



移动扫码阅读

肖艳.煤矿高矿化度矿井水零排放处理技术现状及展望[J].能源环境保护,2021,35(2):7-13.

XIAO Yan. Current situation and prospect of zero discharge treatment technology for high mineralized mine water [J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(2): 7-13.

煤矿高矿化度矿井水零排放处理技术现状及展望

肖 艳

(中煤科工集团杭州研究院有限公司,浙江 杭州 311201)

摘要:为降低煤矿高矿化度矿井水对地表环境的污染,实现矿井水资源化利用,在地表生态环境脆弱地区,将高矿化度矿井水零排放处理势在必行。根据高矿化度矿井水水质特征和处理要求,介绍了预处理、浓缩、蒸发分盐等技术现状;其中,预处理技术包括除悬浮物、除铁锰、除有机物、除硬除硅技术,浓缩技术包括膜浓缩技术和蒸发浓缩技术,结晶分盐技术包括膜法分盐及热法分盐技术。结合不同类型的高矿化度矿井水水质和现有处理技术,给出三个高矿化度矿井水零排放处理工艺案例,包括进水和出水水质、处理规模、工艺流程和运行成本等。最后,建议根据不同类型高矿化度矿井水,制定零排放处理技术标准,形成技术体系;研发高效预处理除硬技术,开发抗污堵膜材料,提高膜浓缩倍率,降低投资与运行成本;有条件的矿区开展同类型高矿化度矿井水区域联合治理,浓盐水区域联合治理,杂盐资源化区域治理,提升经济效益和社会效益。

关键词:高矿化度矿井水;零排放;预处理;膜浓缩;结晶分盐

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)02-0007-07

Current situation and prospect of zero discharge treatment technology for high mineralized mine water

XIAO Yan

(Hangzhou Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Hangzhou 311201, China)

Abstract: In order to reduce the surface environment pollution of high mineralized mine water and realize the resource utilization of mine water, it is imperative to treat high mineralized mine water with zero discharge treatment technology in the area of fragile surface environment. According to the water quality characteristics and treatment requirements of high mineralized mine water, the current technologies of pretreatment, concentration, and evaporative crystallization were introduced. Pretreatment technology includes removing suspended substance, iron and manganese, organic matter, hardness and silicon. Concentration technology includes membrane concentration and evaporation concentration. Evaporative crystallization technology includes salt separation with membrane process and thermal process. Considering the different water qualities and existing treatment processes of high mineralized mine water, three zero discharge treatment cases were given, including influent and effluent water quality, treatment scale, technological process and operation cost. Finally, it was suggested to formulate zero discharge treatment technical standards and form a technical system based on different types of high mineralized mine water, develop efficient pretreatment and hardness removal technology, and develop anti fouling membrane materials to improve membrane concentration ratio and reduce investment and operation costs. To improve economic and social benefits, regional joint treatment of the same type of high mineralized mine

收稿日期:2021-02-03;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:中国煤炭科工集团科技创新创业资金专项重点项目(2018-2ZD001)

作者简介:肖艳(1984-),女,安徽濉溪人,副研究员,主要研究方向为给水与水处理治理。E-mail:hoho-xiao@163.com

water, high-concentrated brine and utilization of miscellaneous salts should be carry out if the condition permits.

Key Words: High mineralized mine water; Zero discharge; Pretreatment; Membrane Concentration; Evaporative crystallization

0 引言

煤炭长期以来为经济社会的发展和能源的安全稳定供应提供了有力保障,实现高质量发展、建设绿色智能矿井是未来一定时期内煤炭工业发展的主要目标^[1]。矿井水是煤炭开采的必然伴生产物^[2],由于受到开采活动及地质条件的影响,矿井水中含有悬浮物、油类、重金属、放射性、氟化物、矿化度等污染物^[3]。根据污染物种类的不同,将矿井水分为含悬浮物矿井水、高矿化度矿井水、酸性矿井水及含特殊污染物矿井水^[4]。高矿化度矿井水是指水中含盐量超过 1 000 mg/L 的矿井水^[5],主要分布在我国内蒙、新疆、陕西、山西、宁夏等缺水地区和山东、两淮等重要水利工程枢纽地区,约占矿井水总量的 1/3。因其矿化度高,常规工艺处理后无法满足生产和生活用水,通常作为灌溉用水或直接外排,导致土壤次生盐碱化、植物枯萎死亡,生态环境遭到破坏,水体质量环境恶化,影响供水水质。同时,我国是全球水资源最为紧缺的国家之一,人均可利用量不足 2 000 m³,且分布极不均匀,煤矿与水资源呈逆向分布^[6]。随着煤炭经济的快速发展,煤矿区水资源短缺矛盾日益突出,矿井水资源化利用是解决水资源供需矛盾、改善生态环境的有效途径^[7]。早期,高矿化度矿井水的处理多以利用为目的,处理方法主要以反渗透为主^[8-9],浓水直接外排或利用蒸发塘自然蒸发处理,如淮南谢桥煤矿^[10]、宁夏清水营煤矿^[11]、陕西黄陵煤矿^[12]等。腾格里沙漠污染事件后,蒸发塘处理方式被禁止。干旱地区及国家重要水利枢纽地区为确保供水水质,限制了外排水的含盐量,近期出台的环评[2020]63 号文要求外排矿井水含盐量小于 1 000 mg/L。高矿化度矿井水的零排放处理将是未来一定时期内煤矿污染治理的重点,也是实现绿色智能矿井的重要保障。笔者分析了国内高矿化度矿井水零排放技术的现状,并列举出几种典型案例,供高矿化度矿井水处理参考。

1 高矿化度矿井水水质特征

高矿化度矿井水的成因与采煤作业活动、气

候条件、地下水文地质条件密切相关^[13],不同地区矿井水中的含盐量及成分差异较大,一般矿井水中含盐量 2 000~10 000 mg/L,宁夏、新疆部分矿区矿井水含盐量高达 10 000~20 000 mg/L^[14]。同一煤矿不同采区所处地质结构及含水层不同,水质差异也较大,因此,确定处理工艺时需以长期水质监测结果为依据,且需要考虑水质的波动对工艺系统稳定性的影响。高矿化度矿井水离子构成中阳离子以 Na⁺为主,阴离子以 SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻为主,除上述主要离子外,常伴有一定量的 Ca²⁺、Mg²⁺和少量 Ba²⁺、Sr、F⁻、Fe 及 SiO₂,通常硬度比较高,易结垢。受中水回用及雨污分流不彻底的影响,部分矿井水中还含有少量生活污水,水中含有少量 COD_{Cr}、BOD₅ 等有机污染物,易引起膜污染^[15]。

2 高矿化度矿井水零排放处理技术现状

高矿化度矿井水零排放过程是利用物理化学方法将水中含盐量降低到满足使用或外排要求,最终得到合格产品水、结晶盐及少部分化学污泥。通常经过预处理、浓缩、结晶分盐三个阶段实现。

2.1 预处理技术

预处理是浓缩和结晶分盐的基础,为确保浓缩和结晶系统长期稳定运行,减少结垢、污堵及频繁清洗,需对浓缩前的高矿化度矿井水进行预处理,以去除水中悬浮物(SS)、Fe、Mn、油类、有机物、Ca²⁺、Mg²⁺等结垢因子,通常采用混凝澄清、砂滤、超滤、微滤、化学沉淀及氧化技术。

2.1.1 除悬浮物技术

由于受到开采活动的影响,矿井水中普遍含有悬浮物,一般含量为 200~500 mg/L,个别煤矿高达 1 000 mg/L 以上。在混凝剂和助凝剂作用下^[16],分子间静电斥力平衡遭到破坏,悬浮物相互碰撞形成絮体沉淀下来。常用的混凝剂以铝盐和铁盐为主,助凝剂以高分子聚合物聚丙烯酰胺为主。沉淀形式有平流式斜管沉淀池、水力循环澄清池、机械搅拌澄清池、高密度澄清池及磁絮凝技术^[17]。平流式斜管沉淀池占地面积大、排泥系统复杂、常出现斜管坍塌现象,目前已逐步被淘

汰。磁絮凝技术是在混凝阶段投加磁粉^[18],使絮体带有磁性,可利用磁盘机将絮体快速分离,再利用磁种回收系统将磁粉回收,占地面积省、实施快,目前常用于井下水处理,实际运行中,因聚丙烯酰胺投加量较大,水中残留的部分药剂造成后续过滤系统滤料、膜表面堵塞,且出水 SS 较高,需要二次混凝沉淀。水力循环澄清池、机械搅拌澄清池、高密度澄清池集混凝沉淀于一体,泥渣循环,药剂投加量省,处理负荷高、运行效果稳定,出水 SS 可小于 10 mg/L,是目前高矿化度矿井水预处理除悬浮物常用的工艺技术。

2.1.2 除铁、锰技术

受地下水水质影响,部分矿区矿井水中铁、锰含量较高,通常地下水中铁和锰以二价离子形式存在,在接触到空气或者加氯处理后,会转化成三价难溶性胶体颗粒沉积在膜表面或因铁细菌滋生加剧膜生物污染^[19]。传统的除铁锰方法先利用空气或化学药剂(NaClO 、 KMnO_4)氧化处理,再通过介质过滤去除,或直接采用锰砂滤料过滤除铁^[20-21]。为节省占地,出现了氧化—微滤/超滤新技术。此外,当铁离子含量 ≤ 0.05 mg/L 时,可用离子交换方式,采用投加阻垢剂的方式也能有效抑制铁锰污染。实际工程中,为节省投资和运行成本,通常将铁锰与悬浮物或硬度一起去除。

2.1.3 除有机物技术

矿井水中少量有机污染主要来源于井下生产活动和地面中水利用系统,有机物会造成膜的生物污染或堵塞,导致膜性能衰减。随着膜在高矿化度矿井水中的普遍应用,矿井水中的有机污染也逐渐被重视。目前采用的处理技术主要有化学氧化、活性炭吸附、膜分离技术。化学氧化有加氯、臭氧、芬顿等技术,加氯主要是抑制微生物生长,一般作为常规手段,臭氧、芬顿能够有效降低水中的 COD。活性炭吸附技术通常与臭氧联合使用,因设计参数选取、运行不当的原因,活性炭吸附存在生物污染风险,一般采用增加滤床深度、降低滤速来降低微生物污染。在 RO 前采用微滤或超滤预处理也是降低有机物浓度的有效手段,实际应用中,常采用加氯、臭氧、活性炭吸附、微滤或超滤几种方式组合协同去除有机物。

2.1.4 除硬除硅技术

高矿化度矿井水中普遍存在一定量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- ,以暂时硬度或永久硬度的方式存在,零排放过程会引起膜、蒸发结晶设备的结

垢^[22]。除硬技术有化学药剂法、离子交换法、晶种法及阻垢剂技术^[23-24]。药剂软化有石灰软化和双碱法^[25],石灰法药剂成本较低,但产泥量大,污泥处置费用高;双碱法产泥量小,但药剂成本较高。实际工程中要根据硬度的组成成分、高低、污泥处置途径核算成本,选取经济、适宜的方法。药剂法除硬过程产生的沉淀物通常采用混凝、沉淀、过滤的方式去除,常用的构筑物形式有机械加速澄清池、高密沉淀池、V 型滤池。当规模较小或用地较为紧张时,管式超滤是一种高效的替代方式,硬度可降低至 20 mg/L 以下,硅可降低至 10 mg/L 以下^[26]。晶种法主要针对高硫酸盐高硬度矿井水,通过投加晶种诱导 CaSO_4 结晶^[27],同步去除水中的 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} ,但因局限性故应用较少。离子交换法是除硬较为彻底的一种方法,目前对 Ca^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 的去除率大于 99.5%,因再生液需要无害化处理,故运行成本高,一般与药剂软化协同分步使用。投加阻垢剂是通过阻垢剂分散作用抑制膜结垢。除硬技术的选择应兼顾效率和运行成本,目前较为经济有效的方式是投加阻垢剂、化学药剂软化及离子交换分步协同技术^[28]。

2.2 浓缩技术

高矿化度矿井水浓缩是实现零排放的关键步骤,其目的是提高矿井水中的盐浓度,达到蒸发结晶分盐技术指标和经济性要求。目前,高矿化度矿井水零排放已有的浓缩技术包括膜浓缩工艺和蒸发浓缩工艺,膜浓缩工艺包含两级 BWRO+SWRO 浓缩、BWRO+SWRO+DTRO 浓缩、BWRO+SWRO+ED 浓缩、高效反渗透(HERO)技术,蒸发浓缩包括 MVR 降膜浓缩和 MED 多效蒸发,也有采用膜浓缩与蒸发浓缩协同技术,具体工艺的选择需要依据水质、水量及热源进行经济性分析而定。

2.2.1 膜浓缩技术

膜浓缩技术是利用膜对水中各组分具有选择性透过,实现水中盐的提浓。随着膜在水处理领域的广泛应用,膜成本逐步降低,技术不断完善成熟。膜技术具有自动化程度高、占地面积省、产水稳定、集成度高等优点。目前,在高矿化度矿井水浓缩处理中采用的膜技术主要包括纳滤(NF)、反渗透(RO)和电渗析(ED)技术^[29]。

纳滤膜技术是利用膜自身的带电性和筛分性特点,对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等二价离子截留,具有操作压力低、通量高、投资低的特点,对二价盐的截

留率可以达到 92% 以上,一价盐截留率较低。目前,常用纳滤膜将二价盐和一价盐分离,提高盐品质,如中天合创矿井水零排放项目^[30]。

反渗透技术起初主要用于海水淡化、地下苦咸水利用,随着各行业水处理零排放技术的发展,出现了各种形式的抗污染膜、高压膜,如 DTRO、HERO、STRO 等,DTRO 和 STRO 是从垃圾渗滤液浓缩分离发展起来的,脱盐率一般可达 85% 以上,较常规反渗透膜脱盐率低,对预处理要求不高,因流道宽、抗污染性强、操作压力高,目前在煤化工废水零排放中应用较多^[31]。HERO 技术是常规反渗透技术的一种改进,在反渗透前利用离子交换去除水中全部硬度,反渗透在高 pH 条件下运行,降低了膜的污染或结垢,回收率可达 80%,较常规反渗透稍高,但大规模的集中除硬导致预处理投资和运行成本均较高,目前在高矿化度矿井水零排放中应用较少^[32]。

电渗析(ED)技术是一种电驱动膜分离技术,阴阳离子在电流作用下不断透过阳膜和阴膜进入浓水室,使盐浓度不断提高。随着膜材料的发展,电渗析膜耐污染性、抗腐蚀性、抗氧化能力显著增强,浓差极化现象得到解决。电渗析的回收率可

达 70%~85%,浓水盐浓度可达 200 g/L,较反渗透技术水量减少 1/3~1/2,对应可减小蒸发结晶规模,节省了蒸发结晶的投资和运行成本。因此,近几年电渗析应用范围由苦咸水淡化、锅炉水软化等给水领域扩展到废水零排放领域^[33]。

实际工程中,膜浓缩阶段含盐量从 0.3%~0.5% 浓缩到 6%~10%。从技术角度和经济角度,都需要多种膜技术的组合,常见的组合方式有两级 BWRO+SWRO 浓缩、BWRO+BWRO/SWRO+DTRO 浓缩、BWRO+SWRO+ED 浓缩。两级 BWRO+SWRO 浓缩技术成熟可靠、投资最省、运行成本低,适用于膜驱动压力小于 80 bar 的场合,BWRO+BWRO/SWRO+DTRO 浓缩投资较高、运行成本较高,适用于驱动压力小于 120 g/L 的场合。BWRO+SWRO+ED 浓缩投资高、运行成本高、产水一般,适用范围比较广,一般为提高产水水质,将 ED 产水返回到前段膜系统循环处理,或在 ED 膜后增加一级 RO。各种组合方式均有一定的优缺点,一般两级 BWRO+SWRO 浓缩为首选工艺,当无法满足使用要求时,考虑采用 BWRO+BWRO/SWRO+DTRO 浓缩或 BWRO+SWRO+ED 浓缩。具体比较见表 1。

表 1 几种常见膜浓缩方式比较

Table 1 Comparison of several common membrane concentration methods

项目	两级 BWRO+SWRO 浓缩	BWRO+BWRO/SWRO+DTRO 浓缩	BWRO+SWRO+ED 浓缩
浓缩效果	浓水含盐量可达 60~80 g/L	浓水含盐量可达 80~120 g/L	浓水含盐量可达 200 g/L
投资	膜元件成本低,投资最省	DTRO 膜元件成本高,投资较高	投资高
运行成本	最低	较高	高
技术成熟性	成熟	较成熟	一般
产水水质	最好(≤200 mg/L)	好(≤500 mg/L)	较好(≤1 000 mg/L)
适用性	适用于膜驱动压力小于 80 bar 以下	适用于膜驱动压力小于 120 bar 以下	适用范围广

2.2.2 蒸发浓缩技术

蒸发浓缩是采用加热浓缩的方式,主要包括多效蒸发(MED)和机械蒸汽再压缩(MVR)蒸发浓缩^[34]。MED 是后一效利用前一效的二次蒸汽为热源、多效串联的蒸发方式,一般单效蒸发吨水蒸汽耗量为 1.0 t,二效为 0.57 t,三效为 0.4 t,效数越多,蒸汽耗量就越省,同时基建投资也越大。综合运行成本与投资,一般采用二效或三效蒸发较多。MED 蒸发浓缩应用灵活,对来料浓度适应范围广,有电厂余热可利用或自建锅炉的煤矿常采用 MED 蒸发浓缩。MVR 蒸发浓缩是利用蒸汽压缩机将物料蒸发的二次蒸汽升压升温,作为热源对来料进行加热^[35]。相对于 MED 工艺来说,最

大程度回收了蒸汽的热能,因此更节能,较 MED 工艺节省能耗 20%~30%,运行成本低,占地面积也较小,设备相对简单,受温升限制,MVR 的操作性不如 MED 灵活,适用范围不如 MED 广,一般用于蒸汽成本高或没有蒸汽源的场合。目前,废热资源相对较多的化工厂常采用蒸发浓缩,煤矿矿井水零排放采用蒸发浓缩的案例极少见,有采用膜浓缩与蒸发浓缩耦合,可以提高整个系统的抗结垢、抗腐蚀能力,降低项目整体投资。

2.3 结晶分盐技术

结晶分盐是高矿化度矿井水零排放的最后一道工序,杂盐一般作危废填埋处置,处置成本高,结晶分盐则将浓盐水中盐以单质盐的形式分离出

来,可作为资源利用。目前主要有膜法分盐和热法分盐两种。膜法分盐是在膜浓缩阶段利用纳滤将水中一价盐和二价盐分离^[36],再分别进行蒸发结晶,得到高品质单质盐,工艺较复杂,投资较高,运行成本较高,纳滤膜耐污染性能差,一般1年就要更换,使用寿命短。一般用在以下场合:来水水质波动较大;两种结晶盐处于共饱和,热法结晶无法分盐;水中主要以二价盐为主,将二价盐分离出后产水便可满足要求。热法分盐是利用不同单质盐在一定饱和蒸汽压下溶解度不同,达过饱和和结晶析出^[37],矿井水中盐以 Na_2SO_4 和 NaCl 为主,与水组成三元体系,三元体系中 Na_2SO_4 溶解度随温度升高变化较大, NaCl 较为平缓。因此,为提高结晶盐纯度、减少杂盐产量,常采用热法+冷冻结晶结合技术,即先高温蒸发结晶得到 Na_2SO_4 结晶盐,再对其母液进行冷冻结晶,得到 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,通常可以控制杂盐率小于8%, Na_2SO_4 结晶盐可达《工业无水硫酸钠》(GB/T 6009—2014) I类一等品, NaCl 结晶盐达《工业盐标准》(GB/T

5462—2016)精制工业盐一级品。

3 高矿化度矿井水零排放处理典型工艺

3.1 典型工艺一

某矿应地方环保部门要求,矿井水要实现零排放,处理后的产品水满足饮用水要求。原水中TDS含量为2 505 mg/L,总体处理规模为600 m³/h,一期300 m³/h,预处理段工艺采用过滤除铁、超滤及离子交换软化工艺,浓缩段工艺采用BWRO+SWRO+DTRO工艺,蒸发结晶分盐段采用三效蒸发工艺,工艺流程见图1。最终产品水满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),TDS ≤ 300 mg/L,硫酸钠符合GB/T 6009—2014工业硫酸钠Ⅲ类合格品,氯化钠符合GB/T 5462—2016日晒工业盐二级指标,项目总投资1.35亿元,日吨水投资1.02万元,水处理直接运行成本5.12元/吨水,综合运行成本7.89元/吨水,系统综合水回收率96.5%。

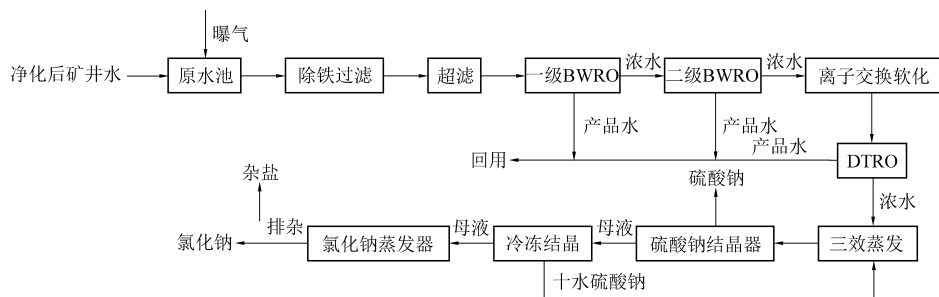


图1 高矿化度矿井水零排放处理典型工艺一

Fig.1 Typical zero discharge treatment process of high salinity mine water I

3.2 典型工艺二

某矿应地方环保部门要求,外排水含盐量不超过1 600 mg/L,硫酸盐不超过650 mg/L,实际水中含盐量4 500 mg/L,硫酸盐2 500 mg/L,设计规模590 m³/h。预处理段采用超滤、两级药剂软化及管式微滤分步协同预处理工艺,膜浓缩段采用BWRO+SWRO+ED工艺,蒸发结晶段采用MVR热法结晶分盐工艺,工艺流程见图2。最终产品水满

足中水再生利用标准,TDS ≤ 1 000 mg/L, SO_4^{2-} ≤ 250 mg/L, Cl^- ≤ 250 mg/L,硫酸钠符合GB/T 6009—2014工业硫酸钠Ⅱ类一等品,氯化钠符合GB/T 5462—2016精制工业盐二级指标,项目投资1.4亿,日吨水投资1.08万元,水处理直接运行成本6.4元/吨水,综合运行成本8.14元/吨水,系统综合水回收率97%。

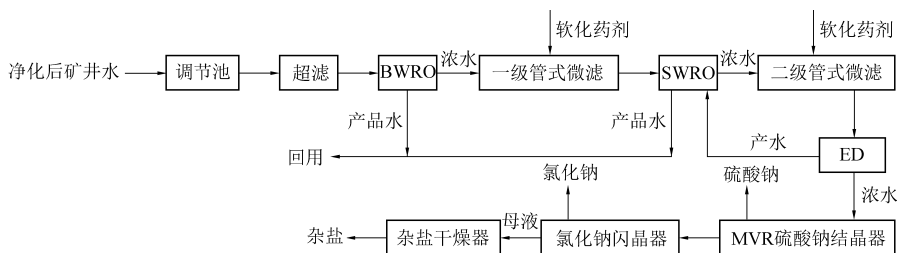


图2 高矿化度矿井水零排放处理典型工艺二

Fig.2 Typical zero discharge treatment process of high salinity mine water II

3.3 典型工艺三

某地区外排矿井水要求满足《地表水环境质量标准》表 1 Ⅲ类和表 2 指标要求,外排水含盐量 3 000 mg/L,其中 SO_4^{2-} 860 mg/L、 Cl^- 380 mg/L,设计规模 30 000 m^3/d 。预处理段采用三级超滤、两级高密度药剂软化、两级离子交换及臭氧分步协同预处理工艺,膜浓缩段采用 BWRO+BWRO/SWRO+HPNF/HPRO 工艺,蒸发结晶段采用膜法分盐结

晶工艺,工艺流程见图 3。最终产品水满足《地表水环境质量标准》Ⅲ类, $\text{TDS} \leq 1\ 000\ \text{mg/L}$, $\text{SO}_4^{2-} \leq 250\ \text{mg/L}$, $\text{Cl}^- \leq 250\ \text{mg/L}$,硫酸钠符合 GB/T 6009—2014 工业硫酸钠Ⅱ类一等品,氯化钠符合 GB/T 5462—2016 精制工业盐二级指标,项目投资 3.8 亿,日吨水投资 1.26 万元,水处理直接运行成本 8.2 元/吨水,综合运行成本 10.3 元/吨水,系统综合水回收率 97%。

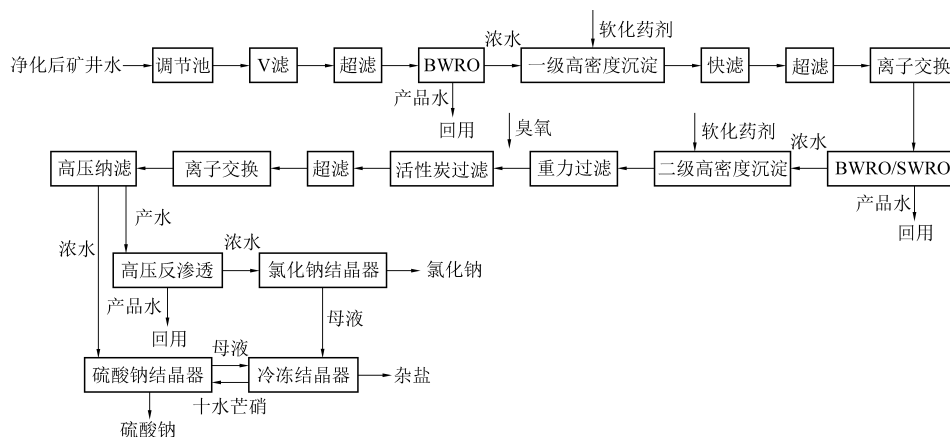


图 3 高矿化度矿井水零排放处理典型工艺三

Fig.3 Typical zero discharge treatment process of high salinity mine water III

三种典型工艺涵盖了目前国内高矿化度矿井水零排放主要技术,从工艺流程复杂程度、吨水投资和运行成本角度来看,工艺三采用膜法分盐,流程较复杂,吨水投资高出 16%~23%,运行成本高出 20%以上。

4 高矿化度矿井水处理技术展望

(1)不同煤矿高矿化度矿井水离子构成存在较大差异,可分为 Na_2SO_4 为主型、 NaCl 为主型、 Na_2CO_3 为主型、混合型四种,不同类型的高矿化度矿井水零排放处理都有其最经济工艺技术路线。目前,高矿化度矿井水技术还处于快速发展阶段,技术主导单位有科研院所、设计院、环保公司及设备厂家,各家主导技术均存在一定差异,尚缺少成熟的高矿化度矿井水处理技术体系或技术标准。因此,建议从行业发展角度出发,由行业环保专业委员会组织科研院所、设计院与重点环保企业制定相关技术标准,形成高矿化度矿井水零排放技术体系,指导国内矿区矿井水零排放项目设计、建设及运营。

(2)高矿化度矿井水零排放处理中除硬系统、高压膜及蒸发结晶系统的投资较高,运行能耗、药剂消耗比较大,且除硬效果的好坏直接影响膜系统和蒸发结晶系统运行稳定性,严重时甚至会对

膜造成不可逆转的破坏。通常,除硬药剂成本约占总成本的 1/5~2/5,膜系统和蒸发结晶系统能耗占总成本的 3/8~1/2。因此,研发高效预处理除硬技术、开发抗污堵膜材料、提高膜浓缩倍率、降低投资与运行成本是高矿化度矿井水零排放的发展趋势。

(3)目前,高矿化度矿井水要求零排放的矿区主要集中在山东济宁、菏泽地区、内蒙地区以及陕西榆林地区,煤矿相对比较集中,但治理相对分散。当距离相对较近时,探讨开展同类型高矿化度矿井水区域集中治理的可能性;当距离相对较远时,管网造价相对较高,探讨浓缩后将高盐水集中处理的可能性,以提高单个项目处理规模,从而降低工程投资及运行维护费用。此外,杂盐目前是按危废处置,建议按区域将杂盐集中处理,进一步资源化,降低环境污染风险,减少运输成本,提高经济效益。

参考文献

- [1] 刘峰,曹文君,张建明,等.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J].煤炭学报,2021,41(1):1-15.
- [2] 高亮,周如禄,徐楚良,等.煤种与煤矿矿井水水质特性之间的相关性探讨[J].能源环境保护,2004,18(6):

- 46-48+62.
- [3] 李翔, 李德忠, 付志亮. 淮南矿区矿井水资源综合利用的新探索 [J]. 煤炭技术, 2010, 29 (12): 225-226.
- [4] 邵立南, 何绪文, 王春荣, 等. 基于层次分析-模糊综合评价的矿井水质量评价 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2008 (3): 450-453.
- [5] 国家发展改革委, 国家能源局. 煤炭工业发展“十三五”规划 [EB/OL]. (2016-12-30) [2021-2-15]. http://www.nea.gov.cn/2016-12/30/c_135944439.htm.
- [6] 何绪文, 杨静, 邵立南, 等. 我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策 [J]. 煤炭学报, 2008 (1): 63-66.
- [7] 郑艳辉, 任友山, 司井丹, 等. 开发利用矿井疏干水是解决缺水地区水资源紧缺的重要途径 [J]. 黑龙江水利科技, 2007, 35 (6): 123-124.
- [8] 郭中权, 冯曦, 李金合, 等. 反渗透技术在高硫酸盐硬度矿井水处理中的应用研究 [J]. 能源环境保护, 2006, 20 (3): 25-26.
- [9] 杨慧敏, 何绪文, 何咏. 反渗透技术用于高矿化度矿井水处理的研究 [J]. 水处理技术, 2009, 35 (10): 82-85.
- [10] 李翠, 毛维东, 陈永春, 等. 淮南矿区矿井水井下处理技术研究与应用 [J]. 能源环境保护, 2014, 28 (2): 20-22.
- [11] 郭中权. 高矿化度矿井水处理技术及应用 [J]. 矿业安全与环保, 2012, 39 (3): 72-74+95.
- [12] 肖艳, 刘海东, 郭中权, 等. 超滤-反渗透工艺处理高矿化度矿井水设计与运行 [J]. 中国给水排水, 2014, 30 (20): 94-97.
- [13] 冯启言, 王华, 李向东, 等. 华东地区矿井水的水质特征与资源化技术 [J]. 中国矿业大学学报, 2004 (2): 69-72.
- [14] 孙红福, 陈健, 李博, 等. 干旱地区煤矿高矿化度矿井水资源化利用 [J]. 煤炭工程, 2015, 47 (9): 117-119.
- [15] 毛维东. 矿井水反渗透处理膜污染的判断与预防 [J]. 煤炭工程, 2013, 45 (8): 98-100.
- [16] 毕狮宇, 李日强, 刘娜, 等. 煤矿矿井水的混凝处理 [J]. 安全与环境学报, 2009, 9 (1): 27-29.
- [17] 贾玉丽. 高悬浮物高矿化度矿井水资源化关键技术应用研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2015: 45-53.
- [18] 易洋, 张科, 王吉白. 一种高效快速去除矿井水悬浮物的技术: 2012 中国环境科学学会学术年会论文集 (第二卷) [C]. 北京: 中国农业大学出版社, 2012.
- [19] 王晓娜, 杨艳玲, 陈志和, 等. 地下水除铁除锰-超滤组合工艺的膜污染特性 [J]. 水处理技术, 2016, 42 (8): 115-119.
- [20] 肖艳, 周如禄, 郭中权. 矿井水井下除铁除锰装置的开发与应用 [J]. 煤矿机械, 2015, 36 (4): 239-241.
- [21] 王建兵, 蒋雯婷, 李亚男, 等. 改性锰砂滤料处理高铁锰煤矿矿井水 [J]. 环境工程学报, 2012, 6 (11): 3843-3848.
- [22] 王卉春. 矿井水中硫酸根及总硬度去除效果的试验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008: 55-60.
- [23] 肖艳, 周如禄, 郭中权. 石灰法降低矿井水硬度设备的研制与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 37 (8): 1-3.
- [24] 张克兵, 高杰, 郑彭生. 石灰法软化处理矿井水试验研究 [J]. 能源环境保护, 2015, 29 (1): 24-26+58.
- [25] 史元腾, 王小强, 寇光辉, 等. 反渗透浓盐水双碱法除硬与除硅工艺研究 [J]. 水处理技术, 2019, 45 (12): 110-112+117.
- [26] 胡林. 管式微滤膜在软化除硬单元中的设计与应用 [J]. 工业用水与废水, 2020, 51 (3): 68-71.
- [27] 唐章程, 黄廷林, 胡瑞柱, 等. 诱导结晶法软化热电厂高永久性硬度水实验研究 [J]. 水处理技术, 2019, 45 (1): 28-32+41.
- [28] 毛维东, 周如禄, 郭中权. 煤矿矿井水零排放处理技术与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45 (11): 205-210.
- [29] 崔玉川, 潘耀祖, 刘婷, 等. RO 法在高矿化度矿井水处理回用中的应用 [J]. 净水技术, 2006 (5): 4-6.
- [30] 荆波湧, 张孔思. 中天合创高盐矿井水深度处理工程工艺设计探讨 [J]. 煤炭工程, 2019, 51 (8): 9-14.
- [31] 李福勤, 赵桂峰, 朱浩浩, 等. 高矿化度矿井水零排放工艺研究 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46 (9): 81-86.
- [32] 董传德, 刘谩飞, 吕涛, 等. 煤矿矿井水零排放中试试验研究及结晶盐应用领域展望 [C] //中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集 (四). 2019: 743-747.
- [33] 何绪文, 张晓航, 李福勤, 等. 煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46 (9): 4-11.
- [34] 王丹, 蒋道利. 蒸发结晶技术在高含盐废水零排放领域的应用 [J]. 中国井矿盐, 2014, 45 (4): 7-10.
- [35] 王小强, 赵泽盟, 林金平. MVR 技术在矿井水零排放及资源化中的应用 [J]. 煤炭技术, 2020, 39 (2): 112-114.
- [36] 赛世杰. 纳滤膜在高盐废水零排放领域的分盐性能研究 [J]. 工业水处理, 2017, 37 (9): 75-78.
- [37] 郭海燕, 徐成燕, 俞彬. 石化行业高含盐废水的分盐零排放中试及应用 [J]. 中国给水排水, 2018, 34 (7): 99-102.