

中文引用格式:李春艺,周睿,顾寅,等. 泡沫灭火剂垂直输运特性及其对关键参数的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(4): 228–234.

英文引用格式:Li Chunyi, Zhou Rui, Gu Yin, et al. Analysis of vertical transport characteristics of foam fire extinguishing agent and influence of key parameters [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 228–234.

泡沫灭火剂垂直输运特性及其对关键参数的影响分析*

李春艺¹, 周睿¹副研究员, 顾寅¹, 刘梦凡², 宿荣芳¹

(1 清华大学 安全科学学院, 北京, 100084;

2 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 淮南, 232001)

中图分类号: X928.7

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0546

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3090502)。

【摘要】 为解决超高层建筑火灾中系留式灭火无人机灭火剂长距离垂直输运的难题, 通过建立泡沫灭火剂垂直输运模型, 对比分析模拟结果、经验模型计算结果和试验数据, 深入研究流量、气液比和管径对泡沫灭火剂垂直输运过程中的压力损失和流动速度的影响。结果表明: 垂直输运模型误差稳定且均小于3%, 优于经验模型的计算精度。随着流量的增加, 压力损失逐渐增大, 且流量越大, 同等流量增量对应的压力损失增幅越明显, 管内流动速度的稳定时间也随之缩短。流量一定、管径分别为60和100 mm时, 压力损失随着气液比增加而减小; 增大管径可减小气液比对摩擦压降和管内流动速度的影响。随着管径增加, 速度变小, 摩擦压降也减小; 管径在40~60 mm范围内, 管径对压力损失和速度变化的影响较大, 当管径大于80 mm时, 影响减弱。

【关键词】 泡沫灭火剂; 垂直输运; 流动特性; 摩擦压力损失; 流动速度; 数值模拟

Analysis of vertical transport characteristics of foam fire extinguishing agent and influence of key parameters

Li Chunyi¹, Zhou Rui¹, Gu Yin¹, Liu Mengfan², Su Rongfang¹

(1 School of Safety Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to address the challenges associated with the long-distance vertical transport of fire suppressant agents delivered by tethered firefighting drones in super high-rise building fires, a vertical transport model for foam extinguishing agents was established. The simulation results were comparatively validated against both empirical model calculations and experimental data. Furthermore, the study conducted an in-depth investigation into the effects of flow rate, gas-liquid ratio, and pipe diameter on pressure loss and flow velocity during the vertical transport of foam extinguishing agents. The findings indicate that the numerical simulation errors remain stable and are consistently less than 3%, demonstrating superior accuracy compared to the empirical model. In terms of flow characteristics, as the

* 文章编号: 1003-3033(2026)04-0228-07; 收稿日期: 2025-11-08; 修稿日期: 2026-01-25

** 通信作者: 周睿(1982—), 男, 陕西安康人, 博士, 副研究员, 主要从事灾害流体动力学方面的研究。E-mail: zhour@tsinghua.edu.cn.

flow rate increases, pressure loss gradually rises, with the rate of increase becoming more pronounced at higher flow rates; concurrently, the stabilization time of the flow velocity within the pipe is reduced. Under constant flow rate conditions, when the pipe diameters are 60 mm and 100 mm, respectively, pressure loss decreases with an increase in the gas-liquid ratio. Moreover, increasing the pipe diameter mitigates the influence of the gas-liquid ratio on both frictional pressure drop and flow velocity. The impact of pipe diameter on pressure loss is primarily realized through alterations in the internal flow velocity: as the pipe diameter increases, the flow velocity decreases, leading to a corresponding reduction in frictional pressure drop. Within the pipe diameter range of 40 mm to 60 mm, the effect of pipe diameter on pressure loss and velocity variation is significant; however, when the pipe diameter exceeds 80 mm, this influence gradually diminishes. The research outcomes provide theoretical guidance for the vertical.

Keywords: foam fire extinguishing agent; vertical transport; flow characteristic; frictional pressure loss; flow velocity; numerical model

0 引言

随着我国城镇化进程加速,超高层建筑规模位居世界前列^[1],这导致火灾风险随之增加,且传统消防装备在超高层扑救中存在显著局限^[2]。当前,搭载液电同缆垂直管缆的系留式大载荷灭火无人机系统成为研究热点,该系统常采用泡沫灭火剂作为灭火介质^[3-4]。然而,由于泡沫灭火剂属于复杂的气液两相流,其流动特性与稳定性尚不明确^[5]。因此,开展泡沫灭火剂垂直输运流动特性研究,具有重要的工程应用价值。

对此,诸多学者开展了研究,在压力损失方面,徐学军^[6]研究了压缩空气泡沫在 DN100 管道中的输运特性,初步建立了垂直向上压力衰减工程预测模型。Cai Bo 等^[7]开展试验,研究了水平螺旋盘管矩形管内不同流型的空间相分布和空气-水流的两相摩擦压降。Su Yuqing 等^[8]通过试验发现,极大螺旋盘管的摩擦压降随质量流量呈正相关,与系统压力呈反相关。Ferraris 等^[9]基于不同试验数据库的构建,分析了水蒸气两相流在螺旋管中的摩擦压降。陈胤昌等^[10]利用数值模拟方法探究了压缩空气 A 类泡沫气液比(气相体积与液相体积的比值)、管径和供液流量对垂直管网输运压力衰减的影响。在管内流速稳定性方面,俞强强等^[11]对比数值模拟与试验结果,发现竖直管内气液两相流在低气相和高液相表观流速下产生分布均匀的稳定泡沫。Bamidele 等^[12]发现,有限流孔的两相流水平管道中,随着气体通量增加管内流速波动幅度增大。Zhu Yan 等^[13]通过试验和数值模拟,研究了黏弹性管道中的瞬态空气-水混合流。

综上,当前对于流动特征参数对各部分压降影响的研究还较为鲜见,因此,笔者拟采用数值模拟方

法,建立泡沫灭火剂垂直输运模型(简称垂直输运模型),分析泡沫灭火剂垂直输运过程中的流动特性,并对比垂直输运模型与均相模型、混合相-单相并流模型的模拟结果误差,以期对高层建筑灭火过程中泡沫灭火剂的输运提供理论依据。

1 垂直输运模型

1.1 湍流模型

$k-\varepsilon$ 模型可以较好地模拟管道中的流动特性,并揭示泡沫垂直管网输运压力衰减变化^[14-15]。因此,选用雷诺时均(Reynolds Average Navier-Stokes, RANS) $k-\varepsilon$ 湍流模型^[16-18]进行模拟计算:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{2}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3}$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{4}$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \tag{5}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{G_k}{\rho C_{\mu \varepsilon}}} \tag{6}$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; k 为湍流动能, m^2/s^2 ; t 为时间, s ; u_i 为时均速度 i 方向的笛卡尔坐标分量, m/s ; x_i 为笛卡尔坐标 i 方向分量, m ; μ 为分子动力黏度;

μ_l 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; σ_k 为计算湍流动能的湍流普朗特数; x_j 为笛卡尔坐标 j 方向分量, m ; G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能, m^2/s^2 ; ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; $C_{1\varepsilon}^*$ 为修正后的经验系数; $C_{2\varepsilon}$ 、 C_{μ} 为常数; μ_l 为紊动能黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; u_j 为时均速度 j 方向的笛卡尔坐标分量, m/s ; $C_{1\varepsilon}$ 为常数; η 为湍流参数; η_0 、 β 、 $C_{\mu\varepsilon}$ 均为常数。根据模拟采用的管径、流速、介质密度和动力黏度计算得到, k 取值范围为 $0.003 \sim 0.073 \text{ 2}$, ε 为 $0.004 \sim 0.930 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。

1.2 物理模型

系留式灭火无人机系统管径选取范围为 $40 \sim 100 \text{ mm}$, 空中作业极限高度为 200 m 。为节省时间和算力, 选用楔形二维网格模型, 即取三维圆管一小角度切口, 经对称轴旋转得到整个三维管道模拟结果。该网格模型已在多种不可压缩流体的模拟计算中得以运用^[19]。

采用二维网格划分物理模型, 综合考虑模拟精度和计算效率, 设定二维物理模型管道高度为 50 m 。为排除网格密度对模拟精度的影响, 选取网格数分别为 5 、 20 和 80 万 3 组网格数进行网格无关性验证。软件自带网格质量检验工具的检查结果表明: 网格质量与完整性良好。选用管径为 100 mm 、气相流量为 $2\,400 \text{ L/min}$ 、液相流量为 400 L/min 的工况, 泡沫灭火剂垂直输运流动状态稳定后管道中心轴线上的流动速度模拟结果如图 1 所示。可以看出, 网格数 20×10^4 与 80×10^4 之间的相对偏差小于 1% , 符合后续计算所需的网格无关性验证要求。表 1 为 3 种网格下相同计算资源配置下的计算耗时。综合考虑图 1 和表 1 结果, 选用网格数为 20×10^4 的网格配置进行计算。

表 1 不同网格计算资源对比

Table 1 Comparison of computing resources for different grids			
网格数	时间步长/s	单位时间步计算时长/s	硬件资源消耗
5×10^4	0.5	112	CPU 16 核并行计算
20×10^4		339	
80×10^4		1 223	

1.3 求解器与初始边界条件设置

泡沫灭火剂是典型的气液两相流, 模拟采用的泡沫灭火剂气液比为 5.67 。实测最大流动速度为 13.19 m/s , 马赫数 (Ma) 为 0.038 (小于 0.3), 流体属于不可压缩流体。选择 OpenFOAM 中可模拟计

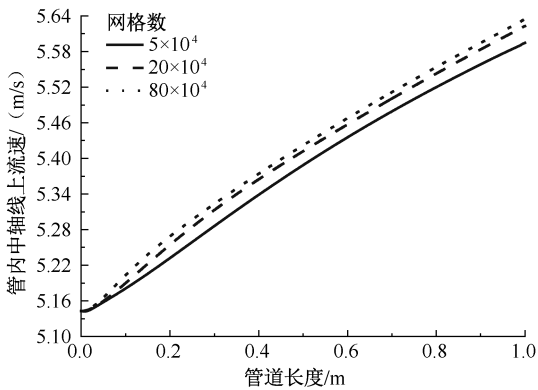


图 1 不同网格数管内中轴线上的流速

Fig. 1 Velocity along centerline inside pipe with different mesh numbers

算多相流不可压缩流体的求解器^[20] 计算垂直输运模型中的相关参数。表 2 为泡沫灭火剂物性参数。

表 2 泡沫灭火剂物性参数

Table 2 Physical properties of foam fire extinguishing agents			
灭火剂组成部分	密度/ (kg/m^3)	运动黏度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	表面张力 系数/(N/m)
气相	1.225	1.48×10^{-5}	0.07
液相	1 000	1×10^{-6}	

1.4 模型验证及分析

1.4.1 经验模型

计算气液两相流垂直流动过程中压力损失较为精确的经验模型主要有均相流动模型^[21] 和混合相-单相并流模型^[22]。

均相模型采用等效可压缩流体代替两相流体:

$$P_H = \frac{4f_p \rho_H \mu_H^2}{D_e} \frac{2}{2} + \rho_H g H \quad (7)$$

式中: P_H 为管道摩擦压降, Pa ; f_p 为两相摩擦因数; D_e 为两相流动水力直径, m ; ρ_H 为均相密度, kg/m^3 ; μ_H 为均相黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为灭火剂输运高度, m 。

混合相-单相并流模型认为泡沫流体在流通管壁上主要以单相液膜存在的流动, 而在竖直管道中的流体为气液两相均匀混合的流体流动。

$$P_B = \rho_m g + 8\phi_g \frac{\lambda_l (\rho_g Q_g + \rho_l Q_l)}{D^5} \frac{1}{\rho_l \pi^2} (1-x)^2 \quad (8)$$

式中: P_B 为单位高度压力损失, Pa/m ; ρ_m 为气液两相流平均密度, kg/m^3 ; ϕ_g 为分液相折算系数; λ_l 为液相的摩擦阻力因数; D 为管道直径, m ; ρ_g 与 ρ_l 分别为液相和气相的平均密度, kg/m^3 ; Q_g 与 Q_l 分别

为液相和气相体积流量, m^3/s ; x 为质量含气率。

1.4.2 模型对比验证

垂直输运模型、均相模型和混合相-单相并流模型在试验工况下的模拟结果与试验数据^[6]对比如图 2 所示,试验工况参数及其取值见表 3,表 4 为 3 种模型模拟结果相对试验结果的误差。可以看出,垂直输运模型在不同管径下得到的相对误差均小于 0.03,可靠性较好。这是因为经验模型依赖于多项假设,而采用垂直输运模型更真实地反映了实际场景。此外,经验模型仅能预测混合液的压力衰减情况,难以模拟管道内流动状态、速度和压力的实时变化,使其在实际应用中的有效性受到限制。

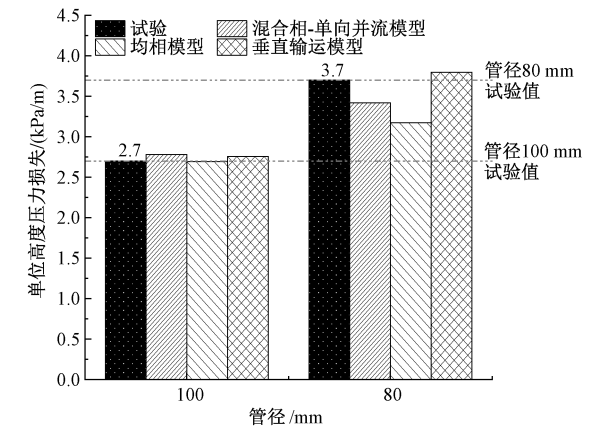


图 2 试验工况下模型模拟结果与试验结果比较
Fig.2 Calculated value of model is compared with experimental value under experimental conditions

表 3 试验工况参数和数据

Table 3 Experimental operating conditions and data			
管径/ mm	液相流量/ (L/min)	气相流量/ (L/min)	单位高度压力 损失/(kPa/m)
80	400	2 400	3.7
100			2.7

表 4 试验工况下不同模型的相对误差
Table 4 Relative errors of different models under experimental conditions

管径/ mm	垂直输运 模型	混合相-单 相并流模型	均相 模型
80	0.021 4	0.03	0.015
100	0.025 9	0.075 7	0.142 4

2 关键参数对垂直输运流动特性的影响分析

2.1 流量对垂直输运流动特性的影响

图 3 为在气液比为 6、管径为 100 mm 工况下,

泡沫灭火剂混合液流量(简称流量)在 1 400 ~ 5 600 L/min 范围内变化时压力损失和流动速度变化情况。结果表明:总压降随流量增大而上升。流量由 1 400 增至 2 800 L/min 时,总压降增幅为 20.7%;继续增至 4 200 L/min 时,增幅为 21.2%;达到 5 600 L/min 时,增幅进一步升至 25.5%。实际工程中应合理控制流量,避免因压损过大影响泡沫灭火剂的正常输送。

图 4 为管段中部(25 m 处)截面流速随时间的变化。可以看出,随着流量增大,管内流速达到稳定状态所需时间逐渐缩短,从 1 400 L/min 时的 10.5 s 减少至 5 600 L/min 时的 4 s。建议在实际输送前进行试运行,并将不同流量下的流速稳定时间纳入灭火准备阶段的时间规划,以保障灭火作业的效率。

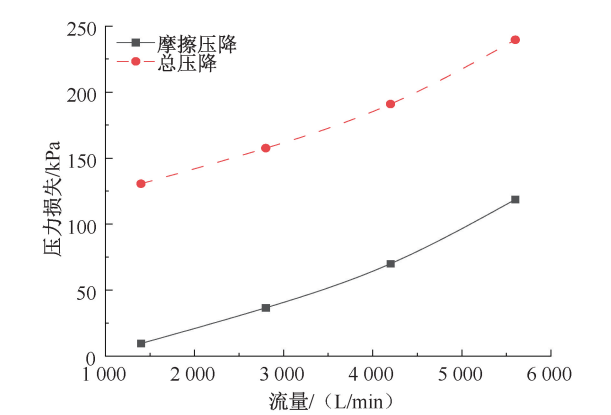


图 3 不同流量泡沫灭火剂垂直输运压力损失
Fig.3 Pressure loss in vertical transport of foam fire extinguishing agent at different flow rates

2.2 气液比对垂直输运流动特性的影响

为保证灭火效率,工程上常采用气液比小于 9 的湿泡沫。综合考虑无人机载荷和重力压降,系留式灭火无人机系统中气液比需大于 5。因此,设置入口流量为 1 400 L/min,在 60 和 100 mm 这 2 种管径下,模拟气液比在 5 ~ 9 变化时,泡沫灭火剂垂直输运过程中流动特性变化情况。

泡沫灭火剂垂直输运过程中压力损失如图 5 所示。可以看出,在 60 和 100 mm 这 2 种管径下,随着气液比的增加,泡沫灭火剂垂直输运压力损失逐渐减小。这是因为气液比增大,泡沫灭火剂动力黏度变小,流体与管道的阻力相应减小。管径为 60 mm 条件下,气液比从 5 增大至 6、从 8 增大至 9 时总压力损失分别降低 21.5 和 11.4 kPa,单位气液比增加时总压力损失降幅均减少约 46.9%。气液比每增加 1 单位,管径为 60 mm 时,总压力损失、摩擦压力

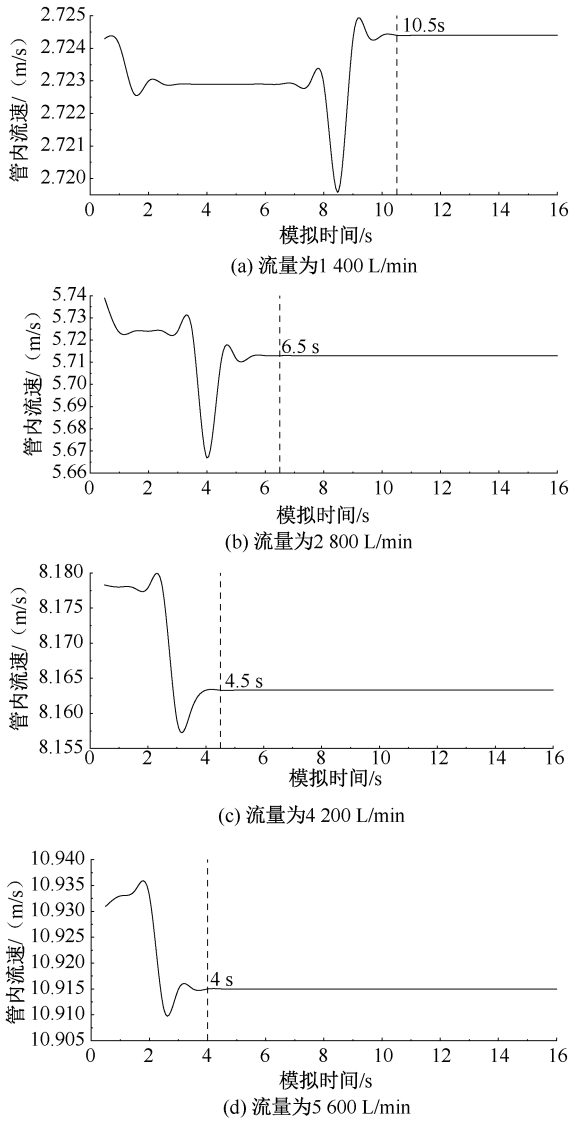


图4 不同流量管内平均流动速度

Fig. 4 Average flow velocity in pipes of different flow rates

损失和重位压力损失的平均变化量分别为 15.88、7.29 和 8.59 kPa;管径为 100 mm 时,总压力损失、摩擦压力损失和重位压力损失的平均变化量分别为 9.21、0.63 和 8.58 kPa。气液比对压力损失的影响随管径增大而减弱,其主要原因是管径增大,管内流动速度减小,泡沫灭火剂的摩擦压力也随之减小。

图 6 为不同气液比下的管内流动速度。可以看出,管径为 60 和 100 mm 时,不同气液比之间的平均变化幅度分别为 0.012 和 0.000 125 m/s;2 种管径下流动速度与平均速度相比的变化幅度不超过 1%,且管径越大,气液比对速度的影响越小。

2.3 管径对泡沫灭火剂垂直输运流动特性的影响

图 7 为入口流量为 1 400 L/min、气液比分别为

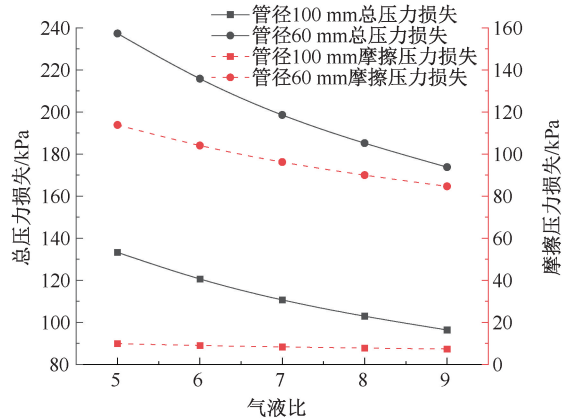


图5 垂直输运压力损失随气液比变化情况

Fig. 5 Vertical transport pressure loss changes with gas-liquid ratio

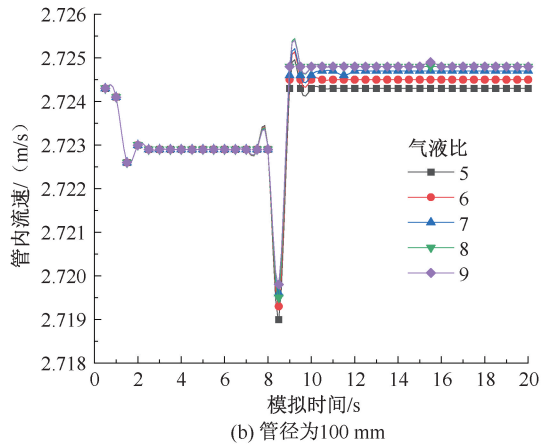
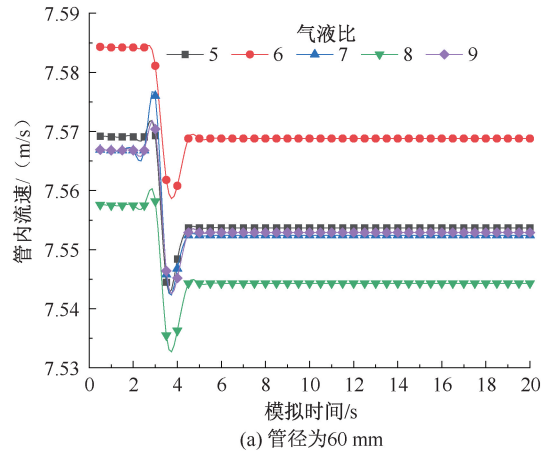


图6 管内流动速度随气液比变化情况

Fig. 6 Variation of flow velocity in tube with gas-liquid ratio

6 和 8 时,泡沫灭火剂流动特性随管径变化的模拟结果。可以看出,随着管径增加,泡沫灭火剂垂直输运的压力损失逐渐减小。当管径从 40 mm 增至 60 mm 时,压力损失明显;当管径大于 80 mm 时,管径增加对压力损失的影响大大减弱。气液比为 6 时,

管径由 40 mm 增加至 60 mm,泡沫灭火剂垂直输运总压力损失减少 630 kPa,而管径从 80 mm 增加至 100 mm 时减少 16 kPa。这主要是因为,在等流量和等气液比情况下,泡沫灭火剂流动速度随管径增大而减小;摩擦压降与流动速度正相关,摩擦压降也随之减小。管径较小时,管径变化引起的管内流动速度变化率增大,导致压力损失变化率增加。当管径越小时,气液比对压力损失的影响越大。这种变化主要是管径对摩擦压降的影响,而当管径大于 80 mm 时,气液比对摩擦压降的影响大幅减弱。

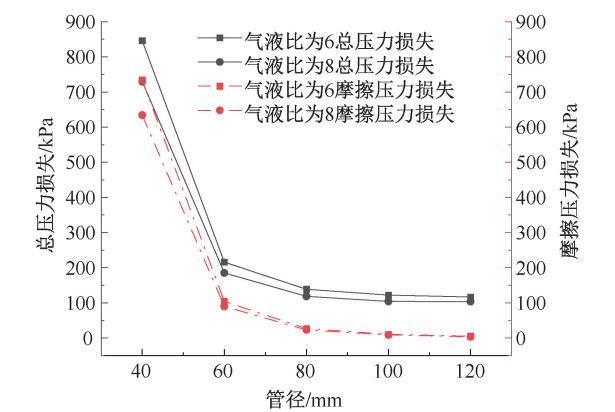


图 7 垂直输运压力损失随管径变化情况
Fig.7 Variation of vertical transport pressure loss with pipe diameter

表 5 为不同管径下泡沫灭火剂垂直输运模型稳定流动速度模拟结果。可以看出,流速随管径增加的变化率逐渐减小。当管径小于 60 mm 时,气液比为 6 的流动速度大于气液比为 8 时的流动速度,随着管径增加二者逐渐接近;当管径大于 80 mm 时,气液比为 8 时的流动速度大于气液比为 6 时的流动速度。这是因为随着管径增大,平均薄膜厚度和发生段塞-搅动和搅动-环状流转变的气体流速都会增加^[23]。管径增大时,雷诺数增加,管内湍流效应加剧,从而导致管内高气液比流动速度加快。管径

为 40 ~120 mm 时,与气液比为 6 时的稳定流动速相比,气液比为 8 时的稳定流动速度变化幅度均小于 5%,在工程上可忽略不计。

表 5 不同管径下泡沫灭火剂的稳定流动速度 Table 5 Foam fire extinguishing agent stabilizes flow speed under different pipe diameters		
管径/mm	管内稳定流动速度/(m/s)	
	气液比为 6	气液比为 8
40	17.050	16.974
60	7.552	7.544
80	4.264	4.266
100	2.716	2.722
120	1.890	2.023

3 结 论

1) 与试验数据相比,垂直输运模型的数值模拟结果误差低于 3%;经验模型在管径 100 mm 工况下的误差均大于 7%。此外,垂直输运模型还可输出管道内流动状态、速度及压力等多维信息,为工程实际中的决策提供数据支持。

2) 在入口流量 1 400 L/min、管径分别为 60 和 100 mm 的条件下,气液比为 5 ~9 时,泡沫灭火剂垂直输运的压力损失随气液比增大而减小,气液比越大对压力损失影响越小,总压力损失下降幅度最大约 46.9%。气液比对重位压降的影响高于对摩擦压降的影响。不同气液比下流动速度与平均速度的变化幅度均不超过 1%,且管径越大,气液比对速度的影响越小。

3) 在入口流量为 1 400 L/min、气液比为 6 与 8 的条件下,泡沫灭火剂的压力损失随管径增大而减小,减小幅度的随管径增加而减小。当管径大于 80 mm 时,不同管径下摩擦压力损失受气液比的影响大幅减弱。管径增大,气液比为 8 时管道内的平均流速略有增加,流速变化幅度均小于 5%。

参 考 文 献

[1] 崔刚. 椭圆形高层建筑物主体施工测量方法[J]. 测绘通报,2024(7):152-157,167.
Cui Gang. Construction survey method for main structure of elliptical high-rise building [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(7): 152-157, 167.

[2] 李宁. 高层建筑物消防安全隐患及防火设备管理研究[J]. 中国设备工程,2024(23):91-93.

[3] Ratzer A F. History and development of foam as a fire extinguishing medium[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1956, 48(11): 2 013-2 016.

[4] Lou Mengwei,Jia Hongyu,Lin Zhun,et al. Study on fire extinguishing performance of different foam extinguishing agents in diesel pool fire[J]. Results in Engineering, 2023, 17: DOI:j. rineng. 2023. 100874.

[5] Kong Depeng, Wang Dongsheng, Chen Jian, et al. Assessing the mixed foam stability of different foam extinguishing agents under room temperature and thermal radiation: an experimental study [J]. Journal of Molecular Liquids,

- 2023, 369: DOI:10.1016/j.molliq.2022.120805.
- [6] 徐学军. 压缩空气泡沫管网输运特性及其在超高层建筑中应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.
Xu Xuejun. Study on transport characteristics of compressed air foam in pipe and its application in super high-rise building[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2020.
- [7] Cai Bo, Xia Guodong, Cheng Lixin, et al. Experimental investigation on spatial phase distributions for various flow patterns and frictional pressure drop characteristics of gas liquid two-phase flow in a horizontal helically coiled rectangular tube[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, 142: DOI:10.1016/j.expthermflusci.2022.110806.
- [8] Su Yuqing, Li Xiaowei, Wu Xinxin. Frictional pressure drop correlation of steam-water two-phase flow in helically coiled tubes[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, 208: DOI:10.1016/j.anucene.2024.110764.
- [9] Ferraris D L, Marcel C P. Two-phase flow frictional pressure drop prediction in helical coiled tubes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 162: DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120372.
- [10] 陈胤昌,陈方,何坤,等. 压缩空气泡沫垂直管网输运压力衰减特性数值模拟研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(5):151-156.
Chen Yinchang, Chen Fang, He Kun, et al. Numerical simulation study on pressure attenuation characteristics of compressed air foam transport in vertical pipe network[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(5): 151-156.
- [11] 俞强强,施红辉,董若凌,等. 竖直升圆管内气液两相流流型特性的数值模拟[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*,2022, 47(3):397-404.
Yu Qiangqiang, Shi Honghui, Dong Ruoling, et al. Numerical simulation of flow pattern characteristics of gas-liquid two-phase flow in vertical upward circular pipe[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Science Edition)*, 2022, 47(3): 397-404.
- [12] Bamidele O E, Ahmed W H, Hassan M. Two-phase flow induced vibration of piping structure with flow restricting orifices[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019,113:59-70. .
- [13] Zhu Yan, Duan Huanfeng, Li Fei, et al. Experimental and numerical study on transient air-water mixing flows in viscoelastic pipes[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2018, 56(6): 877-887.
- [14] Martinuzzi R, Pollard A. Comparative study of turbulence models in predicting turbulent pipe flow. I-Algebraic stress and k-epsilon models[J]. *AIAA Journal*, 1989, 27(1): 29-36.
- [15] 焦守华,王金雨,曾未,等. 基于雷诺时均模型的高温空气流动传热数值研究[J]. *核科学与工程*,2020,40(6): 965-973.
Jiao Shouhua, Wang Jinyu, Zeng Wei, et al. Numerical simulation on flow and heat transfer characteristics of high-temperature air based on ras model[J]. *Nuclear Science and Engineering*,2020,40(6):965-973.
- [16] Spalart P, Almaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[C]. 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992: DOI:10.2514/6.1992-439.
- [17] Markatos N C. The mathematical modelling of turbulent flows[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1986, 10(3): 190-220.
- [18] 王亚军. 基于 RNG k-epsilon 模型的高海拔地区生态基流下游阶梯消能水力特性数值研究[J]. *水利技术监督*, 2019(6): 180-183.
- [19] Rumsey C L, Smith B R, Huang G P. Description of a website resource for turbulence modeling verification and validation[C]. 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2010: DOI:10.2514/6.2010-4742.
- [20] Selma B, Bannari R, Proulx P. A full integration of a dispersion and interface closures in the standard model of turbulence[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010:DOI:10.1016/j.ces.2010.06.020.
- [21] 劳力云,吴应湘,郑之初,等. 气体/非牛顿流体两相流动与气/水两相流动阻力特性的比较[C]. 第八届全国海洋工程学术会议论文集, 2000:321-324.
- [22] Xu Xuejun, He Kun, Zhang Heping, et al. Full-scale experimental study on flow and fire extinguishing characteristics of compressed air foam[C]. 2019 9th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering (ICFSFPE). 2019:DOI:10.1109/ICFSFPE48751.2019.9055859.
- [23] Chen Yinchang, Chen Fang, Cheng Xudong, et al. Multi-scale experimental study on properties of compressed air foam and pressure drop in the long-distance vertical pipe[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 96: DOI:10.1016/j.jobbe.2024.110397.

作者简介: 李春艺 (2001—),男,四川广元人,硕士研究生,研究方向为掺氢天然气燃爆风险分析。E-mail: li-cy23@mails.tsinghua.edu.cn。

