

旋流槽几何参数对喷嘴雾化性能的影响

程永霖, 赵 军*

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2025年6月12日; 录用日期: 2025年6月24日; 发布日期: 2025年8月29日

摘 要

旋流喷嘴的雾化性能高度依赖于内部旋流槽的几何设计。本文基于VOF多相流模型, 构建了旋流喷嘴的三维数值模型, 通过对比六组不同结构组合的工况, 系统模拟并分析了雾化角、液膜厚度及旋流强度的变化规律。结果表明, 槽宽是影响雾化性能的关键参数, 增大槽宽能够显著扩大喷雾角度并减小液膜厚度, 槽厚主要起辅助调节作用, 其效应在旋涡充分发展时尤为显著。此外, 三项性能参数之间存在紧密的耦合关联, 旋流强度的增强通常伴随着雾化角的增大与液膜厚度的减小, 呈现出协同变化的趋势。研究结果可为旋流喷嘴的结构优化提供理论依据, 同时证实了VOF模型适用于不依赖颗粒追踪的液相雾化行为分析。

关键词

旋流喷嘴, VOF模型, 雾化角, 液膜厚度, 旋流强度

Influence of Swirl Chamber Geometric Parameters on Nozzle Atomization Performance

Yonglin Cheng, Jun Zhao*

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 12th, 2025; accepted: Jun. 24th, 2025; published: Aug. 29th, 2025

Abstract

The atomization performance of a swirl nozzle is highly dependent on the geometric design of its internal swirl grooves. In this study, a three-dimensional numerical model of a swirl nozzle was

*通讯作者。

文章引用: 程永霖, 赵军. 旋流槽几何参数对喷嘴雾化性能的影响[J]. 流体动力学, 2025, 13(3): 127-135.
DOI: 10.12677/ijfd.2025.133012

developed based on the Volume of Fluid (VOF) multiphase flow model. By comparing six different structural configurations, the variations in spray cone angle, liquid film thickness, and swirl intensity were systematically simulated and analyzed. The results show that the groove width is a key parameter influencing atomization performance; increasing the groove width significantly enlarges the spray angle and reduces the liquid film thickness. Groove thickness primarily serves as an auxiliary tuning factor, with its effect becoming more pronounced when the vortex is fully developed. Moreover, a strong coupling relationship was observed among the three performance indicators: enhanced swirl intensity is generally accompanied by an increased spray angle and decreased liquid film thickness, indicating a synergistic variation trend. The findings offer a theoretical foundation for the structural optimization of swirl nozzles and validate the use of the VOF model in analyzing liquid-phase atomization processes without dependence on particle-tracking methods.

Keywords

Swirl Nozzle, VOF Model, Spray Cone Angle, Liquid Film Thickness, Swirl Intensity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

旋流喷嘴是一种常见的喷雾装置, 广泛应用于工业冷却、农业灌溉、环境调控及人工造雪等领域。其工作原理基于切向入流液体在旋流槽内获得角动量, 形成高速旋转液膜, 在离心力作用下实现雾化[1]。相比传统的压力喷嘴或气液混合喷嘴, 旋流喷嘴结构简单, 适用范围广, 且不需要压缩空气, 特别适合单液体喷雾, 因此在实际工程中具有重要价值。

喷嘴的结构参数直接影响其雾化效果, 像雾化锥角、液膜厚度、液滴大小等指标, 都决定了喷雾的覆盖范围和均匀性。旋流槽作为喷嘴内部液体旋转的关键部件, 其几何尺寸会影响液体的旋转速度和强度, 进而影响液膜的形成和破碎。然而, 针对旋流槽关键几何参数(如槽宽、槽厚)如何调控内部旋流特性及雾化过程的系统性数值研究仍相对匮乏。

针对旋流喷嘴的研究, Jeng [2]通过实验发现, 喷嘴内部的液体流动方向与气流一致, 但在旋流区域存在回流现象, 这与旋流室的几何结构直接相关。Lee 等[3]使用透明喷嘴研究了柴油和煤油的雾化特性, 重点分析了雾化锥角、液滴直径(SMD)和空气锥长度等参数。VOF 方法能较准确地捕捉液膜和界面形态, 在喷雾和液膜流动等方面应用广泛[4]。Chen 与 Tang [5]通过结合高频成像实验与 VOF 仿真, 细致揭示了液膜破碎各阶段的界面演化过程, 进一步丰富了雾化机理的研究手段。王成军[6]等应用 VOF 模型分析了液体入口压力对雾化性能的影响, 结果显示, 液体入口压力对雾化锥角变化的影响较小。Botond 等[7]则采用 VOF-to-DPM 模型, 预测了喷嘴出口平面处液滴的平均粒径和速度分布, 进一步验证了数值模拟的准确性。此外, Lam Vu 等[8]采用高保真多尺度数值模拟方法, 对空气辅助雾化过程中的液滴尺寸预测进行了验证, 并揭示了模拟模型对液滴形成机制的良好捕捉能力, Xie Yao 等[9]在 LES-VOF 框架下, 系统探讨了旋流腔结构参数对雾化角与液滴分布的影响, 揭示了结构几何对微观雾化过程的调控作用。对于初级雾化过程的模拟, 比如液膜形成、扩展及喷雾锥角演变时, VOF 方法已被证明是有效的工具[10]。

基于这些背景, 本文以典型旋流喷嘴为对象, 固定喷嘴出口直径, 通过数值模拟对不同旋流槽宽度和厚度组合下的喷雾性能进行研究。共设计 6 组结构工况, 提取雾化角、液膜厚度和旋流强度等数据,

分析结构参数对雾化性能的影响。研究结果不仅有助于旋流喷嘴的结构优化，也丰富了 VOF 方法在喷雾模拟中的应用。

2. 喷嘴结构建模与网格划分

2.1. 喷嘴结构设计

本文研究对象为简化型三维旋流喷嘴结构，使用 SolidWorks 建模软件绘制喷嘴流体域。其中旋流槽数量为三道，均匀分布于旋流腔周围，液体自切向通道进入后获得初始旋转动量，沿腔体内部形成旋转液膜，最终从喷嘴出口喷出并完成雾化过程。

为分析结构参数对雾化性能的影响，本文采用控制变量法，仅改变旋流槽的槽宽 b 和槽厚 h 两个参数。其中槽宽设置为 1.5 mm、1.75 mm 和 2.0 mm，槽厚设置为 0.75 mm 和 1.0 mm，喷嘴出口直径统一为 1.70 mm，共构建 6 组工况，具体结构参数如表 1 所示，其余结构保持不变。

Table 1. Nozzle structural parameters under different working conditions

表 1. 不同工况下喷嘴结构参数设置

工况编号	槽宽 b/mm	槽厚 h/mm	出口直径 d/mm
1	1.50	0.75	1.70
2	1.50	1.00	1.70
3	1.75	0.75	1.70
4	1.75	1.00	1.70
5	2.00	0.75	1.70
6	2.00	1.00	1.70

2.2. 网格划分

采用 Mesh 模块生成四面体网格对流体域进行网格划分，为精确捕捉喷嘴出口区域的相界面演变及速度梯度分布，对喷嘴出口区域进行局部网格加密处理，该局部加密策略有效提升了界面追踪精度与速度梯度分辨率，有助于后处理过程中水相分布与速度场信息的精确提取。图 1 展示了喷嘴整体网格结构及出口加密区域的细节。

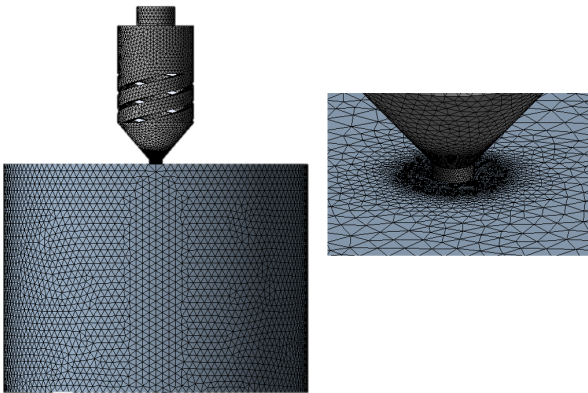


Figure 1. Overall mesh structure of the nozzle and locally refined region near the outlet

图 1. 喷嘴整体网格结构及出口处加密区域

2.3. 数学模型

为精确模拟旋流喷嘴内液膜形成及雾化过程, 本研究采用 ANSYS Fluent 平台开展三维瞬态数值模拟, 计算基于 VOF 多相流模型实现气液界面的追踪。该模型通过求解体积分数输运方程, 专用于模拟互不相溶的两相流系统, 能够准确表征自由界面处的运动和变形, 可有效模拟旋流喷嘴内液体在气相环境中的破碎及扩展过程。

整个计算域中采用共享的动量方程与质量守恒方程, 同时引入体积分数方程用于气液界面追踪, 其基本控制方程如下:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_m \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

体积分数方程:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) \right] = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3)$$

式中, $\dot{m}_{pq}$ 为从 p 相到 q 相的传质量; $\dot{m}_{qp}$ 为从 q 相到 p 相的传质量。

2.4. 边界条件与工况设置

旋流喷嘴的仿真采用瞬态求解方式, 工作介质为水和空气。入口设置为压力入口, 压力为 1.0 MPa, 出口设置为压力出口, 压力为 0 Pa, 初始计算域充满空气, 液体从入口注入。所有壁面设置为无滑移边界, 表面张力系数的选取参考了魏生贤等[11]建立的水的表面张力系数与温度之间的非线性二次拟合关系式, 在本研究设定的 26℃ 条件下计算结果为 0.07179 N/m, 鉴于该数值与常用标准值 0.072 N/m 极为接近, 本文最终采用 0.072 N/m 作为表面张力系数, 用以近似表征常温环境中水的表面张力, 保证模拟参数的合理性, 重力系数为 9.81 m/s², 不考虑传热影响。湍流模型选用 Realizable k-e 模型, 空间离散梯度选择 Least Squares Cell Based, 使用 COUPLE 算法进行求解, 压力格式选择 PRESTO!, 体积分数项采用 Geo-Reconstruct 格式进行离散。

本研究主要关注旋流喷嘴内液体在旋流作用下形成液膜并向外扩展的过程, 采用 VOF 模型追踪气液界面形态变化。在模拟设置中, 并未单独考虑气相湍流对液膜扰动和破碎过程的影响, 主要是因为液体以高压注入, 初期雾化行为主要由液体自身的动量主导。同时, 本文的重点在于比较不同结构参数对雾化角、液膜厚度等宏观指标的变化趋势, 因此该简化处理在当前研究目标下是可以接受的。

3. 仿真结果与雾化性能分析

3.1. 雾化角测量与对比

雾化角是表征喷嘴雾化覆盖范围与雾化能力的关键参数, 定义为液膜离开喷嘴出口后, 其外缘轮廓线在两侧边界之间形成的夹角。较大的雾化角通常对应更强的旋流强度与更优的雾化扩展性能。本研究基于 VOF 模型的模拟结果, 通过提取水相体积分数分布图中 $\alpha = 0.5$ 的等值线作为雾化锥角边界轮廓线, 测量其与喷嘴中心轴线的夹角, 从而确定各组结构参数下的雾化角值。在 VOF 方法中, 网格单元的体积

分数 α 表征单元内液体所占比例， $\alpha = 1$ 表示完全为水， $\alpha = 0$ 表示完全为空气。因此， $\alpha = 0.5$ 的等值线近似代表气液界面过渡带的中心位置，具有良好的代表性。

图 2 展示了工况 1 下 $\alpha = 0.5$ 的水相体积分数云图，图中可观察到液膜从出口处迅速扩展，形成近似对称的锥形喷雾结构。

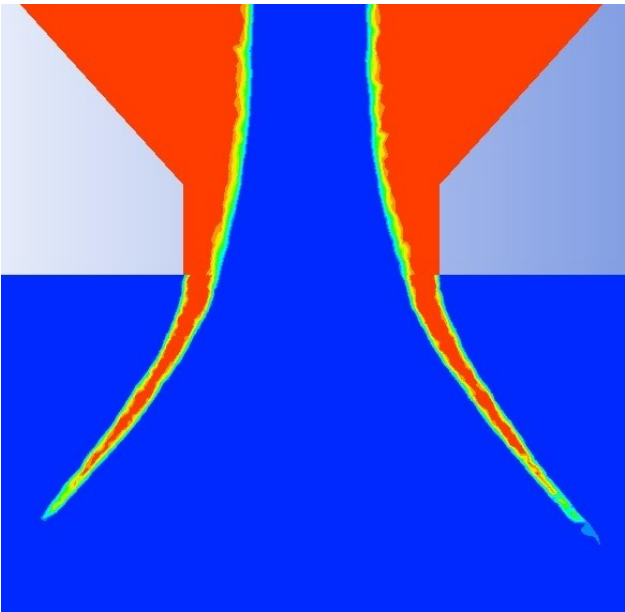


Figure 2. Volume fraction contour of the water phase at $\alpha = 0.5$
图 2. $\alpha = 0.5$ 的水相体积分数云图

为系统评估结构参数对雾化角的影响，测量所有 6 组结构参数下的雾化角值，结果如表 2 所示。

Table 2. Comparison results of spray cone angle
表 2. 雾化角对比结果

工况编号	槽宽 b/mm	槽厚 h/mm	雾化角(°)
1	1.50	0.75	76.90
2	1.50	1.00	80.87
3	1.75	0.75	79.88
4	1.75	1.00	82.37
5	2.00	0.75	80.10
6	2.00	1.00	84.67

从表 2 可见，雾化角整体随旋流槽宽度和厚度的增加而呈上升趋势。当槽宽从 1.50 mm 增至 2.00 mm 的过程中，雾化角显著提升，表明增大槽宽有效增强了液体的切向速度分量，促进液膜在出口处以更大角度径向扩展，同时，固定槽宽条件下，增大槽厚(由 0.75 mm 至 1.00 mm)亦普遍提升了雾化角，这主要归因于进液通道截面积增大导致的流量增加。

图 3 展示了雾化角随槽宽变化的变化趋势。可以看出，在相同槽厚条件下，槽宽越大，雾化角越大，

趋势清晰；同时，在相同槽宽下，槽厚增加同样带来雾化角的增長，说明槽宽与槽厚对雾化性能存在一定的耦合作用。

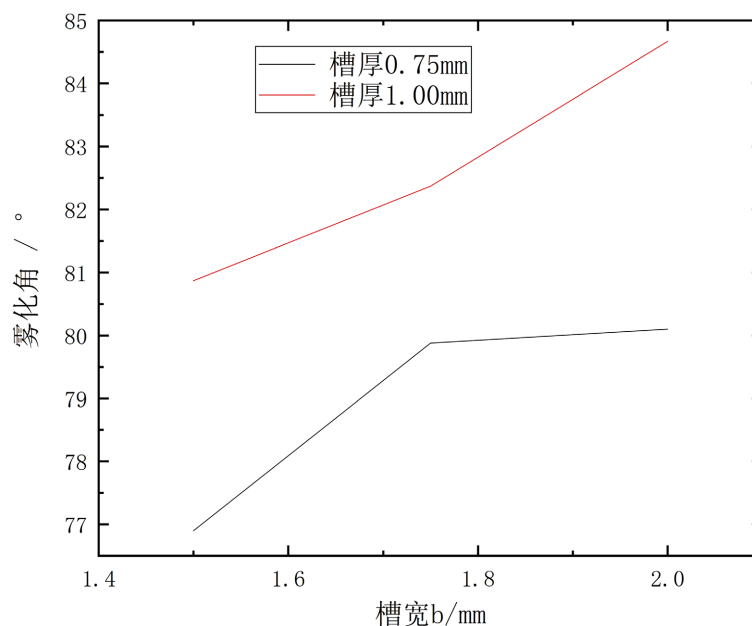


Figure 3. Variation trend of spray cone angle

图 3. 雾化角变化趋势

综上，旋流槽结构参数对雾化角具有显著调控作用，其中槽宽为主导因素。槽宽增大有效强化了液体切向速度和旋转动量，促使液膜在出口处以更大角度扩展，进而显著增大雾化角。相比之下，槽厚主要改变进液通道截面积以调控流量，对旋流强度的提升作用有限，故其增大对雾化角的提升幅度较小，属辅助调节参数。机理分析与仿真结果均表明，槽宽对雾化角的贡献最为突出，应作为旋流喷嘴结构优化设计的首要控制变量。

3.2. 液膜厚度分析

液膜厚度是衡量旋流喷嘴雾化性能的关键局部参数，其定量表征了切向旋流作用下喷嘴出口处旋转液膜的几何特征。研究表明，较薄的液膜在气相剪切作用下更易诱发流动失稳并发生破碎，从而显著促进液滴细化与雾化效率提升。

在本研究中，采用 VOF 模型模拟结果中水相体积分数 $\alpha = 0.5$ 的等值线作为气液界面近似边界，于喷嘴出口下游 0.5 mm 处的 YZ 对称平面上提取径向两侧界面坐标，计算两侧界面间距作为液膜厚度的近似值。每组工况设置多个等间距测点，取其平均值作为对应结构参数下的代表性膜厚值。

表 3 列出了不同结构参数组合下的液膜厚度数据，其变化趋势如图 4 所示。

从数据可见，液膜厚度整体随槽宽 b 的增加而显著减小。在槽厚相同条件下，槽宽由 1.50 mm 增至 2.00 mm，液膜厚度从约 0.25 mm 降至 0.21 mm，表明更宽的切向通道可增强液体的旋转动量，使液体更强烈地向径向扩展，液膜被进一步拉薄。此外，槽厚 h 的增加同样表现出液膜厚度减小趋势。例如，在槽宽为 2.00 mm 时，槽厚由 0.75 mm 增至 1.00 mm，液膜厚度由 0.225 mm 降至 0.210 mm，减薄效果显著(约 6.3%)，而当槽宽为 1.50 mm 时，槽厚增加引起的膜厚变化相对有限(约 3.2%)，这表明槽厚对液膜减薄的促进作用只有在旋涡充分发展的条件下更为显著。

Table 3. Comparison of liquid film thickness
表 3. 液膜厚度对比

工况编号	槽宽 b/mm	槽厚 h/mm	液膜厚度/mm
1	1.50	0.75	0.253
2	1.50	1.00	0.245
3	1.75	0.75	0.251
4	1.75	1.00	0.213
5	2.00	0.75	0.225
6	2.00	1.00	0.210

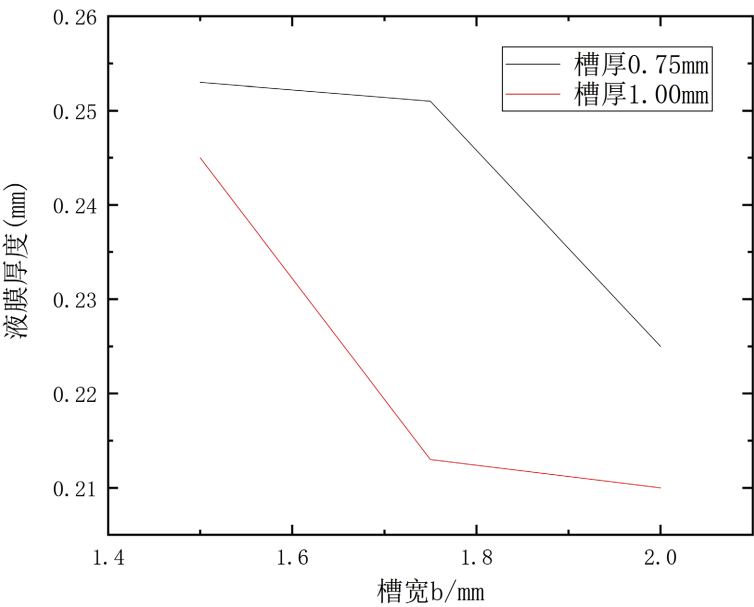


Figure 4. Variation trend of liquid film thickness
图 4. 液膜厚度变化趋势

整体来看，槽宽是影响液膜厚度的主导几何参数，其变化趋势与雾化角变化基本一致。较大的槽宽与适度的槽厚可共同促使液膜展平与薄化，有利于后续液膜破碎与雾化过程的进行。因此，在旋流喷嘴结构优化设计中，应在提升雾化角的同时兼顾减薄液膜，以实现高效、稳定的雾化性能。

3.3. 旋流强度分析

旋流强度是量化评估旋流喷嘴内部流动结构特征及雾化能力的关键参量。在切向进液驱动下，喷嘴内部液体形成强旋流场，其强度直接调控液膜在出口处的径向扩展程度，并显著影响雾化锥角与液膜厚度等宏观雾化性能。

为分析旋流结构特征，本文选取喷嘴出口下游 0.1 mm 处的 YZ 平面作为测量截面，提取液体区域内的轴向速度和切向速度。轴向速度 V_z 取 Fluent 中的 Velocity-Z 分量，表示液体沿喷嘴主轴方向(Z 轴)喷射的速度；切向速度 V_θ 表示液体绕喷嘴轴线旋转的速度分量，由 Velocity-X 和 Velocity-Y 通过如下柱坐标变换公式定义：

$$V_{\theta} = \frac{-y \cdot V_x + x \cdot V_y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (4)$$

其中 x, y 为网格中心坐标, V_x, V_y 为相应笛卡尔速度分量。通过 Fluent 中的自定义场函数功能, V_{θ} 与 V_z 在液体体积分数 $\alpha \geq 0.5$ 的液体区域内进行面积加权平均计算, 进而定义旋流强度指标为:

$$S = \frac{V_{\theta}}{V_z} \quad (5)$$

图 5 展示了不同结构参数组合下旋流强度的柱状对比。从图中可以看出, 固定槽宽时, 槽厚由 0.75 mm 增至 1.00 mm 可显著提升旋流强度。例如, 当槽宽为 1.50 mm 时, 旋流强度由 0.525 升至 0.573, 增幅达 9.1%。这表明增大槽厚直接扩大了进液通道截面积, 流量增加, 切向动量输入更多, 旋涡得以更充分发展。相比之下, 槽宽对旋流强度的调控作用较弱。在槽厚为 0.75 mm 时, 槽宽从 1.50 mm 增至 2.00 mm, 旋流强度基本稳定在 0.52 附近(波动 < 1.5%), 表明在当前参数范围内, 槽宽对旋流强度的提升效应趋于饱和。整体来看, 所有工况下旋流强度均维持在 0.52 至 0.57 之间, 处于中等旋流强度范围, 能够为液膜的扩展和雾化过程提供稳定的旋涡条件。

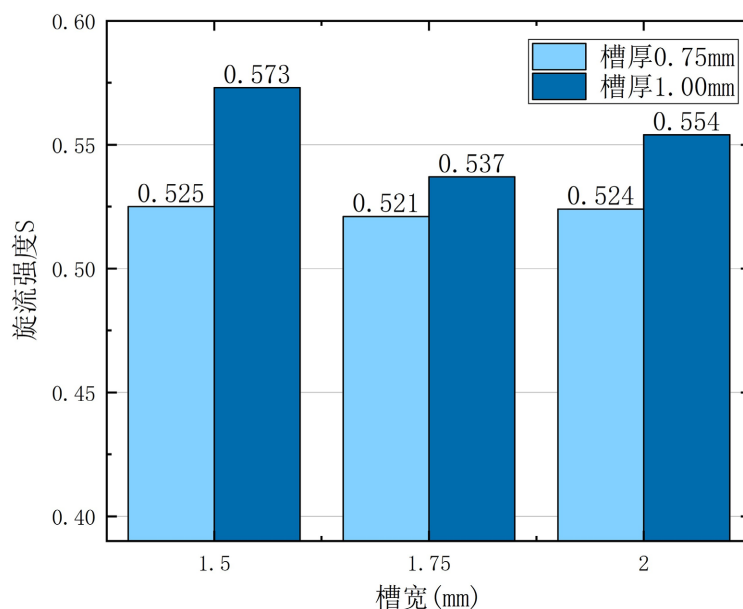


Figure 5. Bar chart comparing swirl intensity under different structural parameters

图 5. 不同结构参数下旋流强度的柱状对比图

进一步分析表明, 旋流强度作为喷嘴内部流动结构的核心控制参数, 对液膜形态与雾化性能具有显著影响。其提升意味着液体获得更大的切向速度分量, 在离心力作用下更易向径向扩展, 推动形成更大的雾化锥角。同时, 强旋流对液膜具有拉伸效应, 使其厚度减小, 薄膜更易受到气相扰动和剪切作用, 从而加速破碎过程。由此可见, 旋流强度的增强不仅提升了液膜的扩展能力, 也提高了其对外界扰动的敏感性, 体现为雾化角增大与液膜厚度减小的协同演化。三项性能指标之间存在明显的耦合关系, 反映了旋流槽结构通过调控流动结构影响喷雾性能的多层次机制。

4. 结论

本文基于 VOF 多相流模型, 采用三维瞬态数值模拟方法, 系统研究了旋流喷嘴中旋流槽结构参数(槽

宽与槽厚)对雾化性能的影响规律, 提取并分析了雾化角、液膜厚度和旋流强度三项关键指标, 主要结论如下:

(1) 旋流槽宽度是影响喷嘴雾化性能的主导结构参数。随着槽宽由 1.50 mm 增至 2.00 mm, 雾化角明显增大、液膜厚度显著减小, 这表明增大槽宽有效增强了液体转动动量输入, 显著促进液膜径向扩展并降低其稳定性。

(2) 旋流槽厚度对雾化性能具有一定辅助增强作用。在槽宽相同的情况下, 增大槽厚(由 0.75 mm 至 1.00 mm)可提升旋流强度并促使液膜进一步减薄, 表明较大的槽厚有利于提升进液流量, 改善了旋涡发展程度。

(3) 旋流强度、雾化角与液膜厚度三者之间呈现明确的耦合关系。旋流强度的提高不仅推动雾化角的增大, 同时也伴随液膜厚度的减小, 三项指标整体表现出协同演化趋势, 揭示了旋流槽几何参数通过调控旋流强度影响宏观雾化性能的内在关联。

(4) 在本研究的结构参数范围内, 槽宽为 2.00 mm、槽厚为 1.00 mm 的组合表现出最佳雾化性能。该参数组合实现了最大的雾化角(84.67°)、最薄的液膜厚度(0.210 mm)及较高的旋流强度(0.573), 展现出最优的喷雾扩展性和液膜破碎潜力, 是旋流喷嘴性能优化的推荐方案。

参考文献

- [1] 陈斌, 郭烈锦, 张西民, 等. 喷嘴雾化特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2001(2): 237-240.
- [2] Jeng, S.M., Jog, M.A. and Benjamin, M.A. (1998) Computational and Experimental Study of Liquid Sheet Emanating from Simplex Fuel Nozzle. *AIAA Journal*, **36**, 201-207. <https://doi.org/10.2514/2.7502>
- [3] Lee, E.J., Oh, S.Y., Kim, H.Y., James, S.C. and Yoon, S.S. (2010) Measuring Air Core Characteristics of a Pressure-Swirl Atomizer via a Transparent Acrylic Nozzle at Various Reynolds Numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **34**, 1475-1483. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.07.010>
- [4] 闫文标. 基于 FLUENT 三种多相流模型的选择及应用说明[J]. 云南化工, 2020, 47(4): 43-44.
- [5] Chen, C. and Tang, Z. (2020) Investigation of the Spray Formation and Breakup Process in an Open-End Swirl Injector. *Science Progress*, **103**. <https://doi.org/10.1177/0036850420946168>
- [6] 王成军, 陈海耿, 马金凤. 基于 VOF 方法数值模拟离心式喷嘴内两相流流动[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(7): 1005-1008.
- [7] Pál, B., Roekaerts, D. and Zandbergen, B. (2021) Numerical Investigation of Atomisation Using a Hybrid Eulerian-Lagrangian Solver. *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, **21**, 327-342. <https://doi.org/10.1504/pcfd.2021.119266>
- [8] Vu, L., Han, A., Machicoane, N. and Desjardins, O. (2022) High-Fidelity Multi-Scale Simulation of Air-Blast Atomization with Drop Size Comparison against Experiments. *Proceedings of the 32nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS-Americas)*, Madison, 22-25 May 2022. <https://hal.science/hal-03761755>
- [9] Xie, Y., Ye, Y., Yu, H., Cheng, W., Xie, S. and Zhao, J. (2023) Influence Law of Structural Parameters of Pressure-Swirl Nozzle on Atomization Effect Based on Multiscale Model. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 60129-60149. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26711-0>
- [10] 张永良, 王宝瑞, 孔文俊, 等. 离心喷嘴实验与流场结构的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(4): 760-764.
- [11] 魏生贤, 胡粉娥, 时有明. 水的表面张力系数与温度的新关系式研究[J]. 曲靖师范学院学报, 2015, 34(3): 11-15, 22.