



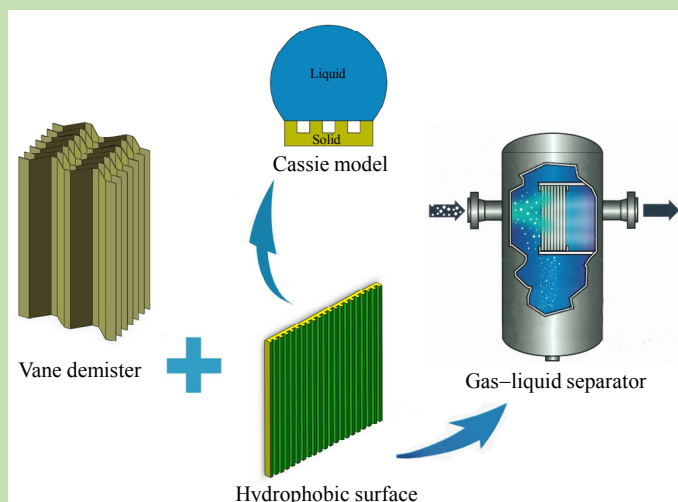
Effect of surface wettability on separation performance of trapezoidal demister

Jiarong WANG^{1,2}, Zhongli JI^{1,2*}, Weiwei MA^{1,2}, Jinjie LU^{1,2}, Bo YANG^{1,2}

1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: The trapezoidal demisters are commonly used to remove droplets over 10 μm in the field of natural gas purification. In order to solve the problem that the separation efficiency of the demisters obviously reduced at high gas velocity in the actual industry, the biomimetic microstructure was constructed on the surface by the wire electrical discharge machining (WEDM) technology to obtain a hydrophobic surface. Furthermore, the effects of surface wettability on the separation efficiency and pressure drop for the demisters were evaluated experimentally using atomized droplets. The results showed that the



surface with biomimetic microstructure had good hydrophobic function and resistance reduction effect, which accelerated the drainage rate of liquid film. When the gas velocity exceeded 5 m/s, the liquid film thickness was relatively thin, which effectively suppressed the re-entrainment phenomenon of the droplets and improved the separation efficiency. In addition, the flow field distribution in the hydrophobic trapezoidal demisters was relatively flat, and the flow resistance was very small. The total pressure drop was only half of the demisters with hook. Therefore, the composite separation performance of the hydrophobic trapezoidal demisters with high efficiency and low resistance was optimal.

Key words: demister; biomimetic microstructure; re-entrainment; separation efficiency

收稿: 2019-06-20, 修回: 2019-08-06, 网络发表: 2019-08-28, Received: 2019-06-20, Revised: 2019-08-06, Published online: 2019-08-28

基金项目: 国家科技重大专项(编号: 2017ZX05064)

作者简介: 王佳荣(1994-), 男, 陕西省韩城市人, 博士研究生, 动力工程及工程热物理专业, E-mail: jr_king0623@sina.com; 姬忠礼, 通讯联系人, E-mail: jizhongli63@vip.sina.com.

引用格式: 王佳荣, 姬忠礼, 马巍威, 等. 表面润湿性对梯形除雾器分离性能的影响. 过程工程学报, 2020, 20(4): 410-417.
Wang J R, Ji Z L, Ma W W, et al. Effect of surface wettability on separation performance of trapezoidal demister (in Chinese).
Chin. J. Process Eng., 2020, 20(4): 410-417, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219236.

表面润湿性对梯形除雾器分离性能的影响

王佳荣^{1,2}, 姬忠礼^{1,2*}, 马巍威^{1,2}, 卢锦杰^{1,2}, 杨博^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 102249

摘要: 为解决实际工业中除雾器在高气速时分离效率明显降低的问题, 利用除雾器分离实验装置, 以水为实验介质, 采用电火花线切割技术在叶片表面构建仿生微结构实现表面疏水化, 考察了表面润湿性对除雾器分离效率和压降的影响。结果表明, 仿生微结构的疏水功能和减阻效应良好, 表面液膜的排液速率明显加快。当气速超过 5 m/s 时, 其液膜厚度相对较薄, 可有效抑制液滴的二次夹带, 提升分离效率。同时, 疏水型梯形除雾器内的流场分布较平缓, 流动阻力小, 总压降约为带钩型梯形除雾器的一半。因此, 疏水型梯形除雾器兼具高效率 and 低阻力特性, 综合分离性能最佳。

关键词: 除雾器; 仿生微结构; 二次夹带; 分离效率

中图分类号: TE832.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)04-0410-08

1 前言

为保证采气井中后期的产气能力, 须清除井底积液, 天然气开采站场通常采用泡沫排水采气工艺^[1], 经此工艺的高压气体需分别经过消泡作业和气液分离除去其中携带的泡沫等液滴杂质, 避免腐蚀管道, 减少压缩机等重要设备非正常停机次数, 保证天然气集输系统安全可靠运行^[2]。折流板除雾器作为一种重要的气液分离设备, 其结构简单且压力损失小, 适用于含液量较大的复杂工况, 因而在工业生产中广泛应用^[3], 其在气液分离中一般作为预分离装置, 与过滤器等高精度气液分离设备匹配使用, 其分离性能直接影响聚结滤芯的实际性能及使用寿命^[4]。

目前, 国内外已有许多学者对折流板除雾器的分离机理进行了大量模拟研究。James 等^[5]研究了板间距、气速和排液通道尺寸对除雾器分离效率的影响, 发现排液通道长 5 mm、宽 2.5 mm 时可提高除雾效率; Kavousi 等^[6]基于 DRW 模型研究了多种工况下带钩除雾器中叶片钩槽的长度、高度和角度等结构参数对除雾效率的影响; 张博等^[7]利用 FLUENT 软件模拟得到折流板除雾器内二次夹带液滴主要来源于液膜的剥落和分离; 郝雅洁等^[8]利用 CFD 方法研究了折流板除雾器的叶片间距、板型及气速对不同粒径雾滴的分级除雾效率和总除雾效率的影响, 同时还得到不同粒径雾滴的运动和捕集规律。还有部分学者通过实验方法研究各参数对除雾效率和压降的影响。王政允^[9]利用称重法计算除雾效率, 研究了烟气流速和板间距对折流板除雾效率的影响; 李嘉

等^[10]测量了不同气速下折流板的除雾效率, 发现当入口气速超过临界破膜速度后, 由于二次液滴夹带导致分离效率降低; Mao 等^[11]利用平面激光诱导荧光技术研究了垂直波形板壁面的薄液膜在气流的剪切作用下破裂的机理, 以此推导出引起液膜破裂的临界气速理论公式; Xu 等^[12]提出一种利用多孔碳化硅泡沫层作为增强捕液结构的新型折流板除雾器, 研究了泡沫层厚度、孔隙率和孔隙密度等几何参数对除雾器分离性能的影响。

国内外学者对折流板除雾器的研究多以数值模拟优化为主, 根据实际情况作了很多简化, 如忽略液滴间碰撞及液滴与壁面上液膜间的碰撞对液滴运动和捕集的影响, 导致除雾效率的模拟值与实际值存在一定误差。此外, 很多学者在研究仿生微结构方面取得了重大进展, 即运用仿生设计理念, 在金属材料表面构建类似荷叶等植物表面天然存在的微结构, 从而获得人工疏水表面。张帆等^[13]利用高速摄影仪和图像处理技术获取液滴以不同速度撞击不同固体材料壁面的形态变化参数, 发现撞击速度、固体材料表面的亲疏水性对液滴铺展直径、液滴高度等参数均有重要影响; 彭建^[14]通过电火花线切割技术在铝合金表面设计并构建仿生微结构, 研究了其疏水表面的防冻粘特性; 谢华^[15]利用先进的数值模拟技术揭示了仿生微结构表面的减摩机理和规律。

本工作针对现有梯形除雾器中易产生液滴二次夹带的问题, 利用先进的仿生学理论, 在天然气净化常用的除雾器叶片的光滑表面构建仿生微结构, 使其具有良好的疏水效果, 用搭建的折流板除雾器实验装置测定其分离性能, 为除雾器的优化提供参考。

2 实验

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。本实验中采用 1/4WTJN-SS 型双流体雾化喷嘴(上海雾泰流体技术有限公司)产生雾化液滴,用相位多普勒粒子分析仪(PDPA 测试系统,丹麦 Dantec 公司)测定其粒径分布,结果如图 2 所示。在喷嘴进气端设置 GC300-08 型油水分离器过滤器(广州市泓观五金机电有限公司)去除压缩空气中的液态杂质,同时将其压力调至 0.25 MPa。进液端通过 PKS76-1 型自吸泵(浙江利欧股份有限公司)输送实验液体,用球

阀控制进液量和液体压力。在 9-19 型离心风机(新东方风机厂)负压抽吸下,雾化喷嘴产生的雾状液滴与空气充分混合后进入除雾器。除雾器由 7 片相同的叶片组成,板间距固定为 26 mm^[8,9]。目前工业中使用的除雾器大多由金属材料压制而成,结构如图 3 所示。操作气速用管道流量与除雾器入口长 280 mm、宽 160 mm 的横截面积的比值表示,用 BF-WQL801407S 型文丘里流量计(上海倍福自动化科技有限公司)测定管道流量。测压点采用环形取压,分别设置在距除雾器上、下游 400 mm 处,用 Testo-510 型微压计[德国仪器国际贸易(上海)有限公司]测量压降。

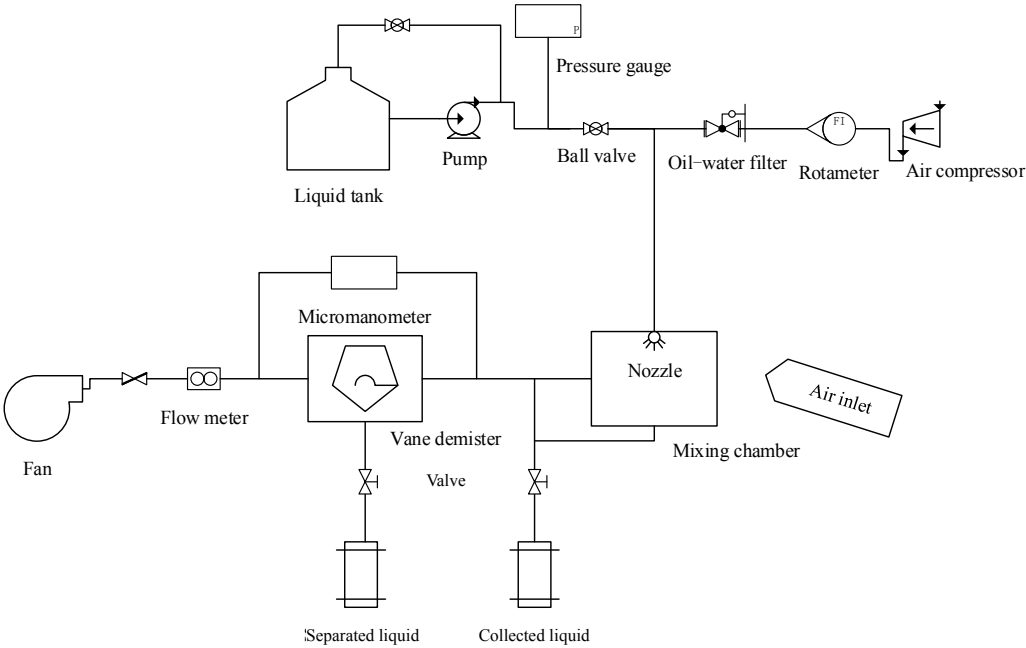


图 1 实验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of experimental device

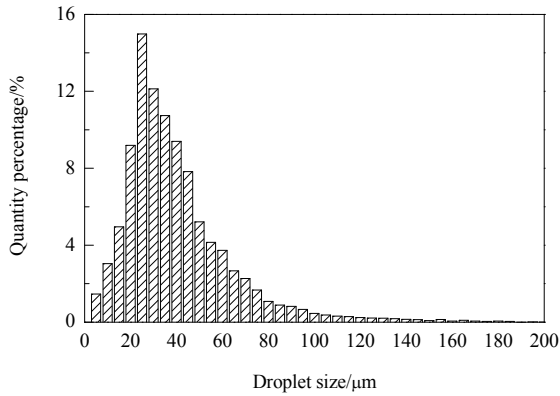
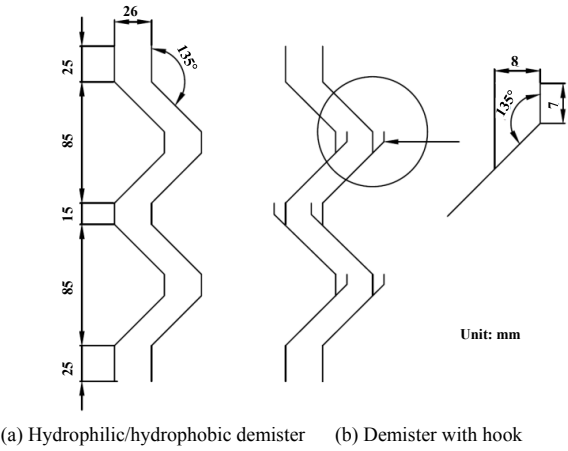


图 2 喷嘴出口雾化液滴的粒径分布
Fig.2 Atomized droplet size distribution at the outlet of nozzle



(a) Hydrophilic/hydrophobic demister (b) Demister with hook

图 3 不同梯形除雾器的结构尺寸示意图
Fig.3 Schematic diagram of trapezoidal demisters with different structure sizes

2.2 实验方法

为探究表面润湿性对梯形除雾器分离性能的影响, 本工作对亲水型、疏水型和带钩型 3 种不同梯形除雾器进行实验测试。

2.2.1 疏水表面的制备方法

为探究折流板除雾器叶片表面的润湿性对其分离性能的影响, 直接采用机械加工方法将生物表面的几何

形态和微纳复合结构等特征应用到 7075 铝合金表面, 以得到同时具备疏水特性和低粘附性的功能性表面。具体加工过程: 选取比强度高、易加工和耐腐蚀的 7075 型铝合金(惠州市精锐合金科技有限公司)为原材料, 采用加工精度高达 $5\ \mu\text{m}$ 的电火花线切割技术, 在铝合金基板上构建特殊的表面微结构, 如图 4 所示, 其中, 微沟槽的宽度 S 、深度 H 及间距 L 均为 $400\ \mu\text{m}$ 。

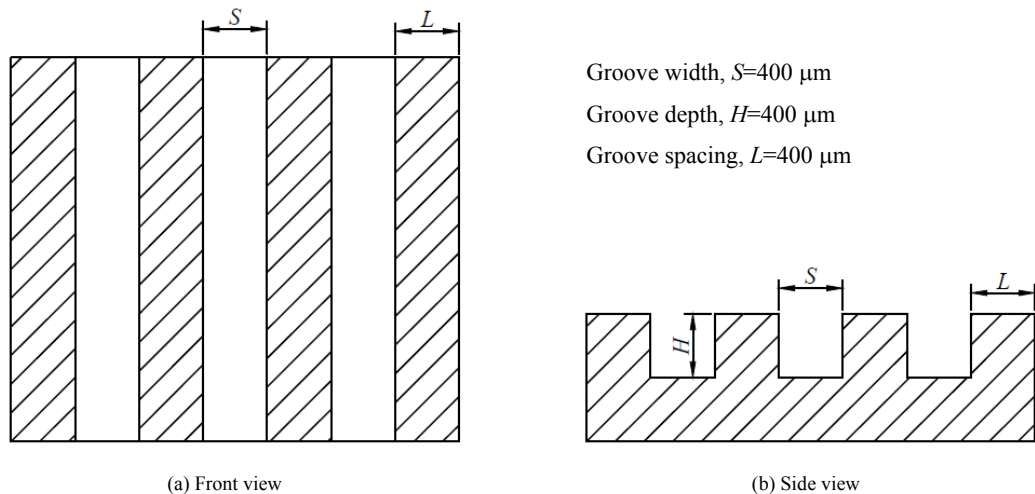


图4 疏水表面结构

Fig.4 The structure of the hydrophobic surface



图5 水滴与铝合金表面的接触角

Fig.5 Contact angles of water droplets and aluminum alloy surface

2.2.2 表面润湿性分析

用具有光滑表面和微结构表面的 7075 铝合金分别制成 2 种表面润湿性不同的梯形除雾器, 用 Attension 光学接触角测量仪(瑞典百欧林科技有限公司)对其静态接触角进行测试和记录, 结果如图 5 所示。可以看出, 水滴在 7075 铝合金光滑表面的静态接触角为 87.6° (3 次测量平均值), 采用线切割技术所制仿生微结构表面的静态接触角为 122.3° (3 次测量的平均值)。接触角是衡量液体对固体材料表面润湿程度的重要参数^[16]。以水为测试液体, 接触角小于 90° 的表面称为亲水表面, 反之则为疏水表面, 水滴很难浸润。因此, 光滑表面为亲水表面, 仿生微结构表面为疏水表面。

2.2.3 除雾器的性能评价

梯形除雾器主要利用惯性碰撞原理实现气液两相分离, 即当气流在通道的曲折角处发生偏转时, 悬浮其中的雾化液滴也会作相应的曲线运动, 其运动轨迹可用无量纲斯托克斯数(St)表示^[17], 为颗粒松弛时间和流体特征时间的比值:

$$St = t \frac{v_p}{d_0} = \frac{\rho_p v_p C_c d_p^2}{18 \mu_g w} \quad (1)$$

式中, t 为颗粒的松弛时间(s), v_p 为颗粒速度(m/s), d_0 为障碍物的特征尺寸(m), ρ_p 为颗粒密度(kg/m^3), C_c 为滑移系数, d_p 为颗粒粒径(m), μ_g 为气体动力粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$), w 为板间距(m)。

由斯托克斯公式可知, 气速是影响除雾器分离效率的重要因素之一。根据现场实际运行工况, 将实验气速定为 2~6 m/s。采用称重法^[9,10,17]计算除雾效率, 实验过程中用 ESK-1 系列精密电子天平(精度 0.1 g, 沈阳龙腾电子有限公司)分别称量实验前后储液桶的质量 $m_1(\text{g})$ 和 $m_2(\text{g})$, 混合管路段的集液量 $m_3(\text{g})$ 及除雾器的排液量 $m_4(\text{g})$, 除雾器的分离效率 $\eta(\%)$ 可由下式计算:

$$\eta = \frac{m_4}{m_1 - m_2 - m_3} \times 100\% \quad (2)$$

为保证测量结果的准确性, 实验开始前打开水泵进行喷雾, 润湿壁面 3 min, 以减少因壁面上液滴残留引起的测量误差。

梯形除雾器的分离性能主要由分离效率和压降共同决定, 利用品质因子 $Q (\text{Pa}^{-1})$ 进行评价^[18]:

$$Q = -\frac{\ln(1-\eta)}{\Delta p} \quad (3)$$

式中, Δp 为除雾器上、下游的压降(Pa)。

2.2.4 实验结果的可靠性

为验证实验数据的可靠性, 用亲水型梯形除雾器进行 3 次重复实验, 其分离效率如图 6 所示。可以看出, 3 次实验的分离效率基本一致, 最大标准偏差为 0.492, 表明实验的重复性较好, 即该除雾器性能实验装置可保证实验数据的准确可靠。

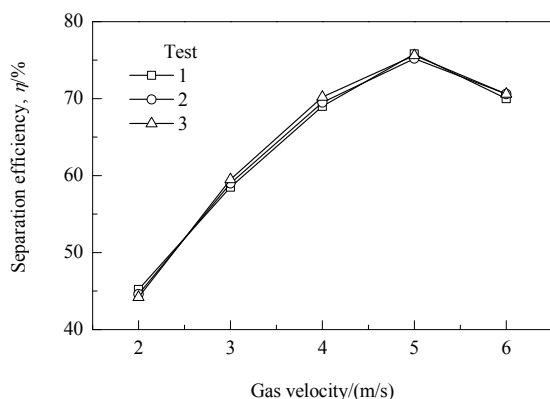


图 6 3 次重复实验的亲水型梯形除雾器的分离效率

Fig.6 Separation efficiencies of the hydrophilic trapezoidal demisters with three repeated tests

3 结果与讨论

3.1 表面润湿性对梯形除雾器分离效率的影响

不同梯形除雾器在不同气速下的分离效率如图 7 所示。可以看出, 气速较低(2 m/s)时, 具有光滑表面的亲水型梯形除雾器的分离效率仅为 44.7%, 这是由于小

液滴在低气速时的惯性动量较小, 易随气流偏转作曲线运动, 其运动轨迹主要取决于 St 值。液滴的粒径越大, St 越大, 液滴抗拒跟随气体流线改变的能力越强^[17]; 而粒径相对较小的液滴在流道弯折处所受惯性离心力偏小, 导致其松弛时间较短, 沿原来直线方向运动的距离短, 很难与除雾器壁面发生碰撞而被拦截。此时, 虽然叶片的第一迎风面会形成大片液膜, 但由于捕获的液滴数较少, 液膜厚度很小。随表面液滴不断累积, 小液滴逐渐聚结成大连滴, 在重力作用下依次向下滑落。

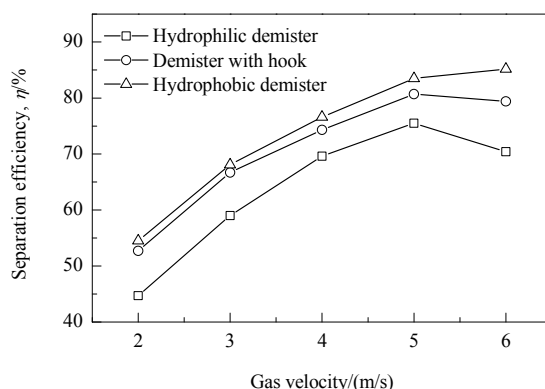


图 7 不同梯形除雾器的分离效率

Fig.7 Separation efficiencies of different trapezoidal demisters

气速低于 5 m/s 时, 亲水型梯形除雾器的分离效率随气速增加而不断增大, 但增大值却由气速 3 m/s 时的 14.3% 逐渐降低至气速 5 m/s 时的 5.9%。这是因为除雾器在低气速时基本能完全分离出粒径较大的液滴, 而 20 μm 以下的小液滴冲击动量随气速增加而不断增加, 其松弛时间延长, 从而增加与板壁发生碰撞被拦截的机会, 分离效率不断提升。但这部分液滴由于粒径很小, 其质量浓度在整个液滴粒径范围内所占比重并不大, 因此分离效率的增幅随气速增加而减小。气速超过 5 m/s 后, 虽然除雾器叶片表面液膜的排液速率(见图 8)较快, 但由于壁面捕获的液滴较多, 液膜厚度较大, 在高速气流剪切作用下, 曲折角处的液膜易脱落、分离, 甚至出现壁面短接现象, 即所谓的液滴二次夹带现象, 使其分离效率降低了 5.1%。

目前, 工业中通常用高效的带钩型梯形除雾器以满足日趋严格的环保要求。相比于亲水型除雾器, 在液膜最易产生夹带液滴的曲折角处增设疏水钩, 一方面增大液膜的流动阻力, 使液膜受到气流的剪切作用变小, 液膜剥落随之减弱, 表面液膜厚度增加, 排液位置增多且排液速率明显加快; 另一方面, 疏水钩的存在造成通流面积减少, 主流区域的气速大幅增加。根据颗粒动力学

原理,液滴在气流偏转时受到的离心力正比于速度的二次方,速度增加使液滴所受惯性离心力大大增加,将促使更多的小液滴与疏水钩相对的板壁碰撞而被拦截。与亲水型梯形除雾器相比,其分离效率可提升4.7%~9.0%。风速为6 m/s时,带钩型除雾器表面液膜的排液速率比亲水型除雾器大(见图8),叶片表面累积的液体数减少,液膜厚度变薄,可有效减少二次夹带液滴,其分离效率比前者高9.0%。

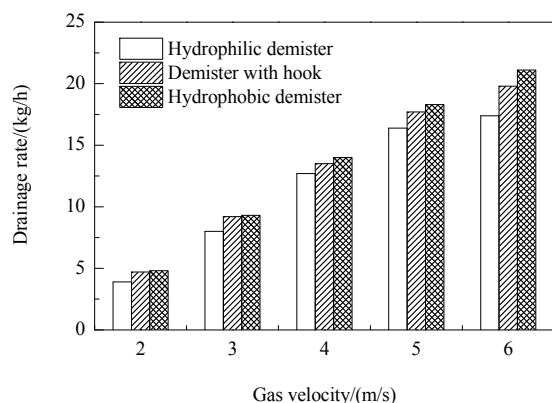


图8 不同梯形除雾器的排液速率

Fig.8 The drainage rates of different trapezoidal demisters

相同操作风速下,疏水型除雾器的分离效率比其它2种除雾器都高。疏水型除雾器表面为仿生微结构,液滴撞击该表面的动力学行为符合Cassie模型。当气流中夹带的液滴以一定速度撞击到疏水叶片表面时,其铺展直径小且铺展过程耗散能量少,液滴的回升高度增加,快速聚结并形成液膜,同时对周围的小液滴还有一定吸附作用。此外,铝合金叶片的光滑表面和仿生微结构表面的静态接触角分别为87.6°和122.3°,随表面疏水性增加,其摩擦因子大大减小^[19],液膜沿重力方向的流动阻力也相应减小,排液速率明显加快。风速为6 m/s时,亲水型和带钩型梯形除雾器由于捕获的液滴较多,表面液膜厚度较大,易产生夹带液滴,分离效率分别降低5.1%和1.3%。而疏水型除雾器由于其表面液膜排液速率快,液膜厚度相对较小。由毛峰等^[20]的研究结果可知,折流板除雾器的临界破膜速度与液膜厚度呈负相关,表面液膜厚度越小,其临界破膜速度越大,可有效抑制液滴的二次夹带。因此,疏水型除雾器的分离效率仍有所提高,分别比亲水型和带钩型除雾器高14.8%和5.8%。

3.2 表面润湿性对梯形除雾器压降的影响

除雾器的阻力特性也是评价其分离性能的重要指标。通常除雾器分离效率的提升往往伴随阻力增加,阻力越大,压降越大。不同梯形除雾器的压降如图9所示。

带钩型梯形除雾器通道内气流的雷诺数始终大于2300,即属于湍流流动。疏水钩迫使气流作偏转运动,同时通流面积减少引起局部风速大幅增加,使气流与板壁的摩擦损失增加,即沿程阻力增大;而湍流扰动的存在使流场内压力分布更不均衡,气流易在通道曲折角附近形成一定量的小漩涡,涡流耗散作用增强,即流动阻力增加。随风速不断增加,湍流的扰动作用愈加强烈,带钩型除雾器的压降呈指数增加。另外2种除雾器的流场分布较平缓,气流与壁面间的摩擦阻力相对较小,压降约为带钩型除雾器的一半,但二者的压降差值最大不超过2 Pa。由于亲水型和疏水型梯形除雾器的结构相同,流道内的流场分布几乎相同,但后者表面的疏水性对液滴有一定的阻碍作用,其压降比亲水型除雾器略大。

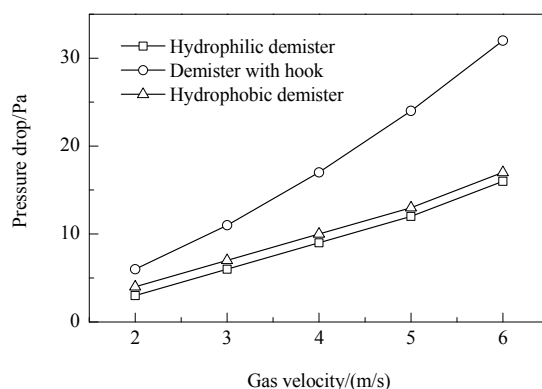


图9 不同梯形除雾器的压降

Fig.9 The pressure drops of different trapezoidal demisters

3.3 综合性能评价

为分析梯形除雾器的综合分离性能,分别计算了3种梯形除雾器在不同风速下的品质因子 Q ,结果如图10所示。可以看出,3种梯形除雾器的品质因子均随风速增加而减小,且疏水型梯形除雾器的品质因子最大。风速为6 m/s时,疏水型除雾器的品质因子约为带钩型除雾器的2.3倍。由于疏水型除雾器可有效消除液滴的二次夹带现象,其分离效率高于带钩型除雾器,同时压降远小于带钩型除雾器,因此疏水型除雾器的品质因子相对较大。疏水型除雾器的压降比亲水型除雾器略大,但其分离效率提升较明显。综合分析可知疏水型除雾器的综合分离性能最佳,在工业中具有广泛的应用前景。

4 结论

利用折流板除雾器分离性能实验装置,研究了表面润湿性对梯形除雾器的分离效率和压降的影响,得出以下结论:

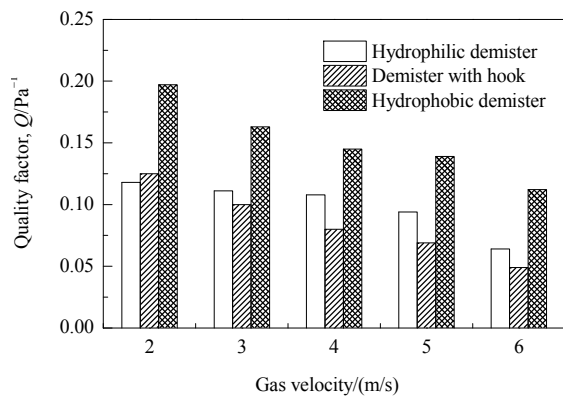


图10 不同梯形除雾器的品质因子

Fig.10 The quality factors of different trapezoidal demisters

(1) 疏水型梯形除雾器表面的仿生微结构具有良好的疏水性和减阻作用,促使板壁上捕获液滴聚结的同时加快排液速率,液膜厚度减小。当风速超过 5 m/s 时,可有效抑制二次夹带液滴,分离效率提升较明显。

(2) 相比于带钩型除雾器,疏水型梯形除雾器内的流场分布较平缓,流动阻力小,其压降约为带钩型除雾器的一半。

(3) 疏水型除雾器的品质因子最大。与带钩型除雾器相比,疏水型除雾器兼具高效率 and 低阻力特性,综合性能最佳。

参考文献

- [1] 薛方刚, 薛刚计. 天然气井排水采气技术研究与应用 [J]. 天然气勘探与开发, 2014, 37(3): 49–51.
Xue F G, Xue G J. Research and application of natural gas well drainage and gas recovery technology [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2014, 37(3): 49–51.
- [2] 常程, 姬忠礼, 黄金斌, 等. 气液过滤过程中液滴二次夹带现象分析 [J]. 化工学报, 2015, 66(4): 1345–1352.
Chang C, Ji Z L, Huang J B, et al. Analysis of re-entrainment in process of gas-liquid filtration [J]. CIESC Journal, 2015, 66(4): 1345–1352.
- [3] 夏芑力, 杨静. 折流板式除沫器性能分析及研究进展 [J]. 化工设备与管道, 2013, 50(6): 33–36.
Xia P L, Yang J. Performance analysis and research progress of wave-plate demister [J]. Process Equipment & Piping, 2013, 50(6): 33–36.
- [4] 熊至宜, 姬忠礼, 杨亮, 等. 聚结型过滤元件过滤性能影响因素的测定与分析 [J]. 化工学报, 2012, 63(6): 1743–1748.
Xiong Z Y, Jiong Z L, Yang L, et al. Measurement and analysis on influencing factors for filtration performance of filter coalesce element [J]. CIESC Journal, 2012, 63(6): 1743–1748.
- [5] James P W, Wang Y. The role of drainage channels in the performance of wave-plate mist eliminators [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2003, 81: 639–648.
- [6] Kavousi F, Behjat Y, Shahhosseini S. Optimal design of drainage channel geometry parameters in vane demister liquid-gas separators [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91: 1212–1222.
- [7] 张博, 巩时尚, 何远正. 除雾器内二次携带液滴的数值模拟 [J]. 发电设备, 2019, 33(1): 1–5.
Zhang B, Gong S S, He Y Z. Numerical simulation of the re-entrainment phenomenon in a demister [J]. Power Equipment, 2019, 33(1): 1–5.
- [8] 郝雅洁, 刘嘉宇, 袁竹林, 等. 除雾器内雾滴运动特性与除雾效率 [J]. 化工学报, 2014, 65(12): 4670–4677.
Hao Y J, Liu J Y, Yuan Z L, et al. Movement characteristics of droplets and demisting efficiency of mist eliminator [J]. CIESC Journal, 2014, 65(12): 4670–4677.
- [9] 王政允. 湿法脱硫系统除雾器除雾特性的实验研究与数值模拟 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 36–40.
Wang Z Y. Experimental and numerical simulation for the demisting characteristic of FGD mist eliminator [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009: 36–40.
- [10] 李嘉, 黄素逸, 王晓墨, 等. 波形板分离器的冷态实验研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 112–114.
Li J, Huang S Y, Wang X M, et al. Experimental research of cold state operation of corrugated-plate separator [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(1): 112–114.
- [11] Mao F, Tian R F, Chen Y X, et al. Re-entrainment in and optimization of a vane mist eliminator [J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 120: 656–665.
- [12] Xu Y C, Yang Z M, Zhang J S. Study on performance of wave-plate mist eliminator with porous foam layer as enhanced structure. part II: experiments [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 171: 662–671.
- [13] 张帆, 陈凤, 薄涵亮. 不同亲疏水表面液滴动力学行为实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2014, 49: 289–293.
Zhang F, Chen F, Bo H L. Experimental study of liquid droplet dynamic behaviors impating on surfaces with different hydrophilicity or hydrophobicity [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 49: 289–293.
- [14] 彭建. 铝合金表面仿生超疏水及防冻粘特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018: 41–61.
Peng J. Study on bionic fabrication and anti-freezing adhesive behavior of superhydrophobic aluminum surface [D]. Changchun: Jilin University, 2018: 41–61.
- [15] 谢华. 仿生壁面减阻机理及表面微结构设计方法研究 [D]. 北京: 中国舰船研究院, 2017: 87–119.
Xie H. Research on friction reduction mechanism and design method of the bionic micro-structure surface [D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2017: 87–119.
- [16] Chunglok A, Muensit N, Daengngam C. Extreme wetting-resistant multiscale nano-/microstructured surfaces for viscoelastic liquid repellence [J]. Journal of Nanomaterials, 2016, 8(3): 1–13.
- [17] 刘华荣. 新型多级冲击采样器的设计与性能验证 [D]. 北京: 清华大学, 2004: 9–23.
Liu H R. Design and performance verification of a new multi-stage impact sampler [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004: 9–23.
- [18] Wang J, Kim S C, Pui D Y H. Figure of merit of composite filters with micrometer and nanometer fibers [J]. Aerosol Science and

- Technology, 2008, 42(9): 722–728.
- [19] 连峰, 王增勇, 张会臣. 双疏铝合金表面的水/油润滑摩擦学性能 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 115–120.
Lian F, Wang Z Y, Zhang H C. Tribological performance of amphiphobic aluminum alloy surface under water/oil lubrication [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 115–120.
- [20] 毛峰, 田瑞峰, 陈怡炫. 波形板干燥器内壁面液膜破裂临界条件的实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2018, 52(5): 856–861.
Mao F, Tian R F, Chen Y X. Experimental study on critical break up of liquid film in corrugated plate dryer [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(5): 856–861.