

# 燃煤发电机组超低排放脱硫方案的选择

张天健

(大唐南京发电厂, 江苏 南京 210059)

**摘 要:** 国家环保政策的日趋严格, 环保问题的矛盾突出, 火力发电厂开始寻求燃煤发电机组超低排放的解决方法, 本文对燃煤发电机组超低排放脱硫主体设备的技术方案进行对比分析, 为超低排放的技术方案选择提供参考。

**关键词:** 燃煤发电; 超低排放; 湿法脱硫; 方案

## 0 引言

随着国家环保政策的日趋严格, 新颁布的《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011) 也在排放总量和排放浓度两方面提出更高的要求, 新的排污收费制度的实施也对火电厂形成了很大的压力。也有报告中指出, 燃煤对以大气雾霾为代表的大气污染形成扮演着最重要的角色, 不清洁的能源使用, 是我国雾霾产生的最根本的原因。这个不清洁的能源, 最主要的是指煤炭。

2014 年, 国内浙江、江苏、广东、山西等省份已开始对个别已达到排放新标的机组的烟气脱硫、脱硝和除尘系统进行进一步提效改造, 实现烟气污染物的超低排放, 在满足特别排放限值的基础上, 达到以天然气为燃料的燃气轮机组的排放标准, 即烟尘排放浓度不大于  $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ , 二氧化硫排放浓度不大于  $35\text{mg}/\text{Nm}^3$ , 氮氧化物排放浓度不大于  $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

已达新标并拟开展超低排放的机组的烟尘和脱硝的改造方案相对单一, 烟尘超低排放可以通过增加湿式电除尘器等附加精细除尘设备, 脱硝超低排放是通过增加催化剂反应层来实现改造目标, 而脱硫超低排放因存在各种技术的组合, 以及吸收塔选择技术路线的不同, 可选择方案较多。

湿法脱硫方案通过向吸收塔的浆液中鼓入空气, 强制使  $\text{CaSO}_3$  都氧化为  $\text{CaSO}_4$  (石膏), 脱硫的副产品为石膏。同时鼓入空气产生了更为均匀的浆液, 易于达到 90 % 以上的脱硫率, 并且易于控制结垢与堵塞。由于石灰石价格便宜, 并易于运输与保存, 因而自 80 年代以来石灰石已经成为石膏法的主要脱硫剂。该方案还具有适用的煤种范围广、脱硫效

率高、吸收剂利用率高、工作的可靠性高的优点。当今国内外选择火电厂烟气脱硫设备时, 石灰石/石膏强制氧化系统成为主要的湿法烟气脱硫工艺, 截至 2013 年底, 已投运火电厂烟气脱硫机组容量约 7.2 亿千瓦, 占全国现役燃煤机组容量的 91.6%, 其中 300MW 以上机组 92% 选择了石灰石/石膏湿法脱硫。

吸收塔内的反应符合德拜-休克尔理论, 根据这个基本原理, 在实际运行的浆液 pH 值 (一般为 5~6) 下, 对于烟气中  $\text{SO}_2$  的脱除极限, 取决于  $\text{SO}_2$  的气、液相平衡。在通常的石灰石-石膏湿法脱硫装置中,  $\text{SO}_2$  气相平衡浓度为 5 ppmv (相当于  $15\text{mg}/\text{Nm}^3$ )。也就是说对于采用石灰石作为脱硫剂的脱硫装置, 出口  $\text{SO}_2$  浓度小于  $15\text{mg}/\text{Nm}^3$  是其平衡浓度, 是可能脱除到的最低浓度。因此, 在燃煤电厂湿法脱硫装置上使  $\text{SO}_2$  排放值低于  $35\text{mg}/\text{Nm}^3$  上是可以实现的。但需要对影响脱硫效率的主要有液气比、烟气分布均匀性、吸收区高度、吸收塔浆池容量等因素进行分析和选择。

湿法石灰石/石膏脱硫改造根据吸收塔设计结构的不同, 可分为单塔双循环、双塔双循环、单塔单循环强化传质、单塔单循环提高液气比。

## 1 单塔双循环

单塔双循环湿法脱硫技术是在单循环湿法脱硫技术上发展而来的。其主要工艺见图 1, 在脱硫塔内设置积液盘将脱硫区分隔为上、下循环脱硫区, 下循环脱硫区、下循环中和氧化池及下循环泵共同形成下循环脱硫系统, 上循环脱硫区、上循环中和氧化池及上循环泵共同形成上循环脱硫系统, 在一

个脱硫塔内形成相对独立的双循环脱硫系统，烟气的脱硫由双循环脱硫系统共同完成。本工艺双循环脱硫系统相对独立运行，但又布置在一个脱硫塔内，既保证了较高的脱硫效率，又降低了浆液循环量和系统能耗，并且单塔整体布置还减少了占地，节约了投资；本工艺特别适合于燃烧高硫煤产生的烟气脱硫，脱硫效率可达到 99% 以上，若要控制二氧化硫排放浓度不大于  $35\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，理论入口浓度可达  $3500\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

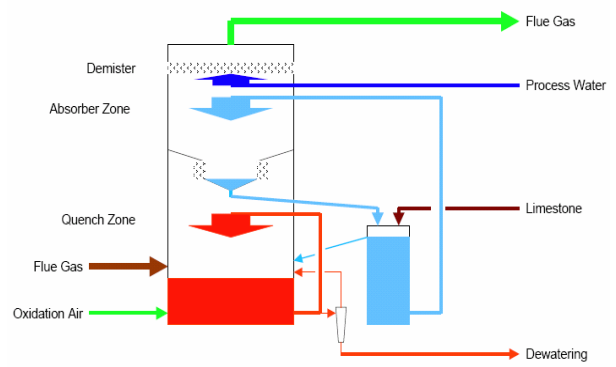


图 1 单塔双循环工艺流程图

本技术的重点在于浆液分区使用，吸收区循环和氧化区循环，单塔双循环两个系统浆液性质分开后，可以满足不同工艺阶段对不同浆液性质的要求，更加精细地控制了工艺反应过程，高pH 值的吸收区循环在较低的液气比和电耗条件下，可以保证很高的脱硫效率。低pH 值的氧化区循环可以保证吸收剂的完全溶解以及很高的石膏品质，并大大提高氧化效率，降低氧化风机电耗。氧化区循环可以去除烟气中的杂质，包括部分的SO<sub>2</sub>、灰尘、HCL和HF。杂质对二级循环的反应影响将大大降低，提高二级循环效率。石灰石的流向为先进入二级循环再进入一级循环，两级工艺延长了石灰石的停留时间。

2 双塔双循环

双塔双循环技术是在单塔双循环技术上的发展和延伸，可进一步提高脱硫效率，非常适用于高含硫煤和高脱硫效率的改造工程。能有效的利用原有脱硫装置，避免了重复建设和资源浪费。可适用二氧化硫排放入口浓度不大于  $3500\text{mg}/\text{Nm}^3$  的烟气处理，若建设用地足够可在机组运行期间建设串塔，留接口在停机后施工，可大大减少机组停运改造时间。但存在后期维护和使用费用偏高的问题。工艺流程见图 2。

3 单塔单循环强化传质

单塔单循环强化传质工艺流程见图 3。本工艺是在单塔单循环湿法脱硫技术的基础上进行内部的改造（塔本体高度不做改动），提高气液传质，强化对流效果，从而提高SO<sub>2</sub>的脱除率。本方案改造工作量较小，特别适用于老塔改造，在原有吸收塔内部进行一系列改造（包括优化喷嘴布置、增加均流提效构件、控制内部pH等）来实现系统提效的目标。

典型单循环钙基湿法烟气脱硫系统影响脱硫效率的因素主要有：塔内烟气流速、液气比、吸收区高度、浆液池容量、浆池 pH 值、烟气分布均匀性等等，在工程应用中要根据实际情况选择合适的参数，实现高脱硫率和良好的经济性，根据目前国内外的情况，提高石灰石-石膏湿法脱硫效率的方案主要有：

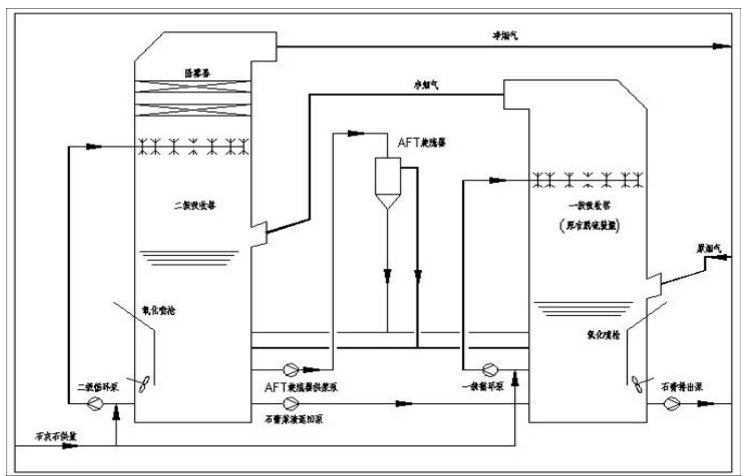


图 2 双塔双循环工艺流程图

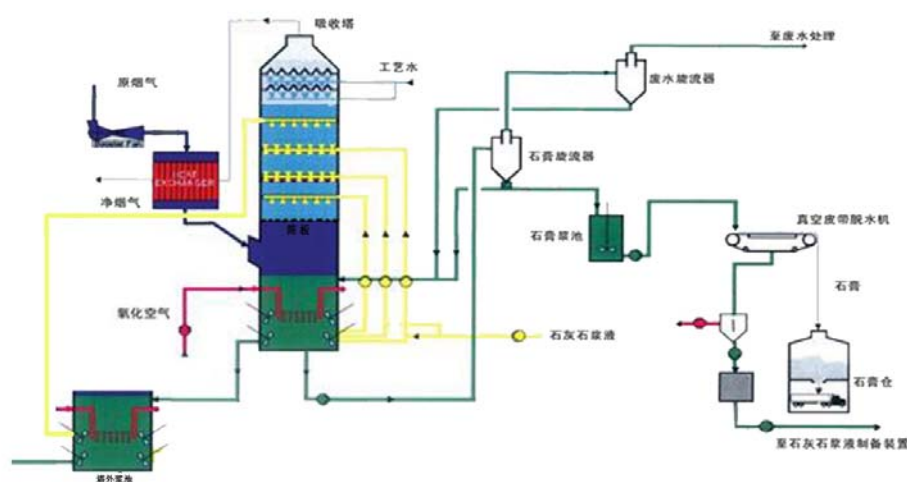


图 3 单塔单循环强化传质工艺流程图

### （1）增加液气比

液气比对脱硫效率的高低有着重要影响。在吸收塔设计中，循环浆液量的多少决定了 $\text{SO}_2$ 吸收表面积的大小，在其他参数恒定的情况下，提高液气比相当于增大了吸收塔内的浆液喷淋密度，从而增大了气液传质表面积，强化传质，提高脱硫效率，提高液气比是提高脱硫效率的有效措施。液气比增大带来的问题是循环泵流量和吸收塔阻力增大，电耗增高。

### （2）采用均流提效构件提高脱硫效率

吸收塔均流构件能改善吸收塔内烟气分布，烟气和浆液的流场分布直接决定着吸收塔内的传质、传热和反应进行程度。对于无均流提效构件塔，改善烟气分布最有效的措施是增加均流提效构件，使进入吸收塔内的烟气分布均匀，避免偏流问题；而对于已有均流提效构件的吸收塔，可以通过调节均流提效构件开孔率、加装第二层均流提效构件满足要求。均流提效构件塔相对于空塔的缺点是吸收塔阻力相对较高，引风机电耗较高。

### （3）合理布置喷嘴，强化传质效果

采用  $120^\circ$  空心锥碳化硅喷嘴，密集布置，面积覆盖率达 200% 以上，在一定的喷射压力下获取直径  $2000\ \mu\text{m}$  以下的浆液液滴，增大浆液与烟气的接触面积；布置在吸收塔周边的喷嘴流量比中心喷嘴流量大 15%，便于烟气向中心流动，避免在周边“短路”。烟气经均流提效构件后，在喷淋区域进一步与浆液接触，再次强化传质，提高脱硫吸收剂的利用

率。

### （4）将标准喷淋层改为对向互补喷淋层

对向互补喷淋层是在中高硫煤或大型机组的脱硫项目的实施中，改进了的喷嘴母管的布置方式，其将两个喷淋管对向布置在同一层上。据计算，在保证脱硫效率的同时，该种布置可以有效降低脱硫塔的高度及循环泵的电耗。对向互补喷淋层实际上是两台循环泵对应的两个喷淋母管分别从吸收塔的两侧进入吸收塔，在同一个平面内交互布置。显而易见，在同一层塔的截面内，对向互补喷淋层可布置更密的喷嘴，这样喷淋的覆盖率和均匀性更好，从而获得更高的效率。

### （5）加装气液传质强化构件

吸收塔内的流场分布情况决定了气液两相的混合和传质效果，从而直接影响着 $\text{SO}_2$ 的脱除效率。对于传统的喷淋塔来说，在塔壁区域，由于喷嘴的布置不尽合理而使得喷淋浆液的覆盖不足，使得烟气沿塔壁逃逸，从而降低了脱硫效率。为改善这一状况，可以通过在喷淋层下面的塔壁区域安装气液传质强化构件，充当塔壁喷嘴的角色，使得吸收区浆液的喷淋密度分布更为均匀，从而提高脱硫效率。

### （6）建塔外浆池

扩大浆池容积，使得浆池中浆液停留时间延长，浆液与氧气的接触时间也延长，氧化更充分，加入的石灰石浆液利用率更高，有利于系统的 PH 值控制，确保系统脱硫效率；同时有利于石膏浆液的结晶并生长，使得反应生成的石膏浆液顺利结晶长大，

对后期的脱水效果有明显的提升，设备运行也更加稳定。

通过以上几种技术的组合，机组燃用含硫 1.2% 以内的燃煤时，可实现 98.5% 以上的脱硫效率，并可达到低排放的脱硫标准。

4 单塔单循环提高液气比

本工艺主要依靠提高液气比，并辅以优化流场结构，从而提高SO<sub>2</sub>的脱除率。本方案改造工作量较大，需对原有吸收塔进行拔高，并在塔内部进行一系列改造（包括提高吸收塔高度、增加喷淋层数量、优化喷嘴布置）来实现超低排放的目标。

利用原有吸收塔现有喷淋层等设施，在吸收塔顶部加高，增加新的喷淋层。吸收塔入口烟道及出口烟道尽可能利用，新增吸收塔段烟气出口接至原吸收塔烟气出口，此方案的优点是改造费用较低，但缺点是对燃煤质量要求高，吸收塔内烟气流速太高，且烟气进、出口流场不佳，严重影响脱硫效率，脱硫塔系统的能耗太高，同时还需对原有吸收塔基础进行核算。

5 结束语

四种方案都有各自的优缺点，在设计选型时要根据具体设计条件而定。技术对比见表 1。大部分达新标拟超低排放改造机组，都会遇到现场布局

受限、系统阻力增加、施工周期短、改造费用、配套辅机升级等一系列问题，而单塔双循环和单塔单循环强化传质对于超低排放改造项目来说，相对还是易于实施，改造费用和工期均得到有效控制，运行实例最多，成为已投运超低排放机组的主流选择。

表 1 四种湿法脱硫技术对比

| 工艺         | 优点  | 缺点   |
|------------|---|--|
| 单塔双循环      | 吸收塔高度和浆池容积较小；<br>L/G 较常规喷淋塔低；<br>浆液 PH 分循环控制，互不干扰；<br>适用于高硫煤； | 单循环改造塔体改动较大，投资较大；<br>外置 AFT 浆池，需要足够场地，且因 pH 高，需要大量氧化；<br>施工工期较长； |
| 双塔双循环      | 吸收塔高度和浆池容积较小；<br>L/G 较常规喷淋塔低；<br>浆液 PH 分循环控制，互不干扰；<br>适用于高硫煤； | 改造工程量巨大，投资很大；<br>双塔布置，占地面积巨大；<br>施工工期很长，若有空余场地，提前施工串塔则可大大缩短工期；   |
| 单塔单循环强化传质  | 系统改动很小，投资低；<br>L/G 较常规喷淋塔大大降低；<br>占地面积小，工期短                   | 烟气阻力较大；  |
| 单塔单循环提高液气比 | 系统改动较小，投资较低；<br>L/G 较高，工期偏长                                   |  |