

# 干煤粉气化炉下渣口泄漏原因及修复工艺分析

张 云

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司气化二厂 宁夏 银川 750000

**摘 要:** 干煤粉气化炉下渣口是连接燃烧室与激冷室的关键部件, 长期处于1300-1500℃高温、3.0-6.5MPa高压工况, 易发生泄漏, 严重影响装置稳定运行。本文结合其结构特性与工作环境, 系统分析流体冲刷、热应力与材质劣化、操作工况波动及辅助因素导致的泄漏机理, 针对锚固钉磨损、管壁穿孔、裂纹等缺陷, 提出针对性修复工艺, 明确修复原则、前期准备及检测标准, 可为下渣口泄漏防控与高效修复提供技术支持, 保障气化炉安全长效运行。

**关键词:** 干煤粉气化炉; 下渣口; 泄漏原因; 修复工艺

**引言:** 干煤粉气化技术是洁净煤利用的核心技术, 广泛应用于煤制油、IGCC等领域, 下渣口作为介质传输关键通道, 承担高温熔渣与合成气导向及高低温区域隔离功能。其运行状态直接决定气化炉作业效率与安全性, 而泄漏是该部件常见故障, 易引发停车、安全事故及经济损失。当前部分修复工艺针对性不足, 修复效果不佳, 因此开展下渣口泄漏原因分析及修复工艺研究, 对突破技术瓶颈、降低检修成本、推动行业技术升级具有重要现实意义。

## 1 干煤粉气化炉下渣口结构及工作特性

### 1.1 干煤粉气化炉整体工作原理

(1) 核心结构主要包括燃烧室、激冷室、下渣口等, 工作流程为: 干煤粉经惰性气体输送至燃烧室, 与气化剂在高温高压下发生气化反应, 生成的合成气与熔渣经下渣口进入激冷室, 熔渣冷却固化后排出, 合成气经洗涤净化后输送至后续工段。(2) 气化过程中, 温度通常在1300-1500℃, 压力维持在3.0-6.5MPa, 高温会加速下渣口材质氧化磨损, 高压则增加其密封负荷, 易导致连接处密封失效, 长期工况下会缩短下渣口使用寿命。(3) 下渣口是介质传输关键通道, 负责引导高温熔渣和合成气进入激冷室, 同时阻挡激冷室水汽反向进入燃烧室, 起到隔离高温与低温区域、保护后续设备免受高温侵蚀的作用。

### 1.2 下渣口结构设计与材质特性

(1) 典型结构以圆筒形膜式水冷壁和盘管式为主, 规格根据气化炉产能设计, 内径通常为300-500mm, 长度800-1200mm, 管壁厚度12-18mm, 适配不同规模气化装置需求。(2) 常用材质为A321, 其含碳量0.08%-0.12%、铬17%-19%、镍9%-12%, 抗拉强度 $\geq 515$ MPa, 耐高温可达800℃, 具备良好的耐磨损和耐腐蚀性能, 能适应气化炉恶劣工况。(3) 密封系统可防止高温气体泄漏, 冷却系统中, 二氧化碳、氮气保护可避免下渣口高温氧化,

循环水冷却能将管壁温度控制在合理范围, 防止材质过热失效<sup>[1]</sup>。

### 1.3 下渣口泄漏的常见表现形式及危害

(1) 常见表现有锚固钉磨损脱落、管壁局部穿孔、焊缝及管壁出现细小裂纹, 其中底部3圈是泄漏高发区域, 裂纹多为热应力导致的微小开裂间隙。(2) 泄漏会导致气化炉压力波动、工况失衡, 甚至被迫停车, 高温熔渣和气体泄漏还会直接威胁操作人员人身安全, 引发烫伤、中毒等事故。(3) 泄漏会造成原料浪费和产能下降, 检修需投入大量人力物力, 同时可能引发激冷室超温、管线磨损等连锁故障, 加剧经济损失。

### 1.4 下渣口泄漏的检测方法

(1) 采用6.3兆帕压力保压进行水压试验, 操作要点为试验前排查管路密封性, 缓慢升压至规定压力, 保压30分钟, 观察压力降, 若压力降超过允许范围则判定存在泄漏。(2) 定位时重点检查下渣口底部及焊缝处, 用记号笔标记泄漏点, 结合压力变化判断泄漏严重程度, 对疑似部位进行重点排查。(3) 着色检测(PT)作为无损检测方法, 通过渗透剂渗入裂纹, 去除多余渗透剂后施加显像剂, 可清晰显示细小裂纹位置, 适用于泄漏初期的表面缺陷检测。

## 2 干煤粉气化炉下渣口泄漏原因分析

### 2.1 流体冲刷导致的泄漏原因

(1) 下渣口长期运行中, 受高温熔渣磨损、介质腐蚀等影响易出现缩径现象, 缩径后气体流通截面积减小, 气流动能显著增加, 高速气流携带渣料对下渣口内壁锚固钉及管壁产生持续冲刷, 长期作用下导致锚固钉磨损脱落、管壁厚度减薄, 最终引发泄漏。(2) 激冷室内的激冷水与高温熔渣、合成气接触后, 会产生反冲气流, 反冲气流携带冷却后的细小渣料, 对下渣口底部形成二次冲刷, 该区域作为介质转向的关键部位, 冲刷强度集中, 易出

现局部磨损超标,进而产生泄漏隐患。(3)冲刷磨损的影响因素主要包括:介质流速越快,冲刷动能越大,磨损越严重;渣料硬度越高,对管壁的切削、研磨作用越强;运行压力过高会加快气流速度,同时增加渣料撞击管壁的力度,三者协同作用,加速下渣口磨损泄漏。

### 2.2 热应力与材质劣化导致的泄漏原因

(1)气化炉生产过程中,多次开停车会导致下渣口温度急剧变化,升温时材料膨胀、降温时材料收缩,交替的热胀冷缩产生周期性热应力,同时高温工况下材料会发生蠕变变形,长期积累会导致管壁出现塑性损伤,进而产生泄漏。(2)下渣口长期处于1300-1500°C高温、3.0-6.5MPa高压工况下,材质会逐渐发生疲劳老化,晶格结构发生变化,韧性和强度下降,表面易产生细小裂纹,裂纹在高温高压作用下不断扩展,最终穿透管壁引发泄漏<sup>[2]</sup>。(3)焊接过程中若存在未焊透、热裂纹、夹渣等质量缺陷,会导致焊接部位材质薄弱,形成应力集中点,在高温、热应力及介质冲刷的共同作用下,缺陷部位易率先出现裂纹并扩展,成为泄漏的主要突破口。

### 2.3 操作工况与物料特性导致的泄漏原因

(1)急冷水流量不足、温度过高,会导致下渣口冷却效果不佳,管壁温度超过材质耐受范围,材质性能劣化加速;若流量波动过大,会造成下渣口温度骤变,产生热应力,进而影响其运行稳定性,诱发泄漏。(2)若渣料流动性差,易粘连在下渣口内壁,形成积渣,积渣与管壁长期接触会加剧局部磨损,同时积渣脱落时会对管壁产生冲击,反复作用下导致管壁穿孔,引发泄漏。(3)煤质波动较大、粉煤掺烧比例不均,会导致气化反应不稳定,炉内温度、压力波动加剧,同时渣料成分、硬度发生变化,冲刷磨损强度不稳定,间接加剧下渣口的损伤,增加泄漏风险。

### 2.4 其他辅助因素导致的泄漏原因

(1)安装、检修过程中操作不当,如装配时存在偏差,导致下渣口与相邻部件连接不紧密,密封性能下降;焊接工艺不合理,未严格控制焊接温度、速度,会产生焊接缺陷,为后续泄漏埋下隐患。(2)冷却系统故障,如循环水管道堵塞、氮气/二氧化碳保护气供应不足,会导致下渣口温度异常升高,材质过热老化,同时失去保护作用,加速氧化磨损,引发泄漏。(3)下渣口内壁的耐火材料若出现脱落、破损,会失去对管壁的保护作用,使管壁直接暴露在高温熔渣和气体中,磨损、腐蚀速度大幅加快,短期内即可出现泄漏。

## 3 干煤粉气化炉下渣口修复工艺研究

### 3.1 修复工艺选型原则与前期准备

(1)修复工艺选型需遵循三大核心原则:一是适配泄漏类型,根据锚固钉磨损、管壁穿孔、裂纹等不同缺陷,选择针对性工艺,杜绝“一刀切”;二是保证修复强度,修复部位需达到原设计强度,能长期耐受气化炉高温、高压及介质冲刷工况;三是兼顾经济性,在保障修复质量的前提下,优先选用耗材成本低、施工周期短的工艺,降低检修成本。(2)修复前需做好全面准备:首先停机,切断气化炉进料、进气、进水等相关管线,泄压降温,确保炉内温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ 、压力为零;其次彻底清理泄漏部位,用角磨机、高压水枪等工具清除积渣、氧化皮、锈蚀及破损涂层,露出基材本色,避免杂质影响修复效果;最后做好安全防护,操作人员穿戴耐高温、防烫伤装备,现场配备灭火器材、有毒气体检测仪并设置警戒区域,防范安全事故。(3)修复材料选型需匹配原材料及工况:焊接材料选用与下渣口基材A321匹配的奥氏体不锈钢焊条,确保焊缝与基材融合良好,具备同等耐高温、耐磨损、耐腐蚀性能;锚固钉选用高强度耐热不锈钢,规格与原钉一致,长度不低于原设计,抗拉强度 $\geq 515\text{MPa}$ ,可承受高温蠕变及介质冲刷,防止修复后再次磨损脱落。

### 3.2 锚固钉磨损修复工艺

(1)先明确锚固钉磨损判定标准,当锚固钉实际长度小于6mm、表面磨损量超过原直径的1/3,或出现松动、脱落、断裂等情况时,需及时进行修复;修复前对锚固钉安装部位进行精细化打磨处理,用角磨机将基材表面打磨平整,去除氧化层、油污及杂质,打磨范围围绕锚固钉安装点向外扩展10-15mm,打磨后用干净的抹布擦拭干净,确保焊接面洁净、无杂物,为后续螺柱焊接奠定良好基础。(2)采用螺柱焊接工艺进行锚固钉修复,焊接档位调节至3-4档,根据锚固钉规格精准调整焊接电流和焊接时间,焊接深度严格控制在8-10mm,确保锚固钉与基材充分熔合,无未焊透现象;操作时需保持焊枪垂直于基材表面,避免倾斜导致焊接不牢固,焊接过程中密切观察熔池状态,及时调整焊接速度,防止出现气孔、夹渣等缺陷,焊接完成后立即用钢丝刷清理焊渣,避免残留杂质影响锚固效果<sup>[3]</sup>。(3)焊接后进行严格的检测与验收,采用目视检查、敲击检查与拉力试验相结合的方式:目视检查无明显焊渣、气孔、裂纹及咬边等缺陷,敲击时声音清脆无杂音,无松动现象;拉力试验需确保锚固钉抗拉强度达到设计要求,无松动、脱落情况,同时检查锚固钉安装间距与原设计一致,验收合格后方可进入下一工序,确保修复质量符合气化炉运行标准。

### 3.3 穿孔缺陷修复工艺

(1) 针对管壁穿孔缺陷, 首先开设止裂槽, 采用角磨机在穿孔边缘四周开设U型止裂槽, 槽宽8-10mm、槽深5-6mm, 止裂槽需圆滑过渡, 无尖锐棱角和毛刺, 其核心作用是阻断原有裂纹的延伸, 分散焊接过程中产生的热应力, 避免焊接时因应力集中产生新的裂纹, 同时为后续焊接修复提供平整、稳定的作业面, 确保焊接质量<sup>[4]</sup>。(2) 优化焊接工艺, 采用分段分层焊接方式, 焊接顺序严格遵循从漏点四周向中心逐步推进的原则, 避免一次性焊接导致局部温度过高, 产生热应力裂纹; 焊接时控制焊接速度为5-8mm/s, 层间温度严格控制在150-200°C, 每焊完一层及时用钢丝刷清理焊渣, 用测温仪检测层间温度, 确认无缺陷后再进行下一层焊接, 确保焊缝饱满、成形均匀, 无夹渣、未焊透、气孔等问题。(3) 焊接完成后采用无损检测方法进行全面质量检验, 主要采用着色检测(PT)和超声波检测(UT)相结合的方式: 着色检测重点排查焊缝表面及周边区域, 确保无细小裂纹、气孔、夹渣等表面缺陷; 超声波检测重点排查焊缝内部, 确保无未焊透、夹渣等内部缺陷; 合格标准为: 表面无可见裂纹、气孔、夹渣及咬边, 内部缺陷符合相关行业标准, 焊缝强度不低于基材强度, 满足高温高压工况运行要求。

#### 3.4 裂纹缺陷修复工艺

(1) 采用“开天窗”修复法, 根据裂纹长度、宽度及延伸方向精准设计窗口尺寸, 通常采用150×60mm椭圆窗口, 窗口需覆盖裂纹两端各20-30mm, 确保完全暴露裂纹区域, 便于清理和焊接。操作流程: 先按设计尺寸在管壁标记窗口范围, 用等离子切割机精准切割并去除破损部位, 再用角磨机清理窗口内壁, 打磨去除氧化层、杂质及裂纹残留, 经放大镜检查确认裂纹彻底清除后, 对窗口边缘倒角, 为后续焊接做准备。(2) 盘管对接焊接时, 严格控制错边量, 不超过管壁厚度的1/10, 防止错边过大导致焊接应力集中引发新裂纹。焊缝需成形

均匀饱满, 余高控制在2-3mm, 无咬边、未焊透、气孔、裂纹等缺陷; 焊接过程采用惰性气体保护, 避免焊缝氧化, 确保焊缝与基材融合良好, 具备与原管壁同等的耐高温、耐磨损、耐腐蚀性能及结构强度<sup>[5]</sup>。(3) 修复后需进行整体检测与密封性验证: 先通过目视检查、超声波检测, 全面排查修复部位及周边, 确认无缺陷; 再进行水压试验, 按6.3兆帕压力保压30分钟, 观察压力降是否达标且无泄漏; 最后进行气密性试验, 通入氮气并维持规定压力, 检查密封部位无泄漏, 确保修复后下渣口能长期适应气化炉高温、高压及介质冲刷工况, 彻底消除泄漏隐患。

#### 结束语

本文围绕干煤粉气化炉下渣口泄漏问题, 全面剖析了各类泄漏原因, 明确流体冲刷与热应力劣化是主要诱因, 结合不同缺陷类型提出了科学可行的修复工艺, 经检测验证, 修复后部件可达到原设计标准。本研究弥补了现有修复工艺的针对性短板, 但在复杂工况下的长效性仍需进一步验证, 后续可结合实际运行数据优化工艺参数, 为干煤粉气化装置关键部件的运维提供更全面的技术参考。

#### 参考文献

- [1] 司彦军. 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, 14(8): 65-68.
- [2] 张亚宁, 匡建平. 大型干煤粉气化炉渣口缺陷分析和结构改进[J]. 压力容器, 2022, 37(12): 36-41.
- [3] 李东阳, 张永明. 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.
- [4] 王薇, 杨会军. 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.
- [5] 郭彩玲. 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(15): 103-106.