

# 壳牌气化炉工艺中飞灰含碳量高的解决路径

韩彦会

河南开祥精细化工有限公司 河南 三门峡 472300

**【摘要】**：壳牌气化炉飞灰含碳量高是影响碳转化效率与经济效益的关键问题，其成因主要源于原料煤质反应活性不足、灰熔点过高，工艺参数如氧煤比、气化温度控制不当，以及设备因素如烧嘴性能劣化。解决路径需多管齐下，涵盖原料的精细化配煤掺烧，核心工艺参数的智能优化调控，关键设备的效能保障，飞灰的循环利用，以及构建基于数据驱动的高级控制体系，以此实现高效、清洁的煤气化生产。

**【关键词】**：气化炉工艺；飞灰含碳量高；解决路径

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.018

## 引言

煤气化是清洁高效利用煤炭的核心技术，而壳牌气化工艺是其中的主流。然而，在运行过程中，飞灰含碳量偏高的问题制约了碳转化率的提升，增加了原料消耗与固废排放。这一现象是多因素耦合作用的结果，涉及煤质特性、工艺操作与设备运行等多个层面。深入剖析其成因，并探索系统性的优化路径，对于提升气化装置的经济性、推动行业技术升级具有重要意义。

## 1 煤气化炉分类

煤气化炉的分类，也是煤炭气化技术的分类，一般按气化炉的化学工程特征和反应器形式进行分类。气化炉的形式在很大程度上影响煤炭的转化效率和产品的制造成本，采用高效、低耗、低污染的煤气化工艺(技术)是发展煤化工的重要前提，其中气化炉便是工艺的核心，可以说气化工艺的发展是随着气化炉的发展而发展的，在煤气化技术发展的进程中，气化炉的分类主要依据其流体力学特性、反应器结构及工程特征。根据煤与气化剂在炉内的接触与流动方式，气化炉主要可分为三大类：固定床（移动床）、流化床和气流床。固定床气化炉（如鲁奇炉）中煤料缓慢下移，与上升气化剂逆流接触，适合块煤，但焦油含量高；流化床气化炉（如温克勒炉）中煤粒被气流托起呈沸腾状，气固接触充分，适合活性高的煤种，但碳转化率相对有限；气流床气化炉（如壳牌炉、德士古炉）中粉煤与气化剂高速并流喷射，在高温高压下瞬间完成反应，碳转化率极高，是当前大型煤化工的主流技术。

## 2 壳牌气化炉飞灰含碳量高的成因分析

### 2.1 原料煤质特性是根本影响因素

煤质特性是决定飞灰含碳量的基础性因素，在壳牌气化工艺中，入炉煤粉的性质直接决定了其在极短时间内高温气化反应的程度与完全性。若选用化学反应活性较低的煤种，例如无烟煤或某些贫煤，其分子结构稳定，需要在更高温度下才能发生有效的气化反应。在相同的炉内操作条件下，这类煤种的反应速率明显慢于高活性烟煤，导致部分碳颗粒在停留时间内未

能充分反应即被气流带出，形成高含碳飞灰。煤的灰熔融特性同样关键，当原料煤的灰熔点过高时，为防止炉内结渣损坏设备，实际操作中往往被迫采取相对保守的炉温控制策略，使反应区的温度维持在较低水平。这种温度水平可能不足以支持低活性煤种的完全气化，从而造成碳转化不完全。煤粉的粒度分布也是一个精细但重要的指标，如果煤粉中粗颗粒比例偏高，这些较大颗粒的比表面积小，在反应区内的升温及反应速率都较慢，容易在未完全转化前就进入后续流程，最终导致飞灰中的残碳含量上升。

### 2.2 气化工艺操作条件是关键控制维度

工艺操作参数的匹配与优化是控制飞灰含碳量的核心环节，氧煤比是其中最为关键的参数之一，它直接决定了反应区的氧浓度与温度水平。如果氧煤比控制不当，例如氧气供给量相对不足，会导致反应区内局部或整体处于还原性或欠氧状态，碳颗粒无法获得足够的气化剂进行完全反应，从而以未燃碳的形式进入飞灰。气化温度是另一个决定性参数，壳牌气化炉虽然属于高温气化，但实际运行温度需在避免结渣和保证反应效率之间寻求平衡。若操作温度偏低，即使是活性较好的煤种，其气化反应速率也会下降，反应所需时间延长，在有限停留时间内无法实现完全转化。此外，烧嘴的运行状态至关重要，烧嘴负责将煤粉与氧气充分混合并雾化送入炉内。若烧嘴因长时间运行而磨损，或雾化效果不佳，将导致煤粉与气化剂混合不均，产生局部过氧或欠氧区域，部分煤粉颗粒因未能接触足够氧气而形成残碳。

### 2.3 设备与系统运行状态是重要工程因素

气化炉本体及配套辅助系统的运行状态是影响飞灰含碳量的工程实践因素，烧嘴作为核心进料设备，其性能的长期稳定性直接影响炉内流场与反应。烧嘴的磨损会导致煤粉射流流形改变，偏离最佳设计状态，从而影响炉内温度分布与混合效果，可能导致部分碳颗粒“短路”逸出。激冷系统对飞灰含碳量也有间接影响，激冷气在混合器处与高温合成气直接接触，起到急冷和保护下游设备的作用。如果激冷气量过大或注入方

式不当,可能对上升的高温气流产生过度扰动,甚至使反应区上部温度过快下降,导致部分尚在进行非均相气化反应被骤然中止,碳颗粒反应链中断而形成残碳。气化炉内部流场与结构的稳定性也不容忽视,任何导致炉内流场偏离理想设计状态的因素,都可能缩短部分颗粒的实际停留时间,或使其处于流动死区,最终降低整体碳转化率,表现为飞灰含碳量升高。

### 3 降低飞灰含碳量的解决路径

#### 3.1 深化原料煤质管控与预处理技术

降低飞灰含碳量需从源头进行系统性优化,关键在于确保入炉煤的理化性质与高温气流床气化工艺的要求高度匹配。实现这一目标的基础是建立精细化的煤质管理体系,对入炉煤的反应活性、灰熔融特性及粒度分布进行严格监控与科学调控。配煤掺烧是实践中最为经济有效的手段之一,通过将不同特性的原料煤,如高灰熔点煤与低灰熔点煤,或高活性煤与低活性煤,进行精确的定量掺混,能够主动调整混合煤的综合性能,使其在获得适宜反应活性的同时,灰熔点也处于理想的操作窗口内,从而为提升气化温度创造先决条件。必要时,可添加少量助熔剂以改善灰熔融特性。在煤粉制备环节,需通过优化磨煤与分级系统,严格控制煤粉的粒度分布,确保绝大部分煤粉颗粒达到并稳定在理想细度,这能极大增加其在炉内的反应表面积,加快反应速度,从物理层面减少粗颗粒未完全反应即被带出的可能性。对原料煤质的深化管控与预处理,是从根本上提升碳转化率、降低飞灰残碳的基石。

#### 3.2 优化核心工艺参数实现精准操作

工艺参数的精确与稳定控制是降低飞灰含碳量的直接且核心的技术途径,其核心在于动态维持气化炉内最有利于碳完全转化的反应环境。氧煤比的精准调控处于首要地位,必须根据实时入炉煤质与气化炉运行工况进行动态优化,确保供给的氧气在总量与分布上既能驱动并维持足够高的反应温度,又能为碳的气化反应提供充足的化学当量,避免因局部或整体缺氧导致的反应不完全。在确保不形成熔渣阻碍的前提下,适度提高气化炉操作温度是最为有效的措施,更高的温度能显著加速多相气化反应速率,使碳在有限的炉内停留时间内更彻底地转化为一氧化碳和氢气。与此同时,蒸汽煤比等辅助参数也需协同优化,以调节反应气氛与热量平衡。通过对上述核心工艺参数实施精细化、智能化与前瞻性的闭环控制,可确保气化过程始终运行在高效转化区间,从而从操作层面直接降低飞灰含碳量。

#### 3.3 保障与提升关键设备运行效能

气化炉及其关键设备的性能状态是工艺意图得以高效实现的物理基础,其稳定与效能直接影响反应过程的完全程度。烧嘴作为最为核心的进料与混合设备,其雾化性能、流道状态与运行稳定性决定了煤粉与气化剂初始混合的均匀性,必须建

立严格的定期检测、维护与更换制度,一旦出现磨损导致雾化角改变或流量分布不均,需立即处理或更换,确保两相流体能够高度均匀混合并形成稳定的火焰结构。激冷系统的设计与操作也需要优化,在满足工艺要求的激冷幅度、保护下游设备的同时,应精细控制激冷气的注入参数,避免其对上升气流的流场与反应区上部的温度场造成过度扰动与冷却,防止尚在进行的气化反应被中途抑制。此外,对气化炉内部结构、流场分布及相关辅助系统的持续改进与优化,也是提升整体运行效率、减少非理想流动导致残碳的重要工程方向。

#### 3.4 推进飞灰循环与资源化利用技术

推进飞灰循环与资源化利用技术,是针对高含碳飞灰问题实现碳元素深度利用与废物资源化的关键策略。该技术路径的核心在于,将原本作为固体废弃物处理的飞灰,视作一种尚含化学能或热值的资源进行重新整合,从而在系统层面提升整体碳转化效率并减少新鲜原料消耗。具体实施主要包含两条技术路线。飞灰循环气化技术,该技术将合成气净化单元收集的飞灰,通过专门设计的加压与稳定输送系统,回注至气化炉的燃烧室或特定反应区。在此高温环境中,飞灰中残存的碳颗粒得以再次与气化剂接触,发生气化反应,从而将这部分原本可能损失的元素碳转化为有效合成气。这一过程能直接提升全装置的总碳转化率,降低吨合成气的原料煤耗。

当直接返回气化炉在工程上受限时,可将高含碳飞灰作为固体燃料进行资源化利用。例如,将其输送至配套的动力锅炉、蒸汽锅炉或专门的燃烧装置中,作为补充燃料进行燃烧,充分回收其热值用于产生蒸汽或发电。这一方式虽未直接提升气化单元的碳转化率,但实现了能量的梯级利用,减少了整个工厂的燃料消耗。无论采用何种路线,成功实施都依赖于精细的工程设计与稳定的过程控制,重点需解决飞灰的稳定、连续、可调节输送难题,评估并最小化其回注对主气化炉内流场、温度分布及反应平衡的潜在扰动,同时关注飞灰中未反应碳与灰分特性对输送设备和反应器可能带来的磨损、结渣等影响。妥善解决这些工程问题,该技术不仅能带来显著的经济效益,也是煤气化工艺向绿色、低碳方向发展的具体体现。

#### 3.5 构建智能监控与先进过程控制体系

构建智能监控与先进过程控制体系是应对复杂工况、实现飞灰含碳量稳定控制的核心发展方向,面对原料煤质频繁波动与工艺系统强耦合的挑战,依赖传统人工经验的操作模式已难以持续保证最优运行状态。该体系的建立旨在通过数据驱动与模型指导,实现对气化过程的精准感知与自适应优化。其基础在于完备的感知层,通过直接部署飞灰含碳量在线分析仪,或基于合成气组分、温度、压力等大量实时工艺数据构建软测量模型,实现对难以直接测量的关键参数进行连续、可靠的在线估算,从而掌握飞灰残碳的实时动态。

在全面感知的基础上，核心在于构建一个融合了气化过程深度机理知识、历史运行大数据与先进机器学习算法的智能决策模型。该模型能够学习和理解不同煤质特性、不同操作条件下，各工艺参数与最终碳转化率和飞灰特性之间的复杂映射关系。它不仅能够解释现状，更能对未来的变化趋势进行预测。最终，以此智能模型为“大脑”，形成一个闭环的先进过程控制系统。这标志着从“人工干预”到“自主优化”的根本性转变，是提升装置运行经济性与安全性的关键技术保障。

### 3.6 探索气化条件强化与过程强化技术

从技术发展的前沿视角，探索和研发旨在强化气化反应过程本身的新技术与新方法，是进一步挖掘降低飞灰含碳量潜力的创新方向。这包括对气化炉内反应环境的主动强化，例如研究更高效的气化剂如富氧或纯氧气化，乃至探索膜催化气化等新型反应体系，从根本上提高反应速率和选择性。也包括对反应器内流体力学条件的优化创新，例如改进烧嘴结构设计以产

生更利于混合与反应的流场，或研究新型的气化炉内构件以优化颗粒停留时间分布。此外，针对低品质或难气化煤种，开发新型的预处理技术，如温和热解提质、催化气化等，改变煤的反应特性，使其更适合气流床气化。这些过程强化技术旨在突破现有工艺条件的限制，从反应本质与工程实现层面寻求突破，为未来实现更高碳转化率、更低飞灰含碳量的下一代煤气化技术提供储备。

## 4 结语

降低壳牌气化炉飞灰含碳量是一项系统工程，需从原料适应、工艺调控、设备维护及智能控制等多维度协同发力。通过实施精细化、智能化的解决方案，可以有效提升碳转化效率，降低运行成本。展望未来，随着过程强化技术与先进控制技术的深入应用，气化工艺有望在高效、清洁与低碳的道路上实现更进一步的突破。

## 参考文献:

- [1] 郑金昊. 生物质低温提质与粉煤气化产物协同利用及过程耦合优化研究[D]. 大连理工大学, 2024.
- [2] 王灿, 谭永义. 壳牌气化炉生产工艺中的煤粉过滤与回收系统优化研究[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(10): 14-16.
- [3] 陈钟宋. 气化炉内表面现场防腐堆焊工艺[J]. 焊接技术, 2024, 53(10): 83-86.
- [4] 杨琦瑶. 循环流化床煤气化飞灰活化制备活性炭研究[D]. 华北电力大学(北京), 2024.
- [5] 常旭. 高氧化劣质褐煤在碎煤加压气化技术上的应用[J]. 氮肥技术, 2024, 45(02): 20-22.
- [6] 赵波涛, 贾慧杰. 气化炉长周期稳定运行探索分析[J]. 山西化工, 2024, 44(01): 172-174+177.
- [7] 金治东, 杨文华. 浅析 APC 技术在气化水煤浆上的应用[J]. 氮肥与合成气, 2024, 52(02): 43-45.