

化工工艺中低温甲醇洗技术的创新与发展

乔志波

内蒙古伊泰煤制油有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要：低温甲醇洗技术是煤化工、天然气净化等领域原料气净化的核心工艺，凭借高净化精度、优异选择性等优势广泛应用。本文阐述该技术的核心物理吸收原理及传统工艺构成，分析传统工艺在能耗、设备、适配性等方面的局限，重点从工艺参数、溶剂体系、关键设备、集成工艺四个维度，探讨技术创新路径，结合工业实践说明创新成效，最后展望技术低碳化、国产化、智能化及适配性拓展的发展趋势，为该技术的工业应用与升级提供实践参考。

关键词：化工工艺；低温甲醇洗技术；传统工艺；多维度创新；发展趋势

引言：随着煤化工产业向大型化、绿色化转型，原料气净化的效率、能耗及环保要求不断提升。低温甲醇洗作为高酸性原料气净化的主流技术，可高效脱除硫化氢、二氧化碳等杂质，保障下游装置稳定运行。但传统工艺存在能耗偏高、设备依赖进口、适配性不足等问题，制约其工业应用效益。基于此，本文结合内蒙古伊泰煤制油相关生产实践，系统探讨低温甲醇洗技术的创新路径与发展趋势，为技术优化升级、推动行业绿色高效发展提供支撑。

1 低温甲醇洗技术核心原理与传统工艺基础

1.1 核心原理：低温甲醇的物理吸收特性

低温甲醇洗的基础是一条物理规律：在低温条件下，甲醇对不同气体的溶解度存在显著差异。温度降至-40℃至-60℃时，甲醇对二氧化碳、硫化氢、羰基硫等酸性气体的溶解能力大幅提升，而对氢气、一氧化碳这些有效气的溶解度增加不多。这一差别让甲醇能够大量吸收酸性组分，同时尽量保留原料气中的有用成分。整个过程是物理吸收，没有化学反应。这意味着吸收和脱附都比较容易实现——升温或降低压力，溶解的气体就会释放出来，甲醇本身不发生变化，可以反复使用。与化学吸收法相比，溶剂损耗小，也不需要额外添加反应剂。另外，甲醇在低温下粘度低、流动性好，有利于塔内气液接触，提高了传质效率。这套特性决定了低温甲醇洗特别适合处理高酸气含量的原料气，比如煤气化或天然气重整产生的合成气。

1.2 传统低温甲醇洗工艺流程构成

传统流程通常由吸收、闪蒸解吸、热再生三个工段串联而成。原料气经过冷却和预处理后，从底部进入吸收塔。低温甲醇从塔顶向下喷淋，气液两相逆向接触。吸收塔一般分成上下两段：下段主要脱除硫化氢和部分二氧化碳，上段用新鲜甲醇进一步精洗，确保产品气中

的总硫低于0.1ppm。吸收了酸性气的富甲醇从塔底引出，进入闪蒸罐。闪蒸罐分几级降压，先释放出溶解的氢气和一氧化碳，这部分气体可以返回系统回收利用；继续降压后，二氧化碳开始大量析出，得到富碳气体。剩下的富甲醇含有高浓度硫化氢，需要送入热再生塔。热再生塔用蒸汽加热，将硫化氢彻底赶出来，同时甲醇得以净化。再生后的贫甲醇冷却后送回吸收塔，完成一个循环。这套流程中，冷量的梯级利用很关键。闪蒸和解吸过程产生的低温气体被用来预冷原料气，减少了外部制冷负荷。

1.3 传统工艺的技术特点与应用局限

传统低温甲醇洗工艺优势十分突出：一是气体净化精度极高，可将总硫含量控制在0.1ppm以内，能够满足甲醇合成、氨合成及费托合成等下游化工装置的严苛净化标准；二是溶剂选择性优异，通过调控工况条件，可灵活实现二氧化碳部分脱除或完全脱除；三是甲醇溶剂性价比高，货源充足、成本低廉，且热稳定性良好，适配长期连续化工生产。

传统工艺也存在明显短板：整体运行能耗偏高，系统需维持-40℃低温工况，即便配置冷量回收装置，制冷与压缩设备仍消耗大量动力；工艺流程冗长复杂，涵盖吸收、多级闪蒸、热再生及制冷等多个单元，设备投资大、运维操作难度高；工艺对水分极其敏感，原料气微量水分易低温结冰造成管路及塔器堵塞，必须增设预干燥单元，增加配套成本；此外对原料气组分波动适应性差，硫化氢、二氧化碳比例变化或有机硫含量偏高时，脱硫脱碳效果明显下降，且解析二氧化碳常掺杂硫化氢，难以直接资源化利用，需额外增设尾气处理工序^[1]。

2 化工工艺中低温甲醇洗技术多维度创新路径

2.1 低温甲醇洗工艺参数的创新优化

低温甲醇洗工艺的运行稳定性与净化效果，直接取

决于操作参数的合理性。结合现场工况优化参数,是提升技术适配性与经济性的关键,具体路径如下:(1)温度与压力协同优化。传统工艺采用固定温压控制,无法适配原料气组分波动,易造成吸收不稳或能耗浪费。实际生产中,依托在线组分分析仪,实时监测硫化氢、二氧化碳含量,动态调整参数:硫化氢升高时,在保障甲醇流动性前提下,降温2-5℃、升压0.1-0.2MPa强化吸收;二氧化碳偏高时,升温3-4℃、降压0.05-0.1MPa,减轻再生负荷。该方式无需改造设备,可在保障总硫脱除率的同时,降低制冷与压缩机能耗。(2)甲醇循环量与浓度调控创新。甲醇循环量是能耗与净化效果的核心影响因素,传统设定偏保守。实际采用浓度-循环量联动调控,在吸收塔出口设在线监测仪表,跟踪甲醇酸性气负载量,负载达80%时梯度提升循环量,同步优化再生参数,确保再生后甲醇浓度 $\geq 99.5\%$ 。结合装置规模差异化调控,小型装置循环量与原料气处理量配比1:1.2-1:1.5,大型装置1:1.0-1:1.2,实现效率与能耗平衡。(3)酸性气脱除效率的参数优化。针对脱除效率波动问题,结合现场数据优化参数区间:吸收塔塔板数30-40层,气液比5:1-7:1;闪蒸段压力0.3-0.5MPa、温度-25℃至-30℃;再生塔塔顶120-130℃、塔底140-150℃。引入多目标优化算法,结合能耗、效率、设备损耗建立模型,实现参数精准匹配,提升运行稳定性。(4)生产数据驱动的参数实践。依托100万吨/年煤制甲醇装置数据,建立工况数据库,筛选最优参数组合。现场应用显示,吸收温度从-45℃调至-42℃,压力从5.0MPa调至4.8MPa,甲醇循环量降低8%,综合能耗下降6.5%,总硫脱除率维持99.99%以上,适配长周期运行需求。

2.2 低温甲醇洗溶剂体系的创新研发

甲醇溶剂是工艺核心,传统纯甲醇存在有机硫吸收弱、再生能耗高、低温流动性差等短板,围绕改性、复合、环保化方向研发,提升性能与适配性,具体路径如下:(1)改性甲醇溶剂研发应用。针对有机硫脱除率偏低问题,筛选MDEA、DEA为改性剂,添加比例5%-8%,其可与有机硫反应,不影响甲醇对硫化氢、二氧化碳的物理吸收。工业验证表明,有机硫脱除率从85%提升至95%以上,-45℃下仍保持良好流动性,减少堵塞隐患。(2)复合溶剂配比优化。结合原料气差异,研发多元复合体系,针对高二氧化碳、低硫化氢原料气,采用“甲醇+碳酸丙烯酯+助溶剂”体系,碳酸丙烯酯强化二氧化碳选择性,助溶剂降低粘度、提升传质效率。正交实验确定配比85:10:5,与纯甲醇相比,二氧化碳吸收容量提升12%,再生能耗降低10%,适配煤化工、天然气

净化装置。(3)溶剂再生节能创新。溶剂再生是高能耗环节,创新“余热回收+减压再生”工艺,利用变换气、蒸汽冷凝水余热预热进料,降低蒸汽消耗;再生塔改为减压操作(0.05-0.1MPa),降低再生温度,顶部增设冷凝装置,回收挥发甲醇,提升利用率、减少损耗。(4)环保型溶剂开发实践。针对溶剂挥发污染问题,研发低挥发、可降解溶剂,添加稳定剂与抗挥发剂,挥发量降低;优化配方提升生物降解性,降解率提升,已在中小型装置试点应用,符合绿色低碳要求^[2]。

2.3 低温甲醇洗关键设备的创新设计与升级

吸收塔、再生塔、绕管式换热器等关键设备,传统存在结构不合理、耐低温腐蚀不足、运维难度大等问题,结合现场痛点创新升级,具体路径如下:(1)塔器结构优化。传统吸收塔浮阀塔板传质效率低、易堵塞,创新设计高效导向浮阀塔板,增设导向叶片,扩大气液接触面积,降低塔板阻力。再生塔优化内件,采用“高效传质内件+液体分布器”,提升再生效果。某装置改造后,吸收塔传质效率提升,处理能力增加,堵塞问题得到解决。(2)换热器改进与防堵设计。绕管式换热器采用Inconel625低温耐蚀合金,适配-45℃至150℃工况,延长使用寿命;入口增设高效过滤器,过滤固体杂质;采用螺旋式换热管,增加换热面积,减少堵塞、提升效率,降低制冷能耗。(3)设备国产化创新。传统关键设备依赖进口,投资高、运维不便,依托国内技术实现国产化替代,优化设计、选用国产优质材料,国产绕管式换热器性能达进口水平,降低投资,降低运维成本,已在大型煤化工装置推广。(4)智能化监测升级。为关键设备配备智能化系统,安装压力、温度、液位等在线传感器,实时采集数据,通过大数据预判堵塞、腐蚀等隐患;建立运维管理系统,优化维护周期,减少非计划停机,提升可靠性^[3]。

2.4 低温甲醇洗技术的集成创新与工艺拓展

传统工艺多独立运行,能耗高、资源利用率低,结合一体化需求,开展集成创新与拓展,实现协同运行,具体路径如下:(1)与煤化工深度集成。将低温甲醇洗与变换、甲醇合成工艺集成,回收冷量用于变换气冷却,解吸酸性气分别送至硫回收、二氧化碳利用装置。(2)自热再生集成应用。利用酸性气解吸余热为溶剂再生提供热源,将高温酸性气引入再生塔底部换热,实现自热再生,减少蒸汽消耗30%以上,降低再生温度,减少设备腐蚀,节能效果显著。(3)双级减压闪蒸耦合创新。针对传统闪蒸损耗大、回收率低问题,设计双级耦合工艺:一级闪蒸(0.5-0.7MPa、-20℃至-25℃)解

吸二氧化碳；二级闪蒸（0.1-0.2MPa、-10℃至-15℃）解吸剩余组分，甲醇损耗降低15%以上，酸性气回收率 $\geq 98\%$ ，减轻再生负荷。（4）酸性气资源化拓展。摒弃焚烧处理，硫化氢含量高的酸性气采用克劳斯工艺回收硫磺；二氧化碳含量高的经提纯至99.5%以上，用于食品级二氧化碳、尿素生产或驱油^[4]。

3 低温甲醇洗技术的发展趋势与展望

随着煤化工产业向大型化、低碳化、智能化转型，低温甲醇洗技术作为原料气净化核心工艺，其发展将紧密贴合工业生产实际需求，聚焦节能降耗、国产化升级、多元适配等核心方向，具体趋势与展望如下：（1）低碳化发展持续深化。依托工艺优化与能量回收技术，进一步降低系统能耗，重点推进余热、余冷的深度回收利用，优化换热网络设计，减少制冷系统与再生单元的能源消耗。结合碳捕集、利用与封存产业需求，完善酸性气资源化回收工艺，提升二氧化碳提纯精度与回收率，推动技术与低碳产业深度融合，契合化工行业绿色发展导向。（2）技术国产化水平持续提升。目前国内已实现部分关键设备与工艺的国产化突破，但高端材料、核心内件等仍有提升空间，未来将重点聚焦耐低温耐蚀合金材料、高效传质内件的自主研发，打破技术壁垒，推动工艺包、设备制造、运维服务全产业链国产化，进一步降低装置投资与运维成本。（3）智能化与数字化深度融合。依托大数据、物联网技术，完善关键设备智能化监测体系，实现工艺参数的实时精准调控与设备隐患预判，推动低温甲醇洗工艺与化工装置整体智能化系统联动，提升装置长周期运行稳定性，降低人工运维强度，适配现代化工智能化发展需求。（4）工艺适配性不断拓展。针对不同原料气组分、装置规模的差异化需

求，研发定制化工艺方案与溶剂体系，优化集成耦合技术，推动低温甲醇洗技术与煤气化、天然气净化、合成氨等工艺的深度协同，同时探索其在低浓度酸性气处理等新场景的应用，拓宽技术适用范围，助力化工产业高质量、多元化发展。在环保标准日趋严格的背景下，低温甲醇洗还将朝着低损耗、长周期、绿色运维方向稳步迈进。通过持续优化溶剂配方与设备防腐结构，减少介质损耗和检修频次，依托现场运行经验形成标准化设计规范^[5]。

结束语：低温甲醇洗技术的创新与发展，是适配现代化工产业低碳、高效、智能化发展需求的必然选择。本文从原理、传统工艺局限出发，提出的多维度创新路径，已在工业实践中体现出显著成效，有效解决了传统工艺的核心痛点。未来需持续深化低碳化技术研发、推进全产业链国产化、强化智能化融合，不断拓展技术适配场景。该技术的持续升级，将进一步提升原料气净化效率，降低生产成本，为煤化工等行业高质量发展提供有力保障。

参考文献

- [1]马凤仙,马华,杨一帆.低温甲醇洗技术研究进展[J].云南化工,2026,53(1):20-25.
- [2]于小强.低温甲醇洗与净化回收技术在化工工艺中的协同作用[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(2):101-104.
- [3]李涵.低温甲醇洗工艺技术在化工生产中的优势与不足探究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(6):145-148.
- [4]张海洋,王建.低温甲醇洗技术净化工艺及研究进展[J].中国科技期刊数据库工业A,2022(4):20-22.
- [5]付建立.低温甲醇洗净化工艺技术进展及应用探究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(7):62-65.