

煤浆加热炉热效率影响因素分析及安全风险防控研究

吴 慧

中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017200

摘 要: 煤浆加热炉是煤制油、煤液化生产的核心关键设备,其热效率直接关系装置能耗、运行成本及生产运行连续性,安全稳定运行是生产顺利开展的首要前提。本文通过分析设备实际运行数据、结合典型异常案例及结构特点,从燃烧工况、设备状态、工艺操作、余热利用及炉管偏流等方面出发,全面分析热效率的影响因素,同时参考燃料特性、炉体结构、运行工况等通用影响机制,系统梳理安全与环保风险成因,重点围绕炉管损坏、燃烧异常、火灾爆炸、联锁失效、人员操作及氮氧化物排放等问题,构建覆盖设备维护、工艺操作、联锁保障、应急管理、人员培训及环保控制的一体化防控体系。研究突出现场实操性,可为煤浆加热炉高效、安全、环保运行提供实践指导,助力企业实现节能降耗、安全生产与环保达标三重目标,推动企业绿色低碳与高质量发展。

关键词: 煤浆加热炉;热效率;安全风险;炉管偏流;氮氧化物;防控措施

引言

在现代煤制油与煤直接液化工业化生产流程中,煤浆加热炉承担着将原料油煤浆稳定加热至后续反应所需工艺温度的核心功能,是连接原料预处理与反应系统的关键枢纽设备,其运行状态优劣直接决定整个生产系统的运行稳定性、能源利用经济性与本质安全水平。在节能降耗、安全生产与环保排放要求不断提高的背景下,提升热效率、控制氮氧化物排放、预防炉管偏流与结焦已成为现场运行管理的重点与难点。油煤浆属于气-液-固三相混合物,流动与传热规律复杂,易出现偏流、结焦、燃烧不均等问题,不仅降低热效率,还可能引发超温、泄漏、火灾爆炸等安全事故。本文立足生产实际,融合现场专用技术与通用理论体系,全面分析热效率影响因素,系统完善安全风险防控体系,突出实操性,为现场高效安全运行提供支撑。

1 煤浆加热炉工作原理及结构特点

1.1 工作原理

煤浆加热炉以瓦斯为主要燃料,通过炉底布置的燃烧器进行稳定燃烧释放大量热量,热量主要以辐射换热方式在辐射室内传递给炉管内流动的油煤浆介质,将油煤浆持续加热至工艺规定的反应入口温度,为后续加氢液化反应提供稳定的温度条件,保障反应系统高效平稳运行。燃烧烟气经烟道排出,通过废热锅炉、空气预热器实现余热回收,提升能源利用率。加热炉氮氧化物主要以热力型方式生成,生成量与燃烧温度、空气过剩系数密切相关,合理控制燃烧参数可兼顾热效率与环保达标。阻火器基于器壁效应与传热原理阻止火焰回窜,避免瓦斯泄漏爆炸,需定期维护确保完好。余热锅炉系统

与加热炉协同运行,联锁触发后的规范处置是保障生产连续性的重要环节。

1.2 结构特点

煤浆加热炉采用多台并联立式结构,单台配备两个辐射室,每室两根炉管,炉管采用 TP347H 耐高温高压材质,抗蠕变特种合金材质,能够适应高温高压恶劣运行环境,延长设备使用寿命水平,环形跑道式螺旋布置,实现双面辐射强化传热。炉体配备底烧式气体燃烧器、长明灯、阻火器、防爆门、消防蒸汽等安全设施;炉管外壁布设热电偶,可实时监测管壁温度,用于识别炉管偏流与超温。炉管内油煤浆与氢气混合流动,氢气的加入能够显著改善煤浆流动特性、降低介质黏度、抑制固体颗粒沉积与管壁结焦,因此配氢量需要根据加热炉负荷变化进行动态精准调整,保障流动状态稳定。多台加热炉烟气集中汇入余热锅炉与空气预热器,实现高温烟气余热的集中回收与梯级利用,兼顾节能降耗与环保减排双重目标,进一步提升装置整体能源利用效率。

2 煤浆加热炉热效率影响因素分析

2.1 燃料与原料特性

燃料与原料的理化特性是影响煤浆加热炉燃烧稳定性与传热效率的基础因素,直接决定加热炉热效率水平。煤浆中碳、氢、氧、硫、灰分等组分则决定燃烧热值与稳定性。碳、氢含量越高,燃烧放热越充分;氧、硫、灰分不产生热量,还会降低有效热值、加剧积灰与腐蚀。煤浆黏度、粒度分布影响流动与雾化效果,黏度过高、粒度过粗易导致燃烧不完全、传热效率下降。燃料气系统压力、纯度波动会直接造成火焰形态不稳定、燃烧不充分,不仅降低热效率,还会加剧氮氧化物等污染物排放

波动,影响环保达标。因此,稳定燃料气品质、优化煤浆原料配比与预处理工艺,是提升热效率的基础保障^[1]。

2.2 燃烧过程控制

过剩空气系数是影响热效率与氮氧化物生成的关键参数。烟气氧含量控制在 3%~5%,既能保证燃料完全燃烧,又能减少排烟热损失、抑制氮氧化物生成。燃烧器性能、供风配比、火焰分布及炉膛负压直接影响燃烧稳定性与传热均匀性。火焰偏烧、局部高温会加剧炉管偏流与热效率下降。稳定燃料气压力与纯度,可减少火焰波动,避免燃烧不完全导致效率降低与排放波动。

2.3 炉体结构与传热状态

炉膛尺寸、内衬材料、受热面布置影响热量分配与散热损失。优质内衬材料隔热性能好,能减少热量向炉外散失,提高热效率;受热面布置影响热吸收效率和热传递均匀性,合理布置辐射与对流受热面可充分发挥优势,提高热吸收效率。炉管结焦、受热面积灰会显著增大传热热阻,降低热效率。炉体密封不良会导致冷风漏入,降低炉膛温度、增加排烟量与热损失,还会增加不完全燃烧可能性,带走更多热量。定期清理传热部件积灰结垢,修补炉墙破损、更换老化密封件,可减少漏风与散热损失,保障设备稳定运行^[2]。

2.4 工艺运行与炉管偏流

工艺运行参数波动与炉管介质偏流是影响热效率的重要动态因素,负荷变化影响燃烧稳定性和热效率,负荷波动时,若调节不及时或不合理,会导致燃烧不稳定,出现局部缺氧或富氧情况,影响燃烧效率。针对不同负荷制定合理调节策略,对维持热效率至关重要。进料参数影响燃烧过程和热效率:煤浆进料流量和压力变化影响在炉管内的分布,流量过大/过小、压力过高/过低都会影响燃烧效率;进料温度影响加热炉热负荷,较高进料温度能减少加热炉对煤浆的加热负荷,提高热效率,但需合理控制。装置负荷波动、进料不稳、配氢不合理会加剧流动不均,均会引发炉管偏流。偏流使局部炉管流速降低、管壁超温、快速结焦,进一步增大阻力、恶化传热,形成恶性循环,是造成热效率下降与设备损坏的重要诱因。规范负荷调整,避免进料量过低或超负荷运行,单台进料泵维修时均匀分配负荷,可降低偏流隐患。合理控制配氢量与炉膛负压,规范点火操作,可避免瓦斯积聚与燃烧不完全。

3 煤浆加热炉安全风险识别

3.1 炉管损坏风险

炉管作为煤浆加热炉核心受压元件,长期处于高温高压环境,偏流、结焦、局部过热易导致蠕变、减薄、

破裂,引发介质泄漏、火灾爆炸,造成装置非计划停工。偏流导致局部超温、结焦、腐蚀,进而造成炉管破裂;结焦堵塞又会加剧偏流,严重时炉管超温烧损、介质泄漏,遇明火引发火灾爆炸。因此,炉管损坏是煤浆加热炉最核心、最危险的设备安全风险。

3.2 燃烧异常风险

燃烧异常是加热炉运行中高频出现的工艺风险,主要包括熄火、回火、二次燃烧三种典型异常工况。熄火多由瓦斯中断、负压波动、联锁失效导致,未及时处理易造成瓦斯积聚爆炸;回火由燃料气压力低、供风不足导致,损坏燃烧器与燃料管线;二次燃烧由烟气中未燃尽可燃物在对流段、烟道或余热锅炉内再次燃烧导致,会造成烟道系统超温、设备烧损、氮氧化物排放剧增等严重后果。同时,燃烧异常还会加剧炉管偏流与超温,形成多重连锁安全隐患,威胁设备安全^[3]。

3.3 火灾与爆炸风险

火灾与爆炸风险是煤浆加热炉最具破坏性的安全风险,需作为防控重点,可燃气体泄漏是引发火灾爆炸的主要诱因。煤浆燃烧会产生一氧化碳、氢气等可燃气体,设备长期运行后,管道连接处密封材料老化、磨损,阀门因频繁操作关闭不严,或管道受外力冲击破损,都会使可燃气体泄漏。泄漏途径主要有法兰连接部位、阀门密封面、管道焊缝等处。当可燃气体与空气混合达到一定比例范围,形成爆炸性混合物,此时若有静电火花、电气火花等火源出现,就会引发剧烈爆炸,造成严重人员伤亡与设备损毁。炉膛爆燃同样危险,炉膛内可燃气体体积聚至爆燃极限时,爆燃情况危急。点火不当是常见原因,若在炉膛内存在大量可燃气体时点火,火焰迅速传播,炉膛内压力急剧升高,导致爆燃。燃烧不稳定也会引发炉膛爆燃,燃烧过程中局部缺氧或富氧,使燃烧速度不均,部分区域可燃气体未充分燃烧而积聚,条件合适时便会爆燃。点火前吹扫不充分、炉膛可燃气体体积聚易引发爆燃。煤浆管道泄漏后易燃且蔓延速度快,易扩大事故范围。瓦斯泄漏、管道破损、密封失效均可能形成爆炸性混合物,严重威胁人员与设备安全^[4]。

3.4 联锁与控制系统失效风险

煤浆加热炉配备停炉、瓦斯压力低低、炉管壁温高高联锁,是防范事故发生、阻止事故扩大的最后一道关键防线。传感器失灵、线路故障、执行机构卡涩会导致联锁拒动或误动,异常工况无法及时切断,易造成事故扩大。仪表失准则会导致操作误判,诱发超温、超压、偏流等事故。因此,保障联锁与控制系统可靠运行,是实现加热炉本质安全的重要前提。

3.5 人员操作风险

人员操作风险是加热炉安全运行中最主要的人为风险,贯穿于点火、运行、调整、停工全流程。点火操作不规范、未吹扫测爆、火嘴点燃不对称都易引发爆炸;应急处置不当,联锁触发后未及时关阀、调整负压可能会扩大事故;炉管偏流后调整方法不及时、操作幅度过快过大,同样会加剧炉管超温与结焦,加速设备损坏。操作人员违规操作、应急能力欠缺均会直接导致安全事故,是运行中最主要的人为风险。

3.6 环保及其他风险

环保风险主要为氮氧化物排放超标,多由燃烧局部高温、参数失控导致。瓦斯泄漏、烟气外逸造成能源浪费与环境污染。高压蒸汽操作不当易发生水击,损坏设备与管道。人员未按规定佩戴防护用品,易发生烫伤、中毒等人身伤害。

4 热效率提升与安全风险一体化防控措施

4.1 设备精细化维护管理

建立完善设备维护台账,明确检查周期、责任与标准,重点聚焦炉管、燃烧器、仪表及安全附件。每日监测炉管壁温与压差,及时冲洗偏流炉管;严控壁温不超过设计值;优化配氢量至 $5000 \sim 7000 \text{ Nm}^3/\text{h}$,改善介质流动状态,有效抑制结焦与偏流发生。定期清理受热面与余热系统积灰,修补炉墙破损、减少漏风散热;同时执行清洁、润滑、紧固等常规保养,建立设备故障档案,提前消除隐患^[5]。

4.2 工艺操作规范化控制

推行工艺操作全流程标准化管控,点火前炉膛强制吹扫不少于 15 分钟,测爆合格(甲烷 $< 0.5\%$,氧含量 $18\% \sim 21\%$)后方可点火;先点燃长明灯,稳定后再投主火嘴;点火失败必须重新吹扫。负荷波动时同步调整瓦斯与配氢量,低负荷避免进料过低,必要时投用冲洗油。偏流后通过调整进料、优化火嘴、降低瓦斯量、投用冲洗油等方式及时纠正。运行中维持烟气氧含量 $3\% \sim 5\%$ 、炉膛负压 $-19.6 \sim -39.2 \text{ Pa}$,并稳定燃料气压力,保障燃烧工况稳定高效。

4.3 联锁与控制系统保障

强化安全联锁与控制系统可靠性管理,定期检查联锁传感器、信号线路与执行机构,确保壁温高高、瓦斯压力低低、停炉等关键联锁动作可靠。建立联锁触发标

准化处置流程,确保操作人员快速响应、正确处置。关键仪表与控制系统采用冗余配置,避免单点故障导致系统瘫痪,提升运行可靠性。

4.4 应急管理与人员培训

完善应急管理体系,制定炉管超温、偏流、熄火、瓦斯泄漏、火灾爆炸等专项应急预案,明确处置步骤、责任分工与救援措施,配齐应急物资。每半年开展实战化应急演练,重点提升偏流调整、紧急停炉、泄漏处置能力。建立岗位培训体系,围绕热效率优化、偏流识别、安全操作、应急处置开展实操与案例教学,落实巡检与操作监督,杜绝违规操作行为。

4.5 环保协同控制

构建节能与减排协同控制机制,优化低氮燃烧工况,控制火焰温度与配风比例,减少热力型氮氧化物生成。强化烟气在线监测,确保排放稳定达标。提高余热回收效率,降低烟气排放量与能源消耗,实现节能与减排协同增效。

结束语

煤浆加热炉热效率受燃料特性、燃烧工况、炉体结构、设备状态、工艺操作及炉管偏流等多因素耦合影响,且与安全运行、环保排放高度关联。炉管偏流是降低热效率、诱发安全事故的核心隐患。通过构建设备维护、工艺操作、联锁保障、应急管理、人员培训、环保协同一体化防控体系,可有效提升热效率、减少偏流与结焦、降低火灾爆炸与环保超标风险,实现装置长周期、高效、安全、环保运行,为企业节能降耗、安全生产、环保达标提供坚实支撑。对推动煤制油行业高质量、可持续发展具有重要的工程应用价值与现实意义。

参考文献

- [1]国家能源集团煤制油煤液化生产中心.煤浆加热炉操作规范[Z].2024.
- [2]中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司.煤浆加热炉异常操作及事故案例汇编[Z].2023.
- [3]张宏.管式加热炉热效率影响因素分析及优化措施[J].石油化工设备,2022,51(3):78-83.
- [4]李建明.煤制油装置煤浆加热炉安全风险防控研究[J].化工安全与环境,2021,34(15):12-15.
- [5]刘光辉.浅谈煤直接液化煤浆加热炉操作中常见问题及应对措施[J].内蒙古石油化工,2023,49(7):38-41.