

高矿化度矿井水处理技术应用现状

刘遵义¹, 李小亮^{2,3,4}

(1. 国家能源集团 新疆能源有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830013; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013; 4. 煤基节能环保炭材料北京市重点实验室, 北京 100013)

摘要: 针对我国高矿化矿井水处理应用技术现状进行综述, 分析了高矿化度矿井水回用途径及相应的处理工艺与水质要求, 并对高矿化度矿井水的处理关键工艺单元进行分析, 主要从技术本身的特点、适应性及处理效果等方面进行讨论。重点介绍了常规处理工艺的混凝沉淀和过滤技术, 深度处理工艺的电渗析和反渗透技术, 零排放处理的浓缩和结晶技术。结果表明, 常规处理和深度处理工艺技术较成熟, 且在高矿化度矿井水处理中应用广泛。虽然浓缩和结晶工艺已有一定工程实践, 但由于受投资和运行成本等因素制约, 高矿化度矿井水的零排放工程案例较少, 因此, 今后在高矿化度矿井水零排放工程实践中, 应针对矿井水水质和分盐结晶资源化利用等要求选择合适的零排放工艺。

关键词: 高矿化度; 矿井水; 反渗透; 零排放; 结晶

中图分类号: O741 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2023)S2-0436-06

Application status of mine water treatment technology with high salinity

LIU Zunyi¹, LI Xiaoliang^{2,3,4}

(1. Xinjiang Energy Co., Ltd., CHN Energy, Urumqi 830013, China; 2. Beijing Research Institute of Coal Chemistry, CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China; 4. Beijing Key Laboratory of Coal Based Carbon Materials, Beijing 100013, China)

Abstract: The application treatment technology in mine water of high mineralized in China was summarized. The reuse ways of high salinity mine water and the treatment technology and water quality requirements were analyzed. The key process units of high salinity mine water treatment were analyzed from the aspects of technology characteristics, adaptability and treatment effect. The coagulation sedimentation and filtration technology of conventional treatment process, electro dialysis and reverse osmosis technology of advanced treatment process, concentration and crystallization technology of zero discharge treatment were introduced. The results show that the conventional treatment and advanced treatment technology has been relatively mature and widely used in the treatment of high salinity mine water. Although the concentration and crystallization process has a certain engineering practice, due to the constraints of investment and operation cost, there are few zero discharge engineering cases of high salinity mine water. Therefore, in the future, in the practice of zero discharge engineering of high salinity mine water, the appropriate zero discharge process should be selected according to the requirements of mine water quality and salt crystallization resource utilization.

Key words: high salinity; mine water; reverse osmosis; zero emission; crystallization

0 引言

据统计, 中国西北地区高矿化度矿井水比例超过 50%, 已成为制约西北地区煤矿发展最突出的问题之一。高矿化度矿井水是指溶解性总固体 (Total Dissolved Solids, TDS, 含盐量) 大于 1 000 mg/L 的矿井水, 这类矿井水含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO^{-} 、 Cl^{-} 等离子, 碱度较高。高矿化度矿井水危害

较大, 用于生产会腐蚀设备, 对外排放会破坏周边环境, 抑制水生物种的活动和繁殖, 长期排放引起土壤盐碱化等问题^[1-2]。国内部分地区在高矿化度矿井水的中水灌溉应用中, 出现了土壤严重盐碱化, 植物生长不良, 病害频发, 甚至枯死等生态问题。由于西部地区水环境和生态环境脆弱, 高矿化度矿井水的排放对生态安全构成严重威胁, 因此, 部分地区环保部门要求这类矿井水不能外排或经过深度脱盐满足

收稿日期: 2022-12-06; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.22120601

作者简介: 刘遵义 (1989—), 男, 河南商丘人, 工程师。E-mail: 864890525@qq.com

引用格式: 刘遵义, 李小亮. 高矿化度矿井水处理技术应用现状[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 436-441.

LIU Zunyi, LI Xiaoliang. Application status of mine water treatment technology with high salinity[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 436-441.

标准后排放。

形成矿井水中 TDS 原因有多种因素,如煤层中含有大量硫酸盐、碳酸盐类矿物质,会使矿井水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 等可溶性盐类物质增加;长期降水量小、干旱地区,由于蒸发量大,使地下水盐分浓缩,因此,中国西北部矿区易形成高矿化度矿井水水质,如新疆乌东煤矿矿井水 TDS 质量浓度最高超过 8 000 mg/L,是典型的高矿化度矿井水。

高矿化度矿井水一般按照分级处理方式回用,对矿化度要求较低的回用方式应优先使用,如矿区井下消防、降尘用水;对 TDS 含量要求较高的回用方式,如工业冷却用水,处理工艺除包括混凝、沉淀等常规工序外,还需进行深度处理脱盐。但经深度处理后会产生大量浓盐水,目前主要通过蒸发塘自然蒸发或灌浆

等方式处理浓盐水,但随着环保政策进一步收紧,高矿化度矿井水的零排放必将提上日程。笔者主要介绍高矿化度矿井水常规处理和深度处理技术的应用现状,并对零排放技术应用进行探讨,为今后制定高矿化度矿井水零排放的技术方案提供参考。

1 高矿化度矿井水处理及回用水质要求

GB/T 37758—2019《高矿化度矿井水处理与复用技术导则》给出高矿化度矿井水处理和复用的一般流程。高矿化度矿井水回用途径和满足标准要求见表 1。由表 1 可知,除煤炭分选、井下消防、降尘用水和景观用水外,其他用途均需深度处理。因此,矿区应该对高矿化度矿井水进行分级、分质利用,合理降低处理成本。

表 1 高矿化度矿井水复用和满足标准

用途	标准	工艺	
工业	煤炭分选	GB 50359—2016《煤炭洗选工程设计规范》	常规处理
	井下洒水、消防	GB 50383—2016《煤矿井下消防、洒水设计规范》	常规处理
	循环冷却水	GB 50050—2007《工业循环冷却水处理设计规范》	常规处理+深度处理
	锅炉用水	GB 12145—2016《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量标准》	常规处理+深度处理
	液压支架乳化液用水	MT 76—2011《液压支架用乳化油、浓缩液及其高含水液压液》	常规处理+深度处理
农业	农田灌溉	GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》	常规处理+深度处理
	养殖	GB 11607—1989《渔业水质标准》	常规处理+深度处理
城市杂用水(洒水、绿化等)	GB 18920—2016《城市污水再生利用城市杂用水水质》	常规处理+深度处理	
景观用水	GB 18921—2002《城市污水再生利用景观环境用水水质》	常规处理	
生活用水	GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》	常规处理+深度处理	

2 高矿化度矿井水处理工艺

2.1 工艺流程

高矿化度矿井水根据不同回用要求大致分为 3 个主要步骤,如图 1 所示。① 矿井水回用对象对 TDS 无限制要求,以去除悬浮物为目的,一般采用常规处理即可,典型的关键工艺包括混凝沉淀和过滤;② 回用对象要求 TDS 质量浓度 $\leq 1\ 000$ mg/L 或更低,如循环冷却水,需采用以脱盐为目的的深度处理,典型的关键工艺为超滤和反渗透,目前高矿化度

矿井水常用处理工艺只到第 2 步骤;③ 零排放处理是对反渗透浓盐水的后处理,使高矿化度矿井水达到零排放,包括浓缩和结晶 2 个关键工艺,以浓盐水减量为目的的浓缩处理,浓缩后的浓盐水 TDS 质量浓度 $\geq 60\ 000$ mg/L,产品水 TDS 质量浓度 $\leq 1\ 000$ mg/L,再对减量后浓盐水中 TDS 进行结晶固化处理,使其达到零排放目的。

2.2 常规处理工艺

矿井水常规处理的典型工艺包括混凝沉淀和过滤。

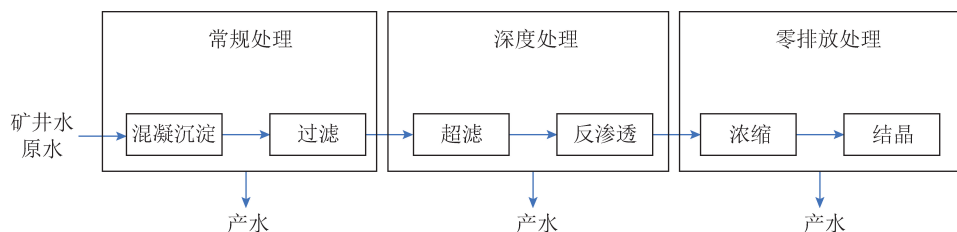


图 1 高矿化度矿井水处理工艺流程

2.2.1 混凝沉淀

混凝沉淀常用工艺包括高效沉淀池、高效旋流器和磁混凝沉淀等技术,这 3 种技术均较成熟,可根据不同要求选择合适的工艺。高效沉淀池应用面广,适用于饮用水生产和污水处理等领域,是一种紧凑、高效、灵活的污水处理工艺,高效沉淀池的工作原理为:通过回流污泥,同时加入药剂,使矿井水中悬浮物不断形成较大絮凝体,增大的絮凝体达到一定密度和半径后会增加沉淀速度,加速悬浮物沉淀。高效旋流器运用直流混凝、旋流分离、悬浮过滤、压缩沉淀的原理,使废水在短时间内实现多级高效净化,该工艺对水中 SS、COD、P、色度、浊度等去除率高,耐冲击负荷强,广泛用于河水、城镇污水、工业废水等领域。磁混凝沉淀是一种快速沉淀技术,其特点是在混凝阶段投加高密度的不溶介质磁粉颗粒作为加载物,利用磁粉的超高密度加速重力沉降及磁粉微表面吸附作用加快絮体的生长及快速沉淀,该工艺可提高絮凝体沉降速度,最高可降低用药量 30%,对总 P 去除率更有优势,一般出水水质稳定达到 SS 质量浓度 < 5 mg/L,总 P 质量浓度 < 0.2 mg/L,且磁粉回收率高达 99.5%。罗延歆^[3]、丁杨等^[4]和曹振兴等^[5]在不同煤矿矿井水治理上采用磁分离

净化技术,认为该技术占地面积小、设备可靠耐用和处理效率高,投资和运行成本较低、管理方便。

2.2.2 过滤

矿井水常规处理的过滤形式有重力式无阀滤池、快滤池和 V 型滤池等。重力式无阀滤池常与高效澄清池联合使用,采用石英砂和无烟煤的双层滤料方式,可有效去除水中悬浮物和胶体,能自动反冲洗,无需外加冲水水泵或水箱,运行管理简单,但其滤料层厚度较薄,自动反冲洗时反冲洗强度不易调节,当截留的悬浮物或胶体较多或滤层污染较严重时冲洗效果差。快滤池是指普通四阀快滤池,由滤池本体、冲洗设施、管廊及控制室组成,具有单层和双层滤料,大阻力配水系统,冲洗效果好,纳污能力强,其缺陷是操作管理复杂,单一水冲洗效果不及气水混合冲洗滤池^[6]。V 型滤池是基于快滤池优化改进而来,其水槽形状呈“V”字形,又称均质滤料滤池,该技术滤料层较厚,纳污能力强,采用气水反冲洗冲洗效果好,滤速高,占地面积小。3 种过滤工艺比较见表 2。3 种滤池都能达到预期的处理效果,技术成熟,但 V 型滤池工程投资低,运行稳定性高,纳污能力强,对水质波动影响较小。

表 2 过滤工艺对比

项目	重力式无阀滤池	快滤池	V 型滤池	优点
滤后出水	好	好	好	均能满足出水水质
纳污能力	较强	较强	强	V 型滤池为均质滤料,厚度大,纳污能力最强
反冲洗效果	一般	较好	好	V 型滤池为气水反冲洗,冲洗效果最好
占地面积	大	较小	较小	快滤池和 V 型滤池滤速高,占地面积较省
工程投资	高	较低	较低	快滤池和 V 型滤池投资较重力式无阀滤池投资省
自动化程度	高	高	高	均能够实现较高的自动化程度

2.3 深度处理工艺

深度处理是高矿化度矿井水回用必不可少的步骤,而脱盐又是处理高矿化度矿井水的核心工序。目前高矿化度矿井水脱盐技术主要借鉴海水淡化,常用技术包括蒸馏法、离子交换法、膜法等。蒸馏法需加热蒸馏,运用于热源非常充足的场所。离子交换法适用于水中盐质量浓度 ≤ 500 mg/L 的环境,工艺系统和运行管理复杂,不能连续出水。常用的膜法脱盐技术包括电渗析(Electrodialysis, ED)和反渗透(Reverse Osmosis, RO) 2 种工艺,ED 为电驱动型脱盐技术,RO 为压力驱动型脱盐技术。

2.3.1 电渗析(ED)

ED 法是在正负电极之间将阴、阳离子交换膜交替排列,并用特制的隔板分隔开,形成脱盐和浓缩

2 个系统,在直流电场作用下产生电位差,以此为驱动力,利用离子交换膜的选择透过性,将 TDS 从矿井水中分离出来,产水率 50%~70%^[7-8]。部分煤矿早年应用 ED 法处理高矿化度矿井水,以解决矿区生活饮用水和工业用水问题。ED 法具有较好的连续出水性、无需再生等优点,但具有以下缺点:① 产水率较低,易结垢。先前未考虑防垢等措施,导致离子交换膜和电极结垢严重,设备压力升高,产水率大幅降低,普遍回收率约 50%左右,且设备运行不稳定,需频繁清洗,运行成本上升,导致设备停用或报废。② 脱盐率较低,仅 50%左右,因此,对原水的 TDS 质量浓度适应范围较窄,适用于 TDS 质量浓度为 1 000~4 000 mg/L 的矿井水。③ 无法去除水中有机物和细菌。④ 电耗大,采用电驱动,需消耗

电能。

由于ED法脱盐率低,对原水含盐量适应范围窄,产水率低和装置组装要求高,难以满足自动化、模块化方向发展需求,ED法在高矿化度矿井水处理应用受到较大限制,工程实例较少。近几年随着科学技术进步,RO投资大幅降低,特别是低压膜应用,大幅降低了RO运行成本,逐渐成为高矿化度矿井水脱盐的主流技术。目前ED法研究转向针对RO浓盐水进行浓缩的新型电渗透技术,包括选择性电渗析(Selectrodialysis, SED)、置换电渗析(Electrodialysis Metathesis, EDM)和反电渗析(Reverse Electrodialysis, RED)等技术^[9-10]。

SED与常规电渗析(Conventional Electrodialysis, CED)相比,仅将离子交换膜更换为单价选择性离子交换膜(Monovalent Selective ion Exchange Membrane, MSIM)。MSIM工艺是利用待迁移离子与膜合力的不同,结合各离子组分在膜相间的迁移速度差异,可选择性实现单价离子的定向迁移。如在分盐过程中, Cl^- 可透过MSIM膜向浓缩室迁移,而 SO_4^{2-} 则留在脱盐室中,可选择性分离 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,从而实现NaCl和 Na_2SO_4 分离。

EDM是在CED基础上对膜堆水流隔板创新的一种新型ED技术,又名离子重组电膜反应器。其基本工作单元由2对离子交换膜和2对具有4个布水通道的水流隔板组成,然后利用膜技术实现离子重组,该技术可将微溶型盐溶液转化为高溶解性盐溶液,可高效处理高硬含盐废水。

RED与CED过程原理相反,利用浓水和淡水的化学势差产电。阴、阳离子分别透过阴、阳离子交换膜选择性由浓盐水侧向淡水侧定向迁移,阴、阳离子定向迁移过程会形成内电流,可通过电极室的氧化和还原反应转化成外电流,以此进行能量回收,据此可集成其他ED技术,是较有前景的低能耗技术。

2.3.2 反渗透(RO)

RO法脱盐原理为:RO膜表面具有较强的亲水性,能选择性吸附 H_2O 分子而排斥其他物质,会在固-液界面上形成2个 H_2O 分子纯水层,在施加外力的情况下,纯水层的 H_2O 分子不断通过毛细管穿过RO膜,利用RO膜的选择截留作用将原水中TDS与 H_2O 分子分离的方法。RO法具有TDS适用范围大、运行和操作管理方便、脱盐率高(>95%)、产水水质好等优点。由于RO膜价格较高,为减少对RO膜系统影响,需在RO前增加预处理工艺,一般需采用机械过滤器、活性炭过滤器和保安过滤器的三级过滤工艺,也可使用超滤膜过滤进行预处理;为解决

RO膜结垢堵塞问题,还需在进入RO系统前添加阻垢剂。

RO法广泛应用于高矿化度矿井水TDS的脱除,肖艳等^[11]对采用RO法去除黄陵一号煤矿矿井水中TDS,处理后的矿井水作为电厂循环冷却水水源,工程实践表明,进水TDS质量浓度从5068 mg/L降至34.1 mg/L。寇雅芳等^[12]以神东矿区活鸡兔煤矿矿井水为研究对象,采用RO装置脱除TDS,RO采用先进的陶氏聚酰胺复合膜元件,TDS平均去除率可达90%以上,水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 形成的硬度可去除96%以上,水质由弱碱性变为中性。谭金生等^[13]对冀中能源某煤矿矿井水采用超滤+反渗透工艺进行TDS脱除,处理后水质达到煤化工用水水质要求,代替水源井水作为煤化工的生产水及循环水补水,实现了矿井水的综合利用。国家能源集团新疆公司乌东煤矿于2012年和2017年分2期建成5100 m^3/d 的“超滤+反渗透”装置,一期RO膜型号为海德能PROC10,产水率 $\geq 70\%$,产水量58 m^3/h ,每套72支膜,共2套;二期RO膜选用陶氏BW30-400,产水量38 m^3/h ,回收率 $\geq 70\%$,共90支膜,RO产水达到电厂循环冷却水标准,目前该系统运行良好。

2.4 零排放技术

根据高矿化度矿井水水质不同,经过RO处理后产生的浓盐水成分略有差异,不同地区 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量差异较大,因此,最终浓盐水中NaCl和 Na_2SO_4 含量差异较大。浓盐水一直是高矿化度矿井水处理系统或工业含盐废水处理最大的难题。目前高矿化度矿井水处理产生的浓盐水主要采用蒸发塘自然蒸发或灌浆回用等,随环保日益严格,浓盐水也需处理,以满足废水零排放要求。目前关于废水零排放的研究和工程应用主要集中在煤化工废水和火力电厂脱硫废水等行业,采用的零排放工艺为浓缩+结晶,而矿井水零排放仅少数煤矿进行工程实践,如陕西榆林袁大滩煤矿^[14]、内蒙古鄂尔多斯红庆河煤矿^[15]等矿井水零排放工程。

2.4.1 浓缩技术

浓缩工艺的目的是减少浓盐水量,提高浓盐水TDS量,减少后续结晶工艺的投资和运行成本。高矿化度矿井水的RO浓盐水浓缩可参考其他行业高盐废水的浓缩处理工艺,典型工艺包括海水浓缩膜、碟管式反渗透膜、管网式反渗透膜、正渗透膜、电渗析膜以及纳滤浓缩等。

1)海水浓缩膜(SWRO)。SWRO广泛应用于海水淡化,在煤化工高盐废水和电厂脱硫废水处理中应用广泛。该技术适用于TDS质量浓度

≤20 000 mg/L浓盐水浓缩处理,可将 TDS 浓缩至 60 000 mg/L 以上,回收率为 40%~60%,该工艺技术成熟,系统简单^[15]。

2) 碟管式反渗透膜(DTRO)。DTRO 属于 RO 技术,早期应用于垃圾渗滤液的浓缩处理,近年来逐渐应用到高盐废水浓缩处理领域,DTRO 要求的压力较高,在高盐废水浓缩处理中应用较多的是 9 和 12 MPa 的膜组件,可将 TDS 质量浓度浓缩至 100 000 mg/L 以上。

3) 管网式反渗透膜(STRO)。该技术起源于德国 Rochem 公司,耐压分 7.5、9.0 和 12.0 MPa 3 个等级。若进水 TDS 质量浓度为 30 000 mg/L,以 7.5 MPa 膜为例,TDS 质量浓度可浓缩至 90 000 mg/L,浓缩倍率为 3 倍,回收率约 66%;若采用 9.0 MPa 膜,TDS 可浓缩至 120 000 mg/L,浓缩倍率可提升至 4 倍,回收率约 75%;目前国内还没有 12 MPa 的工程案例。

4) 正渗透膜(FO)。相对于压力驱动膜分离过程如 RO 技术,FO 可低压甚至无压操作,因而能耗较低,可将 TDS 浓缩至 200 000 mg/L 以上,系统回收率高,由于浓缩倍数高,产生的高浓废水量小,且生产的淡水 TDS 质量浓度<1 000 mg/L,可直接回收作为矿井水处理产水。

5) 电渗析膜(ED)。虽然 ED 技术在深度处理中存在较多问题,但近期在高盐废水浓缩处理中得到应用,浓缩效果较好,可将 TDS 浓缩至 150 000 mg/L 以上,产生的高浓废水量小。

6) 纳滤(NF)。NF 是一种介于 RO 和超滤之间的压力驱动膜分离过程,NF 利用电荷效应,对二价离子和高价离子有较高的截留率,一般可达 97% 以上,浓缩过程中一般与 RO 工艺联用。

高矿化度矿井水零排放的关键是浓缩技术,面临的难题是高效经济的防结垢和高倍浓缩技术。目前采用较多的浓缩技术是多种膜耦合浓缩工艺,如低压反渗透(BWRO)+SWRO 技术、BWRO/SWRO+DTRO/STRO、BWRO/SWRO+EDM 及 NF/EDM/FO+SWRO/DTRO 等。多种膜耦合浓缩工艺根据待处理浓盐水 TDS 不同,一方面考虑浓盐水浓缩工艺的技术经济可行性,另一方面考虑分盐结晶资源化利用,可选择合适的组合工艺^[16]。

除上述典型工艺外,浓盐水处理还有一种新型的真空膜蒸馏技术(MD)。MD 是一种结合膜技术与蒸馏的组合分离技术,集成了膜技术和蒸馏技术的优点,具有操作压力低、蒸馏温度低、浓缩倍数高、产水水质好等优点。MD 法的技术原理是:膜的一

侧为高盐热水,另一侧为冷却水,利用两侧温度差产生蒸汽压差来驱动蒸汽透过疏水膜进入冷却水侧冷却为纯水。

卞伟等^[17]利用 MD 技术处理高矿化度矿井水,对于硬度高而碱度低的矿井水,硬度去除率达 77% 以上,脱盐率 99.5% 以上。由于 MD 技术温度要求低,可与太阳能、井下地热能等联合使用。与太阳能结合的 MD 工艺示意如图 2 所示,该技术利用太阳能集热器产生能量,供 MD 装置使用,可用于 RO 浓盐水浓缩。处理高矿化度矿井水可利用矿井地热资源,采用地热能-MD 技术在井下处理矿井水,产水直接回用,浓盐水可封存于井下,该技术对矿井水零排放成本降低具有优势^[18]。靳德武等^[19]认为 MD 结合地热能或太阳能技术均是中国西部矿区矿井水节能脱盐和浓缩的新思路,矿井深部地热能被用来加热矿井水,能耗较低;中国西部矿区大部分属于太阳能辐射区的第一类(6 700~8 370 MJ/m²)或第二类(5 400~6 700 MJ/m²),将 MD 技术与太阳能开发结合,相比其他浓缩技术将更具优势,大大减少对常规能源的依赖。

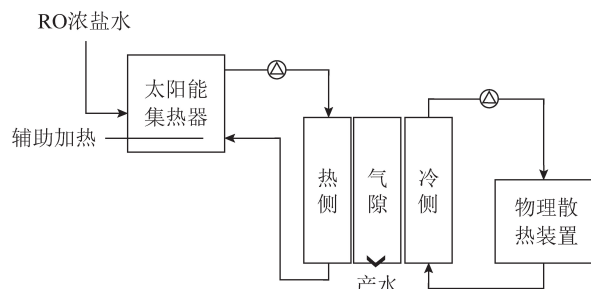


图2 太阳能-MD技术

2.4.2 结晶技术

结晶是对浓缩后的浓盐水实现盐水分离的过程,结晶技术目前应用较成熟的是蒸发结晶技术,是浓盐水实现零排放的最后一步。常见的蒸发结晶技术包括多效蒸发(MED)、多级闪蒸(MSF)和机械压汽蒸发(MVR)等工艺。

1) MED 技术。MED 是一种蒸发器多级串联运行的工艺技术,前一级蒸发器产生的蒸汽是下一级蒸发器的热源。优点是蒸汽可多次利用,从而提高热能利用率;缺点是在蒸发浓缩过程中热交换器的管程存在严重结垢,无法连续稳定运行,且消耗大量电力和蒸汽,运行成本高。该技术投资成本为 130 万~170 万元/t(以浓盐水计,下同),运行成本为 80~120 元/t,投资和运行成本均较高^[20]。

2) MSF 技术。MSF 技术是为解决 MED 技术严重结垢缺点发展起来的一种蒸发技术。将浓盐水加

热后送入闪蒸室,利用闪蒸室压力小于浓盐进水的饱和蒸汽压原理,水迅速汽化,浓盐水不断浓缩,此过程不会析出溶质,可有效解决蒸发器结垢问题。

3)MVR技术。MVR技术相当于一效蒸发器产生的二次蒸汽经机械压缩机压缩提高压力和饱和温度,增加热焓后,再送入蒸发器作为热源,补充循环蒸汽的热损失,运行过程消耗少量动力蒸汽和机械压缩所需的电力。该技术应用广泛,是一种先进的蒸发结晶技术,属于高效节能蒸发器,其节能效果与十效蒸发系统相当^[21]。由于蒸发器内部没有挂膜降流管或其他元件,且循环泵大流量循环并夹带晶体进行冲刷,可有效防止换热器等部件结垢。该技术投资成本约220万元/t,运行成本为传统蒸发器的1/4~1/3。

以上3种蒸发结晶技术已有成熟的工程经验,其中MSF主要应用于海水淡化,MED和MVR技术在煤化工领域应用广泛。考虑运行费用,一般认为在蒸汽价格较高的地方MVR较经济,在蒸汽价格较低的地方MED优势更明显。

3 结 语

由于高矿化度矿井水中TDS含量高,不能满足排放或回用标准,因此,高矿化度矿井水处理的核心是降低水中矿化度,通过近些年高矿化度矿井水处理工程实践,有效推动了降低水中矿化度工艺技术的进步和完善,常规处理和深度处理工艺技术已基本成熟。由于现有技术的局限性,降低回用水矿化度的过程中必然带来另一种污染物——浓盐水。随着环保政策日趋严格,如何处理浓盐水是今后煤矿企业面临的重大问题之一,高矿化度矿井水零排放也是必然趋势,而制约零排放工程项目的主要因素是零排放技术投资和运行成本居高不下,多数煤矿企业难以承受,如何降低零排放工艺技术的投资和运行成本是今后很长时间内国内关注的重点和技术研究的关键所在。

参考文献:

[1] 雷兆武,孙京敏,张尊举,等.高矿化度矿井水井下循环利用水

质指标研究[J].煤炭工程,2022,54(6):128-131.

- [2] 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.
- [3] 罗延歆.矿井水超磁分离净化技术研究与应用[J].煤炭工程,2017,49(6):72-74.
- [4] 丁杨,王亮,张保.雅店矿井地下水处理站优化设计[J].煤炭工程,2017,49(2):14-16.
- [5] 曹振兴,张捷.太平煤矿地下水处理站改扩建方案设计[J].煤炭工程,2013,45(7):9-11.
- [6] 方惠明,戚凯,李向东,等.西部地区高矿化度矿井水处理技术及资源化利用[J].中国煤炭地质,2020,32(12):68-71.
- [7] 王瑶.高悬浮物高矿化度矿井水[D].邯郸:河北工程大学,2013.
- [8] 靳孝兴,王伟,潘汝东.高盐矿井水膜浓缩组合工艺选择与应用实例技术经济评价[J].煤炭加工与综合利用,2021(4):53-57,4.
- [9] 陈青柏,刘雨,赵津礼,等.基于新型离子交换膜过程的含盐废水零排放技术[J].化学进展,2019,31(12):1669-1680.
- [10] 张海琴,李庭,李井峰.电化学技术在矿井水处理中的应用与展望[J].中国煤炭,2021,47(2):70-75.
- [11] 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(20):94-97.
- [12] 寇雅芳,朱仲元,姚苏红,等.神东矿区矿井水深度除盐处理效果论证[J].节水灌溉,2011(6):41-43.
- [13] 谭金生,黄昌凤,郭中权.高悬浮物高矿化度矿井水处理工艺及工程实践[J].能源环境保护,2013(3):30-32.
- [14] 马景国.袁大滩煤矿中高矿化度矿井水资源化技术研究[C]//陕西省煤炭学会学术年会论文集.西安:陕西省煤炭学会,2016.
- [15] 李福勤,赵桂峰,朱云浩,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.
- [16] 张建春.矿井水综合处理在绿色矿山建设中的实践和应用[J].中国煤炭,2021(9):68-69.
- [17] 卞伟,李井峰,吕嘉峰,等.真空膜蒸馏处理高矿化度矿井水试验研究[J/OL].煤炭科学技术:1-7[2022-08-01].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20201013.1425.002.html.
- [18] 卞伟,李井峰,顾大钊,等.西部矿区高矿化度矿井水膜蒸馏处理技术[J].煤炭科学技术,2022,50(3):295-300.
- [19] 靳德武,葛光荣,张全,等.高矿化度矿井水节能脱盐新技术[J].煤炭科学技术,2018,46(9):12-18.
- [20] 立永,王文娟.高矿化度矿井水处理及分质资源化综合利用途径的探讨[J].煤炭工程,2017,49(3):26-28,31.
- [21] 王玉.蒸发技术在浓盐水零排放处理中的应用概述[J].北方环境,2019,31(7):79,81.