

# 天然气长输管线低压运行和分离器合理化运行

杨峰峰 马延惠 裴燕燕 李林君 白 杨 (青海油田分公司输油气公司, 青海 格尔木 816000)

**摘要:** 分离器是实现天然气气液固有效分离、保障输气质量的重要内容。本文围绕天然气长输管线低压运行特性, 系统分析低压工况对分离器的影响因素, 重点探讨分离器在参数优化、结构适应等方面的技术路径, 并提出面向低压工况的分离器合理运行思路, 为长输管线精细化、安全经济运行提供技术参考。

**关键词:** 天然气; 长输管线; 低压运行; 分离器; 合理化运行

**中图分类号:** TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 009-0121-03

## Low-pressure operation of long-distance natural gas pipelines and rational operation of separators

Yang Fengfeng, Ma Yanhui, Pei Yanyan, Li Linjun, Bai Yang (Oil and Gas Transportation Company, Qinghai Oilfield Branch, Golmud Qinghai 816000, China)

**Abstract:** The separator is a crucial component for effectively separating gas, liquid and solid in natural gas and ensuring the quality of gas transmission. This paper systematically analyzes the influencing factors of the separator under low-pressure operation conditions of long-distance natural gas pipelines, focuses on discussing the technical paths in parameter optimization and structural adaptation of the separator, and proposes reasonable operation ideas for the separator under low-pressure conditions, providing technical references for the refined, safe and economic operation of long-distance pipelines.

**Keywords:** Natural gas; Long-distance pipeline; Low-pressure operation; Separator; Rational operation

随着管网互联互通水平的提高, 长输管线在部分工况下面临低压运行常态化趋势, 由此影响了站场分离器的适应性。分离器是保证管道安全运行的关键设备, 运行参数、投用方式等直接关系到系统能耗、运行风险。因此, 研究低压运行条件下分离器合理化运行方式, 能够优化管网运行模式, 提高设备安全水平。

### 1 天然气长输管线低压运行工况特征

天然气长输管线低压运行工况, 通常指系统在低于设计压力 30%-50% 的稳态条件下运行, 呈现出区别于常规高压运行的鲜明物理特征, 主要体现在以下三个方面:

①流动特性转变与输气能力约束: 低压运行首要特征是气体密度显著下降, 在相同温度下, 压力降低会直接减低气体密度, 从而会限制质量流量, 降低实际输送天然气的质量, 同时还会改变流速分布, 流动发展为充分发展的湍流, 改变了摩擦阻力特性。

②热力学与能量传输特性演变: 低压运行改变了管道的热力平衡, 使得焦耳-汤姆逊效应减弱, 降低了管道内因节流造成的冰堵风险。同时也会增强气体与管壁及环境的热交换作用, 使环境温度波动对管内气体温度更为敏感, 增加沿线温度分布的控制复杂度。

③系统压力与能量分布扁平化: 低压工况下, 管道沿线的压力梯度趋于平缓, 降低起始压力水平, 减少可供消耗的压力能。由此可见, 低压运行能引起一

系列连锁变化, 形成一个与高压设计工况迥异的新运行环境, 为后续下游设备运行提供了入口条件。

### 2 分离器合理化运行理论基础

#### 2.1 分离器工作原理

离心式分离器的核心工作原理是利用高速旋转产生的强大离心力场, 分离气、液、固。当携带着固体颗粒的天然气进入分离器筒体后, 气流在特定结构的导流作用下形成高速旋转运动。在旋转流场内, 密度远大于气体的固体颗粒, 会受到远比重力大数百倍的离心力作用, 从而让这些杂质颗粒沿径向朝筒体外壁运动, 并最终聚集在壁面。随后, 液膜在重力作用下沿壁面向下流入集液腔, 完成分离。与此同时, 被净化后的气体则沿轴向向低压区向中心汇聚, 并由顶部出口排出。其优势是高处理强度与对小粒径颗粒的良好捕集能力。

#### 2.2 影响分离效率的关键因素

分离器能否实现合理化运行, 根本上取决于能否在动态工况下维持高效的分离能力。分离效率是衡量其性能的核心指标, 主要受三类关键因素的影响。

①从设备自身看, 结构与尺寸奠定了效率的基础。其中, 筒体直径决定了离心力场的强度, 影响颗粒的分离轨迹。入口设计决定了气流旋转的初始能量。内部构件的布置, 精细调控着流体的运动路径, 是实现高效分离的物理载体。

②更重要的变量来自操作条件。入口流速是核心控制参数，流速过高会加剧湍流，出现已分离颗粒的二次夹带现象；流速过低则会削弱离心力，改变气体密度与粘度，直接削弱基于密度差的分离驱动力。

③被分离介质的特性定义了分离任务的难度。液滴或固体颗粒的粒径分布是最主要的影响因素，分离器通常对特定粒径范围的颗粒具有较高捕集效率。颗粒的浓度、形状等，也会通过影响碰撞、聚并等微观机制，改变最终的分离效果。因此，合理化运行是在明确设备物理极限的前提下，动态优化操作参数，主动适应介质特性的变化，让其在整个运行周期内维持高效、稳定的分离性能。

### 3 低压运行对分离器运行的核心影响

天然气长输管线处于低压运行模式时，下游分离器的运行环境会出现变化，影响分离性能。其中，低压运行会降低气体密度，缩短分离器内部气液固的密度差，影响重力沉降。低压运行还改变了气体的流动特性，影响分离器内部流场的稳定性，干扰分离过程。低压工况下，气体与管壁的热交换作用会增强，影响分离器内部温度，也影响分离器的操作参数，降低气体密度，进而减慢重力沉降过程中液滴的下沉速度，延长分离时间，降低分离效率。

## 4 天然气长输管线分离器合理化运行优化方案

### 4.1 面向低压工况的运行参数优化

#### 4.1.1 基于性能模型的参数自适应调节

针对低压工况下分离器运行效率不稳定的问题，施工单位需搭建动态关联模型，调节相关参数。实际操作中，该模型要实时捕捉分离器进出口流量变化，结合以往运行数据，掌握分离效率的波动规律，进而依据当前实际工况，灵活调整设备操作参数，保证分离器在低压环境下维持较高的分离效果。除此之外，模型中要设置反馈修正机制，能够依据现场实际分离结果，不断修正参数预测数值，形成闭环管控，保证参数调节的准确性。

#### 4.1.2 多台并联分离器的智能负荷分配

在多台分离器并联运行的场景中，施工单位需结合每台分离器的实际处理能力，配套安装高精度流量计，实时采集每台分离器关键运行数据，并同步上传到中央控制系统开展分析。中央控制系统结合实时数据，对照预设分离效率目标，计算各台分离器的最优负荷分配比例，自动规避低效运行区域，保证每一台分离器都能在高效运行区间工作，从而提高整个并联系统的整体分离效率。同时，系统要不断总结历史运行数据中的规律，持续优化负荷分配策略，灵活适配不同工况下的分离作业需求，进一步提高运行的合理

性。

### 4.2 分离器内部过程与结构优化

面对低压工况，单单调整操作参数往往不够。施工单位需要深入分离器内部，优化流动过程与核心结构，从根本上提高其运行效能。实际操作中，优化要从流场调控开始。低压下气体密度降低，常规导流叶片产生的旋流强度可能不足。此时，施工单位要优化叶片角度，在入口动能不变的情况下，增强旋转流场的稳定性，有效补偿因密度下降带来的分离动力损失。对于重力分离区，可优化稳流折板，抑制湍流，为液滴聚并创造更平静的环境，减少二次夹带。

另外，施工单位也要重新布置内部构件。除雾元件是捕获细微液滴的最后一道屏障，在低压下，可组合应用高效叶片式除雾器，针对特定粒径范围实现高效拦截。同时优化排液口结构，增设防涡流挡板，优化其与集液槽的衔接，保证在较低气液动量比下仍能实现顺畅、稳定的液体排放。还有关键部位的材质升级同样重要。针对低压可能加剧的液相腐蚀风险，可在集液区、内部构件表面采用耐蚀合金涂层，延长设备寿命，维持内壁光滑度，保证流场设计的长期有效性。

利用这一“流场-构件-材料”三位一体的优化，能够系统性地强化分离器在低压下的“体质”，让其内部过程重新适应新的工况，为外部的参数优化提供稳定的物理基础，是实现长久、合理化运行的关键支撑。

### 4.3 系统配置与工艺链协同

天然气长输管线低压运行工况下，分离器的合理化运行除了依赖单体设备性能外，还依赖系统级的配置协同和工艺链的整合重构。因此，施工单位需要建立面向低压环境的分离系统优化配置框架，借助工艺链重组与动态协同控制，提高全系统运行效率。

#### 4.3.1 多级分离工艺链的适应性配置

针对低压运行工况的工艺特性，施工单位需建立“离心预分离-高效离心精细分离-深度聚结”的三级梯度分离工艺链。参照《天然气净化厂设计规范》的技术要求，一级分离采用高效旋风分离单元，分离出粒径 $> 50\mu\text{m}$ 的液滴；二级配置改进型导叶式离心分离器，处理 $10\text{--}50\mu\text{m}$ 粒径范围的液滴；三级采用纤维聚结分离器作为保障单元，确保出口气体符合《天然气净化厂设计规范》中液态烃含量 $\leq 5\text{mg}/\text{m}^3$ 的要求。压力低于 $1.6\text{MPa}$ 时，该工艺链组合能够提高整体分离效率。

#### 4.3.2 系统协同运行与动态调控

施工单位要基于实时工况的分离负荷分配模型：

当系统压力降至设计值的 70% 时, 自动启动低压运行模式, 调整各级分离器的并联运行数量, 让各单元负荷率维持在 75%–90% 的最佳效率区间。同时建立分离系统与压缩机组、计量装置的联动控制策略。当检测到入口压力波动超过  $\pm 10\%$  时, 分离控制系统会自动调整运行参数, 向压缩机组发送协同指令。具体实施中, 施工单位要建议采用模块化设计思路, 将分离系统划分为若干标准处理单元, 要求每个单元配备独立的监测控制系统, 利用分布式控制系统实现单元间的智能协同。

经过上述系统配置优化和工艺链协同, 能够提高低压工况下的分离性能, 降低系统整体运行成本, 为实现天然气长输管线分离器的合理化运行提供切实可行的技术路径。

#### 4.4 智能化运行与决策支持

该体系旨在利用数据驱动, 将分离器转变为具有感知、分析、决策与执行能力的智能实体。施工单位要先建立高保真的分离器数字孪生体, 整合实时数据, 实时映射设备的内部压力、流速分布等。如可依据《中华人民共和国安全生产行业标准》, 分析 DCS 实时操作数据与在线气相色谱仪的测量结果, 动态校正孪生模型, 保证其预测精度, 实现对分离效率衰减、内部结垢等状态的早期预警。接着, 施工单位要基于历史运行数据库, 开发以“效率–能耗–安全”为多目标的实时优化决策算法。

系统需自动寻优, 给出最优操作参数组合建议, 并可直接要求控制系统执行, 形成“感知–优化–执行”的闭环, 在保证分离效果的前提下实现节能。平台除了提供实时监控与预警外, 还要积累故障案例, 形成可共享、可迭代的分离器运行知识库。借助机器学习算法, 系统能持续从运行数据中学习, 不断优化控制策略, 让分离器的运行管理向“数据与知识双轮驱动”的演进, 最终实现长周期安全、高效的自主化运行。

#### 4.5 预测性维护与经济性运行

低压运行条件下, 传统的定期维护模式已无法适应动态变化的运行工况, 因此, 施工单位要建立预测性维护体系, 保证设备长期可靠运行。

##### 4.5.1 基于状态监测的预测性维护

施工单位需在分离器关键部位布设高精度传感装置, 采集设备运行过程中的各类参数, 依托中央数据分析平台处理数据。同时引入机器学习算法, 建立适配分离器的健康状态评价体系, 精准捕捉设备早期劣化特征, 预判潜在故障。此外, 结合数字孪生技术搭建分离器虚拟仿真模型, 利用多场景仿真运算优化维护策略, 科学确定合理维护周期, 最大限度压缩停机

时长, 降低控制设备的维护成本。

##### 4.5.2 经济运行优化模型

施工单位需围绕全生命周期, 设计成本最小化优化模型, 提高经济性。该模型围绕分离器运行成本, 借助集成低压工况下的分离效率预测模块, 动态评估不同操作参数影响成本的因素。具体实施中, 模型可调用实时工况数据, 运用混合整数非线性规划算法, 在满足分离效率约束的前提下, 自动生成最优运行参数集, 并利用模型内置经济性分析功能, 量化天外部因素对运行成本的影响程度, 为管理人员提供决策支持。通过与预测性维护模块的联动, 该模型还能在设备性能衰减初期调整运行策略, 延缓性能下降速率, 降低全生命周期运行成本。

#### 5 结束语

天然气管网进入精细化运营阶段, 分离器合理化运行成为支撑长输管线低压运行的重要抓手。未来, 施工单位需结合气质变化、站场功能, 将分离器运行策略融入管网调度, 并借助差异化管理, 实现控制安全风险, 为天然气长输管线高质量运行提供坚实支撑。

##### 参考文献:

- [1] 毕成, 张伟卫, 负柯, 尹融, 李鹤, 杨旭, 王博, 杨铭杨. 天然气长输管道延性裂纹扩展概率及使用寿命预测 [J]. 工业安全与环保, 2025(11):21-23.
- [2] 邓琅, 张计春, 邓荣, 刘宇. 基于超音速分离器的高压天然气井口降压装置冷凝分析 [J]. 机械设计与研究, 2025,41(05):262-266+273.
- [3] 刘金苹, 王刚, 刘历美, 许凯, 赵德良, 尹冲, 袁超青, 何孟桥, 李国庭. 基于人工智能与大数据的天然气长输管线选址与方案分析——以山东管网北干线为例 [J]. 山东国土资源, 2025,41(09):77-81.
- [4] 王欢欢, 罗召钱, 王博, 郑榕, 唐秋平, 肖毅, 陈乐融. 天然气集输管线结垢机理及防垢剂复配研究 [J]. 当代化工, 2025,54(04):833-838.
- [5] 杨树莲, 王建纯, 方群, 米立和. 剖析三相分离器压液故障原因及处理 [J]. 河北企业, 2023(07):158-160.
- [6] 刘轩佐, 李斗. 国产离心式管线压缩机在天然气长输管线中的应用与优化研究 [J]. 中国设备工程, 2024(24):71-73.
- [7] 陈兰亮. 天然气长输管线内表面管材焊缝余高对缺欠检出的影响 [J]. 石油化工建设, 2022,44(01):108-109.
- [8] 刘绪猛, 王国伟. 天然气长输管线工程项目建设及技术分析 [J]. 大众标准化, 2021(16):31-33.
- [9] 郝飞行, 刘珊珊, 钟景. 强化石油天然气长输管线安全管理建设思考 [J]. 化工设计通讯, 2021,47(07):15-16.