[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.04.004

低压旋流喷嘴流场特性的数值仿真分析

欧长劲,李 燕,苏之晓,董星涛

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学),浙江杭州 310014)

摘 要:针对以水为单介质流体的螺旋旋流雾化喷嘴的流场特性,采用 VOF 方法,建立了低压旋流喷嘴内流场的三维流 动数学模型。通过改变旋流喷嘴的螺旋体长度、入口槽道截面积、螺旋升角、螺旋槽形状、旋流室内锥角等不同的结构参 数,对雾化喷嘴的压力场、速度场进行数值分析仿真,得到了螺旋旋流雾化喷嘴的结构参数对流场特性的影响规律。研 究结果对低压旋流喷嘴的设计与开发具有指导意义。图 15 表 1 参 10

关键 词:流体力学;单流体模型;低压旋流喷嘴;数值分析

中图分类号:TB126;TQ051 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2012)04-0012-06

Numerical Simulation Analysis on Flow Field Characteristics of Low Pressure Swirl Nozzle

OU Chang-jin, LI Yan, SU Zhi-xiao, DONG Xing-tao

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhoug 310014, China)

Abstract: According to the fluid field characteristics of spiral swirl nozzle, using the VOF model, the three-dimensional flow mathematical model of internal flow field in swirl nozzle was established with the water as the working fluid of atomization. By means of adjusting the helicoids length, entry slot way sectional area, spiral angle, spiral groove shape and inner cone angle of swirl-chamber, different velocity fields, pressure fields and atomization angles of spray nozzle were carried out to study the effect of the structure parameters to the flow characteristics of the spiral swirl nozzle. The research result is useful for the design and development of the low pressure swirl nozzle. [Ch, 15 fig. 1 tab. 10 ref.] **Key words**; fluid dynamics; single-fluid model; low pressure swirl nozzle; numerical calculation

0 引言

利用喷嘴进行液体的雾化是一种常见的工程技 术,覆盖了从射流清洗、水雾灭火、喷雾干燥到雾化燃 烧、喷水冷却、农药喷洒等工程领域^[1]。压力旋流雾 化喷嘴以其结构简单、雾化性能好、成本低的特点而应 用广泛。近年来,在家用喷雾罐领域的应用中,由于高 压灌装的结构存在易爆炸等安全隐患,不便长途运输 与携带,使得人们越来越青睐低压喷嘴^[2]。由于喷雾 特性涉及的因素众多,喷嘴雾化特性参数的研究在以 往主要通过对实物的实验方法来进行^[34],便于直观获 取喷嘴雾化特性参数,但由于对实物实验方法的研究 周期和成本较高,存在着明显的局限性。随着计算机 和数值计算技术的发展,20世纪 90 年代之后一些学 者开始运用数值方法对旋流式喷嘴的内流场特性进行 研究^[56]。但在低压家用喷雾器领域,这方面的研究研 究尚少。为此,笔者针对低压螺旋旋流喷嘴结构,建立 了低压旋流喷嘴内流场的三维流动数学模型,并针对 其结构参数对喷嘴流场特性影响进行数值仿真分析研 究,为低压家用喷雾器旋流喷嘴的设计和优化提供 指导。

1 物理模型

所研究的低压旋流喷嘴结构示意图如图1所示, 该喷嘴是由喷嘴主体和螺旋体组合而成。液体经圆形 进液通道通过喷嘴入口分流进入螺旋槽中,经螺旋槽 旋转后,沿切线方向流入旋流室产生高速旋流,经喷孔 喷出形成旋转雾化雾炬。图1中旋流喷嘴的主要结构

收稿日期:2011-09-19;修回日期:2012-01-09

作者简介:欧长劲(1956),男,浙江杭州人,教授,主要从事 CAD/CAM 和机电一体化方面的研究。E-mail:jxliyan1986@163.com

参数通径 D 为 6 mm, 螺旋体由 3 个沿圆周成 120°角 均布的凹槽组成; 喷孔的直径 d 为 0.5 mm, 长度 l 为 0.5 mm。通过改变旋流喷嘴的结构参数, 如螺旋体的 长度 L、入口槽道截面积 A、螺旋升角 β 、螺旋槽形状、 旋流室内锥角 α 等参数, 采用软件 Fluent 6.2.16 对喷 嘴雾化的速度场、压力场进行数值模拟仿真, 确定旋流 喷嘴雾化的流场特性规律, 据此对雾化喷嘴的结构参 数进行优化。







2.1 模型假设

对所旋流喷嘴的的流场作了如下假设:①流场为 稳定的等温流场,不考虑能量交换,介质为常温不可压 缩液体(水);②喷嘴入口和出口的势能差很小,可以 忽略不计;③忽略质量力的影响。

2.2 控制方程

液体从螺旋流道进入旋流室后,形成一个紧贴壁 面的旋转液膜,由于旋转液膜的卷吸对喷嘴出口处的 环境气体形成抽吸作用,轴线附近会出现一个气锥,即 空气芯。为了模拟结果的真实性,文中采用适合于模 拟旋流式喷嘴的简单高效的 VOF 模型,且使用 VOF 模型中的 Euler 隐式格式处理。

基于以上模型的假设,流体在螺旋槽及内锥形通 道内满足如下动力学方程组^[7]:

1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho u_{i})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_{i}u_{j})}{\partial x_{i}} = -\frac{\partial\rho}{\partial x_{i}} + \frac{\partial\mu}{\partial x_{i}} \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}}\right) + \rho g_{j} + F_{j}$$
3) 体积分数方程
$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_{i}\frac{\partial F}{\partial x_{i}} = 0$$
The set F_{i} (体积分数 i f_{i} i f_{i} f_{i} f_{i} f_{i}

2.3 *κ-ε*/RNG 模型

RNG κ-ε 模型是由 Yakhot 和 Orag^[8]等人将 RNG 理论用于研究湍流问题而提出的一种标准 κ-ε 模型的 改进形式。高雷诺数时, RNG κ-ε 模型与标准 κ-ε 模 型具有相同的形式,但在方程中出现一个新的附加生 成项,当流动快速畸变时这一项明显增大,在一定程度 上改进了对复杂湍流问题的模拟效果,且可以更好地 处理应变率及流线弯曲程度较大的流动。控制方程的 具体形式如下

$$\rho \frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \Big[\left(\alpha_k \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \Big] + G_k - \rho \varepsilon$$
$$\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \Big[\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \Big] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R$$

式中 α_k 和 α_s 分别是湍动能 κ 和耗散率 ε 的有效湍流 普朗特数的倒数。

湍流黏性系数计算公式为

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1.72 \frac{\tilde{v}}{\sqrt{\tilde{v}^3 - 1 - Cv}} d\tilde{t}$$

式中 $\tilde{v} = \mu_{eff}/\mu, C_v \approx 100_{\circ}$

在 Fluent 中,RNG 模型中默认值常数: $C_u = 0.0845$, $C_{1e} = 1.42, C_{2e} = 1.68_{\circ}$

2.4 边界条件

ρ

边界条件设置如下:采用压力入口,总压为0.4 MPa,湍流强度为6%,水力直径为6 mm;出口为压力 出口,表压为0.1 MPa,回流体积分数 F = 1(即回流均 为空气),回流湍流强度为5%,水力直径为0.5 mm; 壁面处采用无滑移条件,用标准壁面函数法处理。

3 数值求解方法

3.1 网格划分

针对旋流雾化喷嘴内流场几何模型的复杂结构, 按喷嘴的结构采用分块非结构化网格划分,在旋流室 及喷孔处进行局部网格加密,整个模型划分网格单元 数 155 770 个,节点数 124 248 个,划分后的网格如图 2 所示。

3.2 方程离散化与求解

采用控制容积法对各方程进行离散化,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^[9],κ方程和ε方程 均采用一阶迎风格式离散,压力相采用BodyForce Weighted方式离散,求解采用SIMPLE算法进行计算。 由于在SIMPLE算法的迭代过程中,差分方程的非线 性、变量间的强藕合及迭代初值的不合理等都可能导



图 2 计算网格划分 Figure 2 Calculation grads meshing

致计算过程发散,故应合理设置欠松弛因子,以促进收 敛,欠松弛因子 α 在 0.5 ~ 1.0 之间取值,所以 Fluent 6.2.16 的求解面版中各项的欠松弛因子如表 1。

Table 1 Relaxation factor

参数	压强	密度	体积力	动量	体积分	湍流动	湍流耗	黏度
	P	ρ	F_B	M	数 V_F	能 <i>к</i>	能率 ε	V_i
松弛因子	0.3	1	1	0.5	0.1	0.7	0.7	0.8

4 模拟结果与分析

4.1 螺旋体长度 L 对雾化特性的影响

取同样的压力入口和压力出口值,保持其他参数 值不变,改变螺旋体长度。分别取螺旋体长度 L 为 2 mm,3 mm,4 mm,5 mm,6 mm,通过模拟仿真,获得不 同螺旋体长度下旋流喷嘴的出口速度,如图 3 和图 4 所示。





由图 3 可知,螺旋体长度对喷嘴出口轴向速度的 影响不大,其中 L = 4 mm 时,出口中心单元速度明显



图 4 不同螺旋体长度喷嘴出口切向速度 Figure 4 Nozzle exit tangential velocity of the different helicoids length

高于其他长度时的喷嘴。由图 4 可知,喷嘴长度是 4 mm 时,旋流喷嘴的出口切向速度明显大于其他螺旋体长度时的出口切向速度。

不同螺旋长度时喷嘴喷雾的雾化角度大小如图 5 所示,由图可知,螺旋体长度对喷嘴雾化角度影响不 大,且 *L* 为 4 mm 时所对应的雾化角度最大。因此,螺 旋旋流雾化喷嘴的较适合螺旋体长度为 4 mm。







4.2 螺旋槽入口截面积 A 对雾化特性的影响

改变圆弧型螺旋槽直径,分别取 d 为 1.2 mm,1.4 mm,1.6 mm,1.8 mm 和 2.4 mm。通过模拟仿真,获得 不同圆弧型螺旋槽直径所对应的入口截面积情况下旋 流喷嘴的出口速度如图 6 和图 7 所示。

由图6中可知,螺旋槽入口截面积对喷嘴出口轴 向速度有较大的影响。随着圆弧槽直径的增大,喷嘴 出口轴向速度逐渐增大,且在圆弧槽直径从1.6 mm









到1.8 mm时,喷嘴出口轴向速度的大小及形状有明显的突变,之后几乎不变。由图7中可知,当圆弧槽直径从1.2 mm增大到1.6 mm时,喷嘴出口切向速度逐渐增大且圆弧槽直径为1.4 mm和1.6 mm时2者切向速度大体相当。当圆弧槽直径为1.8 mm和2.4 mm时喷嘴出口切向速度也有明显的突变,且其切向速度几乎为0。结合2图可知,减小圆弧槽直径可以有效增大湍流的程度,但太大的湍流程度会增大出口中心形成返流空心的趋势,使雾化形成空心锥体的效果。若随意增大圆弧槽直径,又容易过分增大出口轴向速度,使雾化角减小,严重时甚至无法形成雾化锥体。可见,对于螺旋旋流喷嘴,螺旋槽入口截面积的大小存在一个合适的范围。

雾化角及螺旋槽道的压力损失随喷嘴入口截面圆 弧槽直径的变化关系如图 8 所示,由图可知,圆弧槽直 径越小,雾化角越大,槽道压力损失也总体呈增大的趋势,但在圆弧槽直径为 1.6 mm 时,压力损失出现了减 小的趋势。因此,按文中的螺旋喷嘴结构,圆弧槽直径 为1.6 mm 时较为合适。





改变螺旋槽的螺旋升角,分别取螺旋升角为 20.0°,23.0°,32.5°,40.0°,通过模拟仿真,可获得不 同螺旋升角下旋流喷嘴的出口速度,如图9和图10所 示。螺旋升角对雾化角及压力损失的影响如图11所 示。



the different spiral angle

由图9中可知,螺旋升角对喷嘴出口轴向速度分 布影响较大,随着螺旋升角的减小,喷嘴出口轴向速度 减小,且中心单元处的速度明显低于边缘处速度,特别 是当螺旋升角为23.0°和20.0°时,出口轴向速度呈明 显的马鞍型分布。这是因为流体通过螺旋体进入旋流 室后旋转,对喷嘴出口处的环境气体发生卷吸作用。 由图10中可知,螺旋升角为32.5°时的喷嘴出口切向 速度最大,然后是20.0°和23.0°的升角,螺旋升角为 40.0°时的出口切向速度最小。理论上出口切向分量







图 11 螺旋升角对雾化角及压力损失的影响 Figure 11 Influence of the spiral angle to the atomization angle and the pressure loss

越大,雾化效果越好,且雾化角也更大^[10]。从图 11 中 可知,螺旋升角越小,喷嘴雾化角越大,但压力损失也 更严重。可见,对于螺旋旋流喷嘴,螺旋升角存在一个 合适值,当螺旋升角为 32.5°时,能够达到一个较好的 雾化角且压力损失较小。

4.4 螺旋槽形状对雾化特性的影响

改变螺旋槽形状,分别取螺旋槽形状为矩形与梯 形,但保持2种形状的入口总截面积A不变。通过模 拟仿真,可获得不同螺旋槽形状时旋流喷嘴的出口速 度,如图12和图13所示。

由图 12 可知,矩形槽与梯形槽的出口轴向速度大体相当,且明显大于圆弧槽,但图 13 显示,矩形槽与梯形槽的出口旋流速度几乎为 0,而圆弧槽的出口旋流 明显大于 2 者。综合而言,圆弧槽流道明显优于矩形



图 12 不同螺旋槽形状喷嘴出口轴向速度 Figure 12 Nozzle exit axial velocity of the different spiral groove shape



槽流道。

4.5 不同内锥角 α 对雾化特性的影响

同样改变旋流室内锥角角度,分别取旋流室内锥 角为90°、110°、120°和130°。通过模拟仿真,可获得 不同旋流室内锥角的旋流喷嘴的出口速度,如图14和 图15 所示。

由图 14 可以看出,旋流室内锥角为 90°和 110°时 的出口轴向速度相对较大,且两者大体相当。当内锥 角从 110°到 130°时,喷嘴出口速度大小及形状分布有 了明显突变,且内锥角为 120°时喷嘴出口轴向速度较 为平坦。这说明旋流室内锥角越小整流作用越好。由 图 15 中不同旋流室内锥角对喷嘴出口切向速度分布 图可以发现,120°喷嘴的切向速度最大,其次是 130°, 角度为 90°和 110°时喷嘴的切向速度几乎为 0。这也 说明小角度的旋流室在整流的同时也降低了喷嘴出口 的切向速度,而切向速度小不利于雾化。综合起来看, 旋流室内锥角以 120°为佳。