

管式雾化混合器粒径在线测量结构的性能评价

孔令真^{1,2}, 杨洋^{1,2}, 陈家庆^{1,2,3*}, 孙欢^{1,2}, 谢彤^{1,2}, 张成凯^{1,2}, 蒋英明^{1,2}

(¹北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617; ²深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室, 北京 102617; ³北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘要: 在线测量雾化液滴粒径是评价管式雾化混合器工作性能的重要手段, 但因雾化液滴随气流夹带扩散粘附于透明观测窗内壁而影响测量精度。提出一种基于“环缝吹扫视窗+环隙排液套筒”的雾化液滴粒径在线测量结构, 使用少量吹扫气在观测窗前形成阻隔液滴的气幕, 避免液滴粘附干扰测量精度。结合计算流体动力学(CFD)数值模拟和实验测试, 评价分析了主管道气量、吹扫气量和持续测量时间等参数, 对粒径在线测量组件内速度场分布及测量准确性的影响规律。结果表明, 在液气比0.2 L/m³条件下, 主管道气量在90~150 m³/h范围内变化时, 在线测量与对空测量测得的雾化液滴粒径 d_{32} 绝对差值 E_A 在5 μm以内, 雾化效率差值在1%以内; 综合流场分布及 d_{32} 绝对差值 E_A 分析, 确定最佳环缝吹扫气量应占主管道气量的0.58%~1.0%; 持续5 min在线测量测得的 d_{32} 标准差 σ 均小于1, 粒度分布基本不变, 表现出良好的准确性和稳定性。

关键词: 管式雾化混合器; 粒度分布; 测量; 计算流体力学; 环缝吹扫气量

中图分类号: TQ 051.7

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-11

Performance evaluation of the online droplet size measurement structure for tubular atomization mixers

KONG Lingzhen^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, CHEN Jiaqing^{1,2,3*}, SUN Huan^{1,2}, XIE Tong^{1,2}, ZHANG Chengkai^{1,2},
JIANG Yingming^{1,2}

(¹School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; ²Key Technology and Equipment of Deepwater Oil and Gas Pipeline Beijing Key Laboratory, Beijing 102617, China; ³School of Mechanical and Material Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Online measurement of atomized droplet size is an important method for evaluating the performance of tubular atomization mixers. However, the measurement accuracy is compromised as atomized droplets are entrained and dispersed by the gas flow, subsequently adhering to the inner wall of the transparent observation window. This paper introduces an online measurement structure for atomized droplet size based on a "ring gap purge transparent window and annular drainage sleeve". This design utilizes a small amount of purge gas flow to create an air curtain in front of the observation window, which prevents droplet adhesion and measurement interference. Combined with computational fluid dynamics (CFD) numerical simulations and experiment testing, this research evaluated the effects of main pipeline gas flow rate, purge gas flow rate, and measurement duration on the velocity field

收稿日期: 2025-12-15 修回日期: 2026-04-23

通信作者: 陈家庆(1970—),男,博士,教授, jiaqing@bipt.edu.cn

第一作者: 孔令真(1987—),男,博士,副教授, konglingzhen@bipt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(21808015);北京市教委科技计划一般项目(KM202210017009)

引用本文: 孔令真, 杨洋, 陈家庆, 孙欢, 谢彤, 张成凯, 蒋英明. 管式雾化混合器粒径在线测量结构的性能评价[J]. 化工学报, DOI: 10.11949/0438-1157.20251413

Citation: KONG Lingzhen, YANG Yang, CHEN Jiaqing, SUN Huan, XIE Tong, ZHANG Chengkai, JIANG Yingming. Performance evaluation of the online droplet size measurement structure for tubular atomization mixers[J]. CIESC Journal, DOI: 10.11949/0438-1157.20251413

distribution within the online droplet sizing assembly and on measurement accuracy. The research results show that under the conditions of a liquid-gas ratio of 0.2 L/m^3 , when the gas volume of the main pipeline varies between $90 \text{ m}^3/\text{h}$ and $150 \text{ m}^3/\text{h}$, the absolute difference E_A of the atomized droplet size d_{32} by online measurement and unblocked measurement is within $5 \mu\text{m}$, and the difference in atomization efficiency stays below 1%. A comprehensive analysis of the flow field distribution and E_A revealed that the optimal purge gas flow in annular gap should constitute 0.58%–1% of the main pipeline gas flow. During 5 minutes of continuous online measurement, the standard deviation σ of the measured d_{32} values is consistently less than 1. Meanwhile, the volume distribution proportion remains basically unchanged, which demonstrates that the measurement method has excellent accuracy and stability.

Keywords: tubular atomization mixer; particle size distribution; measurement; computational fluid dynamics; circumferential seam purging gas volume

引 言

在天然气脱酸脱水、二氧化碳捕集和工业废气处理等气体净化处理场合,基于管道空间内气液同向湍流实现吸收剂的微纳尺度雾化混合,能够强化气液接触传质过程,相应开发的高效管式气液接触吸收设备可以显著降低传统塔式吸收设备的尺寸和重量^[1-3]。管式雾化混合器是高效管式气液接触吸收设备的核心组件,在线准确测量其雾化液滴粒径,对于管式气液吸收设备的性能评价和结构优化具有重要意义^[4]。目前,气雾两相流中液滴粒径等参数的测量主要有高速摄像法^[5-6]、光脉动法^[7]、超声衰减法^[8-9]、激光衍射法等,其中基于激光衍射原理的激光粒度仪因能实时、精确获取测量结果而被广泛应用于雾化场的测试研究工作^[10-14]。郭荆璞等^[15]采用激光粒度仪测量大流量内混式空气雾化喷嘴的液滴粒径分布,探究了喷嘴出口不同轴向距离、不同径向距离等对雾化性能的影响。Xue等^[16]通过激光粒度仪测量了三种不同喷嘴附近雾滴粒径分布的典型特征,建立了雾滴谱演变与液体雾化的关系。程旭等^[17]在研究空气雾化喷嘴射流参数对横向射流雾化效果的影响时,使用激光粒度仪测量索特平均直径 d_{32} 值来表征雾化特性。孙欢等^[18]明确管式雾化混合器的实际工作气速为 $10\sim 25 \text{ m/s}$,符合天然气管输气速要求,提出管式雾化混合器3种改进流道结构,使用“常规透明测试窗+马尔文 Spraytec 喷雾激光粒度仪”实时观测评价管道出口处的气液分散混合性能。上述雾化特性研究工作均在开放空间中测量粒径,液滴粘附干扰测量的问题不突出。

鉴于在管道有限空间内高流速($10\sim 30 \text{ m/s}$)带

压测试条件下,采用“常规透明测试窗+喷雾激光粒度仪”观测模式时,雾化液滴往往会随气流夹带扩散粘附于透明测试窗内壁,进而干扰雾化液滴粒径测量的准确性和稳定性,因此有学者针对不同雾化液滴粒径测试结构进行了改进研究。Simmons^[19]和 Sarkhi^[20]等在管道流速在 30 m/s 左右,采用气体吹扫方法,在光学玻璃视窗前设置垂直于管道的径向进气孔进行定期吹扫,虽能在一定程度上阻止液滴飞溅至玻璃视窗,但单孔进气易造成吹扫气流呈局部射流状、周向分布极不均匀,且间歇性吹扫无法实现连续在线测量。Austrheim^[21]主管道气量为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$,通过径向和切向注气孔同时注气,从而避免单一径向进气时沿管道内壁的抽吸或单一切向进气时沿管道中心的抽吸,但多孔进气的结构设计缺乏气流均布措施,吹扫气流在视窗前易形成局部涡流,仍存在气流不均匀的缺陷,难以实现视窗全域的液滴阻隔。Marchetti^[10]等设计了一种吹扫气体和快门机构相结合的测试结构,通过减少主气流与玻璃视窗的测量接触时间,避免大量液滴附着在玻璃表面,但其吹扫结构会存在部分流速盲区,吹扫覆盖不全面等问题。Setekleiv等^[22]沿用 Marchetti 提出的吹扫气体和快门测试结构,测量了不同压力条件下除雾分离器的粒径分离效率。另一方面,孙欢^[23]在主管道气量为 $70\sim 160 \text{ m}^3/\text{h}$ 下对于管式雾化混合器气液流动特性开展研究,当液气比逐渐增大时,液体会由中心雾化喷嘴射流至管式气液雾化器壁面降低雾化效率。在大液气比($0.5\sim 0.6 \text{ L/m}^3$)条件下,管道中雾状流会在壁面形成较厚的流动液膜,因此还需避免液膜直接进入测试管道带来的负面影响。丁红兵等^[24]在液气比 $0.1\sim 0.6 \text{ L/m}^3$ 范围内测试环雾状流时,将主管道两侧观测窗结构向管道内部延伸

8mm,避免液膜直接流入。Steimes等^[25]在液气比1~5 L/m³时测试气液两相环状流中的液滴尺寸时,在出口处采用将小管径的测试管伸进主管道内的测量方式,避免大量液膜进入测试管对测量产生干扰。王新军等^[26]在液气比0.4~5 L/m³条件下测量环状流中粒径分布时采用带有套筒的多孔壁面结构,提前抽离壁面液膜。总体而言,尽管学者们采用单孔或多孔进气吹扫可以在一定程度上减少液滴粘附,但其吹扫气流不均匀的问题始终未得到有效解决,难以完全隔离液滴。尤其是在大液气比(0.5~0.6 L/m³)条件下,还存在雾化液膜难以及时排出而干扰测量精度等问题。

有鉴于此,本文提出一种基于“环缝吹扫视窗-环隙排液套筒”组件+喷雾激光粒度仪的在线测量方案,设计的环状缝隙吹扫结构,形成周向稳定气幕,阻隔气相携带的微小液滴污染观测窗。为评价环缝吹扫气流吹扫效果及对主流的扰动,需要精准掌握环缝吹扫区域与主流区域的速度场分布规律等。本文拟采用CFD数值模拟和实验测试相结合的研究方法,分析讨论所设计线测量组件的内部流场,探究在不同主管道气量(90~150 m³/h)条件下吹扫气量对测量结果的影响以及测量稳定性,进而实现预期目标。

1 在线测量组件及性能评价方法

1.1 基本结构

自主设计的雾化液滴粒径在线测量组件如图1所示,中间管道为主管段,两侧测试管段沿主管段对称分布,在线测量组件与管式雾化混合器主管道整体呈十字型布局。在线测量组件采用304不锈钢加工制造,透明观测视窗镜片采用耐压光学玻璃制成,主管段直径为 $\varphi 50$ mm,管道长度为500 mm,测试管段直径为 $\varphi 32$ mm,测试管段上布置有环缝吹扫结构及透明视窗。在距主管道入口300 mm处设置图1(b)示意的环隙排液套筒结构,中间排液环隙宽度为8 mm,可收集高速气流携带液滴碰撞管壁形成的液膜,避免大量液膜进入测试管路干扰测量。从局部放大图1(c)可以看出,两侧测试管段向主管道内部延伸2 mm,可防止少量液膜直接进入测试管道。如图1(a)所示,环缝吹扫结构进气口分布在左右两侧,干燥气体由进气口进入其内部的环形流道,气体受到压缩,再由环形倾斜狭缝高速喷出,形

成锥形面吹扫气幕,可有效阻隔液滴,避免其粘附在观测窗上。玻璃观测窗的安装方式采用螺纹连接,光学镜片采用玻璃材质,光学镜片两侧放置聚四氟乙烯密封垫片,以确保测试管路整体密封。马尔文Spraytec喷雾粒度仪的激光发射端和激光接收端分别布置在玻璃观测窗两侧,激光从发射端发出,穿过透明观测视窗镜片,由接收端接收,实现雾化场内液滴粒径的在线测量。

1.2 实验测试方法

图2为雾化液滴粒径在线测量实验系统工艺流程示意图,测试时通过法兰将在线测量组件与管式雾化混合器进行连接。从流程图中可以看出,整个实验系统主要由主气路、吹扫气路、供液路、在线测量组件和气液分离段等组成。在主气路中,通过空气压缩机产生气体,经过储气罐缓冲,由气体减压阀减压释放,气体流量计和压力表等沿管路布置;吹扫气路同样由空气压缩机供气,通过阀门和气体流量计调控环缝吹扫气量;供液路则采用注液泵(上海三为公司的L0103型高压注液泵)进行供液,输送介质为超纯水。在测量过程中,首先接通环缝吹扫气路,调试合适的吹扫气量,在测量视窗前形成气幕;随后打开主管道气路,调节工况气量,向主管道内通入空气;最后打开注液泵,将液体沿着管式雾化混合器的注液口注入主管路。在主管道内,在高速气流剪切作用下液体经过管式雾化混合器喷嘴形成喷雾,气雾两相沿管路均匀混合扩散。考虑到雾化过程中部分液滴会被高速气流携带至管道壁面形成液膜,因此采用环隙排液套筒在测量前通过重力作用及时收集液膜。通过计量套筒环隙所收集到的液体体积,可以按下式计算出雾化器在套筒间隙处的雾化效率,

$$\eta = 1 - \frac{V_{\text{收集}}}{V_{\text{输送}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $V_{\text{输送}}$ 表示测试时间段内注液泵的累计液量(ml); $V_{\text{收集}}$ 表示测试时间段内套筒环隙所收集到的液体体积(ml)。

雾化后的气液两相进入气液分离段,液滴经过静态起旋元件时由于气液密度差旋流运移至管壁,从液体出口排放至废液桶,气体从分离段气体出口排出。气液在主管路内形成稳定的雾化场后,使用英国Malvern公司生产的Spraytec喷雾激光粒度仪透过视窗对雾化场进行测量。测量光学模型基于米氏理论和夫琅霍夫衍射理论,采用高稳定氦氛激

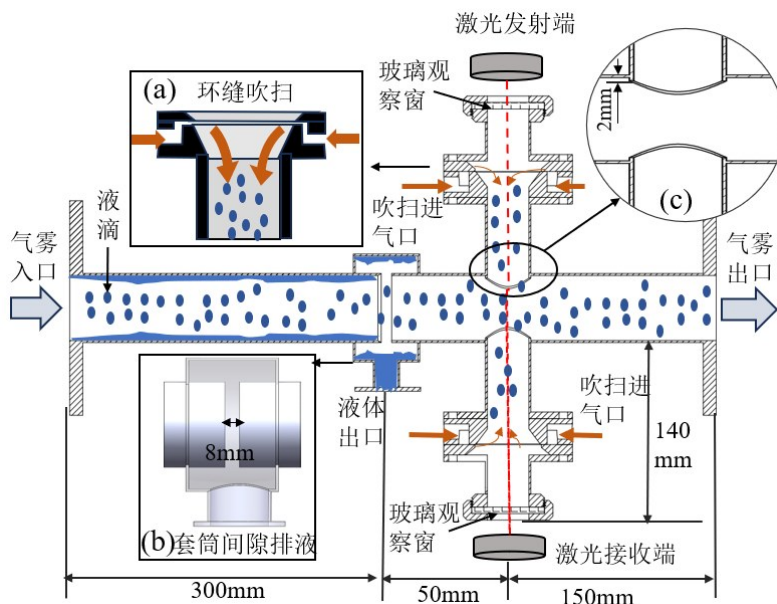


图1 在线测量组件的剖面示意图

Fig.1 Sectional schematic diagram of the online measurement component

光器,测量过程中相同大小的液滴所衍射的光会落在相同位置,此时叠加的光强度反映液滴粒径所占的百分比,经过马尔文 Spraytec 喷雾激光粒度仪配套软件处理后,可计算出雾化液滴粒径大小及其体

积分数分布^[23]。该在线测量方案已申请国家发明专利,不仅可以用于测试分析管式雾化混合器的雾化液滴粒径、雾化效率等参数,还可以用于除雾型气液分离器粒级分离效率的测试评价等^[27]。

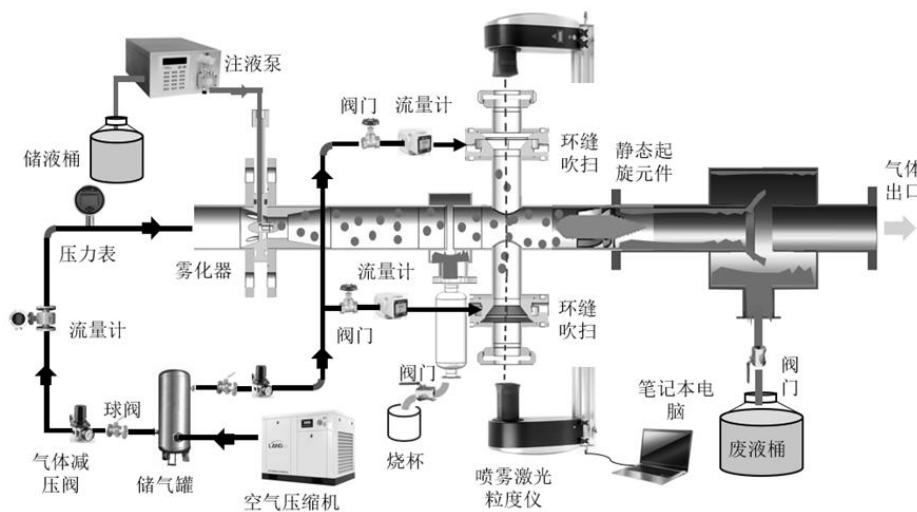


图2 雾化液滴粒径在线测量实验系统的工艺流程示意图

Fig.2 Online measurement experimental system process flow diagram for atomized droplet size

1.3 性能评价方法

1.3.1 数值模拟模型的建立 采用Solidworks软件构建在线测量组件的三维物理模型时,进行了合理简化,模型主要包括主管段、观测段及环缝吹扫结构。网格划分方面,考虑到环缝吹扫结构较为复杂,因此采用Fluent meshing进行多面体和六面体(Ploy-hexcore)网格划分,结果如图3所示。为捕捉

高速气流流动的细节,特意对环缝吹扫区域进行网格加密处理,在Fluent meshing中调用(Create Local Refinement Regions)功能,以环缝吹扫狭缝及周边流场为核心,创建(Box)型局部加密区域,同时设置加密区域具体参数:目标网格尺寸为0.1 mm,网格增长率1.2。采用Smooth-transition方法划分壁面边界处网格,层数设置为5,增长率为1.2。为验证模

拟结果的网格无关性,选取了 78.95 万、90.23 万、98.58 万、111.14 万、120.21 万、131.23 万 6 种不同网格密度的计算方案,以主管道出口处截面平均流速为核心验证指标。如图 4 所示,结果表明总网格数量约 110 万网格方案与 130 万网格方案的模拟结果相对偏差小于 0.5%,继续增加网格数量对结果无显著影响。因此选取整体面网格正交质量 > 0.7、体网格正交质量 > 0.3,总网格数量约为 110 万,确保模拟精度与计算效率。由于环缝吹扫气流为在线测量组件性能的核心影响因素,而研究工况中液相组分含量小于 1%,可以认为离散相对连续相影响较小而忽略不计^[28],因此采用单相模拟即可准确高效描述在线测量组件内的流场特征。虽然测试管道内部气流高速流动,但湍流特性较为均匀,因此湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 模型,模拟吹扫气体进入管道内的流动状态^[29]。在边界条件设置方面,主管道入口和四个环缝吹扫结构入口均设置为速度入口,入口速度与实验工况保持一致,观测视窗设置为壁面 wall,主管道出口设置为压力出口。此外,采用 SIMPLE 算法求解压力-速度耦合方程,采用 PRESTO 算法进行压力插值求解,选择二阶迎风差分格式进行连续性方程、动量方程的离散^[30]。设置计算残差为 10^{-7} ,当残差值小于 10^{-7} 时即认为计算收敛,采用压力基求解器进行稳态计算,计算步数设置为 5000 步。

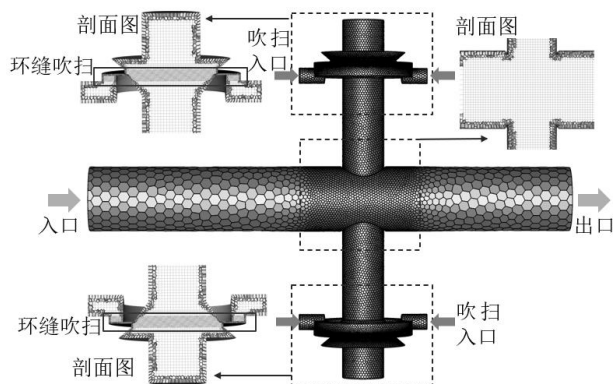


图3 在线测量组件的几何模型及网格划分

Fig.3 Geometric model and mesh generation of the online measurement component

1.3.2 性能评价方案 为验证在线测量技术方案的测量准确性,排除光学镜片对测量结果的干扰,探究环缝吹扫气流对测量结果的影响规律,本研究将采用对空测量与在线测量进行对比分析。如图 5 所示,对空测量是指不安装在线测量组件,在室内

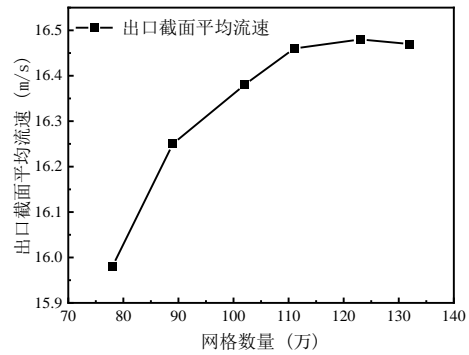


图4 网格无关性验证

Fig.4 Mesh independence verification

空气环境中对管道出口雾化液滴直接进行测量,确保测量过程无干扰。在线测量则采用环缝吹扫透明视窗组件,测量管道内带压条件下的雾化液滴。实验中固定液气比为 0.2 L/m^3 ,以水为介质,主管道气量由 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 逐步提升至 $150 \text{ m}^3/\text{h}$,相应注液量由 300 mL/min 增至 500 mL/min ,分别进行对空测量与在线测量,对比分析不同主管道气量产生的雾化液滴粒径,评价测量结果的准确性。然后在吹扫气量 $0 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $0.46 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,实验测量每个时间段雾化液滴粒径参数变化,并对在线测量组件内的速度变化进行数值模拟分析,探究有无气体吹扫对于雾化液滴粒径测量的影响。随后进一步在 $0.22 \sim 1.42 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内调节吹扫气量,测得雾化液滴粒径的绝对差值 E_d ,并获得在线测量组件内部的速度流场分布,探究吹扫气量对雾化液滴粒径测量的影响,确定最佳环缝吹扫气量范围。最后在不同主管道气量条件下,开展 5 min 长时间连续测量,评价在线测量组件的测量稳定性。

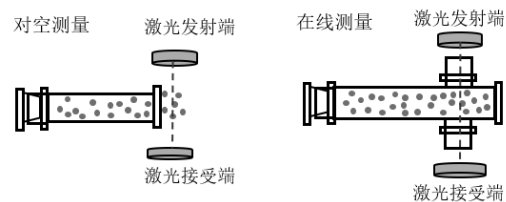


图5 对空测量与在线测量结构示意图

Fig.5 Structure diagram of unblocked measurement and online measurement

(1)采用索特平均粒径 d_{32} 来表征雾化液滴粒径大小, d_{32} 为粒径对表面积的加权平均,计算表达式如下,

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

式中, D_i 为雾化液滴直径, μm ; v_i 为雾化液滴在

粒径分数中的比例。

(2) 对空测量时无干扰, 测量结果准确可靠, 将其作为测量结果的基准值。采用绝对差值 E_A 描述在线测量与对空测量所得雾化液滴粒径的差值, 以反映在线测量粒径结果的准确性, 具体表达式如下,

$$E_A = |d_{32} - d_{32}^*| \quad (3)$$

式中, d_{32} 为在线测量索特平均粒径大小, μm ; d_{32}^* 为对空测量索特平均粒径大小, μm 。

(3) 在线测量组件在长时间下工作的稳定性是确保获得精确测量结果的关键, 亦即测量结果在不同时间均具有可重复性。采用不同时间测得雾化液滴粒径的标准差 σ 来描述测量数据离散程度, 以表征长时间测量的稳定性, 具体表达式如下,

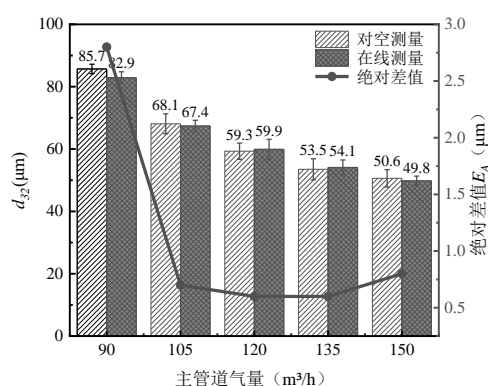
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (4)$$

式中, N 为时间段内测量雾化液滴粒径 d_{32} 的数量; x_i 是时间段内测量 d_{32} 的第 i 个数据值; μ 为时间段内测量 d_{32} 的平均值。

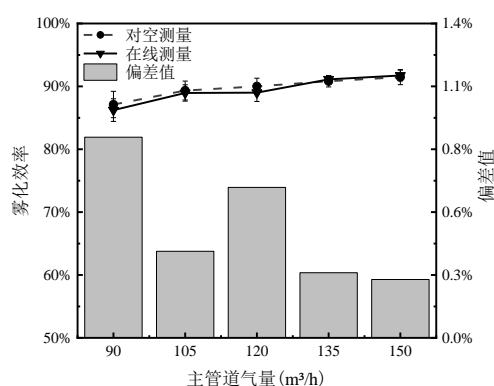
2 结果及分析

2.1 在线测量的准确性分析

不同主管道气量条件下, 对空测量与吹扫气量



(a) 主管道气量对 d_{32} 的影响



(b) 主管道气量对雾化效率的影响

图6 不同主管道气量下对空测量与在线测量 d_{32} 及雾化效率对比

Fig.6 Comparison of unblocked measurement and online measurement of d_{32} and atomization efficiency under different main pipeline gas volumes

在实验测试中, 当主管道气量分别为 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 、和 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 分别对比两种测量方式测得的雾化液滴粒径体积分数和累计体积分数, 结果如图7所示。在不同主管道气量条件下对空测量和在线测量测得的体积分数占比及累计体积分数占

为 $0.70 \text{ m}^3/\text{h}$ 时在线测量雾化液滴粒径 d_{32} 及雾化效率对比如图6所示。从图6(a)中可以看出, ①随着主管道气量从 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 增大至 $150 \text{ m}^3/\text{h}$, 对空测量及在线测量所得雾化液滴粒径 d_{32} 具有相同变化趋势, 两者测得雾化液滴粒径 d_{32} 均逐渐降低, 当管道气量为 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 雾化液滴粒径 d_{32} 在 $50 \mu\text{m}$ 左右。究其原因, 随着主管道气量增大, 管式雾化混合器内气体流速增大, 气相韦伯数随之增大, 气相对液滴破碎的剪切力增强, 导致雾化液滴粒径进一步减小^[31-32]。②在主管道气量变化范围内, 在线测量与对空测量雾化液滴粒径 d_{32} 结果基本吻合, 绝对差值 E_A 都在 $5 \mu\text{m}$ 以内, 表明在线测量组件在进行雾化液滴粒径 d_{32} 测量时具有较高的准确性。③从图6(b)中可以看出, 随着主管道气量的逐渐增大, 两种测量方式收集壁面液膜计算出的雾化效率均在不断上升, 偏差值在1%以内。理论上, 在线测量由于测量流场的空间状态不同和流道结构的附加影响, 会导致壁面液膜收集量略大, 降低雾化效率。在主管道气量 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下, 两种测量方式测得最大雾化效率均为91.5%左右。表明所设计的在线测量组件, 在雾化效率测量计算方面也具有较高的准确性。

比曲线基本一致, 表明在线测量组件在液滴粒度分布占比方面也具有有良好的准确性。同时, 随着主管道气量从 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 增大至 $150 \text{ m}^3/\text{h}$, 雾化液滴粒度分布区间从 $0\sim 700 \mu\text{m}$ 变窄至 $0\sim 300 \mu\text{m}$, 雾化液滴更小也更集中。

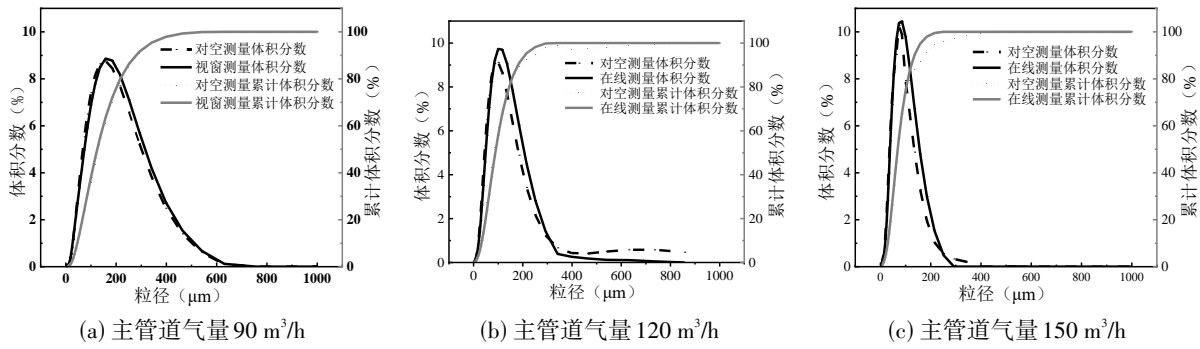


图7 不同主管道气量下对空测量与在线测量雾化液滴粒径体积分数及累计体积分数对比

Fig.7 Comparison of atomized droplet size volume fraction and cumulative volume pair fraction between unblocked measurement and online measurement under different main pipeline gas volumes

2.2 吹扫气量对测量结果的影响分析

当吹扫气量为 $0 \text{ m}^3/\text{h}$ (即无吹扫) 条件下测量时, 光学玻璃视窗会有微小液滴粘附, 观测所得粒径体积分数随时间的变化趋势如图8所示。在测量时间内, 每个时间段测得液滴粒径体积分数占比不断变化, 无法获得稳定的测量数值, 主要原因是观测窗内壁粘附的液滴时入射激光会发生多次折射和漫反射, 仪器无法准确识别雾化场中的液滴, 使得测量粒径区间偏大。图9为无吹扫气量和吹扫气量 $0.46 \text{ m}^3/\text{h}$ 时分别测得雾化液滴粒径 d_{32} 随时间的变化规律。分析可知, 随着测试时间的延长, 雾化液滴粒径 d_{32} 的测量值在 70 s 内从 $57 \mu\text{m}$ 增大至 $74 \mu\text{m}$, 测量偏差值占比超出 30% 。当吹扫气量在 $0.46 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 观察到玻璃视窗在测量期间始终比较洁净, 雾化液滴粒径 d_{32} 的测量值也基本保持平稳, 绝对差值 E_A 在 $5 \mu\text{m}$ 内。结合图11有无吹扫气量时在线测量组件内速度分布云图, 进一步分析组件内部的气体流动情况。如图11所示, 主管道气量为 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 且无吹扫时, 主管道气流明显会携带雾化液滴进入到测试管道内, 导致液滴飞溅到视窗玻璃, 入射激光会因粘附的液滴而发生散射。而且随着液滴在透明观测视窗镜片上不断附着, 使得测量结果逐渐变为无效虚假值。当吹扫气量为 $0.46 \text{ m}^3/\text{h}$, 从图11中速度矢量图可以看出, 环缝吹扫结构内能够形成吹扫气流, 测试管道内气流较均匀, 同时通过速度云图分析管道出口截面平均流速由无吹扫时的 15.48 m/s 变为 15.70 m/s , 并未明显增大, 与无吹扫相比增加的吹扫气流对主管道流动干扰较小。综上分析可知, 气体吹扫对于雾化液滴准确在线测量十分必要, 且吹扫气量大小对于测量结果存在显著影响, 需要进一步确定吹扫气量与主管道气量的匹

配关系。

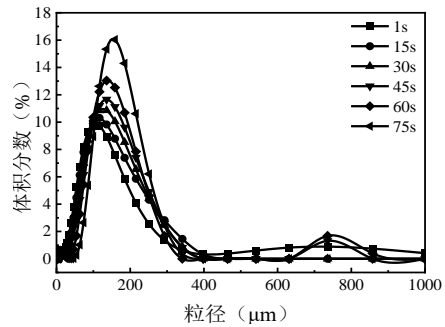


图8 无吹扫时粒径体积分数随时间变化

Fig.8 Variation of particle size volume fraction with time without purging

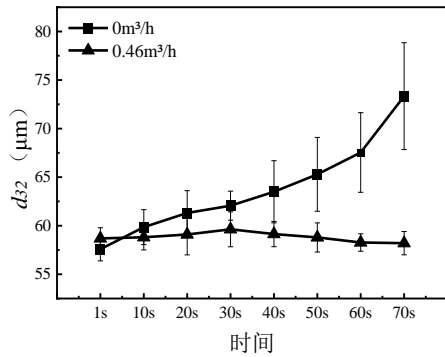


图9 无吹扫气量和吹扫气量 $0.46 \text{ m}^3/\text{h}$ 时 d_{32} 随时间变化
Fig.9 The variation of d_{32} with time at no purge gas flow and purge gas flow of $0.46 \text{ m}^3/\text{h}$

图10给出了不同主管道气量下环缝吹扫气量对雾化液滴粒径 d_{32} 及 d_{32} 绝对差值 E_A 的影响, 从图10(a)中可以看出, 在不同主管道气量条件下, 吹扫气量与主管道气量的比值从 0.26% 提升至 1.38% 时, 虽然测得的雾化液滴粒径 d_{32} 差值会有波动, 但整体变化趋势并不明显。从图10(b)中可以看出, 不同吹扫气量下测得雾化液滴粒径 d_{32} 的绝对差值 E_A

变化较明显。当主管道气量为 $90 \text{ m}^3/\text{h}$, 吹扫气量与主管道气量的比值大于 1.0% (对应吹扫气量 $0.94\sim 1.42 \text{ m}^3/\text{h}$) 时, 所测得雾化液滴粒径 d_{32} 的绝对差值 E_A 大于 $5 \mu\text{m}$ 。这表明当主管道气量较低时, 过高的吹扫气量会干扰主管道内的流速分布, 导致测量结果出现较大偏差。当主管道气量为 $150 \text{ m}^3/\text{h}$, 吹扫气量与主管道气量的比值为 0.15% (对应吹扫气量 $0.22 \text{ m}^3/\text{h}$) 时, 雾化液滴粒径 d_{32} 测量绝对差值 E_A 显著大于 $17 \mu\text{m}$ 。这表明吹扫气量过小, 吹扫气幕对液滴的阻隔效果不佳, 进而影响测量精度。因此, 环缝吹扫气量过大或过小均影响测量液滴粒径分布和测量结果的准确性。

为进一步分析吹扫气量与测量精度之间的影响机制, 在主管道气量为 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下, 模拟得到不同吹扫气量下在线测试组件内部的速度矢量分布, 如图 11 所示。从图中可以看出, 随着吹扫气量不断增大, 测试组件内部流场会发生明显变化, 产生不同大小的涡流, 吹扫气量从 $0 \text{ m}^3/\text{h}$ 提升至 0.46

m^3/h 时, 涡流会明显变小, 吹扫气流会阻挡主体气流中雾化液滴到达透明观测视窗镜片。当吹扫气量与主管道气量的比值达到 0.58% (对应吹扫气量为 $0.70 \text{ m}^3/\text{h}$) 时, 在线测量组件内涡流消失, 吹扫气流在狭缝处由于压缩作用产生强劲的气流, 沿着内壁倾角进行扩散, 再从测试管道进入到主管道气流中。此时, 环缝吹扫气流能够有效隔离外界液滴, 形成气流“屏障”, 达到对玻璃观测窗的保护效果。确定最佳吹扫气量的核心目的是避免主气流在测试管道内形成涡流, 将雾化液滴吹回主管道气流。综上所述, 当吹扫气量与主管道气量的比值大于 1.0% 时, 测量的雾化液滴粒径 d_{32} 绝对差值 E_A 偏差较大; 当吹扫气量与主管道气量的比值小于 0.58% 时, 测试组件内部流场存在涡流, 环缝吹扫气流无法有效隔离外界液滴。所以确定合适吹扫气量与主管道气量比值在 $0.58\%\sim 1.0\%$ 左右, 既能实现对液滴的阻隔, 也不会过多增加系统运行能耗。

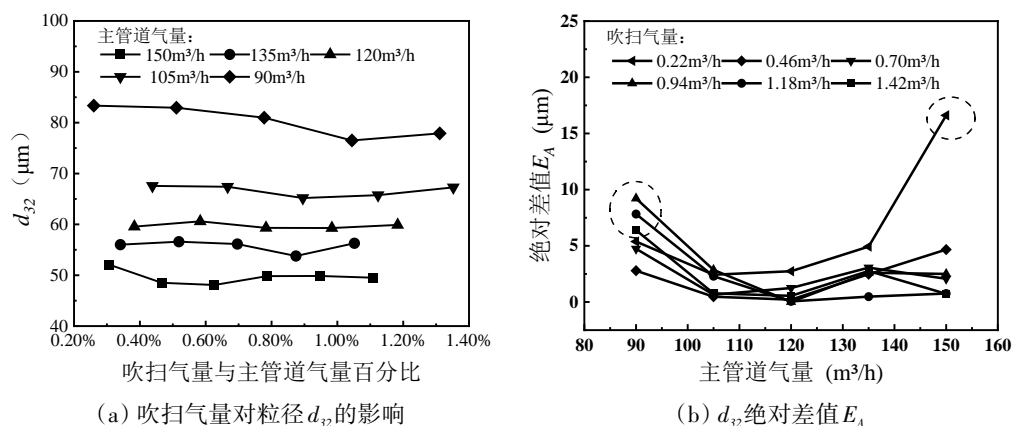


图 10 不同主管道气量下吹扫气量对雾化液滴粒径 d_{32} 影响

Fig. 10 The effect of purge gas volume on atomized droplet size d_{32} under different main pipeline gas volumes

2.3 测量稳定性分析

在不同主管道气量条件下持续测量 5 min , 所得雾化液滴粒径 d_{32} 随时间变化及其标准差如图 12 所示。从图 12(a) 中可以看出, 随着测试时间增加, 在主管道气量 $90\sim 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内所测量的雾化液滴粒径 d_{32} 大小基本不变, 表明所设计的在线测量组件可实现长时间稳定测量。同时采用雾化液滴粒径 d_{32} 标准差 σ 来描述测量时间范围内数据的离散程度, 从图 12(b) 中可以看出, 在线测量组件在管式雾化混合器气量处于 $90\sim 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内时, 雾化液滴粒径 d_{32} 标准差 σ 均小于 1, 表明在线测量组件在长时间运行下, 测量结果具有良好的稳定性, 鲁棒

性较强。当主管道气量在 $120\sim 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 的较高取值条件下, 标准差 σ 小于 0.5, 数据更集中, 测量稳定性更好, 说明主管道气量越大, 管式雾化混合器形成的雾化体系也更为稳定。

图 13 是在不同主管道气量条件下雾化液滴粒径体积分数随时间的变化情况, 从图中可以看出, 在主管道气量 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下, 在 1 min 、 3 min 和 5 min 时间节点测量的雾化液滴粒径体积分数基本重合, 进一步验证了测量结果的准确性和稳定性。值得注意的是, 主管道气量为 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 雾化液滴粒径的体积分布区间变宽, 出现了 $400\sim 1000 \mu\text{m}$ 粒径分布。主要原因是高气量条件

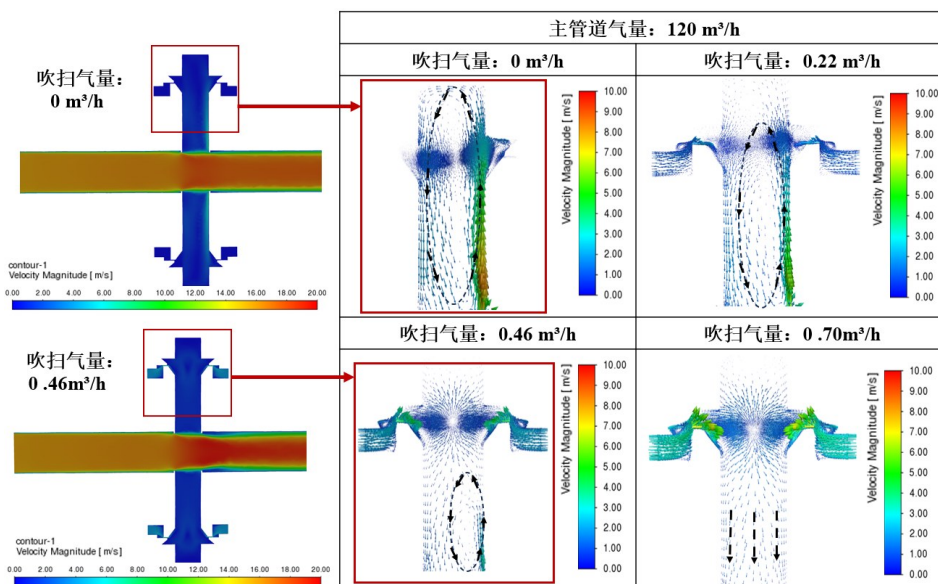
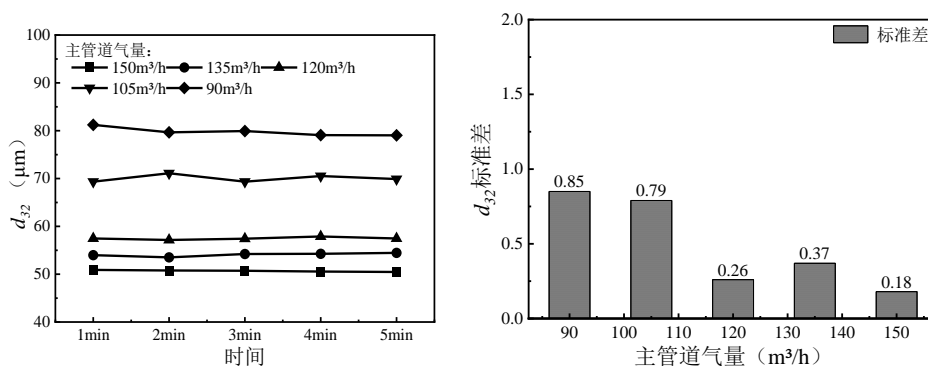


图 11 不同吹扫气量在线测量组件内速度云图及矢量图

Fig.11 Velocity contour and vector diagrams inside the online measurement component with different purge gas volumes



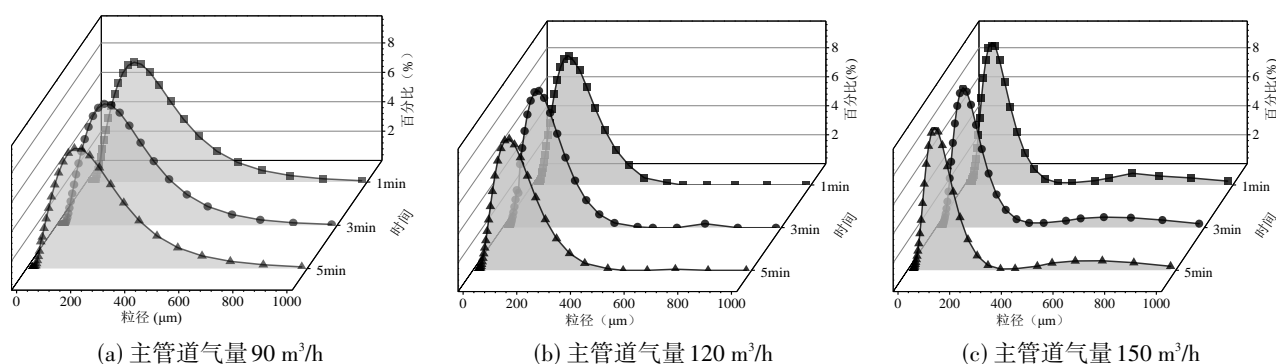
(a) 雾化液滴粒径 d_{32} 随时间变化

(b) 雾化液滴粒径 d_{32} 标准差

图 12 不同主管道气量条件下雾化液滴粒径 d_{32} 随时间变化及 d_{32} 标准差

Fig.12 The atomized droplet size d_{32} changes with time and the standard deviation of d_{32} under different main pipeline gas volumes

下,四通管口附近的液膜在高气流下发生破碎产生 影响。
大液滴,但对 d_{32} 整体测量稳定性并未造成显著



(a) 主管道气量 $90 m^3/h$

(b) 主管道气量 $120 m^3/h$

(c) 主管道气量 $150 m^3/h$

图 13 不同主管道气量条件下雾化液滴粒径体积分随时间变化

Fig.13 Variation of volume fraction of atomized droplet size with time under different main pipeline gas volumes

3 结 论

基于“环缝吹扫透明视窗+环隙排液套筒”设计理念,提出了一种管式雾化混合器粒径在线测量结构,环缝吹扫透明视窗可在较低吹扫气量下,在观测窗前形成气幕阻隔液滴附着干扰,环隙排液套筒结构可提前收集分离液膜。结合CFD数值模拟和实验测量,评价分析雾化液滴粒径在线测量结构的工作性能,得出以下主要结论:

(1)所设计的粒径在线测量结构具有较好的测量准确度,在液气比 0.2 L/m^3 条件下,主管道气量从 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 增大至 $150 \text{ m}^3/\text{h}$,在线测量结果与对空测量结果基本吻合,雾化液滴粒径 d_{32} 绝对差值 E_A 在 $5 \mu\text{m}$ 以内,雾化效率差值在 1% 以内。在不同主管道气量条件下,对空测量和在线测量测得雾化液滴粒径体积分数占比及累计体积分数占比曲线基本一致。

(2)结合不同吹扫气量下测得雾化液滴粒径 d_{32} 绝对差值 E_A 和在线测量组件内流场分布分析,确定吹扫气量应占主管道气量的 $0.58\% \sim 1.0\%$ 。实验测试主管道气量较低时,过高吹扫气量对主管道气流有干扰作用;主管道气量较高时,吹扫气量过低,无法完全隔绝液滴。数值模拟时吹扫气量与主管道气量的比值达到 0.58% ,在线测量组件内速度流场的涡流消失,吹扫气流会阻挡主流中雾化液滴到达测试窗壁面。

(3)管式雾化混合器气量在 $90 \sim 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内时,持续 5 min 在线测量测得雾化液滴粒径 d_{32} 的标准差 σ 均小于 1 ,粒度分布占比基本不变,表明雾化液滴粒径在线测量新方案在较长时间运行下的测量结果较为稳定,鲁棒性较强。在高气量 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,虽然雾化液滴粒径体积分布区间变宽,但测试曲线基本吻合,满足工程应用中的测量需求。

(4)后续研究可从结构优化、技术融合测量、工况适配等方面进一步提升本测量方法的性能与适用范围:一是变宽度梯度环缝结构与均压设计,实现吹扫气幕的周向均匀性调控,适配更宽的气量范围;二是后续可增设电磁联动阀门结构,通过“测量+隔离”缩短液滴与玻璃视窗的接触时间,减少粘附干扰;三是为适配高压、高温等工业气体处理场景,优化视窗镜片的材质,进行高温耐压密封设计等。

参 考 文 献

- [1] 王翔,宋民航.紧凑型天然气脱硫技术进展与展望[J].炼油技术与工程,2023,53(8):1-5.
Wang X, Song M H. Progress and prospect of compact natural gas desulfurization technology[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2023, 53(8): 1-5.
- [2] Ramkumar S, Grave E J, Larnholm P R, et al. cMIST™: novel, compact dehydration system for reducing size and weight[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2017: D041S051R001.
- [3] Shoaib A M, Bhran A A, Hamed M F. Application of compact mixer technique for Khalda gas dehydration plant[J]. International Journal of Engineering and Technical Research, 2016, 4(4): 40-47.
- [4] 孔令真,陈家庆,孙欢,等.微液滴强化传质的天然气甘醇脱水技术进展[J].石油机械,2022,50(10):102-110.
Kong L Z, Chen J Q, Sun H, et al. Progress in natural gas glycol dehydration technology with enhanced mass transfer by microdroplets[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(10): 102-110.
- [5] 陈小艳,周骛,蔡小舒,等.大型喷雾粒径分布的图像法测量[J].化工学报,2014,65(2):480-487.
Chen X Y, Zhou W, Cai X S, et al. Particle size distribution measurement of large spray by imaging[J]. CIESC Journal, 2014, 65(2): 480-487.
- [6] Zhou W, Hu J R, Feng M L, et al. Study on imaging method for measuring droplet size in large sprays[J]. Particuology, 2015, 22: 100-106.
- [7] 蔡小舒,李俊峰,欧阳新,等.光脉动法煤粉实时在线监测技术进展[J].华北电力大学学报,2003,30(6):38-42.
Cai X S, Li J F, Ouyang X, et al. Progress on on-line monitoring of pulverized coal in power station based on light fluctuation[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(6): 38-42.
- [8] 董俊.基于超声衰减法测量液滴粒径分布的仿真研究[D].天津:天津大学,2020.
Dong J. Simulation study on measurement of droplet size distribution based on ultrasonic attenuation method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [9] 苏明旭,袁安利,周健明,等.超声衰减与光散射法蒸汽液滴粒径和含量对比测试[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(2):654-660.
Su M X, Yuan A L, Zhou J M, et al. Measurement of steam droplet size and content: a comparison of ultrasonic attenuation and light scattering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(2): 654-660.
- [10] Marchetti J M, Svendsen H F. Improvements on a laser scattering technique for droplet size measurements applied to a gas-liquid separation equipment[J]. Measurement, 2011, 44(2): 493-499.
- [11] Fritz B K, Hoffmann W C. Measuring spray droplet size from agricultural nozzles using laser diffraction[J]. Journal of Visualized Experiments, 2016(115): e54533.
- [12] 杨越,张丹,郑巨淦,等.NaCl水溶液喷射闪蒸-掺混蒸发的实验研究[J].化工学报,2023,74(8):3279-3291.
Yang Y, Zhang D, Zheng J G, et al. Experimental study on flash and mixing evaporation of aqueous NaCl solution[J]. CIESC

- Journal, 2023, **74**(8): 3279–3291.
- [13] 李登稳, 程振民. 文丘里型气液分布器的实验与数值研究[J]. 化工学报, 2018, **69**(11): 4625–4632.
Li D W, Cheng Z M. Experimental evaluation and numerical simulation of Venturi gas-liquid distributor[J]. CIESC Journal, 2018, **69**(11): 4625–4632.
- [14] Lamanna G, Sun H, Weigand B, et al. Measurements of droplet vaporisation by means of light scattering[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, **261**(1/2/3): 153–161.
- [15] 郭荆璞, 安士杰, 刘振明, 等. 内混式空气雾化喷嘴喷雾性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2017, **39**(6): 78–81.
Guo J P, An S J, Liu Z M, et al. Experimental study on spray performance of internal mixed air atomizing nozzle[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017, **39**(6): 78–81.
- [16] Xue S D, Han J K, Xi X, et al. Coordination of distinctive pesticide adjuvants and atomization nozzles on droplet spectrum evolution for spatial drift reduction[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2024, **66**: 250–262.
- [17] 程旭, 李雅军, 赵铁铮, 等. 空气雾化喷嘴横向射流雾化特性实验研究[J]. 应用科技, 2024, **51**(6): 162–169.
Cheng X, Li Y J, Zhao T Z, et al. An experimental study on transverse jet atomization characteristics of air atomizing nozzle [J]. Applied Science and Technology, 2024, **51**(6): 162–169.
- [18] 孙欢, 孔令真, 陈家庆, 等. 流道结构对管式气液雾化混合器性能的影响[J]. 石油机械, 2023, **51**(3): 92–101.
Sun H, Kong L Z, Chen J Q, et al. Influences of flow channel structure on performance of tubular gas-liquid atomization mixer [J]. China Petroleum Machinery, 2023, **51**(3): 92–101.
- [19] Simmons M J H, Hanratty T J. Droplet size measurements in horizontal annular gas - liquid flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, **27**(5): 861–883.
- [20] Al-Sarkhi A, Hanratty T J. Effect of pipe diameter on the drop size in a horizontal annular gas - liquid flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, **28**(10): 1617–1629.
- [21] Austrheim T. Experimental characterization of high-pressure natural gas scrubbers[D]. Bergen: The University of Bergen, 2006.
- [22] Setekleiv A E, Svendsen H F. Scrubber characterization and performance using hydrocarbons at elevated pressures[J]. Fuel, 2014, **120**: 98–115.
- [23] 孙欢. 管式天然气脱水设备的气液流动与传质分离特性研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2022.
Sun H. Research on gas-liquid flow and mass transfer separation characteristics of tubular natural gas dehydration equipment[D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2022.
- [24] 丁红兵, 刘茜茜, 李金霞, 等. 基于图像法的环雾状流液滴参数测量与分析[J]. 化工进展, 2021, **40**(12): 6460–6468.
Ding H B, Liu X X, Li J X, et al. Measurement and analysis of droplet parameters in annular mist flow based on image method[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, **40**(12): 6460–6468.
- [25] Steimes J, Hendrick P. Measurement and prediction of droplet size in annular gas - liquid flows in aero-engine oil systems[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, **93**: 84–91.
- [26] 王新军, 李卫东, 徐廷相. 气-水环状流携带液滴粒径几何特征的测量[J]. 西安交通大学学报, 1998, **32**(12): 25–28.
Wang X J, Li W D, Xu T X. Study on entrainment of liquid drop size in air-water annular flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, **32**(12): 25–28.
- [27] 孔令真, 杨洋, 陈家庆, 等. 管式雾化混合器性能在线带压测量实验装置及实验方法: 119469850A[P]. 2025-02-18.
Kong L Z, Yang Y, Chen J Q, et al. Experimental device and method for online pressure-bearing measurement of tubular atomizing mixer performance: 119469850A[P]. 2025-02-18.
- [28] Sun H, Kong L Z, Chen J Q, et al. Research on the performance of gas-liquid atomizing mixer in tubular flow channel with variable cross-section[J]. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2026, **219**: 110576.
- [29] 杨树俊, 魏玉聪, Woo Meng Wai, 等. 入口旋流对均一粒径液滴喷雾干燥塔影响的数值模拟[J]. 化工学报, 2018, **69**(9): 3814–3824.
Yang S J, Wei Y C, Wai W, et al. Numerical simulation of mono-disperse droplet spray dryer under influence of swirling flow[J]. CIESC Journal, 2018, **69**(9): 3814–3824.
- [30] 于燕坤. 外混式空气雾化喷嘴数值模拟与雾化特性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2021.
Yu Y K. Numerical simulation and atomization characteristics study of externally mixed air atomization nozzle[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2021.
- [31] 常建龙, 陈连华, 赵永娟, 等. 横向射流液滴雾化研究现状分析[J]. 战术导弹技术, 2022(2): 29–36, 82.
Chang J L, Chen L H, Zhao Y J, et al. Analysis on research status of droplet atomization of jet in crossflow[J]. Tactical Missile Technology, 2022(2): 29–36, 82.
- [32] 兰天, 孔令真, 陈家庆, 等. 低速横流作用下液体射流初次破碎实验[J]. 化工进展, 2020, **39**(4): 1282–1291.
Lan T, Kong L Z, Chen J Q, et al. Experimental studies on primary breakup of liquid jets injected into low-speed air crossflow[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, **39**(4): 1282–1291.