

过程模拟优化在化工工艺设计中的应用分析

李亚利

东华工程科技股份有限公司 安徽合肥 230011

摘要: 本文将河南省偃师市顾县镇建设的某座液化天然气工厂为案例, 分析过程模拟在案例当中的应用过程以及效果对比, 以期能够为相关单位提供借鉴作用。

关键词: 过程模拟优化; 化工工艺; 设计方案

Application analysis of process simulation optimization in chemical process design

Yali Li

Donghua Engineering Technology Co., Ltd. Hefei 230011, Anhui

Abstract: This paper will take a liquefied natural gas (LNG) plant constructed in Gu County Town, Yanshi City, Henan Province, China, as a case study to analyze the application process and comparative effectiveness of process simulation. The aim is to provide a reference for relevant units.

Keywords: process simulation and optimization; Chemical technology; design scheme

过程模拟优化在推进化工工艺效果增加方面的作用极为关键, 可以给化工工业设计提供充分的支持, 提高整体效果。伴随科学技术发展, 化工反应已经广泛应用在多领域, 正确应用计算机技术, 完成对化工生产的历程模拟, 已成为目前化工设计的关键方向。化工领域的模拟软件数量正在持续增多, 目前受到广泛应用的包括 ASPEN、HYSYS 等。在开展化工模拟时, 拥有专业软件和数据支撑, 模型的收效显著提高。

项目以河南省某公司一项拟在偃师市顾县镇建设一座液化天然气工厂的咨询服务。案例的核心是通过对比液化工艺模拟比较, 选择较优的方案设计。项目前期情况: 项目气源来自西气东输二线支线洛阳—偃师输气管道的偃师末站。按当地规划通过偃师末站向偃师供气, 并通过回偃师末站与义马—郑州输气管道连接, 利用现有义马—郑州输气管道向巩义市、荥阳市等县区市供气。末站输送天然气量 $100 \times 10^4 \text{Nm}^3/\text{天}$, 供气压力为 4.5MPa, 供气温度 $10 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

一、液化工艺方案比选

针对业主提供项目情况, 对液化技术方案进行比选, 目前国内外工艺常见的液化方法有三种:

- 1) 有数种单一冷冻组成的逐级冷冻循环;
- 2) 混合冷冻剂冷冻循环;
- 3) 膨胀机制冷循环。

逐级冷冻循环通常由丙烷、乙烯和甲烷组成的冷冻循环构成, 冷冻温度分别为 -30°C , -70°C , -160°C 。逐级冷冻循环所需的能耗最小, 但所需的压缩机组及设备

较多, 操作复杂。

混合冷剂冷冻循环以多组分混合物为冷冻剂, 只需一台混合冷剂压缩机。混合冷剂的组成根据原料气组成、压力以及系统的物料平衡和热量衡算而定。该循环所需设备较少, 但其能耗比逐级冷冻循环高, 一般用于基本负荷型。

膨胀制冷循环直接利用有压天然气, 在膨胀机中等熵膨胀到下游输送管道的压力, 使天然气液化。一般情况下膨胀机工艺的能耗最高, 但因城市管网供气时有管道压力差可以利用, 在这种特定的场合下几乎不需耗电。不足之处: ①天然气液化率低; ②投入到天然气净化处理成本较高; ③天然气压力能利用率低^[1-3]。

根据业主提供的供气和用气特点, 推荐本项目使用膨胀制冷液化工艺, 充分利用管道压力能液化天然气, 同时使膨胀气排入下游城市管网。

二、膨胀制冷液化工艺模拟

在业主同意该方案后, 采用化工模拟软件 HYSYS 对流程进行模拟, 流程模拟中用 PR 状态方程来计算天然气的热物性。PR 方程形式如下:

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2}$$

式中, p 为压力, T 为温度, R 为气体常数, V_m 为摩尔体积, $a\alpha$ 、 b 为与物质类型有关的常数。

根据原料气组分, 对膨胀制冷液化工艺进行工艺模

拟和方案比较。

2.1 方案1 恒比例膨胀液化流程

工艺流程描述: 4.5MPa 管道天然气 (100 万 m^3/d) 经过滤计量后分为二路, 一路天然气 (15%) 进入脱碳装置, 脱去 CO_2 、 H_2S 后进入冷箱, 预冷至 -65°C 出冷箱进入重烃分离器, 分离出重烃后的气体再进入冷箱液化段, 被冷却到 -110°C 出冷箱经节流阀降压至 0.45MPa 进入 LNG 储罐, 从 LNG 储罐闪蒸的低温 BOG 返回冷箱复热至常温后进入中压管网。

另一路天然气 (85%) 经增压机增压至 6.3MPa 后经过水冷器降温至 40°C 进入冷箱, 预冷到 -20°C 出冷箱, 分为二路, 一路天然气 (85%) 进入一级膨胀机进行膨胀, 膨胀至 1.75MPa, 温度降到 -84°C 进入冷箱冷却天然气, 换热到常温后出冷箱进入次高压管网。另一路天然气 (15%) 经冷箱冷却至 -65°C 进入二级膨胀机, 膨胀至 0.45MPa, 温度降到 -137°C 进入冷箱冷却天然气, 换热到常温后出冷箱分为二路, 一路 (54%) 经增压机增压至 1.75MPa 后进入次高压管网; 另一路 (46%) 与复热至常温的 BOG 混合进入中压管网。

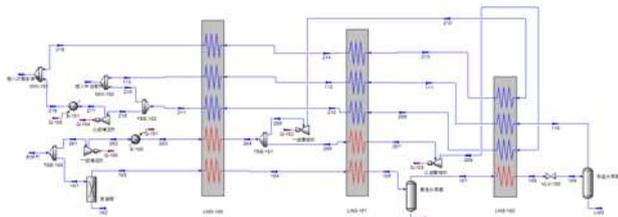


图1 恒比例膨胀液化流程图

2.2 方案2 全组分膨胀液化流程

工艺流程描述: 4.5MPa 天然气 (100 万 m^3/d) 进入脱碳装置, 脱去 CO_2 、 H_2S 后依次进入两级增压机增压至 6.5MPa, 并经过水冷器降温至 40°C 。经水冷后的天然气进入冷箱, 预冷至 -51.5°C 后进入一级膨胀机降温降温, 为保证进入二级膨胀机的气体中没有液体, 在一级膨胀机出口设置了重烃分离器, 分离温度为 -63°C 。从重烃分离器出来的气体进入二级膨胀机膨胀至 1.72MPa, 此时有一部分天然气已经液化。从二级膨胀机出来的天然气进入气液分离器, 气相部分返流进入冷箱为天然气提供冷量, 并使自身加热至常温, 进入次高压管网; 液相部分进过节流阀节流至 450kpa 后, 进入 LNG 分离器, 从分离器底部获得 LNG 产品, 分离器顶部的 BOG 进入冷箱, 为天然气提供一部分冷量并使自身加热至常温, 进入中压管网。

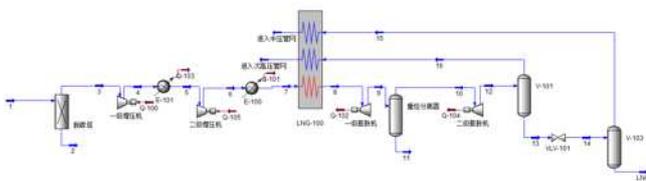


图2 全组分膨胀液化流程

三、两模拟膨胀液化流程比较与分析

3.1 天然气净化处理比较

方案1 恒比例膨胀液化与方案2 全组分膨胀液化在流程上区别在于: 方案一在进入冷箱前直接分离一股 15% 的原料天然气, 经过净化后作为液化气, 而方案二, 全部原料天然气都经过脱酸, 在全部经过增压机加压后, 进入冷箱降温, 再由膨胀机减压 降温液化部分天然气。

在天然气净化这部分方案一, 较为简单, 预处理装置只需考虑 15 万 m^3/d , 而方案二, 预处理能力需按 100 万 m^3/d 来设计。经与专业厂家询价, 原料气组成及净化气指标按下设计。

组份名称(摩尔组分): CH_4 (93.620), C_2H_6 (2.850), C_3H_8 (0.410), IC_4H_{10} (0.030), NC_4H_{10} (0.210), IC_5H_{12} (0.030), NC_5H_{12} (0.020), C_6+ (0.050), N_2 (2.140), CO_2 (0.640), CO_2 含量为按 3% 设计。

原料气经净化后指标: $\text{H}_2\text{O} < 1\text{ppmV}$, $\text{CO}_2 < 20\text{ppmV}$, $\text{Hg} < 0.01\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, $\text{C}_6+ \leq 10\text{ppmV}$, 系统阻力 $\leq 0.15\text{MPa}$, 温度 $\sim 40^\circ\text{C}$

由于方案2 全组分膨胀液化在预处理净化天然气量上较大, 设备投资较高。具体设备、管道、仪表、电气以及工艺包转让等总费用方面合计, 方案1 恒比例膨胀液化流程在天然气净化方面总费约在 225 万。方案2 全组分膨胀液化中, 天然气的预处理投资约在 650 万。

3.2 膨胀机、压缩机效率及能耗比较

系统整体效率的高低部分依赖于系统中动部件的工作效率。膨胀机和压缩机部件的工作效率与工质的进出口状态相关, 考虑到此因素和其他变量过多, 系统模拟中, 膨胀机和压缩机绝热效率都按 80% 设计, 以便各结果在同一基点对比, 同时假设膨胀机所做功全部被压缩机利用。

方案1 与方案2 能耗对比如下:

一级膨胀机 (kw): 493.6/91.4

二级膨胀机 (kw): 84.7/423.9

一级增压机 (kw): 387.9/243.2

二级增压机 (kw): 168.9/286.7

总能耗 (kw): 21.5/14.6

单位能耗 (kw · h/ Nm^3): 0.005/0.0038

注: a/b 为方案1 恒比例膨胀液化流程 / 方案2 全组分膨胀液化流程

由上表可以看出, 在膨胀机及压缩机总能耗方面, 方案2 全组分膨胀液化程单位能耗 $0.0038\text{kw} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ 要好于方案1 的 $0.005\text{kw} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ 。这组数据不包括前期预处理工段的能耗。

3.3 冷箱费用及液化率比较

方案1 恒比例膨胀液化流程在液化过程需要 3 个换热器, 而方案2 全组分膨胀液化流程仅需要一个换热器, 从设备投资角度考虑, 方案1 冷箱费用约在 250 万, 方案2 冷箱费用约在 100 万。

由于方案 1 的换热效果好, 最大程度地回收了天然气的有用能, 其液化率达到 10.85%。方案 2 全组分膨胀液化流程的液化率仅 9.72%。

天然气液化率是利用压力能液化天然气流程的关键指标。方案 1 的液化率比方案 2 高出 1.13%。LNG 按每标方 4 元计算, 一天方案 1 可多生产 LNG 约 4.5 万, 在设备上的差价, 由于较高的液化率将会很快得到弥补。

3.4 其他方面比较

在储存方面, 方案 1 恒比例膨胀液化流程与方案 2 全组分膨胀液化流程的储存压力: 450kPa, 考虑中压管网为 0.4Mpa, 管道输送会有压降。储存温度方面, 方案 1 的储存温度: -139.62°C ; 方案 2 的储存温度: -133.79°C 。

储存设备拟选 150m^3 的真空夹套罐, 两方案在设备投资及储存效率方面相差不多。

应用效果: 根据供气和用气特点, 建议本项目使用膨胀制冷液化工艺, 可充分利用管道压力能液化天然气。通过对两膨胀制冷液化工艺流程模拟的比较, 推荐本项目选用方案 1 恒比例膨胀液化流程。其液化率较高, 前期天然气净化处理设备较简单, 便于操作。根据投产类

似厂家经验, 建议在后期工艺包及详细设计阶段, 考虑原料天然气中重烃的含量变化, 增加重烃脱除装置。

四、结束语

总之, 化工模拟对推动化工工艺的稳步推进以及持续进步的帮助是无可忽略的。现代社会飞速发展, 化工生产的价值无法忽略, 模拟优化技术还可以为今后企业发展明确方向, 使得企业能够更加有效地融入当前的时代发展进程, 其实际价值和作用都是无可忽视的。

参考文献:

[1] M. Minta, R. R. Bowen, J. B. Stone. Process for making pressurized liquefied natural gas from pressured natural gas using expansion cooling [P]. United States, 6,378,330 B1, 2002

[2] W. Robert. Industrial gas pipeline letdown liquefaction system[P]. United States, 6,196,021 B1, 2001

[3] 熊永强, 华贲, 罗东晓. 用于燃气调峰和轻烃回收的管道天然气液化流程[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 130-132.