

煤化工低温甲醇洗酸性气体处理工艺研究

孙 娅

国家能源集团宁夏煤业煤制油分公司 宁夏 银川 750411

摘 要：在“双碳”目标和环保要求日益严苛的背景下，煤化工行业面临着转型升级的迫切需求。酸性气体处理作为煤化工生产中的关键环节，其工艺的高效性与环保性直接影响行业的可持续发展。基于此，本文聚焦于煤化工低温甲醇洗酸性气体处理工艺，深入探讨了其原理、特点以及工艺发展历程。详细分析了低温甲醇洗工艺中酸性气体的脱除机制，研究了工艺流程及关键设备，并对低温甲醇洗工艺的优化方向进行了探讨，旨在为煤化工行业的酸性气体处理提供理论支持和技术参考。

关键词：煤化工；低温甲醇洗；酸性气体处理；工艺研究

引言：煤化工原料气中通常含有大量的酸性气体，如二氧化碳（ CO_2 ）、硫化氢（ H_2S ）等，这些酸性气体不仅会对生产设备造成腐蚀，还会对环境造成严重污染，威胁人类的健康。因此，寻找一种高效、环保的酸性气体处理工艺具有重要的现实意义。低温甲醇洗工艺作为一种先进的酸性气体净化技术，在煤化工领域得到了广泛的应用。与传统的酸性气体处理工艺相比，低温甲醇洗工艺具有吸收容量大、净化精度高、溶剂易再生及能耗低等优点，能够有效提高煤化工生产的质量和效率，减少环境污染。因此，深入研究低温甲醇洗酸性气体处理工艺，优化工艺流程，提高酸性气体的回收效率和净化效果，对于推动煤化工行业的可持续发展具有重要的意义。

1 低温甲醇洗工艺概述

1.1 工艺原理

低温甲醇洗工艺基于亨利定律，在低温（通常为 -60°C 至 -40°C ）和高压（通常为 $2.8\sim 7.0\text{MPa}$ ）的条件下，甲醇对酸性气体（如 CO_2 、 H_2S 、 COS 等）具有极高的溶解度，而对有效气体（如 H_2 、 CH_4 等）的溶解度则相对较低^[1]。当原料气通过低温甲醇洗装置时，酸性气体被甲醇吸收，而有效气体则得以保留，从而实现酸性气体的脱除。如，当温度从 20°C 降到 -40°C 时， CO_2 的溶解度约增加6倍；而在 $-40^\circ\text{C}\sim -50^\circ\text{C}$ 时， H_2S 的溶解度又差不多比 CO_2 大6倍。采取控制压力和温度梯度的方式，可高度实现酸性气体的吸收和解吸循环，从而达到净化原料气的目的。

1.2 工艺特点

低温甲醇洗工艺具有吸收容量大、净化精度高、溶剂易再生、能耗低和选择性好等显著特点。其吸收容量大，能够高效地脱除原料气中的酸性气体；净化精度

高，可将净化后气体中 H_2S 与 COS 总含量降低至 0.1ppm 以下，最大程度上满足严格的环保要求；溶剂易再生，采用减压闪蒸、气提或热再生等方法，能够使吸收酸性气体后的甲醇溶剂再生，以实现溶剂的循环利用；能耗低，与其他酸性气体处理工艺相比，能够有效降低生产成本；选择性好，甲醇对不同酸性气体的溶解度差异较大，可根据需要选择性地脱除 H_2S 、 CO_2 等酸性气体。

1.3 工艺发展历程

低温甲醇洗工艺的发展可追溯至20世纪50年代，由德国林德公司和鲁奇公司联合开发，最初应用于合成氨原料气的净化。随着能源结构的调整和环保要求的提升，该工艺逐步扩展至煤化工、天然气处理等领域。早期技术受限于材料性能和设备制造水平，操作温度与压力范围较窄，溶剂损耗较高。20世纪70年代后，通过改进流程设计、优化换热网络及采用耐低温材料，工艺的能效与可靠性显著提升。进入21世纪，全球对碳排放控制的重视推动了工艺的进一步革新。现代低温甲醇洗系统通过分段吸收、多级闪蒸等设计，实现了 H_2S 与 CO_2 的选择性脱除，并大幅降低能耗。近年来，数字化技术的应用成为发展新趋势，智能控制系统与在线监测手段的引入，使工艺参数调控更加精准。并且，针对高硫煤制气、焦炉煤气等复杂气源，工艺适应性持续增强，通过模块化设计和流程优化满足差异化需求。

2 低温甲醇洗工艺中酸性气体的脱除机制

2.1 不同气体在甲醇中的溶解度

不同气体在甲醇中的溶解度存在显著差异。在低温条件下， H_2S 在甲醇中的溶解度最大，其次是 CO_2 、 COS 等，而 H_2 、 CH_4 等有效气体的溶解度则相对较低。如，在 $-40^\circ\text{C}\sim -50^\circ\text{C}$ 时， H_2S 的溶解度差不多比 CO_2 大6倍，而 CO_2 的溶解度又比 H_2 、 CH_4 等气体大100倍以上。这种溶解

度的差异使得低温甲醇洗工艺能够选择性地脱除酸性气体，而保留有效气体。在实际生产中，可根据原料气的组成和净化要求，合理调整工艺参数，以实现最佳的酸性气体脱除效果。

2.2 溶解热

各种气体在甲醇溶液中的溶解热也有所不同。其中， H_2S 的溶解热为19.264， CO_2 的溶解热为16.945， COS 的溶解热为17.364，而 H_2 的溶解热仅为3.824， CH_4 的溶解热为3.347。溶解热的大小会影响甲醇吸收气体过程中的温度变化，为了保证吸收效果，需要不断取出热量，以控制溶剂的温度。在实际生产中，通常采用换热器等设备来实现热量的交换和调节，确保工艺过程的稳定运行。

2.3 吸收动力学

实验研究发现，低温甲醇洗工艺中吸收过程的速度仅取决于 CO_2 的扩散速率。在相同条件下， H_2S 的吸收速率约为 CO_2 吸收速率的10倍^[2]。由于混合气体中 H_2S 的浓度较小，吸收速率又比较快，所以 CO_2 的吸收是控制因素。影响吸收的主要因素是温度和压力，降低温度和提高压力都有利于提高酸性气体在甲醇中的溶解度，从而提高吸收效率。

3 低温甲醇洗工艺流程及关键设备

3.1 工艺流程

低温甲醇洗工艺的流程设计以多级吸收、分段再生为核心，通过温度与压力的梯度变化实现酸性气体的高效脱除与甲醇溶剂的循环利用。典型的工艺流程可分为原料气预处理、酸性气体吸收、溶剂再生及尾气处理四个主要环节。

原料气首先进入预处理单元，通过冷却与分离去除其中的水分、粉尘及重烃等杂质，避免后续设备堵塞或溶剂污染。预处理后的原料气进入吸收塔底部，与自上而下流动的贫甲醇逆流接触。吸收塔通常设计为多段结构：上段优先脱除 H_2S 及有机硫（ COS ），利用甲醇对 H_2S 的高选择性溶解特性；下段则主要脱除 CO_2 ，通过低温高压条件增强 CO_2 的吸收效率。净化后的气体从塔顶排出，满足下游工段的纯度要求。之后，富含酸性气体的富甲醇从吸收塔底部引出，经过多级减压闪蒸实现溶剂初步再生。高压闪蒸阶段优先释放溶解的 H_2 、 CH_4 等有效气体，回收后返回原料气系统；中压闪蒸阶段分离出高浓度 CO_2 ，可直接捕集或进一步处理；低压闪蒸与热再生结合，通过蒸汽加热彻底解吸 H_2S 等残余酸性气体，生成贫甲醇循环至吸收塔。最后，尾气处理环节针对不同闪蒸阶段的酸性气体采取差异化策略。 CO_2 闪蒸气可通过压缩回用或地质封存；含 H_2S 的酸性气则输送至硫回收装置

（如克劳斯工艺）转化为单质硫，实现资源化与无害化处理。整个流程中，换热网络的设计尤为关键，通过冷热物流的集成优化降低能耗，如利用富甲醇的冷量预冷原料气，或通过再生塔的热量预热贫甲醇。

工艺的灵活性体现在可根据原料气组成调整操作参数。比如，对于高硫煤制气，可强化 H_2S 吸收段的甲醇循环量；若以 CO_2 脱除为主，则需优化闪蒸压力与温度梯度。此外，流程中设置的甲醇过滤器、活性炭吸附器等辅助单元，可有效控制溶剂降解产物的积累，保障系统长期稳定运行。

3.2 关键设备

3.2.1 吸收塔

吸收塔是低温甲醇洗工艺的核心设备，用于实现酸性气体的吸收。吸收塔通常分为多个段，分别用于脱除 H_2S 和 CO_2 等酸性气体。生产中，吸收塔的设计和操作参数对酸性气体的脱除效果有着重要影响。如，吸收塔的塔板数、塔径、填料类型等都会影响气液接触面积和传质效率，从而影响酸性气体的吸收效果。

3.2.2 闪蒸塔

闪蒸塔包括 CO_2 闪蒸塔和 H_2S 闪蒸塔，用于将吸收酸性气体后的甲醇溶剂进行闪蒸，分离出溶解的气体，实现溶剂的再生^[3]。闪蒸塔的操作压力和温度等参数会影响闪蒸效果和溶剂的再生程度。但需要注意的是，应根据原料气的组成和净化要求，合理调整闪蒸塔的操作参数，以确保溶剂的再生效果。

3.2.3 再生塔

再生塔通过蒸汽加热使富含酸性气体的甲醇溶剂再生，释放出酸性气体，得到贫甲醇。再生塔的操作温度和压力等参数会影响溶剂的再生效果和酸性气体的回收率。为此，需要严格控制再生塔的操作参数，以确保溶剂的再生效果和酸性气体的回收率。

3.2.4 换热器

换热器用于实现工艺过程中的热量交换，提高能源利用效率。在低温甲醇洗工艺中，换热器的种类和数量较多，包括绕管换热器、板式换热器等。换热器的设计和选型需重点考虑工艺流程的要求、介质的性质和温度等因素，以确保换热效果和设备的可靠性。

3.2.5 压缩机

用于对气体进行压缩，提高气体的压力，以满足工艺要求。在低温甲醇洗工艺中，压缩机主要用于对原料气和闪蒸气进行压缩。此过程中，压缩机的选型需要考虑气体的流量、压力和温度等参数，以确保压缩机的正常运行和工艺要求的满足。

4 低温甲醇洗工艺的优化方向

4.1 多源监测数据融合技术

在低温甲醇洗工艺运行过程中,设备面临复杂多变的工况,热应力状态会因温度波动、压力变化以及介质腐蚀等因素发生改变。当前单一的热应力监测技术难以全面、精准地反映设备真实运行状态,在复杂环境下,其监测数据的准确性和可靠性受到极大挑战。因此,研究多源监测数据融合技术势在必行。其中,传感器技术能够实时采集设备关键部位的温度、压力、振动等基础数据,为设备运行状态分析提供基础信息;光纤传感技术凭借其高灵敏度、抗电磁干扰等特性,可对设备内部的细微变化进行精确捕捉;红外热成像技术则能直观呈现设备表面的温度分布情况,快速定位异常热源。将这些不同监测手段获取的数据进行融合处理,构建多维度的数据模型。在此基础上,挖掘数据间的内在联系,综合分析数据的关联性和互补性,能够突破单一监测技术的局限性。如此一来,可更全面、精准地掌握设备运行状态,提前识别潜在的安全隐患,为工艺稳定运行提供可靠保障。

4.2 深度学习与传统控制方法结合

深度学习算法具备强大的自学习和自适应能力,通过对海量工艺数据的学习,能够挖掘出数据背后隐藏的复杂规律,精准建模和预测工艺过程的动态变化。而传统的模型预测控制、智能优化算法等,在控制逻辑和稳定性方面具有成熟的理论和实践基础^[4]。将深度学习算法与传统控制方法有机结合,可充分发挥二者优势。在实际应用中,深度学习算法可对工艺过程进行实时建模和预测,提前预判系统状态变化趋势;传统控制方法则根据预测结果,结合既定的控制规则和目标,快速生成最优控制策略。这种融合方式能够显著提升控制系统对复杂工况的适应能力,有效克服系统参数变化、外部干扰等因素的影响,最终实现对低温甲醇洗工艺更精准、高效的控制,保障工艺指标的稳定。

4.3 热应力-材料损伤-寿命预测的多物理场耦合研究

低温甲醇洗设备长期处于低温、高压且伴有腐蚀性介质的恶劣环境中,设备材料会因热应力作用发生疲劳损伤,其性能逐渐劣化。单一考虑热应力或材料损伤因素,难以准确评估设备的实际状况和剩余寿命。因此,开展热应力-材料损伤-寿命预测的多物理场耦合研究至关

重要。

通过建立多物理场耦合模型,将热应力场、材料损伤场以及环境因素等纳入统一的分析框架。综合考虑温度变化导致的热应力、介质腐蚀对材料性能的影响、交变载荷引发的疲劳损伤等多种因素,全面分析各物理场之间的相互作用和影响机制。基于此,能够准确预测设备在不同工况下的寿命损耗情况,为设备维护和更换提供科学依据。

4.4 智能化运维与远程监控技术

智能化运维的核心在于利用大数据分析和人工智能算法,对设备健康状态进行预测性维护。通过采集关键设备的振动、温度、压力等信号,结合历史运行数据,建立故障预警模型,提前识别潜在异常,减少非计划停机。而远程监控技术则依托5G通信和云计算平台,实现跨区域、多装置的集中管理。操作人员可通过可视化界面实时掌握工艺运行状态,远程调整参数或启动应急程序,提高响应速度与安全性。

结语:综上所述,低温甲醇洗工艺凭借独特的原理和显著优势,已成为煤化工酸性气体处理的关键技术。其在脱除酸性气体、保障生产设备稳定运行及降低环境污染等方面发挥着重要作用。然而,面对日益严格的环保要求和行业发展需求,现有工艺仍存在提升空间。通过研究多源监测数据融合技术、探索深度学习与传统控制方法结合,以及加强热应力-材料损伤-寿命预测的多物理场耦合研究等优化方向,有望进一步提高工艺效率与设备可靠性。未来,持续深入研究低温甲醇洗工艺,推动其技术创新与升级,将为煤化工行业的绿色、可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]王伟,杜丽.低温甲醇洗装置贫甲醇换热器换热管失效分析[J].化学工程与装备,2021(10):181-185.
- [2]李晓斌,康霞.低温甲醇洗在合成气净化工艺中的应用研究[J].山东化工,2021,50(18):125-127.
- [3]余汪炎.低温甲醇洗半贫液系统改进及运行总结[J].氮肥与合成气,2021,49(09):9-11.
- [4]刘畅,李繁荣,詹信,安帅.荒煤气净化环节中低温甲醇洗工艺制冷方式的选择[J].化工设计通讯,2021,47(02):7-8+50.