

华鲁恒升 48000 m³/h (氧) 内压缩空分设备的研究开发

张永凤 褚瑞华 周智勇

(杭州杭氧股份有限公司, 杭州东新路 388 号 310004)

摘要: 介绍了华鲁恒升 48000 m³/h 高压内压缩流程空分设备的工艺流程和特点, 分析了整套空分设备配置的技术要点。实际运行表明, 杭氧自行设计制造的 48000 Nm³/h 空分设备已经达到世界先进水平, 填补了国内空分行业的一大空白。

关键词: 大型空分设备; 压内压缩流程; 高压; 液氧内压缩

Research and Development of 48000 m³/h internal compression air unit for Hulu Hhengsheng

zhang Yong-feng, Chu Rui-hua, Zhou Zhi-yong

(Hangzhou Hanyang Stock Co., LTD., 388 Dongxin Road, Hangzhou
310004, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: Technical process and characteristics of 48000 m³/h high-pressure internal compression air separation unit of Hulu Hhengsheng are introduced, and key technical points for the whole set of air separation unit configuration are analyzed. Actual operation proved that the 48000 m³/h air separation unit designed and manufactured by Hanyang has achieved world advanced level and fills the domestic gap in air separation industry.

Keywords: Large scale air separation unit; Internal compression; High pressure; Liquid oxygen internal compression

一. 概述

我国自行研制、国产化程度最高、规模最大高压内压缩空分装置——山东华鲁恒升化工股份有限公司 48000m³/h 空分设备于 2007 年 2 月 3 日一次开车成功, 调试出合格氧、氮、氩等产品。自开车成功到 2008 年 2 月底, 48000m³/h 空分设备已经连续稳定运行了 12 个月, 产品氧、氮、氩纯度和产品均已达标。2008 年 3 月 2 日至 3 月 5 日, 由“机械工业气体分离与液化设备产品质量监督检测中心”、“山东华鲁恒升化工股份有限公司”和“杭州杭氧股份有限公司”三方人员在空分运行现场, 对该公司的 KDON-48000/45500 型空分装置进行了稳定工况下的连续 72 小时测试并通过, 各项技术性能指标均达到或超过合同值 (见表 1)。华鲁

恒升 48000m³/h 空分设备的诞生，说明我国已完全具备了设计和制造 5 万 Nm³/h 等级的内压缩空分设备的能力，同时为研制 60000m³/h 和 80000m³/h 等级的空分设备，积累了丰富的设计经验和打下了坚实的基础。

表 1，华鲁恒升 48000m³/h（氧）空分设备主要性能指标

产 品	产量(Nm ³ /h)	纯度	出冷箱压力
高压氧气	48000	99.6% O ₂	8.5MPa(G)
氮气 I	31500	≤5PPm O ₂	~10KPa(G)
氮气 II	14000	≤5PPm O ₂	~460KPa(G)
液氮	400	≤5PPm O ₂	~0.2MPa(G)
液氩	1620	2ppm O ₂ 3ppm N ₂	~0.19MPa(G)

二. 工艺流程介绍及流程特点

2.1 流程简介

华鲁恒升 48000m³/h 内压缩空分设备是由杭州杭氧股份有限公司设计、制造的。该套空分设备采用高效空气预冷、分子筛净化、空气二段增压、膨胀空气进下塔、增压透平彭长机、规整填料塔和全精馏制氩技术的内压缩工艺流程(图 1)。

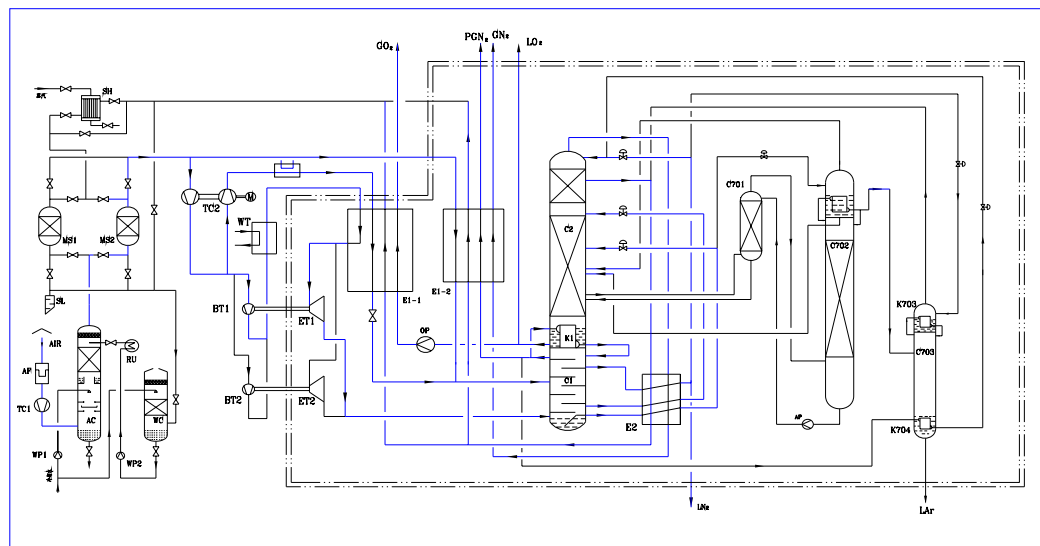


图 1 华鲁恒升 48000 Nm³/h（氧）内压缩空分设备工艺流程简图

空气经过原料空气压缩机组升压至 0.55MPa(G) 后进入空气预冷系统冷却，然后进入分子筛纯化系统净化，净化后的空气分成二股：一股进入低压板式换热器与返流的污氮气换热被冷却到接近液化点后与膨胀的空气一起进入下塔，参与下塔的精馏；另外一股空气去空气增压机组。进入空气增压机组的空气经增压机组

的第一段增压到约 2.8MPa(G)后又分为两股：一股直接出增压机组，经增压机组后冷却器冷却到常温后进入高压板式换热器，被返流的污氮气和高压液氧冷却，再从高压板式换热器中部抽出进入彭长机膨胀，膨胀后的空气进入下塔；另外一股在增压机组的第二段继续增压到约 7.0MPa(G)，并经后冷却器冷却至常温后进入高压板式换热器，与返流的污氮气及高压液氧换热，然后经高压节流阀节流后进入下塔。

空气经下塔初步精馏后，获得富氧液空、纯液氮、污液氮和产品压力氮气。液空、纯液氮和污液氮经过冷器过冷后进入上塔，参与上塔的精馏。经过上塔的精馏后，在上塔底部获得纯液氧，液氧经高压液氧泵升压后进入高压板式换热器被正流的高压空气、中压膨胀空气气化、复热到常温后出冷箱进入氧气管网。从上塔顶部引出氮气经过冷器和低压板式换热器复热到常温后出冷箱，然后被氮气压缩机加压后进入氮气管网。同时，在上塔上部引出污氮气经过冷器、低压板式换热器和高压板式换热器复热出冷箱后分成二股：一股去分子筛净化系统作再生气；另外一股去空气预冷系统。

从上塔中部抽取一定量的氩馏份送入粗氩 I 塔，粗氩 II 塔底部回流液体经液氩泵加压后进入粗氩 I 塔顶部作为粗氩 I 塔回流液。氩馏份经粗氩塔精馏后得到无氧粗氩气，粗氩气进入纯氩塔中部继续精馏，经过纯氩塔精馏后在塔的底部得到 99.999%Ar 的纯液氩。

华鲁恒升 48000m³/h 内压缩空分设备吸收了国外先进流程技术，结合杭氧近年来设计和生产数十套大型空分设备的宝贵经验，解决了大量的设计和制造技术难题，这是成功的基础和根本保证。杭氧对整个流程设计经过周密考虑和很多次的精确计算，特别是对增压机组一段与二段增压的空气参数、上下塔物料量和组份都作了严格的设定和控制，整套空分设备采用可靠的模块化设计软件，经大量的模拟计算，优化设计出最合理的流程。实际运行的情况证明理论计算的参数和实际运行的参数完全吻合，这说明国产大型空分设备在设计和制造水平上有了很大的提高。

整套空分设备具有多种产品及灵活的变工况能力；工艺流程上设有快速启动及液体回灌管路，以缩短空分设备启动时间；整套装置具有较高的变负荷能力，变负荷范围 75%~105%。

2.2 流程特点

华鲁恒升 48000m³/h 内压缩空分设备是典型的五万等级化工型高压内压缩空分装置，具有如下主要特点：

1、采用液氧内压缩流程

本装置采用空气循环单泵内压缩、下塔抽取压力氮气的流程，即采用增压空压机+液氧泵并通过换热器系统的合理组织来取代氧压机。针对用户用氧压力高，用装置规模大的特点，选择这一流程是最安全可靠的，同时也是最经济合理的。采用这种流程后，空分装置具有安全性好、可靠性高、操作维护方便、投资成本低、占地面积小以及节能效果明显等优点。

2、具有先进的技术性能指标

目前，我国正在建设和谐社会，社会经济发展非常迅速，节能减排成为重中之重，所以对于空分设备来说，制氧能耗指标非常重要。华鲁恒升 48000m³/h 内压缩空分设备在采用液氧内压缩、下塔抽取大量压力氮气的情况下，仍然能保证比较高的氧、氩提取率。经实际测量，氧气提取率大于 99%，氩提取率大于 76%，单位制氧能耗约为 0.66 kw·h/Nm³O₂。

3、采用更加先进可靠的 DCS 控制系统

首先，在华鲁恒升 48000m³/h 内压缩空分设备上首次采用了 Emerson 厂家的 Delta V 系统，DeltaV 系统的特点 DeltaV 系统是 ErrlerSOYI 公司依据 FF 现场总线标准设计出的兼容现场总线功能的全新的控制系统。它充分发挥 DCS 的优势，如：系统的安全性、冗余功能、集成的用户界面、信息集成等，同时克服传统 DCS 的不足，具有规模灵活可变、使用简单、维护方便的特点。本 DCS 控制系统由工作站、操作站、控制器、集线器、I/O 卡件等组成，共采用四台控制器分别控制各个分单元，这样能分散风险，降低故障率，四个单元分别为：空压机、冷箱内部分、冷箱外部分、氮压机，上位操作监控共用一套以太网。

其次，在华鲁恒升 48000m³/h 内压缩空分设备首次采用 mesto 公司生产的三偏心硬密封零泄漏切换蝶阀，其结构如图 2 所示

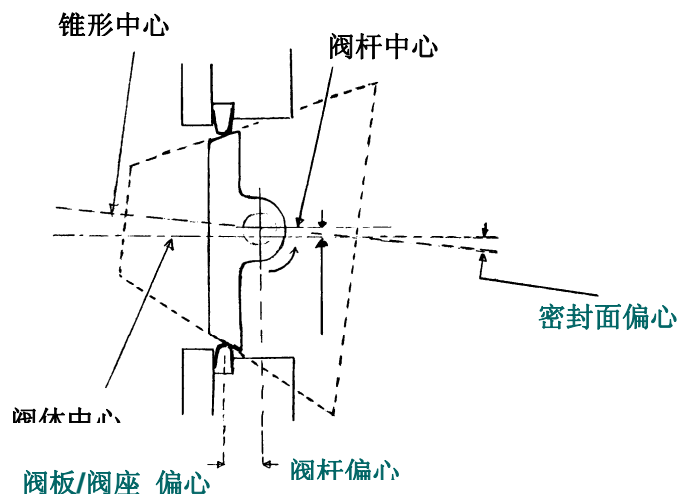


图 2 三偏蝶阀示意图

分子筛切换阀采用常规的普通蝶阀，虽然能达到VI级，由于是软密封随着切换次数的增加，受摩擦后其密封性能会降低，导致阀门泄露的可能性很大。采用三偏心硬密封零泄漏切换蝶阀，这种阀门按照高精度公差加工成的椭圆型阀板，类似于硬质金属锥体上切下的斜片，当阀门关闭时，位于长轴处的椭圆型阀板推动阀座向外，使阀座环与阀板在（椭圆）短轴处相接处，当阀门打开时阀板移动，不与阀座接触，阀座环恢复到圆形，它的浮动式不锈钢阀座与三偏心的椭圆型阀板之间没有摩擦，其结构能够使阀门的切换寿命大大增加，而且零泄漏能保证分子筛系统不会造成气体泄漏。

最后，本套空分增压透平膨胀机防喘振控制首次采用流量防喘振，改变了以前的压力过高后打开回流阀的简易防喘振方式，使膨胀机的运行更加稳定、可靠、节能，易于操作。防喘振控制以压比与流量关系控制回流阀，在 DCS 内实现，此处的压比 PdYI040401B 为膨胀机进出口压力的绝压比值

$$pr=(PI040402B+100.2)/(PI040401B+100.2), \text{喘振点流量 } f-f_1=k(pr-pr_1),$$

$$f=k(pr-pr_1)+f_1, \text{防喘振流量控制 FICS040403B 的设定值为 } k(pr-pr_1)+f_1+c \text{ (其中}$$

$$k=(f_2-f_1)/(pr_2-pr_1), \text{根据膨胀机的随机资料中喘振线确定, } c=\text{机组正常流量}$$

*10%), 喘振线如图 3 所示,

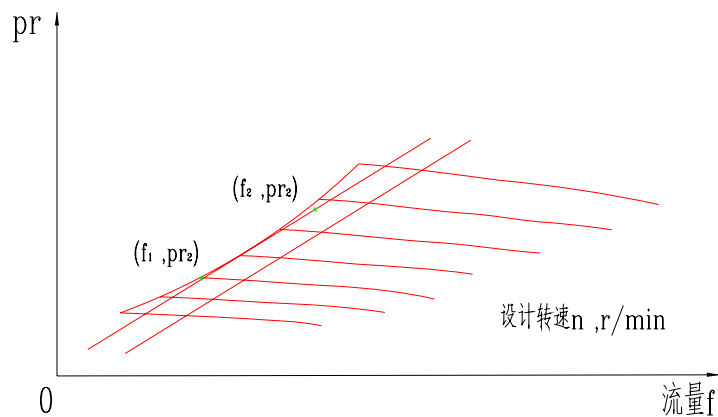


图 3

在其中（FIC040403B 的设定值-实际值）大于机组正常流量*6%时快开回流阀，并且 FIC040403B 输出 100%。

回流阀与膨胀机喷嘴两个控制点在膨胀机机旁盘和中控室 DCS 系统操作台上均可操作。

膨胀机开车阶段，FICS040403B 和 HC040402B 一般在机旁盘上操作，在机旁盘手操器上有手动/自动信号送 DCS 以便手动/自动无扰动切换。待机组运行正常后，FICS040403B（可手操或自调）和 HC040403B 的操作转入中控室 DCS 系统操作台上进行，调试完毕后可在主控室开车，控制回流阀和喷嘴。

仪控系统改进，使本套空分设备的效率及稳定性有了很高的改善，目前空分装置运行稳定可靠，也证明了仪控设计的安全性、稳定性。

三. 设计、配套和制造技术要点

空压机和增压机组、高压液氧泵、冷箱内的精馏塔和主冷凝蒸发器等设备是大型内压缩空分设备的核心，也是设计和制造技术难点所在。

(1) 原料空压机、空气增压机和汽轮机

原料空气压缩机组、空气增压机组和汽轮机组如果采用进口产品，相对来说产品质量可靠，但格非常昂贵。如果全部采用国产产品，但对产品质量有所顾忌。经过多方比较权衡后，最后决定华鲁恒升 48000m³/h 空分设备配套的空压机和空气增压机组采用陕股和 MAN TURBO 合作生产的产品，MAN TURBO 提供整套转子，陕股设计制造机器的其他部件并组装，由陕鼓技术总负责。本空分装置空压机采用了陕鼓的 RIK125-4 型空压机组，增压机采用了 RBZ45-7 型增压机。

同时汽轮机选择杭汽生产的凝汽式汽轮机。

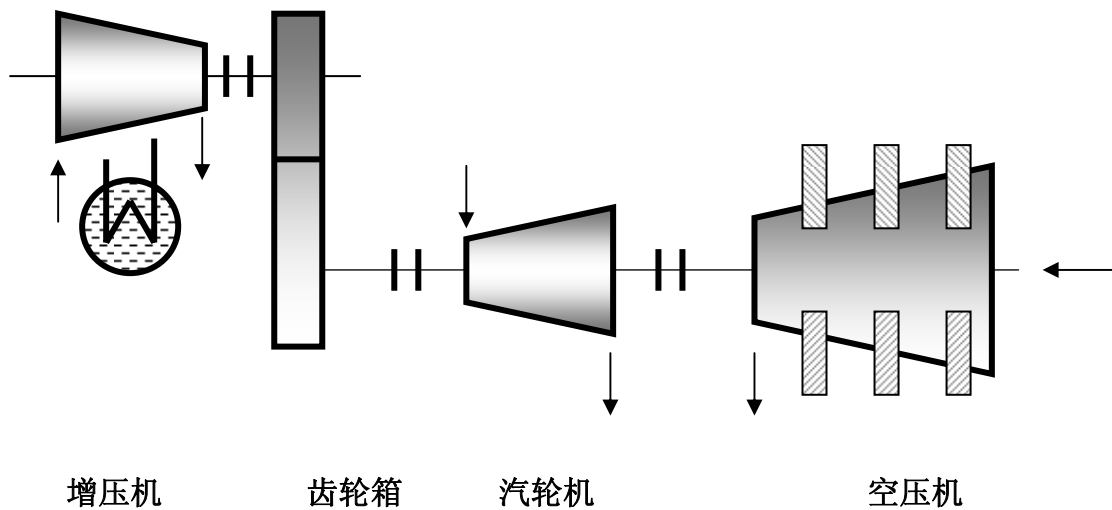


图 4 空压机组的配置形式

在布置方式上采用“一托二”的形式（见图 4），这样布置具有布置紧凑、占地面积小的特点。空分实际运行表明，空压机和增压机运行平稳、安全可靠。

（2）高压液氧泵和增压透平膨胀机

华鲁恒升 48000m³/h 空分设备的氧的压力为 8.5MPa（G），为了保证整套设备的可靠性，高压液氧泵采用 CRYOSTAR 公司的产品，该泵为多级离心式，配进口变频器，采用一用一备的方式，在线冷态备用，工作泵满负荷运转，备用泵低负荷运转。如果工作泵出现故障，备用泵能在短时间内启动并达到工作负荷。同时，为了能及时排出泵体内泵气以保证泵的正常运转，在流程设计时每台高压液氧泵特意设置了泵气自动排放阀，该阀为二位式调节阀，由计算机自动控制开启时间间隔和单次排放时间，并且开启时间间隔和单次排放时间可以由操作工根据实际情况进行调整。

增压透平膨胀机是空分装置的核心部机之一，通常内压缩空分设备只配一套进口膨胀机，但是这也存在一定的隐患。为了尽可能地保证空分的可靠性，华鲁恒升 48000m³/h 空分设备配置了两套膨胀机，采用一用一备的方式，一套膨胀机采用进口产品，另外一套采用杭氧设计制造的膨胀机。事实证明，这样的配置方式既经济又安全可靠。

(3) 精馏塔

五万等级空分设备大型精馏塔的研制成功是该等级空分设备研制成功的关键所在，所以杭氧继三万和四万等级空分开发成功后，投入了大量的人力与物力攻关五万等级精馏塔的研制。华鲁恒升 48000m³/h 空分设备配套的精馏塔有采用规整填料的上塔、粗氩塔、纯氩塔，也有采用四溢流筛板的下塔。规整填料上塔最大直径达Φ4000mm、塔高 30 多米，下塔直径达Φ4000mm、塔高 20 多米，是杭氧当时制造的最大上、下塔。整个精馏塔部分做到了气体上升流速合理，液体下流分布均匀，热质交换充分，精馏效果非常理想。

(4) 五万等级空分设备低温容器加工工艺

华鲁恒升 48000m³/h 空分设备的上塔、主冷、下塔、氩塔等大型低温设备的壳体全部采用了高强度铝合金 5083 材料，这种材料强度虽高，但延伸率只有普通碳钢（Q235）的二分之一，奥氏体不锈钢（0Cr18Ni9）的三分之一，这给上、下塔，主冷所用的大型厚壁封头的成形带来了极大的困难，为此，我们进行了高强度铝合金（5083）厚板的焊接及冷、热加工试验，掌握了焊接，冷、热或成形及热处理规范，攻克了Φ4000×30 大型、厚壁封头的旋压成形难题。

大型低温设备加工技术攻关是结合我国与林德公司合作生产的三万等级空分设备而展开的加工技术攻关，引进并应用了德国的双面双人同时手工钨极氩弧焊，熔化极自动、半自动氩弧焊及嵌入式不锈钢环单面焊等一大批国际先进的铝合金焊接新工艺、大型厚壁维体扳边技术，大直径精馏塔卧装技术等，同时还自行开发了高强度铝合金 5083 整体压制成形工艺；同时杭氧还全面掌握了填料塔的整体制造技术、安装规范和检验要求，如填料塔筒体的椭圆度控制；填料与筒体间隙的控制；填料的卧式组装、立式组装、分块组装和整盘组装技术；填料塔运输要求等。使杭氧有能力向用户提供质量可靠，技术先进的大型填料塔。

(5) 分子筛净化系统节能加热器的应用

三万等级以上的空分设备分子筛净化系统的再生气加热器一般采用蒸汽加热器，但传统的蒸汽加热器存在能耗高和容易泄漏的缺点，对用户产生很大的困扰。华鲁恒升 48000m³/h 空分设备的分子筛系统中使用了的节能型蒸汽加热器，该节能型蒸汽加热器不但吸收蒸汽的潜热，还吸收蒸汽饱和水转变为该蒸汽压力下的过冷水的热量。经理论计算，与常规的蒸汽加热器相比，节能型蒸汽加热器

可节约蒸汽 16%。节能型蒸汽加热器在结构解决了管板上热应力大的问题。

(6) 高压节流阀的设置

高压内压缩空分设备的高压节流阀有高压空气节流阀和高压液氧泵回流阀，这些阀门由于阀门压力等级高、阀前后的压差非常大，对阀门的设计和制造要求很高，一般采用进口产品。若设计不当，很容易造成这些高压节流阀运行时震动剧烈和阀门的破坏，在设计时必须引起足够的重视。

一般来说，高压液体经过高压节流阀的过程中可能出现“闪蒸”和“汽蚀”现象，而阀门制造厂家在设计和制造调节阀时对“闪蒸”和“汽蚀”现象处理方式是不一样的。最有利的是高压节流阀在工作时处于一种非常明确的状态（“闪蒸”或“汽蚀”），而不能是介于“闪蒸”和“汽蚀”之间的状态。而阀门的前后压力决定着液体节流时是“闪蒸”或“汽蚀”，由于液体自重的原因，高压节流阀前后的压力在冷箱上标高不同影响着阀门的前后压力，所以高压节流阀在冷箱上位置影响着阀门的设计和制造。例如，本空分装置高压液氧回流阀的位置设置在液氧泵冷箱上，位于一楼，这样阀后的压力会适当高点，高压液氧节流过程中会有汽泡产生，节流后由于压力的原因汽泡破裂，即该节流过程中是比较明显的“汽蚀”现象，阀门的设计制造按“汽蚀”现象处理。实际运行表明，这样的设计效果非常好。

(7) 冷箱总体的布置

整个冷箱内的管道布置合理，气体和液体的流速恰当，既减小了阻力，也增强了管道的强度，出于流程上的特殊需要，汽液夹带部分的计算更为精细，实践证明运用多个管道软件，在计算机内进行综合计算，得到的效果是十分理想的。

四. 结束语

华鲁恒升 48000m³/h 空分设备于 2005 年 6 月份签定供货合同，2005 年 12 月份完成最终设计，2006 年 3 月 30 日生产完毕，按合同规定日期，准时运抵现场，2006 年 12 月整套空分设备安装完毕，并于 2007 年 2 月 3 日一次开车成功。

2008 年 4 月 22 日，华鲁恒升 48000m³/h 空分设备通过了由专家组成的鉴定委员会对杭州杭氧股份有限公司承担的浙江省工业新产品试产计划项目“五万等级空分设备”（浙贸经技备【2008】26 号，编号 200801A20001）的鉴定，鉴定委员会认为该产品的研发是成功的，达到了项目任务书的要求。

透过华鲁恒升 48000m³/h 空分设备的顺利投运，我们可以看到国产 48000m³/h 空分设备的优良特性，其综合性能已经达到或接近国际先进水平。

随着我国经济的迅猛发展，工业装备也日趋普遍大型化，因而为之配套的空分设备的规模也日趋大型化。五万等级内压缩空分成套设备是大型化肥、大型冶金、大型煤化工等工程装备中配套必不可少的关键技术装备，其投资比重占工程总投资的 10%~20%。而长期以来，随着国民经济发展和科学技术的不断进步，上述重大工程项目所配套的空分设备所需容量正不断地增大，数量不断地增长；而另一方面，我们还没有一套以我为主自行设计制造的五万等级内压缩空分装置，仍然在高价引进。华鲁恒升 48000m³/h 内压缩空分设备的研制成功，改变我国在特大型空分设备长期依靠进口的历史，为国家节约了大量的外汇，填补了国内空分史上的一大空白，说明我国空分设备的设计与制造技术已经跻身于世界空分技术强国的行列。

作者简介：张永凤（1973— ），男，工程师，1998年毕业于中南工业大学应用物理与热能工程系制冷专业，现在杭州杭氧股份有限公司设计院从事空分设备的研究开发工作。