·设计　制造·

带增压器的常温分子筛净化空分流程的探讨

杭州制氧机厂技术开发科　徐谦先

【内容摘要】 对采用常温分子筛净化的10000、35000Nm³/h(氧)两种空分流程，就增设增压器后带来的经济效益和工作适应性进行了计算探讨。结果表明，氧提取率可达96.4%以上；加工空气量比不增设增压器的同种流程下降4.2%，比可逆式换热器冻结流程约下降7.7～9.4%；能耗比不增设增压器的同种流程约下降2.9～3.4%，而与可逆式换热器冻结流程相比时的相对能耗增加值比不增设增压器也大有下降。增设增压器后，对于空分设备的减负荷生产、变工况生产仍然适应。图5表2参3。

一、问题的提出

常温分子筛净化的空分流程和可逆式换热器冻结的空分流程相比，具有进冷箱前加工空气质量较纯净安全运转性能较好、纯产品氮氧产量之比较高、冷箱内设备较少、使用寿命较长、操作简便等优点。因而在国内外已被越来越广泛地采用。但对于同一性能指标的空分设备而言，采用分子筛净化的空分流程，比采用可逆式换热器冻结的空分流程的能耗要大。

如何进一步降低前者能耗，使其更趋完善呢？虽有各种探讨和研制[1-3]，但在流程上对其进行较广泛的分析和计算的资料尚不多见。首先从理论上加以分析，这是本文致力研讨的着眼点。在这种常温分子筛净化的空分流程的基础上，本文针对该流程作了进一步改进——采用增压器，即在透平膨胀机轴的另一端装上一透平增压器。借助于增压器可将膨胀空气在膨胀过程中对外所作的功，直接使进膨胀机的空气增压，提高了膨胀机前压力。从而获得较多的单位制冷量，使膨胀量得以减少。加工空气量亦可相应下降，这样能耗在原有基础上就可降低。为了进一步了解采用增压器后带来的经济效益和适用性，本文就10000、35000Nm³/h(氧)两种容量的常温分子筛净化空分设备对增压器的增设与否，进行计算探讨。

二、10000Nm³/h(氧)空分设备正常工况、减负荷生产及变工况的探讨

首先以具有下列性能指标的10000Nm³/h(氧)空分设备为基础着手进行计算。即氧气10000Nm³/h、99.6%O_2；液氧105Nm³/h、99.6%O_2；氮气10000Nm³/h、10ppmO_2；精氩250Nm³/h、99.999%Ar；中压氮气(下塔顶部抽出)300Nm³/h、10ppmO_2。其流程组织见图1及图2。图1为带增压器的常温分子筛净化空分流程；图2为不带增压器的常温分子筛净化空分流程。

在图1和图2中，各股物流的流路及方向已作标注。两图中，除膨胀空气的流路有所不同外，其余各物流的流路皆相同，且为大家所熟知，因而不予赘述。这里只将空气流路作一

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

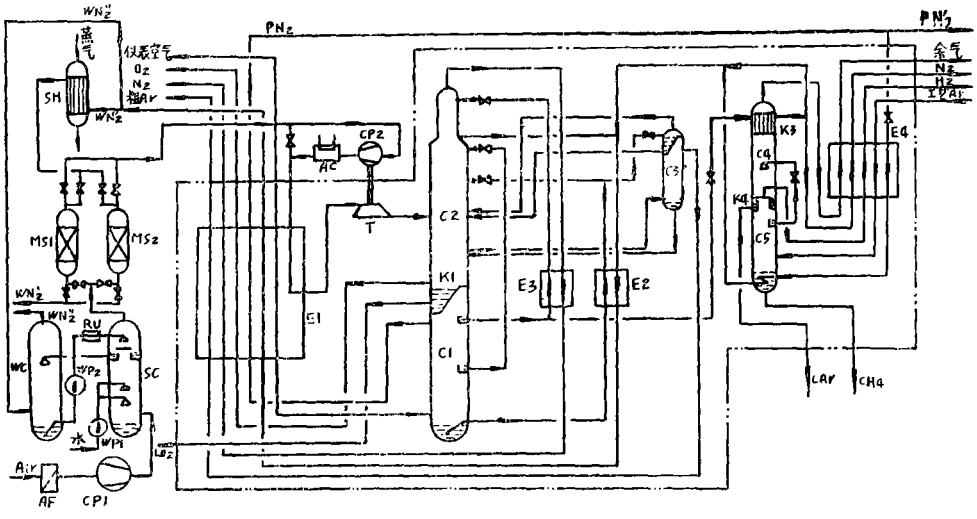

图1　10000Nm³/h带增压器的常温分子筛净化空分流程

AF. 空气过滤器　CP1. 空气透平压缩机　SC. 空气冷却塔　WC. 水冷却塔　MS1、2. 分子筛吸附器　T. 膨胀机　CP2. 增压器　AC. 冷却器　E1. 主热交换器　E2. 液空过冷器　E3. 液氮过冷器　E4. 氩换热器　C1. 下塔　C2. 上塔　C3. 粗氩塔　C4、精氩塔　C5. 除甲烷塔　K1. 冷凝蒸发器　K2. 粗氩冷凝器　K3. 精氩冷凝器　K4. 精氩蒸发器　S. 分离器　SH. 蒸汽加热器　RU. 氟里昂冷冻机　WP1、2. 水泵

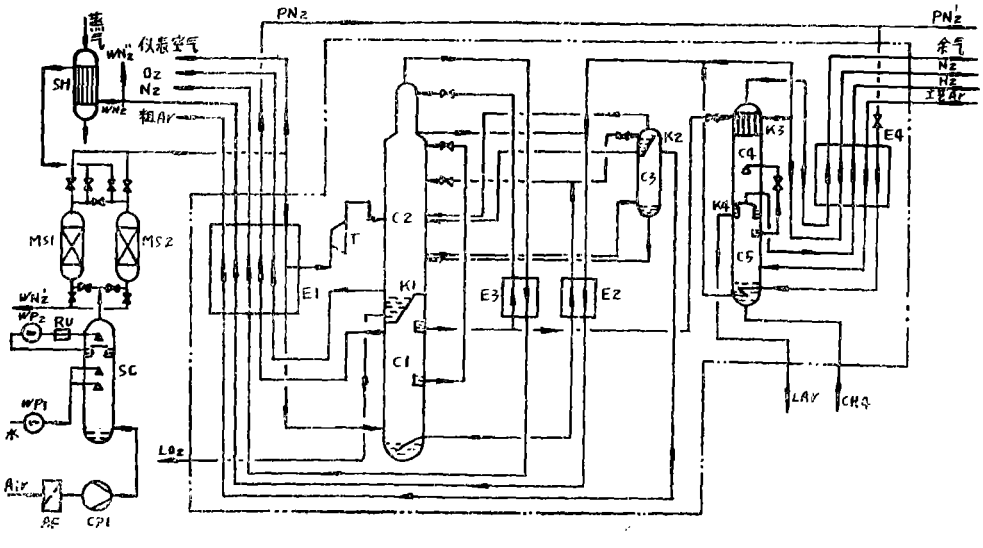

图2　10000Nm³/h不带增压器的常温分子筛净化空分流程(图注同图1)

简介：出透平空压机CP1的空气，在空气冷却塔SC中冷却后，进入分子筛吸附器MS1(或MS2)中净化和干燥。这时出分子筛吸附器后的空气温度约为287K，压力约为6.4ata。在图2中，空气出分子筛吸附器MS后，除抽出少量作仪表空气外，其余则全部进入主热交换器E1中。然后在主热交换器中部抽出一股符合工况冷量平衡要求的膨胀空气，经膨胀机T制冷后送入上塔C2中部参与精馏，余下的继续冷却至有少量含湿量后送入下塔C1。而在图1中，空气

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

出分子筛吸附器MS后，除抽出少量作仪表空气外，其余的分为两路：一路数量等于膨胀空气量的空气经由增压器CP2加压后，在冷却器AC中仍被冷却至原有温度287K后，进入主热交换器E1的通道中冷却至所需温度，然后送入膨胀机T制冷后导入上塔C2；而另一路余下的空气量则全部进入主热交换器E1的另一通道中，冷却至有少量的含湿量后送入下塔C1。空气经过精馏，最终即得所需产品。

为计算方便，本文作了三个假定：1）主热交换器热端温差取为4 K；2）膨胀机的膨胀功转化为增压器的压缩功，其转换率取为约58%；3）在正常工况的精馏计算中，上塔实际塔板数控制在100块左右（一般不少于95块）。计算结果列于表1。为便于和同容量的可逆式换热器冻结流程比较，表1中也列出了后者的计算数据。

表1　10000Nm³/h（氧）空分设备三种流程的计算结果

参数		加工空气量*（Nm³/h）	加工空气压力（ata）	氧提取率（%）	膨胀空气量（Nm³/h）	膨胀空气量/加工空气量（%）	膨胀前/后压力（ata）	膨胀前/后温度（K）
可逆式换热器冻结流程		55000	6.4	87.34	10700	19.45	6.22/1.48	151.6/109.0
常温分子筛净化流程	不带增压器	52000	6.6	92.39	9630	18.52	6.28/1.50	153.0/109.6
	带增压器	49830	6.6	96.41	7100	14.25	9.12/1.50	170.9/113.1

* 加工空气量中不包括仪表空气用量及切换损失量。

从表1中可以看出，带增压器的分子筛流程加工空气量，可比可逆式换热器冻结流程下降9.4%，而比不带增压器的分子筛流程下降4.18%。显而易见，导致加工空气量降低的原因，是由于增压器的采用，使膨胀机前压力由前两种工况的6 ata左右提高到9.12ata。从而使膨胀量大幅度降了下来（只占可逆式换热器冻结流程的66.4%和不带增压器分子筛流程的73.7%）。由于膨胀量的降低，势必导致加工空气量的降低。这样就出现了一个可喜的成果，即氧提取率可由可逆式换热器冻结流程的87.34%、不带增压器分子筛流程的92.39%提高到96.41%。加工空气量的下降，使能耗也随之下降。

根据计算，带增压器的分子筛流程的能耗比不带增压器的分子筛流程（膨胀机采用电机制动的）约下降2.92%（已扣除电机的回收功率，下同）。若分子筛吸附器采用目前单层床结构、再生气温度取为180℃时，在不带与带增压器两种情况下，前者和后者与可逆式换热器冻结流程（膨胀机采用电机制动）相比，相对电耗增加值将由约4.9%下降至约1.8%。

带增压器的常温分子筛净化空分流程，在空分设备减负荷生产时的适应性问题，本文对同一空分设备在加工空气量负荷为原来的80%、59%两种工况下的情况作了探讨。并和不带增压器的常温分子筛净化空分流程进行了对比。根据计算结果，绘于图3中。曲线（1）表示带增压器的工况；曲线（2）表示不带增压器的工况。从图3中可以看出氧提取率随着加工空气负荷比率的下降而下降。在带与不带增压器两种情况下，它们的下降幅度是相近的。但从同图中也可以看到，膨胀量、膨胀机前压力和温度的下降幅度，带增压器的要比不带增压器的大得多。由于机前温度的变化幅度较大，因而在配管和主热交换器的抽口设计中，要注意膨胀机前温度的调节手段。

在图3中还可看出：膨胀空气量和加工空气量之比的变化；加工空气的负荷比率和增压

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

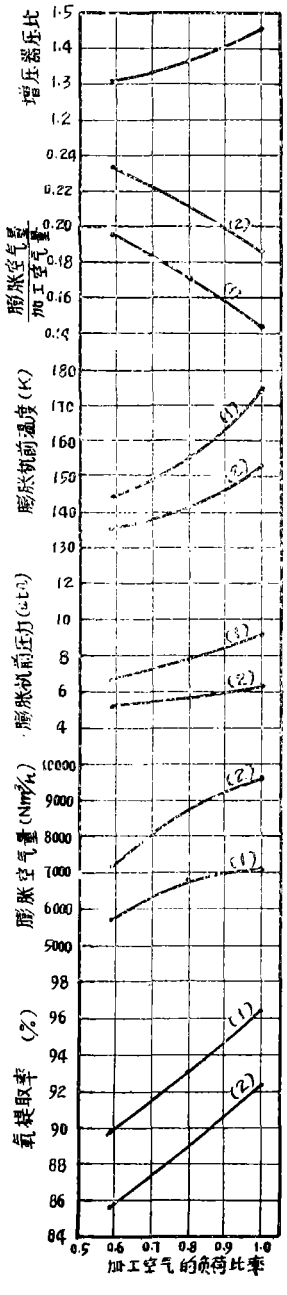

图 3　10000Nm³/h（氧）空分设备加工空气的负荷比率与氧提取率等的关系

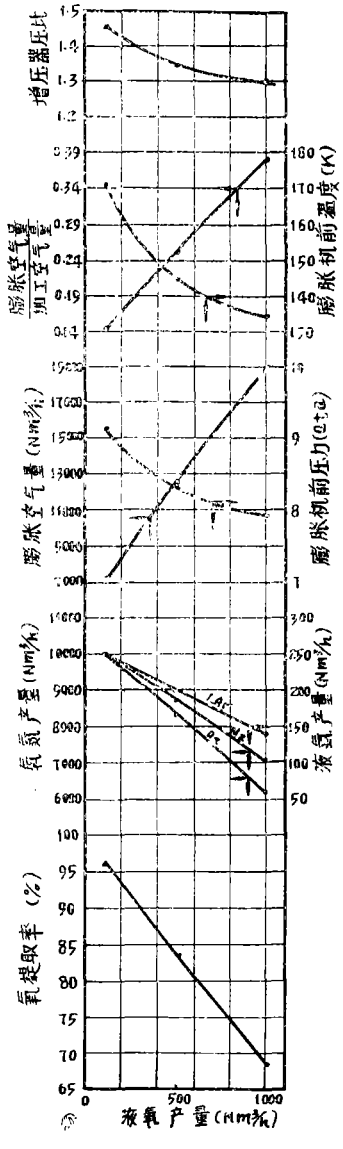

图 4　10000Nm³/h(氧)空分设备液氧产量与氧提取率等的关系

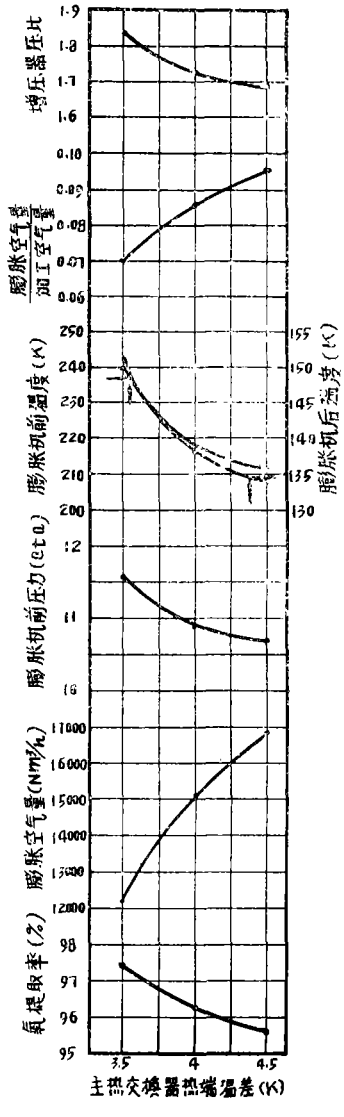

图 5　35000Nm³/h（氧）空分设备主热交换器热端温差与氧提取率等的关系

器压比的关系。本文所述的 10000Nm³/h（氧）空分设备在全负荷运行时，增压器的压比为 1.455。这对透平增压器的设计，采用单级压缩是容易实现的。

在减负荷生产时，膨胀机膨胀量的改变和增压器排量的改变能否协调，是一个重要的问

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

题。大家知道，在膨胀机的运转中，若要膨胀机减量，可用降低膨胀机转速和调节可调叶片的开度为主要手段来达到。膨胀量的下降，导致膨胀机输出功率的相应减少。这样增压器的流量和排出压力也就随之下降，由此可见膨胀量的下降会使增压器流量也跟随下降。要使两者下降幅度相同，可用调节增压器及膨胀机进口导叶开度和增压器进出口阀门开度等方法来实现。

综上所述，可见设置增压器的常温分子筛净化流程是可以满足减负荷生产要求的。

在实际生产中，有时为了某种需要，在原以生产气态氧氮产品为主的空分设备中要求减产气态氧氮产品，从而来生产更多的液氧或液氮。贮存起来，以备使用，通常称之为变工况生产。对于这种情况，带增压器的常温分子筛净化空分流程也是可以满足要求的。本文仅以生产液氧为例，对同一空分设备进行了探讨，其探讨结果示于图4中。从图中可以看出，随着液氧产量的增多，氧提取率将迅速下降。对10000Nm³/h（氧）空分设备而言，最大液氧产量为1000Nm³/h（折成标态），其时氧气、氮气、液氩产量均将相应减少（见图4）。而氧提取率为68.69%，比同性能指标的可逆式换热器冻结流程约提高6.45%。这时两台膨胀机均在最大负荷的情况下运行，膨胀空气量与加工空气量之比约为38.1%，膨胀空气量一半进入上塔参与精馏，而另一半则和过冷器出来的返流污氮汇合后进入主热交换器中复热。在变工况生产中，当液氧产量由多到少变化时，增压器的压比在1.3～1.455间变动，膨胀机前压力在7.9～9.1ata间变动。

三、35000Nm³/h（氧）空分设备正常工况及在不同主热交换器热端温差下工况的探讨

众所周知，随着空分设备容量的增大，膨胀量和加工空气量之比亦将大大减少。为了探讨带增压器的常温分子筛净化空分流程对于较大型的空分设备能否适应，即膨胀量的锐减能否同时满足空分装置和主热交换器冷量平衡的要求。本文按下述的35000Nm³/h（氧）空分设备的性能指标为例，对增设增压器与否作了计算。空分设备的性能指标取为：氧气35000Nm³/h、99.6% O_2；液氧500Nm³/h、99.6% O_2；氮气25000Nm³/h、10ppm O_2；中压氮气1000Nm³/h、10ppm O_2。流程组织从略，计算结果示于表2。为便于比较，同表中也列出了同容量的可逆式换热器冻结流程的相应数据。计算前提为：主热交换器热端温差取为3.5K，其余同前例。

表2　35000Nm³/h（氧）空分设备三种流程的计算结果

参数		加工空气量*（Nm³/h）	加工空气压力（ata）	氧提取率（%）	膨胀空气量（Nm³/h）	膨胀空气量/加工空气量（%）	膨胀机前压力（ata）	膨胀机前温度（K）	膨胀后过热度（K）
可逆式换热器冻结流程		187700	6.35	89.91	25700	13.69	5.83	160.4	27.7
常温分子筛净化流程	不带增压器	180900	6.6	93.30	21900	12.10	6.30	177.3	40.7
	带增压器	173300	6.6	97.39	12250	7.07	11.57	240.0	65.8

* 加工空气量中不包括仪表空气用量及切换损失量。

从表2中同样可以看出，带增压器的分子筛流程加工空气量比可逆式换热器流程下降7.7%，比不带增压器的分子筛流程下降4.2%。同时相应的膨胀量为可逆式换热器流程的47.7%，为不带增压器分子筛流程的55.9%，只占加工空气量的7.07%。而膨胀机前压力却

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大幅度地提高到了11.57ata，氧提取率达到了97.39%。能耗情况为：带增压器的分子筛流程比不带增压器的分子筛流程(膨胀机采用电机制动)下降约3.4%。当分子筛吸附器情况和前述相同时，在不带与带增压器两种情况下，前者和后者与可逆式换热器冻结流程(膨胀机采用电机制动)相比，相对电耗增加值将由约7%下降到约3.4%。

计算结果表明：对于较大型的空分设备，采用带增压器的常温分子筛净化空分流程，虽然膨胀量和加工空气量之比锐减到7.07%，但仍能满足工况要求。由于膨胀量的减少和机前压力的增高，才使氧提取率达到更高的水平，能耗也随之下降。这说明该种流程对较大型的空分设备还是非常适用的。但是从增压器的压比来看，已达到约1.84，压比的升高，这对单级压缩的透平增压器的设计带来了一定的困难。在这种情况下，解决的方法有两：一是采用压比可更高一些的单级的新型叶轮来满足需要；二是设法降低一些增压器的压比。通常对较大型的空分设备而言，如果有需要多生产一些液体产品，压比就可相应下降。但是如果除了规定的安全排放的液氧之外，用户并不需要液体产品。这时为了限制增压器压比的增高，就只能用扩大主热交换器的热端温差来加以解决了。当然过多的扩大主热交换器的热端温差也是不适宜的，因为不可逆损失太大了。

为了探讨主热交换器热端温差和增压器压比等的关系，本文仍以上例为基础，除了对主热交换器热端温差取为3.5K外，还分别以4K和4.5K两种温差作了计算，计算结果示于图5中。当主热交换器温差由3.5K变为4.5K时，增压器压比由1.84降到1.696，氧提取率也由97.39%降为95.62%，相应膨胀机前压力由11.57ata下降为10.69ata，膨胀空气量和加工空气量之比由7.07%上升到9.58%。由计算可见，当主热交换器温差扩大到4.5K时，对上述性能指标的35000Nm³/h(氧)空分设备，增压器实现单级压缩的可能性就完全具备了。

从上述性能指标的空分设备的三种不同的主热交换器热端温差的计算结果来看，有一点值得注意，即膨胀机后温度都是较高的(见图5)，膨胀后过热度少则49K，多则65.8K。这样就必须设置膨胀后换热器来降低膨胀后过热度，以保证上塔精馏的正常进行。

四、结 束 语

(一) 设置增压器的常温分子筛净化空分流程，在本文所讨论的两种性能指标为代表的空分设备中，假定膨胀机的膨胀功转化为增压器的压缩功，转换率取为58%，和在正常工况下的精馏计算中上塔实际塔板数控制在100块左右的情况下，其氧提取率都在96.4%以上，最高可达97.39%(应该指出氧提取率随着空分设备的性能指标的不同而存在差异的)。加工空气量比不带增压器的常温分子筛净化流程约下降4.2%，而比可逆式换热器冻结流程约下降(7.7～9.4)%。能耗比不带增压器的分子筛流程(膨胀机采用电机制动)约下降(2.9～3.4)%，使带增压器后分子筛流程的能耗在原有不带增压器的基础上得以降低下来，这对于大型空分设备来说其节能效果是较大的。而带增压器的常温分子筛净化流程对于可逆式换热器冻结流程而言，就目前情况来看，其能耗尚大于后者。但随着分子筛吸附器工艺流程的改进和分子筛吸附剂性能的改善，将会使常温分子筛净化流程的能耗获得进一步的降低，能和可逆式换热器冻结流程的能耗相当甚至更低。但这不属本文研讨范畴，这里就不再探讨了。

(二) 10000Nm³/h(氧)空分设备带增压器的常温分子筛净化空分流程，对减负荷生产加工空气量为原来的59%和变工况生产达1000Nm³/h液氧(折合成标态)都能适应的。根据图3、图4即可按所需工况采取相应的调节手段。对于较大型的空分设备，如果用户不需要液体产

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

品，要保持较高的氧提取率，增压器的压比就势必较高。当压比大于现有的单级径向后弯式叶轮所能达到的最大压比之后，必须采用压比更高一些的单级的新型叶轮才能满足工况的需要，否则只能用扩大主热交换器热端温差的方法来限制压比的升高。但如为了取得较高的经济效益，只有用前者的方法才是确当的。

（三）设置增压器的常温分子筛净化空分流程，对空分设备容量的适用范围是较为宽广的，对于10000～35000Nm³/h(氧)空分设备是适用的。容量更大的空分设备，本文虽未作探讨，在提高压比的基础上还是能适应的。而对于容量较小的空分设备，只要膨胀空气量能符合透平增压器叶轮的最小极限设计气量范围，本流程也是适用的。

（四）使用增压器后，两台膨胀机可减少两台制动电机（或风机），代之以两台增压器CP2和冷却器AC。同时由于加工空气量和膨胀空气量的减少，将使空分装置配套的设备和机器外形尺寸也相应减小，使设备投资费用得以降低。另外，膨胀机输出的功率直接用于增压器，避免了采用电机制动时的电网和再使用过程中的无用功损失，提高了功的回用率。

（五）冷却器AC的冷源，可利用本身流程中除了供加温再生分子筛吸附器所消耗的污氮量外的多余部份的放空污氮量。先用它去冷却水，然后再将水供冷却器AC使用，不需要再另外供给冷量而增加能耗。提高了带增压器的常温分子筛净化空分流程的经济性。

本文经中国空分设备公司吴廷璐总工程师审校，值此致谢。

参考文献

[1] 联邦德国林德公司 Wilhelm Rohde：产量可变的供氧系统，《深冷技术》，1985年，第2期，第21～23页

[2] 联邦德国林德公司 N. Wagner：空气分离技术的发展，《深冷技术》，1981年，第3期，第28～39页

[3] 联邦德国林德公司 Pater Dupont：林德公司利用深冷法分离空气的概况，《深冷技术》，1985年，第2期，第40～45页

（1985年6～9月初稿　10月修改）

卧式无润滑压缩机十字头结构

哈尔滨制氧机厂　刘兆生

【内容摘要】 在分析无油润滑压缩机活塞下沉对十字头间隙的影响后，提出了新的可靠的连杆、十字头和联接器结构及其特点。图4表1参5。

为了不锈蚀和减少对导向环的负荷等，无油润滑活塞式压缩机活塞体材料，多采用铝合金。鉴于铝合金线膨胀系数较大，为保证在工作状态下活塞体（或导向环）与气缸镜面有足够的且又适度的间隙，使之不因热胀而卡死，故在测量检验的标准温度下，活塞的导向环与气缸镜面间的间隙较大。又因为无润滑用的导向环相对于有润滑的导向环磨损快，为保证足够长的使用寿命，必须规定足够大的允许磨损量。因此无论压缩机在启动时还是无润滑导向环已经磨损时，均会使活塞在气缸中下沉，活塞中心线与气缸中心线不重合，这样就形成了活塞杆的倾斜。因此对十字头的润滑是不利的。同时还会产生不正常的磨损，对压缩机的机械效率也是一个不利因素。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net