



不同喷嘴结构下高压脉冲水射流的数值模拟

施红辉, 张一博, 王天雨, 董若凌, 冯子龙, 彭双双

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要:为进一步优化喷嘴结构,应用流体仿真软件 Fluent 对喷嘴中高压气体驱动的水柱进行数值模拟。在数值模拟方法中应用 SST $k-\omega$ 湍流模型与 VOF 模型,研究了直喷嘴、锥形渐扩喷嘴和锥形渐缩喷嘴结构下的管内外气/液分布与水射流的流体力学特性。模拟结果表明:直喷嘴水射流在初期有最高的射流速度,且在模拟计算域内平均速度最高;锥形渐扩喷嘴水射流射流速度最小、喷射距离最短,在初期射流横向扩散宽度最大;锥形渐缩喷嘴水射流在初期横向扩散宽度最小,在射流后期水射流速度最高、横向扩张宽度最大。该研究通过数值模拟给出了锥形渐缩及锥形渐扩喷嘴结构下高压脉冲水射流的流体力学行为,为后续进一步分析不同喷嘴结构下的高压脉冲水射流提供了参考。

关键词: 脉冲水射流;喷嘴结构;流体力学特性;数值模拟

中图分类号: O0359+.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2021) 05-0343-08

Numerical simulation of high pressure pulsed water jet generated by different nozzle structures

SHI Honghui, ZHANG Yibo, WANG Tianyu, DONG Ruolin, FENG Zilong, PENG Shuangshuang

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech

University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to further optimize the nozzle structure, numerical simulation of water column driven by high-pressure gas was carried out by using the simulation software Fluent. SST $k-\omega$ turbulence model and VOF model were used to investigate gas/liquid distribution inside and outside the tube and the hydrodynamic characteristics of water jet under the straight nozzle, tapered divergent nozzle and tapered convergent nozzle. The experimental results showed that, the water jet under the straight nozzle had the highest speed and the highest average speed in this simulation domain in the beginning. The water jet under the tapered divergent nozzle had the lowest speed and the shortest jet distance, with the largest transverse width in the beginning. The water jet under the tapered convergent nozzle had the smallest transverse width in the beginning, the highest speed and largest transverse width in the later period. This study simulated the hydrodynamic behavior of high-pressure pulsed water jet under the tapered divergent nozzle and tapered convergent nozzle, which provides a reference for further numerical calculation and theoretical analysis of high-pressure pulsed water jet generated by different nozzle structures.

Key words: pulsed water jet; nozzle structures; hydrodynamics characteristics; numericalsimulation

0 引言

高速脉冲水射流可聚集并瞬间释放大量的冲击能量,具有速度快、清洗效果好、绿色环保等优点,在消防用品、农业灌溉、燃料喷射、仪器清洗与机械切割中有着很好的应用前景。喷嘴作为射流产生装置的核心部件,主要作用是将射流中的压力能转化为动能,使射流高速射出,其结构形态对于高压脉冲水射流的流体力学特征有很大的影响。相对于连续水射流,瞬间释放体积较大的液体在实验研究中很难实现,并且瞬间喷射出的水射流对比连续水射流,流体力学特征更加复杂。施红辉等^[1-4]在激波管原理的基础上,应用高压氦气驱动水柱产生高压脉冲水射流,得出水射流的动力学特征以及速度的发展规律,为高压脉冲水射流的研究提供了实验基础。

近几年,随着计算流体力学的发展,众多学者对水射流进行了深入研究。Guha等^[5]应用 $k-\epsilon$ 湍流模型以及欧拉多相湍流模型,准确模拟出了高速水射流在空气中的流动特性,并且分析了完全发展的非淹没状态高速水射流的整体结构。Majidi等^[6]开发出一种基于虚拟流体法(Ghost fluid method)的研究超音速液体射流的计算工具,通过对比计算的结果与同等条件下的实验结果发现,所开发的计算工具能很好地模拟出超音速液体射流进入静止气体介质的运动特征。汪吉军^[7]通过改变喷嘴的热力学参数和结构参数,研究了喷嘴的喷射系数随着喷射器工作压力变化的规律,得出了不同热力学参数和结构参数的喷嘴对喷射器性能的影响。龚辰等^[8]对不同喷嘴结构下射流表面波进行了可视化研究,发现喷嘴结构的改变会对出口处的边界层厚度产生影响,喷嘴收缩比通过改变喷嘴出口处边界的层厚度影响表面波变化规律。姚春德等^[9]采用三维相位多普勒粒子分析仪(Phase doppler particle analyzer, PDPA),研究了高压共轨喷嘴结构对喷雾流体力学特性的影响,结果表明:高压燃油喷雾的粒径分布呈现轴线大两边小的趋势,并在喷雾边缘稍微增加;同时喷雾的索特平均直径(Sauter mean diameter, SMD)分布随着喷射压力的增大和喷孔的减小呈减小趋势。邓军等^[10]数值模拟了高压气体驱动的不同喷嘴结构对脉冲水枪的气/液分布、能量转化、速度分布的影响,模拟结果表明:对比高压空气驱动的脉冲水枪在不同的喷嘴结构下的运动特性,维多辛斯基曲线结构的喷嘴射流速度的稳定性、集束性更好,动能集中在轴线附近且射流的能量转化率更高。

该模拟对脉冲水枪的设计具有借鉴意义,可以提高脉冲水枪的出水效率。王天雨等^[11]对高压气体驱动的直喷嘴圆管水射流进行了数值模拟,并将模拟的结果与实验结果进行比较,结果显示数值模拟的直喷嘴水射流速度和压力的变化与实验结果有很好的一致性,表明所采用的模拟方法在模拟高压气体驱动大体积液柱射流方面有一定的准确性。

综上所述,众多学者已对水射流进行了大量的研究,在喷嘴结构方面也有一定的成果,但大多数研究的喷嘴结构为渐缩喷嘴,有关渐扩喷嘴结构的应用或性能研究较少。本文参考王天雨等^[11]的研究方法,对高压气体驱动的直喷嘴、锥形渐缩喷嘴和锥形渐扩喷嘴结构下的高压脉冲水射流进行数值模拟,对比上述三种喷嘴结构水射流的运动形态、运动速度与运动距离的相似性以及差异,并讨论产生差异的原因。

1 研究对象和数值模拟方法

1.1 研究对象

本文采用的实验装置参考文献[1],其结构如图1所示。实验装置为垂直布置的长度为500 mm,管内直径为34 mm的圆管,实验中将圆管对称分为上下两部分:长250 mm、压力0.25 MPa充满氦气的下半部分;长250 mm、压力为大气压充满水(体积约为0.23 L)的下半部分。在氦气和水之间有16 mm厚的聚酯薄膜将两部分隔开(数值模型中忽略其影响)。

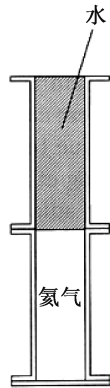


图1 实验装置

根据文献[12]的研究结果,锥形喷嘴的收缩角不能太大或者扩散角不能太小,否则喷嘴的能量转化效率就会降低。锥形喷嘴的收缩角太小或者扩散角太大,喷嘴的长度就要随之增长,影响在现实中的应用。本文选择的锥形渐缩喷嘴和锥形渐扩喷嘴的收缩角和扩散角的角度为 13° ,渐缩段和渐扩段的长度为17 mm,喷嘴加长在如图2(a)所示的直喷嘴前端,设计结构图如图1所示。



图 2 喷嘴结构

喷嘴的截面积对于喷嘴的能量转换率以及现实中的设计有很大影响,根据喷嘴直径求得喷嘴的截面积:

$$A=\frac{Q}{\mu\sqrt{2gH}}\tag{1}$$

式中: A 为喷嘴的截面积, mm^2 ; Q 为喷头流量, mm^3/s ; μ 为流量系数, g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为喷头的工作压力, MPa 。

锥形渐缩喷嘴和锥形渐扩喷嘴的工作参数与直喷管的工作参数基本一致,如表 1 所示。

表 1 模拟中喷嘴的参数值

参数	喷雾器直 径 D_1/mm	喷雾器长 L/mm	出口直径 D_2/mm	气室压力 P_1/MPa	运行压力 P_2/MPa
直喷管	34	500	34	0.25	0.10
锥形渐扩喷嘴	34	517	42	0.25	0.10
锥形渐缩喷嘴	34	517	26	0.25	0.10

1.2 数值模拟

1.2.1 模型建立

本文采用商业仿真软件 FLUENT,对直喷嘴、

锥形渐缩喷嘴和锥形渐扩喷嘴结构的脉冲水射流的流体力学特性进行数值模拟。使用前端处理软件 ICEM 对喷管结构进行建模和网格划分;采用 VOF 模型和 SST $k-\omega$ 湍流模型的方法;通过后处理软件 CED-Post 处理结果数据,生成直观可视的图像,分析上述三种喷嘴结构对脉冲水射流水动力学特征的影响。

在数值模拟中需要建立合适的模型计算域,在本次数值模拟中,射流从喷嘴直接射入到周围空气,计算域不仅包括整个喷管的大小,也包括进入空气中的射流发展的计算域范围,以便于观察整个射流的动力学特征。本文数值模拟计算域如图 3 所示,其中: AB 、 IJ 、 ST 为压力入口,压力设置为 0.25 MPa; $CDEFGH$ 、 $MNOPQR$ 、 $WXYZZ'Y'$ 为压力出口,压力设置为大气压; BC 、 AD 、 JKM 、 ILN 、 TUW 、 SVX 设定为无滑移壁面; $EFGH$ 、 $OPQR$ 、 $YZZ'Y'$ 为射流管外流场区域,本文数值模拟的射流为非淹没射流,此区域内的介质为空气,压力为大气压力,计算参数设置见表 2。

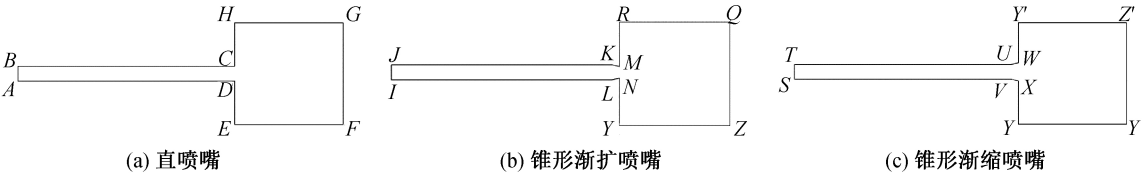


图 3 喷嘴的计算域设置

表 2 计算域初始参数

材料	压力 P/MPa	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	速度 $V_0/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
氦气	0.25	0.1625	0.00
空气	0.10	1.2250	0.00
水	0.10	0.9982	0.00

使用 ICEM CFD 的结构化四边形网格对不同喷嘴的计算域进行划分,并对喷管轴线附近的网格进行局部加密,如图 4 所示。网格的最小尺寸为 0.5 mm,最终得到的三种不同喷嘴模型计算域的网格节点数分别为 402332、466276、465468 个。

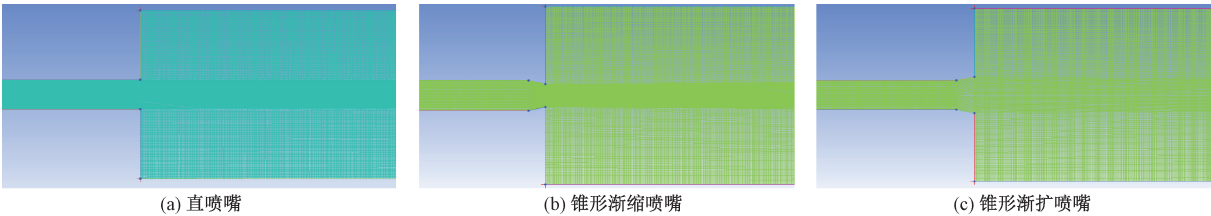


图 4 喷管的网格划分示意

计算模型的边界条件包括压力入口(给定的压力为 0.25 MPa)、压力出口(设定为一个大气压),喷管的壁面设置为无滑移固壁。喷管射流的数值模拟

采用 VOF 多相流模型,该方法可以很好的追踪气/液界面,并且采用了广泛使用的 SST $k-\omega$ 模型模拟湍流流场;设置氦气、液态水以及空气三相,其中氦气和

水,空气和水之间的表面张力设置为 0.072 N/m 。数值计算考虑了重力的影响,并且采用了 PISO 算法对压力—速度进行耦合。

1.2.2 控制方程

在本次模拟计算中,计算模型为高压氦气驱动的高速气/液多相非定常流动,从计算开始到射流完全喷出的时间为毫秒级。本次模拟计算应用可压缩湍流模型,为了便于求解,将水假定为理想的不可压缩液体(热传导、黏度和横向流动忽略),假设氦气为非黏性可压缩理想流体。使用 SST $k-\omega$ 模型模拟湍流流场,应用 VOF 方法对管内部及外部气/液界面的运动状况进行追踪。根据守恒关系,此次模拟的控制方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) e = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

其中: t 表示时间,ms; \mathbf{v} 表示流体速度,m/s; p 表示压力,MPa; e 表示总能量,J; T 表示温度,K。

考虑到高压气体氦气的可压缩性,理想气体的状态方程为:

$$p = \rho RT \quad (5)$$

其中: R 表示气体常数。

SST $k-\omega$ 湍流模型适用于模拟高压梯度下的流体力学,在近壁区计算可以保持 $k-\omega$ 上的优势,又拥有 $k-\varepsilon$ 模型精确计算远场流场的优点,增加了交叉扩散项,并在湍流黏性系数的定义中考虑了湍流切应力的输送过程,从而使 SST $k-\omega$ 湍流模型应用范围更广。其输运方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Omega \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i, (i=1,2,3) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Omega_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Omega_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - D_\omega + S_\omega \quad (8)$$

其中: Ω 、 Ω_k 、 Ω_ω 表示速度 u_i 、湍动能 k 及比耗散率 ω 的有效扩散系数,其各自定义为:

$$\Omega = \mu + \mu_t$$

$$\Omega_k = \mu + \mu_t / \sigma_k$$

$$\Omega_\omega = \mu + \mu_t / \sigma_\omega;$$

G_k 、 G_ω 表示 k 、 ω 的产生项; Y_k 、 Y_ω 表示 k 、 ω 的耗散项; D_ω 表示交叉扩散项,起协调 $k-\varepsilon$ 湍流模型与 $k-\omega$ 湍流模型交界区域的作用; S_i 、 S_k 、 S_ω 为各输送方程的自定义源项; μ_t 表示湍流黏性系数,其计算公式为:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left(\frac{1}{a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right)} \quad (9)$$

其中: S 为平均应变率的张量模量; F_1 、 F_2 为混合函数; σ_k 、 σ_ω 、 a^* 为湍流模型中的系数; a_1 为湍流模型常数。

2 模拟结果与分析

2.1 高压脉冲水射流数值模拟

图5—图7为直喷嘴、锥形渐扩喷嘴、锥形渐缩喷嘴的脉冲水射流数值模拟水相图。对比三幅图可看出,三种状态下的脉冲水射流数值模拟水相图的运动特征有很大的相似性。在射流模拟计算的初期,由于受到高压氦气的推动力,水射流在氦气/水界面产生 Richtmyer-Meshkov 不稳定性现象,形成中间向上凸起的气泡,之后随着高压氦气的推动作用,水柱逐渐喷射出喷嘴。后段水射流拥有更高的速度,追上速度较低的前段水射流,在射流的顶端形成了中间向上突起的蘑菇状头部。当射流全部射出喷嘴约 $16 \sim 20 \text{ ms}$,高压氦气进入空气中,由于高压氦气和空气之间存在很大压力差,使得氦气和水的接触面产生加速度,出现 Rayleigh-Taylor 不稳定现象。并且由于射流横向的水层厚度更薄,会在横向产生更大的加速度,因此射流横向宽度扩张的更快。此现象在锥形渐扩喷嘴和锥形渐缩喷嘴中更为明显。

观察对比图5—图7可以发现三种脉冲水射流在射流喷出过程中的区别。在射流前期,直喷嘴和锥形渐缩喷嘴要比锥形渐扩喷嘴有更好的集束性,呈现向周围锥式扩张的趋势,而锥形渐扩喷嘴则是从喷嘴两侧向周围扩散,如图6(a)—(g)所示。相比于直喷嘴结构的脉冲水射流,在锥形渐扩喷嘴结构下产生的水射流运动距离更短,但是扩散范围更广。在产生射流的初始阶段,射流前端的蘑菇形状逐渐成型,并从一开始就向两侧延伸发展。气/液界面发展与直喷嘴结构类似,都是逐渐发展为中间向上凸起的动力学行为。随着射流逐渐离开喷嘴口,由于高压氦气通过锥形渐扩喷嘴向边缘的推进作用,水射流形成中间中空,两边逐渐横向扩展的伞状。

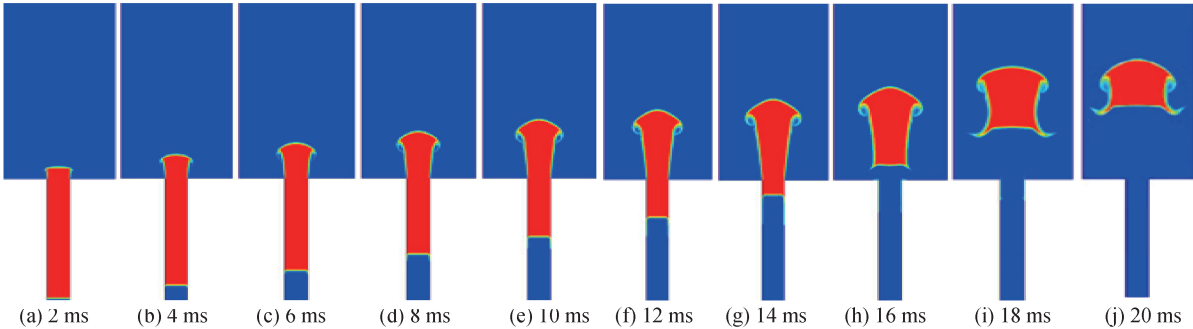


图 5 直喷嘴脉冲水射流的数值模拟水相图

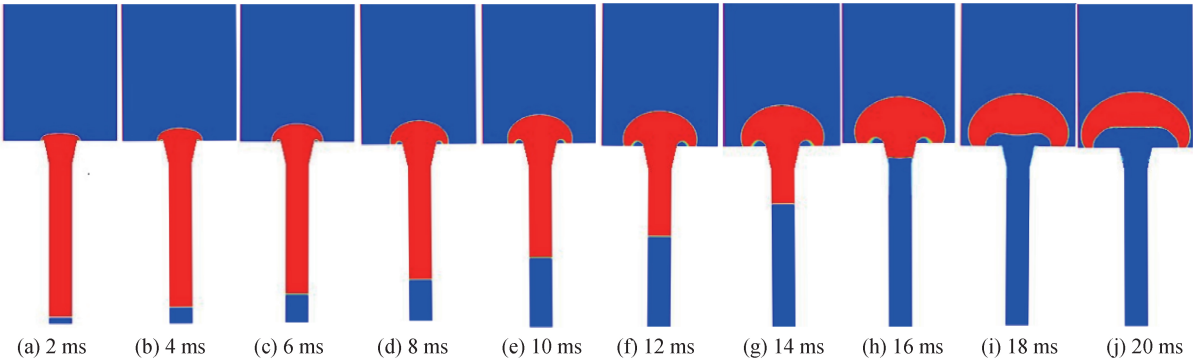


图 6 锥形渐扩喷嘴脉冲水射流的数值模拟水相图

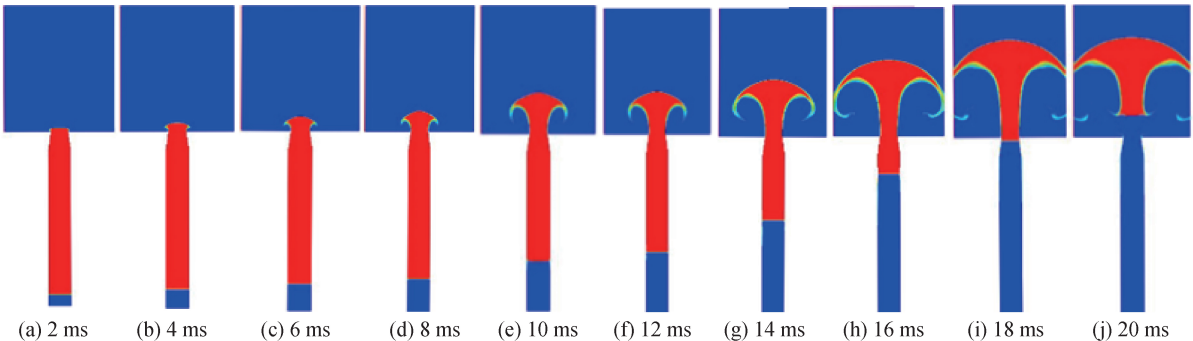


图 7 锥形渐缩喷嘴脉冲水射流的数值模拟水相图

锥形渐缩喷嘴将水柱受到的压力能转换为动能,脉冲水射流水时速度逐渐加快,并逐渐形成蘑菇状射流前端。随着射流的发展,射流前端的横向扩张速度逐渐加快,在射流完全流出喷管后,高压氮气持续作用于射流尾部,使得尾部射流速度超过初次射流速度,导致了射流的横向扩张。整体上,锥形渐缩喷嘴结构与直喷嘴结构产生的脉冲水射流发展状况非常相似,只不过渐缩喷嘴下产生的脉冲射流速度更快。并且可以明显观察到在射流后期,锥形渐缩喷嘴的射流横向宽度最大。

图 8—图 10 分别为直喷嘴、锥形渐扩喷嘴、锥形渐缩喷嘴脉冲水射流数值模拟的速度云图,三种结构下的速度云图有一定的相似性。随着高压氮气在上游的不断推进,三种结构下管内速度逐渐增大,喷嘴出口处射流前端的高速区也开始向下游低速区

扩散,并且在渐缩喷嘴处形成了高速区;随着水射流的发展,管内上游形成高速区并逐渐向下游传递。到了射流完全射出喷管的后期,在喷嘴两侧形成了高速区,并且下游速度基本保持稳定地小幅度增长。整个射流速度呈现出单调递增的变化。

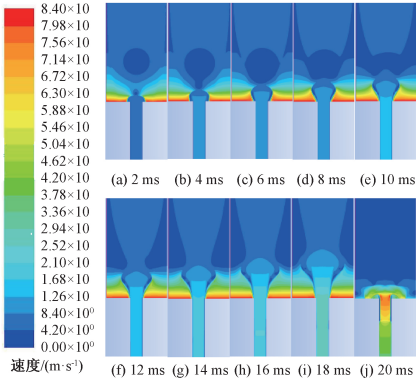


图 8 直喷嘴脉冲水射流数值模拟的速度云图

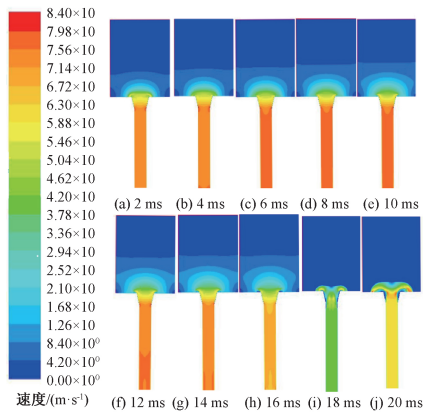


图 9 锥形渐扩喷嘴脉冲水射流数值模拟速度云图

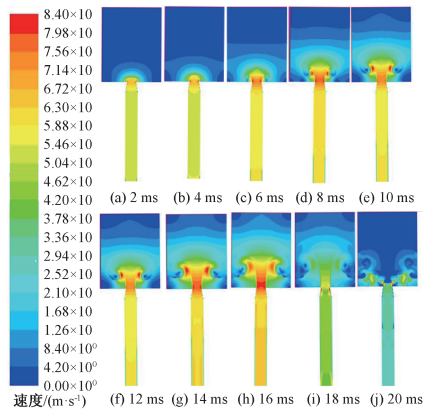


图 10 锥形渐缩喷嘴脉冲水射流数值模拟速度云图

直喷嘴结构射流前期与锥形渐缩喷嘴、锥形渐扩喷嘴结构射流有很大差别,射流在空气中诱导的速度场不尽相同。对比三种结构下的速度云图,直喷嘴结构速度发展的较快,但锥形渐扩喷嘴在横向扩张速度要比直喷嘴结构快,并且最后都在喷嘴出口两侧形成了高速区。锥形渐缩喷嘴射流速度发展最快,并且高速区随着喷嘴出口向射流下游扩散,射流在轴线方向上受到的动能更大。

图 11—图 13 为直喷嘴、锥形渐扩喷嘴、锥形渐缩喷嘴脉冲水射流数值模拟的压力云图。观察得出三种喷嘴结构下压力云图的相似性。在射流初始阶段,受到高压氦气段的影响,射流逐渐射出到空气中,高压氦气也随着射流的射出占据整个圆管内部。当射流射出,射流前端的蘑菇状头部的上方形成对称分布的高压区域,并且随着射流的发展,该区域逐渐扩大。在射流的最后阶段,由于射流全部射出,管内的高压氦气进入到空气中,使得空气的压力增大。

与直喷嘴结构的压力云图相比,锥形渐扩喷嘴结构下喷嘴出口处压力向下游扩散的范围更大,并且高压区范围主要集中于喷嘴口两侧,而直喷嘴结构的高压区主要集中于喷嘴尖端下游。锥形渐缩喷

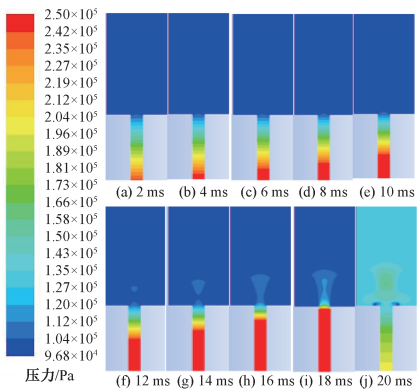


图 11 直喷嘴脉冲水射流数值模拟压力云图

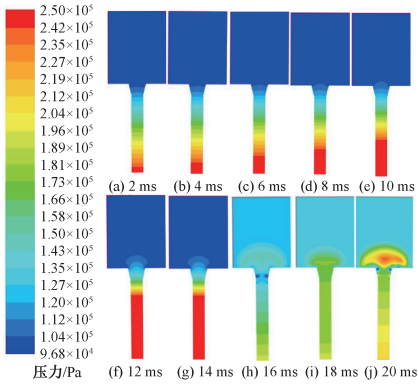


图 12 锥形渐扩喷嘴脉冲水射流数值模拟压力云图

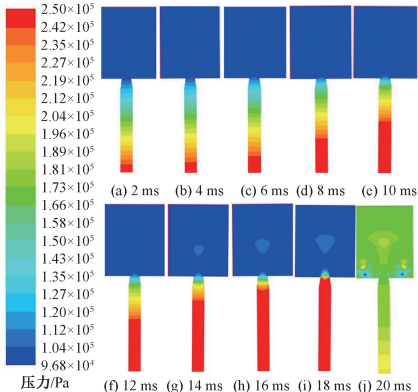


图 13 锥形渐缩喷嘴脉冲水射流数值模拟压力云图

嘴结构下射流前端下游生成了高压区,但是相对于直喷嘴结构,压力向下游扩散的范围更小。

2.2 模拟结果对比分析

图 14 为喷嘴出口轴线处速度的曲线对比图。从图 14 中可以看出,喷嘴出口速度发展的总体趋势都逐渐生上升。三种射流在 0~6 ms 期间速度的加速度较大;在 6~8 ms 左右的时候由于射流形成了蘑菇状射流头部,在空气中受到了较大的阻力形成分散效果,动力加速度有一个明显的减小;在 8 ms 之后由于蘑菇状射流头部继续向下游运动,测量点的射流集聚性变好,加速度有所增加。在射流初期,

由于锥形渐扩喷嘴受到较大的空气阻力,锥形渐缩喷嘴受到较大结构阻力,因此直喷嘴运动速度最快;在射流中期,由于锥形渐缩喷嘴结构下动力的集中效果,射流的出口速度超过直喷嘴的射流速度;在射流后期,由于直喷嘴结构下水射流动量逐渐转化到周围空气中,使得射流速度上升的趋势开始减缓,锥形渐缩喷嘴的速度远远大于直喷嘴和锥形渐扩喷嘴。锥形渐扩喷嘴速度在三种喷嘴结构中一直处于最低状态。

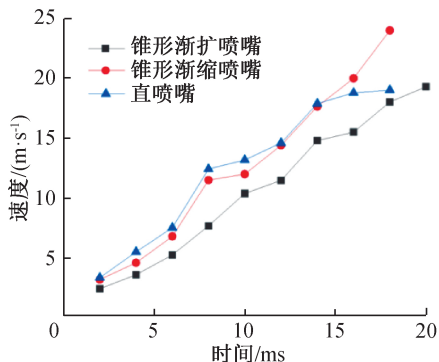


图 14 不同喷嘴结构下出口速度变化

图 15 为三种喷嘴结构下的射流运动距离随时间变化图。从图 15 中可知,在射流前期直喷嘴结构水柱没有受到太大的阻力影响,有更大的加速度,运动距离较远;到了后期,渐缩喷嘴能量转化效率更高所以水射流有更高的加速度;而渐扩喷嘴由于过早雾化导致水射流喷射距离减小。

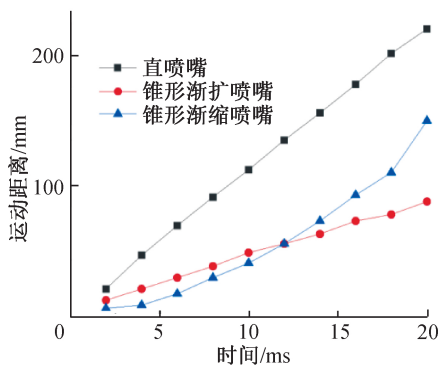


图 15 射流运动距离随时间变化

图 16 为三种喷嘴结构下的射流横向宽度随时间变化图。由图 16 可知,射流前期由于锥形渐扩喷嘴出口较大,且喷嘴两侧受到的动能也更强,因此锥形渐扩喷嘴产生的水射流横向宽度更宽。但到了射流后期,由于锥形渐缩喷嘴结构下的水射流流速逐渐加快,受到的空气阻力也越来越大,射流的横向扩展也越来越明显,最后超过了锥形渐扩喷嘴。

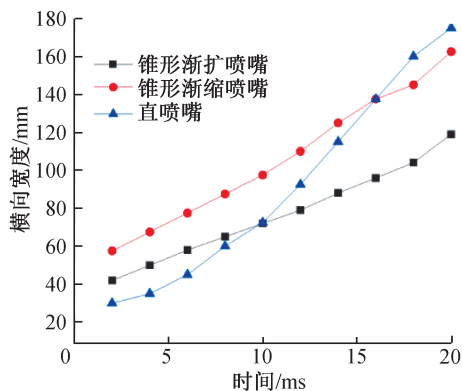


图 16 射流横向宽度随时间变化

3 结论

本文在激波管喷雾器的实验基础上,通过对喷嘴结构理论的分析研究,设计用高压氮气驱动直喷嘴、锥形渐扩喷嘴、锥形渐缩喷嘴结构下的水射流。通过仿真软件 FLUENT 对三种喷嘴结构下的水射流进行数值模拟,对比三种喷嘴结构的水动力学特征,得到下列结论:

a) 水射流速度以及运行距离变化规律。在射流初期,直喷嘴结构脉冲水射流有更高的加速度,在射流初期直喷嘴水射流的速度最高。随后由于渐缩喷嘴的能量转化效率更高,锥形渐缩喷嘴产生的水射流的加速度超过直喷嘴水射流,随着射流的发展,渐缩喷嘴水射流速度超过直喷嘴水射流。因此在射流最高速度的排序上,由高到低的顺序为:锥形渐缩喷嘴、直喷嘴、锥形渐扩喷嘴。在本计算边界内,直喷嘴产生的水射流平均速度要高于锥形渐扩喷嘴和锥形渐缩喷嘴产生的水射流,所以在射流运行距离上由远到近的顺序为:直喷嘴、锥形渐缩喷嘴、锥形渐扩喷嘴。

b) 水射流横向扩散宽度变化规律。在射流前期,锥形渐缩喷嘴水射流扩散宽度最小,锥形渐扩喷嘴结构下推进水射流的动能过于分散,导致射流雾化过早,锥形渐扩喷嘴扩散宽度最大;在射流后期,由于受到结构阻力以及速度的增加的影响,锥形渐缩喷嘴横向扩张速度最大,随后依次超过直喷嘴射流和锥形渐扩喷嘴射流的扩散宽度。

c) 直喷嘴和锥形渐缩喷嘴要比锥形渐扩喷嘴有更好的集束性,呈现向周围锥式扩张的趋势,而锥形渐扩喷嘴则是从喷嘴两侧向周围扩散。锥形渐缩喷嘴在特定的距离内有最大的射流速度以及最小的射流横向宽度在精密器械清洗、机械切割中有很好的应用,且在射流后期锥形渐缩喷嘴的横向扩散宽度最大,射流范围最广,在消防中有很好的应用。

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: Fluids and Thermal Engineering, 2001, 44 (4): 543-551.

[2] 施红辉. 激波管喷雾器: ZL02217458.0[P]. 2003-04-02.

[3] 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.

[4] Wang X L, Shi H H, Itoh M, et al. Flow visualization of high-speed pulsed-liquid jet[J].Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2001, 4183: 899-906.

[5] 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.

[6] Majidi S, Afshari A. Towards numerical simulations of supersonic liquid jets using ghost fluid method [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015, 53: 98-112.

[7] 汪吉军. 喷嘴对喷射器性能影响的数值分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 32-59.

[8] 龚辰, 杨敏官, 康灿, 等. 喷嘴结构对射流表面波影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39 (3): 534-538.

[9] 姚春德, 耿培林, 银增辉, 等. 喷嘴结构对喷雾特性的影响[J]. 内燃机学报, 2016, 34 (1):41-47.

[10] 邓军, 贾鹏飞, 刘长春, 等. 消防脉冲水枪喷嘴结构优化研究[J].中国安全生产科学技术,2018, 14(12): 48-53.

[11] 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.

[12] 毕智华. 蓄能式脉冲水射流消防水枪研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 26-72.

(责任编辑:康 锋)