

超超临界百万机组超低排放改造工程增加湿式电除尘器的探讨

陆锐杰

(国电泰州发电有限公司, 江苏省泰州市高港区永安洲镇 225327)

摘 要: 雾霾肆虐使得环境污染已经成为举国关注的社会问题, 煤炭燃烧是雾霾的最大根源。减少煤炭的大气污染物排放显然是治理雾霾的关键。2014 年 7 月 1 日, 我国对 2012 年之前建成的火电厂执行史上最严《火电厂大气污染物排放标准》。随着我国对火电环保的要求日趋严格, 为进一步降低烟尘的排放浓度能达到超低排放标准, 泰州电厂拆除 GGH, 原脱硫吸收塔后增加二级吸收塔, 二级塔出口增加湿式电除尘器, 湿式电除尘器不仅可消除石膏雨, 捕捉游离液滴, 进一步降低烟尘排放浓度, 同时还可去除烟气中大部分胶状 SO_3 和汞, 进一步净化烟气。

关键词: 超低排放; GGH; 湿式电除尘器

0 引言

目前, 燃煤电厂大气污染物“超低排放”已成为能源、电力、环境、科技甚至社会上的热点话题, 而且随着雾霾问题的严重, 国家进一步加大了污染控制的力度, 特别排放限值提前实施。为响应国家能源局煤电节能减排升级改造行动计划, 在现有超低排放技术尚不成熟的基础上, 泰州电厂潜心专研, 因地制宜、因煤制宜、因炉制宜, 拆除 GGH, 原脱硫吸收塔后增加二级吸收塔, 二级塔出口增加湿式电除尘器, 湿式电除尘器不仅可消除石膏雨, 捕捉游离液滴, 进一步降低烟尘排放浓度, 同时还可去除烟气中大部分胶状 SO_3 和汞, 进一步净化烟气。

1 泰州电厂原烟气环保设施

1.1 设备简述

1.1.1 脱硝装置

脱硝采用 SCR 技术, 催化剂设置 2+1 层, 使用液氨作为还原剂, 设计入口 NO_x 浓度 $300\text{mg}/\text{Nm}^3$, 脱硝效率 75%, 出口 NO_x 浓度不高于 $75\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

1.1.2 脱硫装置

脱硫采用石灰石湿法脱硫技术, 设置有一炉一塔脱硫装置, 配置 GGH, 100% 烟气量下脱硫效率不低于 95.5%。

1.1.3 除尘装置

原设置 3 室 4 电场电除尘器, 原设计除尘效率 99.7%, 出口粉尘排放浓度 $80\sim 100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。后于 2012 年 10 月、2013 年 3 月大修期间, 改成 3 室 5 电场, 设计 99.9%, 配合高频电源改造后, 烟囱出

口粉尘排放浓度可至 $10\sim 20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

1.1.4 烟囱防腐情况

最初的脱硫系统中设置有 GGH, 烟囱为不锈钢内筒, 材质为 JSN 耐硫酸露点钢, 钢内筒外衬 7cm 厚耐酸混凝土, 原设计为干烟囱运行。

1.2 设备运行及存在问题

1.2.1 设备运行情况

锅炉燃烧排放的烟气依次经过脱硝、除尘、脱硫处理后, 净烟气中的主要污染物排放基本达标, 参数如下:

粉尘	$20\text{mg}/\text{Nm}^3$ (标干态, 6% O_2)
NO_x	$100\text{mg}/\text{Nm}^3$ (标干态, 6% O_2)
SO_2	$100\text{mg}/\text{Nm}^3$ (标干态, 6% O_2)

1.2.2 存在问题

上述设备大气污染物治理后, 排放很难满足《火电厂大气污染物排放标准 (GB 13223-2011)》中特别排放限制, 更不要说是超低排放限制。

由于在脱硫后续提效改造中将取消 GGH, 出口排烟温度在 55°C 左右, 降低对烟囱的腐蚀和避免石膏雨问题迫在眉睫。

2 GGH 取消的说明及影响

2.1 拆除 GGH 说明

泰州电厂脱硫装置配套无锡巴克杜尔生产的 GGH 系统, 用于将净烟气加热至 80°C 后排放, 后 GGH 经过改造, 减少换热面积并减少系统阻力, 净烟气加热至 70°C 后排放。但是 GGH 系统始终存在烟气泄漏率问题, 设计要求值为 0.8%, 目前实测在 1.5% 左右。如按照原烟气含硫浓度 $2000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 计

算,净烟气中由于 GGH 泄露造成的 SO_2 浓度为 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$;若原烟气含硫浓度提高,则泄露量更大。所以要达到《火电厂大气污染物排放标准(GB 13223-2011)》中 SO_2 浓度排放不超过 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的要求,必须拆除 GGH。

2.2 拆除 GGH 影响

(1) GGH 拆除后将为脱硫系统降低至少 1000Pa 的阻力空间。

(2) GGH 拆除后利于提高系统的安全稳定性,脱硫旁路拆除后,GGH 成为机组的一个重要辅助设备,一旦 GGH 故障停运将直接导致机组停运。GGH 换热元件结垢后阻力上升也会导致引风机出力不足、能耗上升、机组限负荷等各种故障。

(3) GGH 拆除后烟囱将转为湿烟囱运行,净烟气温度较低且携带大量冷凝水,烟气中残存的 SO_2 和 SO_3 会继续溶解,加剧净烟道及烟囱的腐蚀。

(4) 取消 GGH 后,烟气温度低,降低烟气离开烟囱后的抬升高度,大量水雾形成,冬季烟羽的透明度很低且烟囱附近污染物降落浓度会变高。

取消 GGH,在技术性、可靠性上是可行的,从机组安全性角度上是有利的,综上所述,取消 GGH 利大于弊。

3 增加湿式电除尘器的设想

3.1 烟囱防腐设想

泰州电厂一期两台机组烟囱为不锈钢内筒,材质为 JSN 耐硫酸露点钢,钢内筒外衬 7cm 厚耐酸混凝土,设计为干烟囱运行。

GGH 取消后干烟囱运行方式转变为湿烟囱运行,原先的防腐材质并不能满足湿烟囱运行要求。为提高机组运行期间烟囱的安全性和可靠性,可采取下列措施:

(1) 提高烟囱防腐材质等级,采用钛合金钢板、玻化砖或者玻璃钢等防腐等级较高的材质作为烟囱内衬,解决烟囱腐蚀问题。

(2) 抽取锅炉热二次风混入烟囱,加热净烟气。

(3) 在脱硫塔除雾器后布置湿式电除尘器,捕获净烟气中残存的 SO_2 、 SO_3 、冷凝水、烟尘等杂质,使净烟气尽可能的达到干燥、洁净状态,从而缓解烟囱的腐蚀问题。

以上 3 个措施中,措施 1 可以很好地解决烟囱腐蚀问题,但施工周期长,目前电厂两台机组均不可能有合适的检修周期用来一次性施工;措施 2 在

解决了烟囱腐蚀问题同时,会增加烟囱出口的粉尘排放浓度,从而使粉尘排放不达标;措施 3 可以捕捉烟气中大量的 SO_3 和水等杂质,最终使得烟囱内冷凝液中酸性物质大大减少,提高烟囱冷凝液 PH 值,从而大大减缓酸性物质对烟囱内筒防腐材料的腐蚀,延长烟囱的服务寿命,虽然不能改变湿烟囱运行的本质,但可以在机组目前实际状况下最大程度保护烟囱内筒。

可采用措施 3 和措施 1 相结合的办法:在脱硫塔后加装湿式电除尘器,同时利用两至三个机组停机检修周期对烟囱内部防腐等级进行分段提升,加装湿式电除尘器对现有及将来的烟囱内筒防腐材料起到极好的保护作用,这样就能一劳永逸的解决烟囱防腐问题。

3.2 解决石膏雨的设想

取消 GGH 以后,由于排烟温度降低且烟气中带有大量游离水,所携带的固含物(粉尘和石膏)会对周边环境造成影响,即通常所说的“石膏雨”现象,结合电厂现状,避免和根治“石膏雨”现象在本项目中可行的是降低烟囱入口烟气的含水量,可采取下列措施:

(1) 提高除雾效果。通常可以在吸收塔内设置 2 级屋脊式除雾器,然后在吸收塔出口烟道的适当位置增加 1 级平板式除雾器,降低最终烟囱排放的游离水滴浓度。

(2) 抽取锅炉二次风混入烟囱,提高排烟温度。

(3) 在湿法脱硫后布置湿式电除尘器,捕捉净烟气中的游离水滴。

(4) 在净烟道中加装水冷管式凝水除尘器。采用氟塑料细管密集布置在烟道内,对游离水滴进行拦截。

以上 4 个措施中,措施 1 可以将烟囱出口雾滴从 $75\text{mg}/\text{Nm}^3$ 降到 $40\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的水平;措施 2 中游离水可完全被蒸发,但烟气中的固含量会超标,而且在烟囱的冷凝过程中,固含物会进入二次冷凝水继续排放,虽然排烟温度增高了使得扩散能力增强,避免了石膏雨,但会造成粉尘排放超标;措施 3 中湿式电除尘器对水滴去除效率可以达到 75% 以上,可以将烟囱出口雾滴从 $75\text{mg}/\text{Nm}^3$ 降到 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下;措施 4 与措施 1 类似,但由于其毛细管布置得比较密,除雾效果会略好。在这 4 个措施中,可行的是措施 1、3 和 4,但由于措施 1 使用物理捕捉技术,只能捕捉粒径在 $25\mu\text{m}$ 以上的液滴,使得其

除雾效果有限，措施 4 较 1 会略好，但同时还会进一步降低净烟气温度的，使得烟囱出口扩散能力降低，而措施 3 使用电场捕捉技术，对所有粒径的液滴均有很好的捕捉效果，从而使得净烟气中游离水量降到最低。

3.3 湿式电除尘器的原理及分类

3.3.1 湿式电除尘器的原理

湿式电除尘器的工作原理类似干式电除尘器，利用阴极放电，使流经其中的雾滴、SO₃、尘荷电，在电场的作用下向阳极板运动，最终在阳极板上实现收集、去除。在目前国内外的湿式电除尘器技术中，主要的差别在于阳极板材质的选取，由于该设备处理的对象为含大量游离水的饱和湿烟气，在工作过程中存在着电化学腐蚀、电位差腐蚀、低温腐蚀等，阳极板的选取和工作状态对整个设备的效果起到至关重要的作用。

3.3.2 湿式电除尘器的分类

(1) 导电玻璃钢电极式

该技术采用专利 CF 材质，阳极板具有良好的导电性、耐腐蚀性，表面光滑，系统运行电耗低，不额外增加药品，收集水可直接回用。物耗、能耗低。

(2) 柔性电极式

该技术采用非金属织物柔性电极作为阳极板，在水浸润后可具备导电性，材质本身也耐腐蚀，不额外增加药品，收集水也可回用。物耗、能耗低。

(3) 金属电极式

金属电极式分为 2 类，一类是全部用高耐腐的哈氏合金（如 C276）制作，由于费用过于昂贵，应用较少；另一类是用低性能的 316L 辅以水膜、NaOH，设备内需布置大量喷嘴，阳极板有腐蚀风险，需对收集水进行废水处理。物耗、能耗高。

以上三种技术主要对比参数如表 1 所示。

表 1 湿式电除尘器主要对比参数

参数描述	导电玻璃钢	柔性电极	金属电极
电极材质	导电玻璃钢	非金属织物	316L
导电方式	具有良好导电性和防腐性，不需借助外部水源	金属织物表面需保持有水湿润且均匀	金属不直接作为电极，使用时需保证表面均匀覆盖水膜
冲洗方式	电极表面光滑，只需定时冲洗防止电极表面结垢，大约 24h 一次	厂家说明不需要冲洗	需保持金属电极表面水膜
水耗	10t/h	5t/h	80t/h
电耗	一般	一般	一般
布置要求	可水平、竖直布置	可水平、竖直布置	水平布置
系统阻力	500Pa	700Pa	1000Pa
设备荷载	500t	600t	700t
其它			每小时耗 NaOH 约 0.5t

3.3.3 湿式电除尘器的优点

通过调研，了解到湿式电除尘器在化工、冶金行业应用较为广泛，且属于主要工艺流程单元。其主要功能是可以捕捉烟气里的游离液滴，由于部分粉尘被包裹在水滴内，因此，湿式电除尘器还有间接的除尘效果，其对 SO₃ 也有很好的去除效果。在电厂的湿法脱硫装置后加装湿式电除尘器，有以下几个优点：

(1) 有利于提高 PM_{2.5} 等微细粉尘的去除率。湿法脱硫装置中设置有喷淋层，对烟气进行洗涤，在这个过程中，部分粉尘会被浆液捕捉进入浆池；部分微细粉尘虽然被水滴包裹，但由于粒径偏小，仍然会被烟气带走。湿式电除尘器对液滴有很好的去除效果，会将吸收塔内屋脊式除雾器无法捕捉到的微细液滴进一步捕捉、收集下来，从而降低烟囱的微细粉尘排放量，湿式电除尘器的除尘、除雾效率可达到 75%以上；

(2) 有利于提高烟囱内筒的使用寿命。湿法脱硫的喷淋洗涤对 SO₃ 的去除效率不高，大部分的 SO₃ 会被烟气携带至烟囱排放，而湿式电除尘器对烟气中的 SO₃ 有非常好的捕捉效果，通过湿式电除尘器的作用，会将超过 75% 的酸雾（即 SO₃）捕捉下来，从而可以减少烟囱冷凝液中的强酸性物质，提高烟囱冷凝液的 PH 值，缓解烟囱内筒腐蚀。

(3) 能确保烟囱入口粉尘排在非常低的水平。根据国家发改委 2013 年 8 月 27 日颁布的《国家发展改革委关于调整可再生能源电价附加标准与环保电价有关事项的通知》的第三条，“对采用新技术进行除尘设施改造、烟尘排放浓度低于 30mg/m³（重点地区低于 20mg/m³），并经环保部门验收合格的燃煤发电企业除尘成本予以适当支持，电价补偿标准为每千瓦时 0.2 分钱。” 由于经过吸收塔洗涤后，被烟气携带的液滴会带走一部分固含物，可能会造成最终出口总尘增加。设置湿式电除尘器后，可确保最终烟尘排放浓度低于地方限值，保障电厂的环保收益。

总之，在目前可使用的环保技术中，湿式电除尘器的加装，可尽最大的程度降低烟囱中的污染物排放、避免“石膏雨”现象、降低烟囱内筒腐蚀风险，且满足国家节能减排的整体要求。

4 增加湿式电除尘器的方案

4.1 方案概况

采用湿式电除尘器设备具有很好的应用基础和可行性，能够降低烟囱运行的腐蚀风险，避免石膏雨现象，并积极应对国家现行和未来的污染物排放要求。

(1) 烟气流程

烟气自引风机来，经过脱硫一级塔、二级塔的双循环洗涤后，进入湿式电除尘器，经深度净化后进入烟囱排放。

(2) 布置方式

在增压风机拆除后的场地建设湿式电除尘器，现有的吸收塔作为双循环的一级塔，整体布置紧凑。

(3) 湿式电除尘器基本配置

泰州电厂湿式电除尘器设计处理烟气量 4537487.9m³/h（实际工况）。考虑到湿式电除尘器进出口均为净烟气，为减少净烟道腐蚀风险，净烟道采用玻璃钢或碳钢内衬钛板材质。

(4) 投资预算

泰州电厂一期 2 台湿式电除尘器费用约 1.1 亿。

(5) 工期

湿式电除尘器支撑钢架和设备本体、烟道安装约 3 个月，设备加工约 3 个月，总工期需要 6 个月。

4.2 配套的烟囱防腐方案

考虑到现有烟囱为不锈钢内筒，要改衬玻化砖或者钛合金板材必须全部去除整个耐酸混凝土层，工作量巨大，不满足工期要求。可选用玻璃钢材质贴片进行内衬改造，方案如下：

FRP 贴片防腐。将 FRP 制作成片体后贴在烟囱内壁，示意图 1 所示。

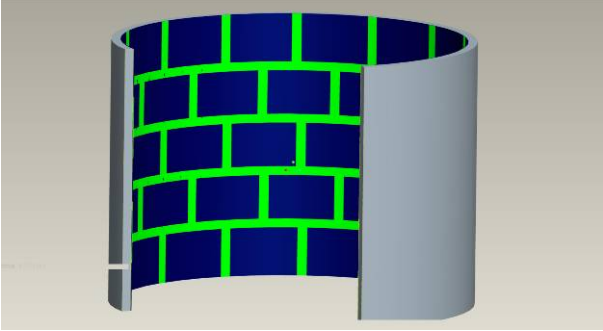


图 1 烟囱防腐贴片

5 环境效益和社会效益

5.1 环境效益

泰州电厂一期 2×1000MW 机组进行湿式电除尘器改造后，可以确保满足新的粉尘排放要求，彻

底避免石膏雨现象，去除大量酸性物质（SO₃）确保更洁净的烟气排放，并在最大程度上保护烟囱内筒。以粉尘排放量计，减排量如表 2 所示。

表 2 粉尘排放量（单位：万吨/年）

项目	湿式电除尘器 改造前	湿式电除尘器 改造后	改造后新增减排量
粉尘	0.1	0.05	0.05

注：各机组年运行按 7500 小时计。

5.2 社会效益

排放到大气中的 SO₃、粉尘重危害人类健康，恶化环境污染，其中 SO₃ 导致酸雨，细小颗粒物造成雾霾天气。尤其是 2013 年以来，雾霾天气对全国多个地区和城市的环境造成了很严重的影响，PM_{2.5} 一度成为地方环境评估的重要指标。火力发电厂属于高污染行业，为此，电厂也积极应对采取了多项环保措施，比如脱硝、除尘、脱硫，通过这些举措，电厂的烟气排放已经达到了一个相当高的水平，现行的《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011）已几乎是全世界最严厉的大气污染物排放标准，并且，《标准》中还特别定义了更严格的重点地区，泰州电厂即属于重点地区范围，主要污染物排放限值为：SO₂ 50mg/Nm³；粉尘 20mg/Nm³。本次湿式电除尘器改造工程之后，泰州电厂一期的粉尘排放将降至 10mg/Nm³以下，并且 SO₃ 将减排 75%以下，在满足工程最初的初衷，即保护烟囱、避免石膏雨、确保运行的同时，还能将电厂的烟气排放中污染物水平降到现有技术水平下的最低程度。

6 结论

本工程实施后，不仅会带来明显的经济效益、环境效益，能最大限度地缓解当地粉尘污染情况，避免石膏雨，为企业可持续发展创造良好的条件，其社会效益是十分明显的。

作者简介：

陆锐杰（1985-），男，本科，江苏无锡人，工程师，从事发电厂环保技术工作，E-mail: luruijie2008@163.com。