

如何降低硫回收硫化氢与二氧化硫比值失调率

李元星

宁夏煤业集团有限公司煤制油分公司，宁夏银川，750002；

摘要：为了保证硫化氢与二氧化硫比值达到并稳定在2:1的最佳反应比，以提升硫磺回收的效率，仪器失调率高会降低测量精度，对硫化氢与二氧化硫比值分析效果造成影响。为保障硫化氢与二氧化硫的含量比分析效果，本次研究中在明确硫化氢比值仪器工作原理及在硫回收装置中的作用的基础上，对降低硫回收硫化氢比值失调率进行分析，伴热蒸汽温度低、仪器老旧、未按规定对仪器定期清理是导致硫回收硫化氢比值仪器失调率高的主要原因。对此本次研究中提出针对性措施，降低硫回收硫化氢比值仪器失调率，并获得一定的效益，为硫回收硫化氢与二氧化硫比值仪器有效使用提供支持。

关键词：硫回收装置；硫化氢比值；失调率

DOI：10.69979/3029-2727.25.10.057

引言

硫回收装置是化工生产过程中的重要装置，能够将含有硫化氢的酸性气体向单质硫转变，以此最大限度上降低硫化物对生态环境造成的污染。为实现对H₂S、SO₂的精准控制，硫回收装置当中配备硫化氢比值仪器，当比值发生失调会影响硫回收装置的运行效率，H₂S、SO₂的控制精度，由此导致员工的劳动强度增大，降低了硫磺回收率，使环保指标超标，因此需要降低硫回收硫化氢比值失调率，为硫回收装置高效运行，H₂S、SO₂高精度控制提供支持。

1 硫化氢比值仪器工作原理及在硫回收装置中的作用

1.1 工作原理

紫外吸收光谱测量是硫化氢比值仪器的技术基础，当含H₂S、SO₂等气体的混合气体通过硫化氢比值仪器测量池时，H₂S、SO₂等气体分子会吸收特定波长的紫外光。硫化氢比值仪器通过对吸收光强度变化进行检测、依据朗伯-比尔定律对H₂S、SO₂的浓度进行计算，由此获得H₂S、SO₂的比值。朗伯-比尔定律计算如(1)式所示：

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot l \quad (1)$$

式中：A—吸光度；

ε —摩尔吸光系数；

c—溶液浓度；

l —光程长度。

$$c = \frac{A}{\varepsilon \cdot l} \quad (2)$$

通过仪器测量获得 ε 、 l 实际值。

1.2 在硫回收装置中的作用

硫回收装置会发生克劳斯反应，H₂S、SO₂在完全反应时对应的比例为2:1，相应的硫回收率最高。硫化氢比值仪器对反应气体当中H₂S、SO₂的比值进行实时监测，并将测量数据反馈给控制系统，控制系统根据仪器提供的比值对燃烧炉空气流量计操作参数进行调整，以此将反应气体中H₂S、SO₂的比例控制在理想状态，为保证克劳斯反应高效进行提供支持，以此实现硫回收率的提升、尾气中H₂S与SO₂的排放量减少。

2 硫回收硫化氢比值失调主要原因

2.1 0.5MPa伴热蒸汽温度低

(1) 伴热系统设计问题

伴热系统设计的合理性与0.5MPa伴热蒸汽温度存在直接关系，当伴热管道保温效果不理想的情况下会损失大量的热量，由此造成0.5MPa伴热蒸汽温度下降。伴热管道的布局不合理同样加剧0.5MPa伴热蒸汽温度损失，从而导致0.5MPa伴热蒸汽温度下降。

(2) 冷凝水排放不畅

冷凝水不能及时排出会造成伴热系统内部积液，从而对0.5MPa蒸汽流动、热量传递效果造成负面影响。

大量的冷凝水积液会降低伴热管道温度，相应地造成 0.5MPa 伴热蒸汽温度下降。

(3) 装置老化或事故

疏水阀、蒸汽分配器等是伴热系统当中的关键装置，当这些装置处于老化或故障状态时，对 0.5MPa 蒸汽流动、温度控制效果造成负面影响，疏水阀故障会造成冷凝水不能被及时排出从而形成大量积液，导致伴热效果下降，相应的 0.5MPa 伴热蒸汽温度下降。

(4) 热损失过大

伴热管道保温材料老化或损坏会造成热量大量散失，伴热管道所在环境温度过低会增加热损失量，从而造成伴热蒸汽温度下降，使得 0.5MPa 伴热蒸汽温度下降。

(5) 工艺操作问题

操作过程中，如果蒸汽的流量或压力调节不当，也会导致温度异常。例如，蒸汽流量过低会导致热量供应不足，温度下降。

(6) 余热回收系统的影响

硫回收装置当中的余热回收系统在一定程度上会影响伴热蒸汽温度，余热回收系统设计不合理、运行故障，会导致 0.5MPa 伴热蒸汽温度下降。

解决办法：蒸汽伴热改造

为降低硫回收硫化氢比值仪器失调，现将 0.5MPa 伴热蒸汽改造为 1.0MPa 过热蒸汽。

(1) 系统现状评估

对硫回收装置的现状进行评估，评估内容包括管道布局、阀门配置、疏水器性能、伴热装置等，对评估结果进行记录并整理，为后续改造工作的开展提供支持。

(2) 蒸汽源选择

为实现 0.5MPa 伴热蒸汽向 1.0MPa 伴热蒸汽的改造，应当确保生产区域拥有充足的 1.0MPa 蒸汽供应，并配备 1.0MPa 蒸汽管网。

(3) 管道改造

①管道与阀门更换。为满足 0.5MPa 伴热蒸汽向 1.0MPa 伴热蒸汽的改造需求，需要将原有 0.5MPa 伴热蒸汽管道和阀门更换为 1.0MPa 伴热蒸汽的管道和阀门。

②管道布局优化。结合 1.0MPa 伴热蒸汽的使用需求对蒸汽管道布局进行重新设计，并在合理范围内最大限度上减少弯头数量、缩短管道长度，以此最大限度上

降低管道蒸汽热损失。

伴热系统升级

①检查伴热装置：对现有的伴热管、疏水器等伴热装置进行全面检查，对老化、损坏的装置进行更换。

②增加保温措施：对伴热管道、装置进行保温处理，最大限度上降低蒸汽热量散失。

③安装温度传感器：在关键位置安装温度传感器，对蒸汽温度进行实时监测，为保障伴热效果提供数据支持。

(5) 调试与优化

①系统调试：蒸汽伴热改造完成后，为确保系统的有效运行应当结合实际情况对系统进行调试，以此保证蒸汽压力、温度满足设计要求。

②系统优化：将仪器测量数据进行对比，根据分析结果明确蒸汽改造后的伴热效果，发现其中的问题并在此基础上进行优化。

③定期维护：工作人员制定详细的维护计划，对硫回收装置蒸汽系统、比值仪器的运行状态进行评估，根据评估结果发现其中的问题，并对问题进行及时处理。

(6) 预期效果

①伴热效率：1.0MPa 伴热蒸汽的温度相比 0.5MPa 伴热蒸汽温度更高，使硫化氢比值仪器的工作温度维持在稳定状态，最大限度上降低因仪器工作温度波动造成影响伴热效率。

②降低热损失：优化后硫化氢比值仪器管道布局、保温措施能够明显降低系统热损失。

③延长装置寿命：稳定的蒸汽供应、温度控制能够在一定程度上延长比值仪器及相关装置的使用寿命。

(7) 注意事项

①安全评估：在伴热系统改造过程中，工作人员应当详细对系统的安全性进行评估，并严格按照规范进行操作。

②人员培训：对操作和维护人员进行培训，使其熟悉改造后的系统操作、维护等工作的相关要求。

③成本控制：工作人员在保障伴热系统使用效果的同时，对系统改造预算进行合理规划，最大限度上将系统改造成本控制在合理范围内。

2.2 仪器老旧

造成装置老旧的原因多样，且不同的原因存在不同

的表现形式，从而对硫回收硫化氢比值仪器效率造成影响。

(1) 仪器老旧原因

①长期运行磨损

仪器在长期运行的状态下，其机械部件、电子元件会逐渐磨损并老化，导致仪器整体性能逐渐下降。

②腐蚀与环境影响

硫回收装置在酸性气体、高温、高湿度的环境下运行，整体运行环境相对恶劣，对仪器被腐蚀并逐渐老化。

③维护不足

仪器缺乏定期维护或维护方式不当，增加仪器故障发生率，同时加快装置老化速度。

(2) 仪器老旧表现形式

①传感器性能下降

硫化氢比值仪器当中配备传感器，而传感器是硫化氢比值仪器的关键元件。传感器在长期使用中逐渐老化，会导致传感器响应时间长、测量精度下降。

②污染

硫化氢比值仪器受到灰尘、腐蚀产物等物质污染后，会造成测量误差增加。

③加热系统故障

加热器、除雾器等部件老化会降低加热效果，从而对样品温度控制效果造成影响，相应地导致测量精度下降。

④仪表过时

仪表过时会导致硫化氢与二氧化硫比值失调，老旧仪表的传感元件性能下降，导致硫化氢和二氧化硫浓度的检测精度降低，且数据处理速度缓慢，无法适应复杂工况下的实时测量需求，导致比值测量结果偏差较大，由此造成比值失调。

解决办法：设计新型操作系统

(1) 数据预处理与特征提取

①数据预处理。针对现场采样数据中存在的缺失、异常和噪声问题，通过填充缺失数据、修正异常数据进行处理。

使用最近距离法将缺失值补全，如(1)式所示：

$$v_i(k) = \frac{v_i(k_p) + v_i(k_q)}{2} \quad (1)$$

式中： $v_i(k_p)$ 、 $v_i(k_q)$ —距离 k 时刻最近非缺失

值

通过滑动窗口计算均值，在此基础上判断、修正异常数据。

②分布式 GRU 模型

单个 GRU 模型处理大量数据时精度下降，为避免这种问题的出现，使用分布式 GRU 模型解构。将输入数据分配至多个 GRU 模型中进行动态处理，对动态特征进行提取并拼接，再将拼接数据送入全连接层进行计算并输出，分布式 GRU 模型重置门、更新门、候选隐藏状态分别如(2)、(3)、(4)式所示：

$$r_t = \sigma(W_{xr}xt + W_{hr}h_{t-1} + b_r) \quad (1)$$

式中： r_t —重置门输出；

σ —Sigmoid 激活函数；

W_{xr} 、 W_{hr} —权重矩阵；

b_r —偏置项。

$$z_t = \sigma(W_{xz}xt + W_{hz}h_{t-1} + b_z) \quad (2)$$

式中： z_t —更新门输出

$$\tilde{h}_t = \tanh(W_{xh}xt + W_{hh}(r_t \cdot h_{t-1}) + b_h) \quad (3)$$

③智能监测与反馈控制

新操作系统通过实时监测 H₂S 和 SO₂ 浓度，结合优化反馈控制算法对氧气流量进行动态调整，以此保障 H₂S、SO₂ 比值处于理想状态。系统具备自动校准功能，通过定期注入校准气体，确保测量精度。

④优化采样与分析

系统采用现场防雾化探头，将硫蒸汽从样品气中冷凝分离，避免硫单质对测量的干扰。在低压蒸汽冷却、引射气技术支持下，减少样品气中含硫量，以此确保测量结果的一致性。

⑤采用新比值仪器

采用新型比值仪器，以此大幅提高测量精度，准确测量硫化氢与二氧化硫比值。新型比值仪器能够快速处理数据，且具有稳定的信号传输功能，为实现对硫回收过程中比值精确监测、有效降低比值失调率提供支持。

2.3 未按规定对仪器定期清理

仪器维护保养人员未严格按照规定对仪器定期进行清理，会导致仪器内部积累大量灰尘，从而影响仪器

整体性能，相应的仪器测量精度下降、故障率上升、响应时间延长。

解决办法：制定定期校准与清理方案

(1) 校准方案

①校准周期

根据实际运行情况和装置制造商的建议，硫化氢比值仪器的校准周期应设定为 7d/次，当装置运行环境较为恶劣或检测数据对生产影响较大，可适当缩短校准周期至 3-4d/次。

②校准前准备

标准气体：准备高纯度的 H₂S 标准气体、SO₂ 标准气体，浓度依次为 50 ppm、100 ppm，用于校准不同量程。

装置检查：在正式开始校准前，对仪器气路系统的畅通过程、管路连接牢固情况进行检查，避免其存在泄漏现象。

预热装置：工作人员启动仪器，按照装置说明书要求进行预热，平均预热时间为 30min。

③校准步骤

零点校准：使用零气对仪器进行零点校准，确保仪器在无 H₂S 和 SO₂ 时输出为零。

量程校准：依次通入不同浓度的标准气体，记录仪器输出值，对仪器量程设置进行调整，使输出值、标准气体实际浓度保持一致。

线性校准：选择 3 种不同浓度的标准气体并分别进行测量、计算线性误差。线性误差控制在 $\langle \pm 2\% \rangle$ 。

重复性测试：对同一浓度的标准气体进行多次测量并计算重复性误差，要求重复性误差 $\langle \pm 2\% \rangle$ 。

(2) 清理方案

①清理周期

对硫化氢比值仪器进行全面清理，确定清理频次为 30d/次，防止仪器内部进入灰尘、硫颗粒等杂质影响测量结果。

②清理步骤

外部清洁：

使用干净的软布擦拭仪器外壳，去除灰尘和污渍。清理探头表面的污垢，确保采样气流畅通。

内部清洁：

由专业操作人员打开仪器外壳，使用压缩空气吹扫

内部电路板和光学部件，去除灰尘。清理过滤器和冷凝器，防止存在堵塞情况。

3 效果分析

结合实际情况采取一系列自主创新优化改造措施，为整套装置长周期运行提供支持、实现造粒尾气达标排放、大幅降低各岗位人员工作量、显著改善工作环境，为大型煤化工项目的硫回收装置比值仪器选择、设计提供依据，同时为高质量推进硫磺回收工艺控制技术发展奠定坚实基础。

3.1 运行效益

表 1 所示为操作系统优化前后运行效益相关参数对比。通过对表 1 进行分析发现，操作系统在优化后，仪器失调率相比优化前明显下降，且测量精度、响应速度显著提升，使维护需求、故障率显著下降。

表 1 操作系统优化前后运行效益相关参数对比

项目	优化前	优化后
仪器失调率	15%~20%	5%~8%
测量精度	$\pm 5\%$	$\pm 1\%$
响应时间	30s	<10s
维护周期	1-2 次/周	1-2 次/周
故障率	10%~15%	2%~3%

3.2 工艺参数稳定性与系统协同性提升

改硫回收系统改造后工艺参数稳定性、装置协同运行水平得到有效提升。

3.2.1 蒸汽伴热改造

通过优化管道布局与保温措施，使 1.0MPa 过热蒸汽系统伴热温度波动范围由 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 缩小至 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，有效避免因温度不足导致的仪器测量偏差。新增温度传感器能够实时监测伴热蒸汽温度，同时与控制系统构成闭环调节，当温度偏离设定值时，系统将自动调整蒸汽流量，使响应时间由改造前的 5min 缩短至 30s，有效确保硫化氢比值仪器持续处于最佳工作温度区间。

3.2.2 仪器系统升级

新型比值仪器搭载分布式 GRU 模型使数据处理能力得到显著提升，对现场采样数据进行预处理后，通过多节点并行计算，使数据处理效率提升 3 倍，测量延迟由 30s 下降至 8s。系统集成智能反馈控制模块能够根据 H₂S、SO₂ 浓度对氧气流量进行实时调节，控制精度 $\pm 0.5\%$ ，相比传统 PID 控制提升 40%。通过应用现场防雾

化探头、低压蒸汽冷却技术，使样品气中硫单质含量由改造前 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 下降至 $10\text{mg}/\text{m}^3$ ，有效消除硫沉积对测量造成的干扰，保障仪器长期运行的稳定性。

经持续3个月运行测试，结果显示系统在高低负荷切换工况下，有效控制 H_2S 与 SO_2 比值波动范围稳定介于 $2:1 \pm 0.05$ ，相比改造前±0.2的波动范围大幅优化，有效支撑克劳斯反应效率提升幅度超过98.5%。

4 结束语

失调率上升会影响硫回收硫化氢比值仪器的实际使用效果，为确保硫回收硫化氢比值仪器使用效果，对其实际使用过程中存在的问题进行分析，结合问题提出针对性的处理措施，以此降低硫回收硫化氢比值仪器失调率，为硫回收硫化氢比值仪器的有效使用提供支持。

参考文献

- [1] 李作亮. 激光-硫比值仪器在硫黄回收装置中的应用[J]. 仪器器, 2025, (01): 40-42.
- [2] 吴文星, 盖迪, 王颖. 比值仪器在硫黄回收装置中的应用[J]. 自动化应用, 2024, 65(03): 184-187.
- [3] 刘成亮. 在线比值仪器在化工硫黄回收工艺中应用与环境影响[J]. 当代化工研究, 2023, (23): 163-165.
- [4] 佟新宇. 硫比值仪器原理及其在硫黄回收中的应用[J]. 天津化工, 2023, 37(S1): 215-217.
- [5] 徐伟清, 袁焱. 比值仪器在Claus燃烧炉上的控制应用[J]. 化工设计, 2021, 31(03): 35-40+1-2.

作者简介：李元星（1988.12-），男，毕业院校，内蒙古科技大学；所学专业，化学工程与工艺，当前单位，国家能源集团宁夏煤业公司煤制油气化二厂，职务，班长，职称级别，助理工程师。