

# 基于 CFD 的超声雾化喷嘴内部流场特性模拟

张 静<sup>1</sup>, 彭玉涛<sup>2</sup>, 刘邱祖<sup>3</sup>

(1. 冀中职业学院 机电工程系, 河北 定州 073000; 2. 中冶天工集团有限公司机电分公司, 河北 定州 073000; 3. 太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为了提高喷嘴的雾化效果, 将超声理论应用到液体射流雾化中, 建立超声雾化喷嘴内部流场特性的数值模型, 并运用流体仿真软件 CFD 模拟不同射流压力下喷嘴内部速度场的分布情况。数值计算结果表明, 超声波明显增强了喷嘴内部速度分布, 增强了湍流效果, 进而提高了液体的雾化能力。沿着喷嘴内部轴线方向, 速度呈先增大后减小的抛物线变化趋势, 随着液滴射流压力的增加, 内部速度和湍流效果得到加强, 这为超声雾化喷嘴的设计提供了良好的理论基础。通过比较其它类型的喷嘴, 超声喷嘴的雾化效率明显增强了很多, 这说明超声波应用于喷嘴雾化领域是可行的。

**关键词:** 超声喷嘴; 雾化特性; 速度分布

中图分类号: TK71 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2017)02-0020-04

numerical calculation results show that the ultrasonic velocity distribution obviously enhances the nozzle turbulence effect, thus improves the atomization of liquid. Along the axis of the nozzle inside, the parabolic trend of speed show increases firstly and then decreases. With the increase of droplet jet pressure, the internal velocity and turbulence effect is strengthened. The ultrasonic atomization nozzle design provides a good theoretical basis. By comparing to other types of nozzle, ultrasonic atomizing spray nozzle efficiency significantly increased, it shows that ultrasonic is applied to nozzle area is feasible.

**Keywords:** ultrasonic nozzle; atomization characteristics; velocity distribution

## Simulation on internal flow field characteristic of ultrasonic atomizer based on CFD

ZHANG Jing<sup>1</sup>, PENG Yutao<sup>2</sup>, LIU Qiuzu<sup>3</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Jinzhong Vocational College, Dingzhou 073000, China; 2. Electrical and Mechanical Branch, MCC Tiangong group Co., Ltd., Dingzhou 073000, China; 3. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to improve the effect of spray nozzle, the ultrasonic theory was applied to the liquid jet atomization, the numerical model of internal flow field characteristics of ultrasonic atomization nozzle were established, and the different nozzle jet pressure inside the distribution of velocity field were simulated by fluid simulation software CFD. The

近年来空气中持续增大的粉尘浓度给人们的生活和健康带来了严重危害, 尤其是 5  $\mu\text{m}$  以下的呼吸性粉尘容易随着呼吸进入人体内部<sup>[1-6]</sup>。由于它的粒径小、表面积大、活性强, 极易吸附重金属、微生物等有害有毒物质, 因此对人体健康的危害最大<sup>[7]</sup>。现阶段对于呼吸性粉尘的防治大多是采用水雾降尘措施, 通过喷嘴对液体水进行雾化, 从而实现雾滴对粉尘的捕集沉降<sup>[8]</sup>。

目前, 通过超声波进行雾化的原理都是基于哈德曼哨效应, 已经在许多领域应用开发, 许多学者的相关研究也取得了不错的成果<sup>[9-11]</sup>。张绍坤等<sup>[12]</sup>应用流体动力式超声雾化喷嘴, 分别对水和重油进行了相关雾化参数测定实验, 并且对同等气压下 2 种介质的雾化粒径进行了对比; 张小艳等<sup>[13]</sup>为了了解参数对超声雾化效果的影响, 开展了不同参数下的雾化试验系统研究, 并应用回归特性关系在试验数据的基础上分析建立了超声雾化性能的数学模型; Rai 等<sup>[14]</sup>通过对超音速气体雾化进行试验测试, 得出了液滴雾化时表面波的频率与雾化气体的振动频率变化规律基本一致。前人的研究主要在超声雾化模型以及雾化效果的衡量上, 对于超声雾化喷嘴内部流场的分析不多。为了认识喷嘴内部超声雾化机理, 运用流体仿真软件 CFD 模拟不同射流压力下超声雾化喷嘴内部速度场的分布。

收稿日期 2016-02-25, 修回日期 2016-03-20。

基金项目: 山西省自然科学基金项目, 编号 20140321014-02。

第一作者简介: 张静(1983—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为机械设计与理论。E-mail: 93763163@qq.com。

通信作者简介: 刘邱祖(1983—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为喷雾雾化及流体动力学。E-mail: liuqiuzu@126.com。

### 1 超声雾化原理

作为超声雾化喷嘴的原理构件,哈德曼哨是一种流体动力式超声波发生容器,它由射流喷嘴和超声波共振腔组成,超声喷嘴结构示意图 1 所示。当高速射流的液滴经与共振腔碰撞发生反弹后,与后面继续射流来的液体发生碰撞行为,进而产生水激波。由于共振腔类似于放大器,因此使得激波进行反复的加强,直至形成超声波。当有液体经过超声波区域时,便受其影响进而发生能量的变化反映,使得液滴破碎并雾化<sup>[15]</sup>。当超声波作用于液体内部时,在声压的作用下使得液体中产生了局部的负压区域,当这个负压克服了液体分子之间的结合力时,液体将被撕裂形成空化气泡。随着他们在超声波的振动下不断发展和溃灭,气泡周围会产生一定的热,除此之外还产生很强的激波,当激波达到一定强度后便开始了液体的雾化。

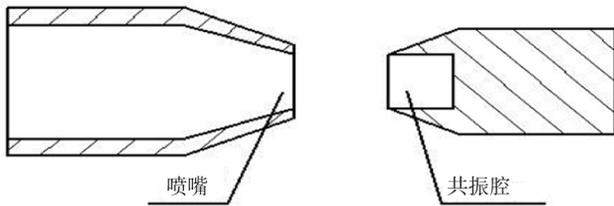


图 1 超声喷嘴结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of supersonic nozzle

### 2 数值模拟

#### 2.1 数学模型

由于超声雾化喷嘴内部液体的流动属于湍流领域,因此可以将液体介质看作连续体,采用的计算模型如下。

连续性方程为

$$\frac{\rho}{t} + \frac{(\rho u)}{x} = 0 \quad (1)$$

其中  $\rho$  为流体密度  $u$  为流体相速度  $x$  为流体位移。

动量方程为

$$\frac{(\rho u_i)}{t} + \frac{(u_i u_j)}{x_j} = \frac{p}{x_i} + \frac{[\mu(\frac{u_i}{x_j} + \frac{u_j}{x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{u_k}{x_k})] + (-\rho \overline{u'_i u'_j})}{x_j} \quad (2)$$

其中  $i, j, k$  为三维坐标系中的坐标方向  $p$  为流体压力  $\mu$  为流体动力粘度  $\delta_{ij}$  为单位张量。

雷诺应力  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  采用 Boussinesq 假设:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu (\frac{u_i}{x_j} + \frac{u_j}{x_i}) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho_k + \mu_t \frac{u_k}{x_k}) \quad (3)$$

标准  $k-\varepsilon$  模型湍动能和耗散率方程为

$$\frac{-(\rho k)}{t} + \frac{(\rho k u_i)}{x_i} = \frac{[(u + \frac{u_t}{\sigma_k}) \frac{k}{x_j}] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k}{x_j} \quad (4)$$

$$\frac{-(\rho \varepsilon)}{t} + \frac{(\rho \varepsilon u_i)}{x_i} = \frac{[(u + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\varepsilon}{x_j}] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon}{x_j} \quad (5)$$

其中  $G_k$  为由于平均速度梯度引起的湍动能  $G_b$  为由于浮力影响引起的湍动能  $Y_M$  为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响  $G_{1\varepsilon}, G_{2\varepsilon}, G_{3\varepsilon}$  为经验常数  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数。

#### 2.2 几何模型及参数设置

图 2 给出了仿真模型网格划分图。网格数为 1 2578,节点数为 3 285,射流喷嘴后正对着振荡腔。射流类型选取为压力雾化,计算参数见表 1 所示。

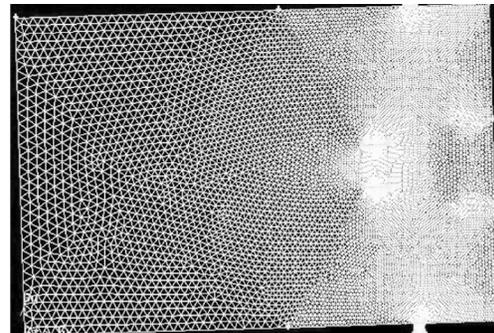


图 2 模型网格划分图

Fig. 2 Grid of model

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculation parameters

计算参数	数值
射流初速度/(m·s <sup>-1</sup> )	30
流体密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	998.2
流体运动粘滞系数/(kg·(m·s) <sup>-1</sup> )	0.001 003
外界气压/Pa	101 325
计算时间步长/s	1.0×10 <sup>-5</sup>
收敛判断标准	10 <sup>-3</sup>

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 超声雾化喷嘴内部湍流云图

观察超声雾化喷嘴内部液滴的湍流能力可以揭示超声雾化机理,体现湍流的关键因素是液体的流动速度,可以从速度矢量分布和速度云图两方面来进行分析,图 3 和图 4 分别给出了喷嘴口直径 2 mm、射流

压力 4 MPa 的条件下超声雾化喷嘴内部速度矢量分布和速度云图。

由图 3 和图 4 可知 :射流液柱撞击到振荡腔后发生了反弹 ,并与前来射流的液柱发生共振 ,形成了低频声波。气流速度强的地方能够明显提高湍流效果 ,这是因为在低速时 ,喷嘴产生的声波频率低 ,致使液滴的振动强度减弱 ,随着内部液滴速度的增大 ,共振腔产生的声波频率提高 ,频率可以达到 20 kHz ,此时水滴的雾化效果最佳。超声波致使喷嘴内部形成的湍流波会逐渐传动到整个喷嘴 ,层层叠加后形成很强的湍流效果 ,有助于降低喷嘴内部压力 ,进而提高液体的雾化效果。

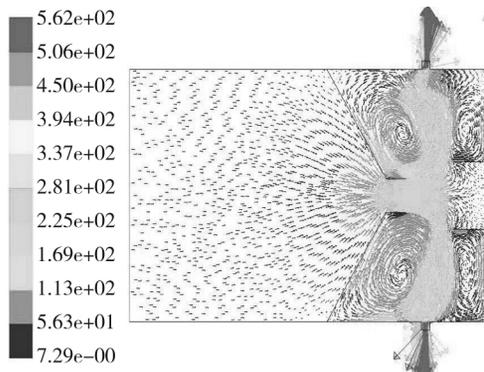


图 3 喷嘴内部速度矢量分布云图

Fig. 3 Velocity vector distribution cloud in nozzle inside

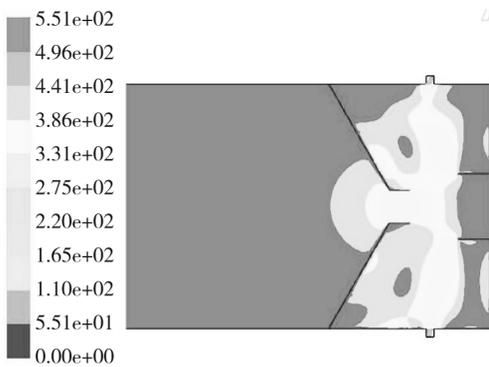


图 4 喷嘴内部速度云图

Fig. 4 Speed cloud in nozzle inside

### 3.2 喷嘴内部速度分布

超声波的传播是无法测试的 ,可以通过速度的传播来进行分析 ,也能取得合理的效果。为了进一步分析喷嘴内部速度分布情况 ,图 5 给出了在喷嘴内部轴线方向上的流速分布情况。由图 5 可知 :速度分布从喷嘴口开始呈现增大的趋势 ,最大值发生在 10 mm 左右 ,对照速度分布云图 ,此处正是湍流能力最强的地方。之后速度降低 ,这符合射流的基础理论。随着液滴

射流压力的增大 ,内部速度得到加强 ,原因是压力不仅增强了射流速度 ,而且提高了液体的湍流效果。但考虑到实际情况 ,液滴压力过大会增加喷嘴及其加压设备的负担 ,所以要根据实际的合理需要选取合适的工作射流压力。

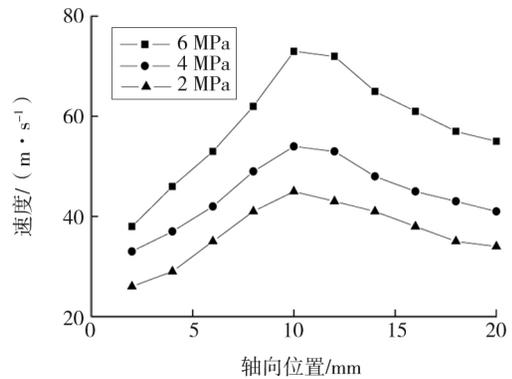


图 5 喷嘴内部轴线方向上的流速分布图

Fig. 5 Axial velocity distribution diagram on axis of nozzle inside

### 3.3 雾化效率对比

为了比较相同 2 mm 喷嘴口直径下轴流喷嘴 ,Y 型喷嘴和旋芯喷嘴的雾化效果 ,以雾化索泰尔平均直径(sauterre mean diameter ,SMD)作为对比标准 ,各类型喷嘴雾化效率对比结果见表 2 所示。由表 2 可知 :超声雾化喷嘴液滴的雾化效率远远大于其它喷嘴 ,这说明超声波应用于喷嘴雾化领域是可行的。

表 2 雾化效率对比

Tab. 2 Atomization efficiency comparison

雾化喷嘴类型	轴流	Y 型	旋芯	超声
雾化 SMD/ $\mu\text{m}$	180	135	85	35

## 4 结论

应用流体仿真软件 CFD 对超声雾化喷嘴内部流场特性进行了数值模拟研究 ,得出以下结论 :

1) 针对超声雾化理论 ,建立了超声雾化喷嘴的数值计算模型 ,运用流体动力学 FLUENT 软件对超声雾化喷嘴进行了不同射流压力下的内部速度测定 ,得到速度矢量图 ,表明速度增大可以明显提高雾化效果。

2) 沿着喷嘴内部轴线方向 ,速度呈先增大后减小的抛物线变化趋势 ,随着液滴射流压力的增大 ,内部速度和湍流效果得到加强。

## 参考文献(References):

- [1] 刘焜,余永刚,赵娜. 某空气雾化旋流喷嘴在受限空间内雾化特性的实验研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(10): 1882-1887.
- [2] 李振祥,郭志辉,车俊龙,等. 一种强剪切空气雾化喷嘴的流场和喷雾[J]. 航空动力学报, 2014, 29(11): 2704-2709.
- [3] 司朝润,王俊彪,张贤杰,等. 超音雾化中喷嘴结构对气体流场与雾化性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, 19(3): 337-343.
- [4] 李宏宇,李建昌,孙越,等. 平口喷嘴的真空射流雾化模拟分析[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(3): 284-288.
- [5] 瞿德刚,向东,牟鹏,等. 基于分段近似方法的超声雾化喷嘴振动系统设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 47-56.
- [6] HOU R, HUANG C, ZHU H. Numerical simulation ultrahigh waterjet flow field with the high frequency velocity vibration at the nozzle inlet [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 71(5/6/7/8): 1087-1092
- [7] WANG P, NI H, WANG R, et al. Modulating downhole cuttings via a pulsed jet for efficient drilling-tool development and field testing [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 27: 1287-1295
- [8] 李建昌,李宏宇,陈建,等. 喷嘴结构对真空喷射雾化性能影响研究[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(2): 101-105.
- [9] 刘旭泽,高贵军. 基于 Hartmann 哨超声喷嘴的雾化特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(3): 268-272.
- [10] 程卫民,周刚,左前明,等. 喷嘴喷雾压力与雾化粒度关系的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1308-1313.
- [11] 巴鑫,罗小辉,朱玉泉,等. 微重力状态下细水雾雾场特性仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 6-9.
- [12] 张绍坤,王景甫. 流体动力式超声波喷嘴雾化特性的实验研究[J]. 石油机械, 2007, 35(6): 1-7.
- [13] 张小艳,王小文. 超声雾化性能的试验研究与回归分析[J]. 工业安全与环保, 2008, 28(2): 8-13.
- [14] RAI G, LAVENIA E J, Grant N J. Powder size and distribution in ultrasonic gas atomization [J]. Journal of Metals, 1985, 37(8): 22-26.
- [15] 李洪喜,刘邱祖,刘燕萍,等. 基于 CFD 的超声激振喷嘴雾化特性数值模拟研究[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(1): 113-117.

## 吃进天然布敦岩 吐出沥青新材料

## 天然布敦沥青新材料及加工装备和技术获新突破

## 高效环保节能 实现全自动连续生产无扬尘、不结块

一种“吃进天然布敦岩 吐出沥青新材料”的装备技术,日前在浙江丰盛布敦沥青科技有限公司问世。该技术已取得 1 项发明专利、2 项实用新型专利,具有自主知识产权,技术水平达到国内领先。这一成果前不久在北京通过了由中国机械工业联合会主持召开的“天然布敦岩沥青加工装备和技术”科技成果鉴定。来自中国石油和化学工业联合会、中国化工学会新材料委员会、工信部电子元器件行业发展研究中心、中国机械工业联合会、清华大学、交通部公路科学研究院、北京公路局、浙江大学等单位的专家参加了鉴定会。

“环保”“新材料”再度成为今年两会的热点新词,“道路沥青资源化无害化利用”已列入国家发改委发布的 2017 年第 1 号公告《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录(2016 版)》,成为节能环保产业之资源循环利用产业化的重点支持领域。

布敦天然沥青作为一种战略资源从国外引进,对节省我国不可再生资源,具有重要的战略意义。

近年来,随着我国经济的腾飞,建设也进入高峰期,由于三超等现象的发生,越来越多的改性剂进入了人们的视野,作为一种天然岩沥青改性剂——布敦天然沥青以其良好的路面性能和低廉的价格受到了业界人士的关注。与石化沥青相比可大幅降低工程成本,广泛应用于公路(高速公路及高等级公路)、市政道路(市政干道、公交车道等)、机场工程(机场跑道、停机坪)、及其它道路(码头道路、重载工业区道路等)。

资料显示,投资一套岩沥青矿粉系统所为企业带来的经济效益非常可观,天然沥青取代部分石油沥青,不仅道路性能得到很大程度的提高(国内外已有多年的路用经验证明及专家论证,交通运输部亦于 2014 年 5 月出台了相关的行业标准 JT/860-2014),同时也大幅度降低沥青混合料生产企业的碳排放,为其生存与发展提供更为广阔的空间,对环保排放效益明显。

针对天然岩沥青在粉碎加工、运输储存、投放使用过程存在的易粘附、易扬尘、易结块等技术难关,浙江丰盛布敦沥青科技有限公司联合安徽和轩沥青科技有限公司、“中国粉碎机专家”国家高新技术企业浙江丰利粉碎设备有限公司、嵊州市天兴粉碎设备有限公司和浙江农林大学等进行“产学研”攻关,成功研制出适用天然岩沥青矿实现全自动连续生产无扬尘、不结块的天然岩沥青矿粉分散系统工艺成套设备,产出的天然岩沥青矿粉完全保留原矿性能,提高生产效率,改善生产环境,为天然岩沥青在路面工程中部分石化沥青在路面工程中的普及推广使用提供了技术、安全、经济方面的支持与保障。

专家认为,该装备基于传统工艺流程,采用辊式粗碎设备、刀片式细碎设备、给料机、提升机、干燥单元设备、风送单元设备、自动化仪控系统关键设备,构成了单线产能达到每小时 10-15 吨的专用成套设备,根据布敦岩高粘度物理特性,自主设计了涡轮式细碎刀片与专用旋转供料器等结构装置,优选一种岩沥青专用分散剂,结合上述创新设备优化生产工艺,解决了加工、运输、储存过程中的结团问题,便于施工使用,通过了科标检测(青岛)测试中心和浙江省机电产品质量检测所的检测,并经梅州市梅州和安沥青混凝土有限公司、梅州市公路局公路工程质量检测站、安徽新同济公路工程试验检测有限公司等测试和使用,反映良好。

(吴红富)

(浙江丰盛布敦沥青热线: 0575-81392698、13705852767; 丰盛网址: <http://www.fsbdlq.com>)