化工空分过程中能量回收与效率提升方法

王杰杰　柴育鹏

连云港石化有限公司　江苏　连云港　222000

摘　要：本文聚焦于化工空分过程，深入探讨了能量回收与效率提升的重要意义。详细分析了当前化工空分过程中能量利用存在的问题，如设备能耗高、能量回收不充分等。在此基础上，提出了一系列针对性的能量回收与效率提升方法，包括优化工艺流程、采用先进设备与技术、加强系统集成与优化控制等方面。通过实际案例分析，验证了这些方法在降低能耗、提高能量回收效率和提升整体生产效率方面的有效性，为化工空分行业的可持续发展提供了有益的参考。

关键词：化工空分；能量回收；效率提升；工艺优化；先进设备

1 引言

化工空分过程是化工生产中至关重要的环节，其主要目的是将空气中的氧气、氮气等组分分离出来，以满足不同化工生产过程的需求。然而，空分过程是一个高能耗的过程，需要消耗大量的电能来驱动空气压缩机、制冷设备等。在全球能源资源日益紧张、能源价格不断上涨以及环保要求日益严格的背景下，如何实现化工空分过程中的能量回收与效率提升，降低生产成本，减少对环境的影响，已成为化工行业亟待解决的重要问题。能量回收与效率提升不仅有助于降低企业的运营成本，提高企业的经济效益，还能减少能源消耗和污染物排放，实现节能减排和可持续发展的目标。因此，深入研究化工空分过程中能量回收与效率提升方法具有重要的现实意义和长远的发展价值。

2 化工空分过程能量利用现状及问题

2.1 化工空分过程能量消耗的主要环节

化工空分过程主要包括空气压缩、空气净化、空气冷却、空气分离以及产品气体的压缩和输送等环节。其中，空气压缩环节是能量消耗最大的环节，通常需要消耗整个空分系统总能量的 80% - 90%。空气经过多级压缩机压缩后，压力升高，温度也随之升高，需要经过冷却器进行冷却，以降低温度，保证后续分离过程的顺利进行。此外，空气净化过程需要消耗一定的能量来驱动空气过滤器、吸附器等设备；空气冷却过程需要消耗制冷剂来降低空气温度；产品气体的压缩和输送也需要消耗一定的能量。

2.2 当前能量利用存在的问题

2.2.1 设备能耗高

目前，部分化工空分企业使用的设备技术相对落后，效率较低。例如，一些老旧的空气压缩机采用活塞式或离心式结构，其等温效率较低，能量损失较大。此外，设备的维护保养不及时，导致设备性能下降，能耗进一步增加。

2.2.2 能量回收不充分

在化工空分过程中，存在大量的余热、余压等可回收能量，但目前的回收利用率较低。例如，空气压缩过程中产生的大量压缩热，通常通过冷却器直接排放到环境中，造成了能量的浪费[1]。另外，产品气体在输送过程中产生的余压也没有得到充分的回收利用。

2.2.3 工艺流程不合理

部分化工空分企业的工艺流程设计不够优化，存在一些不必要的环节和能量损耗。例如，空气冷却过程中使用的制冷剂循环系统设计不合理，导致制冷效率低下，能量消耗增加。此外，不同环节之间的能量匹配不合理，也影响了整体能量利用效率。

2.2.4 系统集成度低

化工空分系统通常由多个子系统组成，如空气压缩系统、空气净化系统、空气冷却系统、空气分离系统等。目前，这些子系统之间的集成度较低，缺乏有效的协同控制和优化调度，导致系统整体效率不高。

3 化工空分过程中能量回收方法

3.1 余热回收

3.1.1 空气压缩余热回收

空气压缩过程中产生的大量压缩热可以通过余热回收装置进行回收利用。常见的余热回收方式有热水型、蒸汽型和有机朗肯循环（ORC）型等。热水型余热回收装置是将压缩热通过换热器传递给水，将水加热成热水，用于供暖、生活热水或工艺用热等[2]。蒸汽型余热回收装置则是将压缩热用于产生蒸汽，蒸汽可以用于驱动蒸汽轮机发电或为其他工艺过程提供热源。ORC 型余热回收装置是利用低沸点有机工质在余热的作用下蒸发，然后驱动膨胀机做功发电，适用于中低温余热的回收利用。

3.1.2 空气冷却余热回收

在空气冷却过程中，空气温度降低，会释放出一定的冷量。可以通过热泵技术将这部分冷量回收利用，用于空气压缩前的预冷或其他需要冷却的工艺过程。热泵

是一种能够将低位热源的热量转移到高位热源的装置，通过消耗少量的电能，可以实现热量的从低温向高温的转移。

3.2 余压回收

3.2.1 产品气体余压回收

化工空分过程中产生的氧气、氮气等产品气体在输送过程中具有一定的压力，这部分余压可以通过膨胀机进行回收利用。膨胀机是一种将气体的压力能转化为机械能的设备，气体在膨胀机中膨胀做功，带动发电机发电或驱动其他设备运转。通过余压回收，不仅可以降低产品气体的输送能耗，还能回收一部分能量用于发电或其他用途。

3.2.2 空气压缩余压回收

在空气压缩过程中，部分压缩空气可能会因为系统压力波动或其他原因而需要排放。这部分排放的压缩空气具有较高的压力，可以通过余压回收装置将其压力能回收利用。例如，可以采用气动马达将压缩空气的压力能转化为机械能，驱动其他设备运转。

3.3 冷量回收

3.3.1 液态产品冷量回收

化工空分过程中生产的液态氧、液态氮等产品在蒸发过程中会吸收大量的热量，产生冷量。可以通过冷量回收装置将这部分冷量回收利用，用于空气压缩前的预冷、空气净化过程中的吸附剂再生或其他需要冷却的工艺过程。冷量回收装置通常采用换热器将液态产品蒸发产生的冷量传递给需要冷却的介质，实现冷量的回收和再利用。

3.3.2 制冷系统冷量回收

在空气冷却过程中使用的制冷系统，如氨制冷系统或氟利昂制冷系统，会产生一定量的冷量。可以通过优化制冷系统的设计和运行，将这部分冷量充分回收利用[3]。例如，可以采用多级制冷系统，将不同温度级别的冷量分别用于不同的工艺过程，提高冷量的利用效率。

4 化工空分过程效率提升方法

4.1 优化工艺流程

4.1.1 采用先进的空分工艺

目前，化工空分行业常用的工艺有低温精馏法、变压吸附法和膜分离法等。低温精馏法是传统的空分工艺，具有分离效率高、产品纯度高等优点，但能耗较大。变压吸附法是一种基于吸附剂对不同气体组分吸附选择性差异的分离方法，具有能耗低、操作简单等优点，但产品纯度相对较低。膜分离法是利用膜对不同气体组分的渗透速率差异进行分离的方法，具有能耗低、设备简单等优点，但目前膜的性能还有待进一步提高。企业可以根据自身的生产需求和能源状况，选择合适的空分工艺，或者采用多种工艺相结合的方式，以提高能量利用效率和产品纯度。

4.1.2 优化空气压缩流程

空气压缩是化工空分过程中能耗最大的环节，优化空气压缩流程对于降低能耗具有重要意义。可以采用多级压缩、中间冷却的方式，降低每级压缩的压缩比，减少压缩过程中的能量损失。同时，合理选择压缩机的类型和级数，根据空气流量和压力要求进行优化配置，提高压缩机的效率。此外，还可以采用变频调速技术，根据空气需求的变化实时调整压缩机的转速，避免压缩机在低负荷运行时能耗过高。

4.1.3 优化空气冷却流程

空气冷却过程是影响空分系统能耗的重要因素之一。可以采用高效的冷却设备和冷却方式，提高冷却效率，降低冷却能耗。例如，采用蒸发式冷凝器代替传统的水冷式冷凝器，可以利用水的蒸发潜热来吸收空气的热量，减少冷却水的用量和冷却水泵的能耗。同时，优化冷却水循环系统的设计，提高冷却水的循环利用率，降低水资源的消耗。

4.2 采用先进设备与技术

4.2.1 采用高效空气压缩机

空气压缩机是化工空分系统的核心设备，其效率直接影响整个系统的能耗。采用高效的空气压缩机，如离心式空气压缩机或螺杆式空气压缩机，可以提高压缩效率，降低能耗。离心式空气压缩机具有流量大、压力高、效率高等优点，适用于大型化工空分系统[4]。螺杆式空气压缩机具有结构简单、运行可靠、维护方便等优点，适用于中小型化工空分系统。此外，还可以采用磁悬浮轴承技术、变频调速技术等先进技术，进一步提高空气压缩机的效率和性能。

4.2.2 采用高效换热器

换热器是化工空分系统中用于热量传递的重要设备，其性能直接影响能量回收和利用效率。采用高效的换热器，如板式换热器、螺旋板式换热器等，可以提高换热效率，减少换热面积和设备投资。板式换热器具有传热系数高、结构紧凑、占地面积小等优点，适用于空气压缩余热回收、空气冷却等过程。螺旋板式换热器具有传热效率高、不易结垢等优点，适用于液态产品冷量回收等过程。

4.2.3 采用先进的吸附剂和膜材料

吸附剂和膜材料是变压吸附法和膜分离法的关键材料，其性能直接影响分离效率和能耗。采用高性能的吸附剂和膜材料，可以提高对氧气、氮气等气体组分的吸附选择性和渗透速率，降低分离过程中的能耗。例如，采用新型的分子筛吸附剂，可以提高对氮气的吸附容量和选择性，减少吸附剂的用量和再生能耗。采用高性能的聚酰亚胺膜材料，可以提高对氧气的渗透速率和选择

性，降低膜分离过程的能耗。

4.3 加强系统集成与优化控制

4.3.1 系统集成

化工空分系统由多个子系统组成，加强系统集成可以实现各子系统之间的能量协同和优化利用。例如，将空气压缩余热回收系统与空气冷却系统、产品气体余压回收系统等进行集成，实现能量的梯级利用和综合回收。同时，将空分系统与其他化工生产系统进行集成，实现能量的共享和互补，提高整个化工企业的能源利用效率。

4.3.2 优化控制

采用先进的自动化控制技术，对化工空分系统进行实时监测和优化控制，可以提高系统的运行稳定性和能量利用效率。例如，采用分布式控制系统（DCS）或可编程逻辑控制器（PLC）对空气压缩机、换热器、膨胀机等设备进行集中控制和监测，根据系统运行参数的变化实时调整设备的运行状态，实现设备的最优运行。同时，采用先进的优化算法，如遗传算法、神经网络算法等，对系统的运行参数进行优化，寻找最优的运行工况，降低能耗。

5 实际案例分析

5.1 案例背景

某化工企业拥有一套年产 10 万吨合成氨的空分装置，采用低温精馏法进行空气分离。该装置原空气压缩机为离心式空气压缩机，等温效率为 75%，能耗较高。同时，装置在运行过程中存在大量的余热、余压和冷量没有得到充分回收利用，导致整体能量利用效率较低。

5.2 改造措施

5.2.1 余热回收改造

在空气压缩机的出口安装了一套热水型余热回收装置，将压缩热回收用于加热锅炉给水，减少了锅炉的燃料消耗。同时，在空气冷却过程中采用热泵技术回收冷量，用于空气压缩前的预冷，降低了空气压缩的能耗。

5.2.2 余压回收改造

在产品气体输送管道上安装了一台膨胀机，将产品气体的余压回收用于发电，年发电量可达 200 万千瓦时。同时，对空气压缩机的排放气体进行余压回收，采用气动马达驱动其他设备运转，降低了设备的电能消耗。

5.2.3 冷量回收改造

在液态氧、液态氮蒸发过程中安装了冷量回收装置，将蒸发产生的冷量回收用于空气净化过程中的吸附剂再生，减少了吸附剂再生所需的蒸汽消耗。

5.2.4 工艺优化与设备升级

对空气压缩流程进行了优化，采用多级压缩、中间冷却的方式，降低了每级压缩的压缩比，减少了压缩过程中的能量损失。同时，将原离心式空气压缩机更换为高效离心式空气压缩机，等温效率提高到了 82%，进一步降低了空气压缩的能耗。

5.3 改造效果

经过上述改造后，该化工企业的空分装置能耗显著降低。空气压缩能耗降低了 15%，余热回收率达到了 60%以上，余压回收发电量满足了装置部分用电需求，冷量回收利用率达到了 50%以上。整体能量利用效率提高了 20%以上，年节约能源成本可达 500 万元以上，同时减少了二氧化碳等污染物的排放，取得了良好的经济效益和环境效益。

结语

化工空分过程中的能量回收与效率提升是一个系统工程，需要从工艺流程优化、先进设备与技术采用、系统集成与优化控制等多个方面入手，综合采取多种措施。通过余热回收、余压回收和冷量回收等方法，可以充分回收利用化工空分过程中的可回收能量，降低能耗。通过优化工艺流程、采用先进设备与技术、加强系统集成与优化控制等方法，可以提高化工空分过程的整体效率，实现节能减排和可持续发展的目标。

未来，随着科技的不断进步和创新，化工空分过程中的能量回收与效率提升技术将不断完善和发展。一方面，新型的能量回收技术和设备将不断涌现，如更高效的余热回收装置、更先进的余压回收膨胀机等，将进一步提高能量回收效率和利用水平。另一方面，智能化控制技术将在化工空分系统中得到更广泛的应用，实现系统的自动化、智能化运行和优化控制，进一步提高系统的运行稳定性和能量利用效率。同时，随着环保要求的日益严格，化工空分行业将更加注重绿色发展，采用更加环保、节能的生产工艺和设备，减少对环境的影响。

参考文献

[1]周霞.空分压缩余热回收系统设计运行理论与实验研究[D].浙江大学,2022.

[2]方青雯.基于改进沙丘猫算法的神经网络预测模型及其空分装置应用[D].杭州电子科技大学,2025.

[3]曹庭瑜,彭伟,冯伟波.探析化工空分设备安全运行的管控措施[J].中国设备工程,2025,(S1):91-93.

[4]薛娇.空分装置安全稳定运行经验探讨[J].氮肥技术,2024,45(05):23-24+50.