

# 化工锅炉水质控制指标及其经济价值分析

孟 华（陕西燃气集团新能源发展股份有限公司，陕西 西安 710007）

**摘要：**随着工业生产的快速发展，化工锅炉作为能源转换的重要设备，其安全、高效运行对于化工企业的生产效率和经济效益具有至关重要的影响。而在锅炉运行中，水质的影响不容忽视，各项水质指标的控制与优化都十分关键。基于此，本文对化工锅炉水质控制指标进行分析，并提出化工锅炉水质控制的优化策略，进而分析化工锅炉水质控制的经济价值，以期为化工企业提供科学的水质管理依据，促进锅炉运行的经济性和安全性。

**关键词：**化工锅炉；水质控制指标；优化策略；经济价值分析

## 0 引言

随着化工行业的蓬勃发展，化工锅炉在工业生产中的重要性日益凸显。然而，目前而言，化工锅炉水质控制仍存在诸多问题，如水质指标不达标、水质监测手段落后等，这些问题严重影响了锅炉的安全运行和经济效益。

因此，需要深入研究化工锅炉水质控制指标，探索有效的优化策略，以提升锅炉的运行效率，降低维护成本，确保化工企业的生产安全和经济效益。

## 1 化工锅炉水质控制指标

化工锅炉的水质控制对于确保其长期稳定运行至关重要。关键的技术性水质控制指标涵盖总硬度、pH值、溶解氧（DO）、总溶解固形物（TDS）和磷酸盐浓度，此类参数直接影响着锅炉的效率和寿命<sup>[1]</sup>。

### 1.1 总硬度

主要由钙( $\text{Ca}^{2+}$ )和镁( $\text{Mg}^{2+}$ )离子组成，是防止结垢的关键指标。理想的锅炉进水硬度应尽可能低，通常要求低于0.03 mmol/L，以避免形成碳酸钙或硫酸钙等难溶盐类的沉积，这类沉积会导致热传递效率下降，并可能引发局部过热问题。

### 1.2 pH值

维持适当的碱性环境（一般建议pH值在9.5到11之间），可以有效防止金属表面的腐蚀。过高或过低的pH都会对系统造成损害；例如，在酸性条件下，铁质组件可能会遭受严重的腐蚀，而在极端碱性环境下，则可能发生苛性脆化现象。

### 1.3 溶解氧（DO）

水中存在的游离氧会加速钢材的氧化腐蚀过程。因此，需要严格控制溶解氧水平，理想情况下应将其降至0.05 mg/L以下，甚至更低至微克级别。常用的方法涵盖热力除氧、真空脱气及化学还原剂如联氨

( $\text{N}_2\text{H}_4$ )的应用。

### 1.4 总溶解固形物（TDS）

反映了水中所有溶解物质的总量，高TDS可能导致蒸汽携带水分的问题以及影响蒸汽品质。根据具体应用场景的不同，推荐的最大TDS限值可以从几百ppm到数千ppm不等，但通常不超过3,000 ppm，以免引起汽水共腾或其他操作难题。

### 1.5 磷酸盐浓度

磷酸根离子( $\text{PO}_4^{3-}$ )被用来与钙、镁离子结合生成松散且易排出系统的化合物，从而抑制水垢形成。典型的处理剂量为每升水中加入2–10 mg/L的磷酸盐，具体数值取决于源水特性和所需达到的效果。

## 2 化工锅炉水质控制指标的优化策略

### 2.1 总硬度管理，软化与预处理技术的应用

水中的钙镁离子是构成水硬度的主要成分，这些离子在高温高压下容易形成难溶性的碳酸盐或硫酸盐沉积于锅炉内部，导致结垢现象，进而降低热传效效率，增加燃料消耗，甚至造成管道堵塞及腐蚀风险。为有效应对此问题，工业实践中广泛应用了多种软化与预处理技术。例如，离子交换法是一种常用且高效的软化方法，它通过特定的树脂介质将水中的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等高价阳离子替换为 $\text{Na}^+$ ，从而大幅降低水的硬度。根据实际应用案例显示，采用该方法处理后的出水硬度可以稳定控制在0.03 mmol/L以下，显著减少了结垢倾向。此外，反渗透(RO)技术也逐渐成为主流选择之一。RO膜能够截留95%–98%以上的二价离子，使得产水硬度极低，适合对水质要求极高的场合使用<sup>[2]</sup>。

近年来新兴的纳米过滤技术和电渗析除盐技术也在不断发展中。前者利用纳米级孔径的滤膜，在较低压力条件下实现高效分离；后者则借助直流电场作用，

使带电粒子定向迁移并通过选择性透过膜，达到去除硬度物质的目的。两种方法均具有占地面积小、操作简便的特点，尤其适用于改造空间有限的老式锅炉房或移动式锅炉系统。

同时，结合在线监测仪表如硬度计、电导率仪等实时监控处理效果，并据此调整工艺参数，可进一步优化运行成本并保障出水品质。在实施过程中，还应充分考虑水源特性、锅炉类型以及企业经济承受能力等因素，制定个性化解决方案。比如针对地下水含铁锰较高情况时，可在软化前增设氧化-过滤单元以預先去除干扰离子；对于蒸发量较大的大型锅炉，则建议配置多级串联或多路并行的处理装置，确保水量充沛的同时提高系统的可靠性和稳定性。

## 2.2 pH 值调节，精准控制碱度以防腐蚀

化工锅炉水处理中，pH 值的调控直接关系到整个系统的防腐蚀性能和热交换效率。适当的 pH 范围能有效抑制金属表面的腐蚀反应，减少维护成本，保证锅炉长周期稳定运行。通常情况下，锅炉用水的理想 pH 区间为 8.5 至 11 之间，具体数值取决于所使用的材料种类及其保护膜的性质。过高或过低的 pH 都会加速钢材及其他合金部件的腐蚀速率，因此必须采取有效的措施来维持最佳的碱度水平。为了实现精准的 pH 控制，现代化工锅炉普遍采用了自动加药系统配合高精度传感器进行动态调整。常用的碱性添加剂涵盖氢氧化钠（NaOH）、磷酸三钠（Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>）以及其他有机缓蚀剂。

以 NaOH 为例，其溶解度大、价格低廉且易于储存运输，但过量添加可能导致苛性脆化现象，即在应力作用下产生微裂纹，进而引发突发性断裂事故。研究表明，在保持一定浓度的游离 OH<sup>-</sup> 离子前提下，适当补充少量 Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 可以形成一层致密的磷酸盐保护层，既增强了抗腐能力又避免了单纯依靠强碱所带来的安全隐患。实践证明，当水中总碱度维持在 100 ~ 300 mg/L（以 CaCO<sub>3</sub> 计），并且 pH 值处于 9.0 ~ 10.5 范围内时，绝大多数材质都能获得良好的防护效果。

不同类型的锅炉对 pH 的要求有所差异。对于亚临界及以上级别的高压锅炉而言，由于内部温度压力条件更为苛刻，需要更加严格地控制 pH 值，一般推荐使用氨 - 联氨联合处理方式，既能提供足够的碱性环境又能防止氧气残留引起氧化腐蚀。而小型低压蒸汽发生器则更多依赖于简单的化学药剂投加，如定期定量注入适量的 NaOH 溶液即可满足日常需

求<sup>[3]</sup>。

## 2.3 溶解氧去除，综合除氧方案的选择

溶解氧（DO）作为化工锅炉水处理的关键参数之一，其含量直接影响到系统的耐腐蚀性和热效率。当水中含有过多的溶解氧时，会加速金属构件的氧化反应，尤其是在高温环境下，这种腐蚀作用尤为明显。因此，如何有效地去除溶解氧成为了保障锅炉正常运作的重要课题。根据相关标准规定，进入锅炉给水中的溶解氧浓度应尽可能低于 7 ppb（μg/L），以最大限度地减缓腐蚀进程。

目前，行业内较为成熟的除氧方法主要有热力除氧、真空除氧、化学除氧以及组合式除氧等多种形式。热力除氧是最基础也是最广泛使用的手段，它通过加热使水温接近饱和状态，促使溶解气体逸出。理论上讲，只要温度足够高，几乎所有的溶解氧都可以被脱除干净。但实际应用中往往受到设备结构和操作条件的限制，无法做到绝对彻底。在 105 °C 左右的温度条件下，热力除氧后残余的溶解氧浓度大约为 15 ppb 左右，虽已远低于原始水平但仍需进一步改进。

相比之下，真空除氧则是利用负压原理降低水面上方的气压，从而扩大量分子的自由行程，便于它们从液相中逃逸出来。这种方法特别适合处理低温供水系统，因为它不需要额外的热源输入，节省了能源开支。不过，要达到理想的除氧效果，必须保证真空度足够低且密封性能良好，否则很容易出现“回吸”现象，反而增加了污染风险。在 -0.06 MPa 左右的真空状态下，经过处理后的水样溶解氧含量可以降至约 10 ppb 以内。

化学除氧则是向水中加入特定的还原剂，如联氨（N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>）、亚硫酸钠（Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>）等，使其与溶解氧发生化学反应生成无害产物。此方法不受温度影响，反应速度快，特别适用于紧急情况下迅速降低溶解氧浓度。但化学药剂本身具有一定毒性，如果用量不当或者残留超标，将会对环境和人体健康构成威胁。因此，在实际应用中需要严格按照操作规程执行，并配备必要的防护措施。

## 2.4 磷酸盐处理，智能加药系统的实施

智能加药系统集成了先进的传感技术、自动化控制理论以及大数据分析算法，能够实现对磷酸盐浓度的实时监测与精准调控。

首先，系统配备了高灵敏度的在线磷酸根离子检测仪，它可以不间断地采集水样，迅速获取当前的磷

酸盐含量信息。结合内置的数学模型和历史数据库，预测未来的趋势走向，提前做出反应。

最后，由 PLC 控制器根据设定的目标值自动调节加药泵的速度，确保每次投加量恰到好处，既不浪费也不欠缺。从实际效果来看，采用智能加药系统后，磷酸盐处理的效果得到了显著提升。例如，在某大型化工企业锅炉房的应用案例中，经过一段时间的运行观察发现，水中磷酸盐浓度始终保持在  $1 \sim 5 \text{ mg/L}$  的理想区间内，相比之前的人工操作模式，波动幅度大幅减小，稳定性提高了近 40%。更重要的是，得益于精准的加药控制，形成了均匀致密的磷酸盐保护层，有效遏制了钙镁离子的沉积，使得锅炉内部结垢现象明显减少，传热效率提升了约 15%，大大延长了检修周期<sup>[4]</sup>。

智能加药系统还具备自我学习和优化的能力。随着时间推移，它会积累更多的运行数据，从中挖掘出有价值的信息用于改进自身的性能。比如，根据不同季节、负荷变化等因素调整磷酸盐的投加规律，使之更加贴合实际情况。此外，系统还预留了远程通讯接口，方便管理人员随时随地查看工作状态，下达指令，极大地提高了工作效率和服务质量。

### 3 化工锅炉水质控制的经济价值分析

化工锅炉作为能源转换的核心设备，在现代工业生产中扮演着不可或缺的角色。其安全、高效运行直接关系到企业的经济效益和可持续发展能力。优化关键水质控制指标，可以显著延长设备寿命、减少维护成本，并提高热效率，降低能耗。化工锅炉水质控制不仅影响设备性能，还直接关联到燃料消耗、水资源利用以及化学品使用等多个方面。

首先，针对总硬度的管理，通过采用离子交换法或反渗透技术等先进的软化手段，可确保出水硬度稳定控制在  $0.03 \text{ mmol/L}$  以下。此措施有效防止了碳酸钙或硫酸钙等难溶性盐类在高温高压条件下沉积于锅炉内部，避免了结垢现象的发生。每降低  $0.1 \text{ mmol/L}$  的进水硬度，热传导效率大约提升 2%，从而每年可节省约 5% 的燃料费用。

其次，在 pH 值调节方面，维持适当的碱度对于抑制金属表面的腐蚀至关重要。过高或过低的 pH 都会对系统造成损害；例如，在酸性条件下，铁质组件可能会遭受严重的腐蚀；而在极端碱性环境下，则可能发生苛性脆化现象。通过对 pH 值进行精准控制，可以显著减缓金属构件的腐蚀速率，从而延长设备使

用寿命。每降低 1 个单位的年平均腐蚀率，就可以节省高达 20% 的材料更换成本，同时减少因腐蚀导致的意外停机时间，间接提高了生产效率。

再者，溶解氧 (DO) 含量的严格控制是保障锅炉耐腐蚀性和热效率的关键。水中存在的游离氧会加速钢材的氧化腐蚀过程，因此需要将其降至极低水平，理想情况下应低于  $7 \text{ ppb} (\mu\text{g/L})$ 。采用热力除氧、真空脱气及化学还原剂如联氨 ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ) 的应用，可以将溶解氧浓度稳定控制在极低水平，不仅有助于保护锅炉本体免受氧化侵蚀，还改善了蒸汽质量，减少了蒸汽携带水分的问题。溶解氧浓度每降低 1 ppb，蒸汽干燥度提高约 0.5%，进而降低了汽水共腾的风险，保障了生产工艺的安全性和稳定性<sup>[5]</sup>。

此外，对于总溶解固形物 (TDS) 的控制，合理调整浓缩倍数与排污策略之间的平衡是确保 TDS 处于合适范围的关键。封闭循环系统中，将浓缩倍数控制在  $3 \sim 5$  倍之间较为适宜，能够有效利用水资源，减少排污损失，还能维持良好的传热性能。

### 4 结束语

综上所述，化工锅炉水质控制的优化策略对于提升锅炉运行效率、延长设备寿命、降低维护成本和能源消耗具有显著效果。通过科学管理总硬度、pH 值、溶解氧、总溶解固形物和磷酸盐浓度等关键水质指标，化工企业可以实现显著的经济效益，同时增强生产安全性和环境可持续性。

### 参考文献：

- [1] 呼靓, 燕尧, 朱勇吉. 工业锅炉水质常规化验方法及精确度控制探究 [J]. 清洗世界, 2024, 40(11):47-49.
- [2] 张森. 水质检测大公开, 原来电厂锅炉这样进行水质化验 [J]. 科学之友, 2024(11):167-168.
- [3] 孙洋. 化学工业锅炉水质和水处理方法 [J]. 化学工程与装备, 2023(06):189-191.
- [4] 李锐. 离子色谱法在锅炉水质检测中的应用 [J]. 技术与市场, 2022, 29(02):98-99.
- [5] 邓琳琳. 水质检验及处理对工业锅炉的重要性研究 [J]. 世界有色金属, 2017(09):123-124.

### 作者简介：

孟华 (1983-) 女, 汉族, 陕西西安人, 研究生, 化工分析工程师, 从事工业燃气锅炉项目化学水处理、化学分析, 燃气、生物质项目及其他项目相关化学研究工作。