

煤化工中的液氮洗工艺技术研究与应用

李刘哲

天脊煤化工集团股份有限公司 山西 长治 046000

摘要：本文探讨了煤化工中的液氮洗工艺技术，包括其定义、原理、流程及特点。液氮洗工艺在合成氨、煤气化等煤化工领域有着广泛应用，能够有效净化合成气，提高产品纯度和质量。然而，该工艺也面临冷量不平衡、氢氮比失调及尾气资源化利用等挑战。因此，提出设计优化、新型分子筛材料应用及智能化监控等技术优化与创新策略。经济与环境效益分析显示，液氮洗工艺在提高经济效益的同时，也有助于减少污染物排放，推动煤化工行业的可持续发展。

关键词：煤化工；液氮洗工艺；合成气净化

1 煤化工中的液氮洗工艺技术概述

1.1 液氮洗工艺定义与原理

液氮洗工艺是利用液氮的低温特性，将合成气冷却至极低温度，使合成气中的杂质组分（如CO、CH₄、Ar等）在低温下液化或固化，从而实现与有效组分（如H₂、N₂等）的分离。液氮洗工艺基于不同气体组分在低温下的沸点差异，通过控制温度和压力条件，使杂质组分被液氮吸收或冷凝，而有效组分则以气态形式通过，达到净化的目的。

1.2 液氮洗工艺流程

液氮洗工艺流程主要包括原料气预处理、液氮洗塔操作、甲烷及尾气处理等环节。（1）原料气预处理：原料合成气首先经过预处理单元，去除其中微量的CO₂、CH₃OH、水分、硫化物等杂质，以防止这些杂质在低温下冻结或腐蚀设备。预处理后的合成气进入液氮洗塔。

（2）液氮洗塔操作：液氮洗塔是液氮洗工艺的核心设备。液氮从塔顶喷淋而下，与从塔底进入的合成气逆流接触。在低温环境下，合成气中的杂质组分被液氮吸收或冷凝，净化后的合成气从塔顶排出，进入后续工序^[1]。

（3）旧液氮洗工艺流程中将分离出的甲烷组份送至甲烷转化装置，通过与水汽反应生成氢气和二氧化碳，反应方程式： $H_2O + CH_4 \rightleftharpoons H_2 + CO_2$ ，再通过变压吸附或低温甲醇洗脱除CO₂，回收有效组份，尾气成份则作为燃料气，为甲烷转化提供反应所需要的温度，提高合成氨产量。新液氮洗工艺流程中，将甲烷组份通过甲烷精馏塔进一步提纯后，将纯度高达99.3%以上的甲烷作为液化天然气（LNG）储存，而尾气组份可作为加热炉、锅炉等设备的燃料，用于厂区内蒸汽生产、工艺加热等，替代天然气或煤炭，降低燃料成本。

1.3 液氮洗工艺特点

（1）净化效果好：液氮洗工艺能够有效去除合成气中的CO、CH₄、Ar等杂质，使净化后的合成气纯度达到很高水平，满足后续化工生产的要求。（2）操作灵活：液氮洗工艺可以根据原料合成气的组成和后续生产的要求，灵活调整操作参数，如液氮流量、温度、压力等，以实现最佳的净化效果。（3）能耗相对较低：与其他合成气净化工艺相比，液氮洗工艺在低温下操作，利用液氮的冷量进行净化，能耗相对较低。通过合理的能量回收和利用，可以进一步提高能源利用效率。（4）设备投资较大：液氮洗工艺需要使用低温设备和材料，如液氮洗塔、低温阀门、管道等，设备投资相对较大。另外，液氮的储存和输送也需要专门的设备和设施，增加了投资成本。

2 煤化工中的液氮洗工艺在煤化工中的应用

2.1 在合成氨工业中的应用

在合成氨工业中，液氮洗工艺是保障合成气质量的关键环节。合成氨反应的化学方程式为： $N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$ ，该反应对原料气中氢气和氮气的比例要求严格，理论上氢气与氮气的最佳摩尔比为3：1。原料气中的杂质如二氧化碳、甲烷、氩气等会降低合成氨催化剂的活性和寿命，影响反应效率与产品质量。液氮洗工艺通过深度净化合成气，能够精准调整氢气与氮气的比例，使其达到合成氨反应的最佳需求。有效脱除杂质气体，为合成氨反应提供高纯度的原料气，显著提高合成氨的产率和质量高纯度的合成气还有助于减少合成氨过程中副反应的发生，降低产品中杂质含量，提高产品的市场竞争力。

2.2 在煤气化工业中的应用

煤气化是煤化工的重要基础工艺，生成的合成气可用于生产多种化工产品。液氮洗工艺作为煤气化工业中

合成气深度净化的核心技术之一，发挥着至关重要的作用。煤气化制合成氨工艺中，液氮洗装置常与低温甲醇洗装置联合使用，在低温甲醇洗装置中将煤气化后的粗煤气中的酸性气体硫化氢和二氧化碳气体脱除后，再进入液氮洗装置中将低温甲醇洗来的净化气中的甲烷、一氧化碳及氩气等杂质脱除，净化后的合成气进入合成氨装置中，提高合成气的纯度和品质。净化后的合成气进入后续合成单元，可显著提高合成反应的效率和产品收率。同时，液氮洗工艺的应用还可减少合成气中杂质对设备的腐蚀和磨损，延长设备的使用寿命，降低设备维护成本，保障煤气化工业生产的稳定运行^[2]。

2.3 在其他煤化工领域的应用

除合成氨和煤气化工业外，液氮洗工艺在其他煤化工领域也有广泛应用。在煤制天然气（SNG）项目中，液氮洗工艺用于合成气的最终净化阶段，将合成气中的二氧化碳、甲烷、氩气等杂质脱除，使合成气的组成和热值符合天然气标准。通过深度净化，可生产出高品质的煤制天然气，实现煤炭资源向清洁能源的高效转化。在煤基多联产项目中，液氮洗工艺能够为不同的生产单元提供高纯度的合成气。在一些新型煤化工技术研发和示范项目中，液氮洗工艺也作为重要的合成气净化手段，为新工艺的稳定运行和产品质量保障提供支持，推动煤化工行业向高端化、多元化方向发展。

3 液氮洗工艺技术研究面临的技术挑战

3.1 冷量不平衡与系统冷量不足的问题

液氮洗工艺是一个高度依赖低温操作的过程，冷量的稳定供应与合理利用是工艺正常运行的关键。在实际生产中，冷量不平衡与系统冷量不足的问题较为突出。一方面，由于工艺系统中各环节对冷量的需求在不同工况下会发生变化，如原料气组份波动、生产负荷调整等，导致冷量供应与需求难以精准匹配。当冷量供应不足时，会影响液氮洗涤效果，导致杂质脱除不彻底，产品气纯度下降；当冷量供应过剩时，则会造成冷量浪费，增加能耗成本。另一方面，冷量回收系统的效率对冷量平衡至关重要。现有冷量回收设备在换热效率、设备可靠性等方面存在一定局限，无法实现冷量的高效回收利用。部分换热器在长期运行后，换热性能下降，导致冷量回收不充分，进一步加剧系统冷量不足的问题。另外，冷量输送过程中的冷损失也是导致冷量不平衡的因素之一，低温管道的保温性能不佳、阀门密封不严等，都会造成冷量在输送过程中散失，影响工艺系统的冷量平衡。

3.2 氢氮比失调与氮气消耗与负荷不匹配的问题

在液氮洗工艺中，精确控制氢气与氮气的比例（ H_2/N_2 ）对于后续合成反应至关重要。然而，由于原料气组成的波动、工艺操作参数的变化等因素，容易出现氢氮比失调的情况。当原料气中氢气或氮气含量发生变化时，若不能及时调整工艺操作，会导致产品气中氢氮比偏离最佳比例，影响后续合成反应的效率和产品质量。同时，氮气消耗与生产负荷之间的匹配问题也不容忽视。液氮洗工艺中，氮气不仅作为产品气的组成部分，还用于提供冷量和调节系统压力等。随着生产负荷的变化，氮气的需求量也会相应改变。当生产负荷降低时，若氮气供应未能及时减少，会造成氮气浪费；当生产负荷增加时，若氮气供应不足，会影响工艺系统的稳定运行，甚至导致装置停车^[3]。

3.3 液氮洗尾气资源化利用与节能减排的挑战

液氮洗工艺产生的尾气中含有一定量的氢气、氮气、一氧化碳等可燃或有用气体，若直接排放，不仅造成资源浪费，还会对环境产生影响。目前，液氮洗尾气资源化利用面临诸多挑战。一方面，尾气中各组分气体的分离难度较大，由于尾气组成复杂，且各组分之间的沸点差异较小，采用传统的分离技术难以实现高效分离和回收利用。另一方面，尾气资源化利用的经济效益有待提高。现有尾气处理技术如燃烧发电、化工原料回收等，存在投资成本高、运行费用大、产品附加值低等问题，企业实施尾气资源化利用的积极性不高。在节能减排方面，液氮洗工艺本身的能耗较高，尽管通过冷量回收等措施降低部分能耗，但与行业节能减排目标仍存在差距。

4 液氮洗工艺技术研究技术优化与创新

4.1 液氮洗装置的设计优化与能效提升

为解决冷量不平衡与系统冷量不足的问题，对液氮洗装置进行设计优化是关键。在设备选型方面，采用高效的低温换热器，如板翅式换热器，其具有传热效率高、结构紧凑、占地面积小等优点，可显著提高冷量回收效率。通过优化换热器的结构参数，如翅片高度、间距、厚度等，进一步增强换热性能，减少冷量损失。在工艺流程设计上，引入先进的流程模拟软件，如化工流程模拟软件（AspenPlus）等，对液氮洗工艺流程进行全面模拟和优化。通过模拟不同工况下的工艺参数变化，确定最佳的操作条件和设备配置，实现冷量的合理分配与高效利用。例如，优化液氮洗涤塔的塔板结构和操作参数，提高气液传质效率，减少液氮用量，降低冷量消耗。同时，设计多股物流的冷量梯级利用方案，将不同温度级别的低温物流进行合理匹配，最大限度地回收冷

量,提升装置的能效水平。

4.2 新型分子筛材料的开发与应用

针对 H_2/N_2 失调及尾气资源化利用难题,新型分子筛材料的开发与应用为解决问题提供了新途径。研发具有高选择性和吸附容量的分子筛材料,可实现对合成气中特定杂质气体的高效吸附分离,从而更精准地控制 H_2/N_2 比例。例如,开发对二氧化碳、甲烷、氩气等杂质具有高吸附选择性的分子筛,在保证氢气和氮气回收率的前提下,有效脱除杂质气体,提高产品气纯度。在尾气资源化利用方面,利用分子筛材料的吸附特性,对尾气中的有用气体进行分离回收。通过优化分子筛的吸附-解吸工艺条件,实现对氢气、氮气、一氧化碳等气体的高效分离和富集,提高尾气资源的利用率。新型分子筛材料还可应用于液氮洗工艺的预处理环节,替代部分传统的脱硫、脱碳设备,简化工艺流程,降低投资成本和运行费用。

4.3 智能化监控与自动化控制技术在液氮洗工艺中的应用

为提高液氮洗工艺的运行稳定性和操作效率,智能化监控与自动化控制技术的应用至关重要。在工艺系统中安装各类传感器,实时监测温度、压力、流量、成分等关键参数,并通过数据采集与传输系统将数据上传至中央控制系统。利用大数据分析、人工智能等技术,对采集的数据进行深度分析和处理,及时发现工艺运行中的异常情况,并预测潜在的故障风险。基于分析结果,自动化控制系统能够自动调整工艺操作参数,实现对工艺过程的精准控制。例如,当检测到 H_2/N_2 失调时,系统自动调节液氮洗涤塔的液氮流量、操作压力等参数,使 H_2/N_2 恢复到最佳比例;当系统冷量不足时,自动启动备用冷源或调整冷量回收系统的运行参数,保障冷量供应^[4]。智能化监控与自动化控制技术还可实现设备的远程监控与故障诊断,减少人工操作和维护成本,提高装置的运行可靠性和安全性。

5 液氮洗工艺的经济与环境效益分析

5.1 经济效益分析

液氮洗工艺的经济效益主要体现在多个方面,通过深度净化合成气,提高产品气的纯度和品质,为后续合成反应提供了优质原料,从而显著提高了化工产品的产

量和质量,增加企业的销售收入。如在合成氨工业中,采用液氮洗工艺后,合成氨产量提高,产品质量提升,市场售价相应提高,企业经济效益大幅增长。其次,工艺的优化与创新降低能耗和生产成本。通过高效的冷量回收系统、优化的设备设计和操作参数,减少液氮、电力等能源消耗,降低运行成本。液氮洗尾气的资源化利用也为企业带来了额外的经济收益,通过回收尾气中的有用气体,可生产高附加值的化工产品或用于发电等,进一步提高企业的经济效益。

5.2 环境效益分析

液氮洗工艺在环境保护方面具有显著效益,一方面,通过深度净化合成气,该工艺有效脱除了其中的一氧化碳、甲烷等杂质,从而减少了这些杂质在后续工艺中的使用和排放,降低了对大气环境的潜在污染。另一方面,液氮洗尾气的资源化利用减少尾气的直接排放,降低温室气体和其他污染物的排放量。通过回收尾气中的氢气、氮气等气体,避免这些气体直接排放到大气中,对缓解温室效应和改善空气质量具有积极作用。工艺优化与创新降低能耗,减少能源生产过程中的碳排放,符合国家节能减排和绿色发展的要求,有助于推动煤化工行业的可持续发展。

结束语

综上所述,液氮洗工艺在煤化工领域发挥着重要作用,其技术优化与创新对于提高工艺效率、降低成本及保护环境具有重要意义。未来,随着煤化工技术的不断发展,液氮洗工艺将继续面临新的机遇与挑战,企业应加强技术研发与创新能力,不断提升工艺水平,以适应市场变化和行业发展趋势,为煤化工行业的绿色发展贡献力量。

参考文献

- [1]韩继峰.煤化工废水处理技术面临的问题与优化措施[J].化工管理,2020(28):84-85.
- [2]高明.煤化工技术的发展与新型煤化工技术[J].化工设计通讯,2020,46(08):11-12.
- [3]华森樑,胡凌峰,李斌,等.常温进料液氮洗装置研发设计总结[J].中氮肥,2025(2):1-4,34.
- [4]张强,张宁,赵晓明.液氮洗装置生产运行波动分析[J].纯碱工业,2024(1):35-38.