

煤层气液化装置设计

——N₂-CH₄混合膨胀制冷工艺

□ 中国石油天然气管道科学研究院 (065000) 毕研军 邵云巧 白世武

摘要: 我国煤炭资源丰富, 为了保证在煤矿开采过程中的安全, 大量煤层气被直接排放到大气中。通过深冷技术可以将回收的煤层气进行液化, 以方便于储运和运输。本文详细介绍了山西某地拟建煤层气液化装置的设计参数和工艺流程, 并分析了液化装置的流程特点。

关键词: 煤层气液化装置 工艺流程 膨胀制冷

CBM Liquefaction Plant Design

——N₂-CH₄ Mixed Expansion Refrigeration Process

China Petroleum & Natural Gas Pipelines Research Institute Bi Yanjun, Shao Yunqiao, Bai Shiwu

Abstract: There is abundant coal resources in China, in order to ensure the safety of coal mining process, a large number of coal bed methane is directly discharged into the atmosphere. In order to facilitate the storage and transport, through the cryogenic technology can be liquefied coalbed methane recovery. This paper describes design parameters and technological process of coalbed methane liquefaction plant a place in Shanxi proposed, and analyses process characteristics of the liquefaction plant.

Keywords: CBM liquefaction plant technological process expansion refrigeration

1 引言

煤层气又称煤层甲烷 (coalbed methane), 是与煤伴生、共生的天然气资源, 是一种潜在的储量巨大的洁净能源^[1]。我国是世界上煤层气资源最丰富的国家之一, 陆上煤田埋深浅于2 000m的资源量为35万亿m³, 相当于450亿t标准煤, 与我国常规天然气资源差不多^[2]。在开采煤炭过程中, 为了保证煤矿安全, 常将其直接排放。全国年瓦斯排放量为360 × 10⁸m³, 仅5.6 × 10⁸m³被回收利用, 利用率仅为1.56%。造成了巨大的环境压力和资源浪费^[3]。

利用中小型天然气液化装置将煤层气液化是开发煤层气的较好方式, 可促进煤层气的利用。煤层气液化有诸多优点: (1) 液化后体积小, 储存效率高、占地少、投资省, 可以用于城市燃气调峰。(2) 煤层气液化后可以方便可靠的运输。同时煤层气液化后有广泛的用途, 市场前景广阔: 可用于天然气发电厂的LNG调峰厂和LNG储罐; 液化后通过运输可供应边远用户; 可用于以大量消耗清洁能源为特征的制造业, 如陶瓷和玻璃行业等^[4]。

目前, 我国煤层气液化发展迅速, 在山西沁水已建成处理量为35 × 10⁴m³/d和2 × 25 × 10⁴m³/d三套工艺

设备，均采用的纯氮气膨胀制冷工艺，其设备全部国产且运行良好。目前正在建设的处理量为 $50 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 和 $60 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 两套工艺，采用的为氮气—甲烷混合膨胀制冷工艺，相比较于纯氮气膨胀制冷工艺，氮气—甲烷混合膨胀制冷工艺可以降低能耗10%左右。下面以山西某地拟建的采用 $\text{N}_2\text{-CH}_4$ 混合膨胀制冷工艺的煤层气液化工程为例，对该工艺的设计和流程进行介绍和分析。

2 设计数据及产品

本工程液化装置的原料气来自管输煤层气，根据现场提供数据，原料气组分见表1。原料气压力为 $0.7\text{MPa} \sim 1\text{MPa}$ ，温度为 $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ ，水含量为饱和水。煤层气处理量为 $15 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ （ 20°C 、 0.101325MPa ），波动范围为 $\pm 10\%$ ，最大处理量为 $16.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ；原料气耗量 $15.6 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ （ 20°C 、 0.101325MPa ），液化率 $\geq 96\%$ 。

表1 原料煤层气组分

组份名称	体积百分比 (%)
氮	2.3805
二氧化碳	0.5796
甲烷	96.5395
氧气	0.5004
水	饱和（在 0.7MPa 、 30°C ）

液态煤层气产量为 $255\text{m}^3/\text{d}$ ，产品压力为 0.4MPa ，温度为 $-130^\circ\text{C} \sim -140^\circ\text{C}$ 。

3 工艺装置

本设计 $15 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的煤层气液化装置主要由原料气压缩系统、预处理系统、液化系统及储存系统组成。原料煤层气经过压缩进入预处理系统，经过预处理系统脱除杂质后进入液化系统，液化后的产品进入储存系统，同时产生的中、低压天然气返回预处理系统后分别进入中、低压煤层气管网（如图1所示）。

本煤层气液化设备将采用带预冷的氮甲烷混合制冷介质循环压缩—膨胀制冷液化工艺流程，该流程的特点为：

- （1）起动时间短、运行灵活、适应性强、容易操作和控制、维护方便；
- （2）流程简单、氮甲烷混合制冷介质测定方便；
- （3）比纯氮膨胀液化流程节省10%~20%的动力消耗。

3.1 原料煤层气的压缩

原料气的压力对煤层气的液化产生巨大的影响，在一定程度上随着压力的升高将煤层气液化到相同的温度所消耗的能量是逐渐降低的，但升高到一定程度以后所带来的影响将不再明显。煤层气的压力与液化

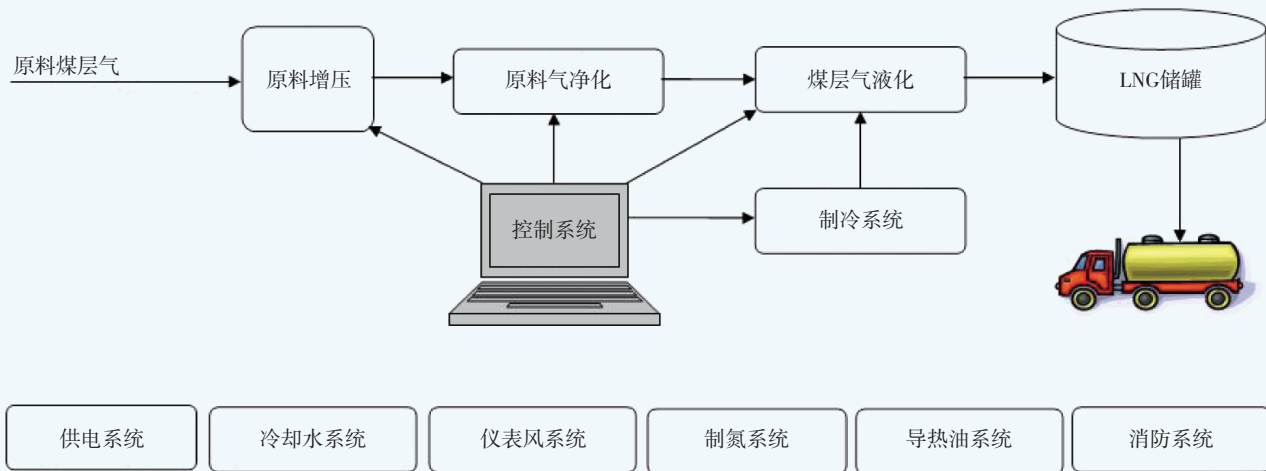


图1 煤层气液化工艺流程

温度的关系如图2所示，煤层气压力与液化功耗的关系如图3所示。

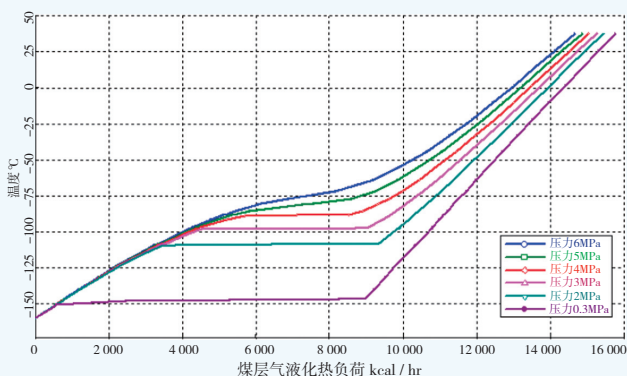


图2 煤层气压力与液化温度的关系

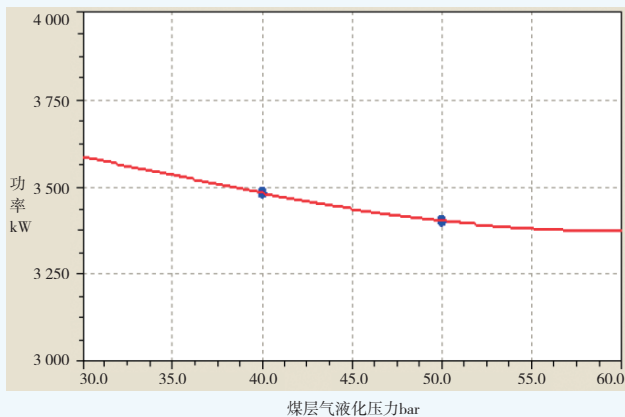


图3 煤层气压力与液化功耗的关系

根据图2和图3所示，本设计将增压后煤层气的压力控制在5.0MPa~6.0MPa范围内。压缩流程如图4所示。

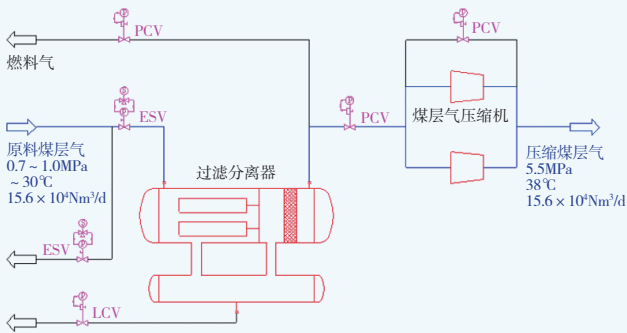


图4 原料煤层气压缩流程

3.2 原料煤层气的净化

根据液化要求必须脱除原料气中的以下组分：硫化氢、二氧化碳、汞、水、固体颗粒等，净化后的煤层气技术指标如表2所示。

表2 净化后的煤层气技术指标

组分	分子量	沸点/°C	熔点/°C	预处理要求
N ₂	28.013	-195.80	-209.90	热值要求
CO ₂	44.010	-78.50	-56.60	< 50 × 10 ⁻⁶
H ₂ S	34.080	-60.35	-85.55	< 4 × 10 ⁻⁶
总硫				< 10 ~ 50mg / Nm ³
芳香烃	78.114	80.15	5.55	< 10 × 10 ⁻⁶
H ₂ O	18.015	100	0	< 0.1 × 10 ⁻⁶
Hg	200.61	356.9	-38.87	0.01 μg / Nm ³

分子筛吸附器主要用来吸附原料天然气中的水分，使原料天然气中的水分含量降到1 × 10⁻⁶以下；吸附原料天然气中的二氧化碳，使出吸附器的原料天然气的二氧化碳的含量降到50 × 10⁻⁶以下；同时还吸附原料天然气中的微量重烃。经过吸附器以后的天然气能够满足天然气在低温工艺过程中不会产生水合物、冰冻和固态物质等情况，保证后续工艺的顺利进行。同时经过吸附器以后的天然气满足液化天然气（LNG）的质量要求。分子筛吸附器将采用13X型分子筛吸附二氧化碳和水分。分子筛吸附剂为3台，一台工作，一台再升，一台冷却。分子筛工作、冷却与再生流程简图如图5所示。脱汞器主要用来脱除脱

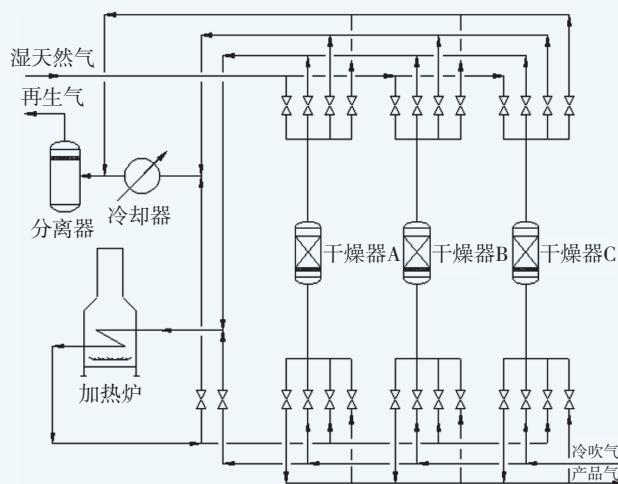


图5 分子筛流程简图

水、二氧化碳以后的原料天然气中的汞，防止气流中的汞进入冷箱腐蚀铝制设备和管道，采用活性炭中载入的硫与汞反应生成硫化汞的方法。粉尘过滤器主要用来脱除原料煤层气中的粉尘等固体杂质，防止粉尘进入冷箱附着与设备和管道内表面，采用精密过滤器过滤等方法。

3.3 制冷工艺流程及氮甲烷膨胀制冷系统

煤层气液化是一个低温过程。净化后煤层气，进入液化冷箱的预冷换热器中进行冷却，冷却到设计温度后进入预冷蒸发器，在其中冷却之后在液化换热器继续冷却，液化和过冷到 -130°C 以下、节流降压到 0.4MPa ，进入液化冷箱内的LNG分离器，分离出的液体，即为LNG产品送入LNG贮槽。

液化工艺中配备的制冷系统就是要使得主换热器达到最小的冷、热流接近温度，并因此获得极高的制冷效率。

本方案采用氟里昂预冷的 $\text{N}_2\text{-CH}_4$ 膨胀制冷循环制冷工艺，制冷剂由循环压缩机从 0.4MPa 压缩到设计压力，冷却后继续由膨胀机同轴带动的增压机压缩到设计压力，经水冷却后进入液化冷箱。

制冷剂在预冷器中冷却，接着进入制冷剂蒸发器继续降温，在液化器中冷却到一定温度后从液化冷箱中抽出进入膨胀机膨胀，之后依次在液化器、预冷器中复热到常温出液化冷箱。出液化冷箱的制冷剂进入循环压缩机压缩而循环膨胀制冷，为煤层气液化提供冷量。采用氟里昂预冷的 $\text{N}_2\text{-CH}_4$ 膨胀制冷循环制冷工艺流程简图如图6所示。

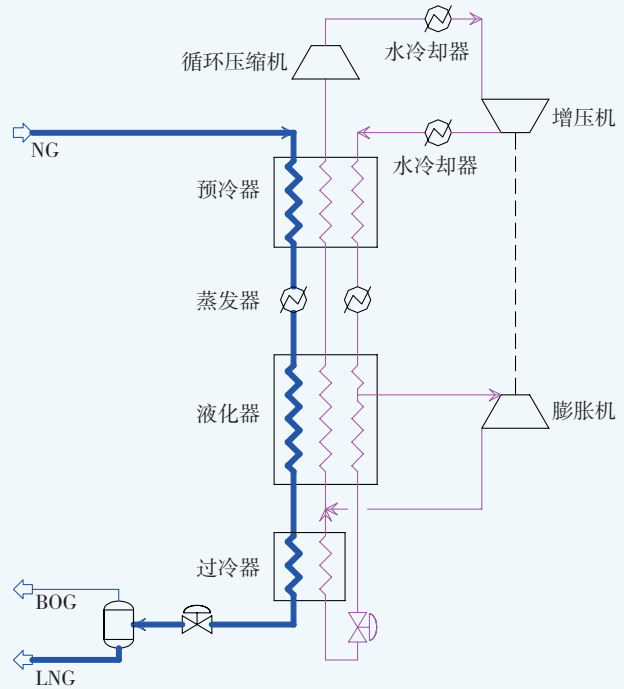


图6 $\text{N}_2\text{-CH}_4$ 膨胀制冷循环制冷工艺流程简图

膨胀机制冷流程中，由于换热器的传热温差很大，可采用氟里昂预冷的方法对制冷剂和煤层气进行预冷，则液化过程的能耗可大幅度降低。

3.4 PSA制氮系统

煤层气液化装置需要氮气，主要用于首次开车和检修时的置换、保持冷箱正压、制冷剂的补充、低温系统的加温解冻等。氮气压力： 0.5MPa ；含水量： $\leq 1 \times 10^{-6}$ ；含二氧化碳量： $\leq 50 \times 10^{-6}$ 。本设计采用PSA制氮系统生产液化装置所需要的氮气，PSA制氮

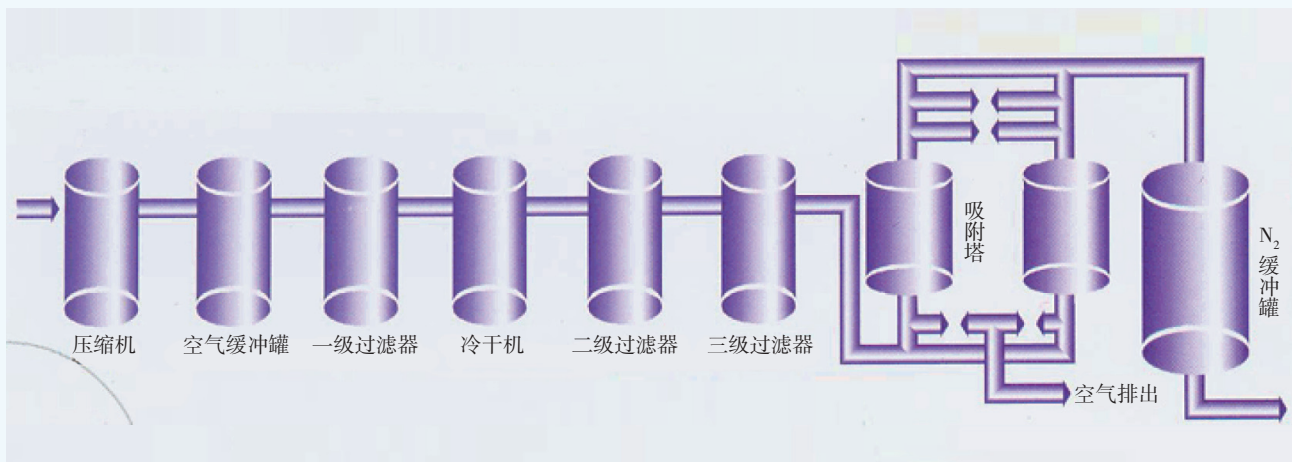


图7 PSA制氮工艺流程简图

工艺流程简图如图7所示。

3.5 氟里昂预冷冻系统

采用氟里昂预冷，使煤层气和混合冷剂冷却到一定温度，达到节约能耗之目的。主要包括如下设备：R22蒸发器、R22循环压缩冷凝机组、附属设备、启动柜等。

3.6 液化煤层气储存系统

考虑液化煤层气的储存天数，设立6台150m³的LNG储罐。储罐采用真空粉末绝热带压LNG贮槽。

3.7 煤层气液化工艺流程控制系统

为了确保能有效地监控成套LNG设备生产过程，确保运行可靠，操作维护方便，其仪控系统一般包括：集散控制系统（DCS）、紧急停车系统（ESD）、火灾检测报警系统（FGS）。

集散控制系统（DCS）主要实现主要工艺参数的显示、趋势记录、历史事件的记录、报警、控制、打印、制表及流程图画面动态显示等功能。

紧急停车系统（ESD）按照安全独立原则要求，独立于DCS集散控制系统，其安全级别高于DCS。

火灾检测报警系统（FGS）系统主要用来对厂区附近区域进行早期的火焰，可燃气体或有毒气体的检测，并通过声光报警指示发生危险的区域。

3.8 液化煤层气辅助系统

除以上主要系统外，装置还包括仪表空气系统、循环冷却水系统等。仪表空气系统主要是为启动仪表提供动力电源；循环冷却水系统主要是为各种装置提供冷却水，例如：压缩机、冷却器等。

4 小结

随着我国天然气工业的发展，天然气资源已经不能满足社会的发展需要。而我国的煤层气资源丰富，和天然气资源相当，可以很好的用以弥补常规天然气资源的不足。通过煤层气的深冷技术可以很好的将收集起来的煤层气进行液化以方便储存和运输。液化后的煤层气体积为原体积的1/600，可以通过公路和铁路进行方便经济的运输。本文对氮-甲烷混合膨胀制冷进行煤层气液化的工艺设计进行了详细的说明，对整套装置的各系统做了细致的介绍，并对其工艺的优点做了简要的概括。通过煤层气液化可以将煤层气运输到市场下游，用于城市燃气调峰、天然气发电、陶瓷冶炼等各种工业。还可以为那些管道燃气不能到达的地方提供洁净能源变成了现实。

参考文献

- 1 张新民, 庄军, 张遂安. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京科学出版社, 2002
- 2 2006年中国煤层气开发利用投资分析报告. 2006
- 3 冯明等. 中国煤层气资源与可持续发展战略[J]. 资源科学, 2007; 29(3): 100-104
- 4 张维江, 石玉美等. 小型天然气液化装置在我国天然气工业中的应用前景分析. 低温技术, 2008; 36(3): 15~18

其它消息

河南省黄泛区农场举行管道燃气特许经营协议签约仪式

2010年7月13日上午，黄泛区农场管道燃气特许经营协议签约仪式在黄泛区农场迎宾馆二楼会议室举行。由中国奥德集团投资建设的管道燃气项目计划总投资8 000万元，主要用于铺设城区中低压管网，安装居民小区用户及公服、餐饮用户。黄泛

区能够率先使用绿色能源天然气，对于拓宽城镇空间，完善城镇职能，创造良好的居住环境都必将产生深远的影响。符合黄泛区农场坚持提高城市环境质量，服务经济和可持续发展的原则。

（郑丽萍）