文章编号:1674-7607(2026)01-0059-08 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240655

压力旋流喷嘴结构参数对雾化性能的影响及优化

宋权斌， 王纪鑫， 刘 瑞， 胡家贤， 罗 玺， 赵杨瑞， 蔡 翀
（长沙理工大学 能源与动力工程学院，湖南长沙 410000）

摘 要：为提高用于喷雾冷却的压力旋流喷嘴的雾化性能，优化喷嘴的结构参数，基于流体体积函数法(VOF)对旋流喷嘴进行了仿真分析，采用正交试验的方法分析各参数对液膜厚度和雾化锥角影响的显著性，并对喷嘴结构参数进行了优化。结果表明：出口长度 L_1、出口直径 D 和旋流孔数 N 对喷嘴雾化性能的影响较显著，旋流室高度 H 对雾化性能的影响较小；增大喷嘴出口长度 L_1 能够减小液膜厚度和雾化锥角；增大出口直径 D 能够增大液膜厚度和雾化锥角；增大旋流孔数 N 会使液膜变厚，雾化锥角变小；增大旋流室高度 H 会使液膜厚度先减小后增大，雾化锥角减小；当出口长度 L_1 为 2 mm，出口直径 D 为 10 mm，旋流室高度 H 为 16 mm，旋流孔数 N 为 6 时，雾化性能最佳，相较于原模型雾化锥角增大了 16.8%，液膜厚度减小了 32.4%。

关键词：旋流喷嘴；结构参数；正交试验；液膜厚度；雾化锥角；数值模拟
中图分类号：TK263.4 **文献标志码**：A **学科分类号**：470.30

Influence and Optimization of Structural Parameters of Pressure Swirl Nozzle on Atomization Performance

SONG Quanbin， *WANG Jixin*， *LIU Rui*， *HU Jiaxian*， *LUO Xi*，
ZHAO Yangrui， *CAI Chong*
(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410000, Hunan Province, China)

Abstract: In order to improve the atomization performance of the pressure swirl nozzle used for spray cooling and optimize the structural parameters of the nozzle, simulation analysis of the swirl nozzle based on the volume-of-fluid function (VOF) method was carried out, and orthogonal tests were used to analyze the significance of the influence of each parameter on the thickness of the liquid film and the spray angel of atomization, then the structural parameters of the nozzle were optimized. Results show that the outlet length L_1, outlet diameter D and the number of cyclone holes N have a more significant effect on the atomization performance of the nozzle, and the height of the cyclone chamber H has a smaller effect on the atomization performance. Increasing the nozzle outlet length L_1 can reduce the liquid film thickness and atomization spray angel; increasing the outlet diameter D can increase the liquid film thickness and atomization spray angel; increasing the number of cyclone holes N will make the liquid film become thicker and the atomization spray angel become smaller; increasing the height of the cyclone chamber H will make the liquid film thickness decrease firstly and then increase, and the atomization spray angel decrease. When the outlet length L_1 is 2 mm, the outlet diameter D is 10 mm, the height of the cyclone chamber H is 16 mm,

收稿日期：2024-10-21 **修订日期**：2024-11-04
基金项目：压缩空气储能联合研究技术服务项目(20240030487)
作者简介：宋权斌(1973—)，男，江苏海安人，副教授，博士，研究方向为燃气轮机关键技术，E-mail：007955@csust.edu.cn。

and the number of cyclone holes N is 6, the atomization performance is optimal. Compared with the original model, the atomization spray angel of the optimized nozzle is increased by 16.8%, and its liquid film thickness is decreased by 32.4%.

Key words: swirl nozzle; structural parameters; orthogonal test; liquid film thickness; atomization spray angel; numerical simulation

在宽域燃烧室和涡轮气热耦合试验舱进行试验时,会产生大量高温气体,这部分高温气体需要冷却处理。利用压力旋流喷嘴的雾化作用能有效地冷却这些气体。其中,喷嘴的雾化性能对冷却效率有较大影响,通过分析喷嘴各结构参数对雾化性能的影响,为喷嘴结构优化提供了重要参考[1],对有效提高冷却效率具有重要意义。

在压力旋流喷嘴中,流体通过旋流结构获得径向速度,在旋流室中进行旋转运动,并逐渐形成空气芯和向外扩展的锥形液膜,随着锥形液膜的发展,其厚度逐渐变薄,在喷嘴出口处依靠空气剪切力使液膜破碎达到雾化效果[2]。喷嘴内的流体运动直接影响出口的雾化锥角和雾化粒径,而流动状态主要受喷嘴结构参数和工作条件的影响。吴正人等[3-4]对喷雾冷却热壁面进行了模拟研究,发现喷射压力提高可以促进液膜破碎和液滴的形成,增强换热能力。Laurila 等[5-6]采用大涡模拟(LES)对高黏度液体在大口径压力旋流喷嘴内部的流场进行研究,发现黏度对液膜厚度具有重要影响。罗俊伟等[7]采用流体体积函数法(VOF)探究了入口雷诺数对雾化特性的影响,发现随着雷诺数的增加,喷嘴出口液膜厚度变薄,流量系数降低,雾化角增大。Jin 等[8]以生物油旋流喷嘴为研究对象,分析了喷嘴孔径、喷嘴出口纵横比、旋流室高度对雾化性能的影响,结果表明喷嘴长径比对雾粒索特平均直径(SMD)的影响最大。Liu 等[9]通过实验和模拟研究了 10 个不同结构的喷嘴,发现入口或出口的直径越大,阻力越低,流量越大,同时出口直径对雾化锥角的影响最大,减小出口直径能大大减小雾化锥角。Dong 等[10]以造雪用旋流喷嘴为研究对象,通过实验与模拟研究发现增加旋流槽面积可以有效降低雾化液滴平均直径,提高喷射流量。浦承皓等[11]采用 VOF 开展旋流喷嘴内部流场分析,发现适当增加槽数、槽深和螺旋升角可优化雾化锥角和雾化粒径。赵亮等[12]对顶部带有圆台的离心喷嘴进行模拟研究,发现增加旋流室高度会使流量系数增加,并导致液膜厚度整体增加,喷雾锥角越来越小。邱贵霞等[13]以航空发动机离心喷嘴为研究对象,发现喷嘴扩张角对雾化性能的影响最显著,扩张角和喷口直径增大可以明显增大雾化锥角,减小液膜厚度和流量系数。

探讨各种结构参数对雾化特性的影响,可以为喷嘴的设计提供更全面的理论依据。本研究采用 VOF 研究旋流喷嘴的雾化特性,考察相同质量流量下喷嘴出口长度、出口直径、旋流室高度和旋流孔数对喷嘴流场、雾化锥角和液膜厚度的影响,并结合正交试验进行验证和喷嘴优化。

1 数值方法

1.1 物理模型

基于付文锋等[14]的压力旋流喷嘴结构进行建模,原喷嘴模型计算域如图 1 所示,其主要由入口段、旋流孔、旋流室、出口段等部分组成。旋流孔数量 N 为 8 个,旋流孔径为 3.5 mm,旋流孔角度为 45°,旋流室高度 H 为 20.8 mm,喷嘴出口直径 D 为 6 mm。

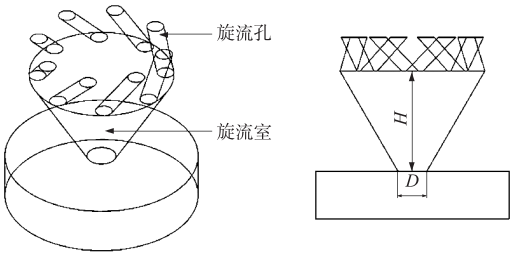


图 1 喷嘴内流场提取图

Fig. 1 Extraction diagram of flow field in nozzle

1.2 数值方法

压力旋流喷嘴通常在高压下将液体喷射到空气中,在旋流室的轴线附近有一个空气芯。因此,压力旋流喷嘴中的流动是一种典型的气液两相流动,适用于用 VOF 模型进行模拟计算。此外,喷嘴的雾化过程是一个复杂的湍流流动过程,Realizable k-ε 模型采用了新的湍流黏度公式,可以更精确地模拟复杂流体流动,包括旋转流动、流动分离、二次流等,相较于标准 k-ε 模型及 RNG k-ε 模型,能更好地处理喷嘴内部复杂流道的湍流流动。因此,本文采用 Realizable k-ε 模型与 VOF 模型结合对喷嘴进行模拟。

1.3 网格无关性验证

对旋流喷嘴进行网格划分,并在喷嘴出口处进

行网格加密。为保证网格 y^+ 值能满足壁面函数使用范围，第一层网格高度控制在 0.2 mm 以上。使用网格数为559 584、830 262、1 446 870、1 729 992、2 287 789 的 5 套网格对喷嘴进行数值模拟，以喷嘴出口速度和质量流量为评价指标，当网格数从 559 584 提升到 830 262 时，喷嘴出口速度明显增大，质量流量也增大；继续提高网格数对出口速度和质量流量几乎没有影响，此时可以忽略网格数对数值模拟结果的影响。在网格数为 830 262 时，模拟所得主流区域的壁面 y^+ 值范围为 15～112，能满足可扩展壁面函数使用要求，因此最终选择 830 262 个网格进行数值计算。网格划分如图 2 所示。

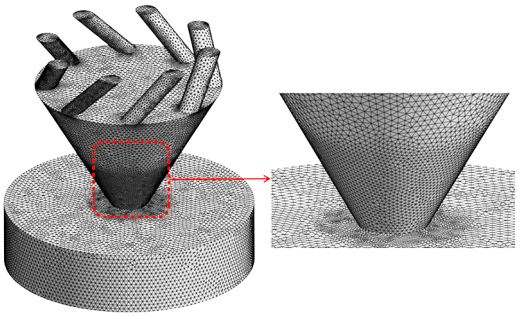


图 2　网格划分

Fig. 2　Grid division

1.4　边界条件

以水为工质对喷嘴的性能进行考察，具体边界条件如下：

进口：可行性分析中入口采用压力入口；研究结构参数的影响时入口采用质量流量入口，为 0.25 kg/s。

壁面：无滑移绝热壁面，采用可扩展壁面函数。

出口：出口外为大气环境，采用压力出口边界条件。

计算时，喷嘴内液体初始体积分数为 0，采用瞬态计算，时间步长设置为 10^{-5}，每个时间步收敛后进行下一次迭代，图 3 为瞬态计算的收敛曲线。

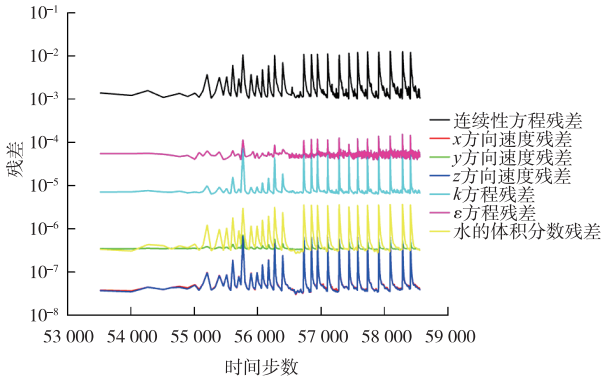


图 3　瞬态计算的收敛曲线

Fig. 3　Convergence curves of transient calculation

1.5　可行性分析

为验证模型的可靠性，将数值模拟所得压力-流量结果与厂家喷嘴的压力-流量数据进行比较，同时将模拟得到的压力-雾化锥角数据与文献[14]中的实验结果进行了比较，如图 4 所示。各压力工况下的入口流量偏差在 8.58%以内，雾化锥角的误差范围不超过 5.1%，这些误差可归因于喷嘴粗糙度、模拟模型中的参数选择问题以及模拟与实验之间的压力差。但模拟结果随喷嘴孔径的变化趋势与实验结果一致，验证了数值模拟方法的可行性，因此该模型可以用于研究喷嘴的雾化特性。

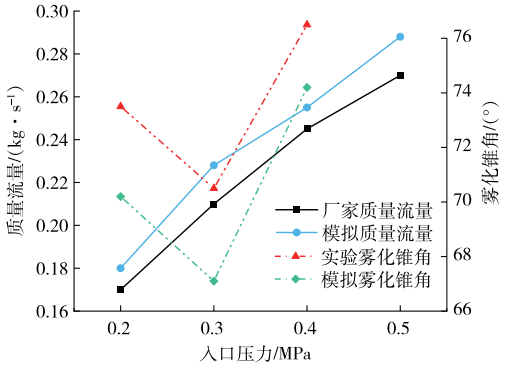


图 4　不同压力下模拟结果与实验结果的对比

Fig. 4　Comparison of simulation results and experimental results under different pressures

2　结果与讨论

2.1　旋流结构对雾化特性的影响

为了研究喷嘴的结构参数（出口长度 L_1、出口直径 D、旋流室高度 H、旋流孔数 N）对喷嘴内液体流动状态、雾化锥角和液膜厚度的影响，首先在原始喷嘴的基础上改变结构参数，对 13 个不同的旋流喷嘴进行了模拟，喷嘴结构参数如表 1 所示，其中喷嘴 1 为原始喷嘴。

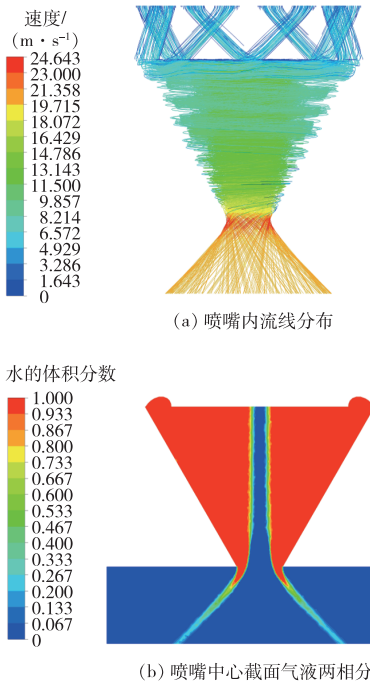
表 1　喷嘴仿真模型结构参数

Tab. 1　Structural parameters of nozzle simulation model

喷嘴序号	出口长度 L_1/mm	出口直径 D/mm	旋流室高度 H/mm	旋流孔数 N
1～4	0、2、3、4	6	20.8	8
5～7	0	4、8、10	20.8	8
8～10	0	6	12、16、24	8
11～13	0	6	20.8	6、7、9

图 5 为喷嘴内流场的三维流线及喷嘴中心截面水的体积分数分布示意图，说明在旋流孔的作用下，流体获得切向速度，产生了旋流现象。在旋流室的

变直径区域，流体速度急剧增加，流体始终保持其旋流状态；同时在喷嘴的轴线附近形成了空气芯，从而增强了液滴破碎效果。



(a) 喷嘴内流线分布

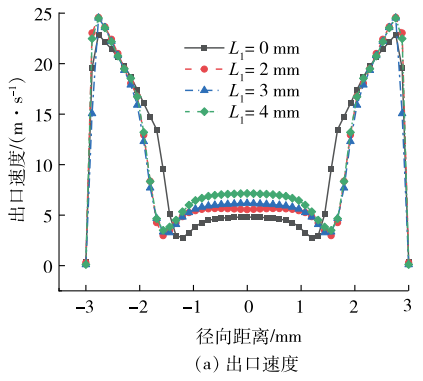
(b) 喷嘴中心截面气液两相分布

图 5 喷嘴内的流线和气液两相分布

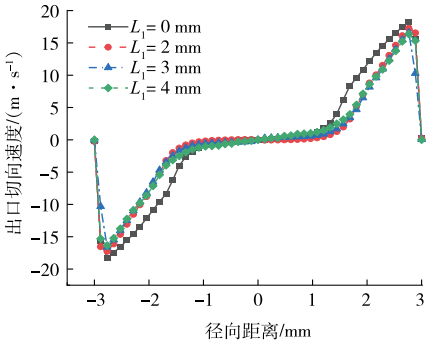
Fig. 5 Flow lines and gas/liquid two-phase distributions inside the nozzle

2.1.1 出口长度 L_1 的影响

图 6 显示了不同 L_1 下的出口速度和出口切向速度。喷嘴的 L_1 从 0 mm 增加到 2 mm，出口速度增加，这是由于 L_1 从 0 mm 增大到 2 mm 时，喷孔会出现收缩现象。由于喷孔入口处流动通道的收缩和流动方向的突然改变，流体在喷孔入口处与喷孔壁分离，从而形成回流区。回流区减少了喷嘴入口段的实际流量面积，增加了出口速度。随着 L_1 的进一步增加，流体出口速度没有较为明显的变化，但出口长度增大导致喷嘴外部的空气回吸增强，使空气芯内部速度增大。当喷嘴的 L_1 从 0 mm 增大到 2 mm 时，其出口切向速度减小。这是由于喷嘴出口部分的整流效应，降低了旋转强度，从而降低了喷嘴出口的切向速度。当 L_1 进一步增加时，出口切向速度略微减小，这正好为喷嘴雾化锥角随 L_1 增加而减小的现象给出了解释。图 7 显示了不同结构参数下的出口液膜厚度及雾化锥角，随着 L_1 的增加，喷嘴的雾化锥角逐渐减小。当液体的体积分数大于 0.5 时，测量液膜厚度，由图 7 可知，随着 L_1 的增加，液膜厚度逐渐减小；但随着 L_1 的增加，其对液膜厚度的影响也逐渐减弱。



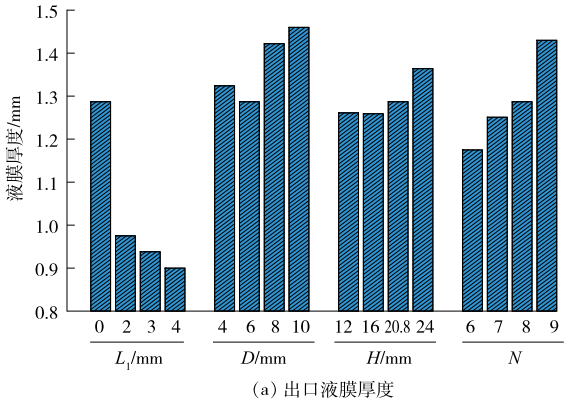
(a) 出口速度



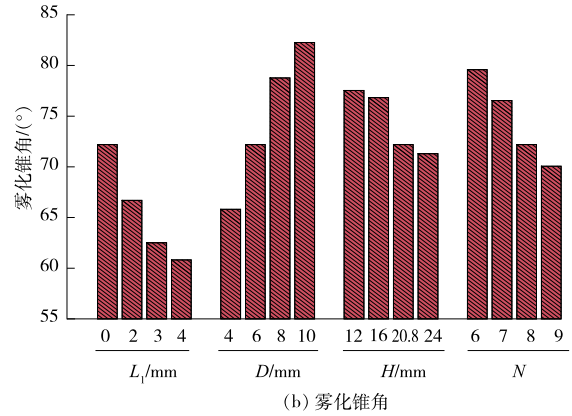
(b) 出口切向速度

图 6 不同 L_1 下的出口速度和出口切向速度分布

Fig. 6 Distributions of outlet velocity and outlet tangential velocity under different L_1 values



(a) 出口液膜厚度



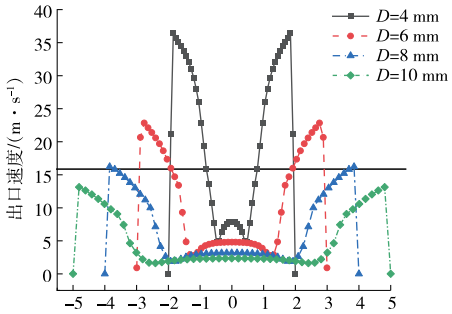
(b) 雾化锥角

图 7 不同结构参数下的出口液膜厚度及雾化锥角

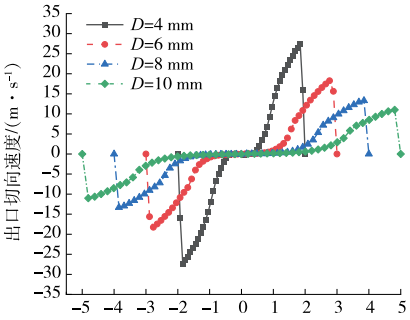
Fig. 7 Outlet liquid film thickness and spray angle under different structural parameters

2.1.2　出口直径 D 的影响

不同 D 下喷嘴的出口速度和切向速度分布如图 8 所示。随着 D 的增大，出口速度逐渐减小。这是因为当喷嘴出口横截面积增大时，在质量流量保持不变的情况下，其出口速度和切向速度均减小。由图 7 可知，随着 D 的增加，流体停留时间减少，减小了喷嘴对其内部液体旋流运动的阻力，能量损失降低，旋流强度增强，切向速度与出口速度的比值增加，喷嘴的雾化锥角逐渐增大。出口液膜厚度随着 D 的增大先减小后增加，在 $D=6$ mm 时具有最小的液膜厚度。



(a) 出口速度



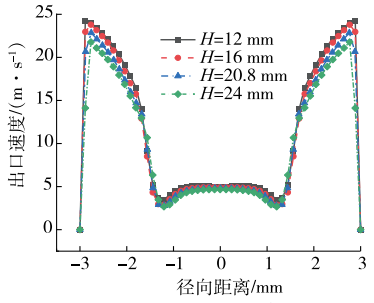
(b) 出口切向速度

图 8　不同 D 下的出口速度和出口切向速度分布

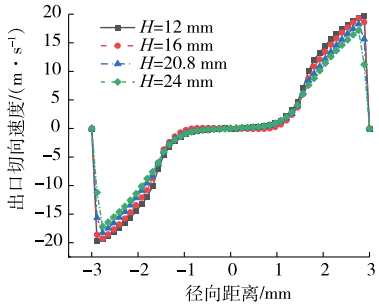
Fig. 8　Distributions of outlet velocity and outlet tangential velocity under different D values

2.1.3　旋流室高度 H 的影响

不同 H 下喷嘴的出口速度和切向速度分布如图 9 所示。出口速度和切向速度均随着 H 的增大而减小。这可能是由于随着 H 的增大，流体在喷嘴内的流动时间增加，与内壁接触面积增大，摩擦流动损失增大，导致出口速度减小；此外有更多的低压空气进入喷嘴内部，流体克服空气阻力做功增加，导致流体出口切向速度减小，雾化锥角变小（见图 7(b)）。由图 7(a)可知，当 H 从 12 mm 增大到 16 mm 时，其液膜厚度基本不变；随着 H 的进一步增大，液膜厚度明显增大。这可能是由于喷嘴的 H 增加，摩擦流动损失增大，旋流室内流体切向速度减小，导致液膜厚度逐渐增大。



(a) 出口速度



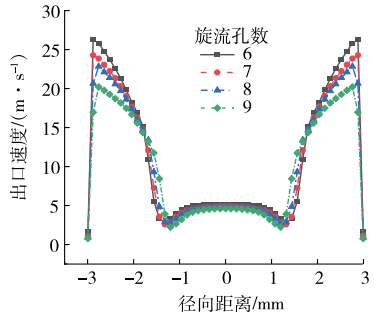
(b) 出口切向速度

图 9　不同 H 下的出口速度和出口切向速度分布

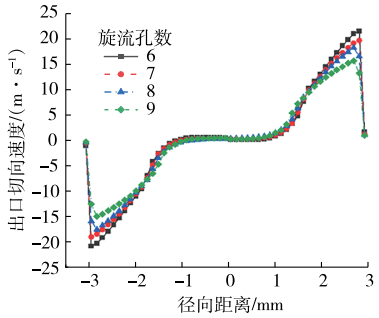
Fig. 9　Distributions of outlet velocity and outlet tangential velocity under different H values

2.1.4　旋流孔数 N 的影响

不同旋流孔数的喷嘴的出口速度和切向速度分布如图 10 所示。随着旋流孔数的减少，出口速度和切向速度均增大。这是由于在相同质量流量的情况下，旋流孔数减少导致液体的入口速度增加。同时，



(a) 出口速度



(b) 出口切向速度

图 10　不同 N 下的出口速度和出口切向速度分布

Fig. 10　Distributions of outlet velocity and outlet tangential velocity under different N values

随着旋流孔数的减少，切向速度与出口速度的比值逐渐减小，雾化锥角增大，说明雾化锥角与旋流孔数呈负相关，$N=6$ 时喷嘴具有最大的雾化锥角，如图 7(b)所示。由图 7(a)可知，随着旋流孔数的减小，液膜厚度逐渐减小，说明液膜厚度与旋流孔数呈正相关，$N=6$ 时喷嘴具有最小的液膜厚度。

2.2 喷嘴结构优化

2.2.1 正交试验设计

为分析各结构参数对喷嘴雾化锥角和液膜厚度的影响及显著性，并对多种结构因素影响下的喷嘴进行分析和优化，最终得到喷嘴雾化锥角最大、液膜厚度最小的结构组合，本节采用正交试验的方法进行研究。其中因素 A 为出口长度 L_1，因素 B 为出口直径 D，因素 C 为旋流室高度 H，因素 D 为旋流孔数 N，如表 2 所示。

表 2 正交试验因素和水平

Tab. 2 Orthogonal experimental factors and levels

因素水平	结构因素			
	A:出口长度 L_1/mm	B:出口直径 D/mm	C:旋流室高度 H/mm	D:旋流孔数 N
1	0	4	12	6
2	2	6	16	7
3	3	8	20.8	8
4	4	10	24	9

设计正交试验，对各因素进行合理安排得到包含 16 种组合的正交试验表 $L_{16}(4^5)$，如表 3 所示，其中 E 为空列，用于判断试验结果是否由误差引起，从而确保试验结果的可靠性。

表 3 正交试验表 $L_{16}(4^5)$

Tab. 3 Orthogonal experimental table $L_{16}(4^5)$

因素水平	结构因素				
	A:出口长度 L_1/mm	E	B:出口直径 D/mm	C:旋流室高度 H/mm	D:旋流孔数 N
1	0		4	12	6
2	0		6	16	7
3	0		8	20.8	8
4	0		10	24	9
5	2		4	16	8
6	2		6	12	9
7	2		8	24	6
8	2		10	20.8	7
9	3		4	20.8	9
10	3		6	24	8
11	3		8	12	7
12	3		10	16	6
13	4		4	24	7
14	4		6	20.8	6
15	4		8	16	9
16	4		10	12	8

对表 3 中 16 种不同组合的喷嘴进行数值模拟分析，从而获得雾化锥角和液膜厚度的精确计算结果，如表 4 所示，该结果可用于后续分析。

表 4 正交试验结果

Tab. 4 Orthogonal experimental results

试验编号	雾化锥角/(°)	液膜厚度/mm
1	75.2	1.010
2	79.0	1.183
3	79.0	1.393
4	78.5	1.556
5	58.6	0.849
6	66.0	0.998
7	77.4	0.953
8	79.4	1.066
9	47.8	0.893
10	60.0	1.014
11	71.1	1.118
12	80.8	0.887
13	45.9	0.840
14	63.5	0.816
15	62.7	1.013
16	71.3	1.010

为进一步揭示不同喷嘴组合对雾化效果的影响程度以及评估各因素间的相对重要性，采用了极差方差分析这一统计方法。极差分析能够直观地展示出各因素在不同水平下的效果差异，而方差分析则能够定量地评估这些差异是否显著，从而科学地识别出影响雾化锥角和液膜厚度的主导因素。

2.2.2 极差方差分析

表 5、表 6 分别为喷嘴雾化锥角、液膜厚度的极差方差分析结果，其中 F 为组间均方与组内均方的比值，R 为各因素对应的的极差，K_i 为某因素第 i 水平的试验均值。查表可得 F 的临界值 $F_{0.10}=9.28$，当 $F>F_{0.10}$ 时，表明该因素对指标影响显著。R 越大，该因素对指标的影响越大。根据 K_i 可判断其水平和组合的优劣。

由表 5 可知，各因素的 F 都大于 $F_{0.10}$，表明出口长度 L_1、出口直径 D、旋流室高度 H 和旋流孔数 N 对雾化锥角的影响显著。极差值 $R_B>R_A>R_D>R_C$，表明出口直径对雾化锥角的影响最大，其次是出口长度和旋流孔数，旋流室高度的影响最小。雾化锥角指标 $K_{1A}>K_{2A}>K_{3A}>K_{4A}$，说明雾化锥角随着出口长度的增大而减小；$K_{4B}>K_{3B}>K_{2B}>K_{1B}$，说明雾化锥角随着出口直径的增大而增大；$K_{1C}>K_{2C}>K_{3C}>K_{4C}$，说明雾化锥角随着旋流室高

度的增大而减小；$K_{1D}>K_{2D}>K_{3D}>K_{4D}$，说明雾化锥角随着旋流孔数的增加而减小。对比 2.1 节的流场仿真分析结果，可以发现正交试验得到的结论与流场仿真分析得到的结论一致。当喷嘴的结构参数为 $A_1B_4C_1D_1$，即出口长度为 0 mm，出口直径为 10 mm，旋流室高度为 12 mm，旋流孔数为 6 时，喷嘴具有最大的雾化锥角。

表 5　雾化锥角的极差方差分析

Tab. 5　Range and variance analyses of spray angle

因素水平	结构因素			
	A：出口长度 L_1	B：出口直径 D	C：旋流室高度 H	D：旋流孔数 N
F	110.362	158.187	13.069	38.519
R	17.075	20.625	5.450	10.475
K_1	77.925	56.875	70.900	74.225
K_2	70.350	67.125	70.275	68.850
K_3	64.925	72.550	67.425	67.225
K_4	60.850	77.500	65.450	63.750

由表 6 可知，F_A、F_B大于 $F_{0.10}$，表明出口长度 L_1 和出口直径 D 为影响液膜厚度的显著因素。极差值 $R_A>R_B>R_D>R_C$，表明对雾化锥角影响最大的是出口长度，影响第二大的是出口直径，其次是旋流孔数，影响最小的是旋流室高度。液膜厚度指标 $K_{1A}>K_{3A}>K_{2A}>K_{4A}$，其中 K_{2A}与 K_{3A}基本相等，说明液膜厚度随着出口长度的增大先减小后略微增大再减小，但总体呈减小的趋势；$K_{4B}>K_{3B}>K_{2B}>K_{1B}$，说明液膜厚度随着出口直径的增大而增大；$K_{4C}>K_{3C}>K_{1C}>K_{2C}$，说明液膜厚度随着旋流室高度的增大先减小后增大，但总体变化范围很小；$K_{4D}>K_{3D}>K_{2D}>K_{1D}$，说明液膜厚度随着旋流孔数的增大而增大。对比 2.1 节的流场仿真分析结果，可以发现在出口长度、旋流孔数和旋流室高度 3 个因素上正交试验得到的结论与流场仿真分析得到的结论保持一致，在出口直径这个因素上两者的结论略有偏差，这可能是由于计算误差导致的，但总体变化趋势基本一致。当喷嘴的结构参数为 $A_4B_1C_2D_1$，即出口长度为 4 mm，出口直径为 4 mm，旋流室高度为 16 mm，旋流孔数为 6 时，喷嘴具有最小的液膜厚度。

表 6　液膜厚度的极差方差分析

Tab. 6　Range and variance analyses of liquid film thickness

因素水平	结构因素			
	A：出口长度 L_1	B：出口直径 D	C：旋流室高度 H	D：旋流孔数 N
F	25.846	11.000	1.769	6.692
R	0.367	0.231	0.108	0.199
K_1	1.286	0.898	1.004	0.916
K_2	0.966	1.003	0.983	1.052
K_3	0.978	1.119	1.042	1.066
K_4	0.919	1.129	1.091	1.115

2.2.3　结果优化

基于 2.2.2 节的极差方差分析可知：当雾化锥角最大时，各因素的水平组合为 $A_1B_4C_1D_1$；当液膜厚度最小时，各因素水平的组合为 $A_4B_1C_2D_1$。显然，这两个指标不能同时达到最佳，为了尽可能提高喷嘴的雾化效果，综合考虑各因素的极差方差影响，得出以下 4 个优化模型：$A_2B_1C_2D_1$、$A_2B_2C_2D_1$、$A_2B_3C_2D_1$、$A_2B_4C_2D_1$。对 4 个优化模型进行数值模拟，得到其雾化锥角和液膜厚度，并与原模型进行对比，如表 7 所示。

表 7　优化喷嘴与原喷嘴的雾化性能比较

Tab. 7　Atomization performance comparison of optimized nozzle and original nozzle

模型	液膜厚度/mm	雾化锥角/(°)
原模型	1.332	72.2
$A_2B_1C_2D_1$	0.751	63.4
$A_2B_2C_2D_1$	0.794	73.8
$A_2B_3C_2D_1$	0.861	79.1
$A_2B_4C_2D_1$	0.901	84.3

通过对比原模型与 4 个优化模型的雾化锥角和液膜厚度计算结果，可知最佳优化结构为模型 $A_2B_4C_2D_1$。原模型和最优模型的雾化锥角和液膜厚度对比如图 11 所示。出口直径增大、旋流孔数减少以及旋流室高度减小使喷嘴对其内部液体旋流运动的阻力减小，增大旋流强度，使雾化锥角大

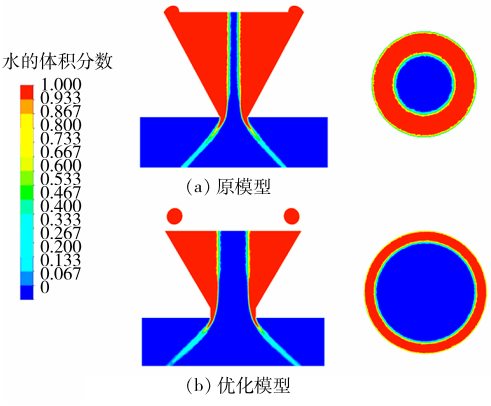


图 11　原模型和优化模型的气液两相分布

Fig. 11　Gas/liquid two-phase distribution of original model and optimized model

幅增大;出口长度增加到 2 mm,使得液膜厚度大幅减小的同时保证雾化锥角不会大幅减小。相较于原模型,该模型的雾化锥角增大了 16.8%,同时液膜厚度减小了 32.4%,可使喷嘴出口附近的液膜能与更多的气体发生相互作用,有利于液体的破碎,提高液体的雾化质量,进而提高冷却效率。这一系列的数值模拟与统计分析为喷嘴的优化设计和实际应用提供了有力的数据支持和理论依据。

3 结论

(1) 出口长度对喷嘴液膜厚度的影响最显著,出口长度增大会使液膜厚度减小,但同时也会导致喷嘴雾化锥角减小。

(2) 出口直径对喷嘴雾化锥角的影响最显著,出口直径增大能显著地增大雾化锥角,但同时也会使液膜厚度增大。

(3) 旋流室高度对喷嘴雾化性能的影响较小,当旋流室高度 H 为 16 mm 时,对应的雾化锥角与液膜厚度结果最佳。

(4) 旋流孔数对喷嘴雾化锥角和液膜厚度均有较为明显的影响,随着旋流孔数的减少,喷嘴的出口切向速度明显增大,雾化锥角增大,同时液膜厚度减小,当旋流孔数为 6 时,喷嘴雾化性能最好。

(5) 喷嘴的最佳优化结构组合为 $A_2B_4C_2D_1$,即出口长度 L_1 为 2 mm,出口直径 D 为 10 mm,旋流室高度 H 为 16 mm,旋流孔数 N 为 6。相较于原喷嘴,结构优化后雾化锥角增大了 16.8%,液膜厚度减小了 32.4%,喷嘴的雾化效果得到增强。

参考文献:

[1] 乔旭,李凯,朱锡锋. 喷嘴结构对生物油喷雾特性的影响研究[J]. 太阳能学报,2019,40(8):2097-2104.
QIAO Xu, LI Kai, ZHU Xifeng. Effect of centrifugal nozzle structure on bio-oil spray characteristics[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(8): 2097-2104.

[2] CHEN Yuxiao, LUO Junwei, WU Fan, et al. Multi-objective optimization on flow characteristics of pressure swirl nozzle: a LES-VOF simulation[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 133: 105926.

[3] 吴正人,甄猛,刘梅,等. 压力旋流喷嘴喷雾冷却热传递特性数值模拟[J]. 机械工程学报,2019,55(4):172-180.
WU Zhengren, ZHEN Meng, LIU Mei, et al. Numerical simulation of heat transfer characteristics of spray swirling nozzle spray under pressure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(4): 172-180.

[4] 吴正人,甄猛,刘梅,等. 空心锥压力旋流喷嘴雾化特性的影响因素分析[J]. 动力工程学报,2018,38(12):988-995.
WU Zhengren, ZHEN Meng, LIU Mei, et al. Factors influencing the atomization characteristics of hollow cone pressure swirl nozzles[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(12): 988-995.

[5] LAURILA E, ROENBY J, MAAKALA V, et al. Analysis of viscous fluid flow in a pressure-swirl atomizer using large-eddy simulation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2019, 113: 371-388.

[6] LAURILA E, KOIVISTO S, KANKKUNEN A, et al. Computational and experimental investigation of a swirl nozzle for viscous fluids[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 128: 103278.

[7] 罗俊伟,陈宇霄,张泽武,等. 入口雷诺数对压力旋流喷嘴雾化特性的影响[J]. 动力工程学报,2023,43(8):967-973.
LUO Junwei, CHEN Yuxiao, ZHANG Zewu, et al. Effects of inflow Reynolds number on spray characteristics of a pressure swirl atomization nozzle[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(8): 967-973.

[8] JIN Junwei, MA Xin, LI Fashe, et al. Study on flow atomization characteristics and structure optimization of swirl nozzle for biodiesel[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, 206: 325-336.

[9] LIU Jinfan, FENG Xin, LIANG Hu, et al. Prediction of atomization characteristics of pressure swirl nozzle with different structures[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2023, 63: 171-184.

[10] DONG Peiwen, CHEN Qi, LIU Guoqiang, et al. Effects of geometric parameters on flow and atomization characteristics of swirl nozzles for artificial snowmaking[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 154: 56-65.

[11] 浦承皓,丁志伟,沈远娴,等. 旋流式喷嘴结构优化分析及试验验证[J]. 动力工程学报,2022,42(12):1230-1236.
PU Chenghao, DING Zhiwei, SHEN Yuanxian, et al. Structure optimization analysis and experimental verification of a swirl nozzle[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(12): 1230-1236.

[12] 赵亮,李颖,朱晓静,等. 离心喷嘴几何参数影响喷淋特性数值模拟研究[J]. 工程热物理学报,2019,40(1):156-163.

(下转第 76 页)

报，2022，42(7)：657-663.
CHEN Chenming，GUO Xueyan，CHANG Linsen. Research on airfoil optimization and domain adaptation based on BP neural network surrogate model[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2022，42(7)：657-663.

[16] 喻伯平，李高华，谢亮，等. 基于代理模型的旋翼翼型动态失速优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版)，2020，54(4)：833-842.
YU Boping，LI Gaohua，XIE Liang，et al. Dynamic stall optimization design of rotor airfoil based on surrogate model[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science)，2020，54(4)：833-842.

[17] LIU Pengyin，YU Guohua，ZHU Xiaocheng，et al. Unsteady aerodynamic prediction for dynamic stall of wind turbine airfoils with the reduced order modeling [J]. Renewable Energy，2014，69：402-409.

[18] JING Simeng，ZHAO Qijun，ZHAO Guoqing，et al. Multi-objective airfoil optimization under unsteady-freestream dynamic stall conditions[J]. Journal of Aircraft，2023，60(2)：293-309.

[19] GHARALI K，JOHNSON D A. Numerical modeling of an S809 airfoil under dynamic stall，erosion and high reduced frequencies[J]. Applied Energy，2012，93：45-52.

[20] BUTTERFIELD C P，SIMMS D，HUYER S. Recent results from data analysis of dynamic stall on wind turbine blades[R]. Golden，CO，USA：National Renewable Energy Laboratory，1992.

[21] RAMSAY R F，HOFFMANN M J，GREGOREK G M. Effects of grit roughness and pitch oscillations on the S809 airfoil[R]. Golden，CO，USA：National Renewable Energy Laboratory，1995.

[22] KULFAN B M. Universal parametric geometry representation method[J]. Journal of Aircraft，2008，45(1)：142-158.

[23] SHI Lei，YANG R J，ZHU Ping. A method for selecting surrogate models in crashworthiness optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization，2012，46(2)：159-170.

[24] LIO W H，LI Ang，MENG Fanzhong. Real-time rotor effective wind speed estimation using Gaussian process regression and Kalman filtering[J]. Renewable Energy，2021，169：670-686.

[25] RASMUSSEN C E，WILLIAMS C K I. Gaussian processes for machine learning[M]. Cambridge，MA，USA：MIT Press，2006.

[26] JONES D R，SCHONLAU M，WELCH W J. Efficient global optimization of expensive black-box functions[J]. Journal of Global Optimization，1998，13(4)：455-492.

[27] BELAMADI R，DJEMILI A，ILINCA A，et al. Aerodynamic performance analysis of slotted airfoils for application to wind turbine blades[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2016，151：79-99.

[28] CORKE T C，THOMAS F O. Dynamic stall in pitching airfoils：aerodynamic damping and compressibility effects[J]. Annual Review of Fluid Mechanics，2015，47：479-505.

[29] ZHONG Junwei，LI Jingyin，GUO Penghua，et al. Dynamic stall control on a vertical axis wind turbine aerofoil using leading-edge rod[J]. Energy，2019，174：246-260.

(上接第 66 页)

ZHAO Liang，LI Ying，ZHU Xiaojing，et al. Numerical analysis of structure parameter effects of a centrifugal nozzle on the spray characteristics[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2019，40(1)：156-163.

[13] 邱贵霞，侯力，易宗礼，等. 离心喷嘴喷口结构参数对雾化性能的影响分析[J]. 推进技术，2020，41(12)：2782-2789.
QIU Guixia，HOU Li，YI Zongli，et al. Effects of structure parameters of centrifugal nozzle on atomization performance[J]. Journal of Propulsion Technology，2020，41(12)：2782-2789.

[14] 付文锋，蔡泽萍，王蓝婧，等. 旋流结构参数对压力旋流喷嘴雾化特性影响的数值模拟[J]. 华北电力大学学报，2025，52(1)：126-134.
FU Wenfeng，CAI Zeping，WANG Lanjing，et al. Numerical simulation of influence of swirl structure parameters on atomization characteristics of pressure swirl nozzle[J]. Journal of North China Electric Power University，2025，52(1)：126-134.