文章编号：1000-8608(2022)02-0165-07

附壁分离元件性能研究

胡大鹏*[1]， 刘利民[1]， 赵一鸣[1]， 张恒瑞[1]， 刘凤霞[1]， 穆思明[2]

（1.大连理工大学 化工学院，辽宁 大连 116024；
2.大连欧科膜技术工程有限公司，辽宁 大连 116041）

摘要： 提出了一种新的附壁分离元件，其具有操作气速范围广、结构紧凑、分离效率高等优点.通过数值模拟和实验，研究了分离弧内直径、入口气速和液滴粒径分布等因素对附壁分离元件性能的影响.研究结果表明：附壁分离元件在低入口气速时即具有较高的分离效率，入口气速大于1 m/s时附壁分离元件对于10 μm的液滴能够达到80%以上的分离效率，对于15 μm及以上的液滴可以100%分离；分离效率随着入口气速的增大而增大，但在一定的粒径分布条件下，存在一个临界入口气速，大于临界入口气速后分离效率反而下降.在入口气速、液滴粒径分布相同时，分离弧内直径越小，分离效率越高.附壁分离元件的压降随着气速的增大呈现二次方增大的关系.

关键词： 附壁分离元件；分离效率；压降；数值模拟
中图分类号： TQ051.1 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb202202008

0 引 言

气液分离器是一种在石油化工厂、热电厂和天然气开采与输送中使用十分广泛的设备，其主要作用是将主气流从夹带液滴和雾滴的气液两相混合物中分离出来，以提高设备运行的经济性与可靠性[1-2].气液分离的方法主要有重力沉降分离、过滤分离、惯性分离、离心分离等[3-5].

国内外研究者对于各种分离器进行了大量的实验与模拟研究.马嘉棋[6]研究了带疏水钩结构的双钩型波纹板气液分离器的分离效率.王文燕[7]提出加钝体波纹板除雾器，能够有效提高折流板分离效率.Ogawa[8]提出了角钢式碰撞分离器，其是由一定角度的角钢按照同一朝向多列组合而成.马艳杰[9]提出了多管旋流板式结构，有效减小了旋流板式分离器的压降.胡恒[10]提出一种含帽碰撞分离器，利用圆弧和槽钢组合而成，具有分离效率高、压降小、操作弹性大等优点.但上述几种气液分离器在气速较低时分离效率往往比较低，不适用于低气速的操作工况.

针对上述问题，本文提出一种附壁分离元件，其依靠射流附壁形成的柯恩达效应[11]，在分离弧内形成旋转流动，在入口气速较低时，对于粒径较小的液滴也有很高的分离效率.通过数值模拟的方法，研究入口气速对于质量分离效率与粒径分离效率的影响.通过实验的方法，测量不同入口气速条件下的分离效率与压降.

1 附壁分离元件分离原理与数值计算模型

1.1 附壁分离元件分离原理

附壁分离元件的分离原理如图1所示，其主要由槽和分离弧组成.气液两相混合物从下部进入分离元件，极小部分液滴能够由惯性力作用直接撞上槽的下表面从而被分离，绝大部分液滴继续跟随气流流动，气流通过槽与分离弧的射流口加速运动，形成射流的附壁效应，部分液滴由于附壁效应跟随气流贴在壁面形成旋转流动，产生一个很大的离心力，在附壁的过程中逐渐被分离弧

收稿日期： 2021-05-12； **修回日期：** 2021-12-08.
基金项目： 国家重点研发计划资助项目(2018YFA0704605).
作者简介： 胡大鹏*(1963-)，男，博士，教授，博士生导师，E-mail：hudp@dlut.edu.cn.

表面所分离，分离出的液滴能够通过重力作用排出分离元件. 离开分离弧时由于气流的速度是沿着分离弧内壁面切向方向，故在气流出分离弧时还能产生离心力，这个离心力能够再将一部分液滴甩到槽的上壁面，最后分离出液滴之后的气流离开分离元件，完成气液分离过程.

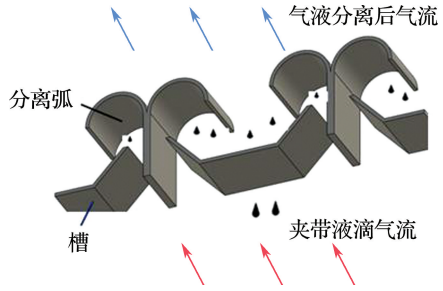


图 1 附壁分离元件分离原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of the wall-attached separation component

1.2 数值计算模型的建立

根据上述基于柯恩达效应的附壁分离元件分离原理，建立的二维数值计算模型如图 2 所示. 附壁式分离器的核心结构参数是射流口的宽度 B，B 的大小决定了能否产生附壁效应；E 为分离弧的内直径；A 为两分离弧之间的距离；α 为分离槽的角度.

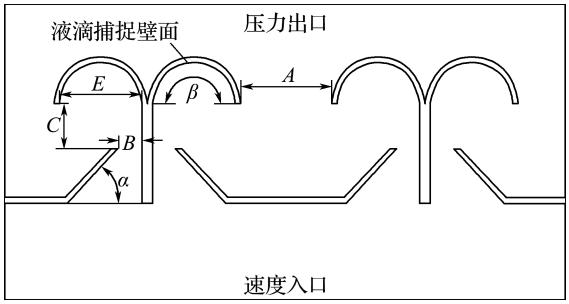


图 2 附壁分离元件计算模型

Fig. 2 Calculation model of the wall-attached separation component

1.3 模型假设与计算设定

由于计算资源的限制，将三维结构简化为二维结构，在可接受的误差范围内做出如下假设：(1)由于附壁分离元件内的最大气速远小于音速，气流在分离器内的流动为不可压缩的黏性流动；(2)液滴只要碰到壁面即为分离，到达出口处为逃逸；(3)由于气速低，可不考虑液滴间的碰撞融合、气流在流动过程中对液滴的剪切作用和气流对液膜的再分离作用.

连续相介质为空气，离散相介质为水，操作压力为 101 325 Pa，由于离散相的体积分数远小于 10%，离散相计算采用基于欧拉-拉格朗日方法的 DPM 模型. 在稳定工况下，处理量为定值，故采用 Fluent 软件进行稳态流场计算. 由于分离元件内存在强旋流作用，而 Realizable k-ε 模型对于强流线弯曲和旋转流动具有精确的预测结果，故湍流模型采用 Realizable k-ε 模型. 使用 Simple 算法，采用二阶迎风差分离散格式和压力基求解.

1.4 网格无关性验证

使用 Gambit 软件对网格进行划分，全局采用四边形网格，全局尺寸为 1 mm×1 mm，对于分离弧内表面和射流口进行局部加密处理. 为排除网格对于分离效率和压降的影响，进行网格无关性验证. 利用 Gambit 软件分别将全局网格控制为 0.80 mm×0.80 mm，1.00 mm×1.00 mm，1.25 mm×1.25 mm，1.50 mm×1.50 mm 和 2.00 mm×2.00 mm，全局网格尺寸越小，网格数越多. 如图 3 所示，当全局网格为 1.00 mm×1.00 mm时，网格数 N 为 119 218，再减小网格尺寸压降和分离效率变化很小，所以为了节省计算资源和保证数值模拟的准确性，全局采用 1.00 mm×1.00 mm 的网格.

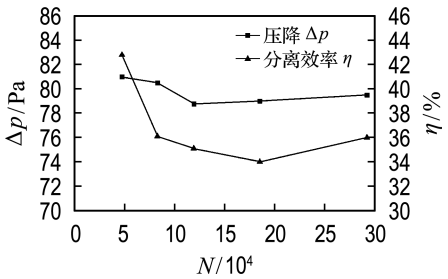


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

2 数值模拟结果分析

打入的液滴粒径分布为 Rosin-Rammler 分布，质量分数分布如图 4 所示，最小粒径为 1 μm，

最大粒径为 70 μm，其中分布系数 n 为 2.2，平均粒径$\bar{d}$为 30 μm. 液滴质量分数

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \tag{1}$$

式中：Y_d 为比指定粒径 d 大的液滴质量分数.

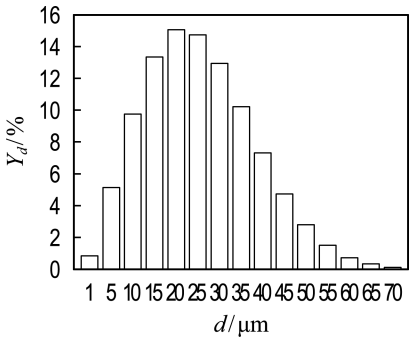


图 4　不同大小粒径质量分数

Fig. 4　Mass fraction of different sizes of particle

质量分离效率 η_1 计算公式如下：

$$\eta_1 = 1 - m_{out}/m_{in} \tag{2}$$

式中：m_{in} 与 m_{out} 分别为进出口质量流量.

粒径分离效率 η_2 计算公式如下：

$$\eta_2 = 1 - n_{out}/n_{in} \tag{3}$$

式中：n_{in} 与 n_{out} 分别为一定大小粒径液滴的入口数量与出口数量.

2.1　入口气速对分离性能的影响

为更加直观地显现附壁分离元件的分离性能，选用分离弧内直径 E=35 mm 的附壁分离元件进行数值模拟研究，设置的分离单元个数为 5. 在入口气速为 1 m/s 时，附壁分离元件速度流线图、速度云图和总压云图如图 5～7 所示.

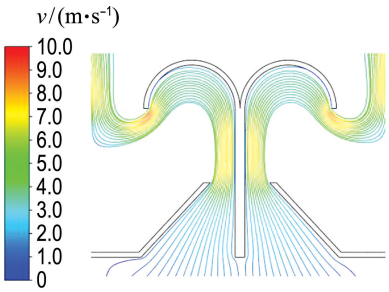


图 5　入口气速为 1 m/s 时附壁分离元件速度流线图

Fig. 5　The velocity streamline diagram of the wall-attached separation component at the inlet gas velocity of 1 m/s

从图 6 可以看出，气流经过渐缩的作用到达射流口，射流口气速大约为入口气速的 7 倍，气流在射流口形成射流附壁效应. 从图 5 可以看出流线能够紧紧贴在分离弧内壁面. 由图 7 总压云图可以看出，气流经过分离弧时，由于速度方向改变和两股高速气流碰撞，压力损失最大.

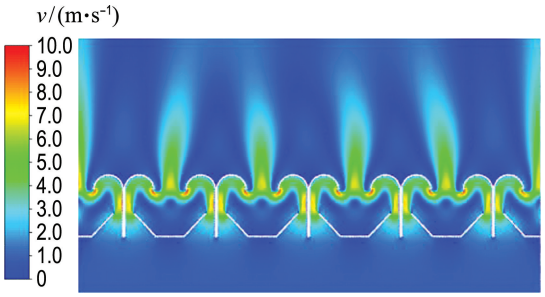


图 6　入口气速为 1 m/s 时附壁分离元件速度云图

Fig. 6　The velocity cloud diagram of the wall-attached separation component at the inlet gas velocity of 1 m/s

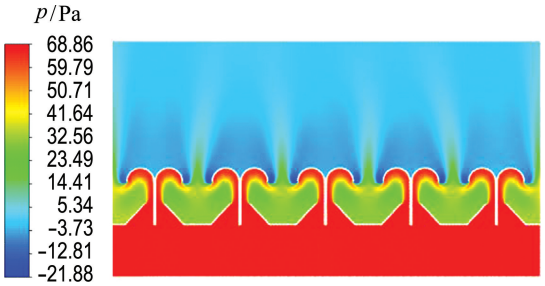


图 7　入口气速为 1 m/s 时附壁分离元件总压云图

Fig. 7　The total pressure cloud diagram of the wall-attached separation component at the inlet gas velocity of 1 m/s

图 8 为不同入口气速下粒径分离效率图，在气速为 0.5 m/s 时，附壁分离元件对于 20 μm 及以上的液滴能够 100% 分离，说明附壁分离元件即使在气速很低时也能保持较高的分离效率.

图 9 为入口气速为 1 m/s 时含帽碰撞分离器与附壁分离元件的粒径分离效率对比，附壁分离元件对于 10 μm 液滴粒径分离效率达到 80% 以上，而含帽碰撞分离器[10]对于 10 μm 液滴粒径分离效率在 5% 以下. 这说明附壁分离元件在低气速

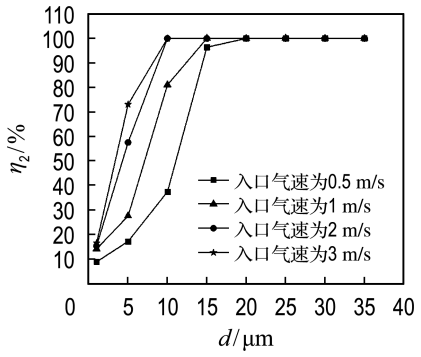


图 8 不同入口气速下粒径分离效率

Fig. 8 Particle size separation efficiency at different inlet gas velocities

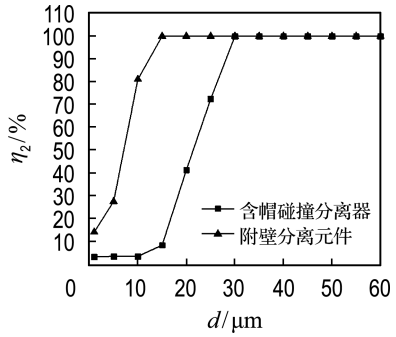


图 9 入口气速为 1 m/s 时附壁分离元件与含帽碰撞分离器粒径分离效率比较

Fig. 9 Comparison of the particle size separation efficiency of the wall-attached separation component and the collision separator with cap at inlet gas velocity of 1 m/s

下就能够满足绝大多数气液分离场合的使用需求.

在不同的入口气速条件下,得到的质量分离效率和压降如图 10 所示. 附壁分离元件压降曲线随着入口气速的增大而增大,并且呈现二次方的变化关系.

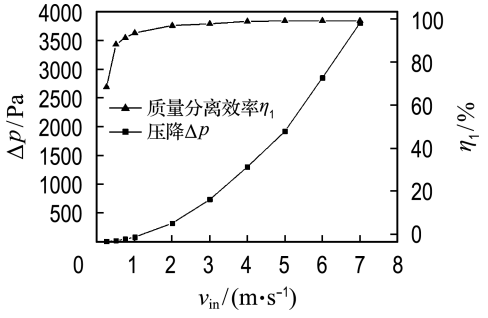


图 10 附壁分离元件压降与质量分离效率

Fig. 10 Pressure drop and mass separation efficiency of the wall-attached separation component

质量分离效率随着入口气速的增大而增大,在入口气速达到 2 m/s 时,质量分离效率达到 97.1%,压降为 315 Pa;再增大气速质量分离效率几乎不再增大,这是由于在气速达到 2 m/s 时,如图 8 所示,附壁分离元件已经将粒径为 10 μm 及以上的液滴 100%分离,由于粒径小的液滴的随流性更强,再增大气速也不能将其完全分离出气流.

2.2 分离弧内直径对性能的影响

给定两种分离弧内直径 E 分别为 35 mm 和 45 mm,其余尺寸与 E 等比例变化,考察分离弧内直径对分离效率和压降的影响.

压降随入口气速变化曲线如图 11 所示,其随着入口气速的增大而呈现二次方增大的变化关系,在相同的入口气速下,E=45 mm 分离元件的压降略大于 E=35 mm 分离元件的.

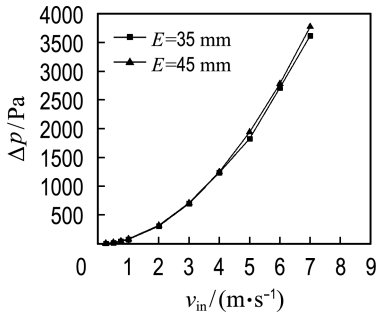
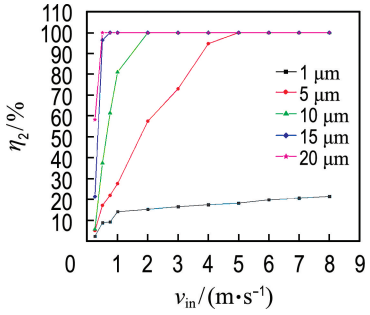


图 11 两种 E 下压降随入口气速变化

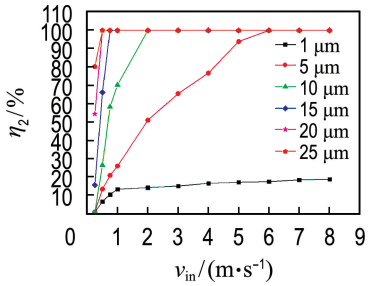
Fig. 11 Pressure drop of two E varing with the inlet gas velocity

E 对粒径分离效率的影响如图 12 所示. 在入口气速相同时,对于所有大小的粒径,E=35 mm 的分离效率明显大于 E=45 mm 的分离效率,说明 E 越小对于粒径较小的液滴的分离性能越好;速度增大对于 1 μm 大小的液滴影响不大,这是因为小液滴的随流性更强,不容易被分离.

对比两种 E 的分离效率结果,E 越小,产生的离心力越大,分离效率越高,与旋风分离器[12]的放大效应类似,尺寸越大,分离效率越低.



(a) E=35 mm



(b) E=45 mm

图 12　两种 E 下粒径分离效率随入口气速变化

Fig. 12　Particle size separation efficiency changes of two E with the inlet gas velocity

3　实验平台与实验结果分析

3.1　实验平台介绍

图 13 与图 14 分别为附壁分离元件实验平台和实验系统简图. 实验平台主要由离心风机、扩流段、稳流段、分离段、分离段积液槽、分流板、雾化喷嘴、水泵、压缩机、压力表、电子秤以及流量计等组成. 实验气流由离心风机提供，气速通过变频器调节风机的转速来调节，并且通过热线风速仪测量. 雾化系统采用的压力式二流体雾化喷嘴，可通过调节气压和液压大小调节雾化颗粒的粒径，在

图 13　附壁分离元件实验平台

Fig. 13　Experimental platform for the wall-attached separation component

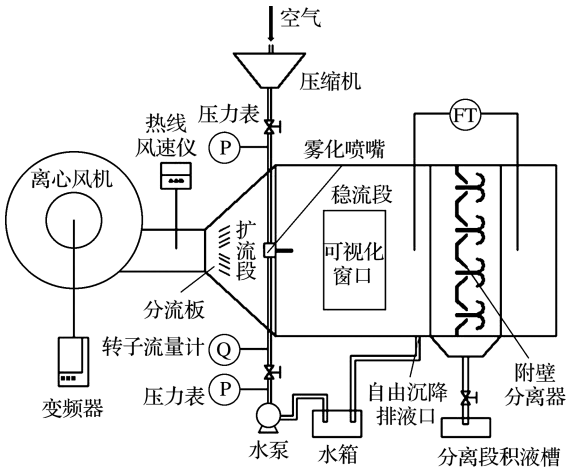


图 14　实验系统简图

Fig. 14　Experimental system simplified diagram

气压 0.4 MPa，水压 0.35 MPa 时，雾化颗粒粒径在 1～20 μm，质量平均粒径为 10 μm. 附壁式分离元件的压降性能通过压力表测量；分离性能通过称重法测量，分离效率计算公式如下：

$$\eta=\frac{m_3}{m_1-m_2} \tag{4}$$

式中：m_1 为入口水槽减少质量，m_2 为稳流段收集到的回流液质量，m_3 为分离段积液槽收集到的分离液质量.

3.2　入口气速对压降的影响

压降与入口气速的关系曲线如图 15 所示，两种尺寸分离元件的压降与入口气速的关系近似于二次方关系. 压降实验值均比模拟值略小，主要原因为模拟的二维流动与实际流动存在差异，压力表的精度有限，但模拟值与实验值的误差在 10% 以内，属于可接受范围，这验证了模拟的准确性.

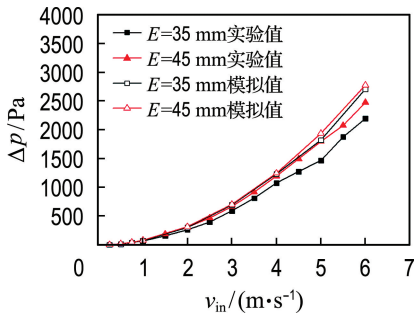


图 15　压降与入口气速关系

Fig. 15　Relationship between the pressure drop and the inlet gas velocity

3.3 入口气速对分离效率的影响

称重法测得的分离效率如图16所示，分离效率先随着入口气速的增大而增大，这是因为液滴的惯性力和离心力随着入口气速的增大而增大. 当入口气速为2.5 m/s左右时，再增大气速，分离效率会略有下降. 这是因为在入口气速达到临界气速时，射流口气速为入口气速的7倍，气流对液滴的破碎作用和液膜的剪切作用增大，将已经被分离的液滴再次夹带，导致分离效率在临界气速之后反而呈现下降趋势. 但是由于夹带的液滴均为大液滴，可以通过简单的方法将其再次分离回收，仍然能保证附壁分离元件优越的分离性能. 由于实验采用的雾化颗粒平均粒径小于模拟所给的，故实验测量得到的实际分离效率小于模拟得到的分离效率. 附壁分离元件在气速相同时，$E=35$ mm时分离效率高于$E=45$ mm时的分离效率，这验证了模拟的准确性.

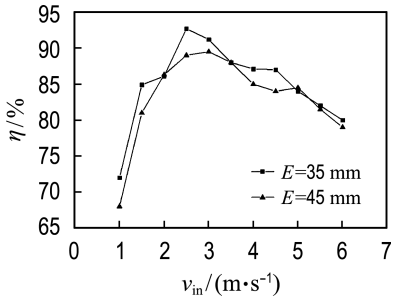


图16 分离效率与入口气速关系

Fig. 16 Separation efficiency varing with the inlet gas velocity

4 结 论

(1)数值模拟结果表明，附壁分离元件在入口气速高于1 m/s之后，对于10 μm的液滴能够达到80%的分离效率，对于15 μm及以上的液滴可以100%分离，说明在低气速下附壁分离元件具有十分优越的分离性能，对于小液滴的粒径分离效率极高.

(2)在给定的入口液滴粒径分布以及气相介质为空气的条件下，模拟得到附壁分离元件到达极限分离效率时的入口气速为2 m/s，此时模拟的质量分离效率达到97.1%，压降为315 Pa.

(3)在实验研究中，随着入口气速增大，压降随之呈现近似二次方关系增大，但分离效率随着入口气速先增大后略有减小，在临界气速2.5 m/s时分离效率最高.

(4)对于附壁分离元件，分离弧内直径越小，产生的离心力越大，分离效率越高.

参考文献：

[1] 胡燕林，胡子煊，胡礼萍. 天然气集输系统中液相危害及解决方案分析[J]. 中国石油和化工标准与质量，2013，**33**(20)：106-108.
HU Yanlin，HU Zixuan，HU Liping. Analysis of liquid phase hazards and solutions in natural gas gathering and transportation system [J]. **China Petroleum and Chemical Standard and Quality**，2013，**33**(20)：106-108. (in Chinese)

[2] 任相军，王振波，金有海. 气液分离技术设备进展[J]. 过滤与分离，2008(3)：43-47.
REN Xiangjun，WANG Zhenbo，JIN Youhai. Progressing of gas-liquid separation technology and equipment [J]. **Journal of Filtration and Separation**，2008(3)：43-47. (in Chinese)

[3] 吉 雷，王 兴，李正贵，等. 天然气新型气液分离器性能试验研究[J]. 热能动力工程，2020，**35**(3)：116-121.
JI Lei，WANG Xing，LI Zhenggui，*et al*. Experimental study on the performance of new gas-liquid separator of natural gas [J]. **Journal of Engineering for Thermal Energy and Power**，2020，**35**(3)：116-121. (in Chinese)

[4] MIL′SHTEIN L M. Comprehensive evaluation and selection of separators for the oil and gas industry [J]. **Chemical and Petroleum Engineering**，2014，**49**(11)：727-735.

[5] LALEH A P，SVRCEK W Y，MONNERY W D. Design and CFD studies of multiphase separators-A review [J]. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**，2012，**90**(6)：1547-1561.

[6] 马嘉棋. 波纹板分离器疏水钩结构的模拟和实验研究[D]. 北京：中国石油大学(北京)，2019.
MA Jiaqi. CFD and experimental study on structure optimization of hooks in corrugated plates gas-liquid separators [D]. Beijing：China University of Petroleum (Beijing)，2019. (in Chinese)

[7] 王文燕. 提高折流板除雾器对细雾滴脱除性能研究[D]. 南京：东南大学，2018.

WANG Wenyan. Study on improving mist removal efficiency of baffle mist eliminator for fine droplets [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)

[8] OGAWA A. **Separation of Particles from Air and Gases** [M]. Boca Raton: CRC Press, 1984.

[9] 马艳杰. 多管旋流板式分离器的结构开发及性能试验研究 [J]. 新技术新工艺, 2013(9): 45-47.
MA Yanjie. Structural development and performance study of multi-tube cyclone plate separator [J]. **New Technology and New Process**, 2013(9): 45-47. (in Chinese)

[10] 胡　恒. 含帽型分离器筛板式高速塔水力学性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
HU Heng. Study on hydrodynamics characteristics of sieve plate high-velocity column with cap-type separator [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)

[11] TRANCOSSI M. An overview of scientific and technical literature on Coanda effect applied to nozzles [C]// **SAE 2011 AeroTech Congress and Exhibition, AEROTECH 2011**. Toulouse: SAE International, 2011.

[12] 邵明望. 旋风分离器放大效应的分析 [J]. 通风除尘, 1996(4): 32-33.
SHAO Mingwang. Analysis of the amplification effect of the cyclone separator [J]. **Ventilation and Dust Control**, 1996(4): 32-33. (in Chinese)

Study of performance of wall-attached separation component

HU Dapeng*[1], LIU Limin[1], ZHAO Yiming[1],
ZHANG Hengrui[1], LIU Fengxia[1], MU Siming[2]

(1. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Dalian Eurofilm Industrial Ltd. Co., Dalian 116041, China)

Abstract: A new wall-attached separation component, which has the advantages of wide operating gas velocity range, compact structure and high separation efficiency is proposed. Through the methods of numerical simulation and experiment, the influence of factors such as the size of the inner diameter of the separation arc, the inlet gas velocity and the droplet particle size distribution on the performance of the wall-attached separation component is studied. The research results show that: the wall-attached separation component has high separation efficiency at low inlet gas velocity, when the inlet gas velocity is larger than 1 m/s, the wall-attached separation component can separate above 80% of droplets of 10 μm, and 100% of the droplets of 15 μm and above. The separation efficiency increases with the increase of the inlet gas velocity, but there is a critical inlet gas velocity under some particle size distribution, the separation efficiency decreases when the inlet gas velocity is larger than the critical inlet gas velocity. The smaller the inner diameter of the separation arc, the higher the separation efficiency under the same inlet gas velocity and particle size distribution of droplets. The pressure drop of the wall-attached separation component shows a quadratic increase with the increase of the inlet gas velocity.

Key words: wall-attached separation component; separation efficiency; pressure drop; numerical simulation