

中文引用格式:谭甜甜,张佳庆,石杨锦,等. 入口流量和管径对弯管内泡沫运输的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(9): 153–158.

英文引用格式:TAN Tiantian, ZHANG Jiaqing, SHI Yangjin, et al. Analysis of influence of inlet flow and pipe diameter on foam transport in bent pipe[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 153–158.

入口流量和管径对弯管内泡沫运输的影响分析^{*}

谭甜甜¹高级工程师, 张佳庆^{**1}正高级工程师, 石杨锦², 李博²副教授

(1 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院 安徽省新型电力系统火灾安全与
应急技术重点实验室(国家电网公司输变电设施火灾防护实验室),
安徽 合肥 230601; 2 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

中图分类号:X924.4; TU892 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1245
资助项目:国家电网有限公司科学技术项目(52120524000U)。

【摘要】 为优化工程灭火技术,采用数值模拟的方式探究泡沫入口处流量和管径对压缩空气泡沫运输行为的影响,模拟中流量的变化范围为1 000~2 400 L/min,管径的变化范围为DN80—DN220,提取表征泡沫运输特性的参量(流场、涡量、黏度和压降)。结果表明:泡沫流体在弯管处速度由外向内形成低速、高速和低速3个区域,但是流量和管径变化对3个区间的影响程度不同。在入口流量影响方面,涡量与入口流量之间呈现正相关关系;并且弯管内侧低速区域增加,高速区域向外侧壁面挤压,外侧低速区域范围减小。同时,随着泡沫流体入口流量的增加,流体的黏度逐渐减小,压降呈现先增加后趋于稳定的变化趋势。在管径影响方面,相对于入口流量,管径增加后弯头附近的速度分层变化和涡旋变化均较为微弱,同时,管内的压降随着管径的增大而逐渐减小,当管径由DN80增加至DN220时,局部压降降低约2/3。

【关键词】 管径; 入口流量; 泡沫运输; 压降分布; 泡沫黏度

Analysis of influence of inlet flow and pipe diameter on foam transport in bent pipe

TAN Tiantian¹, ZHANG Jiaqing¹, SHI Yangjin², LI Bo²

(1 Anhui Provincial Key Laboratory of New Type Power Systems Fire Safety and Emergency Technology(State Grid Laboratory of Fire Protection for Transmission and Distribution

Facilities), State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei Anhui 230601, China;

2 Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In order to optimize engineering fire-extinguishing technologies, numerical simulation was employed to investigate the effects of flow rate and pipe diameter at the foam inlet on the transport behavior of compressed air foam. In the simulation, the flow rate varied within the range of 1 000–2 400 L/min, and the pipe diameter ranged from DN80 to DN220. Characteristic parameters characterizing foam transport

* 文章编号:1003-3033(2025)09-0153-06; 收稿日期:2025-04-14; 修稿日期:2025-06-08

** 通信作者:张佳庆(1987—),男,安徽安庆人,博士,正高级工程师,主要从事泡沫灭火、电气安全等方面的工作。E-mail:dkyzjq@163.com。

were extracted, including flow field, vorticity, viscosity, and pressure drop. The results show that the velocity of the foam fluid at the elbow forms three regions from the outside to the inside: low-speed, high-speed, and low-speed. However, the flow rate and pipe diameter changes have different degrees of influence on these three regions. Regarding the effect of inlet flow rate, there is a positive correlation between vorticity and inlet flow rate. Additionally, the low-speed region on the inner side of the elbow increases, the high-speed region is squeezed toward the outer wall, and the range of the low-speed region on the outer side decreases. Meanwhile, as the inlet flow rate of the foam fluid increases, the viscosity of the fluid gradually decreases, and the pressure drop first increases and then tends to stabilize. In terms of the influence of pipe diameter, compared with the inlet flow rate, the changes in velocity stratification and vortex near the elbow are relatively slight when the pipe diameter increases. Moreover, the pressure drop inside the pipe gradually decreases with the increase in pipe diameter. When the pipe diameter increases from DN80 to DN220, the local pressure drops decreases by approximately two-thirds.

Keywords: pipe diameter; inlet flow rate; foam transport; pressure drop; foam viscosity

0 引言

随着经济社会持续发展,电力需求也与日俱增。为解决能源分布不均衡问题,适用于远距离输电的特高压技术得到了迅速发展。与普通电站相比,特高压站的主变压器有更大油量,其火灾具有“燃烧迅猛、蔓延迅速,常伴随爆炸冲击,人工灭火难度大,损失严重”的特点。对于新形势下灭火需求,常规灭火技术已无法很好满足,压缩空气泡沫灭火技术应运而生。该技术是将水、泡沫液与空气(或氮气)或泡沫预混液与空气(或氮气)在一定压力下充分混合成均质泡沫,再经管路输送喷射至火源灭火^[1]。其灭火效率、适用范围、使用便捷性及实战适应能力均优于水、干冰等传统灭火方式。

国内外研究人员针对压缩空气泡沫的物化特征及灭火性能开展了一系列研究工作。DESHPANDE等^[2]研究了垂直管内气动泡沫流动的流型及其相关的结构、压降和夹带特性,得到了液体性质、表面活性剂类型和浓度、发泡剂和管径等因素对泡沫形成的影响。陆强等^[3]探究了不同的气液混合比、泡沫的发泡倍数等条件对灭火性能的影响,当气液混合比在0.2%~0.5%的范围内时,泡沫的发泡倍数为5~15,产生的泡沫质量最好。林全生等^[4]结合数值拟合与试验对比,研究压缩空气A类泡沫在不同规格水带中沿程阻力损失,提出相应的流体力学计算方法,并推导出沿程阻力系数及其解析表达式。王凯勇等^[5]对不同发泡倍数泡沫特性开展了水平管路压降试验和数值模拟,发现压缩空气A类泡沫具有良好的压缩性,其黏度随着发泡倍数的增大而增大,并利用Fluent数值模拟软件,以不同发泡

倍数泡沫为研究对象,模拟了水平管路内层流流动情况,并研究了压力损失情况,结果表明:质量流量的增加加大了泡沫压力的变化范围。王涛等^[6]建立无机固化泡沫在漏风裂隙中逆风扩散的理论与数值模型,分析其流动特性和压力分布,结果表明:延长注浆时间可提高压力,但扩散距离趋于稳定,需结合注浆压力与漏风参数优化施工设计。BAGHERNEJAD等^[7]试验研究了管子旋转对水平管内两相流流型和压降的影响,发现随着管子转速的增加,分层光滑流态减小,而压降大幅度增加。何灵欣等^[8]采用数值模拟方法,分析了压缩空气泡沫在长距离输运、上升管道输运及管径变化过程中的流动特性与压降,以验证其在举高消防机器人灭火应用中的可靠性。

综上,前人多采用水平和垂直管开展压缩空气泡沫的相关研究,忽略了管段内泡沫输运流动的影响。泡沫的输运效果直接关系到灭火的时效性。同时,泡沫输运时常采用弯管进行局部管路衔接或转换。相较于直管和水平管,由于弯管的离心作用,泡沫的输运效能在弯管中也会不同。考虑在实际工程场景中,多使用不超过45°的弯管用于改变管道方向,如弧形走廊、特殊造型建筑等场景。鉴于此,笔者拟以40°弯管为例,从管径和入口流量2个角度,探究压缩空气泡沫输运特性,以期为实际工程中压缩空气泡沫灭火技术优化提供参考。

1 泡沫输运弯管模拟场景设计

1.1 模拟场景的设计

为探究弯管内泡沫的输运特性,构建三维管道模型,如图1所示,在保证对入口处泡沫输运流动无

影响和出口处的流动已经趋于稳定的前提下,设计管道参数,见表 1。

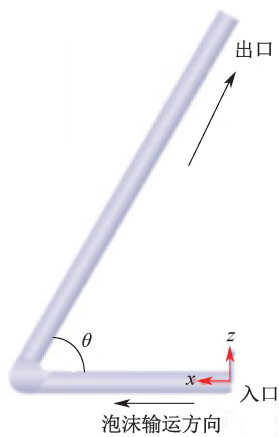


图 1 三维管道模型
Fig. 1 Three-dimensional pipe model

表 1 三维管道模型参数

Table 1 3D pipe model parameters

入口处 管长/m	出口直 管长/m	弯管的弯 曲半径/m	弯管的 内径/m	入口 方向
5	10	0.14	0.01	X 正方向

模拟改变了入口处流量和管径,其中,入口处流量变化范围为 1 000~2 400 L/min,管径变化范围为 DN80—DN220,在管径影响固定时,选用 DN150,在入口流量影响固定时,选用 1 800 L/min,角度均选择 40°。模拟所采用的边界条件为:①入口处采用速度入口;②出口处采用自由出流;③管道壁面为无滑移边界条件;④对称边界采用 Symmetry。

1.2 数学模型的选择

k-ε 双方程模型适用范围包括高雷诺数湍流流动、充分发展的湍流、简单几何形状的流动、无强烈旋转和浮力影响的流动等场景。它包括标准 k-ε 模型、RNG k-ε 模型、Realizable k-ε 模型等^[9]。文中采用 Realizable k-ε 湍流方程,与标准 k-ε 模型和 RNG k-ε 模型相比,Realizable k-ε 采用新的湍流黏度公式,对管流做出更精准的计算,且对于预测强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流也有很好的表现^[10]。

1.3 网格独立性分析

在进行模拟计算时,网格尺寸太小会导致计算成本过高,网格尺寸太大会影响计算结果的准确性。因此,为能够高效获得精准的计算结果,选取 40°的弯管进行网格独立性验证。图 2 为弯管进口处 y、z

切片的网格;图 3 为弯管出口段 3 种网格下压缩空气泡沫流经管道的响应时间。可以发现,网格尺寸越小模拟结果越接近,综合计算的准确度和成本,采用网格数为 563 214。

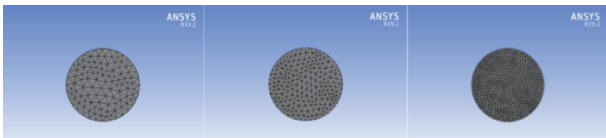


图 2 y、z 切片的网格分布
Fig. 2 Grid distribution of y, z slices

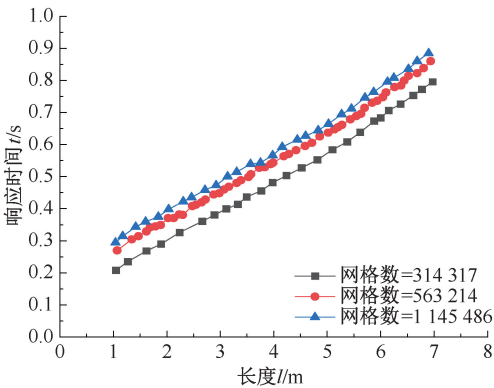


图 3 3 种网格响应时间结果对比
Fig. 3 Comparison of response time results for three grids

2 入口流量和管径对泡沫输运的影响

2.1 入口流量对泡沫输运的影响

图 4 为不同泡沫流量条件下,弯管附近剖面 Y=0 的流体速度 (V) 云图,图中箭头方向为泡沫输运方向)。由图 4 可知:泡沫流体在弯管处出现速度分层,从弯管外侧到内侧分别为低速区域(区间 1)、高速区域(区间 2)和低速区域(区间 3)。随着入口流量的增加,区间 1 逐渐减小至消失,区间 2 分布范围逐渐向区间 1 移动,区间 3 分布范围逐渐增加。这是因为泡沫流体在管道中运动的速度增大,导致其在弯管受到的离心力增强,使得泡沫流体在弯头处输运流动时不断向外侧壁面挤压,因此,内侧的低速区域(区间 3)不断变大。在弯管管径一定的前提下,当入口流量增加时,管道内压缩空气泡沫的流速越高,受离心力作用使得泡沫向管道外侧挤压,导致局部泡沫压缩(密度增大),而管道内侧压力降低导致泡沫膨胀(密度减小)。这种密度梯度会改变泡沫的动量分布,加剧泡沫流动分离和二次流,从而增

加局部压降。

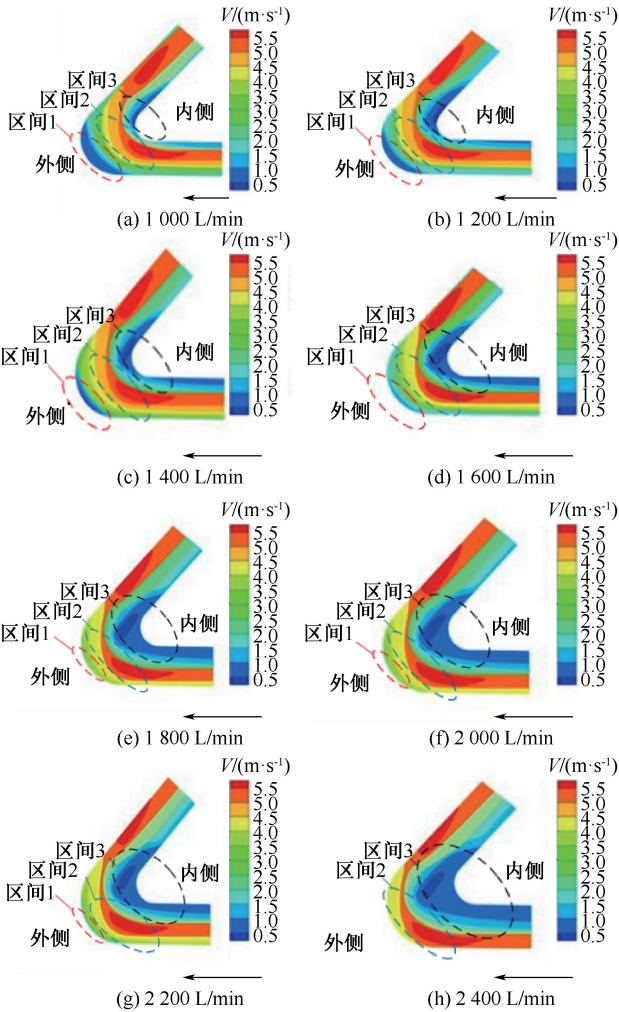


图4 弯管附近剖面 $Y=0$ 的流体速度云图
Fig. 4 Fluid velocity photogram of $Y=0$ on the section near the bend

图5呈现了不同泡沫流量条件下,弯管区域附近 $Y=0$ 剖面的流场空间分布。可以看到,随着入口流量的增加,泡沫在弯管内侧的回流现象逐渐增强,涡旋现象愈加明显。同时,涡旋效应也是弯管出口段内侧产生较大低速区的诱导因素之一。

进一步地,为探究不同泡沫流量下的涡量演变特征,提取弯管附近剖面 $Y=0$ 的平均涡量(Ω)值,并绘制图6。可以发现,涡量与入口流量之间呈正相关关系,随着入口流量的增大,涡旋逐渐发展变强。

压缩空气泡沫是一种具有剪切变稀特性的流体,入口速度变大,流体微团间的相对运动幅度增大,可能影响流体在管内的黏度分布。图7为弯管出口段剖面 $Y=0$ 中轴线的压缩空气泡沫流体的黏度大小,入口流量分别为1000、1600、2200、和

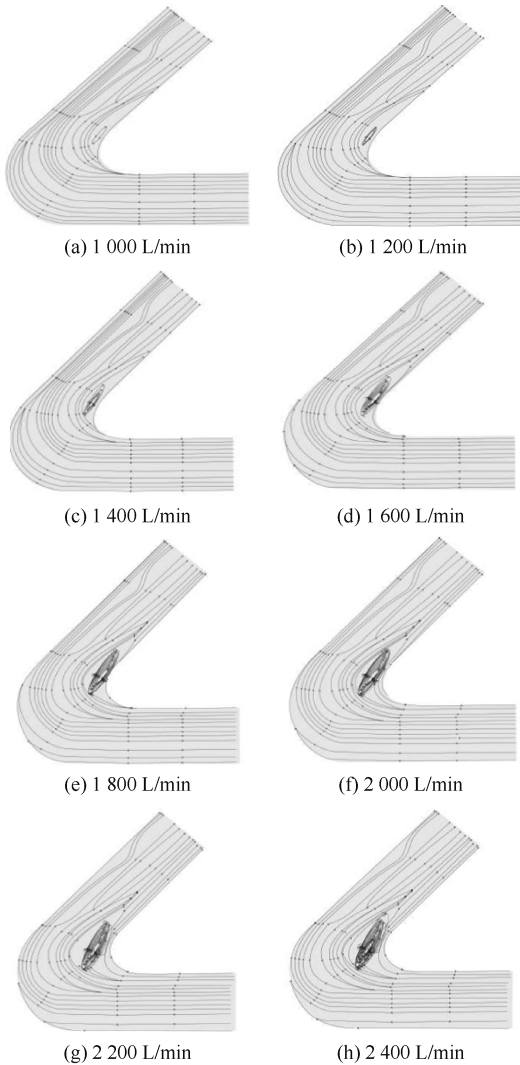


图5 弯管附近剖面 $Y=0$ 的流场分布
Fig. 5 Flow field distribution at $Y=0$ near the bend

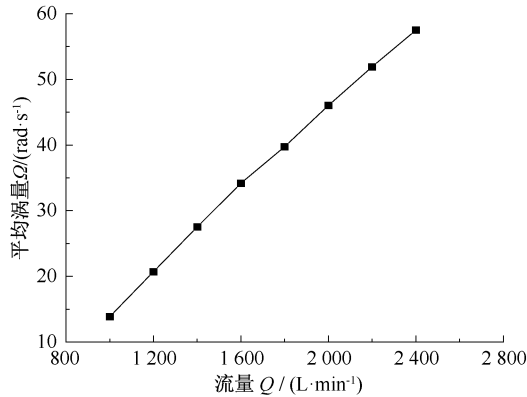


图6 弯管附近剖面 $Y=0$ 的平均涡量大小
Fig. 6 Average vorticity at $Y=0$ in the section near the bend

2400 L/min。该部分数据对应弯管出口10 m管长下的管道中心的黏度值。可以发现,随着泡沫流体

入口流量的增大,流体在管内的运输流动愈加剧烈,导致流体的黏度逐渐减小,但当流量继续增大到一定值时,流体的黏度变化较小。

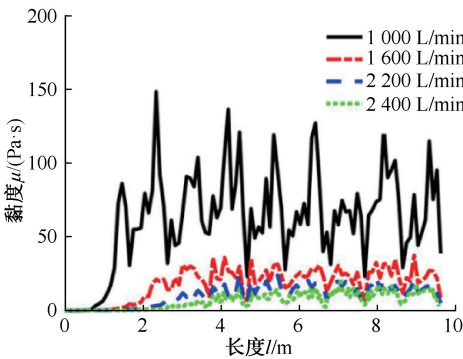


图 7 弯管出口段剖面 $Y=0$ 处轴线的压缩空气泡沫黏度

Fig. 7 Viscosity of compressed air foam on axis $Y=0$ at the exit section of elbow

为进一步探究入口流量对管内压力的影响,将管内压降的分布情况绘于图 8。可以观察到入口流量对管内压降有着显著的影响。当入口流量增加时,压降也随之增大,并且在 1000~1200 L/min 变化较快,之后变化趋势逐渐减缓并达到稳定。这是由于流量增加导致弯管处的离心力增强,回流随之增多,使得泡沫运输时所受到的阻力增加,最终使压降逐渐增大。由此可得压降与入口处流量呈正相关关系,而压降的变化率与入口处流量呈现负相关关系。

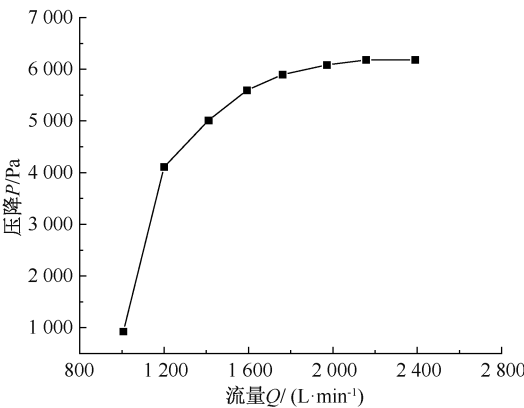


图 8 弯管内的压降分布

Fig. 8 Pressure drop distribution in the elbow

2.2 管径对泡沫运输的影响

图 9 为入口处流量为 1 800 L/min 时弯管附近剖面 $Y=0$ 的流体速度云图,其中,弯管管径变化范围为 DN80—DN220。可以看到,泡沫流体在弯管处速度分为 3 个区域,由外到内分别是低速区域(区

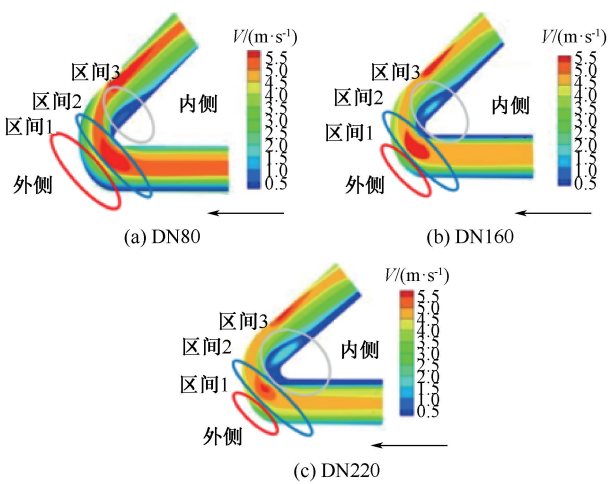


图 9 弯管附近剖面 $Y=0$ 的流体速度云图

Fig. 9 Fluid velocity program of $Y=0$ on the section near the bend

间 1)、高速区域(区间 2)和低速区域(区间 3)。图 10 展示了不同管径下,弯管附近 $Y=0$ 剖面的流场分布特征。可以发现,管径增加后,流经管道的泡沫流速降低,离心效应减弱,速度区间的速度差值减小。同时,由于管径的增加,低速泡沫流体克服弯头的阻碍能力降低,导致在弯头处形成涡旋。总的来说,相对于入口流量的影响,管径变化对速度分区和涡旋的影响较弱。因此,此处不再分析变换管径下的泡沫黏度变化行为。

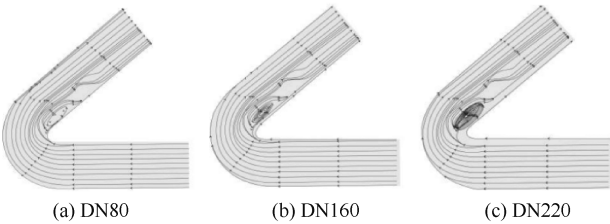


图 10 弯管附近剖面 $Y=0$ 的流场分布

Fig. 10 Flow field distribution at $Y=0$ near the bend

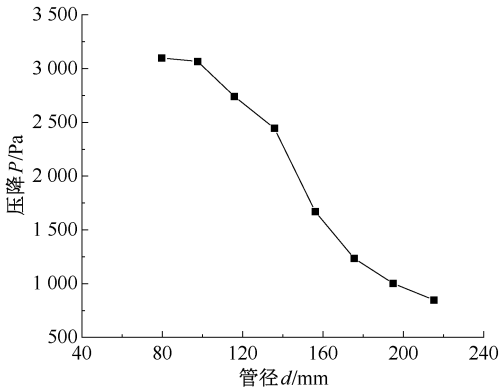


图 11 弯管内的压降分布

Fig. 11 Pressure drop distribution in the elbow

图 11 为不同管径下 (DN80—DN220) 的压降, 由图 11 可知: 随着管径的逐渐增大, 压缩空气泡沫在管内输运流动时的压降呈现单调递减的变化趋势。这是由于在入口处流量一定的情况下, 当管径增大时, 管内流体的流速减慢, 管道对泡沫流体的阻力减小导致压降减小。

3 结 论

1) 在入口流量影响方面, 泡沫流体在弯管处出现速度分层, 从管道外侧到内侧分别为低速、高速和低速 3 个区域。入口流量的增加使弯管受到的离心

力增强, 高速区向外侧挤压, 外侧低速区缩小, 弯管出口管段内壁附近的回流现象增强, 弯头处的涡旋现象愈加明显, 内侧低速区扩大, 涡量与入口流量正相关。泡沫黏度随流量先减小后趋于稳定, 同时弯管内压降分布由 1 000 Pa 增加至约 6 000 Pa。

2) 在管径影响方面, 管径变化同样导致弯管处速度分层。随着管径的增大, 弯管出口管段内壁附近的回流现象愈加清晰, 低速区域范围也随之变大。模拟范围内, 随着管径增加, 弯管内压降减小近 2/3。

3) 相同条件下, 相对于管径的影响, 入口流量对泡沫输运流动行为的影响更为显著。

参 考 文 献

[1] 沈旭钊. 压缩空气泡沫灭火技术应用[J]. 新型工业化, 2021, 11(12): 109-111.

[2] DESHPANDE N, BARIGOU M. The flow of gas-liquid foams in vertical pipes[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55: 4 297-4 309.

[3] 陆强, 包志明, 陈涛, 等. A 类泡沫灭火剂灭火性能试验研究[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(2): 177-179.

LU Qiang, BAO Zhiming, CHEN Tao, et al. Experimental study on the performance of class A foam in extinguishing class A fires[J]. Fire Science and Technology, 2013, 32(2): 177-179.

[4] 林全生, 张猛, 宋波, 等. 压缩空气 A 类泡沫在水平管道内流动研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(9): 1 265-1 268.

LIN Quansheng, ZHANG Meng, SONG Bo, et al. Research on compressed air foam of class A flow in horizontal pipe by Fluent[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(9): 1 265-1 268.

[5] 王勇凯, 高红, 宋波, 等. 压缩空气 A 类泡沫水平管路压降实验及数值模拟[J]. 化工学报, 2018, 69(10): 4 184-4 193.

WANG Yongkai, GAO Hong, SONG Bo, et al. Experimental study and numerical simulation of laminar flow of compressed air class a foam in horizontal pipe [J]. CIESC Journal, 2018, 69(10): 4 184-4 193.

[6] 王涛, 鲁义, 施式亮, 等. 漏风裂隙内无机固化泡沫浆液扩散特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 24-30.

WANG Tao, LU Yi, SHI Shiliang, et al. Research on diffusion properties of inorganic solidified foam slurry in air leakage fracture[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 24-30.

[7] BAGHERNEJAD Y, HAJIDAVALLOO E, ZADEH S. Effect of pipe rotation on flow pattern and pressure drop of horizontal two-phase flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2019, 111: 101-111.

[8] 何灵欣, 张佳庆, 刘睿, 等. 特高压换流站消防机器人长距离输送压缩空气泡沫有效性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(8): 150-157.

HE Lingxin, ZHANG Jiaqing, LIU Rui, et al. Study on effectiveness of long-distance compressed air foam delivery by firefighting robots at ultra-high voltage converter stations[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(8): 150-157.

[9] 张淑佳, 李贤华, 朱保林, 等. k-ε 涡粘湍流模型用于离心泵数值模拟的适用性[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 238-242.

ZHANG Shujia, LI Xianhua, ZHU Baolin, et al. Applicability of k-ε eddy viscosity turbulence models on numerical simulation of centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 238-242.

[10] 余健翔, 刘剑, 王观石, 等. 修正 Realizable k-ε 模型在高压淹没水射流中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 5 024-5 030.

YU Jianxiang, LIU Jian, WANG Guanshi, et al. Correction of Realizable k-ε model for high pressure submerged water jets[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(12): 5 024-5 030.



作者简介: 谭甜甜 (1994—), 女, 安徽阜阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事固定式压缩空气泡沫灭火技术及综合管廊电力舱火灾防护方面的工作。E-mail: tantt1325@163.com。