锅炉烟气脱硫简介和探讨

费忠太（内蒙古荣信化工有限公司，内蒙古　鄂尔多斯　017000）

摘　要：本篇对烟气循环流化床干法脱硫、新型一体化干法脱硫（NID）、喷雾干燥法脱硫、炉内喷钙加尾部增湿活化脱硫、电子束法脱硫及氨法脱硫工艺等进行简单介绍和探讨。

关键词：烟气脱硫；干法脱硫；湿法脱硫；脱硫工艺探究

1 烟气脱硫工艺简介

目前，世界上燃煤电厂所采用的脱硫工艺多种多样，达数百种之多。按脱硫工艺在生产中所处的部位不同可分为：燃烧前脱硫、燃烧脱硫和燃烧后脱硫（即烟气脱硫）。在这些脱硫工艺中，有的技术较为成熟，已经达到工业应用的水平，有的尚处于试验研究阶段。

本篇对石灰石—石膏湿法脱硫、烟气循环流化床干法脱硫、新型一体化干法脱硫（NID）、喷雾干燥法脱硫、炉内喷钙加尾部增湿活化脱硫、电子束法脱硫及氨法脱硫工艺等进行简单介绍和探讨。

1.1 石灰石—石膏湿法脱硫技术

石灰石—石膏湿法脱硫工艺采用价廉易得的石灰石作脱硫吸收剂，石灰石经破碎、加水研磨制成石灰石吸收浆液。在吸收塔内，吸收浆液与烟气充分接触混合，烟气中的 SO_2 与石灰石浆液中的碳酸钙以及送入的氧化空气进行化学反应而被脱除，最终反应产物为石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去带出的细小液滴，经烟气换热器加热升温后排入烟囱。石灰石—石膏湿法脱硫工艺在脱硫的同时，还去除了部分烟气中的其他污染物，如粉尘、HCl、HF、SO_3 等。脱硫石膏浆经脱水装置脱水后可以回收进行综合利用。在脱硫吸收塔内烟气中的 SO_2 首先被浆液中的水吸收与浆液中 $CaCO_3$ 的反应生成 $CaSO_3$，$CaSO_3$ 被送入空气中的 O_2 氧化，最终生成石膏晶体（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）。该工艺适用于任何含硫量煤种的烟气脱硫，脱硫效率一般可达到 95% 以上，对机组容量无限制，尤其是应用在大机组（200MW 及以上机组）。

脱硫副产物石膏的处置方式一般有抛弃和回收利用两种方法，处置方式的选择主要取决于市场对脱硫石膏的需求、脱硫石膏的品质以及是否有足够的堆放场地等因素。美国多采用抛弃方式，抛弃量约占 86%，主要弃置于灰场或回填旧矿坑；日本和德国多采用回收利用方式，主要用作水泥缓凝剂和建筑材料等，石膏的利用率达 90% 以上。

采用石灰石—石膏湿法工艺时，吸收塔出口的烟气温度在 50℃左右，如果不装设烟气换热器，吸收塔出口的净烟气直接通过烟囱排放，烟囱出口的排烟温度约为 40℃左右，由于排烟温度的降低，烟气抬升高度亦随之降低，扩散条件差，SO_2、烟尘和 NOx 的落地浓度将增大，最大浓度点的距离距烟囱更近，同时，由于排烟温度低，烟气中饱和水蒸汽含量大大增加，烟囱会出现冒“白烟”的现象。湿法脱硫不能有效除去烟气中的 SO_3，吸收塔出口的低温烟气经除雾器后仍含有少量的液滴（一般为 75mg/Nm^3）。低温湿烟气进入烟囱后，随着烟温的降低，水蒸汽会结露成液滴，与烟气中的三氧化硫化合，形成硫酸液膜，将对烟道及烟囱筒体产生强烈的腐蚀。

1.2 烟气循环流化床干法脱硫技术

烟气循环流化床脱硫工艺是由德国鲁奇公司 70 年代开发的一种干法脱硫工艺，由吸收剂制备、吸收塔、脱硫灰再循环、除尘器及控制系统等部分组成。该工艺一般采用干态的消石灰粉作为吸收剂，也可采用其他对二氧化硫有吸收反应能力的干粉作为吸收剂。

锅炉排出的未经处理的烟气从底部进入吸收塔，烟气经吸收塔底文丘里结构加速后与加入的消石灰、循环灰及水发生反应，除去烟气中的 SO_2 等气体。烟气中夹带的吸收剂和脱硫灰，在通过吸收塔下部的文丘里管时，受到气流的加速而悬浮起来，形成激烈的湍动状态，使颗粒与烟气之间具有很大的相对滑落速度，颗粒反应界面不断摩擦、碰撞更新，从而极大地强化了气固间的传热、传质。同时为了达到最佳的反应温度，通过向吸收塔内喷水，使烟气温度冷却到 70℃左右。

携带大量吸收剂和反应产物的烟气从吸收塔顶部侧向下行进入脱硫除尘器，进行气固分离，经气固分离后的烟气含尘量不超过 50mg/Nm^3。为了降低吸收剂的耗量，大部分收集到的细灰及反应混合物返回吸收塔进一步反应，只有一小部分被认为不再具有吸收能力的较粗颗粒被作为脱硫副产物排到电厂脱硫灰库。

该工艺适用于任何含硫量煤种的烟气脱硫，脱硫效率可达到 90% 以上。随着最近几年的不断发展，单机的烟气处理能力比过去增大了许多，300MW 机组已有运行业绩，是目前干法脱硫技术商业应用中单塔处理能力最大、脱硫综合效益好的一种方法。

1.3 新型一体化干法脱硫（NID）工艺

NID 工艺是 ALSTOM 公司于 90 年代中期，在循环流化床原理基础上开发的一种简易干法脱硫工艺。

从锅炉的空预器出来的烟气，经静电除尘器 ESP 预除尘后进入反应器，和均匀混合在增湿循环灰中的吸收剂发生反应。在降温和增湿的条件下，烟气中的 SO_2 与

吸收剂反应生成亚硫酸钙和硫酸钙。反应后的烟气携带大量的干燥固体颗粒进入脱硫后的布袋除尘器内收集净化。经过捕集、干燥的循环灰从烟气中分离出来落入灰斗，经流化后由输送设备输送给混合器，与来自消化器的新鲜消石灰混合。混合灰经过增湿搅拌后进入反应器实现一个循环过程。灰循环倍率可达到 100 次以上。净化后的烟气比露点温度高 20℃以上，经过引风机排入烟囱。其主要化学反应式是：

此工艺化学反应过程产生的副产物呈干粉状态，其化学成分主要由飞灰、$CaSO_3$、$CaSO_4$ 和未反应完的吸收剂 $Ca(OH)_2$ 等组成。由于排出的脱硫灰含水率只有 2% 左右，流动性好，适宜采用气力输送装置外送，也可用汽车运输等方式送至灰场。

该工艺主要用于中小机组、低硫煤和脱硫率要求小于 80% 的场合。

1.4 喷雾干燥法脱硫技术

喷雾干燥法脱硫工艺以石灰为脱硫吸收剂，石灰经消化并加水制成消石灰乳，消石灰乳由泵打入位于吸收塔内的雾化装置，在吸收塔内，被雾化成细小液滴的吸收剂与烟气混合接触，与烟气中的 SO_2 发生化学反应生成 $CaSO_3$ 和 $CaSO_4$，烟气中的 SO_2 被脱除。与此同时，吸收剂带入的水分迅速被蒸发而干燥，烟气温度随之降低。脱硫反应产物及未被利用的吸收剂以干燥的颗粒物形式随烟气带出吸收塔，进入除尘器被收集下来。脱硫后的烟气经除尘器除尘后排放。为了提高脱硫吸收剂的利用率，一般将部分脱硫灰加入制浆系统进行循环利用。

该工艺有两种不同的雾化形式可供选择，一种为旋转喷雾雾化，另一种为气液两相流雾化。

喷雾干燥法脱硫工艺具有技术较为成熟、工艺流程较为简单、系统可靠性较高等特点，对含硫量高的煤种，其脱硫率可达到 80% 以上。但对于低含硫煤种，其脱硫效率一般在 50% 左右。

1.5 炉内喷钙加尾部增湿活化脱硫技术

该工艺是在炉内喷钙脱硫工艺的基础上在锅炉尾部增设了增湿段，以提高脱硫效率，吸收剂多采用石灰石粉。石灰石粉采用气力方式喷入炉膛 850℃ ~1150℃温度区，其受热分解为氧化钙和二氧化碳；氧化钙与烟气中的二氧化硫反应生成亚硫酸钙。由于反应在气固两相之间进行，受到传质过程的影响，反应速度较慢，吸收剂利用率较低。在尾部增湿活化反应器内，以雾状喷入增湿水，与未反应的氧化钙接触生成氢氧化钙进而与烟气中的二氧化硫反应。由于增湿水的加入使烟气温度下降，应控制出口烟气温度高于露点温度 10℃ ~15℃。由于吸收烟气热量，水份被迅速蒸发，未反应的吸收剂、反应产物呈干燥态被除尘器收集下来。

该脱硫工艺适合含硫量高的煤种，当钙硫比控制在 2.5 及以上时，系统脱硫率可达到 65~80%。由于脱硫过程吸收剂的利用率较低，脱硫副产物中亚硫酸钙含量较高，其综合利用受到一定的限制。另外，该工艺对锅炉的效率有一定的影响。

1.6 电子束法脱硫工艺

该工艺由排烟预除尘、烟气冷却、氨的充入、电子束照射和副产品捕集等工序所组成。锅炉所排出的烟气，经过除尘器的粗滤处理之后进入冷却塔，在冷却塔内喷射冷却水，将烟气冷却到适合于脱硫、脱硝处理的温度（约 70℃）。

经冷却的烟气进入反应器，在反应器进口处将一定的氨气、压缩空气和软水混合喷入。加入氨的量取决于 SO_2 浓度和 NOx 浓度，经过电子束照射后，SO_2 和 NOx 在自由基作用下生成中间生成物硫酸（H_2SO_4）和硝酸（HNO_3）；硫酸和硝酸与共存的氨进行中和反应，生成粉状微粒（硫酸铵与硝酸铵的混合粉体）；生成的粉体微粒一部分沉淀到反应器底部，通过输送机排出，其余被副产品除尘器所分离和捕集，经过造粒处理后被送到副产品仓库贮藏。经过净化后的烟气由脱硫增压风机排出，经烟囱排向大气。

1.7 氨法脱硫工艺

该脱硫工艺以氨水为吸收剂，副产品为硫酸铵。烟气经烟气换热器冷却至 90℃ ~100℃，进入预洗涤器洗涤后，除去 HCl 和 HF；经过液滴分离器除去水滴进入前置洗涤器中。在前置洗涤器中，氨水自塔顶喷淋洗涤烟气，SO_2 被洗涤去除，烟气经液滴分离器除去水滴，进入脱硫洗涤器，进一步被洗涤，经除雾器除去雾滴，经烟气换热器加热后经烟囱排放。洗涤工艺中产生的硫酸铵溶液浓度约为 30%，可以送到化肥厂进一步处理或直接作为液体氮肥出售，也可以把这种溶液进一步加工成颗粒、晶体或块状化肥出售。

2 脱硫工艺初步探讨

①脱硫工艺方案的选择不仅要根据锅炉容量、燃煤硫份、要求的脱硫效率条件等确定，而且还要结合脱硫工艺的成熟程度、国产化程度、脱硫剂供应条件、脱硫副产品的处置方式和综合利用条件、脱硫废水的处置限制条件、脱硫场地条件等因素，经全面技术经济比较后确定；

②干法脱硫与湿法脱硫相比，无论是初投资还是运行成本都具有一定的优势，而且干法工艺不需要对烟囱采取特殊的防腐措施，运行费用低，设备少、操作方便，水量消耗仅为湿法的 1/3，无废水排放、无石膏处理。采用一炉一塔布置，操作灵活、简便，运行经济、便于调整。干法脱硫对锅炉负荷适应能力差，在锅炉低负荷时需要烟气回流以保证流化床稳定，这样会增加引风机电耗。

参考文献：

[1] 陈欢哲，何海霞，万亚萌，田静，李涛，任保增．燃煤烟气脱硫技术研究进展 [J]. 无机盐工业，2019,51(05):6-11.