

# 气体深冷分离技术分析

金彦超

国家能源集团宁夏煤业烯烃一分公司 宁夏 银川 750000

**摘要：**本文对气体深冷分离技术进行了全面分析。基于混合气体各组分沸点差异，通过冷却至低温使其液化后精馏分离。阐述了压缩与预处理、冷却与液化、精馏分离、产品回收与返流的工艺流程，介绍了压缩机、换热器、精馏塔、膨胀机等关键设备。探讨了影响分离效果的因素，包括温度与压力控制、原料气组成、设备性能、操作与维护水平。为气体深冷分离技术的应用和优化提供了理论支持，有助于提升气体分离的效率和质量。

**关键词：**气体深冷分离；技术原理；关键设备

引言：随着工业发展对高纯度气体需求的增长，气体深冷分离技术的重要性日益凸显。该技术凭借其独特的原理和高效的分离能力，在化工、冶金等众多领域发挥着关键作用。然而，其应用也面临诸多挑战。本文旨在深入剖析气体深冷分离技术，从原理、工艺流程、关键设备到影响分离效果的因素进行系统探讨。

## 1 气体深冷分离技术原理

气体深冷分离技术是一种基于混合气体中各组分沸点差异的分离方法。通过将气体冷却至低温，使其部分或全部液化，然后利用精馏等手段实现不同组分的有效分离。

在标准状态下，不同气体具有明显不同的沸点。例如，氢气、甲烷、乙烷的沸点分别为 $-252.8^{\circ}\text{C}$ 、 $-161.5^{\circ}\text{C}$ 和 $-88.6^{\circ}\text{C}$ 。而空气的主要成分如氧气和氮气，也存在沸点差异，氧气沸点为 $-183^{\circ}\text{C}$ ，氮气沸点为 $-196^{\circ}\text{C}$ 。

深冷分离技术的具体原理如下：首先，将作为原料的气体进行压缩。压缩过程不仅能增加气体的压力，还有助于提高后续冷却的效果。接着，对压缩后的气体进行净化处理，除去其中的水分、二氧化碳、乙炔及其它碳氢化合物等杂质。这是非常重要的步骤，因为这些杂质可能会在低温下凝固或对设备造成损害，影响分离效果和设备运行。

净化后的气体进入主换热器，在这里被返流气体（如产品氮气、废气等）冷却至饱和温度，随后送入精馏塔底部。由于不同气体沸点存在差异，在精馏塔中，沸点较低的气体（如氮气）更容易蒸发，上升至塔顶得到分离，从而获得氮气产品；而液空（主要是液氧和液氮的混合物）经过节流后送入冷凝蒸发器蒸发，同时冷凝由精馏塔送来的部分氮气。冷凝后的液氮一部分作为精馏塔的回流液，另一部分则作为液氮产品输出。

从冷凝蒸发器出来的污氮气经过主换热器复热到一定温度后，一部分可用于分子筛的再生和吹冷，一部分

进入氨水冷却塔进行循环水降温等，其余部分则经消音器排入大气。在深冷条件下，气体的物理性质会发生显著变化，如沸点、密度等，这为分离过程创造了有利条件。然而，该技术也存在一些缺点，比如工艺设备复杂，前期投资较大；压缩、冷却过程能耗较高；设备的维护保养也相对不便。但随着技术的不断进步和发展，通过优化工艺流程、提高设备性能等措施，气体深冷分离技术的能耗已得到较大改善，其产品气体纯度高的优势也使得它在大规模气体分离领域，如空气制氧等方面，仍然具有重要地位<sup>[1]</sup>。目前，在我国约80%的制氧量是通过该方法完成的。

例如，在深冷制氮过程中，空气经空气过滤器清除灰尘和机械杂质后进入空气压缩机，压缩至所需压力，然后送入空气冷却器降低空气温度，再进入空气干燥净化器除去空气中的水份、二氧化碳、乙炔及其它碳氢化合物。净化后的空气进入空分塔中的主换热器，被返流气体冷却至饱和温度后送入精馏塔底部，在塔顶部得到氮气，液空经节流后送入冷凝蒸发器蒸发，同时冷凝由精馏塔送来的部分氮气，冷凝后的液氮一部分作为精馏塔的回流液，另一部分作为液氮产品出空分塔。由冷凝蒸发器出来的污氮气经主换热器复热到约 $130\text{K}$ 进膨胀机膨胀制冷为空分塔提供冷量，膨胀后的气体一部分作为分子筛的再生和吹冷用，然后经消音器排入大气。而由空分塔出来的液氮进入液氮贮槽贮存，当空分设备检修时，贮槽内的液氮进入汽化器被加热后，可送入产品氮气管道。通过这样的深冷制氮工艺，可制取纯度 $\geq 99.999\%$ 的氮气。

## 2 工艺流程

### 2.1 压缩与预处理

原料气体首先经过压缩环节，目的是提高其压力。这样做既有利于后续的冷却和分离过程，又可以增加单

位体积内气体的分子数量，从而提高分离效率。同时，必须进行预处理以去除杂质，例如水分、二氧化碳、硫化物等。这些杂质可能会在低温下冻结，导致设备堵塞，或者对分离效果产生不利影响。去除杂质的常见方法包括使用吸附剂、化学吸收剂或通过物理方法（如冷凝、过滤等）。

## 2.2 冷却与液化

经过压缩和预处理后的气体进入换热器。在换热器中，气体与返流的低温气体进行热交换，从而被冷却。随着温度的降低，气体逐渐接近其液化点。进一步的冷却会使气体部分或全部液化。这个过程中，利用不同气体沸点的差异，沸点较高的气体成分更容易先液化。

## 2.3 精馏分离

液化后的气体进入精馏塔，在这里进行多次气液平衡交换。精馏塔是实现精确分离的关键设备。由于不同组分的沸点存在差异，沸点低的组分（如氮气）在塔顶富集，而沸点高的组分（如氧气）则在塔底富集。

具体来说，进入精馏塔底部的液空在上升过程中，与下流的液体和上升的蒸气进行热量和质量交换。蒸气中的高沸点组分（如氧气）会逐渐冷凝，而液体中的低沸点组分（如氮气）会逐渐蒸发。这样，在塔顶得到的气相产品中氮气的浓度逐渐增加，而在塔底得到的液相产品中氧气的浓度逐渐提高。塔顶的氮气一部分作为产品引出，另一部分则返流回到换热器，为新进气体提供冷量，以维持系统的低温环境。塔底的富氧液体也可以进一步处理，以获得高纯度的氧气产品。

## 2.4 产品回收与返流

从塔顶和塔底分别获得高纯度的气体产品，如氮气和氧气。塔顶得到的高纯度氮气，一部分作为产品收集，另一部分返流至换热器，用于冷却新进的气体，实现冷量的回收利用，有助于维持系统的低温状态，降低能耗。塔底的液体中富含氧气，经过特定的处理步骤，如减压、蒸发等，可以得到高纯度的氧气产品。部分低温气体返流回到换热器，为新进气体提供冷量，以维持系统的低温环境，保证分离过程的持续进行。在实际的气体深冷分离工艺中，还需要精确控制各种参数，如压力、温度、流量等，以确保分离效果和产品质量。同时，设备的设计和选型也非常重要，要考虑到低温环境对材料性能的特殊要求，以及设备的密封性、稳定性和可靠性等因素。此外，为了提高能源利用效率和降低运行成本，还可能会采用一些节能措施和优化策略。

## 3 关键设备

### 3.1 压缩机

压缩机在气体深冷分离流程中扮演着先行者的角色，其主要作用是提升原料气体的压力，为后续的冷却和分离步骤奠定基础。压缩机的类型多种多样，其中离心式和往复式是较为常见的两种。离心式压缩机的工作原理基于离心力，通过高速旋转的叶轮对气体做功，使气体的压力和速度同时增加，然后在扩压器和蜗壳中进一步将动能转化为压力能。这种类型的压缩机具有流量大、运转平稳、结构相对简单且易于维护等优点，适合处理大流量的气体，在大规模的气体深冷分离装置中应用广泛。往复式压缩机则是通过活塞在气缸内的往复运动来实现气体的压缩。它的特点是适应压力范围广，能够达到较高的压缩比，对于处理高压工况具有独特的优势。然而，往复式压缩机的结构较为复杂，运动部件较多，容易产生振动和噪音，且维护成本相对较高。

### 3.2 换热器

换热器是实现气体之间热交换的关键设备。板式换热器以其高效的传热性能和紧凑的结构而备受青睐。这种换热器由隔板、翅片和封条组成，通过在隔板之间布置密集的翅片，极大地增加了传热面积。气体在狭小的通道内流动，与翅片和隔板进行充分的热交换。板式换热器的优点在于传热效率高、体积小、重量轻，能够在有限的空间内实现较大的换热量。绕管式换热器则适用于高压、低温且温差较大的工况。它由多层绕制的管道和外壳组成，气体在管内和管外流动，通过管壁进行热量交换。绕管式换热器具有结构坚固、耐高压、耐高温差等优点，但其制造工艺相对复杂，成本较高。

换热器的传热效率和紧凑性对于系统的经济性和占地面积有着直接的关联。传热效率高的换热器能够在更短的时间内实现所需的温度变化，减少能量损失，提高系统的能源利用率。而紧凑的结构设计则可以减小设备的体积，降低占地面积，从而降低装置的建设成本。为了提高换热器的性能，除了选择合适的类型外，还需要优化换热器的流道设计、翅片结构和材料选择等方面，以减少热阻、增强传热效果。

### 3.3 精馏塔

精馏塔是气体分离的核心设备，通常采用填料塔或板式塔的形式。塔内的填料或塔板结构设计对气液接触效果和分离效率有着直接的影响<sup>[2]</sup>。在精馏塔中，由于不同组分的沸点差异，沸点低的组分（如氮气）会在塔顶富集，而沸点高的组分（如氧气）则在塔底富集。合理设计的填料或塔板结构可以增加气液接触面积和接触时间，提高分离的精度和效率。

### 3.4 膨胀机

膨胀机在气体深冷分离系统中发挥着重要的制冷作用，它利用气体的膨胀做功来获取冷量，降低系统的温度。透平膨胀机是一种基于旋转叶轮的高速设备，其工作原理类似于涡轮机。高压气体进入透平膨胀机的叶轮通道，在膨胀过程中气体的压力和温度急剧下降，同时推动叶轮高速旋转，输出机械功。透平膨胀机具有效率高、制冷量大、运行平稳等优点，适用于大规模的深冷分离装置。活塞膨胀机则通过活塞在气缸内的往复运动来实现气体的膨胀。它的结构相对简单，但其制冷量和效率通常较透平膨胀机低，适用于一些小型或特殊的应用场合。膨胀机的效率和可靠性对于系统的制冷效果至关重要。高效的膨胀机能够在相同的压力降条件下产生更多的冷量，从而降低系统的能耗和运行成本。同时可靠的膨胀机能够长期稳定运行，减少故障停机时间，提高整个深冷分离装置的运行效率。

#### 4 影响分离效果的因素

##### 4.1 温度与压力控制

深冷温度和压力的精确控制对气体的液化程度和精馏效果起着直接的作用。过低的温度和压力可能导致气体无法充分液化，影响分离的进行；而过高的温度和压力则可能引起能耗的增加，甚至对设备造成损坏。

例如，在一定压力下，温度的变化会影响各组分的饱和蒸汽压和沸点。如果温度偏离了最佳范围，气液平衡状态会被打破，导致分离效果下降。此外，压力的控制也非常关键。较高的压力可能使气液间浓度差变小，增加精馏的难度；而适当降低压力可以加大气液相浓度差，有利于氧气的分离，但过低的压力也可能带来其他问题，如设备的密封性要求提高等。

##### 4.2 原料气组成

原料气中各组分的含量和性质对分离工艺和设备的选择有着重要影响。复杂的原料气组成会增加分离的难度和成本。

不同组分具有不同的沸点和物化性质，这会影响它们在深冷分离过程中的行为。例如，原料气中如果含有较多高沸点或难以分离的组分，可能需要更复杂的精馏

塔设计或额外的处理步骤。此外，一些微量组分的存在也可能对分离效果产生影响，特别是在制取高纯度产品时，如氩气对制取高纯氧、氮产品的影响就不可忽视。

##### 4.3 操作与维护水平

操作人员的技能水平和对工艺的熟悉程度对保证系统的长期稳定运行和良好的分离效果起着关键作用。操作人员需要准确地控制温度、压力等参数，及时发现和处理设备运行中的异常情况。如果操作不当，例如温度或压力波动过大，可能导致分离效果不稳定。同时设备的定期维护和保养也非常重要。这包括对设备进行检查、清洗、更换磨损部件等。老化、堵塞或故障的设备会严重影响分离效果和系统的稳定运行。例如，换热器的结垢会降低传热效率，压缩机的故障可能导致压力不稳定等。

为了提高气体深冷分离效果，需要综合考虑以上各个因素。在实际操作中，应根据原料气的组成和性质，选择合适的分离工艺和设备，并严格控制温度、压力等操作参数<sup>[1]</sup>。同时，要注重操作人员的培训，提高其技能水平和责任心，确保设备的定期维护和保养工作得到有效执行。

结语：综上所述，气体深冷分离技术在气体分离领域具有显著优势，但也存在一定的局限性。对其工艺流程、关键设备及影响因素的深入研究，有助于我们进一步优化该技术。未来，随着技术的不断进步和创新，有望通过改进设备性能、优化操作工艺等手段，提高分离效率、降低成本、增强稳定性。

#### 参考文献

- [1]杨峰,樊新武,司慧媛等.深冷处理对高速钢刀具性能的影响[J].工具技术,2014,48(04):43-46.
- [2]李春雨,孙艳丰,赵志伟等.基于AspenPlus的煤层气深冷分离工艺模拟研究[J].现代化工,2023,43(12):182-187.
- [3]马贵阳,张建东,李浩等.基于Matlab/Simulink的CO<sub>2</sub>载冷深冷分离流程仿真与优化[J].化工进展,2023,42(11):5385-5394.