

Composite Wet Electrostatic Precipitator and Conductive FRP Plate Anodes

Chuanbian Yang, Yi Liu

Nanjing Longyuan Environmental Protection CO., LTD, Nanjing Jiangsu
Email: spreadyang@163.com

Received: Mar. 27th, 2017; accepted: Apr. 10th, 2017; published: Apr. 13th, 2017

Abstract

This article mainly introduces composite wet electrostatic precipitator and mist removal principle, system composition, process parameters and performance characteristics, and introduces the conductive FRP plate anodes' characteristics, production process, product structure and quality control in detail. The composite wet electrostatic precipitator is mainly used in wet flue gas dust and mist removal after wet desulfurization and more than 60 composite wet electrostatic precipitators have been applied in 1000 MW, 600 MW and 300 MW grade units. It has the advantages of compact structure, high efficiency of dust and mist removal, and its comprehensive technical and economic indicators, such as water consumption and energy consumption have obvious advantages and its overall technology has reached the international level.

Keywords

Composite Wet Electrostatic Precipitator, Rows of Pipes, Mechanical Mist Eliminator, Fiber Reinforced Plastics, Conductive FRP Plate Anodes

复合式湿式电除尘器及其板式导电玻璃钢阳极板

杨传遍, 刘 轶

南京龙源环保有限公司, 江苏 南京
Email: spreadyang@163.com

收稿日期: 2017年3月27日; 录用日期: 2017年4月10日; 发布日期: 2017年4月13日

摘要

主要介绍了复合式湿式电除尘器除尘除雾原理、系统组成、工艺参数与性能特点;并详细介绍了板式导电玻璃钢阳极板特点、生产工艺、产品结构及质量控制。复合式湿式电除尘器主要应用于湿法脱硫后湿烟气的除尘除雾,已在燃煤电厂1000 MW、600 MW、300 MW等级机组上应用60多台套。具有结构紧凑,除尘除雾效率高,在水耗、能耗等综合技术经济指标具有明显优势,整体技术达到国际先进水平。

关键词

复合式湿式电除尘器, 排管, 机械除雾器, 玻璃钢, 板式导电玻璃钢阳极板

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

为了落实科学发展观和节能减排的要求,新颁布的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)已于2012年1月1日正式实施。环境保护部、国家发展和改革委员会、国家能源局于2015年12月印发了《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知[1],将在全国实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作的专项行动,要求到2020年,全国所有具备改造条件的燃煤电厂及新建电厂都将力争实现 10 mg/Nm^3 的烟尘排放标准。目前,京津冀、长三角、珠三角等地区已开始要求实现 5 mg/Nm^3 的燃气轮机排放要求。

有多种工艺能够做到烟尘 5 mg/Nm^3 的排放,其中在湿法脱硫后配备湿式电除尘器已是技术成熟、应用很广的工艺技术,湿式电除尘器不仅能除去 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$,同时脱除多种污染物,包括:有毒重金属、 SO_3 等。

湿式电除尘器按阳极板材质分以下型式:①导电玻璃钢阳极板:板式导电玻璃钢、蜂窝式导电玻璃钢;②不锈钢材质阳极板:316L、2205;③纤维织物阳极板。蜂窝式导电玻璃钢上世纪主要应用于制酸行业,近四年应用于燃煤电厂湿烟气除尘除雾;不锈钢316L材质阳极板引进日本或美国技术;纤维织物阳极板运行稳定性稍差。为了提高除尘除雾效率、降低湿法电除尘器运行水耗与能耗,自主研发以板式导电玻璃钢为阳极板的复合式湿式电除尘器,目前已申请发明和实用新型专利。

复合式湿式电除尘器应用于燃煤电厂湿法脱硫后湿烟气除尘除雾,不仅能除去 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$,同时脱除多种污染物,包括:有毒重金属、 SO_3 等。本文主要介绍以板式导电玻璃钢为阳极板、集冷凝交换排管、电场与机械除尘相结合的复合式湿式电除尘器工艺技术,并详细介绍板式导电玻璃钢阳极板性能特点、生产工艺及产品质量控制措施。

2. 复合式湿式电除尘器

2.1. 除尘除雾原理

复合式湿式电除尘器除尘除雾原理按饱和湿烟气在除尘器内部的净化过程分为三个阶段:气流均布与烟气冷凝除尘除雾、电区静电除尘除雾及机械除尘除雾,最后经过净化后的烟气经出口喇叭口排出。

复合式湿式电除尘器结构示意图见图 1。

2.1.1. 气流均布与烟气冷凝除尘除雾

湿法脱硫后饱和湿烟气首先进入复合式湿式电除尘器进气喇叭口, 进气喇叭口内设有导流板、排管及均布板组合气流均布装置。组合气流均布装置有三个作用:

① 气流均布作用;

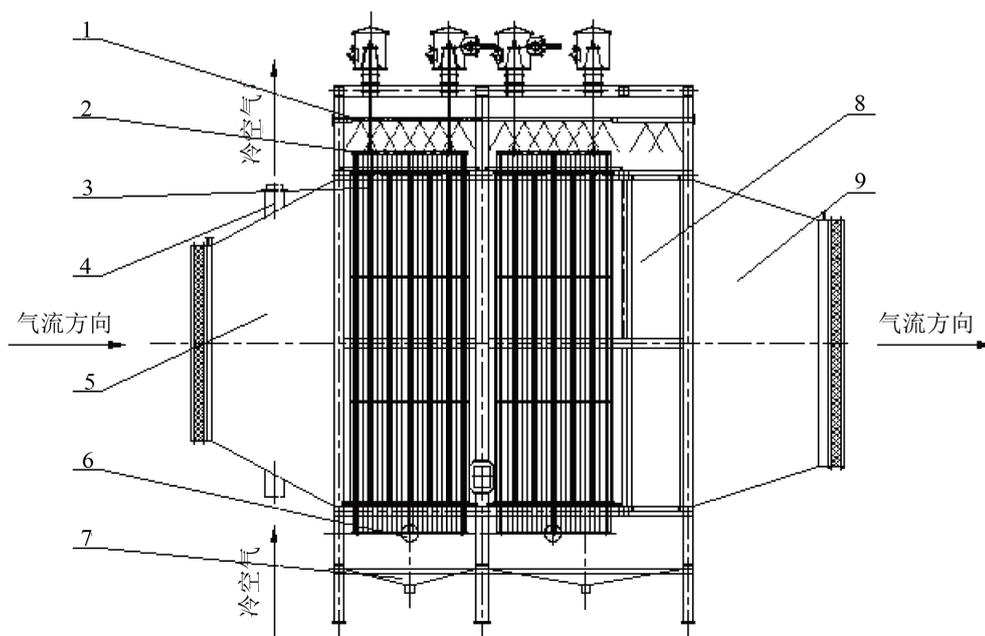
② 热密封风使用的常温空气从布置在喇叭口内的排管下部进入、上部流出, 常温空气经热烟气热交换后温度被加热至接近热烟气温度, 降低空气电加热器能耗;

③ 热烟气与冷空气经过热交换, 烟温稍有下降, 由于热烟气为饱和湿烟气, 烟温下降烟气中会有液滴析出, 因而会有除尘除雾效果。

2.1.2. 电区静电除尘除雾

电区静电除尘工作原理与干式静电除尘器相近[2], 由阴极系统(含高压供电装置)、阳极系统组成, 只不过清灰系统不同。经施加高压直流电源后, 在两极之间形成了非均匀高压静电场, 在电场的作用下, 电晕线周围产生电晕层。电晕层中的空气发生雪崩式电离, 从而产生大量的负离子和少量的阳离子, 这个过程叫电晕放电。烟气进入电场荷电区, 酸雾、烟尘等颗粒被荷电。荷电后的酸雾、烟尘等颗粒静电凝聚加强, 粒径增大, 荷电量增加, 在电场力的作用下迅速抵达阳极板。大量的酸雾及粉尘颗粒不断地被驱向阳极板, 同时迅速释放电荷, 从而达到酸雾、烟尘等与烟气分离的目的。

湿式静电除尘器中, 因放电极被水浸润后, 电子较易溢出, 同时水雾被放电极尖端的强大电火花进一步击碎细化, 使电场中存在大量带电雾滴, 大大增加亚微米粒子碰撞带电的机率, 而带电粒子在电场中运动的速度是布朗运动的数十倍, 这样就大幅度提高了亚微米粒子向集尘极运行的速度, 可以在较高的烟气流速下, 捕获更多的微粒。



1: 水冲洗装置; 2: 阴极线及框架; 3: 阳极系统; 4: 排管等组合气流均布装置; 5: 进气喇叭口; 6: 阴极固定装置; 7: 灰斗; 8: 机械除雾器; 9: 出气喇叭口

Figure 1. Structural schematic diagram of wet electrostatic precipitator

图 1. 复合式湿式电除尘器结构示意图

烟气中的 SO_3 在 80°C 以下时, 如果不存在温度场的急速变化, 则不会形成气溶胶, 而以 H_2SO_4 的微液滴形式存在, 其平均颗粒的直径在 $0.4\ \mu\text{m}$ 以下, 属于亚微米颗粒范畴。这也是干式静电除尘器和 FGD 对 SO_3 的去除率较低的主要原因。湿式静电除尘因对亚微米颗粒的高捕获率, 所以对 SO_3 的微液滴有很高的脱除率。

2.1.3. 机械除尘除雾

电区荷电的粉尘在电场的作用下向极板运动, 在运动过程中颗粒相互撞击发生凝并, 大部分粉尘在电场作用下吸附到阳极板上, 由于湿式电除尘器烟气流速高、在电区停留时间相对较短, 部分未被吸附到阳极板上但在电场作用下, 已凝并成一定直径的粉尘颗粒, 被电区下游的机械除雾器进一步收集。

2.2. 系统组成

2.2.1. 阳极系统

阳极系统由板式导电玻璃钢阳极板及阳极框架组成。阳极板采用拉挤成型工艺机械化、自动化生产, 本文后半部分详细介绍导电玻璃钢阳极板性能特点、生产工艺及产品质量控制措施。

阳极板宽度一般在 $500\sim 650\ \text{mm}$ 之间, 根据复合式湿式电除尘器工艺需要配置单电场阳极板数量, 一般单电场阳极板数量由 $4\sim 9$ 块组成, 阳极板利用阳极框架组合、安装及固定。

2.2.2. 阴极系统

阴极系统由阴极线、阴极框架、高压供电装置、高压绝缘装置及阴极固定装置组成。

因烟气在电区流速较高, 一般设计范围在 $2.5\sim 3.5\ \text{m/s}$, 为避免阴极框架及极线在除尘器内晃动, 在阴极框架底部设置阴极固定装置, 阴极固定装置一端与阴极框架、另一端与除尘器本体连接。阴极固定装置需要热风吹扫绝缘, 以免影响阴极系统升压。

2.2.3. 水冲洗清灰系统

干式静电除尘器采用阴、阳极振打清灰, 湿式电除尘器与之不同, 采用水冲洗清灰。复合式湿式电除尘器, 采用间断水冲洗清灰方式, 冲洗频率及冲洗耗水量与除尘器入口含尘浓度有很直接的关系。

水冲洗清灰系统由冲洗水箱、水泵、控制阀门、管道及喷嘴组成。复合式湿式电除尘器内部只要有烟尘沉积位置均设置喷嘴冲洗, 包括阳极板及框架、阴极线及框架、冷凝排管及机械除雾器等设备。

2.2.4. 灰水排放系统

灰水排放系统由两个子系统组成。

① 除尘器正常运行、未水冲洗清灰时, 收集到的高浓度含尘废水直接排放至脱硫地坑, 系统包括: 控制阀门及管道。

② 除尘器分单元独立冲洗时, 低浓度含尘废水排至沉降箱, 经沉降后的清水溢流至冲洗水箱, 与冲洗补给水一起作水冲洗清灰用; 沉降后的高浓度废水排放至脱硫地坑, 系统包括: 控制阀门、管道及沉降箱。

2.2.5. 热密封风系统

复合式湿式电除尘器处于正压、饱和湿烟气工作环境中, 阴极吊挂需要设置热密封风隔离湿烟气, 以免绝缘瓷瓶内表面有液体影响阴极系统升压; 阴极固定装置连杆正常工况下会有液体和粉尘, 影响阴极系统升压, 需要设置热密封风隔离湿烟气和吹扫粉尘, 使连杆处于干燥、清洁状态。

热密封风系统由离心风机、调节阀门、排管、空气电加热器及管道组成。离心风机吸入的常温空气经排管热交换后温度接近热烟气温度, 再经空气电加热器加热至 $70^\circ\text{C}\sim 75^\circ\text{C}$, 满足了工艺温度使用条件。

2.3. 工艺参数与性能特点

2.3.1. 工艺参数

复合式湿式电除尘器电场内部烟气设计流速一般在 2.5~3.5 m/s 之间, 烟气在电区停留时间根据除尘器入口浓度确定, 一般停留时间不低于 1.5 s。

2.3.2. 性能特点

① 复合式湿式电除尘器常规采用卧式布置, 也可采用立式布置。采用卧式布置方式, 可以根据湿式电除尘器入口粉尘浓度高低, 自由设计、配备电场数量, 以满足出口粉尘排放要求, 最低粉尘排放可控制在 1 mg/Nm^3 以内。单电场粉尘脱除效率 $> 80\%$, 两个电场粉尘脱除效率 $> 95\%$, SO_3 脱除效率 $> 70\%$ 。

② 除尘器排管既可除去部分粉尘、起到气流分布作用, 又可以将密封空气加热、起到降低能耗作用。

③ 配有机械除雾器, 进一步提高粉尘脱除效率和降低出口烟气雾滴浓度。

④ 板式导电玻璃钢阳极板维护、更换方便。

3. 板式导电玻璃钢阳极板

玻璃钢别名玻璃纤维增强塑料, 俗称 FRP。它是以玻璃纤维及其制品作为增强材料, 以合成树脂作基体材料, 经过特定的加工工艺完成的一种复合材料。我国的玻璃钢工业至今已有 60 多年历史, 从简单的手糊制作发展成为今天的微机控制操作。产品性能各异, 种类繁多, 遍及生活的各个角落。

3.1. 玻璃钢的特点

3.1.1. 轻质高强

玻璃钢密度介于 1.5~2.0 之间, 只有普通碳钢的 $1/4\sim 1/5$, 比轻金属铝还要轻 $1/3$ 左右, 而机械强度却很高, 某些方面甚至能接近普通碳钢的水平。例如某些环氧玻璃钢, 其拉伸、弯曲和压缩强复均达到 400 MPa 以上。按比强度计算, 玻璃钢不仅大大超过普通碳钢, 而且可达到和超过某些特殊合金钢的水平。

3.1.2. 耐腐蚀

玻璃钢主要的化学性能就是它有突出的耐腐蚀性。玻璃钢不仅对一般浓度的酸、碱、盐介质及溶剂有较好的稳定性, 而且有抗大气、海水和微生物作用的良好性能。已应用到化工防腐的各个方面, 正在取代碳钢、不锈钢、木材、有色金属等。

3.1.3. 电性能好

玻璃钢是优良的绝缘材料, 用来制造绝缘体。高频下仍能保持良好的介电性能。

3.1.4. 热性能良好

FRP 热导率低, 室温下为 $1.25\sim 1.67 \text{ kJ/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{K)}$, 只有金属的 $1/100\sim 1/1000$, 是优良的绝热材料。在瞬时超高温情况下, 是理想的热防护和耐烧蚀材料, 能保护宇宙飞行器在 2000°C 以上承受高速气流的冲刷。

3.1.5. 产品性能可设计性好

可以充分选择材料来满足产品的性能, 如: 可以设计出导电性能好的、耐瞬时高温的、产品某方向上有特别高强度的, 等等。如需要产品表面导电, 可在产品表面增加碳纤维布; 如有防火需要, 可用阻燃树脂或加阻燃剂;

3.1.6. 产品结构可设计性好

可以根据需要设计出各种结构产品, 并可以使产品有很好的整体性。

3.2. 板式导电玻璃钢阳极板生产工艺及质量控制

玻璃钢成型工艺有如下几种：手糊成型工艺、缠绕成型工艺、模压成型工艺、拉挤成型工艺。

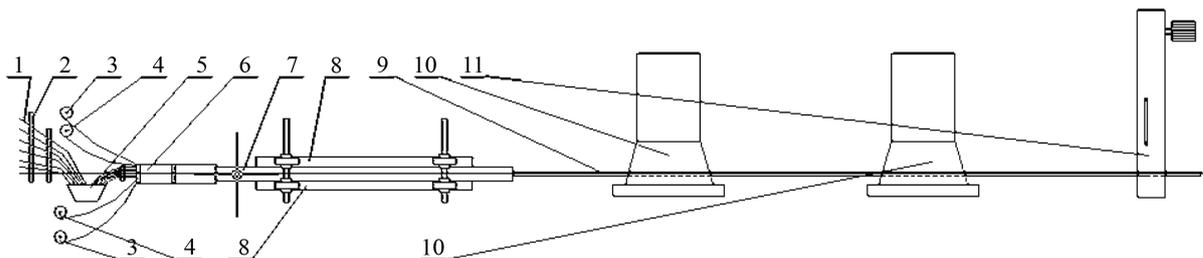
基于湿式电除尘器工作原理，板式导电玻璃钢阳极板表面需具有导电性能，因而在玻璃钢表面增加碳纤维布。板式导电玻璃钢阳极板产品采用拉挤成型工艺，拉挤成型工艺是一种自动化连续生产工艺，适用于制造断面一致的各种型材，生产效率及原材料利用率最高，其产品具有密度均匀可控，质量稳定、外观美观、尺寸准确、在纵向上具有最大的拉伸强度，且该产品在物理性能、化学性能、机械性能以及导电性能上的优点十分突出。

3.2.1. 工艺原理

板式导电玻璃钢阳极板拉挤成型工艺见图 2。拉挤成型工艺过程是由送纱、浸渍树脂、预成型、固化定型、牵引、切断等工序组成[3]。玻璃纤维纱经过纱架进入树脂槽充分浸渍树脂混合料后，与碳纤维布、缝编毡一起，在牵引机构的作用下，由一系列预成型模板合理导向，得到初步的定型，并将多余树脂和气泡排出，最后进入被加热的金属模具，在模具高温的作用下凝胶、固化，从而可以得到连续的、表面光洁、尺寸稳定、强度极高的板式导电玻璃钢阳极板产品。板式导电玻璃钢阳极板可根据复合式湿式电除尘器工艺要求设定产品长度，自动切割。

3.2.2. 产品结构

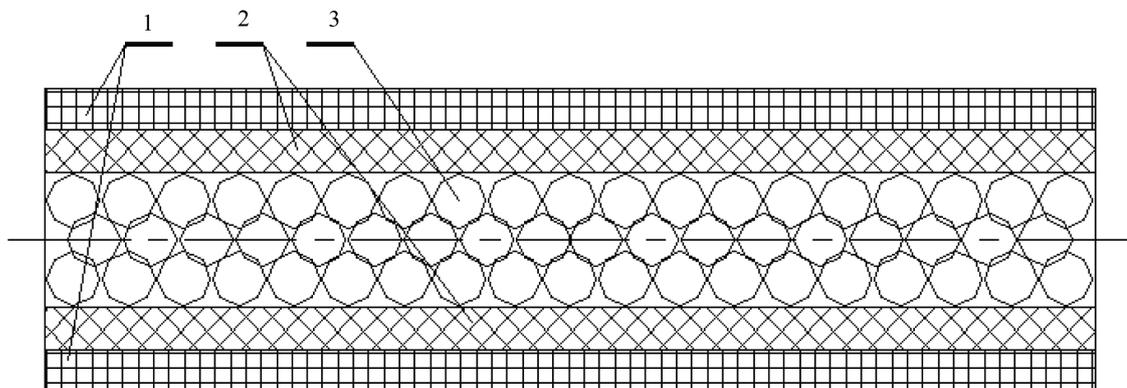
板式导电玻璃钢阳极板剖面结构见图 3。



1: 玻璃纤维纱; 2: 纱架; 3: 碳纤维布; 4: 缝编毡; 5: 树脂混合料; 6: 预成型模; 7: 模具; 8: 加热板; 9: 板式导电玻璃钢; 10: 牵引机构; 11: 自动切割机

Figure 2. Conductive FRP plate anodes pultrusion molding process

图 2. 板式导电玻璃钢阳极板拉挤成型工艺



1: 碳纤维布; 2: 缝编毡; 3: 玻璃纤维纱

Figure 3. Conductive FRP plate anodes section structural schematic diagram

图 3. 板式导电玻璃钢阳极板剖面结构示意图

外层包含一层碳纤维布和一层增强缝编毡。碳纤维布和缝编毡吸纳了丰富的树脂, 既起到导电作用, 又弥补了产品的横向强度的不足, 提高了产品的整体强度。外层以剖面为中心对称布置。

结构层是通过连续布置多股浸渍了树脂混合料的玻璃纤维纱而制得。连续玻璃纤维可以将所受力量均匀向两端传导, 使产品整体承受力量, 但其缺点是横向强度较弱, 因此必须与缝编毡一起使用才能提高整体强度。

3.2.3. 质量控制

板式导电玻璃钢阳极板厚度一般在 3.5~4.5 mm, 产品质量参考执行机械行业标准 JB/T5906-2007《电除尘器阳极板》。质量控制的参数主要包括成型温度、拉挤速度及牵引力等。

① 成型温度

在拉挤成型过程中, 材料在穿越模具时发生的变化是最关键的。

玻璃纤维浸渍树脂后通过加热的金属模具, 一般将连续拉挤过程分为预热区、胶凝区和固化区。在模具上使用加热板来加热, 树脂在加热过程中, 温度逐渐升高, 粘度降低。通过预热区后, 树脂体系开始胶凝、固化, 在固化区内产品受热继续固化, 以保证出模时有足够的固化度。

温度、胶凝时间、拉挤速度应当匹配。预热区温度可以较低, 胶凝区与固化区温度相似。温度分布应使产品固化放热峰出现在模具中部靠前, 胶凝固化分离点应控制在模具中部, 温度梯度不宜过大。

② 拉挤速度

在一定的温度条件下, 树脂体系的胶凝时间点是至关重要的, 拉挤速度的确定要充分考虑使导电玻璃钢阳极板在模具中部胶凝固化, 也即脱离点在中部并尽量靠前。如果拉挤速度过快, 会出现阳极板固化不良或者变形。

③ 牵引力

牵引力是保证阳极板顺利出模的关键, 牵引力的大小由阳极板与模具之间的界面上的剪切应力来确定。阳极板的质量稳定和外观美观, 牵引力的控制很重要, 要求阳极板在脱离点的剪切应力较小, 并且尽早脱离模具。

牵引力的变化反应了阳极板在模具中的反应状态, 它与许多因素, 如: 纤维含量、脱模剂、温度、拉挤速度等有关。

④ 成型温度、拉挤速度及牵引力的相关性

成型温度、拉挤速度及牵引力三个质量控制参数中, 成型温度是由树脂的特性来确定的, 是拉挤质量控制中应当解决的首要因素。拉挤速度确定的原则是在给定的模内温度下的胶凝时间, 保证阳极板在模具中部胶凝、固化。牵引力的制约因素较多, 如: 它与模具温度关系很大, 并受到拉挤速度的控制; 脱模剂的影响也是不容忽视的因素。

板式导电玻璃钢阳极板产品质量的控制, 应首先保证完全固化、平面度和质量的稳定性, 在此基础上方可提高生产效率, 提高拉挤速度。

4. 结语

复合式湿式电除尘器已在燃煤电厂 1000 MW、600 MW、300 MW 等级机组上应用 60 多台套。目前在 350 MW 机组上最长运行时间接近三年, 运行一直很稳定, 除尘除雾效率高, 出口粉尘排放低于 3 mg/Nm^3 , 运行阻力低于 250 Pa。

天津国电津能滨海热电有限公司 $2 \times 350 \text{ MW}$ 机组复合式湿式电除尘器已通过中国电机工程学会科技技术成果鉴定[4], 鉴定意见为: 该复合式湿式电除尘器结构紧凑, 在水耗、能耗等综合技术经济指标具有明显优势, 并实现了在燃煤机组上的推广应用, 整体技术达到国际先进水平。

参考文献 (References)

- [1] 环境保护部、国家发展和改革委员会、国家能源局文件 环发[2015]164 号 关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知[Z]. 2015-12-11.
- [2] 林祖涵. 静电除雾技术在燃煤电厂的应用[J]. 华电技术, 2011, 33(1): 65-68.
- [3] 陈楠. 玻璃钢拉挤设备系统技术概要[J]. 玻璃钢/复合材料, 1999(5): 13-15.
- [4] 中国电机工程学会组织鉴定的《复合式湿式电除尘器技术》科学技术成果鉴定证书, 中电机鉴(2016)第 064 号[Z]. 2016-03-31.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org