

Experimental study of effect of coalescence layer arrangement on filtration performance of filter for high-pressure natural gas purification

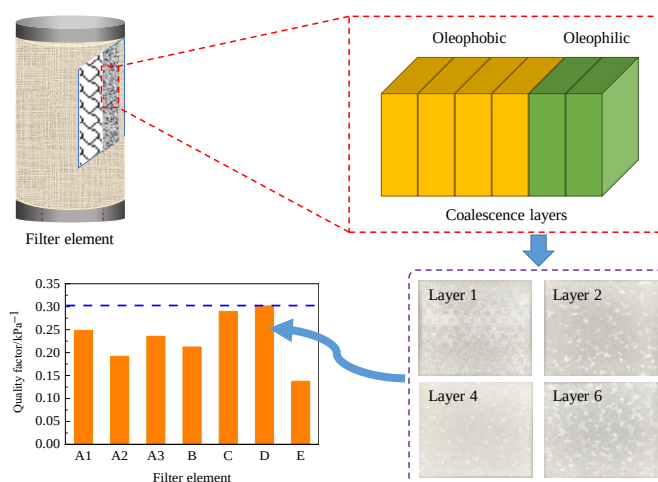
Jun HE¹, Xiaofeng ZHONG¹, Feng CHEN^{2,3*}, Zhuangzhuang HUANG^{2,3}, Jiachang LIU¹,
Yaohan WU¹, Zhongli JI^{2,3}

1. Sichuan to East Natural Gas Transmission Pipeline, National Pipe Network Group, Wuhan, Hubei 430000, China

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

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

Abstract: In the field of high-pressure natural gas purification, it is a challenging problem to improve the performance of coalescence filter element. In this work, the filtration performance of filter elements with the same coalescence filter materials and combination of different coalescence filter materials were studied, and the effects of the arrangement of coalescence layers on the filtration efficiency, pressure drop, saturation and liquid distribution were analyzed by using the experimental device for the filtration performance of coalescence filter element. The results showed that the filtration efficiency of the filter element



composed of the same filter materials increased with the decreasing pore size of filter material, but due to the higher pressure drop, the overall filtration performance was the worst for the minimum pore size case. The coalescence layer arrangement of oleophobic layer in front and oleophilic layer in back could improve the filtration efficiency of the filter element and reduce the secondary entrainment of droplets. The filtration efficiency of the filter element staggered with two layers of the same filter material was significantly higher than that of the single-layer filter material, and the pressure drop was relatively low, which greatly improved the overall filtration performance. Further increase of the number of oleophobic layers on the inlet side delayed the increase of pressure drop and improved the operation life, and the steady-state quality factor of the filter element reached the maximum value (0.30 kPa⁻¹). The influence of coalescence layer arrangement on the filtration performance of filter element was mainly realized by changing the liquid distribution form, and the channel structure change of last filter layer was the main reason for the filtration performance difference of filter elements with various coalescence layer arrangements.

Key words: coalescence; efficiency; pressure drop; saturation; gas-liquid filtration

收稿: 2021-11-06, 修回: 2021-12-07, 网络发表: 2021-12-29; Received: 2021-11-06, Revised: 2021-12-07, Published online: 2021-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 22008259); 中国博士后科学基金资助项目(编号: 2019M660930); 中国石油大学(北京)科研基金资助(编号: 2462019YJRC010; 2462020YXZZ043); 国家管网集团川气东送天然气管道有限公司科研项目(编号: 35150573-20-ZC0607-0008)

作者简介: 何军(1972-), 男, 四川省遂宁市人, 本科, 中级工程师, 油气加工专业, E-mail: gcjs909@126.com; 陈锋, 通讯联系人, E-mail: chenfeng@cup.edu.cn.

引用格式: 何军, 钟晓峰, 陈锋, 等. 聚结层排布对高压天然气净化用滤芯过滤性能影响的实验研究. 过程工程学报, 2022, 22(2): 276-284.

He J, Zhong X F, Chen F, et al. Experimental study of effect of coalescence layer arrangement on filtration performance of filter for high-pressure natural gas purification (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2022, 22(2): 276-284, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.221353.

聚结层排布对高压天然气净化用滤芯过滤性能影响的实验研究

何军¹, 钟晓峰¹, 陈锋^{2,3*}, 黄壮壮^{2,3}, 刘家畅¹, 吴瑶晗¹, 姬忠礼^{2,3}

1. 国家管网集团川气东送天然气管道有限公司, 湖北 武汉 430000

2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

3. 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: 本工作利用聚结滤芯过滤性能实验装置, 通过改变滤芯内部的滤材排布, 研究了聚结层为单一滤材以及由不同滤材排布组合的滤芯过滤性能, 分析了聚结层排布方式对过滤效率、压降、饱和度及液体分布的影响。结果表明, 由单一滤材组成的滤芯过滤效率随滤材孔径减小而增大, 但孔径最小时由于压降较高, 导致滤芯综合过滤性能反而最差。疏油在前、亲油在后的聚结层排布方式可提高滤芯过滤效率、减少液滴二次夹带, 且以两层相同滤材交错排列的滤芯过滤效率比单层滤材交错排列明显更高, 压降也相对较低, 使得综合过滤性能显著提升。继续增加进气侧的疏油滤材层数可延缓压降增长、提高运行寿命, 滤芯稳态品质因子达到最大值(0.30 kPa⁻¹)。聚结层排布方式对滤芯过滤性能的影响主要通过改变液体分布形式而实现, 且末层滤材的通道结构变化是导致不同聚结层排布方式的滤芯过滤性能出现差异的主要原因。

关键词: 聚结; 效率; 压降; 饱和度; 气液过滤

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2022)02-0276-09

1 前言

在高压天然气长距离输送过程中, 气体内经常夹带大量液滴杂质, 不仅损害管道设备和阀门仪表, 而且严重影响离心压缩机及燃气轮机的安全运行^[1,2]。为了去除这些液滴, 长输管线的压气站及分输站内一般安装旋风分离器、卧式过滤分离器和立式聚结过滤器, 三者组合可实现对天然气的净化处理^[3-5]。其中, 聚结过滤器的精度要求最高; 根据石油与天然气领域过滤分离设备的相关行业标准, 气液聚结过滤器要求对0.3 μm以上液滴的过滤效率不低于99.8%^[6]。然而, 现有聚结过滤器多数未能达标, 且存在过滤效果差、使用寿命短和运行成本高等问题。

聚结过滤器的核心部件是聚结滤芯, 滤芯主要包含聚结层和排液层滤材, 前者用于捕集微小液滴并聚结形成大液滴、后者用于将聚结后的液滴排出^[7,8]。聚结层滤材通常由多层玻璃纤维材料构成^[9], 其物性参数及排布方式直接决定过滤器的整体性能水平。

国内外学者在滤材物性参数影响及聚结过滤机理方面已开展大量研究。Hajra等^[10]基于静电纺丝纳米纤维制备方法, 发现将玻璃纤维与纳米纤维进行混纺可提高聚结滤材的综合过滤性能。Kampa等^[11,12]研究了液体在亲、疏油滤材中的运移和沉降方式, 提出了“跳跃-通道”半定量模型, 在此基础上分析了聚结层滤材透气性对过滤性能的影响。Chen等^[13]对比了不同层数及孔径

的亲、疏油滤材稳态过滤性能, 发现适当孔径的滤材具有最佳的综合过滤性能。Wurster等^[14-16]建立了一套可测量宽粒径范围(0.01~2400 μm)的液滴探测系统, 分析了下游液滴夹带率及粒径谱图, 提出了与气泡破裂相关的液滴夹带发生机理, 并获得了夹带率与气泡形成率的数学关系。然而, 包括以上研究在内, 目前多数研究主要针对由相同材料堆叠得到的多层滤材, 未考虑不同滤材排布组合时的过滤性能变化情况。虽然少部分学者选用两种不同材料进行组合, 但仅限于亲油滤材在前还是在后更为合适的对比研究。例如, Agranovski等^[17]将单层亲、疏油滤材进行前后组合, 发现亲油滤材可用于高效捕集小液滴, 而疏油滤材由于对液滴具有排斥作用, 可将液滴从其进气侧聚集排出。Mullins等^[18]对比了由两层亲油与两层疏油滤材组成的复合滤材过滤性能, 发现疏油滤材在前可提高稳态综合性能。需注意的是, 目前绝大多数研究均以片状滤材为实验介质, 对工程实际使用的整根圆柱形滤芯缺乏关注, 而由于流体流动方式的改变, 实际滤芯性能与滤材性能必然存在一定差异。

因此, 本工作利用一套聚结滤芯过滤性能实验装置, 分析聚结层滤材排布方式对滤芯过滤效率、压降、饱和度及液体分布的影响, 探究聚结滤芯内部液滴捕获机理, 以期设计、开发新型高效聚结过滤器提供理论指导与数据支撑。

2 实验

2.1 实验材料

实验滤芯均为圆柱形,内径 104 mm,有效过滤长度 348 mm;滤芯内侧由 6 层玻璃纤维材料缠绕而成,外侧添加 1 层针刺毡排液层。根据玻璃纤维材料的排布方式,共分成 5 种类型,分别记为滤芯 A, B, C, D, E,具体排布方式见表 1。所有滤芯结构和排布方式均为天然气长输管道站场常用的结构和排布方式。其中,作为对比组,滤芯 A 由 6 层相同的玻璃纤维材料构成,但根据材料类型不同,分别记为 A1, A2, A3。所用滤材 GF1 和 GF3 均为疏油玻璃纤维材料,滤材 GF2 为亲油玻璃纤维材料,所有滤材的物性参数见表 2。

实验液体采用目前国际测试标准规定的癸二酸二辛酯(DEHS),在温度为 25℃ 时,密度为 912 kg/m³,动力黏度为 0.023 Pa·s。

2.2 实验装置

根据中国、美国及欧洲相关测试标准^[19-21],建立了聚结滤芯过滤性能实验装置,如图 1 所示。该装置可对

表 1 实验滤芯排布方式

Table 1 Arrangements of experimental filter elements		
Filter	Coalescence layer (inlet-outlet)	Drainage layer
A1	6-layer GF1	
A2	6-layer GF2	
A3	6-layer GF3	
B	2-layer GF2 & 4-layer GF1	Needle felt
C	2-layer GF1 & 2-layer GF2 & 2-layer GF1	
D	4-layer GF1 & 2-layer GF2	
E	1-layer GF1 & 1-layer GF2 staggered	

表 2 用于制备滤芯的玻璃纤维滤材物性参数

Table 2 Physical parameters of glass fiber filter materials for the preparation of filter elements					
Filter material	Thickness/mm	Gram weight/(g/m ²)	Filling degree	DEHS contact angle/°	Mean pore size/μm
GF1	0.42	78.8	0.085	110	8.4
GF2	0.42	76.0	0.081	86	3.3
GF3	0.56	86.1	0.065	105	12.2

滤芯的气液过滤性能进行测试评价。在测试过程中,系统温度维持在 24~26℃,相对湿度维持在 50%~56%。

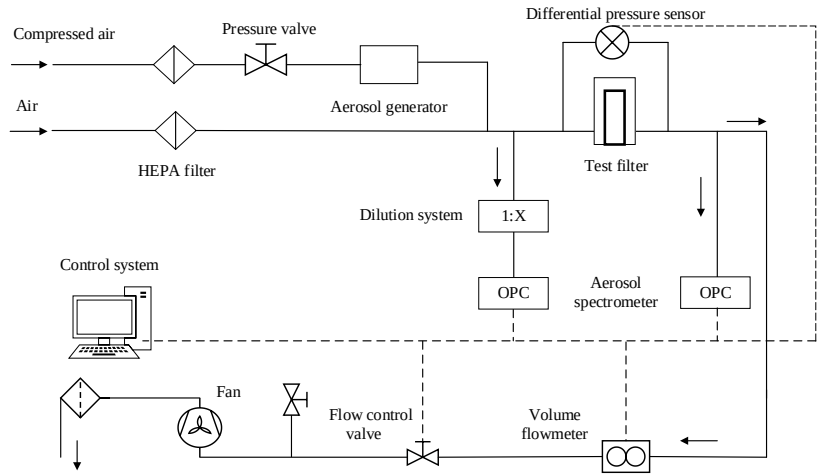


图 1 聚结滤芯过滤性能实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of filtration performance experimental setup for coalescence filter element

将滤芯垂直安装于不锈钢筒体内部,其底部采用弹性垫片与支座进行密封。保证装置气密性无误后,将净化后的压缩空气通入气溶胶发生器(核心部件为Laskin喷嘴),产生雾化液滴后与洁净空气进行混合,形成多分散液体气溶胶,然后从滤芯底部进入。气流由内向外经过滤芯后,其夹带的微小液滴被滤芯拦截捕获,并在重力和气流曳力作用下由小液滴逐渐聚结成大液滴,最终汇集到滤芯外侧、从装置底部排出。过滤后的气体由风机抽出,采用变频器(Micro-master 430,德国西门子公

司)控制整个实验管路的流量,由流量计(BF-LZD,上海倍福自动化科技有限公司)进行显示。滤芯上、下游管路中设有环形取压口和等动采样口,在整个实验过程中,利用差压变送器(3051D,美国Rosemount公司)实时测量并记录滤芯两端的压降,采用光学颗粒粒径谱仪(Welas 3000,德国PALAS公司)测量滤芯上、下游气流中的液滴浓度与粒径分布,采样流量为 5 L/min。在所有滤芯的实验过程中,主管路流量均保持相对稳定。

2.3 分析方法

当滤芯两端的压降变化幅度在1 h内不超过1%时,认为过滤达到稳态阶段,此时停止实验并记录数据。实验结束后,对每根滤芯进行拆解,将每层滤材裁成80 mm×80 mm的方形片,通过高分辨率相机进行拍照记录,获得液体在滤材表面的分布情况。同时,利用电子天平(AL204-IC,瑞士Mettler Toledo公司)对各层滤材称重,并与相同几何尺寸的洁净滤材对比,得到净增重后计算滤材饱和度(S):

$$S = \frac{m_{\text{oil}}}{m_{\text{oil,max}}} = \frac{m_{\text{filter}} - m_{\text{filter,0}}}{V\rho_{\text{oil}}(1-\alpha)} \quad (1)$$

式中, m_{oil} 为滤材内部油液质量, $m_{\text{oil,max}}$ 为滤材内部能够容纳的最大油液质量, m_{filter} 和 $m_{\text{filter,0}}$ 分别为滤材稳态质量和洁净质量, ρ_{oil} 为油液密度, V 和 α 分别为滤材体积和填充密度。

滤芯过滤性能主要包括压降(Δp)和效率(η),但压降一般随着效率升高而增大,因此引入品质因子(Q_F)评价综合过滤性能^[18]。 η 和 Q_F 计算公式分别如下:

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

$$Q_F = \frac{-\ln(C_{\text{out}}/C_{\text{in}})}{\Delta p} \quad (3)$$

式中, C_{out} 和 C_{in} 分别为下、上游气流中的液滴计数浓度。

3 结果与讨论

3.1 聚结层排布对滤芯过滤效率的影响

在实际工程应用现场,滤芯上游气流大多具有压力大、液滴浓度大及粒径小等特征。高压下气体密度增大,液滴扩散作用减弱,导致微纳米级液滴过滤效率显著下降。因此,为模拟现场工况,控制较高的表观气速(0.3 m/s)进行实验,且选用较小孔径的气溶胶发生器喷嘴,通过双喷嘴方式可产生高浓度小液滴。图2为滤芯A1、A2和A3达到稳态时的上、下游液滴粒径分布情况。可见,中位粒径为0.3 μm 左右,达到微纳米级标准,符合实验预期条件。所有滤芯的下游大液滴占比均比相应的上游高,说明小液滴被捕集的比例更大。此外,滤芯A1和A2的下游液滴粒径分布较为接近,但滤芯A3在0.7 μm 处出现粒径峰值,与其内部滤材孔径明显更大有关。

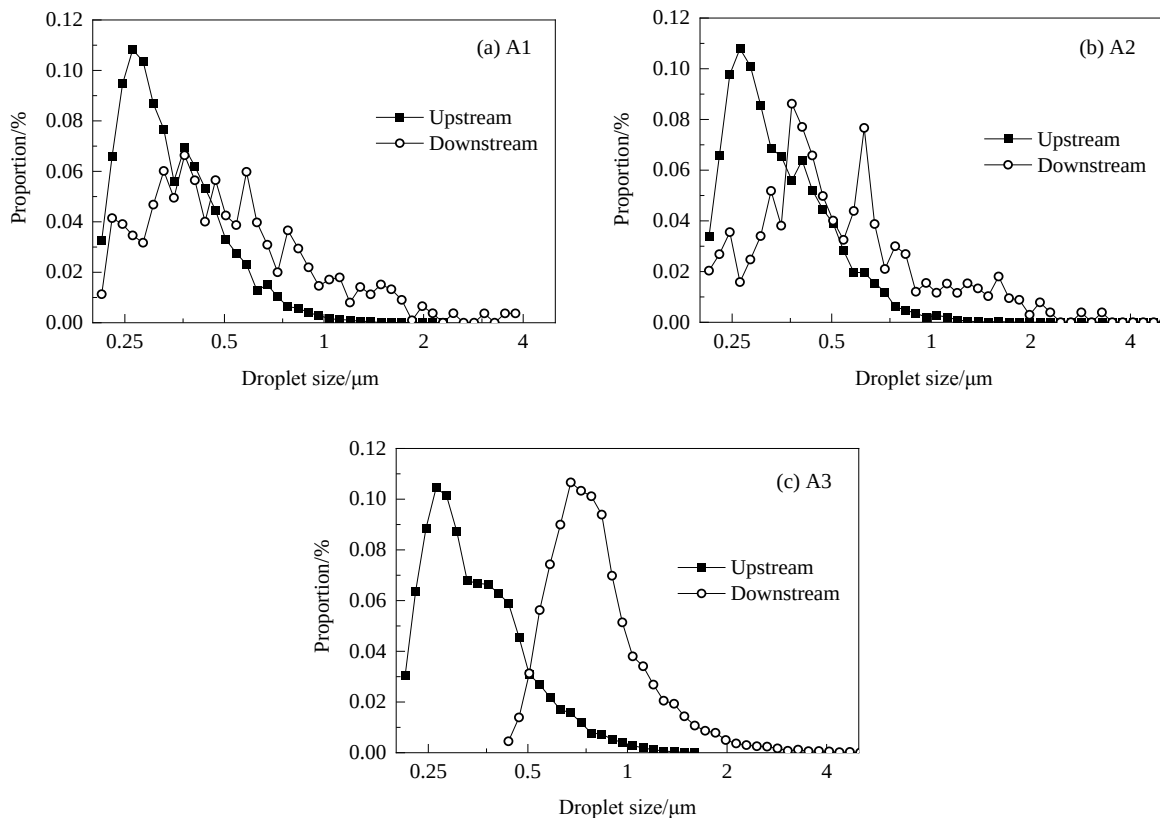


图2 滤芯A1、A2和A3的上下游液滴粒径分布

Fig.2 Upstream and downstream droplet size distributions of filter element A1, A2 and A3

为分析上述滤芯对不同粒径液滴的稳态过滤效率,图3示出了三种滤芯的分级效率曲线。可见,滤芯过滤效率随着滤材孔径增大而降低;滤芯A2的效率最高,其对任一粒径的液滴效率均达到了98.9%以上,且随粒径增大,过滤效率逐渐升高,在 $0.5\ \mu\text{m}$ 处达到99.8%后基本保持稳定。滤芯A1的效率变化趋势与A2相似,最低效率为95.1%,在 $0.3\ \mu\text{m}$ 处达到95.8%后基本保持稳定。滤芯A3的效率最低,在 $1.6\ \mu\text{m}$ 附近发生突降,这是由于滤芯下游出现了大液滴的二次夹带现象。因此,为保证实验结果的可比性,后续有关聚结层排布方式的影响分析,均采用与滤芯A1和A2相同的滤材进行聚结层排布及滤芯制备,具体见表1。

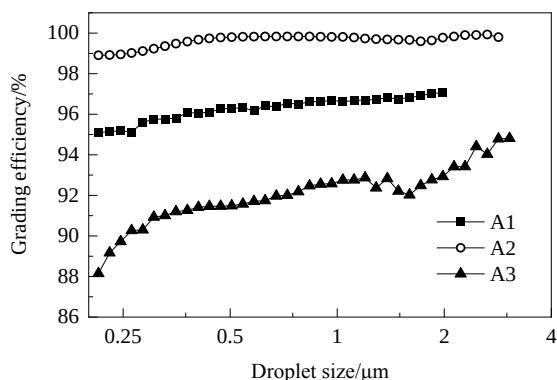


图3 滤芯A1, A2和A3的分级效率

Fig.3 Grading efficiencies of filter element A1, A2 and A3

图4为四种不同聚结层排布方式的滤芯分级效率曲线。可见,滤芯效率的大小排序为 $D > C > B > E$,即前两层为疏油滤材GF1的滤芯具有更高的效率。同时,对比滤芯B和D可发现,疏油滤材在前可提高滤芯的效率,且能够防止液滴二次夹带现象的发生,这是因为滤芯B在 $1.5 \sim 3\ \mu\text{m}$ 范围内出现了明显的效率下降现象。对比滤芯C和E可发现,以两层相同滤材交错排列的滤芯比单层滤材交错排列具有明显更高的效率,这是因为两层滤材有助于形成较稳定的液体运移通道^[2],可避免被捕液滴出现聚结后再破碎、分散的现象。进一步地,对比滤芯C和D可发现,交错排列的各部分滤材层数越多,滤芯效率越高。因此,在聚结滤芯的设计及选型过程中,若以过滤效率为第一关注点,则应采用滤芯D的聚结层排布方式。

3.2 聚结层排布对滤芯压降的影响

图5为滤芯A1, A2和A3的过程压降变化曲线。可见,滤芯A2由于内部滤材孔径较小,压降上升阶段的曲线斜率明显更大,当达到稳态后基本维持在 $24\ \text{kPa}$ 左右。对于滤芯A1和A3,由于疏油特性,压降变化趋势

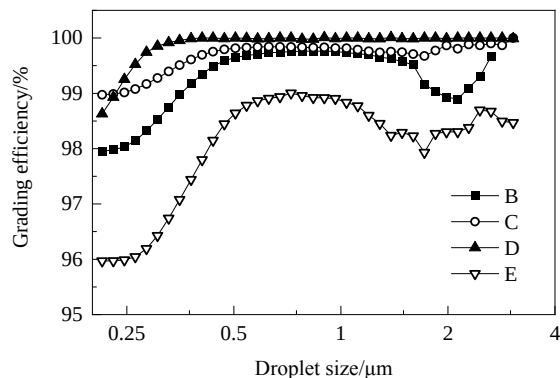


图4 滤芯B, C, D和E的分级效率

Fig.4 Grading efficiencies of filter element B, C, D and E

基本相同,大致可分为四个阶段。第一阶段(0~60 min):压降缓慢上升,此时液滴进入首层滤材,在其内部初步形成运移通道,但由于材料自身特性,液滴到达首层表面速度大于通道形成速度,导致液滴在首层表面开始累积。第二阶段(60~120 min):压降出现快速上升,此时首层滤材进气侧形成一层相对稳定的液膜,导致气流运动严重受阻。第三阶段(120~240 min):压降平缓上升,此时首层滤材进气侧液膜已达饱和,继续捕集的液体与往下游各层运移的液体基本平衡,即下游各层逐渐形成稳定的液体运移通道;需要注意的是,该阶段结束点难以准确区分。第四阶段(240~420 min):压降基本稳定,滤材背面液体已累积到其自身重力大于与纤维间的黏附力,出现较稳定的排液现象,此时进入与排出滤芯的液体含量基本保持动态平衡。

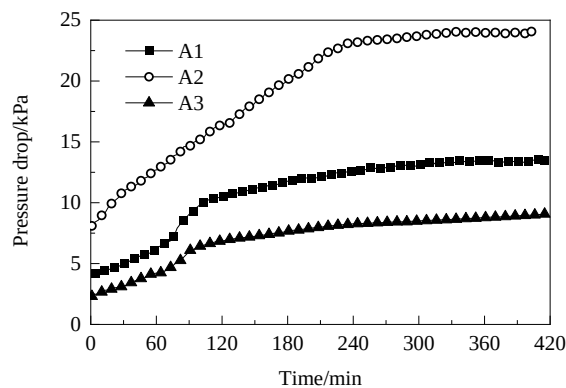


图5 滤芯A1, A2和A3的过程压降

Fig.5 Process pressure drops of filter element A1, A2 and A3

图6为不同聚结层排布方式的四种滤芯过程压降变化曲线。可见,当达到稳态时,滤芯B, C和D的压降基本相等,明显低于滤芯E。由此表明,以单层滤材交错排列的聚结滤芯不仅效率较低,而且压降较高,即综合过

滤性能最差。同样地,对比滤芯B和D可发现,两者初始压降相近,但前者在130 min左右压降达到相对稳定,而后的压降上升速率较低,在220 min左右才达到相对稳定,表明疏油滤材置于进气侧的滤芯D比置于出气侧的滤芯B具有更高的运行寿命。对比滤芯C和E可发现,双层交错排列的滤芯比单层交错排列具有更低的稳态压降,但两者压降达到稳定前的变化曲线基本重合。此外,对比滤芯C和D可发现,进气侧疏油滤材层数较多时有助于延缓压降增长、提高滤芯运行寿命。

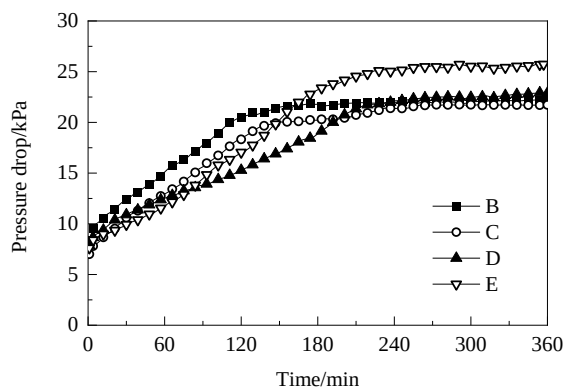


图6 滤芯B, C, D和E的过程压降

Fig.6 Process pressure drops of filter element B, C, D and E

为进一步对比不同聚结层排布方式的滤芯综合过滤性能,将稳态压降与过滤效率代入式(3),得到稳态品质因子对比结果,如图7所示。可见,对于由单一滤材组成的滤芯A,当滤材孔径最小(滤芯A2)时,其品质因子最低。而且,最高品质因子出现在具有中等孔径滤材的滤芯A1,与作者前期对片状滤材的研究结论^[13]一致。对于由不同类型滤材排布组成的滤芯B, C, D和E,可以看出,品质因子排序为D>C>B>E;显然,该排序与图4所示的过滤效率排序完全一致,表明滤芯内部各聚结层的排布方式对于过滤效率的影响相比对于压降的影响更大。此外,从图7还可发现,滤芯D在七种滤芯中具有最高的品质因子(0.30 kPa^{-1}),滤芯C次之(0.29 kPa^{-1}),说明通过调整聚结层排布方式有助于提升滤芯的综合过滤性能,且性能明显优于由单一聚结层滤材组成的滤芯。

3.3 聚结层排布对滤材饱和度及液体分布的影响

图8为滤芯A1, A2和A3的聚结层滤材稳态液体分布情况,分别选取第1, 2, 4, 6层滤材。其中,明亮的部分为润湿区域(或通道区域),灰暗的部分为未润湿区域(或非通道区域)。可见,对于聚结层孔径较大的滤芯A3,各层滤材表面的液体分布比较模糊,通道轮廓不明显。对于滤芯A1和A2,每一相同层数处的滤材表面液体分布情况极为相似,表现为首层滤材的液体通道数量最多、

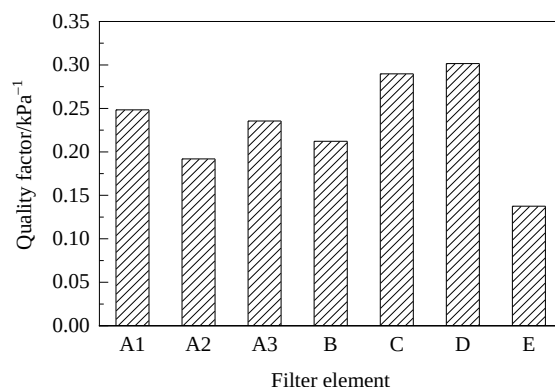


图7 不同滤芯的品质因子

Fig.7 Quality factors of different filter elements

润湿面积最大,随后通道数量逐渐减少且润湿面积缩小,但末层又呈现出相比中间层明显更多的液体通道数目及润湿面积。

为进一步对比各滤芯的内部滤材含液量,图9示出了饱和度分布结果。可见,所有滤芯的各层饱和度呈“U”型分布。首层与上游液滴的接触机会最多,可捕集大量液滴,因此饱和度最高。随后,由于滤材内部通道数目逐渐减少(图8),饱和度也逐层减低,在第四层达到最低点后出现反向增加,其原因是液体在末层受到纤维间的毛细作用力而出现滞留现象、或在末层出气侧产生一层液膜^[11]。以上饱和度变化情况与图8所示的液体润湿面积变化情况基本一致,两者相互印证。此外,结合图5可发现,滤芯稳态压降越高,各层饱和度相应越大。

图10为滤芯B, C, D和E的聚结层滤材稳态液体分布情况;同样地,分别选取第1, 2, 4, 6层滤材。可见,与由单一滤材组成的滤芯A1和A2相比,引入聚结层排布后的滤芯首层滤材液体分布均很模糊,但第二层液体通道轮廓清晰,表明通道在第二层开始稳定。对比滤芯B和D可发现,两者主要区别在于末层;滤芯D的末层出现少数大面积通道,通道区域外基本未被润湿,表明末层滤材的通道结构变化是引起滤芯下游侧液滴含量差异的主要原因。此外,根据Kampa等^[11]和Chang等^[22]的研究结果:疏油滤材一般形成少数大面积通道,亲油滤材一般形成多数小面积通道;然而,从图10(d)和10(l)可知,本工作结果似乎正好相反。分析认为,滤芯B和D前两层分别为亲、疏油滤材,且通道在第二层开始稳定,导致后两层虽然润湿性均与前两层不同,但通道形状依然受到前两层的影响。因此,聚结层滤材的排布方式会改变液体分布情况,进而影响滤芯的过滤性能。

图11为滤芯B, C, D和E的各层饱和度分布结果。可见,所有滤芯的饱和度均呈“U”型分布,彼此间差异相对较小。对比滤芯B和D可发现,前者前两层饱和度较

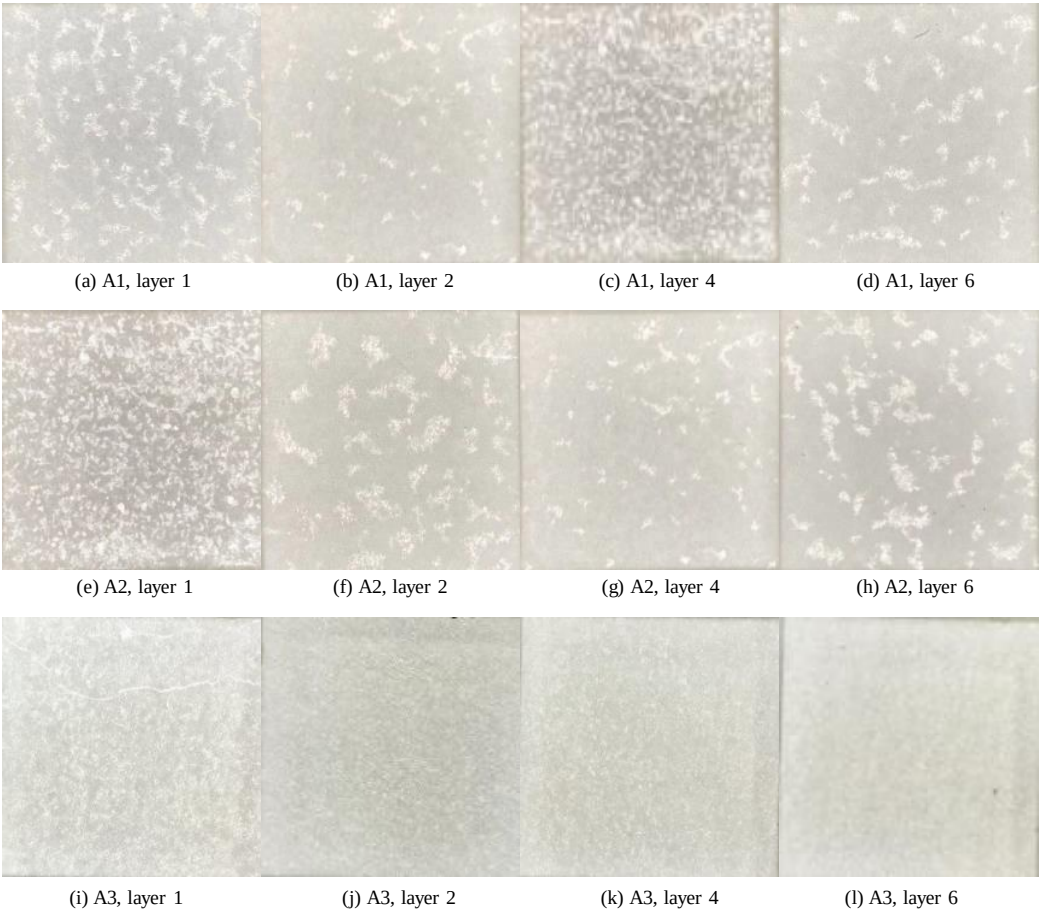


图 8 滤芯 A1、A2 和 A3 的聚结层稳态液体分布(1, 2, 4, 6 层)

Fig.8 Steady-state liquid distributions of coalescence layers (layer 1, 2, 4 and 6) in filter element A1, A2 and A3

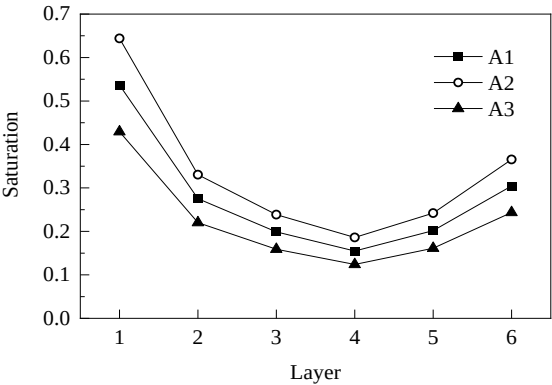


图 9 滤芯 A1、A2 和 A3 的各层饱和度

Fig.9 Saturations of each layer of filter element A1, A2 and A3

高、后两层较低,即疏油层饱和度相比亲油层低,表明进气侧选用疏油层可提高小液滴的弹跳、碰撞机率而被捕集,排气侧选用亲油层可加速液滴运移、聚并;且由于亲油纤维对液体润湿性更强、黏附力更大,有助于聚结液体顺利排出。对比滤芯 C 和 E 可发现,两者前五层饱和度无明显差异,滤芯 E 末层饱和度较高,由末层滤芯的

亲油润湿性引起,根据液膜形成理论^[11],其是导致滤芯 E 稳态压降明显更高(图 6)的主要原因。

4 结 论

利用聚结滤芯过滤性能实验装置,通过改变聚结层滤材排布,研究了由单一滤材以及不同滤材排布组合的聚结滤芯气液过滤性能,分析了滤材排布方式对过滤效率、压降、饱和度及液体分布的影响,得到如下结论:

- (1) 对于由单一滤材组成的聚结滤芯,过滤效率随滤材孔径增加而减小;对于不同滤材排布方式的聚结滤芯,疏油滤材在前可提高过滤效率、减少液滴二次夹带现象,且两层相同滤材交错排列的滤芯比单层滤材交错排列具有更高的过滤效率。
- (2) 对于由单一滤材组成的聚结滤芯,稳态压降同样随着滤材孔径增加而减小;对于不同滤材排布方式的聚结滤芯,单层滤材交错排列易导致稳态压降显著上升,而进气侧疏油滤材层数较多时可延缓压降增长、提高滤芯运行寿命。

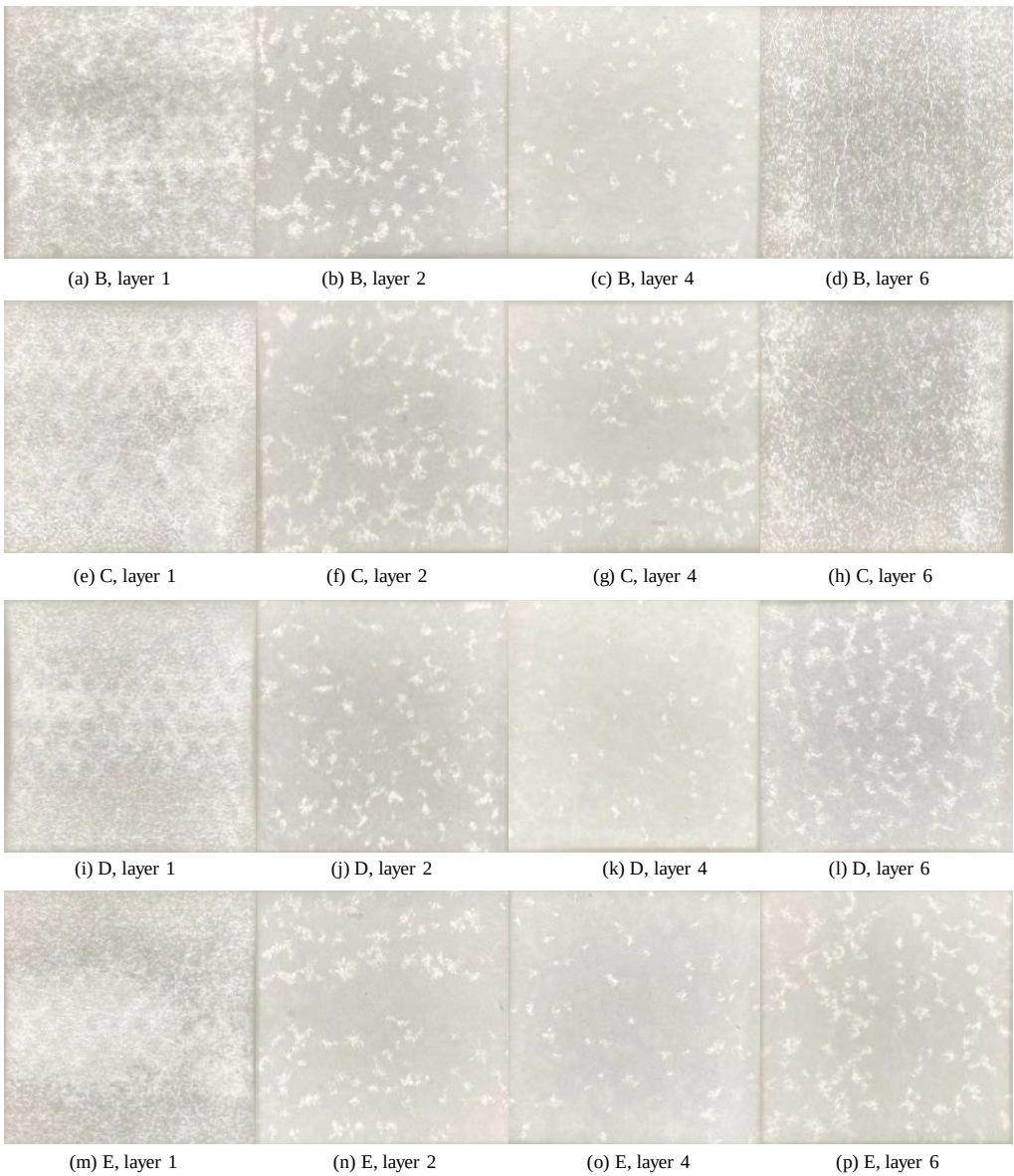


图 10 滤芯 B、C、D 和 E 的聚结层稳态液体分布(1, 2, 4, 6 层)
Fig.10 Steady-state liquid distributions of coalescence layers (layer 1, 2, 4 and 6) in filter element B, C, D and E

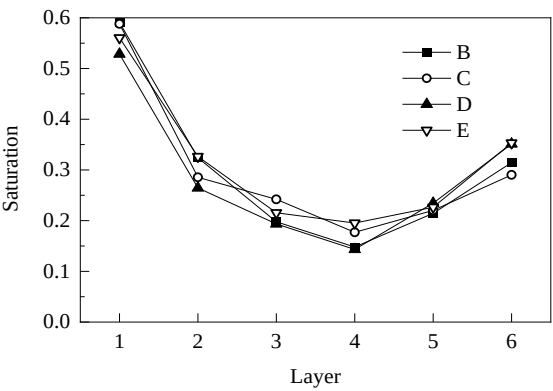


图 11 滤芯 B、C、D 和 E 的各层饱和度
Fig.11 Saturations of each layer of filter element B, C, D and E

(3) 通过调整聚结层滤材的排布方式可提高滤芯综合过滤性能,其性能优于由单一滤材组成的聚结滤芯,且排布方式对过滤效率的影响相比对压降的影响更大;滤材表面液体分布及饱和度变化结果表明,末层滤材的通道结构变化是导致不同聚结层排布方式的滤芯过滤性能出现差异的主要原因。结合品质因子结果表明,四层疏油滤材在前、两层亲油滤材在后的聚结滤芯具有最佳的综合过滤性能,此时聚结层排布方式最佳。

参考文献

[1] 齐强强, 吴小林, 陈锋, 等. 静电纺丝纤维滤材表征及其气液过滤性能 [J]. 过程工程学报, 2018, 18(4): 799-808.
Qi Q Q, Wu X L, Chen F, et al. The characterization of electrospun

- fibers and its gas liquid filtration performance [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(4): 799–808.
- [2] 陈锋, 姬忠礼, 齐强强. 孔径梯度分布对亲油型滤材气液过滤性能的影响 [J]. *化工学报*, 2017, 68(4): 1442–1451.
- Chen F, Ji Z L, Qi Q Q. Influence of pore size distribution on gas-liquid filtration performance of oleophilic filters [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(4): 1442–1451.
- [3] Liu Z, Ji Z L, Shang J F, et al. Improved design of two-stage filter cartridges for high sulfur natural gas purification [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 198: 155–162.
- [4] 李柏松. 天然气净化用滤芯的气液过滤性能研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2009: 1–152.
- Li B S. Study on gas-liquid separation performance of filters for natural gas purification [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2009: 1–152.
- [5] Chang C, Ji Z L, Liu C B, et al. Permeability of filter cartridges used for natural gas filtration at high pressure [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 419–427.
- [6] 国家能源局. 管道站场用天然气过滤器滤芯性能试验方法: SY/T 7034–2016 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- National Energy Administration. Performance test of filter elements used in gas pipelines: SY/T 7034–2016 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [7] Mullins B J, Braddock R D, Kasper G, et al. Capillarity in fibrous filter media: relationship to filter properties [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(22): 6191–6198.
- [8] Chang C, Ji Z L, Liu J L. The effect of a drainage layer on the saturation of coalescing filters in the filtration process [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 160: 354–361.
- [9] Charvet A, Gonthier Y, Gonze E, et al. Experimental and modelled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65: 1875–1886.
- [10] Hajra M G, Mehta K, Chase G G. Effects of humidity, temperature, and nanofibers on drop coalescence in glass fiber media [J]. *Separation and Purification Technology*, 2003, 30(1): 79–88.
- [11] Kampa D, Wurster S, Buzengeiger J, et al. Pressure drop and liquid transport through coalescence filter media used for oil mist filtration [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 58: 313–324.
- [12] Kampa D, Wurster S, Meyer J, et al. Validation of a new phenomenological “jump-and-channel” model for the wet pressure drop of oil mist filters [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 122: 150–160.
- [13] Chen F, Ji Z L, Qi Q Q, et al. Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 201: 71–78.
- [14] Wurster S, Kampa D, Meyer J, et al. Measurement of oil entrainment rates and drop size spectra from coalescence filter media [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 132: 72–80.
- [15] Wurster S, Meyer J, Kolb H E, et al. Bubbling vs. blow-off-on the relevant mechanism(s) of drop entrainment from oil mist filter media [J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 152: 70–79.
- [16] Wurster S, Meyer J, Kasper G. On the relationship of drop entrainment with bubble formation rates in oil mist filters [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 179: 542–549.
- [17] Agranovski I E, Myojo T, Braddock R D, et al. Combined wettable/non-wettable filter for mist purification [J]. *Chemical Engineering and Technology*, 2001, 24(3): 287–292.
- [18] Mullins B J, Mead-Hunter R, Pitta R N, et al. Comparative performance of philic and phobic oil-mist filters [J]. *AIChE Journal*, 2014, 60(8): 2976–2984.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 高效空气过滤器性能试验方法效率和阻力: GB/T 6165–2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method of the performance of high efficiency particulate air filter—efficiency and resistance: GB/T 6165–2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [20] British Standards Institution. Particulate air filters for general ventilation determination of the filtration performance: BS EN779–2012 [S]. England: BSI Standards Publication, 2012.
- [21] Association of German Engineers. Testing of filter media for cleanable filters: VDI 3926–1994 [S]. Germany: Association of German Engineers, 1994.
- [22] Chang C, Ji Z L, Liu J L. Pressure drop and saturation of nonwetable coalescing filters at different loading rates [J]. *AIChE Journal*, 2018, 64(1): 180–185.