

引文: 王玲子, 刘洋, 张超, 等. 地下储气库注气压缩机除油器初分离腔与滤芯结构优化[J]. 天然气工业, 2025, 45(8): 142-149.

WANG Lingzi, LIU Yang, ZHANG Chao, et al. Structural optimization of the primary separation chamber and filter element of oil separator of gas injection compressor in underground gas storage[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(8): 142-149.

地下储气库注气压缩机除油器初分离腔与滤芯结构优化

王玲子¹ 刘洋² 张超² 贺家辉² 冯健美¹ 彭学院¹

1. 西安交通大学能源与动力工程学院 2. 中国石油长庆油田公司第一采气厂

摘要: 压缩机组是地下储气库(以下简称储气库)注气的关键设备之一, 当前广泛采用往复式压缩机, 在其运行过程中需注入润滑油进行冷却、润滑与密封。在储气库注气过程中为了去除随排气流出的润滑油, 压缩机后端配置了除油器, 但现有除油器除油性能不佳, 导致排气含油率仍较高, 直接影响了注入气井的天然气纯度, 造成井筒油污堵塞, 严重影响采气设备的正常运行。为此, 基于陕 224 储气库压缩机运行数据与除油器运行效果, 分析了除油器底部初分离腔体及上部滤芯中的两相流动特性, 提出了 3 种初分离腔体的结构优化方法以及一种新型滤芯结构与安装形式, 最后明确了底部腔体入口处增加内凹弧形挡板以及新型滤芯有较好的优化效果。研究结果表明: ①除油器底部的初分离腔体筒体直径过小, 且气流场分布不合理, 腔体的初级分离效率低; ②滤芯立式放置且长度过长, 导致滤芯高度方向载荷不均匀, 使得滤芯无法在高度方向完全发挥作用, 且大量被分离的润滑油聚集在滤芯下部难以排出, 可能引发液滴的卷吸与飞溅, 严重影响了滤芯滤油效率; ③对于所提出的 3 种初分离腔体优化结构与 1 种新型滤芯, 综合分析认为底部腔体入口处增加内凹弧形挡板后流场具有较高的优越性且新型滤芯具有较好的优化效果。结论认为, 对于现有储气库除油器, 应增加初分离腔体筒体直径并增加挡板折流结构以提高初分离效率, 同时应改进滤芯安装形式并降低滤芯高度以增强排液特性, 这两项改进措施具备大幅提升除油器效率的潜力, 该优化方案对压缩机润滑油回收和储气库高效运行具有重要的参考价值。

关键词: 储气库; 陕 224 储气库; 压缩机; 除油器; 初分离腔; 滤芯结构; 优化

中图分类号: TE866

文献标识码: A

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.08.012

Structural optimization of the primary separation chamber and filter element of oil separator of gas injection compressor in underground gas storage

WANG Lingzi¹, LIU Yang², ZHANG Chao², HE Jiahui², FENG Jianmei¹, PENG Xueyuan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 2. No.1 Gas Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Jingbian, Shaanxi 718500, China)

Natural Gas Industry, Vol.45, No.8, p.142-149, 8/25/2025. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Compressor unit is the key equipment in gas injection into underground gas storage (UGS). Reciprocating compressors are generally used, and they require a certain amount of lubricating oil to cool, lubricate and seal during operations. In order to remove the lubricating oil from the exhaust gas during gas injection, the rear end of the compressor is equipped with an oil separator. However, the existing oil separators are unsatisfactorily performed, leaving a higher-than-expected oil content in the exhaust gas, which directly affects the purity of the gas in the injectors, thereby resulting in oil blockage of the wellbore to seriously impede the normal operation of the gas production equipment. Based on the operation data of compressor at the Shaanxi 224 gas storage and the performance of the oil separator, this paper analyzes the two-phase flow behaviors of the primary separation chamber at the bottom of the oil separator and the filter element at the upper part of the oil separator, and presents three methods for structural optimization of primary separation chamber and a novel filter element and installation form. Finally, this paper demonstrates the good effects of optimization by adding a concave arc baffle at the entrance of the chamber and installing the novel filter element. The following results are obtained. First, the diameter of the primary separation chamber at the bottom of the oil separator is too small, and the distribution of the gas flow field is unreasonable, leading to low primary separation efficiency. Second, the filter element is vertically placed and too long, leading to non-uniform load along the filter height, so that the filter element cannot fully play its role in the height direction. Moreover, a large amount of separated lubricating oil is gathered in the lower part of the filter element and cannot be discharged, which may induce the liquid droplet enrolling and sputtering to seriously affect the efficiency of the filter element. Third, as to three structural optimization methods of the primary separation chamber and the novel filter element, the comprehensive analysis suggests that the addition of a concave arc baffle at the entrance of the chamber yields superior flow field, and the novel filter element achieves a good optimization effect. It is concluded that the existing oil separators used for UGSs should be equipped with primary separation chambers having larger diameters and be added with baffle structure to improve the primary separation efficiency. Moreover, the filter element installation form should be modified, and the filter element height be reduced to enhance the drainage properties, both hopefully to significantly increase the performance of oil separators. These optimizations are referential for recovery of lubricating oil from compressors and for efficient operations of UGSs.

Keywords: Underground gas storage; Shaanxi 224 gas storage; Compressor; Oil separator; Primary separation chamber; Filter element; Optimization

基金项目: 陕西省科技厅校企合作研发平台高校联合项目“智能化大流量液活塞氢气压缩机高性能设计及制造关键技术”(编号: 2022GXJLH-01-21)。

作者简介: 王玲子, 女, 1992 年生, 副教授; 主要从事喷油压缩机系统中油气两相分离机理研究工作。地址: (710049) 陕西省西安市碑林区太乙路街道咸宁西路 28 号。ORCID: 0009-0003-8575-728X。E-mail: wanglingzi@xjtu.edu.cn

通信作者: 冯健美, 女, 1976 年生, 教授; 主要从事压缩机及其系统内部流动传热机理与关键技术研究工作。地址: (710049) 陕西省西安市碑林区太乙路街道咸宁西路 28 号。ORCID: 0000-0001-7023-9250。E-mail: jmfeng@xjtu.edu.cn

0 引言

随着天然气行业的迅速发展，储气库作为一种安全供气、调峰的手段和天然气储存的主要方式之一，在世界各国迅速兴起^[1-4]。截至2024年，我国已建成储气库34座，设计总库容 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5]。根据经济发展趋势预测，未来中国储气库建设将迎来快速发展^[6]，因此配套储气设施的优化、建设与发展至关重要^[7]。压缩机组作为储气库的核心设备^[8-10]，目前国内主要采用往复式和离心式两种类型。由于国内储气库库容普遍较小，而往复式压缩机更适应小流量高压工况^[11]，现有增压设备多选用此类机型。

往复式压缩机运行过程中，需向气缸中喷入润滑油对活塞与气缸的接触摩擦部位进行润滑，同时也通过润滑油吸热带走部分压缩热^[12]，从而提高压缩过程的等温效率。但润滑油在为压缩机带来润滑、冷却、密封等作用的同时，也会混入压缩后的高压天然气中，随气流进入压缩机下游管道，部分附着在管道内壁上，其余进入储气库中。进入储气库的润滑油会渗透到地层的缝隙里，改变储气库的孔隙率并降低地库的储气能力，严重影响注采井生产^[13]。因此，需要在注气压缩机出口处对随排气流出的润滑油进行分离过滤。在此以前国外都采用乌克兰流程，即在压缩机出口先通过活性炭吸附润滑油蒸气，再经陶瓷过滤器过滤掉活性炭粉尘^[14]。通过对美国、法国储气库的调研发现，现有压缩机出口润滑油蒸气吸附技术已优化为仅需单一特制分离器即可高效除油，大幅简化了工艺流程^[15]。目前，国内呼图壁储气库、相国寺储气库及靖边陕224储气库均采用加拿大Propak公司提供的除油器。该设备为立式结构，底部有一定分离空间进行气液两相的初步分离，上部垂直安装六根滤芯，对小液滴进行进一步精分离。

现有运行数据显示，采用该除油器的储气库（如陕224、相国寺储气库）均存在除油效果不佳的问题。以陕224储气库为例，2015—2023年的9个注气周期中，润滑油回收率仅为35%~45%。按单台压缩机日注油量45 L计算，累计约90 m³润滑油已进入储层。这些润滑油不仅污染储层，还会在采气时随天然气返排，导致井筒和地面管线、设备故障（如测井仪器失灵、节流阀堵塞、分离器液位计浮子卡阻等），严重威胁储气库安全运行^[16]。相国寺储气库2019年亦在集注站注气球阀和注采站井口装置中检出大量润滑油^[17]。

为改善除油器性能，有学者曾尝试双滤筒和单筒

两种改进设计^[18-19]，虽出口含油率可降至 4×10^{-6} 以下，但新型分离器结构庞大复杂，且后续运行反馈表明除油效果仍不佳。另有学者提出在除油器底部采用多管旋风分离方案^[20]，但缺乏相应的流场数据结果支撑。因此，笔者对除油器含油状态以及初分离腔与滤芯的除油性能进行分析，以明确现有除油器结构的问题，确定除油器除油性能的优化方法。

1 含油状态分析

在储气库注气周期中，压缩机日均注气量为 $(80 \sim 120) \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据储层中压力的变化，压缩机的排气压力逐渐从16 MPa增加到28 MPa。排出的高温高压气体先经冷却器冷却后再进入后方除油器，根据压缩机流量与冷却器运行工况的波动，进入除油器的气液两相温度范围为20~60℃。陕224储气库3台压缩机气缸内的润滑油均使用雪佛龙生产的OEM Compressor Oil JPEC 460润滑油（密度为877~928 kg/m³）。根据中国科学院兰州化学物理研究所的测试数据，该润滑油在10~60℃温度区间的饱和蒸汽压如表1所示。

表1 润滑油不同温度下饱和蒸汽压数据表

温度/℃	10	20	30	40	50	60
饱和蒸汽压/Pa	0.81	1.06	1.25	1.38	1.59	2.13

由表1数据可知，即使在60℃的较高温度下，润滑油的饱和蒸汽压仅为2.13 Pa，表明该润滑油具有较高的热稳定性和低挥发性。假设润滑油在压缩天然气中的蒸发达到饱和状态，即润滑油蒸气在混合气中能达到最大气相组分，此时润滑油蒸气的分压占比(φ)为：

$$\varphi = \frac{p_{\text{lube},s}}{p_{\text{GM}}} \quad (1)$$

式中 $p_{\text{lube},s}$ 表示润滑油饱和蒸汽压，Pa； p_{GM} 表示压缩后天然气混合气的压力，Pa。

通过蒸汽分压占比(φ)可求得润滑油蒸气与注油量的质量比(ε)为：

$$\varepsilon = \varphi \frac{W_{\text{lube}} Q_g \rho_g}{W_{\text{NG}} Q_{\text{lube}}} \quad (2)$$

式中 W_{lube} 表示润滑油的摩尔分子质量，g/mol； W_{NG} 表示天然气的摩尔分子质量，g/mol； Q_g 表示单台压缩机的注气量，m³/d； Q_{lube} 表示单台压缩机的注油量，m³/d； ρ_g 表示天然气密度，kg/m³。

JPEC 460 润滑油是以 C15 ~ C50 深度精制矿物油为基础油的混合物。矿物油主要由碳氢化合物（烷烃、环烷烃、芳香烃）组成，其摩尔质量范围通常在 200 ~ 600 g/mol，润滑油中添加的抗磨剂的摩尔质量通常在 300 ~ 500 g/mol，因此该润滑油的摩尔质量范围为 300 ~ 500 g/mol。压缩机运行过程中，缸体外侧有较好的冷却效果，使得气缸中瞬时最高温控制在 200 °C 以内，到达排气端时，高压气体可冷却至 40 °C 左右。在此温度范围内，润滑油较难发生挥发或裂解裂化等行为^[21]。综合以上数据，再根据式（1）和式（2）计算可知，注入的润滑油中仅有 0.91% ~ 8.44% 转化为油蒸气，其余以液体形式存在于高压天然气中。理论上，液态润滑油可通过机械式分离结合聚结滤芯来去除，而现有除油器在注气周期内的平均油回收率均不足 50%，表明其结构亟待改进。

2 初分离腔结构优化分析

2.1 初分离腔中两相流动特性

根据储气库注气期间的日均注气量及气缸润滑油日均加注量可得高压天然气中液相润滑油的体积占比为 0.002% ~ 0.006%，属于稀相流动。采用欧拉—拉格朗日（Eulerian-Lagrangian）方法对初分离腔中的气液两相流动状态进行分析。

拉格朗日参考系中预测了油滴的运动轨迹，粒子运动方程为：

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{2} C_D A \rho_g (v_p - v_g)^2 + \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_g) g + F_{add} \quad (3)$$

式中 m_p 、 v_p 、 ρ_p 、 d_p 分别表示液滴的质量、速度、密度和直径； v_g 、 ρ_g 分别表示气流的速度、密度； A 表示液滴的投影面积， F_{add} 表示其他量级较小的附加力，包括热泳力、Saffman 力、虚拟质量力、Basset 力等。

C_D 表示阻力系数，具体数值如式（4）所示^[22]：

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}, & Re_p \leq 1 \\ \frac{1 + 0.15 Re_p^{0.687}}{Re_p}, & 1 < Re_p \leq 1\,000 \\ 0.44, & Re_p > 1\,000 \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$Re_p = \frac{\rho_g d_p |v_g - v_p|}{\mu_g}$$

式中 μ_g 表示气流的黏度。

考虑液滴间的聚合与破碎行为，求解液滴运动时，液滴碰撞聚合采用 O'Rourke 模型^[23] 求解，

液滴的破碎则采用泰勒破碎模型（Taylor Analogy Breakup, TAB）^[24] 求解。

底部初分离腔上方的出口为滤芯，将模型中滤芯部分的材料设置为多孔介质，多孔介质模型本质上是在动量方程中增加了动量源项，源项包含黏性损失项和惯性损失项两个部分，求解方程式如下：

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (5)$$

式中 S_i 表示第 i 个动量方程中的源项； $|v|$ 表示速度标量大小； v_j 表示流体第 j 个方向的速度矢量； D_{ij} 、 C_{ij} 分别表示根据多孔介质特性得到的矩阵 D 、 C 中的元素。

对于简单均匀的多孔介质，可将式（5）简化为：

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (6)$$

式中 α 表示渗透率； C_2 表示惯性阻力因子。

采用甲烷为工作气体，其物性参数（如密度、黏度等）基于 30 MPa、50 °C 的条件设定。分离器入口设为速度入口（入口速度为 10.3 m/s），出口为压力出口，罐体内壁面边界采用无滑移边界条件。润滑油的质量流量为 5×10^4 kg/s，液滴粒径范围为 4 ~ 1 000 μm ，平均粒径为 328 μm 。分离器内壁面为“捕获”边界，即认为到达分离器内壁面的液滴都实现了附壁分离。

采用四面体网格对除油器进行区域离散，底部筒体部分网格尺寸分别设置为 0.014 m、0.012 m、0.010 m 和 0.008 m，滤芯部分的网格为筒体部分网格尺寸的 1/2，产生的网格数量分别为 1.79×10^6 、 2.82×10^6 、 4.83×10^6 和 9.48×10^6 。计算得到除油器出口的质量流量，以除油器出口理论质量流量为基准值进行比较，结果如图 1 所示。当网格数从 4.83×10^6 增加到 9.48×10^6 时，出口质量流量变化较小，表明 4.83×10^6

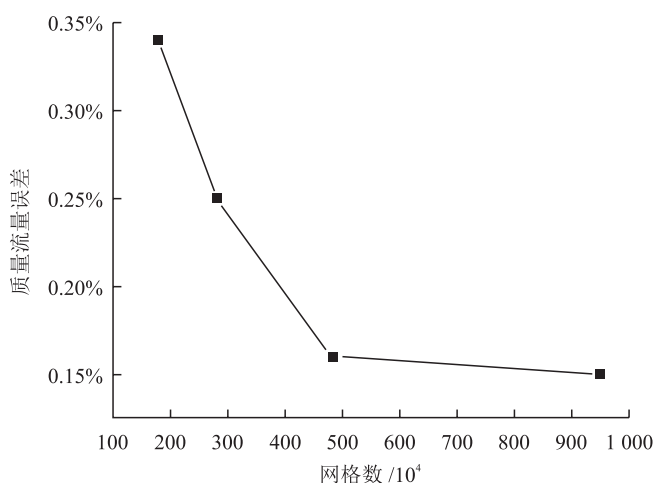


图 1 网格无关性验证图

的网格数量计算所得的流场已具备较高精度。但为进一步提高计算精度，最终选择 9.48×10^6 的网格密度。

采用瞬态计算方法，时间步长为 210^{-3} s。使用 SIMPLE 算法进行压力—速度的耦合求解，压力与动量采用二阶迎风格式进行离散，雷诺应力项则采用一阶迎风格式。

Hoekstra^[25] 通过实验研究了旋风式气液分离器的筒体流场分布。为验证本文模型的可行性，对 Hoekstra 所研究的 Stairmand 分离器进行建模，然后采用本文中的模拟模型对气相流场进行模拟。模拟结果与实验数据的对比如图 2 所示。

分离器中气液两相的流场模拟结果如图 3 所示。可以看出油气混合物从除油器入口进入初分离腔后，由于通流面积增大，在撞击到壁面之前不断向四周逸散，速度不断减小，速度方向略微向上偏移，随后撞击到远离入口一侧的壁面上，主流气体直接向上运动离开初分离腔。气流到达壁面时的速度已经明显低于入口速度，气体中携带的部分润滑油在撞击壁面前随着气流逸散，这部分润滑油很难在初分离腔中再完成分离，而是向罐体上部流动进入滤芯中，成为滤芯载荷的一部分。模拟研究中初分离腔中的分离效率约为 86%（忽略壁面液膜等因素的影响）。

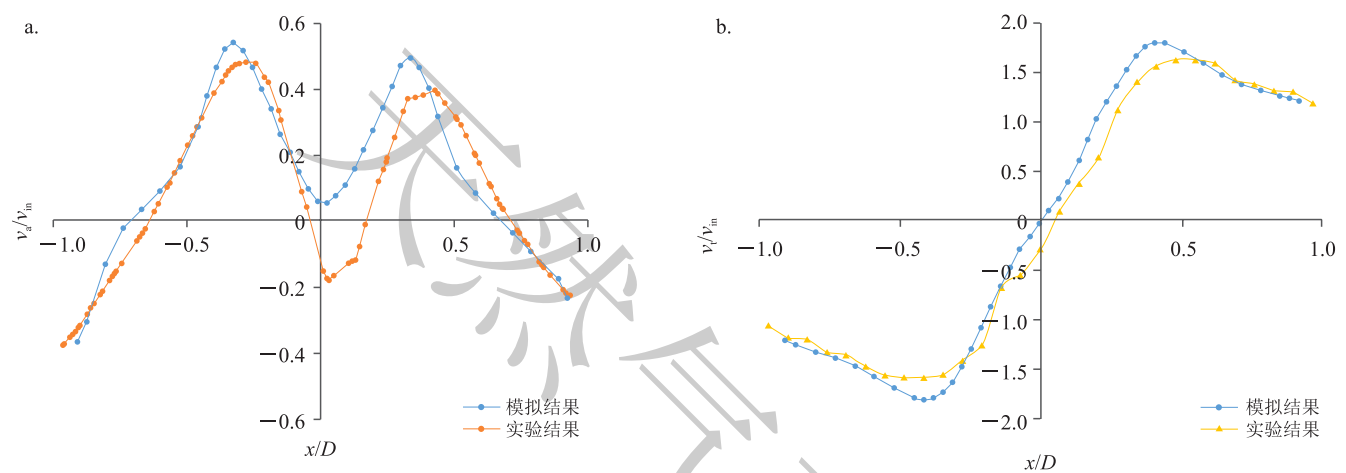


图 2 模拟实验结果对比图

（资料来源：据本文参考文献 [25]）

注： x/D 表示以筒体中心为基准的相对位置， v_x/v_{in} 、 v_r/v_{in} 分别表示筒体内轴向、径向速度与入口速度相对值。

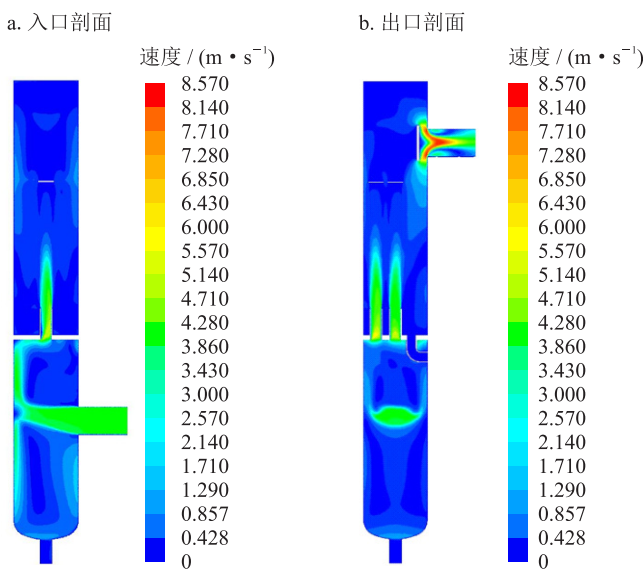


图 3 除油器轴向截面速度云图

天然气在初分离腔中分离出较大的液滴后，经除油器内部隔板上的出口进入滤芯内部进行精分离，

滤芯入口处的速度分布对滤芯的性能和使用寿命都有重要影响，由于缺少导流装置，气体在初分离腔内的流动不够充分，从而影响初分离效率，因此在对初分离腔结构进行改动时，除了提高分离效率，还需要关注滤芯入口处速度均匀性的变化。

除油器滤芯入口处的速度分布如图 4 所示，可以看出气体到达滤芯入口处时的速度均匀性较差，分布不均匀主要是气体进入分离器与罐体相撞后，会

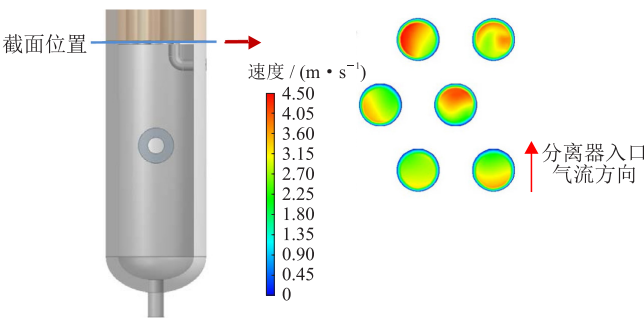


图 4 初分离腔体中的速度场与液滴浓度分布示意图

产生流动方向向上的气流,导致远离分离器入口一侧速度明显大于靠近分离器入口一侧。这意味着每支滤芯的实际负荷不同,一方面可能导致有些滤芯工作环境偏离设计工况,达不到最佳过滤效果;另一方面,可能会使各滤芯的使用寿命产生差异,从而导致有些滤芯提前失效,影响整体过滤效率^[26]。由此可见,优化初分离腔的流场不仅影响着机械分离的效率,同时对滤芯的性能也有重要影响。

2.2 初分离腔结构优化

当筒体直径增大时,筒体中的平均气流速度减小,重力沉降作用增强,分离效率提升。若在现有空间结构限制的条件下不改变筒体直径,也可对筒体内部进行结构改进,本课题组在前期研究中提出的几种结构改进方向如图 5 所示。如可在筒体入口处增加弧形挡板结构^[27],使得进入的油气两相混合物先经过冲击碰撞作用进行一次分离,再向上折流到筒体空间中后进行进一步分离。或是将筒体拉长,并将原来的入口改为切向入口,这样可以实现旋转分离,且顶部有较长的分离空间。还可以直接将底部筒体改造为旋风分离器的结构形式^[28],将内部中筒中流出的气流向上导入滤芯中进行分离。

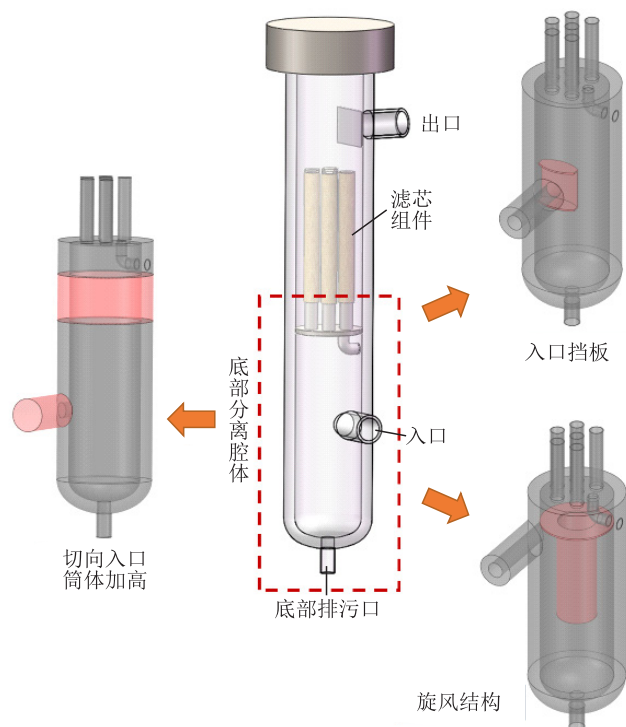


图 5 初分离腔体几种结构优化方向示意图

本课题组针对上述提出的 3 种结构形式进行了流场模拟后发现,当分别采用入口挡板方案、切向入口筒体加高方案以及旋风结构方案时,初分离的

效率分别最高可提升至 96%、98% 和 99%^[29]。但由于在初分离腔体实际改造过程中,除了分离效率本身,还需要考虑分离器压降、改造成本,以及从初分离腔进入滤芯的流场的均匀性。从重要性程度认为分离效率更重要,其次为压降,然后是改造成本,最后是进入滤芯的流场的均匀性。利用层次分析法^[30]对上述 3 种结构进行综合分析,发现筒体内部增加入口挡板的方式综合得分更高,即提高初分离腔体性能最高效可行的方式是在筒体入口内侧增加一个弧形内凹挡板。

3 滤芯结构优化与分析

3.1 滤芯机理及结构分析

气体过滤材料有多种类型,根据制备方法可分为:机织、针织和非织造过滤材料^[31]。非织造材料是指定向或者随机排列的纤维通过摩擦、抱合、黏结等方法相互结合成的片状、纤网或絮垫。非织造气体过滤材料纤维具有直径小、孔径小、孔隙率高等特点,因此其过滤效率更高、压降更低、容尘量更大,是纤维过滤材料中应用最为广泛的一种,市场份额达 70%^[32]。有较多学者从纤维流场理论分析的角度研究了纤维组合与排布方式对过滤性能的影响^[33-35],但在指导滤芯设计时,还需就过滤材料组成的滤芯整体结构进行研究。

天然气除油器中的油气分离滤芯通常为立式结构^[36],过滤材料多采用热气过滤介质^[37],由凝聚层和排液层两部分组成,内外通过支撑骨架包裹^[38]。凝聚层通常采用孔径较小的纤维层(如玻璃纤维),其弯曲交错的孔隙流道有利于小液滴的拦截与凝聚,并促进其扩散聚合成大油滴;排液层通常由大孔径纤维材料组成(如工业滤布、针刺毡等),主要起到促进聚并后的大液滴排出滤材的作用^[39],同时可在外侧起到保护聚结滤材的作用。

3.2 滤芯内流场与低效分析

单纯滤材优化后的滤芯提升了回油率,但其最高值仍不到 50%,且样件滤芯在储气库现场的使用效果远低于实验室测得的 94%。原因主要有两方面:①由于初分离腔结构不合理(如 2.2 节所述),滤芯承担整个除油器的载荷,负担过重;②储气库现场应用的滤芯高度较高,可能导致气液两相流场不合理。为此,基于 2.1 节中气相流场的数值模拟方法,对储气库滤芯中的流场进行模拟。在储气库实际运行工

况下，每支滤芯入口速度约为 $0.5 \sim 3.0 \text{ m/s}$ ，通过流场模拟研究得到，该种情况下滤芯的主流速度场主要集中在滤芯的下 $1/3$ 处，即气液两相流向上冲击流动时难以到达滤芯上部，这使得要分离的高压天然气较多从滤芯底部逸散出，而上半部的滤芯未能有效参与分离，最终造成滤芯的整体效率较低。

根据滤芯的工作原理，聚并形成的大液滴会顺着拦截层向下流动，因此，除调整滤材排布方式^[40-41]外，研究表明滤芯底部油滴可能引发卷吸夹带现象，进一步降低分离效率^[42]。由此可见，现有滤芯的结构存在明显缺陷：长度过长且立式布置限制了效率提升，需通过长度优化和结构改进解决。

3.3 滤芯结构优化与结果分析

针对滤芯工作运行中的问题，本文提出了一种适用于现有储气库分离器的新型滤芯结构与安装方式（图 6），能够在尽可能少地改动除油器结构的情况下通过改进滤芯的装配方式来提高除油器的油回收率。如图 6 所示，新型滤芯采用顶部带盖的套筒式结构，原来的矮柱式支撑管向上拉长到接近除油器出口处，且支撑管上开有多个小孔，小孔分布从下至上逐渐加密，这些小孔可以起到均匀流场的作用，使得进入支撑管的气流沿轴向均匀分布而避免大量气体拥堵在滤芯底部。

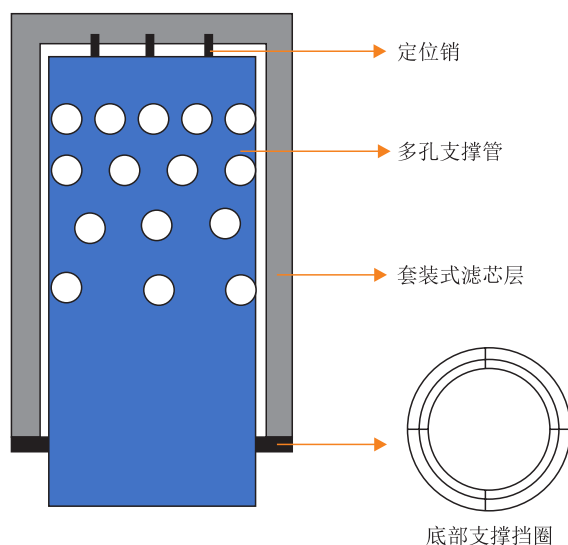


图 6 新型滤芯结构图

表面设置多孔结构后，支撑管内的速度场如图 7 所示。可以看出滤芯中筒侧面的气流速度沿着轴向更加均匀，中筒外侧流出的气流速度，也即进入滤芯过滤层中的气流速度更加统一，这种情况下滤芯的利用率更高，流场更加均匀。滤芯通过套装的方式扣入

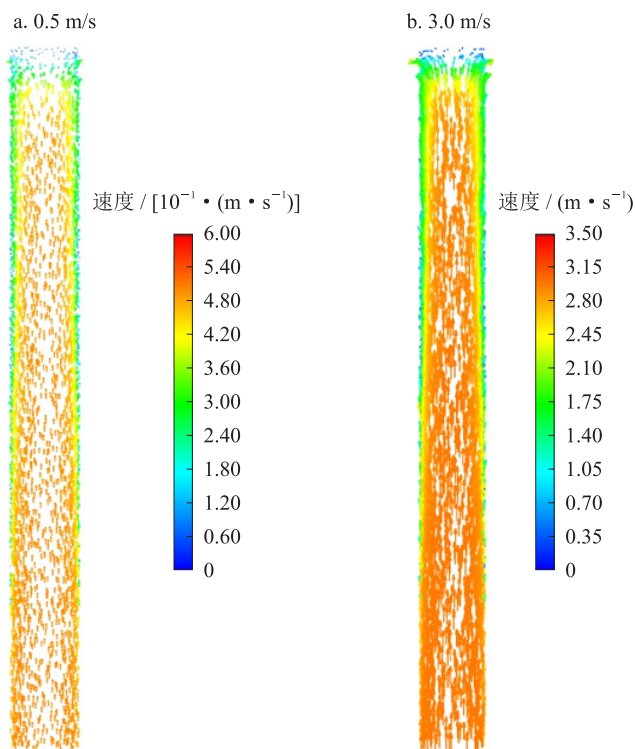


图 7 支撑管结构改进后 2 种不同入口速度下滤芯中心筒内部速度场示意图

支撑管上，从小孔中流出的气流在支撑管与滤芯层的间隙中进一步混合均匀再进入滤芯层中，这样可以使得支撑管中进入滤芯层的速度沿纵向更加均匀，提升滤芯的利用效率。套装的方式使得滤芯更换与安装更加便捷，且拉长的内部支撑管使得滤芯安装后更加稳固，配合顶部的定位销，既能避免滤芯发生旋转，还能留有一定加工误差余量。

4 结论与建议

1) 注入的润滑油 90% 以上以液体形式存在于高压天然气中，理论上几乎所有的润滑油均可通过基于机械式分离与滤芯过滤原理的除油器来去除，而现有的除油器回收率仅为 40% 左右，表明现有除油器结构不合理，性能不完善，亟需进行结构改进。

2) 初分离腔体因筒体直径较小，导致大液滴难以沉降；同时由于缺乏挡板等折流结构，液滴仅在运动至后部筒壁时才能附着分离，致使整体效率较低。建议通过增大筒体直径以改善液滴沉降特性，并适当增设折流结构来进一步提升初分离效果。

3) 针对除油器上部空间的精分离滤芯，现有设计存在滤芯长度过长的问题，再结合内进外出立式安装方式，使得滤芯在储气库运行工况下，中下部

负载过大且底部壁面可能发生液滴夹带与卷吸飞溅,因此应适当降低滤芯高度,并改进其结构形式,使得滤芯侧面的流场速度分布更加均匀。

4) 本文提出了一种新型套装式滤芯结构,不仅减小了安装难度还使得滤芯在筒体中固定更稳定,同时流场分析的结果也显示整根滤芯在高度方向上流速分布更均匀,可显著提高滤芯效率,这一创新设计为滤芯结构形式及安装方式的优化提供了改进方向。

参 考 文 献

- [1] AL-SHAFI M, MASSARWEH O, ABUSHAIKHA A S, et al. A review on underground gas storage systems: Natural gas, hydrogen and carbon sequestration[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 6251-6266.
- [2] 曾大乾, 张俊法, 张广权, 等. 中石化地下储气库建库关键技术研究进展[J]. *天然气工业*, 2020, 40(6): 115-123.
ZENG Daqian, ZHANG Junfa, ZHANG Guangquan, et al. Research progress of Sinopec's key underground gas storage construction technologies[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(6): 115-123.
- [3] 糜利栋, 张睿, 曾大乾, 等. 在产气藏季节调峰选区评价体系及标准[J]. *天然气工业*, 2025, 45(2): 73-83.
MI Lidong, ZHANG Rui, ZENG Daqian, et al. Evaluation system and standard of seasonal peak-shaving and area selection for gas reservoirs under production[J]. *Natural Gas Industry*, 2025, 45(2): 73-83.
- [4] 中国石化经济技术研究院产业发展研究所. 国内天然气市场供应充足前景向好[N]. *中国石化报*, 2025-01-20(05).
Institute of Industrial Development, Sinopec Economic and Technical Research Institute. The domestic natural gas market has an abundant supply and a promising outlook[N]. *China Petrochemical News*, 2025-01-20(05).
- [5] 周代余, 张亮, 伍藏原, 等. 油藏型储气库有效库容量设计方法研究——以东河1石炭系油藏为例[C]. 中国石油学会天然气专业委员会, 第四届中国储气库科技创新与产业发展国际学术论坛论文集. 北京: 中国石化出版社, 2024: 9-14.
ZHOU Daiyu, ZHANG Liang, WU Zangyuan, et al. Study on effective storage capacity design method of oil reservoir type gas storage—Taking Donghe 1 Carboniferous reservoir as an example [C]. *Proceedings of the Fourth China International UGS Science & Technology Innovation and Industry Development Academic Forum*, Natural Gas Committee of Chinese Petroleum Society, 2024: 9-11.
- [6] ZHANG Jindong, TAN Yufei, ZHANG Tiantian, et al. Natural gas market and underground gas storage development in China[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 29: 101338.
- [7] 龙雪梅. 我国天然气储气设施发展现状及路径选择[J]. *化学工程与装备*, 2024(2): 164-166.
LONG Xuemei. Development status and path selection of natural gas storage facilities in China[J]. *Chemical Engineering and Equipment*, 2024(2): 164-166.
- [8] 赵京艳, 葛凯, 褚晨耕, 等. 国产天然气压缩机应用现状及展望[J]. *天然气工业*, 2015, 35(10): 151-156.
ZHAO Jingyan, GE Kai, CHU Chengeng, et al. Current application and prospects of China-made natural gas compressors[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 151-156.
- [9] 于奇. 双台子储气库压缩机选型及运行分析[J]. *石油工程建设*, 2023, 49(4): 22-25.
YU Qi. Selection and operation analysis of compressor in Shuangtaizi gas storage[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2023, 49(4): 22-25.
- [10] 李雪源, 陈家文, 蒋春健. 储气库大功率注气压缩机的技术对比[C]//第33届全国天然气学术年会(2023)论文集(05 新能源及节能减排). 成都: 中国石油学会天然气专业委员会, 2023: 215-223.
LI Xueyuan, CHEN Jiawen, JIANG Chunjian. Technical comparison of high-power gas injection compressors in gas storage facilities[C]//*Proceedings of the 33rd National Natural Gas Academic Annual Conference (2023) (05 New Energy and Energy Conservation and Emission Reduction)*. Chengdu: Natural Gas Committee of Chinese Petroleum Society, 2023: 215-223.
- [11] 梁俊逸. 储气库增压技术现状及发展趋势[J]. *化工管理*, 2024(31): 103-105.
LIANG Junyi. Current situation and development trend of gas storage pressurization technology[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2024(31): 103-105.
- [12] XU Jiu, HRNJAK P. Impinging oil separator for compressors[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 119: 110-118.
- [13] 陈月娥, 赵勇, 王先朝. 呼图壁储气库 KBU-6 注气压缩机适应性改造[J]. *化工管理*, 2015(11): 16.
CHEN Yue'e, ZHAO Yong, WANG Xianzhao. Adaptability renovation of KBU-6 gas injection compressor in Hutubi gas storage[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2015(11): 16.
- [14] 郭洪霞. 微量油水体处理用活性炭性能评价体系构建研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
GUO Hongxia. Study on performance evaluation system of activated carbon for water treatment of trace oil[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [15] 崔红霞. 天然气地下储气库地面配套工艺技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2003.
CUI Hongxia. Research on surface matching technology of underground gas storage[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2003.
- [16] 檀朝东, 武艳红, 周华兴, 等. 储气库生产运行安全监控技术现状及发展趋势[J/OL]. *世界石油工业*, 2025: 1-11[2025-06-17]. <https://doi.org/10.20114/j.issn.1006-0030.20250106003>.
TAN Chaodong, WU Yanhong, ZHOU Huaxing, et al. Present situation and development trend of safety monitoring technology for production and operation of gas storage[J/OL]. *World Petroleum Industry*, 2025: 1-11[2025-06-17]. <https://doi.org/10.20114/j.issn.1006-0030.20250106003>.
- [17] 李雪源, 雷达, 冷海默, 等. 相国寺储气库除油器运行效果分析[J]. *石油管材与仪器*, 2019, 5(2): 66-68.
LI Xueyuan, LEI Da, LENG Haimo, et al. Operation effect of oil remover in Xiangguosi gas storage[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2019, 5(2): 66-68.
- [18] 禹贵成, 黎明. 相国寺储气库新型除油器设计方案探讨[J]. *产业与科技论坛*, 2019, 18(24): 59-61.
YU Guicheng, LI Ming. Discussion on the design scheme of

- a new type oil remover for Xiangguo Temple gas storage[J]. Industrial & Science Tribune, 2019, 18(24): 59-61.
- [19] 曹洪亮. 高压除油器的研发与应用[M]. 四川: 成都伊斯顿过滤器有限公司, 2020.
- CAO Hongliang. Research and application of high-pressure oil remover[M]. Sichuan: Chengdu Easton Filter Co., LTD., 2020.
- [20] 高继峰, 银永明, 公明明, 等. 储气库注采工艺优化研究与应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 126-135.
- GAO Jifeng, YIN Yongming, GONG Mingming, et al. Research and application on optimization of injection production process for underground gas storage[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(1): 126-135.
- [21] 陈志忠, 华秀菱, 廖丰斌, 等. 油气润滑油抗结焦性能的研究[J]. 润滑油, 2024, 39(3): 21-24.
- CHEN Zhizhong, HUA Xiuling, LIAO Fengbin, et al. Study on the anti-coking properties of oil and gas lubricants[J]. Lubricant Oil, 2024, 39(3): 21-24.
- [22] YANG Laishun, WANG Jianxing, SUN Xianhang, et al. Multi-objective optimization design of spiral demister with punched holes by combining response surface method and genetic algorithm[J]. Powder Technology, 2019, 355: 106-118.
- [23] O'ROURKE, JOHN P. Collective drop effects on vaporizing liquid sprays[D]. Ann Arbor: Princeton University, 1981.
- [24] WANG Lingzi, FENG Jianmei, GAO Xiang, et al. Investigation on the oil-gas separation efficiency considering oil droplets breakup and collision in a swirling flow[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 117: 394-400.
- [25] HOEKSTRA A J. Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators[D]. Delft: Delft University of Technology, 2000.
- [26] HU Xiao, PENG Zeyu, CHEN Da, et al. Optimization of an oil-gas separator of gas storage compressor with consideration of velocity uniformity in filter inlets[J]. Energies, 2023, 16(24): 8015.
- [27] ZHANG Jing, GE Zhongyi, WANG Wei, et al. The concave-wall jet characteristics in vertical cylinder separator with inlet baffle component[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, 42: 178-189.
- [28] HOFFMANN A C, STEIN L E. Gas cyclones and swirl tubes: Principles, design and operation[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2008.
- [29] WANG Lingzi, HU Tao, XUE Gang, et al. Performance investigation and optimization of the primary separation part of the oil-gas separator[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62(25): 9797-9811.
- [30] 黄开华, 陶冶, 何顺安, 等. 中型规模压缩空气储能系统用离心式压缩机与往复式压缩机选型比较[J]. 压缩机技术, 2024(2): 41-45.
- HUANG Kaihua, TAO Ye, HE Shun'an, et al. Comparison of type selection between centrifugal compressors and reciprocating compressors for medium scale compressed air energy storage systems[J]. Compressor Technology, 2024(2): 41-45.
- [31] KIM S C, HARRINGTON M S, PUI D Y H. Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007.
- [32] 王哲. 多级结构微纳米纤维的结构调控及其空气过滤性能[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.
- WANG Zhe. Structure regulation of herarchical micro-/nano-scale fibers and their performance of air filtration[D]. Suzhou: Suzhou University, 2017.
- [33] CAO Bowen, WANG Shilong, DONG Wei, et al. Investigation of the filtration performance for fibrous media: Coupling of a semi-analytical model with CFD on Voronoi-based microstructure[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 251: 117364.
- [34] JIN Xinming, YANG Lijun, DU Xiaozhe, et al. Modeling filtration performance of elliptical fibers with random distributions[J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(4): 1193-1201.
- [35] LI Wei, SHEN Shengnan, LI Hui. Study and optimization of the filtration performance of multi-fiber filter[J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27(2): 638-645.
- [36] 赵炯闻. 天然气滤芯实际性能退化的实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- ZHAO Jiongwen. Experimental study on degradation of natural gas filter performance[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [37] HEIDENREICH S. Hot gas filtration: A review[J]. Fuel, 2013, 104: 83-94.
- [38] 杨瑞文, 梁涛, 张青杰, 等. 油液过滤器滤芯骨架的强度与稳定性分析[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(1): 56-62.
- YANG Ruiwen, LIANG Tao, ZHANG Qingjie, et al. Analysis on strength and stability of oil filter cartridge skeleton[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2025, 45(1): 56-62.
- [39] 李玮璞, 陈锋, 孙勇, 等. 高气速下疏油型聚结滤芯的性能分析及优化[J]. 油气储运, 2023, 42(7): 817-825.
- LI Yipu, CHEN Feng, SUN Yong, et al. Performance analysis and optimization of oleophobic coalescing filter element at high gas velocity[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(7): 817-825.
- [40] 张云德, 王龙, 侯亚龙, 等. 压缩机润滑油雾滤芯过滤性能分析与改进研究[J]. 过程工程学报, 2023, 23(3): 421-429.
- ZHANG Yunde, WANG Long, HOU Yalong, et al. Analysis and improvement of filtration performance of filter element for compressor lubricating oil mist[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2023, 23(3): 421-429.
- [41] 黄壮壮. 气液聚结滤芯结构改进及过滤气速影响分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- HUANG Zhuangzhuang. Structure improvement of gas-liquid coalescence filter element and influence analysis of filtration gas velocity[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.
- [42] 谢鹏. 储气库除油滤芯过滤性能实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- XIE Peng. Experimental study on filtration performance of filter element for lubricating oil separation in underground gas storage[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.

(修改回稿日期 2025-06-03 编辑 张晓雪)



本文互动