

GSP气化炉操作参数对气化效率的影响

赵 斌

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃一分公司 宁夏 银川 750411

摘 要: GSP气化炉作为加压气流床气化的典型代表,操作参数的协同调控直接决定了气化效率与产物质。本文围绕炉膛温度、操作压力、煤氧配比、蒸汽煤比及物料停留时间五个核心变量展开分析,揭示了各参数对合成气组分分布、灰渣熔融特性及碳转化率的作用规律。温度与氧煤比主导炉内热场分布,压力影响气体停留时长与反应平衡,蒸汽配比调节氢气产量与炉温平衡,停留时间则决定碳质物料的转化深度。多参数耦合效应下的协同优化是提升GSP气化炉运行效率的关键路径。

关键词: GSP气化炉;操作参数;气化效率;合成气组成;灰渣特性

引言: 煤化工产业中气化环节的效率直接关乎下游合成工艺的经济性与稳定性。GSP气化炉以纯氧为气化剂,在高温高压条件下实现煤粉的快速转化,合成气品质对温度、压力、氧煤比及蒸汽配比等参数极为敏感。单一参数的变动往往牵一发而动全身,各变量之间存在强耦合关系,操作窗口窄,控制难度大。深入理解各参数对气化过程的影响机制,对于装置的高效稳定运行具有重要的工程指导价值。

1 GSP 气化炉基础工艺与气化体系

1.1 GSP气化炉气化反应基本原理

GSP气化炉是一种加压气流床气化装置,煤粉与纯氧在高温高压环境中发生剧烈的非催化反应。煤粉经中心喷嘴以极高速喷入炉膛后与氧气瞬间接触并燃烧放热,局部温度迅速攀升至1400摄氏度以上。在这一极端热环境下,煤粉依次经历预热干燥、挥发分析出、焦炭燃烧以及焦炭气化四个连续阶段^[1]。碳与氧的燃烧反应为后续气化过程提供了所需的全部热量,而碳与水蒸气的反应则是合成气中氢气的主要来源,碳与二氧化碳之间的还原反应进一步将二氧化碳转化为一氧化碳。高温条件下甲烷化反应受到显著抑制,粗合成气中一氧化碳与氢气构成了绝大部分可燃组分。整个气化过程在正压状态下进行,物料在炉内停留时间仅为数秒,碳质物料在极短时间内即完成由固态向气态的转化。

1.2 气化物料传输与工段衔接范围

煤粉储存于煤粉仓中,通过煤粉锁斗、给料容器经高压氮气或二氧化碳加压后通过三根煤粉管线送入炉顶喷嘴,纯氧则由空分装置经管道输送至同一喷嘴位置,两股物料在喷嘴内部完成预混合后以超音速喷入炉膛中心。气化产生的粗合成气携带飞灰颗粒与熔渣液滴进入激冷室,在激冷室内与冷却水直接接触后温度急剧下

降。本工段所定义的产物为粗合成气,该气体经除尘降温处理后送往变换装置,在变换装置中完成一氧化碳与水蒸气的变换反应后本工段的职责即告结束。灰渣从激冷室底部经渣锁斗排出,属于气化过程的副产物,灰渣的流动性与含碳量受到炉内温度场分布及物料在炉内停留时长的共同制约。

1.3 气化合成气与灰渣生成机制

合成气中各组分比例取决于炉内温度水平、氧煤比和蒸汽煤比三个关键操作参数的综合作用。温度维持在较高水平时一氧化碳和氢气的生成占主导地位,而温度偏低或蒸汽比例过高则会导致甲烷含量明显增加。灰渣的形成与煤中矿物质组分的熔融特性存在直接关联,当炉内局部区域温度超过灰分的软化温度时,灰分转变为液态并附着于炉壁内表面形成一层连续的挂渣液膜,该液膜对耐火衬里构成了有效的热防护。未能达到熔融状态的灰分则以固态颗粒形式随粗合成气进入激冷室,被冷却水截留后排出。碳转化率是衡量气化反应完成程度的关键指标,未参与反应的碳最终以灰渣中残碳的形式被带出炉外,残碳含量越低意味着煤粉中的碳元素越充分地转化为了合成气中的有效组分。

2 温度参数对 GSP 气化过程的影响机制

2.1 炉膛温度的工艺调控方式

GSP气化炉的炉膛温度主要依靠氧煤比的调节来实现精准控制。增大氧气投入量意味着更多碳参与燃烧放热,炉内温度随之升高,反之降低氧气比例则温度回落。蒸汽煤比的变动也会对炉温产生影响,水蒸气的注入参与吸热的气化反应,过高的蒸汽比例反而会因碳的过度消耗而导致炉温下降^[2]。实际运行中,操作人员通过调整氧煤比和蒸汽煤比的组合配比来维持炉温在设定范围内,中心温度的波动幅度通常被控制在数十摄氏度

以内。煤粉的粒度分布与水分含量同样会间接影响温度场的分布,细颗粒煤粉燃烧速率更快,炉内温度上升更为迅速,而粗颗粒则需要更长的停留时间才能充分释放热量。

2.2 炉膛温度对合成气生成的作用机制

炉温是决定合成气组分比例的核心变量。当炉温维持在1300摄氏度以上的高位时,碳与水蒸气的气化反应以及碳与二氧化碳的还原反应趋于主导地位,一氧化碳和氢气的产量达到最大值,甲烷含量被压制在极低水平。炉温一旦降低至1100摄氏度以下,甲烷化反应的速率相对提升,合成气中甲烷占比开始明显上升,有效气的产率随之降低。高温有利于碳的深度转化,粗合成气中一氧化碳与氢气的摩尔比更接近下游合成工艺的需求。温度的微小波动都会在合成气组分上产生可观测的变化,这也是GSP气化炉对温度控制精度要求极高的根本原因。

2.3 炉膛温度对灰渣特性的作用机制

炉温的高低直接决定了灰渣的物理形态与化学组成。当炉内温度超过煤灰的软化温度后,灰分进入熔融状态并在炉壁表面形成一层流动的液态渣膜,这层渣膜有效降低了耐火衬里的热负荷,对水冷壁起到了自保护作用。温度进一步升高至灰分的流动温度以上时,液态渣的黏度降低,流动性增强,灰渣能够以液态形式顺利从炉底排出。温度偏低时灰分无法充分熔融,大量固态灰颗粒随合成气进入激冷室被水淬冷却,飞灰含量显著增加,灰渣中残碳含量也会偏高。炉温过低可能导致渣的流动性严重恶化甚至堵塞排渣口,影响装置的连续稳定运行,因此温度的合理把控对灰渣的顺畅排出与碳转化率提升均至关重要。

3 压力与煤氧比对 GSP 气化过程的影响机制

3.1 操作压力的工艺调控特性

GSP气化炉的操作压力通常维持在一定的中高压区间,这一范围的选取需要兼顾合成气下游各工段对压力的不同需求。压力的调节主要通过原料气分离罐出口调节阀来实现,调节阀开度减小则炉内压力上升,调节阀开大则压力回落^[3]。压力升高会缩短气体在炉内的停留时间,但由于气体密度增大,单位体积内碳与氧的碰撞频率反而提升,碳转化率不降反升。不过过高的操作压力会导致设备壁面承压增大,对炉体结构强度和密封性能提出更为苛刻的要求,因此实际运行中压力的调节幅度受到设备设计上限的严格约束。

3.2 操作压力对合成气及灰渣的影响

压力升高对合成气组分的影响体现在两个方向。一方面,高压环境有利于甲烷化反应的进行,粗合成气中

甲烷含量随压力上升而小幅增加,但一氧化碳与氢气仍占绝对主导地位。另一方面,高压条件下气体的体积流量降低,粗合成气中有效成分的分压增大,有利于后续变换反应的热力学平衡向产物方向移动。灰渣方面,压力本身对灰分熔融特性的影响较为有限,但压力变化带来的温度波动会间接改变渣膜的形成状态。压力偏低时炉内温度容易升高,渣膜流动性增强,排渣较为顺畅;压力偏高则温度偏低,固态灰颗粒增多,飞灰含量上升。压力波动还会影响激冷室内的气液接触状态,压力骤变可能导致水封失效或液位异常,进而影响粗合成气的除尘效率与出口温度的稳定性。

3.3 煤氧配比的工艺调控逻辑

氧煤比是GSP气化炉最核心的可调参数,定义为单位时间内进入炉内的纯氧质量与煤粉质量之比。氧煤比偏高意味着氧气过量,炉内燃烧释放的热量充裕,碳的转化率极高,但过量氧气会稀释合成气中的有效组分,降低冷煤气效率。氧煤比偏低则氧气不足,部分碳无法充分燃烧或气化,合成气中甲烷含量上升,有效气产率下降。运行中操作人员根据煤种的灰分含量、挥发分含量以及目标负荷来动态调整煤氧比,煤质波动较大时需要缩短调节周期,保证炉温与合成气组分维持在可接受的范围内。不同煤种的反应活性差异显著,高挥发分煤种对氧量的需求相对较低,而低反应活性煤种则需要更多氧气来维持炉温,这要求操作人员对来煤性质有充分的预判与跟踪。

3.4 氧煤比对气化产物与灰渣的影响

氧煤比的变动直接重塑了合成气中各组分的分布格局。氧煤比从偏低向偏高调整的过程中,一氧化碳含量先升后降,氢气含量则呈持续上升趋势,这与碳在不同氧浓度下的反应路径转变密切相关。灰渣特性随氧煤比的变化更为敏感,氧煤比偏高时炉内温度高,灰分充分熔融,渣中残碳含量极低,灰渣呈黑色玻璃体状,流动性极佳。氧煤比偏低时炉温不足,大量未反应碳被裹挟在灰渣中排出,残碳含量明显攀升,灰渣呈灰黑色疏松块状,不仅降低了碳利用率,还会给后续灰渣处理带来额外负担。

4 蒸汽配比与停留时间对气化过程的影响机制

4.1 蒸汽配比的工艺调控特性

蒸汽煤比指的是单位时间内进入气化炉的水蒸气质量与煤粉质量之间的比值,该参数在GSP气化炉的运行中承担着调节炉温与合成气组分的双重任务。水蒸气从炉顶喷嘴以一定比例注入后迅速与高温碳质物料接触,参与吸热的气化反应,蒸汽比例的高低直接决定了炉内热

量的收支平衡^[4]。增大蒸汽投入量会带走更多反应热，炉温随之下降，减小蒸汽比例则热量积聚，炉温攀升。操作人员在调整蒸汽煤比时需要兼顾炉温控制与合成气中氢气含量两个目标，蒸汽过多导致炉温偏低会抑制碳的转化效率，蒸汽过少则合成气中氢气产量不足，下游变换工段的负荷将明显增大。

4.2 蒸汽比对合成气及变换工段的影响

蒸汽配比的变动对合成气中氢气与一氧化碳的摩尔比产生直接而显著的影响。变换反应的本质是一氧化碳与水蒸气生成二氧化碳和氢气，增加蒸汽比例意味着更多一氧化碳参与该反应，合成气中氢气的绝对产量上升，一氧化碳产量相应下降，氢气与一氧化碳的比值升高。这一变化对变换工段的运行产生深远影响，当入变换工段的合成气中氢气含量偏高时，变换反应的驱动力减弱，一氧化碳的转化率下降，变换催化剂的负荷减轻但出口残余二氧化碳含量可能升高。蒸汽配比偏低时合成气中一氧化碳占主导，变换工段需要处理更大的一氧化碳转化量，催化剂床层的升温幅度加大，对设备的耐温性能提出更高要求。合理的蒸汽配比应当使入变换工段的合成气组分处于变换反应的最佳热力学窗口内，既保证一氧化碳的高转化率，又避免催化剂因过热而失活。

4.3 蒸汽比对灰渣特性的影响

蒸汽配比的变化通过炉温的波动间接作用于灰渣的物理化学特性。蒸汽比例增大导致炉温降低，当炉温降至灰分软化温度以下时，灰分无法充分熔融，大量固态灰颗粒以飞灰形式被粗合成气携带至激冷室，飞灰产率显著增加，灰渣中残碳含量也随之上升。蒸汽比例减小时炉温升高，灰分在高温下充分熔融并在炉壁形成连续的液态渣膜，渣膜的存在不仅保护了水冷壁，还使灰渣以液态形式从炉底顺畅排出，残碳含量可被控制在较低水平。灰渣的黏度与流动性同样受蒸汽配比的间接调控，高温条件下液态渣的黏度较低，流动性好，排渣过程稳定，低温条件下渣液黏度增大甚至重新凝固，排渣口堵塞的风险随之增加。

4.4 物料停留时间对气化体系的综合作用

物料在炉内的停留时间虽然仅有数秒，但这短短几秒内发生的反应深度对整个气化体系的运行效果具有决定性意义。停留时间过短意味着碳质物料未能充分完成燃烧与气化过程便被带出炉外，合成气中有效组分含量偏低，灰渣中残碳含量偏高，碳转化率大打折扣。停留时间过长则气体在高温环境中暴露过久，已经生成的一氧化碳和氢气可能发生逆向反应重新生成碳和水蒸气，有效气产率反而下降。煤粉粒度越细反应速率越快，所需停留时间越短，粗颗粒煤粉则需要更长的停留时间才能达到理想的转化程度^[5]。停留时间与炉温、蒸汽配比之间存在紧密的耦合关系，任何一个参数的调整都会牵动另外两个参数的平衡状态，三者的协同优化是GSP气化炉实现高效稳定运行的核心所在。

结束语

GSP气化炉的高效运行依赖于温度、压力、氧煤比、蒸汽配比与停留时间的精确协同。炉温与煤氧比决定热场格局与碳转化深度，压力与蒸汽配比重塑合成气组分比例，停留时间则划定反应完成的时间边界。灰渣特性作为炉内热状态的直观映射，为操作参数的在线判断提供了可靠依据。各参数间的耦合关系要求操作人员在调整时充分权衡，避免单一变量的大幅波动引发连锁反应，唯有多参数联动优化方能实现气化效率与装置稳定性的双重提升。

参考文献

- [1]刘杰.GSP气化炉火焰检测器的优化与改造[J].能源科技,2023,21(4):77-80.
- [2]孟儒.GSP气化炉运行稳定性与安全性提升措施分析[J].建筑工程与设计,2024,3(12):20-21.
- [3]陆小兵.GSP气化炉工艺改进与技术创新研究[J].工程建设与发展,2023,2(11):65-67.
- [4]王勇,高彦平.GSP气化炉激冷室液位计显示不准或故障原因分析及工艺监控措施[J].警戒线,2021(24):176-177.
- [5]杜钢,范佳明,杨会军.GSP干煤粉气化炉气化灰渣特性研究及其掺烧利用分析[J].煤化工,2024,52(2):113-118.