热法海水淡化技术在高含盐矿井疏干水的应用

肖冰

华北电力设计院有限公司, 北京市, 100120;

摘要: 据调查, 高含盐矿井疏干水水量约占我国北方重点煤矿矿井涌水量的 30%, 这些地区水资源缺乏, 对这部分高含盐矿井疏干水进行处理利用, 不但可以避免矿井水外排造成的环境污染, 还可解决矿区用水紧张的问题。MED 技术是近二十年来在国际国内新发展起来的脱盐技术, 已经广泛应用于海水淡化技术, 但由于其传热机理、流动规律和其他技术问题, 国际和国内只有少数企业掌握该技术, 还鲜有用在矿井水处理上的报道, 采用电站空冷为热源, 进行矿井水淡化的技术, 还属于先进低碳环保技术。

关键词: 高含盐; 疏干水; 热法; 海水淡化

DOI:10.69979/3029-2727.24.03.028

1 前言

1.1 我国水资源概况

我国水资源总量较为丰富, 居世界第六位。但就水资源与国土面积、耕地面积对比而言, 则处于世界中等偏下水平。在世界上近百个缺水国家中, 中国是公认的贫水国, 排在世界人均数量的第 100 位以后。

解决淡水资源匮乏问题的基本途径是开源节流。一是提高全社会的节水意识, 提高水的利用率, 二是开发新的淡水资源。海水淡化就是沿海国家和地区解决淡水不足的有效措施之一, 并已得到越来越广泛的应用。

1.2 高含盐矿井疏干水分布情况

煤炭是我国能源利用的主要方式之一, 煤电联营、煤电一体化项目也广泛存在于煤炭资源较为丰富的地区, 煤炭在开采过程中会伴随着大量矿井疏干水的产生, 不仅给煤矿生态保护带来一定的压力, 还造成了水资源的浪费, 对高含盐矿井水综合利用技术的发展显得尤为重要。煤矿高含盐矿井水是煤炭开采的附属产物, 是煤矿排水的主要污染源之一。据统计, 我国每年因煤炭开采产生的矿井水约为 70 亿吨, 煤炭开采产生大量的疏干水, 不仅给煤矿生态保护带来一定的压力, 还造成了水资源的浪费, 有数据表明, 西北地区已探明的煤炭资源量占全国的 70.8%, 而水资源总量仅占全国的 3.7%。

煤矿产生的矿井水含有一定量的盐分, 盐的质量浓度 $>1000\text{mg/L}$ 时, 称为高含盐矿井疏干水。我国大多数煤矿排放的矿井水是以悬浮物为主的常规矿井水和含铁锰的酸性矿井水, 但在我国较为缺水的西北及北方矿区往往排出高含盐矿井疏干水, 根据相关资料, 在陕西、甘肃、宁夏、新疆、内蒙、山西以及两淮、徐州、新汶、

抚顺、阜新等地区都有高含盐矿井疏干水分布, 淮南矿区排放高含盐矿井疏干水的数量占到矿区煤矿的 50% 以上, 这些地区煤矿矿井水的矿化度一般在 $1000\sim 10000\text{mg/L}$, 个别煤矿的矿井水矿化度则高达 10000mg/L 以上。

如果高含盐矿井疏干水不经处理直接排放, 会破坏生态环境, 造成不可逆的影响, 因此高含盐矿井疏干水的处理也是一项重要的课题。

2 高含盐矿井疏干水采用热法海水淡化技术进行淡化的工艺系统研究

2.1 高含盐矿井疏干水传统脱盐处理技术

据调查, 高含盐矿井疏干水水量约占我国北方重点煤矿矿井涌水量的 30%, 同一般的矿井水水质相比较, 煤矿排放的高含盐矿井疏干水除具有高含盐量特征外, 也含有悬浮物等这些常见的污染物, 悬浮物等通过常规的混凝沉淀和过滤即可去除, 但其中的各种离子则必须通过其他的途径进行脱除, 脱盐是处理高含盐矿井疏干水的关键工序, 也可以称为深度处理。常用的脱盐深度处理技术有离子交换、蒸馏、电渗析、反渗透等技术, 其中离子交换技术不适用于大规模高含盐废水处理。

2.2 高含盐矿井疏干水热法淡化处理技术方案

某项目矿井水 MED 装置按产水量 5000 吨/日设计。汽轮机低压缸排汽作为 MED 制水蒸汽, 首先进入第一效蒸发器作为加热热源。物料水采用平行进料方式, 4 效后面设置凝汽器, 冷凝第 4 效产生的蒸汽, 同时加热进料水。

物料水经蒸发器喷嘴被均匀地分布到蒸发器的顶排管上, 然后沿顶排管以薄膜形式向下流动, 产生的蒸

汽进入下一效，未被蒸发的物料水在蒸发器底部汇集，流入下一效盐水侧闪蒸，最后在4效蒸发器盐水侧并出经盐水泵抽出。而换热管内部接收上一效来蒸汽经过换热而凝结成蒸馏水，少量未凝结蒸汽与不凝气体经真空装置抽出。凝结水汇集到蒸发器底部，第1效凝结水由凝结水泵抽出，返回机组凝结水系统。从2效开始蒸汽凝结水经过效间产品水管道逐效汇集进入4效，然后经产品水泵抽出。系统是在负压下运行，系统设置水环真空泵真空装置，分别从凝汽器、第1效抽不凝结气，维持系统运行真空度。

为防止蒸发浓缩后在管束表面结垢以及产生泡沫影响换热效率、产品水水质，系统设有阻垢剂加药及消泡剂加药。

MED装置平流进料，造水比暂定为3.5(kg淡水/kg蒸汽)。主设备采用4效蒸发器和1个凝汽器。其他辅助供设备包括工艺水泵、过滤器、换热器、化学加药设备及电控设备。

3 矿井疏干水淡化方案相关问题的探讨

3.1 原水化学成分

目前有关矿井疏干水MED蒸馏脱盐处理问题可能不同的矿井疏干水水质相差较大，具体不同水质在低温多效蒸馏过程中可能存在的问题各不相同，而且和海水淡化设备系统方案相比，由于海水主要是不同区域含盐量相差较大，海水的化学成本组成相对变化较小，但对于疏干水应主要受地下地质矿物成分影响较大，因此不能简单的套用不同矿井疏干水或海水淡化项目的技术方案。

COD问题，要保证产品水的COD含量满足使用要求工艺方案中要采取必要的措施：前处理气提工艺、除氧器式分馏分离工艺、后期的化学处理工艺方案等。

Si⁺结垢影响问题，如疏干水Si⁺含量较高的情况，高浓缩蒸馏后可能存在Si⁺结垢问题，初步考虑采用Si⁺阻垢剂应可以解决问题。

Ca结垢影响问题，采用低浓缩倍率蒸馏应该没有问题，但如采用高浓缩倍率后结垢情况如何还需要验证。

氟和亚硝酸根，饮用水对于氟和亚硝酸盐有严格要求，如疏干水中这两项指标较高时，由于这两项化学成分有较高的挥发性，可能会造成产品水水质不合格，需采取相关措施，可考虑沉淀法、活性炭吸附法、电化学法、离子交换法、膜分离法等。

3.2 矿井水温度

矿井疏干水温度如果较高，冷却水量则较大，如夏季水温达到35℃时冷却水量需要是物料水量的2倍以上，因此冷却水的来源也是需要考虑的问题。

3.3 热膜耦合方案

疏干水脱盐工艺方案可膜法和低温多效两种工艺方案结合，采用热膜耦合方式。低盐物料水首先按苦咸水反渗透脱盐工艺系统进行一次脱盐处理，处理后高盐度排水作为低温多效设备的原料水使用。采用热膜耦合方式主要是为了降低脱盐处理的成本，同时考虑降低低温多效脱盐设备的容量，降低低温多效设备的冷却耗水量，同时不同品质淡水根据需要可分别使用。

矿井疏干水进入淡化站首先根据原水水质考虑原水预处理系统，处理项目根据后续工艺方案的需要，如降低悬浮物含量，降低钙镁硅等离子含量，降低COD或其它需要控制的原料水水质需要的工艺过程。

原料水经预处理后首先进行温度调节，采用凝结水、盐水和成品水的热量对原料水进行升温调节，温度根据膜法脱盐工艺的参数需要控制。例如冬季水温过低的情况可能需要先对原水进行加热，然后再进行疏干水原水的预处理，以保证预处理过程对水温的要求。进入膜法反渗透装置需要控制水温在20~30℃左右，防止膜法工艺过程水温过高，有些原料水需要在膜法脱盐系统后进行加热，同时又要保证低温多效设备的进水水温需要。如果全年原水水温变化较大，还需要对系统进行优化处理。

膜法脱盐后产生浓盐水和脱盐淡水两部分，由于疏干水脱盐和海水脱盐不太一样，可能冷却用水不是十分充足，因此考虑凝汽器冷却用水采用膜法脱盐后的浓盐水，即低温多效脱盐设备的物料水，如冷却水量仍不足还需要考虑利用膜法脱盐后的淡水作为冷却水使用，控制最终淡水水温在需要范围内。

经过MED设备凝汽器后升温的冷却水作为MED的原料水使用，此原料水为控制COD含量，首先对原料水进行高温分馏，除掉低沸点COD，保证在MED低温蒸馏过程中进入成品水的COD含量降低。此原料水首先利用各效蒸发器二流程后排放蒸汽进行逐级加热，然后和除氧器式分馏装置的加热热水进行换热，使原料水水温提高，降低除氧器式分馏装置的蒸汽耗量。

经除氧器式分馏装置对原料水进行加热，分离低沸点COD，分离后的低COD原料水经原料水中间换热器冷

却降温,再通过闪蒸罐闪蒸,闪蒸后的蒸汽作为二效的加热蒸汽,闪蒸分离水作为一效的物料水。除氧器式分馏装置分离的高含COD蒸汽经蒸汽冷却器冷却,冷却介质采用MED凝汽器后原料水,冷却淡水另外回收,由于含COD很高,需要另外单独处理。

除氧器式分馏装置后原料水经闪蒸罐后作为MED的物料水,蒸发器各效物料水采用逐级顺流循环供水方式,浓缩倍率可按4-6倍左右考虑,不同的浓缩倍率和蒸发器形式需要对系统方式进行调整。

3.4 加热蒸汽参数

加热蒸汽可采用低压缸排汽,也可采用中压蒸汽,压力一般在0.5~0.7MPa.a,采用中压蒸汽的情景如下:

首先是煤矿的矿井疏干水处理设备肯定靠近煤矿,煤炭价格很低,作为蒸馏脱盐设备由于热价相对较低,可相对放宽降低热成本的考虑。从热物品位考虑综合利用后的低压蒸汽的热价肯定低,但低压蒸汽MED的造水比低,蒸汽耗量增大,例如超低压参数和中亚参数蒸汽设备的造水比分别为6.6和9.5的话,采用超低压参数蒸汽的蒸汽耗量将比采用中亚参数的蒸汽耗量增加50%左右,即便相同蒸汽量的低参数蒸汽输送系统设备成本也是较高的,蒸汽输送量增加后蒸汽输送系统的工程成本会提高较大,同时配套真空系统等容量也要加大。对于低热价条件采用低压蒸汽的热成本降低有限,而设备价格增加较多,综合经济性的优势不明显,因此建议采用较高压力的蒸汽参数。

另一个影响因素是疏干水脱盐项目,一般情况下冷却水供水量受到限制,不同于海水淡化,冷却海水的供应量一般不受限制。采用超低压蒸汽作为MED的加热蒸汽,不设TVC,采用蒸发器全直流系统方式,凝汽器的凝汽量会大幅增加,凝汽量增加同时对应冷却换热量增加,冷却水量增加。上文已经提到采用超低参数蒸汽耗量会增加50%左右,由于两种方案盐水和成品水带走热量变化不大,凝汽量可能增加的不止50%。另一个影响因素是疏干水的含盐量一般会低于海水较多,从回收淡水考虑一般会采用较高的浓缩倍率,浓缩倍率提高以后,加热蒸汽量和物料水量的比值提高,对应凝汽量和作为冷却用物料水量的比值也相同升高,如果没有更多额外冷却水源供应系统不能正常工作。当冷却水严重不足时可考虑采用其它空冷等冷却方式,但冷却效果及工程成本会较大幅度提高,技术经济性降低。要克服这些不利

影响,提高造水比,降低凝汽量是技术措施之一,要提高造水比相应需要采用较高的蒸汽参数来得到实现。出于这些考虑建议在冷却水供应不是很充足的情况下,考虑采用中压蒸汽作为加热蒸汽。

3.5 凝汽器冷却水及MED原料水分馏系统

如夏季水温高达,那么凝汽器需要冷却水量会很高,如果冷却水量供应不足,可以增加反渗透制水来降低热法水处理量来降低凝汽器冷却耗水。该方案降低了热法制水量,对应凝汽量降低,但反渗透淡化水可再次作为凝汽器冷却水使用,这样来解决冷却水量不足的问题。

结论

电站空冷是我国西部地区火力发电重要的冷却方式,也是重要节水措施,对富煤缺水地区具有重要意义,可以解决西部缺水富煤地区电力发展的重要瓶颈。但电站空冷机组能耗高,空冷排热量巨大,约占煤炭消耗热量的一半以上,且温度较湿冷电厂高出10~30℃,这些热量都通过空冷器排向大气。汽机乏汽压力和温度高于水冷方式,一般乏汽压力都在15KPa以上,在夏季高温季节,乏汽压力可达40KPa,温度超过70℃。该温度和压力区间,恰好是低温多效淡化矿井水技术的温度利用区间。

MED技术近几十年已经广泛应用于海水淡化技术,作为矿井水处理技术的新发展,利用乏汽以及中压参数蒸汽,采用MED淡化技术对高含盐矿井水进行淡化,以其综合成本较低的优势,必将对高含盐矿井水处理技术产生较大的影响,尤其在煤电一体化企业和需高品质淡水企业,必将是一种具有较强市场竞争力的技术。

参考文献

- [1]周金余.我国高矿化度矿井水水质特征及处理技术应用现状.城市建设理论研究,2014015.
- [2]樊陈子.蒸发结晶工艺在高矿化度矿井水处理中的应用.工程建设标准化,20230111.
- [3]刘遵义;李小亮.高矿化度矿井水处理技术应用现状.洁净煤技术,2023S2.

肖冰(1982-),女(汉族),山西省长治市人,大学本科,高级工程师,主要从事火力发电、热力、热法海水淡化、风光火储、新能源设计研究等,在电力设计院工作。