

低温甲醇洗鲁奇工艺与林德工艺之间的经济性分析

林荣先（中海油惠州石化有限公司，广东 惠州 516086）

摘要：随着全球能源结构逐步向清洁能源转型，天然气作为一种相对较环保的化石能源，在当今的能源市场中占有重要地位，其中低温甲醇洗鲁奇工艺与林德工艺之间的经济性分析成为行业关注的焦点。基于此，本文首先阐述了低温甲醇洗鲁奇工艺与林德工艺的基本原理及操作步骤，其次对两种工艺进行了详细的设备投资对比，分析了各自的冷量利用效率、副产品回收潜力以及装置运行时的弹性差异，实现了对两种工艺从经济角度深入比较的目标，并以此为企业管理者、技术人员提供实践参考。

关键词：低温甲醇洗；鲁奇工艺；林德工艺；经济性

在天然气净化领域，低温甲醇洗鲁奇工艺与林德工艺被广泛应用于脱除天然气中的酸性组分（如 CO_2 和 H_2S ），以此防止管道腐蚀及满足液化天然气生产的要求。其中低温甲醇洗鲁奇工艺以其高效的分离效率和优异的处理能力受到青睐，而林德工艺则因为其成熟稳定和经济性在市场上占有一席之地，但随着能源需求的不断增长及环保标准的提高，对这些分离技术的经济性进行全面比较显得尤为重要。基于上述实际背景，本文旨在围绕设备投资、冷量利用、副产品回收以及装置运行操作弹性等方面对两者的经济性进行全面分析，揭示两种工艺在各自应用场景下的经济优势和潜在限制，以此辅助投资者、管理人员进行决策。

1 低温甲醇洗鲁奇工艺与林德工艺概述

1.1 低温甲醇洗鲁奇工艺基本原理及步骤

低温甲醇洗鲁奇工艺（简称为 Lurgi 过程）利用甲醇作为溶剂在低温和高压条件下吸收天然气中的酸性组分。此工艺首先主要是对原始煤制气进行预处理，除水和沉淀粉尘、杂质，避免下游设备受损，经预处理后的原料气在吸收塔中与冷却至低温的甲醇接触，吸收天然气中的 H_2S 、 CO_2 等有害成分，再加热降压来使甲醇释放出吸收的气体，并将清洁的甲醇循环回吸收塔使用，最后进一步净化处理，确保处理后的净化气达到销售或作为天然气的液化要求。

1.2 林德工艺基本原理及步骤

林德公司的低温甲醇洗工艺预处理过程主要是通过绕管式换热器来实现降温吸收工作的。实际工艺实践中，需要将原料气首先通过绕管换热器进行预冷却以降低其温度，预冷后的原料气流经吸收塔，与冷却至低温的甲醇接触，吸收天然气中的 H_2S 、 CO_2 等有害成分。富甲醇中压闪蒸过程基于 Joule-Thomson 效应，改变气体流经节流阀时状态实现温度和压力的变

化来分离组分，部分有效气需再次被压缩并循环回预冷却阶段以提高整体效率。

这两种工艺虽然都是为了达到天然气净化目标，Lurgi 工艺与林德工艺大同小异，但是从投资、装置运行经济性等相关方面还是有细微差别。而企业选择哪种工艺不仅取决于经济性因素，还要考量原料组成、所需产品规格以及潜在副产品价值等多方面条件。

2 低温甲醇洗鲁奇工艺与林德工艺的设备投资对比

2.1 初始建设成本对比

Lurgi 工艺需要高压反应器、精馏塔及特殊材料制造的换热器等复杂的设备组合，所以在初始投资方面较大，而且吸收塔需承受高压，并且设计上要求能够处理含有腐蚀性物质的流体，甲醇再生系统也需要额外的设备投入，这便进一步增加了材料和建造成本。相比之下，林德工艺中使用的主要设备为绕管换热器、分离器和压缩机，虽然也需要高质量材料以避免低温条件下的脆化问题，但其操作压力不如 Lurgi 工艺高，这便在一定程度上降低了材料选择上的成本，但林德工艺需要质量较高的绕管换热器实现预冷却过程，这便导致了换热器部分成本较高。

2.2 土建及附属设施投资对比

在土建方面，Lurgi 工艺由于其流程比较复杂，工艺中所需换热器较多，所需的安全距离、基础强度和整体结构稳固程度均大于林德工艺，所以 Lurgi 工艺的土建成本，要远大于林德工艺的土建成本。附属设施方面，两种工艺都需要大量管道、电缆和控制系统，但 Lurgi 工艺由于其复杂性和安全要求通常需要更为复杂的管线布局和控制系统，所以在附属设施上通常也会有较高的费用支出。

2.3 设备折旧与维修保养开销

随着时间推移，所有工业装置都会经历折旧和维

维修保养成本,针对 Lurgi 工艺而言,折旧成本较高主要源于初期投资较大,同时由于系统复杂和对操作环境(尤其是低温和高压)要求严格,在日常运行中的产生故障(非人为因素故障)可能较多,容易产生维修需求,在一定程度上增加了其维修成本,而且甲醇溶剂方面,也需要专门注意以避免污染或损耗,进一步增加了维修保养方面的人力成本。

与 Lurgi 工艺相比,林德工艺同样面临低温带来的脆化风险、以及甲醇溶剂方面的污染或损耗,但因为操作压力相对较低且系统较为简单,在日常检查、故障诊断和零件更换上更为便捷,在维修保养上具有优势,而且绕管换热器等关键部件虽然投资成本可能较高,但其更换频率远低于普通的列管式换热器(高压条件下内部部件寿命较短)。

3 低温甲醇洗鲁奇工艺与林德工艺的冷量利用比较

3.1 各自制冷需求与能耗特点

Lurgi 工艺利用甲醇作为吸收剂,在高压下除去天然气中的 CO_2 和 H_2S 等杂质,此过程将气体降至非常低的温度以提升甲醇的吸收能力,并保持该状态下吸收,所以该类型工艺对制冷需求极大,而且涉及高压操作环境,相应的压缩机能耗也会增加。林德工艺通过 Joule-Thomson 效应或膨胀机实现制冷,并采用多级制冷循环来得到所需的低温,此方法虽然效率高,但能耗会随着要求达到的温差(生产温度需求)增大而增加,所以在处理含有少量杂质的原料气时,林德工艺通常能表现出较好的能效表现,但如果原料气的杂质含量较多,可能反而其能耗会高于 Lurgi 工艺,表现出更高的制冷能耗,所以林德工艺制冷能耗的下限较低,上限较高,需要企业结合自身原料来源、质量进行综合研判选择。

3.2 制冷系统效率对比

Lurgi 工艺的制冷系统必须兼顾吸收塔内部的温度控制及甲醇再生过程的热管理需要,当处理具有高含硫量或其他难以去除杂质的原料气时,此种额外步骤可能导致整个系统的能效降低,而且此步骤无法通过工艺手段降低能耗。林德工艺则专注于通过节流阀或膨胀机快速降低温度,并且通过绕管换热器将预冷却过程中回收的热量有效地用于预热原料气,从而提升了整个系统的能量利用效率,在去除大量硫化物或二氧化碳等杂质情形下,林德工艺可能更加节能。

针对上述对两者冷量利用情况的对比,发现在原料气杂质含量较多,且存在硫化物或其他难以去除

杂质的成分条件下,两者工艺的能耗均会升高,而且林德工艺能耗对比 Lurgi 工艺较高。但如果原料气杂质相对较少,或其中不存在较多的硫化物和难以去除的其他杂质,林德工艺因其反应流程均为基于 Joule-Thomson 效应,其具有节能优势。

4 低温甲醇洗鲁奇工艺与林德工艺的副产品回收与附加价值

4.1 分离杂质处理利用方案

在 Lurgi 工艺中, CO_2 、 H_2S 等杂质被有效地从甲醇中分离,此类杂质气体可以进一步处理用于生产硫磺、液态 CO_2 等产品,比如硫磺是糖、淀粉和纸张工业的重要原料,液态 CO_2 可用于食品行业或作为冷却介质。

林德工艺实践中利用改变压力和温度进行组分分离,获得的副产品主要包括酸性气、 CO_2 等可利用的产品。另外还可回收循环气,此循环气可以直接销售给其他行业或者用于内部再利用。

4.2 副产品再利用的潜在收益对比

Lurgi 工艺收益方面,随着全球硫市场价格波动,硫磺可以作为企业可观的收入来源,而且液态 CO_2 可能会带来稳定的边际利润。当杂质被转换为有用产品时,可以减少废物排放,符合我国对于相关产业可持续发展的要求。但考虑到只有原料成分中含有硫化物杂质的情况下才可产出大量硫磺,而根据上文中对冷量对比的分析可知,在原料成分含有大量硫化物杂质的情况下,Lurgi 工艺的制冷需求会加大,这便带来额外的能耗,企业管理人员需要平衡副产品和能耗消耗两者的收益与损失。

林德工艺收益方面,除了包括上述 Lurgi 工艺收益方面外。回收的循环气可循环再利用,降低能耗;亦可直接销售至下游装置,增加额外经济效益。

企业管理人员在对比两种工艺时,需考虑市场需求,评估硫磺、液态 CO_2 、循环回收气等副产品的市场需求,并预测这些需求随时间变化的趋势,对于需要进一步处理才能变为商品的杂质(如 H_2S 转化为硫磺),要考虑其处理成本和带来的额外能耗成本,最后基于上述因素,计算投资副产品处理和回收设施所需的初始资金量以及计算投资回报率,以此进行全面决策。

5 低温甲醇洗鲁奇工艺与林德工艺的装置运行弹性对比

5.1 不同纯度的适应能力

Lurgi 工艺由于甲醇的吸收能力与系统的操作条

件密切相关,调整操作参数(如压力和温度)可以在一定范围内适应不同纯度要求的产品,技术人员可根据需求增加系统压力或降低温度提高甲醇对杂质的吸收量,从而生成更高纯度的产品气,此种灵活性使得 Lurgi 工艺能够根据市场需求或原料气组成的变化调整产品规格。

林德工艺主要依赖于 Joule-Thomson 效应及绕管换热器进行降温,并通过吸收塔高压低温实现组分分离,冷量回收充分,而且流程中制冷换热器较多,通过制冷系统提供的冷量及时,操作中调整能力相对较强。相较于 Lurgi 工艺,林德工艺对于精细调节有更大的灵活性,因为它可以通过调整连续调整制冷换热器来达到目标。

5.2 对原料组成波动的调整能力

Lurgi 工艺的调整能力源于其设计中的操作变量,如压力、温度和甲醇循环量,技术人员可调整此类参数以适应原料气成分的波动,当原料气中 H_2S 或 CO_2 含量增加时,可以通过提高运行压力和/或降低再生甲醇的温度来提高吸收效率,因而对原料气组成的波动具备一定的适应性,但此种调整通常有极限,超过该极限可能需要额外投资,增设更多的制冷设备或扩大甲醇储存和再生能力。而且由于甲醇能够在单一操作条件下同时吸收多种杂质,因此系统可以通过优化吸收塔各段的吸收甲醇来适应不同浓度级别的杂质输入,假设进料中硫磺含量意外上升,可提高预洗循环甲醇量以保持脱硫效果,在此过程中需监控甲醇洗涤塔顶部在线分析及塔中的温度,并适时调节以确保最佳运行状态,所以在处理富含杂质的原料气时显示出较强的灵活性。

相比之下,林德工艺依赖于 Joule-Thomson 效应及绕管换热器进行降温,并通过低温高压吸收除去杂质,对原料气组成波动的适应取决于预处理过程和制冷系统的设计容量,技术人员可调节 Joule-Thomson 阀前后压力差,改变制冷效果,进一步提高吸收杂质的能力,如果原料气组成变得较重(即碳氢比增加),可通过多台制冷换热器改变制冷效果,达到甲醇再生所需要的低温,才能达到额外的冷却要求。

5.3 对生产规模变动的适应性

Lurgi 工艺实践中,技术人员可以改变循环中甲醇的量,有效控制吸收杂质的程度,从而调节原料气的处理能力,增加循环甲醇量可以提高系统处理大流量原料气的的能力,反之亦然,而且该工艺采用的设备如

吸收塔和再生器通常设计有一定的余量,以便在不同生产需求下保持操作灵活性,从该角度分析,对于生产规模变动适应性 Lurgi 工艺体现在其循环甲醇量的调整。

林德工艺为了适应不同的生产规模,技术人员可以根据生产规模需求进行调整,其中制冷换热器可以通过调整制冷系统负荷实现不同原料气负荷处理的冷量需求,亦可通过改变流程排列和操作参数来适应不同的冷热负荷,以满足不同产量要求。最后,Lurgi 工艺须调整制冷系统和压缩机的运行参数以适应各负荷原料气条件下的甲醇低温差异。林德工艺则可能需要调整中压闪蒸系统的节流制冷压力,以确保在不同负载下维持最佳的冷量回收效率。而且在面对生产负荷的快速转换时,由于林德工艺调整过程是连续的且容易控制,可快速响应生产参数变化,并且不会对产品质量造成显著影响,反观 Lurgi 工艺,则受限于甲醇再生和处理流程的复杂程度,生产操作调整时间可能需要更长时间,并伴随着效率低下问题。

6 结束语

综上所述,本文从设备投资、冷量利用、副产品回收以及装置运行弹性四个角度出发,分析了低温甲醇洗鲁奇工艺和林德工艺的经济性,鲁奇工艺适合于需要高纯度产品并且对副产品回收有较高要求的场合,而林德工艺则更适用于初期投资预算有限且寻求稳定可靠运行的情形。但相关企业在选择具体工艺时,应意识到虽然初步投资是一个重要因素,但长远来看,运营成本、设备维护、系统的灵活性以及市场需求变动都对总体经济效益产生深远影响,管理人员应结合自身实际生产需求,灵活选择处理工艺。未来,随着技术的进步和市场需求的变化,这两种工艺都可能经历变革或创新,以更好地满足产业发展和环境保护的双重挑战,所以相关技术人员应持续监视这一领域的技术和市场趋势,并根据最新数据更新经济性分析,辅助企业管理人员做出明智决策。

参考文献:

- [1] 张永江.鲁奇炉内夹套腐蚀的修复施工技术[J].化工管理,2022(02):163-165.
- [2] 毛相林,王传亚,王瑞.低温甲醇洗工艺及常见问题浅析[J].化工生产与技术,2013(1):3-6.
- [3] 王现利,刘仲伟.低温甲醇洗工艺及常见问题的思考[J].工程技术(文摘版):2024,03(18):78-80.