



低温法空分设备和常温法空分设备的历史 现状与发展展望

杨湧源 邓文

(中冶南方工程技术有限公司上海分公司 201900)

摘要:简述了国内外低温法空分设备和常温变压吸附空分设备的历史与将两种空分工艺进行了比较,指出了各自的优缺点和适用范围,并对两种空分工艺的发展方向、发展内容进行了分析与展望。

关键词:低温法空分设备 常温变压吸附空分设备 流程 变压吸附(PSA) 分子 发展史

目前工业上应用的空气分离方法有低温法和非低温法两种,低温法是在低温下将空气液化后进而实现氧、氮分离的方法。非低温法是在常温下利用变压吸附和膜分离方法实现氧与氮的分离。由于膜分离法只能制取含氧30~45%的富氧,故以下仅对低温法空分设备和非低温法的变压吸附空分设备进行讨论。

一、低温法空分设备

1. 低温法空分设备的原理与发展史

低温法空分设备是利用空气中各组分的沸点差,在低温下将空气液化后,通过精馏分离出氧、氮、氩各组分。

世界上第一台制氧机(10Nm³/h)诞生于1903年,发明者是德国的卡尔·林德。一百年,低温法空分设备取得惊人的发展,单机容量增加了一万倍,达到10~12万Nm³/h,与此同时,设备的流程不断更新与完善,工作压力与单位能耗不断降低,其间:

小型空分设备:从高压流程→中压流程→全低压流程;水份与二氧化碳清除从碱洗塔串联硅胶干燥器到分子常温净化;从活瓣式膨机到透平膨胀机;从氧压机加压到液氧泵内压缩;从气体产品到气液两相或全液体产品。

大、中型空分设备经历了:铝带式蓄冷器高低压流程→石头蓄冷器全低压流程→可逆板式换热器全低压流程→分子常温净化全低压流程→分子常温净化·增压空气膨胀流程→分子常温净化·填料塔·全精馏制氩空分流程。目前正在实现大型空分内压缩流程的变革。前四个阶段环绕着空气中水份和二氧化碳清除设备和方法的改进带动了工艺流程的发展;增压膨胀机的出现改变了分子常温净化流程能耗高的历史;规整填料塔在空分上的使用,降低了空分能耗,提高了氧和氩的提取率,并使全精馏制氩成为可能。

由上可,低温法空分流程的一个进步都是设备和工艺不断创新的结果。一百多年低温法空分系统具有里程碑意义的发明有:

★“焦耳汤姆效应”:1852年英国科学家焦耳和汤姆科发现了节流降温效应,据此,德国科学家林德建立了“林德节流液化循环”,并于1903年制造了第一台10Nm³/h制氧机。

★“克劳特液化循环”:法国工程师克劳特发明了活瓣式膨机,并在中压膨胀机装置中液化了空气,1910年法液空公司制造了第一台50Nm³/h中压膨胀流程制氧机。

★“拉赫曼原理”:1932年前苏联科学家拉赫曼提出将部分膨胀空气直接送入上塔参与精



馏,挖掘上塔潜力。

★“卡皮查低压液化循环”:1939年前苏联科学家卡皮查发明了高效率(80%以上)径流向心反动式透平膨胀机,并建立了卡皮查低压液化循环。

高效率径流向心反动式透平膨胀机和拉赫曼原理构成了全低压大型空分流程的基础。

★“分子常温净化与增压透平膨胀机”:上世纪50年代美国联碳公司采用束常温净化空气,70年代林德公司用压透平膨胀机取代与电机制动的透平膨胀机,两者的结合,束了分子常温净化流程能耗高的历史,确立了“分子常温净化.增压膨胀空气流程”的统治地位。

★“规整填料用于空分精馏塔”:上世纪70年代,瑞士苏尔寿公司发明了规整填料并成功用于空分系统精馏塔,取代了常规的筛板塔,它阻力小.效率高,可节能5~6%,进而实现了全精馏制氮。

如今低温法空分设备已逐步趋于完美,大、中、小型空分设备都实现了全低压流程,单位制氧电耗大型空分已达到0.38~0.40Kwh/nm³O₂,小型空分为0.6~0.7 Kwh/nm³O₂,氧提取率达到99%以上,氮提取率为80~90%,目前在建的最大空分设备能力已达4000吨/天(11.6万Nm³/hO₂)。

2. 我国低温法空分设备的历史与现

从1953年哈尔滨第一机械厂(哈尔滨制氧机厂前身)试制成功两套30Nm³/h制氧机至今,我国空分行业已经走过了54年的发展历程,经历了与前述国外空分行业同样的发展阶段,一些关键事件如下:

★1958年研制成功了3350Nm³/h制氧机,它是铝带式蓄冷器的高低压流程。

★1966~1970年制造了第一套3200和第一套6000Nm³/h制氧机,采用了石头蓄冷器的全低压流程。

★1975年开始在1500~10000Nm³/h制氧机上用可逆板式换热器取代石头蓄冷器,以减少温差和阻力。

★1978年引进了林德公司10000Nm³/h制氧机的设计制造技术。

★1983~1995年在引进的28000~40000Nm³/h空分上与国外著名厂商开展合作设计与合作制造。

★1989年压膨胀机的分子常温净化流程6000Nm³/h空分在吉林化肥厂投产。

★1997年第一套填料塔和全精馏制氮的6000Nm³/h空分在湖北省鄂城钢厂投产。

★2001年第一套填料塔和全精馏制氮的20000Nm³/h空分在济南钢厂投产。

★2002年第一套填料塔和全精馏制氮的30000Nm³/h空分在上海宝钢投产。

★2004年第一套40000Nm³/h内压缩流程空分在山东省德州华鲁恒升公司投产。

★2005年第一套50000Nm³/h空分在本溪北台钢厂投入满负荷运行。

★2006年第一套48000Nm³/h内压缩流程空分在安庆化肥厂建成投产。

★2005~2007年6月国内空分厂商与用户签定了多套40000、48000、52000和60000Nm³/h空分供货合同,其中60000Nm³/h空分已有十套,且国产第一套52000、53000Nm³/h空分已顺利地于2007年底建成投产。

我国空分产品上世纪80年代出口东南亚,本世纪开始向欧洲和中东出口,出口的单机最大能力由6000→10000→15000→20000Nm³/h不断提升,2005年底杭氧与伊朗签定了二套60000Nm³/h空分出口合同,它是我国空分行业至今为止签定的最大出口合同。

目前我国空分行业与国外的差距在逐渐缩小,氧、氮提取率和单位能耗已十分接近,差距主要在自主创新能力、配套能力和运转机械水平上。也就是,经历了54年的不懈努力,我国已迈入



了空分大国行列,并正在向空分强国迈进。

二、常温变压吸附(PSA)空分设备

1. 常温变压吸附制氧(氮)的原理与发展史

常温变压吸附制取氧(氮)是利用分子筛对氧、氮组份的选择吸附能力和分子筛的吸附容量随压力变化而变化的特性实现空气中氧与氮的分离。

PSA 制氧是利用沸石分子筛对空气中氮组份优先吸附,氧组份作产品通过这一特性实现。吸附再生则依靠分子筛的变压吸附能力,即加压吸附,减压解吸完成。由于沸石分子筛对氧气与氮气的吸附能力相近,难以实现氧与氮的分离,故 PSA 生产的氧度通常为 93%,最高为 95%,其余为氮。

PSA 制氮是用碳分子筛作吸附剂,利用氧、氮分子在碳分子筛上的动力扩散速度不同,氧分子的扩散速度较大,在碳分子筛上被吸附,氮气在流动相。氮气纯度可达 99.99%,碳分子筛解吸也是利用它的变压吸附特性。

变压吸附制氧的历史不长,上世纪 70 年代,美国联碳公司和德国的 AG 公司先后开发成功 PSA 制氧设备。先用于污水处理的曝气装置,后来逐步推广至炼铁、电炉炼钢、有色金属冶炼、造纸、生物、食品、医疗等用户。1975 年美国空气产品公司推出了真空解吸的 PSA 技术,即 VP-SA,提高了分离效率,降低了能耗,促进了 PSA 空分设备的发展。

由上可见,变压吸附制氧(氮)工艺简单,只相当低温法空分的空气加压与净化工序,因而投资少、占地小、起动快、操作方便,特别适合于产品单一、气体用量小、氧纯度要求不高的场合。

PSA 制氧(氮)30 年的发展始环绕着三个方面,即:

- ★ 新型分子筛研制
- ★ 工艺流程的完善
- ★ 高寿命切换阀的研制。

30 年,变压吸附空分系统尽管取得了很大进展,但毕竟历史不长,远不如低温法空分设备成熟,尚有较大的发展空间。

2. 我国 PSA 空分设备的历史与现状

我国 PSA 制氧起于上世纪 80 年代后期,在消化引进的基础上 90 年代开始自行制造小型 PSA 装置,当时能耗偏高(0.7~1.1 KWh/Nm³O₂),纯度较低(70~80%O₂),吸附剂和切换阀需要进口。经过十余年的努力,我国 PSA 制氧取得了可喜的进步,设备制造厂商已达 40 余家,工艺水平已接近国际水平,一些重要事件如下:

- ★1994 年建成了第一套 VPSA 制氧装置
- ★2000 年建成了 3200Nm³/hPSA 制氧装置用于高炉富氧
- ★开发了三偏心金属密封程控液压阀,连续开关 100 万次泄漏
- ★研制了 HX-OX03 和 PU-8 专用富氧分子筛,吸附容量和氧、氮分离系数高于 5A 分子筛数倍,减少了分子筛用量

★径向流吸附器研究取得进展

★控制系统采用了“PLC+上位监控站”,可以实现无人操作、自动控制运行

★2005 年研发了 8000Nm³/hPSA 制氧装置,综合电耗(氧气压力 0.5MPa)达 0.52 KWh/Nm³。

目前,我国 PSA 空分设备已经取得了很大发展,当能力小于 5000Nm³/h 时,在能耗上可与低温法空分设备竞争,而投资约为低温法的 75%。并且具备了 10000Nm³/hPSA 制氧装置的设计



制造能力,与国外先进水平的差距正在缩小。当前牵制我国 PSA 空分系统发展的是我国机电产品的总体水平:我国压缩机和真空泵品种单一,单机能力小,干式真空泵尚无产品。此外研发投入尚感不足。

三、低温法空分设备和常温变压吸附空分设备的比较

低温法空分设备和常温变压吸附空分设备比较表

序号	项目	低温法空分设备	常温变压吸附空分设备
1	分离原理	将空气液化后按组份沸点差精馏分离	利用分子筛对氧、氮的选择吸附能力和变压吸附特性分离
2	产量范围	0 ~ 4000T/DO ₂	0 ~ 330T/DO ₂
3	产品范围	可同时生产氧、氮、氩、稀有气体和液体产品	生产氧气或氮气单一产品
4	起动时间	30 ~ 40 小时	0.5 小时
5	单位制氧电耗	0.4 ~ 0.6 kWh/Nm ³ O ₂ *	0.4 ~ 0.6 kWh/Nm ³ O ₂
6	产品纯度 %	O ₂ :99.6 N ₂ :99.999	O ₂ :90 ~ 95 N ₂ :99.99
7	占地	较大	较小
8	工艺流程	复杂	简单
9	操作与调节	较难	较易
10	维修工作量	大	小
11	适用范围	多产品与广范围	氧度要求不高的中、小用户
12	投资	100%	50 ~ 80%

* 此数值已包含同时生产氮、氩产品的能耗,如以氧、氮、氩产品之和计算单位电耗,此值约为 0.2 ~ 0.25 kWh/Nm³

由上表可见,在大型空分设备方面,低温法空分设备的统治地位是不可动摇的,特别是需要多种产品时更是不可替代。但当仅需要氧气或氮气单一产品,且氧气度小于 95% (如 2.1 所述用户),规模又不太大时,变压吸附工艺仍不失为一种好的选择。因它投资少、起动快,能耗不高,操作方便。

四、低温法空分设备和 PSA 空分设备的发展趋势

1. 低温法空分设备的发展趋势

(1) 设备大型化

大型空分的出现是为了满足国民经济各部门发展的需要,与之同时单位产品的投资和能耗也随之下降。随着大型氧气转炉和高炉富氧的出现以及煤制油、IGCC 发电、COREX 炼铁的发展,空分设备的能力不断扩大。法液空为南非 SASOL 公司的煤制油项目先后提供了 14 套 7.5 万 Nm³/h 空分和一套 10.4 万 Nm³/h 空分,林德公司 2002 年给沙特提供了一套 9.1 万 Nm³/h 空分设备,美国空气产品公司最近向卡塔尔的 SASOL 公司供应一套 10.2 万 Nm³/h 空分,这三家公司都声称已具有 15 万 Nm³/h. 台空分设备的设计制造能力。对我国来讲,今后若干年 6 万 Nm³/



h 等级空分仍是大型空分需求的主体,与之同时应做好 7.0~8.0 万 Nm³/h 空分的研制工作,争取在五年左右时间具备设计制造能力,以应对煤制油、IGCC、COREX 等工艺对空分装置能力不断扩大的要求。

(2) 产品多样化

最近几年随着空分行业的发展,为满足用户的不同需求,空分产品品种不断增多,流程也呈现多样化,如内压缩流程的出现给化工和钢铁企业带来了方便和选择余地。

在煤制油、IGCC、COREX 这些用户中,氧气多用于煤气化,氧气纯度只需 95% 左右,因此研发低纯度制氧机,节省投资和操作费,给用户提供更多的选择和方案比较,应是空分行业今后的一项任务。除此之外,使空分装置的工艺和介质流与用户的工艺和介质流相结合以求综合效率最高、能耗最低,也是国内外空分厂商的努力方向。

(3) 进入供气领域,实现区域性集中供氧

进入供气领域是国外各著名空分厂商走向成功的经验之路,即所谓“既卖奶牛也卖牛奶”的道路,世界各大空分设备制造商无一不是大型气体供应商,其好处是:

★多了一条稳定的生财之道。

★气体供应工厂可为空分厂商提供新工艺、新设备的试验地和试验报告。

★由于是内行操作管理,因而可提高设备运转率和产品提取率,同时减少交易费用。

★实现区域性集中供氧后,可以减少氧气放散,减少占地和单位制氧电耗,降低单位氧气投资与成本,提高社会效益和安全性。

前,我国几大空分设备制造商已开始步入供气域,区域性集中供氧也在逐步推广中。

(4) 负荷跟踪调节与无人操作

大多氧、氮用户其用量是波动或间隙的,而低温法空分设备的生产则希望连续稳定,因低温法空分设备产量调节速度慢,调节范围也受到空压机“喘振”的限制,开停车所需时间更长,如能使空分设备的产量曲线紧贴用户的用量曲线则可减少产品放散和贮罐容积,为此,负荷跟踪调节便应运而生。由于低温法空分设备工艺复杂,调节上有滞后,加上不同用户的特点,在软件编制上有一定困难,目前仅在少数用户使用,由于它可以节能和节省投资,今后将会进一步发展和扩大使用。

(5) 新工艺和新设备的研制

空分设备的发展始照环绕着安全与节能两大主题,节能离不开工艺与设备的更新,虽然低温法空分设备经过百年发展,工艺与设备已十分完善,但随着科技的进步仍然具有发展空间。保证设备与运行安全则应贯彻于发展过程的始终。

2. PSA 空分设备的发展趋势

今后 PSA 空分设备的发展重点在以下几个方面:

(1) 新型分子筛的研制

(2) 新工艺的研制,包括吸附与解吸工艺,吸附器个数的合理确定等

(3) 新型切换阀和新型吸附器结构的研制

(4) 家用微型 PSA 制氧机的研制

目前,主要发达国家都在研制新型专用分子筛,使新型专用分子筛的吸附容量和氧、氮分离系数不断提高,以减少分子筛用量和增加氧、氮提取率。工艺方面常压吸附、真空解吸的真空变压吸附(VPSA)由于节能而得到迅速发展;吸附床个数由多床向双床发展,从而可简化工艺,减少阀门;吸附器结构由轴向流向径向流发展,以减小吸附器直径;切换阀的寿命虽已达 100 万次,但阀径有待增加,寿命还有待延长与稳定;PSA 制氧机的单台容量在新型分子筛和吸附器结



构研制的基础上,有望达到 15000Nm³/h 以上;与之同时,随着生活水平提高,也在发展家庭微型制氧机,PSA 空分设备由于工艺简单,操作方便,已经成为首选工艺。

前面说过 PSA 空分设备适用于单一氧、氮产品的中、小用户,通常制氧能力在 5000Nm³/h 以下,我们相信,经过上述 4.2.1~4.2.3 的研究,提取率会进一步提高,能耗会继续下降,PSA 空分设备将会在更大范围内与低温法空分设备展开竞争。

参考资料

- 1 杨湧源 邓文.中国空分行业的十年展望.气体分离.2006 年 No.4
- 2 杨湧源 邓文.首台国产 30000Nm³/h 空分设备的诞生历程与评述.深冷技术,2003 年 No.3
- 3 顾福民.简谈制氧机的生与发展里程.制氧机生 100 周年念论文集,2003.4
- 4 韩光瑶等.大型 ZO-8000/90 型 VPSA 制氧设备在高炉富氧鼓中的应用.通用机械协会气体分离分会空分设备技术交流会论文集,2005.7
- 5 刘世合等.ZO-3000 型 VPSA 制氧设备研制报告.通用机械协会气体分离分会空分设备技术交流会论文集,2003.10
- 6 顾维娜 斐珍.变压吸附制氧、制氮设备.气体分离设备信息网第十一次全网大会论文集,1998.9
- 7 唐伟等.新型空气分离富氧分子 PU-8.气体分离设备信息网第十一次全网大会论文集,1998.9

(上接 21 页)

十一、建议设立有关环境保护,新能源和节能减排,气候变化的宣传教育和培训中心:

鉴于环境保护,新能源等问题的复杂性和重要性,因此建立这类宣教中心非常有必要,日本在这方面做的比较好,从美国前副总统戈尔批评布什,可见问题的严重性。有些国家,只同意京都议定书,而不同意减排指标,也不签字,再有些国家,其经济主要靠石油输出,因此还雇佣“御用作家”,写文章,反对京都议定书。炒作油价,使油价飙升。造成经济、政治风波。凡此种种,都应该邀请有关各行业,全面深入讨论。因此也可以在这类中心,组织讨论会。

尽管目前对于环境问题已逐步被人们所认识,但真正要变成行动,如对新能源进行大量投资,从每个人做起,每天节约一滴水,一滴油……在我们这样一个 13 亿人口的国家,就非常困难。由于能源问题涉及的因素和行业很多,加拿大一教授写了很多文章,从各方面论述能源问题,因此我们也应该建立一个论坛,深入研讨能源和环境问题。

目前,油价不断飙升,已超过 100 美元/桶,油价上涨,必将影响经济发展,再加上环境污染严重,气候变化异常,灾害损失严重。石油在运输过程中,也不断有事故发生,因此,发展可再生能源和氢能,的确是刻不容缓,一定要以科学发展观为主导,以技术创新精神开路,发展新技术,开展一场“能源革命”,从根本上改变能源和动力技术上的落后局面。当前,油价已突破 100 美元/桶,有人预计会超过 120 美元。这将影响到各个方面,它不仅仅是一个经济,技术问题,而且还是一个社会,政治问题,从我们科技工作者来说,只有积极建议和努力参与发展新能源和可再生能源,为解决能源短缺,保护环境作贡献。