

信息技术应用

深冷空分装置不同产品纯度下的产品能耗

江健荣¹, 冯 霄^{1*}, 段明哲², 张志刚²

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 陕西 西安 710049;

2. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘要:利用 Aspen Plus 软件对深冷空分工艺流程建立了模拟模型, 通过改变工况进行模拟分析, 得到产品能耗与氧气体积分数的关系。能耗随氧气体积分数的降低而降低, 二者之间的关系式可以拟合为一个 4 次多项式, 为合成氨生产过程的整体优化节能奠定了基础。

关键词:深冷空分; Aspen Plus; 能耗; 产品纯度

中图分类号: TQ021.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)06-0198-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.06.046

Energy consumption under different product purities in cryogenic air separation unit

JIANG Jian-rong¹, FENG Xiao^{1*}, DUAN Ming-zhe², ZHANG Zhi-gang²

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Coal Chemical Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: A simulation model for cryogenic air separation process is established by using Aspen Plus software. The relationship between the product energy consumption and the volume fraction of oxygen is obtained by simulation under different operating conditions. The product energy consumption decreases with the decrease of the volume fraction of oxygen. The relationship between them can be fitted as a four-order polynomial, which lays the foundation for energy optimization of synthetic ammonia process.

Key words: cryogenic air separation; Aspen Plus; energy consumption; product purity

空分就是用来把空气中的各组分气体分离, 生产氧气、氮气和氩气的工业装置, 其中氧气是工业中应用最广泛的原料^[1-4]。空分的主要途径有 3 种, 深冷空分工艺、变压吸附以及膜分离技术^[5-10]。深冷空分技术应用时间较长, 技术较为成熟, 广泛应用于大工业生产中^[11-13]。传统空分企业所生产的氧气纯度为定值, 但是在很多情况下, 不同生产过程所需求的氧气纯度不同, 过高纯度的氧气势必会造成能量浪费。另外在合成氨的工艺中, 氮气可以作为有用的组分进入合成氨产品。

由于计算机的发展以及流程模拟软件的长足进步, 很多学者应用 Aspen Plus 模拟软件研究深冷空分工艺, 取得了很多科研成果。Cornelissen 等^[14]利用 Aspen Plus 软件模拟深冷空分工艺流程, 得到工艺中主要的物流数据, 然后进行焓分析, 确定了焓损失最大的部分是压缩机。Amann 等^[15]利用 Aspen Plus 软件模拟天然气联合循环电厂中的空气分离以

及相关流程, 模拟的结果与实际吻合良好。陈彩霞^[16]分别利用 Aspen Plus 和 HYSYS 模拟深冷空分流程, 发现 Aspen Plus 的整体模拟效果要优于 HYSYS。鉴于 Aspen Plus 软件在深冷空分工艺模拟中的良好适用性, 本文中采用 Aspen 模拟软件模拟深冷空分工艺流程。

本文中利用 Aspen Plus 软件对深冷空分工艺流程建立模拟模型, 研究产品能耗与氧气产品纯度的关系。为需要氧气的生产过程如合成氨生产过程的整体优化节能奠定基础。类似的研究未见报道。

1 空气分离系统建模

1.1 模拟模型的建立

因为本文中主要研究的是产品为氧气的空分流程能耗随氧气纯度的关系, 为了简化流程, 将空气视为氧和氮的二元组分, 忽略氩组分的影响。在 Aspen Plus 建模方面, 借鉴了韩彩霞^[16]的建模结

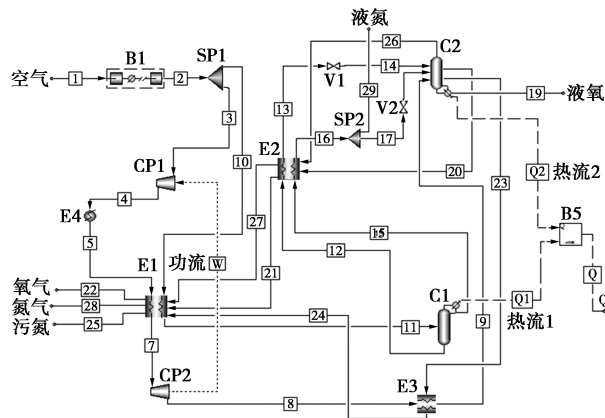
收稿日期: 2017-11-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0602600)

作者简介: 江健荣(1993-), 男, 硕士生; 冯霄(1953-), 女, 博士, 教授, 主要从事过程系统工程研究, 通讯联系人, 029-82664376, xfeng@xjtu.edu.cn。

果,并在此基础上对模型进行了简化,省去了其中的氩塔,并调整了其中的物流关系。Aspen Plus 中空气分离系统主要包括 3 个部分^[17],空气压缩机、换热器以及精馏塔。物性方法选择为 RKS-BM^[18],其被推荐用于深冷空分工艺模拟中,在不同的压力和温度下都有良好的适应性。进料空气温度设定为常温 25℃,压力为 101.325 kPa,主要成分为(体积分数)氮气(79.1%)、氧气(20.9%)。

空气分离系统采用深冷技术,入口流量取为 115 420 m³/h。系统采用全低压内压缩流程,原料空气经过空压机压缩冷却后进入主换热器,其中一部分空气作为膨胀空气,温度降到-143℃后再经膨胀后进入上塔,另一部分空气温度降为-170.9℃进入下塔。具体的工艺流程如图 1 所示。



B1—空压机;SP1,SP2—分流器;CP1—压缩机;CP2—膨胀机;
E1—主换热器;E2—过冷器;E3—膨胀后换热器;E4—冷却器;
V1,V2—节流阀;C1—下塔;C2—上塔

图 1 空分流程模型

1.2 主要模块选取

1.2.1 压缩机

压缩机模块 B1,选用 MCompr 模块,采用两级压缩^[15],级间冷却和级后冷却。出口压力为 580 kPa,出口温度为 32℃。

1.2.2 换热器

主热交换器 E1 选用 MHeatx 模块,主换热器各物流见表 1 所示。

表 1 主换热器主要参数

出口物流	出口温度/℃	压力损失/kPa
膨胀空气 7	-110	8
空气 9	—	12
氧气 26	30	15
氮气 27	30	15
污氮 28	30	15

过冷器 E2 选用 MHeatx 模块,各物流初始参数见表 2 所示。

表 2 过冷器主要参数

出口物流	出口温度/℃	压力损失/kPa
液氮 16	-190	6
污氮 24	-176	3
氮气 23	-176	3
液空 13	—	6

1.2.3 精馏塔

下塔模块 C1 选用 RadFrac 模块,塔板级数 36,塔顶采出率为 0.47,下塔顶部压力为 543 kPa,全塔压降为 18 kPa。下塔进出物流如表 3 所示。

表 3 下塔物料流股

物流类别	物流名称	塔板级数
进料物流	空气 11	36
出料物流	液氮 15	1
	液空 12	36

上塔模块 C2 选用 radfrac 模块,塔板级数设定为 86,塔顶采出率为 0.3065,上塔顶部压力为 132 kPa,全塔压降为 6 kPa。上塔进出物流如表 4 所示。

表 4 上塔物料流股

物流类别	物料名称	塔板级数
进料物流	液氮 17	1
	液空 18	64
	膨胀空气 10	72
出料物流	氮气 19	1
	污氮 20	35
	气氧 21	86
	液氧 22	86

2 结果及验证

因为现行的空分工业中氧气的体积分数大都为 99.6%,现以氧气体积分数为 99.6%工况为例做流股分析。在该工况下,下塔的主要流股计算结果如表 5 所示,上塔的主要流股计算结果如表 6 所示。

表 5 下塔主要流股的计算结果

流股名称	温度/℃	压力/kPa	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	纯度(含氧量)
空气 9	-170.8	580	109765	20.9%
液氮 11	-177.9	550	51589	4×10 ⁻⁶
富氧液空 18	-173.3	568	58175	39.6%

表 6 上塔主要流股的计算结果

流股名称	温度/ ℃	压力/ kPa	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	纯度 (含氧量)
液氮 17	-192.8	140	51540	4×10 ⁻⁶
富氧液空 18	-189.2	140	58175	39.6%
膨胀空气 10	-178.2	138	5656	20.9%
氮气 19	-193.3	132	30000	1×10 ⁻⁶
污氮 20	-193.1	132	65058	6.2%
气氧 21	-179.6	138	20000	99.6%
液氧 22	-179.6	138	300	99.9%

表 7 为流程的主要产品和实际工程产品要求的对比。从表 7 可以看出,流程模拟的主要产品氧气、氮气和液氧纯度和产量均和工业中的实际产品要求相符。说明在 Aspen Plus 中建立的空气分离模型是可行的,能够反映工业中空气分离系统的运行过程。

表 7 模拟结果与实际产品要求对比

产品类别	模拟结果		实际产品要求	
	产量/ (m ³ ·h ⁻¹)	纯度 (含氧量)	产量/ (m ³ ·h ⁻¹)	纯度 (含氧量)
氧气	20000	99.6%	20000	≥99.6%
液氧	300	99.9%	200	≥99.6%
氮气	30000	1×10 ⁻⁶	30000	≤2×10 ⁻⁶
液氮	49.97	4×10 ⁻⁶	50	≤10×10 ⁻⁶

3 能耗随氧气体积分数的变化关系

由于空分的原料是空气,所以空分的生产成本主要是由能耗决定的。在建立的模型中主要的能耗是在压缩机部分,下塔塔压的维持,以及冷量的制取主要也是依靠压缩机部分提供能量。空分的能耗一般由氧气的单耗 N_{O_2} 表示,当空分装置生产多种产品时,应将其他产品的产量折算成氧产品,这时氧气的单耗为折合单耗,计算公式^[19]为:

$$N_{O_2} = \sum N / (V_{O_2} + \sum \alpha_{j,O_2} \cdot V_j) \quad (1)$$

式中, N_{O_2} 为氧气单耗, kJ/(h·m³); N 为耗能, kW; V_{O_2} 为氧气产量, m³/h(标); α_{j,O_2} 为折算系数; V_j 为除氧外其他气体产品, m³/h(标)。

在空分流程中,由于上下塔之间通过冷凝蒸发器换热,而上塔的塔压基本维持在定值。如果将上塔的氧气体积分数调低,上塔塔底的温度降低,则冷凝蒸发器的温差变大。这时就可以将下塔的压力调低,降低下塔塔顶的温度,使冷凝换热器的温差减

小,以维持主冷器温差不变。由于下塔的压力降低,空气压缩机的出口压力就可以相应调低,整个流程的能耗降低。同时,随着氧气体积分数降低,整个流程的氧提取量逐渐增加,如果维持纯氧的提取量不变,可以适当降低入口的空气量。这样空压机的能耗以及整个流程的能耗也会相应地降低。

保持主冷器温差不变,改变入口空气量,调节工况得到不同体积分数氧气产品的系统单耗如表 8 所示。

表 8 氧气产品单耗随纯度变化

氧气 体积 分数	进口 空气量/ (m ³ ·h ⁻¹)	纯氧 提取量/ (m ³ ·h ⁻¹)	空压机 出口压 力/kPa	空压机 功耗/ kW	折合氧 气产量/ (m ³ ·h ⁻¹)	氧气单 耗/(kJ· h·m ⁻³)
0.996	115420	19920	580.0	10076.9	21655	0.47744
0.990	111160	19920	577.9	9682.1	21794	0.45612
0.980	106024	19920	574.4	9198.9	22197	0.42921
0.970	103589	19920	571.1	8954.5	22664	0.41375
0.950	101017	19920	564.4	8665.0	23923	0.39253
0.930	100182	19920	557.6	8525.4	25272	0.37848
0.900	99245	19920	547.3	8342.1	26801	0.35896

图 2 为氧气单耗随氧气体积分数变化的曲线图,从图中可以看出,随着氧气体积分数的降低,能耗的下降是非常明显的。通过对表 8 的数据进行拟合可以得到氧气单耗 N_{O_2} 随氧气体积分数 y_{O_2} 的表达式(2)。

$$N_{O_2} = 3\ 238.6y_{O_2}^4 - 12\ 071.13y_{O_2}^3 + 16\ 871.21y_{O_2}^2 - 10\ 478.72y_{O_2} + 2\ 440.535 \quad (2)$$

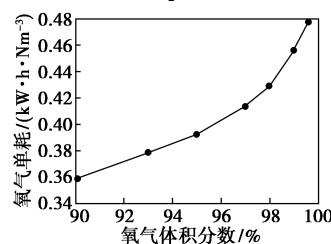


图 2 氧气产品单耗随体积分数变化

对于煤气化成氨工艺来说,空气分离单元的能耗较大^[20],有较大的节能潜力。从表 8 中数据可以分析得出,只要将氧气的体积分数调低至 95%,氧气单耗就可以降低大概 17.8%。但是如果调低氧气产品的体积分数,煤气化过程所需要低体积分数的氧气流量就会增加,后续流程操作费用会增加。这样就存在一个最优的氧气体积分数使得整个煤制合成氨流程的能耗最小,具体的工作还有待于进一

步地展开。

4 结论

利用 Aspen Plus 对深冷空分流程建模并进行了模拟计算。通过调节工况,得到不同氧气体积分数工况下空分流程的能耗并分析了二者之间的关系。结果表明,随着氧气体积分数的降低,能耗的下降是非常明显的,而且在体积分数越高的区域下降越明显。得出二者之间的关系式,有助于进一步优化煤制合成氨工艺流程能耗。

参考文献

- [1] Smith A R, Klosek J. A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes[J]. Fuel Processing Technology, 2001, 70(2): 115-134.
- [2] 高聚忠. 煤气化技术的应用与发展[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(1): 65-71.
- [3] 汪寿建. 现代煤气化技术发展趋势及应用综述[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 653-664.
- [4] Watanabe H, Otaka M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier [J]. Fuel, 2006, 85(12/13): 1935-1943.
- [5] Darde A, Prabhakar R, Tranier J P, et al. Air separation and flue gas compression and purification units for oxy-coal combustion systems [J]. Energy Procedia, 2011, 4(1): 966-971.
- [6] Smith A R, Klosek J. A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes[J]. Fuel Processing Technology, 2001, 70(2): 115-134.
- [7] Jiang L, Biegler L T, Fox V G. Simulation and optimization of pressure-swing adsorption systems for air separation[J]. Aiche Journal, 2010, 49(5): 1140-1157.
- [8] 魏玺群, 陈健. 变压吸附气体分离技术的应用和发展[J]. 低温与特气, 2002, 20(3): 1-5.
- [9] Tan X, Liu Y, Li K. Mixed conducting ceramic hollow-fiber membranes for air separation [J]. Aiche Journal, 2005, 51(7): 1991-2000.
- [10] Coombe H S, Nieh S. Polymer membrane air separation performance for portable oxygen enriched combustion applications [J]. Energy Conversion & Management, 2007, 48(5): 1499-1505.
- [11] 熊杰, 赵海波, 郑楚光. 深冷空分系统的过程模拟、优化及焓分析[J]. 低温工程, 2011, (3): 39-43.
- [12] Ham L V D, Kjelstrup S. Exergy analysis of two cryogenic air separation processes [J]. Energy, 2010, 35(12): 4731-4739.
- [13] 李晓黎, 亢万忠. 大型空分装置在煤化工中的应用与发展[J]. 化肥工业, 2011, 38(5): 8-11.
- [14] Cornelissen R L, Hirs G G. Exergy analysis of cryogenic air separation [J]. Energy Conversion & Management, 1998, 39(16): 1821-1826.
- [15] Amann J M, Kanniche M, Bouallou C. Natural gas combined cycle power plant modified into an O/CO cycle for CO capture [J]. Energy Conversion & Management, 2009, 50(3): 510-521.
- [16] 陈彩霞. 全低压空分装置流程与精馏过程的模拟分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [17] 韩冬, 段伦博, 段钰锋, 等. 富氧燃烧全流程建模及系统优化[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2241-2246.
- [18] Aspen Plus Version 8.6 User Guide [M]. Boston: Aspen Tech Inc, 2000.
- [19] 李化治. 制氧技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [20] 游伟, 王耀, 孔秋生, 等. 煤制合成氨装置能耗分析与节能方向[J]. 化肥设计, 2014, (2): 1-6. ■

我国自主集成世界级“海上油气处理厂”交付

日前,从中国海洋石油集团有限公司传来消息,首次由我国自主集成的世界级 FPSO(海上浮式生产储卸油装置)P67 在青岛成功交付巴西。这是目前我国为国外交付的工程量最大、最复杂、技术要求最高的 FPSO 项目。

FPSO 是当今海上油气田开发的主流生产装置,能够对海上原油天然气进行初步加工、储存和外输,是集人员居住与生产指挥系统于一体的综合性大型海上油气生产基地,被称为“海上油气处理厂”。P67 的成功交付,将进一步加强能源国际合作,同时助推“中国制造”走出去。

据介绍,P67 总长超过 300 m,总宽约 74 m,甲板面积

相当于 3 个标准足球场。作业水深 2 200 m,最大产油量 15 万桶/d,储油量 160 万桶,天然气处理能力 600 万标方/d,配有可供 158 人作业的生活楼及直升机平台。它的最大排水量达 35 万 t,排水量及生产能力均达到世界级水平,堪称海上“巨无霸”。

在 P67 的建造过程中,海油工程进行了 120 多项技术和工艺创新,以焊接检验为例,技术团队成功克服了 PAUT(超声相控阵检测)技术在小径管和不锈钢材料上的应用难题,将该技术应用到 1 寸不锈钢小管焊口的质量检测中,实现了在国内海洋船舶工程领域的首次应用,提升检验效率近十倍。(中国政府网)