

# 60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备的研制

毛绍融, 朱朔元, 周智勇, 卢杰

(杭州杭氧股份有限公司, 浙江省杭州市东新路 388 号 310004)

**摘要:** 杭州杭氧股份有限公司研制的 60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备项目是以大唐国际多伦 3 套 58000 m<sup>3</sup>/h 空分设备为依托工程进行的。文章介绍 60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备研制的基本情况、主要技术内容、具体实施过程与技术创新点等内容, 指出该项目的研发成功, 填补了我国在 60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备设计和制造上的空白。

**关键词:** 大型空分设备; 内压缩流程; 研制; 创新

**中图分类号:** TB657.7      **文献标识码:** A

## Development of 60000 m<sup>3</sup>/h grade inner compression process air separation plant

Mao Shaorong, Zhu Shuoyuan, Zhou Zhiyong, Lu Jie

(Hangzhou Hangyang Co., Ltd., 388 Dongxin Road, Hangzhou 310004, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** The 60000 m<sup>3</sup>/h grade inner compression process air separation plant developed by Hangzhou Hangyang Co., Ltd. is for the project of three sets of 58000 m<sup>3</sup>/h air separation plant of Datang International Duolun. Here, the basic particulars, main technical contents, implementation process and technical innovation of development of the 60000 m<sup>3</sup>/h grade inner compression process air separation plant are discussed. Its successful development fills the gap in China in design and manufacture of 60000 m<sup>3</sup>/h grade inner compression process air separation plant.

**Keywords:** Large sized air separation plant; Inner compression process; Development; Innovation

### 1 项目概况

随着我国国民经济、科学技术的迅猛发展, 大型空分设备的需求量越来越大。60000 m<sup>3</sup>/h 等级空分设备是为大型煤化工、大型化肥、大型钢铁冶炼等重要工业装备配套的不可缺少的关键设备。

自 20 世纪 70 年代以来, 我国先后引进了 30 多套大型化肥装置, 配套的大型空分设备均为进口设备, 而同期新建的大型空分设备也均由国外厂商成套, 我国大型空分设备市场被国外厂商瓜分殆尽, 制造利益也基本被国外厂商独享。当时的状况是: 一方面随着国民经济发展和科学技术的不断进

步, 重大工程项目配套空分设备的容量正不断地增大, 数量不断地增长; 另一方面, 我国还没有一套“以我为主”、自行设计制造的 60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备, 仍然在高价引进。实现大型空分设备国产化并替代进口设备已经显得非常迫切。

杭州杭氧股份有限公司是国内空分行业的龙头企业, 具有 60 年生产空分设备的历史, 是我国大、中型空分及液化设备研究开发中心和制造基地, 是国家 21 家重大装备国产化基地。杭氧已设计、制造了 4000 多套空分设备, 拥有 340 多套大、中型空分设备的生产业绩, 其中 20000 m<sup>3</sup>/h 等级空分

收稿日期: 2010-08-13

作者简介: 毛绍融, 男, 1963 年生, 教授级高级工程师, 国家特殊津贴享受者 (工程技术), 1985 年毕业于西安交通大学低温工程专业, 获工学硕士学位, 现为杭州杭氧股份有限公司总经理。

设备 38 套, 30000 m<sup>3</sup>/h 等级空分设备 30 套, 40000~50000 m<sup>3</sup>/h 等级 (60000 m<sup>3</sup>/h 等级以下) 空分设备 42 套, 从而具备了设计、开发、制造 60000 m<sup>3</sup>/h 等级空分设备的能力。

杭氧 60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备研制的依托项目是大唐国际多伦 3 套 58000 m<sup>3</sup>/h 空分设备。大唐国际发电股份有限公司 (简称: 大唐国际) 在内蒙古多伦县投资的大型工业化应用煤制甲醇生成丙烯的项目, 需要配置 3 套 60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备。多年来国外企业在这一等级空分设备市场上一直处于垄断地位, 杭氧设

计、制造大型空分设备的能力从 40000 m<sup>3</sup>/h、50000 m<sup>3</sup>/h 等级向 60000 m<sup>3</sup>/h 等级的快速成长, 有助于打破国外厂商的垄断局面, 并提高自身在国际市场的竞争力。

## 2 项目技术内容

### 2.1 产品构成

大唐国际多伦 58000 m<sup>3</sup>/h 空分设备由空气压缩系统、特大型空气预冷系统、特大型分子筛纯化系统、增压透平膨胀机制冷系统、精馏塔 (换热和精馏) 系统、液体产品储存系统、仪控系统和电控系统 8 个系统组成, 其工艺流程如图 1 所示。

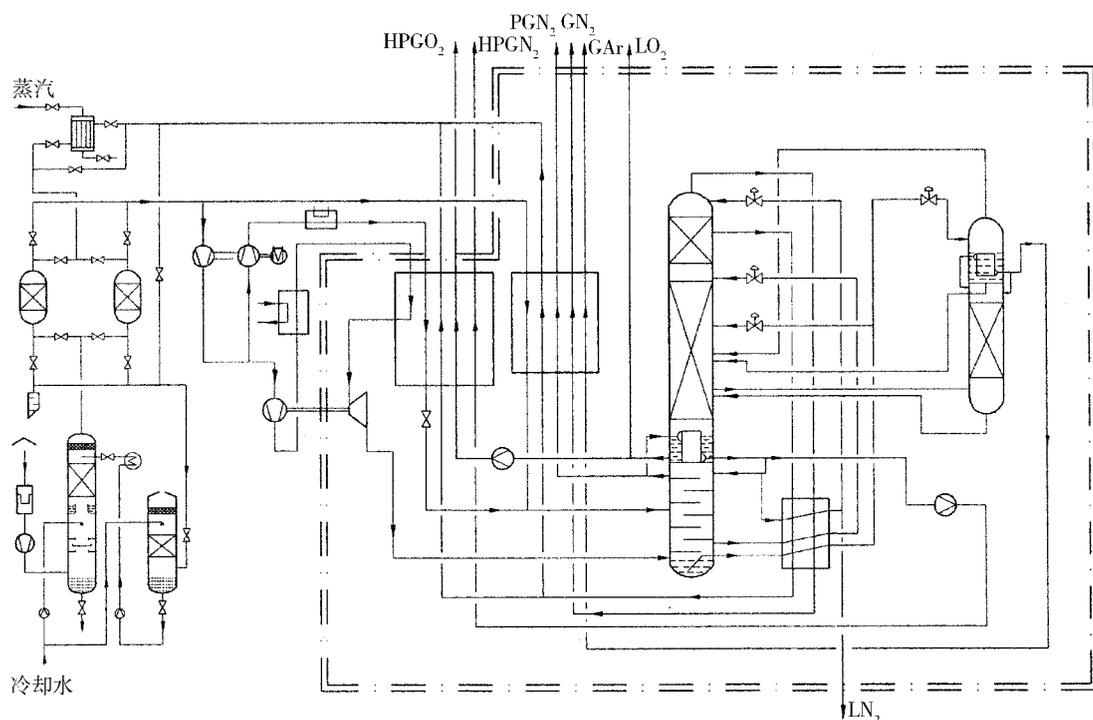


图 1 大唐国际多伦 58000 m<sup>3</sup>/h 空分设备工艺流程简图

### 2.2 各系统的作用及相互间关系

空气压缩系统在为整个空气分离过程提供能量的同时, 还为整个工厂提供仪表空气。特大型空气预冷系统能充分利用从精馏塔出来的污氮气具有不饱和和吸湿性的特点, 降低冷却水的温度, 从而使压缩后的空气温度降低, 并清除空气中的小尘埃和酸、碱性气体。特大型分子筛纯化系统清除空气中的水分、二氧化碳和碳氢化合物等, 保证空分设备安全稳定运行。增压透平膨胀机制冷系统充分利用膨胀机外输出功, 将气体增压后再膨胀, 为空分设备提供冷量。精馏塔系统耦合了冷量回收和空气分

离两大功能, 是整套空分设备的核心。在这里, 空气被分离成氧气和氮气, 高压液氧泵将从主冷凝器抽取的液氧直接加压至用户所需压力, 液氧再在高压换热器汽化后出冷箱, 满足最终的工艺需要。液体产品储存系统将液氧、液氮产品储存起来, 满足液体产品储备或销售需要。仪控和电控系统实现空分设备的自动调节、联锁保护, 保证设备安全、高效运行。

### 2.3 技术特点

#### 2.3.1 采用特大型液氧内压缩流程技术

针对用户用氧压力高、氮气产品规格不多、装

置规模大的特点,开发了空气增压膨胀、双泵内压缩、下塔抽取压力氮气、增效塔的流程,即采用空气增压机+液氧(氮)泵并通过换热器系统的合理组织来取代氧(氮)压机的流程形式。这一流程不仅安全可靠,并且经济合理。采用这种流程后,空分设备操作维护方便、投资成本低、占地面积小,节能效果明显,特别是增效塔技术的开发可以有效降低原料空压机的排气量,节能约4%~6%。

### 2.3.2 空分设备具有先进的技术性能指标

空分设备最重要的指标就是运行能耗,大唐国际多伦58000 m<sup>3</sup>/h空分设备在采用部分液氮内压缩、下塔抽取大量压力氮气的工况下,仍能保证较高的精馏塔氧提取率。同时各配套机组具有优异的单机性能指标,这些指标已经达到了国际先进水平,从而保证了成套设备具有优良的综合性能指标。

### 2.3.3 采用先进可靠的DCS控制系统和ITCC控制系统

成套空分设备采用DCS控制系统,具有控制器电源、通信总线的冗余结构,可靠性高,大唐国际多伦58000 m<sup>3</sup>/h空分设备各机组流程参数的显示与主要操作调节功能,均可在中控室通过计算机完成。空分设备的压缩机组采用ITCC控制系统单独控制,确保压缩机组安全、可靠地运行。

### 2.3.4 装置规模大

之前国内生产的煤化工型空分设备的最大规模为50000 m<sup>3</sup>/h等级,而大唐国际多伦项目配套空分设备的规模达到了58000 m<sup>3</sup>/h。众所周知,空分设备达到一定规模后,随着规模的进一步增大,其设计难度和制造难度成倍地增加,对各方面的要求更高。如58000 m<sup>3</sup>/h内压缩流程空分设备精馏塔的直径、塔体壁厚都比现有产品大,单元部机的设计难度增加,其成形、焊接、安装等工艺难度也大大增加。58000 m<sup>3</sup>/h内压缩流程空分设备的空气预冷系统与分子筛纯化系统的处理空气量达36.1万 m<sup>3</sup>/h,相当于70000 m<sup>3</sup>/h等级空分设备的配套规模,因此无论是在设计方面还是制造方面,都是一个大的飞跃。

## 3 项目研制过程

### 3.1 项目基本情况及测试、鉴定情况

为了满足依托项目——大唐国际在内蒙古多伦县投资的大型工业化应用煤制甲醇生成丙烯项目的

设计要求,杭氧对60000 m<sup>3</sup>/h等级空分设备进行了结构上的针对性设计,主要研制过程如下:

- (1) 2005年3月—2005年9月,可行性研究、前期技术准备;
- (2) 2005年9月—2006年1月,寻找依托项目;
- (3) 2006年1月—2006年4月,流程开发与流程计算技术开发;
- (4) 2006年4月—2006年10月,核心单元设备开发,运输路线勘测、运输方案制定;
- (5) 2006年10月—2006年11月,详细总体设计,配管与冷箱设计;
- (6) 2006年11月—2007年4月,制造工艺开发;
- (7) 2007年4月—2008年7月,工程实施;
- (8) 2008年7月—2009年9月,试运行;
- (9) 2009年9月—2009年12月,技术改进;
- (10) 2009年12月,用户性能测试考核。

大唐国际多伦58000 m<sup>3</sup>/h内压缩流程空分设备于2006年3月正式签订供货合同,2007年1月开始交货,2007年4月开始安装,2009年4月裸冷,2009年7月26日开车,7月31日产品氧气、氮气产量达标。空分设备开车以来,一直都能良好、稳定运行,当氧纯度维持在99.9%左右时,整套空分设备的氧提取率在96.1%~99.7%之间。

### 3.2 60000 m<sup>3</sup>/h等级内压缩流程空分设备研制的 关键技术与难点

特大型内压缩空分流程技术的准确性是决定空分设备能否顺利投产、开车的关键性技术,因此研制时需在传统流程计算的基础上建立面向特定对象的流程计算和优化技术。为适应空分设备的大型化,需要开发特大直径空冷塔、水冷塔与分子筛吸附器的设计、制造技术。空分设备心脏——精馏塔的技术也随之更新和改进,对于上塔需开发特大型(直径4.0 m)高通量、低压降规整填料塔技术,采用Mellapak Plus型填料;对于下塔需开发特大型(直径4.6 m)新型四溢流筛板技术;此外,塔体直径和壁厚的增加,为特大型精馏塔的成形、焊接和组装增加了难度。高压板翅式换热器是空分设备中的关键部件,技术含量高,大型铝制板翅式换热器钎接工艺也是需要开发的关键技术。60000 m<sup>3</sup>/h等级内压缩流程空分设备由于流程复杂、技术要求高,为了使整套设备能低能耗、高效率安全运行,

需要在自动化控制技术深化应用方面做大量的工作。空分设备的大型化,也为冷箱内容器的合理布置与管道的优化设计增加了一定的难度。

### 3.3 解决方案

#### 3.3.1 60000 m<sup>3</sup>/h 等级液氧(氮)内压缩空分流程的设计和计算技术的研制

传统的流程计算采用分块化设计,缺少面向特定对象的流程优化技术,人为干扰因素多,计算速度慢,优化性能差。60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备项目建立了以加工空气量、空压机排气压力、膨胀压力、膨胀气中抽温度、膨胀气量、高压空气量、高压空气的排气压力等关键工艺参数为约束条件,以单位产品能耗最低为目标的流程优化数学模型。

开发空分流程计算物性库,修正物性参数,使之适用于超临界状态下的流程计算;建立面向特定对象的流程计算和优化技术。对 HYSYS 流程模拟平台进行二次开发,实现了空分流程的整体模块化优化设计,减少了人为影响,提高了计算速度。

#### 3.3.2 大型国产化空分精馏塔的研制

单元设备的优劣,直接影响到成套空分设备的运行性能。60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备采用了具有专利技术的四溢流筛板下塔,4.6 m 是目前国内最大的下塔直径。在塔的具体结构上也作了特殊的改进,使上塔留有足够的平衡空间,有利于上塔的氧、氮精馏。

采用精馏塔设计小组自主研制的精馏塔设计与计算软件包进行精馏塔开发设计,大型精馏塔设计与计算软件包主要包括水力学计算软件包、钢制基础架上的塔稳定性校核计算软件包和低温设备用铝吊耳强度校核软件包等几个部分。同时,运用计算机流场分析与 ANSYS 应力分析软件对塔内件结构的合理性、各零部件设计的安全性、理论分析的可靠性进行验证,提高设计的安全性和可靠性。

#### 3.3.3 7.5 MPa 以上压力等级大型铝制板翅式换热器的研制

板翅式换热器是一种被广泛应用的高效、紧凑式换热器,多用于大型空分设备中。空分设备的大型化,为其配套的换热器总体积也相应增大,单台换热单元截面增大,换热单元数也增多。板翅式换热器是空分设备中的关键部件,又是空分设备节能降耗的关键设备。

翅片成形技术、钎焊工艺技术、多组分有相变流体的物性和传热计算、多股流传热流道和整台换热器传热通道的排列技术、两相流体均匀分布结构技术,成熟可靠,可直接提高高压板翅式换热器的使用效率。

#### 3.3.4 液氧内压缩流程计算机自动化控制技术深化应用的研制

仪控系统作为成套空分设备的一个重要组成部分,根据工艺流程的要求,配置了各种先进仪表及自动化装置来监控成套空分设备各部机的工艺参数,并实现各主要操作阀门、切换阀门的自动控制或遥控操作以及必要的联锁保护措施。大唐国际多伦 3 套 58000 m<sup>3</sup>/h 空分设备控制系统(DCS)采用了美国 Honeywell TPS 系统;压缩机组控制系统(ITCC)首次采用 TRICONEX 公司的 TS3000 系统;并且首次采用远程紧急停车系统,以保证成套设备长期、稳定安全运行。

#### 3.3.5 冷箱内容器的合理布置

采用两排换热器镜像对称布置的结构,使流体从两侧汇入主管,被均匀地分布到各个换热器,从而避免了因气流不均而产生偏差,同时减少了气流阻力。

上塔和下塔并列布置,精馏塔冷箱高度大幅降低,热胀冷缩对管道的变形量减小,安全性和可靠性大大提高,杜绝冷箱内泄漏。

采用卧式单层主冷凝器,减小了容器的直径,使得运输变成可能,突破了特大型空分设备的运输瓶颈。同时,主冷凝器采用浴式结构,全浸式操作,增大主冷的循环倍率,防止碳氢化合物、氧化亚氮在主冷的换热表面析出,提高了产品的安全性。另外,采用节距较大的翅片,使液氧流动更通畅,不易堵塞通道。

#### 3.3.6 冷箱内管道设计和应力分析

合理控制管道内工质流速,使整套空分设备工况稳定,同时也减少了成套空分设备的阻力,降低了制氧能耗。

采用三维工厂设计系统 PDMS 软件进行冷箱内管道设计,使管道的布置设计工作更直观、准确,材料统计更准确,单线图更规范。

在设计建模完成后,应用 CAESAR II 软件对管道进行柔性分析。对整个管系和管道的支架在计算机上模拟计算后,合理地确定承重支吊架、限位支

吊架、防振支架的位置和使用场合,使管架能最充分地消除管道的一次应力,同时将二次应力的产生控制在最小的范围内。

### 3.4 生产应用结果

大唐国际多伦 58000 m<sup>3</sup>/h 空分设备已于 2009 年 7 月开车成功,其相关技术参数见表 1。

表 1 大唐国际多伦 58000 m<sup>3</sup>/h 空分设备相关技术参数

产品名称	产量/(m <sup>3</sup> /h)		纯度	
	设计值	实际运行值	设计值	实际运行值
氧气	58000	58537	≥99.6% O <sub>2</sub>	99.8% O <sub>2</sub>
氮气(1)	71000	71326	≤10×10 <sup>-6</sup> O <sub>2</sub>	1.5×10 <sup>-6</sup> O <sub>2</sub>
氮气(2)	6500	6555	≤10×10 <sup>-6</sup> O <sub>2</sub>	1.2×10 <sup>-6</sup> O <sub>2</sub>
氮气(3)	20000	23003	≤10×10 <sup>-6</sup> O <sub>2</sub>	1.2×10 <sup>-6</sup> O <sub>2</sub>
液氮	160	300	≤10×10 <sup>-6</sup> O <sub>2</sub>	—
工厂空气	30000	30000	常压露点 - 40℃	—
仪表空气	11000	11000	常压露点 - 40℃	—

由表 1 可知,大唐国际多伦 58000 m<sup>3</sup>/h 空分设备还提供 30000 m<sup>3</sup>/h 工厂空气和 11000 m<sup>3</sup>/h 仪表空气,原料空压机排气量达 36.1 万 m<sup>3</sup>/h,部分配套部机已达到 70000 m<sup>3</sup>/h 等级成套空分设备的配套规模。

## 4 技术创新点

### 4.1 高压内压缩流程计算技术及优化技术

高压内压缩流程计算技术及优化技术的开发提高了特大型空分设备的内压缩流程计算精度,特别是对开车后数据的归一化,为今后特大型空分设备的内压缩流程计算提供了数据。该技术是建立面向特定对象的计算和优化技术,计算和优化速度快,实现了空分流程的整体模块化优化设计,减少了人为影响,提高了计算速度。

### 4.2 直径 4.6 m 及以上大型规整填料塔的性能及结构设计技术

上塔采用高通量、低压降、高效的规整填料技术,可以使精馏塔的操作弹性更大,并且降低精馏过程能耗。同时,采用新型四溢流筛板下塔,有利于降低设计成本,降低塔高。此项技术将对大型空分设备高效、稳定、经济运行提供有力的保证,并为我国大型空分设备国产化解决了核心技术问题。

### 4.3 铝制高压板翅式换热器设计制造技术

翅片成形技术、钎焊工艺技术、多组分有相变

流体的物性和传热计算、多股流传热流道和整台换热器传热通道的排列技术、两相流体均匀分布结构技术的研制成功,提高了高压板翅式换热器的使用效率,为空分设备的大型化创造了条件。

### 4.4 国内最大的有色金属塔体制造技术

由于大唐国际多伦 58000 m<sup>3</sup>/h 空分设备规模大,精馏塔的直径、塔体壁厚都比现有的产品要大,其成形、焊接、安装等工艺难度也大大增加。杭氧通过引进技术和自主创新,已完全掌握直径为 4.8 m 的大型有色金属塔体制造技术。

## 5 结论

经过多年研制,杭氧终于完成了 60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备流程设计和计算技术开发、大型精馏塔研制、7.5 MPa 以上压力大型铝制板翅式换热器研制、液氧内压缩流程自动化控制技术开发、冷箱内容器的合理布局、管道设计及应力分析等一系列工作,并在实际工程项目中取得了圆满成功,填补了我国在 60000 m<sup>3</sup>/h 等级内压缩流程空分设备上的空白,鼓舞了我国科技创新的士气和斗志,是中国空分行业一次质的飞跃,充分展示了我国在特大型空分设备的设计和制造上的实力,实现了行业为之奋斗多年的夙愿。

通过对 60000 m<sup>3</sup>/h 等级空分设备国产化关键技术的研究,杭氧完全掌握了 60000 m<sup>3</sup>/h 等级空分设备的设计、成套核心技术,拥有自己独立的知识产权。60000 m<sup>3</sup>/h 等级空分设备国产化及其程度的不断提高,可提高国产 60000 m<sup>3</sup>/h 等级空分设备在国内市场中的竞争力,推动我国空分行业上质量、上水平、上等级,提高我国重大技术装备的整体水平。

60000 m<sup>3</sup>/h 等级空分设备国产化,将促使国外大公司的大型成套空分设备大幅降价,使国内用户受益;同时,为降低成本,国外大公司会通过合作生产或建立合资企业等方式来降低产品价格,参与竞争,这也为国内提供了就业机会及利税。

总之,实现 60000 m<sup>3</sup>/h 等级空分设备国产化,不仅可以为国家节约大量外汇,填补国内空分行业的一大空白,为企业带来巨大的经济效益,开拓更广阔的空分设备国内、国际市场,还可以极大地提升我国重大工业装备的设计、制造水平,使我国空分装备业的国际竞争力得到较大提升,并具备参与国际竞争的能力。□