

高盐废液水冷壁焚烧炉衬里剥落失效机理及改造措施

涂 伟

浙江石油化工有限公司 浙江 舟山 316200

【摘 要】：化工高盐有机废液焚烧过程中，高温熔融盐化学侵蚀容易造成焚烧炉耐火衬里开裂剥落、锚固结构失效，成为限制装置长周期稳定运行的瓶颈问题。本文以碳一化工部 16 万吨每年废液焚烧装置水冷壁焚烧炉为研究对象，基于四年多现场运行台账、大修检测数据、物料化验及积盐取样分析结果，系统剖析衬里剥落的多重失效机理。研究得出来料含盐量超标、衬里结构设计冗余不足、碳钢锚固系统耐腐蚀性差、生产工况波动、施工烘炉控制缺失为主要失效原因。针对废液前端预处理、衬里结构升级、锚固系统材质换代、标准化施工养护、稳定化操作管控等一体化综合治理方案进行针对性地实施。经过 15 个月的现场连续运行检验，改造后的炉体衬里没有大面积剥落、抓钉锈蚀的问题基本消除，衬里使用寿命提高了一倍以上，设备运维成本明显降低。研究成果可以给同类型高盐废液水冷壁焚烧炉的衬里运维和升级改造提供工程上的借鉴。

【关键词】：废液焚烧炉；水冷壁可塑料；钠盐高温腐蚀；抓钉氧化；衬里剥落

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.025

1 项目研究背景

本次研究以碳一化工部废液焚烧装置为依托，其配置的两台水冷壁式焚烧炉从 2021 年 10 月、11 月开始运行，到 2025 年 8 月为止总运行时间分别为 3 年 10 个月、3 年 9 个月。炉体采用顶部燃料直喷向下的燃烧工艺，燃烧区峰值温度可以达到 1650 摄氏度，炉膛出口烟气温度为 1100 摄氏度，烟气流速基本保持在 10 米/秒。炉膛水冷壁外侧敷设 60 毫米厚耐火可塑料，通过水冷壁焊接抓钉实现锚固固定，主要作用是降低水冷壁吸热、延长烟气炉膛停留时长，保障有机废液充分分解，稳定急冷塔进口烟气温度在 500 至 530 摄氏度区间。

装置处理的物料有乙二醇杂醇、双酚 A 高温废液和中温废液等混合物料。2022 年 5 月起，乙二醇装置每天产出 25 到 30 吨杂醇，没有专用的缓冲储存设施，只能直接混入上游废液罐焚烧，造成炉膛腐蚀性积盐不断增多。2025 年 3 月二号炉计划性大修检测结果表明，炉顶、炉身大部分部位衬里大面积脱落，80% 以上的水冷壁管束裸露出来，锚固抓钉普遍出现氧化锈蚀现象，整体破损修复面积达到 298 平方米。常规衬里更换修复方式只能达到短期的效果，设备失效问题会不断重复出现。为了彻底解决衬里剥落问题，本文根据现场检测数据和运行工况，对失效机理进行全方位的分析，提出系统性的改造方案并落实到位，通过长期运行检验改造成效。

2 衬里剥落失效机理分析

2.1 高盐废液高温腐蚀，破坏耐火材料基体结构

装置原始运行规范规定含钠废液要和足量的中温废液一起稀释，使混合废液中的钠盐浓度处于安全范围内。实际生产中厂区中温废液日最大产出量为 340 吨，再加上 60 吨双酚 A 高温废液协同稀释后，混合废液的钠盐浓度仍大于 0.7%，达不到设计稀释标准，入炉废液含盐量一直超标。

乙二醇杂醇是炉内腐蚀性积盐的主要来源，它完全燃烧之

后会产生含钠、硫、氯的高温腐蚀烟气。烟气中的氧化钠会和耐火可塑料基体中的二氧化硅发生固相反应，形成低熔点的硅酸盐熔融物，不断地附着、渗透到衬里表面，慢慢使耐火骨料变得粉化，从而降低衬里的结构密实度。同时氧化钠和氧化铝反应生成铝酸钠中间体，高温时会产生物体膨胀，在衬里内产生贯通的网状裂纹，造成耐火材料脆化、分层，最后导致块状脱落。

另外，废液组分频繁变化容易引起进料喷枪堵塞，使炉膛火焰形态变得不稳，燃烧刚度下降，出现火焰局部偏移冲刷炉壁的情况，造成炉膛局部超温，加快耐火材料的腐蚀和磨损，缩短衬里的使用寿命。

2.2 衬里结构升级，分区匹配耐火材料

结合炉膛不同区域工况差异，实施差异化衬里升级。将全炉破损区域衬里厚度由原来的 60 毫米统一增加到 80 毫米，在炉顶燃烧器、烟气涡流冲刷段增设预制耐火砖加强层，大大提高了结构的抗盐蚀、抗气流冲刷冗余。原薄层衬里不能抵抗高温熔融盐的渗透侵蚀，增厚后耐火结构可以阻挡腐蚀性介质向锚固层扩散，减缓高温烟气的机械冲刷，从结构上解决了衬里快速破损的主要问题。

高温燃烧区更换适应高盐腐蚀工况的铬刚玉抗盐蚀可塑料，长期耐受温度可达 1600 摄氏度，适合装置高钠高氯废液焚烧工况。该材质有很好的抗熔融钠盐渗透性、抗高温氧化性，能很好地阻止高温时硅酸盐、铝酸盐腐蚀反应对耐火基体的破坏。低温烟道区用低水泥高铝可塑料代替，保证使用性能的同时控制改造成本。在耐火材料拌合时均匀掺入耐高温不锈钢纤维，可抑制断纹的蔓延扩散，提高衬里的整体韧性以及结构的整体性，从结构上降低衬里块状剥落的风险。

2.3 锚固系统全面换代，提升耐蚀抗温性能

彻底更换原有的普通碳钢抓钉，全炉使用 310S 奥氏体不

锈钢抓钉,提高锚固结构的高温抗氧化和耐氯盐腐蚀性能。普通碳钢在 1000℃ 以上的高温高盐环境中很容易发生晶间腐蚀和高温氧化,短时间内出现截面减薄、脆化断裂,310S 不锈钢中含有大量的铬镍合金元素,在高温腐蚀的环境下会形成致密的钝化保护膜,有效地抵抗硫、氯、钠盐的复合腐蚀,适合于炉膛极端的工作条件。规范抓钉布置标准,把布置间距严格控制在 150 毫米以内,抓钉和水冷壁管束用满焊工艺施工,杜绝虚焊、点焊缺陷,保证锚固连接强度。

在不锈钢抓钉外层用沥青缓冲套管包裹,将金属和耐火材料的热膨胀系数差值减小到一定程度,消除由于热胀冷缩引起的剪切应力,防止衬里开裂、剥离,从而解决了温度交变工况下衬里开裂、剥离的常见问题。建立常态化的抓钉检修标准,在每次停炉检修时对抓钉的腐蚀深度、形变和焊接点位的完整性进行检测,对于腐蚀深度大于三分之一、有弯曲变形或焊点开裂的锚固件全部更换,保证锚固系统一直处在完好受力的状态,给耐火衬里提供持续稳定的锚固支撑。

2.4 运行工况频繁波动,交变热应力损伤衬里结构

装置原有的废液输送系统缺少稳定的调节设施,进料流量、输送压力的波动幅度很大,造成炉膛热值、烟气温度短时间剧烈波动,衬里一直处在交变热循环应力的作用下,结构稳定性不断降低。

喷枪堵塞引起的局部超温,使耐火材料长期处在极限高温区,造成耐火骨料烧结疏松、机械强度急剧下降。装置启停、负荷调节时,升降温速率没有做到统一控制,剧烈的热冲击会导致衬里微观裂纹不断延伸,慢慢变成贯穿性的破损,进而引发衬里分层脱落。

2.5 施工烘炉管控不规范,留存先天结构缺陷

前期衬里现场施工环节控制缺失,给后期设备失效埋下隐患。可塑料拌合阶段加水量控制不当,造成衬里内部存在疏松空洞,密实度不够,腐蚀性烟气很容易渗透到内部侵蚀。分段浇筑施工时冷缝处没有涂刷耐火结合剂,形成结构性分层薄弱带,盐蒸汽可以沿着缝隙进入抓钉根部,加快锚固结构的腐蚀损坏。

烘炉过程中没有按照梯度升温制度进行,升温速度过快,衬里内部游离水和结晶水受热迅速膨胀,不能平稳地排出,使衬里内部鼓包、表层开裂,大大降低了衬里整体的耐腐蚀、抗冲刷性能。

3 一体化综合治理改造措施

对以上多种失效原因,放弃单一的换料维修手段,采用源头治理、结构改良、工艺改善、管理加强等综合手段来解决衬里长期稳定问题。

3.1 前端预处理改造,严控入炉废液含盐量

从腐蚀源头着手,改善废液输送和稀释系统。新增乙二醇杂醇专用缓冲储罐,保证杂醇物料的均衡、稳定的输送,防止高盐废液瞬间全部进入炉内,保证入炉物料组分稳定。优化上游废液回收流程,提高中温废液回收能力,将稀释介质日供给量提高到 500 吨以上,严格控制混合废液钠盐浓度小于 0.4%,大大减少炉内低熔点盐相生成量。

在废液输送管线前端加装精密过滤器,可以有效地拦截物料中的固体杂质,彻底解决喷枪堵塞的问题,稳定炉膛火焰形态和燃烧状态,消除局部高温冲刷对衬里的损伤。

3.2 衬里结构升级,分区匹配耐火材料

结合炉膛不同区域工况差异,实施差异化衬里升级。将全炉破损部位衬里厚度由原来的 60 毫米统一提高到 80 毫米,在炉顶燃烧器、烟气涡流冲刷段增加预制耐火砖加强层,大幅度提高结构的抗盐蚀、抗气流冲刷冗余度。

高温燃烧区更换适配高盐腐蚀工况的铬刚玉抗盐蚀可塑料,长期耐受温度可达 1600 摄氏度,适配装置高钠高氯废液焚烧工况。低温烟道区域选用低水泥高铝可塑料,在保障使用性能的前提下合理控制改造成本。同时在耐火材料拌合过程中均匀掺入耐高温不锈钢纤维,有效阻断裂纹延伸扩散,从结构上降低衬里块状剥落风险。

3.3 锚固系统全面换代,提升耐蚀抗温性能

彻底更换原来的普通碳钢抓钉,全炉使用 310S 奥氏体不锈钢抓钉,大大提高了锚固结构的高温抗氧化、耐氯盐腐蚀性能。规范抓钉布置标准,把布置间距控制在 150 毫米以内,抓钉与水冷壁管束采用满焊工艺施工,杜绝虚焊、点焊缺陷,保证锚固连接强度。

在每个不锈钢抓钉外表面加装一层 1-2 毫米厚的沥青缓冲套管,以抵消由于金属和耐火材料热膨胀系数不同所引起的剪切应力,防止衬里被破坏。建立常态化的抓钉检修标准,每次停炉检修时对抓钉进行全面的腐蚀深度检测,腐蚀深度超过三分之一的锚固件全部更换,保证锚固系统一直处在良好的工作状态。

3.4 规范施工烘炉流程,消除先天结构缺陷

制定标准化施工管控体系,严格把控可塑料拌合加水量,采用机械搅拌方式保障物料混合均匀,实行分层浇筑、逐层振捣施工工艺,彻底消除衬里内部疏松空洞。分段施工产生的冷缝均匀涂刷专用耐火结合剂,消除分层薄弱界面,提升衬里整体整体性。

衬里浇筑成型后,常温自然养护 72 小时,严格执行低温、中温、高温三段梯度烘炉制度,各温度区间设置专属恒温保温周期,缓慢排出衬里内部游离水与结晶水,规避水汽膨胀引发

的鼓包、开裂问题。建立施工和烘炉曲线专项台账，保留全部的改造数据，给后期故障溯源和工艺改进给予数据支持。

3.5 完善运行管控体系，稳定生产工况

增设废液进料缓冲罐，保证物料的输送流量、压力稳定，防止工况急剧变化。对装置的升降温过程进行严格的规范，把炉膛的升温速率控制在不大于 50 摄氏度每小时，把降温速率控制在不大于 40 摄氏度每小时，禁止突然起停或者大幅度调节负荷。建立喷枪定期清洗维护台账，常态化清理喷枪堵塞隐患，保障火焰燃烧均匀稳定。

控制好炉膛负压区间，防止烟气倒流腐蚀衬里背部锚固结构。创建衬里专项巡检制度，在大修时重点检测抓钉锈蚀、衬里裂纹、表面积盐等隐患，对浅层微小裂纹马上修补封堵，防微杜渐避免小故障变大损坏。

4 改造效果与数据分析

4.1 整体运行效果

2025 年 3 月二号废液焚烧炉完成全部一体化改造，落实施工废液预处理、衬里结构升级、锚固系统更换、标准化施工和运行控制优化等全部措施。经过改造之后，该装置连续稳定的运行了 15 个月，成功地克服了以前经常出现的衬里网状开裂、块状剥落的问题。炉体高温区、烟气冲刷区无耐火材料脱落，水冷壁管束全程裸露，无腐蚀损坏。同时锚固系统运行稳定，无抓钉锈蚀、断裂、脱落故障，炉膛积盐附着量大幅减少，火焰燃烧状态均匀稳定，未发生因衬里及锚固失效引发的非计划停机，装置废液处置产能实现满负荷稳定运行。

4.2 核心参数改造前后对比分析

为了直观地衡量改造成效，对改造前后的设备结构、运行参数、故障指标进行梳理，得到标准对比数据，具体参数见下表。经过多方面指标的对比，可以对本次综合治理方案是否可行、有效进行准确的检验。改造前后核心运行及设备参数对比如表所示。

表 1 改造前后核心运行及设备参数对比

对比项目	改造前	改造后	优化效果
衬里厚度 (mm)	60	80	结构抗冲刷腐蚀余量提升 33.3%

入炉废液钠盐浓度(%)	0.7	≤0.4	盐相腐蚀源头大幅弱化
抓钉材质	普通碳钢	310S 不锈钢	高温耐盐蚀性能大幅提升
单次大修衬里修复面积 (m ²)	298	0	彻底消除大面积衬里修复作业
衬里平均使用寿命(月)	12	≥24	使用寿命提升一倍以上
年度衬里故障停机次数	1	0	实现衬里失效零停机

4.3 改造综合效益分析

改造之后从源头控盐、结构升级、工艺规范、运维提质四个方面进行全方位的改进，从根本上解决衬里剥落、抓钉腐蚀的问题。衬里使用寿命提高到 24 个月以上，使用寿命翻倍，年度衬里故障停机次数为零，完全消除大面积衬里大修作业。经济效益上大幅度减少耐火材料采购费、设备检修费、停产减产费；生产运行上有效地防止了装置工况的波动、局部超温、烟气冲刷等风险，保证了焚烧系统长时间的安全、环保、高效运转，给高盐废液焚烧装置长周期稳定运行提供可靠保障。

5 结语

高盐废液水冷壁焚烧炉衬里剥落属于典型的多因素耦合失效问题，物料腐蚀、结构缺陷、施工偏差、工况波动一起加快了衬里失效的速度。乙二醇杂醇无缓冲直输、稀释废液供给不足造成入炉含盐量超标，是衬里高温腐蚀的主要原因。原始衬里厚度不够、碳钢锚固系统耐蚀性差属于设备先天设计缺陷，工况频繁变动、施工烘炉控制不到位又加重了设备损坏的速度。单一更换耐火材料、局部修补的传统维修方式只能治标不能治本，不能从根本上解决衬里反复剥落的问题。本次研究应用的前端废液预处理、分区衬里升级、锚固系统换代、标准化施工养护、常态化运行管控的一体化改造方案，经过 15 个月现场运行验证，成效稳定可靠。该方案针对高盐废液焚烧炉衬里失效的各种核心问题，技术落地性强、适用范围广，可以为国内同类型的化工高盐废液焚烧装置的设备运维、结构改造、故障处理提供成熟的技术工程案例。

参考文献:

- [1] 刘琨,李小龙,孙培.高盐废液双极膜电渗析技术实验研究[J].精细与专用化学品,2026,34(4):27-30.
- [2] 张敏,李凤娟,宿辉,等.油田高盐废液纳滤处理技术应用研究[J].石油化工应用,2026,45(2):96-98+105.
- [3] 袁和川,范椿欣,骆枫,等.放射性高盐废液干燥成盐技术发展现状及改进方案[J].企业科技与发展,2023,(3):25-28.
- [4] 孙冬青.高 COD、高盐废液处理技术研究[J].科学技术创新,2022,(8):47-50.
- [5] 刘庆月,李凌宇,徐菲,等.海上油田高盐废液处置技术方向探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(18):191-192.