文章编号:1674-7607(2026)10-0154-07 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250440

脱硫废水闪蒸浓缩关键离子/重金属迁移特性研究

吉顺健[1]， 张美杰[2]， 张志洪[1]， 杨泽鑫[2]， 范亚光[2]，
安国亚[2]， 张宇涛[2]， 张 娟[1]
(1. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司，上海 200240；
2. 中电投新疆能源化工集团五彩湾发电有限责任公司，新疆昌吉 831799)

摘 要：为了揭示脱硫废水闪蒸浓缩过程中关键离子及重金属的迁移特性，采用旋转蒸发实验装置，研究了不同温度、不同浓缩倍率下实际脱硫废水闪蒸过程中的 pH、总溶解固体(TDS)含量变化规律，以及 Cl^-、NH_4^+、Hg 等关键离子及重金属的迁移规律及蒸发结晶产物特征。结果表明：随着浓缩倍率增加，不同蒸发温度下浓缩液的 pH 不断降低、TDS 含量不断增加；蒸发浓缩过程中 NH_4^+、Hg 部分发生气相迁移，Cl^- 气相迁移可忽略；浓缩 10 倍后，Cl^-、NH_4^+ 仍主要富集在浓缩液中，Hg 则主要富集在冷凝水中；结晶产物以片状结构为主，主要成分为 $CaSO_4$，还含有少量 NaCl 结晶。

关键词：脱硫废水；闪蒸浓缩；离子迁移；Hg；产物特征
中图分类号：X703 **文献标志码**：A **学科分类号**：610.30

Research on Migration Characteristics of Key Ions and Heavy Metals During Flash Evaporation Concentration of Desulfurization Wastewater

JI Shunjian[1]， *ZHANG Meijie*[2]， *ZHANG Zhihong*[1]， *YANG Zexin*[2]， *FAN Yaguang*[2]，
AN Guoya[2]， *ZHANG Yutao*[2]， *ZHANG Juan*[1]
(1. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China;
2. Wucaiwan Power Generation Co., Ltd., CPI Xinjiang Energy Chemical Group, Changji 831799, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: To reveal the migration characteristics of key ions and heavy metals during flash evaporation concentration of desulfurization wastewater, a rotary evaporation experimental setup was employed. The variations in pH, total dissolved solids (TDS), Cl^-, NH_4^+, Hg, and other key ions and heavy metals, as well as the characteristics of evaporated crystalline products, were investigated under different temperatures and concentration ratios. Results show that with the increasing concentration ratio, the pH of the concentrate decreases while TDS content increases at all evaporation temperatures. During evaporation and concentration, NH_4^+ and Hg partially migrate to the gas phase, whereas Cl^- migration to the gas phase is negligible. After 10-fold concentration, Cl^- and NH_4^+ remain predominantly enriched in the concentrate, while Hg is mainly enriched in the condensate. The crystalline products exhibit in sheet structure, with $CaSO_4$ as the main component and minor NaCl crystals.

收稿日期：2025-07-09 **修订日期**：2025-08-13
作者简介：吉顺健(1982—)，男，江苏海安人，工程师，硕士研究生，研究方向为火力发电水处理。
张 娟(通信作者)，女，正高级工程师，硕士研究生，E-mail：zhangjuan@speri.com.cn。

Key words: desulfurization wastewater; flash evaporation concentration; ion migration; Hg; product characteristics

石灰石-石膏湿法脱硫技术常用于处理燃煤机组烟气中的 SO_2，实现达标排放的同时会产生大量脱硫废水[1-2]。这类废水成分复杂，主要包括氯离子(Cl^-)、硫酸根(SO_4^{2-})、钙镁离子、重金属(如汞、砷、铅等)以及悬浮物(如石膏颗粒)等，处理难度较大[3-4]。“三联箱”工艺结合混凝与化学沉淀方法，实现了废水中离子、悬浮物和重金属等的达标去除[5]，是最常见的脱硫废水处理技术，但在实际运行过程中存在系统复杂、投运成本高、对部分物质(如氯离子)去除效果差等问题。随着废水排放要求的日趋严格，如何实现脱硫废水循环利用与零排放成为亟待解决的问题。

现有脱硫废水深度处理研究集中在浓缩减量和结晶固化这 2 个方面。浓缩减量可实现脱硫废水中 70%左右水量的回用，大幅度减轻后续固化处理阶段的负荷，降低系统的工程造价和运行成本，主要包括膜法浓缩[6-7]和热法浓缩[8-9]等方式。结晶固化通常采用热基方法，主要包括烟道蒸发技术[10]、旁路烟气干燥技术[11]等。

其中，多效闪蒸技术因具有操作简单、安全性高、对进水水质要求相对较低、可利用低温余热等特点，在高盐废水包括脱硫废水[12]、核放射废水[13]、石化废水[14]、印染废水[15]等不同废水处理中得到了广泛的研究及应用。对于脱硫废水的多效闪蒸处理，当前研究主要集中在工艺优化和经济性提升方面，如王峰等[16]在 2×350 MW 燃煤机组采用“非软化低温闪蒸浓缩＋高温旁路干燥”工艺进行了脱硫废水零排放处理技术研究，利用烟气余热有效降低了运行成本；侯致福等[17]基于 300 MW 机组进行了 15 m^3/h 的脱硫废水零排放技术应用研究，采用烟气低温余热闪蒸蒸发技术，脱硫废水处理的直接成本仅约为 19.42 元/m^3。然而，对于脱硫废水闪蒸过程中离子等迁移变化特性的研究相对较少，虽然 Cui 等[18]对脱硫废水低温三效蒸发过程中主要离子和重金属的迁移进行研究，但其重点关注的是浓缩液中离子和重金属的变化规律，未对冷凝液中主要离子和重金属的变化进行研究，也未对脱硫废水中日益增多的铵根离子浓度变化进行研究。

基于此，搭建了脱硫废水闪蒸浓缩实验系统，探究了不同温度、不同浓缩倍率下废水闪蒸过程中，pH、总溶解固体(TDS)等参数的变化规律、Cl^-/NH_4^+/Hg 等关键离子及重金属的迁移规律以及废水蒸发结晶产物的特征，相关研究可为脱硫废水多效闪蒸处理工艺设计与运行优化提供关键基础数据与理论支持。

1　实验系统及方法

1.1　实验系统

实验系统的核心是旋转蒸发仪(EYELA N-1200A)，主要由水浴锅、旋转蒸发瓶、冷凝器、冷凝瓶、制冷机、真空泵、控制器等组成，如图 1 所示。通过调控旋转蒸发瓶内的真空度及水浴锅的温度模拟脱硫废水闪蒸处理过程中的温度与压力参数，废水蒸发后的浓缩液留在蒸发瓶中，蒸汽经冷凝管冷凝后形成冷凝液，并收集于冷凝瓶中，之后通过 2 个串联的稀硫酸(浓度为 0.005 mol/L)洗气瓶吸收净化后排放，其中的氨气等气体被进一步收集在洗气瓶内的稀硫酸中。

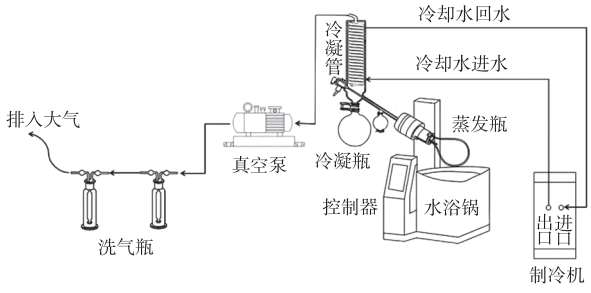


图 1　实验装置流程图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental setup

1.2　实验方法

实验水样为新疆某电厂的脱硫废水。实验初始废水量为 250 mL，绝对蒸发压力恒定为 120 hPa，蒸发温度分别设定为 60、70、80、90 ℃，冷凝器中的冷却水设定温度为 8 ℃，把脱硫废水分别蒸发浓缩至 2 倍、4 倍、6 倍、8 倍和 10 倍。浓缩倍率的计算公式为

$$N=V_0/V_i \tag{1}$$

式中：N 为浓缩倍率；V_i 为蒸发后浓缩液体积，mL；V_0 为初始废水体积，mL。

废水蒸发浓缩后，测量浓缩液及冷凝液质量和体积，同时根据需要对浓缩液、冷凝液及洗气瓶中的吸收液以及结晶产物进行测试分析。其中：液相 pH 通过 pH 计(型号为 PHS-3E)测量；TDS 含量通过电导率仪(型号为 DDSJ-308F)测定；氯离子、铵根离子等通过离子交换色谱仪(型号为 ICS-900)测

量;汞通过原子荧光分光光度计(型号为 AFS-933)进行测量;固相结晶产物的矿物相组成和形貌分别利用 X 射线衍射仪(XRD,型号为 MiniFlex600)和场发射扫描电子显微镜(SEM,型号为 ZEISS SUPRATM 55)进行表征。

2 结果与讨论

2.1 脱硫废水水质分析

实验用脱硫废水呈淡黄色浑浊状态,pH 为 6.4,呈弱酸性,TDS 含量较高,为 27.7 g/L。

废水中主要离子组分包括:Na^+(4.35 g/L)、NH_4^+(0.25 g/L)、Ca^{2+}(7.15 g/L)、Mg^{2+}(1.98 g/L)、Cl^-(24.35 g/L)和 SO_4^{2-}(1.18 g/L),其中,Cl^- 浓度最高。此外,废水中还含有 Hg(46.4 μg/L)等重金属。

2.2 蒸发浓缩过程中浓缩液的特性变化

2.2.1 浓缩液的 pH 变化

脱硫废水闪蒸过程中浓缩液的 pH 变化如图 2 所示。随着浓缩倍率的不断增加,不同蒸发温度下浓缩液的 pH 整体上不断降低,其主要原因是脱硫废水本身为弱酸性,废水蒸发过程中水分不断减少,浓缩液中 H^+ 等酸性离子浓度不断增加,使得浓缩液的酸性不断增强,pH 因此不断下降,实验条件下浓缩 10 倍后 pH 已降至 4 左右。

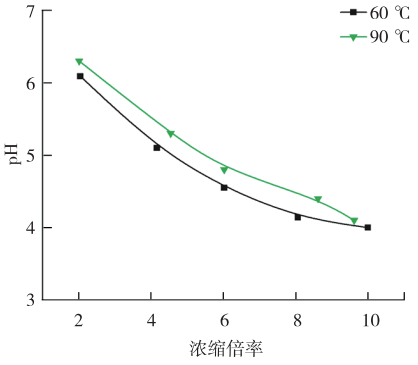


图 2 不同闪蒸温度下浓缩液的 pH 变化

Fig. 2 pH variation of concentrate at different flash evaporation temperatures

此外,在同样浓缩倍率下,蒸发温度较高时浓缩液的 pH 也相对较高,这可能是因为蒸发过程中随着浓缩不断进行,溶液中的少量 H^+ 与 Cl^- 等形成易挥发性的酸,随蒸汽一起逸出并在冷凝过程中被收集下来;由于温度升高会促进酸性气体的挥发,当蒸发温度从 60 ℃升高到 90 ℃时,相同浓缩倍率下的浓缩液中的 H^+ 浓度有所下降,相应的浓缩液的 pH 有所升高。

2.2.2 浓缩液的 TDS 含量变化

脱硫废水蒸发过程中浓缩液的 TDS 含量变化如图 3 所示。随着浓缩倍率的不断增加,不同蒸发温度下浓缩液的 TDS 变化规律一致,均呈现出显著的增长趋势。其主要原因是废水蒸发过程中水分不断减少,浓缩液中各类离子的浓度逐渐升高,电导率不断增加,相应浓缩液的 TDS 含量也快速增加。

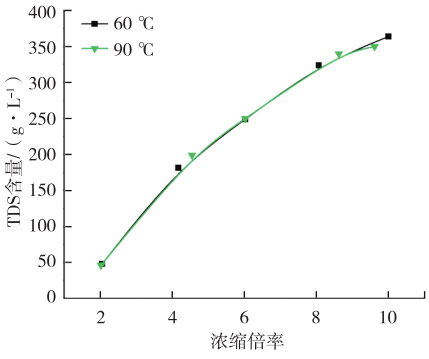


图 3 不同闪蒸温度下浓缩液的 TDS 含量变化

Fig. 3 TDS content variation of concentrate at different flash evaporation temperatures

此外,不同蒸发温度下浓缩液的 TDS 变化曲线基本重合,表明蒸发温度对浓缩液中 TDS 含量的变化影响不大;在浓缩至 10 倍的过程中,TDS 曲线斜率虽逐渐变缓但整体变化不大,表明浓缩液中的 TDS 总含量有所降低,但总体变化不大,特别是在 8 倍浓缩倍率之前。

2.3 蒸发浓缩过程中关键离子浓度变化及迁移规律

2.3.1 Cl^- 浓度变化及迁移规律

浆液中 Cl^- 的浓度是湿法脱硫排放废水的关键指标,也是脱硫废水处理中关注的重点。为研究脱硫废水闪蒸过程中 Cl^- 的迁移变化规律,对不同蒸发温度下浓缩液中的 Cl^- 浓度进行了测试分析,结果如图 4 所示。

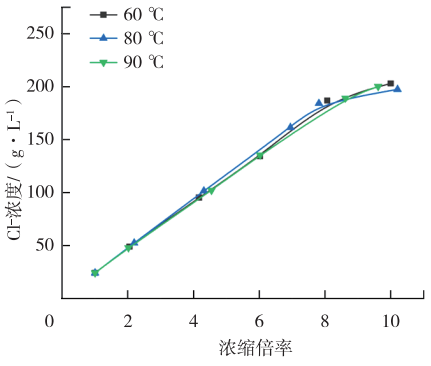


图 4 不同闪蒸温度下浓缩液中 Cl^- 浓度变化

Fig. 4 Cl^- concentration variation in concentrate at different flash evaporation temperatures

与浓缩液中 TDS 含量的变化规律类似，随着蒸发的进行，浓缩倍率不断增加、水分不断减少，浓缩液中 Cl^- 浓度呈现出显著的增长趋势；浓缩 10 倍后 Cl^- 浓度达 200 g/L 以上，结合此时 pH 低于 4，表明此时浓缩液具有较强的腐蚀性，实际应用中应充分考虑废水蒸发装置的抗腐蚀性能。

此外，不同蒸发温度下浓缩液中 Cl^- 浓度变化规律一致且浓度相差比较小，表明 Cl^- 浓度变化主要受浓缩倍率的影响，蒸发温度对其影响较小。在浓缩 8 倍的过程中，Cl^- 浓度基本呈直线变化，表明在 8 倍浓缩倍率内，废水蒸发过程中浓缩液的 Cl^- 总含量基本不变；继续蒸发至 10 倍浓缩倍率，Cl^- 浓度曲线斜率有所变缓，表明浓缩液中 Cl^- 总含量有所降低，但总体变化不大，绝大部分的 Cl^- 仍留在浓缩液中。

与之相比，冷凝液中虽然也有 Cl^-，但 Cl^- 浓度非常低，以闪蒸温度 60 ℃为例，在废水蒸发浓缩 10 倍的过程中，冷凝液中 Cl^- 浓度最高不超过 25 mg/L，Cl^- 最大质量约占废水中 Cl^- 总质量的 0.05%，这再次证明蒸发过程中少量 H^+ 与 Cl^- 形成易挥发性的 HCl 进入冷凝液[19]，另一方面也表明脱硫废水闪蒸处理过程中，可不考虑 Cl^- 的气相析出问题。浓缩倍率为 10 倍时，浓缩液中 Cl^- 质量虽有所减少，但仍占废水中 Cl^- 总质量的 89%左右，表明此时绝大部分氯元素仍以离子形态富集在浓缩液中，剩余约 11%的氯元素以络合物或晶体的形态存在，如图 5 所示。

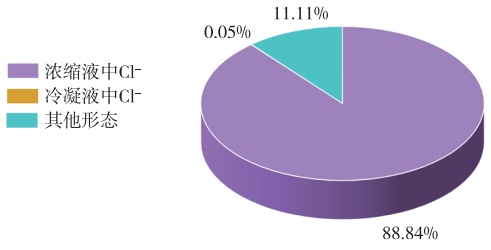


图 5　脱硫废水蒸发过程中的 Cl^- 迁移变化

Fig. 5　Cl^- migration during desulfurization wastewater evaporation

2.3.2　NH_4^+ 浓度变化及迁移规律

受脱硝过程中的氨逃逸等影响，脱硫废水中的 NH_4^+ 浓度也逐渐升高，脱硫废水蒸发处理过程中 NH_4^+ 的变化也逐渐成为关注的重点。为研究脱硫废水闪蒸过程中 NH_4^+ 的迁移变化规律，对不同蒸发温度下冷凝液、吸收液中的 NH_4^+ 浓度进行了测试分析，结果如图 6 与图 7 所示。

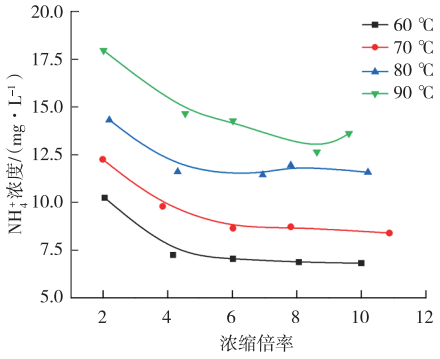


图 6　不同闪蒸温度下冷凝液中 NH_4^+ 浓度变化

Fig. 6　NH_4^+ concentration variation in condensate at different flash evaporation temperatures

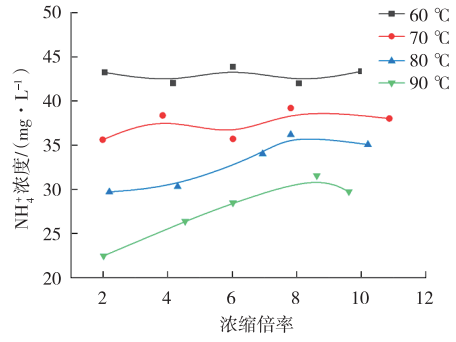


图 7　不同闪蒸温度下吸收液中 NH_4^+ 浓度变化

Fig. 7　NH_4^+ concentration variation in absorbent at different flash evaporation temperatures

由图 6 和图 7 可知，冷凝液与吸收液中均检测到了 NH_4^+，表明脱硫废水闪蒸过程中，少量的 NH_4^+ 逆水解成 NH_3 后随蒸汽逸出，通过冷凝及稀硫酸吸收后分别进入冷凝液及吸收液中。

随着浓缩倍率的不断增加，不同蒸发温度下冷凝液中 NH_4^+ 浓度逐渐降低，表明随着浓缩倍率的增加，冷凝液的增加量要大于 NH_3 逸出的增加量；而随着浓缩倍率的不断增加，不同蒸发温度下吸收液中 NH_4^+ 浓度整体上逐渐升高，表明 NH_3 逸出是一个持续的过程，吸收液中 NH_4^+ 浓度在蒸发过程中不断累积。

此外，蒸发温度越高，冷凝液中 NH_4^+ 浓度越高，而吸收液中 NH_4^+ 浓度越低，两者的变化规律相反，这主要与闪蒸温度与闪蒸时间有关。虽然闪蒸温度高能够促进 NH_3 逸出，但达到同样浓缩倍率的时间也相应较短，根据质量平衡分析，不同闪蒸温度下达到同样浓缩倍率时，其逸出的 NH_3 量基本相同，如图 8 所示。闪蒸温度高时，达到同样浓缩倍率的时间短，单位时间内进入冷凝器的蒸汽量更高，产生的冷凝水更多，更有利于逸出 NH_3 的溶解收集，因此更容易在冷凝段收集下来，闪蒸温度高时冷凝液中的 NH_4^+ 浓度高，吸收液中的 NH_4^+ 浓度低。

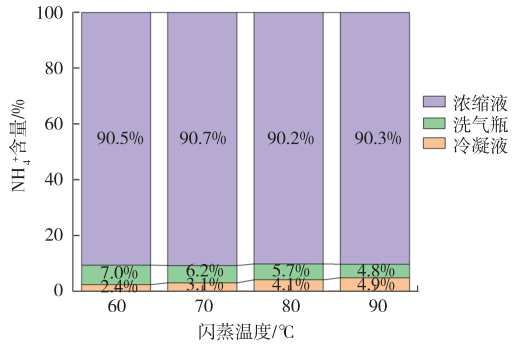


图 8 脱硫废水蒸发过程中 NH_4^+ 的迁移变化

Fig. 8 NH_4^+ migration during desulfurization wastewater evaporation

虽然脱硫废水蒸发过程中部分 NH_4^+ 以 NH_3 从废水中逸出，但浓缩 10 倍后，90%以上的 NH_4^+ 仍然富集在浓缩液中，逸出的气相 NH_3 仅占总 NH_4^+ 质量的 10%左右，并且部分还会随冷凝水被收集下来。

2.3.3 Hg 元素浓度变化及迁移规律

脱硫废水中富集有一定量的来自燃煤烟气中的 Hg，为避免其对生态环境及人类健康产生危害，需要研究脱硫废水闪蒸处理过程中 Hg 的迁移变化规律。不同蒸发温度及浓缩倍率下浓缩液及冷凝液中的 Hg 浓度变化如图 9 和图 10 所示。

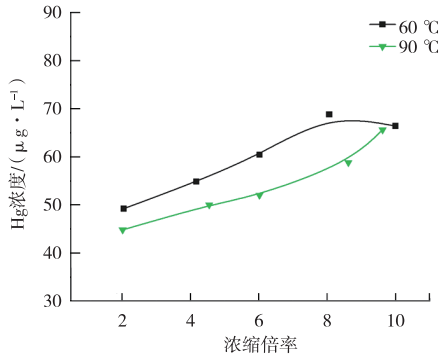


图 9 不同闪蒸温度下浓缩液中 Hg 浓度变化

Fig. 9 Hg concentration variation in concentrate at different flash evaporation temperatures

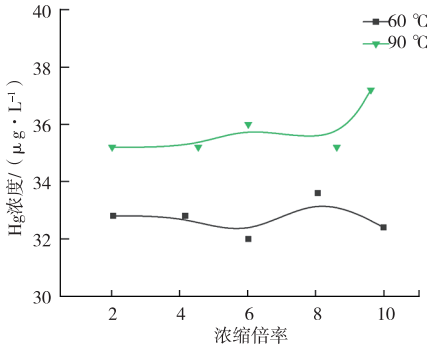


图 10 不同闪蒸温度下冷凝液中 Hg 浓度变化

Fig. 10 Hg concentration variation in condensate at different flash evaporation temperatures

由图 9 和图 10 可知，随着浓缩倍率的不断增加，不同蒸发温度下浓缩液中 Hg 浓度逐渐增加，冷凝液中 Hg 浓度变化规律不明显，但浓度整体低于浓缩液中 Hg 浓度。随着闪蒸温度增加，相同浓缩倍率下浓缩液中 Hg 浓度降低而冷凝液中 Hg 浓度增加。表明脱硫废水闪蒸过程中部分 Hg 会随蒸汽一起逸出，并且闪蒸温度越高，Hg 的逸出量越大。

对闪蒸温度 60 ℃下蒸发过程中 Hg 的迁移特性进行了分析，结果如图 11 所示。由图 11 可知，随着浓缩倍率的增加，浓缩液中 Hg 含量不断降低，冷凝液中 Hg 含量不断增加，浓缩 10 倍后，浓缩液中 Hg 含量占 Hg 总含量不到 15%，62%的 Hg 富集在冷凝液中，由于 Hg 的冷凝收集效率非常高，所以剩余接近 24%的 Hg 应主要富集在结晶产物中，不会逃逸到周围环境中。

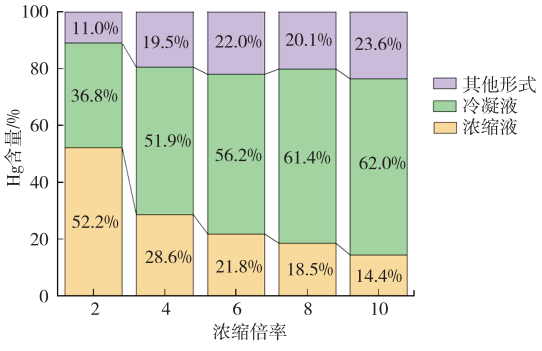


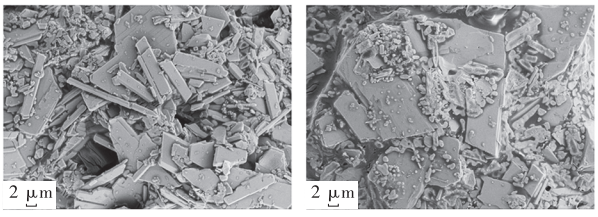
图 11 脱硫废水蒸发过程中 Hg 的迁移变化

Fig. 11 Hg migration during desulfurization wastewater evaporation

2.4 脱硫废水蒸发浓缩结晶产物特征分析

为了研究脱硫废水蒸发结晶产物的特性，对浓缩 4 倍、10 倍时浓缩液底部结晶进行取样，烘干后进行了 SEM-能谱仪(EDS)及 XRD 分析，结果如图 12 与图 13 所示。

由图 12 和图 13 可知，不同浓缩倍率下结晶产物的微观形貌类似，均为片状结构，与浓缩4倍相



(a) 浓缩4倍 (b) 浓缩10倍

图 12 脱硫废水蒸发结晶产物微观形貌

Fig. 12 Microscopic morphology of crystalline products from desulfurization wastewater evaporation

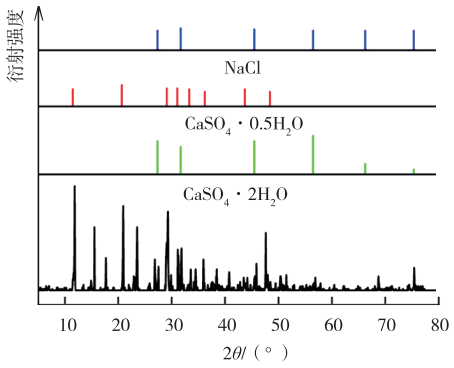


图 13　脱硫废水蒸发结晶 XRD 分析

Fig. 13　XRD analysis of crystalline products from desulfurization wastewater evaporation

比，脱硫废水浓缩 10 倍时，由于离子浓度更高、结晶时间更长，使得晶体的生长速率加快、结晶更加有序，因此形成的晶体结构尺寸相对更大。EDS 与 XRD 分析表明，片状结构主要成分为硫酸钙，此外，还含有少量的 NaCl 晶体，这也再次证明，脱硫废水浓缩 10 倍后，Cl^- 仍主要存在于浓缩液中，以结晶形式析出的量比较少。

3　结论

（1）脱硫废水本身为弱酸性，随着浓缩倍率的增加，不同蒸发温度下浓缩液的 pH 整体上不断降低、TDS 含量则不断增加；同样浓缩倍率下，蒸发温度较高时浓缩液的 pH 也相对较高，但蒸发温度对浓缩液中 TDS 的浓度变化影响不大。

（2）随着浓缩倍率的不断增加，浓缩液中 Cl^- 浓度呈现显著的增长趋势；8 倍浓缩倍率内，浓缩液的 Cl^- 总含量基本不变，浓缩 10 倍后，浓缩液中 Cl^- 含量仍占废水中 Cl^- 总量的近 89%，其气相析出可忽略；浓缩 10 倍后，浓缩液中 Cl^- 浓度高达 200 g/L 以上，pH 低于 4，浓缩液具有较强的腐蚀性。

（3）随着浓缩倍率的不断增加，不同蒸发温度下冷凝液中 NH_4^+ 浓度逐渐降低，吸收液中 NH_4^+ 浓度整体上逐渐升高；浓缩 10 倍后，90% 以上的 NH_4^+ 仍然富集在浓缩液中，逃逸的 NH_4^+ 仅占废水中 NH_4^+ 总量的 10%左右，并且部分还会随冷凝水被收集下来。

（4）随着浓缩倍率的不断增加，不同蒸发温度下浓缩液中 Hg 浓度逐渐增加，但 Hg 含量不断降低，而冷凝液中 Hg 含量不断增加；随着闪蒸温度增加，相同浓缩倍率下浓缩液中 Hg 浓度降低而冷凝液中 Hg 浓度增加；浓缩 10 倍后，浓缩液中 Hg 含量占废水中 Hg 总含量不到 15%，62%的 Hg 富集在冷凝液中，近 24%的 Hg 主要富集在结晶产物中。

（5）不同浓缩倍率下结晶产物的微观形貌类似，均为片状结构，高浓缩倍率下形成的晶体结构尺寸更大。结晶产物以 $CaSO_4$ 为主，含有少量的 NaCl 晶体，再次证明脱硫废水浓缩 10 倍后，Cl^- 仍主要存在于浓缩液中，以结晶形式析出的量比较少。

参考文献：

[1] 齐亚兵，唐承卓，贾宏磊. 工业烟气湿法脱硫技术的发展现状及研究新进展[J]. 材料导报，2022，36(增刊 1)：88-96.
QI Yabing，TANG Chengzhuo，JIA Honglei. Development status and new research progress of wet desulfurization technologies for industrial flue gas[J]. Materials Reports，2022，36(Sup 1)：88-96.

[2] DHAWAN H，SHARMA D K. Advances in the chemical leaching（inorgano-leaching），bio-leaching and desulphurisation of coals[J]. International Journal of Coal Science & Technology，2019，6(2)：169-183.

[3] 刘静颖，贾阳杰，杨凤玲，等. 燃煤电厂脱硫废水零排放预处理工艺研究进展[J]. 无机盐工业，2023，55(12)：12-25.
LIU Jingying，JIA Yangjie，YANG Fengling，et al. Research progress of zero liquid discharge pretreatment process for flue gas desulfurization wastewater from coal-fired power plants[J]. Inorganic Chemicals Industry，2023，55(12)：12-25.

[4] ANDERSON W V，CHENG C M，BUTALIA T S，et al. Forward osmosis-membrane distillation process for zero liquid discharge of flue gas desulfurization wastewater[J]. Energy & Fuels，2021，35(6)：5130-5140.

[5] 张建华，池毓菲，邹宜金，等. 燃煤电厂脱硫废水处理技术工程应用现状与展望[J]. 工业水处理，2020，40(10)：14-19.
ZHANG Jianhua，CHI Yufei，ZOU Yijin，et al. Application progress and prospect of desulfurization wastewater treatment technologies in coal-fired power plants[J]. Industrial Water Treatment，2020，40(10)：14-19.

[6] WU Qingbo，CHEN Qiuling. Application of membrane separation technology in water treatment process[J]. IOP Conference Series：Earth and Environmental Science，2020，508(1)：012048.

[7] 郭淑娟，郑利军，贺占超，等. 面向工业反渗透浓水零排放的膜浓缩技术研究进展[J]. 工业用水与废水，2021，52(6)：1-5.
GUO Shujuan，ZHENG Lijun，HE Zhanchao，et al. Research progress of membrane concentration tech-

nology in zero discharge of industrial reverse osmosis concentrate[J]. Industrial Water & Wastewater, 2021, 52(6): 1-5.

[8] 马双忱，范紫瑄，武凯，等. 低温烟气预浓缩脱硫废水过程中 SO_2 溶解行为实验研究[J]. 动力工程学报，2019，39(12)：981-988.
MA Shuangchen, FAN Zixuan, WU Kai, et al. Experimental study on SO_2 dissolution behavior during FGD wastewater pre-concentration with low-temperature flue gas[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(12): 981-988.

[9] 沈九兵，谭牛高，肖艳萍，等. 多效 MVR 蒸发浓缩水处理系统研究[J]. 工业水处理，2022，42(7)：147-153.
SHEN Jiubing, TAN Niugao, XIAO Yanping, et al. Study on multi-effect MVR evaporation concentrated water treatment system[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(7): 147-153.

[10] 白炎武，刘平元，陆启亮，等. 脱硫废水烟道蒸发技术蒸发特性实验研究[J]. 动力工程学报，2019，39(2)：135-141.
BAI Yanwu, LIU Pingyuan, LU Qiliang, et al. Experimental research on evaporation characteristics of desulfurization wastewater by flue evaporation treatment[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(2): 135-141.

[11] LI Zongkun, MA Xiaoqian, LIAO Yanfen, et al. Characteristics analysis and parameters optimization of desulfurization wastewater evaporation in a rotary spray drying tower[J]. Powder Technology, 2022, 399: 117211.

[12] 张娟，曹兆军，史海红，等. 燃煤电厂脱硫废水分型与浓缩过程的盐类析出规律[J]. 动力工程学报，2022，42(1)：67-74.
ZHANG Juan, CAO Zhaojun, SHI Haihong, et al. Salt precipitation behaviors of classification and concentration process for desulfurization wastewater in coal-fired power stations[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(1): 67-74.

[13] 尉凤珍，方向红. 真空蒸发浓缩装置在核放射废水处理中的应用试验[J]. 工业水处理，2009，29(9)：62-65.
WEI Fengzhen, FANG Xianghong. Experimental research on the vacuum evaporating device and its application to the treatment of radioactive wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2009, 29(9): 62-65.

[14] 刘天柱，赵东风，李石，等. 平流热压缩多效蒸发浓缩高含盐废水的热性能分析[J]. 科学技术与工程，2015，15(1)：106-111.
LIU Tianzhu, ZHAO Dongfeng, LI Shi, et al. Analysis of thermal properties on parallel feed MED-TVC concentrating high-salinity wastewater[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(1): 106-111.

[15] 肖枫，叶楷，汤倩，等. 印染废水闪蒸特性实验及影响分析[J]. 福州大学学报(自然科学版)，2025，53(1)：119-126.
XIAO Feng, YE Kai, TANG Qian, et al. Experimental study and impact analysis on flash evaporation characteristics of dyeing wastewater[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2025, 53(1): 119-126.

[16] 王峰，许勇毅，刘艇安，等. 低温闪蒸耦合旁路干燥废水零排放技术的应用[J]. 洁净煤技术，2024，30(增刊 2)：663-668.
WANG Feng, XU Yongyi, LIU Tingan, et al. Application oflow-temperature flash evaporation concentration coupled bypass drying technology for zero discharge of desulfurization wastewater[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(Sup 2): 663-668.

[17] 侯致福，魏晓仪，邢树涛，等. 300 MW 机组低温余热闪蒸脱硫废水零排放技术应用研究[J]. 华电技术，2020，42(3)：31-36.
HOU Zhifu, WEI Xiaoyi, XING Shutao, et al. Research on low-temperature waste heat flash evaporation technology applied in desulfurization wastewater zero discharge of 300 MW units[J]. Huadian Technology, 2020, 42(3): 31-36.

[18] CUI Xiangzheng, WANG Zhikang, XIAO Rihong, et al. Heavy metal migration and enrichment in desulfurization wastewater during low-temperature triple effect evaporation process[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 478: 143989.

[19] 马双忱，刘道宽，李洋，等. 脱硫废水低温烟气浓缩过程中氯挥发研究[J]. 煤炭学报，2022，47(增刊 1)：365-375.
MA Shuangchen, LIU Daokuan, LI Yang, et al. Study on chlorine volatilization in low temperature flue gas concentration of desulphurization wastewater [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(Sup1): 365-375.