

煤气化制氢工艺的能效提升策略

颜世超

中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017209

摘要：煤气化制氢工艺是制取氢气的重要技术，通过煤炭热解、气化反应、合成气净化及氢气提纯等步骤实现。文章介绍了固定床、流化床和气流床三种主要煤气化工艺类型及其特点，分析当前煤气化制氢工艺的能效现状。针对能效提升，提出了原料与气化剂优化、工艺参数优化、催化剂与反应器创新、热能回收与利用以及系统集成与优化等策略。这些策略旨在提高气化效率、降低能耗，从而实现煤气化制氢工艺的整体能效提升。

关键词：煤气化制氢；能效提升；工艺优化；技术创新

1 煤气化制氢工艺的基本原理

煤气化制氢是一种重要的氢气制取技术，其基本原理是将煤炭通过一系列复杂的化学反应转化为富含氢气的合成气，再经进一步处理获得高纯度氢气。一是煤炭的热解。在高温且隔绝空气的条件下，煤炭受热分解，这一过程会生成焦炭、焦油和煤气等产物。煤炭中的有机大分子结构开始断裂，产生相对较小的分子，如甲烷、氢气以及一些挥发性的烃类化合物。热解的温度和时间等因素会对产物的组成和性质产生影响。二是气化反应。在高温环境中，热解产生的焦炭与气化剂（通常是氧气和水蒸气）发生反应。主要包括两个关键反应：一是碳与水蒸气的反应，即 $C+H_2O \rightleftharpoons CO+H_2$ ，此为吸热反应，生成一氧化碳和氢气；二是碳与氧气的燃烧反应， $C+O_2 \rightleftharpoons CO_2$ ，这是一个放热反应，能为整个气化过程提供所需的热量。同时，一氧化碳还会与水蒸气发生变换反应， $CO+H_2O \rightleftharpoons CO_2+H_2$ ，该反应能进一步提高氢气的产量。三是合成气的净化。气化得到的合成气中除了氢气和一氧化碳外，还含有二氧化碳、硫化氢、粉尘等杂质。要通过一系列净化工艺，如脱硫、脱碳、除尘等，去除这些杂质，以满足后续氢气提纯的要求^[1]。四是氢气的提纯。经过净化的合成气中氢气的纯度还不够高，需要采用合适的提纯技术，如变压吸附（PSA）、膜分离等，将氢气从混合气体中分离出来，得到高纯度的氢气，以满足不同领域对氢气质量的需求。

2 主要煤气化工艺类型及特点

2.1 固定床气化工艺

固定床气化工艺，顾名思义，是指将块煤或经过加工的型煤装入气化炉中，形成一个相对稳定的固定床层。气化剂（通常是水蒸气、氧气或空气）从气化炉的底部通入，与煤炭逆流接触并发生气化反应。该工艺具有技术成熟、操作相对简单的优点，并且对煤种的适应

性较强，能够处理包括高灰熔点、粘结性较强的煤种在内的多种煤炭。例如，鲁奇气化炉就是固定床气化工艺的典型代表，它在国内外得到广泛的应用。

然而，固定床气化工艺也存在一些不足之处。首先，其生产能力相对较低，难以满足大规模工业化生产的需求。其次，炉内温度分布不均匀，容易导致局部过热或冷却不足，从而影响气化效率和产物的品质。此外，由于固定床气化过程中容易出现结渣现象，这不仅会影响气化炉的正常运行，还会降低碳转化率，进一步限制能效的提升。最后，气体带出物较多也是该工艺的一个问题，这会增加后续净化处理的难度和成本。

2.2 流化床气化工艺

流化床气化工艺则是将粒度较小的煤炭颗粒通过气流的作用使其处于流化状态，在流化床气化炉中与气化剂进行反应。这种工艺的优势在于传热传质效率高，反应速度快，生产能力大，并且能够处理粉煤等粒度较小的煤炭，对煤种的适应性也较好。例如，温克勒气化炉和恩德气化炉都是流化床气化工艺的典型代表。尽管流化床气化工艺具有诸多优点，但也存在一些挑战。第一，该工艺对煤炭的粒度和性质有一定的要求，如果粒度过大或性质不符合要求，可能会影响气化效果和能效^[2]。第二，由于气体中灰分含量较高，且气固分离难度较大，容易造成部分未反应的煤颗粒损失，这不仅会影响碳转化率，还会增加后续处理的工作量。第三，流化床气化工艺对设备的磨损也较为严重，需要定期维护和更换。

2.3 气流床气化工艺

气流床气化工艺是目前最先进的煤气化工艺之一，它将煤粉与气化剂以高速气流的形式喷入气化炉内，利用高温高压的条件使煤粉迅速完成气化反应。该工艺具有气化效率高、生产能力大、气体成分稳定、碳转化率高（可达95%以上）等优点，非常适合大规模的工业化生

产。例如,德士古气化炉和Shell气化炉就是气流床气化工艺的典型代表。气流床气化工艺的技术难度较大,设备投资也相对较高。由于气化过程中需要承受高温高压的条件,对气化炉的材料和制造工艺都有很高的要求。此外,该工艺对操作和维护的要求也较为严格,需要专业的技术人员进行监控和管理。

3 煤气化制氢工艺的能效现状分析

目前,煤气化制氢工艺的能效水平参差不齐,受多种因素影响。整体来看,传统煤气化制氢工艺的能效普遍较低,一般在40%-50%之间。在气化环节,由于反应条件难以精准控制,存在大量的能量损失,如不完全燃烧、高温烟气带走的显热等。以某固定床气化炉为例,其气化过程中的能量损失可达总输入能量的30%左右,主要源于炉渣和飞灰带走的热量以及未反应碳的损失。在后续的变换、净化和氢气提纯等环节,也存在能量消耗过高的问题。例如,变压吸附(PSA)氢气提纯技术虽然应用广泛,但在吸附和解吸过程中需要消耗大量的能量,导致整个制氢系统的能效降低。另外,不同工艺类型之间的能效差异较大,气流床气化工艺由于其高效的气化效率和碳转化率,能效相对较高,可达到50%-60%,而固定床和流化床气化工艺的能效则相对较低。随着环保要求的日益严格和能源成本的不断上升,提高煤气化制氢工艺的能效已成为行业发展的迫切需求。

4 煤气化制氢工艺能效提升策略

4.1 原料与气化剂优化

原料与气化剂的选择对煤气化制氢工艺的能效有着至关重要的影响。在原料方面,不同煤种的特性差异显著。例如,煤的灰分、挥发分、固定碳含量以及反应活性等都会直接影响气化效率和氢气产率。低灰分、高挥发分和高反应活性的煤种更有利于提高气化效率,减少杂质对气化过程的干扰,从而降低能耗。因此,在实际生产中,应根据煤质特性进行合理选择,优先选用优质煤种,或者通过煤炭洗选、配煤等技术手段改善原料煤的质量,以提高气化反应的效率和氢气的产出。气化剂的选择和配比同样关键;常用的气化剂有氧气、水蒸气等。氧气作为气化剂,能够提供充足的氧元素,促进煤的燃烧和气化反应,提高反应温度和速率。水蒸气则参与水煤气反应,增加氢气的产量。通过优化氧气和水蒸气的配比,可以实现气化过程的高效进行^[3]。例如,适当增加氧气的比例可以提高气化温度,加快反应速度,但过高的氧气比例可能导致燃烧反应过于剧烈,降低氢气产率;而过多的水蒸气会增加能耗,且可能使反应温度下降。因此,根据具体的煤气化工艺和设备条件,通过

实验和模拟确定最佳的气化剂配比,以提高气化效率和氢气纯度,从而提升整体能效。

4.2 工艺参数优化

工艺参数的优化是提高煤气化制氢工艺能效的重要手段,气化温度、压力、料气比等参数对气化反应的影响相互关联。气化温度是影响气化反应速率和产物分布的关键因素。较高的气化温度有利于加快反应速度,提高碳的转化率,但过高的温度会增加能耗和设备损耗。压力的变化会影响气体的扩散和反应平衡,适当提高压力可以提高反应物的浓度,促进反应的进行,但也会增加设备的投资和运行成本。料气比则决定原料煤和气化剂的相对含量,对气化效率和氢气产率有直接影响。通过实验研究和模拟计算,可以找到最佳的工艺参数组合。例如,在一定范围内提高气化温度,同时优化压力和料气比,可以使气化反应在更高效条件下进行,提高氢气的产率和纯度。此外,还可以采用先进的控制技术和自动化系统,实时监测和调整工艺参数,确保生产过程始终处于最佳状态,从而提高能效和稳定性。

4.3 催化剂与反应器创新

4.3.1 催化剂创新

催化剂在煤气化制氢工艺中起着关键作用,能够显著提高反应速率和选择性,从而提升能效。传统催化剂存在活性不高、稳定性差等问题,限制了反应的进行和氢气的产率。因此,研发新型高效催化剂是提升能效的重要途径。一方面,纳米催化剂成为研究热点。纳米材料具有独特的物理和化学性质,如较大的比表面积、丰富的活性位点等,能够显著提高催化活性。例如,纳米金属催化剂可以在较低的温度下促进煤气化反应,减少能源消耗。通过对纳米催化剂的组成和结构进行精确调控,可以进一步提高其选择性和稳定性,使反应朝着生成氢气的方向进行,减少副产物的生成。另一方面,复合催化剂的研究也取得重要进展。将不同功能的催化剂进行复合,可以发挥各组分的协同作用,提高催化性能。例如,将金属催化剂与载体材料复合,载体材料可以提供良好的分散性和稳定性,同时与金属催化剂发生相互作用,增强催化活性。此外,还可以引入助催化剂,调节催化剂的电子结构和表面性质,进一步提高催化效率。

4.3.2 反应器创新

反应器的结构和操作方式对煤气化制氢工艺的能效也有重要影响,传统的反应器存在气体分布不均匀、传热传质效率低等问题,导致反应不完全和能量浪费。因此,开发新型反应器是提高能效的关键。流化床反应器

是一种具有潜力的新型反应器,在流化床反应器中,固体颗粒处于流化状态,气体与固体颗粒之间的接触更加充分,传热传质效率高。这有利于煤气化反应的进行,提高反应速率和碳转化率,流化床反应器具有较好的适应性,可以处理不同性质的原料煤,提高工艺的灵活性。另外,浆态床反应器也受到广泛关注。浆态床反应器将原料煤以浆液的形式输入反应器,与气化剂充分混合,反应条件更加温和。浆态床反应器可以有效减少气体短路和返混现象,提高反应的选择性和氢气的产率。同时,浆态床反应器还可以实现连续操作,提高生产效率。

4.4 热能回收与利用

煤气化制氢过程中会产生大量的热能,这些热能的回收与利用是提高能效的重要环节。传统的煤气化制氢工艺中,大量的热能以废热的形式散失,造成了能源的浪费。因此,采取有效的热能回收与利用措施至关重要。余热锅炉是一种常用的热能回收设备;在煤气化过程中,高温的气体 and 固体残渣携带着大量的热量,通过余热锅炉可以将这些热量传递给水,产生蒸汽。蒸汽可以用于驱动汽轮机发电,或者用于供暖、制冷等工艺,实现能源的梯级利用。余热锅炉的应用可以显著提高能源利用效率,降低生产成本。废热发电技术可以直接将废热转化为电能,无需经过中间的热能转换过程,提高能源转换效率。例如,采用有机朗肯循环发电技术,利用低品位的废热驱动有机工质循环,产生电能,这种技术适用于煤气化制氢工艺中不同温度范围的废热回收,具有广阔的应用前景。另外,还可以利用固体残渣的余热进行干燥、预热等工艺。例如,将煤气化后的固体残渣用于干燥原料煤,减少外部能源的消耗。同时,固体残渣还可以作为建筑材料或路基材料进行综合利用,实现资源的最大化利用^[4]。

4.5 系统集成与优化

煤气化制氢工艺是一个复杂的系统,各个环节之间相互关联、相互影响。系统集成与优化可以实现各环节的协同工作,提高整体能效。通过流程模拟和优化技

术,对整个煤气化制氢系统进行全面分析和优化,确定最佳的工艺流程和设备配置,减少中间环节的能量损失和物料浪费。例如,优化煤气化、变换、净化等环节的衔接,使气体和物料的输送更加顺畅,降低管道阻力和输送能耗。引入智能化控制系统也是系统集成与优化的重要措施,智能化控制系统可以实时监测生产过程中的各项参数,如温度、压力、流量等,并根据预设的优化目标自动调整工艺参数和设备运行状态。通过智能化控制,可以实现生产过程的精准调控,提高系统的稳定性和能效。另外,加强各环节之间的能量耦合和物质循环也是系统集成与优化的关键,例如,将变换反应产生的热量用于预热原料气,实现能量的梯级利用;将净化过程中产生的废液进行回收处理,实现物质的循环利用。通过系统集成与优化,可以实现煤气化制氢工艺的整体能效提升,降低生产成本,提高产业竞争力。

结束语

综上所述,煤气化制氢工艺的能效提升是一个系统工程,需要从原料选择、工艺参数、催化剂与反应器、热能回收以及系统集成等多个方面进行综合优化。随着技术的不断进步和创新,煤气化制氢工艺的能效将得到进一步提升,为氢能产业的发展提供更加可靠的技术支持。未来,继续加强技术研发和创新能力,推动煤气化制氢工艺的可持续发展,为实现绿色、低碳的能源转型贡献力量。

参考文献

- [1]孙少东,李智,袁本峰,等.整体煤气化燃料电池发电与甲醇联产系统运行特性[J].洁净煤技术,2023,29(3):49-55.
- [2]张天辰,赵众.基于多模型切换控制的煤气化工业过程先进控制[J].煤炭学报,2023,48(4):1747-1758.
- [3]张临乐.水煤浆气化关键设备运行问题及处理措施[J].山东化工,2022,51(04):157-159.
- [4]袁傲,杨靖,张庆,杨岚,王论伟.煤气化细渣资源化利用途径及发展趋势[J].应用化工,2022,51(03):891-896+900.