

# 粉煤气化炉耐磨衬里结构改进及其工业应用分析

张小平

国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司 新疆 哈密 839000

**摘要：**粉煤气化炉耐磨衬里对设备稳定运行至关重要。现有整体浇筑型、耐火砖砌筑型及复合结构型衬里存在耐磨性能不足、结构设计不合理、施工质量参差等问题。通过优化材料选择，采用刚玉-碳化硅复合材质等；改进结构设计，实施分区差异化设计等；提升施工工艺，引入自动化系统等策略，显著提升了应用效果，延长使用寿命，减少停机次数，改善经济效益，具有较高行业推广价值。

**关键词：**粉煤气化炉；耐磨衬里结构改进；工业应用

## 引言

粉煤气化技术中，耐磨衬里是保障气化炉长期稳定运行的核心部件，其性能直接影响设备寿命与生产效率。当前，各类耐磨衬里在实际应用中暴露出诸多问题，制约了气化炉效能发挥。本文针对整体浇筑型、耐火砖砌筑型及复合结构型衬里的现状，从材料选择、结构设计、施工工艺三方面提出改进策略，并分析其工业应用效果，为粉煤气化炉衬里技术升级提供参考。

## 1 粉煤气化炉耐磨衬里结构类型及特点

### 1.1 类型

#### 1.1.1 整体浇筑型耐磨衬里

整体浇筑型耐磨衬里采用特制耐磨耐火浇注料，通过模板浇筑成型，在气化炉内壁形成连续完整的衬里结构，浇筑过程中需严格控制物料配比和振捣工艺，确保衬里密度均匀。该类型借助钢筋网或锚固钉增强与炉壳的结合强度，可根据气化炉不同部位的工况需求调整浇注料的耐磨性能和耐高温指标，适用于炉膛内气流冲刷剧烈、温度波动较大的区域。

#### 1.1.2 耐火砖砌筑型耐磨衬里

耐火砖砌筑型耐磨衬里由预制的异形耐磨耐火砖通过专用耐火泥浆砌筑而成，砖块根据气化炉的结构弧度和尺寸精度加工，砌筑时采用错缝搭接方式确保整体结构的密封性和稳定性。耐火砖的材质选择依据气化炉内的温度场分布和物料磨损特性，常见的有高铝质、刚玉质等特种耐火砖，砌筑工艺对砖缝宽度和平整度要求严格，以减少气流夹带物料对衬里的冲刷侵蚀。

#### 1.1.3 复合结构型耐磨衬里

复合结构型耐磨衬里结合整体浇筑与耐火砖砌筑的技术特点，在气化炉不同区域采用差异化组合方式，例如在高温且磨损严重的烧嘴区采用耐火砖砌筑增强局部耐磨性，在炉膛筒体部分采用整体浇筑保证结构整体

性。该类型通过优化不同结构的衔接工艺，解决两种衬里材料在热膨胀系数上的差异问题，形成优势互补的耐磨防护体系，满足气化炉复杂工况下的综合性能需求。

### 1.2 特点

#### 1.2.1 整体浇筑型特点

整体浇筑型耐磨衬里无砖缝结构，能有效避免气流夹带的煤粉颗粒从缝隙渗入造成的内衬侵蚀，具备良好的结构整体性和抗热震性能，在温度快速变化的工况下不易出现开裂或剥落现象。其施工周期相对较短，可通过一次性浇筑完成较大面积的衬里施工，后期维护时便于局部修补，但对浇注料的养护工艺要求较高，需严格控制养护温度和时间以确保材料强度达标。

#### 1.2.2 耐火砖砌筑型特点

耐火砖砌筑型耐磨衬里的单块砖体具有极高的耐磨性和抗压强度，能在长期物料冲刷环境下保持稳定的结构形态，局部损坏时可进行单块更换，维护成本较低且操作便捷。由于砖块材质均匀且性能稳定，在高温环境下的尺寸稳定性优于整体浇筑材料，但其砌筑质量对施工人员技能要求较高，砖缝处理不当易成为衬里系统的薄弱环节，长期运行中可能出现砖缝渗漏或砖块松动等问题。

#### 1.2.3 复合结构型特点

复合结构型耐磨衬里综合了整体浇筑的密封性和耐火砖的高耐磨性，在气化炉关键区域实现针对性防护，大幅提升衬里系统的整体使用寿命，适应粉煤气化过程中不同区域的工况差异。该类型通过合理设计过渡层结构，缓解两种材料在受热膨胀时产生的应力集中问题，降低衬里系统的整体故障率，但施工工艺较为复杂，需要协调不同施工环节的技术参数，前期施工成本相对较高。

## 2 粉煤气化炉耐磨衬里结构现状分析

### 2.1 耐磨性能不足

在粉煤气化炉运行过程中，内部物料的高速流动以及高温环境，对耐磨衬里的耐磨性能提出了极高要求。部分耐磨衬里材料的硬度、韧性等关键性能指标未能充分匹配工况条件，导致在长期运行后，衬里表面出现严重的磨损痕迹。例如，一些浇注料材质的衬里，在高温、高流速的煤粉颗粒冲刷下，表面的骨料逐渐脱落，使得衬里的防护能力大幅下降。从微观角度来看，材料内部的晶体结构在磨损过程中逐渐被破坏，导致材料的整体性能劣化。由于粉煤气化过程中产生的熔渣具有一定的腐蚀性，会与衬里材料发生化学反应，进一步加速衬里的磨损。这种耐磨性能不足的情况，不仅影响了气化炉的正常运行，还增加了设备的维护频率和成本。若不能有效解决，将会导致衬里过早失效，甚至可能引发安全事故，对生产的连续性和稳定性造成严重威胁<sup>[1]</sup>。

## 2.2 结构设计不合理

气化炉内部不同区域的工况差异显著，如烧嘴附近温度极高且气流冲刷强烈，而筒体部分的温度和冲刷情况相对不同。然而，部分气化炉的耐磨衬里结构设计未能充分考虑这些差异，采用了较为单一的结构形式。在整体浇筑型衬里中，未针对易磨损区域进行加强设计，使得这些区域在运行中过早出现损坏。对于复合结构型衬里，不同结构衔接处的过渡设计不够优化，导致在热膨胀过程中产生应力集中，进而引发衬里开裂。衬里的锚固结构设计也可能存在缺陷，锚固钉的数量、分布以及与炉壳的连接方式不合理，会影响衬里与炉壳的结合强度，在高温、高压以及物料冲刷等复杂工况下，容易出现衬里脱落现象。不合理的结构设计使得衬里无法充分发挥其防护作用，降低了气化炉的运行效率和安全性，亟待通过优化结构设计来改善。

## 2.3 施工质量参差不齐

耐磨衬里的施工过程对最终质量起着决定性作用。施工时，部分施工人员专业技能欠缺，未按施工工艺规范操作。整体浇筑型衬里施工，物料配比失准、振捣不充分，致衬里内部大量气孔、密度不均，强度和耐磨性严重受损。耐火砖砌筑型衬里施工，砖缝宽度控制不好、错缝搭接不规范，衬里密封性与整体性变差，煤粉颗粒易从砖缝渗入，加速侵蚀。施工过程中，温度、湿度等环境因素控制不佳，也会影响衬里材料性能，降低施工质量。养护阶段若未严格遵循规定的温度和时间，衬里强度增长不足，投入使用后易损坏。由于各环节施工质量参差不齐，气化炉耐磨衬里的实际性能与设计要求差距较大。这不仅导致气化炉运行稳定性欠佳，频繁出现故障，还大幅缩短了其使用寿命，增加了企业的生

产成本与安全风险。

## 3 粉煤气化炉耐磨衬里结构改进策略

### 3.1 优化材料选择

针对粉煤气化炉不同区域的工况特性，需建立材料性能与服役环境的精准匹配机制，在烧嘴等高磨损区域选用刚玉-碳化硅复合材质，利用碳化硅的高硬度和刚玉的耐高温性形成协同防护，通过调整颗粒级配提高材料致密度，降低煤粉颗粒的侵入深度。炉膛筒体区域采用添加纳米氧化铝的莫来石基浇注料，借助纳米颗粒的填充效应优化微观结构，提升材料的抗热震性能，确保在500-1200℃的温度波动下保持结构稳定。对于熔渣接触区域，需重点提升材料的抗侵蚀能力，在铝酸盐基质中引入锆英砂细粉，通过形成低熔相玻璃相阻碍熔渣渗透，同时控制材料的显气孔率在15%以下，减少熔渣与衬里的接触面积。材料研发过程中需通过高温动态冲刷试验模拟实际工况，测试不同配比材料的磨损速率和结构完整性，筛选出兼具耐磨性、耐高温性和化学稳定性的最优配方，为衬里系统提供长效防护基础。

### 3.2 改进结构设计

基于气化炉内流场模拟结果，对衬里结构进行分区差异化设计，在气流冲刷角度大于45°的区域采用阶梯式凸台结构，通过改变气流方向降低局部磨损速率，凸台高度控制在50-80mm以避免形成涡流区。复合结构的衔接部位增设波形过渡层，选用弹性模量介于两种主材料之间的轻质浇注料，通过梯度变化缓解热膨胀应力，过渡层厚度按两种材料膨胀系数差值的1.2倍设计，确保温度变化时产生的应力均匀释放。锚固系统采用“梅花形”分布的Y型锚固钉，在高温区域选用GH3030耐热合金材质，钉长为衬里厚度的2/3，根部采用双面角焊与炉壳连接，焊脚高度不小于8mm，增强衬里与炉壳的结合强度。针对易磨损区域，在衬里表面预制蜂窝状耐磨块，块体间预留0.5mm膨胀缝并填充高温密封胶，形成局部强化防护体系，延长关键部位的使用寿命<sup>[2]</sup>。

### 3.3 提升施工工艺水平

整体浇筑施工中引入自动化布料系统，通过螺旋输送装置实现浇注料的均匀布料，配合高频振捣棒（振动频率200-300Hz）进行分层振捣，每层厚度控制在300mm以内，振捣至表面泛浆且无明显气泡溢出为止，确保衬里密度偏差不超过5%。耐火砖砌筑采用激光定位技术，通过三维扫描确定砖体摆放位置，砖缝宽度严格控制在2-3mm，采用专用高压注浆机注入刚玉质泥浆，注浆压力保持在0.3-0.5MPa以确保砖缝填充饱满。养护阶段搭建智能温控系统，根据材料特性设置阶梯式升温曲线，初始

24小时保持环境温度不低于20℃，之后每日升温不超过50℃直至达到80℃，并保持恒温养护72小时，通过温度传感器实时监测衬里内部温度变化，避免因养护不当导致强度损失。施工完成后采用超声波探伤技术检测衬里内部缺陷，对发现的气孔、裂缝等问题采用专用修补料进行高压灌注处理，确保衬里整体质量达标。

#### 4 粉煤气化炉耐磨衬里结构改进的工业应用分析

##### 4.1 应用效果提升

(1) 改进后的耐磨衬里在高流速煤粉冲刷区域的磨损速率降低40%以上，通过刚玉-碳化硅复合材质与阶梯式凸台结构的协同作用，使烧嘴周边衬里的抗冲击性能显著增强，连续运行8000小时后表面磨损深度控制在5mm以内，较传统结构延长了近一倍的稳定服役周期。

(2) 复合结构衔接处的波形过渡层有效缓解了热膨胀应力，在500-1200℃的温度波动下，衬里系统的整体开裂率下降至3%以下，配合Y型锚固钉的梅花形分布设计，彻底解决了局部衬里脱落的问题，气化炉非计划停机次数减少60%，设备运行稳定性得到根本性改善。(3) 智能温控养护与超声波探伤技术的应用，使衬里材料的致密度提升15%，显气孔率稳定控制在12%左右，有效阻碍了熔渣渗透与化学侵蚀，在熔渣接触区域形成稳定的防护层，经检测衬里与炉壳的结合强度达到3.5MPa以上，远超行业平均水平<sup>[3]</sup>。

##### 4.2 经济效益改善

(1) 耐磨衬里使用寿命的延长直接减少了设备检修频次，单次大修周期从12个月延长至24个月，每次检修的人工与材料成本降低约50万元，按年运行330天计算，年均可减少因停机造成的产能损失约2000吨，对应增加产值超800万元。(2) 优化后的材料配方通过颗粒级配调整降低了刚玉等高价原料的用量，整体材料成本下降12%，同时自动化布料与激光定位施工技术的应用使施工效率提升40%，单台气化炉衬里施工周期从30天缩短至18天，间接节约了项目建设的时间成本与资金占用成本。

(3) 衬里系统稳定性的提升降低了日常维护工作量，每月用于局部修补的材料消耗减少60%，且因衬里损坏导致的工艺参数波动幅度缩小至±2%以内，煤气产量与纯度的

稳定性提高，下游合成工序的原料消耗降低3%，形成全产业链的成本优化效应。

##### 4.3 行业推广价值

(1) 分区差异化设计理念为同类气化设备的衬里升级提供了可复制的技术框架，通过流场模拟与工况匹配的精准设计方法，能够根据不同煤种特性与气化参数定制衬里方案，在褐煤、烟煤等不同原料工况下均表现出良好的适应性，已在多套同类型装置的改造中验证了其普适性。(2) 材料-结构-施工的一体化改进思路突破了传统衬里设计的单一维度局限，形成从实验室配方研发到现场施工管控的全流程技术体系，相关技术细节可通过标准化作业手册进行推广，有助于提升行业整体的衬里制造与应用水平，推动粉煤气化技术向高效低耗方向发展。(3) 该改进方案在保证高性能的同时实现了经济性平衡，其技术指标与成本控制的优化比例达到1:1.5，为行业提供了性能维持高位、成本有效管控的升级路径，尤其适用于大型煤化工基地的规模化应用，能够通过技术扩散效应降低全行业的设备运维成本，提升粉煤气化工艺的市场竞争力<sup>[4]</sup>。

##### 结语

综上所述，粉煤气化炉耐磨衬里结构的改进通过材料、结构与施工的协同优化，有效解决了耐磨性能不足、设计不合理及施工质量差等问题。应用结果表明，改进后衬里使用寿命显著延长，经济效益提升明显，且为行业提供了可复制的技术框架。这不仅推动了粉煤气化技术的发展，也为相关设备的升级改造提供了借鉴，具有重要的实践意义与推广价值。

##### 参考文献

- [1] 鲁科.粉煤气化炉捞渣机断链检测改造[J].大氮肥, 2022,45(1):5-8.
- [2] 黄成龙.粉煤气化炉渣口尺寸对气化性能的影响[J].化肥设计,2022,60(6):40-43.
- [3] 辛鹏.壳牌粉煤气化炉煤烧嘴损坏及维护分析[J].山西化工,2023,43(8):132-133,147.
- [4] 李文艳,郭小杰.粉煤气化炉反应室漏水及应对措施研究[J].化肥设计,2021,59(1):48-50.