

GONGYE DAQI WURAN
FANGZHI JISHU JI YINGYONG

工业大气污染 防治技术及应用

上海市环境保护工业行业协会 编著

上海科学技术出版社

工业大气污染防治技术及应用

上海市环境保护工业行业协会 编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

工业大气污染防治技术及应用 / 上海市环境保护工业行业协会编著. —上海:上海科学技术出版社,
2016. 11

ISBN 978-7-5478-3158-8

I. ①工… II. ①上… III. ①工业污染防治 ②空气污染控制 IV. ①X322 ②X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 158274 号

工业大气污染防治技术及应用

上海市环境保护工业行业协会 编著

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行

200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 10.5

字数 180 千字

2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-3158-8/X·38

定价: 40.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书由上海市环境保护工业行业协会组织工业大气污染防治方面的有关专家学者撰写,以求真、先进、简明、实用作为撰写原则,全面总结近 10 多年来我国在工业大气污染防治领域所取得的技术成就和工程应用。全书分除尘技术及应用、脱硫技术及应用、脱硝技术及应用、有机废气治理技术及应用、多污染物协同治理技术及应用五个章节,分别撰述其基本原理、特点与分类,着重于技术发展和工程应用,并提供一线的应用实例,契合我国雾霾防治和绿色发展的需要。

本书的主要读者是环境污染治理的相关行政管理部门的管理人员、生产企业的技术人员,以及高等院校环境科学和工程专业的师生。

强环保意识
推绿色产业

贺《工业大气污染防治技术及应用》出版

蒋以任

二〇一六年十一月

本书编委会

主 编：陶 晖

副主编：李 磊 高继贤

策 划：汤东升

编 委：吴皓琛 赵婷婷 陶 岚

周树鹃 陈百会 蒋 静

顾 问：赵国通 黄斌香

主编单位：上海市环境保护工业行业协会

参编单位：福建龙净环保股份有限公司

上海市机电设计研究院有限公司

宝钢工程技术有限公司

欣闻《工业大气污染防治技术及应用》付梓出版,谨致以诚挚祝贺。

当今世界,气候变化问题是全人类面临的共同挑战,攸关人类未来。应对气候变化,有效控制大气温室气体浓度上升,减少大气污染,引领绿色发展,是人类共同的事业。改革开放以来,在党中央的领导下,我国大力推进生态文明建设,推动绿色环保低碳发展。党的十八届五中全会决定把生态文明建设作为“十三五”规划的重要内容,提出实施创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,通过科技创新和体制机制创新、实现优化产品结构、构建低碳能源体系、发展绿色建筑和低碳交通、建立全国碳排放交易市场等一系列政策措施,形成人与自然和谐发展现代化建设新格局。

近10年来,上海为加快防治工业大气污染,注重以清洁生产为核心,以低碳节能为重点,以高效污染防治技术为支撑,实施总量控制,淘汰落后产能,推进结构调整,优化生产布局;注重源头消减,过程控制,提高资源和能源利用率,发展循环经济;注重鼓励脱硫、脱硝、除尘技术的研发与应用;注重调整能源结构,推广使用清洁能源,减少污染排放总量和排放强度,减少大气污染。近些年来,上海的空气质量有所好转,空气中可吸入颗粒物、二氧化硫、氮氧化物的含量开始下降。然而,从结构和来源看,上海的空气污染仍主要表现为细颗粒物、灰霾和酸雨等三个典型特征。上海废气排放总量呈上升趋势,其中工业废气排放量占废气排放总量的93.2%。空气中的二氧化硫63.2%来源于工业排放,二氧化硫引起的酸雨频率逐渐上升。空气中的氮氧化物66.7%来自汽车等流动源排放,33.3%来自电厂工业锅炉等固定源排放。因此,上海仍然面临着严峻的大气污染防治形势。

为认真贯彻落实国家和上海关于保护环境和加快生态文明建设的要求,进一步推动上海环境保护装备产业发展,推广环保治理技术和产品,促进工业结构优化升级,推进可持续发展,上海市环境保护工业行业协会受上海市经济和信息化委员会委托,对工业大气污染治理的技术和产品等方面开展调研,查阅国内外相关技术文献,编写了《工业大气污染防治技术及应用》。本书总结了上海近几年来治理工业大气污染的经验,汇集了大气治理技术和产品装备应用实例,内容包括除尘技术及其应用、脱硫技术及其应用、脱硝

技术及其应用、有机废气治理技术及其应用、多污染协同治理技术及其应用等。涉及的技术和产品面广且细,其有先进性、实用性和指导性的特色,可供政府主管部门、行业、企业及环保从业人士在工作中参考。

随着产业结构调整不断深化、生态文明建设不断推进,行业协会作为绿色低碳发展的参与者和促进者的作用将进一步显现。上海市环境保护工业行业协会编写《工业大气污染防治技术及应用》的实践告诉我们,在促进生态文明建设、实现绿色发展中,行业协会应当而且完全可以发挥自己的优势,与企业一起创新思维,积极有为,及时总结新经验,推广新技术,介绍新产品,以服务 and 协调推动环境保护工作和生态文明建设。

我热情地向广大读者推荐此书,并衷心希望在上海的企业中,出现更多、更好、更高水平的大气治理新技术、新产品。

是为序。

A handwritten signature in black ink, reading '俞国生' (Yu Guosheng). The characters are stylized and fluid, typical of a personal signature.

2016 年 10 月

目 录

Contents

第 1 章 除尘技术及其应用	001
1.1 概述	001
1.2 电除尘技术	002
1.3 袋式除尘技术	010
1.4 电袋复合除尘技术	021
第 2 章 脱硫技术及其应用	028
2.1 概述	028
2.2 湿法脱硫技术	029
2.3 半干法脱硫技术	051
2.4 干法脱硫技术	057
第 3 章 脱硝技术及其应用	060
3.1 概述	060
3.2 SCR 脱硝技术	061
3.3 SNCR 脱硝技术	065
3.4 SCR/SNCR 组合脱硝技术	068
3.5 低温催化脱硝技术	069
第 4 章 有机废气治理技术及其应用	071
4.1 概述	071
4.2 吸附技术	074
4.3 热力燃烧技术	087
4.4 催化燃烧技术	094
4.5 冷凝技术	100

4.6	吸收技术	100
4.7	生物处理技术	102
4.8	等离子技术	109
4.9	光催化氧化法	112
4.10	膜分离技术	116
4.11	行业实用处理技术	117
第5章	多污染物协同治理技术及应用	120
5.1	概述	120
5.2	燃煤锅炉烟气协同治理技术	120
5.3	工业炉窑烟气协同治理技术	130
5.4	废弃物焚烧烟气协同治理技术	136
缩略语表		140
图表索引		142
案例索引		147
参考文献		149
后记		153

除尘技术及其应用

1.1 概述

除尘器(收尘器)是将固液态颗粒物从气溶胶中分离的设备,广泛用于物料回收和废气净化。除尘技术是专门研究除尘器及其应用的一门学问。按除尘机理不同分为机械除尘、静电除尘、袋式除尘、湿式除尘等四大类。机械类除尘器是分别利用重力、惯性力、离心力分离原理开发的沉降室、惯性除尘器、旋风除尘器的统称。

工业除尘器已有 100 多年的发展历史,早期产品基本上都是机械类除尘器,主要用于物料回收。20 世纪中期,环境保护提上日程,除尘技术转向用于工业废气除尘净化,经历了从低效到高效、从湿法到干法的进化过程,近期为适应高效除尘、超低排放的要求,逐渐形成了以静电除尘、袋式除尘、高能文氏管湿式除尘为主,三足鼎立竞相发展的格局。三类除尘器的分级除尘效率如图 1-1 所示。

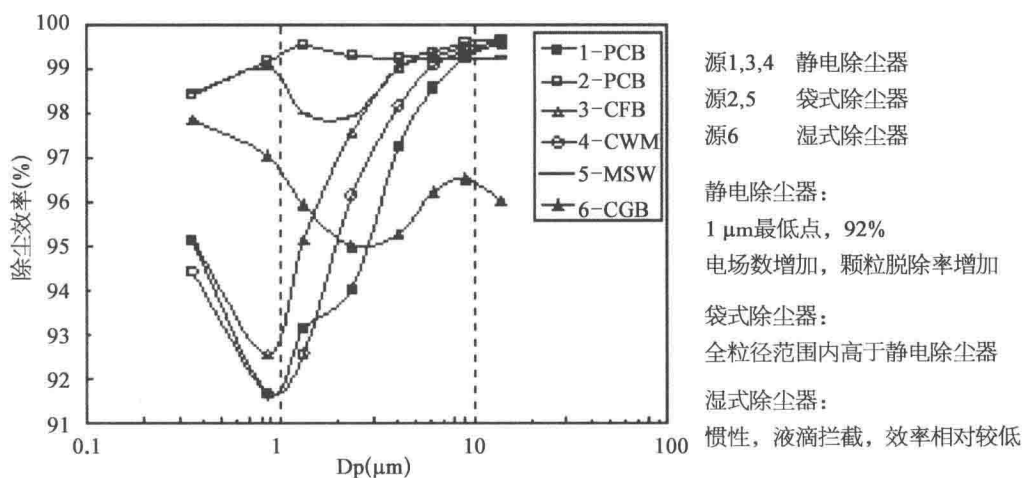


图 1-1 三类高效除尘器的分级效率对比

我国的除尘事业始于新中国成立后,以原苏联技术为版本,从机械除尘起步。改革

开放促使我国经济高速发展,也带来严重的环境污染,“节约资源、保护环境”成为我国基本国策。排放标准不断修订提高,除尘技术获得快速发展,开发了一大批性能优良的除尘新技术、新设备。尤其在近几年中,面对日益严重的“雾霾”天气,在节能减排、向“污染宣战”中发挥重要作用。

电除尘、袋式除尘、电袋复合除尘是当前应用中最为广泛的,因而本章重点进行介绍。

1.2 电除尘技术

1) 技术原理及特点

电除尘器(ESP)利用静电吸引的原理,含尘气体流经不均匀电场,尘粒或雾滴在电场力的驱动下被正负极捕集,而从气体中分离。电除尘器工作原理如图 1-2 所示。

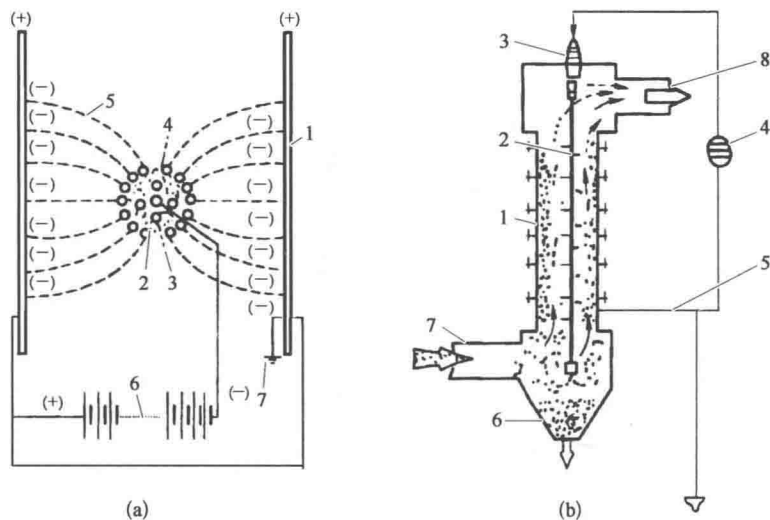


图 1-2 电除尘器工作原理

(a) 板式;(b) 管式

1—沉淀极;2—电晕线;3—绝缘杆;4—高压直流电源;5—接地线;6—灰斗;7—含尘气体进口;8—净气体出口

尘粒在电场内的驱进速度 ω_k 是决定电除尘器除尘效率 η 的重要参数,其影响因素及相关性见式(1-1)、式(1-2)。

$$\omega_k = \frac{qE_p}{3\pi\mu d} \tag{1-1}$$

式中 q ——尘粒荷电量(C);

E_p ——收尘极处电场强度(V/m);

μ ——气体粘滞系数(Pa · S)；
 d ——尘粒直径(m)。

$$\eta = \left[1 - \exp\left(-\omega_k \frac{A}{Q}\right) \right]^k \times 100\% \tag{1-2}$$

式中 Q ——处理烟气量(m³/s)；
 A ——收尘极板面积(m²)；
 ω_k ——有效驱进速度(m/s)；
 k ——经验常数(0.4~0.6)。

2) 结构型式及分类

电除尘器由电源设备、除尘室体(包括入口气流分布、电场、清灰装置)、输灰装置和控制系统组成,如图 1-3 所示。电除尘器有多种分类方式,按不同分类依据,可归纳为 11 种,详见表 1-1。

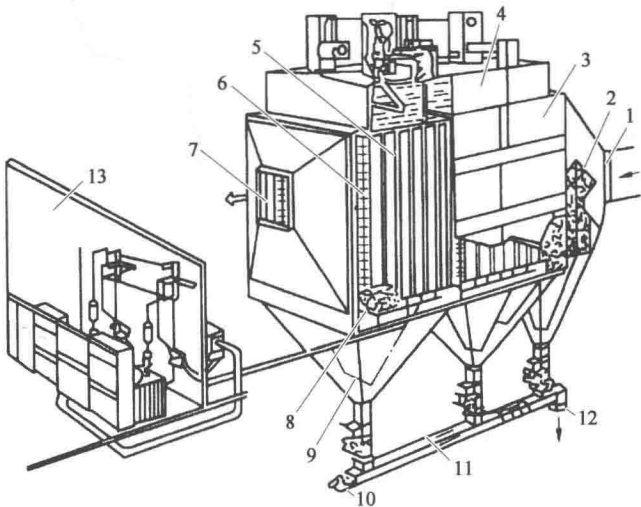


图 1-3 电除尘器基本结构型式

1—入口;2—气流分布板;3—外壳;4—保温箱;5—集尘板;6—电晕极;7—净气出口;8—振打装置;
9—灰斗;10—电动机;11—螺旋输送机;12—排尘口;13—高压供电装置

表 1-1 电除尘器的分类

序 号	分 类 依 据	基 本 型 式
1	按收尘极板型式	分为管式、板式和桅杆式
2	按收尘极板间距	分为常规型(300 mm)和宽间距型(≥ 400 mm)
3	按极板安装型式	分为竖装吊挂型和横装旋转型
4	按极板极线清灰方式	分为干式(振打、括刷清灰)和湿式(水雾、水流清灰)

(续表)

序 号	分 类 依 据	基 本 型 式
5	按电场串联数量	分为单室和多室(2~8 室)
6	按电晕区与除尘区布置	分为单区和多复双区(电晕区、除尘区前后分布)
7	按末电场清灰时是否关气断电	分为在线清灰、离线清灰(关断烟气)或离线断电清灰(关断烟气,停供电源)
8	按电源设备配置	分为交流或直流、高频或工频、脉冲或恒流
9	按气流走向	分为卧式(端进端出水平流)和立式(上进下出垂直流)
10	按电场室体形状	分为方箱体和圆筒体(LT 煤气除尘)
11	按入口烟气温度	分为高温型($\geq 130^{\circ}\text{C}$)、低温型(110°C)和低低温型(90°C)

3) 技术发展

世界上第一台电除尘器于 1885 年由英国 O. Lodge 在 Northwales 熔铅厂建造,用静电感应器作为高压电源,因电源选型不当而失败。1907 年美国 F. G. Cotrell 改用机械整流电源,在加州一个火药厂安装一台电除尘器捕集硫酸雾获得成功,开始工业应用。直至 20 世纪 40 年代出现硅整流电源,促使电除尘器在各工业领域推广应用。

20 世纪 60 年代我国在引进项目中成套引进电除尘设备,80 年代原机械工业部统一组织从瑞典引进 FLAKT 电除尘技术,第一台国产化样机在拱北电厂 300 MW 机组成功投运,揭开了电除尘技术在我国快速发展的序幕。经过 30 多年的努力,我国已成为世界公认的电除尘器生产和应用大国。近几年为满足不断修订提高的排放标准,适应《节能减排行动计划》的需求,我国研发成功多项电除尘新技术,大大提高电除尘技术水平,详见表 1-2。

表 1-2 我国电除尘技术发展

序 号	新技术名称	技术原理特点	功 效
1	烟气调质	注入 H_2O 、 SO_3 、 NO_3 等工质	调温、降比电阻、提效
2	低低温	设 MGGH,将烟气温度降到酸露点以下	减烟气量、降比电阻、提效节能、脱除 SO_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等
3	粉尘凝聚	在前置烟道内分列荷电,扰流凝聚	减少微尘排放、提高除尘效率
4	移动电极	在末电场改用旋转收尘极和清灰刷	有效清除积尘,防止产生反电晕和二次扬尘
5	多复双区	荷电区、收尘区分布,改进电配与极配	提高电除尘器对煤种适应性和运行稳定性,提高性价比

(续表)

序 号	新技术名称	技术原理特点	功 效
6	湿电技术	将 ESP 振打清灰改为水雾凝并水膜清灰,设在 WFGD 出口,末端控制	起末端收敛控制作用,根治微尘酸雾、石膏雨
7	高频电源等	将三相工频电源经整流、逆变、升压、再整流,形成 40 kHz 以上高频电流,具有恒直流和脉冲两种供电方式	提高场强和驱进速度,提高除尘效率,节能 50%以上

4) 工程应用

电除尘器在电力、冶金、建材、化工等工业领域具有广阔的应用市场。燃煤电厂锅炉烟气条件比较适宜电除尘,因此历来由电除尘器一统天下,近期尽管被袋除尘、电袋除尘分流一部分,但仍占有 70%左右的份额。水泥窑窑头窑尾烟气具有比电阻较高的特点,但在采取增湿塔增湿、换热器降温等调制措施后,选用电除尘器也可达标排放。冶金工厂烧结机机头烟气具有风压高、温度变化范围广、水分高的特点,适宜选用电除尘器。炼钢转炉烟气具有烟温高、尘粒细、浓度高、含 CO 气体、易燃易爆的特点,历来采用高能文氏管湿法除尘(OG 法),1981 年德国鲁奇—蒂森联合开发圆筒形电除尘器干法除尘技术(LT 法),宝钢二期工程 250 T 转炉首先引进这项技术和装置,现已成套国产化,并在我国 20 多家钢铁企业推广应用。

例 1-1 宁德电厂 4# 600 MW 机组电除尘提效改造

宁德电厂 4# 600 MW 机组原配设双列双室五电场电除尘器,设计除尘效率为 99.6%,2006 年投产。由于实际燃用煤种偏差,排烟温度偏高,除尘效率达不到规定要求,2011 年立项改造。

1) 设计条件及参数

- (1) 处理烟气量 312 200 m³/h。
- (2) 烟气温度 148℃。
- (3) 电场有效截面 2×428 m²。
- (4) 电场极配:阳极板 BE,阴极线不锈钢针刺。
- (5) 比集尘面积为 103 m²/(m³/s)。

2) 电除尘改造方案

采用低低温电除尘技术,在除尘器前垂直烟道和进口喇叭处分设烟气余热利用节能装置,同时换用高频电源,改进气流分布,整修极配,调整清灰制度,开发烟气调温与节能减排自适应控制系统。使除尘器的运行温度由 150℃下降到 95℃左右。改造模型实景如图 1-4 所示。

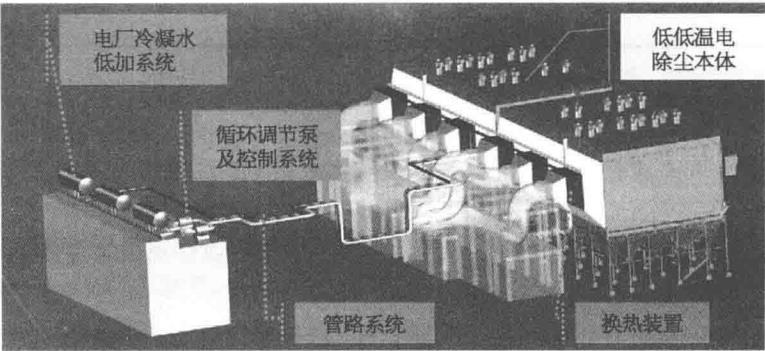


图 1-4 宁德电厂 4# 600 MW 机组电除尘提效改造模型

3) 性能参数

改造后低低温电除尘器的主要性能参数见表 1-3。

表 1-3 600 MW 机组低低温电除尘器的主要性能参数

分 项	单 位	原电除尘器	余热利用高效低低温电除尘器(改造后)
入口烟气流	m ³ /h	3 122 000	2 729 000
处理烟气温	℃	148(年均)	95
电场有效断面积	m ²	2×428	2×428
电除尘列数/室数/电场数	双列/双室/5 电场		
电场极配型式		阳极板为 BE 板,配置不锈钢针刺线	
极板有效高度	m	14.84	
总集成面积	m ²	89 325	
比集尘面积	m ² /(m ³ /s)	103	117.8
余热利用换热器总换热面积	m ²	—	36 616
保证出口含尘浓度	mg/m ³	60	30
机组供电标煤耗降低	g/(kW·h)	—	1.5

4) 治理效果

该改造项目于 2012 年 6 月完成施工安装,7 月底投运,取得预想效果。经广东电科院实测:降温幅度最大可达到 55℃ 以上,降温后的烟气温控制在 90~100℃,比电阻降至 10⁸~10¹⁰ Ω·cm;粉尘排放值从原 60 mg/Nm³ 下降到 20 mg/Nm³,SO₃ 脱除率达到 73.78%;Q235 钢材的低温腐蚀率为 0.053 7 mm/a;在 600 MW 负荷时,汽机的热耗下降 52 kJ/(kW·h) 以上。与扩容提效方案相比,不需要增加电场,技术经济性明显优越,是低低温电除尘技术在我国大型燃煤机组应用的突破。

例 1-2 宝钢炼铁 $3 \times 450 \text{ m}^2$ 烧结机机头除尘

1) 烟气条件及参数

- (1) 烟气温度：正常 $80 \sim 150^\circ\text{C}$ ，最高 $190 \sim 200^\circ\text{C}$ 。
- (2) 烟气含湿量： $8\% \sim 10\%$ 。
- (3) 含尘浓度：无底辅料 $2 \sim 4 \text{ g/Nm}^3$ ，有底辅料 $0.5 \sim 1 \text{ g/Nm}^3$ 。
- (4) 粒径分布： $\geq 50 \mu\text{m}$ 占 26% ； $50 \sim 10 \mu\text{m}$ 占 41% ； $\leq 10 \mu\text{m}$ 占 33% 。
- (5) 粉尘堆比重： $1.7 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ 。
- (6) 粉尘比电阻： $10^{10} \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

2) 除尘净化工艺

烧结机头的主排烟风机是烧结工艺的主体设备，主排烟气除尘不仅是环保要求，更是确保料层燃烧、保护主抽风机的工艺措施，讲究高效、稳定、可靠。烧结机头烟尘由大密闭罩捕集，具有烟气温度变化范围大、湿度高、粉尘磨琢性强、比电阻适中的特点，目前大多采用静电除尘。宝钢 1# 烧结机机头除尘引进日本宽间距超高压电除尘技术 (ESCS)，2#、3# 烧结机电除尘技术进行国产化，并实行多项技术改造，使电除尘器总体性能得到进一步提高，除尘工艺流程如图 1-5 所示。

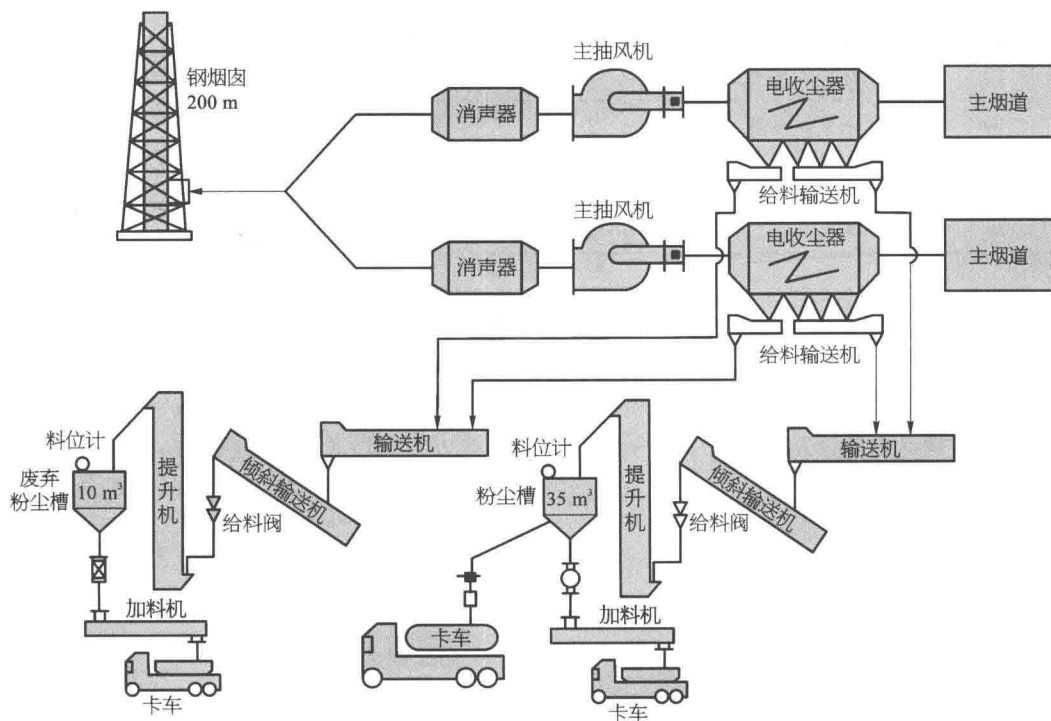


图 1-5 宝钢 $3 \times 450 \text{ m}^2$ 烧结机机头电除尘工艺流程

3) 性能参数

宝钢 $3 \times 450 \text{ m}^2$ 烧结机机头电除尘器主要性能参数及配置见表 1-4。