



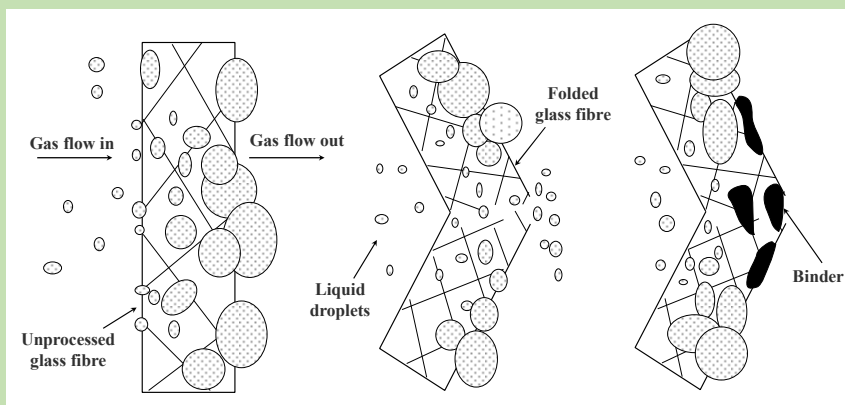
Testing and optimization of gas–liquid filtration performance of folded filter

Jing CHEN^{1,2}, Zhongli JI^{1,2*}, Zhen LIU^{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: Clean environment is required in many industrial processes, such as pharmaceutical production, large rotating machinery crankcase ventilation and petroleum refining, because liquid droplets can corrode and clog the equipment. As an important branch of filtration, the purpose of gas–liquid filtration is to effectively remove liquid droplets from gas. In this work,



according to the ISO-8573-2 standard, a gas–liquid filtration performance testing system of folded filter was established. The effect of oil mist loading rate and filter apparent velocity on the gas–liquid filtration performance of cylinder folded filter element were studied. The effects of the coating binder on the filter surface pressure drop and filtration efficiency were analyzed. The results showed that the tensile strength of the filter material increased, and the pore size of the material decreased significantly after coating binder. Filtration pressure drop of folded filter had the same trend as that of winding filter because of the same filtration mechanism. With the increase of the oil mist loading rate, the number of liquid transport channels in the filter layers increased, and channel pressure drop rose because more oil droplets were transported per unit time through filter. The initial pressure drop grew up with the increase of filter apparent velocity. The binder mainly coalesced in the area where the filter glass fibre was dense and low permeability, because of uneven glass fibre. Coating binder had less influence on the pressure drop of the folding filter. With the increase of filter apparent velocity, the filtration efficiency increased, because entrainment was inhibited. In the case of high concentration and low filter apparent velocity, due to binder coalesced on filter material inhibits entrainment, the filtration efficiency increased obviously. The binder peeled off as filter apparent velocity increased, and the filtration efficiency of filter coated with binder decreased significantly.

Key words: gas–liquid filtration; cylinder folded filter; binder; efficiency; pressure drop

收稿: 2018–10–17, 修回: 2019–01–23, 网络发表: 2019–03–15, Received: 2018–10–17, Revised: 2019–01–23, Published online: 2019–03–15

基金项目: 中国石油大学(北京)科研基金资助项目(编号: 2462017YJRC059)

作者简介: 陈景(1993–), 男, 陕西省延安市人, 硕士研究生, 动力工程专业, E-mail: cccjchen@126.com; 姬忠礼, 通讯联系人, E-mail: jizhongli63@vip.sina.com.

引用格式: 陈景, 姬忠礼, 刘震. 折叠滤芯气液过滤性能测试及优化. 过程工程学报, 2019, 19(4): 775–782.

Chen J, Ji Z L, Liu Z. Testing and optimization of gas–liquid filtration performance of folded filter (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(4): 775–782, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218301.

折叠滤芯气液过滤性能测试及优化

陈景^{1,2}, 姬忠礼^{1,2*}, 刘震^{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: 采用聚结型滤芯气液过滤性能实验装置, 研究了油雾加载率和表观过滤速度对折叠滤芯过滤性能的影响及涂覆粘合剂对折叠滤芯过滤性能的优化作用。结果表明, 涂覆粘合剂后, 滤材抗张力强度明显增大, 滤材孔径减小。随油雾加载率增大, 滤芯过滤层液体运移通道数增加, 通道压降升高。初始压降随表观过滤速度增加而升高。粘合剂主要凝固在渗透性低的区域, 压降变化较小。表观过滤速度增加抑制了二次夹带, 折叠滤芯过滤效率升高, 而由于粘合剂脱落, 涂覆粘合剂的滤芯过滤效率下降。表观过滤速度为 0.10 m/s 时, 随油雾加载率增大, 聚结在滤材表面的粘合剂抑制夹带, 滤芯过滤效率升高。

关键词: 气液过滤; 折叠滤芯; 粘合剂; 效率; 压降

中图分类号: TH136 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)04-0775-08

1 前言

在压缩气体及天然气管道运输等工业过程中, 气体中含有的小液滴会腐蚀管道和过程设备, 增加运行成本和安全隐患。用聚结过滤器过滤气体是除去气体中液态杂质的有效手段。作为聚结过滤器的核心元件, 高精度聚结滤芯由折叠结构和缠绕结构组合而成, 其过滤性能直接影响气液分离效果, 因此对折叠结构过滤性能的研究具有重要意义。

近年来, 国内外学者对气液过滤机理进行了大量研究, 如操作参数^[1-3]、环境因素^[4]、液体物性参数^[1,5]、滤材结构及物性参数^[6-8]等对滤材过滤性能的影响。Charvet 等^[9]根据亲油性缠绕滤芯过程压降在气液过滤过程中的变化, 将过滤过程分为静态过滤阶段、动态过滤阶段和稳态阶段。Kampa 等^[5,10]提出了跳跃-通道模型解释亲油性滤材和疏油性滤材的压降在过滤过程中的变化, 研究表明通道压降随油雾浓度和滤材层数增加而升高, 表观过滤速度主要影响初始压降。Wurster 等^[11,12]进行亲油性和疏油性滤材对比实验, 两种滤材的二次夹带均由液膜产生的气泡破裂导致, 认为油雾浓度影响二次夹带率。Kolb 等^[13]实验发现稳态压降随时间延长逐渐增加, 且增长速率随油雾加载率和表观过滤速度增加而升高。以上研究表明, 油雾加载率和表观过滤速度对气液过滤性能有重要影响, 但均以滤材或缠绕滤芯为研究对象, 而对折叠滤芯研究较少。

玻璃纤维在过滤过程中可能承受高压和高速气流冲击, 纤维容易断裂、结构变形, 导致过滤效率下降。将粘合剂涂覆在玻璃纤维表面可巩固滤材结构, 保持滤材结构的完整性和持久性。Jeffery 等^[14]以低熔点聚合物为

粘合剂材料, 增强了纤维强度。Vasudevan 等^[15]将低熔点玻璃纤维在高温下融化黏着在高熔点玻璃纤维上, 形成组合型玻璃纤维, 可升高过滤效率。常用的粘合剂如环氧树脂、丙烯酸树脂和酚醛树脂等, 对环境具有潜在的危险性。Hutten^[16]尝试在工业上用更环保的水分散聚合物作为替代粘合剂。Mcconnell 等^[17]尝试用颗粒和粉末聚酯粘合剂作为非织造布的粘合剂。Liu 等^[18]在玻璃纤维表面喷涂雾化粘合剂, 为介质提供了足够的结构刚度, 减少了纤维断裂和结构变形, 提高了滤芯的过滤性能。以上研究结果表明, 涂覆粘合剂对改善滤芯过滤性能具有重要的作用, 为改善折叠滤芯的过滤性能提供了新思路。

本工作用聚结型滤芯气液过滤性能实验装置, 以折叠滤芯为研究对象, 在不同油雾加载率和表观过滤速度下测试折叠滤芯的过滤性能。将粘合剂涂覆在滤材折痕处, 封堵折痕处的孔隙以巩固纤维结构, 分析粘合剂对滤芯压降和过滤效率的影响。

2 实验

2.1 实验材料

实验介质采用葵二酸二辛脂(DEHS), 密度为 912 kg/m³ (25 °C), 挥发性低, 过滤过程中不易发生相变。未经任何处理的玻璃纤维滤材 U-GF。为研究粘合剂对滤芯性能的影响, 用 4 种滤芯(F-GF, BGF-1, BGF-2 和 BGF-3)进行实验, F-GF 为 2 层亲油性玻璃纤维组成的圆柱形折叠滤芯, 内径为 36 mm, 外径为 75 mm, 有效过滤长度为 284 mm, 滤芯内部滤材厚度为 0.40 mm, 滤材克重 81 g/m², 滤材填充密度 0.081。BGF-1, BGF-2 和 BGF-3 分别为涂覆 AB 石材裂缝填补胶(株洲世林聚合

物有限公司)、三防剂(吴江市金诚精细化工有限公司)和 LB-102 粘合剂(东莞市兰宝化工新材料有限公司)的折叠滤芯。

2.2 实验方法及设备

根据国际标准 ISO-8573-2^[19]搭建的滤芯测试实验装置示意图如图 1 所示。用 9306A 型气溶胶发生器(美国 TSI 公司)产生的雾化液滴,与经过高效空气过滤器的洁净空气混合后进入垂直放置的待测滤芯,含液气流由滤芯内部向外穿过,雾化液滴被待测滤芯捕获并排出,气流由风机抽出。用 3051CD 型罗斯蒙特差压变送器(美国 Rosemount 公司)实时测量压降,并用 SIN-R9600 型无纸记录仪(杭州联测自动化技术有限公司)记录。为保证实验结果的准确性,用 MCR 500 slpm 型质量流量控制器(美国 Alicat Scientific 公司)控制空气流量。为计算待测滤芯的过滤效率,滤芯饱和后停止实验,在下游取样过滤器中填装 3 层高精度滤膜,重新启动实验装置,收集待测滤芯下游气流中液滴。一段时间后停止实验,取出待测滤芯,更换取样过滤器的高精度滤膜,重新启动实验装置,收集上游液滴。为计算滤膜收集的液体质量,用 AL204-IC 型电子天平(瑞士 Mettler Toledo 公司)

对实验前后的滤膜称重。实验和测量上下游液滴浓度过程中,保持空气流量、压缩空气的压力及油雾加载率等条件不变。

采用称重法测定滤芯的过滤效率,滤膜前后质量差与取样时间之比即为油雾加载率 v_{oil} (g/min),利用油雾加载率可计算滤芯的过滤效率 E (%):

$$v_{oil} = \frac{m_1 - m_0}{t}$$

$$E = \frac{v_{oil,0} - v_{oil,1}}{v_{oil,0}} \times 100\%$$

式中 m_0 , m_1 分别为测试前后 3 层高精度滤膜的质量(g), t 为滤膜收集液滴所用时间(min), $v_{oil,0}$, $v_{oil,1}$ 分别为待测滤芯上游和下游的油雾加载率(g/min)。

用 Phenom ProX 型扫描电子显微镜(SEM, 荷兰 Phenom-World 公司)观察折叠滤材的微观结构,用 CFP-1200-A 型气体渗透法孔径分析仪(美国 PMI 公司)测试滤材折痕处的孔径分布,用 Instron 5944 型拉力测试试验台(美国 Instron Corporation 公司)测试滤材的抗张力强度。

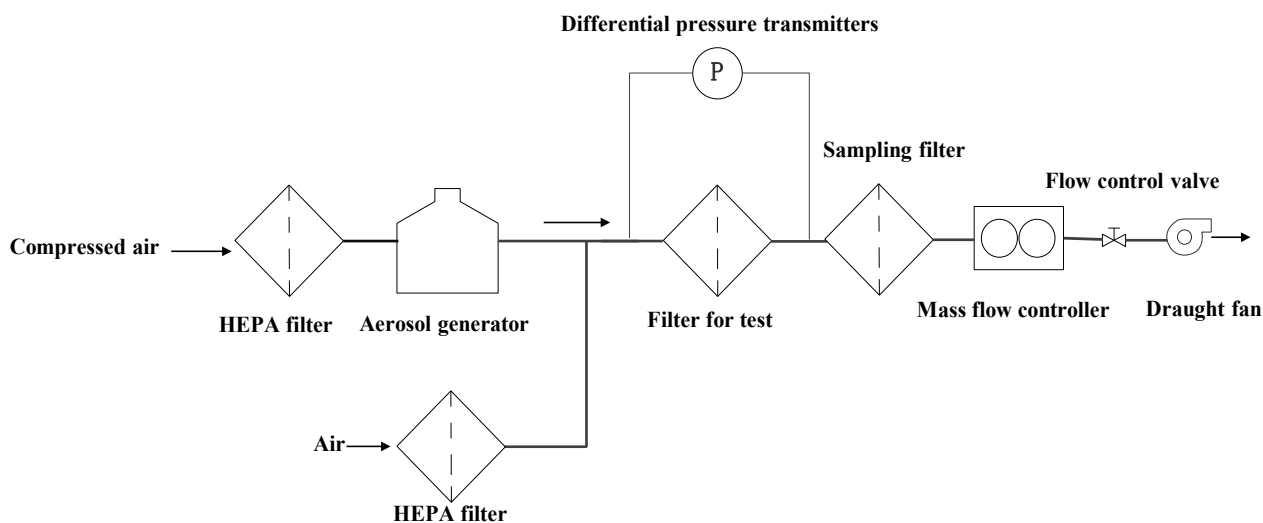


图 1 实验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

3 结果与讨论

3.1 滤材性能评价

F-GF 滤材在折叠过程中玻璃纤维容易发生断裂,用 SEM 观察折叠滤材的微观结构,如图 2 所示。从图可以看出,纤维有明显的断裂痕迹,表明折叠破坏了滤

材结构。折叠滤材涂覆粘合剂后的微观结构如图 3 所示,可见粘合剂主要在纤维密集、渗透性低的区域凝结成块状或膜状。由于玻璃纤维分布不均匀导致滤材内部毛细力存在差异,粘合剂由渗透性高的区域进入滤材,向毛细力较大的纤维密集区域扩散,使凝结在大孔径处的粘合剂较少。

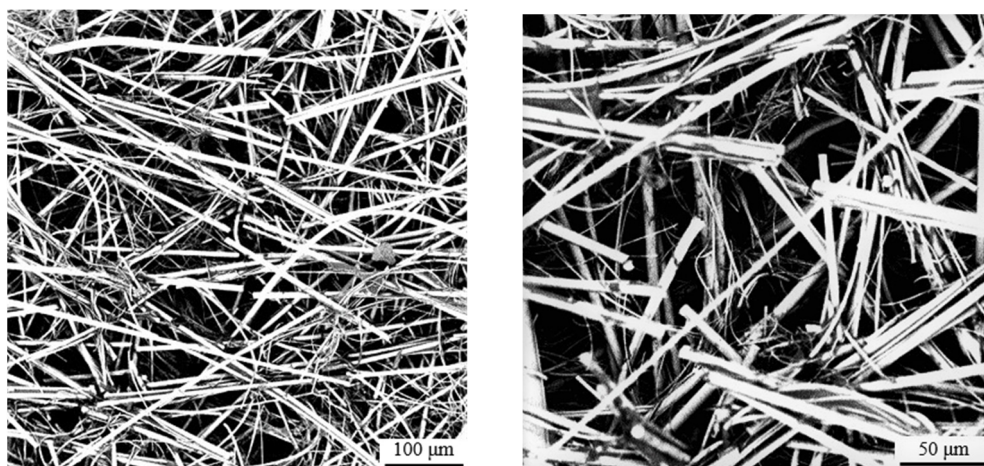


图 2 滤材折痕处 SEM 照片

Fig.2 SEM images of the crease of the filter material

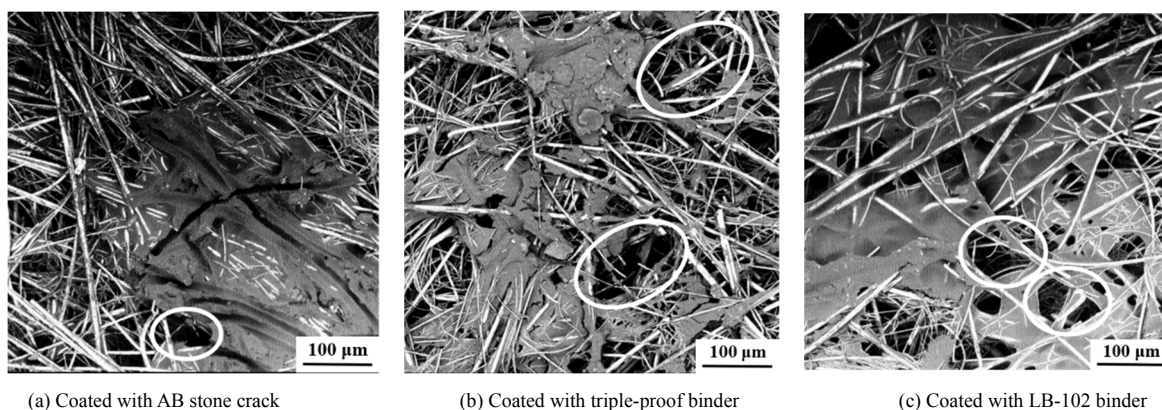


图 3 涂覆不同粘合剂的滤材的 SEM 照片

Fig.3 SEM images of the filter material coated with different binders

为探究折叠和涂覆粘合剂对滤材孔径的影响,测试了滤材折痕处的孔径分布。不同滤材的孔径分布如图 4 所示,根据图中数据计算得,U-GF 滤材的中位孔径为 $4\mu\text{m}$,F-GF 滤材的中位孔径为 $5\mu\text{m}$,BGF 滤材的中位孔径为 $2\sim 3\mu\text{m}$ 间。出现直径 $6\sim 8\mu\text{m}$ 的孔隙,表明折叠会破坏滤材结构,使折痕处孔径增大。粘合剂主要凝结在纤维密集的区域(图 3),但在纤维稀疏区域也凝结少量粘合剂,使大孔隙的直径减小,表明涂覆粘合剂使孔径减小。

过滤过程中压降使滤材承受高压,导致玻璃纤维断裂,滤芯失效,因此滤材的抗张力强度影响滤芯使用寿命。将 U-GF、F-GF 和 3 种 BGF 滤材剪成 $15\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 的矩形,用拉力测试试验台测试滤材的抗张力强度,结果如图 5 所示。折叠后滤材抗张力强度由 352 N/m 降至 103 N/m ,表明折叠会破坏滤材结构,缩短滤芯使用

寿命。BGF-1 和 BGF-3 的抗张力强度约为 380 N/m ,而 BGF-2 的抗张力强度与 F-GF 接近,表明三防剂对折叠滤材的巩固作用很小。

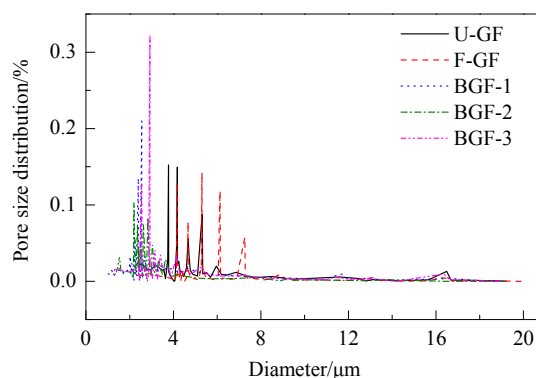


图 4 滤材的孔径分布

Fig.4 Pore size distribution of filter materials

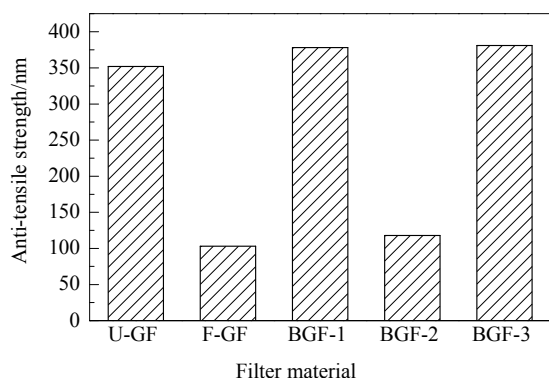


图5 涂覆粘合剂对滤材抗张力强度的影响

Fig.5 Effect of coating binder on anti-tensile strength of glass fiber

3.2 折叠滤芯过程压降

为研究油雾加载率和表观过滤速度对 F-GF 滤芯压降的影响,分别在油雾加载率为 21.8, 40.2 和 60.3 g/h 及表观过滤速度为 0.10, 0.15 和 0.20 m/s 的条件下,对 F-GF 滤芯进行实验。图 6 为 F-GF 滤芯过滤压降曲线,根据 Kampa 等^[5]提出的跳跃-通道模型,过滤过程可分三个阶段^[9]: (1) 通道压降阶段(Stage 1)。气流与干净滤芯接触,滤材对气流的阻力产生初始压降,气流中液滴被滤材捕获聚结成液滴,在气流作用下向下游层转移,形成并行运移通道,产生通道压降; (2) 跳跃压降阶段(Stage 2)。到达最后一层滤材外侧的液滴在毛细力作用下聚结成液膜,液膜阻碍气流通过,导致压降急剧增长,即跳跃压降; (3) 稳态阶段(Stage 3)。滤芯内部形成的并行运移通道数增加到足够多,进入和排出滤芯的液体量达动态平衡,滤芯达到饱和状态。该阶段滤芯压降、滤芯内部持液量、表观过滤速度及过滤效率均相对稳定。

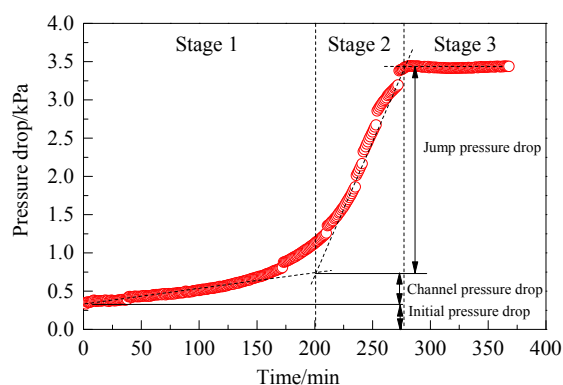


图6 F-GF 滤芯过滤过程压降曲线

Fig.6 Evolution of pressure drop of folded filter

3.2.1 油雾加载率对折叠滤芯过滤过程压降的影响

为保证油雾加载率改变时油雾粒径分布稳定,保持

气溶胶发生器内气压不变,通过改变开启喷嘴的数量控制油雾加载率。由图 7 可知,油雾加载率越高, F-GF 滤芯达到稳态阶段所需的时间越短。根据 Kampa 等^[10]的实验分析,到达某一滤层的液体首先在边界处横向扩散,直到找到通往下游滤层的最优路径。分析认为,提高油雾加载率可使单位时间内到达某一滤层的液体量增多,分布范围增大,横向扩散速度加快,滤芯加速饱和。

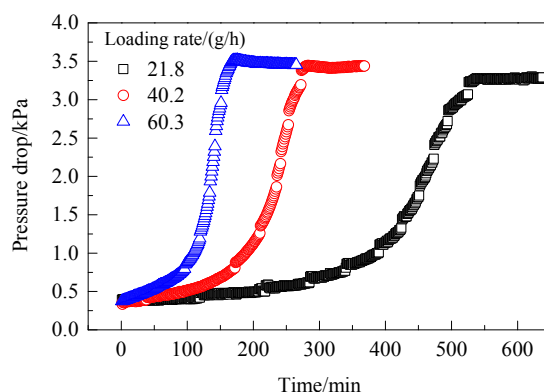


图7 表观过滤速度为 0.10 m/s 时,不同油雾加载率下 F-GF 滤芯压降与时间的关系

Fig.7 Pressure drop of F-GF vs. time under different oil mist loading rates for fixed filter apparent velocity of 0.10 m/s

将达到饱和状态的滤芯过程压降分解为初始压降、通道压降和跳跃压降,如图 8 所示,随油雾加载率增大,通道压降明显升高,这是因为单位时间内通过滤芯的液体增多,滤芯内部并行运移通道数增加,阻力增大,与 Kampa 等^[5]对缠绕滤芯的实验结果一致。跳跃压降无明显变化,这是因为其由液膜阻碍气流通过而产生,而液膜是因为滤芯最外层滤材的毛细力而形成,最外层滤材与上游油雾未直接接触,且毛细力主要与滤材孔径有关,故跳跃压降受油雾加载率影响较小。

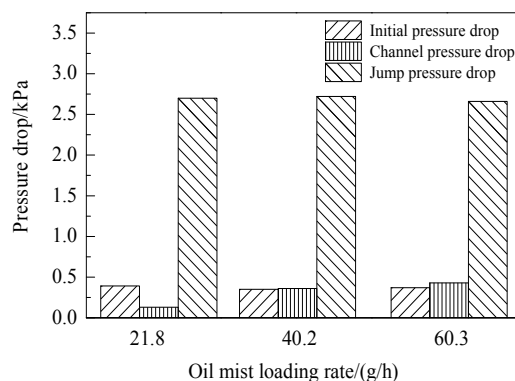


图8 油雾加载率对压降的影响

Fig.8 Effect of oil mist loading rate on pressure drop

3.2.2 表观过滤速度对折叠滤芯过滤过程压降的影响

图9为表观过滤速度对F-GF滤芯过滤过程压降的影响。由图可知,表观过滤速度越大,过程压降曲线越高,过程压降越大。

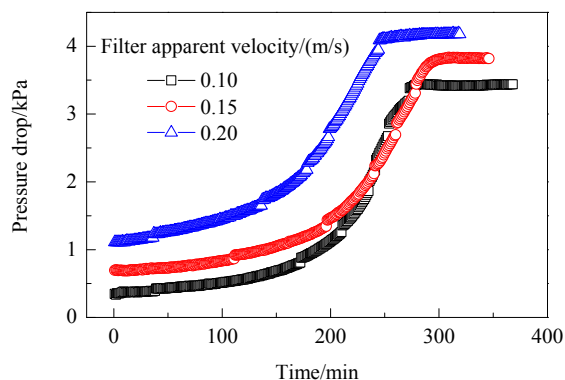


图9 油雾加载率 40.2 g/h 时,不同表观过滤速度下 F-GF 滤芯压降与时间的关系

Fig.9 Pressure drop vs. time under different filter apparent velocities for fixed oil mist loading rate of 40.2 g/h

如图10所示,随表观过滤速度增大,初始压降明显升高,因单位时间内穿过滤材的气体增多,滤材对气流的阻力增大;而通道压降没有明显变化,这是因为虽然单位时间内穿过滤材的气体增多,但油雾加载率不变,滤芯内部形成的液体迁移通道数不变;跳跃压降不变是因为其主要与滤芯最后一层滤材的毛细力有关,根据 Wurster 等^[12]的实验研究,气流要克服滤材的毛细力将滤材表面的液体吹落,流速需达 10 m/s 甚至更高。表观过滤速度由 0.10 m/s 升至 0.20 m/s,对滤材毛细力的影响很小。

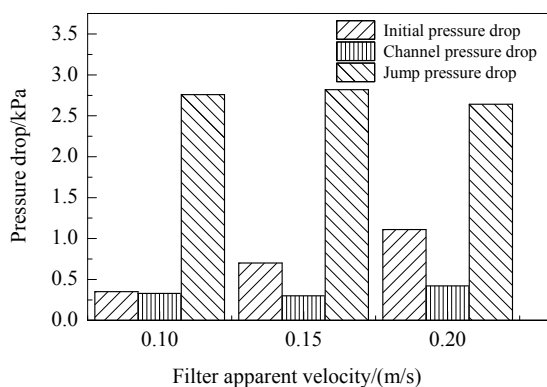


图10 表观过滤速度对压降的影响

Fig.10 Effect of filter apparent velocity on pressure drop

3.2.3 涂覆粘合剂对折叠滤芯过滤过程压降的影响

保持油雾加载率 40.2 g/h、表观过滤速 0.10 m/s 不变,对 F-GF 滤芯和 BGF 滤芯进行实验,考察涂覆粘合

剂对折叠滤芯过程压降的影响。如图11所示, F-GF 和 BGF 滤芯稳态阶段压降均约为 3.5 kPa, 粘合剂主要凝固在滤材渗透性较低区域(图3), 因此对滤芯压降影响较小。由图可知, BGF 滤芯通道压降阶段的时间均长于 F-GF 滤芯, 这是由于液滴到达某一滤层后向边界周围横向扩散时, 受粘合剂阻碍, 扩散速度降低。BGF 和 F-GF 滤芯均是依次经过通道压降阶段和跳跃压降阶段, 最终达到稳态阶段, 表明涂覆粘合剂没有改变滤材的润湿性。以 BGF-1 滤芯为例, 如图12和13所示, 改变油雾加载率和表观过滤速度时, BGF 与 F-GF 滤芯(图7和9)的过程压降变化趋势一致。

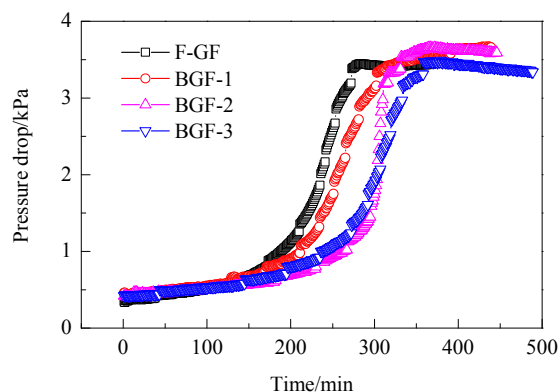


图11 表观过滤速度 0.10 m/s、油雾加载率为 40.2 g/h 时, 粘合剂对滤芯压降的影响

Fig.11 Effect of binder on pressure drop of filters for fixed filter apparent velocity of 0.10 m/s and oil mist loading rate of 40.2 g/h

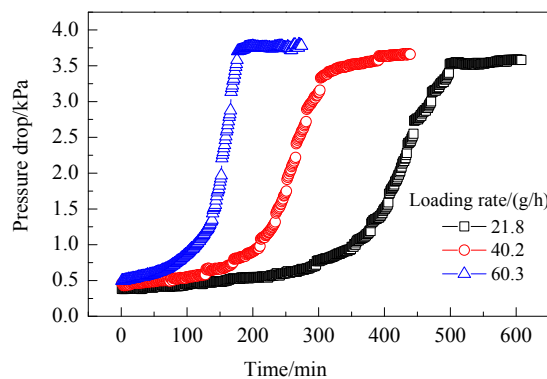


图12 表观过滤速度 0.10 m/s 时,不同油雾加载率下 BGF-1 滤芯压降与时间的关系

Fig.12 Pressure drop of BGF-1 vs. time under different oil mist loading rates for fixed filter apparent velocity of 0.10 m/s

3.3 折叠滤芯过滤效率

3.3.1 油雾加载率对折叠滤芯过滤效率的影响

相同条件下,考察油雾加载率对折叠滤芯过滤效率的影响。结果如图14所示,油雾加载率为 21.8 g/h 时,3 种 BGF 滤芯的过滤效率均低于 F-GF, 这是因为此时

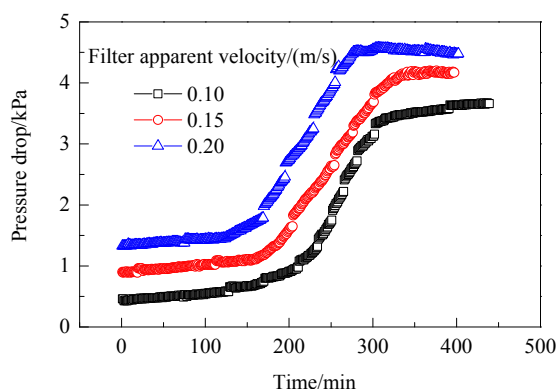


图 13 油雾加载率为 40.2 g/h 时, 不同表观过滤速度下 BGF-1 滤芯压降与时间的关系

Fig. 13 Pressure drop of BGF-1 vs. time under different filter apparent velocities for fixed oil mist loading rate of 40.2 g/h

滤芯排液速率较低, 滤芯外表面的粘合剂阻碍液膜流动, 液膜厚度增加。根据 Wurster 等^[20]的实验结果, 二次夹带率随液膜厚度增加而升高, 致使过滤效率降低。油雾加载率为 60.3 g/h 时, BGF-2 滤芯过滤效率达 98.6%, 比 F-GF 高约 0.6%。这是因随油雾加载率增大, 滤芯排液速率加快, 液膜流动速度增加, 粘合剂的阻碍作用减小; 另外, 夹带率随油雾加载率增大而升高, 而涂覆粘合剂使滤芯孔径减小, 抑制了夹带发生。综合衡量, 油雾加载率大于 40.2 g/h 时, BGF 滤芯过滤效率高于 F-GF。

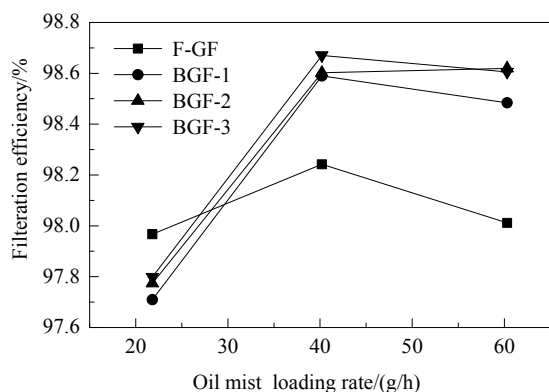


图 14 表观过滤速度 0.10 m/s 时, 油雾加载率对滤芯过滤效率的影响

Fig. 14 Effect of oil mist loading rate on filtration efficiency of filters for fixed filter apparent velocity of 0.10 m/s

3.3.2 表观过滤速度对折叠滤芯过滤效率的影响

表观过滤速度对滤芯过滤效率的影响如图 15 所示, F-GF 滤芯的过滤效率随表观过滤速度增大而升高。根据常程等^[2]的研究结果, 表观过滤速度增加, 使 F-GF 滤芯外层滤芯持液量减少, 液膜覆盖区域减少, 抑制二次夹带发生。由图可知, 表观过滤速度为 0.10 m/s 时, BGF

滤芯过滤效率高于 F-GF, 表观过滤速度增加到 0.20 m/s 时, BGF 过滤效率降低。表观过滤速度为 0.10 m/s 时, 涂覆粘合剂可减小滤芯孔径, 提高过滤效率; 随过滤速度增加, 压降升高, BGF 滤芯上的粘合剂脱落, 破坏滤芯原有结构, 因此其过滤效率降低。从图可以看出, BGF-2 滤芯在表观过滤速度为 0.15 m/s 时效率下降幅度最大, 可知三防剂对滤芯的巩固作用最小, 脱落最严重。

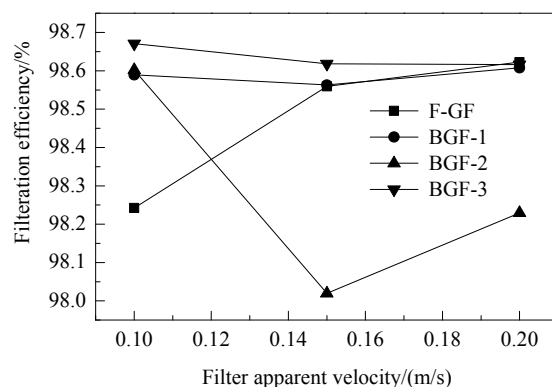


图 15 油雾加载率 40.2 g/h 时, 表观过滤速度对滤芯过滤效率的影响

Fig. 15 Effect of filter apparent velocity on filtration efficiency of filters for fixed oil mist loading rate of 40.2 g/h

4 结论

使用聚结型滤芯气液过滤性能实验装置, 在不同油雾加载率及表观过滤速度下研究折叠滤芯的过滤性能及涂覆粘合剂对折叠滤芯的影响, 得到以下结论:

(1) 由于滤芯内玻璃纤维分布不均匀, 粘合剂主要聚结在滤芯玻璃纤维密集、渗透性低的区域; 粘合剂能有效减小折叠滤芯的孔径, 提高其抗张强度。

(2) 随油雾加载率增大, 滤芯内部液体运移通道数增加, 通道压降升高; 折叠滤芯的初始压降随表观过滤速度增加而升高; 由于粘合剂主要凝固在滤芯渗透性较低的区域, 涂覆粘合剂对折叠滤芯压降影响较小。

(3) 表观过滤速度为 0.10 m/s、油雾加载率大于 40.2 g/h 时, 涂覆粘合剂有效抑制夹带发生, 使滤芯的过滤效率明显升高; 随表观过滤速度增加, 折叠滤芯过滤效率升高, 而涂覆粘合剂后, 由于粘合剂脱落使其过滤效率降低。

参考文献

- [1] 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.
- [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): 1344–1352.
- 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): 1344–1352.
- [3] 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 & Engineering, 2016, 34: 419–427.
- [4] Hajra M G, Mehta K, Chase G G. Effects of humidity, temperature, and nanofibers on drop coalescence in glass fiber media [J]. Separation & Purification Technology, 2003, 30(1): 79–88.
- [5] 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.
- [6] 陈仕林, 刘震, 宫敬, 等. 高压条件下聚结过滤滤芯性能的影响因素 [J]. 油气储运, 2018, 37(2): 204–209, 240.
- Chen S L, Liu Z, Gong J, et al. Factors influencing the performance of filter element for coalescence filtration under high pressure [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(2): 204–209, 240.
- [7] 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.
- [8] Liu Z, Ji Z L, Zhang J F, et al. Influence of processing parameters on gas–liquid filtration performance of fibrous filter cartridge [J]. Procedia Engineering, 2015, 102: 911–920.
- [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(5): 1875–1886.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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 & Purification Technology, 2015, 152: 70–79.
- [13] Kolb H E, Meyer J, Kasper G. Flow velocity dependence of the pressure drop of oil mist filters [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 166: 107–114.
- [14] Jeffery A B, Bakis G, Skelton J. High-efficiency, self-supporting filter element made from fibers: US 5456836 A [P]. 1995–10–10.
- [15] Vasudevan G, Chase G G. Performance of B–E-glass fiber media in coalescence filtration [J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(1): 83–91.
- [16] Hutten I. Fiberrich—an alternative to phenolic treated filter paper for automatic lube oil filtration [J]. Fluid Particle Separation Journal, 1998, 11: 314–321.
- [17] McConnell R L, Meyer M F, Petke F D, et al. Polyester binders in nonwovens and other textile applications [J]. Journal of Coated Fabrics, 1987, 16(3): 199–208.
- [18] 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 & Purification Technology, 2017, (S1): 155–162.
- [19] ISO/TC 118. ISO 8573-2-2007, Compressed air—part 2: test methods for oil aerosol content [S]. International: IX-ISO, 2007.
- [20] Wurster S, Meyer J, Kasper G. On the relationship of drop entrainment with bubble formation rates in oil mist filters [J]. Separation & Purification Technology, 2017, 179: 542–549.