

# 分子筛型空分装置优点及与 其它流程的比较

[林德公司] W. Rohde

比较了分子筛吸附器的空分装置与可逆式换热器的空分装置的能耗; 列述了分子筛吸附器空分装置的应用, 与可逆式空分流程相比, 分子筛型空分流程可以多产: 氧气 2%、氩气 13.5%、氮气 30~35%; 最后介绍了分子筛型空分装置在操作方面的 15 个优点。林德公司已制造投运该型空分装置 350 多套, 其中 40000Nm<sup>3</sup>/h 以上空分装置 20 多套。图 8 表 3。

“分子筛装置”这个术语与空气的低温分离装置相联系, 已经在世界上得到了公认。在分子筛装置中, 一些有害的组分如水、二氧化碳以及有危险性的烃类物质等在空气进入分离装置冷区前被除去。

本文只主要讨论以下三方面的内容:

1. 分子筛型空分装置与可逆式型空分装置能耗的比较;
2. 过程的应用;
3. 在操作方面的优点。

## 一、能耗比较

只有在同样的条件下, 才能对能耗进行比较。目前常用的方法是在产品的产量(如氧气和氮气)相同的情况下进行比较。用可逆式换热器或者用蓄冷器的空分装置, 其纯产品的数量与加工空气量之间有着严格的限制。在用可逆式换热器的空分装置中, 大约只有空气量的 50% 能够作为纯产品回收; 而在用蓄冷器的空分装置中, 能回收的纯产品只能达到大约 45%。事实上, 从能耗的观点看, 用蓄冷器的空分装置是不经济的, 而且成本也高。因此, 下面只就用可逆式换热器的空分装置与用分子筛吸附器的空分装置进行能耗比较。

## 1.1 空气量

我们先把总空气量与纯空气量这两个概念加以区别。所谓总空气量是指为了得到规定的产品量而所需要压缩的空气的总容积。纯空气量则是指为了得到所需的产品量而必须进入分离设备的空气容积。总空气量与纯空气量之间的主要差别, 是由切换损失和控制与仪表用气引起的。

先把技术上的各种优点放在一边(到后面再来讨论), 那么用可逆式换热器的空分装置所需的空气量, 要比用分子筛吸附器的空分装置大约多 2%。这是因为用可逆式换热器的空分装置, 由于它的切换时间短, 所以大约有 2.5% 的切换损失。而用分子筛吸附器的空分装置, 分子筛吸附器的切换造成的损失只有 0.3~0.4%。

## 1.2 空气压力

空气的压力和空气量一样, 都决定着压缩所需要的能量。纯氮的流程如图 1 所示。为了使纯氮气能流入管路系统, 它需要有 20mbar(毫巴)的余压。

在用可逆式换热器的空分装置中, 从这一点到冷凝器的压力损失要高约 30mbar, 见图 1 和表 1。因为氮气在进入可逆式换热器

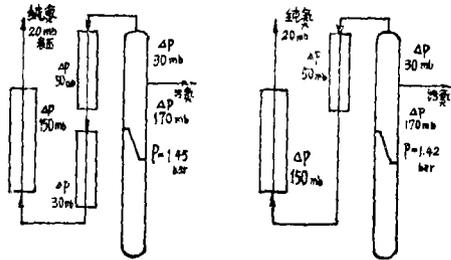


图1 在可逆式换热器及分子筛吸附器的空分装置中纯氮的流路

表1 纯氮流路的压力损失

项目与单位	用可逆式换热器的空分装置	用分子筛吸附器的空分装置
纯氮出口压力(mbar)	20	20
主换热器压力损失(mbar)	150	150
液化器压力损失(mbar)	30	—
过冷器压力损失(mbar)	50	50
上塔上段压力损失(mbar)	30	30
上塔下段压力损失(mbar)	170	170
全部压力损失加出口压力(mbar)	450	420
冷凝器上面的绝对压力(bar)	1.45	1.42

以前还要在液化器中被加热。

对分子筛吸附器的空分装置来说，冷凝器上的压力不是像可逆式换热器的空分装置那样要根据纯氮的流路来决定，而是要根据废氮的流路来决定。因为废氮作为再生气体，必须有100mbar的余压，见图2和表2。

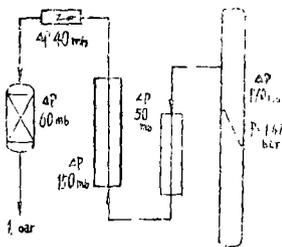


图2 废(污)氮的流路

林德公司的短周期吸附器是这样来设计的：在再生气加热器入口有100mbar的压力就能使需要的再生气体量通过吸附器。因此，就不需要再生气鼓风机，也就减少了由

表2 废(污)氮(再生气)流路的压力损失

项目与单位	用分子筛吸附器的空分装置
再生气(废氮)出口压力(mbar)	100
主换热器压力损失(mbar)	150
过冷器压力损失(mbar)	50
上塔下部压力损失(mbar)	170
全部压力损失加再生气出口压力(mbar)	470
冷凝器上面的绝对压力(bar)	1.47

鼓风机引起的操作问题。

低的压力损失是吸附器床层横截面积大的结果。这是符合林德公司的观点：即让气体通过床层的速度，远低于可能使床层引起搅动的速度。即使是床层的局部的搅动也应该制止。如果搅动的程度过烈，必然是气体流速过高所引起。对1/16"的13X分子筛床来说，大约在每米床层57mbar时(阻力)达到搅动界限。

考虑到纯氮与废氮的流路，在用分子筛吸附器的空分装置中冷凝器上面的压力，要比用可逆式换热器的空分装置中冷凝器上面的压力大20mbar。冷凝器的温差是1.5°C，冷凝侧的压力即下塔顶部的压力，对用可逆式换热器的空分装置来说是5.44bar，而对用分子筛吸附器的空分装置来说是5.5bar。考虑到两种装置中的空气的流路，对用分子筛吸附器的空分装置来说，空气透平压缩机的出口压力是5.83bar，而在用可逆式换热器的空分装置中，空气透平压缩机的出口压力是5.68bar，即在用分子筛吸附器的装置中空气透平压缩机的出口压力要高150mbar，见图3和表3。

在1~6bar的压力范围里，终压高100mbar，压缩功大约要增加1%。在用分子筛吸附器的空分装置里，空气量少2%，而加工空气压力要高150mbar。最终的结果是：为了加工空气的压缩，用分子筛吸附器的空分装置要比用可逆式换热器的空分装置能耗小

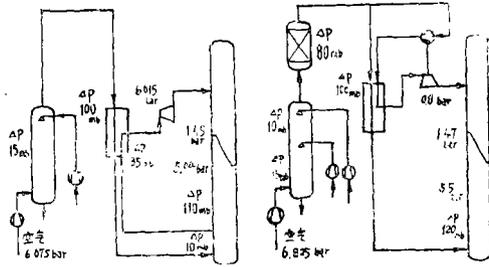


图 3 两种装置的空气流路

表 3 空气流路的压力损失

项目 及 单位	用可逆式 换热器的 空分装置	用分子筛 吸附器的 空分装置
冷凝器下面的压力(bar)	5.44	5.5
水冷却器的压力损失(mbar)	15	25
分子筛吸附器的压力损失(mbar)	—	80
主换热器压力损失(mbar)	100	100
下塔压力损失(mbar)	120	120
全部压力损失加冷凝器所需压力(bar)	5.68	5.83
两种装置加工空气的压差(mbar)	150	

0.5%。下面是一个例子：

一台装置的加工空气量是 100000Nm<sup>3</sup>/h 纯空气量。在用分子筛吸附器时，总空气量是 100500Nm<sup>3</sup>/h。压力从 1bar 压缩到 5.83 bar，空压机的驱动能约为 8000kW。在用可逆式换热器时，总空气量是 102500Nm<sup>3</sup>/h，压力从 1bar 压缩到 5.68bar，空压机的驱动能约为 8040kW。

在分子筛装置无廉价蒸汽可利用时，或者在利用压缩热时，这种情况正变得愈来愈普遍。为了加热再生气体，还需要再消耗电能。

再生气体量约是加工空气量的 20%，再生气体的温度约是 120℃，加热周期是吸附器工作周期的 25%。这样，对上面的例子来说，再生气加热器的平均功耗就可以计算出来：

空气量 100000Nm<sup>3</sup>/h, 15℃, 6bar;  
再生气体量 20000Nm<sup>3</sup>/h;

再生气温度 120℃;  
再生所需要的能量(平均值)  
163000kcal/h。

如果用电能，则加热器的平均功耗是 190kW。

### 二、过程的应用

对空分装置来说，为克服冷损所需的冷量是由透平膨胀机产生的。

在用可逆式换热器的空分装置里，膨胀空气的流路如图 4 所示。

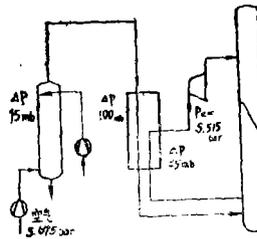


图 4 用可逆式换热器的空分装置中空气的流路

空气从透平压缩机经过后冷却器和可逆式换热器后进入下塔。经过下塔 2~3 块精馏塔板的洗涤后，一部分空气回到可逆式换热器，在这儿加热到一定的温度后进入透平膨胀机膨胀，释放能量后送入上塔。在透平膨胀机前的这段流路中的压力损失大约是 160mbar，即膨胀机的入口压力是 5.5bar。在这样一个入口压力下，为了弥补冷损失所需的膨胀空气量大约是 15.8%。在这些条件下，利用常规的塔板数约可生产 19900Nm<sup>3</sup>/h 的氧气。

在用分子筛吸附器时，透平膨胀机的入口压力要高得多。这是因为膨胀空气在进入膨胀机前的流路中压力损失较低，更主要的是因为可以利用膨胀机的增压机，见图 5。

在上述情况下，膨胀机增压机前的压力损失是 150mbar。膨胀空气在增压机里从 5.72bar 压缩到 8.2bar，最后进入膨胀机时是 8bar。由于利用了膨胀空气在膨胀时所产生的

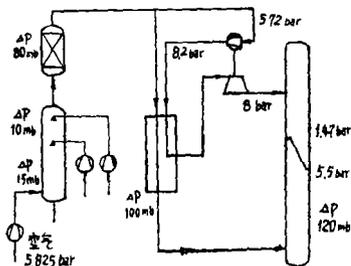


图5 分子筛装置中的空气流路

生的能量，所以为克服冷损失所需要的膨胀空气量只要8.8%。与用可逆式换热器的空分装置相比，氧气产量可以增加3.25%，达到20550Nm<sup>3</sup>/h。

在第一节“能耗比较”中已经指出，如果不考虑分子筛吸附器再生气加热器的电耗，则在这种规模的分子筛吸附器型的空分装置里，为空气压缩所需的能耗要比用可逆式换热器的空分装置低0.5%。由于利用了膨胀机增压机(对此林德公司有专利权)，从氧气的生产来看，用分子筛吸附器的空分装置其能耗要低3.25+0.5=3.75%。考虑到在这个例子中，可逆式换热器的空分装置其膨胀机制动电机可以回收130kW的电能，那么用分子筛吸附器的空分装置，其能耗仍然要低2%。在用可逆式换热器的空分装置中，100000Nm<sup>3</sup>/h的分离空气约可回收625Nm<sup>3</sup>/h的纯液氧。如果把用于可逆式换热器的空分装置同样多的能量，用于分子筛吸附器的空分装置，则可利用的空气量约可增加1.2%，即为101200Nm<sup>3</sup>/h，可以回收纯液氧710Nm<sup>3</sup>/h。与用可逆式换热器的空分装置相比，氧产量增加了13.5%。

现在可以归纳如下：在消耗同样多的能量的情况下，用分子筛吸附器的空分装置比用可逆式换热器的空分装置，可增加的产量如下：

- 氧气产量增加 2%；
- 氮气产量增加 13.5%；
- 氩气产量增加 30~35%。

下面再来看看利用分子筛吸附器的空分装置在其它方面的优点。

### 空气再循环系统—氮气再循环系统

当装置主要生产液氧时，在用分子筛吸附器的空分装置里，可以用所谓空气再循环系统来代替标准的氮气再循环系统，制取冷量，见图6。

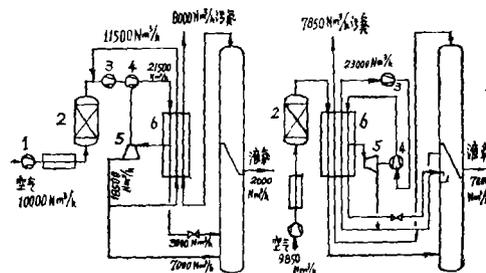


图6 用空气再循环或氮气再循环的液氧装置

1. 空压机 2. 分子筛吸附器 3. 循环压缩机
4. 透平增压机 5. 透平膨胀机 6. 主热交换器

它有两方面的优点：一个是投资方面的优点；另一个是操作和技术方面的优点。从图7可见，两种再循环系统的主要差别在于热交换器中的质量流量不同。

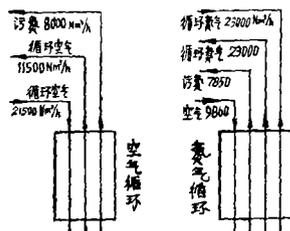


图7 在空气再循环与氮气再循环的空分装置中热交换器的流量比较

很明显，在投资和热交换器中，两个系统的能量损失是有差距的。在图示的例子中，用空气再循环系统的热交换器的损失，要比用氮气再循环系统的损失小10000 kcal/h。其结果是：用空气再循环系统时，氧的回收量可增加73Nm<sup>3</sup>/h，或者说增加3.7%。

### 氧气的内部压缩

在这种装置里，液氧先用泵压缩到以后的过程所需要的压力，再在换热器中加热，然后作为压力气氧从装置排出，如图 8 所示。一般的方法是：从装置流出的氧气只有很小的一点余压，然后在环境温度下再压缩到用户所需要的压力。

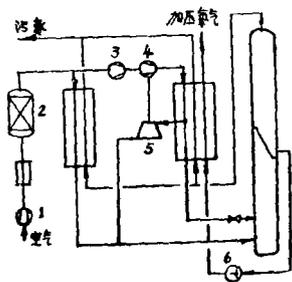


图 8 氧气的内部压缩

1. 低压空压机 2. 分子筛吸附器 3. 中压空压机  
4. 透平增压机 5. 透平膨胀机 6. 高压液氧泵

利用氧气内部压缩的空分装置与空气再循环系统有类似的优点。经内部压缩后的氧气在换热器中用中压空气加热，而这部分中压空气正是去膨胀机增压机增压来提供所需冷量的空气。利用这样一些过程，当氧气排压超过 65bar 时，氧气内部压缩装置的能耗只比常规的氧气装置的能耗高 1~3%（取决于压缩效率）。而内部压缩的可逆式换热器空分装置，要比氧气在外部压缩的空分装置多消耗 6~8% 的能量。在氧气内部压缩的空分装置中配有两台液氧泵，这种泵是林德公司为了这个过程而专门发展起来的。两台泵各在其设计能力的 50% 下连续运转。

带内部压缩的用分子筛吸附器的空分装置的投资，与只用一台氧压机而无备用氧压机的氧气外部压缩的那种空分装置的投资相当。

### 三、操作方面的优点

对各种不同型的空分装置，都有经验丰富的操作者，他们必定都会承认分子筛型

空分装置有以下优点：

3.1 没有像可逆式换热器的空分装置那种通过水分和二氧化碳冻结区的问题，膨胀机可以立即满负荷运转，缩短起动时间。

3.2 对主换热器不需要进行精确的温度控制。

3.3 没有二氧化碳与水分再升华问题。

3.4 由于没有气相吸附器、压力塔吸附器或再循环吸附器，因此也就没有设在冷区的这些吸附器因切换、加热所引起的问题。

3.5 不用液氧循环泵，因此不需要密封氮气和安全管理路，也节省了维护费用。

3.6 没有可逆式换热器或蓄冷器切换时引起的精馏塔的频繁重复波动，特别是对提氩有好处。

3.7 提高了与烃类物质有关的安全性。

3.8 经分子筛吸附器净化后的空气是干燥空气，因此在管路及热交换器中没有腐蚀问题。

3.9 对热交换器没有压力交变的要求。

3.10 在短期或较长时间的停车后，在冷态下再起动时对空分装置没有问题。

3.11 可以进行迅速的负荷调节，因为用不着考虑像可逆式换热器那样的温度梯度及由此引起的再升华问题。

3.12 对再循环系统来说，经过一次彻底的干燥和净化后，就再没有干燥问题。

3.13 没有那种在冷吸附器冷区范围内的管路、阀门及各种配件再生时反复加热与冷却的问题。

3.14 可以相当简单的实现完全的自动化以及装置从冷态或热态的起动。

3.15 冷箱内需要维护的或者容易产生其它问题的容器、仪表及阀门大大减少。

作为结论，应该再次指出，世界上几乎所有的制造商现在都已经承认分子筛装置的优点，并且正在开始改变他们在小型以及大

型空分装置中采用分子筛装置的产品范围。林德公司开发了利用吸附来除去空气中杂质的过程,并于1954年应用这个原理制造了第一台装置。然而,在那个时候还没有可供采用的分子筛。因此,那些吸附器必须在不同的温度水平下运转,里面充填硅胶或铝胶。

当分子筛于1960年进入市场以后,林德公司开发了分子筛短周期吸附器。这种吸附

器现已在世界范围里巩固了自己的地位。到目前为止,林德公司已成功地设计制造并已投入运行的采用这种吸附器的空分装置达350套以上,其中20套以上的空分装置产量大于 $40000\text{Nm}^3/\text{h}$ 。

译自 林德公司1986年6月第五届空分装置讨论会论文集  
中国空分设备公司 江楚标

## 国外深冷动态报道(五则)

① **法国空气液化公司** 将为联邦德国BASF公司建造一台生产 $1500\text{t}/\text{d}$ ( $44000\text{Nm}^3/\text{h}$ )氧气的空分设备,它同时还生产大量的氮气和液氮。这台设备高度自动化,采用吸附技术净化空气。

② **在欧洲的空气制品公司** 将为比、荷、卢经济联盟建造一台二千一百万美元的空分设备与高效液化器。该设备将应用最新技术生产 $300\text{t}/\text{d}$ 的液氧、液氮和液氩供给工业气体市场,拟于1988年初投入运行。

③ **瑞典斯德哥尔摩AGA-Fano S. A. 公司** 将在哥伦比亚的 Cali 建造一台生产氧、氮、氩的空分设备,该设备的设计容量为 $70\text{t}/\text{d}$ ,投资费用估计为七百五十万美元,拟于1988年初投入运行。

④ **美国联合碳化物公司林德分公司** 将在南卡罗来纳州的 Camden 附近建造一台生产氧、氮、氩的 $600\text{t}/\text{d}$ 空分设备。该设备的造价估计为一千七百万美元,拟于1987年秋季投入运行。它将用管道向Dupont的纺织纤维设备提供氮气。

⑤ **美国Calgon碳素公司** 正在推广一种新的变压吸附装置,它采用碳分子筛从空气中分离出氮气。该公司能生产孔径约为 $3\text{\AA}$ 的碳分子筛。据说采用这种装置生产氮气的成本费用比采用低温流程低50%以上,氮气的供应价格为 $8\sim 15$ 美分/ $100$ 英尺<sup>3</sup>。

摘译自 Cryogenic Information Report, 1986, №5

杭州制氧机研究所 谢开明 译

## 粉末冶金用高纯氮气保护 产品质量提高

南京粉末冶金厂从联邦德国引进WBS-100-135/e型步移梁式烧结电炉(全自动操作),采用氮气保护气氛工艺,代替原来的水煤气气氛,烧结各种中高强度粉末冶金构件,产品质量明显提高。主要表现在:

1. 产品无氧化现象,性能稳定;
2. 产品几何尺寸稳定,为整形创造了良好条件,报废率低;
3. 烧结件的氧化起皮现象消失,烧结件寿命可显著延长。

南京粉末冶金厂使用的氮气,由江苏仪征化纤工业联

合公司动力厂用低温液氮槽车供应,高纯液氮汽化后使用,氮气纯度 $>99.999\%\text{N}_2$ ,满足了工艺要求。1986年8月上旬设备联动试车一次成功,为我国粉末冶金工业的发展作出了贡献。

江苏仪征化纤工业联合公司动力厂气体车间 $1000\text{Nm}^3/\text{h}$ 氮气液化装置,所生产的高纯液氮将通过南京粉末冶金厂向南京地区供应,以加强地区、企业之间横向经济联系,提高经济效益。

江苏仪征化纤工业联合公司动力厂 严志明 项建国

1986年8月5日