

高含硫天然气过滤单元性能优化

刘震^{1,2} 姬忠礼^{1,2} 吴小林^{2,3} 赵峰霆^{2,3}

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院 2. 过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室
3. 中国石油大学(北京)化学工程学院

刘震等. 高含硫天然气过滤单元性能优化. 天然气工业, 2016,36(3):87-92.

摘要 为了避免高含硫天然气湿气输送过程中所夹带的固体颗粒和液体杂质对天然气净化装置和效果的不良影响,在脱硫工艺前端设置了由预过滤器和聚结过滤器所组成的两级过滤单元。针对某高含硫天然气净化厂原料气过滤单元存在的聚结过滤器滤芯压降不上升、无法通过压降来判断滤芯更换时间等问题,利用两级过滤性能评价系统对比了不同过滤性能预过滤器滤芯和聚结过滤器滤芯组合的过滤性能,发现其原因在于聚结过滤器滤芯对亚微米级液滴的聚结性能不理想、预过滤器滤芯和聚结过滤器滤芯的性能不匹配。为此,提出了改进措施:①改进聚结过滤器滤芯的聚结层;②设置疏油型排液层,改变预过滤器滤芯的结构参数,使之与改进后的聚结过滤器滤芯的性能相匹配。实验结果表明:改进后聚结过滤器滤芯的稳态压降较在用滤芯降低 75%,对于粒径为 0.3 μm 及以上的液滴过滤效率达到 99.99%,同时实现了预过滤器滤芯和聚结过滤器滤芯压降的同步变化。现场试验结果表明:改进后的原料气过滤单元对液体杂质的过滤能力提高了 1 倍,能更有效地保证后续工艺的安全运行。该研究成果为高含硫天然气过滤元件设计和过滤系统优化运行提供了参考。

关键词 高含硫天然气 脱硫 预过滤 聚结过滤 固体颗粒 液体杂质 滤芯 压降 性能匹配

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2016.03.012

Performance improvement of a high-sulfur natural gas filtration unit

Liu Zhen^{1,2}, Ji Zhongli^{1,2}, Wu Xiaolin^{2,3}, Zhao Fengting^{2,3}

(1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, Beijing 102249, China; 3. College of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 36, ISSUE 3, pp.87-92, 3/25/2016. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: For avoiding the adverse impacts on natural gas purification process from solid particles and liquid impurities carried by wet acid gas during its transportation, a two-stage filtration unit consisting of a pre-filter and a coalescence filter is set at the front-end of desulfurization process. In a certain acid gas purification plant, the pressure drop of the coalescence filter cartridge did not rise so that the replacement time of the filter cartridge was impossible to be diagnosed on the basis of pressure drop. In view of this, different combinations of two-stage filter cartridges were compared by using a two-stage filtration performance evaluation system. As being revealed, the problem was induced by the fact that the capture ability of coalescence filter for sub-micron droplets was not as ideal as the expectation and both filters were not matched in the filtration performance. Thus, two improvement measures were put forward: to optimize the coalescence layers of coalescence filter cartridges and to set the hydrophobic drainage layers on the coalescing filter and adjust the structure parameters of the pre-filter cartridge to match with the improved coalescence filter cartridge. Experimental results show that the steady pressure drop of the improved coalescence filter cartridge is reduced by 75%, and the filtration efficiency reaches 99.99% for the droplets with diameter $\geq 0.3 \mu\text{m}$. Furthermore, synchronous pressure drop evolution is also realized between the pre-filter and the coalescence filter. Field tests reveal that the liquid capturing capacity is doubled by means of the improved filtration unit and the safe operation of subsequent process can be guaranteed effectively. This study provides reference for the design of natural gas filter cartridges and the optimization of natural gas filtration systems.

Keywords: Acid gas; Desulfurization; Pre-filter; Coalescence filter; Solid particle; Liquid impurity; Filter cartridge; Pressure drop; Performance matching

基金项目: 国家科技重大专项“百亿方级净化厂安全运行技术优化”(编号:2011ZX05017-005)、国家自然科学基金项目“天然气净化用气液聚结滤芯过滤分离机理研究”(编号:51376196)。

作者简介: 刘震, 1987年生, 博士研究生; 主要从事天然气过滤技术的研究工作。地址:(102249)北京市昌平区府学路18号。电话:(010)89734336。ORCID:0000-0002-0108-386X。E-mail:liuzhen629@126.com

通信作者: 姬忠礼, 1963年生, 教授, 博士生导师, 博士; 主要从事多相流分离与检测技术的研究工作。地址:(102249)北京市昌平区府学路18号。电话:(010)89734336。E-mail:jizhongli63@vip.sina.com

在天然气净化过程中,原料天然气需先经过原料气过滤单元,去除气相中夹带的固体颗粒和液体杂质,过滤后的原料气方可进入脱硫单元脱除其中的酸性组分。因此,原料气过滤单元是保证高含硫天然气净化装置安全运行的一个关键环节^[1-3]。

天然气过滤方面的研究方法包括实验室实验、模拟计算、现场检测与试验等。Li Baisong 等^[4]利用光学粒子计数法和滤膜称重法,测试了“西气东输”管道用的 3 种滤芯,评价了压降、出口浓度、分级效率等性能指标,发现所测滤芯对粒径大于 2.0 μm 液态气溶胶的过滤效率较高。Innocentini 等^[5]通过实验测试了纤维素、聚丙烯、聚酯和不锈钢纤维这 4 种过滤材料在绝对压力为 93 ~ 693 kPa 范围内的渗透特性,发现压力增高时气体密度增大而导致压降呈正比上升,并模拟了不同过滤材料在高达 5 000 kPa 高压状态下的压降。Azadi 等^[6-7]通过等速采样方法现场测试了天然气集输系统中不同节点的颗粒物浓度和粒径分布,认为过滤系统的性能仍需提高。

解决原料气过滤单元存在的问题,宜采用实验室实验和现场试验相结合的研究方法,以便尽快应用改进后的过滤元件。笔者就高含硫天然气净化厂内原料气过滤单元在运行中存在聚结过滤器压降不上升、无法通过压降判断滤芯更换时间的问题进行了分析,根据实验室性能评价确定了过滤元件结构改进和两级匹配方案,通过现场试验考核了改进后过滤元件的过滤性能和实际应用效果。

1 原料气过滤单元

原料气过滤单元位于天然气净化厂工艺流程的最前端,一般使用预过滤器和聚结过滤器的两级串联过滤方式。预过滤器用于去除原料气中粒径超过 1.0 μm 的固体杂质和液滴,聚结过滤器则用于去除 0.3 ~ 1.0 μm 的固体颗粒和液滴。原料气过滤单元的运行流程如图 1 所示,1 个过滤单元由 2 台预过滤器和 1 台聚结过滤器组成,工作状态下 2 台预过滤器为 1 用 1 备。其工作流程为:含有杂质的原料气首先进入预过滤器上腔室,从滤芯外表面进入滤芯内部,这时较大的固体颗粒和液滴被去除掉,过滤后的气体经预过滤器滤芯下端进入下腔室。经过预过滤处理的原料气经由预过滤器下腔室经过管道进入聚结过滤器下腔室,这一过程中会有一部分透过预过滤器滤芯的颗粒被分离。带有细小固体颗粒和液滴的气体继续上升至聚结过滤器上腔室的聚结滤芯内部,

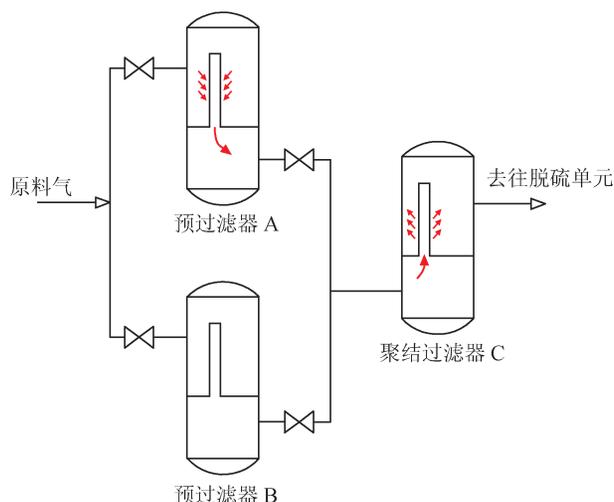


图 1 天然气净化厂原料气过滤单元流程图

然后穿过聚结滤芯由滤芯外表面流出。被滤芯拦截和凝聚的液滴沿着滤芯外表面落入上腔室,在累积到一定液位后经排污阀排出。目前尚难以实现高含硫天然气的过滤器性能在线监测,滤芯更换的依据为滤芯前后的压降。当过滤器压降达到 0.1 MPa 时,需更换新的滤芯。

自 2010 年以来,开展了原料气滤芯首次国产化实验和现场试验,强调了滤芯应满足过滤性能要求和延长使用周期,初步解决了过滤器频繁拥堵、进口滤芯采购周期长和运行成本高等问题。然而,在后期的运行中发现聚结过滤器压降基本不上升,无法通过压降来判断聚结过滤器是否需要更换滤芯。由于过滤器筒体内的液位上升即说明过滤器捕集到液滴,起到了分离原料气杂质的作用,因此可以改为根据过滤器筒体内的液位变化来判断是否需要更换滤芯。若滤芯未达到使用寿命而被提前更换,会造成一定的经济损失。而如果在滤芯失效时仍继续使用,则会影响后续工艺的安全。为此,需要分析该问题的原因并予以解决。

2 过滤单元评价

建立专门的滤芯性能评价方法及装置,重点分析预过滤器与聚结过滤器间的匹配性能,以确定现场存在问题的原因。

2.1 评价方法

在实验室利用滤芯过滤性能评价系统对改进前后的滤芯及两级过滤组合进行对比,该评价系统参照相关标准^[8-9]建立,使用癸二酸二辛酯作为实验液体雾化生成液态气溶胶,李柏松等^[10-11]和熊至宜等^[12]

验证了该评价系统的可靠性验证了该评价系统的可靠性。为便于考察两级过滤的整体性能,在原有聚结滤芯单元前设置预过滤单元,改为与现场原料气过滤单元流程类似的两级过滤单元(图2)。按照原料气过滤单元的工艺流程,气体由预过滤器滤芯外部流向滤芯内部,而后由聚结过滤器滤芯内部流向滤芯外部。在每级过滤筒体的进出口管路上安装等速采样装置,样品气通过 Welas 3000 型气溶胶粒径谱仪在线测出液滴浓度和粒径分布等参数,其测量范围为 $0.3 \sim 40.0 \mu\text{m}$ 。压差变送器用于测量滤芯上下游的压差并记录,量程为 $0 \sim 10 \text{ kPa}$ 。涉及的实验操作参数为:室温条件下,表观过滤速度为 0.1 m/s ,入口浓度约为 200 mg/m^3 ,测试指标为过滤过程压降、液滴粒径分布和稳定状态过滤效率。

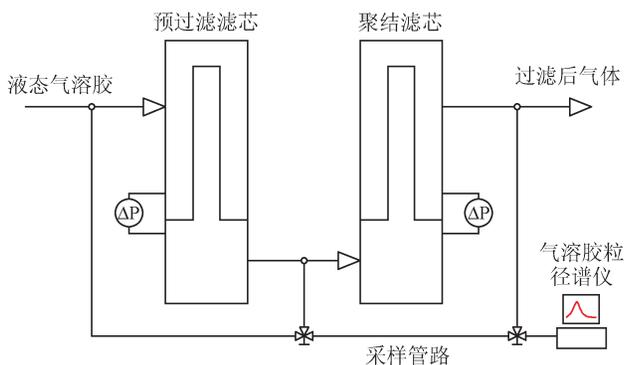


图 2 两级过滤元件性能评价系统图

2.2 问题分析

图 3 为 3 组具有代表性的两级组合方式压降的

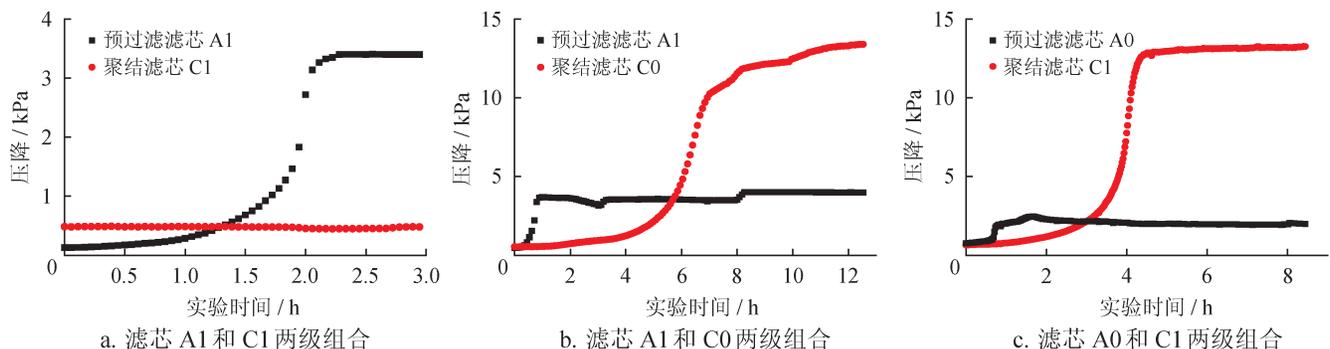


图 3 3 组具有代表性的两级过滤过程压降图

通过上述 3 组两级过滤组合性能测试,分析得到现场出现问题的原因在于:①现场原料气过滤单元的两级过滤形式只有预过滤器起作用,聚结过滤器滤芯对亚微米级液滴的过滤性能不足,导致不能有效捕集从预过滤器滤芯透过的颗粒;

对比,其中预过滤器滤芯 A1 和聚结过滤器滤芯 C1 为现场在用滤芯,预过滤器滤芯 A0 为过滤效率次于 A1 的普通滤芯,聚结过滤器滤芯 C0 为过滤效率优于 C1 的某型号进口滤芯。

首先考察现场在用 A1 与 C1 两级过滤组合的性能,如图 3-a 所示。滤芯 A1 的过滤过程压降曲线符合一般液态气溶胶过滤的变化趋势^[13-14],经过一段快速上升期后到达稳定过滤阶段,压降保持在 3.3 kPa ,而滤芯 C1 的压降始终保持在初始压降值,验证了现场存在聚结过滤器压降上升缓慢的问题。此外,预过滤器滤芯基本除去了粒径超过 $2.0 \mu\text{m}$ 的液滴,聚结过滤器滤芯的出口浓度相比其进口浓度并未发生明显降低,说明滤芯 C1 对粒径小于 $2.0 \mu\text{m}$ 液滴的聚结过滤效果不理想。

为证明上述结论,考察 A1 与 C0 两级过滤组合的性能,如图 3-b 所示。此时滤芯 A1 的过滤过程压降依然为快速上升后保持稳定。而滤芯 C0 的过滤过程压降也经历了相对较长的缓慢上升期和快速上升期,并逐渐达到稳定。此组合下的总出口浓度明显降低,即滤芯 C0 起到了对亚微米级液滴的聚结过滤作用,说明滤芯 C1 的性能尚需提高。

当 A0 与 C1 两级过滤组合使用时,发现在滤芯 A0 对液态气溶胶的过滤性能较 A1 有所下降时,液滴的透过率高,滤芯 C1 的入口液滴粒径较大、浓度较高,使得滤芯 C1 对预过滤后的液态气溶胶起到了一定的过滤作用。因此,滤芯 C1 的过滤过程压降出现了正常的变化曲线,如图 3-c 所示。

②现场在两级过滤设计时未考虑预过滤器滤芯和聚结过滤器滤芯的性能匹配,即尚未实现预过滤器滤芯负责除去粒径为 $2.0 \mu\text{m}$ 及以上颗粒和聚结过滤器滤芯负责除去粒径为 $0.3 \mu\text{m}$ 及以上颗粒的合理分工。

3 性能改进与匹配

依据对现场问题的分析结果,拟提出以下改进措施:①通过改变聚结过滤器滤芯的结构,实现对亚微米级液滴低阻高效聚结过滤的目的;②基于工艺设计的要求和便于运行维护的目的,最佳的两级匹配形式应为既能实现两级过滤分工合作和各自的压降变化同步,又能使总压降最低以减少能耗。因过滤器原有尺寸的限制,改进后的滤芯采用与在用滤芯相同的外形尺寸。为与在用滤芯的编号相对应,将改进后的预过滤器滤芯编号为A2,改进后的聚结过滤器滤芯编号为C2。

3.1 聚结过滤器滤芯改进

实验室测定发现,滤芯C1不能有效捕集亚微

米级液滴,且被捕集的液滴易拥堵于亲油性排液层,不仅显著增加了压降,而且在气流作用下易发生液滴二次夹带^[15-17]。为此,在滤芯C1的基础上选取纤维直径更小的过滤材料,以提高对粒径为0.3~1.0 μm液滴的捕集能力。对滤芯聚结层进行了结构固化,提高了抗工况波动的能力。将排液层改为疏油疏水型纤维材料,使聚结而成的液体及时在排液层排出,减少了液体滞留量,同时降低了液滴夹带的风险。通过对滤芯C2进气侧的过滤材料做折波处理,增大了过滤面积,使得相同气量下滤芯C2的初始压降比滤芯C1低约30%。改进前后聚结过滤器滤芯的性能对比如图4所示,滤芯C2在稳定聚结状态下的压降仅为滤芯C1的25%,但对于粒径为0.3 μm及以上的液滴过滤效率达到99.99%,过滤性能得到明显提升。

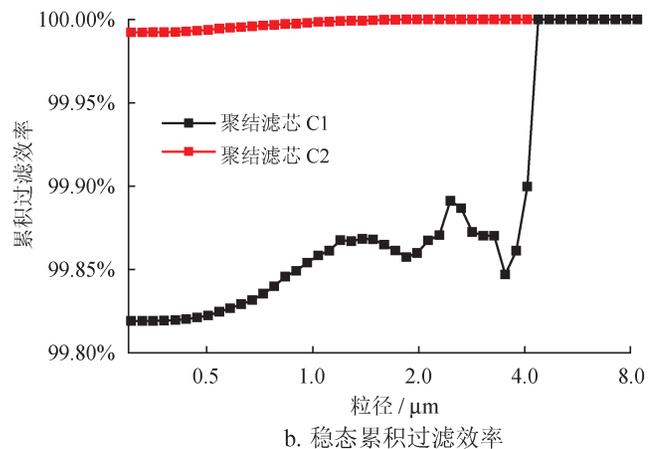
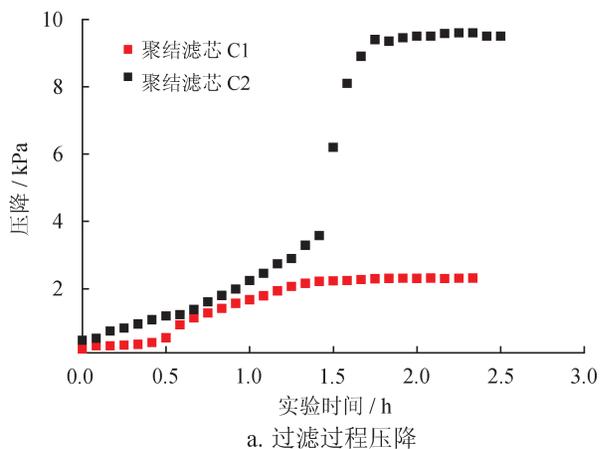


图4 改进前后聚结过滤器滤芯的性能对比图

3.2 滤芯性能匹配

当确定选用性能较好的滤芯C2时,可适当降低预过滤器滤芯的过滤性能,以实现两级过滤的合理分工。通过改变预过滤器滤芯的滤材孔隙率和纤维直径等参数,最终确定了与滤芯C2相匹配的预过滤器滤芯A2。在同样的气液过滤实验条件下,滤芯A1的稳态压降约为3.0 kPa,而滤芯A2需要5倍于滤芯A1的时间才达到稳定状态,且稳态压降仅为1.5 kPa。滤芯A2对粒径小于2.0 μm液滴的过滤效率较滤芯A1有所降低,使得更多的粒径小于2.0 μm的液滴透过滤芯A2,由滤芯C2负责处理,降低了预过滤器的运行负荷。

图5反映了滤芯A2与C2的两级过滤过程压降,可以看出滤芯A2与C2的压降随时间变化而同时阶段性上升。从整体的稳态累积过滤效率来看,对粒径为0.3 μm及以上的液滴过滤效率达到了99.99%,表明通过改进聚结过滤器滤芯的排液层,不仅避免了液

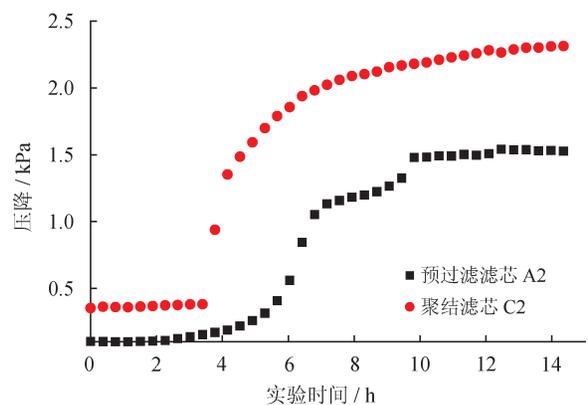


图5 滤芯A2与C2的两级过滤过程压降图

滴夹带现象,而且保证了过滤单元的出口气质,降低了两级串联总压降。相比于在用滤芯A1和C1组合,改进后滤芯A2和C2的整体过滤性能有了明显提升,将通过现场试验进一步考察改进后的预过滤器滤芯与聚结过滤器滤芯组合的实际效果。

4 现场试验

选择天然气净化厂内某联合装置的 2 个系列装置（简称 1 系列和 2 系列），对在用滤芯和改进后滤芯进行性能对比试验。1 系列为对照组，2 台预过滤器均安装在用滤芯 A1，聚结过滤器安装在用滤芯 C1。2 系列为试验组，2 台预过滤器均安装滤芯 A2，聚结过滤器安装滤芯 C2。每个系列的进气压力为 8 MPa，正常处理气量为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ，试验过程中记录原料气过滤单元进气压力和流量、预过滤器和聚结过滤器的压降和筒体内的液位。

4.1 压降变化

选取现场得到的 1 000 h 内进气压力和流量的试验记录（图 6），可以看出对照组和试验组的进气压力均稳定在 8 MPa。试验组的处理气量整体上比对照组少约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ，这与 2 个系列装置的位置和阻力等因素有关。两者的压力和流量趋势一致，保证了 2 组数据的可比性。

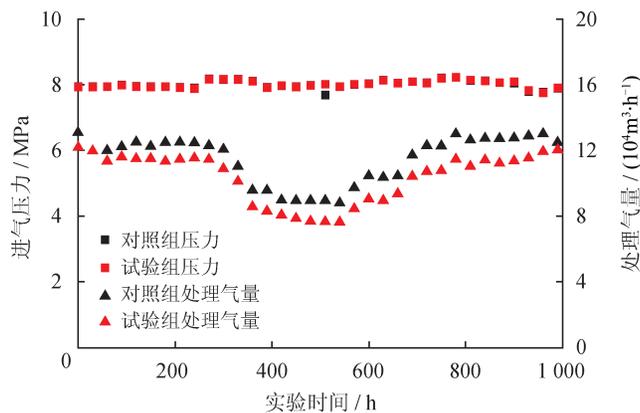


图 6 现场试验原料气入口的压力和处理气量示意图

受处理气量和气质变化的影响，试验组和对照组的压降均有所波动（图 7）。在运行 1 000 h 后，对照

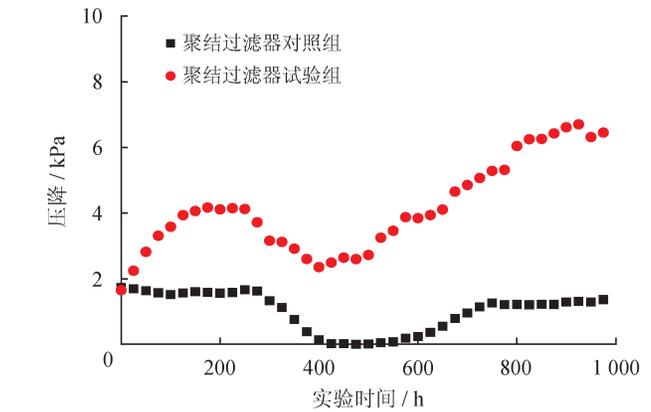
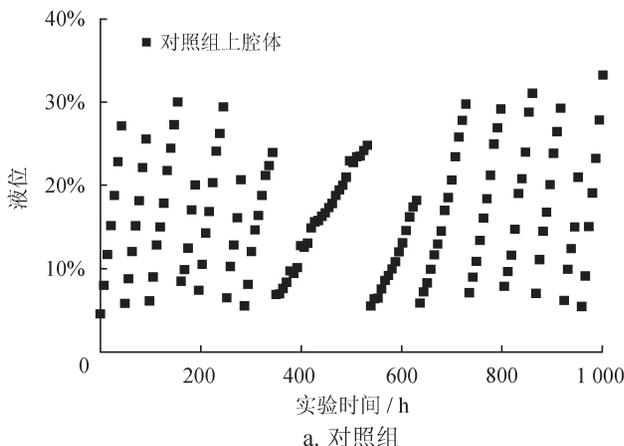


图 7 现场试验过程中聚结过滤器的压降变化图

组的聚结过滤器压降除了随流量变化而有所波动外，未见明显上升，而试验组的聚结过滤器压降上升至约 7 kPa。此外，试验组的预过滤器和聚结过滤器呈现同步上升的趋势。由于现场工况下压降上升主要由于固体杂质拥堵在过滤材料表面或内部。因此 2 组压降的差异说明试验组滤芯对原料气中的固体杂质起到了更有效的捕集作用。

4.2 排液量

按照现场操作规程，当过滤器筒体内的液位达到液位计总量程的 30% 时，需进行排液操作，使筒体内累积的液体进入排污管道。因此可以通过排液次数和排液时的液位来计算试验过程中的累积排液量，进而计算出滤芯的液体捕集量。

对照组和试验组的聚结过滤器排液量如图 8 所示。对应图 6 可发现，液位的增长与流量的变化有对应关系：在处理量为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，2 组过滤器的液位均增长迅速，排液操作频繁；当处理气量下降到约 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，液位增长速度明显放缓，仅有 1~2 次排液操作。这说明气体处理流量降低时可能会显著减

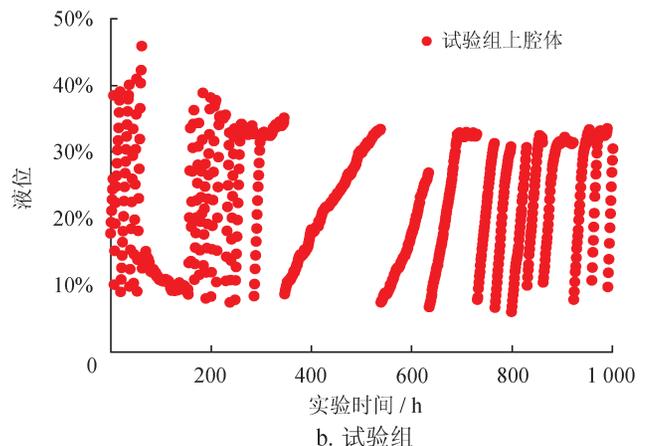


图 8 现场试验中聚结过滤器上腔体液位的变化图

少杂质夹带量。此外,单根滤芯处理流量的变化会影响滤芯过滤性能,进而导致液体捕集量变化^[18]。

在所选取的 1 000 h 内,对照组聚结过滤器排液操作 15 次,累积排液量为 0.95 m³,而在相同时间内试验组聚结过滤器排液操作 28 次,累积排液量为 2.03 m³,即在相同工况条件下,试验组聚结过滤器滤芯拦截的液体量约为对照组的 2 倍。

5 结论

1) 高含硫天然气净化厂的原料气具有硫化氢含量高、工况波动大、含液量多等特点,要求作为非标准的过滤元件具有较好的抗腐蚀性、结构强度和纳污能力,在选用过滤元件的型号和材料时需综合考虑运行工况、过滤性能要求和运行成本等因素。

2) 与气固过滤会形成滤饼和压降持续上升的特点不同,气液过滤会发生液滴的拦截、聚结、运移和夹带等过程,并最终达到一个稳态压降。选用疏油疏水型排液层过滤材料,促进液体及时排出,可显著减少液滴夹带量和降低稳态过滤压降。

3) 在提高预过滤器滤芯和聚结过滤器滤芯本身性能的同时,还需考虑到两级过滤之间的分工和性能匹配关系,实现过滤单元的低阻高效运行。

参 考 文 献

- [1] 胡天友,熊钢,何金龙,印敬,彭修军.胺法脱硫装置溶液发泡预防及控制措施[J].天然气工业,2009,29(3):101-103.
Hu Tianyou, Xiong Gang, He Jinlong, Yin Jing, Peng Xiujun. Prevention and control measures for foaming in amine desulfurization unit[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(3): 101-103.
- [2] 李峰,孙刚,张强,龙杰.天然气净化装置腐蚀行为与防护[J].天然气工业,2009,29(3):104-106.
Li Feng, Sun Gang, Zhang Qiang, Long Jie. Corrosion behavior and prevention of gas sweetening unit in natural gas processing plants[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(3): 104-106.
- [3] 曾德智,商剑峰,龙德才,刘元直,王团亮.高含硫天然气净化厂腐蚀规律研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2014,36(6):135-142.
Zeng Dezhi, Shang Jianfeng, Long Decai, Liu Yuanzhi, Wang Tuanliang. The research on corrosion in high-sulfur gas purification plants[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(6): 135-142.
- [4] Li Baisong, Ji Zhongli, Yang Xue. Evaluation of gas-liquid separation performance of natural gas filters[J]. Petroleum Science, 2009, 6(4): 438-444. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12182-009-0067-z>.
- [5] Innocentini MDM, Tanabe EH, Aguiar ML, Coury JR. Filtration of gases at high pressures: Permeation behavior of fiber-based media used for natural gas cleaning[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 74(22): 38-48. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.050>.
- [6] Azadi M, Mohebbi A, Scala F, Soltaninejad S. Experimental study of filtration system performance of natural gas in urban

- transmission and distribution network: A case study on the city of Kerman, Iran[J]. Fuel, 2011, 90(3): 1166-1171. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.009>.
- [7] Azadi M, Mohebbi A, Soltaninejad S, Scala F. A case study on suspended particles in a natural gas urban transmission and distribution network[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 93(1): 65-72.
- [8] The American Society of Heat Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2007 Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size[S]. http://www.camfil.us/FileArchive/_10_Camfil_Message_CamTab/Air%20Quality/Air%20Filter%20Standard%20ASHRAE%2052.2-2007.pdf.
- [9] The British Standards Institution. BS EN 779-2012 Particulate air filters for general ventilation-determination of the filtration performance[S]. <http://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=00000000030200845>.
- [10] 李柏松,姬忠礼,陈洪玉.天然气过滤器气液分离性能的实验研究[J].天然气工业,2007,27(10):123-125.
Li Baisong, Ji Zhongli, Chen Hongyu. Experimental studies on gas/liquid separation performance of natural gas filters[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(10): 123-125.
- [11] 李柏松,姬忠礼,冯亮.液体黏度和表面张力对滤材气液过滤性能的影响[J].化工学报,2010,61(5):1150-1156.
Li Baisong, Ji Zhongli, Feng Liang. Influence of liquid properties on gas-liquid separation performance of filter[J]. CIESC Journal, 2010, 61(5): 1150-1156.
- [12] 熊至宜,姬忠礼,冯亮,杨云兰.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):1742-1748.
Xiong Zhiyi, Ji Zhongli, Feng Liang, Yang Yunlan. Measurement and analysis on influencing factors for filtration performance of filter coalescer element[J]. CIESC Journal, 2012, 63(6): 1742-1748.
- [13] Contal P, Simao J, Thomas D, Frising T, Callé S, Appert-Collin JC, et al. Clogging of fibre filters by submicron droplets. Phenomena and influence of operating conditions[J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(2): 263-278. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.07.003>.
- [14] Charvet A, Gonthier Y, Gonze E, Bernis A. Experimental and modelled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(5): 1875-1886. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2009.11.037>.
- [15] Mead-Hunter R, King AJC, Mullins BJ. Aerosol-mist coalescing filters-A review[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 133: 484-506. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2014.06.057>.
- [16] Mullins BJ, Mead Hunter R, Pitta RN, Kasper G, Heikamp W. Comparative performance of philic and phobic oil mist filters[J]. AIChE Journal, 2014, 60(8): 2976-2984. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aic.14479>.
- [17] 常程,姬忠礼,黄金斌,詹爽,李兰洁.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 Cheng, Ji Zhongli, Huang Jinbin, Zhan Shuang, Li Lanjie. Analysis of re-entrainment in process of gas-liquid filtration[J]. CIESC Journal, 2015, 66(4): 1344-1352.
- [18] Frising T, Thomas D, Bémer D, Contal P. Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modelling study[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(10): 2751-2762. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2004.12.026>.