

一九五四年一月四日

深冷译文选

(参考资料)

3

杭州制氧机研究所技术情报组

目	1. 空分设备的设计	Helmut Springmann (西德)
录	2. 空气分离设备的现状和展望	Helmut Springmann (西德)
	3. 高炉用空分设备的最佳纯度之探讨	齐藤 章 冈部道昌 (日本)
	4. 大型制氧机的设计	井上 尊 (日本)

空分设备的设计

Helmut Springmann (西德)

一、氧、氮、氩的应用

大气中的空气除了少量的稀有气体氦、氖、氩、氪和一小部分二氧化碳及水蒸气以外，就是氧、氮、氩。

如果要将空气进行分离，就得确定氧、氮、氩三种气体的分离过程。在低温时得考虑到二氧化碳及水蒸气这两种组分的干扰作用。

氧是在应用中最重要产品。不同纯度的氧在氧化过程中可用来代替空气。应用高纯度或低纯度的氧可提高反应温度和加速氧化过程。

氧的主要用户是冶金工业及化学工业。但是直到今天还不知道在冶金工业及化学工业中制氧装置的总提取量是多少。但是已经知道用1970年制造的设备所提取出的氧在冶金工业中的需要量为67%，化学工业中的需要量约27%，其它用途约6%。

在冶金工业中，氧主要用于氧气顶吹炼钢。但也越来越多地用来增加高炉热风以及在其它冶金过程中，比如在铸铁生产中用来增加风量。

在化学工业中氧的用途是促使气态与液态的碳氢化合物的部分氧化，并用于乙烯氧化物、硝酸及乙炔的生产。最近还用于废水处理。

在能量直接转换的过程中也用氧。第一台磁流体动力发电机（MHD发电机）即将投入生产。

空气分离时所获取的氮，其应用范围不如氧大，但仍很重要。在氨合成时必须用氮来制取氨，此外主要是在不同的化工过程中作保护气体用，如保护热电解槽和催化剂等。

越来越多地应用液氮来作冷源，比如用于食品冷藏以及在医学中作冷源用。

稀有气体氩，通常是无化学反应的，它同样主要是在高温过程中作保护气体用，如用于氩弧焊、白炽灯充气等。

二、纯度要求

根据各种应用目的，对气体馏分的成分的要求是极不一样的。

用氧气顶吹炼钢时，对氧的纯度要求特别高，而在其它大部分化学过程中对氧的纯度要求就很低。用氧顶吹炼钢时对氧纯度要求高的原因是：因氮在转炉中若与铁相结合就严重地影响生产出的钢的质量。因此，通常要求用于顶吹炼钢的氧馏分中的含氧量应尽可能高些，而剩余气体就不再详加说明了。事实上，氧馏分就是氧、氩、氮三元混合物。因为氮在炼钢时没有破坏作用，有意义的是它不仅能保持氧的高含量，而且能够限制剩余气体的成分——即氮含量。

从图1中可以看出，在通常的低温分离设备中制取出的氧馏分中氧含量处于98%~100%时，氮含量只有很小变化，而氩含量则发生相应变化。在图1所示出的情况中，氮含量约为70~80PPm，此值不是理论值，而是在上述情况中由于设备稍有漏气引起的。从理论上来说，氧馏分中的氮含量还要小得多。图中描述出的现象其根据是：

氧、氮、氩三元混合物应该是在一台低温分离设备中分离的，氩的气压曲线在氧、氮气压曲线之间，因此，氩在精馏塔中就成为氧、氮馏分之间的一种缓冲剂。氩缓冲剂的作用是在上塔的下部完成氩和氧之间的分离；这时，在较高的氧含量中，非氧组分应该是氩。

对氧馏分纯度的实际要求应考虑到技术设备中总存在着很小的漏气的。由于这个原因要求氧馏分中的氮含量不应高于必需量。——生产含氩量 2 % 的氧馏分与生产含氩量 0.3 % 的氧馏分，从能耗上来比较，前者要比后者大为便宜。应该针对节省能量这一事实不必要求氧馏分中的氧含量太高。

在现代的空分设备中毫无疑问是能生产氮馏分的，其中氧含量少于 5 Ppm，但是氩含量却相当高。在设计空分设备时采取特别的工艺就可使纯氮馏分中的氩含量小于 0.02 ~ 0.03 % 左右。

氩馏分可与生产极高纯度的氧、氮含量同时制取，但应考虑到，若在一台大空分设备中制取相当少量的氩，就会大量浪费纯氩，这就没有什么太大的经济价值。当然提取其它稀有气体亦是如此。

三、分离空气时的能量消耗

假定分离空气在理论上是能量最便宜的过程而实际上又是不可逆的过程，那么，分离一标准立方米空气所需的功耗是 5000 mkg/Nm^3 或 0.0136 千瓦时/标米^3 空气。对氧而言，这就是说：在一个绝压时制取 $0.21 \text{ 标米}^3/\text{时}$ 的氧所需功耗为 0.0136 千瓦时 。人们称这种功耗为理论分离功。

通常的工艺过程大都是不可逆的。下述在原理上受应用过程所限的不可逆部分与受结构元件的设计所限定的部分是有区别的。我们称以一种过程为条件的功耗为原理分离功（图 2）。原理分离功也是一种理论概念，因为没有一种过程可使结构元件不漏损的。但是这种概

念有一个数值，它可以对不同过程的功耗互相作比较。

在用双塔作分离的通常低温过程中，原理分离功是由压缩功实现的。如果纯氮应在一只冷凝器中液化而纯氧于一个绝压时在冷凝器的另一边蒸发的话，压缩功就应将空气压缩到纯氮的液化压力。流体的压降、温差、冷量消耗等如前所述。在此未加考虑。

原理分离功在 0.039 千瓦时/标米³空气的低温过程时，假定为等温压缩，约为理论分离功的三倍值。

到今天还不知道制取纯氧、氮的物理方法，用这种物理法需一种比低温法更小的原理分离功。也没有必要等待这种方法的发现。

如果限于较低的纯度，那么原理分离功就减小到相应于较低的必需冷凝压力。

纯度要求低时就有希望使其它分离法——如扩散法及吸附法——的分离功耗与低温法相同或者甚至可低于低温法的功耗。

事实上，分离空气的能耗则大大高于原理能耗。这与设备容量有极大的关系。

在图3中已画出了制取氧的单位能耗与各种容量的设备所制取的氧量的关系。可以看出，这张图表对各种类型的设备都适用的。在生产超过 25000 标米³/时纯氧的设备中，能耗实际上并没有进一步下降，而是保持稳定的。其原因是：能耗主要是由压缩空气时所用的压缩机的效率决定的，与设备本身关系极少，这里唯一用上的透平压缩机的总效率，当空气量超过 150000 标米³/时实际上并不再提高。

从能量观点来看，制造生产 30000 标米³/时以上的制氧设备是没有什么大意义的。当然，设备容量愈大投资成本愈低。这就有希望为建造 $60000 \sim 80000$ 标米³/时大容量的制氧设备而显著地节省投资成本。

四、主要采用的空分方法

如上所述采用低温法分离空气是最经济的方法。下面谈谈在实际中主要采用的三种方法。

三种方法都是在同类型的双精馏塔中进行分离的，塔的原理分离功是在第二段实现的。这种双分离塔比其它所有分离方法优越，在双塔的一只预分离塔中纯氮是作为主分离塔的回流液而生产的。这三种方法在工艺上的区别仅在于对分离的空气冷却和预加工的方法不同，对此还有待进一步阐述。

被分离的空气中含有水分和二氧化碳，这两种物质会破坏低温过程，因为它们在冷却过程中就成固体而沉淀下来并堵塞流动截面。清除这些起破坏作用的杂质有三种可采用的方法：

1. 在空气冷却之前就清除水分及二氧化碳。在实际应用中则采用分子筛或硅胶吸附剂——吸附法。

2. 使水分和二氧化碳在空气冷却过程中沉淀。为了防止流动截面被堵塞，使它们逐渐自行蒸发掉。可在蓄冷器或可逆式换热器中实现既沉淀又不断蒸发的冷却过程——蓄冷器——可逆式换热器设备。

3. 在吸附器中清除水蒸气。二氧化碳在冷却过程中沉淀下来并随分离组分一齐带走再从液体过滤中消除出——固体离析法。

不想在此详述众所周知的细节，仅将三种方法简述如下：

第一种方法：（图4）——吸附法

被分离的空气经过吸附器，然后在对流换热器（W）中冷却到分离温度再流进压力塔D。在压力塔中空气被分离成氮馏分及含氧量约40%的氧馏分。这两种馏分成液态再流向上塔O，在这里又被分离成纯氧馏分及或多或少的纯氮馏分。产品又成气态离开上塔，经过换热器W回流到设备出口处。必需补偿冷却的冷量是由透平T生产的。

一部分分离的空气也流经透平。

第二种方法：蓄冷器设备（图 5）——可逆式换热器设备

a 蓄冷器设备

因为分离部分的情况与第一种方法中所谈的一样。这里只限于谈谈蓄冷器运转情况。蓄冷器 R_1 及 R_2 就是两只，其内填有一种高热容量材料的容器。当空气经过蓄冷器 R_1 进入设备时，一部分分离产品（大部分是氮）则经过蓄冷器 R_2 从设备中出来。经一定时间后，如果蓄冷器 R_1 充满了足够量的水及二氧化碳的话，蓄冷器就切换使空气从蓄冷器 R_2 中通过，而氮则从蓄冷器 R_1 中通过。沉淀下来的水分和二氧化碳即重又升华。

纯的产品馏分——通常指的是氧——经过蓄冷器中的盘管而从设备中出来。采用这种方法时有必要加一只液化器 V ，以便使空气与分离产品之间达到为升华所需的极小温差。

b 可逆式换热器设备（图 6）

冷凝及再蒸发过程是在可逆式换热器中完成，而不是在蓄冷器中完成的。空气流经 X_1 截面，升华所需的分离产品则经过 X_2 截面。经一定时间后，流路切换即交换截面，空气流经 X_2 截面而分离产品则流经截面 X_1 。蓄冷器和可逆式换热器在运转时的区别是：蓄冷器中的充填材料的热容量是为热交换用的，因为空气先将充填材料加热，然后由分离产品再冷却。而在可逆式换热器中，换热器隔板的热容量只起着次要的作用。因为空气与分离产品只穿过换热器间壁进行换热的。

第三种方法（图 7）：固体离析法

采用这种方法时，必须使分离的空气具有高压才能将所形成的固体二氧化碳送进压力塔 D 。固体二氧化碳在压力塔中沿着液氧的道路

进入过滤器 F，再经过滤清除出。

这是在上述三种方法中最简单的一种方法。当然，采用每一种类型的设备时都要设想到液体循环路线，以便能生产大量的液态产品。此外，各种方法鉴于要求极不相同也可能有所变更。在安装各种类型的设备时也可配置氦及其它稀有气体的富集装置。

五、各种不同分离方法的比较

每一种方法的几个基本条件阐述如下：

a 所谓纯产品的制取量

我们是不含水蒸气及二氧化碳的产品理解成纯产品的。这种产品不妨碍氧、氩、氮的组合。

采用吸附法 100% 的分离空气可以提取上述的纯产品。约有 80—85 % 的分离空气可以提取纯氮及纯氧，余下的分离空气由于调节技术方面的原因就成为氧氮混合物。

采用蓄冷器流程大部分被分离的气体供工艺流程所用，只有约 35 % 的分离空气可以提取纯产品。余下的分离气体供蓄冷器中的水及二氧化碳升华用。

采用可逆式换热器流程约有 40—50 % 的分离空气量可制取纯产品，剩余气量供可逆式换热器中升华用。

b 设备的寿命——腐蚀感受性

低温分离设备的寿命主要取决于这些设备的腐蚀感受性。尤其是在工业企业中，分离用的空气或多或少地皆掺有腐蚀性的成分，如硫化物、氯化物等。

设备中的进气换热器采用防腐蚀材料制造，这种设备就可防止类似化合物的腐蚀。特种合金钢实际上根本不能防腐蚀。能防腐蚀的钢相当少，铝则多些。特别是铝合金更耐腐蚀。一般来说，吸附设备和

蓄冷器设备要比可逆式换热器设备寿命长。因为吸附设备及蓄冷器设备可用任何一种材料制造，但可逆式换热器则不行。

c 对于误操作的敏感性

吸附设备是最容易操作的设备。蓄冷器设备及可逆式换热器设备操作难度几乎相同，但都比吸附设备操作难度大。

坚固的蓄冷器不会因误操作而损坏。可逆式换热器设备若误操作就极易损坏，特别是当水进去时更敏感。

d 启动速度——运转周期

设备从热状态到达运转状态，启动速度很重要。启动速度取决于透平膨胀机或其它致冷机的冷量与设备冷容量的比例。

凡是生产气态产品也生产液态产品的设备，因此都具有较大的过剩冷量，从而能够很快地达到冷却。通常冷却时间最好要达到10小时。只生产气态产品因而在透平膨胀机功率内只具有极少量的过剩冷量的设备，其开车时间就必需相应长一些。

现代的设备，尽管其运转方式不同，但其运转周期却是一致的。原则上可以无限期地长期运转。不能错误地使运转中断但是若进入设备中的碳氢化合物不能完全再清除，这台设备就不再是完全的。因此，建议隔一定时间就应将设备完全加热一次，以清除碳氢化合物。设备通常所允许的安全运转期是没法规定的，这得因地制宜。

吸附设备若在冷却状态下不需采取特别措施就可无限期地长时间停车。

蓄冷器设备及可逆式换热器设备在冷却状态下，若不采取辅助措施就不能无限期地长时间停车，因为，不然的话蓄冷器或可逆式换热器中的温度就受破坏，以致再启动时升华就会发生困难。

从以上阐述中可以得出结论，吸附法是应用于各种目的的最佳方

法。但是应该考虑到，吸附法的投资费用最昂贵，而可逆式换热器方法的投资成本最便宜，因此，应根据各种使用目的而确定一种最佳的方法。

六、低温分离设备的几个基本特性

a 设备的部分负荷特性

现代的空分设备处于部分负荷时也能比较经济地进行生产。

从图 8 中可以看出，设备的能量效率如计算时所估计的那样，实际上是稳定在 60~100% 这个范围内。从曲线中可看出，氧产量几乎是非常成比例地下降的。因为空气压力同样下降，所以生产氧的单位能耗则是稳定的。

氩也主张在部分负荷时制取。在一些制成的设备中，粗氩的制取量是和加工的空气量成比例的。这就表明分离塔的质量高，因为分离塔内只要出一点小故障就会改变最大的氩浓度位置，氩浓度值也随之改变。

分离设备的上述优点为了能得到充分地利用，就应采用转速可调节的压缩机。如不可能，或者可将配置在氧装置中的压缩机容量规定如下：当类似的一台设备处于全负荷时就用一台于全负荷时完全起动的压缩机生产，当设备处于半负荷时就用一台于半负荷时才起动的压缩机生产。众所周知，部分负荷特性对于透平压缩机在转速稳定时特别不利。因此，只有在上述情况时才能在实际中充分利用设备的上述优点。

设备最佳的部分负荷特性是由分离塔的特殊结构这到的。空分设备中的其它构件在上述范围内对于部分负荷特性影响极小，可逆式换热器及蓄冷器也是如此。

b 设备的动态特性

最佳的部分负荷特性可使空分设备运转时具有适应性，这既可简单又迅速地对设备进行调节。

经试验表明，不单是吸附设备，蓄冷器设备及可逆式换热器设备都可以用同样而简易的方法将设备从一种工况调节到另一种工况。在图9中即是蓄冷器设备及可逆式换热器设备从全负荷转换到接近半负荷时的调节特性，两种工况的差别极小，一方面是由于进行不同的调节，另一方面是由于分离塔的特性稍有不同。

蓄冷器及可逆式换热器在两种工况中其特性相同，这就是说冷端的温度与温差没有破坏，而小心地纠正冷端的温度与温差对于二氧化碳的升华是极其重要的。

本文仅阐述了几个原则问题。这些原则问题仅供在设计生产氧及其它空气产品的工厂时作参考。对于一系列联合生产中的特别问题未能详加说明，还有待在其它文章中加以阐述。

译自：„Linde Berichte aus Technik und Wissenschaft“

31/1972 S.3--9.

校对：林战生 翻译：毛捷

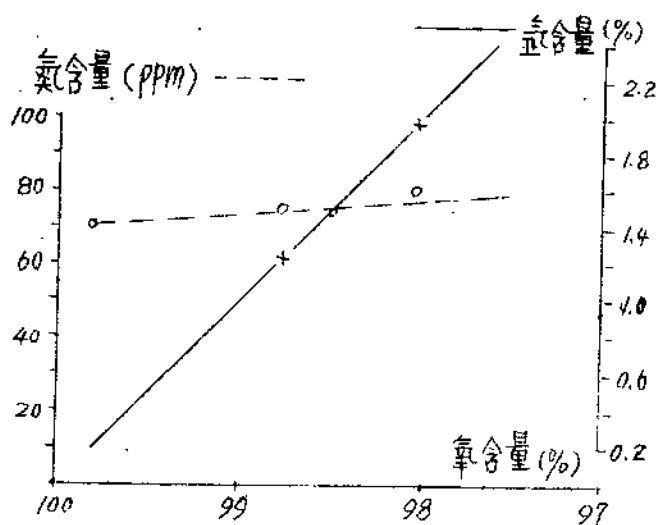


图 1
氮、氧在不同纯度的
氧馏份中的含量

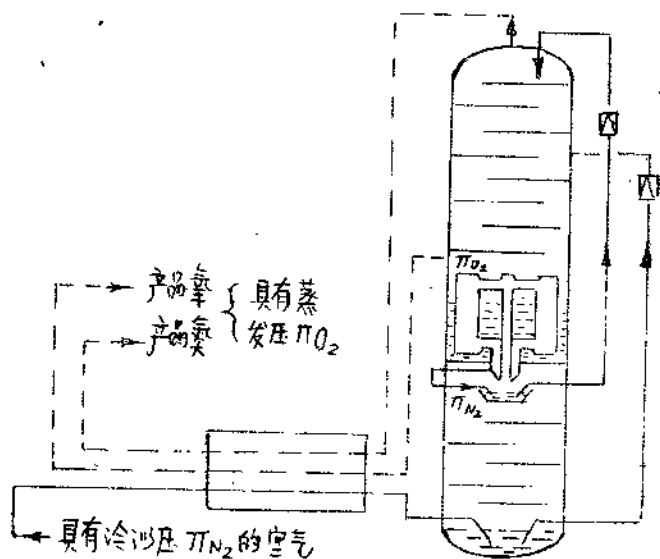


图 2
分离空气的理论低压

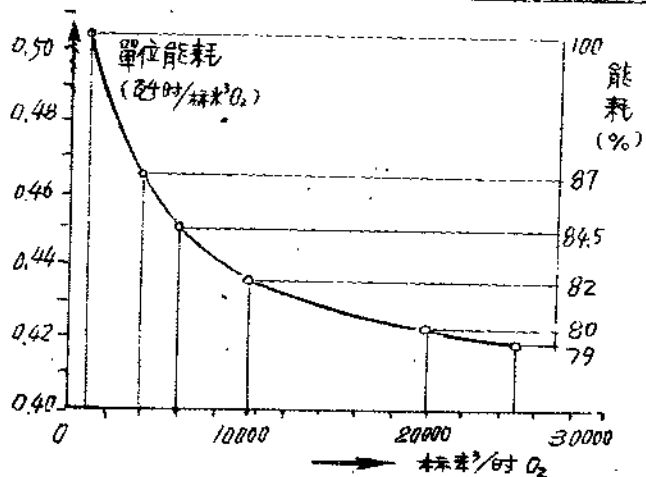


图 3
以每小时氧产量作定
义的设备容量 (纯度 99%)

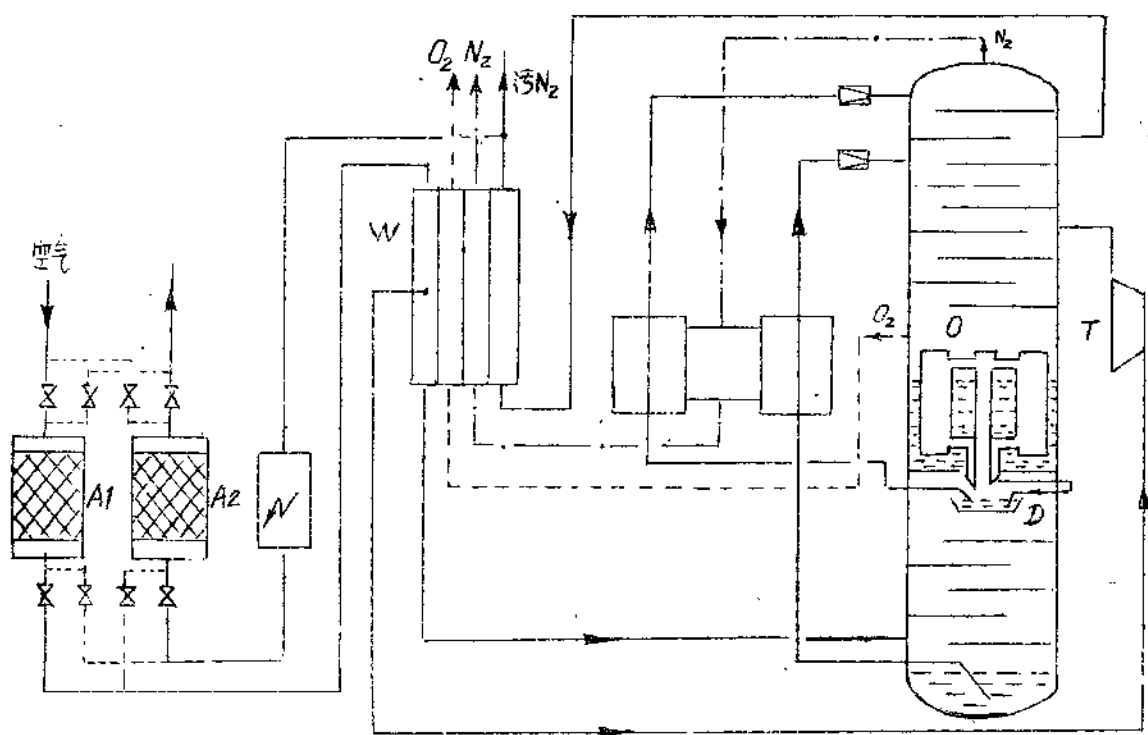


图4 吸附设备的空分流程

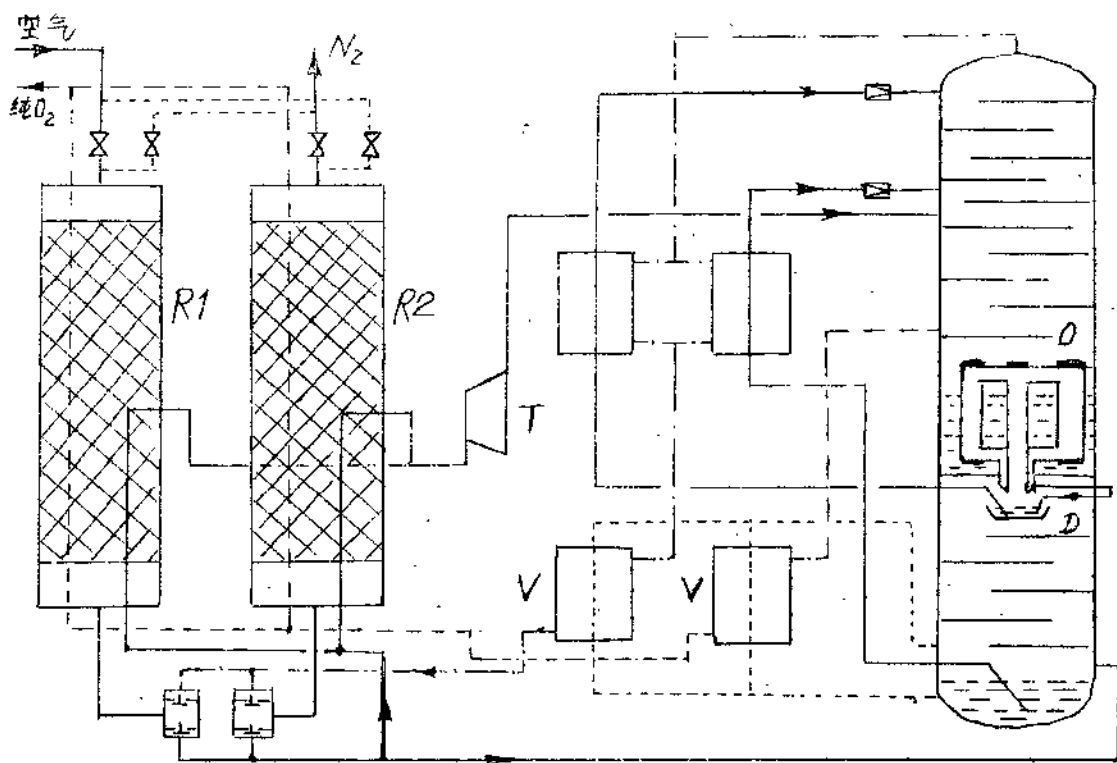


图5 蓄冷器设备的空分流程

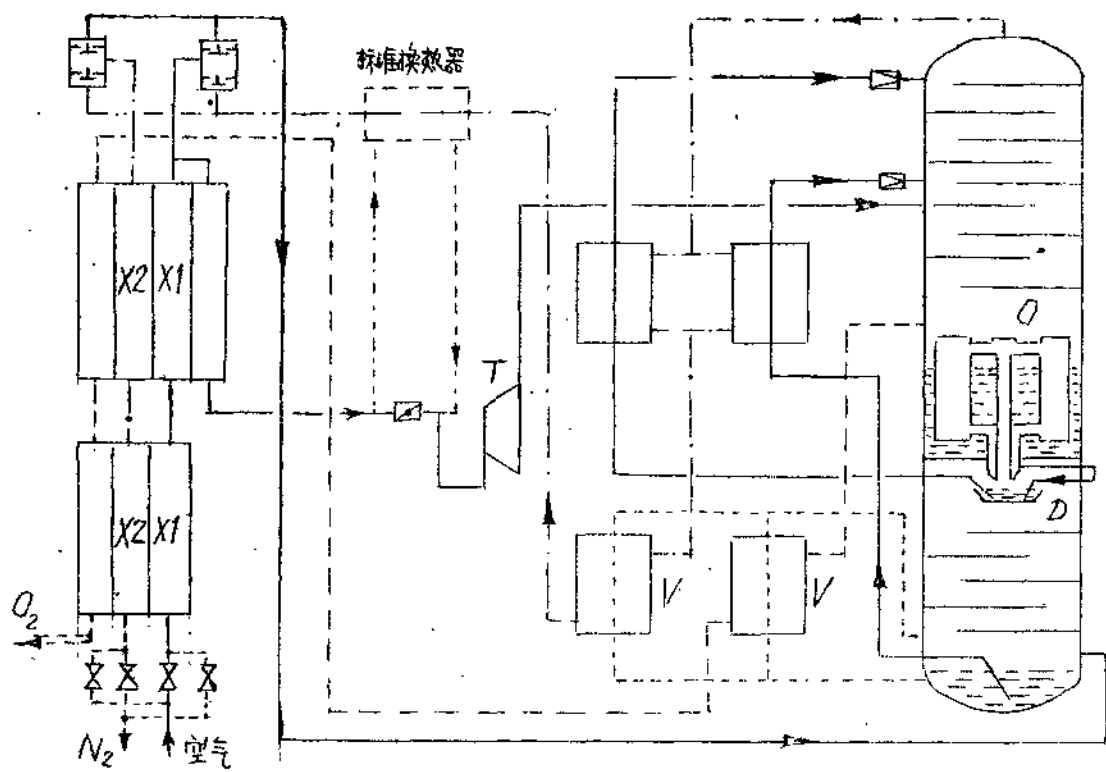


图6 可逆式设备的空分流程

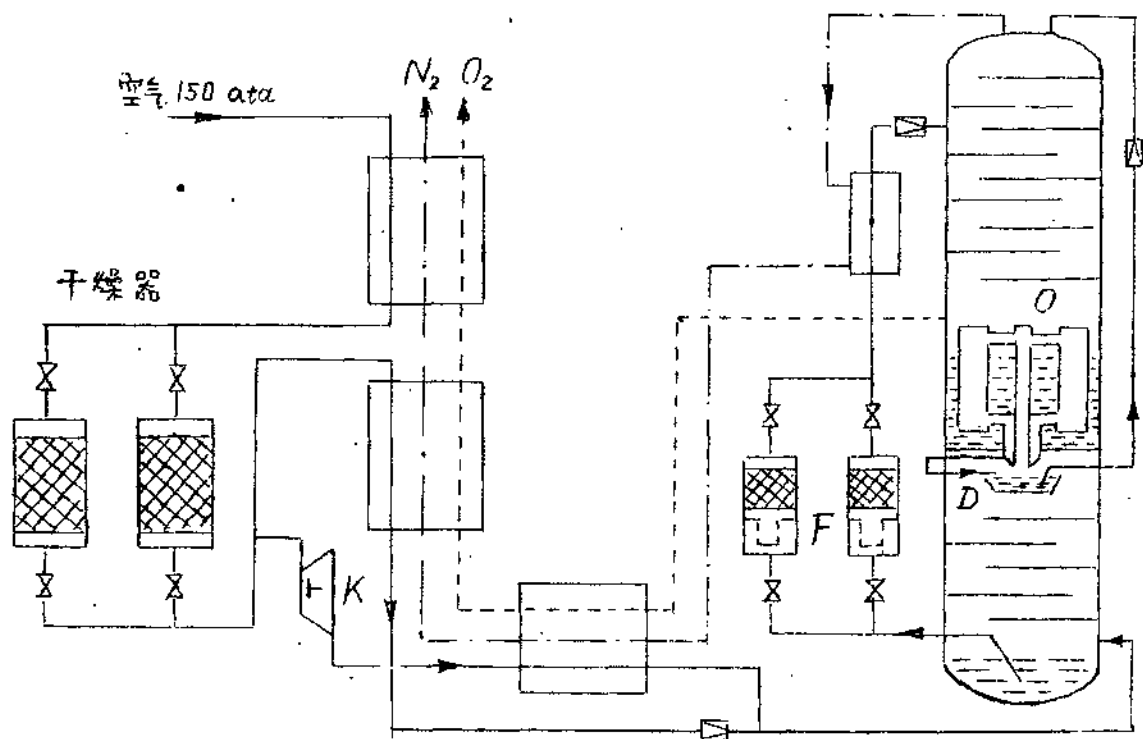


图7 固体吸附法的空分流程

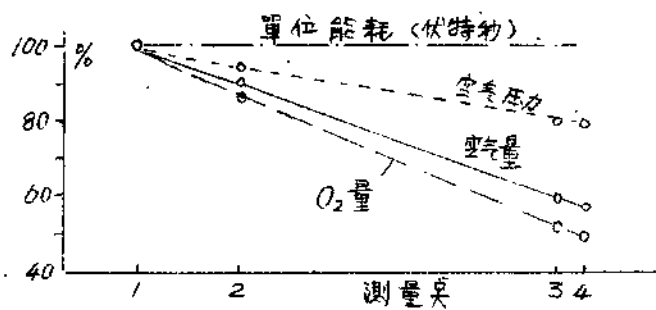


图8a.
一台空分设备的部分
负荷特性

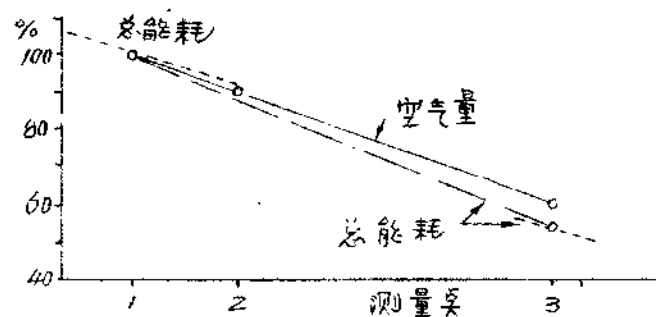


图8b.
空气透平压缩机的部
分负荷特性
----- 转速稳定的压缩机的工作范围
----- 转速可调的压缩机的工作范围

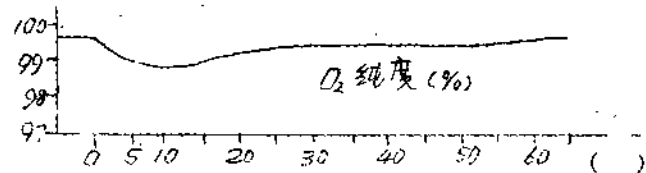
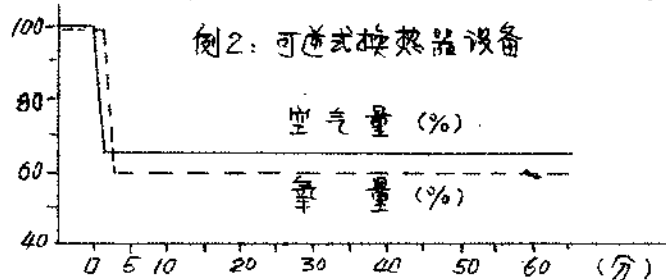
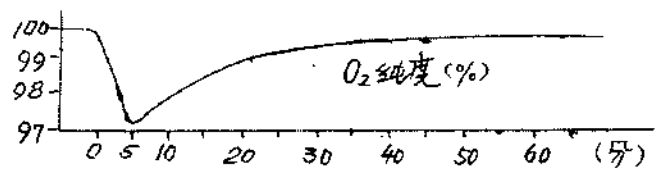
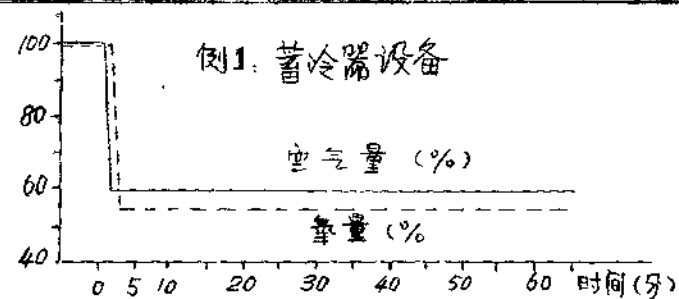


图9.
一台蓄冷器设备和
一台可逆式换热器设
备的调节特性

空气分离设备的现状和展望

Helmut Springmann(西德)

空气分离设备的制造约有70年历史了。至今已发展到一个先进的阶段。其发展阶段大致可分为三个时期。发展初期只能制取氧及氮。后来可成功地制取各种纯度与各种产量的所有空气成份，如氧、氮、氩、氦、氖、氪及氙。现在我们的任务不仅是制取各种纯度与各种产量的所有空气成份，而且，要讲究经济核算。所谓“经济核算”就是要求能耗低、投资少、管理少、故障少。这些要求对一种情况来说并不能全都实现，而必须对各种情况寻求最好的解决方法。影响解决方法的主要因素如下。

产品纯度、产品的物理状态、产品数、产品量、设备的允许容量、记录方法、能量费用、管理和维修人员的开支。

对所有这些因素皆作等同考虑的空分方法是不存在的。一种流程若要求能耗低，则投资费用就高。

在下面几节中将谈谈空分过程的几个基本元件，并根据这些基本元件谈谈空分的现状。

空分设备与其它各种工程低温设备一样，由四组部件构成。这些部件是：

I 空气压缩机、II 空气与产品气流之间交换用的换热器、III 精馏塔、IV 制冷装置，如膨胀机（也用菲利普斯机器）或膨胀阀门。

尽管所有这些部件皆同样重要且不可缺一。但是，换热器特别重要。在换热器中进行热交换同时分离出水及二氧化碳；另方面，在换热器内这两种工艺流程又是不一样的。后者需用辅助装置。空分设备的实用名称可对这些装置加以区别。我们常说的有：分子筛设备，

蓄冷器设备及可逆式换热器设备。

还有第四种装置，在这种装置中二氧化碳被冷凝后进入压力塔的氧流再由过滤器分离出来。但是，这种流程的应用性有限，因此不象其它流程那样重要。

从图1中可看出分子筛设备的配置情况，空气被压缩后经过分子筛吸附器，将水及二氧化碳分离出来，在换热器中冷却后到达精塔。从图2中可看出一种蓄冷器设备的空分流程线路。在蓄冷器中进行换热，同时将水和二氧化碳冻结并使其升华随返流气体带出。蓄冷器是一种充填有高热容材料的容器。空气和产品气体交替地从中通过。图3是一台可逆式换热器设备的空分流程图。在可逆式换热器中也进行热交换并将水和二氧化碳分离出来。

三种方法在小型及大型设备上皆采用。假定一台设备仅用来分离干燥且不含二氧化碳的空气，其能耗定为1.00%，那么，采用分子筛设备能耗则为1.08%，采用蓄冷器设备能耗为1.04%，而采用可逆式换热器设备的能耗为1.02%。

分子筛设备由于是采用分子筛吸附器进行再生的，所以其附加能耗量相当高。在其它设备流程中，主要是在蓄冷器或可逆式换热器中由于转换损失才造成附加能耗。

图4示出了设备大小与单位能耗的关系。其中产品氧量作为设备大小的规格。值得注意的是，设备生产量超过30000标米³/时，单位能耗就渐趋平稳。当然，制造大型设备还能降低投资成本。

能否提取不含水蒸汽及二氧化碳的产品量则是用户所评论的主要问题。在这方面分子筛设备则名列前茅。实际上，所有从设备中出来的气流都是不含水及二氧化碳的。在可逆式换热器设备中可提取约40—50%不含水及二氧化碳的产品量。在蓄冷器设备中此值约为35%。