

一种新型造雪核子器的数值模拟研究

赵巍¹, 潘书毅¹, 张华¹, 袁兴阳¹, 孙承华²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 北京卡宾滑雪体育发展集团股份有限公司, 北京 100041)

摘要: 基于造雪机核心部件核子器, 建立了核子器物理模型与内流域模型, 利用数值模拟方法对核子器的内流场进行了计算, 针对该核子器重要参数混合室长度、核子器出口直径的变化, 首先采用 VOF 模型研究了核子器内部气液两相分布情况, 并使用 DPM 模型研究了上述参数对核子器雾化粒径的影响, 分析了雾化粒径大小及其出现频率的规律, 研究核子器受关键几何参数的影响规律, 为核子器结构优化提供科学依据。模拟结果表明: 核子器混合室长度对其雾化效果有较大的影响, 出口直径对其雾化效果有一定的影响, 该核子器达到较好雾化效果的结构为混合室长度 30 mm、出口直径 1.1 mm。

关键词: 数值模拟; 多相流喷嘴; 雾化粒径; 索特尔直径

中图分类号: TK 123 **文献标志码:** A

Numerical simulation of a new snow crystal sprayer

ZHAO Wei¹, PAN Shuyi¹, ZHANG Hua¹, YUAN Xingyang¹, SUN Chenghua²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Beijing Carving Ski Group Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: The snow crystal sprayer is the key component of the snow maker. Its atomization effect directly determines the snow forming ability of the snow maker. The physical model and inner internal flow field of the snow crystal sprayer were established based on the snow crystal sprayer, the core component of the snow maker. The internal flow field of the snow crystal sprayer was calculated by means of numerical simulation. In view of the change of the mixing chamber length and the outlet diameter of the snow crystal sprayer, the VOF model was used to study the gas-liquid two-phase distribution in the snow crystal sprayer. The DPM model was used to study the influence of the above parameters on the atomization particle size of the snow crystal sprayer. The rule of atomization particle size and occurrence frequency was analyzed, and the influence of key geometric parameters on the snow crystal sprayer was explored. This provides a scientific basis for the structural optimization of the snow crystal sprayer. The simulation results show that the length of the mixing chamber has a great influence on the atomization effect, and the outlet diameter has a certain influence on the atomization effect. The structure of the snow crystal sprayer to achieve better atomization effect is that the length of the mixing chamber is 30 mm and the diameter of the outlet is 1.1 mm.

收稿日期: 2022-04-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFF0303901)。

第一作者: 赵巍(1975-), 女, 讲师。研究方向: 人工造雪。E-mail: zw_cherry@163.com

Keywords: *numerical simulation; multiphase flow nozzle; atomization particle size; Sauter mean diameter*

冬季是滑雪旅游的旺季,2022北京冬奥会的成功举办激起了广大群众对滑雪运动的热情,大大促进了我国冰雪运动的发展,从北京成功申办第24届冬奥会开始,各地纷纷建设滑雪场。2015年6月,国家奥委会确定在北京举办冬奥会并提出人工造雪将会是张家口赛区的主要雪源^[1]。滑雪场是个对雪需求量极大的地方,但是,受限气象条件的影响,自然降雪未必能达到滑雪场的要求。目前,造雪机的发展方向是提高成核率,其中最为核心的部件就是核子器^[2]。核子器是一种典型的两相流喷嘴,通过与液体流动方向成一定角度注入一定压力的空气,在内部形成高速气流,作为能量载体,经过撞击或者摩擦等与低速的液体发生相互作用。高速气流在喷嘴内流动时的气动作用足够大时,能够克服液体射流产生的黏性力与表面张力,致使液体被撕碎成一个个的小液滴^[3]。核子器实现液体射流的破碎是依靠高压气体的辅助,国际上众多学者认为,提高液体射流与环境周边空气的相对速度是改善喷嘴雾化效果最有效的手段之一^[4]。气流无论是在喷嘴内部与液体混合,还是在喷嘴外部与液体相互作用,都对雾化效果有明显的提升^[5]。

本文研究的核子器是内混式喷嘴,气液在喷出前先进行混合,其在结构上最显著的特点是有供气液混合的混合室。气液两相在混合室内相互作用,形成大量的液膜碎片与大小不均的液滴,喷出后在压差作用下气体迅速膨胀,进一步雾化形成更细小的液滴^[6]。与传统Y型核子器相比,本文使用的核子器由2个对称的空气入口与一个液体入口组成,这种结构两侧呈一定角度进气,气液混合更加均匀。目前与核子器相关的气液混合式喷嘴已经有了不少的研究。杨玉昆^[7]研究了工作介质水和空气的混合比例对雾化性能的影响,结果表明,增加空气的比例可以有效地优化雾化性能;胡建林等^[8]建立了气动雾化喷嘴的空气与水的流动模型来研究辅助雾化孔角度的改变对雾化特性的影响,结果表明,气动雾化喷嘴应尽量选用较小的辅助雾化孔角度;王耀荣^[9]研究了液体ALR(air-liquid ratio)对喷嘴内部液体

的影响,当ALR由小变大时,混合室内的液柱波动性变得越来越小,壁面上液膜扰动性也变得越来越小;张奎^[10]研究了内混式空气雾化喷嘴的进气孔个数对核子器雾化效果的影响,结果表明,增加进气孔个数使得雾化效果有显著的提高;江莉^[11]通过实验得出了喷嘴结构和喷射条件改变时喷雾锥角变化不大的结论;肖彬^[12]用实验的方法回归出了内混式雾化喷嘴的液体流量系数的经验关联式;马其良等^[13]以压缩空气和变压器油为工质,得出了内混式介质雾化喷嘴油、气流量系数与运行及结构参数的实验关系式。张琳等^[14]以常规内混式喷嘴为研究对象,研究了工质为燃料与雾化剂时不同混合室长度对雾化粒径的影响规律,得出了该种喷嘴的最佳混合室长度为70~80 mm。Jones等^[15]采用数值模拟的方法研究了内混式喷嘴,其中,空气为连续相,液滴为离散相,采用欧拉模型与拉格朗日模型计算了液滴的雾化粒径,模拟值与实验值具有较好的吻合性。张淑荣等^[16]采用了组分输运模型对Y型内混式喷嘴的雾化效果进行了模拟,介质为燃油,结果表明,出口直径的结构尺寸对于Y型内混式喷嘴雾化效果具有显著的影响。对于气液混合式喷嘴来说,混合室的长度对雾化效果有着重要的影响,前人研究表明,特定型式的核子器混合室长度以及出口直径的变化会影响索特尔平均粒径 D_{32} 的大小以及液滴粒径分布,因此,混合室长度和出口直径是关键参数。本文采用数值模拟的方法研究关键结构参数(核子器混合室长度、出口直径)对该核子器雾化效果的影响。

1 物理模型及数学模型

1.1 物理模型

采用卡宾集团所提供的核子器,结构如图1所示,采用UG软件建立数值仿真几何模型。核子器的结构与尺寸均按照卡宾所提供的核子器实物建立,核子器混合室长度 H 为30 mm,出口直径 d 为1 mm。为研究不同混合室长度和直径对雾化效果的影响,对这2个参数进行小范围缩放,最终选取范围为27~39 mm与0.9~1.3 mm。外部喷

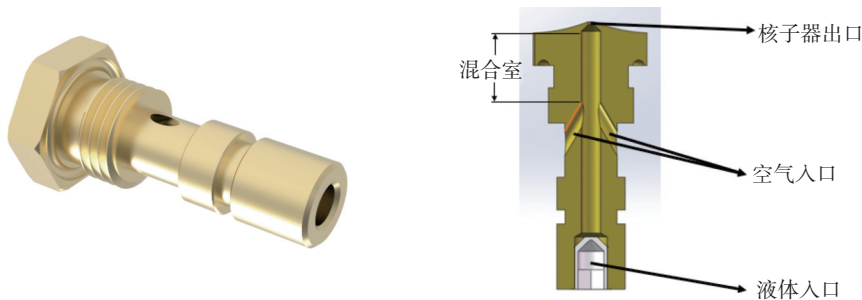


图 1 几何模型

Fig.1 Geometric model

雾场流域为直径 40 mm、高 200 mm 的圆柱形区域。网格划分如图 2 所示, 由于该几何模型比较复杂, 故采用非结构化网格进行网格划分, 网格大小设置为 0.3 mm, 近壁面处增加了边界层网格, 以确保计算的稳定性和可靠性。

在进行网格划分时, 并不是网格数量越大, 计算越精准, 相反, 当网格数量过大时, 计算精度并没有被提高, 反而会造成计算发散, 出现报错等结果。因此, 为了保证后期模拟计算的网格

都为最优, 且既要保证计算精度又不能浪费计算资源, 通常需要先作网格无关解分析。采用不同数量的节点数来确定该无关解, 节点数依次取 36 万, 55 万, 71 万, 98 万, 114 万, 123 万, 134 万及 142 万进行计算, 网格加密系数约为 1.2。网格无关性验证如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 当节点数增加到 98 万时, 核子器出口速度 v 几乎不再变化, 因此, 选择网格数 98 万为计算网格。 n 为网格数。

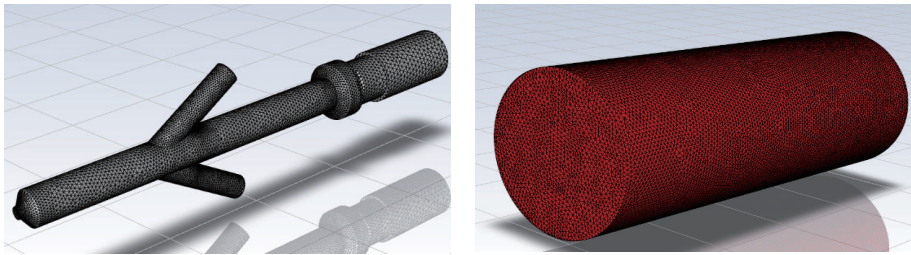


图 2 核子器与流域网格划分

Fig.2 Grid division of watershed and snow crystal sprayer

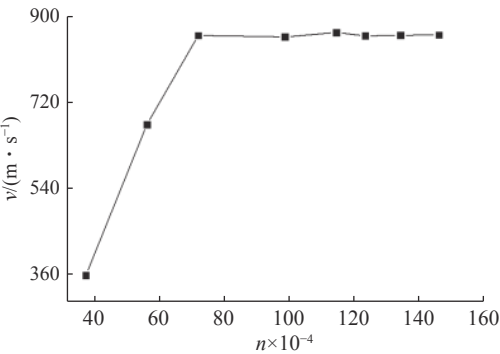


图 3 核子器出口处速度与网格数量关系

Fig.3 Relationship between the velocity at the exit of snow crystal sprayer and the number of grids

1.2 数学模型^[17]

现介绍本模拟的数学模型。

a. 质量守恒方程。

根据质量守恒定律, 单位时间内控制体的总

净流出质量等于相同时间内从外界流入控制体的质量, 即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

式中: ρ 为连续相密度; t 为时间; u, v, w 分别为控制体在 x, y, z 方向上的速度分量。

b. 动量守恒方程。

外界作用在微元体上的各种力之和等于该微元体中流体动量对时间的变化率。流体在 x, y, z 方向上的动量守恒方程为

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \text{div}(\rho u \mathbf{U}) = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \text{div}(\rho v \mathbf{U}) = \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \tag{3}$$

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial z} + \text{div}(\rho w \mathbf{U}) = \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \tag{4}$$

式中: $\mathbf{U}$ 为流体速度; p 为控制体上的压强; τ 为

作用在控制体表面上的黏性应力; F 为作用在控制体上的外力。

c. 能量守恒。

能量方程是指在单位时间内流入控制体的各种能量与外力所作的功之和等于控制体内能量的增量,其表达式为

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho U T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad } T\right) + S_T \quad (5)$$

式中: T 为温度; k 为传热系数; c_p 为流体的比热容; S_T 为由于黏性作用由流体机械能转换来的热能及流体的内热源。

d. VOF (volume of fluid) 模型

目前主要有两大类数值模拟方法用于解决多相流问题: 欧拉-欧拉方法和欧拉-拉格朗日方法。液体雾化过程中通常以连续的液膜或是大块的液团结构存在, 因此, 在数值模拟中主要采用实现界面捕捉的欧拉方法, 其中, 较为常见的就是 VOF 模型^[18]。在计算域中定义一个标量场函数 α , 用来表征模拟中的第二相在计算网格中所占的体积分数。如图 4 所示, $\alpha=1$, 则网格内全部为液体; $\alpha=0$, 网格内全部为气体; 当 $0<\alpha<1$ 时, 此处的网格内为气液混合物。

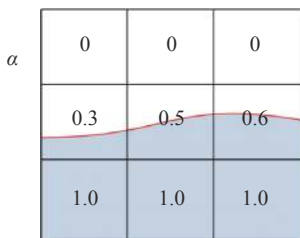


图 4 不同液体体积分数的网格

Fig.4 Grid of different liquid volume fractions

可以通过求解单个或多个相的体积分数来实现相与相间的界面的跟踪, 方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (U_1 \alpha) = 0 \quad (6)$$

式中: α 为体积分数; U_1 为液相速度。

e. 离散相模型。

液滴运动方程为

$$\frac{dU_p}{dt} = F_D(U - U_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (7)$$

式中: F_D 为离散相受到的拽力; F 为连续相对离散相的阻力; U_p 为颗粒速度; g 为重力加速度; ρ 为流体密度; ρ_p 为颗粒密度。

将喷嘴内部及近喷嘴区域的流动模拟分为

2 个步骤。首先对喷嘴内气液两相的流动进行瞬态模拟, 时间步长为 2×10^{-6} s, 采用压力基求解器, 选择 SIMPLE 算法进行压力速度耦合计算。考虑到气液相间的能量交换, 采用能量方程。VOF 模型中设置空气为第一相, 水为第二相。相界面分辨模型选择 Dispersed 类型, 表面张力模型为连续表面张力模型, 表面张力系数为 0.073 N/m。湍流模型选择 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 考虑湍流产生的黏性耗散效应。喷嘴进气口采用压力入口边界条件, 考虑空气的可压缩性, 采用理想气体模型, 压力大小为 0.6 MPa。喷嘴进水口采用压力入口边界条件, 大小为 1.5 MPa。喷雾场采用压力出口边界条件, 为标准大气压 101.325 kPa。初始化模式采用标准初始化, 进水口速度设为 3.5 m/s, 外部边界设置为无滑移速度边界条件, 其他壁面均设置为绝热壁面。喷嘴雾化数值模拟采用 DPM (discrete phase model) 模型进行瞬态模拟, 其中, 空气为连续相, 液滴为离散相。喷嘴雾化模型采用 air-blast-atomizer 模型, 注射粒子类型为液体颗粒, 颗粒注入流量等于液体的入口流量, 颗粒释放的计算方法采用 const-number 模型。液滴破碎模型选用 Wave 模型, 采用动态曳力模型来考虑液滴变形对阻力系数的影响。采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型描述气相湍流, 考虑气液两相之间的耦合, 流体相中湍流引起的颗粒弥散可以用随机跟踪模型来预测。

液滴的粒径大小及分布可以用来判断雾化效果的好坏。在实际的雾化过程中, 液滴并不是规则的球体, 工程上一般将这种不规则的球体折算为规则的球体来进行简化的计算。不同的应用场合, 液滴平均粒径的计算方法也不尽相同, 在评价喷嘴雾化性能中应用最为广泛的粒径标准为索特尔平均粒径 D_{32} , 即表面积平均粒径, 其计算式为^[19]

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (8)$$

式中: n 为液滴总数; D_i 为第 i 个液滴的粒径。

1.3 模型验证

为了验证核子器雾化模型的适用性, 模拟了水压 0.4 MPa、气压 P_{air} 在 0.4~0.48 MPa 之间的核子器雾化粒径, 并与上海理工大学科技冬奥项目团队使用激光粒度仪测得的实验值进行对比, 由图 5 可以发现, 数值模拟得到的 D_{32} 与实验值的相

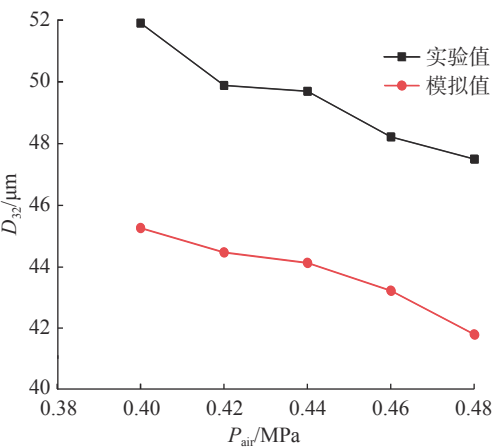


图5 核子器 D_{32} 模拟值与实验值对比

Fig.5 Comparison of D_{32} analog and experimental values of snow crystal sprayer

似度较高，趋势完全符合，各工况误差如表1所示，最大误差为15.33%，考虑到数值模拟是在相对理想的条件下进行的，且核子器受到工艺限制，实验结果与模拟结果有一定差距，但也在合

表1 各工况误差

Tab.1 Errors under various working conditions

$P_{\text{air}}/\text{MPa}$	0.4	0.42	0.44	0.46	0.48
误差/%	15.33	11.25	11.01	10.35	12.01

理范围内，故该数值模拟方法具有一定适用性。

2 数值模拟结果

2.1 混合室长度对核子器雾化效果影响

对于气液混合式喷嘴来说，混合室的长度对雾化效果具有重要的影响，有研究表明，其长度的变化会影响 D_{32} 的大小以及液滴粒径分布。图6和图7为不同混合室长度条件下核子器内部与出口处气液相分布图。从图中可以看出，液体受到空气的挤压与剪切作用，在混合室两侧分布，随着混合室长度的增加，液膜在出口处发展越来越完全，气液相分布越来越均匀。这是由于混合室长度增加后气液混合时间增加，混合更加充分。

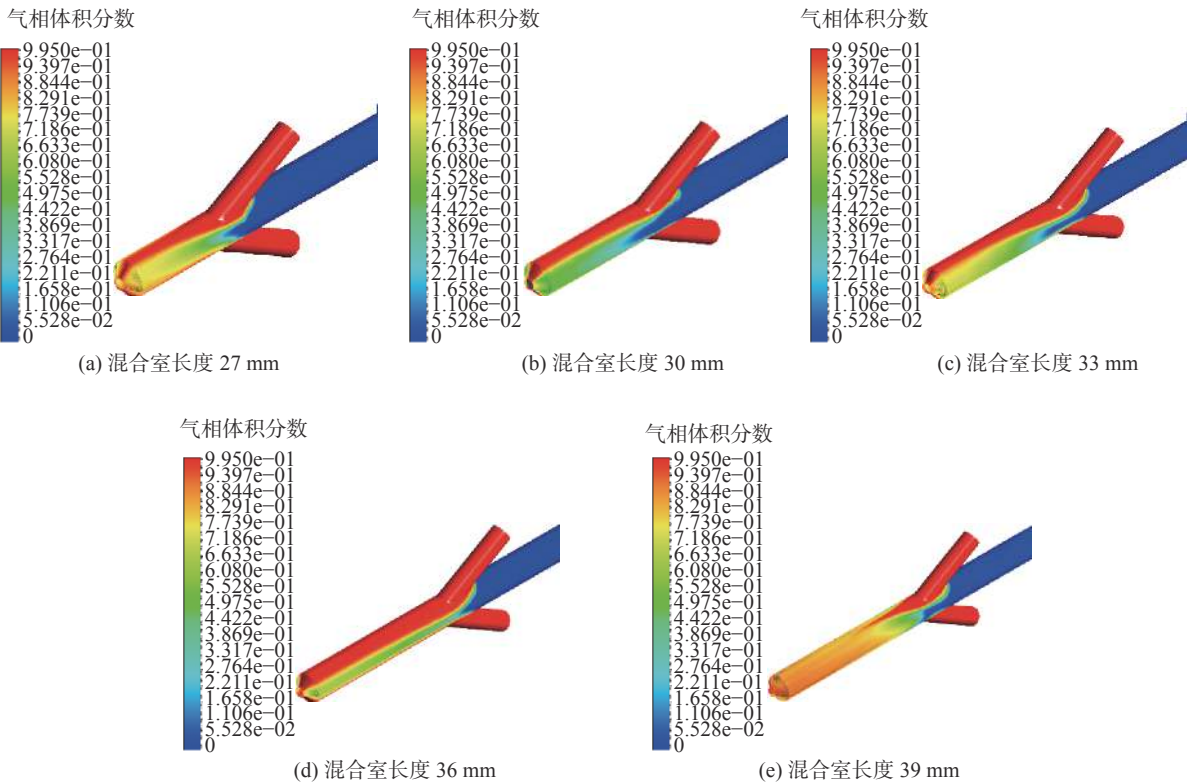


图6 不同混合室长度核子器内部气液相分布图

Fig.6 Gas-liquid phase distribution in snow crystal sprayer with different mixing chamber lengths

图8为不同混合室长度出口处液膜厚度 δ 的变化情况。从图中可以看出，液膜厚度开始时较

大，随着混合室长度 H 的增加，液膜厚度不断减小，在长度为33 mm时达到最小值，但随着混合

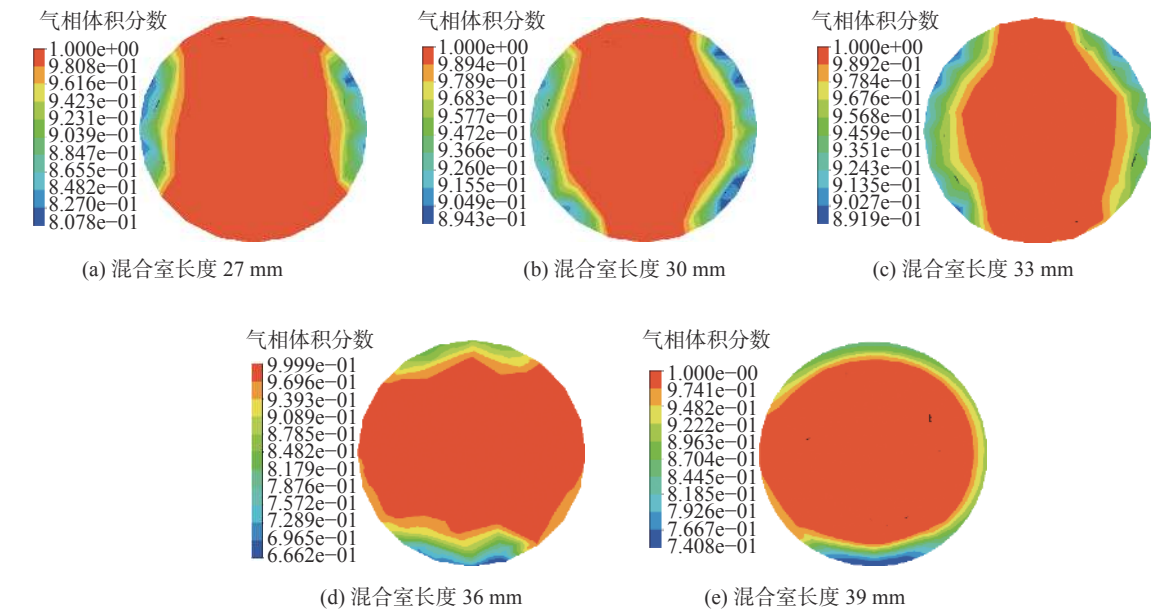


图 7 不同混合室长度核子器出口处气液相分布图

Fig.7 Gas liquid phase distribution at the outlet of snow crystal sprayer with different mixing chamber lengths

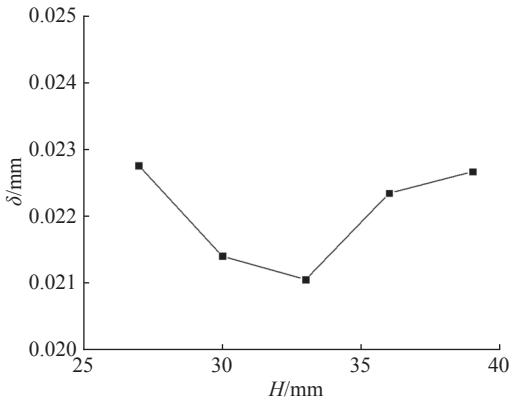


图 8 不同混合室长度核子器出口处液膜厚度

Fig. 8 Liquid film thickness at the outlet of snow crystal sprayer apparatus with different mixing chamber lengths

室长度继续增加, 液膜厚度呈增大的趋势。这是由于随着混合室长度的增加, 流体在混合室内流动过程中受到的阻力增大, 导致气水混物流速降低。虽然延长混合室长度使得液膜展开更加完全, 但由于流速降低, 液滴容易聚合, 使得液膜厚度反而变大。

图 9 为不同混合室长度条件下核子器内部以及近核子器区域的速度云图, 计算时考虑了重力, 实际上核子器的摆放方向是水平放置的, 如图 2 所示, 重力的方向垂直于核子器出口方向, 因此会导致气流向重力方向偏移。通过分析图 9 可以发现, 空气进入核子器与水在混合室内进行

混合后, 由于空气流通空间的变化, 静压与动压的转换增加了空气的速度, 在混合的过程中, 液体与空气相互摩擦冲击, 促进了液体变为更小的液滴, 但是, 随着混合室长度的增加, 提供给液滴破碎的能量在混合室内产生了损耗。在核子器的出口处, 气液混合物被喷出后因压力差的原因, 体积迅速膨胀, 空气速度得到进一步的增加, 加快了液丝与液膜等发生破碎, 雾化为更小的液滴。

图 10 为不同混合室长度核子器内部截面液滴速度分布图。可以发现, 最内围的空气层速度较大, 最外层的液体层速度较低, 随着混合室长度的增大, 喷嘴内部速度分布逐渐趋于同心圆分布, 但是, 随混合室长度继续增加, 速度分布开始变得不均匀, 呈 8 字形分布。这是因为: 混合室长度的增加影响了核子器的泄流能力, 气体的流量总体呈下降趋势, 从而使得混合室内的速度变慢, 同时过长的混合室会令流体排出时获得更大的阻力, 不利于液滴的雾化。

图 11 为不同混合室长度核子器液滴 D_{32} 变化图, 从图中可以看出, 雾化粒径呈先减后增的趋势, 混合室长度为 30 mm 时雾化粒径最小, 可见混合室长度在 27~30 mm 内能够达到较好的雾化效果。图 12 为不同混合室长度粒径分布频率图, 从图中可以看出, 当混合室长度在 27~30 mm 时, 核子器雾化液滴粒径分布范围较窄, 基本分布在小于 110 μm 范围内, 均匀性较好, 特别是当

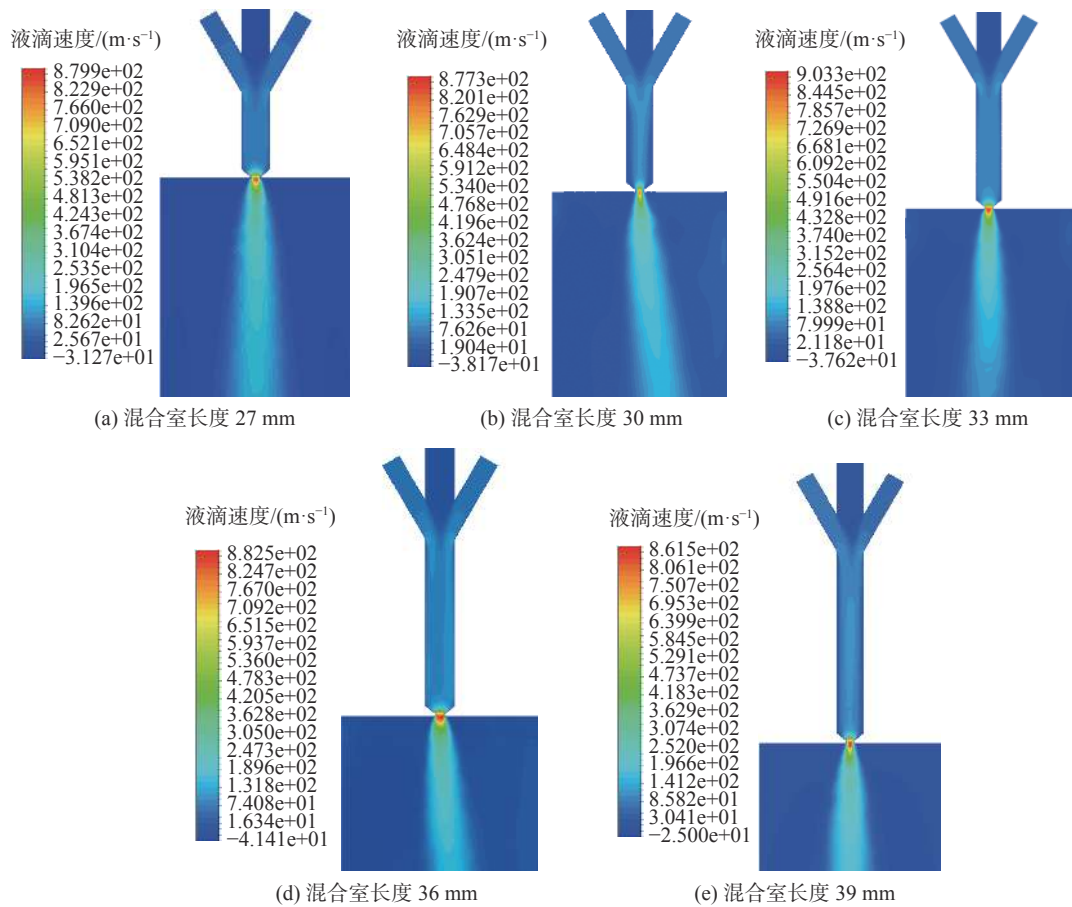


图 9 不同混合室长度核子器雾化液滴速度分布

Fig.9 Velocity distribution of atomized droplets in snow crystal sprayer with different mixing chamber lengths

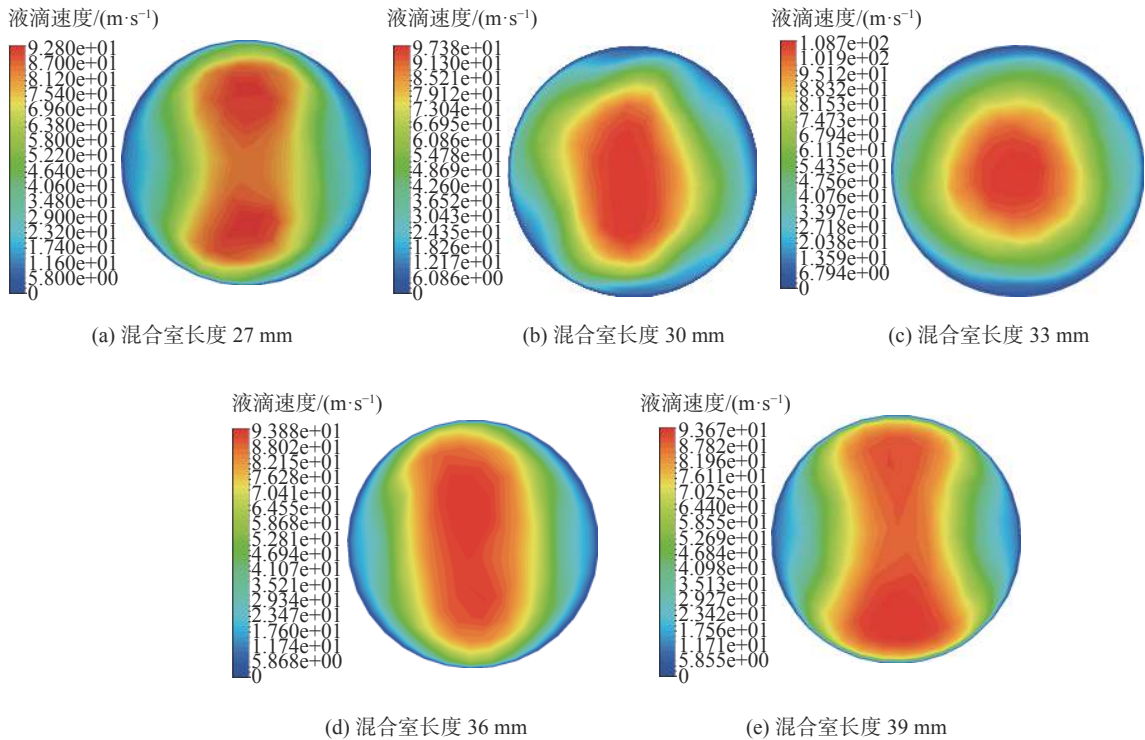


图 10 不同混合室长度核子器内部截面液滴速度分布图

Fig.10 Droplet velocity distribution diagram of internal section of snow crystal sprayer with different mixing chamber lengths

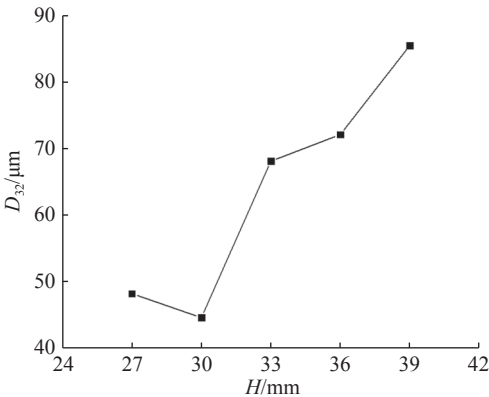


图 11 不同混合室长度的 D_{32} 变化图

Fig. 11 Sauter mean diameter variation diagram of different mixing chamber lengths

混合室长度为 30 mm 时, 雾化粒径分布频率最大值达到 40%, 表明大部分液滴达到了较好的雾化效果。而当混合室长度继续增加, 雾化液滴粒径分布范围变大, 均匀性变差, 当 $H=39$ mm 时, 液滴雾化粒径分布均匀性最差, 粒径在大于 $190\text{ }\mu\text{m}$ 范围内都有一定的频率占比, 可见混合室长度

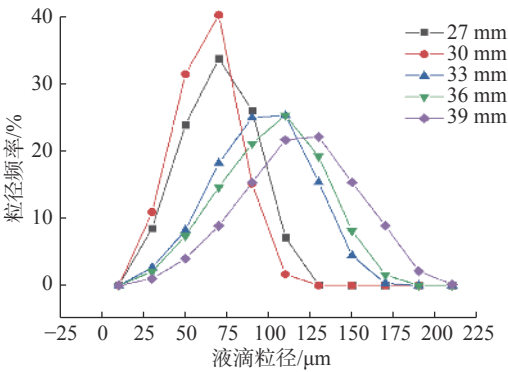


图 12 不同混合室长度粒径频率分布图

Fig. 12 Particle size frequency distribution of different mixing chamber lengths

对雾化质量的影响较大。

2.2 出口直径对核子器雾化效果影响

图 13 和图 14 分别为不同出口直径条件下, 核子器内部以及出口处气液两相分布情况。从图中可以看出, 随着出口直径的增加, 核子器近壁面的液相逐渐减少。这是由于出口直径增大后, 核子器的整体泄流能力增强, 液相再经过混合室混

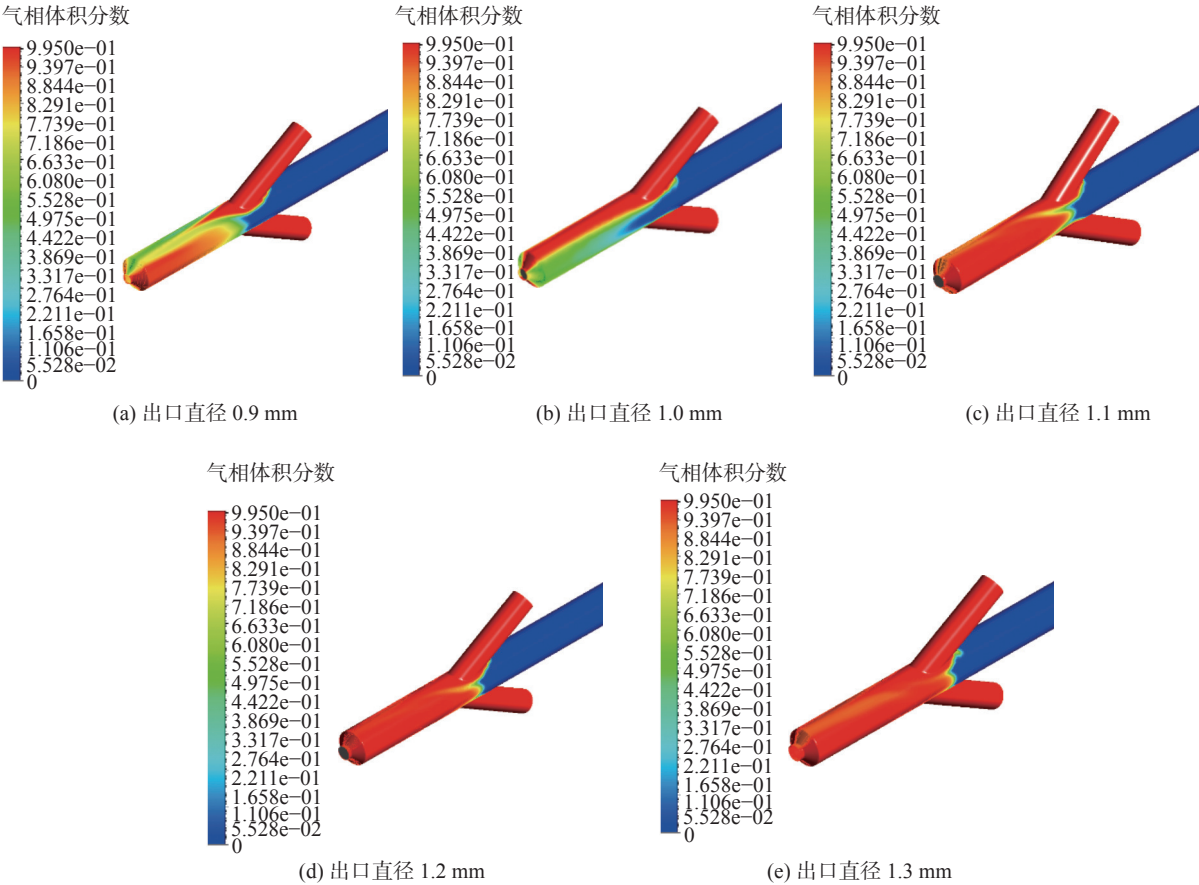


图 13 不同出口直径核子器内部气液相分布图

Fig. 13 Gas liquid phase distribution in snow crystal sprayer with different outlet diameters

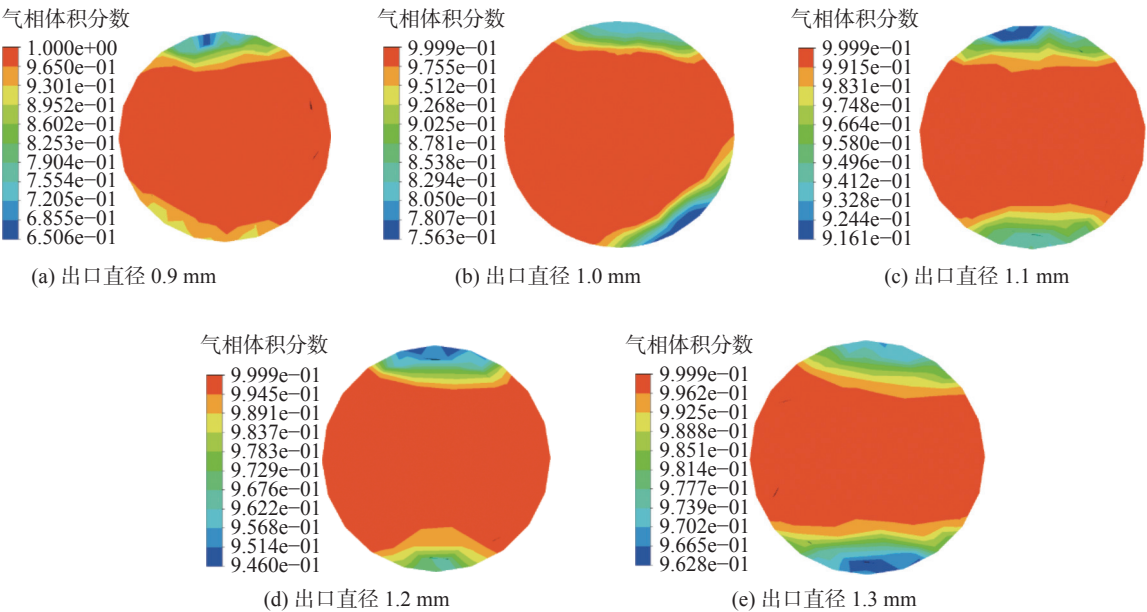


图 14 不同出口直径核子器出口处气液相分布图

Fig.14 Gas liquid phase distribution at the outlet of snow crystal sprayer with different outlet diameters

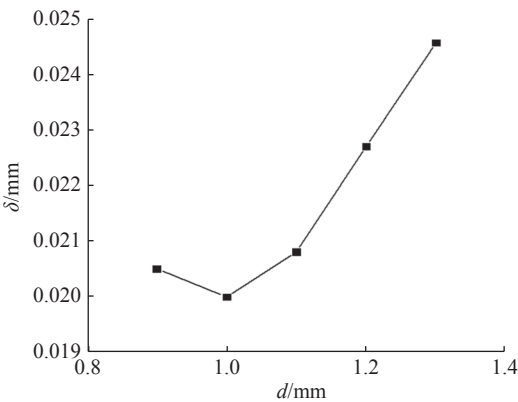


图 15 不同出口直径液膜厚度

Fig. 15 Liquid film thickness with different outlet diameters

合后能更容易地排出。同时观察图 14 的出口处的液相分布发现，随着出口直径 d 的增加，液相分布更加均匀。具体增加趋势如图 15 所示，在出口直径 0.9 mm 时液膜厚度比 1.0 mm 时要略大，这是由于核子器出口处泄流能力有限，导致气液混合物在出口处排出阻力较大，从而形成稍厚的液膜。随着出口直径不断增加，核子器排出气液混合物量的增加，在出口处流经气液混合物的量增加，在出口边缘形成了较厚的液膜。

图 16 为不同出口直径条件下核子器内部以及近核子器区域的速度云图。通过观察图 16 可以发现，核子器出口处的速度随着出口直径的增大而增大。在同样的运行参数下，随着核子器出口直

径的增加，气液混合物流量增大，而当出口直径较小时，喷嘴排泄能力较弱，流动阻力较大，导致整体速度减小。图 17 为混合室中间液滴速度分布图，随着出口直径的增加，核子器排泄能力增加，混合室内气液混合物流动速度增加。因此，在雾化过程中，当核子器出口直径较大时，空气流量更大，使得其能提供更多的雾化能量，液膜更容易被撕裂为小液滴，强化雾化效果。

图 18 和图 19 分别为不同出口直径的 D_{32} 分布与粒径频率分布，从图中可以发现，随着核子器出口直径的增加， D_{32} 呈先减小后增大的趋势，且在 1.1 mm 时达到最小值。这是由于出口直径的增加使得核子器出口流量增加，混合室内空气速度增加，使得雾化能量增加，强化了核子器的雾化效果，但是，当出口直径超过 1.1 mm 时，过大的流量会使混合室内的气液混合物在未混合充分时就被喷出。观察图 19 可以发现，出口直径 $d=0.9\sim 1.1$ mm 时粒径分布相对集中，主要分布在小于 $70\text{ }\mu\text{m}$ 范围。从图 19 的局部放大图可以看出，当核子器出口直径继续增大时，大直径液滴所占比率相对增多，这是由于虽然出口直径较大时空气速度增加。但是，未经完全混合的气液混合物中气液两相的相互碰撞时间减少，同时会增大粒径大于 $90\text{ }\mu\text{m}$ 液滴的比率，使得液滴大小分布不均匀，并且对 D_{32} 的计算结果会有较大影响，导致整体平均粒径增大。

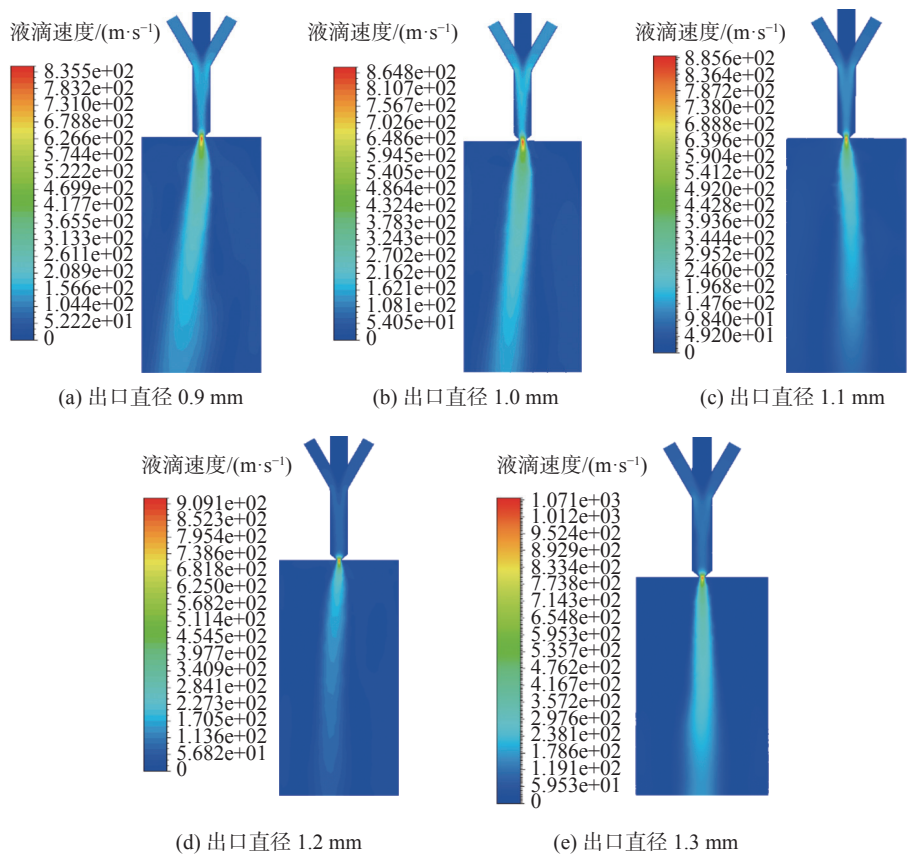


图 16 不同出口直径核子器雾化液滴速度分布

Fig.16 Velocity distribution of atomized droplets in snow crystal sprayer with different outlet diameters

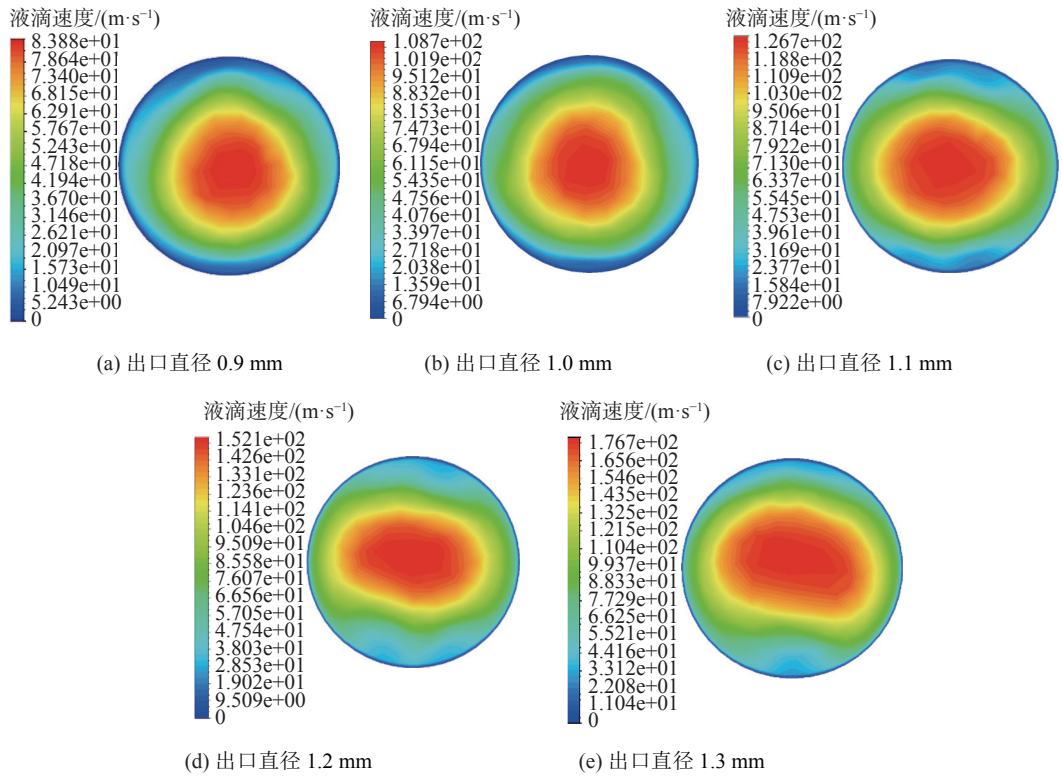


图 17 不同出口直径核子器内部截面液滴速度分布图

Fig.17 Droplet velocity distribution diagram of internal section of snow crystal sprayer with different outlet diameters

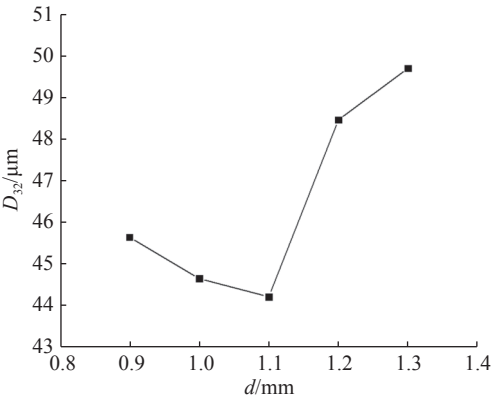


图 18 不同出口直径的 D_{32} 变化图

Fig. 18 Sauter mean diameter variation diagram of different outlet diameters

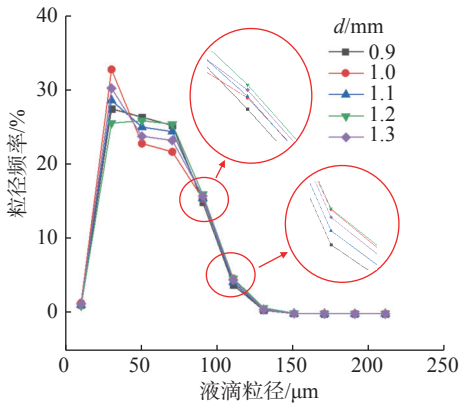


图 19 不同出口直径粒径频率分布图

Fig. 19 Particle size frequency distribution of different outlet diameters

3 结 论

对核子器雾化效果进行数值模拟研究，研究核子器不同混合室长度以及不同出口直径的变化对核子器雾化效果的影响，从而探索该种核子器的最佳雾化效果结构，模拟结果表明：

a. 核子器混合室长度对其雾化效果有较大影响，当混合室长度在 30 mm 附近时，气液混合效果较好，且不会过多地浪费雾化过程中空气所提供的动能，雾化得到的液滴粒径分布较为均匀，雾化效果较好。

b. 核子器不同的出口直径对核子器雾化效果有一定影响。当出口直径过小时，核子器泄流能力有限，液滴多次碰撞聚合使得雾化效果变差；当核子器出口直径较大时，流量增加，流速增加，但是，混合程度减弱，使得雾化液滴中有较多的大颗粒，且分布不均匀。当 $d=1.1$ mm 时取得的雾化效果相对较好。

c. 综上所述，该种核子器达到较好雾化效果的结构为混合室长度 30 mm、出口直径 1.1 mm。

参考文献：

[1] 毛明策,王琦,田亮. 2022 年北京冬季奥运会人工造雪气象条件初步研究 [J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 547-552.

[2] 刘国强,熊通,晏刚,等. 人工造雪技术现状与研究进展 [J]. 制冷学报, 2021, 42(5): 1-16.

[3] 穆文乐. 内混式空气助力喷嘴喷雾特性的试验及数值模拟研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.

[4] [美] 诺曼·奇格. 能源、燃烧与环境 [M]. 韩昭沧, 郭伯伟, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1991

[5] 曹建明,李跟宝,朱辉. 空气助力喷嘴雾化特性实验研究 [J]. 新能源进展, 2018, 6(4): 267-273.

[6] 张征,樊未军,杨茂林. 双路离心式喷嘴雾化特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 153-156.

[7] 杨玉昆. 造雪机核子器雾化性能仿真分析与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021.

[8] 胡建林,郑水华,汪军印,等. 气动雾化喷嘴辅助雾化孔角度优化 [J]. 轻工机械, 2021, 39(6): 75-80.

[9] 王耀荣. 内混式空气雾化喷嘴内部两相流动特征试验与数值模拟研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.

[10] 张奎. 内混式空气雾化喷嘴雾化特性与结构优化研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.

[11] 江莉. 喷嘴结构及喷射条件对内混式空气雾化性能影响试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.

[12] 肖彬. 内混式二相流喷嘴流量特性 [J]. 化学工程, 2006, 34(12): 28-30.

[13] 马其良,张秋婷,毕政益. 内混式油喷嘴流量特性实验研究 [J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(3): 253-256.

[14] 张琳,王立坤,薛磊,等. 内混式喷嘴流场的数值模拟研究 [J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(6): 959-963.

[15] JONES W P, LETTIERI C. Large eddy simulation of spray atomization with stochastic modeling of breakup[J]. Physics of Fluids, 2010, 22(11): 115106.

[16] 张淑荣,尹洪超. 空气雾化燃油喷嘴的喷雾数值模拟 [J]. 能源技术, 2007, 28(1): 14-16.

[17] 王志奇,陈柳明,肖炳英,等. 重油燃烧器 Y 型喷嘴气液两相流动与雾化特性模拟 [J]. 过程工程学报, 2021, 21(10): 1167-1176.

[18] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.

[19] 曹建明. 喷雾学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.