

基于流化床酸再生的废气减排与资源化利用技术探讨

马睿智 陈则艳

考克利尔酸循环科技(山东)有限公司

DOI:10.32629/eep.v8i12.2999

[摘要] 工业生产过程中废酸处置所释放的酸性废气是大气污染治理的关键环节,流化床酸再生技术因其卓越的酸回收能力与废气净化性能,已成为实现环保减排跟资源循环利用的重要技术途径。基于此,本文融合国内工业实践,深度分析该技术在废气削减跟资源化方面的核心作用,归纳其主流应用现状,并针对工程实行中存在的技术瓶颈提出切实有效的改良方针。研究成果为流化床酸再生技术的精细化推广给予支撑,助推工业绿色低碳转型。

[关键词] 流化床酸再生; 废气减排; 资源化利用

中图分类号: F205 文献标识码: A

Discussion on Emission Reduction and Resource Utilization Technology Based on Fluidized Bed Acid Regeneration

Ruizhi Ma Zeyan Chen

Cockleil Acid Cycle Technology (Shandong) Co., Ltd.

[Abstract] The acidic exhaust gas released during the disposal of waste acid in industrial production is a key aspect of air pollution control. The fluidized bed acid regeneration technology, due to its outstanding acid recovery capacity and exhaust gas purification performance, has become an important technical approach for achieving environmental protection and emission reduction as well as resource recycling. This paper integrates domestic industrial practices, deeply analyzes the core role of this technology in reducing exhaust gas and resource utilization, summarizes its mainstream application status, and proposes practical and effective improvement measures for the technical bottlenecks encountered in engineering implementation. The research results provide support for the refined promotion of the fluidized bed acid regeneration technology and promote the green and low-carbon transformation of industry.

[Key words] Fluidized bed acid regeneration; Exhaust gas reduction; Resource utilization

引言

伴随我国制造业结构改良升级,钢铁、有色金属冶炼等领域废酸产出量逐年攀升,处理环节释放的氯化氢、二氧化硫等酸性气体若未妥善净化,易致使空气品质恶化;且废酸中具有回收价值的组分没能高效提取,加重资源损耗,目前生态环境监管持续趋严,工业废气排放限值日趋收窄,而既有废酸处置技术普遍存在尾气排放偏高、有价值物质回收能力不足等缺陷,愈发不易满足产业绿色转型要求。流化床酸再生技术借助流态化反应,高效实现废酸再生跟尾气协同净化,同时拥有污染物削减与资源回收双重效益,已在多家国内大型企业实现规模化应用,深度探索其应用价值、重点工艺现状及改良方略,对增强工业废气治理效能、助推资源循环利用有着显著现实意义。

1 流化床酸再生技术的废气减排与资源化核心价值

1.1 环保减排价值凸显

流化床酸再生技术依托一体化反应体系,从源头有效控制酸性废气,显著削减污染物排放强度,该工艺利用流化状态下高效的传质反应,充分回收废酸中的酸性成分,并将废气中有害物质转化为稳定产物,规避了传统方法中酸性气体直排的弊端。同常规焙烧法相比,其废气排放浓度更低,粉尘及氯化氢等污染物排放量仅达国家特别排放限值的三分之一,该源头削减方针不光减轻了末端处理负担,又满足大气污染精细化防控需求,为工企达标排放给出了坚实技术保障。

1.2 资源循环利用赋能

流化床酸再生技术的核心优势在于高效实现废酸资源的循环再利用,工业废酸中所含的盐酸等有效组分,经由流化反应和冷凝回收等工艺,可重新制备成符合标准的酸液并返回生产系统。另外,废气治理过程中生成的氯化物等副产物亦可作为工业原料加以二次利用,从而实现废弃物的资源化增值。该循环形式

不仅削减了企业对新酸的采购依赖与资源消耗,还显著降低了固废处理成本,建立起“废酸再生—资源回用—副产品回收”的闭环体系,契合资源节约型工业的发展方向。

1.3 能耗控制协同增效

流化床酸再生技术借助工艺集成和余热回收设计,有效控制了能耗。其反应过程可利用反应释放的热量维持系统温度,减少对外部热源的依赖;配套的余热回收装置还能将反应产生的热能加以利用,用于原料预热或辅助加热。相比传统方法,该技术单位能耗显著下降,国内大型机组应用实例显示,年均可减少数千吨碳排放,能耗的减少不光削减了企业生产开支,更契合“双碳”目标下工业节能减碳的发展需求,达成环保与经济双重效益的协同。

1.4 产业适配性广泛

流化床酸再生技术展现出卓越的产业适应性,可以有效应对多领域废酸处置需求,不论是钢铁行业冷轧酸洗产生的废酸,抑或冶金过程中各类酸性废液,均可借助工艺参数改良实现高效治理,除了上述内容以外,小型模块化流化床酸再生装置的研发跟应用,助推了从“现场施工”向“工厂预制”的转型,显著压缩建设周期,减少厂房投入,契合中小型企业废酸处理的实际要求。该技术广泛的适用性让它在众多工业场景中加速推广,拓宽了废气减排与资源回收利用的实践广度。

2 流化床酸再生核心技术应用现状

2.1 流化床反应器设计技术

流化床反应器作为酸再生及尾气净化的核心装置,其结构设计的科学性直接决定整体工艺性能,目前我国大量使用的该类设备多呈圆柱状,底部配置均流风板以保障气流均匀进入,从而维持床层稳定流化。反应区内填充氧化铁球颗粒作为流化载体,有效增大废酸的接触面积。设计阶段须严格调控内径、料层厚度等核心尺寸参数,主流工业装置的内径一般为3至5米,料层厚度控制在0.4到1米之间,以保证必要的反应滞留时间满足工艺指标。目前设计方案尚存在若干缺陷,譬如某些装置出现料层分布不均问题,削弱了反应的均匀性,亟需改良其结构布局。

2.2 废气捕集与预处理技术

废气收集与初步净化是实现减排目标的核心前置步骤,目前我国大多使用密闭型集气系统,将酸再生工艺中产生的全部废气导入净化设施,杜绝无序逸散,该环节利用冷凝设备脱除绝大部分酸性雾滴,冷凝温度一般维持在50至60摄氏度,继而高效回收液态酸类物质,并辅以高效除雾单元,截留微细液滴,显著减少后续处理系统的运行负担。高负荷工况下,部分捕集装置密封性欠佳,使微量废气逸出;经预处理的气体中依然残留痕量悬浮颗粒,捕集及预处理效能亟需改良。

2.3 余热回收与资源化技术

余热回收及资源化利用技术是增强工艺经济性的重要保障,目前,国内主流余热回收系统依托换热装置捕获反应过程释放的热能,所获热量主要用于废酸原料预热或反应助燃空气预热。大型装置余热回收率大多逾60%。可是,余热利用效率尚有改良

潜力,制约其高值化应用。

3 流化床酸再生工程实施优化路径

3.1 床层流化稳定性优化

布风系统使用孔径渐变式风帽阵列布局,依据反应器横截面各区域对气流均匀性的差异化要求,将风帽开孔尺寸划分为三级梯度:中心区为1.5-2.0mm,中间过渡区为2.0-2.5mm,外围区为2.5-3.0mm,借此保障床层内气体分布的均衡性。从而显著增强整体床层的流化稳定性与均匀程度,除了上述内容以外,在反应器床层上方三分之一处加装蜂窝状钢制格栅,其开孔尺寸为10毫米,板厚达8毫米;该结构凭借阻截跟导流功能,有效缓解局部物料堆积现象。为保证改良措施切实落地,施工中须严控布风系统安装精度,要求风帽水平度偏差 ≤ 0.5 毫米/米,以实现气流分布高度均匀。经改良实施与现场实测验证,床内各区域温差稳定在5-10℃,压降波动收窄至 ± 50 Pa以内,流化均匀性明显增强,酸再生能力提高8-10%,为后续废气减量及资源回收提供了可靠运行保障。除此之外,炉压仪表的测量精度、助燃风机风压风量的控制精度也会对床层的稳定性有很大的影响。

3.2 降低烟气中HCL及颗粒物浓度

在烟气经过两级吸收塔脱酸反应后,剩余烟气将经过气液分离器、文丘里等设备。这些设备可以有效的将烟气中的气凝胶、颗粒物、HCL进行深度捕捉。换热器将在这一阶段降低冷凝水的温度,通过冷凝水泵对烟气不断地冷却,从而达到降低烟气流量及颗粒物、HCL浓度的目的。该改良方案在某钢铁企业流化床酸再生工程中开展试点应用,结果表明,采用本套先进的“酸雾冷却工艺”,实现了废气超低排放和废水近零排放,同步降低了水耗和酸耗。这不仅显著改善了员工作业环境和厂界环境质量,而且降低了劳动负荷,提高了劳动效率。通过对烟气排放的24小时在线连续检测,实现了粉尘和酸雾排放量仅为国家特别排放限值三分之一的超低水平,环保效益和经济效益协同增强。最新监测数据表明,每年可减碳4800吨、减少氯化氢和粉尘25吨,杜绝了氨氮废水和固体危废产生。

3.3 设备腐蚀防控优化

设备选材改良中,反应器内壁使用“Q235钢板+耐酸陶瓷涂层/耐酸耐火材料”复合构造;所用高铝陶瓷含 Al_2O_3 不低于95%,借助等离子喷涂成形,涂层厚度准确控制于3至5毫米,耐酸耐火材料约300mm厚,并经800-850℃高温固化,显著增强界面融合强度,其抗酸蚀能力较常规不锈钢增加五倍以上。换热器选用钛材制造,该材料在氯化氢等强酸性介质中表现出卓越的抗蚀能力,完全胜任高温高压腐蚀性工况,管道系统使用钢塑复合管,内壁衬覆聚四氟乙烯,厚度控制在2至3毫米,实现酸性介质与基体钢管的有效隔离。工艺改良方面,新增烟气温度精密调控模块,借助协同调节进风速度和热能输入,使反应器出口烟气温度稳定维持于120-140℃区间,显著高于酸性气体露点,然后杜绝冷凝酸液沉积,于换热器进气端布设测温点,一旦烟气温度跌至120℃以下,系统即刻联动辅助加热单元,保障其温度恒高于酸露点,同步改良废气预处理段的雾滴脱除性能,使用高性能折流式除雾

装置,使脱雾率稳定达99.5%以上,显著削减酸性液滴向下游设备的迁移量,继而缓解腐蚀隐患。在腐蚀监控跟风险预警领域,部署包含全工艺流程的腐蚀监测体系,在反应器内壁、换热器管束及管道焊缝等易蚀区域布设电阻型腐蚀探头,其测量分辨率达0.01毫米/年,实现腐蚀速率动态追踪,采集数据经工业互联网平台汇入中央控制系统;当速率逾越0.1毫米/年阈值,系统即时触发声光报警并生成运维优化建议。另外,推行关键设备半年度超声波测厚巡检机制,准确评估壁厚减薄趋势,全面掌控腐蚀演化态势,经多层次防控方针改良,设备平均服役周期由1.5年加强至超5年,年度维保支出缩减七成,显著支撑工程长效稳健运行。

3.4 自动化控制精准度优化

系统升级中新增多参数在线检测装置:废酸进料管路配置电磁式流量计及在线浓度分析仪,动态获取流量(精度 $\pm 0.5\%$)跟浓度(精度 $\pm 0.1\%$);反应器进出端及催化床层多层位布设温压传感单元,温度分辨率达 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,压力分辨率达 $\pm 10\text{Pa}$,排气口集成傅里叶变换红外光谱仪,连续测定 SO_2 、 HCl 等污染物浓度,采样频次达1Hz,显著增强数据时效性与可靠性。在控制策略精进层面,依托历史工况数据,建立多变量协同调控模型,以废酸流量及浓度作为输入变量,依据废气出口浓度实时监测结果实行动态校准,提高喷淋效率,同步设计反应温度与床层压降的耦合调控机制:当压降逾越预设限值时,自动调节进风速度,当温度偏离目标区间时,协同改良热源功率跟进风速率,保障流化均匀性与温控稳定性。为准确调控酸再生所得溶液的浓度,建立了再生酸浓度同反应温度及冷凝温度之间的耦合模型,凭借协同改良二者参数,使浓度控制偏差缩至 $\pm 1\%$ 以内,执行单元升级方面:助燃风送风机使用变频离心结构,转速可调区间为0-1450r/min,控制分辨率达 $\pm 1\text{r}/\text{min}$;热源调节阀配置电动式球阀,开

度控制精度为 $\pm 0.5\%$ 。同样,改良控制系统通信协议,融合工业以太网跟PROFINET总线技术,显著减少数据传输时延,将控制指令响应时间由5-10分钟压缩至10-20秒。

4 结语

流化床酸再生工艺在工业尾气净化与资源回收领域展现出突出的战略意义,顾及环境改良与经济收益双重目标,目前,重点装备开发、酸性组分去除过程调控等关键技术已在国内实现产业化推广,但实际工程运行中依旧存在物料流化状态易波动等瓶颈问题。借助气流分布系统精进、多层级防腐方针及智能控制系统迭代等技术手段,可切实增强整体应用性能,伴随技术不停精进与精进,流化床酸再生工艺将在工业绿色转型中扮演更核心角色,加快其改良部署,可增强废气处理效能,助推资源高效循环,为达成碳达峰碳中和目标给予坚实技术保障。

【参考文献】

- [1]解伟磷.循环造粒流化床在雨水再生利用中的应用前景[J].内蒙古水利,2024,(S2):90-91.
- [2]陈梦阳.流化床丙烷脱氢工艺反应-再生系统自控方案优化[J].上海化工,2023,48(04):48-51.
- [3]胡紫瑞,刘士豪,冷子乐,等.流化床型络合液再生工艺研究[J].硅酸盐通报,2022,41(12):4389-4396+4405.
- [4]肖振翀,张永胜,张亮,等.流化床电极热再生氨电池性能特性[J].工程热物理学报,2022,43(06):1660-1665.
- [5]徐劲松.废混酸流化床焙烧法再生实验研究[D].东南大学,2022.

作者简介:

马睿智(1996--),男,汉族,甘肃会宁人,本科,职称:工程师,研究方向:机械电气。