

海上油气生产平台天然气脱水工艺研究

祁晓

中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司, 中国·天津 300452

摘要: 随着中国“双碳”目标的实施, 天然气在能源结构优化转型中迎来重要发展机会, 天然气可以作为煤炭替代能源使用, 帮助降低能源消耗中的碳排放, 这也推动天然气脱水处理工艺不断完善和优化。不论在海上平台还是陆地处理厂, 天然气脱水技术都是天然气处理流程的核心工艺。论文综述了几种常见的海上油气生产平台天然气脱水工艺, 总结各自优缺点, 为天然气脱水工艺的优选提供了新的思路。

关键词: 海上平台; 天然气; 脱水工艺; 节流制冷

Research on Natural Gas Dehydration Process for Offshore Oil and Gas Production Platforms

Xiao Qi

CNOOC Energy Development Co., Ltd. Oil Production Service Branch, Tianjin, 300452, China

Abstract: With the implementation of China's "dual carbon" strategy, natural gas has ushered in an important development opportunity in the optimization and transformation of energy structure. Natural gas can be used as a substitute energy for coal, helping to reduce carbon emissions in energy consumption. This also promotes the continuous improvement and optimization of natural gas dehydration treatment processes. Whether on offshore platforms or onshore processing plants, natural gas dehydration technology is the core process of natural gas processing. The paper reviews several common natural gas dehydration processes for offshore oil and gas production platforms, summarizes their advantages and disadvantages, and provides new ideas for the optimization of natural gas dehydration processes.

Keywords: offshore platform; natural gas; dehydration process; throttling refrigeration

0 前言

海上油气生产平台开采出的天然气几乎都被气相水所饱和, 甚至还会携带一定量的游离水。天然气中水的存在, 不论对于开采、处理或集输, 经常会造成严重危害, 主要概括为以下几点: ①天然气中一般都含有 CO_2 、 H_2S 等酸性气体, 这些酸性气体溶于水, 易形成具有强腐蚀性的酸液, 从而引起设备与管线的腐蚀^[1]。②天然气在高压低温的环境下易形成水合物, 会堵塞管道、阀门、设备, 造成安全隐患, 威胁稳定生产。③游离水的存在会增加流动压降, 降低天然气管道的输送能力, 引起额外的动力损耗。因此, 必须对天然气进行脱水处理, 水露点合格后, 方可进行天然气外输。传统海洋平台脱水技术存在设备庞大、橇装困难、能耗大、投资及运维费用高等缺点, 随着技术进步以及油气生产降本增效要求, 探索适合海洋平台新型天然气脱水技术具有重要意义^[2]。

1 海上油气生产平台常规天然气脱水技术

1.1 溶剂吸收法

溶剂吸收法是使用最为广泛的一种天然气脱水工艺^[3]。三甘醇是最为常用的一种吸附溶剂, 在海上平台广泛使用, 其优点主要包括: 吸水力强、溶解度低、沸点高、容易再生、

投资少等。三甘醇脱水系统主要包括吸收和再生两大模块, 如图 1 所示。湿气在接触塔内被贫三甘醇吸收水蒸气变成干气, 经检测水露点合格后进行外输。贫三甘醇吸收水蒸气后变成富三甘醇, 后经再生系统脱水后再次变为贫三甘醇, 如此往复循环使用。同时, 三甘醇脱水系统具有系统比较复杂, 占地空间大, 再生期间消耗量大, 三甘醇遇到轻质油易被污染发泡, 在高温环境下会发生氧化反应生成有腐蚀性的有机酸等缺点。

1.2 固体吸附法

固体吸附法是一种纯粹的物理脱水法, 利用吸附剂的亲水性和吸附张力达到吸附脱水的目的。固体吸附法是基于物理吸附作用的天然气脱水技术, 其核心原理是利用固体吸附剂的亲水性表面和吸附张力, 通过分子间作用力(如范德华力)将天然气中的水蒸气吸附在吸附剂表面, 从而实现脱水。具体脱水过程包括两个阶段:

吸附阶段: 湿气通过填充吸附剂的床层时, 水蒸气被吸附剂表面捕获, 干气则从床层流出。

再生阶段: 当吸附剂吸附饱和后, 通过加热(如热气流吹扫)或降压等方式, 使水蒸气从吸附剂表面脱附, 恢复吸附剂的活性, 实现循环使用。

常见的固体吸附法有以下几种。

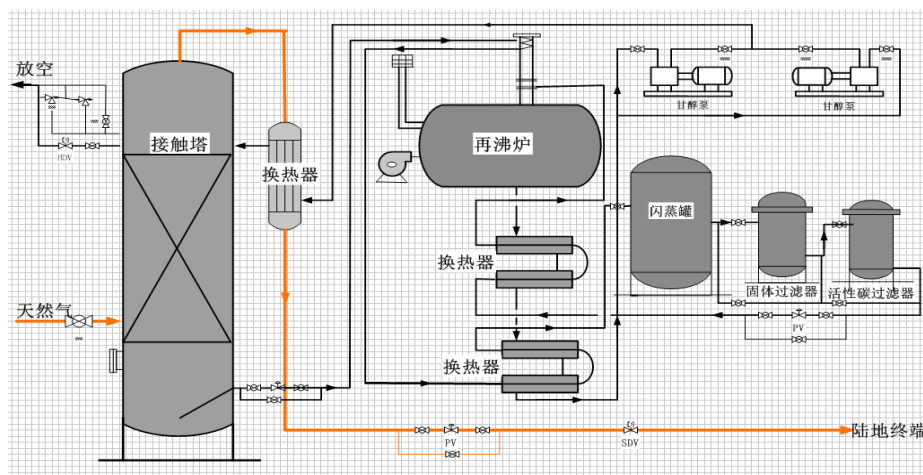


图 1 三甘醇脱水再生系统简图

1.2.1 分子筛吸附法

分子筛吸附法采用人工合成的硅铝酸盐晶体（如 A 型、X 型、Y 型分子筛）作为吸附剂，其晶体结构具有规则的微孔网络和高达 $500\sim 1000\text{m}^2/\text{g}$ 的比表面积，孔径尺寸可精准控制（如 3A、4A、5A 分子筛的孔径分别为 0.3nm 、 0.4nm 、 0.5nm ）。该方法通过“孔径筛分”与“极性吸附”双重机制分离水分子——仅允许直径小于孔径的水分子进入孔道，同时利用硅铝骨架与金属阳离子形成的极性中心对水分子产生强静电引力。其典型应用为深度脱水场景，如 LNG 预处理（可将水露点降至 -70°C 以下）和高压输气管网，也可同时吸附 H_2S 、 CO_2 等酸性气体，但需控制酸性气体浓度以防吸附剂中毒。

1.2.2 硅胶吸附法

硅胶吸附法以无定形二氧化硅水合物（ $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）为吸附剂，其结构呈多孔海绵状，比表面积达 $300\sim 800\text{m}^2/\text{g}$ ，表面富含硅羟基（ $-\text{SiOH}$ ）。该方法依靠硅羟基与水分子形成氢键（ $-\text{SiOH}\cdots\text{OH}_2$ ）实现吸附，属于物理吸附且可逆性强，但吸附容量随温度升高显著下降（如 25°C 时吸附容量约 $6\%\sim 8\%$ ， 100°C 时降至 2% 以下）。其典型应用为中低温环境下的天然气初步干燥（水露点可降至 $-20^\circ\text{C}\sim -40^\circ\text{C}$ ）和仪表风干燥，抗油污染能力优于分子筛，但需控制气体中的液态水含量，以防孔道被堵塞。

1.2.3 活性氧化铝吸附法

活性氧化铝吸附法采用多孔性 γ -氧化铝（ Al_2O_3 ）作为吸附剂，比表面积约 $200\sim 300\text{m}^2/\text{g}$ ，具有较高的机械强度和耐磨损性。其表面羟基通过物理吸附作用捕获水分子，吸附容量受气体湿度和温度影响较大——湿度越高、温度越低，吸附效果越好。该方法适用于高温环境（可达 200°C ）及含液态水的天然气脱水场景，如油田伴生气处理、高压湿气预处理等，尤其适合需要抵抗气流冲击的工况，但对酸性气体的吸附能力较弱，需搭配预处理装置使用。

1.2.4 复合吸附剂法

复合吸附法通过将多种吸附剂（如分子筛与硅胶）复

合改性，或在载体上负载金属氧化物（如 TiO_2 、 ZnO ）制备新型吸附材料，旨在结合不同材料的优势（如分子筛的高选择性、硅胶的抗油性），优化吸附容量、选择性及再生效率。例如，分子筛—硅胶复合吸附剂可同时兼顾深度脱水与抗油污染能力，金属氧化物负载型吸附剂可提升对酸性气体的耐受性。该技术目前尚处于研发或小规模应用阶段，主要用于解决传统吸附剂在抗污染性、再生能耗等方面的局限性，适用于复杂工况下的天然气脱水（如高含油、高酸性气田）。

硅胶、分子筛、活性氧化铝、凝胶等都是固体吸附法常用的干燥剂，其中分子筛应用广泛且技术相对成熟。分子筛干燥剂具有吸附效率高，吸湿容量大，且再生能力好，不易破损，价格实惠，货源一般也很充足，装置占地面积小，操作简单等优点^[1]；同时也有一些缺点，如设备投资大、运维成本高等缺点，总体来说不如三甘醇脱水法经济^[4]。

2 海上油气生产平台新型天然气脱水技术

2.1 超音速脱水技术

天然气超音速脱水技术属于冷冻分离法，是基于超音速冷凝和气液分离原理开发的一种新型天然气净化技术，如图 2 所示，其核心设备是天然气超音速分离器，主要由拉瓦尔喷管、旋流分离段和扩压段 3 部分组成^[5]。天然气在压差的作用下匀速进入拉瓦尔喷管，之后在喷管内逐步加速到超音速，天然气在超音速下产生剧烈的气流旋转，在离心力的作用下将小液滴分离出来。天然气超音速脱水装置具有结构简单紧凑、维护费用低、环境污染小、操作方便等优点，同时该技术还能分离天然气中的 CO_2 、 H_2S 等物质^[6]。

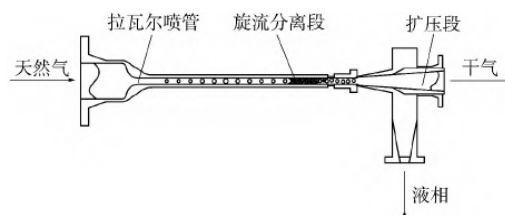


图 2 天然气超音速脱水装置结构图

2.2 J-T 阀节流制冷脱水技术

J-T 阀节流制冷脱水技术是利用焦耳-汤姆孙效应,即气体在节流过程中温度随压强而变化的现象。高压天然气通过节流阀发生急剧膨胀,膨胀过程中吸收周围环境的热量使温度降低凝析出水,该技术本质上是一种低温分离脱水技术。该装置的核心部件为 J-T 阀,主要包括:海水冷却器、气液分离器、预热换热器、低温分离器等,装置图如图 3 所示。

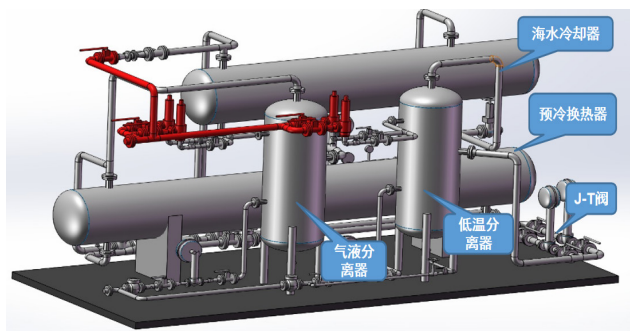


图 3 J-T 阀节流制冷脱水装置

T 阀节流制冷脱水装置,脱水流程具体如下:

①预冷与节流:高压天然气先经海水冷却器或预冷换热器降温,再通过 J-T 阀节流降压,使天然气温度骤降。

②气液分离:降温后天然气中的水蒸气冷凝为液态水,与重烃组分一同进入低温分离器或气液分离器,实现脱水脱烃;干气经预热后外输,液相则回收处理。

③抑制剂加注:为防止节流过程中形成天然气水合物,需同步加注甲醇或乙二醇,降低水合物形成温度。

J-T 阀节流制冷脱水技术适用于高压气田^[7],该技术将高压天然气降压外输的过程中,实现了脱水脱重烃,节能降耗同时有利于重烃组分的回收利用,水露点合格后实现干气外输。同三甘醇、分子筛脱水技术相比具有占地空间小、结构紧凑、易于后期操作维护等优点,但脱水过程中温度骤降容易形成天然气水合物,造成管线和设备的冻堵,需要配合加注甲醇、乙二醇等水合物抑制剂。

2.3 膜分离法脱水技术

天然气膜分离法脱水技术主要是通过膜的可释放性机理来完成的,从而利用各种成分的压力差、浓度差和电位差等实现膜分离的选择性渗透,最终达到组分分离的重要作用^[8]。膜分离法脱水技术核心过程是溶解—扩散:高压湿气在膜上游侧,水分子因极性高、溶解度高优先溶解于膜材料;水分子在膜两侧压力差驱动下,通过膜孔道扩散至下游侧,形成富水渗透气,而甲烷等烃类因扩散速率低留在上游侧,成为干气。

按照材料来划分,分离膜可以分为有机膜和无机膜。有机膜(如醋酸纤维、聚酰亚胺),通过分子链间空隙筛分水分子,孔径约 0.5~2nm,透水率高但耐温性差($\leq 80^{\circ}\text{C}$)。无机膜(如陶瓷、分子筛涂层)主要是依靠规则微孔结构分

离,耐温性强(可达 300°C),但成本高、制备难度大。天然气脱水常用的用的分离膜主要是由醋酸纤维、聚酰亚胺、聚砜等材料制成的微孔膜,甲烷回收率高于 98%,效果良好^[9]。单级膜分离可将水露点降至 $-10^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$,满足常规外输标准(水露点 $\leq -5^{\circ}\text{C}$);多级串联(如 3~5 级)可实现深度脱水(水露点 $\leq -40^{\circ}\text{C}$),但能耗和投资成本显著增加。

天然气膜分离脱水技术具有设备简单、占地空间小、易于操作等优点,无需额外添加药剂,不会造成对环境的二次污染。该技术的缺点是膜的性能会受塑化作用的影响,在渗透阶段甲烷会随着水一起进入渗透气中,这在很大程度上会造成烃损失^[10]。为了减少膜分离过程中的烃损失,这就要求分离膜需要具备更好的稳定性和选择性。如今,新型膜技术取得了长足发展,制膜工艺不断发展完善,制膜技术取得新突破,这也使得天然气膜分离法脱水技术拥有了更广阔的发展空间^[10]。

3 结语

随着天然气工业的发展,中国对于气田的开发程度不断加深,这也推动了天然气脱水技术的不断进步。综上所述,无论是传统技术还是新技术都有其优缺点,具体还应根据海上平台的生产工况、空间大小、成本投入、维保操作等因素,综合考虑优选出最佳方案。

参考文献:

- [1] 陈佳羽,马维龙,赵盼婷,等.天然气脱水工艺发展现状及趋势[J].石油化工应用,2023,2(42):8-10.
- [2] 孙为志,曾树兵,陈文峰,等.海洋平台新型天然气脱水技术探讨[J].石油和化工设备,2019,22(5):95-97.
- [3] 杨冬磊,蒋洪,谢崇文,等.高含硫天然气集气站三甘醇脱水工艺对比[J].石油与天然气化工,2018,47(5):31-38.
- [4] 颜文杰.天然气的三甘醇脱水和分子筛脱水对比[J].化工管理,2019(26):125-126.
- [5] CAO X, BIAN J. Supersonic separation technology for natural gas processing: A review[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2019(136):138-151.
- [6] CAO X W, GUO D, SUN W J, et al. Supersonic separation technology for carbon dioxide and hydrogen sulfide removal from natural gas[J]. Journal of Cleaner Production, 2021(288):1-13.
- [7] 杨秘.节流制冷技术在海上平台天然气脱水系统中的应用[J].化学工程与装备,2020(11):78-79.
- [8] 岳世超,魏举行,李陈若琪.天然气脱水新工艺新技术[J].化学工程与装备,2019(3):93-94.
- [9] 李星雨.天然气脱水技术综述[J].辽宁化工,2017,3(43):269-270.
- [10] 张建.天然气脱水技术[J].化学工程与装备,2022(5):61-62.

作者简介:祁晓(1991-),男,中国天津市人,本科,工程师,从事海上油田油气开采及油气水处理工艺管理与研究。