

气化炉水质关键指标对设备运行稳定性的量化影响研究

张保钢

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司 宁夏 银川 750411

摘要: 本文聚焦气化炉水质关键指标对设备运行稳定性的量化影响。先阐述气化炉工作原理与工艺流程,明确其对水质的洁净性、防腐蚀、防结垢要求。通过多种方法确定硬度、pH值等关键水质指标,采用单因素与多因素分析模型量化其对设备稳定性的影响,确定指标阈值。构建“预警-调控-运维”一体化体系,提出分级预警、精准调控及运维优化建议。经实践验证,该体系能缩短预警响应时间、降低故障率,保障气化炉稳定运行。

关键词: 气化炉;水质关键指标;设备运行稳定性;量化影响

引言:在煤化工生产中,气化炉作为核心设备,其运行稳定性至关重要。而水质管理是影响气化炉稳定运行的关键因素之一。水质关键指标的波动会直接或间接影响设备的冷却、防腐蚀及防结垢等功能,进而影响设备运行效率和寿命。目前,对于水质指标与设备运行稳定性之间关系的量化研究尚不完善。因此,深入探究气化炉水质关键指标对设备运行稳定性的量化影响,具有重要的现实意义。

1 气化炉工作原理及水质要求

气化炉作为将煤炭、生物质等原料转化为合成气的核心装置,其运行依赖高温高压环境,且运行状态与水质管理紧密相连。深入探究其工作原理与水质要求,是开展后续指标影响研究的关键,有助于精准把握气化炉运行规律,保障其稳定高效运行。

1.1 气化炉工作原理与工艺流程

以干煤粉加压气化炉为例,其工作流程涵盖煤粉制备与输送、气化反应、合成气冷却与净化三大核心环节。在煤粉制备与输送阶段,煤炭需经过精细研磨、干燥、旋风分离,制成含水率约4%的干煤粉输送至气化工段,随后与氧气一同被送入气化炉燃烧室。进入气化反应环节,在1300-1500℃的高温以及4MPa左右的高压条件下,发生剧烈的部分氧化反应,生成以CO、H₂为主的粗合成气。此后,粗合成气进入合成气冷却与净化阶段,先经激冷室与洗涤塔冷却至210℃以下,在此过程中有效去除粉尘与酸性气体,最终送至后续系统进行进一步处理。值得注意的是,激冷水、洗涤水、循环灰水及锅炉给水等水质直接参与反应冷却与设备保护过程,对维持整个系统的稳定运行起着不可或缺的作用。

1.2 气化炉对水质的基本要求

气化炉系统对水质有着严格且多元的要求,需满足冷却、洗涤、防腐蚀等多重功能需求,其基本要求

可系统概括为三类。其一为洁净性要求,水中悬浮物(SS)、颗粒杂质必须严格控制在极低水平。若水中悬浮物长期超标,极易堵塞激冷环喷嘴、激冷水过滤器、灰水换热器管束等关键部位。某企业气化炉就曾因水质悬浮物超标,导致激冷水过滤器堵塞,最终造成停车检修长达60小时,给生产带来严重损失。其二为防腐蚀性要求,水中Cl⁻、S²⁻等腐蚀性离子需严格管控。这些离子易引发气化炉衬里、换热器筒体的化学腐蚀,破坏设备结构,影响设备寿命^[1]。其三为防结垢要求,水的硬度(主要是其中的钙镁硬度影响大)、碱度需处于合理范围。若硬度与碱度失衡,在高温环境下极易生成碳酸钙、氢氧化镁等垢层,降低换热效率,影响气化炉的正常运行。

2 气化炉水质关键指标的确定

2.1 水质指标的初步筛选

气化炉水质包含众多复杂指标,像硬度、碱度、酸度、pH值、溶解氧、氯离子含量、硫酸根离子含量以及悬浮物含量等。在初步筛选阶段,必须全面考量这些指标对气化炉运行多维度的影响。硬度过高,水在加热时极易结垢,结垢会附着在设备内壁,大幅降低设备传热效率,增加能耗,同时垢层脱落还可能对管道造成堵塞或冲刷磨损;溶解氧含量超标,会加速金属设备的氧化腐蚀进程,缩短设备使用寿命;氯离子和硫酸根离子腐蚀性强,会侵蚀设备耐火材料和金属部件,破坏设备结构完整性;悬浮物含量过高,可能堵塞设备管道,阻碍工艺介质(如激冷水、黑水、高低压灰水等)的正常输送,影响气化反应。基于此,对各指标进行初步分析,筛选出对气化炉运行稳定性潜在影响重大的指标,作为后续深入研究的对象。

2.2 关键指标的确定方法

确定关键水质指标,可采用多种科学方法。专家评

估法借助行业内资深专家的经验与专业知识,对各水质指标的重要性进行评估打分,依据评分结果确定关键指标,该方法依赖专家权威,但可能存在主观性。相关性分析法通过深入分析各水质指标与气化炉设备运行参数,如设备故障率、运行效率、产物质量等之间的相关性,选取相关性强的指标作为关键指标,能客观反映指标与设备运行的联系。主成分分析法将多个水质指标进行降维处理,提取出能代表原始指标大部分信息的主成分,根据主成分的贡献率确定关键指标,可简化数据结构。综合运用这些方法,可提高关键指标确定的准确性与可靠性。

2.3 确定的关键水质指标

经过上述严谨的筛选与确定方法,并结合气化炉实际运行情况,最终确定的关键水质指标主要有硬度、pH值、氯离子含量、溶解氧含量以及悬浮物含量。这些指标从不同方面对气化炉的运行稳定性产生关键影响。硬度过高会导致结垢,影响设备传热和正常运行;pH值偏离合适范围会改变设备的腐蚀速率,加速设备损坏;氯离子含量直接关联设备的腐蚀程度,含量越高腐蚀越严重;溶解氧含量影响金属设备的氧化腐蚀,含量过高腐蚀加剧;悬浮物含量影响设备的正常运行与维护,含量过高易堵塞管道^[2]。

3 气化炉水质关键指标对设备运行稳定性的量化影响分析

3.1 单因素量化影响分析

3.1.1 硬度指标影响

硬度对气化炉运行稳定性影响显著。水中钙镁离子含量过高时,在高温环境下易生成碳酸钙、氢氧化镁等垢层,附着于设备内壁(如换热器管束表面),阻碍热量传递,导致传热效率下降。垢层形成会加剧设备能耗,同时其脱落可能堵塞或磨损管道,影响工艺水与合成气的正常输送,破坏气化反应的稳定性,进而增加设备故障风险,缩短使用寿命,影响气化炉运行周期。

3.1.2 pH值指标影响

pH值偏离合适范围会显著改变设备的腐蚀速率,直接影响气化炉运行稳定性。在酸性环境下(pH值过低),气化炉衬里、换热器筒体等金属部件易发生化学腐蚀,加速保护膜破坏,导致腐蚀速率上升。而在碱性过强环境(pH值过高)下,虽对金属腐蚀抑制作用增强,但可能引发材质碱脆现象,破坏金属结构完整性,且在高pH情况下更易发生钙镁离子沉淀成垢。长期运行表明,将pH值稳定控制在合理区间内,可有效减缓腐蚀进程和结垢倾向,保障设备稳定运行。

3.1.3 氯离子含量指标影响

氯离子具有强腐蚀性,与设备腐蚀程度密切相关。它会破坏金属表面的保护膜,加速电化学腐蚀过程,导致关键部位(如换热器管束)腐蚀加剧。长期高氯离子含量环境下,设备结构完整性受损,易出现泄漏等问题,干扰气化反应的正常进行,增加非计划停车风险,对气化炉长期安全运行构成威胁。

3.2 多因素量化影响分析

3.2.1 硬度与pH值协同影响

硬度和pH值并非独立影响设备运行稳定性,二者存在协同作用。在硬度较高且pH值偏离合适范围时,设备结垢与腐蚀问题会相互加剧。例如,当水的总硬度为250mg/L(以CaCO₃计)且pH值为5时,换热器管束表面不仅会快速形成垢层,降低传热效率,同时酸性环境还会加速垢层下金属的腐蚀,形成腐蚀-结垢的恶性循环。pH值超过8.5时,会导致水中碳酸根离子增多,若钙硬增加使得碳酸钙离子浓度超过其溶解饱和度时则形成碳酸钙垢。这些情况下,设备故障率会比单一因素影响时更高,可能达到30%左右,严重影响设备运行稳定性^[3]。

3.2.2 氯离子含量与溶解氧含量协同影响

氯离子含量和溶解氧含量共同作用时,对金属设备的氧化腐蚀影响更为显著。氯离子破坏金属表面保护膜后,溶解氧会加速金属的氧化反应。当水中氯离子含量为80mg/L且溶解氧含量超过0.5mg/L时,气化炉金属设备的腐蚀速率会比仅有氯离子或溶解氧单一因素影响时提高40%-50%。这种协同腐蚀作用会迅速削弱设备结构强度,增加设备泄漏和故障风险,对设备运行稳定性构成严重威胁。

3.3 指标阈值确定

综合单因素和多因素量化影响分析结果,结合气化炉设备长期运行数据和实际生产经验,确定关键水质指标的阈值范围。硬度应控制在不超过150mg/L(以CaCO₃计),pH值稳定在7-8.5之间,氯离子含量不超过30mg/L,溶解氧含量不超过0.2mg/L,悬浮物含量不超过10mg/L。当水质指标超出这些阈值范围时,设备运行稳定性将受到明显影响,需及时采取调控措施,以保障气化炉的安全、稳定运行。

4 基于量化模型的水质调控与设备稳定性优化

以量化分析结果为核心,构建“预警-调控-运维”一体化优化体系,能够达成水质精准管理与设备稳定运行的双重目标,全面提升气化炉系统的运行效率和可靠性。

4.1 水质关键指标的分级预警体系

构建三级预警体系,紧密结合在线监测数据实现实

时预警功能。一级预警（蓝色）：当指标处于预警阈值区间，此时设备稳定性评分在7-8分，系统会自动发送短信提醒运维人员，同时每2小时加密一次监测频率，以便及时掌握指标变化趋势。二级预警（黄色）：若指标接近紧急阈值，稳定性评分降至6-7分，立即启动专项检查，全面排查污染源头，并针对性地调整处理工艺，确保水质尽快恢复正常。三级预警（红色）：一旦指标超过紧急阈值，评分低于6分，立即启动应急方案，如迅速切换备用新鲜水源或加大新鲜水源用量、投入应急处理药剂、更换原料煤种等，必要时降低设备负荷运行。某企业应用该体系后成效显著，水质相关故障预警响应时间大幅缩短至15分钟，故障发生率下降40%，有效保障了设备的稳定运行，减少了因水质问题导致的生产损失^[4]。

4.2 精准水质调控策略

针对不同指标特性制定差异化调控策略，实现精准治理。对于Cl⁻浓度，采用“反渗透+离子交换”双膜处理工艺，当浓度接近预警阈值时，系统自动提高离子交换树脂再生频率，确保Cl⁻浓度稳定在安全范围。对于总硬度，投加螯合剂与阻垢剂，根据硬度监测值动态调整药剂投加量，有效防止结垢现象发生。对于pH值，通过在线加药系统精准投加氢氧化钠或盐酸，严格控制pH值波动范围 ≤ 0.5，避免设备腐蚀或结垢加剧。对于悬浮物与溶解氧，分别采用高效沉淀池强化沉淀与真空除氧工艺，确保指标稳定在安全区间，保障设备正常运行。

4.3 设备运维优化建议

为充分发挥水质影响规律对设备运维的指导作用，进一步优化设备运维方案，全方位提升设备整体性能，可从以下几个方面着手。其一，建立“水质-运维”联动机制。密切关注水质指标的动态变化，依据其波动情况灵活且精准地调整检修周期。比如，当Cl⁻浓度持续逼近预警阈值时，鉴于其对设备腐蚀的潜在威胁，将换热器检修周期从原本的6个月果断缩短至4个月，以便及时发现并妥善处理潜在问题，防止问题恶化导致设备故障；其二，强化关键部位防护。针对气化炉衬里、激冷环、

废水冷却器等容易遭受腐蚀和结垢的关键部位，积极采用耐蚀材质与防结垢设备（如自洁式废水换热器）进行升级改造。通过这些先进技术的应用，有效增强设备关键部位的抗腐蚀和防结垢能力，降低水质波动对设备造成的不良影响，延长设备使用寿命；其三，采用气化灰水处理新工艺，新建灰水除硬装置。近年来，结晶造粒软化技术应用在气化灰水除硬方面效果显著，该技术通过向专用反应器内投加晶种、碳酸钠药剂等将灰水中的钙镁离子结晶造粒后脱除，可有效降低气化灰水总硬度^[5]；其四，开展运维人员专项培训。组织专业课程，重点讲解水质指标监测方法、预警响应流程以及调控操作技巧等内容，提升运维人员的专业素养和实操能力，使其在面对突发水质问题时能够迅速、准确地做出应急处理；其五，建立水质与运维数据台账，定期开展数据分析，总结经验教训，持续优化调控与运维方案，实现设备运维的科学化、精细化。

结束语

本研究借助量化分析，为气化炉水质管理与设备稳定运行构建了科学体系。实践证明，“预警-调控-运维”一体化模式成效显著，提升了设备运行可靠性。同时，加强行业交流与技术共享，推动该体系在化工领域广泛应用，为更多设备的水质管理与稳定运行提供参考，助力化工行业实现高效、安全、可持续发展。

参考文献

- [1]于少锋.气化炉表面测温系统低温区测量不准原因分析及处理[J].仪器仪表用户,2025,32(1):56-58,61.
- [2]张彦海,俞彬,李敬元,等.德士古气化炉气化废水预处理工程实例[J].工业用水与废水,2017,48(2):70-72.
- [3]自晓东,毕顺涛,潘云阳.气化炉灰水系统的水质管控与优化[J].清洗世界,2021,37(7):19-20,25.
- [4]吴博.系统水质对气化炉工艺气带灰的影响[J].大氮肥,2022,45(3):204-207.
- [5]奥成杰,侯小鹏,陈昱.煤气化灰水系统结垢原因及处理技术分析[J].煤化工,2022,50(6):131-134.