

文章编号:1000-582X(2011)11-1111-06

## 不同含氮量煤层气氮膨胀液化流程优化与性能分析

高 婷<sup>1</sup>, 林文胜<sup>1</sup>, 顾安忠<sup>1</sup>, 辜 敏<sup>2a,2b</sup>

(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 a. 资源及环境科学学院; b. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘 要:**针对高含氮量的煤层气液化, 构建了适用于小型液化装置的氮膨胀液化流程。为考察煤层气中氮含量对液化流程的影响, 分别以一定的液化率和甲烷回收率作为限定条件, 通过 HYSYS 模拟计算对不同氮含量(0~70%)下的液化流程进行优化, 并以单位产品液化功耗为主要指标, 比较各种条件下的系统性能。结果表明, 煤层气液化流程的性能随含氮量的变化而改变, 但并非单调变化。

**关键词:**煤层气; 气体液化; 流程设计; 优化; 氮膨胀; 功耗

**中图分类号:** TB61+9.3

**文献标志码:** A

## Optimization and performance analysis of nitrogen expansion liquefaction process for CBM with different nitrogen content

GAO Ting<sup>1</sup>, LIN Wen-sheng<sup>1</sup>, GU An-zhong<sup>1</sup>, GU Min<sup>2a,2b</sup>

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

2a. College of Resources and Environmental Science; 2b. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China.)

**Abstract:** A nitrogen expansion liquefaction process which is suitable for small-scale liquefaction plants is proposed for coalbed methane (CBM) with high nitrogen content. In order to investigate the effects of the nitrogen content on the liquefaction system performance, optimizations are done for CBM with nitrogen content among 0~70% via simulation and calculation with HYSYS when the liquefaction rate and the methane recovery rate are fixed respectively, and with the unit product liquefaction power consumption as the major index, the corresponding system performance is compared. The results show that, the system performance of CBM liquefaction process changes greatly along with nitrogen content. However, the changing is not monotonous.

**Key words:** coalbed methane (CBM); liquefaction of gases; process design; optimization; nitrogen expansion cycle; power consumption

煤层气(CBM)是一种以甲烷为主要成分的煤矿伴生气, 对其加以利用对能源利用, 煤矿安全及环

境保护均具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。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大约

收稿日期: 2011-06-01

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, 上海交通大学博士研究生, 主要研究方向为液化天然气(含煤层气)技术。

林文胜(联系人), 男, 上海交通大学副教授, (E-mail) linwsh@sytu.edu.cn。

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<sup>[4,5]</sup>。中国煤层气气源分散,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<sup>[6,7]</sup>。

西安交通大学蒲亮等<sup>[8,9]</sup>对煤层气氮-甲烷膨胀液化流程做了深入的研究,指出甲烷摩尔分数为50%左右时耗功最小。他们还构建了3种不同的膨胀机液化方案,指出丙烷预冷的氮-甲烷单级膨胀液化循环方案要优于氮-甲烷串联双级膨胀液化循环和氮-甲烷并联双级膨胀液化循环。

但是,目前对于煤层气液化流程方面的研究主要还是针对高甲烷浓度的煤层气。而受到目前瓦斯抽采技术的限制,中国大多为低浓度煤层气,含氮、氧往往较多。针对低浓煤层气,一些研究学者提出了用低温精馏法提高甲烷浓度的方法<sup>[10]</sup>。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。笔者认为,精馏过程需要低温环境,适合在液化过程之后进行,但出于安全性的考虑,氧应该在最开始就除去。因此对于低浓煤层气的液化-精馏工

艺,氮含量的多少对液化流程的参数设置及系统性能能有很大的影响。而以往的研究工作或者将氧引入了液化流程从而带来一定安全隐患,或者仅考察某一固定煤层气组分下的液化方案性能<sup>[10-12]</sup>。

笔者构建了氮膨胀液化流程,分别以一定的液化率和甲烷回收率作为限定条件,通过 HYSYS 软件模拟计算对不同氮含量下的煤层气液化流程进行优化,并以系统单位产品液化功为主要指标,比较各种条件下优化的液化流程的系统性能。

## 1 液化流程

煤层气的氮膨胀液化流程如图1所示。煤层气前期的脱水、脱酸等净化处理与普通天然气类似,笔者省去了这一步骤。图中的入口煤层气(101)假设是已经过预处理后的气体,且仅由甲烷和氮组成。煤层气(CBM)首先经两级压缩至临界压力以上,并水冷至常温;然后连续进入3个换热器(HEX1~HEX3)被循环冷氮气及天然气闪蒸回流冷气体逐级冷却并液化;最后通过节流阀(VLV-101)节流降压至接近常压,并在气液分离器(V-101)中分离出LNG产品。分离出的冷气体则依次通入3个换热器利用它的冷量。

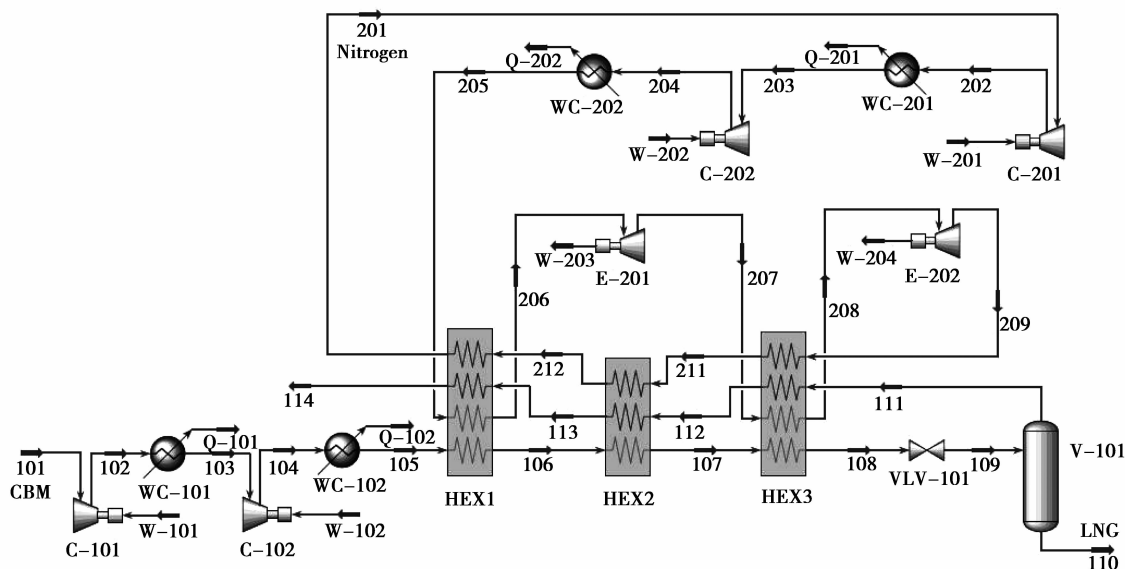


图1 煤层气氮膨胀液化流程

氮膨胀循环中,氮首先被两级压缩并水冷,接着在换热器 HEX1 中被预冷,然后一级膨胀至中间压力,并进入换热器 HEX3 被进一步冷却,之后经二级膨胀至低压并获得低温,最后依次通入3个换热器中提供冷量。

## 2 参数设定

流程中设定的参数为:经水冷器冷却后的温度为35℃,各压缩机效率为85%,膨胀机效率为80%,各换热器压降假设为0 kPa。

煤层气液化过程中:原料气温度  $t_{101} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,压

力  $p_{101} = 101.325 \text{ kPa}$ , 摩尔流量  $q_{n_{101}} = 1 \text{ kmol/h}$ ; 压缩终压  $p_{104} = 5 \text{ MPa}$ ; 产品压力  $p_{110} = 110 \text{ kPa}$ 。

换热过程中: 各换热器端面传热温差设置为  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 且各流体经同一个换热器换热后的温度相等。即  $t_{114} = t_{201} = t_{105} - 5 \text{ }^\circ\text{C} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{106} = t_{206} = t_{113} + 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{107} = t_{207} = t_{112} + 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{209} = t_{108} - 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 3 流程优化

#### 3.1 优化目标

在某一确定的煤层气含氮量并给定了流程液化率或流程甲烷回收率后, 有了以上设定的参数, 还需要确定一些参数才能计算出流程中所有流体的物性参数, 也就是需要优化的参数。包括: 1) 制冷剂氮的压缩终压  $p_{204}$  ( $p_{\text{high}}$ ); 2) 制冷剂氮的膨胀终压  $p_{209}$  ( $p_{\text{low}}$ ); 3) 换热过程中的各级温度。其中氮一级膨胀后的温度  $t_{207}$  在确定氮压缩终压及膨胀终压后即可计算出来 (一级膨胀后的压力  $p_{207}$  按压比相同确定);  $t_{108}$  也可由流程的液化率或甲烷回收率求得。因此需要确定的温度只有  $t_{106}$ 。

优化过程以流程系统单位功耗  $w$  ( $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ ) 作为主要指标,  $w$  可由式 (1) 计算得到。

$$w = \frac{W_{\text{com}} - W_{\text{exp}}}{q_{v110}} \quad (1)$$

式中:  $W_{\text{com}}$  是各个压缩机的功耗之和,  $\text{kW}$ ;  $W_{\text{exp}}$  是各个膨胀机的输出功之和,  $\text{kW}$ ;  $q_{v110}$  是 LNG 产品在标准状况下的气体体积流量,  $\text{Nm}^3/\text{h}$ 。优化的目的是使  $w$  最小。

#### 3.2 优化过程

以含氮量为 5%, 液化率为 95% 时的情况为例, 优化步骤如下:

1) 首先假定  $p_{\text{high}} = 2 \text{ MPa}$ ,  $p_{\text{low}} = 320 \text{ kPa}$ , 考察  $t_{106}$  对  $w$  的影响。当  $t_{106}$  增大到一定值, 会使得换热器 HEX2 的最小传热温差 ( $\Delta t_{\text{min}}$ ) 降低甚至导致该换热过程不能完成, 因此  $t_{106}$  存在一个上限。 $w$  及  $\Delta t_{\text{min}}$  随  $t_{106}$  的变化情况如图 2 所示。

由图 2 可见, 系统单位功耗随  $t_{106}$  的增大而减小, 但受到换热器 HEX2 的最小传热温差  $\Delta t_{\text{min}}$  的限制,  $t_{106}$  有个最大值。以  $\Delta t_{\text{min}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  作为限定条件, 此时  $t_{106}$  的最优值为  $-51 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) 接下来保持  $p_{\text{high}} = 2 \text{ MPa}$  不变, 考察  $p_{\text{low}}$  对  $w$  的影响。膨胀终压不宜低于常压, 因此把  $110 \text{ kPa}$  作为其下限。在该过程中, 每改变一个  $p_{\text{low}}$  的值, 都根据步骤 1) 找到最优的  $t_{106}$ 。 $t_{106}$  的最优值及在最优  $t_{106}$  时的  $w$  值随  $p_{\text{low}}$  的变化情况如图 3 所示。

由图 3 可见,  $p_{\text{low}}$  存在一个可使  $w$  最小的最优值。在该条件下其值为  $300 \text{ kPa}$ , 对应的最优  $t_{106}$  为

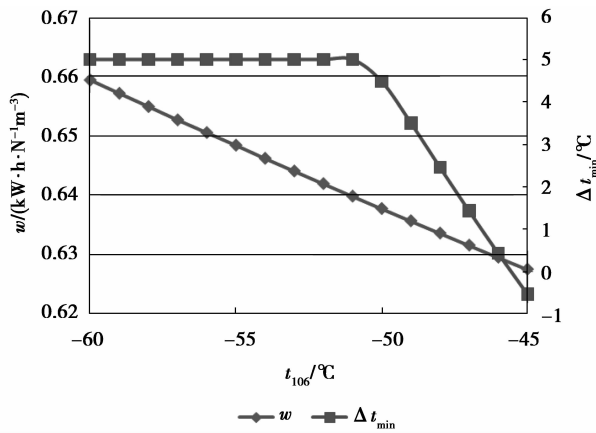


图 2  $w$  及  $\Delta t_{\text{min}}$  随  $t_{106}$  的变化

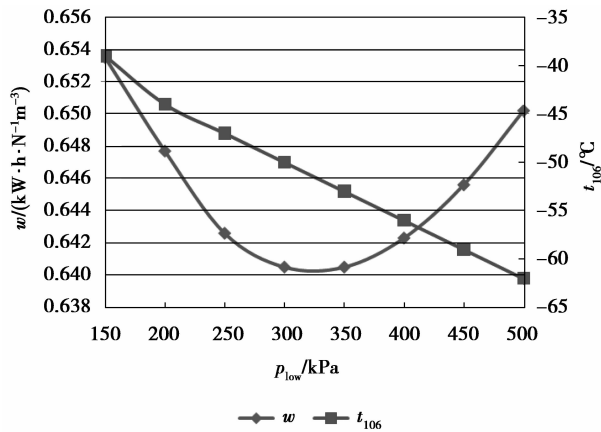


图 3  $t_{106}$  的最优值及相应的  $w$  随  $p_{\text{low}}$  的变化

$-50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3) 最后考察  $p_{\text{high}}$  对  $w$  的影响。考虑到目前压缩机设备的制造水平, 氮的压缩终压不能过大, 在此以  $10 \text{ MPa}$  作为其上限。在该过程中, 每改变一个  $p_{\text{high}}$  的值, 都按照步骤 1) 和步骤 2) 找到最优的  $t_{106}$  及  $p_{\text{low}}$ , 由此即可得到这 3 个参数的最优组合。在优化的  $t_{106}$  及  $p_{\text{low}}$  下  $w$  随  $p_{\text{high}}$  的变化情况如图 4 所示, 其相应的  $t_{106}$  及  $p_{\text{low}}$  的最优值如图 5 所示。

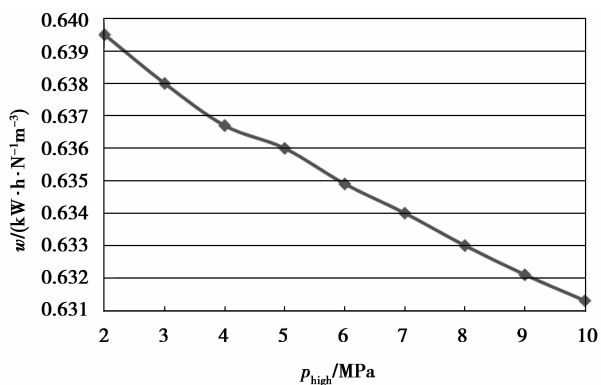


图 4  $w$  随  $p_{\text{high}}$  的变化

由图 4 可见,在考察范围内,系统单位功耗随  $p_{\text{high}}$  的增大而降低,因此可设置  $p_{\text{high}}$  为压力上限 10 MPa。

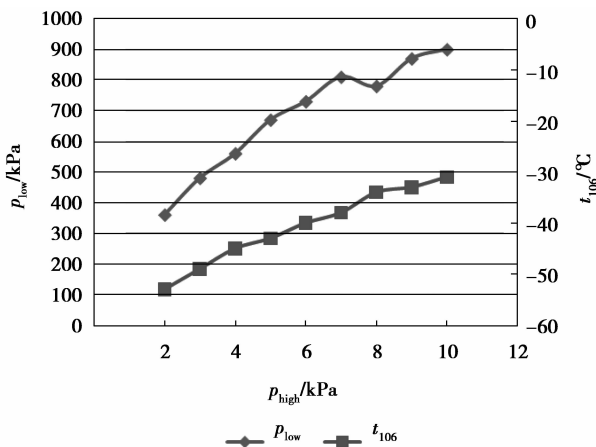


图 5  $t_{106}$  及  $p_{\text{low}}$  的最优值随  $p_{\text{high}}$  的变化

按此步骤,找到了含氮量为 5%,液化率为 95% 时流程的最优参数组合为:  $p_{\text{high}} = 10 \text{ MPa}$ ,  $p_{\text{low}} = 900 \text{ kPa}$ ,  $t_{106} = -31 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 4 系统性能研究

按照以上优化步骤,分别在一定的液化率及一定的甲烷回收率下,对煤层气含氮量在 0~70% 范围内变化时的液化流程进行优化,并考察系统单位功耗的变化情况。

### 4.1 固定液化率 $y$

液化率  $y$  是液化流程的主要指标之一,即 LNG 产品与煤层气原料气的摩尔流量之比。通过模拟计算得出了液化率在 100%~80% 范围内,煤层气含氮量在 0~70% 范围内变化时的流程最优参数。其中,  $p_{\text{high}}$  的最优值大多为 10 MPa,只是在煤层气含氮量和液化率都较高的时候,  $p_{\text{high}}$  的最优值较低。这是因为随着含氮量和液化率的增大,煤层气的液化温度逐渐降低,氮的制冷温度  $t_{209}$  也随之降低,若  $p_{209}$  ( $p_{\text{low}}$ ) 过高则可能导致膨胀机 E-202 入口带液,因此  $p_{\text{low}}$  存在一个上限。例如,含氮量为 30%,液化率为 95% 时,最优的  $p_{\text{high}}$  只有 2 900 kPa,对应的最优  $p_{\text{low}}$  为该条件下  $p_{\text{low}}$  的上限 240 kPa。特别的,含氮量高于 40%,液化率要求为 100% 时,  $p_{\text{low}}$  的上限低于常压,因此流程不能正常运行。此外,  $p_{\text{low}}$  和  $t_{106}$  的最优值均随着含氮量和液化率有着显著的变化。其中  $p_{\text{low}}$  随含氮量和液化率的增大而降低;  $t_{106}$  随含氮量的增大而显著降低,其变化范围从  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  一直到  $-77 \text{ }^\circ\text{C}$ ,随液化率的变化则不明显。

图 6 显示了优化的参数下液化流程单位功耗随含氮量和液化率的变化情况。

由图 6 可见,系统单位功耗随液化率的增大而增大,而随着含氮量的增大,单位功耗先是急剧增大,之后增长速度逐渐降低甚至出现功耗降低的趋势。这主要是因为随着液化率的增大,煤层气节流前需要达到的温度大大降低,制冷循环的制冷系数降低,从而使系统单位功耗增大。含氮量则有两方面的影响:一方面,氮的沸点低于甲烷,因此液化氮所需达到的温度低于甲烷,那么随着含氮量的增大,煤层气节流前需要达到的温度也降低,制取相同冷量的功耗增大;另一方面,氮的比热容和气化潜热均小于甲烷,所以气体氮降温部分所需冷量和冷凝过程所需冷量均小于甲烷,即将氮液化所需的冷量小于甲烷。以上两方面的共同作用使得含氮量对功耗的影响不一定是单调的。

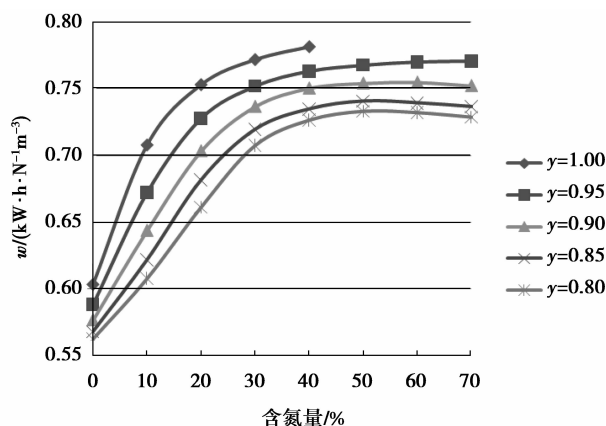


图 6  $w$  随含氮量及  $y$  的变化

### 4.2 固定甲烷回收率 $x$

在实际应用中,我们主要关心的是甲烷能否被回收,所以可以把甲烷回收率,即液态产品中甲烷的摩尔流量占煤层气原料气中甲烷摩尔流量的比率作为主要控制指标进行计算。同样的,对甲烷回收率在 100%~80% 范围内,煤层气含氮量在 0~70% 范围内变化时的流程参数进行了优化,得到的优化流程的功耗变化情况如图 7 所示。

由图 7 可见,固定甲烷回收率时,随着含氮量的增大,系统单位功耗迅速增大。这是因为在一定的甲烷回收率下,LNG 产品中氮含量随煤层气氮含量的增长速度大大低于固定液化率时候的情况(见图 8),也就是说所需液化的氮的增大速度较低。因此当含氮量增大的时候,煤层气液化所需冷量减少使系统功耗减少的影响远远小于液化温度降低使功耗增大的影响。

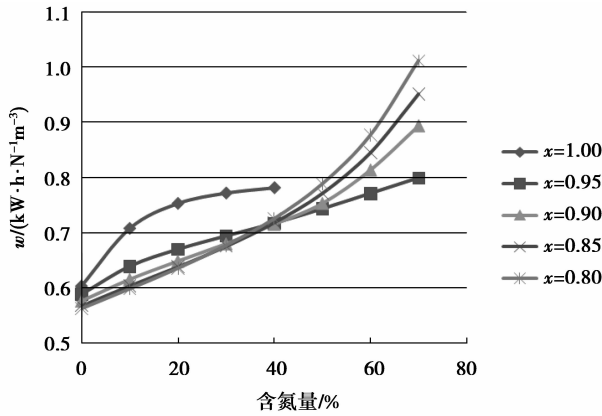


图 7  $w$  随含氮量及  $x$  的变化

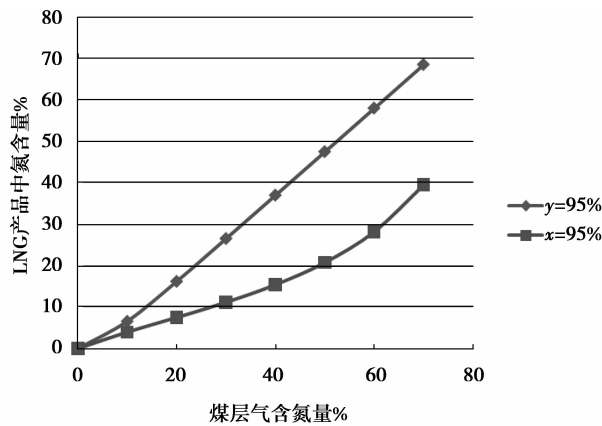


图 8 固定液化率及固定甲烷回收率时 LNG 产品中氮含量随煤层气含氮量的变化

而在相同的含氮量下,随着甲烷回收率的增大,在较低的氮含量下,系统功耗增大;而在较高的含氮量下,系统功耗反而减小。这是因为甲烷回收率对系统功耗也有两方面的影响。一方面,甲烷回收率增大,节流前温度降低,这使功耗有增大的趋势;另一方面,甲烷回收率增大,LNG 产品中氮含量也增大,因此液化所需的冷量减少,这使单位功耗有减小的趋势。随着含氮量的增大,液化温度随甲烷回收率增大而减小的速度有所降低,而 LNG 产品中氮含量随甲烷回收率增大而增大的速度大大增加(见图 9),因此后者的影响逐渐大于前者,使得功耗的变化情况也发生了变化。

## 5 结论

构建了适合于小型煤层气液化装置的氮膨胀液化流程。分别以一定的流程液化率和流程甲烷回收率作为控制指标,对煤层气含氮量在 0~70% 范围内变化时的流程参数进行优化。并以系统单位产品

液化功为主要指标,比较了各种条件下经过优化的流程性能。

结果表明,对于不同氮含量下的煤层气源,其流程参数的设置和流程性能都有很大的区别。在一定的液化率下,系统单位功耗随煤层气含氮量的增大而增大,但高于一定含氮量后基本不再增长;而在一定的甲烷回收率下,系统单位功耗随煤层气含氮量的增大迅速增大。另一方面,在相同的含氮量下,系统功耗随液化率的增大而增大;在较低的含氮量下,系统功耗随甲烷回收率的增大而增大,但在较高的含氮量下,则随甲烷回收率的增大而减小。

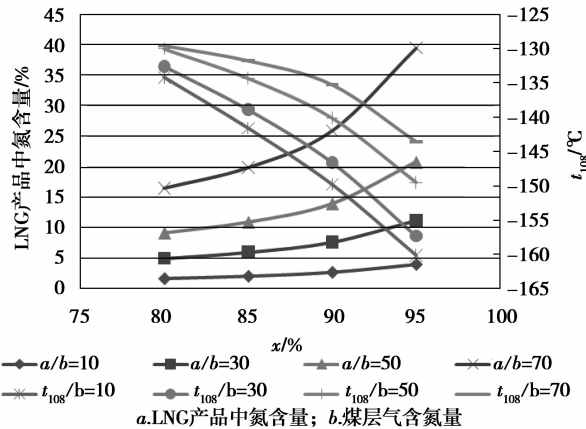


图 9 LNG 产品中氮含量及节流前温度  $t_{108}$  在不同煤层气含氮量下随甲烷回收率的变化

## 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 (6/8): 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.  
YU GUO-BAO, SUN ZHI-GAO, GUO KAI-HUA, et al. Prospect and feasibility study of CBM small-scale liquefaction [J]. Sun Yatsen University Forum, 2007, 27(2): 96-100.
- [4] LIN WEN-SHENG, GU MIN, GU AN-ZHONG, et al. Analysis of coal bed methane enrichment and liquefaction processes in China [C] // The 15th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, April 24-27, 2007, Barcelona, Spain.

- Barcelona: [s. n.], 2007: PO-39.
- [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.  
XU HUI-JUN, ZHU CHAO. Coalbed methane: role in China's energy structure, present status and future prospects of development and utilization [J]. China Coal, 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.  
FU YONG-XING, LI HUA-ZHI, GUO GUI-BIN, et al. The economic analysis of the coalbed methane liquefaction equipments [J]. Low Temperature and Special Gases, 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.  
LIN WEN-SHENG, GU AN-ZHONG, ZHU GANG. Selection for the process for liquefaction plants of natural gas [J]. Vacuum and Cryogenics, 2001, 7(2): 105-109.
- [8] 蒲亮, 孙善秀, 程向华, 等. 几种典型的煤层气液化流程计算及分析比较[J]. 化学工程, 2008, 36(2): 54-58.  
PU LIANG, SUN SHAN-XIU, CHENG XIANG-HUA, et al. Calculations and energy analysis on several kinds of liquefaction processes of natural gas[J]. Chemical Engineering (China), 2008, 36(2): 54-58.
- [9] 蒲亮, 孙善秀, 厉彦忠, 等. 带膨胀机的煤层气液化流程计算及热力学分析[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(9): 1115-1118.  
PU LIANG, SUN SHAN-XIU, LI YAN-ZHONG, et al. Calculation and thermodynamic analysis on liquefaction processes of natural gas with expanders [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(9): 1115-1118.
- [10] 范庆虎, 李红艳, 尹全森, 等. 低浓度煤层气液化技术及其应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 117-120.  
FAN QING-HU, LI HONG-YAN, YI QUAN-SEN, et al. Liquefaction technology on low-concentration CBM and its application [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 117-120.
- [11] 陶鹏万. 煤矿区煤层气低温分离液化工艺功耗分析[J]. 中国煤层气, 2009, 6(1): 37-41.  
TAO PENG-WAN. Analysis of power consumption of the liquefaction technology for separation of CMM at low temperature[J]. China Coalbed Methane, 2009, 6(1): 37-41.
- [12] 孙恒, 朱鸿梅, 舒丹. 一种低浓度煤层气低温液化分离工艺的模拟与分析[J]. 低温技术, 2009, 37(8): 21-23.  
SUN HENG, ZHU HONG-MEI, SHU DAN. Simulation and analysis of a liquefaction and separation process of low concentration CBM[J]. Cryogenics, 2009, 37(8): 21-23.

(编辑 郑洁)

~~~~~

(上接第99页)

- [8] GARCIA O, FLORES L A, OLIVER J A, et al. Bi-directional DC/DC converter for hybrid vehicles [C]// Proceedings of IEEE Conference on Power Electronics Specialists, June 16, 2005, Recife, Brazil: [S. l.], 2006:1881-1886.
- [9] INOUE S, AKAGI H. Voltage control of a Bi-directional isolated DC/DC converter for medium-voltage motor drives [C]// Proceedings of IEEE Conference on Power Conversion, April 2-5, 2007, Nagoya, Japan: [S. l.], 2007:1244-1250.
- [10] LEE W K, KWON T, LEE J, et al. A design of DC link voltage according to power loss of inverter and motor in hybrid vehicle [C]// Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Telecommunications Energy Conference, October 18-22, 2009, Incheon, Korea: [S. l.], 2009:1-3.
- [11] PAN C T, CHEN T C, HONG Y H, et al. A new DC-link converter for induction motor drives [J]. Energy Conversion, 1995, 10(1): 71-77.
- [12] CHAI J Y, LIAW C M. Development of a switch-reluctance motor drive with PFC front end [J]. Energy Conversion, 2009, 24(1): 271-280.
- [13] MOYNIHAN J F, EGAN M G, MURPHY J M D. Theoretical spectra of space-vector-modulated waveforms [J]. Electric Power Applications, 1998, 145(1): 17-24.
- [14] 陈瑶, 童亦斌, 金新民. 基于PWM整流器的SVPWM谐波分析新算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 76-80.  
CHEN YAO, TONG YI-BIN, JIN XIN-MIN. A novel algorithm of SVPWM harmonic analysis based on PWM rectifier [J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(13): 76-80.
- [15] VAS P. Sensorless vector and direct torque control [M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.

(编辑 王维朗)