

高矿化度矿井水处理技术及资源化利用研究

张春海

山东能源集团西北矿业有限公司 710000

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15762

[摘要] 本文聚焦高矿化度矿井水处理技术及资源化利用,深入剖析现有处理技术的特点与不足,创新性地提出新的处理思路与方法,探讨水资源及矿物质的资源化利用途径,为实现矿井水的高效处理与可持续利用提供理论支持。

[关键词] 高矿化度矿井水; 处理技术; 资源化利用; 创新方法

引言:

高矿化度矿井水的处理与利用是矿业领域面临的重要问题。传统处理技术存在成本高、效率低等问题,且对矿井水的资源化利用不足。开展高矿化度矿井水处理技术及资源化利用研究,对于减少环境污染、提高水资源利用效率具有重要意义。

1. 高矿化度矿井水现状分析

1.1 水质特征

高矿化度矿井水最显著的特征是总溶解固体含量高,通常在 1000mg/L 以上,部分矿区可达 10000mg/L,水中含有大量可溶性盐类,包括钠离子、钙离子、氯离子、硫酸根离子等,不同地区主导离子存在较大差异,比如内蒙古、山东某些矿区,矿井水以硫酸根离子为主,甘肃、青海、新疆等地区,氯离子占比上升。这些离子的存在使水体导电性强,硬度和酸碱度也常偏离正常范围,部分矿井水 pH 值低于 6.5 或高于 8.5。水质成分受地质条件影响显著,在煤系地层中,矿井水可能伴随铁、锰离子,呈现出浑浊的黄褐色;在含石膏的岩层区域,硫酸根离子含量尤其突出,导致水体具有较强的腐蚀性,年腐蚀速率可达 0.3 毫米/年。此外,这类矿井水往往含有悬浮颗粒物、有机污染物及少量重金属,悬浮颗粒物浓度通常在 1000~3000mg/L,井下条件恶劣时,悬浮物可达 10000mg/L,化学需氧量在 50~250mg/L,铅、镉等重金属浓度多在 0.01~0.1mg/L。某矿区的矿井水检测显示,其总溶解固体含量是普通地下水的 50 倍,长期暴露在空气中易产生白色盐析现象,直接影响水体的感官性状和使用价值。

1.2 排放现状

高矿化度矿井水的排放量随着煤炭开采规模扩大而逐年增加,我国北方干旱半干旱地区及西南高盐地层矿区年排放量已达 20 亿吨以上,其中 70%未经深度处理直接排放。这些矿井水多数仅经过简单沉淀后用于低洼地带的灌溉,处理后

悬浮物浓度仍达 30mg/L 以上,难以满足水质要求较高的生产、生活用水。部分中小型煤矿缺乏完善的水处理设施,年排放量约 5 亿 t,直接排入附近河流或沟渠,导致受纳水体盐度每年上升 50~100mg/L,影响水生生态系统。大型煤矿虽配备处理设备,但处理工艺多针对悬浮物和部分重金属,对高矿化度的去除效果有限,处理后水的总溶解固体含量仍超过回用标准,难以利用,年排放量约 8 亿 t。在水资源短缺的矿区,这种“采水即排”的模式既浪费了宝贵的水资源,又增加了污水处理成本,处理成本达 8~15 元/吨,形成“缺水与污染并存”的矛盾局面。

2. 现有处理技术剖析

2.1 物理处理技术

物理处理技术主要通过分离、过滤等方式去除水中的悬浮物和部分盐分,常用方法包括沉淀、过滤、膜分离等。沉淀法利用重力作用使水中的悬浮颗粒物下沉,通常需添加絮凝剂加速沉淀过程,能使悬浮物浓度从 100~500mg/L 降至 20~50mg/L,有效降低水体浊度,但对溶解态的盐类几乎无去除作用。过滤法通过石英砂、活性炭等滤料截留水中的细小颗粒,进一步净化水质,可将悬浮物浓度降至 5~20mg/L,部分滤料还可吸附少量有机物,使化学需氧量下降 10~30%,但处理后水体的矿化度仍保持较高水平。膜分离技术是物理处理中去除盐分效果较好的方法,通过反渗透膜的选择性透过性,将水分子与盐离子分离,能使总溶解固体含量从 10000mg/L 以上降至 500mg/L 以下,去除率达 95%以上。然而,膜分离过程中易出现膜污染和浓差极化现象,膜寿命仅 1~3 年,需要频繁清洗和维护,处理成本达 10~20 元/吨,在高盐矿井水处理中应用范围受限。某矿区采用超滤膜处理矿井水,虽使悬浮物去除率达 90%以上,但总溶解固体含量仅下降不足 10%,难以满足回用要求。

2.2 化学处理技术

化学处理技术通过化学反应改变水中盐分的存在形态,实现脱盐或固盐目的,主要包括化学沉淀、离子交换、电渗析等。化学沉淀法向水中投加化学药剂,使特定离子形成难溶性沉淀物,如投加碳酸钠去除钙离子,可使钙离子浓度从500mg/L降至50mg/L以下,或通过浓缩富集形成硫酸钙同步去除硫酸根和钙离子,去除率达80%以上,该方法操作简单,但会产生大量化学污泥,污泥产生量达处理水量的1-3%,处理不当易造成二次污染。离子交换法利用树脂对水中的离子进行选择吸附,通过阳离子交换树脂和阴离子交换树脂的组合,可使总溶解固体含量从10000mg/L降至500mg/L以下,处理后水质较好。但树脂再生过程需消耗大量酸碱,每吨树脂再生需消耗盐酸50-100kg、氢氧化钠30-60kg,运行成本达8-15元/吨,且再生废液处理难度大。电渗析技术在水场作用下,利用离子交换膜的选择透过性使盐离子定向迁移,实现水体脱盐,对中等矿化度矿井水的脱盐率达70-80%,能耗为3-5千瓦时/吨。但对于高矿化度水体,总溶解固体含量超过20000mg/L时,电耗显著增加至8-15千瓦时/吨,且膜易受污染,使用寿命缩短至1-2年,影响处理效率和使用寿命。

2.3 生物处理技术

矿井水中的COD主要是煤粉所致,其次是由于井下工作人员的便溺和落入水中的各种动植物残骸所致。生物处理技术利用微生物的代谢作用降低水中的污染物含量,主要用于去除矿井水中的有机污染物和部分还原性无机物,对高矿化度的直接去除效果有限。其次,20世纪70年代末,美国部分煤矿将“人工湿地生态工程技术”应用于酸性矿井水处理,不仅可以提高水中的pH值,同时可去除部分铁、锰、硫酸根、钙、镁等。

厌氧生物处理则在无氧环境下,利用厌氧菌将复杂有机物分解为甲烷等简单物质,甲烷产量可达0.3-0.5立方米/公斤化学需氧量,适用于高浓度有机污染的矿井水处理,应用案例较少。生物处理技术成本低,运行成本仅1-3元/吨,运行稳定,但受盐度影响较大,总溶解固体含量超过5000mg/L时,微生物活性下降50%以上,导致处理效率下降。为提高微生物的耐盐性,可通过驯化培养耐盐菌种或投加生物促生剂,增强微生物在高盐环境下的代谢能力。某矿区采用序批式生物反应器处理矿井水,经耐盐菌驯化后,有机污染物去除率提升至70%,但对盐离子的去除率仍不足5%,需与其他技术联合使用才能实现脱盐目标。

3. 资源化利用途径探索

3.1 水资源回用

高矿化度矿井水经深度处理后,可作为工业用水或农业用水实现资源化回用。处理达到工业循环冷却水标准的矿井水,总溶解固体含量控制在1000mg/L以下,可用于煤矿井下防尘、设备冷却和地面喷淋系统,单矿年用水量可达50-100万吨,减少对新鲜水资源的依赖。在火力发电厂,经脱盐处理的矿井水总溶解固体含量降至100mg/L以下,可作为锅炉补给水,单厂年用水量可达100-500万吨,其水质稳定性通过严格控制总溶解固体和硬度来保障。农业灌溉回用方面,处理后的矿井水总溶解固体含量控制在1000mg/L以下,可用于棉花、甜菜等农作物(非盐碱土地区 $\leq 1000\text{mg/L}$,盐碱土地区 $\leq 2000\text{mg/L}$),灌溉面积可达1000-5000亩。部分矿区将处理后的矿井水用于生态补水,注入人工湿地或景观水体,年补水量达10-50万吨,改善矿区生态环境。某煤矿通过“预处理-反渗透-深度净化”工艺处理矿井水,出水用于井下综采工作面喷雾降尘和选煤厂生产用水,年节约新鲜水50万吨,同时减少了废水排放量。

3.2 矿物质提取

高矿化度矿井水中富含的盐类物质可通过提取工艺转化为有价值的化工产品。利用蒸发结晶技术,根据不同盐分的溶解度差异,可分别提取氯化钠、硫酸钠、硫酸镁等晶体,氯化钠纯度可达95%以上,年产量可达处理水量的1-3%,这些产品可用于化工、建材、食品加工等行业。对于含钾量较高的矿井水,钾离子浓度达50-200mg/L时,采用离子交换法或溶剂萃取法提取氯化钾,提取率达70-80%,作为钾肥原料,适用于农业生产,年钾肥产量可达1000-5000吨。提取矿物质后的母液可进一步处理,实现零排放。某高盐矿井水处理项目通过多效蒸发和分步结晶工艺,年处理矿井水100万吨,提取工业盐2万吨,产品纯度达到95%以上,不仅降低了水处理成本,还创造了数百万元的经济效益,形成“以水养水”的良性循环。

3.3 能源回收

高矿化度矿井水在处理过程中可伴随能源回收,主要体现在余热利用和生物质能源转化两个方面。部分矿井水温度较高,尤其是深部开采的矿井水,水温可达30-50℃,水量达100-500t/h,通过热泵技术可回收其中的热能,制热功率达50-200kw,用于矿区供暖或热水供应,年节约标准煤500-2000t。矿井水中的有机污染物经厌氧生物处理后产生的

沼气, 甲烷含量达 60-70%, 产气量达 0.3-0.5 立方米/吨水, 可作为燃料用于发电或供暖, 发电功率达 100-500kw, 实现能源的梯级利用。某矿区将温度为 42℃ 的矿井水通过地源热泵系统进行热量回收, 满足了矿区办公楼和职工宿舍的供暖需求, 供暖面积达 10000m³, 年节约标准煤 1000t; 同时, 利用厌氧消化产生的沼气驱动发电机, 为水处理站提供 50 千瓦的电力, 降低了运行成本。

4. 创新对策与展望

4.1 新技术研发

针对现有技术的局限性, 应加强多技术协同处理工艺的研发, 提高处理效率并降低成本。开发低能耗的膜材料和膜组件, 增强膜对高盐水体的耐污染能力, 使膜寿命从 1-3 年延长至 3-5 年, 降低膜清洗频率和运行能耗, 将反渗透膜处理能耗从 5-8 千瓦时/吨降至 3-5 千瓦时/吨。研究新型吸附材料, 如改性活性炭、分子筛等, 提高对特定离子的选择性吸附能力, 对氯离子、硫酸根离子的吸附容量提升至 100-200mg/g, 实现盐类物质的高效分离。探索生物-化学联合处理技术, 利用耐盐微生物降低水中的有机物和还原性物质, 使化学需氧量去除率提升至 80%以上, 再通过化学方法脱盐, 减少化学药剂的使用量 30-50%。此外, 开发智能化处理系统, 通过在线监测和自动控制, 实时调整处理参数, 优化工艺运行状态, 使水处理的稳定性和可靠性提升 20-30%。某科研机构研发的“电渗析-蒸发结晶”耦合技术, 较传统工艺能耗降低 30%, 盐类回收率提升至 90%以上, 已在多个矿区进行中试应用。

4.2 政策支持建议

完善高矿化度矿井水处理及资源化利用的政策体系, 推动技术应用和产业发展。制定专门的矿井水排放标准和回用标准, 明确不同行业的水质要求, 如工业用水总溶解固体含量控制在 2500mg/L 以下, 沙漠绿植树水控制在 2000mg/L, 农业用水控制在 1000mg/L 以下, 引导企业开展深度处理。加大财政支持力度, 对矿井水处理及资源化利用项目给予 30-50% 的投资补贴或减免企业所得税, 降低企业的投资和运行成本。建立矿井水资源化利用的激励机制, 鼓励煤矿企业将处理后的水用于自身生产或对外供应, 对达到回用比例 70% 以上的企业给予每吨水 1-2 元的奖励。加强跨部门协作, 环保、水利、能源等部门联合制定规划, 统筹矿井水资源的开发、利用和保护, 每年投入 10-20 亿元用于技术研发和设施建设。此外, 建立技术推广平台, 组织开展技术交流和培

训, 每年培训技术人员 1000-2000 人次, 促进先进技术的普及应用。某省出台政策, 对矿井水回用率超过 70% 的煤矿企业, 减免水资源费和排污费, 每年为企业节约成本 100-500 万元, 有效调动了企业的积极性。

4.3 未来发展趋势

未来高矿化度矿井水处理及资源化利用将向高效化、低碳化、多元化方向发展。高效化体现在处理工艺的集成化和智能化, 通过多种技术的优化组合, 使总溶解固体去除率提升至 95% 以上, 处理速度提高 50%, 自动化水平提升至 80% 以上。低碳化要求减少处理过程中的能耗和碳排放, 开发可再生能源驱动的水处理技术, 如太阳能、风能结合膜分离或蒸发结晶工艺, 将处理能耗从 5-10 千瓦时/吨降至 2-5 千瓦时/吨, 碳排放量减少 30-50%。多元化则体现在资源利用的广度和深度上, 不仅实现水资源的回用和矿物质的提取, 还将拓展到余热回收、生物质能源利用等领域, 使资源综合利用率提升至 80% 以上, 形成多资源协同回收的产业链。此外, 随着智慧矿山建设的推进, 矿井水处理将与矿山整体信息化系统融合, 实现水质监测、处理工艺、资源利用的一体化管理, 提升矿井水资源的综合利用效益。

结束语:

通过对高矿化度矿井水处理技术及资源化利用的研究, 提出了一系列创新对策。未来需进一步加强技术研发与政策支持, 推动高矿化度矿井水的高效处理与资源化利用, 实现矿业的绿色可持续发展。

[参考文献]

- [1] 张明. 高矿化度矿井水深度处理技术研究[J]. 山西化工, 2024, 44 (06): 270-272.
- [2] 韩纪委, 迟冉. 矿井水深度处理系统膜污堵分析及优化方案[J]. 清洗世界, 2024, 40 (02): 16-18.
- [3] 郑海平, 王淑民, 王吉坤, 等. 我国煤矿矿井水处理技术研究进展及建议[J]. 煤化工, 2024, 52 (01): 92-96.
- [4] 武文. 煤矿矿井水深度处理工艺设计要点[J]. 山西化工, 2023, 43 (03): 233-234.
- [5] 顾良波. 煤矿综合废水处理及回用技术探讨[J]. 山西化工, 2023, 43 (01): 191-193.

作者简介: 张春海 (1990.07), 男, 汉族, 山东省平度市, 学士 (本科), /, 工程师, 煤矿矿井水处理, 山东能源集团西北矿业有限公司。