

页岩气液化工艺操作成本估算

李垂窈

(西南石油大学 经济管理学院, 成都 610500)

摘要:针对我国页岩气开采中存在的问题,提出对页岩气就近进行 LNG 液化更具经济灵活性,并以四川威远的威 204 井开采出的页岩气的液化为例进行液化工艺操作成本估算。使用化工流程模拟 HYSYS 软件对流程进行工艺模拟,并利用 Matlab 软件以混合制冷循环部分的操作能耗最低为目标对混合制冷剂的配比进行了多参数优化,得到较优的混合制冷剂配比。在该优化配比下,对操作成本进行分析,总结出适用于操作成本估算的公式,为国内发展页岩气产业提供参考。

关键词:页岩气;LNG;混合制冷剂;优化;操作成本

中图分类号:F272.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2016)03-0111-05

天然气具有污染少、热值高的特点,主要以管输天然气、压缩天然气(CNG)与液化天然气(LNG)等形式使用。受开采量的限制,目前天然气占我国一次能源的比重不到 4%。增加天然气这一高效、优质、清洁的能源在我国一次能源结构中的比重,能保证 GDP 的持续稳定增长,并达到节能减排与降低空气 PM2.5 的目标并顺利完成“十二五”计划。随着我国天然气对外依存度的持续走高(如图 1 所示),国家对非常规天然气的开发越来越重视。其中,页岩气作为一种非常规天然气,全球范围内储量巨大,同常规天然气相当,其巨大的开发潜力使得我国页岩气产业在近年来得到了较大发展。

我国页岩气资源丰富。2012 年 3 月,国土资源部公布全国页岩气资源评估报告,评价工作历时 3 年,范围涵盖了全国 41 个盆地和地区、87 个评价单元、57 个含气页岩层段,经初步评价,中国陆域页岩气地质资源潜力为 $134.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源潜力为 $25.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$,页岩气资源量是常规天然气资源量的 2.4 倍^[1]。

然而,中国页岩气的开发过程中也面临着包括关键技术、核心设备以及市场环境体系建设等种种瓶颈,与美国相比,中国页岩气勘探开发受地表环境影响较大。北美人少地多,开发页岩气的地区以平原为主,水源丰富,交通便利,钻前工程量小,费用也低。而中国南方页岩气有利区多位于像四川长宁、威远这

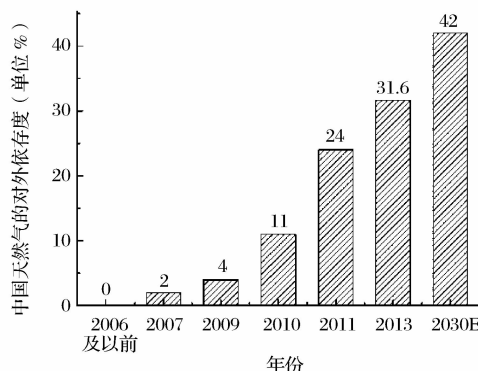


图 1 我国天然气对外依存度走势图

样的丘陵、低山地区,耕地肥沃但面积不多,交通和水源受限,且人口相对稠密,所以不仅井场选择受限,钻前工程量大,费用也高,而且受环境因素制约多^[2]。

此外,页岩气开发具有单井产量低、采收率低、投入高、钻完井周期长、产量递减快、资金回收慢、技术要求高等特点^[3]。刘竞等^[4]对四川盆地页岩气开发指标与开发潜力进行分析,得出四川盆地页岩气藏的开发单井递减率:第 1 年 40%,第 2 年 33%,第 3~5 年 6%~8%,8 年以后降为 5%,最后以 5%平稳生产。加之地质地形原因导致管道架设难度及成本较大,如一次性大规模建设页岩气天然气运输管道,将会大量增加开采初期成本投入,而后期产量下降势必又会造成资金成本极大的浪费。因此,在开采地附近

收稿日期:2015-10-28

作者简介:李垂窈(1991—),女,四川成都人,西南石油大学经济管理学院,硕士研究生,研究方向:石油产业经济。

就近建设页岩气液化工厂,将页岩气液化成 LNG 产品后通过常规交通工具运输的方式运送出来,可避免开采初期大量建设运输管道的不经济性,且 LNG 产品面对的消费市场将更具有灵活性。

1 四川页岩气开发状况

四川盆地不仅是人类最早发现、开采、利用天然气的地区之一,而且也是当前中国页岩气勘探开发的突破点,具有巨大的页岩气资源潜力和良好的发展前景^[5]。根据国土资源部全国页岩气资源潜力调查评价及有利地区优选结果,四川省的页岩气资源量为 27.50 万亿立方米,占全国的 20.46%,页岩气可采资源量 4.42 万亿立方米,占全国的 17.67%,资源量和可采资源量均居全国第一。四川省在全国最早进行页岩气勘探开发实践,有最早被国家发展与改革委员会、国家能源局批准设立的“四川长宁—威远国家级页岩气示范区”。目前,四川已累计开发出页岩气 1.66 亿立方米,销售使用 1.19 亿立方米。由于四川威远地区具有丰富的页岩气资源,因此,本文以威远地区页岩气井威 204 井为例,对其液化工艺进行操作成本估算,可以为国内发展页岩气产业提供参考。

威远构造属于川中隆起区的川西南低陆褶带,由于页岩地层裂缝发育,长水平段钻井中易发生井漏、跨塌等问题,造成钻井液大量漏失、卡钻、埋钻具等工程事故^[6]。考虑到威远地区地质条件和可能存在气井后期产量下降的问题,对威 204 井开采出的页岩气就近进行液化是较为经济可行的方式。

页岩气的主要成分是烷烃,其中甲烷占绝大多数,另有少量的乙烷、丙烷和丁烷,此外还含有硫化氢、二氧化碳、氮、水气以及微量的惰性气体,如氦和氩等。根据威 204 井气质组分分析表明,威远区块页岩气中不含硫化氢和液态烃,其天然气气质组分详见表 1 所示。

表 1 威 204 号井出口页岩气组成 (y%)

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	He	H ₂	CO ₂
97.28	0.527	0.019	0.416	0.028	0.021	1.709

2 页岩气液化流程的模拟

在各类 LNG 液化流程中,混合制冷剂液化流程具有投资较少、管理方便的优点,目前世界 80% 以上的基本负荷型天然气液化装置均采用带丙烷预冷的混合制冷剂液化流程^[7]。在页岩气的 LNG 液化过程中,混合制冷剂循环是装置实现液化的主体部分,混合制冷剂循环部分的操作成本基本能反映整个液化装置

的操作成本高低水平,因此,对混合制冷剂循环部分的操作成本估算十分必要,且对相似工程的建设具有一定的指导作用。

本文对威 204 井开采出的页岩气设计使用带丙烷预冷的混合制冷剂进行液化,其流程示意图如图 2 所示。

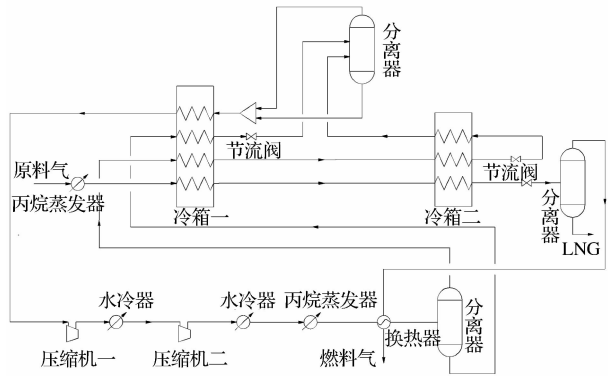


图 2 页岩气液化流程示意图

温度为 25℃、压力为 5 150 kPa 的页岩气由丙烷蒸发器预冷后进入液化装置,由混合制冷剂提供液化所需冷量,经两级冷箱换热至 -142℃,节流降压至 110 kPa 后,经两相分离器分离气液两相后得到 LNG 液相产品和气相 BOG 闪蒸汽。混合制冷剂通过两级压缩机压缩后,经水冷和丙烷预冷,并与气相 BOG 闪蒸汽换热后由两相分离器分成气液两股:液相混合制冷剂在一级冷箱中换热后,通过节流阀膨胀放热获得 -146℃ 的低温制冷剂流;气相制冷剂经两级冷箱降温,通过节流阀膨胀放热获得 -171.5℃ 的低温制冷剂流并返回二级冷箱提供冷量,换热后与之前的 -146℃ 的低温制冷剂流混合并返回一级冷箱提供冷量,在完成供冷后回到压缩机单元重新开始制冷剂的循环。

其中,由于 CO₂ 在低温环境下可能形成干冰造成装置冻堵,因此实际液化操作前应对原料气进行预处理脱除 CO₂。根据王楼明等^[8]建议二氧化碳含量 ≤0.1mol% 的标准,在 HYSYS 软件进行模拟时,设定进入 LNG 液化装置的原料气 CO₂ 体积分数为 0.1%,并对其余组分进行归一化处理后,成分如表 2 所示。

表 2 LNG 装置入口进料组成 (y%)

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	He	H ₂	CO ₂
98.87	0.537	0.019	0.424	0.029	0.021	0.1

在 HYSYS 环境中建立带丙烷预冷的混合制冷剂液化装置模拟流程,选择 Peng-Robinson 状态方

程^[9]作为物性方法,对威 204 井页岩气的 LNG 液化过程进行模拟。

3 混合制冷剂循环的优化

3.1 混合制冷剂配比对流程能耗的影响

在混合制冷剂 LNG 液化流程中,混合制冷剂循环是装置实现液化的主体部分,因此,优化混合制冷剂循环,降低混合制冷剂循环部分的能耗,对页岩气液化厂有着较大的经济效益。其中,混合制冷剂循环流程的主要能耗来自于动设备压缩机的电力消耗。利用化工流程模拟软件 HYSYS 可以较为准确地对液化过程中的能耗进行模拟和计算^[10-11],通过 HYSYS 软件建立页岩气液化流程的模型,可探究混合制冷剂循环各参数之间的相互影响关系。

表 3 不同制冷剂配方下对应的能耗

配方号	$x_1, \%$	$x_2, \%$	$x_3, \%$	$x_4, \%$	E, KW
1	0.29	0.42	0.26	0.03	29 262.1
2	0.31	0.4	0.26	0.03	29 916.84
3	0.32	0.39	0.26	0.03	30 242.41
4	0.29	0.4	0.28	0.03	28 897.57
5	0.32	0.37	0.28	0.03	29 876.58
6	0.28	0.42	0.26	0.04	29 559.33
7	0.3	0.4	0.26	0.04	30 198.56
8	0.32	0.38	0.26	0.04	30 848.03
9	0.29	0.42	0.25	0.04	30 062.9
10	0.29	0.39	0.28	0.04	29 508.88
11	0.31	0.37	0.28	0.04	30 148.29
12	0.26	0.42	0.28	0.04	28 570.63
13	0.27	0.42	0.26	0.05	29 819.99
14	0.29	0.4	0.26	0.05	30 447.5
15	0.31	0.38	0.26	0.05	31 084.01
16	0.32	0.37	0.26	0.05	31 405.04
17	0.29	0.42	0.24	0.05	30 823.54
18	0.29	0.4	0.26	0.05	30 447.5
19	0.29	0.38	0.28	0.05	30 074.71
20	0.3	0.37	0.28	0.05	30 389.28
21	0.32	0.35	0.28	0.05	31 023.79
22	0.29	0.42	0.26	0.03	29 262.1
23	0.31	0.4	0.26	0.03	29 916.84
24	0.32	0.39	0.26	0.03	30 242.41

注: $x_1 \sim x_4$ 分别为甲烷、乙烷、丙烷、氮气的摩尔含量。

混合制冷剂循环的总效率主要取决于天然气原料与混合制冷剂之间的温度匹配情况,其中,混合制冷剂的组成是影响温度匹配的最重要因素^[12]。另外,由于制冷剂中各单一组分的原料价格不同,因此不同的组成配比的制冷剂其原料使用成本也不同。在满足液化流程工艺要求的条件下,分别使混合制冷

剂中甲烷摩尔含量(x_1)在 26%~32%、乙烷摩尔含量(x_2)在 35%~42%、丙烷摩尔含量(x_3)在 24%~28%、氮气摩尔含量(x_4)在 3%~5%之间变动,其不同的组成及对应的能耗(E)见表 3。

使用 Matlab 软件对表 3 中的数据进行拟合,得到式(1):

$$E = (-1.10489 + 3.49611x_1 + 3.62012x_2 + 3.20578x_3 - 4.16352x_1x_2 - 4.03777x_1x_3 - 4.32996x_2x_3 - 1.74519x_1^2 - 2.29218x_2^2 - 1.99421x_3^2) \times 10^5 \tag{1}$$

回归模型 P 值 $<0.000\ 1$,远小于 0.05 表明其有极高的可靠性和显著性,复相关系数($R^2=0.999\ 9$)接近于 1,校正相关系数 $R^2_{Adj}=0.999\ 9$ 表明模型可表征试验中 99.99%的数据。一般信噪比大于 4 即可,该模型的信噪比为 2 814.432 说明模型精密度高。所以该能耗模型具有较高准确度。

其中,由于制冷剂各组分受到总含量百分之百的约束,各组分摩尔含量并不是完全相互独立的自由变量,因此,在拟合中仅选取甲烷摩尔含量(x_1)、乙烷摩尔含量(x_2)和丙烷摩尔含量(x_3)为自由变量,而氮气摩尔含量(x_4)为单位 1 与前三种组分摩尔百分数总和的差值,即 $1-x_1-x_2-x_3$ 。

3.2 混合制冷剂配比的优化

$$\left\{ \begin{aligned} &E = (-1.10489 + 3.49611x_1 + 3.62012x_2 + 3.20578x_3 - 4.16352x_1x_2 - 4.03777x_1x_3 - 4.32996x_2x_3 - 1.74519x_1^2 - 2.29218x_2^2 - 1.99421x_3^2) \times 10^5 \\ &s. t. \\ &0.26 \leq x_1 \leq 0.32 \\ &0.35 \leq x_2 \leq 0.42 \\ &0.24 \leq x_3 \leq 0.28 \\ &0.03 \leq 1 - x_1 - x_2 - x_3 \leq 0.05 \end{aligned} \right. \tag{2}$$

采用 Matlab 软件,在制冷剂各组分含量变化范围约束内,以能耗 E 最低为目标函数,对式(2)进行最优化求解,得到的最优制冷剂配比为:甲烷/乙烷/丙烷/氮气 = 0.27/0.42/0.28/0.03。再结合 HYSYS 软件,在保证流程收敛的情况下对配比进行修正,得出混合制冷剂在甲烷摩尔含量为 27.5%,乙烷摩尔含量为 41.5%,丙烷摩尔含量为 28%,氮气摩尔含量为 3%的配比下,装置取得最小功耗 28 419.58 KW。

对优化后的混合制冷剂的成分配比换算成各组分的质量百分数,如表 4 所示。

表 4 优化后的制冷剂的各组分质量分数(w/%)

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂
14.67	41.49	41.05	2.79

4 页岩气液化工艺操作成本的估算

混合制冷循环部分的总操作成本 M 由两部分组成:动设备的操作能耗成本 M_1 和原料使用操作成本 M_2 。

$$M = M_1 + M_2 \tag{3}$$

其中,混合制冷循环部分的操作能耗成本 M_1 由三部分组成:功耗 $E(\text{KW})$,装置工作时间 $t(\text{h})$,当地大工业用电价 $P_e(\text{元/度})$ 。

$$M_1 = E \times t \times P_e \tag{4}$$

原料使用操作成本 M_2 主要用于描述制冷剂等原料在装置操作过程中的使用及消耗情况,对因运行过程中各种损耗导致的制冷剂补充设置更换系数 C ,如:制冷剂在一年内有 50%被更换补充,则更换系数为 1.5。另外,设定装置中混合制冷剂总质量为 G (吨),制冷剂各组分的质量分数为 $w_i(\%)$,各组分价格为 $P_i(\text{万元/吨})$ 。

$$M_2 = C \times \sum G \times w_i \times P_i \tag{5}$$

其中,混合制冷剂中各组分的市场价格如表 5 所示。

表 5 混合冷剂各组分价格 (1×10⁵元/吨)

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂
0.4	1.25	0.85	0.14

在总操作成本 $M(\text{万元/年})$ 的计算过程中,功耗采用优化的制冷剂配比条件下所得功耗,装置工作时间 t 通常按照 8 000 h/a 计算,并结合制冷剂质量配比、制冷剂原料价格等各已知条件,最终得出混合制冷循环部分的总操作成本估算公式(6):

$$M = 22735.6740 \times P_e + 0.9301 \times C \times G \tag{6}$$

5 结论

我国页岩气资源丰富,但存在开采难度大,技术不够完善的问题。针对我国页岩气开发地质原因问题以及可能存在气井后期产量下降的问题,建议在开采地附近就近建设页岩气液化工厂,将页岩气液化成 LNG 产品后通过常规交通工具运输的方式运送出

来,可避免开采初期大量建设运输管道的不经济性,且 LNG 产品面对的消费市场将更具有灵活性。

四川地区具有巨大的页岩气资源潜力和良好的发展前景,是当前中国页岩气勘探开发的突破点。四川威远地区具有丰富的页岩气资源,对我国页岩气发展具有示范作用,以威远地区页岩气井威 204 井为例,对其液化工艺进行操作成本估算,可以为国内发展页岩气产业提供经济参考。

在页岩气混合制冷剂液化流程中,混合制冷剂的配比对装置的操作成本有较大影响。通过优化冷剂配比后总结出的操作成本估算公式可以较为简捷地对页岩气液化装置操作成本进行估算,具有一定的实用性。

参考文献

[1] 胡文瑞,鲍敬伟. 探索中国式的页岩气发展之路[J]. 天然气工业,2013,33(1):1-7.

[2] 王兰生,廖仕孟,陈更生,等. 中国页岩气勘探开发面临的问题与对策[J]. 天然气工业,2011,31(12):119-122.

[3] 朱凯. 中美页岩气发展路径比较研究[J]. 国际石油经济,2013 (1):89-95.

[4] 刘竞,徐海棠,余果,等. 四川盆地页岩气开发指标与开发潜力分析[J]. 天然气勘探与开发,2014(2):45-47.

[5] 江永宏. 页岩气勘探和开发政策研究初探[J]. 科技创新导报,2012(26):20-21.

[6] 聂靖霜. 威远、长宁地区页岩气水平井钻井技术研究[D]. 成都:西南石油大学,2013.

[7] 王保庆. 天然气液化工艺技术比较分析[J]. 天然气工业,2009,29(1):111-113.

[8] 王楼明,叶锐钧. 进口 LNG 的质量及其控制指标探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量,2009(3):23-28.

[9] 郑云萍,夏丹,刘晓红,等. 基于 HYSYS 的 C3/MRC 天然气液化流程影响因素分析[J]. 石油与天然气化工,2013,42 (5):473-477.

[10] 石玉美,汪荣顺,顾安忠. 流程参数对 C3/MRC 天然气液化流程性能的影响(上)[J]. 天然气工业,2004,24(2):88-90.

[11] 石玉美,顾安忠. 制冷剂参数对混合制冷剂循环液化天然气流程性能的影响[J]. 上海交通大学学报,2000,34(9):1182-1186.

[12] 牛亚楠. 多元混合制冷剂小型天然气液化装置的模拟研究[D]. 上海:同济大学,2007.

Cost Estimation of Liquefaction Process for the Shale Gas

LI Chui-yao

(School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Liquefying shale gas into LNG product near the gas well can be of more economic flexibility in response to the problems existing in the development of shale gas in China. The cost estimation of liquefaction for the shale gas from Wei 204 # well in Weiyuan was taken as the calculation case. Based on the propane-precooled mixed refrigerant liquefaction process, chemical simulation software Hysys was employed as the simulator. Software Design-Expert and Matlab were also used to optimize the composition proportion of the mixed refrigerant with the minimum energy consumption of the mixed-refrigerant cycle as the objective function. Then the formula for cost estimation was concluded according to the composition proportion above. The merit of simplicity makes the formula convenient and practical for cost analysis of the shale gas liquefaction in field operation.

Key words: shale gas; LNG; mixed refrigerant; optimization; operation cost

(上接第 105 页)

[7] 陈云, 谭淳方, 俞立. 科技型中小企业技术创新能力评价指标体系研究[J]. 科技进步与对策, 2012(2): 110—112.
[8] 李希义, 房汉廷. 我国科技型上市公司的创新性[J]. 经济管理, 2009, 30(11): 22—27.
[9] SUOMALA P. The life cycle dimension of new product development performance measurement[J]. International Journal of Innovation Management, 2004, 8(2): 193—221.
[10] BREMSER W G, BARSKY N P. Utilizing the balanced scorecard for R&D performance measurement[J]. R&D Management, 2004, 34(3): 229—238.
[11] CRUZ-CÁZARES C, BAYONA-SÁEZ C, GARCÍA-MAR-

CO T. You can't manage right what you can't measure well: technological innovation efficiency[J]. Research Policy, 2013, 42(6): 1239—1250.
[12] 布凌格. 聚焦创新[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 29—31.
[13] 王立然, 周文学, 文宗川. 企业创新方法应用成熟度模型研究[J]. 科技管理研究, 2013(24): 196—198.
[14] 王晓梅, 郭中杰. 基于雷达图的中小企业管理创新评价[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(20): 5732—5736.
[15] 冯琳, 韩震. 基于技术创新能力评价的创新模式选择[J]. 云南社会科学, 2014(1): 81—84.

Research on Enterprise Innovation Ability Measurement
Based on Time Consuming Factor

YANG Ze-kun, FAN Yi-yang, GAI Xue-min

(Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The accurate and effective measurement of innovation is an important way to boost social innovation development. Based on the idea of time internal friction factor, this paper uses program analysis to extract time internal friction factors in terms of their scopes. Then we use the normalized linear mapping and maturity grading to establish measurement model. Finally innovation scorecard is taken to measure enterprise innovation capacity so that we can propose some advice and improvements.

Key words: innovation capability measurement; time consuming factor; innovation maturity

(上接第 110 页)

Township Sustainable Development Evaluation Based on
Principal Component Analysis

ZENG Ben-hao, ZHANG Xin-ying, WU Feng-hua, WU Yu-feng, WEI Ni-yu,
CHEN Ping, WANG Yong-zhuang

(School of Environment and Life Science, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China)

Abstract: Changtang town of Qingxiu district of Nanning city was chosen as the research region. An index system including sub-system of economic, society, resource and environment, population, and 18 induces, was constructed. Principal component analysis was used to assess the sustainable development of Changtang town according to the observation data of 2010 to 2014. The results showed that the sustainable development capacity of this town show an increasing trend during 2010—2014. The comprehensive score grows to 16.85 from -17.18 which grow 1.98 times. The sustainable development level rank of the sub-system is: society > resource and environment > population > economic.

Key words: sustainable development; principal component analysis; Changtang town