, the symmetry of which was improved and the spray density was basically symmetrical when the pressure was 349 kPa. While increasing spray height had an opposite effect. With the increasing of spray height, the two peaks gradually moved away from the center and the radial droplet distribution was more uniform. The peak value of spray density decreased but always dominated, and the effective spray area expanded outwards. When designing the horizontal-tube evaporation distributor, the operating pressure should be controlled reasonably depending on the uniformity of nozzle spray density. The ineffective spray area can be eliminated effectively according to the principle of peak-valley superposition.

**Key words:** hollow nozzle; spray cone angle; spray density; experimental investigation

收稿: 2018-11-19, 修回: 2019-04-11, 网络发表: 2019-05-06, Received: 2018-11-19, Revised: 2019-04-11, Published online: 2019-05-06  
基金项目: 国家自然科学基金青年项目(编号: 51406027); 国家自然科学基金重点项目(编号: 51336001)  
作者简介: 赵亮(1979-), 男, 辽宁省大连市人, 博士, 副教授, 热能工程专业, E-mail: zlhmf@dlut.edu.cn; 沈胜强, 通讯联系人, E-mail: zzbshen@dlut.edu.cn.

**引用格式:** 赵亮, 焦娟娟, 王鹏, 等. 空心喷嘴喷淋特性实验研究. 过程工程学报, 2019, 19(6): 1085-1092.

Zhao L, Jiao J J, Wang P, et al. Experimental investigation on spray characteristics of hollow nozzle for liquid distribution (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(6): 1085-1092, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218321.

# 空心喷嘴喷淋特性实验研究

赵亮, 焦娟娟, 王鹏, 朱晓静, 邱庆刚, 沈胜强\*

大连理工大学能源与动力学院, 辽宁省海水淡化重点实验室, 辽宁 大连 116024

**摘要:**为使大型水平管降膜多效蒸发海水淡化装置的横管降膜蒸发器均匀布液, 自主设计并搭建了一套离心喷嘴喷淋特性实验台及径向喷淋密度测量装置, 通过高速摄影仪拍摄的喷淋照片对喷淋外缘进行标注测量, 得到喷嘴各喷淋锥角, 对旋流式空心喷嘴的流量、喷淋锥角和径向喷淋密度等喷淋参数随入口压力、喷淋高度的变化规律进行实验探究分析。结果表明, 流量随入口压力增加而增加, 但入口压力越大, 流量增长速度越缓慢; 正常工况下, 喷淋锥角由喷嘴出口扩张段角度决定, 与喷嘴扩张角保持一致, 在重力作用下出现向内的收缩圆弧液膜边; 喷淋形状为规则的环形喷淋, 入口压力增加使有效喷淋区域整体向中心压缩, 喷淋密度峰值变大, 两波峰的对称性得到改善, 压力为 349 kPa 时, 喷淋密度基本完全对称, 增加喷淋高度则情况相反。根据此喷淋密度分布特点, 在设计横管蒸发布液器时合理控制工况压强, 根据峰谷叠加原理可有效消除无效喷淋区域。

**关键词:**空心喷嘴; 喷淋锥角; 喷淋密度; 实验研究

中图分类号: P747

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2019)06-1085-08

## 1 前言

横管降膜蒸发器是大型低温多效蒸发海水淡化装置的核心设备, 外管壁侧工质喷淋密度控制在合理区域内可以提高换热效果<sup>[1]</sup>。离心喷嘴作为常用布液设备, 在喷淋不均匀的情况下, 管壁液膜厚度不一致, 液膜厚度过大导致管壁蒸发率下降, 液膜厚度过小则出现管壁干灼等传热恶化的现象, 影响整个系统的工作性能甚至损坏设备<sup>[2]</sup>。改进和优化离心喷嘴喷淋的均匀性具有重要的作用和意义。

国内外学者对喷嘴的研究大都侧重于雾化液滴尺寸和分布特性<sup>[3-5]</sup>, Santolaya 等<sup>[6]</sup>研究了液滴碰撞对喷雾形成的影响, 测量了3种不同入射压力下喷雾的粒径; Sun 等<sup>[7]</sup>数值模拟了高压共轨柴油发动机中喷嘴的几何结构参数对空化流动特性的影响; Saha 等<sup>[8]</sup>对孔口直径 0.3 和 0.5 mm 的空心锥离心喷嘴喷淋过程中液膜破碎与液滴凝聚机理进行了研究; Gad 等<sup>[9]</sup>利用粒子图像测速仪分别测量了燃料喷嘴出口与雾化空气出口之间的距离由 0 变为 3 mm 时的喷雾特性, 结果表明喷雾锥角随距离增大而减小, 喷雾浓度在中心线上有最大值; Tratnig 等<sup>[10]</sup>用相位多普勒速度仪对一种离心雾化器的雾化颗粒粒径进行测量, 在每个喷雾截面上的某些点进行测量, 颗粒粒径均小于 100  $\mu\text{m}$ ; Halder 等<sup>[11]</sup>采用实验及数值计算的方法对压力旋流实心喷嘴的流量系数和喷雾锥角研究分析, 通过模拟喷嘴出口处流体径向速度的分布规律验证了标准  $k-\varepsilon$  湍流模型预测的正确性; Rabe 等<sup>[12]</sup>实验研究了水滴二元碰撞表面中出现的拉伸分离、合并和反射分离现象; Broniarz-Press 等<sup>[13]</sup>利用激光衍射的方法研究了异形孔和锥形孔雾化喷嘴雾化机

理, 与 Radcliffe<sup>[14]</sup>和 Rizk 等<sup>[15]</sup>研究的具有相似孔型喷嘴的雾化过程对比后改进了喷孔形状。

目前, 国内外关于喷嘴的研究主要针对航天或船舶发动机燃烧室, 对用于 LT-MED (Low Temperature Multi-effect Distillation) 海水淡化装置的空心离心喷嘴喷淋特性的实验研究, 特别是有关喷淋密度的研究较少。LT-MED 喷淋的海水在换热器表面形成液膜, 喷淋均匀性对产生的二次蒸汽量具有重要影响, 从而影响产水量。喷嘴的液滴粒径分布和喷淋密度分布的均匀性是评判喷嘴性能的重要指标<sup>[16]</sup>。程会方等<sup>[17]</sup>研究了燃料池喷淋系统, 考察了高度、流量、扭转角等关键因素对喷淋流量密度分布特性的影响, 得到最大的喷幅及稳定的流量密度分布。尹晓奇<sup>[18]</sup>通过扩大数值计算区域, 得到不同流量下喷嘴喷淋液密度的分布规律, 分析了喷嘴结构参数对喷嘴流场和喷淋密度分布的影响。

本工作借助实验的手段, 通过流量、喷淋锥角和径向喷淋密度等喷淋特性参数描述用于海水淡化空心喷嘴的外部流场喷淋特性, 归纳了喷淋特性的一般与特殊规律, 为多喷嘴干涉状态下横管降膜蒸发器均匀布液提供理论指导。

## 2 实验

### 2.1 实验系统

图 1 为通过 PROE 软件建立的实验台三维布置示意图。离心喷嘴喷淋特性实验系统的组成包括: 高压装置提供水源, 旁路装置调节出水流量, 固定支架防止高速流体引起喷嘴震动, 滑轨调节喷嘴位置, 喷淋特性测量装置和废水循环利用装置。实验开始由给水泵在水箱中抽取具有一定压强的水进入喷淋系统, 通过旁路上的

回水阀控制入口体积流量，部分流体经回水阀调节回流至水箱，另一部分则继续经给水管道流向喷嘴。在电磁流量计和压力传感器读数保持稳定后，高速摄像机记录整个喷淋过程及捕捉喷嘴喷淋锥角等参数，喷嘴下方的测量装置测得不同角度的径向喷淋密度。最后水槽收集的流体被回水泵经过滤器过滤处理后回到水箱，实现水的循环利用。

2.2 实验对象

图 2 为空心喷嘴的实物与示意图，喷嘴由切向入口、顶部为圆台结构的旋流室、出口段(包括收缩、直管、扩张结构)组成，具体尺寸见表 1。

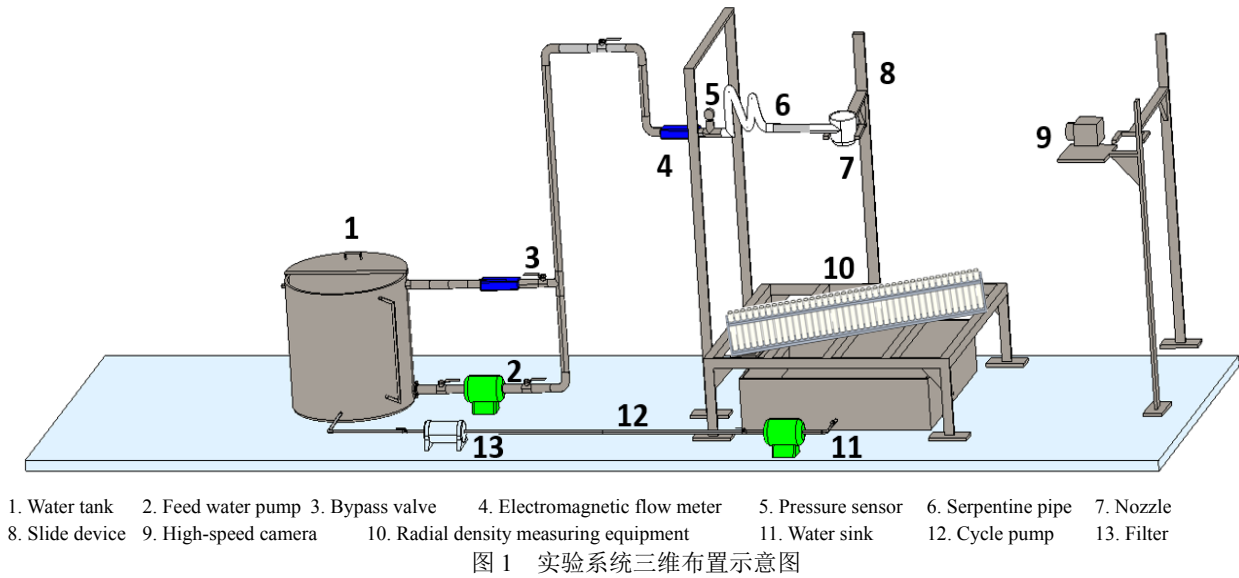


Fig.1 Three-dimensional layout of experimental platform

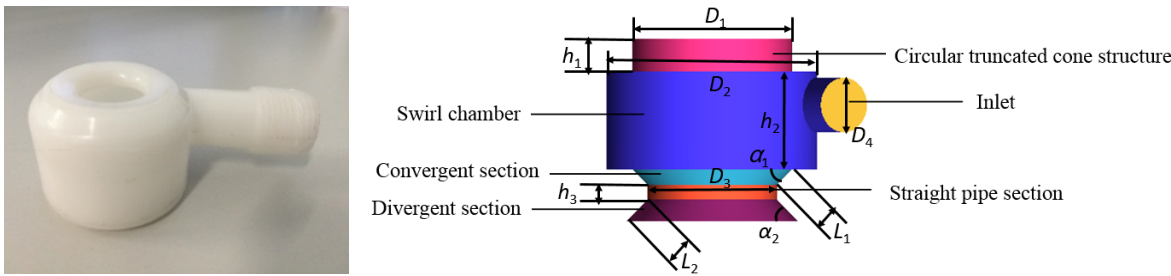


图 2 空心喷嘴实物与示意图

Fig.2 Picture and schematic of hollow nozzle

表 1 喷嘴尺寸

Table 1 Value of nozzle size

Parameter	$D_1/\text{mm}$	$D_2/\text{mm}$	$D_3/\text{mm}$	$D_4/\text{mm}$	$h_1/\text{mm}$	$h_2/\text{mm}$	$h_3/\text{mm}$	$L_1/\text{mm}$	$L_2/\text{mm}$	$\alpha_1/^\circ$	$\alpha_2/^\circ$
Value	22.1	29.1	17.9	13.5	4.4	14.1	1.6	2.9	2.9	135	135

2.3 研究方法

2.3.1 喷淋锥角

喷淋锥角通过测量高速摄影仪拍摄的喷淋照片的喷淋外缘得到(图 3)。准确测量离心喷嘴的喷淋锥角，需注意以下几点：(1) 为清晰的观测喷淋过程变化及外部喷淋流场边界，实验操作在黑暗的环境中进行，在喷嘴正中心下部布置亮度足够的稳定光源；(2) 由于喷淋过程中可能出现供水水压失稳及外界干扰等情况，以喷嘴为圆心，每 120°取 1 个测量点进行拍摄，3 个喷淋锥角的平均值即为此工况下的喷淋锥角；(3) 确保高速摄像

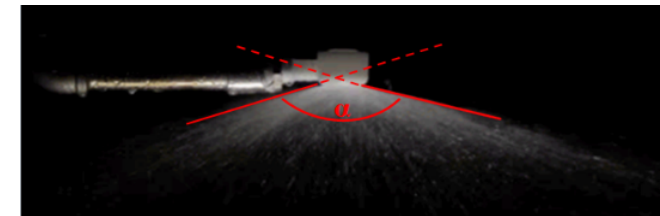


图 3 高速摄影仪拍摄的喷淋锥角

Fig.3 Spray cone angle recorded by digital camera

仪镜头和喷嘴出口在同一水平位置；(4) 考虑到在低入

口压力下喷嘴喷淋受重力等因素的影响而呈现弧状喷淋, 测量同一喷嘴的喷淋锥角的相对测量位置保持一致, 即标注切线的切点位置距喷嘴出口中心的直线距离一致。

### 2.3.2 喷淋密度

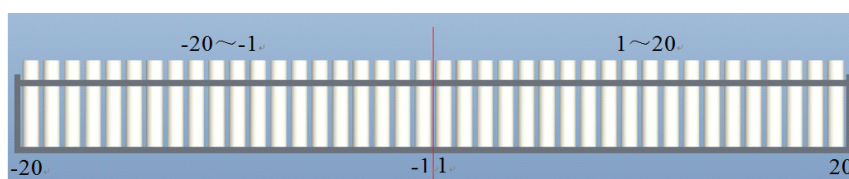
喷淋密度  $Q[\text{mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})]$  为喷淋区域某个位置上, 单位时间单位面积内累积的流体体积:

$$Q = \frac{V}{St} \quad (1)$$

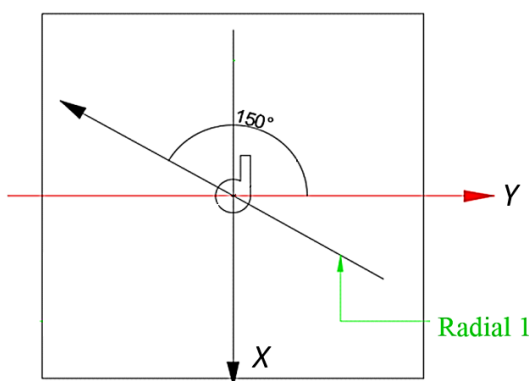
式中,  $V$  为测量装置中液体体积(mL),  $S$  为测量装置横截面积( $\text{cm}^2$ ),  $t$  为测量时间(h)。

基于上述原理设计径向喷淋密度测量装置(图 4), 装置由试管架和玻璃试管组成。试管架放置 40 个玻璃

试管, 每个试管直径 0.03 m, 高 0.22 m。试管口距试管架上支撑平台 0.07 m, 相邻试管口圆心距离 0.05 m, 相邻试管间距 0.02 m, 以防止液滴碰撞试管外壁及平台飞溅的液滴进入其它试管造成实验误差。每个试管按方向和顺序标有序号, 量程范围为 2~100 mL。试管布置俯瞰图和序号见图 4, 正方形区域代表集水槽, 以喷嘴旋流室中心为原点建立坐标系, 喷嘴的入口方向为  $X$  轴, 垂直方向为  $Y$  轴。将试管架中心放在坐标轴原点处, 从左侧第 1 个试管至右侧最后一个试管依次编号 -20~20, 测量径向喷淋密度时, 以  $Y$  轴正方向为起始角度  $0^\circ$ , 沿喷嘴旋流室直径逆时针旋转整排试管直至  $360^\circ$ , 每隔  $1^\circ$  测量一次。如图 4(b) 中测量在  $150^\circ$  周向角条件下的径向喷淋密度。



(a) Diagram of radial spray density measuring device



(b) Survey layout overview

图 4 喷淋密度测量装置

Fig.4 Spray density measuring equipment

## 3 结果与讨论

### 3.1 喷嘴喷淋流量和喷淋锥角与入口压力的关系

喷嘴在不同入口压力下的喷淋如图 5 所示, 所测喷淋锥角标注的切点位置与喷嘴出口中心的直线距离为 0.25 m。水从喷嘴喷出首先形成离散的液滴群, 液滴尺寸大小不一, 大液滴在向喷嘴下游运动的过程中受气流的扰动作用, 破碎成较小尺寸的液滴, 部分液滴在较短的距离内破碎。喷嘴出口速度的方向与压力无关, 但液滴通过一定高度所需的时间与垂直出口速度有关, 因此重力对液体运动轨迹的影响较小, 主要取决于入口压

力。低入口压力下, 流体速度和流量太小, 受重力影响顺壁面流出, 不具备形成喷淋的条件。

图 6 为入口压力对喷嘴流量和喷淋雾化角的影响。随入口压力增大, 喷嘴入口流量逐渐增大且增大趋势逐渐变缓。喷嘴出口与环境相通, 环境压力保持不变, 随着入口压力的增加旋流室中气液两相压差增大, 提高了流体流动速率, 离心力作用加强, 单位时间进入旋流室中的水流量不断增加。同时, 喷嘴旋流室中流道狭窄且直径保持不变, 入口压力增大导致流体与壁面处的流动阻力增大, 摩擦力增加造成部分压损, 因此入口流量的增加趋势逐渐变小。喷嘴喷淋锥角随入口压力增大并未

发生明显变化,均保持  $150^\circ$ ,表明在正常实验工况的入口压力下,喷嘴喷淋锥角受自身结构的限制,稳定流动

状态下喷淋锥角只与喷嘴出口扩张段斜扩角度有关。

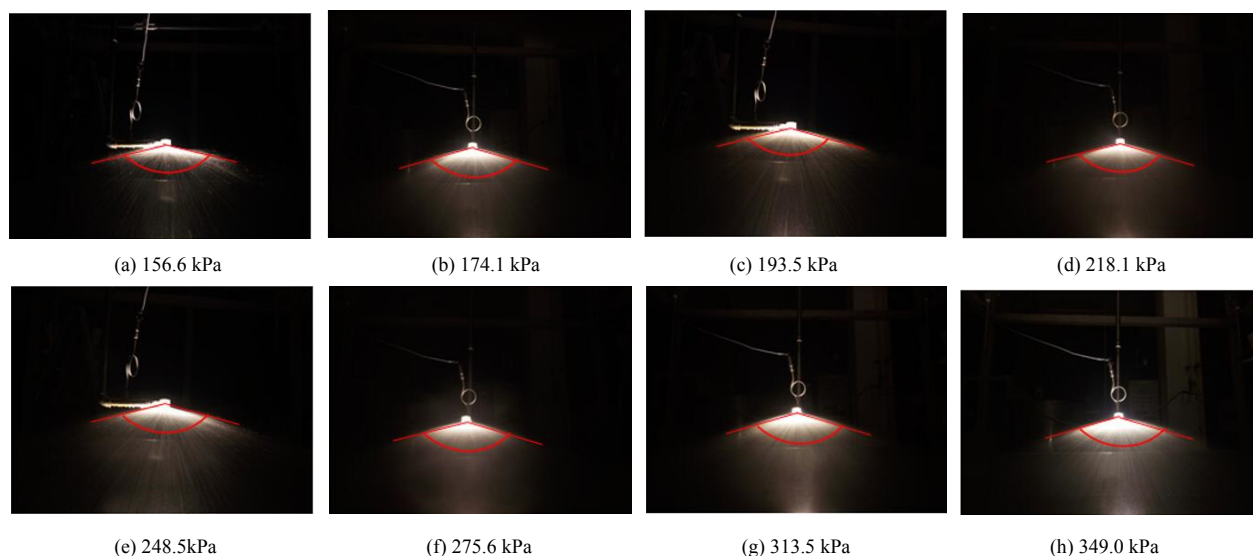


图 5 不同入口压力下的喷嘴喷淋图像

Fig.5 Spraying images of nozzle at different inlet pressures

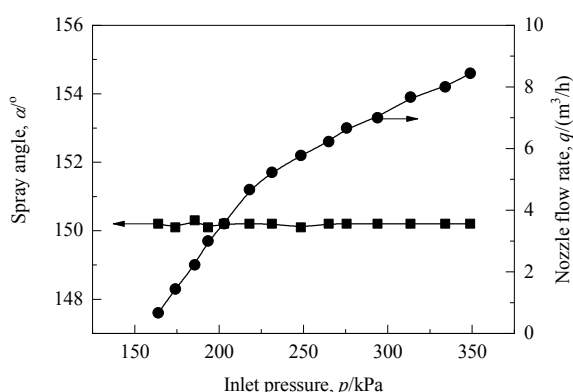


图 6 入口压力对喷嘴流量和喷淋雾化角的影响

Fig.6 Effects of inlet pressure on nozzle flow rate and spray angle

### 3.2 相同喷淋高度、不同入口压力下的喷嘴喷淋密度

喷淋高度  $h$  为喷嘴出口中心到喷淋密度测量装置中玻璃试管口所在水平面的垂直距离。图 7 为喷淋高度  $h=0.20$  m、不同入口压力下沿  $X$  轴方向的径向喷淋密度,玻璃试管口中心与试管架中心的距离在中心左侧距离为负、中心右侧为正。由于旋流室中心压强小于大气压强,空气进入喷嘴内部旋流中心区域形成稳定空气柱,导致空心喷嘴的喷淋形式为圆锥形空心圆环状。在整个环状喷淋区域中,定义曲线中间位置喷淋密度为 0 的区域为无效喷淋区,其两侧有液滴分布的环形区域为有效喷淋区域,二者共同组成喷嘴的空心圆锥形喷淋区域。

由图 7 可知,喷嘴单侧入口使整个喷嘴内部流场在较小压强下呈不对称性,造成空气芯偏移,且偏移方向

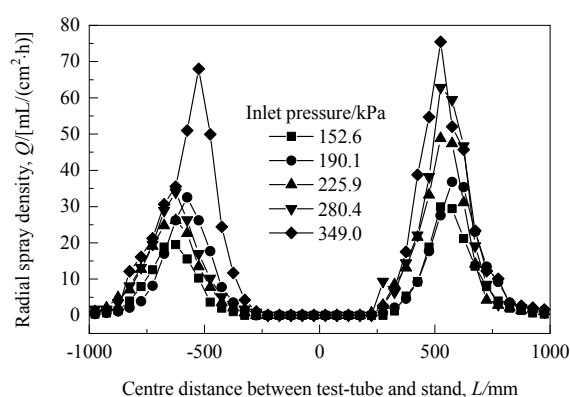


图 7 喷嘴喷淋高度  $h=0.20$  m 时不同入口压力下径向喷淋密度

Fig.7 Radial spray densities of nozzle at different inlet pressures with spray height  $h=0.20$  m

靠近喷嘴入口处,极不利于出口液体均匀分布。在实验压力范围内,喷淋密度的对称性随入口压力增加不断改善, $p=349$  kPa 时喷嘴喷淋区域对称性最佳,在密度测量装置半径 0.5 m 附近出现喷淋密度峰值。

在实验工况范围内,随入口压力增大,有效喷淋区外直径无明显变化,从另一个角度验证了扩张段角度对喷淋锥角的限制。在有效喷淋区径向喷淋密度形成 2 个峰,入口压力越大,形成双峰的跨度越短,边缘流峰值越高,附近喷淋密度变化越剧烈。这是因为喷嘴入口压力增加使流量增加,旋流室内空气流场体积被压缩,旋流室内液体区域变厚,喷嘴出口扩张段的液膜厚度增加,导致喷淋至大气环境后有效喷淋区向中心压缩,无



效喷淋区域面积减小。

如图7所示,喷淋密度的峰值出现在环形喷淋区域中间,且内侧峰边缘比外侧峰边缘的喷淋密度变化更剧烈。不同出口位置处液滴的速度方向和大小各不相同,且在不同喷淋直径上到达各试管的距离差异较大的原因都造成了径向喷淋密度分布呈抛物线分布。图8为4条不同的液滴轨迹, $L_1, L_2, L_3, L_4$ 分别为4个不同方向的液滴到达对应收集试管口的距离, $L_1$ 和 $L_4$ 分别为与喷嘴扩张段壁面一侧接触的液滴轨迹和与空气柱一侧接触的液滴轨迹。 $L_4$ 侧的液滴受空气卷吸的影响,液滴速度很小,而 $L_1$ 侧液滴受空气卷吸的影响逐渐减小。 $L_1$ 侧壁面处存在较大摩擦阻力,损失了液滴的出口动能,使该侧液滴无论到达试管的直线距离还是垂直方向上的轴向速度均很小。液滴的飞行时间取决于液滴的喷射距离 $L$ 与速度 $v$ ,因此在液滴群两侧边缘之间定会存在一条特殊运动轨迹可以使液滴喷射到喷嘴下部测量装置的用时最短,在相同时间范围内单个试管收集到的流量体积最大形成喷淋密度波峰,其附近喷淋密度则递减,从而导致喷淋密度在中心两侧呈抛物线状规律分布。因

此可在设计横管蒸发布液器时合理控制工况压强,根据峰谷叠加原理有效消除无效喷淋区域。

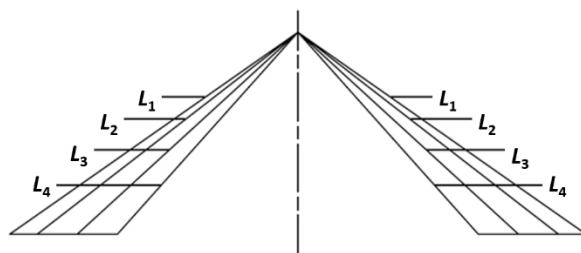


图8 喷嘴喷淋液滴轨迹平面示意图

Fig.8 Plane sketch of droplet track

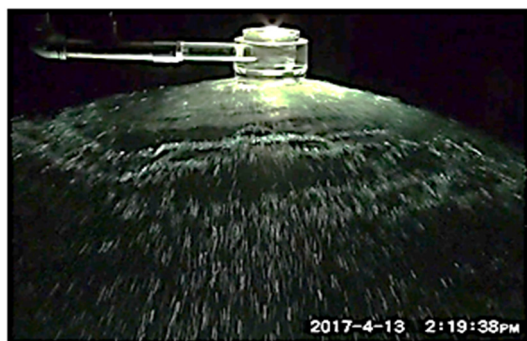
不同入口压力下液膜破碎状态如图9所示,随压力增加,喷嘴液体破碎的液滴变密,同时液膜破碎的长度变短。这是由于随入口压力增大,液体在离心腔内的离心速度增大,离开喷口后,在液膜与空气相互扰动的作用下,液膜更易破碎形成粒径更小的液滴,在空气气流作用下均匀分布,雾化效果较好,因此增加压力有利于液膜破碎。不同压力下中心两侧径向喷淋密度坐标基本一致,验证了喷嘴喷淋断面为规则的环状区域。



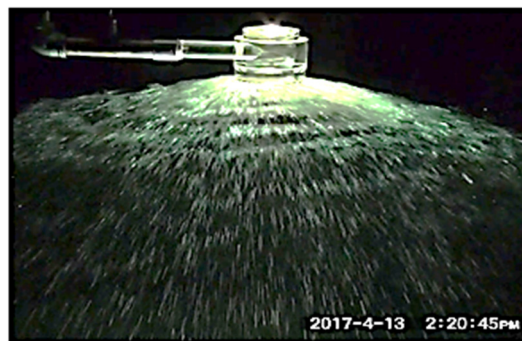
(a) 102.0 kPa



(b) 107.1 kPa



(c) 108.7 kPa



(d) 112.1 kPa

图9 不同入口压力下液膜破碎状态

Fig.9 Fragmentation of liquid film at different inlet pressures

### 3.3 相同入口压力、不同喷淋高度下的喷嘴喷淋密度

图10为喷嘴入口压力为152.6、225.9和349.0 kPa时,不同喷淋高度下径向喷淋密度的变化。由于喷淋高

度增加,喷淋区域直径变大,受测量范围的限制在 $h=0.30$ 和 $0.45$  m的测量高度下仅可得到部分径向喷淋密度,其变化趋势依然呈相似分布规律。由图10可知,

在出口距离较小的测量高度上,液滴在同一喷淋区域的直径上集中分布,随着喷淋高度的增加喷淋密度分布逐渐分散,径向液滴分布范围更均匀,喷淋密度峰值减小但始终占主导地位。 $h=0.3\text{ m}$  时,喷嘴喷淋密度两个峰开始逐渐对称,有利于改善布液的均匀性。由几何学分析可知,喷嘴外部流场形成空心圆锥状的喷淋区域,随喷淋高度增加,中间无效喷淋区面积逐渐增大,外侧液滴聚集的环状区域直径不断扩大,喷淋面积随之增大导致喷淋密度分布逐渐区域分散;由流体力学分析可知,

液膜在出口处破碎形成的液滴间无相互运动,单位体积内液滴数很多,随着喷淋高度增加,小液滴不断受到空气阻力的作用,且液滴之间碰撞拉伸导致聚合分离,不同索太尔直径液滴的速度和方向均随之变化,液滴速度减小逐渐扩散,从而出现喷淋密度体积流量分布在径向上逐渐趋于分散均匀。径向喷淋密度的分布也验证了随喷淋高度增加,喷淋锥角由于动力损失,在重力作用下出现向内的收缩圆弧液膜边缘。

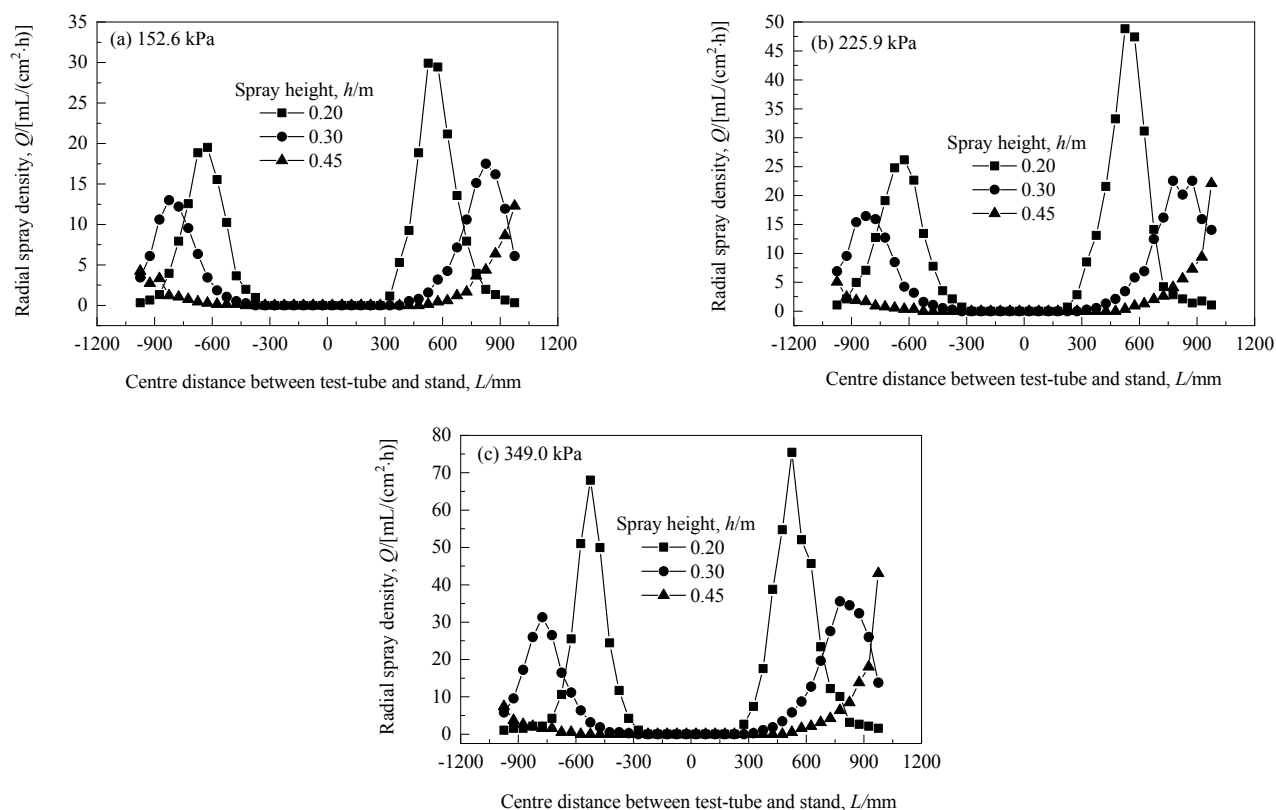


图 10 不同入口压力和喷淋高度下的径向喷淋密度  
Fig.10 Radial spray densities of nozzle at different spray heights and inlet pressures

## 4 结 论

在自行设计搭建的离心喷嘴喷淋实验台上,对离心喷嘴流量、喷淋锥角和径向喷淋密度等喷淋参数随入口压力、喷淋高度变化的分布规律进行了研究,得到如下结论:

(1) 旋流式空心喷嘴的入口流量大小正比于入口压力的变化,但增加幅度逐渐趋于缓慢;在研究的入口压力工况下,喷淋锥角受斜扩角度的影响并维持不变。

(2) 喷嘴喷淋区域中间位置喷淋密度几乎为零,有效喷淋区域呈规则圆环状。喷淋密度在径向的中心两侧有两个峰;提高入口压力,无效喷淋区面积缩小,喷淋

密度分布愈集中,两个峰值显著变大,波峰向中心位置移动。入口压力为 349 kPa 时,喷嘴喷淋区域对称性最佳。根据峰谷叠加原理可有效消除无效喷淋区域。

(3) 增大喷淋高度,位于喷淋直径两端的喷淋密度波峰逐渐远离中心,径向液滴分布范围更均匀,喷淋密度峰值减小但始终占主导地位,有效喷淋区域向外扩张,位于中心处的无效喷淋区域面积增大。喷淋高度为 0.3 m 时,喷嘴喷淋密度两处波峰开始逐渐对称。

## 参考文献

- [1] 周士鹤. 低温多效蒸发海水淡化系统热力性能分析和优化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 1-10.  
Zhou S H. Thermal performance analysis and optimization of low temperature multi-effect evaporation desalination system [D].

- Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 1–10.
- [2] 张猛, 周幅彦, 朱冬生. 降膜蒸发器的研究进展 [J]. 流体机械, 2012, 40(6): 82–86.
- Zhang M, Zhou G Y, Zhu D S. Research progress of falling-film evaporator [J]. *Fluent Machinery*, 2012, 40(6): 82–86.
- [3] 陈坚, 李建中, 袁丽, 等. 雾化特性对喷雾燃烧点火过程的影响 [J]. 推进技术, 2017, 38(6): 1318–1326.
- Chen J, Li J Z, Yuan L, et al. Effects of spray characteristics on ignition process in spray combustion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1318–1326.
- [4] Lan Z, Zhu D, Tian W, et al. Experimental study on spray characteristics of pressure-swirl nozzles in pressurizer [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 63(1): 215–227.
- [5] Muhammad R, Huang Y, Zheng Z. Effect of geometric parameters on spray characteristics of pressure swirl atomizers [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(35): 15790–15799.
- [6] Santolaya J L, Garcia J A, Calvo E, et al. Effects of droplet collision phenomena on the development of pressure swirl sprays [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, 56(10): 160–171.
- [7] Sun Z Y, Li G X, Chen C, et al. Numerical investigation on effects of nozzle's geometric parameters on the flow and the cavitation characteristics within injector's nozzle for a high-pressure common-rail DI diesel engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89(1): 843–861.
- [8] Saha A, Lee J D, Basu S, et al. Breakup and coalescence characteristics of a hollow cone swirling spray [J]. *Physics of Fluids*, 2012, 24(12): 621–633.
- [9] Gad H M, Ibrahim I A, Abdel-baky M E. Experimental study of diesel fuel atomization performance of air blast atomizer [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 99(12): 211–218.
- [10] Tratnig A, Brenn G. Drop size spectra in sprays from pressure-swirl atomizers [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, 36(5): 349–363.
- [11] Halder M R, Dash S K, Som S K. A numerical and experimental investigation on the coefficients of discharge and the spray cone angle of a solid cone swirl nozzle [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2004, 28(4): 297–305.
- [12] Rabe C, Malet J, Feuillebois F. Experimental investigation of water droplet binary collisions and description of outcomes with a symmetric Weber number [J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22(4): 1–11.
- [13] Broniarz-Press L, Włodarczak S, Matuszak M, et al. The effect of orifice shape and the injection pressure on enhancement of the atomization process for pressure-swirl atomizers [J]. *Crop Protection*, 2016, 82(4): 65–74.
- [14] Radcliffe A. High speed aerodynamics and jet propulsion [M]. Princeton: Princeton University Press, 1960: 12–18.
- [15] Rizk N K, Lefebvre A H. Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1985, 1(3): 193–199.
- [16] 李承凯, 张德远. 离心旋流式喷嘴雾化特性实验研究 [J]. 装备环境工程, 2016, 13(6): 47–51.
- Li C J, Zhang D Y. Research on atomizing properties of centrifugal swirl nozzle [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(6): 47–51.
- [17] 程会方, 苏夏, 桂璐廷. 乏燃料池喷淋系统离心式喷嘴性能实验研究 [J]. 科技与企业, 2016, (6): 243–245.
- Cheng H F, Su X, Gui L T. Experimental study on performance of centrifugal nozzle in spent fuel pool spray system [J]. *Science, Technology and Enterprise*, 2016, (6): 243–245.
- [18] 尹晓奇. 离心式喷嘴空心锥喷淋特性数值研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 41–55.
- Yin X Q. Numerical investigation on the hollow cone spray characteristics of pressure swirl nozzles [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 41–55.