

## 火力发电厂废水零排放工艺综述

本文对目前火力发电厂废水“零排放”的相关工艺进行了简要综述，其内容包括节水工艺的发展历程、目前正在试验研究的“零排放”工艺路线、“零排放”工艺中的分盐技术等，因其相关工艺仍在试验研究和完善中，因此文中提及的工艺仅供借鉴参考。

### 1 火力发电厂废水的来源

火力发电厂废水的来源主要有两部分，其一是生活废水，其二是生产废水。生活废水就是厂区人员生命活动所需排放的各种废水，这部分废水其排放有两种途径，若电厂附近有社会公用污水管网，可将本部分废水排入污水管网系统中，由污水综合处理厂进行处理，若厂区附近无污水管网或不允许自排到公用污水系统，电厂需自建污水处理装置进行生化处理，要求处理后的水质达到水质排放标准。

电厂工业污水的来源主要有三部分，其一，化学补给水处理系统的废水，如生水预处理产生的废水、反渗透排放的浓缩水、树脂再生需排放的废水、设备清洗排放的废水、厂区地面冲洗产生的废水等；其二，循环水排污水；其三，脱硫废水。

除上述生活、工业废水外，电厂还有一部分排水，即雨（雪）水，一般将其纳入电厂生活污水处理系统。

### 2 电厂废水零排放的必要性及节水工艺的发展历程

随着国家环保政策、法规的逐步实施，对火电厂水质排放要求日益严格，实现废水“零”排放已成为当下火电厂面临的迫切问题。为了减少电厂废水排放量，目前电厂已在节水工作中采取了很多有效措施，主要措施有：

- 1) 用空冷机组代替水冷机组，在减少生产用水的同时，降低冷却水排水量。
- 2) 将处理后的生活污水（含雨水）作脱硫用水或循环水补充水。
- 3) 提高循环水浓缩倍率，同时将排污水处理后作为脱硫用水或进行“零”排放处理。
- 4) 循环水排污水经反渗透处理后，其淡水作为化学补给水进水或循环水补充水，浓水进行“零”排放处理。
- 5) 将工业废水（循环水排污水除外）处理后作脱硫用水（化学除盐再生废水进行“零”排放处理）。
- 6) 部分生活污水处理后作为厂区除尘和煤场喷洒、喷淋、除渣、绿植浇灌用水等。

火力发电厂废水“零”排放的发展历程见图1。

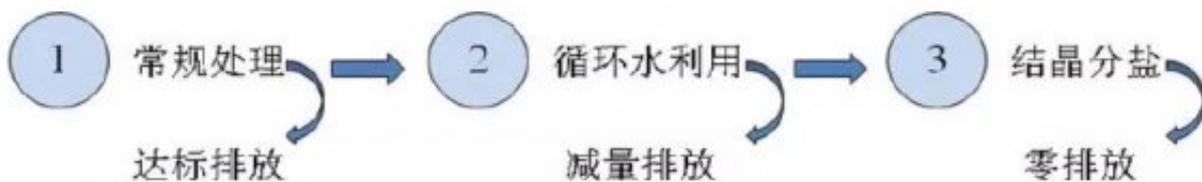


图 1—电厂废水零排放的发展历程

根据电厂水平衡测试结果，电厂节水工艺一般设计如下：生产和生活污水除少部分作为电厂煤场、厂区喷洒，除渣用水和绿植浇灌用水外，大部分废水最后归宿是作为脱硫用水（部分废水直接进行“零”排放处理，如化学除盐再生废水），其排放的总废水量通过减量排放后控制在小于或等于脱硫用水量。

因脱硫废水的含盐量直接与脱硫效率和石膏品质有关（脱硫废水的含盐量来源于烟气和脱硫用水），因此脱硫系统的水的含盐量浓缩到一定值后必须排放，由于脱硫废水含盐量极高（10000mg/L以上），若直接排放到自然界必将导致环境污染，因此实现电厂废水“零”排放已成为当下火电厂面临的迫切问题。

### 3 当前电厂“零”排放研究的工艺路线

废水“零”排放是指厂内水除蒸发、风吹等自然损失外，在厂内通过循环使用和各種物理、化学处理方法，不向厂外排放任何废水，废水中的盐类以固定废物形式被处置。

目前电厂脱硫废水“零”排放研究的技术路线主要如下：

- 1) 无软化处理采用晶种法进行蒸发结晶，产物为混盐；
- 2) 软化预处理后进行蒸发结晶，产物为混盐；
- 3) 软化预处理后经过膜处理，进行蒸发结晶，可实现分盐；
- 4) 预处理后经过膜浓缩，终端进行烟气或烟道蒸发进入粉煤灰，无需处置固体盐（该工艺需要商榷，目前试验结果问题较多）。

电厂废水零排放主要工艺技术路线如图2、图3所示：

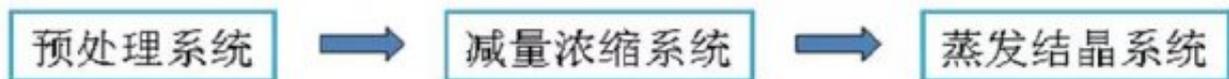


图 2—电厂废水零排放总体工艺技术路线

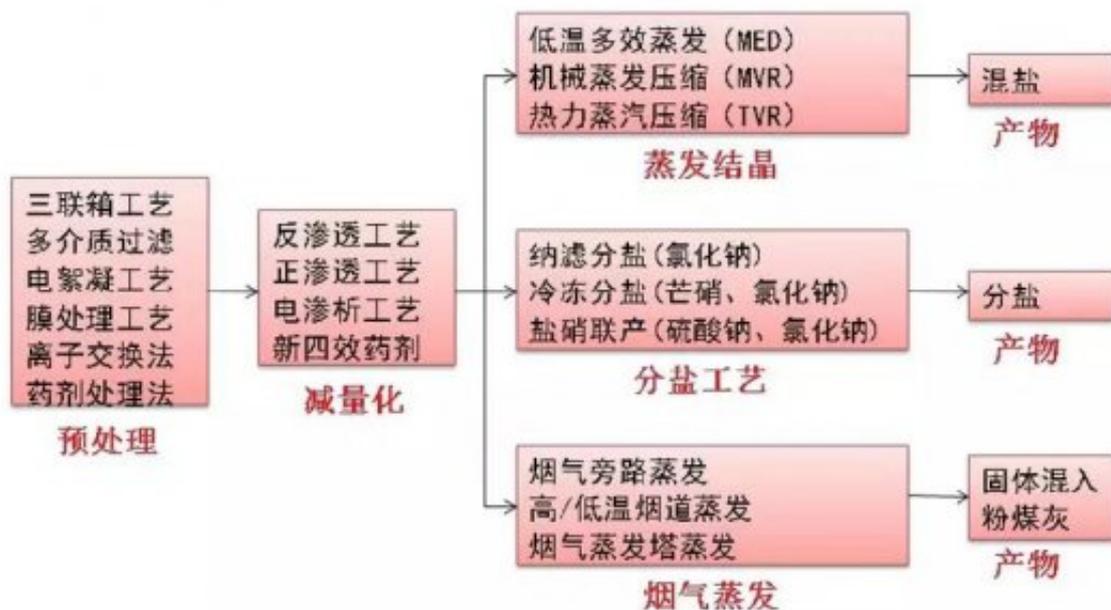


图 3—电厂废水零排放工艺技术路线

#### 3.1 废水预处理技术路线

电厂废水具有有机物含量高、浊度、硬度大等特点，为确保后续系统安全稳定运行，通常需要设置有机物预处理和除浊软化处理单元。

##### 3.1.1 有机物预处理技术

有机物预处理技术包括：混凝处理工艺、电解絮凝处理工艺及高级氧化处理工艺；高级氧化由于投资和成本很高，大规模的工业处理极少采用。

1) 目前国内大部分电厂采用常规混凝沉淀法处理（三联箱），经中和、絮凝、反应、沉淀、分离等方法对废水进行预处理，污泥进行压滤外运。但当循环水系统投加阻垢缓蚀杀菌剂等处理药剂后，常规混凝等物化工艺难以去除有机物，通常需要通过增加混凝剂投药量、改变混凝剂匹配或调整 pH

以实现强化混凝目的。该工艺系统较为复杂，药剂投加量大，处理出水存在腐蚀性，且运行效果不稳定。

2) 电絮凝处理工艺是采用金属铁或铝及合金材料作为电极，电解出活性离子，与水中的OH<sup>-</sup>结合生成高活性絮凝核，吸附、捕捉水中胶体颗粒或悬浮物。该工艺可实现自动化运行，操作简单，占地面积小，但是会增加部分能耗，对水中TOC的去除效果较差。

3) 高级氧化处理工艺包括臭氧氧化、Fenton 氧化、电化学氧化、光催化氧化、超临界水氧化等技术。高级氧化技术在化工行业特种废水、高有机废水的处理中应用较多，在电力行业则鲜有应用。

### 3.1.2 除浊、软化处理单元

除浊、软化处理单元：一般通过投加化学药剂、离子交换、膜法分离或使用一体化设备实现。

1) 投加化学药剂是指通过投加絮凝剂、助凝剂或石灰、碳酸钠等软化药剂，在水中形成絮凝核与水中的悬浮物胶体等吸附、絮凝、沉降，实现除浊与软化目的。该工艺通常需要设置反应、沉淀等辅助构筑物，药剂消耗量较大。

2) 离子交换通常包括钠床、阴阳离子交换床、混床等装置，通过离子交换可有效去除水中的硬度离子，交换释放出的H<sup>+</sup>与OH<sup>-</sup>立即生成电离度很低的水分子，达到软化目的。该工艺预处理要求简单、工艺成熟，出水水质稳定、设备初期投入低，适用于含盐量较低的原水，但该工艺系统需要根据运行情况进行再生，而产生再生废液。

3) 膜分离法包括微滤等方式，当来水水质条件稳定时，微滤膜可以有效截留化学药剂软化后形成的微小絮体，有效去除水中悬浮物和胶体杂质，但其膜通量受有机物浓度限制明显，膜处理虽然处理出水水质较好，但是存在膜污堵风险，对进水的水质要求也较高，适用于低浊低硬水的处理。

4) 多介质过滤器等一体化处理装置也常用于软化水系统的前级预处理，其利用一种或几种过滤介质，在一定的压力下把浊度较高的水通过粒状或非粒材料，实现除浊、除油、软化目的，该装置集成化程度高，占地面积小，但需要定期进行恢复性清洗。

### 3.2 废水减量化技术路线

废水减量化的目的旨在全厂水量平衡及梯度循环利用的基础上，减少末端蒸发结晶处理水量，同时降低成本。目前减量化技术路线主要包括：提高循环水浓缩倍率、电渗析工艺、反渗透工艺、正渗透工艺。

1) 提高循环水浓缩倍率：通常通过投加药剂实现，通过降低循环水排水量从而减少循环水补充水量、高含盐废水的处理量以及末端废水蒸发结晶的处理量，药剂种类需根据循环水动态实验确定。

2) 电渗析工艺：在外加直流电场作用下，利用离子交换膜的选择透过性实现离子与水的分离，该方式占地小，操作简单，出水水质稳定，在脱盐过程中无相的变化，环境污染环境小，但是会增加部分能耗，原水预处理不当易造成膜污染与中毒老化，且设备安装较为复杂，脱盐效果与水的回收率有限。

3) 反渗透工艺：较为先进、稳定、有效的除盐技术，其对原水水质要求相对较高，通常工艺路线为超滤出水进反渗透系统或纳滤出水进高压反渗透系统，产水作为化学除盐进水或循环水补充水等循环使用，该工艺产水品质好，但设备投资较高。该工艺具有系统简单、操作方便、易于自动控制、无污染、运行成本低等优点，原水含盐量高仍可使用，对运行成本影响不大。

4) 正渗透工艺：依靠选择性渗透膜两侧的渗透压差为驱动力自发实现水传递的膜分离过程，该技术难点在于需考虑经济高效的汲取液体系和汲取液再浓缩途径，投资运行费用高，维护复杂，对进水悬浮物浓度要求严格，浓差极化及膜污染问题有待改进，目前市场应用效果不佳，技术成熟性不高。

### 3.3高盐废水“零排放”技术路线

末端高盐废水主要通过蒸发固化进行减量，工艺路线包括：自然蒸发、强制蒸发、烟气蒸发三种。

#### 1) 自然蒸发

以蒸发塘为典型工艺，该工艺基建费用低，运行管理简单，但其存在占地面积大，防渗处理复杂且存在二次污染风险，目前已极少选用。

#### 2) 强制蒸发

该工艺作为在多种行业的普适性技术，工艺路线较为成熟，用于电力行业，呈现出“大马拉小车”的特点，推广积极性不高。强制蒸发以MED、MVR和TVR为典型工艺。

**MED 低温多效蒸馏法：**最早运用于海水淡化，其主要原理是通过抽真空技术，降低海水沸点，用一定量的蒸汽输入通过多次的蒸发和冷凝，从而得到多倍于加热蒸汽量的蒸馏水。

**MVR 蒸发器：**采用压缩机提高二次蒸汽的能量，并对提高能量的二次蒸汽加以利用，回收二次蒸汽的潜热。具体为：将蒸发器产生的二次蒸汽，通过压缩机的绝热压缩，使其压力、温度提高后，再作为加热蒸汽送入蒸发器的加热室，冷凝放热，因此蒸汽的潜热得到了回收利用。冷料在进入蒸发器前，通过热交换器吸收了冷凝水的热量，使之温度升高，同时也冷却了冷凝液和完成液，进一步提高热的利用率。

**TVR 蒸发器：**也叫热力蒸汽压缩蒸发器。是一种可以回收部分二次蒸汽的节能蒸发装置。它是在多效蒸发器上加装蒸汽喷射器，利用高压新蒸汽作为动力蒸汽，进入蒸汽喷射器的蒸汽腔，抽吸部分二次蒸汽进入低压蒸汽腔，在混合腔混合后，得到中温位的混合蒸汽，为蒸发器提供热源从而回收了部分二次蒸汽达到节能的目的。通过蒸发，废水中的大部分水被分离，剩下废水浓缩液。

浓浆液再进一步蒸发，得到含有结晶固形物的高浓缩液，高浓缩液通过干燥雾化或者离心分离将晶体分离出来，整个处理过程需要消耗大量的蒸汽和电能。通常情况蒸发结晶末端仍有5%-10%母液残留，无法实现100%的废水处置，一般通过喷雾干燥装置进行处理，或将其喷洒至煤场。

结晶分离出来的盐类固化物需要进一步处置，带来了固体废弃物的处理问题，采用纳滤、冷冻结晶、盐硝联产等分盐方式虽可解决固体废弃物处置问题，但上述工艺在电厂领域成功运行案例极少。

#### 3) 烟气蒸发工艺

**高/低温烟道蒸发：**将经过常规处理的脱硫废水经压缩空气进行雾化，利用电厂烟气的余温进行蒸发结晶。蒸发过程可在除尘器前或后进行。高温烟道蒸发：设置在除尘器前，利用高温烟气进行蒸发。

由于除尘器前烟道中烟气温度较高，喷入烟道的雾化脱硫废水迅速在高温烟道中蒸发掉水分，废水中的杂质以固体物的形式和粉煤灰一起随烟气进除尘器，经过除尘器捕捉，随粉煤灰一起外排，该方法节约成本，改造简单，无固体废弃物处置问题，但是喷洒不均匀会存在喷头堵塞及烟道腐蚀风险，处理量相对有限，受锅炉负荷影响明显，对后续构筑物的影响还需试验检验；

**低温烟道蒸发：**设置在除尘器后，利用低温烟气进行蒸发，当水量出现波动，可能出现烟气热量与蒸发水量不匹配，造成无法完全蒸干的问题。无论采用低温或高温烟气，都会降低最终的排烟温度，对于粉尘等颗粒污染物的除去造成一定的影响。

**烟气旁路蒸发：**烟气蒸发工艺与烟道蒸发工艺类似，利用电厂烟气的余热对脱硫废水进行蒸发，该蒸发不在烟道内进行，通常通过设置旁路，引出高温烟气进行蒸发，该工艺主要为从空预器前抽取高温热烟气，脱硫废水经过雾化器雾化后与热烟气在喷雾干燥塔内相互接触、混合，进而被彻底蒸发。

蒸发产物与烟气一起进入电除尘器，其中的干态物质随粉尘一起进入电除尘器捕集，其中的水蒸气最终进入脱硫塔被收集，解决了固体废弃物处置的问题，实现了“多污染物一体化治理”。

烟气蒸发塔蒸发：配备独立蒸发塔，可以保证内部流场均匀，同时方便系统切换，利用制药行业广泛应用的旋流雾化器可在一定程度上解决堵塞问题，目前该技术已经通过小试试验，下一步计划进行中试试验。蒸发塔适用水量在10t/h以下，当水量波动较大，超过处理负荷，需要先经膜法浓缩。

无论采用烟道还是设置蒸发塔的烟气蒸发技术，都会加重烟道的运行负荷，当液体蒸发不彻底，部分高浓度凝结液不断回流循环，使得体系盐分浓度不断升高，存在一定的风险，同时也存在影响排烟温度的问题。目前市场上烟气蒸发设备投运时间较短，负荷有限，来水水质相对单一，且技术不够成熟，实验模拟数据在工程上推广应用效果存在一定差别，还需经过时间的验证，建议选用前经过长期中试实验确定。

#### 4目前典型分盐工艺

高盐废水通过蒸发结晶产生的盐是一种混盐，很难充分利用，为了使蒸发结晶产生的盐得到进一步综合利用，部分废水“零排放”工艺中采用了分盐工艺，主要工艺如下：

(1) 纳滤：以压力差为推动力的膜分离过程，截留透过超滤膜的小分子量有机物，透析反渗透膜所截留的部分无机盐，实现浓缩与脱盐同步进行，一般分离氯化钠及部分杂盐。该方式常温下即可进行分离，回收率较高，占地相对较小，能耗低，自动化性能好，会有部分杂盐产生，也可通过硫酸钠废液回流解决，硫酸根通过软化澄清工艺去除，但是该方法需要综合考虑系统离子平衡，需要核算氯化钙药剂使用情况。

(2) 冷冻分盐：是根据硫酸钠的物料特性，经过冷冻脱硝得十水硫酸钠，含有大量氯化钠的母液去电解生产烧碱，芒硝熔融后蒸发得到纯度较高的无水硫酸钠。该工艺采用真空冷冻，需要配备压缩机，能耗高，采用间接冷冻，成本较低，投资也较少，但是效率较低，采用直接冷冻法，虽然工艺简单，但分盐效果不好。

(3) 盐硝联产：主要应用于化工行业，废水经高温蒸发得到无水硫酸钠，冷冻结晶析出芒硝与二水氯化钠的复盐，复盐熔融后返回原液池蒸发后重新得到无水硫酸钠；纯度较高的氯化钠母液蒸发得到氯化钠晶体，离心后的母液部分外排处理，能得到纯度更高的无水硫酸钠和氯化钠。该工艺能耗较高，在电厂的应用有待进一步研究。

#### 5电厂废水零排放技术实施的可行性分析

1) 国内尚缺乏电厂废水“零”排放技术的实际工程案例 目前国内火电厂的节水工作虽然取得了很大进步，但随着“水十条”的颁布，资源约束与排放限值共同施压，未来火电厂面临的废水治理形势依然严峻。

电厂废水“零”排放技术属于国际前沿技术，在国外有少量成功案例，基于国内的经济和技术现状，目前所谓的电厂“零”排放大多只是废水的近零排放，真正意义的零排放在现阶段成功的工程实例尚少。末端杂盐的处置也成为困扰电厂发展的一大问题，而国外电厂杂盐的处置则无相关环保政策压力要求。

2) 关键的分盐技术已在其它行业成功应用，电厂零排放技术预处理与减量化工艺相对成熟，但前端若不经处理直接进行蒸发，结晶出的固体物为杂盐混合物，固体废弃物资源化处理问题日益突出，由于其不符合环保要求，作为危废处理成本较高，混盐方式存在诸多问题，当前环保形势日益严峻，相关企业需进行分盐技术储备与路线改造，通过纳滤、冷冻结晶、盐硝联产方式可实现分盐的目的。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/141965.html>