

工艺与设备

液化天然气冷能用于商品天然气轻烃分离回收工艺及过程分析

边海军, 徐文东, 李秀喜, 钱宇

(华南理工大学化学与化工学院, 广东 广州 510640)

摘要:开发了液化天然气(LNG)冷能用于商品天然气轻烃回收工艺,其乙烷的回收率为96.6%。该工艺的能量利用率分析及焓分析结果表明,系统的能量利用率为58.7%,焓效率为91.0%;与电压缩制冷工艺相比,节电效率为90.5%。此外,采用图像焓分析方法对本工艺进行焓流分析,诊断出了该系统中焓损较大的操作单元,为提高该操作单元的焓利用率及整个工艺系统的优化奠定了理论基础。

关键词:冷能利用;液化天然气;轻烃回收;焓分析

中图分类号:TQ083.4

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2010)07-0058-04

Description and analysis of ethane recovery process from natural gas with LNG cryogenic energy

BIAN Hai-jun, XU Wen-dong, LI Xiu-xi, QIAN Yu

(School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A novel process of ethane recovery from natural gas with cryogenic energy of liquefied natural gas (LNG) is developed. The recovery efficiency of ethane is 96.6%. Energy efficiency analysis and exergy analysis have been carried out, the results show that energy efficiency of the process is 58.7%, and exergy efficiency of daily fire use of the process is 91.0%. Compared to the electric refrigeration process, the electricity-saving efficiency is 90.5%. In addition, the process has been analyzed by the fire energy utilization diagram analysis, and the operational units with large exergy loss has been identified. The analytical results could be used for the exergy efficiency improvement of the operational units and the optimization of the whole process is thus based.

Key words: utilization of cryogenic energy; liquefied natural gas; ethane recovery; exergy analysis

随着我国 LNG 产业的发展,其进口量逐年增加,仅2008年我国实际进口量约为330万t,按理论上每吨 LNG 回收冷能240 kWh 计,则可以回收约8亿kWh 的电力,因此,LNG 冷能的利用受到了学者和工业界的普遍关注。LNG 冷能利用方式主要有以下几种:空气分离^[1-3],冷能发电^[4-5],橡胶深冷粉碎^[6],冷库^[7]等。

我国众多的商品天然气 C₂ 组分含量较高,如果把这些 C₂ 组分分离出来作为乙烯裂解原料,不仅具有较高的经济价值,亦能缓解我国日趋紧张的能源局势。目前,随着我国 LNG 接收站在沿海地区的建设及商品天然气管网在沿海城市的普及,使得 LNG 冷能用于商品天然气中 C₂ 组分分离技术的应用成为可能。

料,压力为16 bar(1 bar = 10⁵ Pa),温度40℃,其典型组成和 LNG 组成见表1。该工艺的处理能力为250.0 × 10⁴ m³/d,回收 C₂ 组分后的产品天然气管输至中压管网,外输压力2.5 MPa。该工艺共利用的 LNG 流量为270 t/h,利用的冷能温位为-158 ~ -120℃。

表1 商品天然气和 LNG 组成

项目	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀
商品天然气摩尔分数/%	87.82	9.76	1.14	0.01
LNG 摩尔分数/%	89.39	5.76	3.30	0.78
项目	nC ₄ H ₁₀	CO ₂	N ₂	H ₂ O
商品天然气摩尔分数/%	0.01	0.55	0.56	0.15
LNG 摩尔分数/%	0.66	0.00	0.11	0.00

该工艺采用 ASPEN 软件进行模拟,热力学方法采用 PR 方法。泵效率为90%,不考虑换热器热损失,换热器压降为0.4 bar;脱甲烷塔仅设塔底再沸器,2股进料,脱甲烷塔主要设计参数见表2。所得

1 工艺流程模拟

1.1 原料及产品

该工艺采用未回收 C₂ 组分的商品天然气为原

收稿日期:2010-02-07;修回日期:2010-06-02

作者简介:边海军(1978-),男,博士生,主要从事 LNG 冷能利用方向的研究,020-87112260, haijun.bian@mail.scut.edu.cn;钱宇(1957-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事系统工程方向的研究,通讯联系人,020-87113046, ceyuqian@scut.edu.cn。

产品见表3。

表2 脱甲烷塔主要设计参数

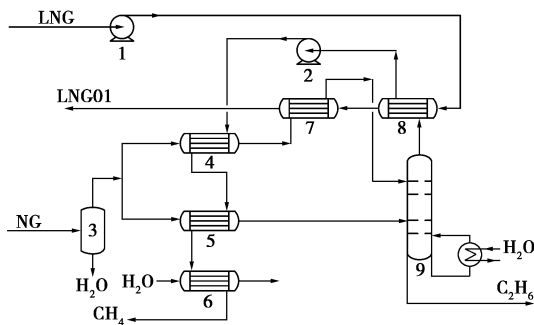
塔板数	进料板位置	进料温度/ ℃	操作压力/ bar	拔出物流率/ kmol·h ⁻¹
31	1,12	-120, -90	14	4145

表3 产品一览表

产品	温度/ ℃	压力/ bar	流量/ kg·h ⁻¹	组成(摩尔 分数)/%	回收 率/%
乙烷	-15.4	15.8	16480.9	85.7	96.6
产品天然气	5.0	34.0	67202.2	98.8	—

1.2 工艺流程

笔者开发的商品天然气轻烃回收工艺流程见图1。原料天然气 NG 经油水分离器脱水后分为2股,1股与来自脱甲烷塔 T₁ 塔顶的产品天然气一次换热后,再与 LNG 二次换热,冷却至液态 -120.0℃,进入脱甲烷塔塔顶做回流;另1股与来自脱甲烷塔塔顶的产品天然气二次换热,冷却至 -90℃,进入脱甲烷塔的中部,分离原料气中的 C₂ 组分。



1—LNG 提升泵;2—产品提升泵;3—油水分离器;
4,5,6,7,8—换热器;9—脱甲烷塔

图1 LNG 冷能用于商品天然气轻烃分离回收工艺流程图

脱甲烷塔塔顶的产品天然气冷却至液态后经泵升压,再经过冷能回收利用环节,最后经海水升温至 2℃ 左右后,进入城市天然气管网。

本工艺特点是采用 LNG 冷能为整个工艺过程提供冷能,同时考虑了低温产品的冷能回收利用,是一种较为节能的商品天然气轻烃回收工艺。

2 结果与讨论

2.1 能量利用率分析

该工艺中 LNG 提供的冷能量约为 9 670 kW/h,

LNG 提升泵和脱甲烷塔塔顶产品输送泵的总的电力负荷约为 1 340 kW/h,公用工程输入该工艺的热负荷为 5 472 kW/h,经计算,该工艺的能量利用效率为 58.7%。按脱甲烷塔进料温度 -90℃、制冷系数 COP 为 0.75^[8] 计算,由 LNG 所提供的冷能约相当于用电量 1.28×10^4 kW,即相对于电压压缩制冷工艺,本工艺可节电约 1.28×10^4 kW,节电效率为 90.5%。

2.2 焓分析

焓是系统由任意状态可逆变化到给定环境状态时理论上的最大有用功,是以环境作为基准的相对量。一种物质的焓由物理焓 $E_{X,phys}$ 和化学焓 $E_{X,chem}$ 组成,可用式(1)表示:

$$E_X = E_{X,phys} + E_{X,chem} \quad (1)$$

对于稳定流动的系统,由于忽略了工质的位能和动能焓,某工质在某一状态下的焓可以用式(2)表示:

$$E_X = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (2)$$

其中 T_0 、 H_0 、 S_0 为基准态下的温度、焓和熵,本文中基准态为 25℃,1 atm (1 atm = 1.01×10^5 Pa)。

该工艺过程为稳定流动的物理变化过程,不涉及化学反应,因此,本文只计算各物流的物理焓。

常用的系统焓分析模型有黑箱模型和灰箱模型 2 种。黑箱模型分析是借助于输入、输出子系统的能流信息来研究子系统内部用能过程;灰箱模型是将系统中所有设备均视为黑箱,黑箱与黑箱之间以主焓流线连接起来形成网络,是一种黑箱网络模型。对于黑箱模型,输入、输出系统的总焓不变,这里输入系统的总焓包括供给焓 $E_{X,sup}^S$ 和物流的带入焓 $E_{X,br}^S$,输出系统的总焓包括有效焓 $E_{X,eff}^S$ 和系统的焓损 $E_{X,loss}^S$,系统的焓损 $E_{X,loss}^S$ 包括输出系统的无效焓 $E_{X,ineff}^S$ 和内部焓损 $E_{X,irr}^S$,系统的焓平衡关系可以用式(3)表示;焓效率即为输出系统的有效焓与输入系统的总焓的比值,可以用式(4)计算:

$$E_{X,sup}^S + E_{X,br}^S - E_{X,eff}^S - E_{X,loss}^S = 0 \quad (3)$$

$$\eta = E_{X,eff}^S / (E_{X,sup}^S + E_{X,br}^S) \quad (4)$$

根据图 1 可以建立该工艺的焓分析模型,见图 2(框中数字代表图 1 中对应设备)。此模型中,将工艺的各个单元视为黑箱,仅考虑输入输出各个单元的能流信息,同时根据各个单元间的能量流动情况,用主焓流线将各个单元连接后形成本工艺的焓分析模型,模型中将脱甲烷塔的塔底再沸器与精馏塔作为 1 个整体考虑。

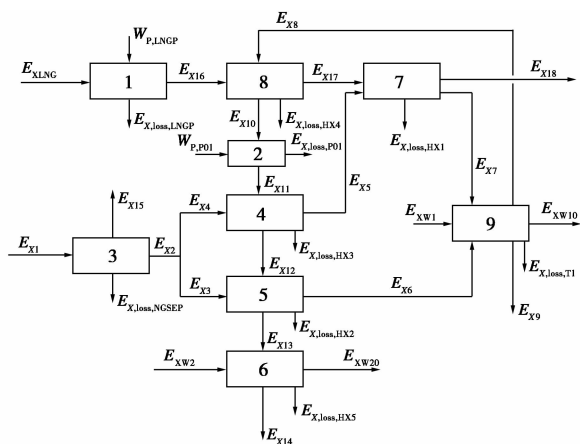


图 2 商品气轻烃回收工艺焓分析模型

从图 2 中可以看出,图 2 中的各个单元均与图 1 中的各个设备相对应,仅考虑了与各个单元相关的能流信息。若将整个系统视为黑箱模型,则可以根据式(3)建立系统的焓平衡方程,根据式(4)计算出整个系统的焓效率;若分别将各单元视为黑箱模型,则可以根据式(3)建立各单元的焓平衡方程,根据式(4)计算出各单元的焓效率。物流 LNG01 为 -120℃ 的 LNG,温度较低,具有较大的冷能回收价值,本文中将其视为有效焓。经计算,系统的焓效率为 91.0%,系统中各单元的焓效率见表 4。

表 4 轻烃回收工艺各单元的焓效率

单元名称	3	4	5	6	7	8	9
焓效率/%	99.9	96.3	51.3	79.3	85.2	90.2	74.3

从表 4 中可以看出,换热器 5 和脱甲烷塔的焓效率为 51.3% 和 74.3%,焓效率较低,其原因在于换热器 5 和脱甲烷塔的塔底再沸器冷热物流的换热温差较大,引起的过程焓损较大,其焓效率较低。

2.3 EUD 焓流图分析

为了进一步揭示单元焓损失产生的内在原因,本文采用 Ishida 教授 1982 年提出的图像焓分析方法即 EUD 法^[9-11]进一步分析本工艺。EUD 方法引入了能量品位 A 的概念,以图像来反映过程的能量利用情况,横坐标为 ΔH,纵坐标为 A,是过程前后焓的变化 ΔE 与能量变化 ΔH 的比值,即:

$$A = \Delta E / \Delta H = 1 - T_0 \Delta S / \Delta H \quad (5)$$

式中 ΔS 表示过程前后熵的变化, T₀ 为环境参考温度(298.15 K)。对于换热过程,上式可以简化为:

$$A = \Delta E / \Delta H = 1 - T_0 / T \quad (6)$$

EUD 方法将能量的传递过程分为能量释放侧和能量接收侧,能量品位之差表示过程驱动力,2 条

变化曲线之间的面积代表了过程焓损失。

从式(6)可以看出,换热过程的能量品位 A 仅为温度函数,因此,可以通过换热单元中冷热物流的温度计算出该物流的能量品位 A。由于在精馏过程中,主要的焓损失发生于塔顶的冷凝器和塔底的再沸器,可以将精馏过程近似作为换热过程处理。该工艺的换热及精馏过程的 EUD 图见图 4。

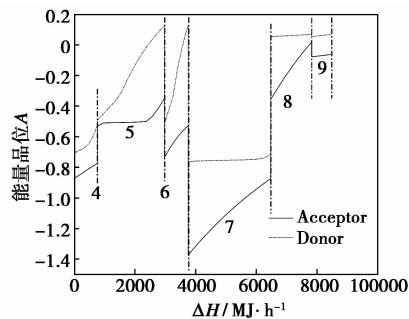


图 4 商品天然气轻烃回收工艺换热及精馏过程 EUD 图

图 4 中各曲线段所围的面积即为油田伴生气凝液回收工艺中各换热单元及精馏单元的焓损,对图 4 中各曲线所围面积积分,即可得到凝液回收工艺中各换热单元及精馏单元的焓损,计算结果见表 5。

表 5 换热单元及精馏单元的焓损

单元名称	焓损/10 ⁵ kJ·h ⁻¹	对应曲线
换热器 4	1.57	4
换热器 5	7.80	5
换热器 6	3.67	6
换热器 7	10.70	7
换热器 8	3.30	8
脱甲烷塔 9	6.94	9

图 4 中 5、4、8、9 曲线段中能量释放侧的能量品位 A 或能量接收侧的能量品位 A 存在平台线段,其原因在于该换热器中的冷物流或热物流存在相变过程,同时发生相变物流的单位温变的热负荷较大,使得相变物流的相变过程持续较长。另外,从图 4 还可以看出,换热器 7 为整个过程中的焓损最大单元,其能量释放侧的能量品位 A 为 -0.73,能量接收侧为 -1.34,能量品位相差较大,造成了较大的焓损失。

3 结语

本文开发了 LNG 冷能用于商品天然气轻烃

回收工艺,建立了该工艺的焓分析模型,分析了该工艺的能量利用情况及节电效率,通过上述分析可以得到如下结论:

(1)该工艺乙烷的回收率为96.6%,能量利用率为58.7%。

(2)与电压缩制冷工艺相比,该工艺的节电效率为90.5%。

(3)该工艺的焓效率为91.0%;同时,通过图像焓分析方法诊断出了该工艺的能量利用瓶颈单元,为该工艺的优化奠定了理论基础。

未来几年内我国沿海地区即将建成20个LNG接收站,预计到2020年,我国每年将进口LNG 6 000万t。同时随着我国西气东输1线、西气东输2线、“陕气北上”、“川气出川”等内陆天然气管网的迅猛发展,多种气源管网的统一建设、燃气热值标准化等问题逐渐显露出来。LNG冷能用于商品天然气轻烃回收技术的开发应用将成为解决这些问题的重要措施之一。因此,该工艺具有广阔的应用和发展空间。

参考文献

[1] Yamanouchi N, Nagasawa H. Using LNG cold for air separation [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1979, 75(7): 78-82.

- [2] Nakaiwa M, Akiya T, Owa M, *et al.* Evaluation of an energy supply system with air separation [J]. *Energy Conversion & Management*, 1996, 37(3): 295-301.
- [3] 陈则韶,程文龙.一种利用LNG冷量的空分装置新流程[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(6): 913-916.
- [4] Celidonio D, Giorgio D, Vincenzo L. Exergy recovery during LNG regasification: Electric energy production-part one [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29: 380-387.
- [5] Zhang N, Lior N. A novel near-zero CO₂ emission thermal cycle with LNG cryogenic exergy utilization [J]. *Energy*, 2006, 31: 1666-1679.
- [6] 熊永强,华贵,贾德民.利用液化天然气卫星站冷能的废旧橡胶低温粉碎装置[J]. *现代化工*, 2009, 29(7): 59-62.
- [7] 王强,历彦忠,陈曦,等.液化天然气冷能分析及其回收利用[J]. *流体机械*, 2003, 31(1): 56-58.
- [8] 化工第四设计院. *深冷手册* [M]. 北京:燃料化学工业出版社, 1973: 10-13.
- [9] Ishida M, Kawamura K. Energy and exergy analysis of a chemical process system with distributed parameters based on the energy-direction factor diagram [J]. *Industrial Engineering and Chemistry Process Design & Development*, 1982, 21: 690-702.
- [10] Jin H, Ishida M. Graphical exergy analysis of complex cycles [J]. *Energy*, 1993, 18: 615-625.
- [11] Thongchai Srinophakun, Sangapong Laowithayangkul, Masaru Ishida. Simulation of power cycle with energy utilization diagram [J]. *Energy Conversion & Management*, 2001, 42: 1437-1456. ■

废电器及电子材料综合利用技术实现重大突破 浙江丰利承担的浙江省重大科技专项通过验收

日前,由全国高新技术企业浙江丰利粉碎设备有限公司承担的浙江省重大科技专项“废电器及电子材料综合利用技术及其成套设备”项目,经过3年多时间的实施,现已完成规定的各项技术经济指标,顺利通过浙江省科技厅验收。[验收证书编号:浙科验字(2010)743号]。

验收专家认为:该项目的完成,开创了工业化批量处理废电器及电子材料的先例;从整体上提高我国废电器及电子材料回收利用的综合水平,从而推动我国再生资源回收行业的技术进步和提升再生装备水平,实现产业的跨越式发展。

据了解,目前我国已经进入家电更新的高峰期,由此产生的废弃电子电器总量高达500多万t;废旧电子电器中既有大量可以资源化的金属和非金属材料,又有对环境存在较大威胁的危害成分——重金属和卤素阻燃剂等。如何降低废弃电子产品有害物质对环境的危害,促进废弃电子产品以无害环境的方式回收利用和处置,成为亟待解决的重要课题。

长期致力于绿色环保装备开发的浙江丰利粉碎设备有限公司,积极响应国家倡导的资源节约型、环境友好型“两型”企业建设号召,紧紧抓住节能环保产业成为国家重点扶持的“战略性新兴产业”的良好契机,借鉴国外先进技术,结合我国国情,采用先进的机械处理方法,将超微粉碎

技术与绿色环保科技有机结合,实现了废电器及电子材料综合利用多项技术的新突破,使电子废弃物得到合理的处理和利用,成功走出一条变废为宝的新兴产业化和循环经济之路。“废电器及电子材料综合利用技术及其成套设备”项目列入2006年度浙江省重大科技专项(项目编号2006C13032)。

项目产品针对废电器及电子材料的特点,重点研究废电器及电子材料的粗、中、细破碎和高压静电分选技术,开发了废旧电子电器回收处理成套设备。该成套设备具有配置合理、粉碎效果好、分选纯度高、二次污染低、自动化程度高等特点。各项技术指标可达到国外的废电器回收技术指标,但生产成本大大低于国外同类设备。项目产品现已获得发明专利1项、实用新型专利3项,并荣获浙江省科学技术二等奖。

目前,浙江丰利已经开发完成了年处理10 000 t和5 000 t的废电器及电子材料回收处理示范生产线;并已达到年产15条废电器及电子材料综合利用成套设备的生产规模。产品经浙江方圆检测集团股份有限公司检测,所测指标符合国家和企业相关标准要求,并达到了项目可行性研究报告中的技术指标。产品经各地用户使用,反映良好,具有较好的社会效益,有效解决了环境污染和资源浪费的现象。(吴宏富)