

氢冶金工艺气体深度净化安全技术开发与应用

梁 峰 韩 闯

鞍山钢铁劳研所科技有限公司 辽宁 鞍山 114001

摘 要：氢冶金是钢铁行业低碳转型的核心工艺，但其工艺气体杂质残留、富氢介质风险突出，传统净化工艺难以适配现场安全生产需求。本文系统分析了传统净化技术在微量杂质脱除、富氢工况适配、安全联动防控等方面的短板问题，针对性开发多级深度净化、精准除杂、低损氢气提纯核心工艺，配套研发全流程监测预警、紧急联锁切断、设备本质防爆等安全保障技术。结合冶金现场连续生产条件制定成套工程应用方案，解决工况波动适应性差、系统安全冗余不足等现场难题。研究成果可有效提升氢冶金工艺气体净化精度与系统运行安全性，为行业同类装置安全稳定运行提供技术参考。

关键词：氢冶金；工艺气体；深度净化；安全保障技术；工程应用

引言：在钢铁工业低碳化升级的行业背景下，氢冶金替代传统碳冶金的应用规模持续扩大，高纯度氢气是保障还原冶炼质量与生产稳定的核心条件。氢冶金工艺气体组分复杂、温压波动频繁，富氢介质易燃易爆的特性，对气体净化精度和安全管控标准提出更高要求。当前行业沿用的传统净化体系多适配常规燃气工况，普遍存在深度除杂能力不足、安全防护针对性弱、工况适配性差等问题，极易引发设备故障与安全隐患。为解决现场实际生产瓶颈，本文围绕工艺气体深度净化与安全保障技术开展研发及工程应用研究，助力氢冶金工艺安全、稳定、工业化落地。

1 传统气体净化工艺安全短板及现场工况适配问题

现阶段国内氢冶金生产所采用的传统气体净化工艺，多沿用传统高炉煤气、煤化工气体净化技术体系。在实际现场运行过程中，普遍存在深度除杂能力不足、安全防护针对性弱、工况适配性差等突出问题，具体短板及适配问题主要体现在以下方面：（1）深度净化精度不足，微量杂质管控能力缺失。传统净化工艺以除尘、粗脱硫等常规净化工序为主，仅可脱除气体中大部分大颗粒粉尘及高浓度硫化物，针对氢冶金工艺气体中残留的微量羰基硫、微量氧、氮氧化物及碳质微粒脱除效果较差。这类微量杂质长期富集，会造成氢气纯度持续偏低，不仅影响氢还原冶炼效率，还会在管道、反应器内壁形成沉积腐蚀，诱发设备堵塞、管路承压异常等隐患，难以适配氢冶金高纯气体的生产工况要求。（2）富氢工况安全适配性差，工艺固有风险突出。传统净化设备及工艺流程针对常规燃气工况设计，未考虑高氢介质的特殊理化特性。氢气密度小、渗透性强、点火能量低，传统净化装置的密封结构、管路连接、泄压防护设

计标准偏低，在高温、高压的氢冶金生产环境下，极易出现介质渗漏、微量泄漏问题。（3）工况波动适应性弱，系统运行稳定性不足。氢冶金生产负荷、炉况状态存在动态波动，工艺气体组分、温度、压力随之实时变化。传统净化工艺参数固定、调控方式单一，无法根据现场工况动态调整净化负荷与工艺参数，工况波动时易出现净化失效、杂质穿透等问题。且传统系统缺少工况联动调控机制，异常工况下无法快速响应，易造成不合格气体进入后续工序，引发系统性生产及安全问题。（4）安全防控体系与净化工艺脱节。传统净化系统仅依托通用安全监测、防护设备，未结合氢冶金气体净化的工艺特点搭建专属防控体系。杂质超标、设备泄漏、工况异常等隐患无法实现提前预判与实时预警，多依靠人工巡检排查，防控滞后性明显，难以满足现代化氢冶金连续安全生产的管控需求^[1]。

2 氢冶金工艺气体深度净化关键技术开发

2.1 适配氢冶金工况的多级深度净化工艺整体方案设计

结合氢冶金工艺气体组分波动大、杂质种类复杂、安全管控标准高的现场特点，重构净化工艺流程体系，设计分级、分步、分级管控的多级深度净化整体方案。（1）按照“粗除杂-精净化-深度提纯-稳定稳压”的梯度净化逻辑，优化工艺流程排布，摒弃传统单一净化模块的作业模式，针对粉尘、硫化物、氧杂质、碳氧化物等不同杂质的理化特性，匹配对应的净化单元，实现杂质分层精准脱除。（2）结合冶炼现场启停炉、负荷升降、温压波动等动态工况，优化工艺衔接逻辑，调整各净化单元的串联耦合方式，解决传统工艺工况适配性差、净化失效的问题。（3）基于富氢介质安全运行标准，优化

工艺管线布局、介质流向及单元切换模式,简化冗余工艺环节,降低系统阻力,规避高氢氛围下介质滞留、局部超压的工艺缺陷,保障净化系统与氢冶金主工艺同步稳定运行。

2.2 一体化除尘、脱硫、脱氧精准除杂核心技术研发

针对传统工艺无法脱除微量杂质、多杂质协同净化能力弱的问题,开发一体化精准除杂技术,实现多种有害杂质同步深度脱除。(1)优化干法精密除尘技术,改造除尘滤料结构与过滤精度,适配高温含氢气体工况,拦截超细粉尘微粒,避免细微粉尘穿透净化单元造成后端设备堵塞。(2)研发靶向脱硫技术,优化脱硫吸附剂配方与装填方式,重点针对氢冶金气体中微量羰基硫、硫化氢进行精准脱除,解决传统脱硫技术对微量有机硫脱除效率低的问题。(3)配套低温催化脱氧技术,在不消耗高纯氢气的前提下,精准脱除工艺气体中的残余氧含量,规避氧杂质富集引发的组分失衡问题,满足高纯氢还原冶炼的工艺要求。整套一体化除杂技术可实现多杂质同步净化,大幅提升气体净化精度^[2]。

2.3 低损耗氢气提纯与微量杂质深度脱除技术优化

围绕氢冶金生产氢气损耗偏高、微量杂质残留超标的现场痛点,开展氢气提纯与深度脱除技术优化。(1)优化变压吸附提纯工艺参数,调整吸附压力、解析时间、循环周期等核心参数,适配含氢混合气体组分特征,提升氢气提纯纯度,同时降低提纯过程中的氢气损耗。(2)增设微量杂质深度精脱单元,针对常规工艺难以去除的微量碳氧化物、氮化物残留杂质,采用多级吸附、催化分解复合技术,实现痕量杂质深度脱除,满足氢冶金连续生产的高纯气体指标要求。(3)优化气体分流、回收结构,对净化过程中低分压氢气进行回收再利用,减少工艺放空造成的氢气损耗,提升工业生产经济性。

2.4 净化工艺节能增效与工况稳定性优化设计

基于冶金现场连续化生产需求,对净化工艺进行节能改造与稳定性优化。(1)匹配主工艺负荷变化特征,开发自适应调参机制,根据气体温度、压力、杂质浓度的实时波动,自动调整净化单元运行参数,避免固定参数运行导致的净化过剩或净化不足问题。(2)优化设备运行负荷匹配模式,均衡各净化单元运行能耗,淘汰高能耗工艺模块,降低整套净化系统运行能耗。(3)优化工艺稳压、稳流结构,抑制工况波动对净化效果的干扰,提升系统抗波动能力,保障不同生产负荷下净化指标稳定达标,适配氢冶金长周期、连续化工业生产需求^[3]。

3 基于富氢工况的净化系统安全保障技术研发

3.1 气体净化全流程安全防护体系架构搭建

结合净化工艺各单元风险差异,打破传统单点防护模式,搭建覆盖进气、净化、提纯、排气、回收全流程的分级安全防护架构。(1)按照风险分级管控原则,对预处理、精细净化、氢气提纯、尾气处理各单元进行风险分级,针对富氢高风险单元设置多重防护屏障,低风险单元实施常规管控,实现防护资源精准匹配。(2)建立工艺设备、介质状态、运行环境、操作行为四位一体的防护机制,补齐原有体系只监测参数、不管控工况的短板,实现净化系统全方位安全管控。(3)衔接生产主工艺安全逻辑,统一净化系统与氢冶金主装置的安全连锁标准,保证上下游工艺安全逻辑一致,避免系统防控脱节引发的安全隐患。

3.2 杂质与氢气泄漏在线智能监测预警技术

针对现场人工巡检滞后、微量泄漏与杂质超标难以及时发现的问题,研发适配富氢工况的在线监测预警技术。(1)优化微量杂质在线监测模块,升级高精度传感设备,实时捕捉气体中氧、一氧化碳、硫化物等杂质含量波动,精准识别微量超标异常,杜绝杂质累积引发的工艺风险。(2)布设分区式氢气泄漏监测点位,根据管道法兰、阀门、设备密封等易泄漏点位分布特点,优化监测布局,解决传统监测点位稀疏、盲区较多的问题,实现空间全覆盖监测。(3)搭载数据实时分析与预警模块,区分正常工况波动与异常故障信号,设置分级预警阈值,避免误报、漏报问题,为现场处置提供精准数据支撑。

3.3 异常工况自动连锁与紧急切断安全控制技术

为应对富氢工况下压力波动、组分异常、介质泄漏等突发故障,优化升级系统应急控制技术。(1)构建多参数联动连锁逻辑,整合气体压力、温度、组分浓度、设备运行状态等核心参数,任一参数触发阈值即可启动分级连锁调控,提前干预异常工况,避免故障扩大。(2)研发快速紧急切断控制技术,在管线泄漏、气体组分严重超标、系统超压等极端工况下,实现上下游阀门毫秒级切断,隔离故障单元,阻断氢气扩散与危险介质串流。(3)优化系统泄压与放空控制逻辑,异常状态下自动匹配泄压速率,规避瞬时泄压过快引发的二次工况波动,保障装置应急处置过程可控、安全。

3.4 净化设备防爆防泄漏安全防护升级技术

立足富氢介质高渗透、易燃易爆的特性,对净化核心设备及管路系统开展本质安全升级。(1)对吸附塔、过滤器、换热器等核心设备进行密封结构优化,采用高压适配密封材质,改良法兰、接口连接结构,降低氢气渗

透泄漏概率,适配长期高温高压运行工况。(2)统一设备防爆设计标准,优化设备腔体通风、泄爆结构,消除富氢介质局部积聚空间,满足氢工况防爆安全规范。

(3)完善管路防应力、防振动防护结构,针对生产负荷波动引发的设备振动、管线形变问题,增设缓冲与固定结构,减少长期运行导致的密封失效、管路破损等设备安全隐患^[4]。

4 氢冶金气体净化安全技术工程应用方案

4.1 工程应用场景与现场工况适配方案设计

结合氢冶金生产线工艺布局、气体组分特征及设备配置现状,完成净化安全技术的场景适配设计。(1)梳理生产线进气参数、负荷波动区间、杂质含量波动规律,明确净化系统运行边界条件,匹配对应的净化工艺参数与安全防护阈值,避免技术与现场工况脱节。(2)结合厂区防爆分区、管线走向、设备布局,划定净化装置及安全监测设备的安装区域,规避高温热源、振动设备、密闭死角等危险区域,优化整体布置方案。(3)结合生产线连续生产模式,制定不停机改造、分阶段投用的适配方案,规避工程施工对主生产线运行造成干扰,保障生产连续性。

4.2 净化设备与安全系统现场安装及配套改造

依据现场实际设备条件,开展净化主体设备、安全防护系统的安装与配套改造工作。(1)对原有老旧净化管线、密封组件、过滤单元进行拆解更换,适配新型深度净化工艺运行要求,消除老旧设备带来的泄漏、堵塞隐患。(2)完成在线监测模块、紧急切断阀门、防爆泄压装置等安全设备的定点安装,优化设备接线、管路接驳结构,保证装置对接严密、运行可靠。(3)同步完成电气系统防爆改造与接地处理,严格遵循富氢场所电气安全规范,杜绝电气火花引发的安全风险,实现净化设备与安全系统一体化配套落地。

4.3 全流程标准化作业与安全运维规程制定

结合新工艺、新设备运行特性,建立适配现场的标准化作业与运维体系。(1)制定设备启停、负荷调整、杂质检测、系统吹扫等标准化操作流程,规范各岗位操

作行为,减少人为操作失误引发的工艺波动与安全隐患。(2)建立日常巡检、定期校验、设备维保分级运维制度,明确监测设备校准周期、净化耗材更换周期、安全联锁装置试验周期。(3)编制异常工况处置专项规程,明确泄漏、杂质超标、系统超压等故障的处置流程与岗位职责,提升现场应急处置规范性与时效性^[5]。

4.4 工程应用难点与现场针对性解决措施

针对工程落地过程中的现场难点,制定专项应对措施。(1)针对生产工况波动导致净化参数不稳定问题,采用动态参数微调模式,根据实时气体组分、温压数据自适应调整系统运行状态。(2)针对富氢环境设备易泄漏、易老化问题,定期开展密封结构检测与耐压试验,及时更换老化配件。(3)针对多系统联动适配难题,优化系统通讯与联锁逻辑,统一各设备运行控制标准,保障净化系统与安全防控系统协同稳定运行。

结束语:本文通过梳理传统净化工艺的现场适配缺陷,完成氢冶金气体深度净化关键技术及富氢工况安全保障技术的系统性开发,形成适配冶金现场的成套工程应用方案。研发的多级精准除杂、低损氢气提纯、智能监测预警及应急联锁防护技术,有效解决了微量杂质富集、工况适应性弱、氢介质防控不足等生产难题。后续可结合不同冶炼负荷工况持续优化参数匹配性,进一步推动氢冶金净化安全技术的标准化与规模化应用。

参考文献

- [1]张颖,王莹,查松妍,等.钢铁行业氢冶金技术路线及发展现状[J].烧结球团,2023,48(4):8-15+23.
- [2]张帅,张立秋.氢冶金工艺气体深度净化废水处理技术研究[J].四川冶金,2026,48(1):60-64.
- [3]郑励行,董耿林,汪鹏,等.钢铁行业氢冶金技术的替代潜力与经济性分析——以广东为例[J].新能源进展,2023,11(6):583-592.
- [4]魏炜,饶文涛.氢冶金场景下规模化固态氢储运技术的开发及应用[J].科技导报,2024,42(15):40-48.
- [5]张帅.氢冶金工艺气体深度净化安全技术开发与应用[J].河北冶金,2026,(4):87-91.