

内压缩与外压缩流程在高纯氮装置中的技术经济对比研究

潘群

空气化工产品（中国）投资有限公司南京分公司

摘要：本文主要研究高纯氮装置里内压缩和外压缩两种流程的技术和经济情况。先简单讲讲高纯氮装置的基本情况，比如现在市场上对高纯氮的需求情况，还有装置大概是怎么运行的。之后会分别对这两种流程的运行原理和技术特点做详细分析。比如内压缩流程是怎么压缩气体的，外压缩流程又有哪些不一样的地方。再对比两种流程在运行效率、成本方面的表现，全面评估内压缩流程和外压缩流程在高纯氮装置中的技术经济状况。同时，还对这两种流程的环境影响与可持续性展开探讨。

关键词：高纯氮装置；内压缩流程；外压缩流程；技术经济对比

一、高纯氮装置概述

1.1 高纯氮的市场需求分析

科技不断进步，工业发展速度也在加快，高纯氮在越来越多的领域里派上了用场。在电子工业里，高纯氮常被当作保护气体来用。比如半导体制造、集成电路封装这些关键环节，都需要它来帮忙，这样才能让生产出来的产品质量更有保障，性能也更稳定。化工领域也离不开高纯氮。合成氨、尿素这些常见的化工产品生产时要用到它，而且在一些化学反应里，它还能作为惰性气体，给反应过程提供安全的环境。除了这两个领域，食品包装、医药制造、金属热处理这些地方，高纯氮同样发挥着挺重要的作用。随着这些行业一步步发展起来，对高纯氮的市场需求也慢慢增加，呈现出稳定上升的态势。

1.2 高纯氮装置的工作原理

高纯氮装置制取高纯氮气的核心技术是空气分离。整个过程要经过空气压缩、净化、冷却和精馏等环节。空气首先会被压缩机压缩到特定压力，之后进入净化系统。这个系统主要用来去除空气中的水分、二氧化碳和乙炔等杂质，避免这些物质影响后续的分离步骤。净化后的空气会被冷却到接近液化的温度，然后送入精馏塔。精馏塔的工作原理是利用空气中不同成分沸点的差异，通过多次的部分蒸发和部分冷凝，把氮气和氧气分离开。从精馏塔顶部得到的氮气还需要进一步处理，比如通过吸附干燥去除残留水分，或者用催化脱氧的方式降低氧气含量。经过这些步骤后，氮气就能达到高纯度的要求，供给电子、化工等行业使用。

二、内压缩流程技术分析

2.1 内压缩流程的工作原理

内压缩流程的核心操作集中在低温精馏塔内。当塔内完成氮气和氧气的分离后，塔顶会得到纯度较高的氮气，接下

来要对这些氮气进一步加压处理。和外压缩流程比起来，内压缩流程不需要用到中压氮气压缩机这类设备。具体操作时，精馏塔分离出高纯氮气后，工作人员会用液氮泵把液氮加到需要的压力，再通过换热器让液氮重新变成气体，这样就能得到有一定压力的高纯氮气了。这种流程的特别之处在于，加压的步骤是在低温环境下通过液氮泵完成的。少了一些中间步骤和设备，系统整体的工作效率和稳定程度都能有所提升。

2.2 内压缩流程的技术特点

内压缩流程在技术层面有不少值得关注的特点。比如说设备集成度这一块，因为不用额外装中压氮气压缩机这类设备，整个系统占的地方小了很多，对那些场地空间紧张的企业来说特别实用，买设备的钱也能省下来不少。从运行状态来看，这种流程的稳定性也比较突出。在低温环境下靠液氮泵完成压缩步骤，中间要走的环节少了，设备出问题导致系统不稳定的情况也跟着减少，能更持续地生产出纯度高的氮气。能耗方面的表现也不错。和外压缩流程比起来，内压缩流程少了一些能量转换的步骤，能源用起来更高效，企业长期用下来能省一大笔能源费用。操作和维护上也有优势。系统里的设备数量不多，操作步骤相对简单，对操作人员的技术水平要求没那么高，平时需要维护的地方也少，人力成本和维护时的难度都降了下来。

三、外压缩流程技术分析

3.1 外压缩流程的工作原理

在高纯氮装置的技术领域里，内压缩和外压缩两种流程的对比一直是行业内讨论的重点方向。外压缩流程作为常用技术之一，它的操作方式和内压缩有明显区别。外压缩流程的核心特点是气体压缩环节放在空分设备的外部完成。具体操作时，空气首先要经过过滤、预冷等前期处理，把里面的

灰尘、水分等杂质去掉。处理后的空气会进入空气压缩机进行压缩，压缩后的空气温度会升高，这时候需要通过冷却器降温，这样能减少后面步骤的能量消耗。降温后的空气还要进入纯化器，进一步清除二氧化碳、碳氢化合物这些微量杂质，保证空气足够纯净才能进入下一步。纯净的空气进入精馏塔后，通过低温精馏的方法把氮气和氧气等成分分开，就能得到高纯度的氮气了。最后，从精馏塔分离出来的高纯氮气会被送到外置的氮气压缩机里再次压缩，达到使用需要的压力后，再输送到使用的地方或者储存起来。

3.2 外压缩流程的技术特点

外压缩流程的第一个特点是灵活性强。比如说，企业生产时对氮气的压力大小、输送量多少常有不同要求，这套流程能通过调整压缩机的运行参数来适配，不管是小批量实验用还是大规模生产用，都能满足需求。另外，它的设备摆放比较简单，占的地方不大。很多工业场地本身空间就紧张，这种节省土地的设计刚好能解决场地受限的问题，不用额外扩建就能放下整套装置。

从维护角度看，外压缩流程也有优势。因为主要的压缩设备都放在外面，工作人员日常检查、修理起来都方便，发现小故障能及时处理，不会让设备问题影响整个生产的稳定运行。还有一点是对空气预处理的要求不高。前期不用花太多钱买复杂的预处理设备，日常运行时的能耗也低一些，这对控制项目的初期投资和长期运营成本都有帮助。

四、技术经济对比研究

4.1 内压缩与外压缩流程的效率对比

在效率对比方面，内压缩流程和外压缩流程各有特点。内压缩流程把压缩环节放在精馏塔内部，少了中间步骤，氮气压缩时的能量损失比较小，整体热效率更高。而且它能更好利用精馏塔的低温环境，让能量分步骤使用，进一步提升能源利用效率。外压缩流程虽然更灵活，但氮气从精馏塔出来到外置压缩机的过程中，会散失一些能量，外置压缩机还得额外消耗能量来达到需要的压力，所以能源利用效率比内压缩流程差一点。不过外压缩流程的设备运行更稳定，独立的压缩系统不会受精馏塔内部工况波动的影响，能保证氮气供应的连续和稳定。

具体来说，内压缩流程在能量回收上做得不错。通过优化精馏塔内部结构，冷凝时释放的潜热能被有效回收，转化成压缩需要的能量，进一步降低能耗。外压缩流程的能量回收主要靠外部热交换系统，技术虽然成熟，但受设备布局 and

热传递效率限制，整体能量回收率较低。内压缩流程启动时间短，能快速达到设计工况。外压缩流程因为要预热和调试外置压缩机，启动过程更复杂，耗时更长。不过处理大规模高纯氮生产时，外压缩流程可以通过模块化设计让多台压缩机一起运行，在一定程度上弥补效率的不足。

内压缩流程的精馏塔内部压缩机制让整个系统更紧凑，减少了占地面积和管道损失，对空间有限或布局要求高的生产环境很重要。同时，它减少了氮气和外界接触的机会，降低了氮气被污染的风险，提高了产品纯度的稳定性。外压缩流程通过多级过滤和净化也能保证氮气纯度，但这一环节比内压缩流程繁琐，还会额外消耗能量。从长期运行来看，内压缩流程结构简单，维护点少，维护成本低，故障率也低，有助于降低整体运营成本。外压缩流程设备独立性高，方便维修和更换，但机械部件和管道系统更多，维护复杂度和成本也相应增加。

4.2 内压缩与外压缩流程的成本分析

从设备投资成本上看，内压缩流程把压缩环节整合到精馏塔里面，设备结构要更复杂些，对制造工艺和材料的要求也更高，所以一开始买设备的钱通常会比外压缩流程多。外压缩流程用的是单独的压缩系统，设备组成相对简单，买设备和安装设备花的钱会少一些。运行成本这块，内压缩流程的能源利用效率比较高，在用电这些能源成本上有一定优势，长时间用下来能省不少钱。外压缩流程因为有能量散失，加上外置压缩机还要额外耗电，能源成本会更高一些。另外，外压缩流程的设备维护起来相对简单，维护成本可能比内压缩流程低一点；内压缩流程的设备集成度高，要是出了故障，维修难度和成本可能相对较大。

从长期投资回报的角度分析，内压缩流程虽然一开始投入多，但运行成本低，要是生产规模大、运行时间长，随着能源成本省下来的钱越积越多，总体成本可能会慢慢比外压缩流程低。外压缩流程在生产规模小、对设备启动时间要求不高或者运行时间不连续的场景里，因为初始投资低、维护简单，可能更有成本优势。不同地区的能源价格不一样，也会影响两种流程的成本分析。在能源价格高的地方，内压缩流程在能源成本上的优势会更突出；在能源价格低的地方，外压缩流程的成本竞争力可能会有所提升。

五、运营成本与维护成本分析

5.1 内压缩流程的运营与维护成本

内压缩流程在实际运行时，因为能更高效地利用能源，

所以用电方面的成本不算高。不过，它的精馏塔内部有一套复杂的压缩结构，得定期找专业人员用专用设备来检查和维护，这样才能让整个流程一直稳定运转。这就需要安排懂技术的人员，还要准备对应的检测工具，自然会多花一些人力和物力。要是精馏塔内部的压缩部分出了问题，由于设备本身集成度高、结构又复杂，维修的时候得花不少时间和精力去找出问题在哪儿，然后再进行修复。而且有些关键的零件可能得从特定的供应商那里买，等零件的时间也长，这些都会让维护的成本变高。另外，为了让内压缩流程能长期保持高效运行，还得给操作人员做系统的培训，让他们熟悉设备怎么操作、维护时要注意哪些要点。这些培训工作虽然不是直接的成本支出，但也会间接增加整个运营过程中的成本投入。

5.2 外压缩流程的运营与维护成本

外压缩流程在实际运行中，得靠外部的压缩机来提供所需的压缩气体。这就导致它的用电成本比较高，毕竟压缩机得一直开着才能满足生产上的需求。和内压缩流程比起来，外压缩流程的设备结构要简单一些。平时的检查和维护工作，一般技术人员就能做，不需要用特别专业的检测工具，这样人力和物力上的花费就少了。

外压缩流程的设备大多是模块化设计的，要是某个模块出了问题，能很快换掉修好，维修所花的时间比较短。另外，因为设备的通用程度高，买关键零件也方便，不用只盯着某几个特定的供应商买。不过外压缩流程的设备因为长时间运转，零件磨损、设备老化的问题可能会更明显。这就需要定期花点钱更新、升级设备，这样才能保证生产稳定进行，维持住生产效率。

六、环境影响与可持续性分析

6.1 内压缩流程的环境影响评估

内压缩流程在实际运行时，对环境的影响主要集中在能源使用和排放两个方面。这类流程一般会用到效率较高的节能压缩技术，能源的利用效率比普通流程要高一些，这在一定程度上减少了不必要的能源浪费，也让温室气体的排放量有所降低。不过，就算用了先进技术，内压缩流程在压缩环节还是会产生一定的噪音和热量，这些都会对周边环境带来一些影响。另外，流程里用到的设备在运行时可能需要润滑油之类的辅助材料，如果这些材料发生泄漏，或者处理方式不够恰当，也可能对环境造成污染。从实际操作的角度来看，在内压缩流程的设计和运行过程中，得把环保因素考虑进去，

采取一些有效的办法来降低它对环境的影响。比如说优化设备的摆放位置，这样能减少噪音的传播；再比如加强对设备的日常维护，防止润滑油出现泄漏的情况。

6.2 外压缩流程的环境影响评估

外压缩流程在实际运行时，对周边环境的影响需要重点关注。和内压缩流程比起来，外压缩流程得额外用外部压缩机来提供压缩气体，这就导致它消耗的能源一般更多，这在某种程度上让能源浪费和温室气体排放的情况更明显了。外压缩流程运行时还会发出噪音、散出热量，这些都会对周围环境造成一定干扰。像外部压缩机这类设备，在日常维护和运行的时候，可能要用到润滑油、冷却液之类的辅助材料，如果这些材料发生泄漏或者处理方式不对，也可能给环境带来污染。在外压缩流程的设计和运行环节，环保方面的因素得特别重视。可以选用噪音小、能耗低的设备，也可以加强设备的日常维护和保养，还可以对产生的废弃物进行合理处理，这些措施都能帮助降低外压缩流程对环境的影响。

结语

在高纯氮装置的技术经济对比研究里，内压缩和外压缩这两种流程各有自己的长处和需要应对的问题。从工作原理、技术特点这些基础层面入手，再到效率、成本和对环境的影响，把这些方面都分析清楚，就能更全面地了解它们在实际使用中的情况。内压缩流程因为高效、节能还环保，在很多场景里都能发挥不小的作用；外压缩流程则靠着灵活和能适应不同情况的特点，在一些特定条件下还是没法被其他流程替代的。随着技术一步步改进，环保方面的要求也越来越高，高纯氮装置在设计 and 运行的时候，会更看重怎么提高能效、怎么减少对环境的影响，这些变化也会推动整个行业朝着更加绿色、可持续的方向发展。

参考文献

- [1] 邓韬. 氮气制备设备变压吸附工艺控制与改进. 化工设计通讯, 2024(12):56-58.
- [2] 朱程浩; 季志文; 黄明亮. 几种氮气的制取工艺流程与比较[J]. 低温与特气, 2023(06):32-35.
- [3] 王玉军; 肖立; 叶国兵; 史洲剑. 变压吸附制氮系统设计及对比分析[J]. 广东化工, 2024(16):110-112.
- [4] 王颖丹. 制氮工艺流程的优化及效果评测[J]. 山西化工, 2023(08):95-97.
- [5] 刘钊; 卢克超; 龙飞飞; 蒋波; 李林龄. 变压吸附制氮设备压紧装置优化改造[J]. 石化技术, 2022(07):186-187