

利用吸附余压的煤层气半开式氮膨胀液化流程

高婷¹, 林文胜¹, 顾安忠¹, 辜敏²

(1. 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240; 2. 重庆大学采矿工程系, 重庆 400044)

摘要:煤层气(CBM)液化是对其开发利用的一种有效方式。我国煤层气中常常含有较多氮气, 要作为能源加以利用, 必须进行甲烷提浓。液化前通过变压吸附可以实现氮/甲烷的分离。构建了一种新型的吸附-液化一体化的氮膨胀液化流程, 将吸附后排出的带余压氮气用于氮膨胀循环, 为煤层气液化提供冷量。通过 HYSYS 软件模拟计算考察了不同含氮量和不同吸附余压下系统单位产品液化功的变化情况, 并与普通氮膨胀液化流程进行比较。结果表明, 高含氮量下, 一体化的流程能够大大降低系统功耗。

关键词:煤层气; 液化流程; 吸附; 余压利用; 功耗

中图分类号: TB619.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2009)05-0068-04

Coal bed methane liquefaction by semi-open nitrogen expansive liquefaction process utilizing the residual pressure of adsorption

GAO Ting¹, LIN Wen-sheng¹, GU An-zhong¹, GU Min²

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Mining, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Liquefaction is an effective way for development and utilization of coal bed methane (CBM). Generally, CBM is usually full of nitrogen, which is usually required to be removed to enrich the methane content when it is utilized as an energy resource. This could be achieved by adsorption before liquefaction. In this paper, a novel nitrogen expansive liquefaction process is proposed, which integrates two parts of adsorption and liquefaction together by introducing the waste nitrogen with residual pressure into the semi-open nitrogen expansive liquefaction cycle. Taking the unit product liquefaction power consumption as the major index and nitrogen content of CBM feed gas together with residual pressure of waste nitrogen as variables, the system performance of this integrated process is studied and compared with that of the nitrogen expansive liquefaction process without integration. By simulation and calculation with HYSYS software, it is confirmed that, for CBM with high nitrogen content, the energy conservation effect is significant.

Key words: coal bed methane; liquefaction process; adsorption; residual pressure utilization; power consumption

作为一种以甲烷为主要成分的煤矿伴生气, 煤层气(CBM)是一种优质高效的清洁能源。同时, 对其加以利用还可以减少因瓦斯爆炸引起的矿难及温室气体甲烷的排放, 因此对能源利用、煤矿安全及环境保护均具有重要意义^[1-3]。我国的煤层气总储量约 36 万亿 m³, 与天然气相当, 位居世界第 3, 且主要分布在经济发达或较发达的中东部地区, 与常规天然气表现出很好的互补性, 容易形成便利的市场条件, 因此我国煤层气开发利用具有突出的优势和发展潜力^[4-5]。然而, 我国煤层气产地一般远离天然气管网, 且气质与常规天然气不同, 不便或不宜进入现有管网。利用天然气的液化技术将煤层气液化, 可使其体积减少为原来的约 1/600, 极大地方便了

从产地到用户的输送, 是一种极有前景的开发形式^[4]。我国煤层气气源分散, 且大多单井排放量较小, 因此更倾向于使用小型液化装置。氮膨胀液化流程结构简单、造价较低、适应性强、易于操作和控制, 是较适用于小型液化装置的方式, 但其能耗较高^[6-7]。

受到目前瓦斯抽采技术的限制, 我国的煤层气大多为矿井气, 由于混入了空气而常含有较多的氮, 不能通过常规的净化工艺脱除, 影响了其作为能源加以利用。因此通过预处理工艺脱除固体杂质、酸性气体(CO₂、H₂S)、水和重烃后, 还必须在液化前进行变压吸附或液化后进行低温精馏, 将氮从预净化后的煤层气中分离出去, 从而提高甲烷的浓度。

收稿日期: 2008-12-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)项目(2006AA06Z234)

作者简介: 高婷(1985-), 女, 博士生; 林文胜(1967-), 男, 副教授, 主要研究方向为液化天然气(含煤层气)技术, 通讯联系人, 021-34206533,

linwsh@sjtu.edu.cn。

低温精馏法利用沸点差实现氮与甲烷的分离,是一种高效的分离方式,其主要优点是甲烷纯度高,可达95%以上。但由于需要将氮同时液化,增加了系统液化功耗。而变压吸附过程在常温和较低压力下工作,能耗较低,且吸附法工艺简单,操作、维护费用低,有其独特的优势^[8-12]。

对于吸附-液化的方式,煤层气首先被引入吸附器,甲烷被吸附床吸附,而氮气则连续释放出去。之后提浓的甲烷在脱附床中释放出来,并引入液化流程。废氮往往被直接排放到大气中。本文中,考虑到废氮还具有一定的吸附余压,笔者将其用于氮膨胀循环为煤层气液化提供冷量,形成吸附-液化一体化的新型流程。若含氮量和吸附余压足够高(含氮量达90%,吸附余压达3 MPa),则煤层气液化所需的冷量可完全由这部分废氮直接膨胀提供,从而完全省略氮压缩功。但往往煤层气中的含氮量不足以满足使其液化所需的冷量,因此需要补充一部分常压氮气形成半开式循环,这仍然因为大大降低了氮压缩功而降低系统的整体功耗。

笔者使用 HYSYS 软件分别构建了吸附-液化一体化的半开式氮膨胀液化流程和不利用余压的普通氮膨胀液化流程,并以系统单位产品液化功作为主要指标,比较了2种流程的系统性能及其随含氮量和吸附余压的变化情况。

1 液化流程

煤层气前期的脱水、脱酸等净化处理与普通天然气类似,而预处理后的煤层气主要是氮与甲烷的混合物。为便于计算分析并集中精力考察含氮量对

流程的影响,假设煤层气仅由甲烷和氮组成。此外,本文不讨论氮与甲烷吸附分离的过程本身,因此使用 HYSYS 模拟构建流程时,直接设定吸附分离前后的参数。

1.1 普通的氮膨胀液化流程

普通的氮膨胀液化流程如图1所示。

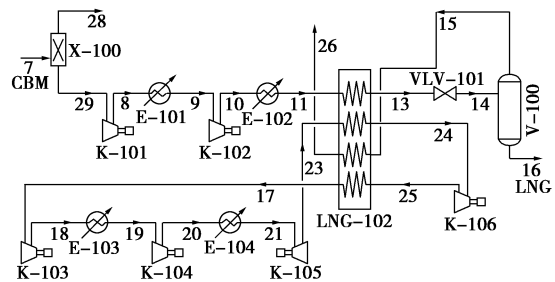


图1 普通的氮膨胀液化流程

CBM 原料气首先在吸附器 X-100 中被分离成 2 股流体,分别为以甲烷为主的流体 29 和以氮气为主的流体 28。通过吸附过程,煤层气中的氮大部分被脱除。之后,富含甲烷的煤层气依次经过两级压缩、水冷、液化、节流,最后在气液分离器 V-100 中得到液化天然气(LNG)产品。而闪蒸出来的低温气体则被引入换热器 LNG-102 回收利用其冷量。煤层气液化所需的冷量由 1 个两级氮膨胀循环提供。

1.2 利用吸附余压的半开式氮膨胀液化流程

变压吸附后分离出来的废氮气可能带有较高的压力,可将其直接膨胀或进一步压缩以参与氮膨胀循环为煤层气液化提供冷量。从而节省了循环氮气量,使得氮压缩功有所降低,因此最终系统整体单位产品液化功也将减少。

施行之有效。

参考文献

- [1] 任凌波,任晓蕾.压力容器腐蚀与控制[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [2] 初世宪,王洪仁.工程防腐蚀指南[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [3] 化工设备设计全书编辑委员会.废热锅炉[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [4] 梁斌,段天平,傅红梅,等.化学反应工程[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [5] 国家医药管理局上海医药设计院.化工工艺设计手册[M].北京:化学工业出版社,1996.
- [6] 国家质量技术监督局.GB151—1999 管壳式换热器[S].北京:中国标准出版社,1999. ■

(上接第 67 页)

5 改进效果

采取上述措施后的新设备于 2008 年 4 月底投入使用,改进后的设备完全满足生产需要,能达到设计生产能力。目前生产投料仍维持改造前的水平,反应器入口温度处于 200~220℃,出口温度能控制在 280~300℃。虽反应器热点下移至接近换热管的 1/2 位置,但甲醇的转化率即便是在催化剂运行半年多后仍维持在 99% 以上(满足 ≥ 98% 的设计要求)。2009 年 2 月该公司大修,拆开上封头对设备进行检查发现设备本体正常,分布器安装稳固,管板表面平整,焊波清晰,未发现存在明显腐蚀的迹象。这说明对反应器失效原因的分析是正确的,改进措

本文中考察吸附余压在 1~6 MPa 内变化,考虑到氮膨胀循环中氮压缩终压在 3 MPa 左右为宜^[13],因此为使吸附余压得到尽可能的利用,笔者根据吸附余压的不同范围分别设置较合适的流程:吸附余压低于 3 MPa 时,将吸附分离出的带余压氮气与压缩到中间压力的循环氮气混合,并进一步压缩到所需的压力,然后膨胀至低温为煤层气液化提供冷量,如图 2 所示;吸附余压高于 3 MPa 时,将其先膨胀至 3 MPa,然后与两级压缩后的循环氮气混合,再共同膨胀至低温,为煤层气液化提供冷量,如图 3 所示。

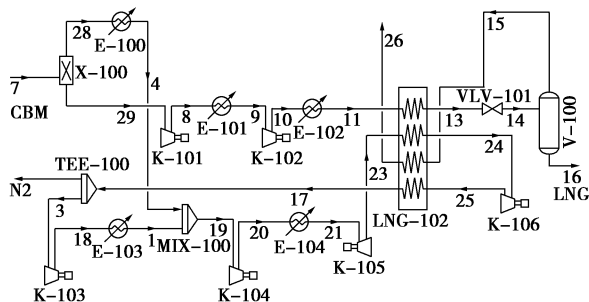


图 2 吸附余压低于 3 MPa 时的半开式氮膨胀液化循环

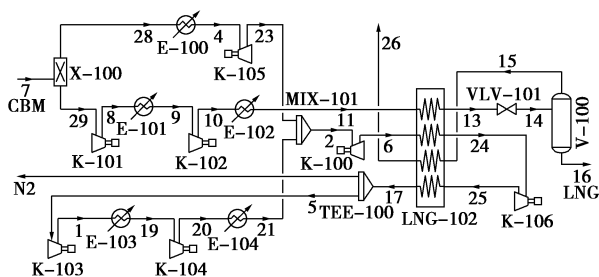


图 3 吸附余压高于 3 MPa 时的半开式氮膨胀液化循环

2 计算过程

2.1 参数设定

CBM 吸附-液化循环中,原料气 7 的温度 $t_7 = 35^\circ\text{C}$,压力 $p_7 = 101.325\text{ kPa}$,摩尔流量 $q_{n7} = 1\text{ kmol/h}$;吸附分离后煤层气中甲烷摩尔分数为 95%,同时甲烷回收率也为 95%;两级压缩后 CBM 压力 $p_{10} = 4\,500\text{ kPa}$;CBM 液化率为 95%;LNG 产品的压力 $p_{16} = 101.325\text{ kPa}$;冷气体冷量回收后温度 $t_{26} = -40^\circ\text{C}$ 。

半开式氮膨胀循环中,循环氮气一级压缩后中压 $p_1 = 1\,000\text{ kPa}$;压缩终压 $p_{20} = 3\,000\text{ kPa}$;膨胀终压 $p_{25} = 180\text{ kPa}$,温度 $t_{25} = -165^\circ\text{C}$;二级膨胀前的温度 $t_{24} = -110^\circ\text{C}$ 。

水冷后的流体温度均设为 35°C ,各压缩机效率为 85%,膨胀机效率为 80%,各换热器压降均假设为 0。

2.2 计算方法

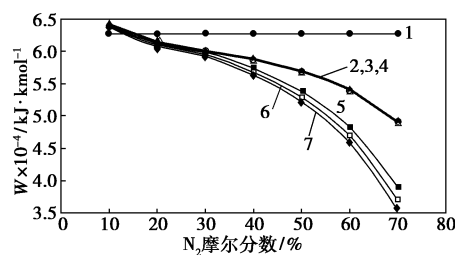
系统单位产品液化功为:

$$w = \frac{W_{\text{com}} - W_{\text{exp}}}{q_{n16}} \quad (1)$$

其中 W_{com} 为各压缩机的功耗之和, W_{exp} 为各膨胀机的做功量之和, q_{n16} 为 LNG 产品的摩尔流量。这些均可通过 HYSYS 直接读取或简单计算得出。

3 计算结果及分析

考察含氮量在 10%~70%,吸附余压在 1~6 MPa 变化时,一体化流程单位功耗的变化情况并与普通液化流程进行比较,其计算结果如图 4 所示。

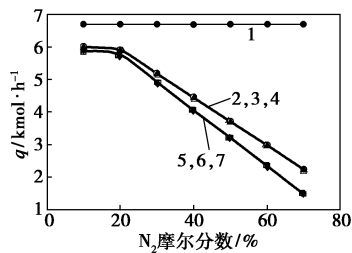


1—普通流程;2—1 MPa;3—2 MPa;4—3 MPa;5—4 MPa;6—5 MPa;7—6 MPa

图 4 系统单位功耗随 CBM 含氮量及氮吸附余压的变化图

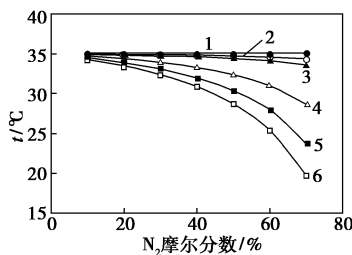
图 4 的结果显示,带吸附余压的氮气参与氮膨胀制冷循环后,可有效降低系统单位产品液化功。且随着含氮量的增加及吸附余压的增大,系统单位功耗均降低。其中含氮量对系统功耗的影响更大,而吸附余压在同一流程中对功耗的影响较小,尤其是在低压流程中。当含氮量大于 50%时,节能的效果已经比较显著;若含氮量达到 70%,吸附余压为 1 MPa 时可节能大于 20%,4 MPa 时即可节能将近 40%。

含氮量的影响是显而易见的:原料气中含氮量越多,可节省的常压循环氮气也越多,则氮压缩功也越少,因此节能效果越好。吸附余压对系统单位功耗的影响有 2 方面的因素:①部分工作流体(包括余压氮气和循环氮气的混合氮气)带压可节省总的氮压缩功(但在同一个流程中压力大小的变化对此影响不大);②与较高压力的流体混合后可使温度有所降低,这也可以一定程度上降低系统单位功耗。不同含氮量和不同吸附余压下液化所需的工作流体摩尔流量和混合后的氮气温度分别见图 5 和图 6。



1—普通流程;2—1 MPa;3—2 MPa;4—3 MPa;5—4 MPa;
6—5 MPa;7—6 MPa

图5 工作流体摩尔流量随含氮量和
吸附余压的变化图



1—1 MPa;2—2 MPa;3—3 MPa;4—4 MPa;5—5 MPa;6—6 MPa

图6 混合后的氮气温度随含氮量和
吸附余压的变化图

图5验证了含氮量越大,所需的工作流体越少;图6验证了吸附余压越高,混合后的氮气温度越低,且含氮量的增大也有同样的效果。图5还显示,同一流程下吸附余压对所需的氮流量几乎没有影响,这部分解释了吸附余压对系统单位功耗影响较小的原因。由图6还可看出,低压下余压变化对温度的影响较小(尤其在低含氮量下),则由此引起的功耗变化就更小了,这也解释了吸附余压为1~3 MPa时系统单位功耗曲线几乎重合的原因。此外,混合过程会造成压力损失,这也造成高吸附余压节能的效果有限,尤其吸附余压在1~3 MPa内,均将其与压缩到1 MPa的补充氮气混合,使得其压力能的利用程度几乎得不到提高。

由图4还可看出,含氮量较小时(大约小于13%),一体化流程的系统功耗反而大于普通的氮膨胀液化流程。这是因为补充氮气的组分与吸附分离出的氮气组分相同,而吸附分离出的氮气实际上还含有一部分甲烷,且原料气中含氮量越低,分离后的氮气中甲烷含量也越高,则单位流量的工作流体可提供给煤层气液化的冷量也越少,这就需要更多的工作流体用于液化,使得相应的氮压缩功有所增加。由此可知,该方法仅适合于含氮量较高的煤层气液化流程(大于20%)。图7显示了原料气含氮量对工作流体含氮量的影响。

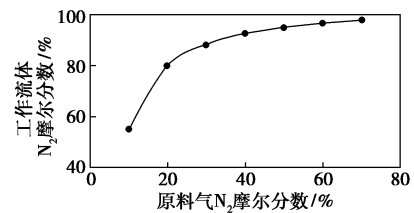


图7 工作流体含氮量随原料气含氮量的变化图

4 结语

本文提出了吸附-液化一体化的利用吸附过程余压的煤层气半开式氮膨胀液化新流程,并比较了该流程与普通氮膨胀液化流程的性能及其随含氮量和吸附余压的变化情况。分析表明,将吸附分离出的带余压废氮进行利用,使其参与氮膨胀制冷循环形成半开式的氮膨胀液化流程,较适合于含氮量大于20%的煤层气液化。可以降低系统所需的单位产品液化功,从而提高经济效益。尤其对于高含氮量的煤层气原料气,节能效果显著。而对吸附余压的要求相对较低。如含氮量达到70%时,吸附余压在1~3 MPa范围内可节能大于20%,4 MPa时即可节能将近40%。

参考文献

- [1] Thakur P C, Little H G, Karis W G. Global coalbed methane recovery and use[J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37(6/7/8): 789 - 794.
- [2] Flores R M. Coalbed methane: From hazard to resource[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35: 3 - 26.
- [3] 余国保,孙志高,郭开华,等.煤层气小型液化前景与可行性探讨[J].中山大学学报论丛,2007,27(2): 96 - 100.
- [4] Lin Wen-sheng, Gu Min, Gu An-zhong. Analysis of coal bed methane enrichment and liquefaction processes in China[C]//Proceedings of the 15th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, Barcelona, 2007.
- [5] 徐会军,朱超.煤层气在我国能源中的地位及开发利用现状和前景[J].中国煤炭,2001,27(12): 32 - 36.
- [6] 付永兴,李化治,郭桂彬,等.煤层气液化装置流程及经济性分析[J].低温与特气,2004,22(4): 10 - 13.
- [7] 林文胜,顾安忠,朱刚.天然气液化装置的流程选择[J].真空与低温,2001,7(2): 105 - 109.
- [8] 陶鹏万,王晓东,黄建彬.低温法浓缩煤层气中的甲烷[J].天然气化工,2005,30(4): 43 - 46.
- [9] 辜敏,鲜学福.提高煤矿抽放煤层气甲烷浓度的变压吸附技术的理论研究[J].天然气化工,2006,31(6/7/8/9/10): 11 - 16.
- [10] 蒋孝兵,谢海英.煤层气利用新方案[J].天然气工业,2006,26(10): 144 - 146.
- [11] 杨克剑.含氧煤层气的分离与液化[J].中国煤层气,2007,4(4): 20 - 22.
- [12] 祝家新.高含氮量煤层气吸附-液化过程研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [13] 高婷,林文胜,辜敏.煤层气中含氮量对氮膨胀液化流程的影响[J].低温工程,2007(增刊): 34 - 40. ■