

# 离心喷嘴设计和结构参数对喷嘴性能的影响研究

周薛豹, 赵军\*, 孙娜

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年12月26日; 录用日期: 2022年12月30日; 发布日期: 2023年3月9日

## 摘要

为明确喷嘴的设计方法和喷嘴结构对喷嘴性能的影响规律, 本文对喷嘴的设计方法进行了梳理验证并研究了旋流半径比、旋流室倾角和喷孔长径比对喷嘴性能的影响规律: 旋流半径比增大会使雾化角减小、流量增大; 旋流室倾角增大会使雾化角增大、流量减小; 喷孔长径比增大会使雾化角减小, 对流量影响不大; 喷孔长径比对雾化角影响最大, 旋流室倾角对流量影响最大。

## 关键词

离心喷嘴, 喷嘴设计, 数值模拟

## Study on the Influence of Centrifugal Nozzle Design and Structural Parameters on Nozzle Performance

Xuebao Zhou, Jun Zhao\*, Na Sun

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

Received: Dec. 26<sup>th</sup>, 2022; accepted: Dec. 30<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 9<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to clarify the design method of nozzle and the influence of nozzle junction structure on

\*通讯作者。

nozzle performance, this paper combs and verifies the design method of nozzle, and studies the influence of swirl radius ratio, cyclone chamber inclination angle and nozzle length-diameter ratio on nozzle performance: increasing the swirl radius ratio will reduce the atomization angle and increase the flow. Increasing the inclination angle of the swirl chamber will increase the atomization angle and reduce the flow rate. The increase of the length-to-diameter ratio of the nozzle will reduce the atomization angle and have little effect on the flow; the length-to-diameter ratio of the nozzle has the greatest influence on the atomization angle, and the inclination angle of the swirl chamber has the greatest influence on the flow rate.

## Keywords

Centrifugal Nozzle, Nozzle Design, Numerical Simulation

Copyright © 2023 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

雾化喷嘴在燃气轮机、燃烧器、消防、环境、农业等领域有着广泛的应用,可分为机械雾化喷嘴和介质雾化喷嘴两类,机械雾化喷嘴通过压差力和离心力实现液体雾化,结构相对简单,雾化效果相对较差,适用于低粘度液体,介质雾化喷嘴通过高速气体介质实现液体雾化,结构相对复杂,雾化效果好,适用于高粘度液体。

其中机械雾化喷嘴又可分为射流式、离心式和螺旋式,离心式喷嘴根据其内部有无旋流件又可分为有旋流件和无旋流件两种情况,旋流件可以强化喷嘴内部流体的旋转强度进而提升雾化效果,但结构上也会更加复杂。

液体在喷嘴内部的流动及气液之间的相互作用很是复杂,不同类型的喷嘴其雾化机理不同,大体上可分为经典式和瞬发式两类[1],但目前尚未有一种令人完全信服并经得住检验的雾化机理[2]。

喷嘴的设计方法相关资料很少且不够详细,常见的有最大流量原理法、当量几何特性法和经验关系图线法等[3],目前有关喷嘴的研究大多针对某款现有的喷嘴进行分析[4] [5] [6],而喷嘴的设计研究很少,本文以简单离心式雾化喷嘴为例(无旋流件),通过上述喷嘴设计方法设计一款简单离心雾化喷嘴,并借助CFD工具探究喷嘴结构参数对雾化性能的影响规律。

## 2. 喷嘴结构与性能表征

### 2.1. 结构设计

简单离心式雾化喷嘴结构参数主要有进口倾角、进口数量、进口槽宽度、旋流室半径、旋流室倾角、喷孔半径、喷孔长度等,相关几何参数示意图如图1所示。

常见的设计方法有最大流量原理法和当量几何特性法,但相关参数释义不完整,设计过程逻辑也不够清晰,这里对这两种设计方法具体设计过程进行梳理归纳。

最大流量原理法由原苏联学者阿勃拉莫维奇提出,该方法假设流动是对称的,略去了径向速度,未考虑液体粘性,该方法设计过程如下

工况: 质量流量  $q_m$  (kg/s)、压力  $P$  (表压 Pa)、密度  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ )。

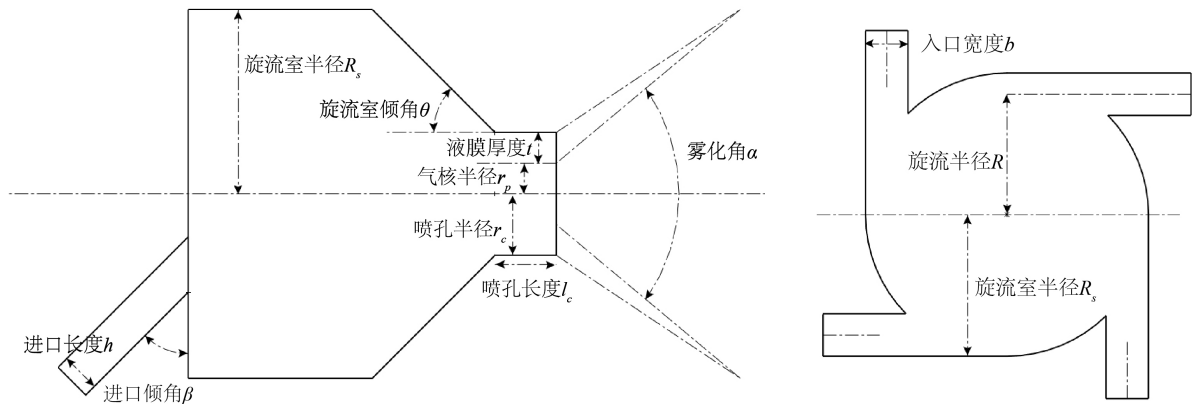


Figure 1. Schematic diagram of nozzle geometric parameters

图 1. 喷嘴几何参数示意图

有效截面系数  $\varphi$

$$\varphi = 1 - \frac{r_c^2}{r_p^2} \quad (1)$$

$r_c$ : 喷口半径,  $r_p$ : 气核半径。

理论几何特性数  $A$

$$A = \frac{\pi R r_c}{S} \quad (2)$$

$S$ : 进口槽总面积,  $R$ : 旋流半径。

1) 首先根据预期雾化角计算有效截面系数  $\varphi$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{(1-\varphi)\sqrt{8}}{(1+\sqrt{1-\varphi})\sqrt{\varphi}} \quad (3)$$

2) 根据有效截面系数  $\varphi$  计算流量系数  $\mu$

$$\mu = \sqrt{\frac{\varphi^3}{2-\varphi}} \quad (4)$$

3) 根据有效截面系数  $\varphi$  计算理论几何特性数

$$A = \frac{1-\varphi}{\sqrt{\varphi^3/2}} \quad (5)$$

有效截面系数、流量系数和雾化角与理论几何特性关系曲线如图 2 所示。

4) 根据工况计算喷孔半径  $r_c$  (mm)

$$r_c = \sqrt{\frac{q_m}{\pi\mu\sqrt{2\rho p}}} \times 1000 \quad (6)$$

5) 求单个进口槽长度  $h$  和宽度  $b$  (mm)

$$b = \sqrt{\frac{\pi R r_c}{neA}} \quad (7)$$

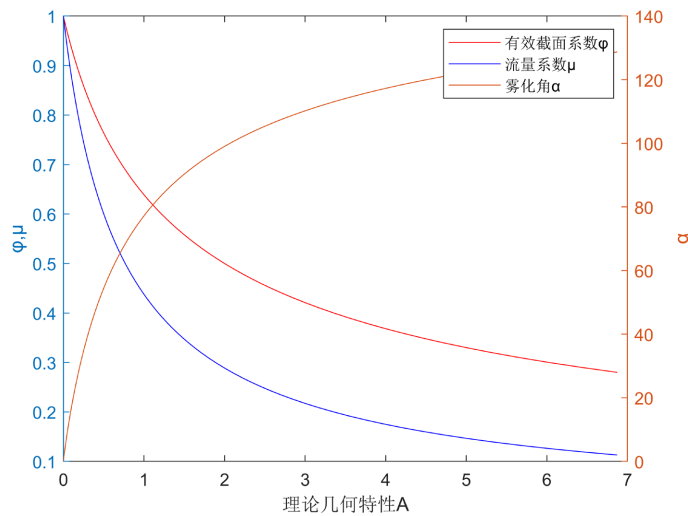


Figure 2. Theoretical geometric characteristic curve of nozzles  
图 2. 喷嘴理论几何特性曲线

$e$ : 进口槽长宽比,  $e = h/b$ ,  $e$  一般大于 1。

$n$ : 进口槽数量。

$R$ : 旋流半径,  $R = \lambda_r r_c$ ,  $\lambda_r$  一般取 2~6。

6) 计算旋流室半径  $R_s$  (mm)

$$R_s = R + 0.5b \quad (8)$$

至此, 喷嘴主要几何尺寸已经确定, 相关的理论推导过程可参考相关文献[7] [8]。该方法未考虑进口倾角  $\beta$ 、旋流室长度  $l_s$ 、旋流室倾角  $\theta$ 、旋流半径比  $\lambda_r$ 、喷孔长度  $l_c$  等几何参数的影响, 此外该方法因忽略径向速度和粘性使所预测的理论几何特性  $A$  偏低, 使得进口槽面积偏大, 进口速度偏小、雾化角偏小, 总之该方法预测精度较低, 不建议采用。

当量几何特性法在上述基础上考虑了粘性对喷嘴的影响, 此外还考虑了旋流室倾角  $\theta$ 、旋流半径比  $\lambda_r$  的影响, 设计过程如下:

工况: 质量流量  $q_m$  (kg/s)、压力  $P$  (表压 Pa)、密度  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)。

1) 首先根据预期雾化角查表获取当量几何特性参数  $Ae$  和流量系数  $\mu$

以旋流半径比  $\lambda_r = 3$ , 旋流室倾角  $\theta = 30^\circ$  为例, 根据表中数据对曲线进行拟合得  $Ae = f(\alpha)$  和  $\mu = f(Ae)$  曲线, 如图 3 所示。

经拟合得

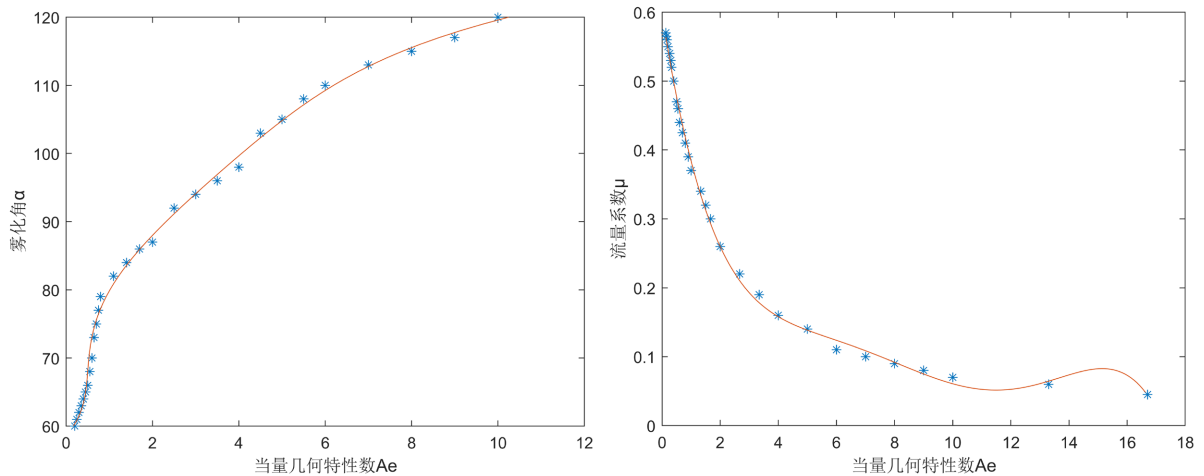
$$\begin{aligned} Ae &= 1.107 \times 10^{-7} \alpha^5 - 4.863 \times 10^{-5} \alpha^4 + 0.008446 \alpha^3 - 0.7221 \alpha^2 + 30.38 \alpha - 503.4 \\ \mu &= 1.107 \times 10^{-7} Ae^5 - 4.863 \times 10^{-5} Ae^4 + 0.008446 Ae^3 - 0.7221 Ae^2 + 30.38 Ae - 503.4 \end{aligned}$$

2) 根据工况计算喷孔半径  $r_c$  (mm)

$$r_c = \sqrt{\frac{q_m}{\pi \mu \sqrt{2 \rho p}}} \times 1000 \quad (9)$$

3) 求单个进口槽长度  $h$  和宽度  $b$  (mm)

$$b = \sqrt{\frac{\pi R r_c}{n e A e}} \quad (10)$$



**Figure 3.** Nozzle equivalent geometric characteristic curve  
**图 3.** 喷嘴当量几何特性曲线

$e$ : 进口槽长宽比,  $e = h/b$ ,  $e$  一般大于 1。

$n$ : 进口槽数量。

$R$ : 旋流半径,  $R = \lambda_r r_c$ ,  $\lambda_r$  一般取 2~6。

4) 计算旋流室半径  $R_s$  (mm)

$$R_s = R + 0.5b \quad (11)$$

该方法预测精度相对较高, 本文采用该设计方法, 设计一款基础喷嘴, 采用控制变量的思想, 在此基础喷嘴的基础上研究旋流半径  $R$ 、旋流室倾角  $\theta$ 、喷孔长度  $l_c$  对雾化性能的影响规律。

## 2.2. 性能表征

1) 压损  $\Delta P$

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (12)$$

$P_{in}$  为喷嘴入口压力,  $P_{out}$  为喷嘴出口压力。

喷嘴在常压下工作时入口压力(表压)即是喷嘴压损, 压损越大工作压力越大, 能耗也越大。

2) 流量数  $FN$

流量数定义式

$$FN = \frac{q_v}{\Delta P^{0.5}} \quad (13)$$

$q_v$ : 体积流量( $m^3/h$ )。

流量数表征了喷嘴的流通能力, 流量数越大, 单位压损流过的液体越多。

3) 雾化角  $\alpha$

用不同参数表征雾化角得到的经验公式不同, 里兹克(Rizk)和勒菲沃(Lefebvre)提出的雾化角经验公式如下[9]

$$\alpha = 6 \left( \frac{D_s d_o}{A_p} \right)^{0.15} \left( \frac{\Delta P_L d_o^2 P_L}{\mu_L^2} \right)^{0.11} \quad (14)$$

$D_s$ : 旋流室直径,  $d_o$ : 喷孔直径,  $A_p$ : 总进口面积,  $P_L$ : 液体压力,  $\mu_L$  液体动力粘度。

雾化角减小会削弱液膜与周围空气的相互作用, 使初始液膜厚度增加, 雾化效果变差。

#### 4) 粒径

颗粒粒径的表征常用的方法有直方图、累积分布、罗森-莱姆勒分布和索特尔平均直径(SMD)等, 这里采用最常用的索特尔平均直径进行粒径分析。

根据 SMD 直径的定义, 一群个数为  $N$  的液滴群, 将其看作一群个数为  $N_s$  平均直径为  $d_s$  的液滴群, 令假想液滴群的体积与表面积之比与真实液滴群的体积与表面积之比相等, 求出的  $d_s$  即为 SMD 直径

$$\frac{\frac{1}{6}\pi N_s d_s^3}{\pi N_s d_s^2} = \frac{\frac{1}{6}\pi \sum_{i=1}^N (d_i^3)}{\pi \sum_{i=1}^N (d_i^2)} \quad (15)$$

$$d_s = \frac{\sum_{i=1}^N (d_i^3)}{\sum_{i=1}^N (d_i^2)}$$

SMD 直径是应用最广的粒径表征方法, 尤其是在蒸发燃烧领域, 这里采用勒菲沃[10] (Lefebvre)提出的离心喷嘴的 SMD 经验公式

$$\text{SMD} = 4.52 \left( \frac{\sigma \mu_L^2}{\rho_A \Delta P_L^2} \right)^{0.25} \left( t \cos \frac{\alpha}{2} \right)^{0.25} + 0.39 \left( \frac{\sigma \rho_L}{\rho_A \Delta P_L} \right)^{0.25} \left( t \cos \frac{\alpha}{2} \right)^{0.7} \quad (16)$$

$t$  为喷嘴出口位置液膜厚度,  $\alpha$  为雾化角,  $\mu_L$  液体动力粘度,  $\Delta P_L$  液体喷嘴压损,  $\rho_L$  液体密度。该式描述了雾化喷嘴的结构特性和液体的物性参数对 SMD 的影响, 在不做液滴粒径实验测量的情况下, 根据喷嘴内部液体流动特性来预测雾化效果。

### 3. 数值计算

#### 3.1. 数学模型

结合实际工况, 对流动作以下简化: 1) 不可压缩; 2) 不考虑相间质量传递, 相关控制方程如下连续方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

多相流方程:

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

根据周建伟[11]的湍流模型仿真对比, 相比于 SST 和 RNG, RMS 湍流模型能更准确的预测喷口出口位置的气穴, 故本文选用 RMS 湍流模型。

#### 3.2. 几何模型与网格

采用上文当量几何特性法设计一款工质为水、流量 0.001、压力 0.2、90°雾化角的离心喷嘴, 几何模

型如图 4 所示

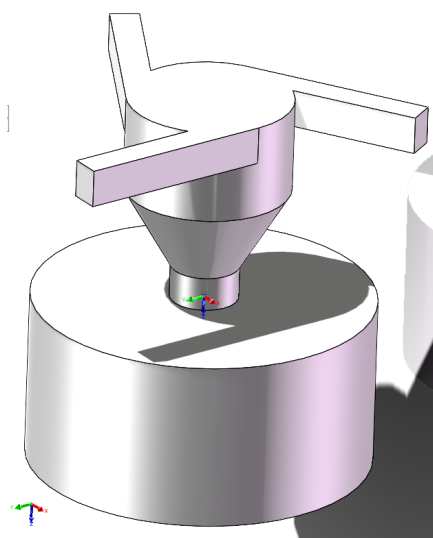


Figure 4. Nozzle geometry

图 4. 喷嘴几何模型

采用 Fluent Meshing 划分网格, 最大网格歪斜率小于 0.6, 对液膜位置做了局部加密, 如图 5 所示对网格无关性进行验证, 网格数量为 90 万时所监测的物理量已无太大变化, 故取 90 万网格数量对应的网格尺寸。

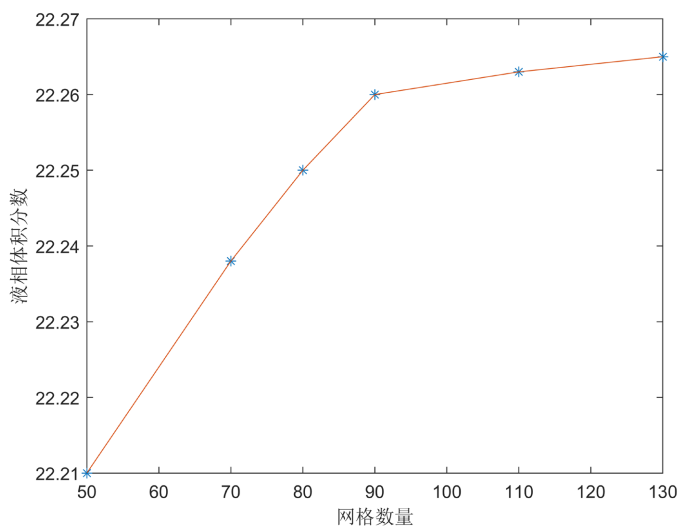


Figure 5. Mesh independence verification

图 5. 网格无关性验证

### 3.3. 工况与边界条件

工况: 所有案例采用相同工况, 流量  $0.001 \text{ kg/s}$ , 压力  $0.2 \text{ MPa}$ , 密度  $998.2 \text{ kg/m}^3$ , 动力粘度  $0.001003 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

多相流模型: VOF, 稳态, Implicit, Compressive。

进口边界: 压力进口, 0.2 MPa。

出口边界: 压力出口, 0 MPa。

### 3.4. 试验设计

Minitab 能够生成所有变量组合的曲面图, 在其它变量不变的情况下, 使用  $x$  和  $y$  变量拟合响应变量 ( $z$ ), 并且能够绘制出平滑曲面, 曲面图能够直观的显示响应变量与两个变量的相关程度。本文在基础几何模型的基础上, 用 Minitab 对目标参数进行相应曲面分析, 采用 Box-Behnken 方法设计实验来研究旋流半径、旋流室倾角、喷孔长度对雾化角和流量的影响, 试验因素和水平如表 1 所示, 实验设计和结果如表 2、表 3 所示

**Table 1.** Table of factors and levels

**表 1.** 因素与水平表

因素名称	旋流半径比	旋流室倾角	喷孔长径比
水平 1	2	30	0.5
水平 2	3	45	1
水平 3	4	60	1.5

## 4. 结果分析

胡旭财[8]采用 VOF 方法对工况参数和结构参数对离心喷嘴雾化性能的影响进行了分析, 并对仿真和试验进行了对标, 雾化角的仿真结果和试验结果误差小于 5%, 误差值较小, 表面 VOF 在离心喷嘴仿真上满足误差要求, 本文亦采用 VOF 对离心喷嘴进行研究, 故认为仿真结果满足误差要求。

离心喷嘴主要在压力的驱动下使液体在喷嘴内部获得较大速度并旋转运动, 为便于下文分析描述定义旋流强度  $I = \frac{v}{w}$ , 其中  $v$  为切向速度,  $w$  为轴向速度, 用旋流强度表征离心力的强弱, 旋流强度越大离心力越大, 由公式 16 可知雾化角越大, 雾化效果越好。

### 4.1. 结构参数对雾化角的影响分析

结构参数对雾化角的影响结果如表 2 所示。

**Table 2.** Experimental design and atomization angle

**表 2.** 实验设计与雾化角

因素名称	旋流半径比	旋流室倾角	喷孔长径比	雾化角
实验 1	2	30	1	83.24
实验 2	4	30	1	60.11
实验 3	2	60	1	79.37
实验 4	4	60	1	85.71
实验 5	2	45	0.5	90.16
实验 6	4	45	0.5	90.00
实验 7	2	45	1.5	76.87



Continued

实验 8	4	45	1.5	76.58
实验 9	3	30	0.5	88.89
实验 10	3	60	0.5	94.27
实验 11	3	30	1.5	77.84
实验 12	3	60	1.5	79.29
实验 13	3	45	1	85.67
实验 14	3	45	1	85.67
实验 15	3	45	1	85.67
$k_1$	82.41	77.52	90.83	
$k_2$	85.33	84.37	80.78	
$k_3$	78.10	84.66	77.64	
极差 $R$	7.23	7.14	13.19	

$k_i$  为  $i$  水平结果之和, 极差  $R$  为  $\max\{k_i - k_j\}$ , 极差越大表面该因素在取值范围内对结果的影响越大, 从表 2 可以看出喷孔长径比极差最大, 故在这三个因素中喷孔长径比对雾化角的影响最大, 旋流半径比和旋流室倾角分别次之。此外, 大部分模型雾化角皆在  $90^\circ$  左右, 说明当量几何特性法设计的喷嘴雾化角与预期较接近, 在雾化角的预测上精度较高。

从图 6 可以看出在喷嘴出口形成了锥形液膜, 达到了预期雾化角, 但在喷孔内部未形成气核, 其余实验也未能在喷孔内部形成气核, 说明简单离心喷嘴喷孔内部液体旋转强度不够强, 可以通过加装旋流件增强旋流强度来进一步提示雾化效果。

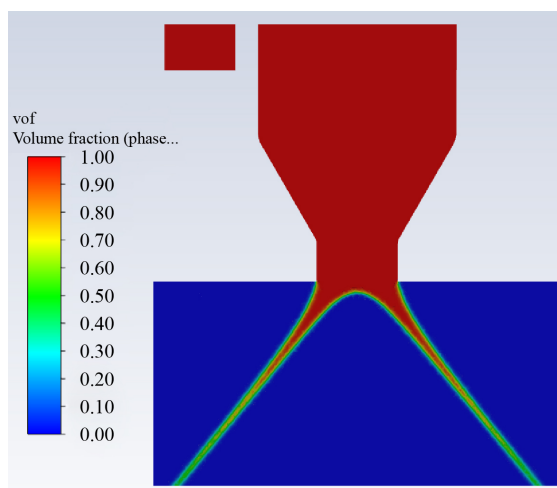
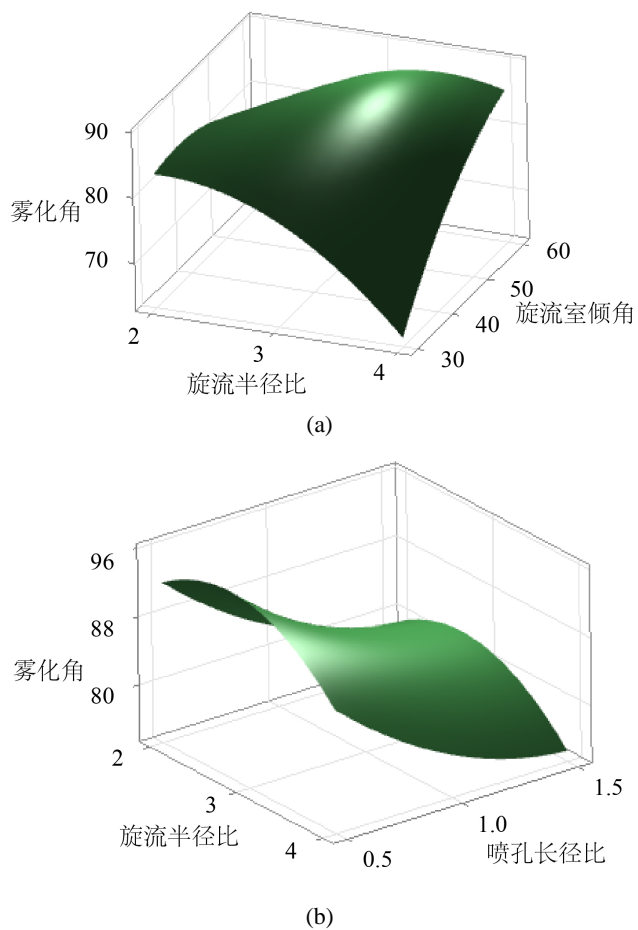
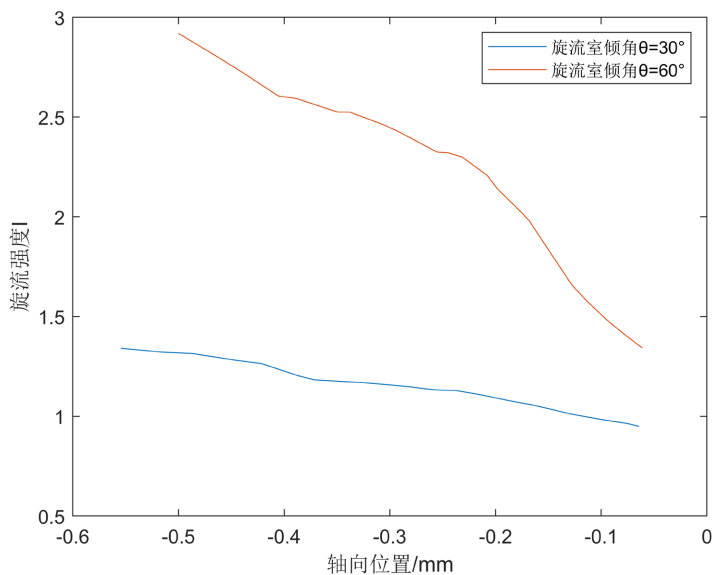


Figure 6. Experiment 1: Gas-liquid interface distribution  
图 6. 实验 1: 气液界面分布

从图 7(a)可以看出雾化角随旋流半径比的增大而减小, 这是因为流体在旋流室内旋转运动, 随着旋流半径比的增大, 流动截面积增大, 速度降低, 旋流强度降低, 故雾化角减小, 实际中旋流半径比的取值范围一半在 2~6 之间, 故可据此结论在喷嘴设计过程中对旋流半径比进行相应的调整。



**Figure 7.** Influence of structural parameters on atomization angle  
**图 7.** 结构参数对雾化角的影响



**Figure 8.** Variation curve of swirl intensity at  $x = 0.2$  mm  
**图 8.**  $x = 0.2$  mm 处旋流强度沿程变化曲线

从图 7(a)可以看出,雾化角随旋流室倾角的增大而增大,图 8 为试验 1 和试验 3 在  $x = 0.2 \text{ mm}$  位置旋流强度沿轴向方向( $z$  方向)的变化曲线,可以看出,旋流强度  $I$  沿轴向方向逐渐减小,流体整体上沿轴向方向流动并从喷口流出,因旋流室倾角导致沿轴向方向流动截面积逐渐减小,故轴向速度必然逐渐增大,但从入口槽道获得的旋流强度沿轴向方向因局部阻力和沿程阻力而逐渐消耗,最终导致旋流强度沿轴向方向逐渐减小,故旋流室倾角越大,轴向距离越短,旋流强度衰减越小,出口位置旋流强度越大,雾化角越大。

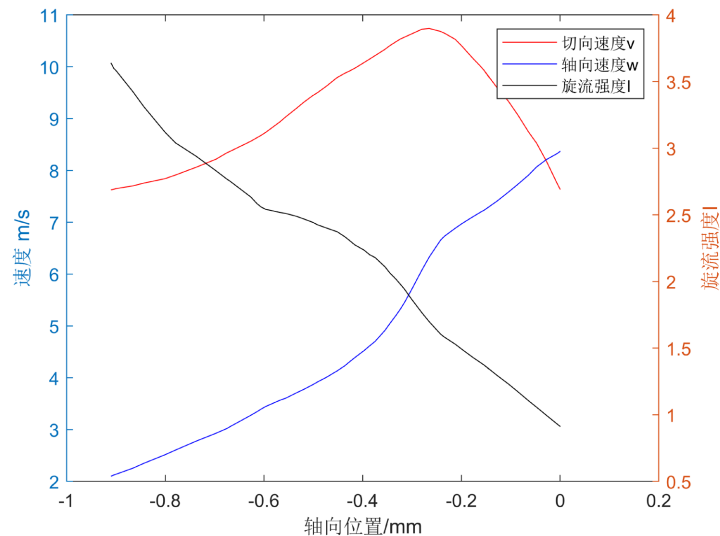


Figure 9. Speed change curve at  $x = 0.2 \text{ mm}$   
图 9.  $x = 0.2 \text{ mm}$  处速度沿程变化曲线

从图 7(b)可以看出雾化角随喷孔长径比的增大而减小,图 9 为试验 1 在  $x = 0.2 \text{ mm}$  位置切向速度、轴向速度和旋流强度沿轴向方向( $z$  方向)的变化曲线,可以看出切向速度在旋流室内逐渐增大,在喷孔内因切向速度梯度产生粘性损耗进而导致切向速度逐渐减小,轴向速度因流动截面积逐渐减小而逐渐增大,故在喷孔内部旋流强度逐渐减小,因此喷孔长度越长切向速度损耗越大,旋流强度越低,雾化角越小。

#### 4.2. 结构参数对流量的影响分析

结构参数对流量的影响结果如表 3。

Table 3. Experimental design and flow  
表 3. 实验设计与流量

因素名称	旋流半径比	旋流室倾角	喷孔长径比	流量 kg/s
实验 1	2	30	1	0.00153
实验 2	4	30	1	0.00173
实验 3	2	60	1	0.00137
实验 4	4	60	1	0.00145
实验 5	2	45	0.5	0.00147
实验 6	4	45	0.5	0.00159
实验 7	2	45	1.5	0.00144

Continued

实验 8	4	45	1.5	0.00155
实验 9	3	30	0.5	0.00164
实验 10	3	60	0.5	0.00141
实验 11	3	30	1.5	0.00160
实验 12	3	60	1.5	0.00138
实验 13	3	45	1	0.00148
实验 14	3	45	1	0.00148
实验 15	3	45	1	0.00148
$k_1$	0.00145	0.00162	0.00153	
$k_2$	0.00149	0.00150	0.00150	
$k_3$	0.00158	0.00140	0.00149	
极差 R	0.00012	0.00022	0.00003	

从表 3 可以看出旋流室倾角的极差最大, 故在这三个因素中旋流室倾角对流量的影响最大, 旋流半径比和喷孔长径比分别次之。此外可以发现流量皆大于 0.001, 说明当量几何特性法设计的喷嘴流量偏高, 可以对流量系数进行一定修正, 但这不影响下文结构参数对流量影响趋势的分析。

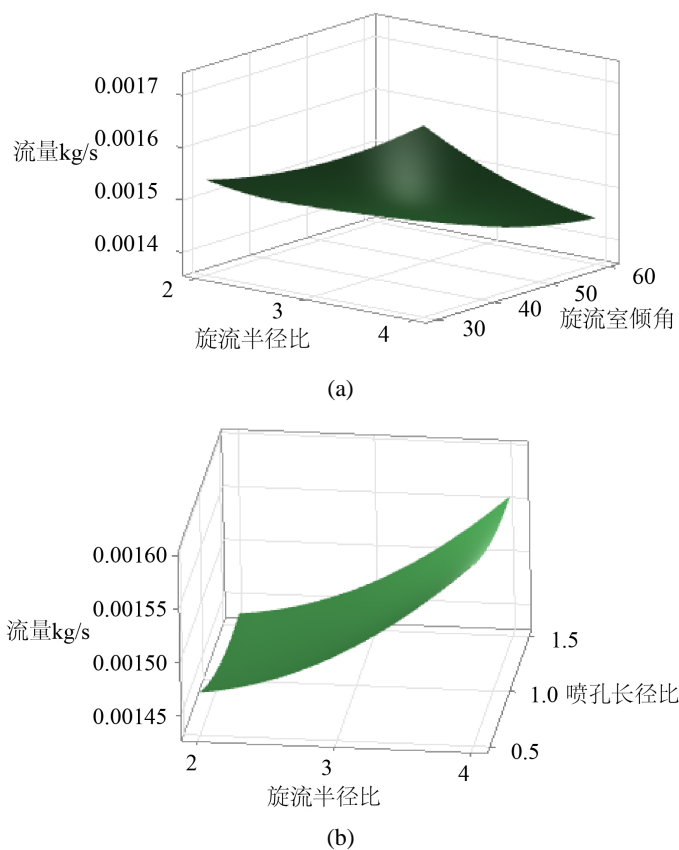


Figure 10. Effect of structural parameters on flow  
图 10. 结构参数对流量的影响

从图 10(a)可以看出流量随旋流半径比的增大而增大,这是因为旋流半径比增大流动截面随之增大,流动阻力减小,故流量随之增大,所有试验中喷孔直径不变,流动截面不变,所以流量大意味着出口位置速度大,速度越大液膜与周围空气之间气动作用力越强,液膜表面不稳定波动越剧烈,越有利于液膜的破碎,雾化效果越好。

流量随旋流室倾角的增大而减小,这是因为旋流室倾角形成一个过渡段,沿着流动方向流动截面逐渐减小,此处流体微团之间剧烈碰撞掺混造成较大能量损失,即存在较大的局部阻力,旋流室倾角越大,流体微团之间碰撞掺混越剧烈,能量损失越大,阻力越大,故流量随之减小,雾化效果随之变差。

从图 10(b)可以看出喷孔长径比对流量几乎无影响,这是因为喷孔是直管道,能量损失主要是沿程损失,无局部损失,而沿程损失在总损失中一般占比很小,故对流量几乎无影响。

## 5. 结论

本文通过数值模拟对离心喷嘴不同设计方法进行了验证,离心喷嘴几何结构参数较多,不同结构参数对不同指标影响不同,本文研究了部分结构参数对喷嘴性能的影响机理,得出以下结论:

- 1) 旋流半径比增大会使雾化角减小、流量增大;
- 2) 旋流室倾角增大会使雾化角增大、流量减小;
- 3) 喷孔长径比增大会使雾化角减小,对流量影响不大;
- 4) 旋流半径比、旋流室倾角和喷孔长径比三者中喷孔长径比对雾化角影响最大,旋流室倾角对流量影响最大;
- 5) 按当量几何特性法设计的喷嘴在雾化角上预测校准,在流量上存在较大偏差,该方法可以为喷嘴前期设计提供一定的参考价值;
- 6) 众多实验均未能在喷孔位置形成气核,说明简单离心喷嘴内部旋流强度不够,可以通过加装旋流件,增强旋流强度来进一步提高雾化效果。

## 参考文献

- [1] A.H. 勒菲沃. 燃气涡轮发动机燃烧[M]. 刘永泉,译. 北京: 航空工业出版社, 2016: 182-187.
- [2] 解茂昭. 内燃机计算燃烧学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995.
- [3] 侯凌云. 喷嘴技术手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 96-103.
- [4] 史永杰. 中低压雾化喷嘴结构优化设计与流场液滴破碎规律试验研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [5] 张光通. 旋流喷嘴雾化特性的仿真与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [6] 徐翠翠. 喷嘴内外流场雾化特性及尘雾耦合降尘试验研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
- [7] 张永良. 离心喷嘴雾化特性实验研究和数值模拟[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2013.
- [8] 胡旭财. 压力旋流喷嘴雾化性能研究及结构优化[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27360/d.cnki.gtlgy.2022.000520>
- [9] Rizk, N.K. and Lefebvre, A.H. (1985) Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers. *Journal of Propulsion and Power*, **1**, 93-199. <https://doi.org/10.2514/3.22780>
- [10] Lefebvre, A.H. (1987) The Prediction of Sauter Mean Diameter for Simplex Pressure—Swirl Atomizers. *Atomization and Spray Technology*, **3**, 37-51.
- [11] 周建伟. 内部结构参数对离心喷嘴雾化性能影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.