

* 专题综述 *

杭氧大型空分设备的技术进展

查文杰 周智勇

(杭州制氧集团有限公司设计研究院)

摘要 杭氧第6代空分设备已达到国际90年代的水平。简述了第6代空分设备的特点及杭氧应用新一代技术的开发业绩,阐述了规整填料塔及无氢制氩技术、分馏塔总体设计、新型的空气预冷系统、新型分子筛纯化系统的研究和开发。

关键词:大型空分设备 规整填料塔 无氢制氩 分馏塔 预冷系统 分子筛纯化

1 前言

1988年杭氧成功地开发了国产第一套带增压透平膨胀机的全低压分子筛流程大型空分设备(第五代空分),即吉林化学工业公司化肥厂6000m³/h空分设备。在随后的五年里又相继开发了天津大无缝钢管厂3200m³/h空分设备、上海焦化厂11000m³/h空分设备、湘潭钢厂14000m³/h空分设备,这些设备的开发成功使杭氧的空分设备设计制造技术达到了国际80年代先进水平,同时在国内处于明显的领先地位。

时隔十年,随着邢台钢厂6000m³/h空分设备、上钢五厂12000m³/h空分设备这两套以采用填料上塔和全精馏制氩技术为核心的新一代空分的试车成功,使杭氧的空分设备设计制造技术又向前迈进了重要的一步,同时也标志着杭氧已经掌握了代表当今世界空分技术最高水平的规整填料塔技术和无氢制氩技术。

杭氧人经过十年艰辛开发的新一代空分设备即第六代空分设备,从流程的先进性和可靠性,到成套设备及单机系统的性能指标都有了很大的提高。我们完全可以说杭氧的第六代空分设备的设计制造水平已完全达到了国际90年代初的先进水平。

2 规整填料塔及无氢制氩技术的研究和开发

随着气体市场竞争的日益加剧,用户对空分设备的要求越来越高,主要体现在提取率高、能耗低、运行可靠及安全。鉴于上述要求,在大型空分设备上应用规整填料及无氢制氩这两项技术,就成了当今空分设备发展的主流和方向,采用这两项技术的优点有:

2.1 上塔采用规整填料塔使得空压机能耗大大下降,一般情况下能耗可降低7%~8%,其原因是

- 上塔阻力大大下降,使空压机排压降低。

- 上塔操作压力降低,分离介质相对挥发度增大,分离效果更好。因而在同等提取率条件下,填料塔比筛板塔理论塔板数要少,即阻力更小。

2.2 采用全精馏制氩技术的优点

- 制氩工艺流程更简单,操作更方便,配套设备与占地面积大大减少。

- 无需制氩装置,操作更安全可靠。

- 节省了制氩能耗,约占空分总能耗的3%~4%。

2.3 采用这两项技术后分馏塔系统的优点

- 氧氩提取率更高,目前对于冶金型空分设备分馏塔氧提取率可达99%,氩提取率可

达 80%，对于采用氮循环的液体流程氩提取率可达 90% 以上。

- 产品纯度高，如氮气纯度可达 $(1 \sim 2) \times 10^{-6} \text{O}_2$ 氩气含氧量可达 $1 \times 10^{-6} \text{O}_2$ ，甚至更小。

- 单位能耗更低，总的制氧能耗可降低 10% 以上。

- 变负荷能力强，从理论上讲填料塔可在 40% ~ 110% 范围内进行正常工作。

80 年代初期，国外一些著名的空气制品公司就开始将规整填料技术应用于空分设备上，除法液空外，其它一些公司基本上都采用苏尔寿公司的规整填料，而法液空则是世界上唯一一家自己研究并生产填料的公司，这些公司起先将规整填料部分地应用于空分设备上，如上塔的辅塔、精氩塔、粗氩塔，随后又应用于整个上塔。到了 90 年代采用规整填料和无氢制氩技术的空分设备已开始全面推向工业化应用。

杭氧早在 70 年代中期就在小型高纯氮设备上应用了规整填料并取得成功，进入 80 年代中期我们开始规划并致力于开发用于大型空分设备的规整填料塔及无氢制氩技术。

- 1988 年我们为舞阳钢厂开发设计了配 $1500 \text{m}^3/\text{h}$ 空分设备的精氩塔，并于 1993 年一次试车成功。

- 1992 ~ 1994 年我们对 $150 \text{m}^3/\text{h}$ 空分设备上塔进行厂内规整填料工业性试验取得成功，并积累了大量数据。

- 1994 年 1 月我们开发设计了上海娄塘 $1000 \text{m}^3/\text{h}$ 全精馏制氩空分设备，该设备于 1996 年 1 月一次试车成功，1998 年通过了省级鉴定。

- 1995 年 10 月我们开发设计了绍兴钢厂 $1700 \text{m}^3/\text{h}$ 全精馏制氩空分设备，并于 1997 年 8 月投产运行。

- 1996 年 1 月我们开发设计了采用填料上塔的海盐碱总厂“3200”空分设备，该设备于 1998 年 1 月调试出氧，氧气产量达到

$3300 \text{m}^3/\text{h}$ 。

1996 年后，杭氧在总结前面几套空分设备的设计经验和实际运行经验基础上全面推出了采用填料上塔及无氢制氩技术的新一代空分设备，这些设备包括：杭钢、邢钢、承钢、水钢、衢化等 5 套“6000”等级空分；上钢三厂、南钢 BOC、云南梅塞尔等三套“10000”等级空分设备；上钢五厂“12000”等级空分设备；湘潭钢厂、邯鄹钢厂、上海中远等三套“15000”等级空分设备。

对于这种采用填料上塔及无氢制氩工艺的空分设备，无论是流程计算、流程组织、流程控制还是填料塔的设计、制造，都具有其特殊的要求和技术难度，杭氧在下列方面进行了深入的研究：

- (1) 在流程计算方法上，针对这种新型流程的特点，杭氧开发成功了用于全精馏制氩流程的精馏计算模块，它可以实现主塔与氩塔的计算。在这一模块中充分考虑了主塔与氩塔之间在精馏过程中的内在联系，使我们的理论计算更接近于实际工作过程，提高了计算精度，也极大地方便了变工况设计及工艺参数的优化选择。

- (2) 在流程组织及控制方面，杭氧根据新流程的特点，主要从设备的稳定、快速启动及正常工况下操作稳定性等方面作了大量工作：

- 针对填料塔热容量大、冷损大的特点，我们在流程设计上除采用外启动管线的方法外，还增加了液氧回灌管线，同时适当增大膨胀机的膨胀量，使成套空分设备启动更灵活方便、快捷。

- 在稳定塔的操作压力上，我们设置了进塔空气流量与空压机入口导叶的自动调节回路。其目的主要是消除分子筛吸附器在升压时由于进塔空气量的下降而造成塔的操作压力的波动，同时在污氮管路上我们对污氮放空阀采用分层控制，即在分子筛吸附器卸压前几十秒由程控器控制污氮阀先打开一定的开度，然后再由污氮管网压力来控制放空量，

这样大大消除了吸附器在卸压前由于憋压所引起的上塔压力的上升。以上两项措施对稳定塔的工况,尤其是带氩工况上塔氩馏分组成的稳定分布及氩塔的稳定工作起了重要的作用。

·在全精馏制氩系统,我们在氩馏分抽口位置的确定、实际操作过程中相应的调整手段、氩馏分流量控制、粗氩含氧量的控制及调整、精氩塔进料方式及控制、粗氩泵的控制及流量调节方法等方面结合实际运行经验,进行了大量的研究并不断加以完善。

·在提取高纯氧的流程设计上,我们采用从粗氩塔下部提取氧馏分的方法,使得生产出的氧纯度更高,碳氢化合物含量更少。

(3)在填料的设计及制造上,杭氧从自行设计、委托设计、联合设计中走出了一条切实可行的路子,并可根据用户需要进行自由选择。

·由法液空及杭氧液空进行塔的总体性能及结构设计,并由法液空提供分布器,杭氧液空提供填料,杭氧严格按照法液空的安装规范及检验要求进行组装和检验,如邢钢、承钢、水钢、邯钢项目的上塔及粗氩塔就是通过上述途径进行设计制造的。

·由杭氧进行塔的性能计算,苏尔寿公司进行塔的结构设计,并由苏尔寿公司提供填料和分布器,杭氧严格按照苏尔寿公司的安装规范及检验要求进行组装和检验。通过这种途径进行合作的项目有上钢五厂 12000m³/h 空分、上钢三厂、云南梅塞尔和南钢 BOC10000m³/h 空分的上塔和粗氩塔。

·由杭氧和天津大学化工研究所进行联合设计,并由天大提供填料和分布器,杭氧严格按照天大—杭氧的安装规范与检验要求进行组装。通过这种形式进行合作的项目有杭钢 6000m³/h 空分上塔,衢化 6000m³/h 空分改造项目上塔和粗氩塔,上海氯碱总厂 3200m³/h 空分项目上塔。

·由杭氧自行设计制造。可以说杭氧目前已经掌握了填料塔的设计制造技术,尤其

是中大型塔的设计制造技术。在填料塔设计初期由于我们缺乏设计和制造大直径填料塔的经验,因而走过一些弯路。近几年来经过我们不断探索和研究,从失误中总结经验和教训,终于取得了成功,我们为攀枝花钢厂 10000m³/h 空分设备和本钢 10000m³/h 空分设备设计的填料塔已经相继投产,产量指标均超过设计值。

在填料塔的制造工艺上,杭氧近几年作了极大的改进,我们深刻地认识到,如果没有制造过程的严格把关,就极有可能造成塔的运行失败。因而我们从填料和分布器的质量验收、筒体的圆度和直径公差控制、装配人员的培训、场地要求、工艺规程的制定、检验细则要求等方面都作了十分严格的规定,以充分保证我们装配的每一个填料塔都达到规定的要求。

3 分馏塔总体设计的研究

空分设备采用规整填料上塔及无氢制氩工艺后,塔的高度均有显著增加,尤其是粗氩塔,其总高度达到 60m 左右。为保证下塔液空能顺利输送到粗氩冷凝器,通常将粗氩塔分成两段,即使这样整个冷箱的高度根据提取率的不同一般也在 50~60m 之间,比原来采用筛板塔的冷箱足足要高 15~20m,这对分馏塔系统的总体设计提出了更高的要求,针对这一问题杭氧着重对以下几个问题进行了研究。

3.1 应用 MSC/NASTRAN 软件进行冷箱应力分析

冷箱作为壳体,要承受风载、内压、珠光砂等载荷,同时作为工业建筑也需考虑地震载荷。随着全精馏制氩技术的应用,冷箱的高度在不断提高,如邢钢 6000m³/h 空分冷箱高度为 52m,邯钢钢厂 16000m³/h 空分冷箱高度为 60m。在冷箱设计中我们继续采用了大幅面组合冷箱板等技术,以方便用户安装,增加风载能力,同时对冷箱进行应力分析,以选择最合理的型钢规格。MSC/NASTRAN 可

以根据现代设计的要求进行分析计算,如非线性分析、热应力分析、最优化设计计算等,它具有以下几个特点:

- 可以对各梁单元计算出各向应力,并进行量化分析。

- 计算速度快,一般一个大型冷箱有~700个节点,~1000个梁单元,~700个板单元,从建模到每一点应力的计算分析,只需一个星期就能完成。

3.2 应用计算机软件实现冷箱内管道三维设计

应用计算机软件对新一代空分设备进行冷箱内管道三维设计,并全面推广使用,彻底改变了传统的管路平面设计。用计算机应用软件进行三维设计具有以下优点:

- 管道的布置情况直观、清晰,可有效地避免管路的碰撞,使配管更经济、合理。

- 对重要的管路可进行应力分析计算。

- 统计材料方便,准确性好。

- 设计进度加快,周期缩短。

- 可以方便地绘制单线图,便于用户安装施工。

4 开发新型的空气预冷系统

早先的空冷系统中空冷塔一般采用空筒喷淋塔或穿流筛板塔,流程基本上采用冷冻机冷却中部回水的形式,因而塔的传热温差大、效率低、负荷适应范围小,同时对氮气用量较少的设备,没有充分利用污氮气的不饱和和吸湿性,使系统配用的冷冻机制冷量大、能耗高。为了解决这些问题,在新一代空分的开发中,把新型空冷系统的研究放到了重要的位置。

(1)首先我们通过技术合作的形式引进了国外专门用于空冷系统性能计算及散堆填料型空冷塔和水冷塔结构计算的软件,使我们新型空冷系统的开发有了先进可靠的设计手段。

(2)在流程组织上对氮气产量要求较少的设备,新的空冷系统采用水冷却塔冷却外

界循环水再经冻机冷却后进入空冷塔上段,充分利用了污氮气的吸湿性,使冷冻机制冷量下降了40%~50%,同时我们在上述流程的基础上开发了一种不带冷冻机的流程,使整个系统运行更可靠,能耗更低。我们为宝钢3号30000m³/h空分设备改造的空冷系统目前正在不带冷冻机状态下运行的。我们为邯郸钢厂16000m³/h空分设计的空冷系统也是采用不带冷冻机的流程。

(3)在空冷塔及水冷却塔的结构形式上我们开发了散堆填料塔和大孔径降液管式(溢流式)筛板塔。在空冷塔及水冷却塔中采用散堆填料具有传热效率高、阻力小、操作弹性范围大的优点。对散堆填料的选择,我们在不同塔段考虑到工作状态的不同,采用不同结构形式和不同材质的散堆填料,并且对填料表面经过特殊处理,使其表面的润湿性更好,以增加传热效果。我们给宝钢30000m³/h空分改造项目设计的大型散堆填料塔,经实际运行测试,空冷塔上段空气出塔温度与冷却水进水温度温差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$,循环水经水冷却塔后温降大于18 $^{\circ}\text{C}$,负温差大于5 $^{\circ}\text{C}$,完全达到了设计指标。与此同时,杭氧开发了大孔径降液管式(溢流式)筛板塔,这种塔既有较高的传热效率,又有较大的操作弹性,同时其造价又比散堆填料塔低。

5 新型分子筛纯化系统的研究

近年来我们着重对分子筛床层结构、吸附器工作周期、吸附器的再生形式、气流均匀性进行研究,不断完善分子筛系统的切换蝶阀,重点对均压阀的选型和分子筛再生污氮气放空阀压力控制的研究,以减少分子筛均压和切换时对分馏塔工况的影响。

(1)吸附器采用活性氧化铝+分子筛双层结构,充分利用活性氧化铝吸水性好的特点,有效地保护了分子筛多孔结构免遭破坏,延长了分子筛使用寿命,尤其对于长周期和不带冷冻机的流程其优越性更为明显。同时由于活性氧化铝脱附容易,解吸热量少,再生

温度低,阻力小,因而再生能耗也低。目前我们设计的吸附器绝大多数均采用双层床结构。

(2)对于吸附器的再生,杭氧开发出了一种电蓄热器,这种电蓄热器将电加热器与蓄热器合二为一,提高了传热效率,降低了再生电耗,简化了加温流路,使再生流路的操作及控制更为方便可靠,尤其是,由于这种电蓄热器的开发成功,使 $10000\text{m}^3/\text{h}$ 以上空分设备的分子筛吸附器的工作时间可以提高到 4 小时,如我们为邯郸钢厂设计的吸附器。这对提高空分设备的运行稳定性,延长吸附系统的使用寿命是非常有益的。

(3)吸附器设置气流分布装置及内置式空气过滤网,保证了气流的均布性,同时有效地防止了分子筛粉末等杂质进入冷箱。

(4)采用新型的分子筛切换蝶阀,该种蝶阀具有以下特点:

- 蝶阀采用自密性结构,密封性能好,寿命长。

- 执行机构采用齿轮齿条传递形式,运动位置十分精确。

- 密封圈压球采用直压式,检修方便。

(5)采用直通型球阀代替原来气动阀作分子筛的均压阀,使其在整个均压过程中不存在方向性,其流量基本恒定。

6 其它机组设备及系统的技术开发与提高

杭氧在研究开发上述技术的同时,对其它用于空分设备配套的机组设备及系统的技术开发与提高亦做了大量的工作。

(1)采用 NREC 软件,成功地开发出了双轴三元流透平压缩机,该压缩机在印度经实际运行表明机器运转稳定,振动小 ($18 \sim 24\mu$),噪声低,等温效率比单轴高 5%。同时开发出了三元流透平氧压机,效率比原二元流氧透提高约 5%。

(2)采用 NREC 软件开发出三元流透平膨胀机,包括配“30000”空分设备的大型透平膨胀机,等熵效率达到 86%。

(3)在板式换热器设计制造方面,杭氧引进了美国 S-W 公司的板式换热器设计制造技术及真空钎接炉,使我们的板式换热器设计制造技术有了长足的提高。同时我们自行开发了用于多股流、带相变的换热器传热计算软件。我们还新开发了多种新型翅片,满足不同使用场合的要求,如我们目前配大型空分设备的主换热器已有部分采用了高密度翅片。

(4)开发了高效新型冷凝蒸发器,使主冷温差从 1.3°C 降低到 1°C ,进一步降低了空分能耗。

(5)开发了用于无氢制氩流程的低温透平液体泵,这种泵采用特殊的密封形式以保证粗氩塔精馏工况不被破坏,目前杭氧是国内唯一一家能生产这种泵的厂家。

(6)开发了第六代空分设备的 DCS 控制系统,这种系统在原第五代的基础上针对新流程的特点,在空压机的流量控制、分子筛纯化系统的稳定切换、精馏系统主参数的过程控制及趋势预示、事故状态的回路联锁等方面都取得了成功的经验。

7 结束语

尽管杭氧在开发新一代大型空分设备中做了大量的工作,也取得了一定的成绩,但离用户和市场对我们的要求还有一定的距离,我们将在以后的工作中继续在以下几个方面努力:

- 不断提高成套空分设备的可靠性和先进性,努力保持与世界空分设备设计制造技术同步发展。

- 不断降低空分设备的能耗,降低产品成本,使用户能更好地参与市场竞争。

- 开发多品种、多规格的空分设备,以满足不同用户的需求。

我们衷心地希望广大的用户对我们的产品提出宝贵的建议和要求。

(1999 年 1 月)