

发电厂除灰 控制技术

李培荣 李金伴 李捷辉 等编著



化学工业出版社

发电厂除灰控制技术

李培荣 李金伴 李捷辉 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂除灰控制技术/李培荣等编著. — 北京: 化学工业出版社, 2005.9
ISBN 7-5025-7693-2

I. 发… II. 李… III. 发电厂-除尘-控制-技术
IV. TM621.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 115050 号

发电厂除灰控制技术

李培荣 李金伴 李捷辉 等编著

责任编辑: 陈 丽 刘俊之

文字编辑: 宋 薇

责任校对: 周梦华

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 9¼ 字数 231 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7693-2

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

内 容 提 要

本书以火力发电厂低正压气力除灰控制系统为实例，系统地介绍了火力发电厂低正压气力除灰控制系统的技术基础、系统控制设备、设计选型控制方法以及 PLC 工作原理和故障诊断方法等内容。并详细介绍了粉煤灰基本的物化特性、技术基础和输送方法。

本书介绍管道中粉煤灰输送的控制新技术、新方法，适合于从事火力发电厂低正压气力除灰技术研究、开发的工程技术人员参考和现场运行与管理的工程技术人员参考，亦可供高等院校相关专业师生参考。

前 言

火力发电厂气力除灰输送技术在世界各国得到了迅速发展和应用。随着我国可持续发展战略的实施和环境保护、粉煤灰综合利用的发展,火力发电厂气力除灰技术的应用前景将会越来越好。在 20 世纪 20 年代,国外气力输送技术开始应用于火力发电厂,主要用于除尘器底部粉煤灰的输送,并以空气压缩机作为气源设备。到 20 世纪 50 年代中期,国内少数电厂也开始采用真空泵作动力源的负压气力输送系统。这种系统的缺点是出力较低,输送距离较短,设备磨损严重,蒸汽耗量大,系统运行的安全性和经济性均较差,一般仅限用于中、小型火力发电厂。进入 20 世纪 80 年代以后,许多火力发电厂相继引进了各种类型的气力除灰设备及其相关技术,进一步促进了国内火力发电厂粉煤灰气力输送控制技术的发展。气力输送系统的输送距离、输送浓度、系统出力、设备的制造工艺、自动控制及管理水平得到很大提高。作为气力输送技术理论基础的气固两相流的理论研究及输送系统的设计、控制算法也不断得到完善。

本书介绍了先进的火力发电厂低正压气力除灰控制技术,以及多年来的生产经验和研究成果。内容涉及粉煤灰低正压气力输送应用基础和输送原理、控制算法、气力除灰及设备的设计选型、安装、运行维护和故障诊断方法等。

本书第 1 章由李培荣编写,第 2 章、第 5 章、第 6 章由李金伴编写,第 3 章、第 4 章由李捷明编写,第 7 章、第 8 章由李捷辉编写。在编写中,参阅了有关教材、资料和文献,在此向原作者表示衷心的感谢。

在本书的编写中，得到了江苏大学领导、其他教师和镇江电站辅机厂、江苏电力设计院崔功龙的热情帮助，提出了不少宝贵意见，在此谨向他们表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中难免会有错误、疏漏之处，诚恳希望读者批评指正。

编者

2005 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 火力发电厂气力除灰系统应用概况	1
1.1.1 国外火力发电厂气力除灰概述	1
1.1.2 国内火力发电厂气力除灰概述	1
1.1.3 火力发电厂气力除灰系统几个基本概念	4
1.2 火力发电厂粉煤灰物理化学特性	5
1.3 火力发电厂气力除灰系统基本原理	6
1.4 火力发电厂气力除灰设备和选型	7
1.4.1 概况	7
1.4.2 纽普兰气力输送系统配置	8
1.4.3 输送系统单元划分	10
1.4.4 单元输送系统出力确定原则	10
1.4.5 输送压缩空气系统	10
1.4.6 发送器	12
1.4.7 阀门配置状况	12
1.4.8 发送器运行模式	13
1.4.9 输送气灰比	13
1.4.10 输送管道	13
1.4.11 辅助输送系统	14
1.4.12 吹堵系统	14
1.4.13 系统对设备故障的适应性	14
1.4.14 对锅炉排灰量的适应性	15
第 2 章 火力发电厂气力除灰技术基础	16
2.1 火力发电厂气力除灰系统的类型和特点	16

2.1.1	火力发电厂气力除灰系统的基本类型	16
2.1.2	火力发电厂气力除灰技术特点	17
2.1.3	火力发电厂粉煤灰的黏附性	18
2.2	火力发电厂灰气混合物的技术参数	20
2.2.1	火力发电厂灰气混合比	20
2.2.2	输料管中灰气混合物的实际浓度	21
2.2.3	火力发电厂中灰气混合物密度	22
2.3	粉煤灰颗粒的沉降速度和悬浮速度	24
2.3.1	粉煤灰颗粒自由沉降与自由悬浮运动的基本 概念	24
2.3.2	粉煤灰颗粒自由沉降速度的计算与应用	26
2.3.3	输灰管中沉降、悬浮速度的影响因素	29
2.4	粉煤灰在输灰管中的运动状态	31
2.4.1	气力输送管中粉煤灰颗粒的运动状态	31
2.4.2	气力输送管内气流速度场和粉尘浓度场的分布	33
2.4.3	水平输送管中颗粒悬浮的机理	35
2.4.4	垂直输料管颗粒的运动	36
2.5	粉煤灰的流态化特征	37
2.5.1	粉煤灰的流化机理	37
2.5.2	粉煤灰体的似液体性	39
2.5.3	粉煤灰体的流态化	40
2.6	粉煤灰输灰管中气固两相流阻力特性	41
2.6.1	粉煤灰在输灰管中颗粒群运动方程	41
2.6.2	输送管内悬浮式气固两相流的压力损失	45
2.6.3	气力输送管道中的最佳风速	50
2.7	粉煤灰输送管道的布置要求	52
2.8	粉煤灰输送管道的磨损	54
第3章 可编程控制器的结构及工作原理		57
3.1	可编程控制器的基本组成	57
3.1.1	可编程控制器的基本组成	57

3.1.2	可编程控制器各部分的作用	58
3.2	可编程控制器的工作原理	62
3.2.1	可编程控制器的工作原理	62
3.2.2	PLC 的扫描周期及响应时间	65
3.2.3	PLC 的技术指标	67
3.3	几种 PLC 的硬件系统配置及特点	68
3.3.1	S7-200 PLC 的系统特性及硬件配置	68
3.3.2	C200H PLC 的硬件系统配置	72
3.4	可编程控制器的软件	77
3.4.1	系统软件	77
3.4.2	用户程序	79
3.5	可编程控制器的接口与通信	79
3.5.1	概述	79
3.5.2	S7-200 通信及网络	80
第 4 章	可编程控制器指令应用与编程	87
4.1	简单电路的设计与编程	87
4.1.1	可编程控制器逻辑指令应用	87
4.1.2	数据处理指令应用	104
4.2	复杂电路的设计与编程	109
4.2.1	顺序控制指令应用	109
4.2.2	模拟量控制、PID 指令的使用	118
第 5 章	火力发电厂低正压气力除灰设备	129
5.1	气源部分	129
5.2	气锁阀	132
5.3	总输灰管	136
5.4	灰库	137
第 6 章	火力发电厂低正压气力除灰设备 PLC	138
	控制系统的设计	138
6.1	顺序控制概述	138

6.2 火力发电厂低正压气力除灰设备 PLC 控制系统的设计	139
6.2.1 确定 I/O 信号的种类和数量	139
6.2.2 确定 PLC 的机型	144
6.2.3 PLC 模块的选择	146
6.2.4 建立 I/O 信号的地址分配表	153
6.2.5 输入/输出接线图设计	157
6.3 低正压气力除灰设备 PLC 控制系统的软件设计	161
6.3.1 初始化部分	161
6.3.2 模拟量输入信号处理部分	162
6.3.3 气源控制部分	163
6.3.4 控制协调部分	164
6.3.5 气锁阀组部分	167
6.3.6 总输灰管部分和灰库部分	170
6.3.7 其他部分	172
第 7 章 低正压气力除灰设备监控界面的设计	173
7.1 组态王概述	173
7.2 低正压气力除灰设备监控界面的设计过程	176
7.2.1 I/O 设备的设置	177
7.2.2 构建数据库	177
7.2.3 设计图形画面	181
第 8 章 低正压气力除灰设备 PLC 控制系统的故障诊断	187
8.1 PLC 控制系统的故障	187
8.2 PLC 本身故障的诊断	188
8.3 PLC 控制系统外部设备故障的诊断	189
8.4 用 BP 神经网络进行 PLC 控制系统外部设备故障的诊断	190
8.4.1 PLC 控制系统故障诊断研究概述	191
8.4.2 人工神经网络概述	198

8.4.3	BP 神经网络概述	202
8.4.4	BP 训练算法	204
8.4.5	PLC 顺序控制故障的分析	208
8.4.6	故障诊断训练样本的确定	210
8.4.7	具体应用	214
8.5	调试	216
8.5.1	实验室调试	216
8.5.2	现场安装和调试	218
8.5.3	现场调试	221
8.6	气锁阀故障诊断程序的调试	223
附录		226
附录 A I/O 信号的地址分配表		226
附录 B		238
附录 C		256
附录 D 气力除灰系统的要求		271
参考文献		283

第 1 章 绪 论

1.1 火力发电厂气力除灰系统应用概况

1.1.1 国外火力发电厂气力除灰概述

火力发电厂采用气力除灰起源于粉粒状物料的气力输送。1866 年斯特蒂文特 (Sturtevant) 研制了除尘器, 标志着粉粒状物料气力输送技术研究的开始。1886 年阿林顿 (Allington) 对纤维的气力输送进行了研究。1890 年多克哈姆 (F. F. Duckham) 发明了套筒式吸嘴, 并且设计了吸送谷物的卸粮机, 为现代卸粮机的发展奠定了基础。1906 年米切尔 (Mitchell) 研制了谷物卸船机, 在该卸船机中采用了输料管逐段改变断面尺寸的技术。1919 年昆尼翁 (A. G. Kinyon) 发明了用于压送粉末状物料的螺旋泵。1924 年加斯泰斯塔特 (Gasterstadt) 对气力输送小麦进行了研究, 并且提出了相应的压力损失计算公式。1958 年尼特 (Barth) 进一步发展了加斯泰斯塔特的研究成果。在 20 世纪 70 年代, 世界上发生能源危机, 许多发电厂由烧油改为烧煤, 气力输送广泛应用于输送粉煤灰、石灰石等物料, 并且发展迅速。

1.1.2 国内火力发电厂气力除灰概述

从 20 世纪 30 年代初期, 火力发电厂气力输送技术已在燃煤发电厂应用, 主要是输送除尘器 (多管式) 干灰和锅炉底渣。但由于当时发电厂气力输送技术还不成熟, 火力发电厂气力除灰 (渣) 系统可靠性较差, 因此在燃煤发电厂内一般均以水力除灰



系统为主，火力发电厂气力除灰系统为辅，两套除灰系统并存的除灰方式。

在 20 世纪五六十年代，我国电厂的除灰设备比较落后，几乎是低浓度的水力除灰，即所谓“3 泵 2 管 1 条沟”的单一模式。为了满足节水、保护环境、减少灰场用地和投资，以及灰渣综合利用等方面的要求，后来逐渐向多类型除灰探索，先后发展了高浓度水力除灰、气力除灰和机械除灰。但总体来讲，除灰环节仍然是电厂较薄弱的环节。

在 20 世纪 80 年代及以后，随着我国电力工业的高速发展，排灰渣量大大增加。加之我国地少人多、很难就近找到理想灰场、经济不发达、科技水平不高、水资源匮乏等因素，从我国电厂的发展情况来看，除灰任务相当繁重。

近年来在我国气力除灰发展比较快。至今在我国投产的气力除灰系统有：正压气力除灰系统、低正压气力除灰系统、负压气力除灰系统、空气输送槽或几种形式的联合。以下分别介绍这四种气力除灰系统。

(1) 正压气力除灰系统

正压气力除灰系统是在 20 世纪 60 年代从水泥行业移植到电力行业的，并且发展了长距离的配管技术，已经日趋成熟，应用最多。据不完全统计，约 60 余座电厂装有这类设备，如谏壁、宝钢、福州、南市、西固、昆明、小龙潭等电厂。正压气力除灰系统一般以 0.8MPa 压缩空气作为气源，输送距离在 1000m 左右，曾经做过 1520m、2100m 试验，证实可以输送，但经济性有所降低。系统出力多在 10~60t/h。

从 20 世纪 80 年代开始，由于燃煤发电厂粉煤灰已作为一种资源被开发利用，广泛应用在建材、水利工程和道路建设等，同时国家对环境保护的要求不断提高，如要求水力除灰系统灰水零排放等。因此开始从国外引进气力除灰系统及其配套设备，在国内各科研机构和设备制造厂共同努力下，逐步完成气力除灰系统



及其配套设备国产化，并提高系统及其配套设备运行的可靠性。目前国内燃煤发电厂的除灰方式已采用以气力除灰系统为主，不需要水力除灰系统或其他除灰方式作备用。

在正压气力除灰系统中一般采用仓泵作为发送器。仓泵是正压气力除灰系统的主要设备。仓泵容积 $0.4 \sim 14 \text{m}^3$ ，可以分为上引式、下引式、流态化、喷射式、“飞达”式等。

正压气力除灰系统的气源压力相对较高，因此输灰浓度高、输送距离远。全套设备可由国内生产，投资和运行费用较低。正压气力除灰系统环节较少、简单可靠。

根据我国电力部门的调查情况，正压气力除灰系统主要存在以下不足。

- ① 料位计、灰库库顶收尘器等部件需要进行改进。
- ② 需要在锅炉的静电除尘器下面设置粉煤灰集中装置。

(2) 低正压气力除灰系统

根据我国电力部门的调查情况，采用低正压气力除灰系统的电厂主要有：南通、平圩、北仑港、吴泾、石洞口二厂等电厂。低正压气力除灰系统的气源压力在理论上不大于 0.2MPa ，采用高压罗茨风机或高速回转风机提供压缩空气。输送当量长度不超过 2000m ，系统出力一般大于 30t/h 。

低正压气力除灰系统采用气锁阀作为发送器。气锁阀又称小仓泵，是低正压气力除灰系统的主要设备。气锁阀容积 $0.7 \sim 1.7 \text{m}^3$ ，在锅炉静电除尘器的每只灰斗下面各安装 1 个气锁阀，一般 4~8 个气锁阀接到 1 根分支输灰管上，各分支输灰管再并接到总输灰管上。

低正压气力除灰系统的优点是：将粉煤灰集中和输送集于一体；转运灰库可以远离厂房。低正压气力除灰系统的缺点是：投资高；检修维护工作量大；运行费用高；控制点多，调试时间较长；对运行、检修人员要求较高。

(3) 负压气力除灰系统



负压气力除灰系统早在 20 世纪五六十年代就被我国采用，均安装于小容量机组上，由我国自行设计制造。根据有关资料，安装有负压气力除灰系统的电厂主要有：一汽、云岗、坝桥、开远、巡检司、解化、宝钢、石横等电厂。负压气力除灰系统的灰源压力在 $-0.06 \sim -0.04\text{MPa}$ ；输送当量长度一般不超过 200m；常用作粉煤灰集中，系统出力一般为 $10 \sim 40\text{t/h}$ 。

负压气力除灰系统需要在静电除尘器的灰斗下面安装物料输送阀（又称受灰器），向系统供灰。物料输送阀是负压气力除灰系统的主要设备。负压气力除灰系统的灰管连接和控制类似于低正压气力除灰系统。负压气力除灰系统对收尘装置要求较高，通常设 2~3 级收尘器。抽真空设备主要有负压罗茨风机、水环式真空泵、水抽子、汽抽子等。

负压气力除灰系统的不足之处为：运输距离短，一般用于粉煤灰集中；投资较大；检修维护工作量大；控制环节多，调试周期长；对运行、维护人员要求较高。

（4）空气输送槽

空气输送槽主要是利用气力和重力的作用，使粉煤灰沿着斜槽流动，从而达到输送的目的。常用作粉煤灰集中，在欧洲应用较多。根据有关资料，我国从 20 世纪 70 年代开始，先后在巴公、高井、军粮城、闵行、江油、珞璜、岳阳等电厂使用。空气输送槽结构简单，本身无转动部件，能耗较小；设备为国产，投资省。输送长度一般为数十米，其出力可以按照需要进行选配。

空气输送槽的不足之处为：为了满足安装坡度，在静电除尘器下面要留有较高的安装空间；锅炉启动阶段产生的油灰、粗灰、冷灰、杂物等非正常排灰，空气输送槽较难适应。

1.1.3 火力发电厂气力除灰系统几个基本概念

采用气力除灰系统类型和系统输送能力与发电厂单机发电容量无必然关系，它只与气力除灰系统输送灰量、灰的物理性能、



输送距离等有关。

浓相气力除灰系统是应用浓相气力输送技术，从而达到降低输送速度、提高输送效率、减少磨损的目的。

气灰比有很多含义，如气灰比、平均气灰比、输送气灰比、瞬时气灰比、瞬时最大气灰比等。但在工程实践中，只有输送过程气灰比和输送综合气灰比两种是系统设计和考核的重要指标。由于气灰比计算方法与所有用的气力除灰系统类型有密切的关系，因此大致可以按下式计算。

输送过程气灰比 $\mu =$

$$\frac{\text{从发送设备出口到灰库被输送的灰量}}{\text{输送时间} \times \text{单位时间内消耗输送压缩空气量} \times \text{压缩空气密度}} \\ (\text{kg 灰/kg 气})$$

输送综合灰气比 $\mu =$

$$\frac{\text{输送系统出力}}{720 \times \text{输送压缩机空气体积流量}} (\text{kg 灰/kg 气})$$

输送过程气灰比是计算输送管道压力损失的重要依据；输送综合气灰比是选择输送压缩机容量和系统考核的重要依据。

1.2 火力发电厂粉煤灰物理化学特性

火力发电厂粉煤灰颗粒的分类在国内外文献资料中很不统一，但就一般情况可以分为三类：球形颗粒、不规则多孔颗粒、不规则颗粒，对于烟气脱硫灰还存在片状颗粒。

火力发电厂粉煤灰堆积密度为 $r_n = 0.7 \sim 0.75 \text{ t/m}^3$ 。粉煤灰质量指标分级根据 GB 146—90 标准确定（见表 1-1）。

表 1-1 粉煤灰质量指标分级

质量指标/% 等级	细度不大于(45 μm 方孔筛的筛余)	烧失量	需水比	三氧化硫含量
I	≤ 12	≤ 5	≤ 95	≤ 3
II	≤ 20	≤ 8	≤ 105	≤ 3
III	≤ 45	≤ 15	≤ 115	≤ 3

干灰在质量中位径 d_{50} 的条件下, $5\mu\text{m}$ 细灰比面积为 $6000\text{cm}^2/\text{g}$, 粗灰比面积为 $1700\text{cm}^2/\text{g}$ 。火力发电厂粉煤灰的化学成分见表 1-2。

表 1-2 粉煤灰的化学成分

代号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	C
数据/%	33.9~ 59.7	16.5~ 35.4	1.5~ 15.4	0.8~ 10.4	0.7~ 1.8	0~ 1.1	0.7~ 3.3	1.0~ 23.5

1.3 火力发电厂气力除灰系统基本原理

火力发电厂气力输送是气固两相流在输送管道内以各种流动状态从甲地输送至乙地, 输送介质为压缩空气, 压缩空气是气力输送的载体和动力源。

正压气力除灰系统是由高压端向低压端输送, 负压气力除灰系统是由低真空度向高真空度输送。

浓相气力输送与稀相气力输送的区别在于干灰在输送管道内的流动状态。干灰在输送管道内的流动状态与发送设备、输送速度有密切关系。

火力发电厂气力输送系统有间断式和连续式两种输送方式, 间断式输送系统的输送过程气灰比与输送距离成反比例关系, 而连续式输送系统影响输送过程气灰比的主要因素不是输送距离。

火力发电厂气力输送系统中的气灰混合物流速与输送管道压力损失成平方关系, 降低气灰混合物流速不但能降低能耗还可以延长输送距离, 因此气灰混合物流速应在优化计算后确定。

输送压缩空气量平衡计算是气力输送系统设计的关键, 在任何状态下出现输送压缩空气量不平衡时, 都会影响气力输送系统正常运行。

气力除灰系统主要技术参数如下。

锅炉额定排灰量: t/h (或需要输送的灰量 t/h)。

气力输送系统平均出力: t/h。

