

石油化工空分装置中的气体分离技术研究进展

牛祖堂 张双泉

盛虹炼化(连云港)有限公司 江苏 连云港 222065

摘要: 随着石油化工行业的快速发展,空分装置在气体分离技术中的应用日益广泛。气体分离作为工业生产中的重要环节,不仅关系到产品的纯度与质量,还直接影响到生产效率和能耗。本文旨在综述石油化工空分装置中气体分离技术的研究进展,重点探讨深冷法、变压吸附法、膜分离法及其改进技术,以期为行业技术进步提供参考。

关键词: 石油化工;空分装置;气体分离技术;应用现状;研究进展

引言

气体分离技术在石油化工领域具有举足轻重的地位,其核心在于通过物理或化学手段将混合气体中的各组分有效分离。空分装置作为实现这一目标的关键设备,其技术水平直接关系到整个生产流程的效率与经济效益。近年来,随着材料科学、化学工程等学科的进步,气体分离技术取得了显著进展,推动了石油化工行业的绿色高效发展。

1 气体分离技术的应用现状

1.1 深冷法(低温精馏法)

深冷法,又称低温精馏法,是目前石油化工空分装置中最常用的气体分离技术之一。该技术基于不同气体组分在低温下沸点的显著差异,通过一系列精心设计的步骤,包括压缩、冷却、精馏等,实现气体的高效分离。深冷法的具体过程如下:首先,将原料空气进行压缩,以提高其压力和密度,为后续处理创造有利条件。接着,对压缩后的空气进行预冷,降低其温度,为后续的精馏过程做准备。在预冷之后,需要对空气进行净化处理,以去除其中的杂质和污染物,确保最终产品的纯度。净化后的空气进入膨胀制冷阶段,通过膨胀过程进一步降低温度,使不同沸点的气体组分开始分离。随后,进行精馏过程,利用不同组分沸点的差异,通过多次部分汽化和冷凝,将氧气、氮气等组分逐一分离出来。最后,收集并储存这些高纯度的气体产品。深冷法具有诸多优点。首先,由于精馏过程的精确控制,所获得的气体产品纯度极高,满足了许多高端应用的需求。其次,该技术经过长期的发展和完善,工艺已经相当成熟,操作稳定可靠^[1]。然而,深冷法也存在一些挑战和问题。一方面,该技术的设备相对复杂,需要高精度的控制和维护,增加了运行成本。另一方面,深冷法的能耗较高,需要大量的能源来维持低温环境和精馏过程的进行,这在一定程度上限制了其在大规模应用中的经济性。

1.2 变压吸附法(PSA)

变压吸附法(PSA)是一种高效且经济的气体分离技术,它利用特定吸附剂(如分子筛)在不同压力下对气体混合物中特定组分的吸附能力差异来实现分离。这种技术因其操作简单、投资少、能耗低以及自动化程度高等优点,在中小规模的气体分离场合中得到了广泛应用。PSA技术的核心在于吸附剂的选择和吸附过程的控制。常用的吸附剂包括分子筛、活性炭、硅胶等,它们对不同的气体组分具有不同的吸附能力。在变压吸附过程中,通过周期性地改变压力,可以使吸附剂对目标气体组分进行吸附和脱附,从而实现气体的分离。近年来,变压吸附法在吸附剂性能改进和工艺过程优化方面取得了显著进展。一方面,研究人员通过改进吸附剂的制备工艺和表面改性技术,提高了吸附剂的吸附容量、选择性和再生效率,从而进一步提升了PSA技术的分离效果和经济效益。另一方面,通过优化工艺参数、改进设备结构和提高自动化控制水平,PSA技术的操作稳定性、可靠性和适应性也得到了显著提升。此外,PSA技术还具有一些其他优势。例如,它可以在较宽的压力和温度范围内进行操作,对原料气的纯度要求不高,且可以处理含有多种杂质的气体混合物。同时,PSA技术的设备结构相对简单,维护方便,运行成本较低。

1.3 膜分离法

膜分离法是一种先进的气体分离技术,它基于不同气体分子在膜材料中渗透速率的差异来实现分离。这种技术以其分离效率高、能耗低、操作简便等显著优点,在石油化工、食品、医药等多个领域展现出了广泛的应用前景。膜分离法的核心在于膜材料的选择和膜组件的设计。膜材料需要具备良好的选择透过性,即允许某些气体分子快速透过,而阻碍其他气体分子的透过。同时,膜材料还应具备足够的机械强度、化学稳定性和热稳定性,以适应不同的操作条件和使用环境。膜组件的

设计则关系到膜的装填密度、气体流动路径和分离效率等因素^[2]。近年来,随着膜材料科学的不断进步,新型高效气体分离膜的研发成为当前研究的热点之一。研究人员通过改进膜材料的制备工艺、优化膜的结构和性能,不断提高膜的分离效率和选择性。例如,一些新型膜材料采用了纳米级的多孔结构或特殊的表面改性技术,显著提高了对特定气体分子的吸附和扩散能力。除了膜材料本身的进步,膜分离技术还在与其他技术的结合应用方面取得了显著进展。例如,将膜分离技术与深冷法、变压吸附法等传统气体分离技术相结合,可以形成更为高效、节能的混合气体分离系统。这种混合系统可以充分发挥各种技术的优势,实现更为精确和高效的气体分离。

2 气体分离技术最新研究进展

2.1 深冷法的改进

2.1.1 设备优化

研究人员着重于新型填料和塔板设计的研发。通过采用高性能的新型填料,如具有更大比表面积和更优传质性能的多孔材料,显著提高了塔内的气体分离效率。同时,塔板设计的创新也极大地改善了气体在塔内的流动状态,进一步提升了分离效果。这些优化措施不仅提高了产品质量,还有效降低了能耗。

2.1.2 工艺流程改进

引入了先进的低温换热技术。通过优化换热器的结构和材料,提高换热效率,从而减少了能量在传递过程中的损失。这种技术改进不仅提升了能量利用率,还进一步降低了深冷法的整体能耗。此外,为了保障生产安全,研究人员还致力于开发高效的气体储存和输送系统。通过优化储存容器的设计和提高输送管道的密封性能,确保了气体在储存和输送过程中的稳定性和安全性。这些创新措施为深冷法的工业化应用提供了有力的保障。

2.2 变压吸附法的创新

2.2.1 吸附剂性能的改进

新型吸附剂的研发:研究人员不断探索新型吸附材料,如高性能分子筛、金属有机骨架材料(MOFs)、碳纳米材料等,这些材料具有更高的比表面积、更丰富的孔道结构和更优异的吸附性能。通过对吸附剂进行表面改性,如化学氧化、还原、负载金属或金属氧化物等,可以显著改善吸附剂的表面性质和润湿性,提高其吸附效率和选择性。将不同性质的吸附剂复合在一起,制备出具有优异性能的复合吸附剂。这种复合吸附剂能够充分发挥各种吸附剂的优点,提高整体的吸附容量和选择性。

吸附剂再生与循环利用:为了降低生产成本和减少

环境污染,研究人员致力于开发高效的吸附剂再生技术,如热再生、变压再生、化学洗涤再生等,以实现吸附剂的可持续利用。

2.2.2 工艺过程的优化

吸附塔结构的改进:吸附塔是PSA技术的核心设备之一,其结构直接影响分离效果。研究人员通过优化吸附塔的高度、直径、填料种类和层数等参数,提高了吸附塔的分离效率和稳定性。采用先进的填料技术,如多孔陶瓷、活性炭等高性能填料,提高了吸附剂的利用效率,进一步提升了分离效果。

操作参数的优化:通过对吸附压力、解吸压力、吸附时间、均压时间等操作参数的精确控制,实现了对吸附过程的精细化调节。这有助于在保证分离效果的同时,降低能耗和提高生产效率。引入智能控制系统,实现对吸附过程的实时监测和自动调整,提高了系统的稳定性和可靠性。

自动化控制系统的升级:随着信息技术的发展,PSA技术的自动化控制水平不断提高。现代PSA系统通常采用PLC控制器或DCS系统进行集中控制,实现了对吸附塔切换、压力调节、流量控制等关键环节的精确控制^[3]。通过引入先进的传感器和检测技术,如氧气传感器、压力传感器等,实现了对吸附过程中关键参数的实时监测和反馈,为系统的优化调整提供了有力支持。

2.3 膜分离法的前沿探索

2.3.1 新型膜材料的研发

动态共价化学方法制备多孔材料:利用动态共价化学方法,制备出具有可调孔径和高度有序孔隙结构的多孔材料。这些材料在气体分离领域展现出巨大潜力,因为它们能够精确控制孔径大小,从而实现对不同气体分子的高效分离。例如,某些多孔材料能够选择性地允许特定大小的分子通过,同时阻止其他分子,从而大大提高分离效率。动态共价化学方法的优势在于其可逆性和动态平衡特性,这使得材料在制备过程中能够根据需要进行调整和优化,从而获得理想的分离性能。

混合基质膜的研究:混合基质膜是将无机纳米粒子(如沸石、金属有机骨架材料等)分散在有机聚合物基质中而形成的一种复合材料。这种膜结合了无机材料的高选择性和有机聚合物的良好加工性能,展现出优异的分离性能。研究表明,通过优化无机纳米粒子的种类、大小和分布,可以显著提高混合基质膜的渗透性和选择性。此外,混合基质膜还具有良好的稳定性和耐久性,能够适应各种复杂的操作条件。

2.3.2 膜分离性能的提升

渗透性与选择性的平衡：新型膜材料的研究致力于在渗透性和选择性之间找到最佳平衡点。通过精确控制材料的孔径大小、孔隙结构和表面性质，研究人员成功制备出既具有高渗透性又具有高选择性的膜材料。

稳定性与耐久性的增强：在实际应用中，膜材料的稳定性和耐久性至关重要。新型膜材料通过优化材料组成和结构设计，显著提高了其抵抗化学腐蚀、热老化和机械损伤的能力，从而延长了膜的使用寿命。

3 石油化工深冷空分的技术发展历程及展望

石油化工空分装置中的深冷空分技术，其发展历程经历了从小规模到大规模、从单一技术到多元化技术集群的显著变化。这一过程不仅体现了技术的进步^[4]，也反映了工业需求的增长和技术应用的深化。

3.1 早期探索与基础建立

深冷空分技术的雏形可以追溯到19世纪末，当时科学家们开始尝试液化空气并研究其组成。到了20世纪初，随着低温制冷技术的不断发展，人们开始使用液氮制冷机等设备将空气冷却到低温状态，并成功分离出氧气和氮气等组分。这一时期，深冷空分技术主要应用于小规模实验和工业试制，为后续的大规模应用奠定了基础。

3.2 技术突破与商业化应用

20世纪中期，随着工业和医疗领域的快速发展，深冷空分技术得到了广泛应用和推广。特别是在20世纪30年代，英国科学家约翰·金巴尔提出冷凝液化空分的概念，并成功设计建造了第一台低温空分装置，这标志着深冷空分技术进入了一个全新的发展阶段。此后，随着设备的效率和可靠性不断提高，深冷空分技术开始在石油化工、钢铁制造、化工和医疗等多个领域得到广泛应用。

3.3 规模化发展与技术创新

进入20世纪后半叶，随着自动化技术的发展和能源效率的重视，深冷空分技术迎来了新的发展机遇。这一时期，深冷空分装置的设计和建造朝着更大型化、集成

化的方向发展，以满足大规模生产的需求。同时，控制系统开始采用电子设备和计算机技术，极大提升了深冷空分过程的稳定性和效率。此外，新型制冷技术和分离材料的引入，进一步提高了深冷空分技术的分离效率和产品质量。

3.4 多元化技术集群与绿色转型

进入21世纪，随着全球对环保和能源效率的日益重视，深冷空分技术的发展也开始聚焦于减少能源消耗和降低环境影响。这一时期，深冷空分技术不仅在传统领域继续深化应用，还开始向新能源、环保和高新技术领域拓展。例如，在氢能领域，深冷空分技术被用于氢气的提纯和储存；在碳捕捉与封存技术中，深冷空分技术用于高效捕捉和分离二氧化碳。此外，数字化管理和智能控制技术的应用，进一步提高了深冷空分过程的稳定性和可靠性，确保了高质量气体的连续生产。

结语

石油化工空分装置中的气体分离技术是实现高效生产、保障产品质量的关键环节。随着科学技术的不断进步和工业化需求的不断提升，气体分离技术将在深冷法、变压吸附法、膜分离法等领域取得更加显著的进展。未来，通过持续的技术创新和产业化应用推广，气体分离技术将为石油化工行业的绿色高效发展注入新的动力。

参考文献

- [1]徐竞博.关于空分装置在石油化工中的应用分析[J].化工管理,2019,(11):196-197.
- [2]赵辉.气体分离膜技术及其在石油化工领域的应用[J].石油化工,2023,52(03):412-417.
- [3]陆君君,王永健.空分装置的工艺路线及设备选型分析[J].现代工业经济和信息化,2022,12(02):258-260.
- [4]徐宏,王兆慧,王恩毓.空分装置控制系统升级与优化应用[J].工业仪表与自动化装置,2021,(04):139-141.