

空气分离技术的最新进展

Eugen Schoenpflug 等

(联邦德国 林德公司)

【摘要】 介绍林德公司空气分离技术的最新进展：生产氧气和氮气的变压吸附流程、带液氧泵的低温空气分离设备、填料塔、空分设备控制“优化模拟系统”。图5表1。

关键词：空分设备 变压吸附 液氧泵 填料塔 流程 控制

一、采用变压吸附生产氧气和氮气

在采用变压吸附分离空气方面，已有两种不同流程生产氧气和氮气。生产氮气主要使用碳分子筛。BF流程是 Bergbauforschung Essen 以及林德公司发明的，它是分离空气生产氮气最重要的变压吸附方法。

美国联合碳化物公司首先把变压吸附制氧技术投放于市场，即应用于废水处理设备中。与生产氮气不同的是，生产氧气使用合成沸石分子筛材料。尽管变压吸附流程是空气分离方面较新的流程之一，然而这20年来它已经取得了巨大的进展。图1.1中单位能耗降低的情况清楚地表明了这一点，单位能耗是衡量流程效率的一个准则。

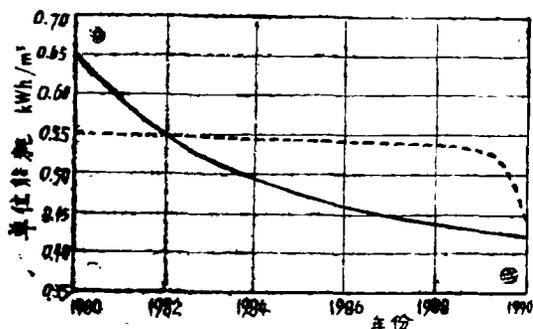


图1.1 十年来单位能耗的改进情况
氧气：纯度93%，产品压力约1 bar(a)
氮气：纯度含O₂ 0.5%，产品压力约5 bar(a)

1. 生产氧气的林德变压吸附流程

图1.2示出了真空再生流程的原理。空气由一只空气鼓风机送入一只充填沸石分子筛的吸附筒内，该吸附筒内的压力上升到稍高于0~0.1 bar(表压)。空气中的水分、二氧化碳以及氮气被沸石分子筛所吸附，氧气则从吸附筒的顶部引出。产品氧气由另一只压缩机压缩到所需的排气压力。在解吸氮气之前，先把空气流切换到另一只吸附筒内。

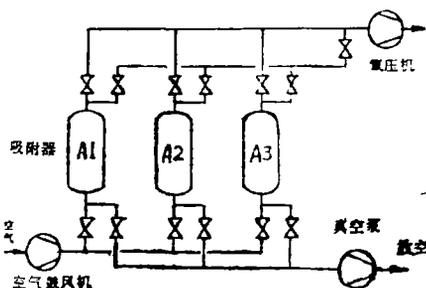


图1.2 真空再生流程的原理图

在吸附阶段结束之后，负载的吸附剂必须进行再生，这是通过使用多级真空泵对该吸附筒进行抽空来完成的。解吸出来的富氮气体、二氧化碳以及水分从吸附筒的底部吸出并排入大气。解吸期间，吸附筒的压力逐渐下降至150~300 mbar(绝压)。

在重新进行吸附之前，该吸附筒必须经过第三阶段进行升压，即从吸附筒的顶部充

入产品氧气。产品氧气来自另一只吸附筒，因此不需要增设一只缓冲器。

每个循环的时间约为3分钟，每一阶段约为1分钟，三只吸附筒交替经过吸附、解吸、升压这三个阶段。

2. 生产氮气的变压吸附流程

原料空气的压缩采用旋转式压缩机，仅在空气流量很小时使用往复式压缩机。常用的吸附压力为6~10 bar(绝压)，它取决于所需的产品压力。

经过冷却和压缩的空气通过一只缓冲器进入一只吸附筒，空气中的水分、二氧化碳以及氧气被碳分子筛所吸附，残余氧含量为3~0.1%的产品氮气从吸附筒的顶部排出。

由于两只吸附筒交替操作导致产品纯度和压力的波动，由一只缓冲器给予均衡。吸附剂的再生在常压下进行。为节能起见，在这两只吸附筒之间还有一个均压阶段。该流程的原理图示于图1.3中。

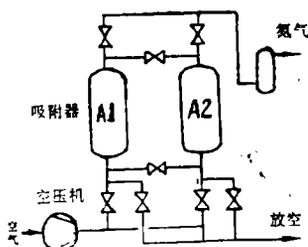


图1.3 变压吸附制氮流程的原理图

影响变压吸附制氮流程效率的主要因素，是空气压缩机的能耗以及碳分子筛材料的特性。近几年来，碳分子筛的质量并没有取得重大的改进。1989年，Bergbauforschung把一种新型的碳分子筛材料投放市场，它使生产氮气的能耗减少了20%左右，产量也有了更大的提高。

二、带液氧泵的低溫空气分离设备

图2.1示出了一个带液氧泵的制冷循环，该泵把液氧从分馏塔的压力压到它的最终产品压力。循环氮气用于使加压液氧进行

复热和气化。同时，氮气循环系统还用于生产液态产品——液氧、液氮和液氩。所需的冷量由一台中温透平膨胀机和一台低温透平膨胀机提供，它们的进气温度分别约为250K和160K。这个制冷循环还可提供中压氮气(约为9~16 bar)或高压氮气(其压力即是循环压缩机的排气压力，约为28bar)。

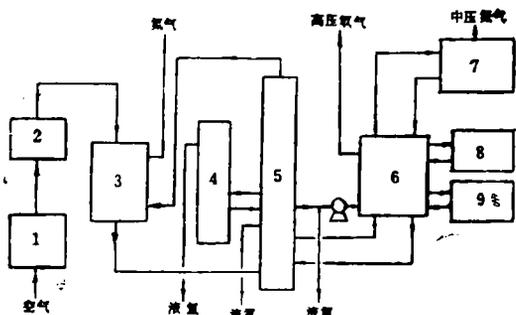


图2.1 生产液态产品和内部泵压氧气的制冷循环

- 1. 空气压缩机 2. 分子筛吸附器 3. 空气换热器 4. 氮塔 5. 主精馏塔 6. 循环换热器 7. 氮气循环压缩机 8. 中温透平膨胀机 9. 低温透平膨胀机

在生产液态产品的空气分离设备中，所需的能耗是分离能耗与液化能耗的总和，而后者占了总能耗的较大部分(参见表3.1)。

生产液态空气产品的工业气体公司如要向用户提供大量的加压氧气，可采用这种液氧泵系统来获得加压氧气。

这种内部加压氧气不需要氧气压缩机，只需要一台小型的液氧泵。为了从进行复热与气化的高压氧气中回收冷量，需要增设一台氮气循环压缩机。这种内部加压氧气，和对氧气进行压缩的投资成本大不相同，然而它们的能耗却大致相当(参见表3.1)。

三、填料塔

空气压缩机的出口压力取决于精馏塔中冷凝蒸发器冷凝氮气所需的压力。精馏塔中通常都有冷凝蒸发器，所以压力塔的冷凝器也就是低压塔的蒸发器。低压塔的压力越低，

表3.1 几种低温空气分离设备的比较

| 比较项目与单位 | 液体产品 (板式塔) | 气体产品 (板式塔) | 气体产品 (填料塔) | 气体氧泵 (板式塔) | 气+液产品 (板式塔) | 气+液产品 氧 泵 (板式塔) | 气+液产品 氧 泵 (填料塔) |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 空气流量Nm ³ /h | 35000 | 50000 | 49000 | 49500 | 60000 | 60000 | 59000 |
| 空气压力 bar | 6.3 | 6.3 | 5.6 | 6.3 | 6.3 | 6.3 | 5.6 |
| 气 氧 Nm ³ /h | — | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |
| 氧 压 力 bar | — | 1.3/27 | 1.1/27 | 27 | 1.3/27 | 27 | 27 |
| 液 氧 Nm ³ /h | 7000 | — | — | — | 2000 | 2000 | 2000 |
| 气氮(1 bar) Nm ³ /h | 14000 | 25000 | 25000 | 22500 | 23500 | 23500 | 23500 |
| 压力氮气 Nm ³ /h | — | — | — | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| 氮 压 力 bar | — | — | — | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.0 |
| 液 氮 Nm ³ /h | 3500 | — | — | — | 6500 | 6500 | 6500 |
| 液 氩 Nm ³ /h | 230 | 330 | 340 | 300 | 400 | 400 | 410 |
| 空气压缩机 kW | 2800 | 4000 | 3600 | 3960 | 4800 | 4800 | 4350 |
| 循环压缩机 kW | 6300 | — | — | 2020 | 5100 | 6500 | 6700 |
| 氧气压缩机 kW | — | 1560 | 1650 | — | 1560 | — | — |
| 液 氧 泵 kW | — | — | — | 10 | — | 10 | 10 |
| 辅助设备 kW | 570 | 560 | 460 | 550 | 620 | 650 | 650 |
| 液 氧 kWh/Nm ³ | x | — | — | — | 1.01 | 1.01 | 1.01 |
| 液 氮 kWh/Nm ³ | 0.66 | — | — | — | 0.66 | 0.66 | 0.66 |
| 液 氩 kWh/Nm ³ | 0.9 | 0.9 | 0.6 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.6 |
| 氮 气 kWh/Nm ³ | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 压力氮气 kWh/Nm ³ | — | — | — | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 |
| 增量氧功率 kW | 7083 | 5698 | 5381 | 5892 | 5117 | 4997 | 4887 |
| 单位能耗 kWh/Nm ³ O ₂ | x = 1.01 | 0.57 | 0.54 | 0.59 | 0.51 | 0.5 | 0.49 |

所需的空气压力也越低。

为了获得最低的原料空气压力，我们有时给低压塔充装苏尔士发明的结构填料，这种填料的压降只有筛孔塔板的十分之一。

在生产气态产品的空气分离设备中，上塔和粗氩塔充装结构填料，可使空气压力降低0.7 bar，因而可使原料空气的压缩能耗减少6.5%左右。

采用填料塔与使用筛孔塔板相比，不仅能耗较低，而且负荷范围也较大。填料塔的设计灵活性较高(30%~110%)，因此能使这种空气分离设备在很低的部分负荷状态下进行运转。

此外还有另一个相当重要的因素，即填料塔的滞留量很小。因此，采用填料塔的空气分离设备与负荷有关的特性较好，对氧气

或氮气需求量的变化能迅速作出反应。

四、“优化模拟系统”(OPTISIM)

使空气分离设备能够根据不同负荷进行最佳运转的另一个重要因素，是应用了现代化的计算机处理系统和经改进的控制方法。为了获得最佳的计算机控制自动化操作，整个设备必须配置一个完整的设备模拟与最佳化系统。

林德公司开发了一种很有用的方法，用于综合处理一个大型的模拟系统。该方法称为“OPTISIM”(“优化模拟系统”)，它是一种崭新的程序，具有一种新式的结构，它是应用计算机与数学最新技术进行特殊设计的。

“优化模拟系统”是一个与方程式有关的模拟程序，它会自动产生一系列的方程式来说明一个流程，然后同时解出所有的方程

式。在一个详细的空气分离设备模型中，典型的方程式组大约含有10000个方程式。

优化模拟系统与老式的顺序模块方法相比，具有如下优点：

- 降低模型研制费用；
- 减少计算时间；
- 增加模型确定的灵活性；
- 增加最佳化确定的灵活性；
- 增加解决流程算法的灵活性；
- 提高数学稳定性；
- 提高准确性。

优化模拟系统和某些与方程式有关的老式模拟程序不同，它使用简单的单元操作基本语言，不会让使用者遇到麻烦的方程式。模型定义语言的简单结构语义，让使用者能够很容易地确定最佳化的问题。

该程序可以使用所有的变量，因此不仅外部变量如空气流压力或功率极限可以定为目标或约束，单元内部变量如精馏塔蒸气流量或透平出口温度也可以这样处理。采用优化模拟系统可以进行联机和脱机最佳化。

优化模拟系统联机时能够使用其大功率模拟设施，使不同的设备数据进行协调。所以设备操作者能够知道设备的工作状态，当产量需要改变时，产品管理人员可以调整新的控制器设定点来取得最佳效果。

优化模拟系统是一种很有用的手段，它能使设备管理人员在生产成本最低的情况下完成生产计划。当需求量迅速改变时，他能够找到最好的方法使设备进行最佳运转来满足所需的氧气或氮气生产。

若要在数字控制系统中应用优化模拟系统模型时，则需要使用另一台处理计算机（Micro-Vax 3300或其它工作站）。

优化模拟系统模型联机必须迅速，因为它们实时工作，例如几分钟。对于直接的数字控制系统来说，这一点尤其重要。优化模拟系统模型能迅速及时地提供信息。

优化模拟系统也是一个大型的动态模拟器。我们对用于煤气化动力设备的成套空分设备（见图4.1）的调节能力进行了试验，试验时采用好几种调节率。我们应用优化模拟系统流程模拟程序进行了动态流程模拟，在整个负荷范围内，每分钟5%的调节率（15分钟调节75%）获得了成功。

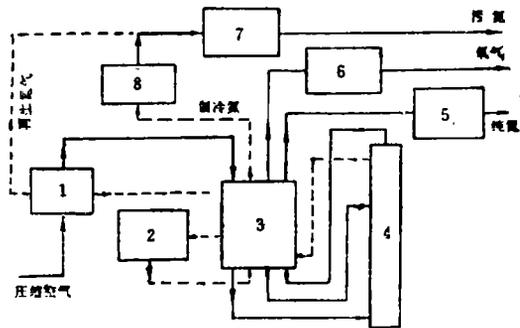


图4.1 用于煤气化动力装置的低温空气分离设备

1. 分子筛吸附器 2. 透平膨胀机 3. 空气换热器 4. 精馏塔 5. 纯氮压缩机
6. 氧气压缩机 7. 污氮压缩机 8. 辅助压缩机

结束语

在空气分离方面，存在着吸附流程与低温精馏之间的竞争。变压吸附的优点是启动后几分钟内就可以达到所需的纯度，而低温设备则能同时生产气态和液态的氧、氮、氩。

同时生产液氧和内部泵压氧气的设备是较为先进的设备，其灵活性较大，自动化程度较高。为了提高改变设备产量的可能性，可在精馏塔内充装结构填料。

先进的流程控制硬件以及高度完善的控制原制理，将在大型空气分离设备方面占有它的位置。采用计算机控制和最佳化，可使设备在负荷变动期间保持良好的平衡。应用新式的设备模拟和流程最佳化系统，可从低温氧气设备中获取最大的好处。

译自《ICEC 13》，1990。

抗氧研究所 谢开明译 李永康校