

燃煤电厂烟气湿法脱硫废水零排放处理技术及其发展趋势

折玲玲（山西西山热电有限责任公司，山西 太原 030022）

摘要：文章以燃煤厂湿法脱硫废水零排放处理技术进展为研究对象，首先对燃煤厂湿法脱硫废水处理技术现状进行了分析，随后探讨了燃煤厂湿法脱硫废水零排放处理技术路线选择原则，并着重对燃煤厂湿法脱硫废水处理技术进展进行了研究，最后围绕某脱硫废水处理技术，对其进行的具体的应用分析，以供参考。

关键词：燃煤厂；湿法脱硫废水；零排放；技术进展

1 燃煤厂湿法脱硫废水处理技术现状

在燃煤厂，传统脱硫废水的处理采用的是“三联箱”处理工艺。通过让废水经过“中和箱”、“反应箱”以及“絮凝箱”，并在其中加入石灰乳、有机硫、絮凝剂等，去除废水中的杂质。再经过沉淀池进行澄清，最终获得的出水水质能够排放达到排水标准。但经过上述工艺处理后，废水中的氯离子含量依然很高，且水有着非常大的硬度，本身有着较强的腐蚀性，因此在最终回收利用方面，依然会面临着种种限制，如果直接将其排放至自然环境之中，依然会对周围水体带来不利影响。基于此，必须加强对燃煤厂湿法脱硫废水零排放处理的研究，从而确保最终的出水能够达到排放到自然环境中的标准，并实现出水的深度回收利用。

2 燃煤厂湿法脱硫废水零排放处理技术路线选择原则

针对燃煤厂湿法脱硫废水零排放处理技术路线选择，应遵循以下原则：

①可靠与经济性原则。即针对脱硫废水零排放处理，能够保持长期稳定顺利的运行，降低整个处理过程的成本，保障处理成效；

②因地制宜原则。不同的燃煤厂，基础设施条件不同，实际生产的脱硫废水也有一定差异性，因此在最终选择脱硫废水零排放处理技术路线时，还应遵循因地制宜原则，考虑不同燃煤厂的实际情况，如此更有利于相应处理技术发挥出更大作用价值；

③综合性原则。针对脱硫废水的处理，仅仅依靠单一的零排放技术，并不能够达到最终的排放目标。因此还需要综合考虑湿煤电厂系统现有的废水处理单元设施，注重实现处理技术与单元措施协同运行，才能发挥出更好的废水处理效果^[1]；

④安全环保原则。针对脱硫废水的零排放处理，在技术路线选择方面，应注重凸显“零排放”特征，要求在完成废水处理后，能够满足绿色环保的要求，既不能带来新的污染，同时也要确保废水处理后能够进行充分的回收利用。

3 燃煤厂湿法脱硫废水处理技术进展

3.1 脱硫废水预处理技术

3.1.1 化学沉淀处理技术

该项技术并不复杂，主要是通过向废水中投入一些

化学药剂，然后利用废水中的一些物质与化学药剂发生沉淀反应，从中顺利将这些物质从废水中去除。比如废水中的钙离子、镁离子、硫酸根等，便能够经过化学沉淀处理技术有效去除。常用的化学沉淀技术处理方法有石灰-碳酸钠法、氢氧化钠-碳酸钠法等，能够对水质起到良好的软化效果。

3.1.2 混凝沉淀技术

在对废水完成化学沉淀处理后，针对依然存在的一些悬浮物以及其他一些杂质，可以通过向废水中加入混凝剂，比如聚合氯化铝和聚硅酸铁等，成功让这些杂质聚集在一起，形成更易于分离的絮凝体，达到进一步净化水质的效果。但这种方法受客观水质情况的影响较大，且无法完全将悬浮物去除，整体处理效果存在较大波动，因此还需要继续做后续的净化处理。

3.1.3 过滤

为有效提高脱硫废水的水质，让整体废水变得更加清澈，针对已经生成的混凝沉淀，还需要做好过滤处理。在实践中，可灵活选择多种过滤处理方法。比如微滤、超滤、纳滤等。其中对微滤而言，可以选择内压错流式管式微滤方式，该项过滤技术有着很多优势^[2]。比如通过采用这种过滤方式，前期无需投入大量的絮凝剂进行沉淀铺垫，同样能够起到良好的净化效果。且该项过滤技术本身有着非常高的自动化程度，运行稳定，因此针对一些高固体含量废水，非常适合采用这种处理技术。

3.2 脱硫废水浓缩减量技术

3.2.1 正渗透浓缩减量技术

该项技术的核心是采用了选择性分离膜，通过在膜内外制造浓度，从而顺利完成废水的浓缩化处理。尤其是随着近些年正渗透膜生产制造工艺不断精进，促使正渗透浓缩减量的效果也得到了显著提升。在实际应用时，耗能得到了显著降低，经过正渗透处理后，出水水质也得到了显著提升，因此已经逐步应用到商用领域之中。但当前针对正渗透膜处理的缺陷也不容忽视，比如该渗透膜的水通量较低，从而不利于整体净化处理效率提升。同时针对该渗透方法的驱动溶液制备难度比较高，因此整体处理成本居高不下，因此未来还需要不断进行优化改进，才能发挥出更大作用价值。

3.2.2 反渗透浓缩减量处理技术

同渗透浓缩减量技术一样，该项技术的核心关键在

于反渗透膜的应用。通过给予待浓缩减量溶液一定压力，当这种压力高于溶液渗透压时，溶剂会逆向渗透，最终实现溶液与溶质的分离。对反渗透膜而言，本身有着非常好的过滤性能，溶液中溶质若超出 0.1Nm ，便能够成功截留，除此之外，针对有机物，也有着非常好的截留效果。一般若有机物相对分子质量超出了 100，便能够有效截留。基于此，该项技术有着显著的出水稳定、除盐效率高、耗能较低等优点。但处理应用的反渗透膜，实际造价比较昂贵，且反渗透膜比较“脆弱”，易磨损，因此还需要在后续研究中加以解决。

3.2.3 电渗析浓缩减量处理技术

该项技术主要从离子交换层面入手，达到浓缩减量的目的。在实际应用过程中，主要利用在阴阳两极不同的电位差作为驱动力，同时采用了离子交换膜作为“滤网”。在阴阳两极间，通过接通直流电，溶液中的阴、阳离子会受到电流吸引，向阴阳两极方向迁移。而在经过离子交换膜时，由于这种过滤膜具有离子选择性，因此能够在膜内外，形成不同离子浓度的“淡室”与“浓室”，最终可达到溶液浓缩、提纯的目标。该项浓缩减量技术不仅耗药量相对较少，而且对中废水盐浓度有着非常好的适应性，因此能够提高浓缩减量的效果。但该项技术也有一定缺陷问题。比如实际需要消耗的大量水量，一些物质本身难以电离，因此去除也比较困难，容易结垢，需要的处理设备也比较多变复杂等。因此在后续的研发改进中，还需要从电极板材料改进等方面入手，弥补技术缺陷问题。

3.2.4 膜蒸馏技术

该项技术主要浓缩的是一些非挥发溶质。通过让水蒸气直接透过过滤膜，余下的物质便是不易挥发的物质。在火力发电厂中，低品质热源非常丰富，因此也非常适合采用这种浓缩减量技术，可以提高整体的能源利用率。但由于当下针对蒸馏膜的研发依然有着较大的优化空间，因此无法被广泛用于商用领域。

3.3 脱硫废水末端零排放技术

3.3.1 蒸发塘技术

该项零排放技术主要利用的是自然蒸发的原理。常用的自然蒸发设备为机械雾化蒸发器，有利于提高自然蒸发的效率。一般在水塘面积同等的情况下，相较于普通蒸发塘，采用机械雾化蒸发器在蒸发效率上能够提升至 14 倍。但该项技术也有明显的缺陷，比如采用的设备占地空间较大，前期需要投入大量基础设施建设成本。同时蒸发的水分也难以充分回收利用，因此并不适合在脱硫废水中加以应用。

3.3.2 结晶技术

针对脱硫废水的零排放处理，结晶技术也是一项应用较为广泛的技术。所谓结晶，即溶液在过饱后。能够形成晶核，最终实现晶体与母液相分离。在具体应用过程中，结晶技术通常会搭配蒸发塘技术，二者能够发

挥出“ $1+1 > 2$ ”的效果。通过上述两者结合，形成了 MVR 工艺与 MED 处理工艺。其中对 MVR 工艺而言，如今已经应用发展相对比较成熟，且整体耗电量相对较高。通常情况下，每立方米脱硫废水的整体耗电量为 $50\sim 85\text{kWh}$ 。比如某电厂脱硫废水的零排放处理中，采用了这种结晶 + 蒸发塘技术，最终成功获得了达到工业盐标准的结晶盐，实现了脱硫废水的零排放与综合利用。但从综合效益来看，该项技术的实施，前期需要进行大量投入，开展基础设施建设，消耗的基建成本比较高^[3]。与此同时，在实际进行生产过程中，能耗消耗也非常高，并且从最终结晶盐生产情况来看，虽然也产出了一些达到工业标准的结晶盐，但依然有很多结晶盐属于杂盐，无法进行回收利用。

3.3.3 烟道蒸发

针对该项脱硫废水技术的实施，按照不同的蒸发位置，可分为两种蒸发技术形式。一是直喷烟道余热蒸发技术，二是高温旁路烟气蒸发技术。对前者而言，通过选择在锅炉尾部空气预热器与除尘器之间，设置相应的烟道与喷嘴，然后对经过浓缩后的脱硫废水进行雾化处理。而对雾化液滴来说，受高温烟气的影响，本身能够快速地蒸发，并随着烟气一起排出。而脱硫废水中的杂质，则会被收入除尘系统，随粉煤灰一起排出，最终实现脱硫废水的零排放目标。从电厂应用该项零排放技术效果来看，取得了良好的效果，且整体的投入与运行成本也相对较低。但后续在煤电厂生产过程中，伴随着低温电除尘技术的推广普及，烟道余热蒸发能够利用的烟道长度在不断地减小，因此也在一定的程度限制了该项技术效果的发挥。

而对后者来说，脱硫废水在经过上述沉淀以及浓缩处理后，经高效雾化喷头进行雾化处理，使得废水被分解为微小的液滴，这些液滴经过高温烟气后，会被直接蒸发；而其中的含硫物质也在蒸发过程中被不断的析出，并附着在烟气中的粉尘颗粒上，最终被除尘器捕所捉；在后续的水蒸气中，也含有一定的硫物质，这些物质将会随着烟气进入脱硫塔。经过脱硫塔的处理，最终能够实现脱硫废水的零排放。这一零排放技术也被应用于某电厂之中，并取得了良好的效果。

从生产应用实践来看。该项技术实施所采用的设备系统结构简单，还能够结合实际需求，合理控制烟气流量流速，不会对主烟道造成较大的影响，因此有着非常高的应用价值。

4 燃煤厂湿法脱硫废水处理技术具体应用分析

本次燃煤厂湿法脱硫废水处理技术应用，主要以混凝沉淀技术为例进行分析，该项技术实施需要历经以下几个流程：

4.1 中和

在中和箱中，先添加一定量的氢氧化钙，主要目的是利用氢氧化钙，促使含硫废产生一定的酸碱中和反应，

降低废水的酸性。与此同时，还能够成功析出废水中一些重金属物质，比如锌、铜、镍、铬等，使其形成氢氧化物沉淀，成功将这些重金属物质去除。同时还应注意，不同的金属离子，在形成氢氧化物时，需要的 pH 值条件也有一定差异性。相较于二价金属例子，对三价金属离子而言，成功形成氢氧化物沉淀所需的 pH 值一般要更低。并且相应的二价和三价重金属离子，主要通过形成微溶的氢氧化物，顺利的从废水中沉淀出来。通常而言，在进行含硫废水中和时，将 pH 值控制在 9.0~9.5 之间比较合适。在火力发电厂实际生产之中，之所以选择采用氢氧化钙作为中和剂，主要是因为这种物质在水中呈微溶状态，不仅能够进行 pH 调节，而且这种调节过程还具有一定的缓冲空间，因此能够简化实际操作难度。不仅如此，采用氢氧化钙进行中和调节，还能够有效去除废水中的氟化物和砷化物。此外，从成本角度考虑，氢氧化钙便宜易得，因此非常适合作为中和物质。

4.2 沉淀

在采用氢氧化钙将含硫废水 pH 值调节至 9.0~9.5 后，废水会自动流入沉淀箱，而废水中的镍、铬和铅等重金属离子，则会形成氢氧化物沉淀，留在沉淀池。但对汞和镉而言，这些重金属氢氧化物有着非常大的溶度积，且在废水中，残留含量也比较高。通过采用氢氧化钙，将废水调节成碱性环境，由于硫化物的溶度积小于氢氧化物的溶度积，因此可以向沉淀箱中添加硫化物，该物质不仅能够与汞和镉等重金属形成硫化物沉淀，成功析出这些物质，还能进一步去除废水中残留的少量的铁、铜、镍等金属物质。在实际沉淀操作过程中，可供选择的沉淀剂有：有机硫、硫化钠、硫化氢或硫化亚铁。通常情况下，选择有机硫化物更为适合。

4.3 絮凝

含硫废水在经过沉淀反应后，还会余下很多悬浮物，真正这些悬浮物的处理，可以采用以下常规的混凝剂与絮凝剂去除。比如通过添加一些混凝剂，能有效中和废水中的悬浮物颗粒表面电荷，此时悬浮颗粒会处于失稳状态，由此会形成粒径较大的颗粒团。而加入絮凝剂，则能够有效降低大直径颗粒团的表面张力，一方面，能够使得颗粒团进一步增大，另一方面，针对一些细小的絮凝物，也能够逐渐聚集，形成大粒径物质，变得更加容易沉淀。除此之外，在实际进行絮凝反应过程中，最终生成的絮凝物质，还能够有效吸附含硫废水中的细小重金属沉淀物，从而进一步增强重金属沉淀物的去除效果。在实际操作中，混凝剂可以选择聚铁、聚铝和铝铁盐等，助凝剂可以选择聚丙烯酰胺等。

4.4 pH 值调节

含硫废水经过絮凝反应后，此时内部大部分杂质已经去除，因此会流入澄清池内，然后进行泥水分离。此时澄清池中的上清液 pH 值一般较高（在 9 左右），不满足国家排放标准要求，因此还需要加入酸性物质，做

好 pH 调节。一般在燃煤电厂中，可加入工业盐酸进行 pH 调节。

总而言之，当前的混凝沉淀法在废水脱硫方面应用已经比较成熟，具有运行相对稳定可靠、维护简单和出水水质较好等优势。但我们也应认识到这种方法存在的一些缺陷问题。

从具体实践情况来看：华电国际邹县发电厂三期及四期采用了以混凝沉淀法技术为重要内容的脱硫废水处理系统，运行结构表明，整体效果相对较差，存在占用设备以及占地空间过多、运行控制难以及入成本高等问题，电厂消耗大量的人力物力进行维护，依然无法有效保障系统能够连续稳定的运行，经常会出现各种故障问题，降低了废水脱硫效率，不利于电厂节水减排效果提升^[4]。又如当涂电厂脱硫废水处理系统运行过程，采用了以混凝沉淀法技术为核心的处理系统，结果发现，三联箱出水 pH 值较高，澄清池出水浊度也比较高，污泥脱水系统出泥量较少，最终导致出水水质不稳定。并且整个废水处理系统在实际运行过程中，也存在无法连续稳定运行的现象，严重削弱了脱硫系统的废水处理效果。基于此，为有效弥补这些缺陷，当下国内电厂一般将这种技术与厂内其他工艺段出水混合，或者采用其他深度处理方法对其进行处理，以满足《污水综合排放标准》排放要求或者回用。但是在实际运行中仍出现一些不足，如工艺流程长、占用设备多、运行控制难、投入成本高和设备管道堵塞频繁等缺陷，后续还需要继续进行优化，才能起到更好地废水处理效果。

5 总结

总而言之，传统的脱硫废水处理技术存在种种弊端，既不利于自然环境保护，也不利于废水的回收再利用。为有效解决这一问题，必须要从多方面着手，加强对燃煤厂湿法脱硫废水零排放处理技术的应用分析，从而有效解决上述弊端问题，推动燃煤电厂经营实现更好地发展。

参考文献：

- [1] 孙继华.解读燃煤电厂湿法脱硫废水零排放处理技术进展[J].科技创新导报,2020,17(14):20-21.
- [2] 张山山,王仁雷,晋银佳,等.燃煤电厂脱硫废水零排放处理技术研究应用及进展[J].华电技术,2019,41(12):61-62.
- [3] 陈思艰.燃煤电厂脱硫废水的零排放处理技术[J].建筑工程技术与设计,2018,23(14):20-21.
- [4] 李新法,王祖涛.石灰石-石膏烟气湿法脱硫废水处理方式优化[J].华电技术,2011(05):70-73+80.

作者简介：

折玲玲（1982-），女，籍贯：山西古交，大学本科，太原理工大学热能动力工程专业，技术职称热能动力助理工程师，研究方向热能动力和脱硫。