

不同天然气脱水工艺技术经济性对比分析与优选研究

张 雨 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 天然气脱水是防范管道腐蚀及水合物形成的关键步骤, 其工艺选取会直接对工程投资以及运行效率产生影响。本文着重对TEG法、分子筛法以及膜分离法这三种主流的脱水工艺展开研究, 搭建涵盖“技术指标+经济指标”的综合评估体系, 从脱水深度、处理能力、适应性能等层面, 以及初始投资、运行成本、生命周期成本等经济层面展开比较分析, 并结合层次分析法构建工艺优选模型, 为天然气脱水工艺的工程选型事宜给予科学性依据。

关键词: 天然气脱水工艺; 技术经济性; 对比分析; 工艺优选

中图分类号: TE646 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 031-0057-03

Comparative Analysis and Optimal Selection of Economic Benefits of Different Natural Gas Dehydration Processes

Zhang Yu (Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: Natural gas dehydration is a key step in preventing pipeline corrosion and hydrate formation, and its process selection will directly affect engineering investment and operational efficiency. This article focuses on the research of three mainstream dehydration processes: TEG method, molecular sieve method, and membrane separation method. A comprehensive evaluation system covering “technical indicators+economic indicators” is established, and comparative analysis is carried out from the aspects of dehydration depth, processing capacity, adaptability, as well as initial investment, operating costs, life cycle costs and other economic aspects. A process optimization model is constructed using the Analytic Hierarchy Process to provide scientific basis for the engineering selection of natural gas dehydration processes.

Keywords: natural gas dehydration process; Technical economy; Comparative analysis; Process optimization

1 天然气脱水工艺基础认知

1.1 主流天然气脱水工艺类型及原理

当下, 在天然气行业应用范围最广泛的有三类脱水工艺, 其核心原理以及技术路径存在明显差异: 其一为TEG法, 此技术借助三甘醇溶液的较强吸水性, 使其与原料气在吸收塔内逆向接触, 在此过程中, TEG分子与水分子会形成氢键, 从而达成水分吸收的目的。吸收水分后的富液会经过再生塔加热, 以此脱除水分, 进而再生成为贫液并循环使用, 该工艺是目前成熟度最高、应用最广的大规模脱水技术。其二为分子筛法, 该方法采用4A或者13X型的分子筛作为吸附剂, 凭借分子筛多孔结构的选择性吸附, 于常温高压条件下对原料气中的水分予以吸附。一旦吸附剂饱和后, 借助加热或者降压的方式达成再生, 进而构成“吸附-再生”的循环模式, 其核心优势是脱水深度高, 可满足严苛的露点要求。其三为膜分离法, 其原理是借助高分子膜在水分以及天然气各组分渗透速率方面的差异, 让原料气在压力差的推动作用下, 流经膜组件, 在此过程中, 水分子快速渗透通过膜孔被富集脱除, 而像甲烷这类烃类组分则会被截留, 该工艺无需再生环节, 设备模块化程度高, 适合分散式、中小规模脱水场景。

1.2 工艺技术核心特征

适用场景的差异由三类工艺的核心技术特征决定:

TEG法的技术关键在于吸收与再生效率, 普通TEG溶液能够将天然气露点降低到-40℃, 通过添加消泡药剂、防止结垢药剂, 能够增强运行的稳定程度, 不过它对原料气中的含硫量敏感, 一旦含硫量超出范围, 就会加快TEG的降解速度, 加大药剂的损耗以及设备被腐蚀的可能性。分子筛法的主要特点体现于脱水深度以及吸附周期, 性能优良的分子筛能够将天然气的露点降低到-80℃以下, 如此便能契合LNG原料气以及长输管道高压力两类场景的使用要求。吸附剂对原料气组分有较强适应能力, 并且在经过再生处理后其吸附容量的衰减比例较低。

然而, 单套分子筛装置的处理能力存在限制, 因此需要将多组吸附塔并联操作, 以此提高整体的处理量。膜分离法的关键优势在于设备灵活, 且对占地需求较小, 膜组件采用模块化设计方式, 能够依据实际处理量灵活地增加或减少单元数量。膜分离法的操作压力适应区间宽泛, 但其脱水深度会受到膜性能的约束, 常规膜组件仅能将露点降低到-20℃至-40℃的范围。^[1]

2 天然气脱水工艺技术经济性评价指标体系

2.1 技术评价指标

技术指标着重关注工艺与天然气处理需求的适配能力,设定五个核心方面。首先是脱水程度,其通过天然气出站露点降来衡量,该露点降是原料气露点与处理后露点的差值,这是判断工艺能否契合管道输送或后续加工要求的重要依据。其次是原料气的适应情况,涵盖对原料气压力、温度以及含硫量的可承受范围。再者是处理能力,以单套装置的最大处理量衡量,它体现了工艺在规模化应用方面的潜在能力。然后是操作的稳定程度,通过年故障率和连续运行周期衡量。由于TEG法的再生系统复杂,年故障率较高;而分子筛法与膜分离法机械部件较低,年故障率较低。最后是对环境的友好程度,以单位处理量的能耗以及污染物排放量衡量,膜分离法不存在再生能耗,单位能耗仅是TEG法的五分之一、分子筛法的八分之一,而且没有废水废气排放,在环境方面明显优势。

2.2 经济评价指标

经济指标以全寿命周期成本为核心构建,包含了三类关键成本:其一为初始投资成本,其中涵盖设备购置费用、土建安装费用以及系统调试费用。就不同方法而言,TEG法由于需用到吸收塔、再生塔、加热炉等设备,其单套初始投资大约300~400万元;分子筛法需吸附塔、加热设备、阀门切换系统等,单套初始投资大概450~550万元;膜分离法的主要设备是膜组件与增压泵,单套初始投资约为200~280万元。其二为运行成本,其涵盖了能耗、药剂或者耗材更换以及维护费用。具体而言,TEG法的运行成本集中在药剂补充以及再生加热能耗上,每立方米运行成本大致0.25元到0.35元;分子筛法的运行成本主如果再生加热的能耗以及吸附剂的更换,每立方米运行成本约为0.3元到0.4元;膜分离法的运行成本主如果膜组件的更换,每立方米运行成本大约在0.2元到0.3元。其三为寿命周期成本,把20年作为计算周期,对初始投资、运行成本以及残值进行综合考量。TEG法的寿命周期成本大概处于1800万元~2200万元,分子筛法大约是2300万元~2700万元,膜分离法则约为900万元~1100万元。^[2]

3 不同天然气脱水工艺技术经济性对比分析

3.1 技术指标对比

三类工艺于技术指标方面的差异会直接对其适用场景起决定作用。就脱水深度而言,分子筛法展现出明显优势,能够稳定达成露点≤-60℃的效果,从而满足诸如LNG、高压长输管道等严苛需求;TEG法常规情况下的露点为-40℃,借助对再生温度进行优

化,能够将露点降低至-50℃,然而会使能耗增加,并且会提升TEG降解的风险;膜分离法最高只能实现-40℃的露点,而且随着原料气湿度升高,露点容易波动,仅适用于对露点要求处于中低水平的场景。

从对原料气的适应能力方面来看,分子筛法耐受硫以及耐受烃类物质,能够对H₂S含量≤5000mg/m³的高含硫气田进行处理,并且其对原料气压力的起伏变化有较强适应能力;TEG法在H₂S含量大于1000mg/m³的情况下,需配备脱硫装置,否则,就会使TEG溶液发泡,还会使再生效率降低;膜分离法对原料气的纯净度有高要求,需在前面设置过滤系统除去油污粉尘,不然就会造成膜污染。

从处理能力以及稳定性方面考量,TEG法适宜大规模的集中处理工作,并且在运行参数调节上较强灵活性,即便处理量出现小幅度的波动情况,其依然可以稳定运行。反观分子筛法,其单套装置的处理量存在一定限制,若要实现大规模处理,就需将多个塔并联,不过,在塔切换过程中,容易露点不稳定、产生波动。再看膜分离法,此方法能借助模块化叠加的方式提高处理量,然而当单套装置的处理量过大时,设备在投资成本以及占地面积的优势就会逐渐减弱至消失。^[3]

3.2 经济指标对比

工艺成本竞争力通过经济指标的差异得以体现。在初始投资维度,当处理量相同时,膜分离法的初始投资最低,TEG法的初始投资处于中间位置,分子筛法的初始投资则最高。当处理量提升时,TEG法的规模效应开始显现,其初始投资仅增加50至100万元;与之对比的是,分子筛法需要额外增加2套吸附系统,初始投资增加到600至700万元;膜分离法需要叠加4至5组膜组件,初始投资增加到450至550万元,在此情况下,TEG法的初始投资优势就明显凸显。

在运行成本维度,中小规模的应用场景,膜分离法的单位运行成本最低,TEG法的单位运行成本其次,而分子筛法的单位运行成本最高;而大规模的应用场景,TEG法借助规模效应,使单位能耗以及药剂损耗降低,已经接近膜分离法的单位运行成本;然而分子筛法由于再生能耗会随着处理量线性增长。

在寿命周期成本以及投资回收期两方面,在中小规模场景中,膜分离法在20年的寿命周期内的成本大概700~800万元,其投资回收期为2~3年,相较于其他两种工艺而言有明显优势;当处于大规模场景时,TEG法的寿命周期成本大约是2500~2800万元,投资回收期在3~4年,比分子筛法更具优势(分子筛法的寿命周期成本是3200~3600万元,投资回收期为5~6

年)；在对脱水深度要求高的场景下，只有分子筛法能满足技术要求，虽然其成本较高，不过却是唯一可行的选择。^[4]

3.3 典型场景适应性对比

在综合技术与经济维度看，三种工艺在典型场景中的适应情况有明显差异。具体而言，对陆上的大规模气田，TEG 法凭借其强大的处理能力以及大规模作业时的低经济成本，成为最合适的选择。例如，我国西部某气田采用了 TEG 法进行脱水作业，其单套设备的处理量能够达到每日 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，单位运行成本为每立方米 0.28 元，投资回收期为 3.5 年相较于分子筛法，使用 TEG 法每年能够节省大约 120 万元的成本。其二是高含硫的气田，鉴于分子筛法具备较强的耐硫性以及较高的脱水深度，能规避 TEG 法需配备脱硫装置的额外成本。

例如，西南地区的某高含硫气田运用了分子筛法，虽然其初始投资相较于 TEG 法多出 200 万元，不过无需进行脱硫系统的投资，综合成本更低，并且运行状况稳定，露点的达标率为 100%。其三是海上或分散式的气田，膜分离法有模块化、占地面积小、投资回收周期短的明显优势。例如某海上平台采用膜分离法，该装置占地面积仅 20 m^2 ，投资回收期为 2.2 年，与 TEG 法相比节省了 70% 的占地面积，适合平台空间有限的情形。

4 天然气脱水工艺优选模型构建与应用

4.1 优选模型构建

以层次分析法为基础，搭建涵盖“目标层-准则层-指标层-方案层”的四级工艺择优模型。其中，目标层所指向的是“天然气脱水工艺的最佳抉择”；准则层设定了“技术适配性”与“经济合理性”两个维度，其权重分别是 0.55 和 0.45；指标层进一步细化为 8 项具体指标，在技术适配性方面包含脱水深度(权重为 0.3)、原料气适应性(权重 0.25)、处理能力(权重 0.2)、操作稳定性(权重 0.25)；在经济合理性方面，则有初始投资(权重 0.25)、运行成本(权重 0.35)、生命周期成本(权重 0.3)、投资回收期(权重 0.1)；方案层包含了 TEG 法、分子筛法、膜分离法三种工艺。借助专家评分明确各项指标的评分准则，接着凭借层次单排序及总排序的方式算出各工艺的综合分数，综合分数最高的工艺即为最优方案。^[5]

4.2 模型应用案例

选取某中部气田脱水工艺的选型事例，运用优选模型进行计算。在技术适配性层面上，TEG 法于脱水深度指标 7 分，适应性 8 分，处理能力 9 分，稳定性 8 分，加权后分数为 7.85 分；分子筛法脱水深度 10 分，

适应性 9 分，处理能力 7 分，稳定性 9 分，加权 8.8 分；膜分离法脱水深度 4 分，适应性 6 分，处理能力 6 分，稳定性 8 分，加权后分数 5.75 分。

在经济合理性维度中，TEG 法初始投资 8 分，运行成本 8 分，生命周期成本 8 分，投资回收期 7 分，加权后 7.85 分；分子筛法初始投资 5 分，运行成本 6 分，生命周期 5 分，投资回收期 5 分，加权得分 5.4 分；膜分离法初始投资 9 分，运行成本 9 分，生命周期成本 9 分，投资回收期 10 分，加权后分数 9.15 分。

综合各项得分的计算结果为：TEG 法综合得分是 7.85；分子筛法综合得分 7.31；膜分离法综合得分 7.23。最终，TEG 法的综合得分最高，故而被确定为该气田最理想的脱水工艺，这一判定与实际的运行数据高度契合。具体而言，在采用 TEG 法后，气体露点稳定，单位运行成本为每立方米 0.3 元，投资回收期为 3.8 年，能够充分满足气田的实际需求。

5 结论

本文借助对 TEG 法、分子筛法、膜分离法三种天然气脱水工艺开展技术经济性的对比分析，得到如下结论：其一，从技术角度而言，分子筛法具备最高的脱水深度以及最强的适应性，TEG 法拥有最优的处理能力，而膜分离法在灵活性与环境友好性方面表现突出；其二，在经济方面来讲，中小规模场景中，膜分离法具有最低成本以及最短投资回收期，在大规模场景下，TEG 法更具备经济性，在高脱水深度场景中，分子筛法是唯一可行的选择；其三，所构建的层次分析优选模型能够结合具体气田的处理量、露点要求、原料气组分等相关参数，达成科学选型。在未来发展进程中，有必要对工艺技术展开更深入的优化工作，以使各个工艺的适用范围能够显著提升，同时对经济评价模型进行完善，从而使工艺选择能够更好契合双碳目标的需求。

参考文献：

- [1] 何勤. 天然气脱水分子筛失效分析及故障诊断 [J]. 石化技术, 2024, 31(11):34-36.
- [2] 夏博钢, 苏海鹏. 天然气分子筛脱水装置问题浅析 [J]. 石油和化工设备, 2024, 27(02):164-166+174.
- [3] 王海萍, 赵嘉琳, 刘峰, 等. 某海上项目天然气低温脱水工艺路线对比 [J]. 山东化工, 2023, 52(24):166-168.
- [4] 仇放. 国内外天然气分子筛脱水工艺计算对比研究 [J]. 化工设备与管道, 2023, 60(04):29-33.
- [5] 郭金, 侯辰光, 梁建斌, 等. 海上油气田天然气三甘醇脱水装置工艺优化研究 [J]. 石油工程建设, 2023, 49(01):52-55.