

大型空分装置在煤化工中的应用与发展

李晓黎, 亢万忠

(中国石化集团宁波工程有限公司 315103)

摘要 在煤化工产业发展的推动下,以深冷分离为主的空气分离技术在产业链中日趋重要,空分装置逐渐成为产业链中的核心和龙头装置,业界对空分装置的可靠性、能耗、投资等方面提出了更高要求。近年来,空分装置在装置大型化、产品多样化、系统集成化方面取得了显著进步,国产空分装置的设计、制造水平显著提高。

关键词 空气分离 大型化 集成化 发展

Use and Development of Large-Scale Air Separation Plants in Coal Chemical Industry

Li Xiaoli, Kang Wanzhong

(SINOPEC Ningbo Engineering Co., Ltd. 315103)

Abstract Under the impetus of development of coal chemical industry, air separation technology, mainly cryogenic separation process, is increasingly important in the industry, air separation plants have gradually become key and leading plants in industry, which brings out higher demands for reliability, energy consumption and investment of the plants by the industry. In recent years, air separation plants have made significant progress in terms of large-scale, product diversification and system integration. The design and manufacturing level of domestic air separation plants has improved remarkably.

Keywords air separation large-scale integration development

空气分离技术是最典型的公用工程技术,被广泛应用于化工、钢铁、养殖、高效燃烧和污染物治理等行业和领域。空分制氧技术通常分为吸收分离、吸附分离、膜分离和深冷分离4种。近年来,随着煤化工的快速发展,以深冷分离为主的空气分离技术得到迅速发展,单套装置的规模不断增大,能耗、物耗、投资不断降低,自动化水平和运行可靠性日益提高。随着煤化工产业链的延伸与发展,业界对空分装置的产品规格、能耗、投资、运行可靠性等提出了更高的要求。

均需要大量的氧气。典型气化技术的氧煤比见表1,不同产品规模的煤化工装置采用典型煤气化技术的氧耗量见表2。

表1 典型气化技术的氧煤比/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

煤气化技术	氧煤比	煤气化技术	氧煤比
BGL	0.52	GE	0.90
HTW	0.54	E-Gas	0.89
U-Gas	0.60	Shell	0.86
KRW	0.68	Preflo	1.03
KBR	0.63	CSP	0.80

表2 不同产品规模的煤化工装置采用典型煤气化技术的氧耗量

产品及规模	煤气化技术	氧耗量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 标态)
1 000 kt/a 甲醇	GE 水煤浆气化	120 000
1 000 kt/a 合成油	Shell 粉煤气化	250 000
600 kt/a 合成氨	Shell 粉煤气化	65 000
600 kt/a 甲醇制烯烃(MTO)	Shell 粉煤气化	230 000
20 亿 m^3 /a 天然气	BGL 碎煤气化	160 000

1 煤气化配套空分装置规模大

装置大型化是煤化工行业发展的一个显著特点。随着煤化工装置规模的不断扩大,煤气化对氧气的需求量不断增大。无论采用固定床、流化床还是气流床气化技术,为获得理想的碳转化率,

从表 1 可看出: 各种煤气化装置的氧煤比均在 0.52~0.90。从表 2 可看出, 达到国家产业政策所要求的规模下限的单套装置的氧耗至少要达到 65 000 m³/h(标态)。为保证装置运行的可靠性, 空分装置宜采用多系列配置。

目前, 装置大型化是空分技术发展的主要方向, 国际上在空分领域领先且占据主导地位的供应商均有大型的空分装置, APCI 有 4 套 100 000 m³/h(标态) 以上的空分装置在运行; 空气产品公司的单套空分装置最大设计、制造能力已达 150 000 m³/h(标态), 目前该公司在运行的最大生产装置为 110 000 m³/h(标态); 法液空在运行空分装置的最大规模为 120 000 m³/h(标态); 林德公司单套空分装置的最大能力为 110 000 m³/h(标态)。林德-BOC 与陕西煤化能源有限公司签订了 90 000 m³/h(标态) 的设备合作协议, 成为目前国内最大的在建空分装置。2009 年, 杭州制氧机集团完成了 26 套大型空分装置的制造, 实现了 60 000 m³/h(标态) 空分装置的制造开发; 2010 年 10 月, 通过了 80 000 m³/h(标态) 空分装置的技术方案论证。开封空分集团新基地已具备 80 000 m³/h(标态) 等级空分装置的制造能力。国家新的产业指导要求国内新建空分装置单套最小能力为 60 000 m³/h(标态)。

2 空分装置从单纯制氧向副产多种产品和集成化发展

空分产品日趋复杂和多样化是空分装置发展的又一特点。

Shell 粉煤气化氧耗低, 空分装置的规模可相对较小, 由于采用氮气输送粉煤, 需要氮气的数量和规格较多, 造成空分装置氮气提取率高、氮气系统复杂、氮压缩投资高。

在巴陵、湖北、安庆、柳州 4 套 Shell 粉煤气化装置中, 除巴陵采用引进林德的的空分装置外, 其余均为国产化空分装置。国产化空分装置的特点: ①氧气提取率高, 正常操作工况(48 000 m³/h, 标态) 下氧气提取率达 93% 以上, 最大操作工况(52 000 m³/h, 标态) 下的氧气提取率 >90%; ②氮气产品量大, 氮气的提取率达 42%, 最大操作工况下达 46.6%; ③氮气有 6 种产品规格(高压 N₂, k 中压 N₂, 低压 1 N₂, 低压 2 N₂, 液氮, 污氮), 各产品需求量变化范围大, 最大超过 150%, 这对氮气循环系统的设计和产品压缩机性能提出了更高的要求; ④空气压缩机、循环氮气压缩机、高压产品氮气压缩机首次共轴采用 1 台汽轮机驱动, 通过变速箱满足不同压缩机组的转速要求, 驱动机轴功率达 43 000 kW, 这要求各机组的设计、制造与冷箱部分高度集成; ⑤稳定的氮气供给对于迅速建立粉煤循环、准确计量入炉煤量、缩短开车时间、降低开车成本至关重要, 这要求空分装置除稳定供给氧氮产品外, 应能快速启动, 因此对加温解冻时间、装置启动时间均提出了严格的要求; ⑥空分装置在生产氧氮产品(包括液氮)的同时, 还需提供仪表空气、工厂空气和最大 1 350 m³/h(标态) 的液氩产品。

2 000 t/d Shell 粉煤气化装置要求的空分产品见表 3。

表 3 2 000 t/d Shell 粉煤气化装置要求的空分产品

产品名称	产量/(m ³ ·h ⁻¹ 标态)			纯度(体积分数)	压力/MPa(表压)	温度/℃
	正常	最大	无液氮			
O ₂	48 200	50 610	37 700	O ₂ ≥99.6%	4.52	27
高压 N ₂	24 300	29 180	19 000	O ₂ < 10 × 10 ⁻⁶	8.20	≤80
中压 N ₂	26 407	29 000	20 600	O ₂ < 10 × 10 ⁻⁶	3.25	~178
低压 1 N ₂	14 300	21 600	11 400	O ₂ < 10 × 10 ⁻⁶	0.70	40
低压 2 N ₂	14 500	16 000	11 600	O ₂ < 10 × 10 ⁻⁶	0.46	40
液氮	1 300	1 300	1 300	O ₂ < 10 × 10 ⁻⁶	0.45	-188
仪表空气	2 500	3 000	2 500	常压露点, -40 ℃	0.70	40
工厂空气	2 000	3 000	2 000	常压露点, -40 ℃	0.70	40
液氩	1 260	1 350	950	Ar >99.999%, O ₂ ≤2 × 10 ⁻⁶ , N ₂ ≤3 × 10 ⁻⁶	0.18	-182

此外, 空分装置与系统的集成度越来越高。

在煤气化联合循环发电(IGCC)中, 空分装置有

3种基本的设置模式,即独立空分设备、与氮气结合的空分设备、与氮气和空气同时结合的空分设备,尤其是空压机与燃气轮机的共轴、氮气和空气系统与燃机系统的集成对于提高整套IGCC装置的效率、降低投资具有重要的意义。

3 随着产业链的不断发展,对空分装置的可靠性要求更高

随着煤化工产业链的延伸和发展,对空分装置的可靠性要求更高:①空分装置作为煤化工的龙头装置,已成为重要的生产装置,其可靠性、开车周期等对全系统的影响越来越大;②围绕空分-气化装置的公用工程岛使空分装置成为核心装置,空分装置提供的氧气、氮气、仪表空气以及工厂空气等是整个装置安全、稳定运行的重要前提;③随着产业链的延伸,装置的开车成本迅速上升,从原料到出产品的周期更长,开车消耗也随着装置规模的增大而成倍增加;④空分装置与下游装置的高度集成,在获得较好运行效率的同时,制约了空分装置可靠性的进一步提高。

但目前空分装置运行的可靠性与煤化工全流程的“安、稳、长、满、优”运行要求尚有差距。在西班牙ELCOGAS装置统计的故障率中,气化装置占48.4%,空分装置占5.8%,联合循环装置占41.4%,其它原因为4.4%;在空分装置的故障中,氮气系统原因占44%,污氮系统原因占42%,氧气系统原因占14%。国内某煤气化装置配套采用国产空分装置,2009年煤气化装置累计运行224d,年运转率仅为61.4%;空分装置年运转258.4d,年运转率70.8%。另一配套国产空分装置的煤气化装置在2009年停车9次,因空分装置原因停车2次。还有一煤气化装置在2009年停车15次,因空分装置原因停车4次。几套煤气化装置停车因素统计分别见表4~表8。

表4 A装置停车原因汇总

开车时间	工艺	设备	仪电	空分	其它	总计	空分所占比例/%
第1年	1	2	4	6	1	14	42.8
第2年	0	1	0	5	1	7	71.4
第3年	0	1	0	1	2	4	25.0
第4年	0	0	0	0	1	1	0.0

表5 B装置开车以来气化炉停车原因汇总

停车原因	停车次数	所占比例/%
设备	3	17.6
仪电	2	11.8
空分	8	47.1
其它	4	23.5
合计	17	100.0

表6 C装置空分运转率和运行负荷

年份	年运转率/%	年平均负荷/%	最长连续运行时间/d	停车次数	停车时间/d
2007	51.51	90.00	66.00	13	177.0 ¹⁾
2008	76.88	90.21	129.15	9	85.0
2009	21.24 ²⁾	90.00			71.5

注:1)2007年,装置投入运行;2)2009年,停车改造。

表7 D装置由于空分装置故障引起的气化装置停车情况

年份	停车时间/d	占气化装置非计划停车的比例/%
2000	8.99	20.13
2001	7.09	13.76
2002	4.73	10.70
2003	11.21	40.52
2004	4.55	11.01
2005	3.93	41.11
2006	0.29	2.78
2007	10.52	20.22
2008	1.75	5.15
2009	4.41	32.19

表8 E装置空分装置停车情况统计

年份	停车时间/d
2004	0.50
2005	4.05
2006	1.15
2007	
2008	6.65

从表4~表8看出:A、B和C3套装置因开车时间短,空分装置的可靠性表现很脆弱;D和E装置的空分装置可靠性有了很大提高。目前报道国外空分装置的可靠性最好数据为>99.2%,因此提高空分装置的可靠性仍是空分产业发展的重要课题。提高空分装置可靠性首先是要保证投入,确保关键设备和部件的质量和性能;其次是空分装置制造商要严格设计,采用软件进行可靠性分析研究。

4 节能降耗是提高空分产品竞争力的重要途径

在煤化工产业链中,空分装置耗能最大。在美国的 Ccoolwater, Wabash 和 Tampa 电站中,IGCC 装置自用电率分别为 20.00%, 12.25% 和 21.29%; 而在自用电中,主要是空分装置耗电,3 套装置空分耗电量分别占自用电的 70.10%, 75.50% 和 82.19%。在煤制合成气成本中,氧气成本占合成气成本的 35% 以上。通常,空分装置的副产品较多,难以准确计算单位氧气的能耗,如不考虑副产品的因素,氧气的能耗一般均 > 15 GJ/m³(标态)。在空分装置的能耗中,压缩机蒸汽能耗占 90% 以上,制冷剂能耗近 3%。今后空分技术的发展将体现在压缩机效率的提高、冷箱内物流循环的改进、新型换热设备的采用、新型分子筛的采用等方面。

通过对空分装置的焓损失进行计算后发现:空分装置的焓效率只有 29%, 而 71% 的能量用于各种不可逆损失,其能耗最高的部分依次是精馏、压缩、换热和节流膨胀,其中精馏与压缩的焓损失为 41%, 换热的焓损失为 23%, 因此降低精馏塔压降、提高压缩机效率、减小换热温差是降低能耗的重要方向和途径。

5 进一步降低空分装置的投资

空分装置的投资在煤化工产业链中所占比例最大。对于常规的气流床气化技术,空分装置与煤气化装置的投资比为 0.30 ~ 0.55:1; 在 GTL 联合装置中,合成气制备占总投资的 60% ~ 70%, 空分装置占总投资的 15% ~ 20%; 在煤基 IGCC 装置中,空分装置占主体装置投资的 10% ~ 15%。在降低投资方面,国产空分装置制造企业做出了很大的贡献,使近年来大型空分装置的成本降低了 30% ~ 35%。

6 空分系统通常存在的主要问题

空分装置的设计、制造、安装应严格执行国家、行业标准中规定的程序和要求,在工程建设中应该重点关注的环节包括空压机的安装和试车、控制系统的调试、氧气管线的清洗和脱脂、冷箱的裸冷和管系的检查、珠光砂的装填等。

随着大型空分装置数量的增加,空分装置的操作水平显著提高,快速开车、无液氨开车等操作技巧不断涌现。空分系统在操作中常见的问题包括:能耗高、蒸汽耗量大;二氧化碳穿透造成板式热交换器通道堵塞;操作数据偏离设计指标,造成换热器冷端或热端温差增大;精馏塔设计不合理或上下塔能力不匹配,造成产品产量不达标或产品品质下降;循环水设备结垢,造成压缩机能力降低;冷箱管道应力缺陷,造成管系破坏;珠光砂装填不均或者不实,造成冷箱结霜和冷损增大;压缩机噪声超标;分子筛吸附能力设计不足或因吸入空气质量变差而导致分子筛切换频繁;空气过滤器压差大等。

通常引起空分系统停车的主要因素包括压缩机故障停车(空压机结垢、空压机导叶故障、空压机防喘振阀故障、轴振动或轴位移超标、压缩机控制系统故障)、阀门故障(分子筛段控制故障、故障定位器故障)、氧压机故障、分子筛二氧化碳穿透、液氧泵故障、空压机末段冷却器结垢造成纯化器进口温度高、仪表故障、主换热器通道堵塞、系统失电或蒸汽供给不稳定、操作失误等。

7 空分技术的新发展

首先是传统深冷分离技术的进步,包括:采用先进的控制系统,如先进的 ALC 系统;提高单台设备可靠性,如液氧泵在线备用;提高装置的操作弹性,装置操作范围更大,如高压氧气的操作负荷范围为 60% ~ 110%;提高系统集成能力,如建设以空分装置为核心的公用工程岛;采用新设备、新材料等,如 APCI 采用专用的钙基吸附剂,能除去更多的杂质 CaX,材料、控制和设计标准也是可靠性的重要保障;在安全生产方面,每 20 万 h 的可记录人工伤害率为 2.5,通过危险与可操作性分析(HAZOP)等手段,使空分装置的安全生产达到了一个新的水平。

离子膜制氧技术具有投资成本低、设备占地面积小、以更少的电能生产出大量高纯度的氧气产品、高温工艺与发电系统有更好的协同效益等特点,每个膜组件每天可生产 0.5 t 氧气,可靠性与操作灵活性也大为提高。与传统的深冷空分技术相比, Air Products & Chemicals 公司与 Praxair

(下转第 15 页)

0.35元/(kW·h)计算,仅此一项年可节约57万元,18个月左右即可收回比氨压缩制冷机组多投资的费用。

(2) 碳丙液温度从35℃降至15℃,单位体积碳丙液的吸收能力可提高30%以上。按合成氨生产能力200kt/a计算,碳丙液温度35℃时所需溶液循环量为1700m³/h,而15℃时只需1200m³/h即可满足要求,溶剂泵的电功率可减少500kW,年可节约电费126万元,14个月即能收回机组投资。由于碳丙液温度降低,净化气温度和净化气中二氧化碳含量随之降低,压缩机的电耗也相应降低。

4 结语

(1) 利用尿素系统蒸汽冷凝液的余热,采用石家庄正元塔器设备有限公司的自主专有技术——溴化锂吸收式制冷与热泵技术,通过热水

型溴化锂制冷机组制取低温冷水并用于冷却碳丙液,节能降耗效果显著,经济效益明显。

(2) 合成氨(尿素)企业低温余热质低、量大,如水溶液全循环法尿素生产工艺中的大量甲铵生成反应热以及铜洗、脱硫和甲醇精馏工段的蒸汽冷凝液等均属此类低温余热,同时在生产中又需要高质、高温热量和低温冷源。随着能源价格的日趋上涨,采用溴化锂制冷技术回收利用低温余热在经济上已经显示出明显的竞争优势,如应用在合成氨生产中的工艺气体冷却及办公、生活设施的供冷、取暖等方面均是非常好的节能、降耗、减排措施。

(3) 采用溴化锂制冷技术回收利用低温余热是提高能源利用率、缩小我国在能源利用方面与世界发达国家的差距的有效手段,对减少温室气体排放、改善生态环境具有积极意义。

(收到修改稿日期 2011-05-18)

(上接第11页)

公司联合开发的离子转移膜空分技术,造价更低,能效更高。采用该技术的空分装置被用于IGCC电站时,与深冷分离的空分装置相比,电站净功率可增加7%,制氧设备的投资费用下降35%,制氧能耗减少37%(从235kW/t降至147kW/t),IGCC电站的投资费用可下降7%。该技术采用无孔交错传导的陶瓷膜,由于该膜的结晶结构中含有氧离子空穴,在800~900℃条件下,氧气通过这些空穴进行扩散,从而将空气中的氧气分离出来。

试验表明:商业规模的晶片模块可在2.93MPa条件下可靠运行。目前开发的重点是开发一种具有良好化学稳定性和机械性能的钙钛矿化合物,提高离子传导速率并能用常规的陶瓷加工工艺进行处理。

8 结语

空分装置在现代煤化工中占有重要地位,煤化工的发展对空分装置的规模、可靠性、能耗、投资等提出了更高的要求,装置大型化、提高可靠性、进一步降低投资和能耗是空分装置发展的主要方向。随着我国综合制造能力的提高,国产化空分技术近年来发展迅速,在大型化、降低投资与能耗等方面取得了显著的进步,今后仍需在系统集成、提高设计和制造水平、采用先进控制系统等方面做更多的工作。

参考文献

- [1] 邓世敏. IGCC中空分系统特性及其对整体性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2003, (3): 186-189.
- [2] 李伟, 张国华, 崔洪伟. 空分中总氧气产量偏低原因分析与措施[J]. 大氮肥, 2010, 33(5): 333-334.

(收到修改稿日期 2011-08-01)

U-Gas 技术气化高灰分混煤试烧成功

2011年8月24日,由山东兖矿峰山化工有限公司提供的本地兴隆庄低热质混煤在美国综合能源系统公司(SES)位于山东的合资公司埃新斯

(枣庄)新气体有限公司进行试烧并取得成功。通过对试烧后的试验数据分析,U-Gas技术在气化高灰分混煤时表现出很强的适应性,碳转换率达到96%以上,冷煤气效率在80%左右。

(钱伯章)