



# 氦气驱动水射流雾化特性的数值模拟研究

俞强强, 施红辉, 董若凌, 张一博

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘要:** 为了研究水射流的雾化特性, 通过 Fluent 软件对 3 种实验工况下氦气驱动水柱的雾化过程进行了二维数值模拟, 这 3 种实验工况分别是常温常压下直喷嘴圆管内气/液相管道长度比为 1:1、1:2 和 2:1 的 0.25 MPa 氦气驱动水射流。分别采用 Standard  $k-\epsilon$ 、RNG  $k-\epsilon$ 、Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型和 VOF 模型, 研究在氦气驱动下的射流雾化特性, 对数值模拟结果与实验结果进行了比较, 并且对不同气/液相管道长度比的数值模拟结果进行了比较。模拟结果表明: 在采用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型对氦气驱动水柱进行数值模拟时, 在气液混合液体进入管口附近, 由于混合液体中氦气压力大于大气压, 产生初次雾化现象, 随后前后液相的相互碰撞以及空气动力与液柱的相互作用是二次雾化现象产生的主要原因, 管内观测点压力先增大后减小, 雾化锥角呈单调递减变化, 与实验结果变化趋势整体一致; 对比直喷嘴圆管不同气/液相管道长度比的数值模拟结果, 当气/液相管长比为 2:1 时雾化锥角最大, 气/液相管长比为 1:1 时雾化锥角稍小, 气/液相管长比为 1:2 时雾化锥角最小。

**关键词:** 数值模拟; 射流雾化; 水射流; 气/液界面; 雾化锥角; 气/液相管长比

**中图分类号:** O359.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2021)09-0642-07

## Numerical simulation of atomization characteristics of water jet driven by helium gas

YU Qiangqiang, SHI Honghui, DONG Ruoling, ZHANG Yibo

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to study the atomization characteristics of water jet, 2D numerical simulation was carried out on the atomization process of helium-driven water column under three experimental conditions with Fluent software. The three experimental conditions were 0.25 MPa helium-driven water jet, with a gas/liquid pipeline length ratio of 1:1, 1:2 and 2:1 in the straight nozzle round pipe at normal temperature and pressure. The atomization characteristics of helium-driven jet were investigated by using Standard  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , Realizable  $k-\epsilon$  turbulence simulation and VOF model respectively, and the numerical simulation results were compared with the experimental results, and the numerical simulation results of different gas/liquid pipeline length ratios were also compared. The simulation results indicate that when the Standard  $k-\epsilon$  turbulence model is used for numerical simulation of the helium-driven water column, near the nozzle of gas-liquid mixture, the helium pressure in the mixture is higher than atmospheric pressure, which results in the phenomenon of primary atomization, and then the collision between the former and latter liquid phases and the interaction between aerodynamic force and liquid column are the main reasons for the phenomenon of secondary atomization. The pressure at the observation point in the tube increases first and

then decreases, and the atomization cone angle decreases monotonically, which is consistent with the overall variation trend of experimental results. The numerical simulation results of straight nozzle round pipes with different gas/liquid pipeline length ratios are compared. When the gas/liquid pipeline length ratio is 2:1, the atomization cone angle, when the gas/liquid pipeline length ratio is 1:1, the atomization cone angle is slightly small, and when the gas/liquid pipeline length ratio is 1:2, the atomization cone angle is the minimum.

**Key words:** numerical simulation; atomization of jet; water jet; gas/liquid interface; atomization cone angle; gas/liquid pipeline length ratio

## 0 引言

射流雾化在农业喷灌、防暴雨炮、工业降尘等领域应用广泛,其雾化机理和雾化性能检测越来越受到人们的重视。然而,射流雾化的实际应用,在多数情况下需同时满足最大射程和有效雾化这两大性能指标。施红辉等<sup>[1-3]</sup>运用高速摄影技术观测直喷嘴圆管流域内气液两相流的演变及产生的管外射流雾化现象,发现在压力作用下,管内气液两相流流型由泡沫流向环状流的转变,还观察到由于管内气泡膨胀产生的管外雾化锥角比传统水射流产生的雾化锥角更大。周刚等<sup>[4]</sup>基于射流雾化进行了理论拓展分析,将射流雾化分为一次雾化和二次雾化两个过程,喷嘴内部形成的空穴及其产生湍流作用主导了喷嘴出口附近的一次雾化,空气动力控制着此后的二次雾化。张敏健<sup>[5]</sup>对喷嘴雾化机理进行了综述,发现液体在雾化过程中受到各种力的作用,其中空气动力对液体的作用与高速流动液体自身惯性是导致射流雾化的重要原因,并且综述惯性力与表面张力效应之比的韦伯数是射流雾化重要无量纲参数。张元坤<sup>[6]</sup>认为:在气液两相流一次雾化中,气相在液柱破碎的过程中起着主导作用,液体破裂后液粒的大小取决于周围空间对液体的作用力与液体表层拉力之比;水射流进入空气产生的二次雾化是由空气动力引起的,可用临界韦伯数判断是否发生二次雾化,当空气动力和表面张力共同作用于液滴表面时,直喷嘴气液两相流二次雾化的临界韦伯数是13。陈庆等<sup>[7]</sup>研究了射流进入空气后的雾化特性,结果发现:进入空气后雾化的射流前端保持标准圆锥形;射流前端距离管口越远,前端圆锥形射流半径越大,在同一截面,射流速度从截面中心处向截面边缘处递减。本文基于前人对于射流雾化理论分析和实验研究,在文献[1]实验基础上进行玻璃圆管内氦气驱动水射流产生雾化现象的机理研究。雾化锥角指喷嘴出口中心点处到雾矩外边界两条切线之间的夹角,易

惠萍等<sup>[8]</sup>用雾化锥角和射流的射程来衡量雾化效果,在高压工况下对不同类型水射流喷嘴的雾化锥角和射流长度进行比较,结果发现:随着泵压的上升,不同类型水射流喷嘴的雾化锥角和射流长度均呈现递增的趋势,但未探究射流雾化锥角与射流长度的关系。本文因此探究雾化锥角与射流长度的关系。

随着计算流体力学的高速发展,众多学者对于脉冲水射流的雾化现象进行了深入分析。刘昌波等<sup>[9]</sup>对射流雾化过程的数值模拟方法进行总结和分析,指出雾化过程数值模拟应用最广泛的方法是准直接数值模拟,使用该方法进行雾化仿真,核心是气液界面的追踪问题,对于该问题,数值模拟中的Euler界面捕捉法比Lagrange界面追踪法更适合仿真模拟,前者如VOF法应用广泛,可以严格保证质量守恒和较高界面精度。王天雨等<sup>[10]</sup>、施红辉等<sup>[11]</sup>对过脉冲水射流进行了数值模拟,研究不同喷嘴类型脉冲水射流流动机理,发现:流体体积法(Volume of fluids)结合Standard  $k-\epsilon$ 湍流模型,可以准确模拟两相流气液界面变化;高压氦气驱动水射流在管口处液柱射流与气泡速度均呈单调递增趋势,管内压力均呈现先增大后减小趋势;并将数值模型应用于火药脉冲水枪,发现随着射流速度的增加,液体产生明显雾化破碎现象,证明其数值模型的合理性。Guha等<sup>[12]</sup>采用Fluent软件,利用欧拉多相湍流模型和具有标准壁面函数的标准 $k-\epsilon$ 湍流模型对空气中高速湍流水射流进行数值模拟,数值模拟结果与现有实验结果比较结果显示,该方法可以准确预测了空气中高速水射流在空气中的速度、压力和体积分分布。

压力驱动水射流的流动机理十分复杂,涉及气体的压缩性、射流的空气动力学特征,而液滴的雾化也涉及气动阻力、黏性力、液体表面张力和惯性力。由于流体流动机理和射流雾化过程的复杂性,前人对雾化机理的分析主要通过实验观察完成,有关雾化机理理论公式大多是经验或是半经验公式。本文

针对氦气驱动水射流技术的雾化过程进行了数值模拟,并对比了数值模拟和实验结果。首先,分析了直圆管氦气驱动水射流雾化机理,分析了两者间水射流压力、速度变化和一致性和差异性,讨论了差异性产生的原因;然后,以刘磊等<sup>[13]</sup>关于射流雾化锥角与最大射程相互制约的理论分析为参考依据,讨论圆管射流雾化锥角与射流长度之间的关系;最后,在文献[1]实验基础上改变气相区域管长和水相区域管长比,讨论不同气/液相管长比下雾化锥角与射流长度的关系。

## 1 研究对象与数值方法

### 1.1 研究对象

本文以文献[1]中的氦气驱动水射流实验为参照展开,原实验装置如图1所示,结构参数见文献[1]。其主体为透明圆管,工作压力0.25 MPa,使用初始浓度为99.99%的实验用氦气,用聚酯薄膜隔膜将氦气与水隔开,数值模拟过程中忽略聚酯薄膜隔膜的影响。CH1处为数值模拟压力采样点,本文计算结果的有效性采用该点数值结果与对应实验结果的差异衡量。

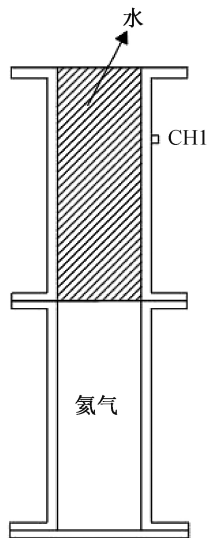


图1 氦气驱动水射流的实验装置示意

### 1.2 数值方法

#### 1.2.1 模型建立

本文根据图1实验装置示意图建立了二维轴对称几何模型,如图2(a)所示。左侧细长部对应圆管实验装置,计算域为17 mm×500 mm;右侧对应射流出口后在空间的扩展区域,计算域为100 mm×500 mm。运用ICEM软件进行网格划分,如图2(b)所示;采用结构性网格,网格无关化选择后采用的单元数量为56886。

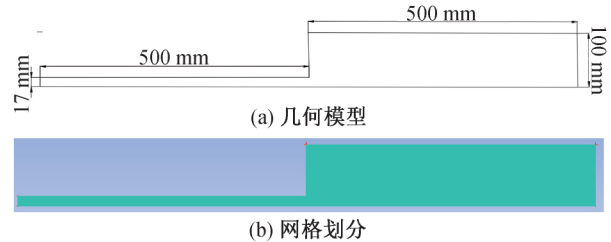


图2 二维轴对称几何模型及网格划分

#### 1.2.2 网格无关性验证

为了验证网格的无关性,本文分别对网格数为56886、87596和119348的算例进行了数值模拟。瞬态计算残差设置为 $10^{-6}$ ,此时流场计算达到收敛。得到了在3种网格达到收敛条件下管口中心轴线处速度随时间变化的数据。网格无关性验证如图3所示,可以看出3种网格数计算得到的管口速度随时间变化曲线基本一致,3种网格量得到的管口速度计算结果相对误差小于1%。因此可以排除网格数大小对计算结果的影响。本文在保证计算精度的前提下为节约时间成本,选择网格数为56886的网格模型开展数值模拟。

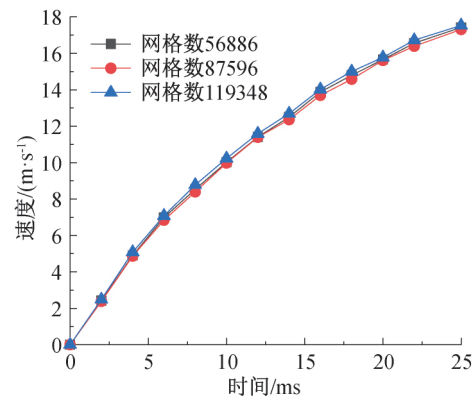


图3 管口中心轴线处速度随时间变化曲线

#### 1.2.3 湍流模型及守恒方程

本文模拟内容为多相非定常流动过程,采用的湍流模型为Standard  $k-\epsilon$  双方程模型;标准壁面函数处理流固边界;VOF模型模拟多相流;压力速度耦合采用Coupled算法。控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_T \quad (4)$$

其中: $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>;  $t$ 为时间,s;  $\mathbf{v}$ 为速度,m/s;  $\mathbf{g}$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;  $p$ 为压力,N;  $\mu$ 为动力黏

度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\alpha$  为某一相的体积比;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $k$  为传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ;  $c_p$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $S_T$  为黏性耗散项。

#### 1.2.4 初始条件和边界条件

本文的数值模拟涉及的工质包括水、氦气和空气。在进行数值模拟时, 本文作以下假设: 水为理想不可压缩液体, 其热传导忽略不计; 氦气和空气均为理想气体; 氦气、空气和水互不相溶; 忽略聚酯薄膜隔膜的影响。

本文的数值模拟采用了 Standard  $k-\epsilon$  模型、RNG  $k-\epsilon$  模型和 Realizable  $k-\epsilon$  模型, 验证不同模型对多相流气/液界面的影响。图 4(a) 为文献[1]实验管道流动气/液界面图, 图 4(b)~(d) 分别是数值模拟中不同模型下的气/液界面图。对比图 4(a)~(d) 可以看出: 采用标准壁面函数的 Standard  $k-\epsilon$  模型中考虑了实际压力梯度的影响, 克服了实验过程中聚酯薄膜隔膜未完全破裂等因素的干扰, 出现尖顶胀谷现象的气/液界面数值模拟结果整体趋势与实验结果一致。

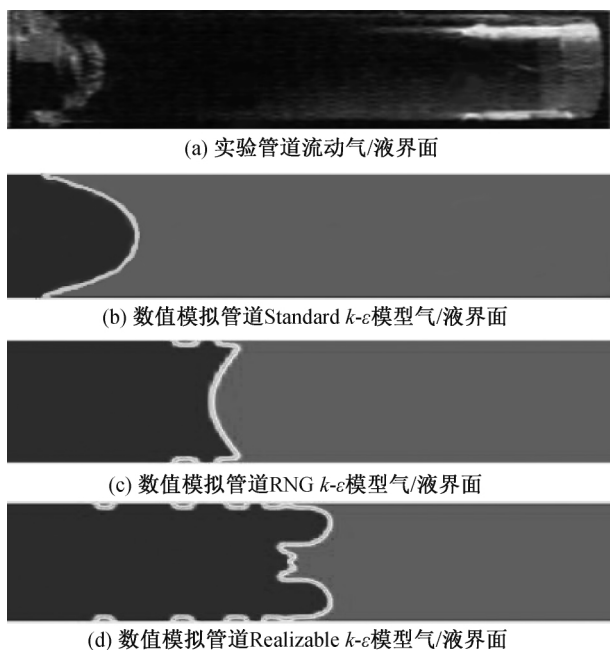


图4 实验管道流动和数值模型管道流动气/液界面图

射流计算域中, 氦气的压力为  $0.25\text{ MPa}$  时达到破膜条件, 而后驱动水喷射出管道。管道设置为无滑移壁面; 壁面均为绝热壁面; 空气域边界条件均设置为压力出口; 初始氦气压力区域为  $0.25\text{ MPa}$ ; 数值模拟材料参数如表 1 所示。

## 2 数值模拟与实验结果对比分析

张元坤<sup>[6]</sup>将雾化情形分为两个阶段: 第一个阶

表1 数值模拟初始时刻液体参数值

参数	压力 $P/\text{MPa}$	密度 $\rho/$ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
氦气	$2.50\times 10^{-1}$	6.69	$1.80\times 10^{-2}$
水	0.00	$9.98\times 10^2$	$8.55\times 10^{-4}$
空气	0.00	1.23	$7.98\times 10^{-4}$

段是压缩氦气冲破聚酯薄膜隔膜驱动水射流喷出管口, 在喷嘴出口产生雾化初级阶段, 第一个雾化形成阶段主要由于速度增加, 液体雷诺数的增大, 管内气液混合, 混合液体喷出管口时氦气压力大于液体压力, 产生雾化现象; 第二阶段是水射流由喷嘴进入空气中, 管内气液混合液体追赶上初始水射流, 产生碰撞, 以及水射流在空气扰动作用力下产生雾化现象的二次雾化阶段, 是否发生空气扰动导致的二次雾化可用临界韦伯数进行衡量, 直喷嘴气液两相流低黏性流体二次雾化临界韦伯数为  $13^{[14]}$ 。图 5 是氦气驱动水射流管在内中心轴线气液界面处, 水射流速度变化的数值模拟结果与实验结果对比图。在  $14\text{ ms}$  时, 气液界面处液体速度为  $11.483\text{ m/s}$ , 雷诺数为  $456079$ 。

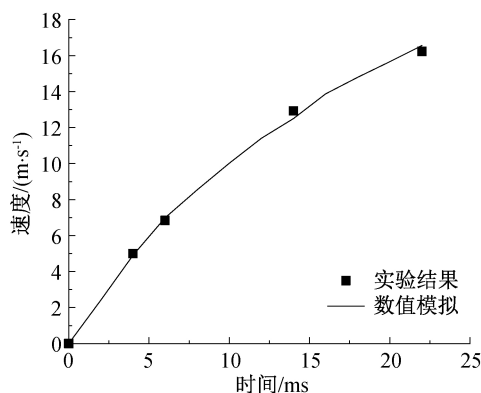


图5 氦气驱动水射流管内中心轴线气液界面处水射流速度变化曲线

图 6 为文献[1]氦气驱动水射流管内发展实验拍摄图, 在  $14\text{ ms}$  时, 氦气冲击水射流导致水相向上运动, 管内流动状态为湍流, 管内形成栓塞流, 在射流底部的气液界面发生 Rayleigh-Taylor 不稳定性, 形成尖顶胀谷交错的气液界面 (见图 6(a))。图 7 为文献[1]氦气驱动水射流管外射流雾化现象实验拍摄图, 在此期间气液掺混从射流后端开始, 射流前端并未气液掺混, 水射流在经管道出口流出管外后开始出现横向扩张现象, 产生的蘑菇状射流,  $14\text{ ms}$  时未出现雾化现象 (见图 7(a)), 纯水射流喷出管外后, 鉴于周围空气的静止和低压状态, 其间存在的速度差和压力差, 促使了射流的横向发展;  $16\text{ ms}$  时, 射流后端速度为  $12.532\text{ m/s}$ , 雷诺数为  $497716$ , 此

时管内气液完全掺混,湍流造成的非对称扰动持续增大(见图6(c)~(f)),当气液混合液体喷出管外,气体压力远高于周围大气压,故此形成了第二次的横向扩展,出现了初次雾化现象(见图7(b));20 ms时,气体压力要高于液柱前缘的压力,其主体追上第一次扩展的部分,发生碰撞和汇合,碰撞导致了前端液相的底部出现雾化,实验图片中也存在明显的雾化现象;20 ms时,射流向前运动至0.097 m,其前端速度为14.375 m/s(见图8),出现雾化现象并向四周扩散,液滴平均粒径(SMD)为 $45\ \mu\text{m}^{[1]}$ ,此时韦伯数为73.7,远大于临界韦伯数,故20 ms时不仅出现后端射流追上前端射流,碰撞导致雾化;且前端射流自身出现向四周扩散的小液滴,达到二次雾化阶段。

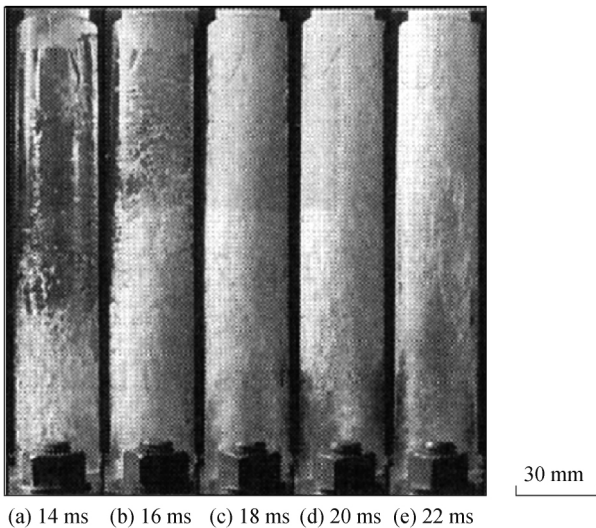


图6 氮气驱动水射流管内发展实验照片

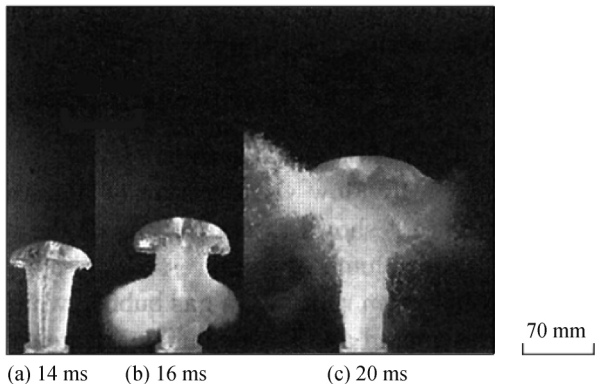


图7 氮气驱动水射流管外射流雾化现象实验照片

图8为氮气驱动水射流射流前端运动距离与射流前端速度变化曲线,图中的理论解和实验结果数据来源于文献[1]。从图8中可以看出,数值模拟结果与实验结果变化趋势基本一致,射流前端的速度都是呈现逐渐递增的趋势,且射流前端加速度都呈现逐渐减小的趋势。实验过程中,由于管道内聚酯薄膜隔膜

并未完全破裂,氢气受到壁面附近不完全破裂聚酯薄膜隔膜的影响,测量的射流前端速度均小于忽略聚酯薄膜隔膜影响的数值模拟结果和理论解。

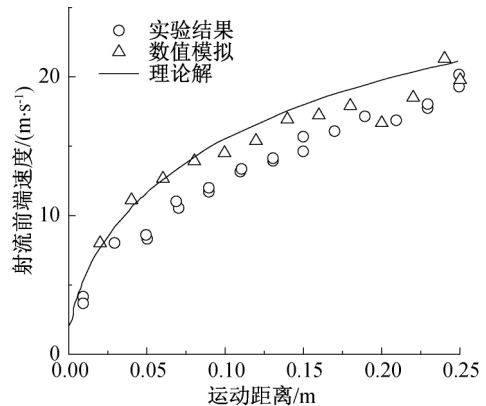


图8 氮气驱动水射流射流前端运动距离与射流前端速度变化曲线

图9是直喷嘴水射流数值模拟与实验CH1位置压力变化曲线。由于实验过程存在没有完全破掉的聚酯膜等试验因素的影响,其测量压力值有多次的波动现象存在,数值模拟克服了上述干扰,真实体现了射流过程的压力变化,其主体趋势与实验结果相同,记录了该位置所经受的破膜后压缩波传递、维持和衰落的全过程。

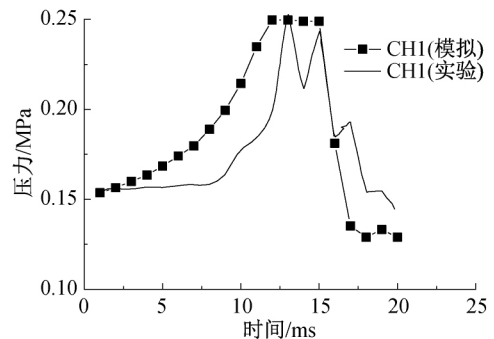


图9 直喷嘴水射流数值模拟与实验CH1位置压力变化曲线

图10是氮气驱动水射流数值模拟速度云图 and 对照实验图像,可见其基本描述了射流的速度变化过程:射流由于受到0.25 MPa氢气作用,速度逐渐增大,推动射流进入空气中,并在直管道管口达到最大速度。综合图10(a)~(f)易见,射流整体的速度最大处总是发生在管道出口位置。水射流最初进入空气中,由于受到氢气冲击的影响,射流产生对称横向扩张现象(见图7(a)),在图10(a)~(c)速度云图中,空气中出现对称分布的高速区域。随着流速继续增加,射流距离的增大,射流受到空气阻力的影响,横向扩张区域增大。在速度云图(d)~(f)中体现为速度增大的同时空气中高速区域也在增大。



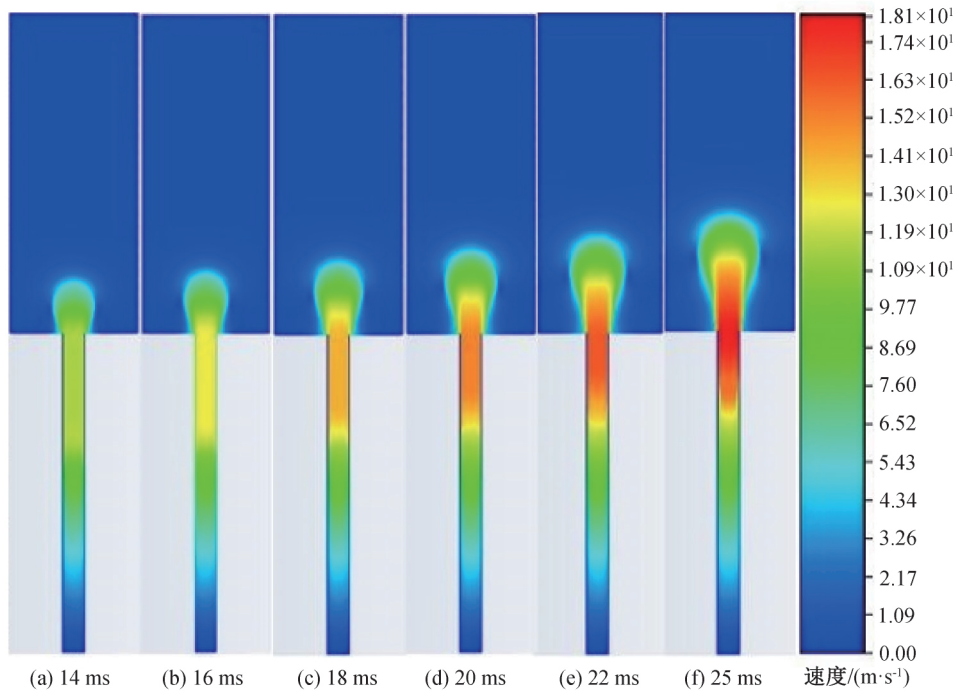


图10 氦气驱动水射流数值模拟速度云图

图11是射流雾化锥角随时间变化曲线图。射流在喷出管口后,雾化锥角整体呈减小趋势,说明射流进入空气后的长度增长速率大于射流雾化横向宽度增长速率。在数值模拟结果中,16~18 ms期间雾化锥角曲线下落明显,说明在初次雾化后的16~18 ms期间液滴横向扩张速度远小于射流纵向流速;18~20 ms期间射流雾化锥角减小速率呈减缓趋势,相对于射流流出管口的速率来说,射流雾化横向宽度增长速率明显加快,由于20 ms时射流出现后端射流追上前端射流发生碰撞以及二次雾化产生了更多的液滴,液滴表面积增大,受到空气阻力增大,液滴出现横向发展更加明显(见图7),射流纵向速度进一步减小;20~25 ms期间,射流产生二次雾化现象后,空气对于射流产生的雾化的影响相较于喷嘴出口处产生液滴横向扩张的影响要明显许多,随着时间增加,射流前端速度的增长速率逐渐减小,雾化锥角减小的趋势逐渐变缓。数值模拟的结果与实验结果形成的散点图雾化锥角趋势基本一致。

本文在文献[1]实验基础上,改变液相管道长度,研究不同气/液相管长比下雾化锥角随射流长度变化的规律,不同气/液相管长比雾化锥角变化曲线如图12所示。为便于理解数值模拟结果,将横坐标设为射流长度与管口内径比的无量纲形式。在图12中,3种气/液相管长比对应的雾化锥角随射流长度的变化规律基本一致,即随射流长度呈现递减趋

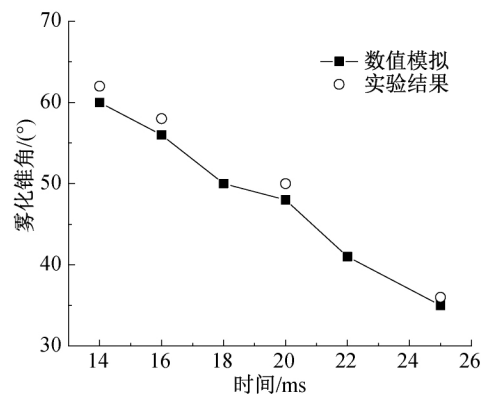


图11 氦气驱动射流雾化锥角变化曲线图

势,因为雾化的实质是射流转化为液滴,雾化锥角越大,液滴群表面积越大,而液滴群表面积增大会导致液滴在飞行时受到的空气阻力增大,从而制约射流长度;气/液相管长比为1:2时雾化锥角最小(液体体积约为0.46 L),气/液相管长比为1:1时雾化锥角稍大(液体体积约为0.23 L),而气/液相管长比为2:1时雾化锥角最大(液体体积约为0.115 L),且3者在射流即将完全喷出管外前雾化锥角的减小逐渐变缓,因为氦气驱动射流喷出管口时,氦气驱动射流的总压不变,液体体积减小导致氦气对单位质量流量流体的压力增大,使得流体喷出管口时的速度增大,流体压力和大气压压差也增大。根据数值模拟结果推断:减小气/液两相流液相管道长度可以增大射流雾化锥角。

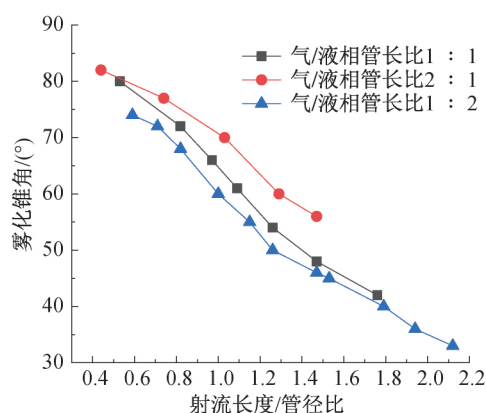


图12 水射流气/液相不同管长比雾化锥角变化曲线

### 3 结 论

本文在已有的氦气驱动水射流实验的基础上,运用 Fluent 软件对该实验进行数值模拟,在湍流情形下,采用 VOF 模型结合 Standard  $k-\epsilon$  模型,研究 0.25 MPa 的压力下,不同时刻氦气驱动水射流进入空气产生的雾化现象,将该气液两相流数值模拟结果与实验结果进行对比分析,得出以下结论:

a) 数值模拟结果参照实验结果,射流在管口出口处横向扩张并产生雾化主要因素是气液混合液体进入空气,氦气压力远大于大气压力;随后产生二次雾化现象主要由于空气动力与液柱的相互作用以及前后液相相互碰撞。

b) 数值模拟结果对比实验结果,CH1 位置压力变化在整个射流过程中呈现先增大后减小的变化规律,表明本文所使用的数值模型能准确模拟氦气驱动水射流。

c) 射流雾化锥角随时间的变化趋势与实验结果发展趋势一致,都是单调递减的。

d) 对比 3 种气/液相管长比雾化锥角的模拟结果,发现气/液相管长比为 2:1 时雾化锥角最大,气/液相管长比为 1:1 时雾化锥角稍小,气/液相管长比为 1:2 时雾化锥角最小。

### 参考文献:

- [1] Shi H H, Wang X L, Itoh M, et al. Acceleration of water column and generation of large flow rate water spray by shock tube[J]. JSME International Journal Series B, 2001, 44(4): 543-551.
- [2] 施红辉, 岸本薰实. 瞬态加速液柱的流体力学问题研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 391-397.
- [3] 施红辉. 激波管喷雾器: CN2542344Y[P]. 2003-04-02.
- [4] 周刚, 程卫民, 聂文, 等. 高压喷雾射流雾化及水雾捕尘机理的拓展理论分析[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(3): 121-126.
- [5] 张敏健. 喷嘴研究发展概述[J]. 电站系统工程, 2008, 24(1): 17-18.
- [6] 张元坤. 气液两相流喷嘴的雾化机理分析及实验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018: 15-35.
- [7] 陈庆, 魏旭, 陈光, 等. 不同压力下细水雾雾场特征参量模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(6): 803-806.
- [8] 易惠萍, 邓英剑, 赵近谊, 等. 水射流降尘用喷嘴的雾化特性研究[J]. 矿山机械, 2013, 41(11): 119-122.
- [9] 刘昌波, 周立新, 雷凡培. 雾化过程的数值模拟研究综述[J]. 火箭推进, 2014, 40(1): 10-17.
- [10] 王天雨, 施红辉, 董若凌, 等. 脉冲水射流产生过程的流体力学特性数值模拟[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(1): 63-70.
- [11] 施红辉, 张一博, 王天雨, 等. 不同喷嘴结构下高压脉冲水射流的数值模拟[J/OL]. 浙江理工大学学报(自然科学版). (2021-03-23) [2021-04-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1338.TS.20200929.1646.012.html>.
- [12] Guha A, Barron R M, Balachandar R. Numerical simulation of high-speed turbulent water jets in air[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(1): 119-124.
- [13] 刘磊, 战仁军. 基于脉冲水射流技术的警用防暴水炮的探析[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 148-151.
- [14] 魏南. 气液两相流喷嘴的射流雾化机理的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2014: 11-31.

(责任编辑:康 锋)