

低温甲醇洗技术在煤化工中的应用分析

胡家伟

国家能源集团宁夏煤业煤制油分公司 宁夏 银川 750411

摘要：本论文聚焦低温甲醇洗技术在煤化工领域的应用。深入探究其吸收解吸原理与核心机制，阐明该技术在净化效率、能耗及成本效益上的显著优势，分析其与煤气化制合成气、煤制天然气等典型工艺的适配性。结合实际案例展现应用流程与效果，针对设备腐蚀、甲醇损耗等挑战提出优化策略，展望智能化升级与新兴工艺融合的前景，为推动该技术在煤化工行业高效、可持续发展提供理论与实践依据。

关键词：低温甲醇洗技术；煤化工；应用分析；技术优化；节能减排

引言：在全球能源结构深度变革与我国“双碳”目标驱动下，煤化工作为煤炭清洁高效利用的关键路径，对保障能源安全、推动化工产业转型意义深远。但煤气化、煤液化等工艺产生的合成气，含硫化氢、二氧化碳等酸性气体及杂质，未经净化会腐蚀设备、毒害催化剂，加剧环境污染。数据表明，合成气中硫化氢超10ppm，下游催化剂活性将降低30%以上。低温甲醇洗技术凭借高效脱除酸性气体的优势，成为煤化工气体净化核心技术。虽已实现国产化与大规模应用，却仍面临设备稳定性、能耗控制等难题。深入研究其应用与优化策略，对煤化工绿色低碳发展至关重要。

1 低温甲醇洗技术的原理与核心机制

1.1 吸收原理

低温甲醇洗技术基于物理吸收原理，利用甲醇在低温高压条件下对酸性气体（ H_2S 、 CO_2 等）和其他杂质（ COS 、 HCN 等）具有高溶解度的特性，实现对合成气的净化。甲醇作为吸收剂，具有沸点低（ $64.7^\circ C$ ）、黏度小、化学稳定性高的特点，且对 H_2S 和 CO_2 的吸收能力远强于对氢气（ H_2 ）、氮气（ N_2 ）等有效成分的吸收。在吸收过程中，低温（ $-20^\circ C$ 至 $-50^\circ C$ ）和高压（ $2\sim 8MPa$ ）的操作条件显著提高了甲醇对酸性气体的吸收效率。 H_2S 和 CO_2 在甲醇中的溶解度随温度降低和压力升高而大幅增加，例如在 $-40^\circ C$ 、 $5MPa$ 条件下，甲醇对 H_2S 的溶解度可达常温常压下的200倍以上。这种选择性吸收特性使得低温甲醇洗技术能够在有效保留合成气中 H_2 、 N_2 等有用成分的同时，高效脱除酸性气体。从分子层面来看，低温环境降低了气体分子的热运动速率，使其更容易被甲醇分子捕获；高压则增加了气体分子的碰撞频率，促进其溶解于甲醇溶液中。

1.2 解吸原理

吸收酸性气体后的富甲醇溶液需通过解吸过程再

生，恢复吸收能力。解吸过程主要通过降压和升温实现。（1）富甲醇溶液进入闪蒸塔，通过降低压力至 $0.5\sim 1.5MPa$ ，使溶液中溶解的大部分 CO_2 闪蒸释放；（2）溶液进入气提塔，通过与惰性气体（如氮气）逆流接触，进一步解吸出残余的 CO_2 ；（3）在热再生塔中，通过加热（约 $60\sim 80^\circ C$ ）使甲醇溶液中的 H_2S 几乎完全解吸。在闪蒸塔中，压力降低打破了气体溶解的平衡状态，使得原本溶解在甲醇中的 CO_2 快速逸出；气提塔中，惰性气体的通入起到了“载气”的作用，将残留的 CO_2 携带出体系；热再生塔内，升高温度为 H_2S 的解吸提供了能量，促使 H_2S 从甲醇溶液中彻底分离。解吸出的 H_2S 气体可富集回收，用于生产硫磺，实现资源的循环利用；解吸出的 CO_2 气体若纯度达标，可进行封存或资源化利用，如用于生产碳酸饮料、食品保鲜或驱油采油等领域，减少温室气体排放。

1.3 核心机制

低温甲醇洗技术的核心在于吸收与解吸过程的循环耦合。在吸收塔内，合成气自下而上流动，低温甲醇溶液自上而下喷淋，气液充分接触，酸性气体被甲醇吸收；在再生系统，富甲醇溶液通过多级降压、气提和加热，逐步释放酸性气体，再生后的贫甲醇溶液经冷却、加压后循环回吸收塔，形成连续的净化流程^[1]。该技术通过精确控制温度、压力、流量等工艺参数，以及优化吸收塔和再生塔的结构设计（如采用规整填料塔提高传质效率），确保酸性气体的高效脱除和甲醇的循环利用，实现合成气净化与吸收剂再生的协同高效运行。例如，通过调整吸收塔内的喷淋密度和气体上升速度，可优化气液接触面积和接触时间，提高吸收效果；在再生系统中，合理设计各塔的压力梯度和温度分布，能够最大化解吸效率，同时降低能耗。

2 低温甲醇洗技术的核心优势与行业适配性

2.1 核心优势

(1) 低温甲醇洗技术具有卓越的净化效率, 能够将合成气中的 H_2S 脱除至1ppm以下, CO_2 脱除至20ppm以下, 满足各类煤化工下游工艺对原料气的严格要求。在某煤制烯烃项目中, 采用低温甲醇洗技术净化后的合成气, 使后续甲醇合成催化剂的使用寿命延长至3~5年, 大幅降低了催化剂更换成本和设备维护费用。以另一个大型煤制乙二醇项目为例, 该项目采用低温甲醇洗技术处理合成气, 将 H_2S 含量从初始的5000ppm降至0.5ppm, CO_2 含量从20%降至0.1%, 为乙二醇合成提供了优质的原料气, 保证了产品质量的稳定。(2) 在能耗控制方面, 该技术利用甲醇的物理吸收特性, 相比化学吸收法(如醇胺法), 减少了吸收剂再生过程中的热量消耗。通过采用多级闪蒸、热集成等节能技术, 进一步降低能耗。与传统净化技术相比, 低温甲醇洗技术可降低能耗15%~25%, 在大规模煤化工项目中, 每年可节约标准煤数万吨^[2]。例如, 在某千万吨级煤制油项目中, 通过优化低温甲醇洗装置的热集成系统, 将装置的蒸汽消耗降低了20%, 每年节约蒸汽成本达数千万元。(3) 从成本效益角度看, 尽管低温甲醇洗技术初期设备投资较高, 但由于其吸收剂甲醇价格低廉、循环利用率高(可达99%以上), 且硫磺等副产品可创造额外收益, 长期运行成本优势显著。在某年产180万吨煤制甲醇项目中, 低温甲醇洗装置运行成本较其他净化技术降低20%, 项目投资回收期缩短2~3年。此外, 随着甲醇生产技术的不断进步, 甲醇的生产成本持续降低, 进一步提升了低温甲醇洗技术的成本优势。

2.2 行业适配性

低温甲醇洗技术与煤化工产业高度适配, 适用于多种煤化工工艺。(1) 在煤气化制合成气工艺中, 无论是固定床、流化床还是气流床气化技术产生的粗合成气, 均能通过低温甲醇洗技术有效净化。例如, 在水煤浆气流床气化工艺中, 低温甲醇洗技术可快速脱除粗合成气中高浓度的 H_2S 和 CO_2 , 为后续合成氨、合成甲醇等工艺提供优质原料。对于固定床气化产生的合成气, 低温甲醇洗技术同样能够高效去除其中的杂质和酸性气体, 满足不同下游工艺的需求。(2) 对于煤制天然气工艺, 低温甲醇洗技术能够将合成气中的酸性气体脱除至符合天然气标准的极低水平, 同时有效分离 CO_2 , 便于后续产品气的甲烷化反应和 CO_2 的捕集利用。在某大型煤制天然气项目中, 通过低温甲醇洗技术的深度净化, 使合成气中的 H_2S 含量低于0.1ppm, CO_2 含量低于1%, 为甲烷化反应创造了良好条件, 同时回收的高纯度 CO_2 用于驱油采油, 实现了资源的综合利用。(3) 在煤制油工艺中, 其可净

化煤气化产生的合成气, 为费托合成提供纯净原料, 减少催化剂中毒风险, 提高油品质量。某煤间接液化制油项目中, 气化产生的粗合成气经低温甲醇洗净化后, H_2S 和 CO_2 含量大幅降低, 有效保护了费托合成催化剂的活性, 使油品收率提高10%~15%^[3]。同时, 该技术还能有效脱除合成气中的COS等杂质, 避免其在后续工艺中水解产生 H_2S , 进一步保障了装置的稳定运行和产品质量。

(4) 低温甲醇洗技术的模块化设计使其可根据不同煤化工项目的规模和需求灵活调整装置处理能力, 从小型试验装置到千万吨级大型煤化工项目均能适配, 具有广泛的行业应用前景。无论是新建项目还是现有装置的改造升级, 低温甲醇洗技术都能通过合理的设计和配置, 满足项目的气体净化要求。

3 低温甲醇洗在煤化工典型工艺中的应用

3.1 煤气化制合成气工艺中的应用

(1) 在煤气化制合成气工艺中低温甲醇洗技术通常作为核心净化单元。以某大型煤气化制甲醇项目为例, 气化炉产生的粗合成气(温度约200℃, 压力4.0MPa)首先经冷却、除尘后进入低温甲醇洗装置。在吸收塔内, 粗合成气与-40℃的低温甲醇逆流接触, H_2S 和 CO_2 被甲醇吸收, 净化后的合成气($\text{H}_2\text{S} < 0.1\text{ppm}$, $\text{CO}_2 < 20\text{ppm}$)送往甲醇合成单元。(2) 吸收酸性气体后的富甲醇溶液依次进入闪蒸塔、气提塔和热再生塔进行再生。闪蒸塔回收的 CO_2 气体纯度可达98%, 可用于食品级 CO_2 生产; 热再生塔解吸出的 H_2S 气体经克劳斯工艺转化为硫磺, 年产量可达数万吨, 实现了资源的高效利用和污染物的减排。在该项目中, 通过对低温甲醇洗装置的精细化操作和管理, 装置的运行稳定性和净化效果得到了有效保障, 为甲醇合成装置的长周期稳定运行奠定了坚实基础。

3.2 煤制天然气工艺中的应用

(1) 在煤制天然气工艺中, 低温甲醇洗技术的作用尤为关键。某煤制天然气项目中, 煤气化产生的粗合成气经变换调整 H_2/CO 比例后, 进入低温甲醇洗装置。该装置采用两段吸收工艺, 第一段重点脱除 H_2S , 第二段深度脱除 CO_2 , 使净化后的合成气中 H_2S 含量低于0.1ppm, CO_2 含量低于1%, 满足甲烷化反应对原料气的严格要求^[4]。(2) 再生过程中解吸出的高纯度 CO_2 气体(纯度>99%)被压缩后封存或用于驱油采油, 减少了温室气体排放; H_2S 气体回收硫磺后, 实现了硫资源的循环利用, 整个过程符合绿色化工理念。在该项目的实际运行中, 通过优化低温甲醇洗装置的操作参数和工艺流程, 进一步提高了 CO_2 和 H_2S 的回收率, 降低了甲醇的损耗, 提高了项目的经济效益和环境效益。

3.3 煤制油工艺中的应用

(1) 在煤制油工艺中,低温甲醇洗技术用于净化煤气化产生的合成气,为费托合成提供合格原料。某煤间接液化制油项目中,气化产生的粗合成气经低温甲醇洗净化后, H_2S 和 CO_2 含量大幅降低,有效保护了费托合成催化剂的活性,使油品收率提高10%~15%。(2) 该技术还能有效脱除合成气中的COS等杂质,避免其在后续工艺中水解产生 H_2S ,进一步保障了装置的稳定运行和产品质量。在该项目中,为了应对合成气组成和流量的波动,对低温甲醇洗装置的控制系統进行了优化升级,采用了先进的自动控制算法,实现了装置的稳定运行和高效净化。

4 低温甲醇洗技术的挑战与优化

4.1 现存挑战

(1) 设备腐蚀是低温甲醇洗技术应用的突出难题。甲醇吸收 H_2S 、 CO_2 形成酸性环境,对热再生塔、换热器等高温设备侵蚀严重。数据显示,运行超5年的装置中,设备腐蚀致使维修成本占总运行成本15%~20%,缩短设备寿命的同时,还暗藏安全隐患。(2) 甲醇损耗同样不容小觑,即便采用回收塔,挥发、夹带等因素仍导致其年损耗量占循环量0.1%~0.3%,大型项目每年损耗成本达数百万元,加剧生产成本压力与环境污染风险^[5]。(3) 工艺优化存在瓶颈,部分装置参数波动大、稳定性差,余热回收效率低、设备能效不足,难以应对负荷变化,严重影响合成气净化效果与技术升级。

4.2 优化策略

(1) 针对设备腐蚀,可选用双相不锈钢、合金钢等耐腐蚀材料制造热再生塔、换热器等关键设备,同时在甲醇溶液中添加复合型缓蚀剂,通过在金属表面形成保护膜抑制腐蚀反应。优化设备内部结构,如在热再生塔内安装导流板和分布器,降低流体对塔壁的冲刷强度,

延长设备使用寿命。(2) 在甲醇损耗控制上,改进回收工艺,采用高效聚结器强化气液分离效果,可使甲醇夹带量降低超50%;优化热再生塔操作参数,精确控制温度、压力和回流比,提高甲醇再生效率^[5]。同时升级密封材料与结构,减少装置泄漏点,降低甲醇挥发损耗。

(3) 工艺优化方面,引入DCS和APC先进控制系统,实时监测并自动调节温度、压力等参数;利用余热回收装置,将再生过程的热能用于预热甲醇溶液;借助Aspen等模拟软件开展工艺仿真,优化操作条件与流程配置,实现装置稳定运行与能耗降低。

结语

低温甲醇洗技术凭借高效净化、节能降耗及强适配性,成为煤化工气体净化核心技术,在多工艺场景中实现资源高效利用与污染物减排。但设备腐蚀、甲醇损耗、工艺优化难题仍存。通过材料升级、工艺改进与智能控制,可提升其稳定性与经济性。未来,随着智能化技术深度应用与CCUS技术融合,该技术将在精准控制、场景拓展上持续突破,为煤化工绿色转型与“双碳”目标达成提供关键支撑。

参考文献

- [1]姚帆.低温甲醇洗技术在煤化工中的应用探究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(21):181-183.
- [2]闵波,姜海明,姚强,等.煤化工低温甲醇洗装置先进控制技术研究[J].自动化博览,2024,41(10):94-98.
- [3]袁和,李自恩,贾飞飞,等.甲醇品质对低温甲醇洗运行及优化措施研究[J].山东化工,2024,53(17):226-227+230.
- [4]刘建付,马利玲,孔永平,等.低温甲醇洗工艺降低甲醇损耗的研究[J].化学工程与装备,2020,(07):27-28.
- [5]杨霖霖,巩守龙,郝巧娥,等.两种脱硫工艺低温甲醇洗和MDEA法的模拟与经济分析[J].煤炭技术,2025,44(05):256-259.