

YANGQI YIQUE SHENGCHAN LIUCHENG YOUHUASHEJI YU CHANPIN
JI GUANZHUANG XINJISHU BIAOZHUN SHIYONGSHOUCE

氧气、乙炔 生产流程 优化设计与产品及灌装新技术标准

实用手册

大地音像出版社

封面设计 任勇设计室

ISBN 7-88619-003-3



9 787886 190032 >

ISBN 7-88619-003-3
定价：888.00元

氧气、乙炔生产流程优化设计与 产品及灌装新技术标准实用手册

(第二卷)

主 编：随学兵

大地音像出版社

出,经过冷器后送入上塔顶部。在下塔中部(第 17 块塔板)抽出部份污液氮,经过冷器后也送入上塔上部。下塔底部得到含氧 38% 的液体富氧空气(简称液空)。液空引出后,经过液空吸附器、液空过冷器后,送入上塔中部。

由下塔送入上塔的液体逐块沿上塔塔板流下直至主冷凝蒸发器而成为含氧 99.6% 的液氧。主冷凝蒸发器采用板式换热器,一侧是低压的液氧蒸发,另一侧是高压的氮气冷凝。液氧在此蒸发成气体,其中部分气体顺上塔塔板上升,保证精馏正常进行。其余的氧气作为产品引出精馏塔。

由于空气中氩的存在,因此在上塔上部抽出一部分含氮为 94.7% 的污氮气,数量约占加工空气量的 65%。大部分氩气由污氮气中带走,以保证在上塔顶部得到含氮 99.99% 的纯氮气。

液氧从上塔底部放出,用液氧泵升压,再经过液氧吸附器(吸附乙炔)后,分成二路,一路仍回到上塔,另一路经过液氧过冷器后排出装置,进入液氧贮槽,作为液氧产品。

液空、液氮、污液氮从下塔进入上塔都要节流,使压力由原来下塔压力降低到上塔压力。这时液体的液化温度也要随之降低,所以节流后有部分液体会汽化。为了使节流后汽化的数量减少些,因此在节流前用上塔引出的纯氮和污氮经过冷器把液体先过冷一下,以减少节流以后的汽化,使上塔塔板上的液体可以多些,对塔板上的精馏工况比较有利。本装置的过冷器都采用板式换热器的结构。

(三) 杂质的清除系统

一般高空的空气比较清洁,尤其在工厂区附近,所以空分装置都装有吸入塔。它的高度约 30 米~50 米,在高空吸入空气(也可采用远方吸入空气的方法)。当空气吸入后采用油浸链板式空气滤清器,使空气中的灰尘粘附在油膜上而被除去。过滤后的空气中灰尘及固体杂质的含量应小 1 毫克/米³。此外,制氧站应安装在工厂区的上风方向,使得在大多数时间内都能避免吸入工厂上空比较脏的空气。

水分和 CO₂ 的清除一般可以将空气经过干燥器除去水分和 CO₂ 吸附器除去 CO₂,但这就需要增加两组庞大的设备。因此,为了减少设备,简化流程,全低压流程中都采用在换热器中冻结的方法清除水分和 CO₂。一般空气被冷到 -60℃ 时,其中水蒸汽即被冻结成雪。而 CO₂ 要在 -135℃ 时才开始从空气中冻结出来。在 -172℃ 时空气中的 CO₂ 含量极少,可以认为清除干净。所以切换式换热器热段清除水分,冷段清除 CO₂。当空气经过切换式换热器时,水分及 CO₂ 冻结在换热器的肋片上。切换后,污氮流入此通道,将雪及 CO₂ 升华并带走。污氮能否把雪及 CO₂ 带走,决定于换热器的冷端温差。过分低的氮气温度不利于雪及 CO₂ 的升华。因此要求污氮进入切换式换热器的温度不低于空气出切换式换热器的温度 2~3℃(即冷端温差)。冷端温差越小,越有利于污氮将雪及 CO₂ 带走。为了要使空气中的水份及 CO₂ 除掉,则必须将空气冷却到 -172℃,使水分及 CO₂ 冻在换热器内。为了污氮能把换热器内的雪及 CO₂ 全部带走,就要求污氮进换热器的温度为 -175℃。但这样返流气体(指氮、氧、污氮)的冷量就不足以把正流空气冷却到 -

172℃。这样既不能保证清除空气中的 CO₂,也不能保证冷端有较小的温差,因此就必须采取措施。本装置中采用环流法,即将部分空气由下塔中引出(已冷却到 -172℃,清除了水分及 CO₂),重新返回切换式换热器,经过冷段的环流通道。这部分空气也就称为环流空气。它在切换式换热器中被加热至 -120℃时放出。

环流空气量可以根据以下方法来确定:空气在切换式换热器中由 +30℃冷却到 -172℃时所放出的热量和由周围环境传入的热量(即跑冷损失)的总和,与氧气、氮气和污氮在切换式换热器中所能够吸收热量的总和是不相等的。放出的热量大于吸收的热量。这二者之差,即为环流空气所需吸收的热量。根据这一数值就可计算出环流空气由饱和状态加热到 -120℃时所需要的量。本装置环流空气量约占进装置加工空气量的 11.7%。

环流空气量并非一成不变,而决定于环流出口温度以及环流进口的状态。并与氧、氮、污氮进切换式换热器的状态,正流空气出切换式换热器的状态也有关。

环流空气量的大小应保证使正流空气能冷却到 -172℃,过大将使空气在切换式换热器中产生液体;过小又将不能使空气冷却到要求的温度,使空气中的 CO₂ 清除不干净,而带入下塔。

由于考虑到析出的水分在切换式换热器的肋片上会向下流动,所以切换式换热器一般热端在下,冷端在上,使水分不易流到低温段去。

为了防止仍有少量的 CO₂ 随着空气进入精馏塔,因此在下塔底部设有一块泡罩塔板,用来洗涤空气中的 CO₂,使下塔上部的塔板上不受 CO₂ 的影响,保证了精馏工况的正常进行。为防止 CO₂ 进入上塔,在液空送入上塔前,先经过 CO₂ 过滤器,除去固体 CO₂,保证上塔塔板上不被 CO₂ 所堵塞。

乙炔的清除利用液空过滤吸附器。如果还有少量带入上塔,则用液氧泵将液氧经乙炔吸附器清除。液氧中乙炔的含量应小于 0.02ppm(ppm 为百万分之一),才能有效地防止主冷凝蒸发器内发生爆炸的危险。液氧泵的液氧循环量约等于氧产量。

(四)加温吹除系统

虽然在空分装置中采取了上述措施来清除灰尘,水分、CO₂、乙炔等,但是并不能将这些杂质彻底清除,因此空分装置还设置了一套加温吹除系统。当装置连续生产一年后,或是切换式换热器阻力过分增大,或是分馏塔中产品氧、氮的纯度、产量达不到要求,就应停车进行全面的加温和吹除。另外,在空分装置连续运转时,液空及液氧吸附器也需经常切换加温再生,也是由这套加温吹除系统来完成。

加温系统是由空气滤清器、干燥器、罗茨鼓风机,加热器和热空气过滤器组成。空气经空气滤清器过滤,干燥器吸附空气中的水份后,在罗茨鼓风机中加压至 0.35 公斤/厘米²(表压),并在加热器中加热,再经热空气过滤器,供精馏塔内容器的加热和干燥器的加热再生。加热器的热源采用 7 公斤/厘米²(表压)的饱和蒸汽。

加热精馏塔内各容器时,空气的温度为 90℃;而再生干燥器硅胶时,空气的温度应为 150℃。温度的高低由供给的蒸汽来控制。

为了安全起见,液空吸附器和液氧吸附器,以及液氧泵均需用纯氮进行加温再生。

(五)仪表控制系统

为了保证制氧装置正常生产,并能获得合乎规定的质量和最大产量的氧气和氮气,生产过程的控制就很重要。及时的控制可以预防偏离稳定生产的倾向,防止设备运转中的故障,以至事故。为此设备上装配了控制计量的仪表。这些仪表改善了工作人员对过程的看管,为无事故运转创造条件。

在制氧装置中,应控制的指标:

1. 送进装置的空气量及所生产的氧和氮的产量。
2. 空气、氧、氮、油、冷却水的温度及压力。
3. 主冷凝蒸发器、下塔塔釜中的液面。
4. 蓄冷器、上塔、下塔、吸附器,过滤器中各个设备的阻力。
5. 产品的纯度,液氧、釜液中氧氮的成分,以及液氧中乙炔的含量。
6. 节流阀及调节阀的开度。
7. 蓄冷器的切换时间控制。
8. 透平膨胀机及透平压缩机的转速。

KFD-4100 型空分装置的特点:

1. 本装置采用全低压流程。
2. 低温容器、管道等全部采用铝合金,所有热交换器全部采用铝制板式换热器,制造方便,有利于大批生产。
3. 采用了切换式换热器代替石头蓄冷器,可以节省大量铜材。用环流法代替中抽法,可以省去两只庞大的 CO_2 吸附器,四个中部抽气阀。同时使启动也较方便。
4. 采用液氧循环。液氧从主冷凝蒸发器底部引出,经液氧泵加压,在液氧吸附器中除掉浓缩于液氧中的乙炔和碳氢化合物,保证了设备的安全运转。

二、KFS-21000 型空分装置

主要技术性能如下:

加工空气量:	21000 米 ³ /时(20℃,760 毫米汞柱)
氧产量:	3200 标米 ³ /时(99.6% O_2 以上)
氮产量:	4000 标米 ³ /时(99.99% N 以上)
工作压力:	6.5 公斤/厘米 ² (绝对压力)
启动时间:	48 小时
运转周期:	一年

图 2-3-21 表示 KFS-21000 空分装置流程图。空气由远方吸气站吸入,经空气滤清器清除机械杂质,进入透平压缩机,压缩到 5.5 表压,经末端冷却器冷却后,进入氮水预冷系统,将空气冷却到 30℃ 以下,再进入空分设备。

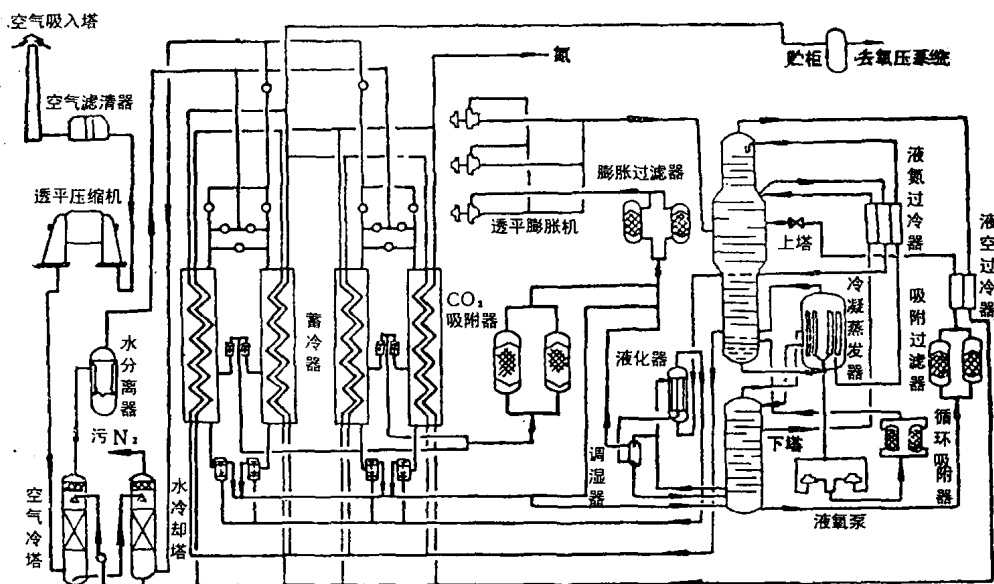


图 2-3-21 KFS-21000 型空分装置流程图

空气由蓄冷器前的自动切换强制阀分配进入每对石头蓄冷器中的一个，在蓄冷器中空气被石头填料所冷却，并把所含的水分和二氧化碳冻结在石头填料上。空气出石头蓄冷器时，温度降至 -172°C （接近于冷凝温度），经自动阀箱后，进入下塔下部。在下塔中空气自下而上经一块泡罩塔板和 35 块筛板塔板后，在下塔顶部产生浓度为 99.99% 的氮气。氮气进入冷凝蒸发器的管间，与管内的液氧进行热交换，液氧气化，气氮冷凝。冷凝后的液氮，分为两部分。一部分进入液氮过冷器，过冷后再经节流阀降压到 0.3 表压后送入上塔顶部，作为上塔的回流液。另一部分流回下塔，作为下塔的回流液。当液体流到第 20 块塔板时，又抽出部分浓度为 94.1% N_2 的污液氮。污液氮也经过冷却器过冷 7°C 后节流，压力降低到 0.3 表压后送入上塔第 54 块塔板处。在下塔中继续往下流的液体流至下塔底部时，则得到含氧浓度 36 ~ 40% 的富氧液空。液空抽出经过滤吸附器和液空过冷器后，进入上塔中部。

在石头蓄冷器的中部抽出一股空气，温度为 -120°C ，进入二氧化碳吸附器，除去二氧化碳，经过滤器，再与调湿器来的空气混合。混合后空气温度为 -143°C ，经过膨胀过滤器，再进入膨胀机。透平膨胀机共有三台，分别为 4500, 5000, 5500 m^3/h 。膨胀后的空气送入上塔中部，参加上塔精馏。

在上塔的顶部得到浓度为 99.99% N_2 的产品纯氮，经液空过滤器，再经蓄冷器的盘管后，送至用户。在上塔的底部得到浓度为 99.6% O_2 的氧气，经过蓄冷器的另一组盘管后，送至氧气柜。在上塔上部引出浓度为 94.1% N_2 的污氮，经过液氮过冷器、液化器、蓄冷器的自动阀，进入蓄冷器，并从蓄冷器中带走压缩空气中被冻结在填料上的水分及二氧化碳。污氮出冷却器后进入水冷却塔，将水冷却后放空。

本装置共有4个石头蓄冷器分为两对,每对两个。蓄冷器直径为2米,高11米,内部绕有铜管,盘管间充有 $\phi 9 \sim 12$ 毫米的卵石。自动切换强制阀以9分钟切换一次,使得每对蓄冷器中的一个Ⅰ顺流通空气,另一个Ⅱ逆流通过污氮。隔9分钟切换后,则顺流空气进入另一个蓄冷器Ⅱ,逆流污氮进入蓄冷器Ⅰ。当污氮逆流通过时,将冷量传给石头填料,当下一周期顺流空气通过时,石头将所蓄的冷量传给空气,使空气温度降低到 -172°C 。空气中所含的二氧化碳及水蒸气冻结在蓄冷器中的石头填料上。当下一周期逆流污氮通过时,二氧化碳和水分升华随同污氮被带出。

在蓄冷器中,为了使空气中的二氧化碳能清除干净,必须使空气冷却到尽可能低的温度。然而在6大气压下空气在 -173°C 时即开始液化,液化的部分空气很难流出自动阀而进入下塔,这样在切换后,污氮进入蓄冷器,液化的部分空气将被污氮带走,造成空气损失。因此,一般要求空气出蓄冷器的温度比液化温度高 1°C 左右,这时水份早已冻结在蓄冷器的上部,而二氧化碳也绝大部分(95%)冻结在蓄冷器的填料上。当切换过后,返流气体污氮流入蓄冷器,为了能将冻在填料上的二氧化碳带走,则污氮进蓄冷器的温度要求只能比空气出蓄冷器的温度低 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ (即蓄冷器冷端温差)。这样返流气体的冷量就不足以把空气冷却到要求的温度。因此,在这个流程中采用了中部抽气的方法,就是将蓄冷器中部的空气(-120°C)抽出一部分(约占总量12%),保证其余88%的空气能冷却到要求的温度。抽出空气中的水虽已清除干净,但仍保留着二氧化碳。将这部分空气通入二氧化碳吸附器中的一个,吸附器中装填硅胶,硅胶吸附了空气中的二氧化碳。为了防止硅胶粉末随着空气带入透平膨胀机,空气经过滤器,滤去硅胶粉末,再进入膨胀机,膨胀后的空气送入上塔。

离开蓄冷器底部的空气尚带有少量的二氧化碳进入精馏塔下塔,若不清除掉危害很大。因此,当空气进入下塔后,首先经过一块泡罩塔板,气流穿过塔板上的液层时,液体将气体洗涤干净。二氧化碳全部留在液体中,液体流到塔釜。当釜液引向上塔时,在管路上设置了吸附过滤器,把这部分二氧化碳过滤掉。

由于返流气体进蓄冷器有一定的温度要求,因此在氮气管路上设置了过冷器及液化器,保证蓄冷器的氮气进口温度。

液化器,是为了装置在启动过程中产生和积聚液体。空气经过膨胀机后温度达到 -180°C 以下(比饱和温度要高一些),就直接通过启动管线进入液化器。在液化器中将刚出蓄冷器的空气(压力为6公斤/厘米²,温度为 -172°C)进一步冷却和液化,液化的液体流入下塔底部。因此液化器在启动过程中是不可缺少的设备。当装置启动结束转入稳定操作时,液化器只起污氮加热的作用,回收污氮的冷量,并把污氮加热到进蓄冷器所要求的温度。

过冷器除了使氮气温度升高,以满足进蓄冷器所要求的温度外,还为了使液空、液氮和污液氮过冷,以减少由于节流而引起部分液体的气化,使得上塔能得到较多的液体,从而改善上塔的精馏工况。

为了保证空分装置的安全运转,在流程中设置了清除乙炔的设备。由于乙炔能溶于液空和液氧中,所以在液空进入上塔的管路中设置了乙炔吸附器,吸附器中装有硅胶,用

来吸附乙炔。如果尚有微量的乙炔没有被吸附而进入上塔,而使得液氧中乙炔浓度升高,这也是危险的。因此在制氧设备中装有液氧的乙炔吸附器。用液氧泵作为动力,从主冷凝器底部将液氧抽出,送入乙炔吸附器,经过再一次的吸附,除去在液氧中的乙炔,液氧仍送回上塔。

压氧部分采用 ZY-33/30 型三缸三列活塞式无油润滑的氧气压缩机。每小时压缩 1800 标米³ 压力为 30 公斤/厘米² 的氧气,以供转炉炼钢用氧。

本装置与 KFD-41000 相比较:

1. 结构可靠。在目前的制氧机中,使用比较稳定。
2. 热交换器都为管式结构,消耗有色金属铜材多。
3. 蓄冷器中用的是卵石填料,因此设备大。同时又采用中间抽气法。为了解决 CO₂ 的清除问题,必须增加一对(两个)庞大的 CO₂ 吸附器。这些都使得启动时间长,增加了设备的冷损。
4. 装置容量相同时,纯氮产量可提高 25% 左右。

三、FL-3350-Ⅲ型空分装置

18700 标米³/时的空气经过滤器后,在透平压缩机中压缩,压力达 6 绝对大气压,温度为 30℃。其中 3250 标米³/时的空气进入二个氧蓄冷器中的一个,15450 标米³/时的空气进入二个氮蓄冷器中的一个。蓄冷器内放有蓄冷盘。它是用厚 0.46 毫米、宽 50 毫米,轧制成波纹状的铝带绕卷成盘、每只氧蓄冷器中放有蓄冷盘 78 盘,每只氮蓄冷器中放有蓄冷盘 79 盘。空气通过蓄冷器时与蓄冷器中的蓄冷盘发生热量交换,使空气温度逐渐降低。经过蓄冷器中的全部蓄冷盘后,空气已被冷却到 -171℃,然后开蓄冷器而进入下塔。空气在蓄冷器中被蓄冷盘逐渐冷却的同时,将所含有的水蒸汽及二氧化碳冻结在蓄冷盘上。经过 3 分钟后,空气由强制阀控制进入氧氮蓄冷器的另一个,而原来进空气的一个停止进入空气,使氧、氮反方向进入。氧、氮在蓄冷器中冷却已被空气加热的蓄冷盘,同时把已经冻结在蓄冷盘上的冰和二氧化碳升华并将它们带走。

为了保证氧蓄冷器中不被冰和二氧化碳所堵塞,使返流的氧气能完全清除空气冻结在蓄冷盘上的冰和二氧化碳,采用返流的氧气量比顺流的空气量大 1.03 倍。而氮蓄冷器的不冻结性,则在氮蓄冷器中部抽出 -120℃,数量为 2600 标米³/时的空气,从而增加了蓄冷器下部返流氮气量大于顺流空气量的倍数,使得氮蓄冷器的冷端温差缩小到 6℃,这样保证了返流氮气能清除空气中冻结在蓄冷盘上的水和二氧化碳。从氮蓄冷器中抽出的空气含有二氧化碳,需通过二氧化碳吸附器。在二氧化碳吸附器中装有细孔球形硅胶吸附剂,能吸附空气中的二氧化碳。为了使二氧化碳吸附器能连续工作,吸附器应有两个。一个在通过空气时吸附二氧化碳,另一个用氮气再生,经过 24 小时后交换使用。经过二氧化碳吸附器后的空气与下塔下部抽出数量为 1870 标米³/时的空气汇合,这时空气温度为 -140℃,然后进入透平膨胀机。空气在透平膨胀机中由 5.55 绝对大气压膨胀至 1.35 绝对大气压。膨胀后的空气送入上塔第 35 块塔板上参加精馏。

经过蓄冷器冷却后的空气进入分馏塔下塔。在下塔中首先穿过一块泡罩塔板,塔板上装有 48 个直径为 $\phi 170$ 毫米黄铜制泡罩。在这块塔板上清洗了空气中残留的二氧化碳,避免二氧化碳堵塞其他塔板的筛孔,保证其它塔板的正常工作。空气穿过泡罩塔板和 24 块筛孔塔板后,在下塔上部可以得到 98% 的氮气。氮气流入主冷凝蒸发器。主冷凝蒸发器中装有 17720 根紫铜管,约 600 平方米的传热面积,使大部分氮气在紫铜管中被上塔底部处于管间的液氧所冷凝。剩下占总加工空气量 1/4 的未冷凝氮气经过液氮分离器流进辅助冷凝器。辅助冷凝器是用 660 根每根 14 米长的紫铜管绕制而成,换热面积有 260 米²。氮气在辅助冷凝器的管间被来自主冷凝蒸发器的液氧冷凝成液体。这部分液氮经过液氮过冷器过冷后,节流降低送至上塔顶部作回流液体。数量为 0.11 标米³/标米³ 的液氮,由下塔液氮槽中抽出,经液氮过冷器过冷后节流降压送至上塔顶部,作为回流液体。

数量为 0.165 标米³/标米³ 的空气由下塔下部抽出,经气液分离器后,分为两路。一路去透平膨胀机;一路去液化器,被塔顶出来的氮气所冷却。这部分空气被冷凝成液体,仍流回到下塔底部。在液化器中,氮气被加热至一定的温度,这样就保证了氮蓄冷器的冷端温差。

上塔有 50 块筛孔塔板。膨胀后的空气进入第 35 块塔板上;液空进入第 38 块塔板上,液氮进入第 50 块塔板上(塔板编号为由下而上)。通过上塔精馏的结果,得到纯度为 99.7% O₂ 的液氧和纯度为 96.5% N₂ 的氮气。大部分液氧在主冷凝蒸发器中蒸发。蒸发后的氧气作为塔板上的上升蒸气,使塔板上的液体逐步精馏成液氧。而其余小部分液氧从主冷凝蒸发器流入辅助冷凝器中蒸发成氧气。这部分氧气经过乙炔分离器、氧蓄冷器后,作为产品氧引出。它的纯度由于氧蓄冷器的切换,以及切换强制阀和自动阀的泄漏,造成氧的纯度下降为 98.5%。从上塔顶部引出的氮气经过氮蓄冷器后,其纯度为 96% N₂。氧、氮出蓄冷器后的压力均为 1.05 绝对大气压,温度为 25 ~ 26℃。

流程的特点:

(1) 采用铝带蓄冷器。为保证蓄冷器不冻结性,其中氧蓄冷器采用返流量大于顺流量的方法;而氮蓄冷器则采用中部抽气的方法。抽出的空气采用硅胶低温吸附,除去其中的二氧化碳。

(2) 在防爆措施中,将液空通过乙炔吸附器除去液空中的乙炔。在主冷凝蒸发器下部做成锥形,使乙炔不能在局部地区浓缩,并设置辅助冷凝器及乙炔分离器,分离并排放掉浓缩了乙炔的液氧,保证精馏塔的安全。

(3) 为了保证氧的纯度,减少由于蓄冷器造成氧浓度降低的影响,采用延长蓄冷器放空时间,以保证出蓄冷器氧气纯度不低于 98.5% O₂。

(4) 由于在流程中没有制取高纯度氮气,故上塔、下塔的塔板数较少。下塔为 24 块,上塔为 50 块。因此阻力损失小,压缩空气压力可以降低些,从而降低了制氧装置的能量消耗。

(5) 采用两台高效率反动式透平膨胀机,流量各为 4000 标米³/时和 5000 标米³/时。

(6) 流程中自控仪表简单、操作方便。

第四章 空气液化与净化 流程优化设计

第一节 空气液化流程优化设计

空气在地球周围,通常是过热蒸气,将其液化,需要通过液化循环来实现。液化循环由一系列必要的热力过程组成,制取冷量将空气由气态变成液态。

低温循环的用途,从热力学的观点有下列几种情况:

- (1)把物质冷却到预定的温度,通常由常温冷却到所需的低温;
- (2)在存在冷损的条件下,保持已冷却到低温的物质的温度,即从恒定的低温物质中不断吸取热量;
- (3)为上述两种情况的综合,即连续不断地冷却物质到一定的低温,并随时补偿冷损失,维持所达到的低温工况。

空气液化循环属于第三种情况,要将空气连续不断地冷却到当时压力下的饱和温度,又要提供潜热,补偿冷损,维持液化工况。这首先要选择制冷方法,而后组成行之有效的液化循环,这就是本章所讨论的内容。

一、获得低温的方法

要使空气液化,需要从空气中取出热量使其冷却,最后全部成为液体。我们知道,在 $0.98 \times 10^5 \text{ Pa}$ 大气压下,空气液化温度是 -191.8°C ,从 300K 变为干饱和蒸气需取出 222.79kJ/kg 热量,再从干饱和蒸气变为液体需取出 168.45kJ/kg 热量(即潜热),显然,为使空气液化首先要获得低温。

工业上空气液化常用两种方法获得低温,即空气的节流和膨胀机的绝热膨胀制冷。

(一)气体的节流

节流可以降温,如打开高压氧气瓶的阀门,使氧气从瓶中放出,不多久就能感到阀门变冷了。这表示高压氧气经过阀门降低压力后,温度也降低了。把这种现象应用到空分中,使压力空气经节流阀降压降温。

1. 节流降温

图 2-4-1 具有一定压力的空气流过节流阀,由于通流截面的突然缩小,气体激烈扰动,压力下降。由于气体经阀门的时间很短,来不及和外界产生热交换,所以 $q = 0$, 气体对外也没有作功, $L_0 = 0$, 同时认为在阀门前后,气体流速是不变的,即 $w_1 = w_2$ 像这样的流动过程称为节流。

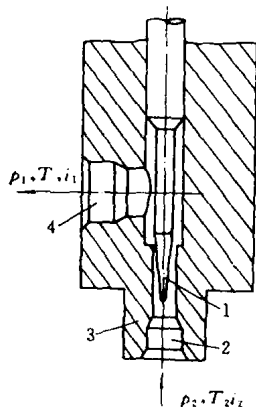


图 2-4-1 节流阀截面图

1—阀芯;2—阀高压腔;
3—阀体;4—阀低压腔

$$\text{由能量方程得: } q = \Delta h + \frac{1}{2g}(w_2^2 - w_1^2) + (Z_2 - Z_1) + L_0$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 0$$

式中 h_1 ——节流后空气的焓值;

h_2 ——节流前空气的焓值。

这表示节流过程最基本的特点是气体在节流前后的焓值不变。为气体节流后的温度变化,点 1 表示节流后的 p 、 T 、 h 值,点 2 表示节流前的 p 、 T 、 h 值。节流使气体温度变化的大小,与节流前的温度、压力有关。为进一步说明节流前后的温度变化关系,常用节流阀前后微小的压力变化 ∂p 和气体温度的微小变化 ∂T 的比值 α_t 来表示节流的效果。即 $\alpha_t = (\partial T / \partial p)_h$ 。我们称 α_h 为节流微分效应,下脚 h 表示节流过程为等焓过程,若节流后温度降低则 $\alpha_h > 0$, α_h 值越大,降温效果越好,若温度没有变化,则 $\alpha_h = 0$,若节流后温度升高,则 $\alpha_h < 0$ 。

对 $T = 283\text{K}$ 的空气进行实验,得知在空气分离过程中,节流前压力低于 $304.78 \times 10^5 \text{Pa}$ 时,节流效应总是正值,即节流后的温度总是降低的。当 $P > 304 \times 10^5 \text{Pa}$,压力的微小降低反使温度升高。气体节流过程是等焓过程,也就是节流前后气体的总能量不变。节能只是内能和推动功之间的转化。而内能又包括内位能及内动能,内动能的大小只与

气体温度有关。节流后内动能降低时节流后的温度下降；内动能不变时节流后的温度也不变；内动能增大时节流后的温度升高。内动能的变化只有确定了内位能与流动功变化关系后才能确定。气体节流后的压力总是降低的，其比容增大，内位能总是增大的。只有流动功的变化可能变大也可能不变或变小。当流动功的变化 $d(pU) \geq 0$ 时，气体节流时温度降低，此时气体分子间呈吸引力，当 $d(pU) < 0$ 其绝对值大于内位能的增加值时，气体节流时温度升高，此时气体分子之间排斥力很大。对于某种气体而言，在节流时内位能的增加正好等于流动功的减少时，节流前后的温度保持不变，这一温度叫做转化温度。只有在转化温度以下节流才能产生冷效应。表 2-4-1 列出了几种气体的转化温度。

表 2-4-1 几种气体的转化温度

气体名称	转化温度/K	气体名称	转化温度/K
空气	650	氟	204
氧	771	氮 ⁻³ 氮 ⁻⁴	~39 ~46
氮	604	氖	1079
氩	785	氙	1476

对于空气、氧、氮、氟、氩因转化温度很高，因而从室温节流时总是产生冷效应。只有氦室温节流温度会升高。选用节流工质时应该注意其转化温度。

2. 等温节流制冷量

空气经过节流，虽可降温，但对外没有热交换（绝热），也没有作功。因此，节流前后气体的总能量不变即等焓过程也就是节流过程本身不产生冷量。

但是为了提供一定压力的节流气体，需要先将气体通过压缩机等温压缩后再由节流阀节流，节流后的气体再经过换热器去冷却被冷介质，构成压缩、节流、换热流程如图 2-4-2 所示。

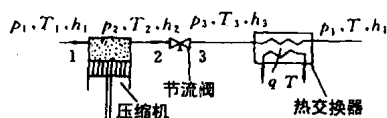


图 2-4-2 等温节流流程图

假设将 $0.98 \times 10^5 \text{ Pa}$, 30°C 的空气等温压缩至 $9.8 \times 10^5 \text{ Pa}$ 后节流。在焓—温图 2-4-3 中表示, 空气的状态由点 1 变化到点 2, 再节流到 $0.98 \times 10^5 \text{ Pa}$, 此时温度降到 12°C (285K), 即图中点 3。在热交换器中, 低温的空气吸热, 使本身温度从 12°C 再升到 30°C 即由点 3 再恢复到点 1, 空气此时所吸收的热量称为等温节流制冷量用 q 表示。 q_T 可以用焓值计算:

$$q_T = -\Delta h_T = h_1 - h_3 \quad (2-4-1)$$

焓值用气体的热力性质图查出。

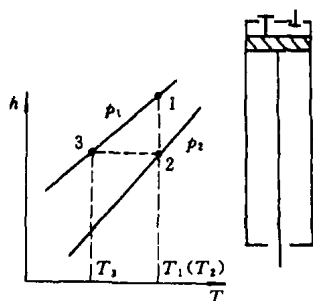


图 2-4-3 等温节流循环示意图

在节流前后压差较小时, 利用查图法计算等温节流循环制冷量时往往误差很大, 此时等温节流制冷量 q_T , 可以由比热来计算:

$$q_T = C_p \cdot \Delta T$$

ΔT ——节流温降, 可以查图确定, 也可以根据微分节流效应 α_i 来确定。微分节流效应 α_i 可理解为节流时单位压力降的温度变化率, 故

$$\Delta T = \alpha_h \cdot \Delta p$$

因此

$$q_T = C_p \cdot \alpha_h \cdot \Delta p \quad (2-4-2)$$

根据精确的实验得出, 空气在压力 $p < 15 \times 10^3 \text{ kPa}$ 时, 微分节流效应为

$$\alpha_h = (a_0 - b_0 p) \left(\frac{273}{T} \right)^2 = (2.73 \times 10^{-3} - 0.0895 \times 10^{-6} p) \left(\frac{273}{T} \right)^2 \quad (2-4-3)$$

式中 P ——节流前压力, kPa ;

T ——节流前温度, K ;

a_0 、 b_0 ——实验常数。

可见, 节流效应与节流前的压力和温度有关。节流前的温度降低, 节流效应增大。节流前的压力增高, 节流效应变小。

综上所述, 等温节流制冷时, 气体需经历等温压缩和节流膨胀两过程才具有制冷量, 这是因为气体在等温压缩时焓值降低, 压缩机的压缩功和气体的焓降都一同以热量的形式传给环境介质。在等温压缩过程中气体已具备制冷能力。而节流膨胀只不过是一种降温的方法, 为气体在等温压缩时已具备的制冷内因表现出来创造条件。

(二) 压缩气体作外功制冷

气体对外做功的机器称为膨胀机。压缩气体在膨胀机内膨胀后,压力降低,体积增大。由于过程进行得非常快,所以过程是绝热的($\delta Q = 0$)。根据热力学第二定律,绝热过程的实质 $\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T} = 0$,即等熵过程。这是在不考虑摩擦及其他损失的理想情况下,膨胀机的膨胀为可逆过程。气体在膨胀机中一边膨胀,其内位能增加,又一边对外做功,这两部分能量消耗都需要用内动能来补偿,所以气体在膨胀机中等熵膨胀,焓值下降,温度必然降低。

气体在膨胀机内的膨胀过程用 $T-S$ 图或 $H-S$ 图可清楚地表示出来。在图 2-4-4 中,气体进膨胀机的状态由 1 点表示,由 1 点向下引垂线交于膨胀后压力 p_2 等压线于 2 点。膨胀机的温降 $\Delta T = T_1 - T_2$,膨胀机对外所作的理想功 $W_{理} = h_1 - h_2$ 。实际上膨胀机中的膨胀过程是不可逆过程,气体与气体之间、气体与机器壁之间及机器本身转动件之间都存在着摩擦,消耗了气体的一部分作功能力。摩擦产生的热又传给了气体,使气体膨胀终了温度又有所增加,所以膨胀后的温度点为 2' 点。0 点到 1 点为等温压缩过程。

如果我们令膨胀后气体恢复到 0 点的状态(T_1, p_2)则所制取的冷量 q_s 为:

$$q_s = h_0 - h_2 = (h_0 - h_1) + (h_1 - h_2) = -\Delta h_T + W \quad (2-4-4)$$

即等温节流制冷量 Δh_T 与膨胀功 W 之和。

同样,将气体等熵膨胀时,压力的微小变化所引起的温度变化称为微分等熵效应,以 α_s 来表示。 $\alpha_s = (\frac{\partial T}{\partial p})$,由于气体膨胀比容增大,内位能增加,而且对外做功,所以 α_s 总是大于零, α_s 为正值,因此气体的等熵膨胀后温度总是下降的,总是产生冷效应。显然,等熵膨胀过程的温降随着压力比 p_1/p_2 的增加而增大,在一定的膨胀压力的情况下,随膨胀前的温度提高而增大,这意味着具有较高温度的气体,有较大的内动能,有较强的作功能力。

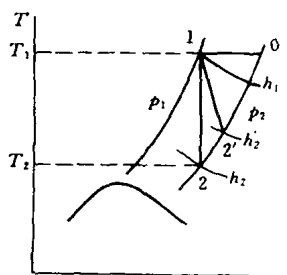


图 2-4-4 等熵膨胀示意图

(三) 节流膨胀与等熵膨胀的比较

从理论方面分析,由于等熵膨胀气体在膨胀过程中要作外功,因此微分效应 $\alpha_s > \alpha_h$, 即气体的微分等熵效应永远大于气体的微分节流效应。而且微分等熵效应总是 $\alpha_s > 0$, 为正值,这意味着膨胀机膨胀永远产生温降。微分节流效应 $\alpha_h \geq 0$ 或 $\alpha_h \leq 0$, 这表示通过节流过程不一定会产生冷效应。只有气体温度低于转化温度时, $\alpha_h > 0$, 才能产生冷效应, 节流后才会降温。

从温降的大小方面比较,从图 2-4-5 可以看出,膨胀机的膨胀可以产生较大的温降,在膨胀前、后压力相同的条件下,等熵膨胀的温降总是大大的大于节流膨胀的温降。这是由于气体的能量大量地消耗于作外功的结果。

例如,膨胀前空气压力 0.5884MPa 温度为 30℃ (303K),膨胀到 0.0981MPa,在空气 $T-S$ 图可以查出膨胀机的等熵膨胀温降 110℃,即膨胀后的温度为 -80℃。在同样条件下,通过计算,空气经过节流膨胀的温降只有 1.07℃。可见,降温幅度的差别之大。

从制冷量比较,等熵膨胀制冷量 q_s 也远远大于等温节流制冷量。正如上述 q_s 值等于 q_T 与膨胀功 W 之和。制冷量可以由 $T-S$ 图中的面积来表示。图 2-4-5 中的面积 $01'bc$ 表示等温节流制冷量;面积 $02ac$ 表示等熵膨胀制冷量。等熵膨胀制冷量包含了等温节流制冷量,其余部分面积即表示膨胀功。

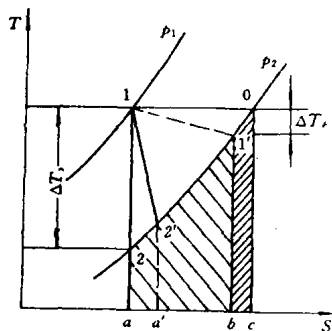


图 2-4-5 节流及等熵膨胀温降及制冷量

总之,无论从温度效应大小及制冷量多寡方面,等熵膨胀都比节流膨胀制冷效果显著,而且膨胀机还可以回收一部分膨胀功,从而提高其经济性。节流过程用节流阀结构简单,调节方便,并且可以工作在气液两相区内。所以等温节流制冷及膨胀机等熵膨胀制冷都是重要的制冷方法,都有互不可取代的应用价值。

尤其是在初温较低时,等温节流的制冷能力增强,等熵膨胀的制冷能力减弱,两者差别缩小时,应用节流阀较为有利。怎样应用这两种制冷方式,在制氧机中,依视具体情况而定。

二、气体液化循环的性能指标

在制冷机中,气体工质连续不断地工作,需要经历一系列的状态变化,重新回复到原始状态,也就是要经历一个循环。

功变热,还是热变功,按照循环的效果不同,可分为正向循环和逆向循环。把热能转化为机械能的循环叫正向循环;把机械能转化为热能的循环叫逆向循环。

(一)正、逆向循环

正向循环包括下面两个过程:

(1)工质从温度较高的外界热源吸收热量 q_1 ;

(2)工质向温度较低的外界热源放出热量 q_2 。

吸收的热量 q_1 大于放出的热量 q_2 ,两者之差为对外所作的机械功,即 $AW = q_1 - q_2$,正向循环的热效率用 η 表示:

$$\eta = \frac{W}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (2-4-5)$$

热效率可以衡量正向循环的经济性。 η 越大,说明吸收相同热量时,所转化成的机械能越多。

(二)逆向循环、制冷系数

逆向循环包括:

(1)工质从温度较低的外界热源吸入热量 q_1 ;

(2)工质向温度较高的外界热源放出热量 q_2 。

这种转化要消耗机械功, $W = q_1 - q_2$, $q_1 > q_2$,即机械功转变为热量与 q_2 一起排给温度较高的外界热源。

一切制冷机都按逆向循环工作,其经济性可用制冷系数 ϵ 表示。

$$\epsilon = \frac{q_2}{W} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} \quad (2-4-6)$$

ϵ 越大,表明消耗相同的机械功,能从低温热源排走较多的 q_2 (也即制冷量),因而经济性好。

(三)气体液化的最小功

低温液化循环由等温压缩,绝热膨胀降温,等压换热等一系列过程组成。其目的是获得低温使空气液化。低温液化循环获得冷量必须消耗功,耗功的大小代表了循环的经济性。

假若在整个液化循环中的各过程均为可逆过程,无任何损失,则该液化循环为理想液化循环,通过这种循环使气体液化所消耗的功为最小,称之为气体液化的理论最小功。