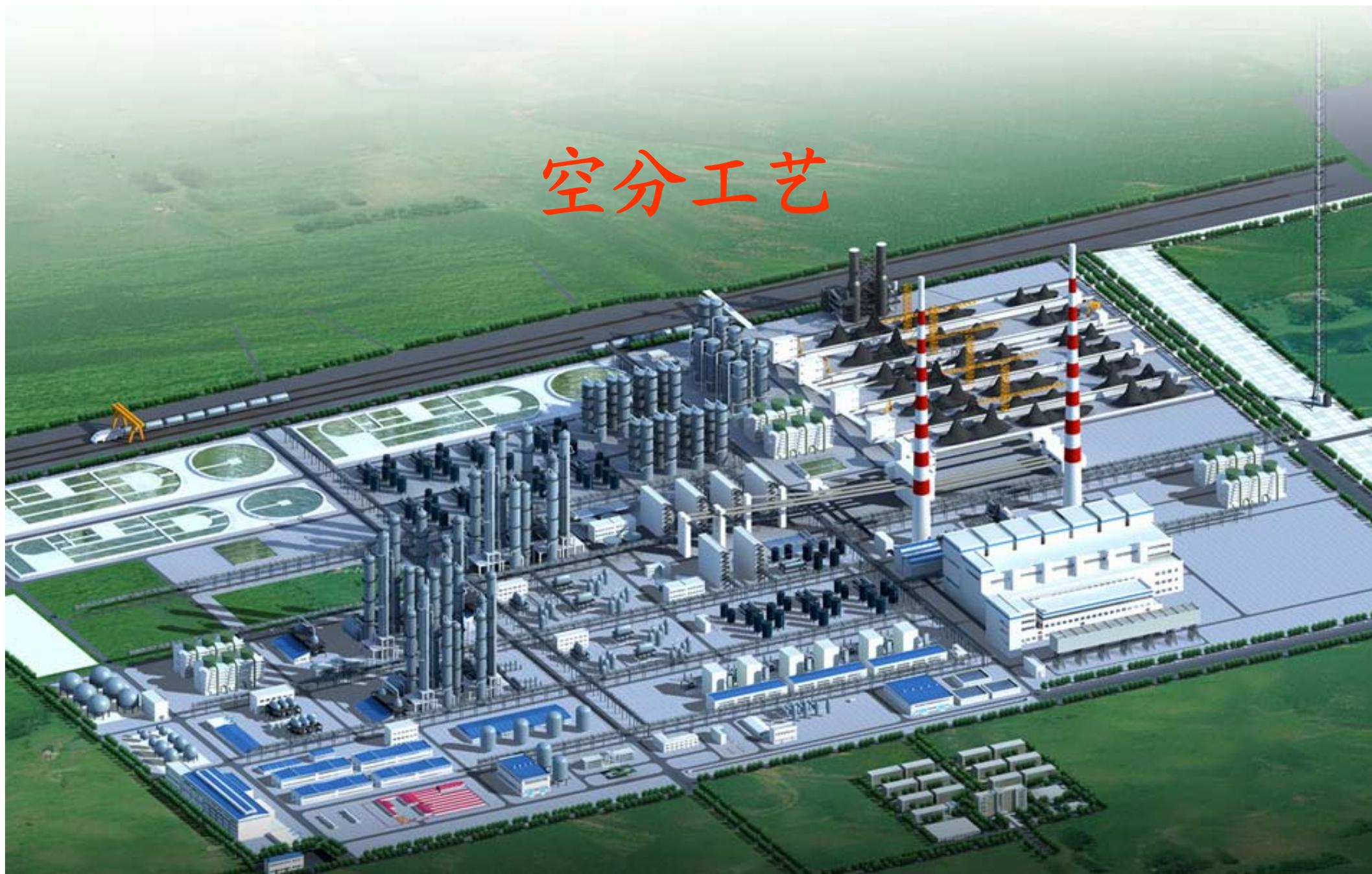


团结、务实、追求卓越

空分工艺



空分培训目录

- 一、空气分离的方法
- 二、空气的组成
- 三、空气分离的基本原理
- 四、空分流程的技术发展
- 五、空分流程特点
- 六、空分装置简介
- 七、空分设计原则
- 八、空分装置与其它界区的联系
- 九、空分主要技术性能指标
- 十、空分工艺流程

一、空气分离的方法和原理

➤ 空分的含义：简单说就是利用物理或者化学方法将空气混合物各组进行分开，获得高纯氧气和高纯氮气以及一些稀有气体的过程。

➤ 空分分离的方法和原理：

空气中的主要成分是氧和氮，它们分别以分子状态存在，均匀地混合在一起，通常要将它们分离出来比较困难，目前工业上主要有3种实现空气分离方法。

1) 深冷法（也称低温法）：先将混合物空气通过压缩、膨胀和降温，直至空气液化，然后利用氧、氮汽化温度（沸点）的不同（在标准大气压下，氧的沸点为 $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；氮的沸点为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，沸点低的氮相对于氧要容易汽化这个特性，在精馏塔内让温度较高的蒸气与温度较低的液体不断相互接触，低沸点组分氮较多的蒸发，高沸点组分氧较多的冷凝的原理，使上升蒸气氮含量不断提高，下流液体中的氧含量不断增大，从而实现氧、氮的分离。要将空气液化，需将空气冷却到 $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的温度，这种制冷叫深度冷冻（深冷）；而

空气分离的方法和原理

利用沸点差将液态空气分离为氧、氮、氩的过程称之为精馏过程。深冷与精馏的组合是目前工业上应用最广泛的空气分离方法；

- 2) 吸附法：利用多孔性物质分子筛对不同的气体分子具有选择性吸附的特点，对气体分子不同组分有选择性的进行吸附，达到单高纯度的产品。吸附法分离空气流程简单，操作方便运行成本较低，但不能获得高纯度的双高产品。
- 3) 膜分离法：利用一些有机聚合膜的潜在选择性，当空气通过薄膜或中空纤维膜时，氧气穿过膜的速度比氮快的多的特点，实现氧、氮的分离。这种分离方法得到的产品纯度不高，规模也较小，目前只适用于生产富氧产品。

二、空气的组成

组分	氧	氮	氩	氖	氦	氪	氙	二氧化碳	其它
分子式	O ₂	N ₂	Ar	Ne	He	Kr	Xe	CO ₂	氮氧化物 水
体积含量	20.93	78.03	0.932	1.5~1.8 × 10 ⁻³	4.6~5.3 × 10 ⁻⁴	1.08 × 10 ⁻⁴	8 × 10 ⁻⁶	0.03	
重量含量	23.1	75.6	1.286	1.2 × 10 ⁻³	7 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻⁴	4 × 10 ⁻⁵	0.046	
气体密度	1.429	1.250	1.734	0.9	0.178	3.743	5.896	1.977	
沸点	— 182.9 7	— 195.7 9	— 185.8 6	— 246.08	— 268.938	— 153.4	— 108.11	—78.44 (升)	

空气的组成

- 氧、氮、氩和其他物质一样，具有气、液和固三态。在常温常压下它们呈气态。在标准大气压下，氧被冷凝至 -183°C ，氮被冷凝至 -196°C ，氩被冷凝至 -186°C 即会变为液态，氧和氮的沸点相差 13°C ，氩和氮的沸点相差 10°C ，空气的分离就是充分利用其沸点的不同来将其进行分离。
- 空气中除氧、氮和氩外，还有氦、氖、氪、氙等稀有气体，这些稀有气体广泛应用在国防、科研及工业上，稀有气体的提取也直接关系到空分装置氧气的提取率和生产运行能耗。目前大型的空分装置都普遍带无氩制氩工艺。

三、空气分离的基本原理

- 空气分离的基本原理就是利用低温精馏法将空气冷凝成液体(空气冷凝温度 -173°C), 然后按各组分蒸发温度的不同将空气分离。
- 压缩空气除去水分和二氧化碳等杂质后, 经热交换系统和增压膨胀机制冷后进入下塔, 在塔板上气体与液体接触, 由于气、液之间温度差的存在, 在进行传热和传质交换时, 低沸点组分氮吸收热量开始蒸发, 氮组分首先蒸发出来, 温度较高的气体冷凝, 放出冷凝热, 气体冷凝时, 首先冷凝氧组分. 这过程一直进行到气相和液相的温度相等为止, 也即气、液处于平衡状态。这时, 液相由于蒸发, 使氮组分减少, 同时由于气相冷凝的氧也进入液相, 因此液相的氧浓度增加了, 同样气相由于冷凝, 使氧组分减少, 同时由于液相的氮进入气相, 因此气相的氮浓度增加了. 多次的重复上述过程, 气相的氮浓度就不断增加, 液相的氧浓度

空气分离的基本原理

也能不断的增加. 这样经过多次的蒸发与冷凝就能完成整个精馏过程, 从而将空气中的氧和氮分离开来。

- 空气在下塔被初步精馏为气氮、污液氮和富氧液空, 以节流阀减压降温后送至上塔作为上塔的回流液, 进一步实现精馏, 最终在上塔顶部得到纯氮气, 下部得到合格的液氧产品。
- 主冷凝蒸发器是连接上下塔实现精馏过程的纽带, 起到承上启下的重要作用。根据压力对应液化温度成正比的特性, 在主冷凝蒸发器中通过液氧将压力氮气冷凝为液氮, 为上下塔提供回流液建立精馏工况, 同时主冷氧侧的液氧被蒸发成气氧, 进入上塔作为上升蒸气, 主冷凝蒸发器换热工况的平衡直接关系到精馏工况的稳定。

四、我国空分流程的技术发展

- 空分设备是由诸多配套部机组成的成套设备，我国空分于1953年起步，经过50多年的发展，从第一代小型空分流程发展到目前的第六代大型全精馏无氢制氩工艺流程。每一次空分设备流程的变革和推进，都是新技术、新工艺的创新。透平膨胀机的产生，实现了大型空分设备全低压流程；高效板翅式换热器的出现，使切换板翅式流程取代了石头蓄冷器、可逆式换热器流程，使装置冷量回收效率更高；增压透平膨胀机的出现极大的提高了膨胀机的制冷效率并把输出的外功有利的得到回收；常温分子筛净化流程替代了切换式换热器，使空分装置净化系统的安全性、稳定性得到极大提高并使能耗大大降低，随着规整填料和低温液体泵在空分装置中的应用，进一步降低了空分设备的能耗，实现了全精馏无氢制氩，使空分设备在高效、节能、安全等

我国空分流程的技术发展

方面取得了进步。随着计算机的广泛应用，空分装置的自动控制、变负荷跟踪调节等变得更为先进。

- 第一代：高低压循环，氮气透平膨胀，吸收法除杂质；
- 第二代：石头蓄冷器，空气透平膨胀低压循环；
- 第三代：可逆式换热器；
- 第四代：分子筛纯化；
- 第五代：规整填料，增压透平膨胀机的低压循环；
- 第六代：内压缩流程，规整填料，全精馏无氢制氮。

五、现代空分流程特点

- 采用常温分子筛净化，清除空气中的有害物质更有效，切换损失小，装置设计连续运行周期大于二年；
- 采用规整填料上塔替代筛板上塔，使上塔阻力大大降低（只有筛板阻力的 $1/4$ ），使空压机的排气压力降低，装置运行能耗下降 $5\% \sim 7\%$ ；
- 空分设备氧的提取率提高，氧气纯度在 99.6% 以上；
- 精馏采用全精馏无氢制氩技术，氩塔采用规整填料塔，省略了制氢设备，流程简化，节省投资和运行费用；

现代空分流程特点

- 分子筛纯化系统采用双层床结构，大大延长了分子筛的使用寿命和降低了床层阻力，使空分装置运行更安全可靠；
- 采用高效增压透平膨胀机技术，能很好的回收部分能量，膨胀机制冷效率在85 %以上；
- 采用DCS控制技术，实现了中控、机房和就地一体化的控制，可有效地监控整套空分设备的生产过程；

六、空分装置简介

整个空分界区可分为两大块：压缩区域和精馏区域。压缩区域包括一拖二空压机组、仪表空气压缩机组以及和汽轮机相配套的全凝式空气冷凝器；在精馏区域主要包括空气预冷系统、分子筛纯化系统、增压透平膨胀机制冷系统、分馏塔系统以及液体贮存系统；

七、空分设计原则

- 1) 安全性好
 - 采用液氧内压缩流程，主冷凝器采用浴式结构，全浸式操作，增加主冷液氧的循环倍率，防止碳氢化合物等在主冷换热表面析出而引起的主冷爆炸；
 - 内压缩的液氧泵取代外压缩的氧压机极大减少火灾隐患；
 - 二台液氧泵完全实现在线自动启动与切换运行程序，可有效地保证装置的安全运行与连续供氧；
 - 产品液氧在高压下蒸发，使烃类物质积累的可能性大大降低。
- 2) 可靠性高

空分设计原则

- 低温高压液氧泵和增压膨胀机采用进口名牌产品，产品性能可靠，液氧泵实现在线冷备，若运行泵出故障则备用泵可在10秒钟内自动启动达到工作负荷；
- 本装置产品为高压氧气，内压缩流程中的液氧泵取代外压缩流程中的氧气压缩机，运行可靠性大大增加；
- 采用高效增压透平膨胀机，有效的回收透平膨胀机产生的功，提高单位制冷量并有效的降低系统能耗；
- 采用双层床分子筛纯化系统，使装置使用周期更长。

3) 投资成本低，配置更合理

- 采用内压缩流程后增压机+低温液体泵+高压板式换热器的投资比

空分设计原则

外压缩的氧压机低;

- 主空压机与增压机共用一台汽轮机驱动，设备配置紧凑合理;
- 低压氮直接从下塔抽出，无需氮压机进行加压，减少投资。

4) 采用先进可靠的DCS控制系统;

- 成套空分装置采用DCS控制系统，关键控制点采取冗余配置，设备安全运行的可靠性高。

5) 流程进行优化设计。

充分的利用富余的氮气和污氮气回收其冷量，根据要求配置冷水机组; 利用节能型蒸汽加热器取代传统的蒸汽加热器，蒸汽消耗量得到有效降低，冷凝液充分回收。

空分设计原则

6) 原料空气压缩机和增压机特点:

采用先进的透平压缩机组产品，可充分保证机器具有先进的性能指标，降低系统总体能耗；

- 原料空压机配备高压水叶轮清洗机构，可方便地进行叶轮的除垢清洗，提高压缩机的运行效率。
- 原料空压机的入口，增压机的一段与二段入口均带入口导叶调节机构，可方便地进行气量的调整与变工况操作考虑到增压机在流程中的特殊地位，采用进、出口压力与入口流量进行防喘振控制，很好的实现压缩机的保护功能。

八、空分装置与其它界区的联系

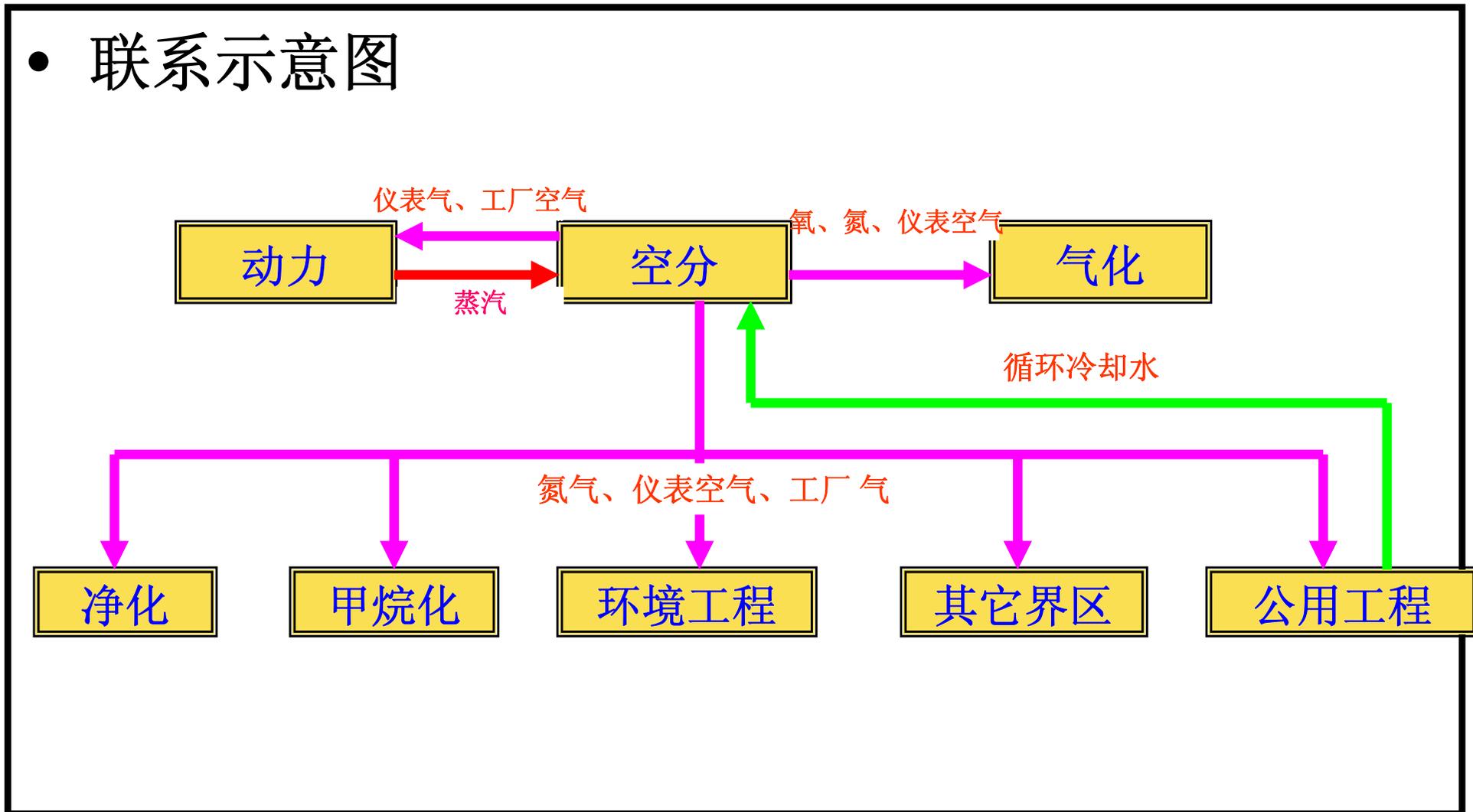
- 空分装置原始开车时，由动力分厂为空分装置提供驱动汽轮机用的高压蒸汽和蒸汽加热器用的中压蒸汽，空分装置原始开车时为自己提供仪表气源；
- 空分装置正常生产后，主要为下游气化装置提供氧气，作为气化装置的原料气参加反应；
- 压力氮气主要供下游工艺生产使用，作为汽提气、密封保护气和吹扫用气；

空分装置与其它界区的联系

- 高压氮气主要供下游净化装置开车升压时使用。
- 副产的工厂空气供空分及下游所有化工区使用，作为仪表气源和吹扫用气。

空分装置与其它界区的联系

• 联系示意图



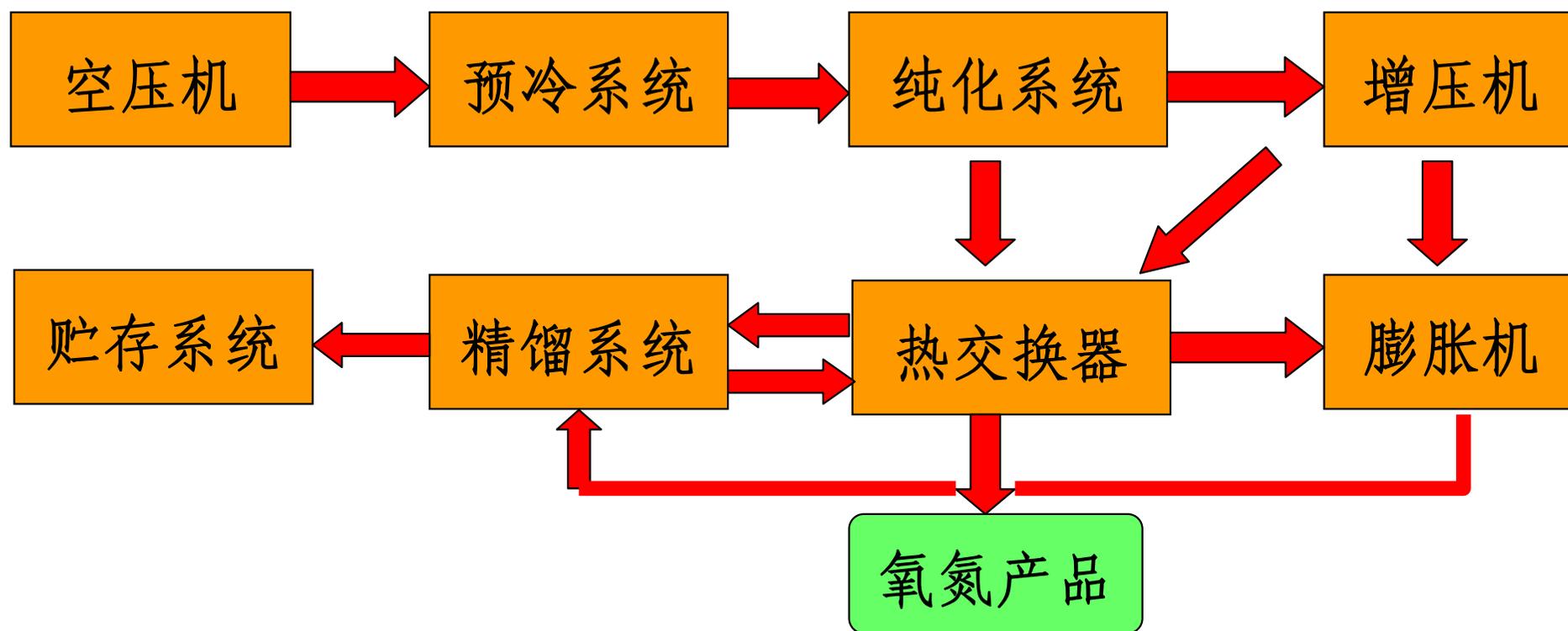
九、空分技术性能指标

产 品	产量Nm ³ /h	纯 度	压力 MPaG	备注
氧 气	48,000	99.8% O ₂	4.7	内压缩
液 氧	300	99.8% O ₂	0.16	
氮气I	25,000	≤ 10ppm O ₂	0.4	下塔抽取
氮气II	10,000	≤ 10ppm O ₂	4.1	开车时用气量包 含在氮气I中
氮气III	55,000	≤ 10ppm O ₂	0.008	通水冷塔

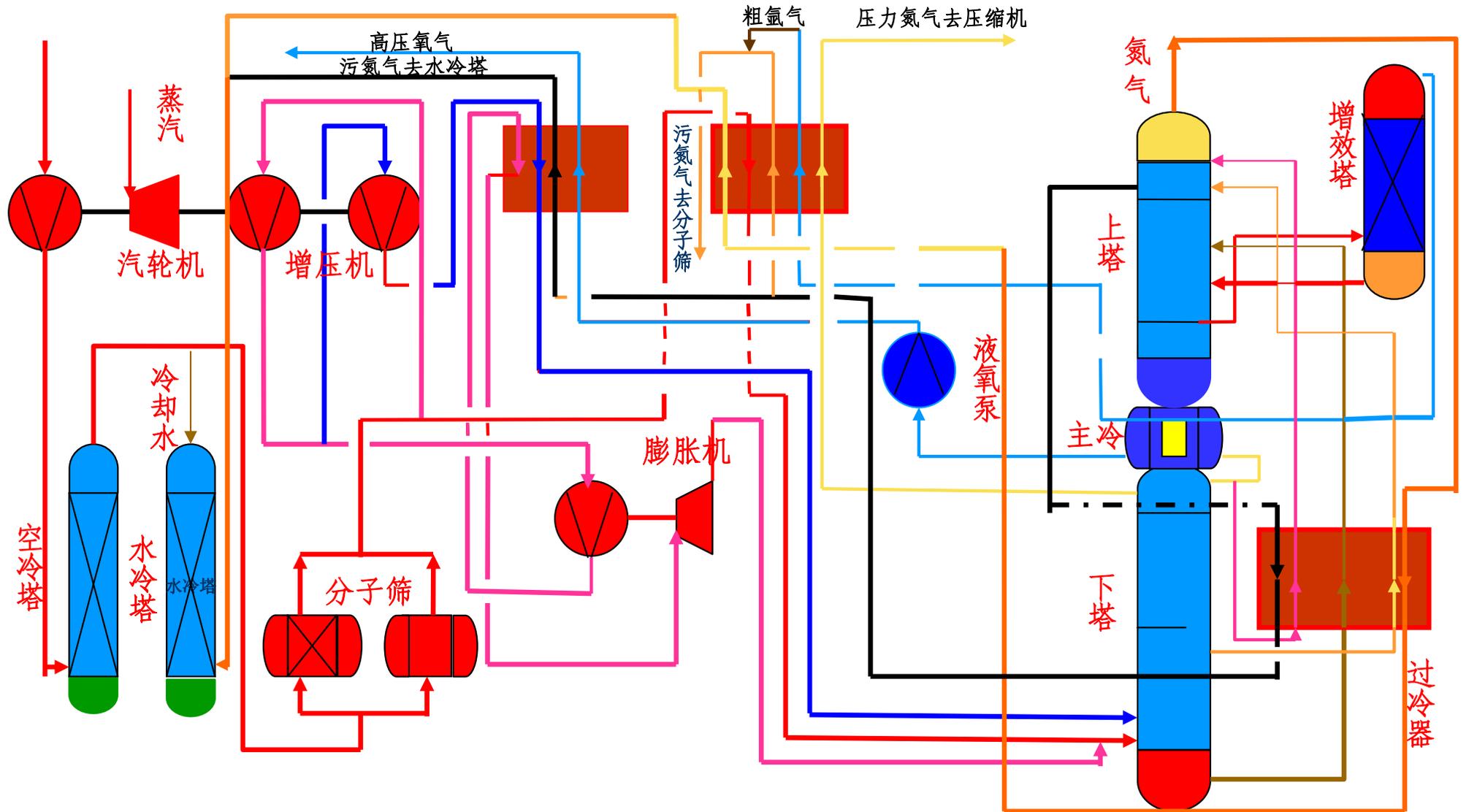
空分技术性能指标

液 氮	300	$\leq 10\text{ppm } O_2$	0.2	
仪表空气	6000	无油、无尘 压力露点： $\leq -40^\circ\text{C}$	0.7	增压机一级后抽 出减压
装置空气	5000	无油、无尘 压力露点： $\leq -40^\circ\text{C}$	0.4	分子筛后抽出
气化炉开工空 气	7000	无油、无尘 压力露点： $\leq -40^\circ\text{C}$	0.4	气化开车时使用 、分子筛后抽出

空分流程框图



十、空分工艺流程图



空分工艺流程

- 空分装置为分子筛净化空气、空气增压、膨胀空气进下塔、液氧内压缩流程，带中压空气增压透平膨胀机，采用规整填料上塔、增效氩塔工艺；
- 原料空气自吸入口吸入，经自洁式空气过滤器除去灰尘及其它机械杂质。过滤后的空气进入离心式空压机，经原料空气压缩机压缩后进入空气冷却塔冷却。冷却水为经水冷塔冷却后的低温水。空气自下而上穿过空气冷却塔，在冷却的同时，又得到清洗；
- 经空冷塔冷却后的空气进入切换使用的分子筛纯化器，空气中的二氧化碳、碳氢化合物和水分被吸附。分子筛纯化器为两只切换使用，其中一只工作时，另一只再生。纯化器的使用周期约为240分钟，定时自动切换；净化后的空气分为两股：一股进入低压板式换热器，与

空分工艺流程

- 返流的气体换热后出换热器底部后进入下塔，另一股去空气增压机；
- 进入空气增压机的空气经增压机第一段增压后分为两股：一股直接出增压机，经后过冷器冷却后进入膨胀机的增压风机中增压，然后被冷却器冷却至常温后进入高压板式换热器，再从高压板式换热器中部抽出进入膨胀机去膨胀。膨胀后的空气进入送入下塔；
- 另一股空气在增压机的第二段继续增压并经后过冷器冷却至常温后进入高压板式换热器，与高压液氧及返流污氮气体换热。这部分高压空气从换热器底部抽出经节流进入下塔；
- 空气经下塔初步精馏后，获得液空和污液氮，并经过冷器过冷后节流进入上塔。经上塔进一步精馏后，在上塔底部获得液氧，并经液氧泵

空分工艺流程

- 压缩后进入高压板式换热器，复热后出冷箱，进入氧气管网。另抽取液氧送入液氧贮存系统；
- 在下塔顶部获得纯液氮，送入液氮贮存系统；
- 在下塔顶部抽取压力氮气，经低压板式换热器复热后出冷箱，进入氮气管网；
- 从上塔中部抽取一定量的氩馏份送入增效粗氩塔，氩馏份经增效粗氩塔精馏后得到粗氩气。粗氩气经过低压板式换热器复热后出冷箱，可以与污氮气汇合去水冷塔也可以单独作为粗氩气产品；

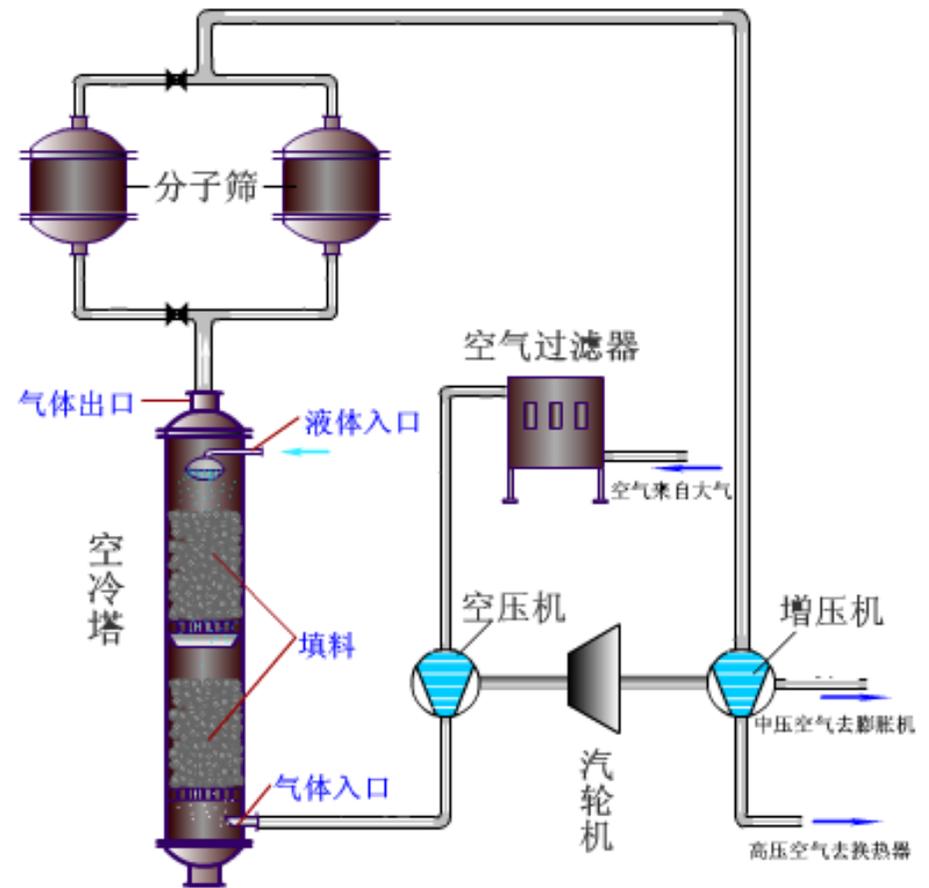
空分工艺流程

- 从上塔顶部抽取低压纯氮气经过冷器、低压板式换热器复热后送入水冷塔或送入用户管网；
- 从上塔上部引出污氮气经过冷器、低压板式换热器和高压板式换热器复热出冷箱后分成两部分：一部分进入分子筛系统的蒸汽加热器，作为分子筛再生气体，其余污氮气去水冷塔。

自洁式空气过滤器

- 空气过滤器

空气中含有大量的尘埃，空压机在长时间的高速运行中，粉尘会造成机器内部的叶轮、叶片等部件的磨损、腐蚀和结垢，缩短机器的使用寿命，因此设置空气过滤器，清除掉空气中的灰尘及杂质。



自洁式空气过滤器

作用：清除原料空气中的机械杂质、灰尘。

结构：由高效过滤筒、文氏管、自洁专用喷头、反吹系统、控制系统、净气室出风口、柜架等组成。

原理：在吸气负压作用下，空气穿过高效过滤筒，粉尘由于重力、静电和接触被阻留，净化空气进入净气室。可对大于1UM以上的灰尘过滤效率达99.9%，滤筒上的灰尘通过专用喷头吹除达到清除。

空压机组

- 空气压缩机

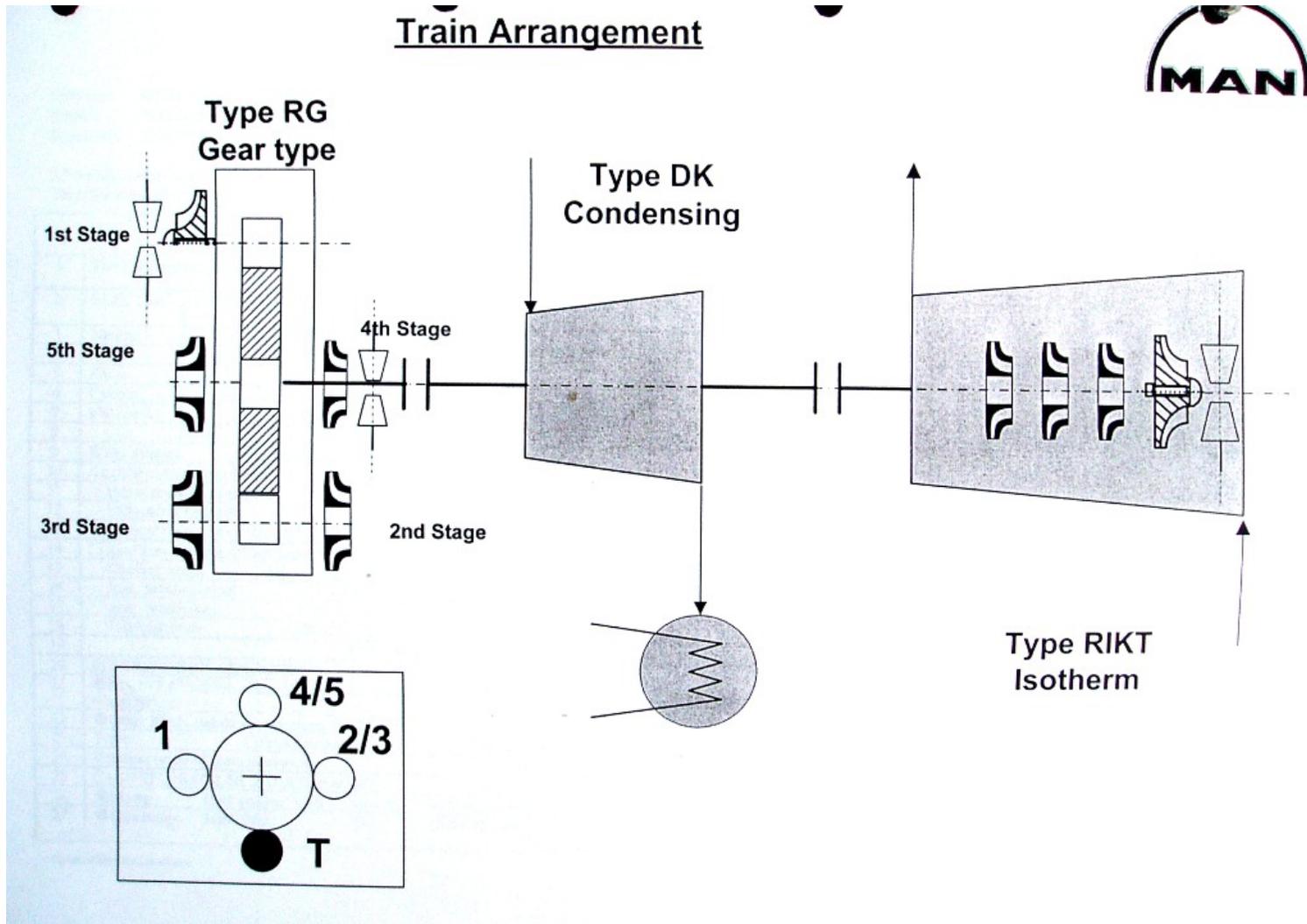
原料空气压缩机和增压空气压缩机

作用：提供带压原料空气。

由汽轮机拖动两台离心式压缩机



空压机组



空压机组

- 离心式压缩机是利用装于轴上带有工作轮的叶片在原动机的带动下做高速旋转运动，叶轮对气体做功，使气体获得动能，然后气体在扩压器中速度下降，动能转变为静压能，压力得到进一步提高的过程。
- 汽轮机的工作原理：利用高温高压蒸气进入喷嘴静叶栅中蒸气内能减少，动能增加，获得了很大的流速，蒸气的温度压力下降，高速气流冲击动叶片，使叶轮旋转，蒸气的热能又转化为转子的机械能，同时蒸气的温度压力下降。空气经自洁式过滤器过滤其中的机械杂质、灰尘等，然后进入原料空气压缩机经过四级压缩后，送至空气冷却塔冷却。

空压机组

- 来自分子筛纯化器的空气进入循环增压机，经三级压缩之后的空气一部分抽出送到膨胀机的增压端，另一部分进入增压机二段，继续压缩后在高压板式换热器与返流介质换热后进入下塔。

空气预冷系统

- 空冷、水冷塔
- 空气冷却塔
- 作用：用来降低进分子筛吸附器的空气温度与含水量，把空压机出来的高温气体（ $<116^{\circ}\text{C}$ ）冷却到 17°C 并使气体得到洗涤；
- 使用方式：空气从空冷塔下部进入，在填料表面与自上而下流过的冷却水和常温水进行热质交换，使并洗除空气中的一些有害杂质



空气预冷系统

- 压缩后的高温空气进入空气冷却塔下部，由下向上穿过空气冷却塔中的传热传质单元，依次与常温水 and 冷却水进行逆流接触而进行传热传质以达到冷却空气的目的，并除去大部分水溶性有害物质如 NH_3 、 SO_2 等。
- 水冷塔利用来自冷箱内污氮、氮气含水的不饱和性吸收蒸发潜热使循环水降温；通过低温水泵加压送入空冷塔上部对空气进行冷却，空冷塔和水冷塔为堆散填料塔，水泵为多级卧式离心泵。

分子筛纯化系统

- 分子筛吸附器

作用：吸附空气中水分、乙炔、 CO_2 等碳氢化合物。

结构：卧式圆筒体，内设支撑栅架。

使用方式：由于分子筛的吸附特性将空气中的水份、乙炔、 CO_2 等吸附，后被高温气体反向再生。分子筛吸附器成对交替使用，一只工作时，另一只被再生。



分子筛纯化系统

- 空气由多组分组成，除氧气、氮气等气体组分外，还有水蒸汽、二氧化碳、乙炔及少量的灰尘等固体杂质。这些杂质随空气进入空压机与空气分离装置中会带来较大危害，固体杂质会磨损空压机运转部件，堵塞冷却器，降低冷却效果；水蒸汽和二氧化碳在空气冷却过程中会冻结析出，将堵塞设备及气体管道，致使空分装置无法生产；乙炔进入空分装置后会导致爆炸事故的发生，所以为了保证制氧机的安全运行，清除这些杂质是非常有必要的。
- 分子筛吸附原理：
- 经空冷塔冷却后的空气一般在 18°C 左右进入吸附器内吸附纯化。水分、乙炔、二氧化碳都是极性或饱和分子。分子筛对它们都有很强的亲和力。分子筛的共吸附性能使它可以在吸水的同时还可以吸附其它

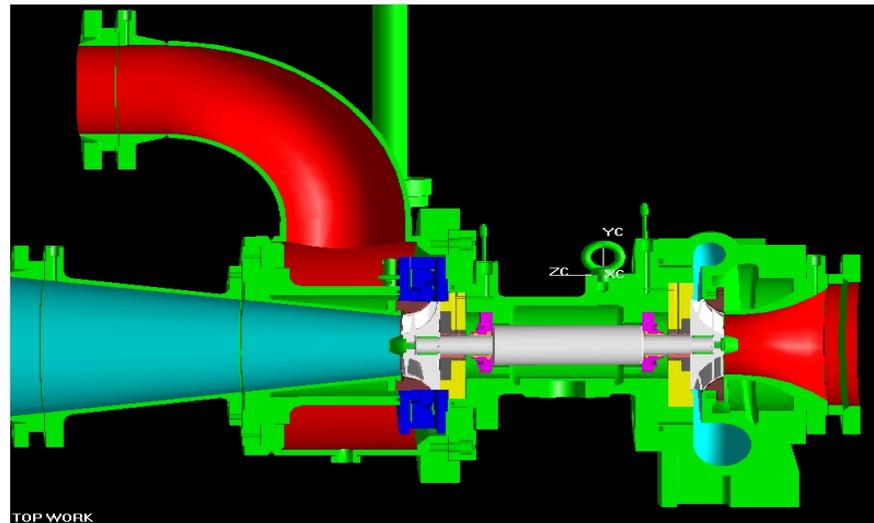
分子筛纯化系统

物质，这种亲和力的顺序是： $H_2O > C_2H_2 > CO_2$ 。

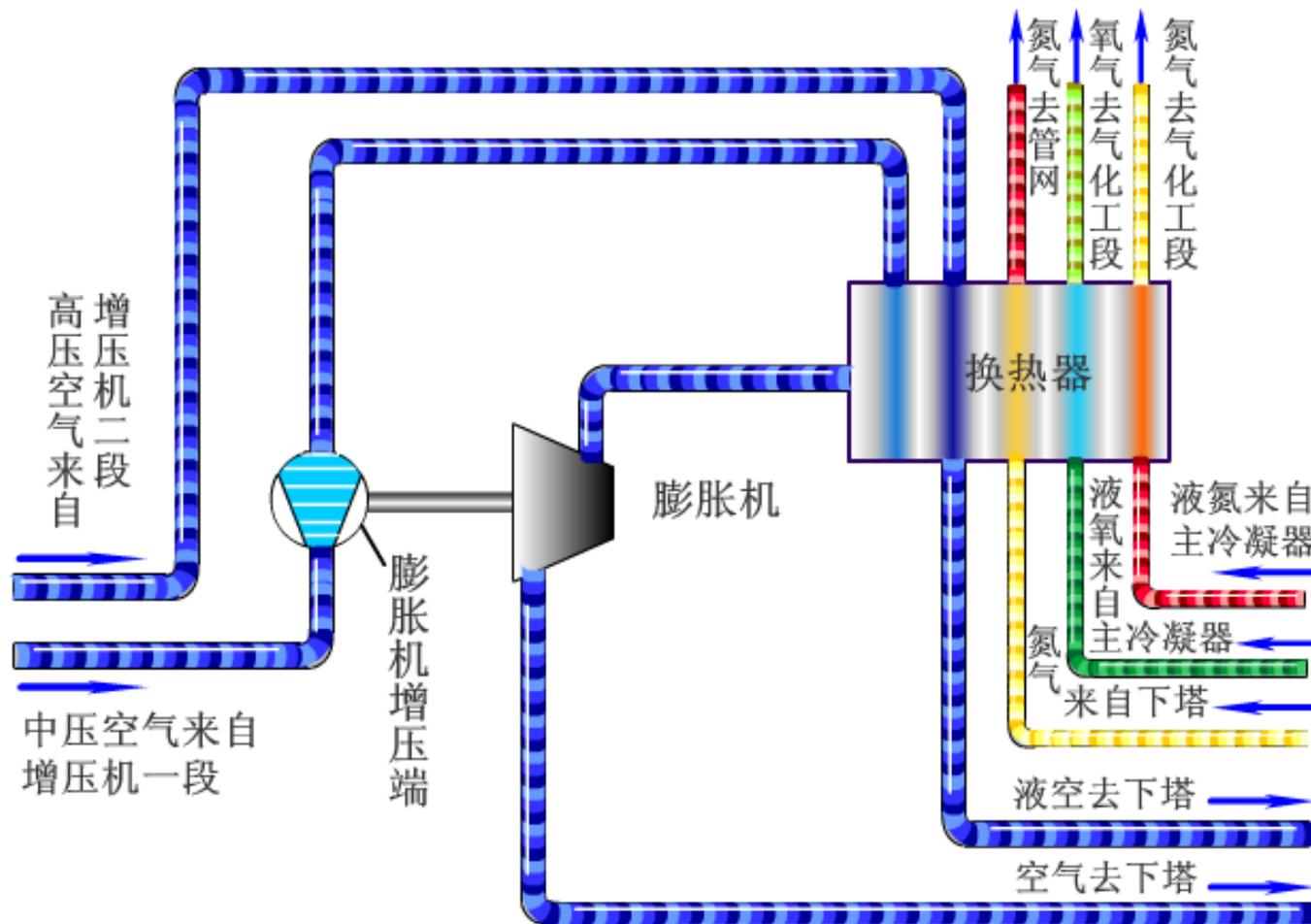
- 分子筛吸附系统采用长周期，双层床净化技术，切换系统采用无冲击切换控制技术，其作用是吸附空气中的水份、二氧化碳、乙炔、丙烯、丙烷、重烃等杂质。分子筛吸附器采用双层床结构，底层活性氧化铝床层可有效地保护分子筛，延长分子筛使用寿命，同时采用双层床也使吸附器再生阻力下降，再生温度降低，节约了再生能耗。

增压透平膨胀机

- 膨胀机
- 作用：膨胀机是空分设备的心脏部机之一，由气体在膨胀机中等熵膨胀而制取冷量，正常生产中为系统补充冷损。
- 工作原理：工质在透平膨胀机的通流部分膨胀获得动能，并由工作轮轴端输出外功，因而降低了膨胀机出口工质的内能和温度。



增压透平膨胀机



空气精馏系统

空气的精馏过程:

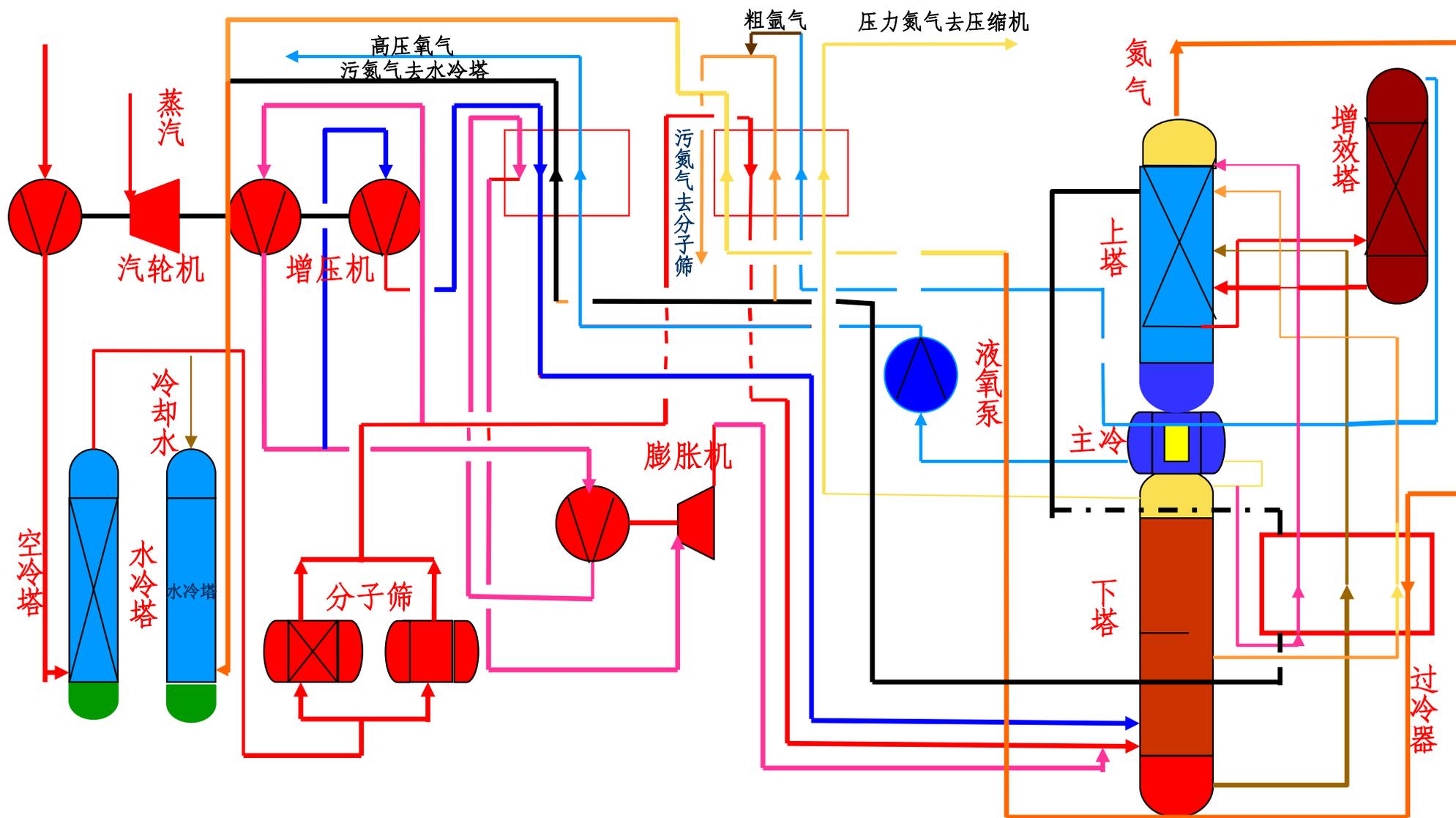
利用氧、氮的沸点不同，混合液体吸收上升蒸汽的热量而部分蒸发，沸点较低的氮较多的蒸发，而上升蒸汽在放出热量而部分冷凝，沸点较高的氧较多的冷凝，这样蒸气中的氮浓度越来越高，液体中的氧浓度也越来越高， 这样通过多次的部分蒸发与部分冷凝来完成整个精馏过程，从而将空气中的氧和氮分离开来。

- 分馏塔系统是空分装置的核心系统，其作用是利用低温精馏法将原料空气分离为氧、氮产品。分馏塔系统采用规整填料塔技术，具有氧提取率高，能耗低，下塔采用专用于大型空分设备的四溢流塔板技术流程，设置增加粗氮增效塔，提高空分氧提取率，减少原料空压机的排量，降低能耗。

空气精馏系统

- 采用全浸式操作方式，不会产生干蒸发，使单元内部液氧中碳氢化合物不浓缩。当液氧操作液位低于主冷凝蒸发器板式单元高度的80%时，报警系统立即报警。
- 采用截距较大的翅片，使液氧流动更通畅不易堵塞通道，并降低微小颗粒所产生的静电，从结构上根本解决了主冷内部的安全防爆问题。在液氧侧设有接地保护装置。
- 在整个液氧大池中，保持液氧侧较高的循环倍率，并通过加大液氧排放量使液氧底部不会出现易燃化合物的凝结。

空分系统流程图





谢谢大家！！