

摘 要

我国燃煤发电机组容量占电力总装机容量的 85%左右, 年耗煤量近 5 亿吨, 燃煤烟尘排放量占全国工业烟尘排放总量的 40%以上, 列第 1 位。实现电力工业的可持续发展, 在推广净煤燃烧和调整火电结构同时, 提高企业烟尘浓度排放标准已势在必行。即将颁布的燃煤电厂污染物排放标准将燃煤锅炉的粉尘(标准状态)排放要求提高到 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 。因此, 行业的迅速发展需要能达到新排放标准要求性能更高的电除尘器。

湿式电除尘器是一种重要的环保设备, 对于保护和改善环境、使烟气排放符合国家有关标准、保障民众的身体健康等都有非常重要的意义, 它作为一种有效的烟气净化装置, 正发挥着越来越重要的作用。本设计依据煤种、含尘量等工艺条件及排放标准的要求, 对小型湿式电除尘器的性能和结构进行了设计计算; 设计抛弃了电除尘器原本的振打清灰方式, 通过选择合理的湿式清灰方法, 电极配置、高压供电方式, 使电除尘器更小巧, 噪音污染降低。

关键词: 小型湿式电除尘器, 湿式清灰, 结构设计

Abstract

In China, thermal power generation unit account 85% in the total capacity of Coal-fired power generation, and the coal consume approaches 50 million t/a. Thermal power stations are the most important fly ash discharge sources, which discharged more than 40% of the whole industry dust. For the sustained development of electric power industry, expect for burning the cleaned coal and adjustment of construction of thermal power generation, the upgrade of thermal power stations fly ash discharge criterion is imperative under the situation. According to the new edition of thermal criterion, the discharged concentration of dust will be restricted to 100 mg/m^3 . Hence, the more capable electrostatic precipitations which can suit for boiler coal and technologic process are needed.

Wet Electrostatic Precipitators (WESP) is an important practical significance for protecting the people's health, improving the environment, flue gas emissions in line with the state standards, protect people's health and so on. As an effective flue gas purification device, WESP becomes more and more important. This design based on coal, dust concentration and other process conditions and the requirements of emission standards, the performance and the construction of the electrostatic precipitation were calculated. Wet electrostatic precipitator abandoned the original vibration cleaning methods instead of choosing a reasonable method of wet cleaning, the electrode configuration and high-voltage power supply in order to the structure of ESP more compact, reduction of noise pollution.

Key words: Wet Electrostatic Precipitators(WESP), wet cleaning, structural design

目 录

第一章 前 言	1
1.1 选题背景	1
1.2 研究意义	2
1.3 电除尘器应用及介绍	3
1.3.1 除尘设备的介绍	3
1.3.2 电除尘器的主要特点	8
1.3.3 电除尘器的种类	10
1.3.4 电除尘装置的应用范围	11
1.3.5 湿式电除尘器	11
1.4 小型湿式电除尘器的理论基础	12
1.4.1 传统电除尘的理论基础	12
1.4.2 小型湿式电除尘器的设计原理	15
第二章 小型湿式电除尘器结构设计	17
2.1 设计依据	17
2.1.1 设计依据标准	17
2.1.2 设计具体参数	17
2.2 电除尘器的选型	18
2.2.1 电除尘器型号的确定	18
2.2.2 集尘板与电晕电极的配置	19
2.3 主要参数计算	26
2.3.1 除尘效率(初定)	26
2.3.2 临界电场强度的计算	27
2.3.3 临界电压	28
2.3.4 电晕电场强度	29
2.3.5 集尘极附近的电场强度	29
2.3.6 驱进速度	30
2.4 小型湿式电除尘器总体设计计算	30
2.4.1 集尘极比表面积	30
2.4.2 集尘极板总面积	30
2.4.3 实际集尘极比表面积	31
2.4.4 除尘效率验算	31
2.4.5 有效截面积	32
2.4.6 集尘极数量	32
2.4.7 集尘极有效高度	33

2.4.8 气体在除尘器内实际速度.....	33
2.4.9 气体在有效电场内的停留时间.....	33
第三章 电除尘器部件的设计和计算	34
3.1 气流分布装置	34
3.1.1 气流分布板的形式	34
3.1.2 气流导向板	35
3.2 高压绝缘子	35
3.3 电除尘器筒体几何尺寸	38
3.3.1 筒体截面直径	38
3.3.2 筒体厚度	39
3.3.3 出气口底面至集水斗下端面距离.....	41
3.3.4 进气口面积	42
3.4 电除尘器载荷计算	43
3.4.1 质量载荷	43
3.4.2 风载荷	44
3.4.3 最大弯矩	46
第四章 辅助系统设计选型及安装维护	47
4.1 高压供电装置的选型	47
4.1.1 高压硅整流器	47
4.1.2 保护	49
4.1.3 供电系统材料	49
4.2 喷淋系统的设计选型	50
4.2.1 电晕极间断喷水	50
4.2.2 集尘极连续喷淋管道设计.....	51
4.2.3 喷淋产生的污水处理.....	51
4.3 水泵与风机的选型	52
4.3.1 水泵的选型	52
4.3.2 风机的选型	52
4.4 小型湿式电除尘器的保温和防腐	52
4.4.1 小型湿式电除尘器的保温.....	52
4.4.2 小型湿式电除尘器的防腐.....	53
4.5 仪器仪表	54
4.6 小型湿式电除尘器的安装、调试、使用及维护	55
4.6.1 安装	55
4.6.2 调试	55
4.6.3 使用	55

4.6.4 维护	56
4.7 工业卫生与安全消防	57
4.7.1 工业卫生	57
4.7.2 安全技术措施	57
4.7.3 消防灭火安全	58
第五章 小型湿式电除尘器系统的投资概算和运行管理	59
5.1 收费依据	59
5.2 工程概算	59
5.2.1 主体部分	59
5.2.2 附件费用	61
5.2.2 其它项目概算	61
5.2.3 总的投资费用	61
5.3 年运行费用	62
第六章 结论与展望	63
6.1 结论	63
6.2 展望	63
参 考 文 献	64
致 谢	66
声 明	67

第一章 前言

1.1 选题背景

20 世纪是世界经济高速发展、科学技术突飞猛进的时期，也是社会环境和自然环境被严重破坏、人类赖以生存的大气被污染的时期。当人类进入 21 世纪，人们面临的温室效应、臭氧层破坏和酸雨三大全球性问题，使环境形势仍十分严峻，人类社会可持续发展对环境的要求也更趋严格。当今，控制大气污染的任务已由过去以治理烟(粉)尘为主，逐渐向烟尘治理与有害气体(SO_2 、 NO_x 、F) 治理并重过渡。电除尘器是国际公认的高效除尘器，投运工业 100 年以来一直担负着净化烟气、捕集颗粒物、保护环境的使命。我国全面系统地对电除尘器技术进行研究和开发始于上个世纪 60 年代。在 1980 年以前，我国在国际电除尘器领域还处于非常落后的地位。改革开放以来，我国国民经济持续不断地高速增长，环境保护对国民经济的可持续发展显得愈来愈重要。受市场经济下的利益驱动，国内许多大、中型环保产业对电除尘器进行技术研究和开发方面的投入不断加大，电除尘器的应用得到了长足的发展。通过对引进技术的消化、吸收和合理借鉴，到上世纪 90 年代末，我国电除尘器技术水平基本上赶上国际同期先进水平。

进入 21 世纪以后，我国把“大力推进科学技术进步，加强环境科学研究，积极发展环保产业”作为经济发展的重要相关政策，环保产业进一步得到重视。随着国家对污染控制要求的不断提高，对粉尘排放的要求也大幅提高。GB13223-2003 《火电厂大气污染物排放标准》(2004-01-01 开始实施)规定新建电厂大气污染物的排放浓度控制在 $50\text{mg}/\text{m}^3$ (标准状况，下同)以下，而旧标准 GB13223-91 要求粉尘排放浓度小于 $150\text{mg}/\text{m}^3$ 。电除尘器作为控制大气污染、解决环保与经济发展之间的矛盾的主要设备之一，其应用技术进一步得到飞速发展。目前，电除尘器已广泛应用于火力发电、钢铁、有色冶金、化工、建材、机械、电子等众多行业。我国作为世界电除尘器大国立足于国际舞台，不仅在数量上，而且在技术水平上都已进入国际先进行列。电除尘器技术从设备本体到计算机控制的高低压电源，以及绝缘配件、振打装置、极板极线等已全部实现国产化，并且已有部分产品出口到 30 多个国家和地区。

在 1980 年以前，我国电除尘器的规模绝大多数都在 100m^2 以下，而其行业占

有量为有色冶金行业 32%，钢铁行业 30%，建材行业 18%，电力行业 8%，化工行业 5%，轻工行业 4%，其他行业 3%。随着我国经济的飞速发展，尤其是电力、建材水泥行业的发展达到空前水平，到上世纪 90 年代中期，电除尘器行业占有量的格局已改变为：电力行业 72%，建材水泥行业 17%，钢铁行业 5%，有色冶金行业 3%，其他行业 3%。目前火力发电行业的电除尘器用量已占全国总量的 75%以上， 648m^2 的电除尘器已在 1000MW 的火电厂中成功运行。在化工行业，由于受国际硫磺价格的影响，从上世纪 90 年代中期采用硫磺制酸工艺取代硫铁矿制酸工艺的企业急剧上升，使得电除尘器的行业占有量也随之大幅下降，直到近两年才有触底反弹的迹象^[1]。

1.2 研究意义

随着国民经济的迅猛发展，环境保护作为基本国策正在不断强化。相应的环保产业得到了振兴。广大科技工作者对大气环境污染控制工程课题的研究成果。积极支持了环保事业的发展。近年来我国加大了环境保护管理力度，使空气污染指数有了很大改善。据有关资料介绍静电除尘器在大气污染控制工程中。起着相当重要的作用。静电除尘用来捕集固体颗粒，具有耗能低、操作稳定、净化率高的优点。它已被广泛应用于环保、冶金、发电、水泥、化工、医药、轻工等领域。是最受欢迎的除尘设备之一。

但是资料显示原有的静电除尘器大都是体积庞大、占地广，一次性投资及维修保养费用高，而且维修不便，也不适用于局部产生点的除尘。随着电晕多极化、收尘多室化，小型高效除尘器的研制成为可能。小型湿式电除尘器不仅适用于局部产生点的除尘，也适用于大范围产生面的降尘。传统的干式电除尘器是用锤击来清灰的，而湿式电除尘器电极上的粉尘是用水来冲洗的，同时粉尘形成泥浆而排放出去。由于这些差别的结果，湿式电除尘器具有以下优点：

- (1)收尘的性能与粉尘的比电阻无关；
- (2)没有二次扬尘，这使其有可能达到出口粉尘浓度很低；
- (3)由于没有如同锤击设备的运动部件，可靠性很高；
- (4)由于在电除尘器内电场气流速度较高和灰斗的倾斜角减小，设备的布置可能很紧凑；
- (5)对于亚微米大小的颗粒，包括 SO_3 酸雾和极微细的物料都能有效捕集^[2]。

小型湿式电除尘器实际上是几种除尘机理的结合、在旧有除尘设备的基础上进行改造,这种复合除尘器是近几年来除尘技术发展的一个新方向。

1.3 电除尘器应用及介绍

1.3.1 除尘设备的介绍

煤炭是人类生存不可缺少的能源物质,它是由有机物和无机物组成的,一般在煤炭成分中占多数的是有机物。煤炭中的可燃成分主要是化学元素碳(约占可燃成分的 50%~90%),其它可燃成分主要有化学元素氢(约占 24%),氧(约占 20%),硫(约占 1%~2%),氮(约占 0.5%~2%);不可燃成分主要有水(约占煤炭的 1%~60%)及灰分(约占煤炭的 10%~50%)。各种成分的多少因煤炭的品质不同而差异较大。

煤炭在燃烧中会大量产生灰渣、烟尘和各种有害气体。灰渣根据煤质的不同约占煤炭燃烧总质量的±30%左右。烟尘主要成分是碳黑和飞灰,碳黑是煤炭中没有完全燃烧的碳物质,粒径 $d < 1\mu\text{m}$;飞灰主要是瓷土、二氧化硅、氧化铁和碱金属的混合物,粒径 $d = 1 \sim 100\mu\text{m}$ 。有害气体主要是煤炭燃烧过程中产生的一氧化碳、二氧化硫、三氧化硫、一氧化氮和硫化氢等。烟气中的有害物质主要是碳黑、飞灰和二氧化硫,碳黑和飞灰的产生与锅的类型(即锅炉的燃烧方式)有关^[3]。

我国电力工业以燃煤锅炉发电为主,约占全国发电量的 80%。在电力工业中,对大气污染影响最大的是火力发电厂中的燃煤电厂,尤其是燃煤锅炉烟气,已成为造成我国煤烟型大气污染的重要因素。

电厂燃煤锅炉烟气除尘的方法很多,主要是袋式除尘和静电除尘。静电除尘以其除尘效率高,可净化气量较大、温度较高的烟气,结构简单气流速度低,压力损失小,能耗低,可微机控制,远距离操作而得到广泛应用。1991年用电除尘器除尘的锅炉已占37.59%。发达国家燃煤电厂锅炉烟气主要采用电除尘器,如美国约95%的火电厂用电除尘器控制颗粒物的排放,相当于330000MW的发电容量。到2000年我国的发电能力已翻了一番,达到 $3 \times 10^8 \text{kW}\cdot\text{h}$,但全国排放的烟尘量仍然保持在 $3.8 \times 10^6 \text{t/a}$ 的水平。至1993年年底,中国共有316台电机组安装了电除尘器,是1983年的11倍。烟尘的排放从1983年的 $14.8 \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 下降到1993年的 $6.8 \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 减少了53%。同时为了减少烟尘排放,我国有关部门已决定,要有80%的国有燃煤电厂到2000年安装电除尘器^[4]。

燃煤锅炉不同的类型对锅炉排烟污染有不同影响(见表 1-1)。锅炉类型不同则

燃烧方式不同,它对锅炉排烟污染的主要影响因素是炉膛形式、炉排类型和炉膛容积热负荷等。锅炉的燃烧方式取决于锅炉厂家生产的锅炉类型,正确选择锅炉类型(即燃烧方式)需根据所用煤质的情况,如煤质灰分熔点低,选用往复炉、煤质差,选用沸腾炉等。对于同一种除尘器,不同的燃烧方式对其除尘效果有不同的影响。

表 1-1 燃煤锅炉不同的类型对锅炉排烟污染影响

序号	锅炉类型	含尘浓度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占灰份的比例/%
1	手烧炉(自然引风)	0.6~2	15~20
2	手烧炉(机械引风)	1.5~5	15~20
3	往复炉排	0.5~2	15~20
4	链条炉排	2~5	15~20
5	振动炉排	3~8	15~20
6	抛煤机炉	5~13	20~40
7	煤粉炉	10~30	70~85
8	沸腾炉	20~60	40~60

表 1-2 锅炉燃料烧后产生的颗粒分散度

粒径	手烧炉(自然引风)	手烧炉(机械引风)	往复炉排	链条炉排	抛煤机炉	煤粉炉	沸腾炉
<5	1.2	1.3	4.2	3.1	1.5	6.4	1.3
5~10	4.6	7.6	8.9	5.3	3.6	13.9	7.9
10~20	14	6.65	12.4	11.4	8.5	22.9	13.8
20~30	10.6	8.2	10.6	8.8	8.1	15.3	11.2
30~47	16.9	15.6	13.8	11.7	11.2	16.4	15.4
47~60	9.1	7.5	6.7	6.9	7	6.4	10.6
60~74	7.4	3.2	7	6.3	6.1	5.8	11.2
>74	36.2	50	30.6	46.5	54	13.4	28.6

控制燃煤锅炉烟尘污染的最有效方法是正确选择锅炉的除尘器，除尘器一般分为离心除尘器、洗涤除尘器、袋式除尘器和电除尘器。其原理是利用重力、惯性力、离心力、扩散附着力、电场力、表面张力等作为除尘的作用力，除尘器对不同的粉尘粒径有不同的除尘效率，常用除尘器所对应的最佳粉尘粒径(见表 1-2)。

不同类型的锅炉燃料烧后产生的烟尘颗粒分散度是不同的(见表 1-3)，正确选择除尘器，一要使除尘器的最佳粉尘粒径适合该锅炉燃烧方式的烟尘颗粒分散度；二要使除尘器能够适合该锅炉烟气的性质、温度和浓度。

表 1-3 常用除尘器所对应的最佳粉尘粒径

除尘器类 型	重力	机械除尘 器惯性力	旋风	洗涤除尘 器	过滤除尘 器	电力除尘 器
粒径/ μm	>100	>50	5~20	0.1~5	0.1~1	0.01~1

在燃煤锅炉中伴随燃料及其他物质的燃烧所产生的煤烟中，存在着离子状态的固体和液体物质。

目前电厂通常用的各种除尘器装置有：

(1) 离心分离除尘器

离心分离除尘器的工作原理是，利用烟气作旋转运动，依靠离心作用将烟气中粉尘分离出来。这种离心力要比单独靠重力获得的分离大得多，因而除尘较有效。它的结构简单，运行操作方便，可以分离捕集较细的粉尘，但除尘效率不高，约 85%左右，阻力一般不大于 1000Pa，因此，它被广泛应用于独立的除尘装置，也可作其它除尘器的预处理装置。

(2) 洗涤式除尘器

洗涤式除尘器是用液滴、液膜、气泡等洗涤含尘气体，使含烟气相凝集，从而使尘粒得到分离的装置。其中应用最多的是文丘里洗涤除尘器，它的主要部件是文丘里管。压力水从文丘里管的喉口的小孔进入，高速的含尘烟气流过喉口将水雾化成为无数水滴，同时使尘粒粘附在所生成的水滴上。将这种气液混合物引入分离器，使水滴与尘粒分离，烟气得到净化。因此，在文丘里洗涤器的除尘过程中可分为雾

化、凝集和除尘三个过程。前两个过程在文丘里管内进行，后一过程在气液分离器中完成。文丘里洗涤器的除尘效率一般在 95% 以上，它随液滴直径、喉管气流速度的增加而增加。当液滴直径比尘粒大 150 倍时，其除尘效率最高。这种除尘器的结构简单，除尘效率高，水滴还能吸收烟气中的二氧化硫和三氧化硫。其缺点是阻力大，需要有污水处理装置^[5]。

(3) 袋式除尘器

袋式除尘器是使含尘气流通过过滤材料将粉尘分离捕集的装置，采用玻璃纤维作滤料的空气过滤器，主要可用于通风及空气调节的气体净化。袋式除尘器的除尘机理如下：含尘气体进入滤袋，在通过滤料的孔隙时，粉尘被捕集于滤料上，透过滤料的清洁气体从排污口排出，沉积在滤料上的粉尘可在机械振动的作用下从滤料表面脱落，落入灰斗中。常用滤料用棉、毛、人造纤维等加工而成。滤料本身网孔较大，一般为 $20\sim 50\mu\text{m}$ ，表面起绒的滤料为 $5\sim 10\mu\text{m}$ ，因而，新鲜滤料的除尘效率低。粉尘因截留、惯性碰撞、静电和扩散等作用，逐渐在滤袋表面形成粉尘初层。初层形成后，它成为袋式除尘器的主要过滤层，提高了除尘效率。滤布只不过起着形成粉尘初层和支撑它的骨架作用，但随着粉尘在滤袋上积聚，滤袋两侧的压力增大，会把有些已附在滤料上的细小粉尘挤压过去，使除尘效率下降。袋式除尘器的阻力一般为 $1000\sim 2000\text{Pa}$ 。另外，若除尘器阻力过高，还会使除尘系统的处理气体量显著下降，影响生产系统的排风效果。因此，除尘器阻力达到一定数值后，要及时清灰，清灰不能过分即不应破坏粉尘初层，否则会引起除尘效率显著降低。

(4) 电除尘器

电除尘技术是一项很重要的防治大气污染环保技术，已广泛应用于各个工业领域的含尘废气治理、气固分离、粉状物料回收等(如冶金、有色、电力、化工、建材行业)。我们知道，电除尘是利用静电力除尘，又称为静电除尘，它的基本原理利用高压放电，使气体电离，粉尘荷电后向收尘极板移动而从气流中分离出来，从而达到净化烟气的目的。电除尘技术经过近一个世纪的发展，已经取得了许多成果。

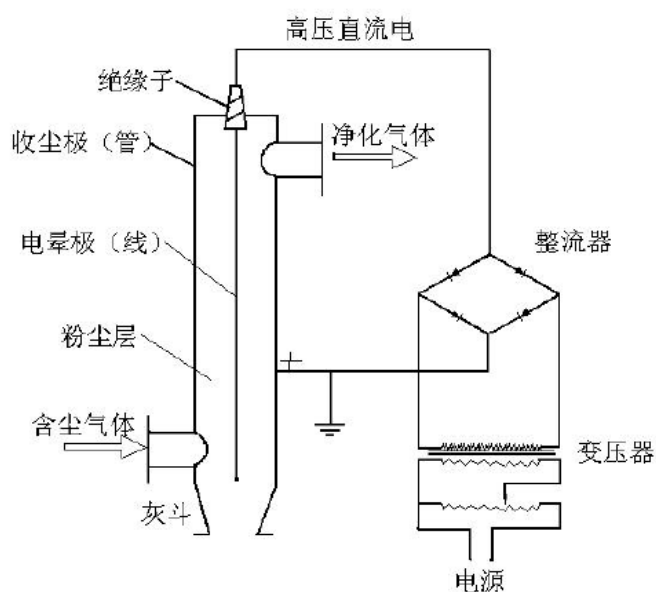


图 1.1 电除尘器的基本原理

电除尘器是利用电力进行收尘的装置，国外多称静电收尘器。而实际上“静电收尘”这个词并不确切，因为粉尘粒子荷电后和气体离子在电场力作用下，要产生微小的电流，并不是真正的静电。但是习惯上将所有高电压低电流的现象也包括在静电范围之内，所以把这种收尘装置也称为静电收尘器。而我国习惯上叫电收尘器或电除尘器(图1.1)。

电除尘器是利用高压直流电加到电除尘器电场正、负极，电场强度随着电压的升高而增大，电晕电离产生了大量的电子和正离子，悬浮于烟气流中的尘粒受到发射离子的作用而带电，在荷电尘粒受到不同极性的电极表面的吸引而被吸附。被吸附在电极表面上的尘粒通过周期性振打从金属表面上脱落，在重力的作用下脱落，用水冲洗形成泥浆而排放出去。电除尘器的除尘效率与电场强度、集尘板面积、烟气流量、粉尘趋进速度，尤其与粉尘的导电性有关。电除尘器具有很高的除尘效率(最高可达99.99%)，可捕集 $0.1\mu\text{m}$ 以上的尘粒。它阻力小，运行费用低，处理烟气量的能力大，运行操作方便，可完全实现自动化。缺点是设备庞大，投资费用高^[6~7]。

常规电除尘器的基本结构如图1.2。

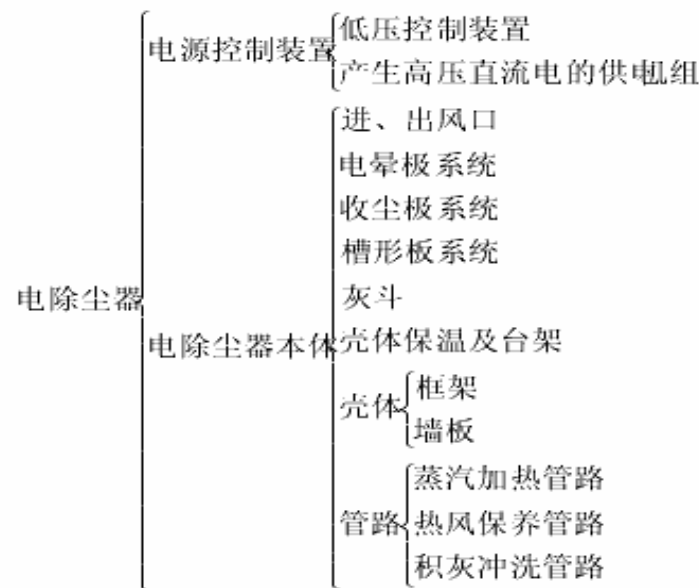
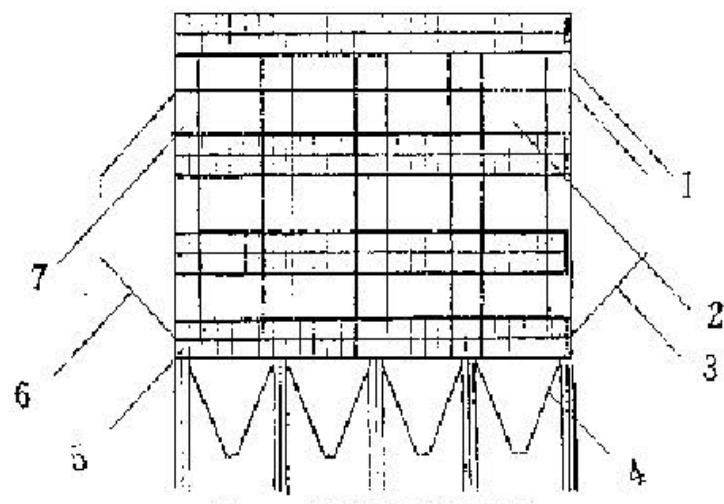


图 1.2 电除尘器的组成



1、大梁；2、侧墙；3、进气烟箱；4、灰斗；
5、底梁；6、出气烟箱；7、立柱

图 1.3 电除尘器的本体结构简图

1.3.2 电除尘器的主要特点

(1) 收尘效率高

电除尘装置可以很方便的通过加长电场长度达到 99%以上的除尘效率。当前,我国普遍使用三个电场的电除尘器,当烟气中粉尘状态处于一般状态时,其捕集效率可达 99%以上。国外工业化国家目前普遍使用五个电场的除尘器,收尘效率在 99.9%以上。

电除尘装置还有一个出色的特征,就是收尘效率可长期稳定保持不变,这是其它除尘器比不上的,只有袋除尘器例外。但袋除尘器需要经常更换滤袋,才能保持良好的收尘效率。静电除尘器电场内主要部件都是静止的,烟气流速又很低(仅 1m/s 左右),磨损很少,只要设计合理、制造安装合格、维护保养及时,电除尘器一般都能长期高效运行。

(2)烟气阻力小,总的能耗低

电除尘器的能耗主要是由烟气阻力损失、供电装置、电加热保温和振打电机等能耗组成。其它烟气除尘装置的烟气阻力占总能耗的 90%以上,其数值是电除尘器的 5~8 倍,电除尘器的烟气阻力,不管装置的体积有多大,一般仅为 200Pa 左右;即使四个电场、五个电场也不会超过 300Pa。由于总的能耗低,又很少有要更换的易损件,所以运行费用比袋除尘器、文丘里除尘器等要小得多。

(3)适用范围广

电除尘器可捕集粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的粒子、 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的高温烟气,湿式静电除尘器不仅可以除尘,还可以除去烟气中的水雾和酸雾。这种综合性的能力,为用户提供了方便。当烟气的各项参数发生一定范围波动时,电除尘器仍然保持良好的捕集性能。

(4)可处理大容量烟气

电除尘器易模块化,因此可以很方便地实现装置的大型化。目前单台电除尘器处理气量已达 $2\times 10^6\text{ m}^3/\text{h}$ 。这样大的气量用袋除尘器或旋风除尘器来处理是很难想象的。即使勉强做到也是不经济的。

(5)捕集到的粉尘干燥

因为粉尘以干燥的形态被捕集,有利于粉尘的输送和再利用,也没有二次污染。

(6)维护保养简单

电除尘器如果品种规格选的恰当,又有良好的制造安装质量,日常的维护保养量是很少的。电除尘器的操作运行已全部实行自动化,实现了智能化—即自动选择瞬时最佳运行方式。

(7)一次投资大

电除尘器和其它除尘器相比,结构较复杂,耗用钢材较多,每个电场须配用一套高压电源及控制设备,因此价格较高。但是静电除尘装置设备费用加上 3~5 年的运行费用比大多数其它除尘设备低。

从以上的优缺点比较分析可得:首先从除尘器进口的粉尘浓度来源看,火电厂除尘器入口的浓度较高。在火电厂,由于燃煤的费用占发电成本的 60%~70%。所以,尽管含灰量大的煤使锅炉对流受热面有磨损,但为了降低发电成本,煤粉炉不得不燃用含灰量较大、价格较低的煤。如前所述,这样导致锅炉出口粉尘浓度较高,这不适合用袋除尘器。若使用袋除尘器,高粉尘浓度会导致袋除尘器的清灰频率增加,布袋磨损加剧,使本来寿命不长的滤袋寿命更短。其次,从这两种除尘器的投资和运行费用来看,尽管电除尘器的一次投资费用大,但袋除尘器的阻力极大,布袋更换导致其运行费用极大。故从总的费用来看,电除尘器的设备费加上 3~5 年的运行费用比大多数袋除尘器的费用要低。再次,从这两种除尘器的使用年限来看,袋除尘器由于滤袋寿命的缘故,只能使用 1~5 年,而电除尘器可以使用 5~10 年,甚至 20 年。从这几点可以看出,火电厂比较适合用电除尘器来处理烟尘,虽然电除尘器也有一些缺点,不过随着电除尘技术的进步,也能逐渐克服^[8]。

1.3.3 电除尘器的种类

电除尘器按其应用的不同形式可以有不同的分类方式:

(1)按烟气在电场中的流动方向分为立式和卧式电除尘器。立式电除尘器中的气流是自下而上垂直运动的。立式电除尘器较高,气体通常直接排入大气,所以在正压下运行。它的主要优点是占地面积小。卧式电除尘器内的气流是沿水平方向流动。与立式电除尘器相比,它的优点是按照不同除尘效率的要求,可任意增加电场长度和电场个数;能分段供电;适合于负压操作,引风机的寿命较长。

(2)按清灰方式,可分为干式和湿式电除尘器。干式电除尘器的清灰方式是通过冲击振动来剥离电极上的粉尘,收集的粉尘是干燥的,便于综合利用。湿式电除尘器一般采用水喷淋湿式清灰。在除尘过程中。对于积沉到极板上的固体粉尘,一般是用水清洗沉淀极板,使极板表面经常保持一层水膜,当粉尘沉到水膜上时便随水膜流下,从而达到清灰的目的。

(3)按电极形状可分为板式、管式和棒式电除尘器。板式电除尘器的收尘极呈板状。为了减少粉尘的二次飞扬和增加极板的刚度,通常将极板轧制成不同的凹凸槽

形。管式电除尘器收尘极由一根或一组截面呈圆形、六角形或方形的管子构成，放电极位于管子中心，含尘气体自下而上进入管内。通常用于除去气体中的液滴。棒式电除尘器的收尘极是用钢筋编成棒帷状。它结实，耐腐蚀，不易变形，但自重大，耗钢材多。

(4)按电极距离的大小分常规电除尘器和宽间距电除尘器。常规电除尘器同极距离一般为 250—300mm。同极间距超过 300mm 的称为宽间距电除尘器。宽间距电除尘器除了间距加大以外，在本体结构上与常规电除尘器没有根本的区别。但是内于间距的加大，供电机组电压的提高，有效电场强度大，板电流密度均匀，驱进速度提高，有利于净化高比电阻粉尘。这是目前电除尘器发展的一个新趋势。

1.3.4 电除尘装置的应用范围

电除尘装置可应用于火力发电(燃油锅炉、燃煤锅炉、废热锅炉)，黑色冶金(高炉、烧结炉、平炉、转炉、电炉、冲天炉、火焰加热炉、局部作业区除尘)，有色冶金(各种熔化、焙烧炉)，建筑材料(水泥窑、烘干机、磨机、玻璃熔化炉、陶瓷烘干窑)，化工(硫酸烟雾、氯化铵、炭黑、增塑剂烟雾、焦油沥青、石油油水分分离)，造纸(碱回收、石灰窑)，废物焚烧(城市垃圾、火葬场、放射性废物处理)和铸造(化铁炉、型砂回收)等行业以及作为医疗单位空气除菌，食品、制药、纺织、计算机、手表、仪器和精密机械加工车间空气净化的除尘设备。

1.3.5 湿式电除尘器

湿式电除尘器一般采用水喷淋湿式清灰，在除尘过程中，对于积沉到极板上的固体粉尘，一般是用水清洗沉淀极板，使极板表面经常保持一层水膜，当粉尘沉到水膜上时便随水膜流下，从而达到清灰的目的。形成水膜的方法，既可以采用喷雾方式，也可以采用溢流方式。

湿式清灰的关键在于选择性能良好的喷嘴和合理地布置喷嘴。湿式清灰一般选用喷雾好的小型不锈钢喷嘴或铜喷嘴。清灰的喷嘴布置是按水膜喷水和冲洗喷水两种操作制度进行的。

(1)水膜喷水

湿式电除尘器一般设有三种清灰水膜喷水，即分布板水膜、前段水膜和电极板水膜。气流分布板水膜喷水在静电除尘器进风扩散管内气流分布板迎风面的斜上方，使喷嘴直接向分布板迎风而喷水，形成水膜。

前段水膜喷水在紧靠进风扩散管内的气流分布板上设有 1 排喷嘴，直接向气流中喷水(顺喷)形成一段水膜段。使烟尘充分湿润后进入收尘室。

收尘电极水膜喷水是在收尘室电极板上设若干喷嘴，喷嘴由电极板上部向电极板喷水，使电极板表面形成不断向下流动的水膜，以达到清灰的目的。

(2)冲洗喷水

在每个电场电极板的上部装设有冲洗喷嘴进行冲洗喷水，冲洗水量较水膜喷水少些，应在停电和停止送风后对静电除尘器电场进行水膜喷水。

清灰用水一般是循环使用，当悬浮物或其他有害物超过一定浓度时要进行净化处理，符合要求后方可循环使用^[9]。

1.4 小型湿式电除尘器的理论基础

1.4.1 传统电除尘的理论基础

电除尘器主要由放电电极和集尘极组成，如图 1.4 所示。放电极是一根曲率半径很小的纤细裸露电线，上端与直流电源的高压电极相连，下端由一吊钎固定其位置；集尘电极是具有一定面积的管或板，它与电源的另一极相连而接地。

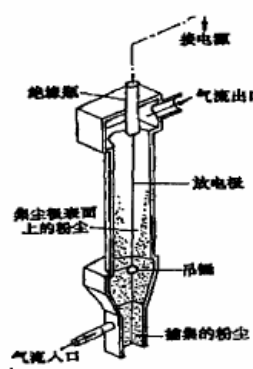
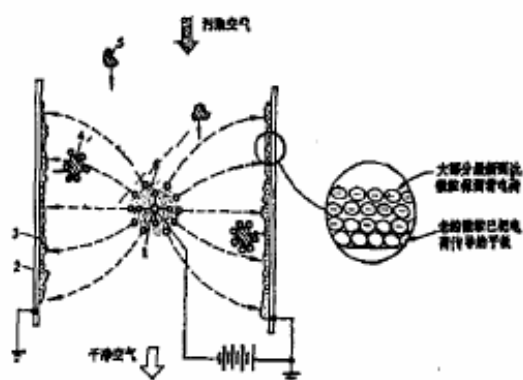


图 1.4 管式静电除尘器示意图

当两极间上加一较高电压，则在放电电极附近的电场强度很大，而在集尘极附近



- 1、电晕极；2、集尘极；3、颗粒层；
4、荷电颗粒；5、未荷电颗粒；6、电晕区

图 1.5 静电除尘器的基本原理

的电场强度相对很小，因此两极之间的电场是不均匀电场。其除尘原理如图 1.5 所示，它包括气体电离、颗粒荷电、荷电颗粒的迁移、颗粒的沉积与清除等四个过程。

(1) 气体电离

如图 1.6 所示，随着两极间的电压增加，电流变化分为三个不同的区域：区域 ① 是随着电压的增加，空气中天然存在的离子被加速的过程；区域②是空气离子全到达电极的饱和状态；当电压升到 V_0 时，到达了区域③此时，具有足够能量的电子撞击通过极间的中性气体分子，使中性气体分子外层分离出一个电子，从而产生了一个正离子和自由电子。这个电子又将进一步引起碰撞电离，如此重复

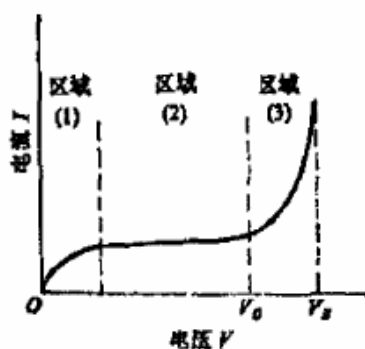


图1.6 电极放电特性

为电子雪崩。在电子雪崩中，电晕极表面出现青紫色光点，并发出撕裂声，这种现象叫电晕放电。这些自由电子和气体离子在电场力的作用下，将向极性相反的电极运动。当电压到达 V_s 时，空气被击穿，电晕放电即转为火花放电。所以在工业除尘中均采用的是电晕放电形式。

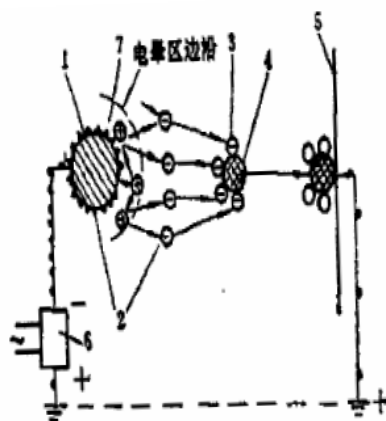
(2) 颗粒荷电

颗粒荷电有两种荷电过程：一种是离子或电子在电场力作用下作定向运动，并与颗粒碰撞而使颗粒荷电，称为电场荷电；另一种是由离子或电子的扩散而使颗粒荷电，称为扩散荷电。这种扩散荷电主要是依靠离子或电子的无规则热运动，而不是依赖电场力。粒径大于 1 微米的颗粒，电场荷电占优势，小于 0.2 微米的颗粒，扩散荷电占优势，在 0.2—1 微米的，两种都是必须考虑的。

颗粒荷电的形式也有两种：一是电子直接撞击颗粒，使颗粒荷电，另一种是气体吸附电子而成为负气体离子，此离子再撞击颗粒而使颗粒荷电。在电除尘中主要是后一种荷电形式。能吸附电子的气体称为电负性气体。

(3) 荷电颗粒的迁移

荷电颗粒在电场力作用下，将朝着与其电性相反的集尘极移动，如图 1.7 所示。颗粒荷电愈多，所处位置的电场强度愈大，则迁移的速度愈大。当荷电颗粒到达集尘极处，颗粒上的电荷便与集尘极上的电荷中和，从而使颗粒恢复中性，此即颗粒的放电过程。



1、电极；2、电子；3、离子；4、颗粒；
5、集尘区；6、高压电源；7、电晕区

图1.7 静电除尘器中荷电颗粒运动图

(4) 颗粒的沉积与清除

气流中的颗粒在集尘极上连续沉积，极板上的颗粒层厚度就不断增大。最靠近集尘极的颗粒已把大部分电荷传导给极板，因而使集尘极与这些颗粒之间的静电引力减小，颗粒将有脱离极板的趋势。但是由于这些颗粒层电阻的存在，靠近颗粒层外表面的颗粒没有丢失其电荷，它们与极板所产生的静电力可足以使靠近极板的非荷电颗粒被压在极板上。因此，必须喷淋方法或其他清灰方式将这些颗粒层强制破坏，使其落入灰斗，从除尘器中排出。

1.4.2 小型湿式电除尘器的设计原理

小型湿式电除尘器本体的主要部件包括：电极系统、清理系统、排污口、烟道系统（引入、分布和排出通道部件）及绝缘箱（即将高压直流电源引入电除尘器的部件）(工艺流程见图 1.8)。

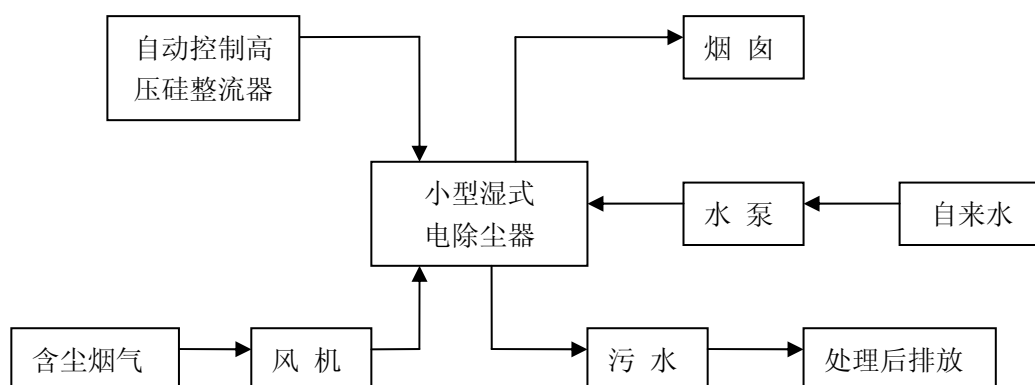


图 1.8 小型湿式电除尘器运行流程

(1) 电极系统

这是小型湿式电除尘器的核心部分，电晕电极和沉降电极的结构型式及它们的合理匹配，能够降低造价、提高净化效率，因此，电极系统成为国内外经常研究的重要课题。关于电极的具体结构特点，摘要介绍如下。

① 电晕电极

电晕电极决定了放电的强弱，因而直接影响到净化效率。另外电晕电极的安全

运转也决定了整个电净化器的可靠性。所以，它是电净化器中重要的构件之一。它可分为多种型式：如 a. 星形；b. 圆形；c. 芒刺形；d. 锯齿形；e. 刀状；f. 弹簧线型等。

电晕线的固定方式，在很大程度上能保证放电极的安全运行。其基本结构有两种：一种是用直径为 25-40 毫米的钢管制成的整体排架，排架两侧用拉条连接，形成一整体框架；另一种是重锤式框架，放电极是在上部框架上自由悬吊，下部用重锤拉紧。前者刚度好，不易断线，工作可靠。在制造电晕线的固定框架时，既要考虑足够的强度和刚度，又要使电晕电极有良好的放电性能，获得最大的驱进速度。

② 沉降电极

沉降电极直接影响净化效率及金属的消耗量。沉降电极板一般采用普通炭钢板轧制成型，钢板厚 1.2—2 毫米。管式电净化器具有直立的气体通道，气体通过截面呈圆形、六角形或方形的管式沉降电极，沉降电极装在架子上或严密的壳体内。管子的直径为 200—350 毫米，长 3000—5000 毫米。沿管子的轴线安装截面呈圆形、星形或其它形状的电晕电极。它的上端和下端用框架固定，框架对壳体沉降电极绝缘。通常上面的框架固定在置于设备外面的绝缘子上，下面的框架悬挂在电晕电极上。管式电除尘器通常用于湿式电除尘。

(2) 外壳、烟道及清理系统

电除尘器的外壳一般有砖砌、混凝土和钢结构三种。砖砌结构简单，但密封性不好；混凝土结构较砖结构好，一般不用保温，但施工麻烦；钢结构密封性好，安装方便，但耗钢材较多。

烟道指的是烟气进入和排出电除尘器的通道。由于电净化器内气流分布的均匀性对除尘效率有很大的影响，因此通过改变烟道而改善气流分布的均匀性，可将净化效率由 80% 或 90% 提高到 99% 以上。

电极是否洁净，直接影响到净化效率，电晕电极经常处于污垢状态，会造成电极肥大，从而减弱电晕放电，使除尘效果恶化。湿式电除尘器采用水喷淋湿式清灰，在除尘过程中，对于积沉到极板上的固体粉尘，一般是用水清洗沉淀极板，使极板表面经常保持一层水膜，当粉尘沉到水膜上时便随水膜流下，从而达到清灰的目的。

本文主要是设计一台小型湿式电除尘器，用来除去锅炉燃烧后产生的烟气中的颗粒物。用喷淋的湿式清灰方式代替原本的干式清灰，并且将电除尘器小型化，使其安装更加方便。

第二章 小型湿式电除尘器结构设计

已知条件设计要求：

- (1)处理炉气量： $Q=8000\text{m}^3/\text{h}=2.2\text{m}^3/\text{s}$ (标况)
- (2)炉气温度： 200°C
- (3)粉尘的平均半径： $8\times 10^{-6}\text{m}$
- (4)炉气含尘量： 进口： $10\text{g}/\text{m}^3$ (标况)； 出口： $0.1\text{g}/\text{m}^3$ (标况)

2.1 设计依据

2.1.1 设计依据标准

设计中依据的主要标准如下。

《大气污染物综合排放标准》	GB16297-1996
《电除尘器性能实验方法》	GB/T13931-32
《电站锅炉性能实验规律》	GB10184-1988
《火电厂污染物排放标准》	GB13223-200X
《火电厂烟气排放连续监测技术范围》	HJ/T75-2001
《锅炉大气污染物排放标准》	GB13271-2001
《电收尘器性能测试方法》	GB/T13931-1992
《电收尘器调试、运行、维修、安全技术规范》	JB6407-1922
《电除尘器机械安装技术条件》	ZBJ8808-1989

2.1.2 设计具体参数

- (1) 工作压力： $P_0=3.0\times 10^5\text{Pa}$;
- (2) 当地大气压： $P_1=99.3\text{kPa}=745\text{mmHg}$;
- (3) 漏气率： $C_0=5\%$;
- (4) 燃煤成分及性质： 无烟煤煤质见表2-1;

表2-1 无烟煤的组成^[10]

燃料种类	燃料组成%(质量)						
	水分	C	H	S	N	O	灰分
无烟煤	8.8	84.9	3.19	0.27	0.76	1.07	1.01

(5) 灰尘性质:

灰尘的成分、粒径分布分别见表2-2、表2-3。

表2-2 灰尘成分^[4]

项目	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
%	49.0	1.5	37.5	0.16	3.57	0.5	6.64	6.64	6.64	1.00

表2-3 粉尘粒径分布^[11]

灰尘粒度 μm	<3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	>40	中位粒径 μm
%	18	15	26	22.5	8.5	4.2	5.8	7.9

2.2 电除尘器的选型

2.2.1 电除尘器型号的确定

电除尘器的种类繁多，通常有以下几种分类方法：

按气体流向分立式电除尘器和卧式电除尘器；

按清灰方式分干式电除尘器和湿式电除尘器和电除雾器；

按使用温度分低温电除尘器、高温电除尘器和中温电除尘器；

按沉尘极结构形式分管式电除尘器和板式电除尘器

按电极配置位置分单区式电除尘器和双区式电除尘器；

按电极的大小分常规电除尘和宽间距电除尘器。

传统的干式电除尘器体积庞大、占地广，一次性投资及维修保养费用高，而且维修不便，也不适用于局部产尘点的除尘。

湿式电除尘器一般为立式电除尘器除尘极采用管式设计，因此，拟设计立式、湿式、管式电除尘器。

2.2.2 集尘板与电晕电极的配置

(1) 电晕线(阴极线)的选择

电晕线应选择放电性能好，起晕电压低，对烟气条件变化的适应性强；机械强度大，不断线，耐腐蚀；高温下不变形；有足够的刚度以及清灰性能好等。

电晕线的种类(图 2.1)主要分为芒刺线和非芒刺线两种，其基本型式见表 2-4。

表 2-4 电晕线基本型式^[12]

芒 刺 线	非 芒 刺 线
管形芒刺线(简称管芒线)	星形线
锯齿芒刺线(简称锯齿线)	麻花星形线(简称麻花线)
角钢芒刺线(简称角芒线)	圆形线
鱼骨针线(简称鱼骨线)	螺旋线

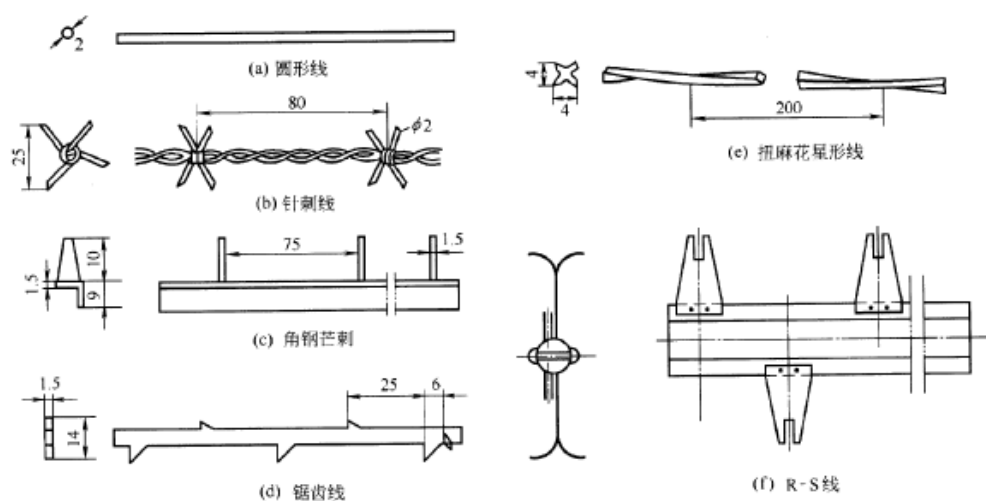


图 2.1 各种放电电极形式^[14]

①圆形放电：电极的放电强度与其直径成反比，直径越小，放电强度越高。然而从机械强度的角度考虑，直径不能太小。放电电极要承受振打时的机械振动力(湿式清灰不予考虑)、火花放电时可能的电腐蚀以及化学腐蚀等，因此在工业电除尘器中通常都采用直径为2-3mm的镍铬线。圆形放电电极通常都是采用重锤悬挂式结构。但也可采用刚性框架式，这时圆线作成螺旋弹簧形，安装时将其拉伸（保留一定的弹性）并固定到框架上。由于内部存在一定的应力，放电线始终处于绷紧状态，以保持极间的距离。

②星形放电：电极采用4-6mm普通钢材冷拉而成。有时星形线作成扭麻花形，有助于保持线的平直度并加大尖锐边的长度，从而可以提高电晕电流。星形线由于在其四角上曲率半径小，在保证必要的放电强度下具有足够的机械强度，大大减少断线的可能性。星形电极通常采用框架式，但也可用重锤悬吊和桅杆式。

③带形、刀形电极及锯齿电极：带形电极是用厚约1.5mm、宽7mm的钢带作成，若两侧作成刀状即成为刀形电极。若在两侧作成锯齿状则成为锯齿形电极。刀形电极的放电强度最高，星形电极较低。这类放电电极的放电强度见表2-5。

表2-5 放电电极的放电强度^[14]

电压/kV	刀形电极厚 1.5mm宽7mm	锯齿形电极厚1.5mm 宽7mm+6mm=13mm	带形电极厚 1.5mm宽7mm	星形电极 3mm/4mm
50	249	231	192	90
55	325	310	262	136
60	405	390	330	192
65	495	470	415	267
70	600	570	510	340

这类放电电极特点是：放电性能好，不易断线，由于是片状，一旦断线，只倒向放电线同侧的框架平面内，不倒向除尘极造成短路，工作时不晃动，火花侵蚀少，清灰性能好。

④芒刺电极:电极属于点状放电，锯齿形是其中一种。常用的还有芒刺角钢、针刺线、R-S线等。芒刺电极的起晕电压低，放电强度高，不易断线。其中的R-S线采用圆管（直径约20mm）作为支撑，交叉芒刺伸出在圆管两侧。芒刺的放电强度高，而支撑钢管的机械强度高，不致断线和变形。采用R-S放电线代替圆芒刺线的电场强度可以提高（在同等条件下电压可提高15%-20%），电流也增加，从而提高了除尘效率^[13]。

电晕线与电晕线之间的距离对放电强度也有很大影响。间距太大会减弱放电强度。如电晕线太多太密，也会因屏蔽作用反而使其放电强度降低。最优间距处于150-300mm之间。圆形电晕线耐腐蚀，电晕线细，电晕放电性能越好，不宜用于卧式电除尘器，一般用于小型管式电除尘器。

设计采用圆形电晕极线，材质为镍铬合金。技术要求参照中华人民共和国机械行业标准JB/T 5913-2007《电除尘器 阴极线》中相关规定^[12]。

(2) 电晕线的固定

湿式电除尘器电晕线固定方式的选择要求：

①要有利于保证电晕线的平直度与保证异极间距，且应尽可能使电晕线在气

流作用下减少晃动。

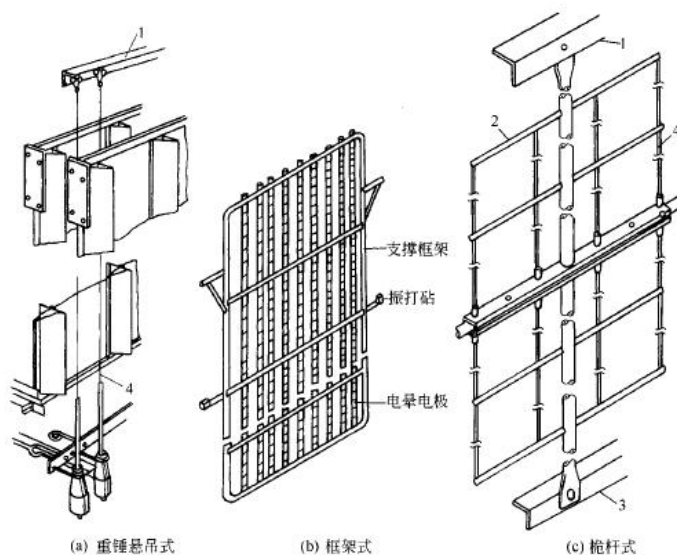
②要有利于电晕线的安装与维修。

电晕线的固定方式(图 2.2)大致有如下三类：

①重锤悬吊式：放电线在上部固定后，下部用2-3kg的重锤拉紧，以保持放电线处于平衡的伸直状态，通过设于下部的固定导向装置，防止放电线摆动，保持放电极与除尘极之间的距离。这种方式适用于高温电除尘器，且安装、检修方便，但振打力传递性能差。

②框架式：其电晕线的固定方式采用框架式结构，它适用于星形线等直线形电晕线和适用于管型芒刺线等芒刺形电晕线。框架式结构中又可分成封闭式，即电晕线全在框架内，与外伸式，即电晕线上下端均伸出框架外。框架式的优点在于既能保证异极间距，又能使电晕线上获得较大的掘打加速度。

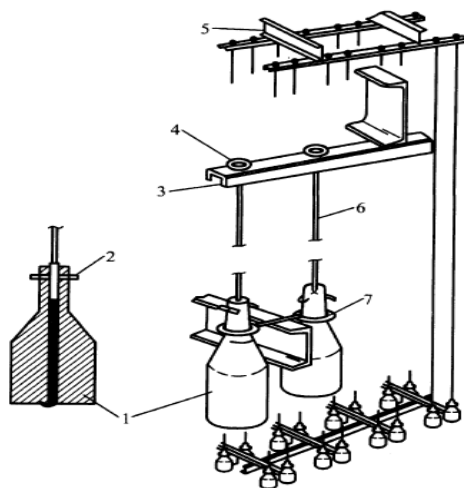
③桅杆式：通过中间的主立杆作为支撑，两侧各绑1-2根放电线，在高度方向，通过横杆分隔成约1.5m长的间隔。这种方式与框架式相类似，但金属较节省。放电线与框架横杆的连接要固定死，不能有晃动，否则在这些点上易产生局部火花和拉弧，形成电腐蚀，使放电线很快烧坏，造成断线。这是放电电极最经常遇到的故障之一^[14]。



1、顶部梁；2、横杆；3、下部梁；4、放电电极

图2.2 电晕极固定方式^[14]

由于设计采用的是湿式清灰，不用考虑振打效果，考虑到安装费用与检修方便等因素，故设计采用重锤悬吊式来固定电晕线。



1、重锤；2、重锤固定销；3、高压电极支撑架；
4、高压电极套圈；5、高压异向架；6、高压放电线；7、重锤定向环

图2.3 重锤式吊挂放电线^[13]

(3) 集尘极(阳极板)的选择

对除尘电极的要求

①消耗金属少除尘板极消耗的金属在整个电除尘器中占有很大的比重，降低极板的金属消耗很有意义。

②防止二次扬尘(由于本设计是湿式清灰不予考虑)。

③振打性能(由于本设计是湿式清灰不予考虑)。

④电气性能除尘极的电气性能主要表现在极板表面上的电流强度及电流密度的均匀性上。管式电极接近于理想的电流分布。

⑤制造及安装精度除尘极板的高度与极板之间的距离之比可达数十倍，因而除尘极板的平直度对保证极间间距是很重要的。电极间间距的安装误差应小于5%，极板的歪曲及极间距的不均匀会导致工作电压降低和效率下降。

⑥机械强度除尘电极的机械强度主要表现在刚度、耐高温和耐腐蚀方面。除尘电极往往是细长的。要有一定的刚度才能不扭曲，以保证极板间的距离不变。管式

电极在防止高温变形方面具有良好的特性，并且在一些高温场合仍然有所应用。

综上所述设计定为管式电除尘器，管式主要分为圆形管式和六边形管式，六边形管式相对圆形管式空间更加紧凑，具有以下特点：

- ①能提高烟尘的驱进速度；
- ②适于捕集高比电阻烟尘；
- ③增加有效收尘面积 $1/10 \sim 1/3$ ，辅助电极捕集的烟尘占总烟尘量 $1/10 \sim 1/5$ ；
- ④可减少占地面积和设备重量。

(4) 极间距的确定

极间距与工作电压和极板的高度有关。常规电除尘器的宽度为 200-350mm。极板越高应采用较宽的间距。对 300mm 间距，相应的电压为 60-70kV。宽间距电除尘器通道宽达 400-1000mm，而相应的电压达 80-200kV。极间距与放电电极的间距相对应。

设计采用六边形管式集尘极，管径为 320mm，用 1.2-2mm 的不锈钢卷板轧制而成，参照《中国主要不锈钢牌号最新国家标准材质》^[25]选择奥氏体不锈钢 (12Cr17Ni7) 为集尘板材料。集尘管之间贴靠紧密以中间集尘管为中心呈放射状排布，形成类圆柱体形状(参见图 2.4)。集尘极的尺寸偏差与形状偏差应符合中华人民共和国机械行业标准 JB/T 5913-2007《电除尘器 阳极板》^[15]中相关要求(参见表 2-6)。

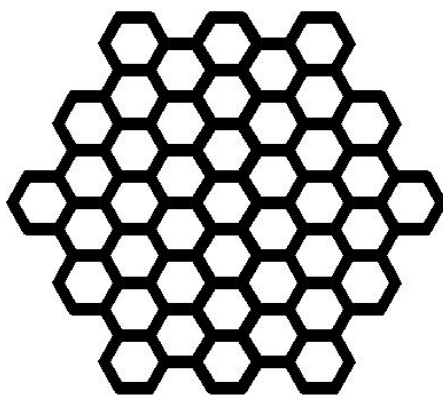


图 2.4 集尘极水平剖面图

表 2-6 阳极板尺寸偏差与形状偏差^[15]

mm

偏差类别	偏差项目名称		偏差符号	阳极板宽度	
				≤ 500	> 500
尺寸偏差	外型尺寸	长 度 L	l	± 5	
		宽 度 B	b	+2 -1	± 2
		高 度 H	h	± 1	+1 -1.5
	安装孔间距	宽度方向 B_0	b_0	± 1	
形状偏差	长度 L 方向	平面弯曲度	f	$L/1000$ 且 ≤ 10	
		侧面弯曲度	g	$0.5L/1000$ 且 ≤ 5	
		平面扭曲度	e	$1.5L/1000$ 且 ≤ 15	
		平面波纹度	q	$1.5/200$ 任意段	

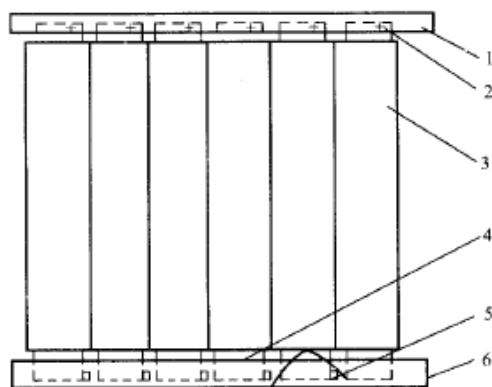
电晕极与集尘极之间的距离 160mm;

相邻电晕极端点间距 325mm。

(5) 集尘极的固定

集尘极最常用的吊挂方式有挂钩悬挂和自由悬挂型。

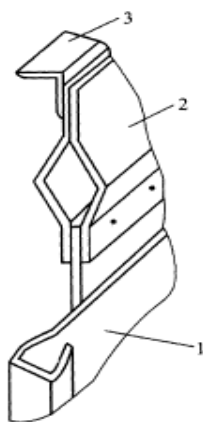
自由悬挂型以单点偏心吊挂为代表,如图 2.5 所示。采用这种悬吊方式的极板,上、下端均焊有加强板,上端加强板的悬吊点位于极板二分之一宽度的中心线上,仅用一个销轴定位。极板在悬吊杆内允许有 5mm 的横向位移,使之形成单点偏心悬挂。极板由于本身重力矩的作用向右侧偏斜,由冲击杆内的挡铁将它找正。极板偏心愈大,下部加强板与挡铁的正压力愈大。当振打力从右方传递过来时,下端加强板对挡铁产生相对运动,极板绕上端偏心悬挂点回转,然后靠自重落下,再次与挡铁碰撞。单点偏心吊挂的极板振打时位移较大,振打力一定时,其传递振打力较小,但比较均匀。其固有频率较低,因此清灰效果较好。这种悬挂方式适用于烟气温度较高的场合。



1、悬吊梁；2、销轴；3、收尘极板；4、加强板；5、挡铁6、冲击杆

图2.5 偏心吊挂方式

由于本设计采用湿式清灰，所以无需考虑振打产生的问题，所以设计采用挂钩悬挂方式(参见图2.6)，上下通过悬挂梁的挂钩定位。极板受热伸长时，由于不是固接，影响异板距的可能性小得多^[13]。



1、极板；2、绝缘材料；3、悬吊角钢

图 2.6 挂钩悬挂

2.3 主要参数计算

2.3.1 除尘效率(初定)

除尘效率可以根据电除尘器进口烟气浓度和出口浓度来确定，根据最新《火电

厂污染物排放标准》(GB13223-200)^[16]的规定，出口排放浓度标准状态下小于100mg/m³来确定。

$$\begin{aligned}\eta &= \left(1 - \frac{C_0}{C_i}\right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{0.1}{10}\right) \times 100\% \\ &= 99\%\end{aligned}\quad (2-1)$$

式中 η ——除尘效率；

C_i ——入口含尘浓度，g/m³

C_0 ——出口含尘浓度，g/m³

2.3.2 临界电场强度的计算

$$E_0 = \left(31.02\rho + 9.54\sqrt{\frac{\rho}{R_A}}\right) \times 10^3 (V/cm) \quad (2-2)$$

式中 R_A ——电晕线半径，cm；

ρ ——气体密度因子；

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{T_0 P}{P_0 T} \\ &= \frac{298 \times 1.0 \times 10^5}{473 \times 1.0133 \times 10^5} \\ &= 0.622\end{aligned}\quad (2-3)$$

式中 由于电晕线为圆线，一般采用直径为0.15~0.25cm，取 $R_A=0.1$ cm

$$\begin{aligned}
 E_0 &= \left(31.02\rho + 9.54\sqrt{\frac{\rho}{R_A}} \right) \times 10^3 \text{ (V/cm)} \\
 &= \left(31.02 \times 0.622 + 9.54\sqrt{\frac{0.622}{0.1}} \right) \times 10^3 \\
 &= 43.1 \text{ kV/cm}
 \end{aligned}$$

2.3.3 临界电压

$$\begin{aligned}
 u_0 &= R_A \cdot E_0 \cdot \ln\left(\frac{d}{R_A}\right) \quad (2-4) \\
 &= 0.1 \times 43.1 \times 5.3 \\
 &= 22.84 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

式中 R_A ——电晕线半径, cm;
 d ——换算常数, 取为 20。

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{K}{f_0 b^2 \ln\left(\frac{d}{R_A}\right)} \times u(u - u_0) \quad (2-5) \\
 &= \frac{2.1}{9 \times 10^6 \times 16^2 \ln\left(\frac{20}{0.1}\right)} \times 40000(40000 - 22840) \\
 &= 0.12 \text{ mA/m}
 \end{aligned}$$

式中 K ——当温度为 $t^\circ\text{C}$, 压力为 101325Pa 时的离子迁移率 $\text{cm}^2/(\text{v}\cdot\text{s})$ 取空气的离子迁移率为 $2.1 \text{ cm}^2/(\text{v}\cdot\text{s})$;

u ——实际操作电压 一般为 $40 \sim 70 \text{ kV}$, 取其为 40 kV ;

u_0 ——临界电压;

f_0 ——换算常数 $f_0 = 9 \times 10^6$ 。

2.3.4 电晕电场强度

$$\begin{aligned} E_R &= \frac{u}{b} \\ &= \frac{40}{16} \\ &= 2.5 \text{ kv / cm} \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中 u ——实际操作电压, kv;

b ——电晕极与集尘极之间的距离, cm。

2.3.5 集尘极附近的电场强度

在工程设计中通常采用下式计算集尘极电场强度:

$$\begin{aligned} E_p &= \sqrt{\frac{4ib}{Kc}} f_0 \\ &= \sqrt{\frac{4 \times 0.12 \times 16}{2.1 \times 16.3}} \times 9 \times 10^6 \\ &= 1.4 \text{ kv / m} \end{aligned} \quad (2-7)$$

式中 c 电晕极线间距的一半, cm。

f_0 ——换算常数 $f_0 = 9 \times 10^6$ 。

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 \frac{273+C}{T+C} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \\ &= 1.73 \times \frac{273+160}{473+160} \left(\frac{473}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \times 10^{-4} \\ &= 1.7 \end{aligned} \quad (2-8)$$

2.3.6 驱进速度

当粒径小于 $50\mu\text{m}$ 时, ω 与尘粒粒径成正比, 则有

$$\omega = \frac{DE_R E_p r}{6\pi\mu} (\text{cm/s}) \quad (2-9)$$

式中 D ——与粉尘介电常数有关的常数;

$$D = 1 + 2(\varepsilon - 1) / (\varepsilon + 2) \quad (2-10)$$

气体 $\varepsilon = 1$

r ——尘粒半径 $8 \times 10^{-6} \text{m}$ 。

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1 \times 2.5 \times 1.4 \times 8 \times 10^{-6}}{6 \times 3.14 \times 1.7 \times 10^{-4}} \\ &= 8.95 \text{cm/s} \end{aligned}$$

由经验可得取 $\omega = 9 \text{cm/s}$ 。

2.4 小型湿式电除尘器总体设计计算

2.4.1 集尘极比表面积

$$\begin{aligned} f' &= \frac{1}{\omega} \ln \frac{1}{1-\eta} \\ &= \frac{1}{0.09} \ln \frac{1}{1-0.99} \\ &= 52 \text{s/m} \end{aligned} \quad (2-11)$$

式中 ω ——驱进速度;

η ——除尘效率。

2.4.2 集尘极板总面积

$$\begin{aligned} A_0 &= fQ \\ &= 52 \times 2.2 \\ &= 115 \text{m}^2 \end{aligned} \quad (2-12)$$

式中 Q ——处理炉气量。

计算求得的极板面积后，在选择电除尘器的实际极板面积时，要考虑各种参数的准确性和电除尘器的结构等方面的影响，应将极板面积，适当增加一些余量(也可称为储备参数)，取储备系数 $K=1.5-2.0$ ，所需集尘极面积为

$$\begin{aligned} A &= (1.5-2.0) \times A_0 \\ &= (1.5-2.0) \times 115 \\ &= (172.5-230) \text{m}^2 \end{aligned} \quad (2-13)$$

取 $A=180 \text{m}^2$

2.4.3 实际集尘极比表面积

$$\begin{aligned} f &= f' \frac{A}{A_0} \\ &= 52 \times \frac{180}{115} \\ &= 81 \text{s/m} \end{aligned} \quad (2-14)$$

2.4.4 除尘效率验算

驱进速度与电除尘器的除尘效率和沉积面积关系密切。目前世界上都采用得意希(Deutsch)公式来计算除尘效率，即

$$\eta = 1 - e^{-f\omega} \quad (2-15)$$

$$\begin{aligned} &= 1 - e^{-81 \times 0.09} \\ &= 99.93\% \end{aligned}$$

2.4.5 有效截面积

因为设计定为管式电除尘器，气体速度 $V=0.6\sim 1\text{m/s}$ ，取 $V=0.7$

$$\begin{aligned} F &= \frac{Q}{V} \\ &= \frac{8000}{3600 \times 0.7} \\ &= 3.3\text{m}^2 \end{aligned} \tag{2-16}$$

2.4.6 集尘极数量

集尘极设定为管式六边形

单根截面积

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{3}{2}b^2\sqrt{3} \\ &= \frac{3}{2} \times 0.16^2 \times \sqrt{3} \\ &= 0.07\text{m}^2 \end{aligned} \tag{2-17}$$

集尘极数量

$$\begin{aligned} n &= \frac{F}{S_1} \\ &= \frac{3.3}{0.07} \\ &= 47.14\text{根} \end{aligned} \tag{2-18}$$

考虑到管壁厚度等因素取 $n=43$ 根。

2.4.7 集尘极有效高度

$$\begin{aligned} h &= \frac{A}{2n\pi b} \\ &= \frac{180}{2 \times 43 \times 3.14 \times 0.16} \\ &= 4.07m \end{aligned} \quad (2-19)$$

取集尘极高度 $h=4.5m$ 。

2.4.8 气体在除尘器内实际速度

$$\begin{aligned} V &= \frac{Q}{F} \\ &= \frac{2.2}{3.3} \\ &= 0.7m/s \end{aligned} \quad (2-20)$$

2.4.9 气体在有效电场内的停留时间

$$\begin{aligned} t &= \frac{h}{V} \\ &= \frac{4.07}{0.7} \\ &= 5.8s \end{aligned} \quad (2-21)$$

第三章 电除尘器部件的设计和计算

3.1 气流分布装置

电除尘器中气体流速的均匀程度对除尘效率有很大影响，因为当气流分布不均匀时，在流速低处所增加的除尘效率，远不足以弥补流速高处效率的降低，因而总效率降低。

气流分布均匀程度主要依靠正确选择管道断面与除尘器断面的比例（开口比），以及设置气流分布装置来达到。

3.1.1 气流分布板的形式

气流分布板见图 3.1。圆孔板及方孔板的开口比可取 1：7.5。百叶形分布板开口比可取 1：10，而 X 形分布板可高达 1：15。

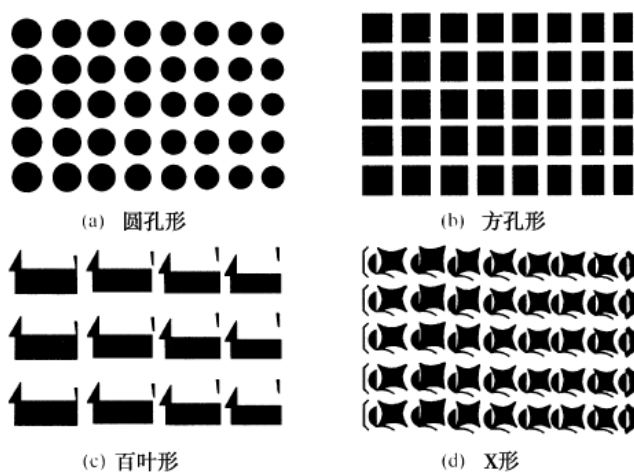


图 3.1 气流分布板

在实际中，常用的是圆孔分布板。圆孔直径不应太小，以防止粉尘堵塞，一般可采用40-60mm。通常在整个分布板上圆孔的大小都相同。但为了气流分布均匀，通过模型试验，也可采用不等直径的圆孔，例如中部圆孔较小，而四周圆孔增大或相反。在分布板上圆孔的面积与整个分布板的面积之比称为开孔率。一般开孔率应为50%-65%。有时设置1块分布板还达不到气流分布均匀的目的，则可以设置2-3块

分布板，板间距应不小于孔距的5-10倍，或按下式计算，即

$$D = (0.15-0.2)H \quad (3-1)$$

式中 D ——分布板的孔距，m；

H ——分布板的高度，m。

(1) 分布板层数

设计采用 2 层气流分布板结构，气流分布板间距为 500mm。

(2) 开孔率(f_0)

分布板开孔率因气体速度而异，对于 1m/s，开孔率取 50%较合理。靠近工作室第二层分布板开孔率应比第一层小，即第二层分布板阻力系数比第一层大，这样就能达到气体分布板较均匀的目的。

分布板可由3mm厚的不锈钢板压制而成，其直径取3m左右，边缘以焊接方式连接壳体，分布板上每个孔径取 $\phi 50\text{mm}$ ，由公式(3-1)可得分布板的孔距：

$$\begin{aligned} D &= (0.15-0.2) \times 500 \\ &= 75-100 \text{ mm} \end{aligned}$$

设计选 $D=75\text{mm}$ 。

电除尘器安装好以后，要求对分布板进行通气测试，气流分布不均匀处，贴堵或切割部分孔眼，调整达到 5%的测定速度大于或小于 30%气体的平均速度为止^[13]。

3.1.2 气流导向板

由于设计采用直角入口，即从上转90°后进入电除尘器内，这时为了获得良好的气流分布效果，除了设置分布板外在气流转变处要加设导流装置，在除尘器进气口与气体分布板之间加设一块气流导向板。

3.2 高压绝缘子

高压绝缘子按用途分为支柱绝缘子、绝缘套管和电瓷转轴三种，绝缘套管按材质又分为石英玻璃套管和瓷套管两种。三种绝缘子采用电工陶瓷材料时，又分为普通长石瓷、氧化铝瓷和高温锆质瓷(表3-1)电除尘器的瓷绝缘子应具有以下特征：耐

热程度高；机械强度大；高温时电绝缘性好；耐腐蚀性强；耐冷热急变性能好；表面光滑不易积灰和化学稳定性好^[17]。

表3-1 高压绝缘子材料的性能比较^[17]

条件与性能	单位	长石陶瓷	氧化铝陶瓷	锆质陶瓷	石英玻璃
长期使用温度	℃	100	200	300	300
吸水率	%	< 0.1	< 0.1	< 0.1	
骤热骤冷性(温度差)	℃	130	180	280	780
热膨胀系数(40 ~ 450℃)	10 ⁻⁶ /℃	6.5	6	3	0.54
硬度	莫式	7.5	8	8	11
抗弯强度	MP _a	120	200	140	> 15
抗压强度	MP _a	500	800		> 40
击穿电压强度	kV/mm	7 ~ 14	7 ~ 14	10	10 ~ 32 ^①
体积固有电阻(20℃)	Ω•cm	> 10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹⁵
(200℃)	Ω•cm	10 ⁸	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹³
(300℃)	Ω•cm	10 ⁶	10 ⁸	10 ¹⁰	5 × 10 ⁹ ^②

① 常温下为32kV/mm，标准规定为10-14kV/mm

② 系在400C° 时测得的数值。

本设计绝缘子一方面受到烟气的作用，一方面又承受放电极系统的荷重所以设计选用支柱绝缘子。支柱绝缘子的作用是使放电极长期稳定放电并与接地部件绝缘，支撑整个放电极的荷重。它是电除尘器的心脏部件，其性能优劣和运行好坏，直接影响到电除尘器的除尘效率。随着工业电除尘器所处理的烟气高温、高湿、高浓度以及荷电电压向更高电压发展，要求支柱绝缘子具有较好的性能。

支柱绝缘子的结构可划分为以下几种类型：

(1)实心圆柱形支柱绝缘子(也称“棒形支柱绝缘子”)，它具有外胶装金属附件，属A型绝缘子；

(2) 具有联合胶装或外胶装金属附件的内部有空腔的圆柱形支柱绝缘子，它的每个元件上都具有一个整体烧成的内部瓷隔板，属B型绝缘子；

(3)具有内胶装或联合胶装金属附件的A型圆柱形支柱绝缘子；

(4)具有内胶装或联合胶装金属附件的B型圆柱形支柱绝缘子；

(5)针式支柱绝缘子，属B型绝缘子^[18]。

设计选用广东乐清市康乐高压电瓷电器有限公司生产的ZSW-20/1600型支柱绝缘子，它属于具有内胶装或联合胶装金属附件的A型圆柱形支柱绝缘子，如图3.2所示。

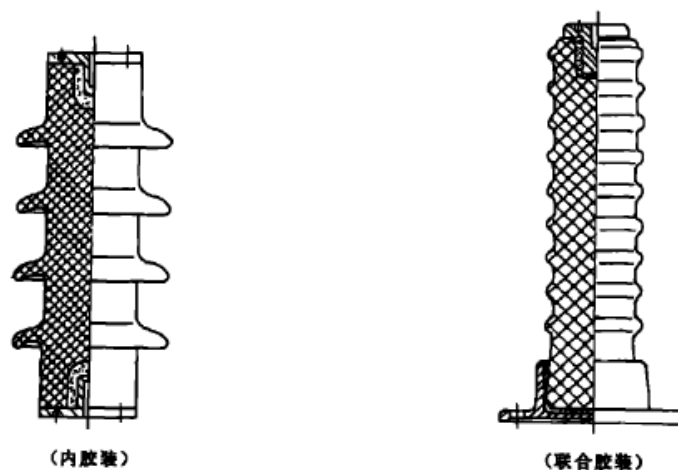
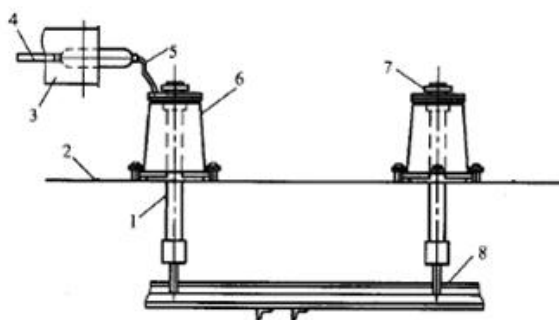


图3.2 内胶装或联合胶装金属附件的A型圆柱形支柱绝缘子

圆柱形支柱绝缘子安装效果如图3.3



- 1、悬吊杆；2、除尘器顶盖；3、高压线的金属保护套管；
4、来自整流器的高压线；5、输入线；6、石英套管；
7、金属盖；8、高压放电极框架

图3.3 支柱绝缘子

3.3 电除尘器筒体几何尺寸

电除尘器筒体的作用是引导烟气通过电场、支撑电极和振打设备，形成一个与外界环境隔离的独立的收尘空间。筒体结构应有足够的刚度和稳定性，不允许发生改变电极间相对距离的变形。同时，还要求筒体封闭严密，漏风率在5%以下。

筒体的材料根据被处理的烟气性质而定，一般都用钢材制作，因其安装周期短，施工方便。烟气有腐蚀性的，可采用砖、混凝土或耐腐蚀钢材制作。有时也可以作防腐内衬。若高温烟气中含有腐蚀性物质，则必须外敷保温层，以保持筒体内的温度高于烟气的露点温度。

筒体包括检修门、楼梯和安全装置等。筒体设计除应考虑满足电除尘器工艺的一切要求外，还要最大限度地节省材料。因为筒体的重量一般占电除尘器总重的30%-55%。

筒体的伸缩是利用支承除尘器的支柱下面的支撑轴承来实现的。支撑轴承除了一个用固定支座外，其余均用单向或双向活动支座。

因为电除尘器设计为六边形管式电除尘器，所以定为圆柱型筒体。电除尘器筒体可分为筒体和支撑架两部分。下部框架由支撑柱组成，它除承受电除尘器全部结构的自重外，还承受外部附加载荷及灰斗中物料的重量。筒体一般是用厚5mm的钢板制作，并适当加筋构成一体。通常，主肋布置在跨度较小的方向上，次肋则嵌于主肋之间。采用热轧型钢肋最经济，常用的有角钢、槽钢和工字钢。筒体应能承受电场运行的负压、风压及温度应力等，同时还要满足检修和敷设保温层的要求。

3.3.1 筒体截面直径

$$\begin{aligned}\phi &= 2[n_1 b + c] \\ &= 2 \times [7 \times 0.188 + 0.2] \\ &= 3.00m\end{aligned}\quad (3-2)$$

式中 n_1 ——43 根集尘管组合成类圆型时直径上的管数；

b ——电晕极与六边形管式集尘极的最远距离。

$$\begin{aligned}b &= \frac{0.325}{2 \times \cos 30^\circ} ; \\ &= 0.188m\end{aligned}$$

c ——最外层一排集尘极中心线与内壁表面的距离，m，一般取 $c=0.05 \sim 0.2m$ 。

参照 GB9019-1900 《压力容器公称直径》，筒体用钢板卷制时，容器公称直径按照表 3-2 规定。

表 3-2 压力容器公称直径（mm）

300	350	400	450	500	550	600	500	700	750	800	900	1000	1100
1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000	5200

根据此表，选取的筒体公称直径为 3000mm。

3.3.2 筒体厚度

由于电除尘器壁厚没有具体标准，经验显示最小厚度不能低于 3mm，本设计除尘器工作压力为常压 $1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ ，设计考虑超负荷运行时选取较大工作压力进行设备的壁厚计算。

在已知公称直径，按照 GB6654-1996 《压力容器用钢板》^[18]，结合设计参数，选用筒体材料为 16MnR 钢，设计模拟最大压力为 $3.0 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

$$\delta = \frac{PD}{2[\sigma]\phi - P} \quad (3-3)$$

式中 σ ——圆通的计算厚度，mm；

P ——设计压力，MPa；

D ——圆通的内径，mm；

$[\sigma]$ ——圆筒内径的许用应力，MPa。若设计温度较高，考虑温度对材料性能的影响，应以设计温度下材料的许用应力 $[\sigma]^t$ 代替 $[\sigma]$ ；

ϕ ——焊缝系数，根据《钢制压力容器》对焊缝系数的定义可知，双面焊的全焊透对接焊缝局部无损探伤的焊缝系数 $\phi = 0.85$ 。

表 3-3 压力容器用碳素钢、低合金钢板指标^[18]

钢号	钢板标准	使用状态	厚度 (mm)	常温强度指标		以下温度下的许用应力				
				(MPa)		(MPa)				
				σ_b	σ_a	20	100	150	200	250
16MnR	GB6654	热轧、正火	6~16	510	345			170		

计算厚度：

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{PD}{2[\sigma]\phi - P} \\ &= \frac{0.3 \times 3000}{2 \times 170 \times 0.85 - 0.3} \\ &= 3.1\text{mm}\end{aligned}$$

厚度附加量包括两部分，即厚度负偏差和腐蚀余量，用一下公式表示，即

$$C = C_1 + C_2 \quad (3-4)$$

式中 C ——厚度附加量；

C_1 ——钢板或钢管的厚度负偏差，按相应的钢板或钢管标准选取，mm，下表列出了常用规格钢板和钢管的负偏差，当钢板和钢管的负偏差不大于 0.25mm，且不超过名义厚度的 6%时，可取 $C_1 = 0$ ；

C_2 ——腐蚀余量，mm。

表 3-4 钢板厚度负偏差 C_1 值

钢板厚度 mm	2.5	2.8~3.0	3.2~3.5
负偏差 C_1 mm	0.20	0.22	0.25

腐蚀余量也可以根据介质对材料的均匀腐蚀率与容器的设计寿命决定，即

$$C_2 = K_a B \quad (3-5)$$

式中 K_a ——腐蚀速率，mm/a；

B ——容器设计寿命，通常取 10~15 年。

也可以根据腐蚀速率直接选取；当材料的腐蚀速率为 0.05~0.1mm/a 时，单面腐蚀取 $C_2 = 1 \sim 2\text{mm}$ ，双面腐蚀取 $C_2 = 2 \sim 4\text{mm}$ ；当材料的腐蚀速率小于或等于 0.05mm/a 时，单面腐蚀取 $C_2 = 1\text{mm}$ ，双面腐蚀取 $C_2 = 2\text{mm}$ 。

综上所述，设计厚度为

$$\begin{aligned}\delta_{\text{总}} &= \delta + C \\ &= \delta + C_1 + C_2\end{aligned}\quad (3-6)$$

$$\delta = 3.1\text{mm}$$

$$C_1 = 0.25\text{mm}$$

$$C_2 = 2\text{mm}$$

$$\begin{aligned}\delta_{\text{总}} &= \delta + C \\ &= \delta + C_1 + C_2 \\ &= 3.1 + 0.25 + 2 \\ &= 5.35\text{mm}\end{aligned}$$

圆整之后取 6mm。

综上所述筒体厚度应 $>3\text{mm}$ 且 $\leq 6\text{mm}$,所以设计选择筒体厚度为 6mm。

3.3.3 出气口底面至集水斗下端面距离

$$\begin{aligned}H_1 &= h + h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 \\ &= 4.5 + 1.5 + 1.3 + 2.0 + 0.5 + 2.0 + 2.1 \\ &= 13.9\text{m}\end{aligned}\quad (3-3)$$

式中：h ——集尘极高度，m；

h_1 ——集尘极上顶端至冲洗装置喷嘴距离，m，取 $h_1=1.5\text{m}$ ；

h_2 ——集洗装置喷嘴至出气口距离，m，取 $h_2=1.3\text{m}$ ；

h_3 ——集尘极下端至上层气流分布板距离，m，取 $h_3=2.0\text{m}$ ；

h_4 ——上下气流分布板间距，m，取 $h_4=0.5\text{m}$ ；

h_5 ——下层气流分布板至灰斗上端面距离，m，取 $h_5=2.0\text{m}$ ；

h_6 ——集水斗上端面至底部距离，m，取 $h_6=2.1\text{m}$ 。

h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 、 h_5 、 h_6 (图 3.4)可根据电晕极、集尘极和其他构件具体情况确定^[19]。

3.3.4 进气口面积

$$\begin{aligned}
 F_0 &= \frac{Q}{3600v_0} & (3-4) \\
 &= \frac{8000}{3600 \times 13} \\
 &= 0.17m^2
 \end{aligned}$$

式中 F_0 ——进气口的面积， m^2 ；

v_0 ——进气口处的风速， m/s 。该值越小对电除尘器越有利， v_0 一般取 13~15m/s。

由此可得进气口直径

$$\begin{aligned}
 \phi &= 2\sqrt{\frac{F_0}{\pi}} & (3-5) \\
 &= 2 \times \sqrt{\frac{0.17}{3.14}} \\
 &= 0.48m
 \end{aligned}$$

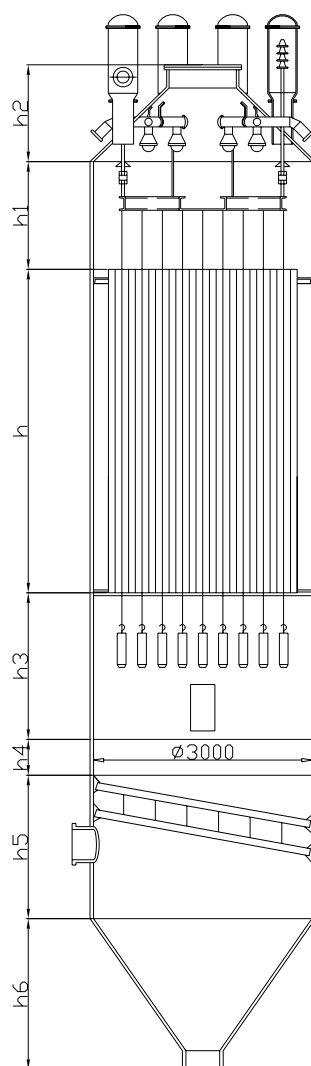


图 3.4 小型湿式电除尘器尺寸

3.4 电除尘器载荷计算

3.4.1 质量载荷

设备的操作质量 $m_0(\text{kg})$; $m_0=m_1+m_2+m_a$ (3-6)

式中 m_1 ——壳体质量, kg;

$$m_1=5174.4 \text{ kg}$$

m_2 ——内件质量, kg;

$$m_2=16.9+2 \times 43=102.9 \text{ kg};$$

m_a ——人孔、接管、法兰等附属件质量, kg; 取50kg。

$$m_0=5174.4+102.9+50=5467.3 \text{ kg}$$

设备最大质量 $m_{\max}(\text{kg})$; $m_{\max}=m_1+m_2+m_w+m_a$ (3-7)

式中 m_1 ——壳体质量, kg;

m_2 ——内件质量, kg;

m_w ——设备内充液质量, kg;

$$m_w = \frac{\pi}{4} \times 0.1^2 \times 1.5 \times 12 \times 1000 = 140 \text{ kg}$$

m_a ——人孔、接管、法兰等附属件质量, kg。

$$m_{\max}=5174.4+102.9+140+50=5327.3 \text{ kg}$$

设备最小质量 $m_{\min}(\text{kg})$; $m_{\min}=m_1+0.2m_2+m_w+m_a$ (3-8)

式中 m_1 ——壳体质量, kg;

m_2 ——内件质量, kg;

m_a ——人孔、接管、法兰等附属件质量, kg。

$$m_{\min}=5174.4+0.2 \times 102.9+50=5244.98 \text{ kg}$$

3.4.2 风载荷

塔设备受风压作用时, 塔体会发生弯曲变形。吹到塔设备迎风面上的风压值, 随设备高度的增加而增加。为计算简便, 将风压值按塔设备高度分为几段, 假设每段风压值各自均匀分布于塔设备的迎风面上。

(1) 水平风力

两相邻计算截面间的水平风力按式(3-9)计算:

$$P_i = K_1 K_{2i} q_0 f_i l_i D_i \quad (3-9)$$

式中 P_i ——设备中第*i*段水平风力，N；

K_1 ——体形系数，取0.7；

K_{2i} ——风振系数，当设备高 $H \leq 20\text{m}$ 时，取 $K_{2i} = 1.7$ ；

q_0 ——基本风压值，kN / m²；各地区的基本风压值按《全国基本风压分布图》或按当地气象部门资料确定，取300N/m²；

f_i ——风压高度变化系数；

l_i ——第*i*计算段长度，mm；

D_i ——设备各计算段有效直径，mm。

$$\begin{aligned} P_1 &= K_1 K_{21} q_0 f_1 l_1 D_1 \\ &= 0.7 \times 1.7 \times 300 \times 1.17 \times 6.892 \times 3 \\ &= 8626.2\text{N} \end{aligned}$$

式中 f_1 ——风压高度变化系数，查表得1.17；

l_1 ——第1计算段长度6892mm；

D_1 ——设备各计算段有效直径3000mm。

$$\begin{aligned} P_2 &= K_1 K_{22} q_0 f_2 l_2 D_2 \\ &= 0.7 \times 1.7 \times 300 \times 1.17 \times 4.144 \times 3 \\ &= 5192.7\text{N} \end{aligned}$$

式中 f_2 ——风压高度变化系数，查表得1.17；

l_2 ——第2计算段长度4144mm；

D_2 ——设备各计算段有效直径3000mm。

$$\begin{aligned} P_3 &= K_1 K_{23} q_0 f_3 l_3 D_3 \\ &= 0.7 \times 1.7 \times 300 \times 1.17 \times 3.948 \times 3 \\ &= 4947.1\text{N} \end{aligned}$$

式中 f_3 ——风压高度变化系数，查表得1.17；

l_3 ——第3计算段长度3948mm；

D_3 ——设备各计算段有效直径3000mm。

(2) 风弯矩

设备底面处的风弯矩 M_w 按式(3-10)计算：

$$\begin{aligned}
 M_w &= P_1 \frac{l_1}{2} + P_2 \left(l_1 + \frac{l_2}{2} \right) + P_3 \left(l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2} \right) \\
 &= 8626.2 \times \frac{6.892}{3} + 5192.7 \left(6.892 + \frac{4.144}{2} \right) + 4947.1 \left(6.892 + 4.144 + \frac{3.948}{2} \right) \\
 &= 130726 N \cdot m
 \end{aligned} \tag{3-10}$$

3.4.3 最大弯矩

设备底面处的最大弯矩

$$M_{\max} = M_w + M_e \tag{3-11}$$

式中 M_e ——偏心弯矩，本设计为0；

$$M_{\max} = M_w = 130726 N \cdot m$$

第四章 辅助系统设计选型及安装维护

4.1 高压供电装置的选型

高压供电装置是一个以电压、电流为控制对象的闭环控制系统。包括升压变压器、高压整流器、控制元件和控制系统的传感元件等4个部分(参见图4.1)。其中升压变压器的高压整流器及一些附件组成主回路，其余部分组成控制回路。

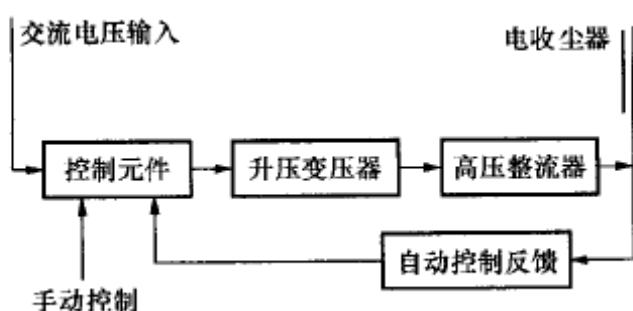


图4.1 电除尘器供电装置

4.1.1 高压硅整流器

国内供电机组定型为GCAJ02-A/KV(参见图4.2)。可控硅自动调压是由自耦调压器、饱和电抗器—磁放大器等手动调压方式发展起来的。而硅整流器则是由机械整流器、电子管整流器等发展起来的。

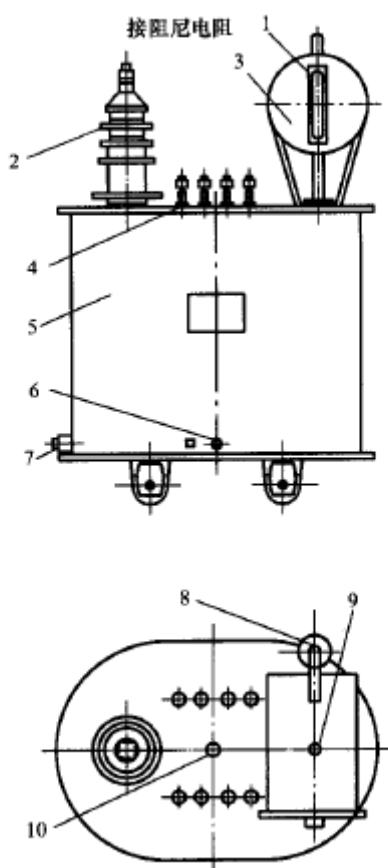
高压供电机组应水平安装。变压器、电抗器的安装倾斜度不大于 2° ，控制柜的安装倾斜度不大于 5° 。

高压整流变压器和控制柜的外壳应牢靠接地，接地电阻应小于 1Ω 。接地线的截面积不小于 25mm^2 。导线采用电焊机上用的多股铜芯软电缆，目的是为了减少阻抗和可靠接地。

高压整流变压器与控制柜间取样信号的连接线，必须选用金属隔离屏蔽线，不能用一般导线替代。屏蔽线的金属外皮应牢靠接地，防止干扰信号，产生误动作。高压硅整流器有户外式和户内式两种。户外式装在除尘器顶部，整流器为侧出头，

通过隔离开关、穿墙套管用硬母线与放电极悬吊管联接。硬母线最好用大于 $\Phi 10\text{mm}$ 的铜管，铜棒或 $\Phi 12.7\text{mm}$ 镀锌钢管。目的是为了防止自身产生电晕放电。

户内式安装在操作室内，高压输出端经阻尼电阻、导线、高压隔离开关、高压电缆线引至电除尘器进线箱内的电缆终端盒。高压电缆端头应封装。每台整流器之间及与人行道之间均应用铁丝网隔开。与四周应有 1m 以上的距离。



- 1、油标；2、高压瓷瓶；3、油枕；4、低压瓷瓶；5、箱体；
6、接地螺丝；7、放油线；8、干燥器；9、加油口；10、温度计

图4.2 高压硅整流器外形^[13]

(1) 电压

小型湿式电除尘器工作电压为异极间距乘以平均场强，工作场强一般为 3000～3500V/cm，空载场强一般为 4000V/cm。

$$\text{工作电压 } U=(3000\sim 3500)\times 16=48\sim 56(\text{kV}) \quad (4-1)$$

$$\text{空载电压 } U=4000\times 16=64\text{kV}$$

(2) 电流

选取板电流密度为 0.40mA/m^2 ，选用一台整流器，故整流器对应的极板面积为 $A=180\text{m}^2$ ，故整流设备应输出的电流为

$$I=0.4\times 180=72(\text{mA})$$

根据计算求得的电压和电流值，在高压供电装置的定型产品样本中选与计值接近的装置，所以可以选用 GCAJ02-0.1/72 型的自动控制高压硅整流器，外型尺寸如表 4-1。

表4-1 高压硅整流器

型号	长(mm)	宽(mm)	高(mm)	重量(kg)
GCAJ02-0.1/72	600	980	1400	800

4.1.2 保护

对电除尘器本体、变压器和控制柜等的接地保护要求：由于高压硅整流器的正极是接地的，负高压接到电除尘器的阴极系统，为了保证人身安全和电除尘器的可靠运行，电除尘器本体：整流变压器和控制柜等的接地要认真做好。

一般在电除尘器本体顶部设一圈接地母线(扁钢)保温箱和人孔门等接地用扁钢与接地母线焊接。另在电除尘器本体和整流室的下部设一圈接地母线，再使人孔门壳体与此接地母线焊接，则上下接地母线通过金属壳体连成通路。再用接地母线与电除尘器本体和整流室周围装设的接地网络相连接，电除尘器的接地网要单独设置，其电阻越小越好，一般不得大于 1Ω ，电除尘器壳体要与接地网可靠连接，接地点要求每电场设一个，用扁钢与接地网相连接，整流室内所有金属部分如控制柜、变压器和电抗器及其外壳体的接地端、电缆头支架、金属隔离网，都必须十分可靠接地。

4.1.3 供电系统材料

高压部分： 母线采用直径大于 10mm 的圆钢管，以免高电压引起电晕放电；

通常高压供电设备采用电缆与电缆终端盒连接，施工方便；采用 ZA-35Y 型支持绝缘瓷瓶(实践表明，适用于电除尘器)。

低压部分：一般选用 VLV-500 型电缆。沿操作平台下或楼板下铺设，要求与电除尘器表面之间有适当距离或采取隔热措施，距离高压电缆须大于 300mm。

4.2 喷淋系统的设计选型

该系统由水泵、水箱、管网、电磁阀、手动阀以及喷嘴组成，分电晕极间断喷水与集尘板连续喷水两个独立的喷水单元，喷水的流量、周期均由计算机或手动控制。

4.2.1 电晕极间断喷水

在电场电晕极的上部装设有冲洗喷嘴进行冲洗喷水，电晕极喷水采用间断喷水，喷嘴以固定的方式、固定的角度将水喷射到电晕线上依靠水流自身重力向下流动，以此来带动沉积在电晕线上的粉尘、将粉尘冲下，收集在除尘器下部的集水槽内(如图 4.3)。

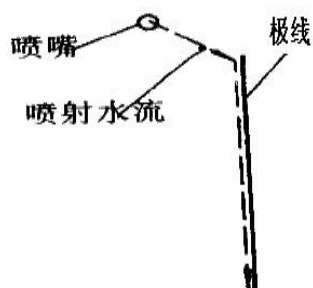


图4.3 间断喷水^[20]

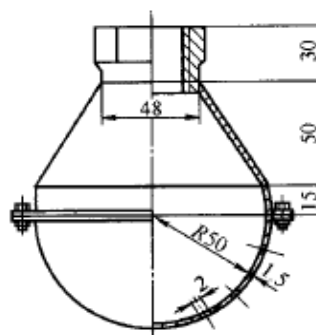


图4.4 喷洒型喷头

设计选用喷洒型喷头，其外壳钻很多小孔，或直接用管子压扁，靠水压从小孔中喷射出来。(如图4.4)

喷水工作压力0.3~0.5MPa(可调)，间断喷水量为0.6t/h。间断喷水1h一次，每次喷水2~5min。当间断喷水时，由PLC发出指令，高压控制柜应能自动对电除尘器的供电实行降低电压，当停止间断喷水后，PLC发出指令，高压控制柜应能自动

恢复电除尘器的正常供电电压。当除尘器切断煤气和电源后，给水可以自动切断。给水系统应满足压力要求，并有调压、稳压等功能。当清灰系统停水时，高压控制柜能自动切断向电除尘器的供电。

4.2.2 集尘极连续喷淋管道设计

连续喷水设计采用自动喷洒给水管道(图4.5)，管道设计遵照GB50084-2001《自动喷洒系统设计规范》相关规定。

除尘器连续喷淋管道分为两个独立单元，每个单元上有一根主管，4根支管与一个环形支管(参见图4.5)，主管设有3个小型喷嘴，4根支管上每个各4个小型喷嘴设计管径选DN=100采用 管箍式连接或法兰连接，自动喷洒给水管采用内外壁热镀锌钢管。连续喷淋喷水水量为25t/h，喷水工作压力0.3~0.5MPa(可调)。

所以总的喷水量=间断喷水量+连续喷淋喷水水量=0.6t/h+20t/h=20.6t/h

图4.5 连续喷淋管道图

4.2.3 喷淋产生的污水处理

湿式除尘器产生的污水和泥浆应当加以处理，避免造成水的二次污染，，同时尽可能使污水循环使用或处理后再利用，以节约用水。湿式电除尘器原来用的是工业水，悬浮物含量平均在80 mg/L，从电除尘器中排出的污水经N型水封自流至排水沟，汇合后流入污水池，然后由污水泵送至絮凝池。污水进入絮凝池前，在静态管道混合器内与由加药泵送出的除污药剂充分混合反应之后流入絮凝池中心混合区，使污水与药剂进一步充分混合反应。污水中悬浮物经药剂的絮凝作用形成絮状沉淀物，沉降在絮凝池下部的集泥斗中，积存到一定量的时候就由污浆泵排出。得到净化的水经溢流堰出水管自流至普通快滤池，自流至普通快滤池中的水经过水槽稳流分布，均匀流经过滤层，悬浮物被截流在过滤层的上面，经过滤后，水中悬浮物一般不超过20 mg/L，污水得到进一步净化后自流至清水池。这些清水由水泵送出，到达电除尘器的各个喷头^[22]。

4.3 水泵与风机的选型

4.3.1 水泵的选型

湿式除尘器耗水量为20.6t/h，除尘器单体高度约为17m，查机械工程给排水手册确定选择IS80-65-125单级离心清水泵作为本湿式电除尘器的供水装置(具体参数见表4-2)。

表4-2 单级离心清水泵参数

型号	理论流量 Q_{th} (m^3/h)	扬程 H (m)	转速 n (r/min)	电动机功率 (kW)	重量 (kg)
IS80-65-125	50	20	2900	5.5	42.5

4.3.2 风机的选型

设计进气流量 $8000m^3/h=133.33 m^3/min \approx 134 m^3/min$ ，查机械工程给排水手册确定选择RF-95型罗茨鼓风机作为本湿式电除尘器输送气体装置(具体参数见表4-3)。

表4-3 罗茨鼓风机参数

型号	理论流量 Q_{th} (m^3/min)	转速 n (r/min)
RF-95	134	2900

4.4 小型湿式电除尘器的保温和防腐

4.4.1 小型湿式电除尘器的保温

为了使通过小型湿式电除尘器含尘烟气的温度不至于大幅下降和腐蚀设备，必须在壳体外表设保温层，选用石棉作为保温材料。电除尘器保温层安装十分重要，它除了关系到收尘器性能的好坏外，很大程度上影响收尘器构件的应力。壳体保温可以在一定程度上防止了烟气的结露，避免设备腐蚀。延长电除尘器使用寿命，降

低设备的维护费用，所以必须认真做好保温层的施工。

在收尘器壳体安装完毕后，必须先进行漏风试验，待试验检验合格后，才能进行保温层的安装施工。

铺设保温层前，应将壳体外表面的铁锈及尘土清除干净，然后将保温层固定螺栓按图纸规定的间距焊于壳体上，再涂上一层防锈漆。

根据保温层设计图纸核实保温材料和辅助材料的种类和数量。

保温层材料容易吸收潮气，应采取措施防止其受雨水浇淋。搬运到施工现场的保温材料，其数量不应超过一天作业的需用量。

保温材料的拼接部分，不应存在间隙，以免影响保温效果，如有间隙，则应用同样的材料充填。

设备的防腐主要采用防腐涂料和防腐材料，特殊情况下，可采用橡胶衬里或铸石衬里。选用防腐蚀方法时，应考虑到材料来源，现场加工条件及施工能力，经技术经济比较后确定。

4.4.2 小型湿式电除尘器的防腐

常用的防腐涂料有各色原漆、红丹酚醛防锈漆、沥青防腐漆、各色过氯乙烯防腐漆、各色聚氨酯环氧防腐漆等。涂料保护分为内防腐和外防腐两种，内防腐为设备内壁用的涂料，用以隔离设备腐蚀介质的腐蚀；外防腐为设备外壁用的涂料，以隔离扩散至大气中的腐蚀介质或防止大气腐蚀，既起到防腐蚀作用，又起到装饰作用，使用的目的不同，选用时对涂料的要求各不相同，但应符合以下要求：

(1) 涂料应有良好的耐腐蚀性，必须根据接触介质的具体情况选择涂料品种，所选用的涂料对接触的介质必须有较高的耐腐蚀程度。

(2) 涂层应密实无孔，并且有良好的物理机械强度。一般采取增加涂层次或改性的方法使涂层密实无孔。如过氯乙烯涂料，在设备内部涂敷时，多采用 8 层以上，以减少孔隙。涂层应具有良好的韧性和抗冲击性能，以防涂层在使用过程中受外力冲击而过早破坏。

(3) 涂层应有良好的附着力，附着力是确保设备、管道使用寿命的重要因素。有些涂料虽然具有良好的耐腐蚀性能，但与金属的附着力很差(如呋喃类涂料)，因而限制了应用范围。又如乙烯类涂料与金属表面的附着力不良，故使用时，必须与指定的底漆配套，才能起到较好的防腐效果。

(4) 应具有良好的耐热性，选择的涂料品种应能满足使用温度的要求。

(5) 涂料施工方法必须切实可行。被涂的金属材料、应用范围、所处环境以及施工方法的不同，均能影响油漆工程质量，造成经济上、时间上的损失，故必须按照指定的施工方法进行施工。

(6) 对设备外壁的防腐涂料还必须符合以下要求：涂层应具有防腐、防潮、防工业大气的腐蚀性能，应能耐紫外线日照等物理因素作用。涂层应具有一定色泽，除起防腐作用外，还应具有装饰、标志作用。根据作用的地点和要求，选择一定颜色的防腐蚀涂料。涂层应能在室温下固化。

4.5 仪器仪表

本电除尘系统配套用仪器仪表，包括除尘系统仪器仪表和料仓料位检测系统两部分内容，前一部分仪器仪表置于本除尘系统控制室内的 1 台仪表柜中，后一部分设备安装在料位计控制室内。

(1) 电除尘器顶部保温箱温度检测：电除尘器顶部 6 个保温箱，其中两个反馈保温箱各设一个温度检测点，共 2 个测点，由 Pt100 铂热电阻进行温度检测，每个测点的温度由控制室内仪表上的数显温控仪进行显示，并通过温控仪对相应电加热端进行控制，保证保温箱内温度高于露点温度。

(2) 除尘系统气体流量、压力、温度检测：电除尘器进口管道上设流量计一台，压力计一台，对除尘系统气体流量、压力、温度进行检测，其检测结果在控制室仪表柜上显示。

(3) 风机电机参数检测

① 风机轴承温度检测：设两个风机轴承测温点，对风机轴承温度进行检测，其温度在控制室显示，超温时报警。

② 电机温度检测：根据电机形式，设若干电机温度测点，对电机温度进行检测，其温度在控制室显示，超温时报警。

(4) 风机调节阀控制和阀门开度：风机前设调节阀一台，控制室内及现场两地操作。并在控制室内仪表柜上设阀门开启度指示。

(5) 料仓料位检测系统：所有料位信号在仓上值班室内模拟盘上显示，低料位报警，高料位设信号灯闪烁及报警。料位信号处理及仓存量估算在仪表柜内中央处理器上进行。

4.6 小型湿式电除尘器的安装、调试、使用及维护

4.6.1 安装

一台电除尘器的零部件数量多达数千件，大型电除尘器的梁、柱、框架常是一些重数吨、长十多米的大型构件，因此，在除尘器安装前对零部件的堆放需有合理的安排，并应注意下列几点：

- (1) 安装位置附近应考虑安装起重设备以及吊运过程的运行轨迹的位置；
- (2) 零部件的堆放要尽可能考虑安装顺序；
- (3) 型构件(梁、柱、框架等)堆放时应注意构件的刚度，尽量使自重的用力方向与刚度较大的方向一致，防止构件的变形；
- (5) 收尘极板、电晕线等重要构件应储放在包装箱内，并应设防雨棚；
- (6) 高压电源设备、电气设备、电气元件、电机、电瓷轴、绝缘套管、电加热器等，可装在集装箱内或放在工地的仓库内。

电除尘器的安装很多情况下是属高中空作业，因此特别注意工人的人身安全，安装现场应设置安全网，系安全罩、安全带、安全帽，并进行安全知识教育。整个安装过程设有安装计划进度表。

4.6.2 调试

电除尘器的调试是在电源和本体安装后进行的，目的是为了在冷态下检查各部件的安装质量并进行适当的调整，其调试内容包括下面几项：

- (1) 气体分布装置；
- (2) 启动冲洗装置，检查装置是否正常；
- (3) 接通保温箱内的电加热器，检查升温速度及温度控制范围是否满足设计要求。然后适当的调节恒温控制器；
- (4) 启动电除尘器下部的排灰阀装置和锁风装置，使其运转 4h，检查运转是否正常，电机是否发热；
- (5) 测定漏风率；
- (6) 接通高压硅整流器，向电场供电。

4.6.3 使用

电收尘器开车前, 必须进行检查, 检查内容与试运转相同, 重新关好各个检修门, 使阳极和阴极之间开路。

(1) 开车按下列顺序进行:

①向电加热器送电 1 小时之后, 才能向电场送电;

②合上高压电源开关及自动调压旋钮, 使电压缓慢上升;

③打开烟道闸阀(先不要一次全部打开), 使烟气通入电场;

④注意各电场的电压, 电流是否在正常范围内, 后面电场的电压一般应高于前面电场的电压。

⑤调整火花频率, 直至获得满意的收尘效率为止。在使用过程中, 当风机闸阀已经全部打开时, 如须打开检修门观察电火花或电场内部的其他情况时, 要特别注意人身安全, 不要被高负压的气流把人吸入电场。为此, 在打开检修门之前, 须把风机闸阀关小些, 减小风机的风量, 或者将所有检修门全部打开, 人方可靠近检修门进行观察。

(2) 停车按下列顺序进行:

①切断烟道烟气;

②静待 3-5 分钟后, 再切高压电流;

③关停冲洗装置;

④火花频率控制装置复位并“0”;

⑤观察电流表、电压表是否已经恢复至零位;

⑥使阳极与阴极短路。

4.6.4 维护

(1) 高压硅整流器的维护

①每一个月对控制柜和整流器进行一次清扫和擦拭, 保持控制柜内部和整流器套管的清洁, 一年后干燥剂应进行复原或更换处理;

②每年进行一次变压器油的试验, 击穿电压平均值应大于 35kV/2.5mm;

③每年测量一次接地电阻, 其值不应大于 1 Ω 。

(2) 电除尘器本体的维护

①每周对保温箱内进行一次清扫, 并检查绝缘套管和管状加热器是否损坏;

②每周应检查一次各冲洗装置；

③若除尘器工作 3 个月以上，则应利用工艺生产停车机会对电除尘器内部构件进行检查和维护；

④每周检查一次排灰装置的运行情况，并及时维护；

⑤每两个月对电缆头、低压控制柜、支座瓷瓶进行一次清扫；

⑥每半年检查一次保温层，如果破损，及时修理，并监测壳体内外壁的温度值；

⑦每年测定一次除尘器进山口的烟气量、含尘浓度和压损，从而分析除尘器性能的变化。

(3) 电气部分的维护；

①高压控制柜和高压发生器不允许开路运行；

②及时清扫所有绝缘件上的积灰和控制柜内部积灰，检查接触器开关、继电器线圈、触头的动作是否可靠，保持设备的清洁干燥；

③每年测量一次，高压发生器和控制柜的接地电阻 $<2\ \Omega$ ；

④每年更换一次高压发生器的干燥剂；

⑤每年一次进行变压器耐压试验，其击穿电压不低于交流有效值。

4.7 工业卫生与安全消防

本除尘系统整体设计执行国家《工业企业设计卫生标准》、《冶金企业安全卫生设计规定》、《建筑设计防火规范》、《消防条件》等相关法规，各专业设计中均要考虑设备安全防护、人员安全与健康、消防等多种综合技术设施，确保项目投运后，能提供一个良好的劳动条件，保障安全生产、人员健康，同时亦能在发生突发事件时，人员疏散、消防灭火等行为。

4.7.1 工业卫生

各尘源点设密闭罩，控制物料经皮带转运过程中的粉尘飞扬，主要操作岗位粉尘浓度控制在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。含尘气体采用电除尘器、布袋除尘器设备净化后排入大气，两种除尘器均为高效除尘器，排放浓度小于 $100\text{mg}/\text{m}^3$ (保质期内 $\leq 50\text{mg}/\text{m}^3$)，系统建成后将使厂区和岗位环境得到显著的改善(浓度为标准状态下)。

4.7.2 安全技术措施

(1) 总平面布置

工程中所涉及的建筑物、设备的布置充分考虑安全距离、事故疏散、消防灭火等要求，道路畅通，满足厂区车辆通行。

(2) 工作场所

① 操作室设有冬季采暖和夏季空调设施。为方便操作室与厂内调度室的联系及出现事故的处理，控制室内设有厂内调度电话和办公用电话两台。

② 经常操作维修的部位，如除尘器、风机、阀门、测孔等部位设有梯子、平台、走道等安全措施，防护栏杆高于地面 1.05m。设备的布置中考虑了安全检修距离和空间。

③ 电除尘器、风机、大型电机等设备上部设有防雨棚和起吊装置，便于设备的安装与检修。

④ 风机、电机等运转设备的暴露部位设有防护罩。

(3) 电气安全

① 高压设备，转动设备等要害部位设有防护围栏和警告牌，并设有安全连锁开关。

② 所有电气设备均可靠接地，并设有灭火器。烟囱电除尘器均有避雷针。接地电阻小于 2Ω 。

③ 高低压控制柜的布置均有足够的安全距离和检修空间。

④ 设计中采用 380V/24V 安全照明变压器一台，提供 24V 安全电源供设备内检修照明使用。除尘器上设有安全照明灯若干，供夜间检查。

4.7.3 消防灭火安全

(1) 总图布置考虑消防灭火的规范要求，道路畅通，消防车可开到除尘器周边附近，消防范围可覆盖整个除尘器。

(2) 配电室、变压器室、操作室等均设有灭火器。

(3) 建筑物耐火等级为二级。

(4) 烟囱和除尘器上均设有防雷设施。

第五章 小型湿式电除尘器系统的投资概算和运行管理

5.1 收费依据

本工程取费依据按北京市建设厅2000年修订的《全国统一安装工程预算定额》、《北京市市政工程预算定额》、《北京市建筑装饰工程预算定额》等一系列现行预算定额编制。其中各主要材料市场价部分按《北京市建筑安装工程材料差价调整办法》为依据计算。工艺设备及通用设备价格根据制造厂近期报价、订货价及其他类似工程的设备价格资料进行计算，设备运杂费按设备原价的8%计。

5.2 工程概算^[24]

5.2.1 主体部分

(1)材料费

一台湿式电除尘器主体包括筒体、阴阳极板(线)、进出水管

①筒体

筒体壁厚0.6cm，半径150cm，由三部分组成上下为锥形，中间部分为圆柱型，圆柱高1050cm，上圆锥高130cm，下圆锥高210cm。

根据《压力容器与化工设备使用手册》，碳素钢钢板和低合金钢钢板的基本重量(实际就是钢的密度)一律按照 7.85g/cm^3 计算。

圆柱部分质量 m_1

$$m_1 = (150.6^2 - 150^2) \times \pi \times 1050 \times 7.85 \times 10^{-3} = 4670.3\text{kg}$$

上圆锥部分质量 m_2

$$m_2 = \frac{1}{3} \times \pi \times (150.6^2 - 150^2) \times 130 \times 7.85 \times 10^{-3} = 192.7\text{kg}$$

下圆锥部分质量 m_3

$$m_3 = \frac{1}{3} \times \pi \times (150.6^2 - 150^2) \times 210 \times 7.85 \times 10^{-3} = 311.4 \text{ kg}$$

筒体总质量为：

$$m_1 + m_2 + m_3 = 4670.3 + 192.7 + 311.4 = 5174.4 \text{ kg}$$

按厚度6mm的低合金16MnR钢的市场价格在8000元/吨经济核算。

整个筒体价格为

$$5174.4 \times 10^{-3} \times 8000 = 41395.2 \text{ 元} \approx 4.2 \text{ 万元}$$

②集尘极价格

本设备集尘极由43根长450cm的六边形管构成六边形每边长18.8cm，厚0.25cm，由本论文图2.4 集尘极剖面图可看出集尘极可以看做由156块长450cm、宽18.8cm、厚0.25cm的矩形集尘板组成，按照标准奥氏体不锈钢(12Cr17Ni7)密度取7.98g / cm³进行计算

$$\text{集尘板总质量} = 450 \times 18.8 \times 0.25 \times 7.98 \times 10^{-3} = 16.9 \text{ kg}$$

市场调研不锈钢参考价格为3万元/吨

$$\text{集尘极价格为} 16.9 \times 10^{-3} \times 300000 = 5070 \text{ 元}$$

③电晕线价格

电晕线单根长约6m，共60根(含备用)，电晕线总长=6×60=360m

市场调研参考价格为15.00元/米

$$\text{电晕线价格为} 360 \times 15 = 5400 \text{ 元}$$

④进水管价格

表 5-1 各管道估算长度

管道名称	单根长(m)	数量	总长(m)
连续喷淋进水管	13.2	4	52.8
间断喷淋进水管	14.2	2	28.4
供水总管	6	1	6
总计(m)		87.2	

按照管道价格取100元/米，进水管总价为

$$87.2 \times 100 = 8720 \text{元}$$

材料总价为

$$42000 + 5070 + 5400 + 8720 = 61190 \text{元}$$

(2)设备总价

设备总价包括材料总价、制作费用、利润。

设备制作费用(包括组装、焊接、防腐涂层、绝缘涂层等)按照材料费的1.5倍来计算

$$1.5 \times 61190 = 91785 \text{元}$$

利润取60000元

所以设备总价为

$$61190 + 91785 + 60000 = 212975 \text{元} \approx 22 \text{万元}$$

5.2.2 附件费用

小型湿式电除尘器附件费用见表5-2

表5-2 小型湿式电除尘器附件费用

名称	单价	数量	总价
绝缘子	120 元/个	20	2400 元
单级离心清水泵	7000 元/个	2 台	1.4 万元
RF-95 罗茨鼓风机	1 万元/个	2 台	2 万元
高压硅整流器	10 万元/个	1 台	10 万元
合计		13.64 万元	

5.2.2 其它项目概算

(1)包装运输费：2万元

(2)湿式电除尘器施工安装费：设备施工安装费用包括电收尘器保温材料、保温施工设备总价格的15%计：一套电收尘器安装费为用3万元。

5.2.3 总的投资费用

工程费用总概算见表5-3 所示。

表5-3 工程费用总概算

序号	分项名称	总价/元
1	电除尘器主体部分	220000
2	包装运输费	20000
3	施工安装费	30000
4	附件费用	136400
合计(元)		406400

5.3 年运行费用

(1)水电费

按工业电费0.8元/度，水费2.5元/吨来计算，水电费14000元/年。

(2)劳动定员

为保证各除尘设备如电除尘器、风机等设备的正常运行，需配备相应的操作、维修人员对除尘系统进行管理。本设计按除尘设备在正常操作、维修的人员进行编制，设备大修人员由厂内设备检修工段统一考虑。

本设计电除尘器系统定员2人两班制，每人工资1500元/月。

人员总工资=2×1500×12=36000元

所以年运行费用为14000+36000=50000元

第六章 结论与展望

6.1 结论

本次设计的是一种小型湿式电除尘器，以传统的电除尘技术为理论基础，同时复合湿式喷淋的技术。解决了传统干式电除尘器体积庞大、占地广，一次性投资及维修保养费用高，而且维修不便，也不适用于局部的除尘，并且由于振打清灰使其安全性稳定性较差等问题。从实际推广的角度把小型湿式电除尘器效果和运行成本作了较好的平衡，使小型湿式电除尘器性价比得到提高，按照燃煤锅炉烟气除尘需求，作出相应的设计，在实际推广上有一定的意义。

6.2 展望

目前我国正处在经济飞速发展的时代，随着人们物质生活的不断提高，对环境的破坏也日益严重，我国人民的环保意识较发达国家还有相当大的差距。环境保护类产品的向着更经济型，推广型的道路上发展是我国 21 世纪环境保护行业发展的趋势。

目前湿式电除尘器的应用还是工厂与燃煤电厂居多，将来可以把湿式电除尘器设计的体积更小、造价更低，适于中小型工厂与环境实验室使用，这样对烟气除尘的范围将大大增加，对环境保护的意义更为重大。同时研究喷淋后污水的成分，争取把污水进行回收再利用做得更好，减少对环境的二次污染。

参 考 文 献

- [1] 黄秀生.电除尘器技术发展现状及新技术简介[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2006, 6(12): 3~5
- [2] H.Fujishima, Y.Tsuchiya. 湿式电除尘器在电站燃煤锅炉上的应用[M](田牛).第五届国际电除尘学术会议论文集.1995. 49~53
- [3] 程福林.静电除尘器的安全使用及事故处理[J].煤气与热力, 2002 (4):331~332
- [4] 李桂中. 电力建设与环境保护[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000: 13~24
- [5] 尚绪永.静电除尘器用于水煤气净化时应注意的几个问题[J].煤气与热力, 1998(2):21~23
- [6] 祁君田. 燃煤电厂现役电除尘器存在的主要问题及对策[J]. 热力发电, 2003, 1(11): 13~17
- [7] 黄丽霞.296m²电除尘器的结构设计及改进[D]:[硕士学位论文].重庆:重庆大学, 2003
- [8] 金国森. 化工设备设计全书—除尘设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 181~271
- [9] 泊头市鹏鹤环保机械有限公司.<http://www.btpenghe.com/product-jingdian29.htm>
- [10] Seth Forster.Inactivation of Bacterial Aerosols Using an X-ray Enhanced Electrostatic Precipitator, 2003: 7~14
- [11] 化工部热工设计技术中心站. 热能工程设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 197~259
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JB/T 5913—2007. 电除尘器 阴极线[S]. 机械工业出版社: 李玉成、杨绵寿、朱华富, 等, 2007-09-01
- [13] 何银虎.最新除尘设备安装、运行调试、故障处理与检修维护及应用选型综合技术手册[M]ISBN7-900395-47-6/D.8.吉林电子出版社, 2005.713-893
- [14] 陈家庆. 环保设备原理与设计[M]. ISBN 7-80164-881-1.北京: 中国石化出版社, 2005.483~494
- [15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JB/T 5906—2007. 电除尘器 阳极线[S]. 机械工业出版社: 朱华富、王凤根、林杏根、徐小峰, 等, 2007-09-01
- [16] 国家环境保护总局国家质量监督检验检疫总局.GB 13223—2003. 火电厂大气污染物排放标准[S]. 中国标准出版社:中国环境科学研究院、国电环境保护研究所, 2003
- [17] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JB/T 6746.2—1993. 电除尘器用瓷绝缘子[S]. 机械工业出版社: 中华人民共和国机械工业部, 1993
- [18] 国家环境保护总局国家质量监督检验检疫总局. GB 8287.1—1998. 高压支柱瓷绝缘子[S].

中国标准出版社:中国环境科学研究院、国电环境保护研究所, 1999

[19] 国家质量技术监督局. GB 150-1998. 钢制压力容器[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998

[20] 马燕兵. 某热电厂静电除尘器的结构设计[D].北京石油化工学院, 2005

[21] 王海昌, 周新宇. 屋顶电除尘器湿式清灰探讨[D]. 冶金工业部建筑研究总院环保所,1999

[22] 姚力, 苗俊岭, 吴广元. 污水处理技术在湿式电除尘器上的设计与应用[J]. 冶金动力.2007,3:16~18

[23] Babcock & Wilcox. Wet Electrostatic Precipitators for Industrial Applications [J], EPultra F, 2003(3): 101~112

[24] 周兴求.环保设备设计手册—大气污染控制设备[M].北京: 化学工业出版社, 2004.45~50