



制冷学报

Journal of Refrigeration

ISSN 0253-4339, CN 11-2182/TB

《制冷学报》网络首发论文

题目：室外造雪机用核子器两相流动过程与雾化规律研究
作者：郝亚辉，吴海峰，徐荣吉，张华，王瑞祥
网络首发日期：2024-05-10
引用格式：郝亚辉，吴海峰，徐荣吉，张华，王瑞祥. 室外造雪机用核子器两相流动过程与雾化规律研究[J/OL]. 制冷学报.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20240508.1326.004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

室外造雪机用核子器两相流动过程与雾化规律研究

郝亚辉¹ 吴海峰¹ 徐荣吉¹ 张华² 王瑞祥¹

(1 北京建筑大学环境与能源工程学院 北京市建筑节能综合高效综合利用工程技术研究中心 北京 100044;

2 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要 核子器对促进人工造雪的液滴快速成核、结晶、成雪过程具有重要作用。针对室外造雪机用的通用核子器，设计了可视化实验平台，研究了核子器内部气液两相流动过程以及对雾化行为的影响规律。结果表明：核子器内部呈两相环形流动，外部形成了连续的空锥形喷雾场。随着气液压力比 (Φ_{GL}) 的增加，界面扰动波在内部气液两相流动过程中逐渐消失。随着空气核占据更多的空间，液膜厚度逐渐减小且变得均匀稳定，雾化效率和雾化质量均得到显著提升。当 Φ_{GL} 从 20% 增至 67% 时，液滴分布的均匀性和稳定性分别提高了 17% 和 60%。

关键词 室外造雪机；核子器；内部流型；粒径分布；科技冬奥

中图分类号：TB61¹；P481；TS952.6³

文献标识码：A

Study on Two-phase Flow Process and Atomization Law of Nucleator Nozzle for Outdoor Snow Maker

Hao Yahui¹ Wu Haifeng¹ Xu Rongji¹ Zhang Hua² Wang Ruixiang¹

(1. Beijing Engineering Research Centre of Sustainable Energy and Buildings, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 100044, China; 2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract The nucleator nozzle plays an important role in promoting the rapid nucleation, crystallization, and snow formation process of droplets of artificial snow. In order to study the gas-liquid two-phase flow process inside the nucleator nozzle and its influence on atomization behavior, a visual experimental platform was designed in the paper. The results show that there is two-phase annular flow inside the nucleator nozzle, and a continuous hollow cone spray field is formed external. As the gas-liquid pressure ratio (Φ_{GL}) increases, interface disturbance waves gradually disappear at the gas-liquid interface of the internal flow. As the air core occupies more space, the liquid film thickness gradually decreases and becomes uniform and stable, and the atomization efficiency and quality are significantly improved. When the Φ_{GL} increased from 20% to 67%, the uniformity and stability of droplet distribution increased by 17% and 60%, respectively. This work can provide important guidance for the structural design of high-performance atomization components.

Keywords outdoor snow maker; nucleator nozzle; internal flow pattern; droplet distribution; science and technology Winter Olympics

北京冬奥的成功举办，积极带动了冰雪运动的全面普及与快速发展^[1]。但我国地域辽阔，气候分区多样化，这对室外造雪机的高温成雪、多气候多地域适应性提出了更高的要求^[2-3]。在室外造雪机中，核子器是关键部件之一，首先通过供水系统将高压水输送至喷嘴，在混合腔内与压缩空气混合，高速流动的气体撞击并破碎液滴，形成细小的晶核，对促进大量液滴的快速成核、结晶、成雪过程具有重要作用，实现高温环境成雪^[4-5]。因此，通过调节气体和液体的压力及流量可以有效控制成雪质量和覆盖范围，从而推动多地域冰雪运动的发展^[6-7]。

核子器的缺点是在低气液压力比下产生不稳

定的喷雾，导致雾化效果差，甚至在严重情况下雾化失败^[8]。喷雾不稳定将会导致人工造雪过程中雪晶质量不一、覆盖面积受限和资源浪费等问题^[9]。因此，提升喷雾稳定性是提升造雪机整体性能的关键。喷雾稳定性受操作参数、结构参数及物性参数等因素影响^[10]。孙元等^[11]实验测试空气助力喷嘴出口口径对喷雾液滴分布的影响，发现口径的缩小有利于喷雾稳定性的提升。陈有锦等^[12]通过数值模拟分析了不同操作工况对空气助力喷嘴内流场特性的影响，发现空气助力喷嘴混合腔径向截面的变化影响流体速度和湍动能的分布。曹建明等^[13]研究了空气助力与液体黏度对液体破碎形态的影响，得到射流流速与液体破碎之间的关系，并指出在液体破

基金项目：国家自然科学基金（52306220）资助项目。（The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52306220).)

碎过程中，液体黏度起主要抑制作用。M. Zaremba 等^[14]对比了 4 种不同空气助力喷嘴结构，发现喷雾的形成主要取决于内部设计，特定的混合过程可形成有利的环形流动，从而产生稳定的喷雾。卢立新等^[15]通过数值模拟揭示了空气助力喷嘴雾化系统原理，发现液膜分布的差异性造成了喷射形状和覆盖均匀性的不稳定。综上所述，核子器雾化性能的不稳定性主要受混合腔内气液两相流动状态的影响。

因此，本文以室外造雪机用通用核子器为研究对象，采用可视化实验研究了不同运行工况对核子器混合腔内气液两相流动过程及雾化规律的影响，探讨了内部流态与喷雾稳定性的相关性，研究成果可为高性能空气助力喷嘴的结构设计和优化提供参考。

1 实验装置

1.1 实验系统与方法

搭建了气液雾化喷嘴的性能测试系统，如图 1 所示，该系统可以可视化观察核子器内部流型和喷雾行为，实现粒径分布的测量。实验系统主要包括供水系统、供气系统、测量系统和雾化装置 4 部分。供水系统包括储水箱和水泵；供气系统包括空气压

缩机和空气过滤器；测量系统包括激光粒度分析仪、高速摄像机、LED 灯和压力表等；雾化装置由可视化喷嘴和配套底座组成。首先，高压水由水泵输送至喷嘴混合腔。同时，压缩空气也被输送至喷嘴混合腔，与高压水进行混合后，雾化形成喷雾。实验过程环境温度约为 20 ℃，实验设备主要参数如表 1 所示。实验中的可视化过程应用了背光成像技术。使用配备固定焦距镜头的高速摄像机对混合腔和泄压口附近进行可视化观察。混合腔和喷雾的瞬态图像以 10 000 FPS 的频率和 60 μs 的曝光时间拍摄。为了精确测量喷雾液滴粒径大小和粒径分布等信息，实验将激光粒度分析仪放置在泄压口下方 40 cm 处以测量液滴直径分布^[16]。

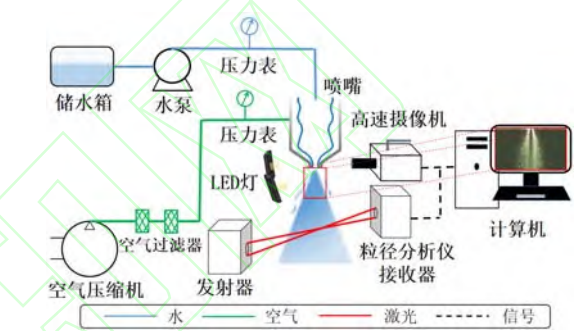


图 1 气液雾化喷嘴性能测试系统
Fig.1 Performance testing system for gas-liquid atomization nozzle

表 1 实验设备主要参数

Tab.1 Main parameters of experimental equipment

设备名称	设备厂家	型号	设备参数	误差
离心水泵	浙江飞利浦斯	FLPS25X26A-M3.0D	最大扬程 230m	—
激光粒度仪	山东耐克特	PW180-B	量程 0.1~800 μm	±1%
空气压缩机	永磁变频螺杆空压机	C5	公称容积流量 0.2~0.4 m ³ /min	—
高速摄像机	美国 Phantom	V211	最大帧数 20 000	—
镜头	日本 Nikon	定焦 50mm	—	—
压力表	陕西西仪	YB-150B	量程 0~4 MPa	±0.16%

当造雪机运行时，高压水和压缩空气被送入核子器。当空气和水的比例不合适时，喷雾会失败。因此，根据造雪机的实际工况，确定合适的气液压力比范围为 20%~67%，引入一个无量纲比例系数 Φ_{GL} 来表征气液压力比，计算如式 (1) 所示。气液压力比显著影响混合室内流体流动形态。

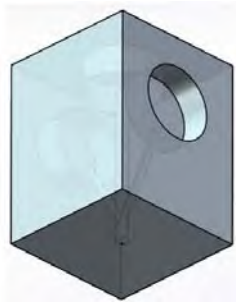
$$\Phi_{GL} = p_g / p_w \quad (1)$$

式中： p_g 为供气压力，MPa； p_w 为供水压力，MPa。

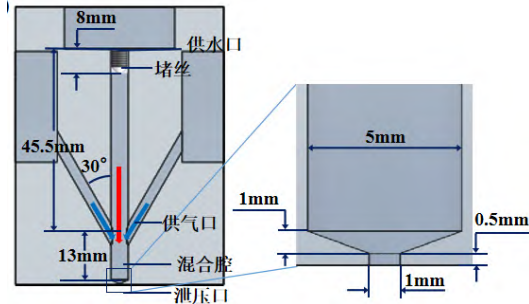
1.2 核子器的可视化设计

实验所用喷嘴为室外造雪机用通用核子器^[5]。

喷嘴有一个液体入口和两个空气入口。水和空气在混合室中以不同的形式混合，然后从泄压口扩散出来形成喷雾。当气体和液体进入核子器的混合腔时，气体和液体的混合和切碎过程影响了喷雾质量^[17]。图 2 (a) 为设计和加工的可视化气液雾化喷嘴，可直接观测混合腔内空气和水的混合过程，具体尺寸如图 2 (b) 所示。为了确保提供平整的观察表面，从而准确传递视觉信息并最大限度地减少光学失真，设计并加工了方形结构的透明喷嘴。



(a)核子器



(b)核子器结构参数

图2 可视化的核子器结构

Fig.2 Visualized structure of nucleator nozzle

2 结果与讨论

2.1 内部流型分析

图3所示为不同 Φ_{GL} 下喷嘴内部流型的可视化结果。由图3可知，在气液相互作用过程中，气体挤压液体，液体形成环形液膜附着在壁面上，泄压口连续的环境形成连续的雾化。气体和液体之间存在可区分的界面。当 Φ_{GL} 为20%时，液体表面张力和黏性力发挥主要作用，阻止液体破碎，形成了上窄下宽的液膜，其扰动性较大。随着 Φ_{GL} 的增加，气液速度比逐渐增加，单位面积液体与更多的空气接触，液体获得更大的动能，使液体表面波的生长速率增加^[18]，使液体更易破裂，在狭小空间内，形成更薄的液膜附着在壁面。空气核向泄压口的移动，导致液膜厚度不断变化，产生了不稳定的喷雾。当 Φ_{GL} 增至67%时，空气核几乎填充了整个通道，形成了一层几乎看不见的薄膜，液膜表现出优异的稳定性的。可以推断出，在一定条件下， Φ_{GL} 越大，喷雾稳定性和均匀性越好。

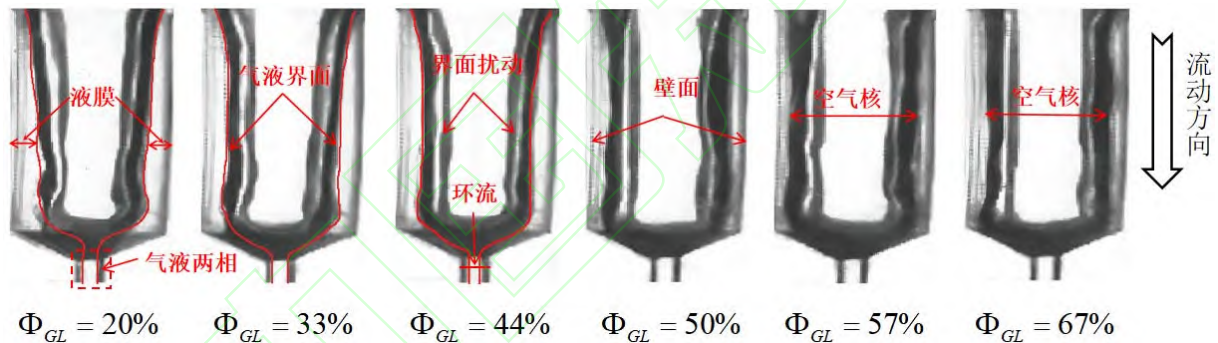


图3 不同水气压力比下的内部流型

Fig.3 Internal flow patterns at different gas-liquid pressure ratio

2.2 喷雾形态分析

图4所示为不同 Φ_{GL} 下喷嘴内部流型对应的喷雾形态。当 Φ_{GL} 为20%时，泄压口喷射的液体主要表现为液体射流。同时，在气液界面处存在微弱的空气动力学效应，其中一些液片或液丝从射流表面剥落，并以不规则的轨迹飞行。随着 Φ_{GL} 的增加，液片和液丝的尺寸减小，在大规模扰动下，逐渐形成空锥形喷雾，雾化面积增大。这表明空气动量的增加增强了气液界面的剪切效应，导致在液面上形成更多液滴，并形成小规模湍流。此外，液滴数量的增加伴随着液滴尺寸的减小，液滴飞行轨迹逐渐变得规则，并沿喷嘴的轴向飞行。当 Φ_{GL} 增至67%，

气液相互作用急剧增强。雾化的初始区域几乎出现在泄压口处，虽然在泄压口处观察到液片和液丝的存在，但它们迅速破碎为更细小的韧带和液滴，使雾化颗粒的直径显著减小，最终形成雾状的雾化效果，达到了理想的雾化状态。此外，可以在雾化初始区域观察到空气锥，主要特征是锥角和穿透长度。随着 Φ_{GL} 的增加，空气锥的穿透长度从8 mm增至28 mm，锥角从10°增至14°。空气锥逐渐占据更大的面积，提供更多的能量，增加了刚出泄压孔时的液体向外扩张的效果，雾化锥角增大，雾化覆盖范围增大。

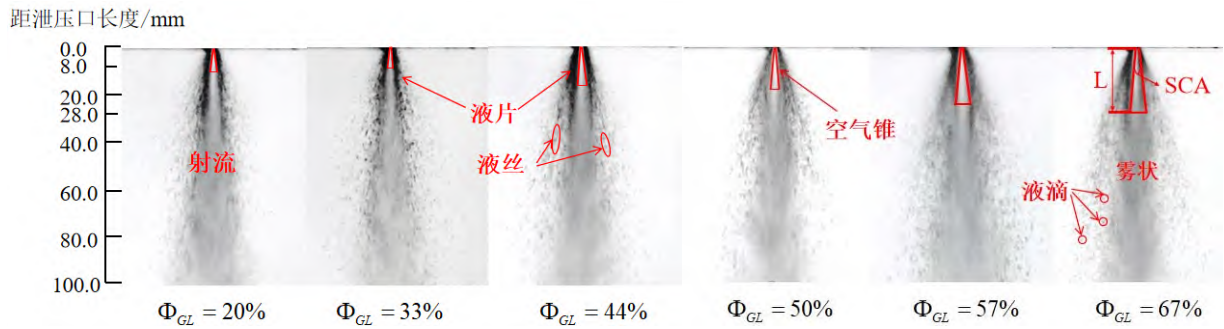


图 4 不同水气压力比下的喷雾形态

Fig.4 Spray patterns at different gas-liquid pressure ratio

2.3 雾化特性

图 5 所示为不同液滴特征直径随 Φ_{GL} 的变化。其中, D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 表示小于该尺寸颗粒的体积含量分别占有所有颗粒的 10%、50%和 90%。索特平均直径 (SMD, sauter mean diameter) 是评价喷嘴喷雾性能时广泛使用的粒度标准, 意义是与实际颗粒具有相同表面积的球体的直径, 表示为 D_{32} 。由图 5 可知, SMD 首先随着 Φ_{GL} 的增加而迅速减小, 然后趋于平稳。这是因为随着 Φ_{GL} 的增大, 气体动量分配至单位质量液体增强, 混合腔内形成较薄的液膜, 在高速气流作用下, 薄膜更易破碎成液丝, 形成更小的液滴。当 Φ_{GL} 增至一定值, 气液之间的速度差所产生的剪切破碎作用达到饱和状态, 继续增大 Φ_{GL} , 对于液体破碎促进作用减弱。其次, 即使 Φ_{GL} 为 20%, SMD 也可以保持在 $31.38 \mu\text{m}$, 这意味着核子器具有优异的雾化性能, 可以将液体雾化成微米级的离散相液滴。 D_{10} 和 D_{90} 的趋势与 SMD 相同, 而 D_{50} 随着 Φ_{GL} 的增加先减小后逐渐增大。在喷雾的下游, 由于高速气流的作用, 液滴颗粒高速飞行, 液滴粒子之间的碰撞和聚集效应导致喷雾粒径分布不稳定, 使每个特征直径的变化趋势略有不同。特征直径的变化趋势还需要进一步研究。

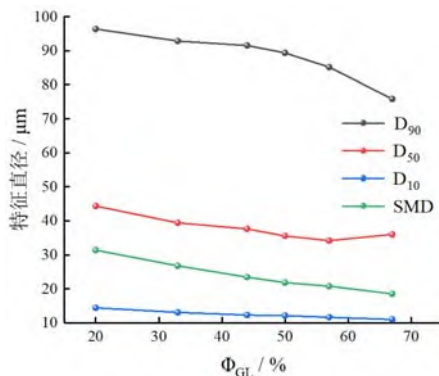


图 5 不同水气压力比下液滴粒径变化规律

Fig.5 Variation of droplet size at different gas-liquid pressure ratio

图 6 所示为不同 Φ_{GL} 下特征直径标准偏差的变化。 D_{90} 的标准偏差明显大于其他特征直径, 表明大液滴是不稳定的。这是因为小液滴由于质量小、惯性小, 更容易受到周围气体分子的随机碰撞影响。这种运动有助于分散和稳定小液滴, 防止它们聚集成更大的液滴。其次, 相比于大液滴, 小液滴相对表面积较大, 与周围空气接触的面积也增大。因此, 小液滴受到的空气阻力相对较大, 这有助于减缓其运动速度, 保持其稳定。因此, 液滴的稳定性随 Φ_{GL} 的增加而增加。当 Φ_{GL} 增至 57% 时, 从喷嘴内部和外部可视化图像中均可看到, 雾化效果已达到“饱和”, 对稳定性的提升变得不再显著。 D_{90} 的标准偏差比 D_{50} 和 D_{10} 的标准偏差大一个数量级。因为在喷雾过程中, 中小液滴的数量多于大液滴, 气流使大液滴更难保持稳定^[19]。其次, 大液滴的尺寸比小液滴大几倍, 这使较大液滴之间的标准偏差处于较高水平。此外, 由于一些大液滴在二次喷射过程后分解成更小的液滴, 随着 Φ_{GL} 的增加, 由大液滴引起的强烈波动逐渐减弱, 喷雾液滴的稳定性增强。

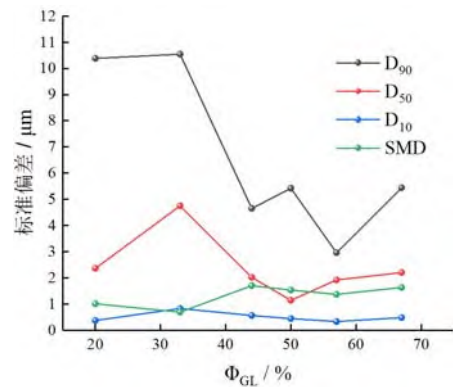


图 6 不同水气压力比下标准偏差变化规律

Fig.6 Variation of standard deviation at different gas-liquid pressure ratio

图 7 说明了水气压力比对索特平均直径和相对跨度因子的影响。相对跨度因子 (RSF, relative span factor) [20] 表示液滴粒径分布最大直径与最小直径之差除以中位直径, 用来评估雾化效果的均匀性, 其值越小, 雾化越均匀, 计算如式 (2) 所示。这两个值均与 Φ_{GL} 呈负相关, 当 $\Phi_{GL} > 57\%$ 时, 这些影响也会减弱。 Φ_{GL} 从 20% 增至 67%, Φ_{GL} 降低 17%, 雾化均匀性显著提升。图 8 说明了 Φ_{GL} 对雾化锥角和变异系数的影响。变异系数 (CV, coefficient of variation) [20] 表示标准偏差与平均值的比值, 用来衡量数据分布的离散程度, 其值越小, 雾化越稳定, 计算如式 (3) 所示。SCA 与 Φ_{GL} 呈正相关, 而 Φ_{GL} 与 Φ_{CV} 呈负相关。当 $\Phi_{GL} > 57\%$ 时, 这种影响会减弱。当 Φ_{GL} 从 20% 增至 67% 时, SCA 增加了 106%, 雾化覆盖范围得到大幅提升。同时, Φ_{GL} 从 20% 增至 67% 会使 Φ_{CV} 降低 60%, 喷雾稳定性显著提升。这些研究结果与前述可视化观察到的结果相一致。

$$\Phi_{RSF} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (2)$$

$$\Phi_{CV} = \sigma / \bar{x} \quad (3)$$

式中: Φ_{RSF} 为相对跨度因子; Φ_{CV} 为变异系数; σ 为标准偏差, ($^{\circ}$); $\bar{x}$ 为平均值, ($^{\circ}$); 本文中自变量为雾化锥角 (SCA), ($^{\circ}$)。

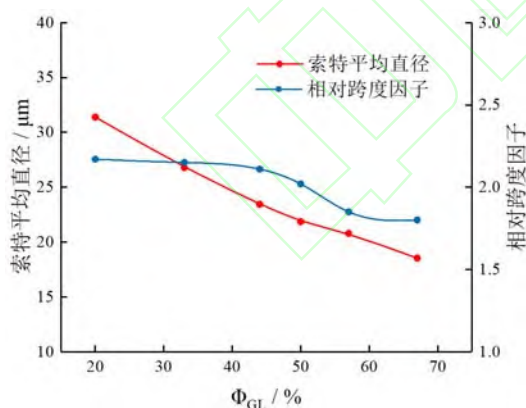


图 7 不同水气压力比下 SMD 和相对跨度因子的变化规律

Fig.7 Variation of SMD and RSF at different gas-liquid pressure ratio

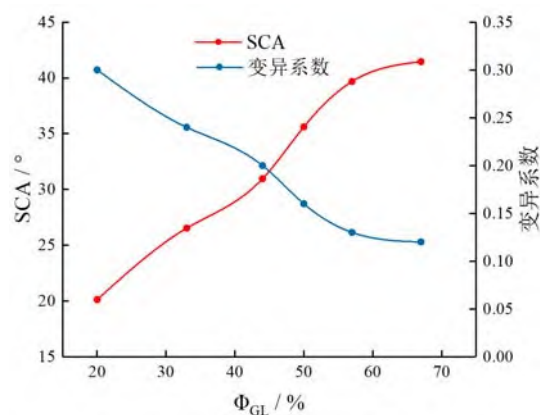


图 8 不同水气压力比下雾化锥角和变异系数的变化规律

Fig.8 Variation of spray cone angle and CV at different gas-liquid pressure ratio

3 结论

本文实验研究了不同运行工况下室外造雪机用核子器的内部两相流动和喷雾发展过程, 得到如下结论:

1) 核子器的内部结构决定了其形成环型流。液膜的厚度由 Φ_{GL} 决定, 形成具有不同稳定性的喷雾形态。在 Φ_{GL} 为 67% 时, 液膜达到最薄且保持稳定, 表现出了卓越的雾化性能和理想的雾化效果。

2) 随着 Φ_{GL} 的增加, 大尺寸液片和液丝的破碎概率增加, 破碎初始区域在泄压口出现, 并沿径向扩散, 雾化锥角最大达到 42° , 雾化覆盖能力显著提升。

3) 不同特征直径的液滴稳定性取决于 Φ_{GL} , 中小液滴的稳定性优于大液滴。降低 Φ_{GL} 将增强喷雾的不稳定性, 导致雾化效率和均匀性较差。

4) 随着 Φ_{GL} 的增加, 核子器的雾化效率和喷雾质量显著提升。当 Φ_{GL} 从 20% 增至 67% 时, 液滴分布的均匀性提高了 17%, 稳定性提高了 60%。

本文受北京市教委研发计划项目 (KM202310016009) 资助。(The project was supported by the R&D Program of Beijing Municipal Education Commission (No. KM202310016009).)

参考文献

[1] 马传业, 郝雅芳, 王婷. 北京 2022 年冬奥会对中国体育发展的影响[J]. 当代体育科技, 2020, 10(18): 234-236. (MA Chuanye, HAO Yafang, WANG Ting. The influence of Beijing

2022 winter Olympics on sports development in China[J]. Contemporary Sports Technology, 2020, 10(18): 234-236.)

[2] 杨占武. 北京冬奥会和冬残奥会人工造雪的研究[J]. 冰雪运动, 2017, 39(1): 1-8. (YANG Zhanwu. Research on the snow-making for Beijing 2022 Winter Olympics and Winter Paralympics[J]. China Winter Sports, 2017, 39(1): 1-8.)

[3] 孙天慧, 贾红星, 王贺, 等. 国家高山滑雪中心造雪工艺系统设计[J]. 暖通空调, 2022, 52(6): 77-81, 76. (SUN Tianhui, JIA Hongxing, WANG He, et al. Snow-making system design for National Alpine Skiing Center[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(6): 77-81, 76.)

[4] 赵巍, 汪惠荣, 张华, 等. 内混式造雪机雪晶粒径分布实验研究[J]. 制冷学报, 2023, 44(6): 125-130, 166. (ZHAO Wei, WANG Huirong, ZHANG Hua, et al. Experimental study on distribution of snow grain size for internal mixing snow makers[J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(6): 125-130, 166.)

[5] 郝亚辉, 吴海峰, 张博文, 等. 室外造雪机用核子器雾化性能规律实验研究[J]. 制冷学报, 2023, 44(1): 88-93. (HAO Yahui, WU Haifeng, ZHANG Bowen, et al. Experimental study on atomizing performance of nucleator nozzle for outdoor snow makers[J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(1): 88-93.)

[6] 陈爱强, 刘斌, 李斌, 等. 人工造雪水滴蒸发冷却过程分析[J]. 制冷技术, 2020, 40(3): 13-17, 63. (CHEN Aiqiang, LIU Bin, LI Bin, et al. Analysis of evaporative cooling process of water droplet for artificial snowmaking[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(3): 13-17, 63.)

[7] 刘道平, 郭志敏, 华泽钊. 雪晶形成过程与人工造雪机技术[J]. 制冷与空调(北京), 2003, 3(2): 1-5. (LIU Daoping, WU Zhimin, HUA Zezhao. Snow crystal formation process and artificial snow making technologies[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2003, 3(2): 1-5.)

[8] 王潇楠, 齐鹏, 于聪伟, 等. 农药雾滴雾化沉积飘失研究进展[J]. 农药学报, 2022, 24(5): 1065-1079. (WANG Xiaonan, QI Peng, YU Congwei, et al. Research and development of atomization, deposition and drift of pesticide droplets[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2022, 24(5): 1065-1079.)

[9] 刘国强, 熊通, 晏刚, 等. 人工造雪技术现状与研究进展[J]. 制冷学报, 2021, 42(5): 1-16. (LIU Guoqiang, XIONG Tong, YAN Gang, et al. Current technology situation and research progress of artificial snowmaking[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(5): 1-16.)

[10] SUN C, NING Z, QIAO X, et al. Measurements of internal flow regime and bubble size in effervescent nozzle[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 98:604-620.

[11] 孙元, 王凤辉, 李楚桥, 等. 碰撞和孔径对喷嘴喷雾特性影响的试验研究[J]. 汽车实用技术, 2018(5): 134-135. (SUN Yuan, WANG Fenghui, LI Chuqiao, et al. Experimental study on impact of collision and nozzle diameter on spray characteristics[J]. Automobile Applied Technology, 2018(5): 134-135.)

[12] 陈有锦, 袁锐波, 张剑, 等. 空气雾化喷嘴内流场的特

性分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(2): 298-306. (CHEN Youjin, YUAN Ruibo, ZHANG Jian, et al. Characteristic analysis of flow field in an air atomizing nozzle[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(2): 298-306.)

[13] 曹建明, 卢林春, 李跟宝, 等. 粘性和空气助力作用对液体碎裂过程的影响[J]. 中国西部科技, 2011, 10(31): 1-3. (CAO Jianming, LU Linchun, LI Genbao, et al. The effect of viscosity and air assistant on liquid breakup process[J]. Science and Technology of West China, 2011, 10(31): 1-3.)

[14] ZAREMBA M, WEIB L, MALÝ M, et al. Low-pressure twin-fluid atomization: Effect of mixing process on spray formation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 89: 277-289.

[15] 卢立新, 董玉杰, 潘嘹, 等. 屋顶纸盒灌装机包装材料灭菌模拟模型[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 285-294. (LU Lixin, DONG Yujie, PAN Liao, et al. Simulation model for the packaging material sterilization of gable-top carton filling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(14): 285-294.)

[16] 刘联胜, 杨华, 吴晋湘, 等. 环状出口气泡雾化喷嘴液膜破碎过程与喷雾特性[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(2): 121-125. (LIU Liansheng, YANG Hua, WU Jinxiang, et al. Studies on breakup of liquid-sheet and spray characteristics downstream of the annular-spout effervescent atomizer[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(2): 121-125.)

[17] LIU Bin, HU Hengxiang, BI Lisen, et al. Analysis of the characteristics of the gas-liquid mixed artificial snow-making[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 149: 155-167.

[18] JIANG Lulin, AGRAWAL A K. Spray features in the near field of a flow-blurring injector investigated by high-speed visualization and time-resolved PIV[J]. Experiments in Fluids, 2015, 56(5): 103.

[19] BOGGAVARAPU P, RAMESH S P, AVULAPATI M M, et al. Secondary breakup of water and surrogate fuels: breakup modes and resultant droplet sizes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, 145: 103816.

[20] HAMMAD F A, SUN Kai, CHE Zhizhao, et al. Internal two-phase flow and spray characteristics of outside-in-liquid twin-fluid atomizers[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 187: 116555.

通信作者简介

吴海峰, 男, 博士, 副教授, 北京建筑大学环境与能源工程学院, 18810906815, E-mail: wuhaifeng@bucea.edu.cn. 研究方向: 雾化技术、制冷和光伏建筑一体化等。

About the corresponding author

Wu Haifeng, male, Ph. D., associate professor, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 86-18810906815, E-mail: wuhaifeng@bucea.edu.cn. Research fields: atomization technology, refrigeration and building integrated photovoltaics, et al.