

# 低压旋流喷嘴喷雾特性数值仿真及结果分析

董星涛, 孙 磊, 卢德林, 李 超, 王长志  
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 为了提高旋流喷嘴在低压下的雾化效果, 对影响低压旋流式喷嘴的 5 个因素: 旋流室直径  $D$ 、旋流室高度  $H$ 、喷嘴出口直径  $d$ 、喷嘴出口长度  $l$  和旋流室入口数量  $n$  进行了研究。以正交试验方案确定了数值模拟的 16 组喷嘴结构参数组合。用 Gambit 进行了非结构网格划分, 入口边界设为压力入口,  $p_0=0.3$  MPa, 用 fluent 6.3 进行了仿真计算。对仿真结果运用正交试验的极差分析方法, 获得了 5 个参数对喷嘴出口轴向速度和雾化角的影响程度排列顺序和最优参数组合。最后经过综合分析得到了 4 组优化的参数组合。研究表明, 该研究为低压旋流喷嘴进一步的实验研究奠定了基础。

**关键词:** 旋流喷嘴; 喷雾特性; 正交试验设计; 数值模拟

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)11-1306-04

## Numerical simulation and results analyzing on low-pressure swirl nozzle spray characteristics

DONG Xing-tao, SUN Lei, LU De-lin, LI Chao, WANG Chang-zhi

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In order to improve the swirl nozzle atomization under low pressure, the five factors which affecting the low-pressure swirl nozzle atomization were investigated, which were swirling chamber diameter  $D$ , swirling chamber height  $H$ , nozzle exit diameter  $d$ , nozzle exit length  $l$  and swirling entrance number  $n$ . Sixteen groups of nozzle structural parameters were designed by the way of orthogonal experimental design. The unstructured mesh was gotten with Gambit, the inlet boundary conditions is pressure-inlet and the gauge total pressure is 0.3 MPa. the simulation was carried out with fluent6.3 software. The results of the simulation were analyzed through the range analysis method of orthogonal experiment and the order of the influence that the five factors have on the nozzle axial speed and the spray angle was obtained, the optimal parameters was also gotten through the simulation results analyzing. Finally, with the comprehensive analysis, four groups of optimal parameters were gained. The results show that the analysis lays the foundation for the further experimental study of the low-pressure swirl nozzle.

**Key words:** swirl nozzle; spray characteristic; orthogonal experimental design; numerical simulation

## 0 引 言

家用喷雾器可用于喷洒各种杀虫剂、香水、除臭剂等水剂、油剂液体, 在家庭、宾馆及小型公共场所用于蚊蝇消灭、环境消毒、湿度调节、花卉喷淋、食用菌喷湿等用途<sup>[1]</sup>, 喷嘴部分的旋流结构和参数很大程度上影响了喷雾器的喷雾特性。闫云飞<sup>[2]</sup>等用实验方法研究了石灰浆液雾化旋流喷嘴, 冉景煌<sup>[3]</sup>等提出了渐扩切向槽旋流喷嘴, 尹俊连<sup>[4]</sup>等为揭示旋流喷嘴内部

流场机理进行了数值仿真和实验研究, 还有关于高压旋流方面的研究<sup>[5-7]</sup>, Park<sup>[8]</sup>提出了一种计算液滴尺寸分布的非线性模型, Nuyttens<sup>[9]</sup>和 Paineye<sup>[10]</sup>也进行了相关研究。目前的喷雾器存在很多问题, 靠灌装高压使液体雾化的喷雾器存在易爆炸等安全隐患, 在施药方面, 由于喷嘴结构不适或参数不优化, 喷雾产生较大粒子, 在距喷嘴近处降落地面, 能击中目标物的粒子很少, 影响杀虫效果, 而且还造成药剂浪费和环境污染。

收稿日期: 2011-05-27

作者简介: 董星涛(1962-), 男, 浙江宁波人, 副教授, 主要从事 CAD/CAM 和快速成型技术方面的研究。E-mail: amt00@zjut.edu.cn

所以,研究低压下雾化效果好的喷雾喷嘴很有必要,由于本研究所涉及的因素水平组合过多,直接进行实验研究,成本高,周期长,故笔者采用数值仿真的方法,探究其中的规律,找出最佳的组合参数,以指导相应的实验研究。

## 1 喷嘴结构及其几何参数正交实验设计

### 1.1 低压旋流喷嘴结构参数分析

根据旋流式喷嘴的设计方法<sup>[1]</sup>,喷嘴的结构如图 1 所示。液体由旋流室入口进入旋流室,其在旋流室内既有轴向运动,又有旋转运动,最后经喷孔喷出形成雾化喷雾。

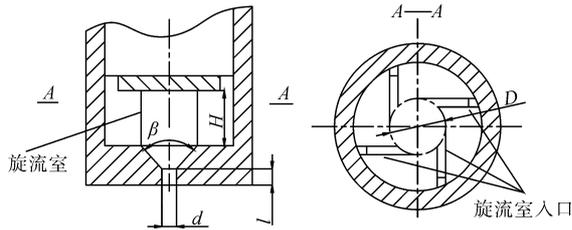


图 1 实验用喷嘴结构图

$D$ —旋流室直径; $H$ —旋流室高度; $d$ —喷嘴出口直径; $l$ —喷嘴出口长度; $\beta$ —旋流室前角; $n$ —旋流室入口个数

旋流室入口截面为正方形,多数学者研究认为,旋流室入口长度  $L$  和宽度  $b$  的比值在  $0.9 \sim 7$  时,其对流量系数影响较小,一般认为其最佳的比值  $L/b = 3$ <sup>[12-13]</sup>。经过计算可得,喷嘴结构尺寸范围如表 1 所示。

本研究取旋流室直径  $D$ 、旋流室长度  $H$ 、喷嘴出口直径  $d$ 、喷嘴出口长度  $l$ 、旋流室入口个数  $n$  为实验因素,每个因素取 4 个水平,把实验中的 5 个因素,  $D$ 、 $H$ 、 $d$ 、 $l$  和  $n$  分别命名为 A、B、C、D 和 E,正交试验因素水平组合如表 2 所示。

表 1 低压旋流式雾化喷嘴结构尺寸的取值范围

参数	旋流室		喷嘴出口		旋流室入口长宽比	进口压力 $P/\text{MPa}$	旋流室前角 $\beta/(\circ)$
	直径 $D/\text{mm}$	长度 $H/\text{mm}$	直径 $d/\text{mm}$	长度 $l/\text{mm}$			
取值范围	2.5~4	1~4	0.3~1.5	0.5~2	0.9~7	0.3	120

表 2 喷嘴结构参数因素水平组合表

水平	因素				
	A( $D$ )	B( $H$ )	C( $d$ )	D( $l$ )	E( $n$ )
1	2	1	0.3	0	2
2	2.5	1.5	0.5	0.5	3
3	3	2	0.8	1	4
4	3.5	2.5	1.2	1.5	5

本研究仅考察 5 个因素对喷雾特性的独立影响,不考虑各个因素之间的交互作用,故选择  $L_{16}(4^5)$  正交表。

## 2 喷嘴雾化数值模拟及结果分析

喷嘴三维建模在 SolidWorks 中完成,本研究用 Gambit 对这 16 个喷嘴进行网格划分,其中 9 号喷嘴非结构网格划分如图 2 所示。雾化液体为普通的水。本研究的仿真模型对实际物理现象进行了如下假设<sup>[14]</sup>:

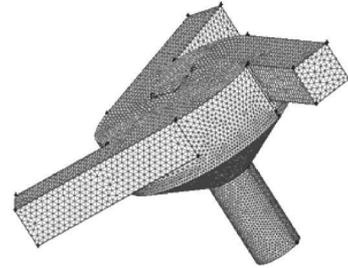


图 2 9 号喷嘴非结构网格

- (1) 液体为连续不可压缩介质;
- (2) 喷嘴入口和出口的势能差很小,可以忽略不计;
- (3) 在旋流室中没有液流的脱壁现象,即进口流量系数为 1;
- (4) 液体的表面张力较小,理论方程中表面张力项可以忽略不计;
- (5) 不考虑质量力的影响。

本研究考虑到网格划分的可实现和计算效率,一律采用分区域非结构化网格划分,不同区域网格密度不同,喷嘴出口处及附近流场的网格密度较大。喷嘴出口的网格大小为 0.05,其余为 0.1。湍流模型选择 RNG  $k-\epsilon$  模型。由于液体在旋流室内做旋转流动会形成空气芯,为了保证模拟的可靠性,仿真过程采用两相流模型。VOF 方法特别适合水为第一相流体,空气为第二相流体的研究,故采用 VOF 模型。入口边界设为压力入口,  $p_0=0.3 \text{ MPa}$ ,  $v_0=0.2 \text{ m/s}$ ; 初速度矢量方向与入口截面垂直。固定壁面处采用无滑移条件,即  $u=0, v=0$ 。壁面的表面粗糙常数设为 0.5。出口边界为压力出口,表压为 0,回流体积分数  $F=1$  (即回流均为空气),并计算出口回流湍流度和水力直径。方程的离散化与求解采用控制体积公式法。本研究对流项、扩散项采用一阶迎风格式离散,源项采用中心差分进行线性化处理,为避免离散中带来的假扩散,体积分数方程采用 3 阶 QUICK 格式进行离散,  $k$  方程和  $\epsilon$  方程均采用一阶迎风格式离散,压力相采用 PRESTO 方式离散。流场计算采用 SIMPLE 算法,在 SIMPLE 算法迭代过程中,由于差分方程的非线性、变量之间的强耦合以及迭代初值的不合理等都可能导致计算过程发散。

通过采用欠松弛迭代法可以减弱参数变化的幅度,促进收敛。欠松弛因子在 0.5~1.0 之间取值。

本研究用 fluent6.3 对 1~16 号喷嘴进行数值模拟,喷嘴出口轴向速度和雾化角模拟结果如表 3 所示。

表 3 喷雾数值模拟结果

试验号	因素					模拟结果	
	A	B	C	D	E	出口轴向速度 / (m·s <sup>-1</sup> )	雾化角 / (°)
1	1(2)	1(1)	1(0.3)	1(0)	1(2)	21.46	82
2	1	2(1.5)	2(0.5)	2(0.5)	2(3)	23.94	2
3	1	3(2)	3(0.8)	3(1)	3(4)	21.13	24
4	1	4(2.5)	4(1.2)	4(1.5)	4(5)	18.45	40
5	2(2.5)	1	2	3	4	21.80	32
6	2	2	1	4	3	20.57	9
7	2	3	4	1	2	14.56	122
8	2	4	3	2	1	15.04	90
9	3(3)	1	3	4	2	15.69	75
10	3	2	4	3	1	14.00	82
11	3	3	1	2	4	22.31	15
12	3	4	2	1	3	22.98	95
13	4(3.5)	1	4	2	3	16.87	83
14	4	2	3	1	4	15.05	122
15	4	3	2	4	1	21.27	22
16	4	4	1	3	2	20.96	13

理论分析认为,喷雾射程取决于喷嘴出口轴向速度,轴向速度越大,射程越远。根据模拟结果,1~16 号喷嘴可以分为两类:

(1) 实心型。1、2、3、4、5、6、11、12、15、16 号喷嘴的出口轴向速度分布是周边小,中心大,典型代表如图 3 所示,其为 2 号喷嘴轴向速度梯度分布图。说明液体在流经喷嘴出口后出现集聚现象,形成一段液柱后在发散形成雾化角。其喷雾形状往往是实心的。

(2) 空心型。7、8、9、10、13、14 号喷嘴的出口轴向速度分布则是中心小,周边大。典型代表如图 4 所示,其为 7 号喷嘴轴向速度梯度分布图。该图说明液体经过旋流室的旋转流动后直接在喷嘴出口出现发散现象。其喷雾形状一般是空心圆锥形。

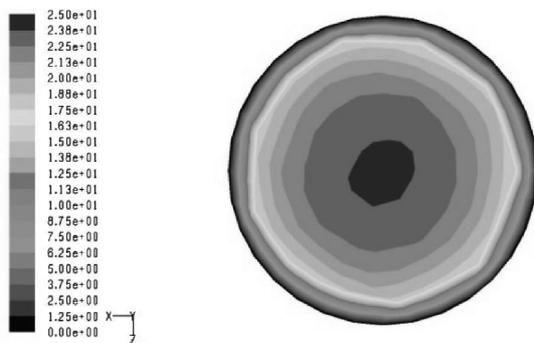


图 3 2 号喷嘴速度梯度分布图

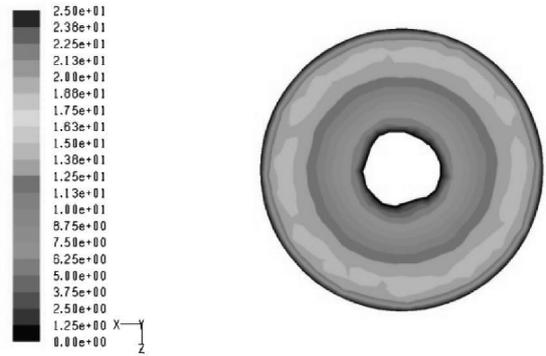


图 4 7 号喷嘴速度梯度分布图

本研究对模拟结果运用正交试验的极差分析法,5 个因素对喷嘴出口速度的影响程度由强到弱的顺序为:C,A,E,B,D。当  $C_2=0.5$  mm,  $A_1=2$  mm,  $E_3=4$ ,  $B_3=2$  mm,  $D_2=0.5$  mm 时,喷嘴有最大出口速度,对喷嘴雾化角影响程度由强到弱的顺序为:D,C,A,B,E。当  $D_1=0$  mm,  $C_4=1.2$  mm,  $A_3=3$  mm,  $B_1=1$  mm,  $E_1=2$  时,喷嘴的雾化角最大。喷嘴出口的轴向速度与雾化角成反比,喷嘴出口的旋转速度与雾化角成正比关系。下面根据因素的影响主次,确定最佳水平值。

对于 A 因素,其对喷嘴出口速度影响排第 2 位,而对雾化角影响排在第 3 位,则 A 因素取  $A_1$ 。同理,对于 B 因素,其对喷嘴出口速度和雾化角影响都排第 4 位,则 B 因素取  $B_3$  或  $B_1$ 。C 因素取  $C_2$ 。D 因素取  $D_1$ ,但是,  $D_1=0$  mm,考虑到喷嘴加工的工艺性,取  $D_1$  和  $D_2$  分别做比较。E 因素取  $E_3$ 。

综上,理论最优喷嘴结构参数组合为  $A_1B_1C_2D_1E_3$  和  $A_1B_3C_2D_1E_3$ ,加工工艺性较好的最优喷嘴结构参数组合为  $A_1B_1C_2D_2E_3$  和  $A_1B_3C_2D_2E_3$ 。

### 4 结束语

本研究通过对影响低压旋流喷嘴雾化效果的结构参数的数值模拟和结果分析,可得到如下结论:

(1) 不考虑因素间的相互影响,5 个因素对喷嘴出口速度的影响程度由强到弱的顺序为:C,A,E,B,D,当  $C_2=0.5$  mm,  $A_1=2$  mm,  $E_3=4$ ,  $B_3=2$  mm,  $D_2=0.5$  mm 时,喷嘴有最大出口速度;对喷嘴雾化角影响程度由强到弱的顺序为:D,C,A,B,E,其中选择  $D_1=0$  mm,  $C_4=1.2$  mm,  $A_3=3$  mm,  $B_1=1$  mm,  $E_1=2$  时,喷嘴的雾化角最大。

(2) 根据多指标正交试验极差分析法,理论上最佳的喷嘴结构参数组合有两组: $A_1B_1C_2D_1E_3$  和  $A_1B_3C_2D_1E_3$ ,加工工艺性较好的最优喷嘴结构参数组合为  $A_1B_1C_2D_2E_3$  和  $A_1B_3C_2D_2E_3$ 。

该研究取得了 4 组优化的喷嘴参数组合,减少了实验研究的盲目性,对低压旋流喷嘴进一步的实验研究具有指导意义,达到了预期的目的。

## 参考文献(References):

- [1] 刘耀林,张舜德,李华. 喷雾器喷嘴流场仿真研究[J]. 轻工机械,2008,26(1):20-23.
- [2] 闫云飞,张力,高振宇,等. 低压旋流雾化喷嘴的雾化性能[J]. 化工学报,2009,60(5):1141-1147.
- [3] 尹俊连,焦磊,仇性启,等. 旋流喷嘴内部流场的数值模拟和实验研究[J]. 浙江大学学报:化学版,2009,43(5):968-972.
- [4] 冉景煌,张力,辛明道,等. 渐扩切向槽式低压旋流喷嘴流场数值模拟[J]. 工程热物理学报,2002,23(5):586-588.
- [5] 石庆宏,叶世超,张登平,等. 旋转压力式喷嘴喷雾特性的实验研究[J]. 高校化学工程学报,2005,19(6):851-854.
- [6] 周华,朱畅,范明豪,等. 高压旋芯喷嘴的雾化特性[J]. 农业机械学报,2006,37(1):63-66.
- [7] 周文会. 高压水射流喷嘴内外流场的数值模拟研究[D]. 兰州:兰州理工大学机械电子工程学院,2008.
- [8] PARK K S, HEISTER S D. Nonlinear modeling of drop size distributions produced by pressure-swirl atomizers[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010(36): 1-12.
- [9] NUYTENS D, BAETENS K, SCHAMPHELEIRE M D, et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics [J]. *Biosystems Engineering*, 2007 (97): 333-345.
- [10] PAINE M D, ALEXANDER M S, JOHN P W. Stark nozzle and liquid effect on the spray model in nanoelectrospray[J]. *Journal of Colloid and Interface Sciences*, 2007(305):111-123.
- [11] 刘广文. 喷雾干燥实用技术大全[M]. 北京:中国轻工业出版社,2001.
- [12] 濮亚楠. ECPE 有效热效率和燃油消耗特性仿真[J]. 现代制造技术与装备,2010(4):30-32.
- [13] 高振宇. 液固两相低压旋流雾化喷嘴数值模拟与实验研究[D]. 重庆:重庆大学动力工程学院,2006.
- [14] 刘志超. 直通式旋流细水雾喷嘴雾化理论分析及灭火实验研究[D]. 成都:西南交通大学机械工程学院,2007.
- [编辑:张翔]
- (上接第 1305 页)
- [5] GOKDERE L U, BENLYAZID K, DOUGAL R A, et al. A virtual prototype for a hybrid electric vehicle [J]. *Mechatronics*, 2002(12):575-593.
- [6] BAUMANN B M, WASHINGTON G, GLENN B C, et al. Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000,5 (1):58-72.
- [7] BERCKMLER M, ROTTENGNEBER H, AETAL E. Potentials of a Charged SI-Hydrogen Engine [N]. SAE Paper, 2003.
- [8] TANG Xiao-guo, KABAT D M, NATKIN R J, et al. Ford P2000 Hydrogen Engine Dynamometer Development [C]. SAE, 2002.
- [9] ENDO H, ITO M, OZEKI T. Development of Toyota's transaxle for mini-van hybrid vehicles[J]. *JSAE Review*, 2003(24):109-116.
- [10] CHAU K T, WONG Y S. Overview of power management in hybrid electric vehicles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2002(43):1953-1968.
- [11] ROBERT F N. Power requirements for batteries in hybrid electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2000(91): 2-26.
- [12] 俞明,罗玉涛,黄榕清. 一种混联式电动汽车驱动系统[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2001,29(8):90-92.
- [13] 沈继军,俞明,黄榕清. 一种混联式混合动力汽车驱动系统的性能分析[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2002,30(6):94-97.
- [14] AKIHIRO K, TETSUYA A, SHOICHI S. Drive force control of a parallel-series hybrid system[J]. *JSAE Review*, 1999(20):337-341.
- [15] 姚春德,李云强. 甲醇燃料在柴油机中的应用与发展[J]. 小型内燃机与摩托车,2004 (1):37-40.
- [16] 乔建刚,杨敦荣. 液压挖掘机的节能技术[J]. 现代机械, 2002 (2):78-80.
- [17] 拉米尼,迪克斯. 燃料电池系统-原理·设计·应用[M]. 朱红,译. 2版.北京:科学出版社,2006.
- [18] YANG Zhen-zhong. Combustion and Optimizing Control in a Hydrogen Fueled Engine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [19] AKAGAWA H, HIROYUKI I I, OSAFUNE S, et al. Development of Hydrogen Injection Clean Engine[M]. Yokohama: [s.n.], 2004.
- [20] VERHELST S, ASPECTS S R. Concerning the Optimisation of a Hydrogen Fueled Engine [M]. Beijing: [s.n.], 2000.
- [21] YANG Zhen-zhong, LI Jing-ding. Research on the optimizing control technology based on fuzzy neural network for hydrogen fueled engines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006,31 (15):2370-2377.
- [22] LEE S J, YI H S, KIN E S. Combustion characteristics of in take port injection type hydrogen fueled engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1995,20 (4):317-322.
- [编辑:张翔]