

## \* 设计制造 \*

# 内压缩空分流程探析

毛绍融

(杭州制氧机研究所, 杭州艮山门外东新路152号, 310004)

**【摘要】** 本文分析了内压缩空分流程中制冷系统、换热系统及精馏系统的特点; 研讨了常用的空气循环和氮气循环内压缩空分流程组织中的主要问题; 指出了这种流程组织的关键是合理地安排液体蒸发复热系统, 充分利用设备的内部潜力。并对目前适用于大化肥工业的比较先进的大型内压缩空分流程, 作了详细的分析。图3表2参5。

**关键词:** 空分流程 内压缩 氮气循环 空气循环

## 一、引言

内压缩空分流程是指在空分设备内部, 用低温液体泵把产品加压到所需的压力, 在装置内部将其汽化, 回收冷量, 从而得到带压产品气体的一种空分流程。众所周知, 压缩液体比压缩气体要容易得多。但是, 实现液体在冷箱内压缩、汽化, 会造成一定的不可逆损失。尽管如此, 在某些特定的场合, 内压缩流程仍具有优点。首先, 省去一套复杂的气体压缩系统; 其次, 由于目前技术及工艺上的问题, 气体压缩所能达到的压力受到限制, 尤其是在流量比较大的情况下; 再者, 对于氧气来说, 由于在压缩过程存在一定的危险性, 因此对氧气压缩系统的要求就更高, 所能达到的最高压力相应要低一些。由于以上三方面的原因, 目前内压缩流程仍具有一定的生命力。

在大化肥工业中, 已经使用液氧内压缩流程。早在70年代末80年代初, 我国的镇海、乌鲁木齐和银川三地从林德公司引进了三套容量为  $28000 \text{ m}^3/\text{h O}_2$  的设备, 提供年产30万吨合成氨所需的  $9.7 \text{ MPa}$  的高压氧。在大化肥工业中所需的这种高压氧气, 根据现有

的技术水平, 用透平氧压机是难以实现的。目前, 国内正筹建的大化肥厂, 为内压缩空分流程提供了一个广阔的使用天地。

在小型空分设备中, 早已有采用内压缩流程的设备。主要用于液氧内压缩, 将液氧直接压缩到充瓶所需的压力, 如林德公司生产的带液氧泵的集装型空分设备<sup>[1]</sup>, 我国也设计过这种类型的空分流程<sup>[2]</sup>。这种空分流程采用液氧内压缩的目的, 是使流程简单, 省去复杂的活塞式氧压机系统, 同时消除了由于气氧压缩而造成的污染, 保证了氧气的纯度。

在油田开采行业, 采用注氮采油, 要求氮的压力很高, 可高达  $100 \text{ MPa}$ , 而且用量也较大。对于这种特高压氮气, 采用氮压机是难以实现的, 只能依靠液氮泵来实现。因此, 采用液氮内压缩流程, 是实现这种制氮装置的一种有效方法。

总之, 在某些领域, 使用内压缩空分流程, 有其独特的优越性, 并且有广阔的发展前景。

## 二、内压缩空分流程的原理

上面提到, 内压缩流程要在空分设备内

部将低温液体压缩、汽化后排出。这就意味着要在空分设备中设置一套压缩和汽化液体的系统，而这一系统会造成较大的不可逆损失。因液体在压缩过程及汽化过程中，都存在较大的不可逆性，这些对流程组织造成了很大的影响。下面将分析这些影响，并从流程组织方面采取相应的解决措施。

1. 内压缩空分流程的特点

内压缩流程由于用液体压缩，所以与一般的流程有很大的不同。首先，精馏系统中要排出大量的液体产品，这会造成精馏系统的冷量不平衡。为了保证精馏工况的正常进行，必须向精馏系统提供一定数量的液体。通常采用两种方法：一种是向精馏系统提供液空；另一种是向精馏系统提供液氮，以保证精馏系统的冷量平衡。

其次，液体被压缩后，必须把它汽化，以回收它的冷量，这正是内压缩流程的关键所在。要使液体蒸发，必须用一定数量的工质和它进行换热。特别应指出的是在很多情况下，液体被压缩后，其压力超过临界压力，这时在工质被加热过程中已不存在等温汽化过程。尤其是工质的压力高于临界压力时，其物性发生剧烈变化，传热温差大。因此用多高的压力，采用什么样的工质与相应压缩后的液体进行换热，是个十分关键的问题。

再次，制冷系统也有它的特点，内压缩流程由于实现了在冷箱内汽化，它排出装置的产品是气体而不是液体。因此，并不从装置中直接带走冷量。但是，内压缩流程除了存在与常规流程相同的冷损以外，还会增加额外的冷损。这是由于：第一，液体的压缩是一个不可逆过程，特别是在低温下，液体泵输入的功率，最终全部以热量形式加到装置上，造成冷损；第二，液体蒸发复热过程存在较大的温差，因而造成较大的冷损；第三，产品以带压形式排出装置，其压力往往比原料气体的压力高得多。因此，还存在由

于产品带压排出而引起的冷损。这部分冷损与等温节流效应正好相反；第四，由于在装置内增加液体蒸发换热系统，使冷箱的体积增大，与相同规模的常规外压缩空分设备相比，其跑冷损失也会增加。

由于上述的原因，内压缩空分流程的制冷系统需要提供更多的制冷量，来弥补额外增加的冷损。内压缩流程的制冷系统还要较好地与液体蒸发换热系统相结合，充分地吸收其蒸发的冷量。

最后要指出的是内压缩流程内部各系统是一有机整体，各系统是互相依赖、互相影响的。因此，流程的组织也与常规的外压缩流程有所不同。

2. 内压缩空分流程的组织及原理

图1给出了很早就采用的小型液氧泵空分设备的原理流程图。流程采用压力比较低的原料空气来蒸发高压氧，氧的压力为16.5 MPa,大大高于其临界压力(~5.0MPa)。制冷系统采用返流氮膨胀制冷，流程中用低压

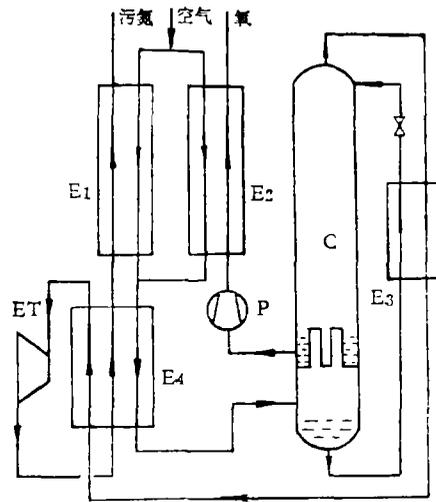


图1 小型液氧内压缩流程

E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、E<sub>3</sub>、E<sub>4</sub>—换热器

ET—透平膨胀机

OP—液氧泵 C—精馏塔

图中更正：图中液氧泵“P”应改为“OP”。

空气来回收高压氧的冷量，由于空气的压力低于其临界压力，因此，不能通过蒸发液氧来获得液空，使冷量回收很不完善。精馏系统由于抽走液氧而造成的冷量不平衡，通过增加进入下塔空气的含液量来弥补。而这部分液空只能通过液化器来制取。另外，由于装置容量比较小，跑冷损失比较大，制冷系统所承担的负荷也就比较大。最终造成原料空气的压力比较高。同时，由于提供给下塔的是液空，因而对氧提取率也有影响。

这种流程的优点是简单可靠，只用了一台空压机及液氧泵就可得到高压、无污染的氮气，省去了活塞式氧压机系统。这对小装置来说是比较适宜的。而对于大型设备，整个装置的效率、能耗指标显得比较重要。因而必须提高流程的效率，降低不可逆损失。从前面的分析可知，要提高内压缩流程的效率，其关键是如何有效地回收液体蒸发的冷量。而要做到这一点，必须把与液体换热的工质压力提高到临界压力以上，同时合理地安排换热系统，以减小换热温差。图2中的(a)与(b)分别给出了在流程中各增加一台循环空压机和循环氮压机的两个液氧内压缩分流程。通过这两台压缩机，分别把与液氧换热的空气及氮气的压力提高到临界压力以上。

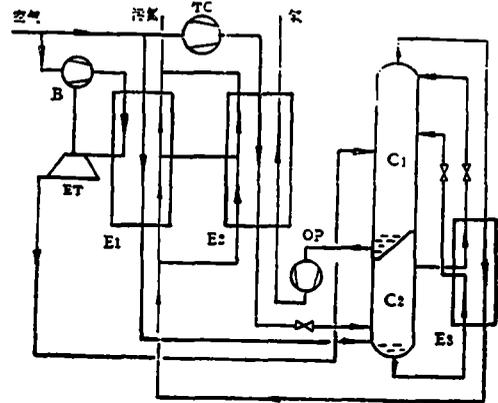


图2b 带有外循环的内压缩流程  
(空气循环)  
E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、E<sub>3</sub>—换热器 C<sub>1</sub>—上塔  
C<sub>2</sub>—下塔 B—增压机 OP—液氧泵  
TC—循环空压机 NC—循环氮压机  
ET—膨胀机

用来蒸发液氧的空气或氮气的压力提高到各自的临界压力以上，就避免了在空气与氮气被冷却时，经过汽液两相区。同时可适当调节空气或氮气的压力，使之与高压氧换热时换热温差小。这样就能得到与蒸发液氧数量相当的液氮和液空。从而保证了充分地回收液氧蒸发的冷量。图2中所示的两个流程实际上是把压缩氧气转移成压缩空气和压缩氮气，目的在于减少压缩氧气的困难。同时，压缩机的进排气压力可在一定范围内选择，从而降低了循环氮压机与循环空压机设计上的困难，增加设计的灵活性。

从图2中可以看出，这两个流程都采用空气增压膨胀制冷系统，来提供整个流程所需的冷量。虽然，采用液氧内压缩会使装置的冷损增加，但是，针对大型空分设备，若不生产液体产品，其本身的制冷能力是有富余的。况且，由于采用了增压膨胀机系统，加上大型透平膨胀机等效率不断提高，因此，这种制冷系统完全能满足整个装置的冷量要求，并利用了上塔的精馏潜力。

图2中(a)与(b)两个流程的主要区别

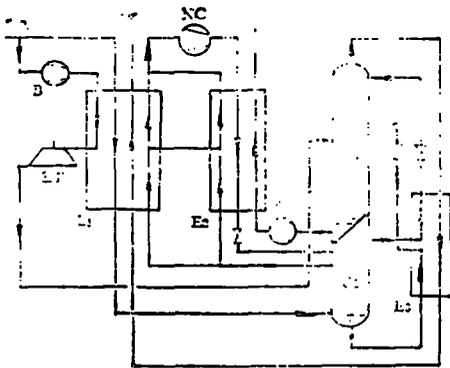


图2a 带有外循环的内压缩流程  
(氮气循环)  
(图注见图2b)

在于：一个是用高压空气来蒸发高压氧；另一个是用高压氮来蒸发高压氧。使用高压氮时，向精馏系统提供的是液氮，对装置的氧提取率影响很小。而用高压空气时，向精馏系统提供的是液空，这样对氧提取率有所影响。但是，空气循环直接利用了参加精馏的原料空气，因此进出换热器的流量比用氮气循环时的流量要少，相应的复热不足冷损也就比较小。两个流程各有其优点，当需要高压氮产品时，则采用高压氮循环比较合适，这样可以把产品氮压机与循环氮压机合在一起，以减少部机，并能提高压缩效率。

总之，要组织一个比较合理的内压缩流程，首先要考虑采取措施，尽可能回收液体蒸发的冷量。其次要使液体压缩及蒸发换热系统与整体流程有机地结合起来，充分利用原有系统的内在潜力，同时保证精馏系统及制冷系统在较好的工况下运行。最后要充分地考虑到其它产品的要求，合理地组织外部压缩系统，从最大程度上提高压缩效率。

### 三、现代大型内压缩空分流程的主要技术问题

目前大型内压缩空分流程主要用于大化肥用的空分设备，这种空分设备生产大量高压氧气的同时，还生产大量的压力氮气。我国从林德公司引进的三套 28000 m<sup>3</sup>/h O<sub>2</sub> 的空分设备，就是这种流程。随着工业技术的不断发展，空分行业的各项技术也在不断发展。现代大型内压缩空分流程，是建立在吸收空分领域中各项新技术、使用先进设备和机器基础上的新型空分流程。

图 3 给出了这种空分流程，该流程采用了氮循环，并带有高压氮膨胀机。现在，以该流程为例，来分析一下流程组织和参数确定上的一些主要技术问题。

#### 1. 该流程的主要问题之一，就是制冷系统的组织

整个流程所需的冷量，分别由空气膨胀

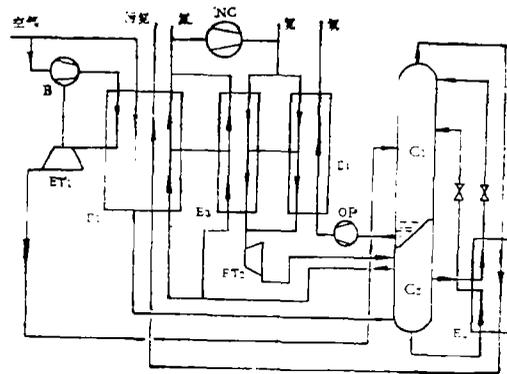


图 3 现代大型内压缩流程

E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、E<sub>3</sub>、E<sub>4</sub>—换热器 B—增压机  
ET<sub>1</sub>—空气膨胀机 OP—液氧泵 ET<sub>2</sub>—  
高压氮膨胀机 C<sub>1</sub>—上塔 C<sub>2</sub>—下塔

机、高压氮膨胀机及等温节流效应提供。这样一来，产冷量如何分配？空气膨胀量取多少？这些问题就显得很重要。显然，若增加空气膨胀量，则可增加空气膨胀机制冷量，高压循环氮的量就可减少。但是，空气膨胀量的增加必然会导致氧提取率的下降，从而使加工空气量增加。相反，若减少空气膨胀量，则可减少加工空气量，但会导致高压循环氮量增加。所以，如何合理地分配两者间的制冷负荷，是必须考虑的主要问题。首先，应该从总的能耗大小来考虑，以确定比较合理的循环氮量和氧提取率；同时，应考虑到相应设备和机器的情况。有一点必须值得重视，就是合理地利用上塔的精馏潜力。

#### 2. 该流程组织中的另一个主要问题，是循环氮系统的组织

循环氮用来回收液氧的冷量，为了使循环氮能够充分地吸收液氧的冷量，必须合理地组织换热系统。由于氧氮热物理性质上的差异，故只能通过改变循环氮的压力，使得氧氮换热时温差小一些。当氧气的压力低于临界压力时，则氮气的压力比较容易确定。此时，只要通过氮冷凝与氧蒸发的温差就可确定相应的氮气压力。

当氧气的压力比较高,大于其临界压力时,情况就比较复杂一些。因为,此时已不存在氧的等温汽化区域。因此,在确定循环氮的压力时,必须考虑到氧氮的整个换热过程。这时,决定氧氮换热特性的是从低温到常温的整体传热情况。由于超临界氧氮的物性变化剧烈,比热变化大,因而如何组织好氧氮换热是一个十分复杂的问题。作为一个例子,表1中给出了使用压力分别为6.0、7.0、8.0、10.0、12.0 MPa的氮气来蒸发10.0 MPa、1 m<sup>3</sup>/h O<sub>2</sub>(标态)时所需的氮气的量、氮气出口温度、节流到0.6 MPa所得到的液氮量,以及换热最大温差和积分温差。在计算中,氧的进口温度取97.0 K,出口温度取308.5 K,氮的进口温度取313.0 K,换热最小温差控制在2.0 K。

表1 高压氧氮换热特性

压力 (MPa)	氮流量 (m <sup>3</sup> /h)	出口温度 (K)	产生的液体 (m <sup>3</sup> /h)	最大温差 (K)	积分温差 (K)
5.0	1.5432	134.3	0.4456	37.3	8.47
6.0	1.4775	134.6	0.5507	37.6	8.55
7.0	1.4168	133.0	0.6477	36.0	8.28
8.0	1.3650	129.6	0.7308	32.6	7.93
10.0	1.2900	121.5	0.8545	24.5	7.25
12.0	1.2525	115.0	0.9236	18.0	6.92

从表1中还可以看出,在这种情况下,随着氮气压力的提高,氧氮之间的换热温差不断减少,氮气的出口温度不断降低,氮氧的比例不断下降,氮节流后能得到的液体量不断增加。这表明随着氮气压力的升高,氧氮换热的温差减少,不可逆损失减小。因此在氧气压力较高时,应该尽量提高循环氮的压力。但是,从另一角度来看,循环氮压力的提高,一方面对氮压机及换热器的设计造成困难,另一方面也会增加不可逆损失。

因而,在确定氮气循环压力时,必须综合考虑。

3. 高压氮膨胀机的使用,是该流程中的

又一个关键问题

由于氮气的压力比较高,该膨胀机的出口基本上是液体。下面来看看这种膨胀机的作用如何,制冷效果怎样?

在传统的制冷循环中,最低温度的获得都采用节流阀。但节流过程是一个不可逆过程,其损失很大。在温度比较低、压力比较高时的超临界压力氮,若采用等熵膨胀来代替节流过程,可以得到一定的焓降,减少节流汽化率。为更具体地说明这一点,本文作了一些计算,结果示于表2中。当把温度为120.0 K,压力分别为15.0、12.5、10.0、8.0、6.0 MPa的氮气,各自通过等熵效率为100%和70%的膨胀过程及等焓节流过程,膨胀到0.6 MPa时,所能获得的焓降和出口的带液量,从表2中可以看出,采用膨胀过程能得到一定的焓降,其带液量明显大于等焓节流的带液量。而且压力越高,这种差别就越大,采用膨胀过程的优点就越突出。所以在氮循环系统中采用膨胀机来代替节流阀,一方面可以回收部分膨胀功,而更重要的是可以制取温度水平较低的冷量,直接增加液氮量,从而大大地提高了氮循环系统的效率。

表2 进口温度为120 K时不同压力下的氮气膨胀和节流到0.6 MPa的焓降和带液量

压力 (MPa)	等熵膨胀过程		等熵效率为70%		等焓节流
	焓降 (kJ/m <sup>3</sup> )	带液量 (%)	焓降 (kJ/m <sup>3</sup> )	带液量 (%)	带液量 (%)
15.0	30.66	82.26	21.46	77.89	67.70
12.5	26.39	80.65	18.48	76.69	68.11
10.0	22.41	78.88	15.69	75.68	68.23
8.0	19.67	77.16	13.77	74.36	67.81
6.0	16.60	74.87	11.62	72.50	66.98

#### 四、内压缩空分流程的综合性性能评价

一个空分流程的好坏,应该看其能耗指标的高低、设备投资成本的大小,以及运行可靠性。

内压缩流程最大的优点是省去了高压气体压缩机,尤其是高压氧压机,从而简化了系统,避免了压缩高压气体的危险性。对于液氧内压缩流程,从主冷中抽出了大量的液氧,减少了主冷爆炸的危险,增加了装置的安全性。因而,采用内压缩流程的装置与常规的装置相比,运行更加安全可靠。

设备投资成本的估计比较复杂,内压缩流程与常规的外压缩流程相比,省去了产品气体压缩系统,而在冷箱内部增加了液体泵和高压蒸发换热器。如图3所示的流程中,增加了液氧泵及两只高压换热器,省去了高压氧压机。液氧泵投资比较小,高压换热器投资比较大一些。高压氧压机是技术要求比较高的机器,整个系统比较复杂。具体成本的高低,还要看具体的设备及当时市场因素来决定。

内压缩流程在装置内部实现了产品的压缩,产品可达到所需的压力后排出装置。这样,在装置外部省去了产品压缩机。因此,在评价内压缩流程的功耗时,应考虑到产品的压缩功耗。这一点与常规的外压缩空分设备有所不同,只有在考虑常规的外压缩流程功耗时(包括了产品压缩功耗),两者相比才有意义。

内压缩流程用液体泵及循环压缩机来取代产品压缩机,由于蒸发系统的换热温差较大,以及液体压缩造成的冷损,会导致装置内部功耗增加,对此加以补偿的是使循环压缩机易于设计,从而提高压缩效率,降低了压缩功耗,并充分利用了装置的内在潜力,降低循环量,减少功耗。所以,一般说来,内压缩流程的能耗不会增加。根据现有的技术水平估算,总的能耗指标基本上与常规的流程处于同一水平。

### 参 考 文 献

- 1 张祉祐,石秉山.制冷及低温技术(下册).机械工业出版社,1981.
- 2 空分行业小型制氧机联合设计组.单高氧(带液氧泵)空分设备计算书.行业资料.1980.7
- 3 蒋全勋.煤、油制氮装置中空分流程的选择.深冷技术,1988(3):10-16
- 4 阎振贵.林德28000m<sup>3</sup>/h空分流程分析.深冷技术,1988(6):1-4
- 5 Theobald, Alan. Method of producing gaseous oxygen and a cryogenic plant in which said method can be performed. European patent, № 0044679

(1991年9月改稿)

## 湖北省劳动厅强调气瓶充装安全管理工作

湖北省劳动厅1991年8月26日以鄂劳函[1991]259号文“转发劳动部‘关于一九九一年气瓶充装站、检验站整顿治理工作的通知’的通知”,结合湖北省气瓶充装检验整治情况,提出了六条意见,强调继续加强气瓶充装安全管理工作。

“通知”指出,各地应按《湖北省气瓶充装单位资格审查及注册登记暂行办法》,查清本辖区内气瓶充装单位的数量、分布、基本状况和问题,进一步做好对气瓶充装单位资格审查及注册登记发证工作。并实行“分级管理,统一办证”。各气瓶充装单位要认真做好迎审工作,对于资格审查规定性条件和关键性项目,应进行认真整改和落实,达不到规定条件不予审查。从1993年1月1日起,凡未按要求办理气瓶充装注册登记手续的气瓶充装单位,不准从事气瓶充装工作。并强调定期检验及抓好现有定点检验站的审查和管理工作。

(430083 武汉青山 武钢氧气厂气瓶检验站 王吉昌)