

干煤粉气化炉下渣口泄漏原因分析及修复工艺研究

司彦军

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 750000

摘要: 干煤粉气化技术是现代煤化工领域的核心工艺,其下渣口作为关键部件,直接影响气化系统的安全与效率。本文针对干煤粉气化炉下渣口泄漏问题展开研究,系统分析设备设计制造缺陷、材料性能劣化及操作工艺参数影响等多维度泄漏原因,提出基于复合陶瓷与金属基复合材料的修复材料优选方案,并制定非停车在线修复与停车检修一体化修复工艺路线。通过正交试验优化焊接/喷涂工艺参数,结合应力释放策略提升修复质量。研究表明,合理选择修复材料、优化工艺可显著降低泄漏风险,为干煤粉气化炉下渣口的安全稳定运行提供理论与技术支持。

关键词: 干煤粉气化炉;下渣口泄漏原因;修复工艺

引言:干煤粉气化技术在高温、高压、强腐蚀的复杂工况常导致下渣口泄漏,引发设备损坏、生产中断及安全隐患。当前对下渣口泄漏的系统性研究尚不完善,修复技术亟待优化。本文通过深入剖析泄漏根源,结合新型材料与工艺,提出针对性解决方案,旨在填补技术空白,提升气化炉运行可靠性,推动煤化工产业高效绿色发展。

1 干煤粉气化炉下渣口结构与工作原理

干煤粉气化炉下渣口是气化炉排渣系统的核心部件,其结构设计与工作原理直接影响气化炉运行的稳定性和安全性。在结构上,下渣口由多层复合部件构成。最内层是耐高温、抗冲刷的耐火材料层,通常选用高铬刚玉砖、碳化硅砖等,这些材料具有优异的高温强度和抗渣侵蚀性能,能够抵御1300°C-1600°C高温熔渣的直接接触;中间层为隔热层,采用轻质隔热材料如陶瓷纤维毯或微孔隔热砖,用于减少热量传递,降低外部金属壳体的温度;最外层是金属壳体,一般采用低合金耐热钢,提供结构支撑和密封功能。下渣口还配备有冷却系统,通过水或气体冷却的方式带走热量,防止局部过热导致材料性能下降。密封装置也是重要组成部分,常见的有迷宫密封、填料密封等,以防止高温含渣气体泄漏。

在工作原理方面,干煤粉气化过程中,煤粉与气化剂在气化炉内发生反应,生成合成气,同时产生液态熔渣。液态熔渣在重力作用下向气化炉底部流动,经下渣口排出。下渣口的尺寸和形状需精确设计,确保熔渣能够顺利排出且不会堵塞。在排渣过程中,下渣口需承受熔渣的冲刷磨损、高温热应力以及含渣气流的化学腐蚀。由于熔渣的物理化学性质(如黏度、酸碱度)会随化工况变化,这对下渣口的适应性提出了更高要求。例如,当气化温度降低时,熔渣黏度增加,可能导致排

渣不畅,增加下渣口堵塞风险;而温度过高则会加剧耐火材料的侵蚀速度^[1]。

2 下渣口泄漏的原因分析

2.1 设备设计与制造缺陷

设备设计与制造缺陷主要包含以下方面:(1)在干煤粉气化炉下渣口的设计过程中,结构应力集中问题是引发泄漏的潜在风险因素。下渣口的拐角、变截面处等几何形状突变区域,会因应力分布不均而产生应力集中现象。依据弹性力学理论,应力集中系数与结构的几何参数密切相关,尖锐的拐角或截面尺寸的剧烈变化,会使局部应力远超平均应力水平。在高温高压的服役环境下,应力集中区域的材料承受着更大的变形和破坏风险,随着运行时间的增加,微小裂纹易在此处萌生并扩展,最终导致结构失效,引发泄漏。(2)制造工艺缺陷。焊接质量直接关系到下渣口金属部件的连接强度和密封性。焊接过程中若存在未焊透、气孔、夹渣等缺陷,会削弱焊缝的承载能力,形成应力集中源。焊接热影响区的组织性能变化,可能导致材料韧性下降,在热应力和机械应力的共同作用下,焊缝区域易发生开裂。材料的冶金缺陷,如成分偏析、夹杂物等,会破坏材料的连续性和均匀性,降低其综合力学性能,使得下渣口在高温、高压、冲刷等复杂工况下,更易出现局部损伤,进而引发泄漏问题。

2.2 材料性能劣化

以下渣口的材料在高温环境中长期服役,其性能会逐渐劣化。(1)耐火材料作为抵御高温熔渣侵蚀的第一道屏障,在高温下其抗渣性和热震稳定性会发生衰退。高温熔渣与耐火材料之间会发生复杂的物理化学反应,熔渣中的氧化物会与耐火材料成分相互渗透、扩散,导致耐火材料的组织结构改变,强度降低,抗侵蚀

能力减弱。在气化炉运行过程中，温度的频繁波动会使耐火材料承受热震作用。热震过程中，材料内部产生的热应力超过其强度极限时，会引发裂纹的产生和扩展，降低耐火材料的完整性，使得熔渣更容易渗透侵蚀，最终造成下渣口泄漏。（2）金属部件在高温环境下，会发生高温氧化和硫化腐蚀。高温氧化是金属与氧气发生化学反应形成氧化膜的过程，随着氧化膜的不断生长和剥落，金属部件会逐渐减薄，强度下降。在含有硫元素的气化介质中，金属还会发生硫化腐蚀，硫化物的形成速率通常高于氧化物，且硫化物的结构疏松，无法有效阻止腐蚀介质的进一步侵入，加速金属部件的腐蚀进程。

2.3 操作与工艺参数影响

操作与工艺参数影响主要有以下方面：（1）气化温度。气化温度的波动会直接改变熔渣的黏度，当温度降低时，熔渣黏度增大，流动性变差，在通过下渣口时，流动阻力增加，对下渣口壁面的冲刷磨损加剧。高黏度的熔渣更容易在渣口处堆积，增加堵塞风险，为维持排渣顺畅，可能需要提高排渣压力，这进一步增大了下渣口的受力，加速其结构损伤。而温度过高时，熔渣对耐火材料的侵蚀能力增强，耐火材料的劣化速度加快，缩短了下渣口的使用寿命。（2）负荷骤变会使气化炉内工况发生剧烈变化，产生热冲击效应。当气化炉负荷突然增加或减少时，炉内温度、压力等参数会迅速改变，下渣口材料因热胀冷缩产生较大的热应力。由于材料内部各部分的温度变化不同步，热应力分布不均匀，反复的热冲击会使材料疲劳损伤，导致裂纹产生和扩展。（3）渣口堵塞与强制清渣操作也会在下渣口造成机械损伤。当渣口堵塞时，采用机械疏通或高压气体吹扫等强制清渣方式，会对下渣口壁面产生冲击和摩擦，破坏耐火材料表面结构，形成局部损伤，降低下渣口的密封性能和结构强度，增加泄漏风险^[2]。

3 下渣口泄漏的检测与风险评估

下渣口泄漏的及时检测与科学评估是保障干煤粉气化炉安全稳定运行的关键环节。（1）泄漏检测。主要依赖在线监测技术，通过多维度数据采集实现早期预警。声发射技术利用泄漏时气体与固体摩擦产生的弹性波，经传感器阵列捕捉信号并分析特征频率，可在泄漏初期（泄漏孔径小于1mm时）发现异常；红外测温系统则通过监测下渣口表面温度分布，识别因泄漏导致的局部过热区域，温度分辨率可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，精准定位泄漏点。（2）泄漏程度评估。结合理论计算与实际监测数据，基于伯努利方程和连续性方程，建立泄漏量计算模型，输入压力、温度、泄漏孔径等参数，可估算泄漏速率；

利用超声波流量计、气体浓度检测仪等设备获取实时数据，修正理论模型，实现泄漏量的动态预测。（3）风险评估。采用量化分析方法，构建包含泄漏可能性、后果严重性的风险矩阵。综合考虑泄漏对设备损坏、生产中斷、人员安全及环境污染的影响，通过故障树分析（FTA）与事件树分析（ETA）计算事故发生概率，结合层次分析法（AHP）确定各风险因素权重，划分风险等级，为制定应急处理与预防措施提供依据^[3]。

4 修复工艺方案设计与优化

4.1 修复材料优选

在干煤粉气化炉下渣口的修复中，材料的选择直接决定修复效果与使用寿命。以下耐高温抗渣新型材料的性能对比及与服役环境的匹配性设计，是确保修复成功的关键。（1）复合陶瓷材料与金属基复合材料。复合陶瓷材料，如碳化硅-氧化铝（SiC-Al₂O₃）复合材料，凭借高硬度、低导热性及优异的化学稳定性，能有效抵御高温熔渣的侵蚀。其内部形成的互锁结构，可显著提升材料的抗热震性能，在温度频繁波动的工况下，减少裂纹的产生与扩展。而金属基复合材料，例如碳化钨增强镍基复合材料，兼具金属的高韧性与陶瓷颗粒的高耐磨性，能够承受熔渣冲刷与机械应力的双重作用。通过对比两种材料在高温下的抗侵蚀速率、热膨胀系数、力学强度等指标发现，复合陶瓷材料在抗渣侵蚀方面表现更优，金属基复合材料则在承受机械载荷上更具优势。

（2）材料与服役环境的匹配性设计。针对下渣口高温（1300-1600 $^{\circ}\text{C}$ ）、高压（2-4MPa）的环境，材料需具备良好的高温强度与稳定性，确保在极端条件下不发生软化或变形。熔渣的化学组成复杂，含有多种氧化物、硫化物，修复材料应具有高化学惰性，减少与熔渣的化学反应。材料的热膨胀系数需与原结构材料相近，以降低热应力的产生。如在修复耐火材料层时，选择与原耐火砖热膨胀系数相差不超过5%的复合陶瓷材料，可有效避免因热膨胀差异导致的界面开裂。

4.2 修复工艺路线制定

修复工艺路线的制定需根据气化炉的运行状态，分为以下非停车在线修复与停车检修时的一体化修复两种模式。（1）非停车在线修复工艺。以带压密封技术为核心，旨在不中断生产的前提下处理泄漏问题。带压密封技术通过在泄漏部位安装密封夹具，注入密封剂形成密封结构。密封夹具需根据下渣口泄漏位置的几何形状定制，确保与泄漏部位紧密贴合，承受内部压力。密封剂则要求具备良好的流动性、耐高温性与固化后高密封性，在高温高压环境下迅速填充泄漏间隙并固化。在实

施过程中,需精确控制密封剂的注入压力与速度,压力过低无法有效封堵泄漏,压力过高则可能破坏原结构。同时,要对密封过程进行实时监测,通过声发射、红外测温等技术判断密封效果,及时调整工艺参数。(2) 停车检修时的一体化修复。流程包含预处理、填充、烧结/固化三个关键环节。预处理阶段,需彻底清理泄漏部位的残渣、氧化皮等杂质,采用机械打磨、高压水射流等方式对修复表面进行粗化处理,以增加修复材料与基体的结合面积。填充环节根据修复材料特性选择不同方法,对于粉末状耐火材料,采用振动填充、压力灌浆等方式确保填充密实;对于膏状或液态材料,通过喷涂、涂抹等工艺均匀覆盖修复区域。烧结/固化过程需严格控制升温速率、保温时间与降温速率。例如,对于陶瓷基修复材料,缓慢升温至1200°C并保温3小时,使材料充分烧结致密化,随后以5°C/min的速率降温,避免因热应力导致修复层开裂,最终形成牢固且密封性能良好的修复结构。

4.3 工艺参数优化

工艺参数优化是提升修复质量的重要手段,主要通过以下基于正交试验的焊接/喷涂工艺参数优化与热修复过程中的应力释放方案实现。(1) 基于正交试验设计,对焊接/喷涂工艺参数进行系统优化。以金属基复合材料的焊接修复为例,选取焊接电流、焊接速度、保护气体流量、电弧电压等作为试验因素,每个因素设置3-4个水平。通过设计正交试验表,进行多组焊接试验,以焊接接头的抗拉强度、硬度、气孔率等作为评价指标。利用方差分析确定各因素对焊接质量的影响主次顺序,筛选出最优参数组合。如经试验发现,焊接电流对焊接接头强度影响最为显著,在一定范围内,随着焊接电流的增加,接头强度先升高后降低,通过试验确定最佳焊接电

流为180A,此时接头强度最高且气孔率最低。对于喷涂工艺,通过调整喷涂距离、粉末输送速度、热源温度等参数,优化涂层的致密度与结合强度。(2) 热修复过程中的应力释放方案。在修复材料的升温、降温过程中,由于热膨胀与收缩,会在材料内部产生热应力。采用分段升温、保温处理的方式,可逐步释放热应力。在升温阶段,每升高一定温度(如200°C),保温30-60分钟,使材料内部温度均匀分布,降低热应力。降温过程同样采用分段降温策略,并在降温至一定温度后进行回火处理,消除残余应力^[4]。在修复层与基体之间引入过渡层,选用热膨胀系数介于两者之间的材料,可有效缓解界面处的热应力集中问题,进一步提高修复结构的可靠性与使用寿命。

结束语:本研究全面揭示了干煤粉气化炉下渣口泄漏的内在机理,成功设计出多场景修复工艺方案并完成参数优化。通过理论分析与技术创新,有效解决了材料适配性与修复可靠性难题。但随着气化技术的发展,对下渣口性能要求不断提高。未来研究可聚焦智能化监测技术开发、新型耐蚀材料研发及修复工艺自动化升级,进一步降低泄漏风险,为煤化工行业高质量发展提供持续技术保障。

参考文献

- [1]郭彩玲,张云.干煤粉气化炉下渣口泄漏原因分析及修复工艺研究[J].工程研究与实用,2025,6(8).
- [2]李东阳,张永明,院建森,等.干煤粉气化炉主烧嘴与渣口匹配性研究[J].现代化工,2024,44(z1):328-331.
- [3]王薇,杨会军,蔚永清,等.干煤粉气化炉黑水闪蒸系统工艺优化[J].煤化工,2024,52(4):77-79.
- [4]张亚宁,匡建平,刘水刚,等.大型干煤粉气化炉渣口缺陷分析和结构改进[J].压力容器,2020,37(12):36-41,47.