

RANMEIFADIANCHANG
FENMEIHUIQILISHUSONGXITONG

崔功龙 编著

燃煤发电厂 粉煤灰气力输送系统



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

燃煤发电厂 粉煤灰气力输送系统

◎ 崔功龙 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

各种类型的气力输送系统都必须针对被输送物料的物理特性、输送量、输送距离和环境条件等因素进行设计。所有类型的气力输送系统都有一定的局限性,因此本书根据被输送物料在输送管道内的基本流动状况,将气力输送系统归纳为负压气力输送系统、低速栓状流气力输送系统、气锁阀正压浓相气力输送系统、流态化并联仓泵浓相气力输送系统,以及与输送系统配套的常见灰库及其中转运输系统等,并着重介绍各种类型气力输送系统的输送原理、输送特点、适应范围、常见故障分析。针对不同类型的气力输送系统设计,详细介绍了其系统计算、运行程序、安装调试等。

本书可供从事气力输送技术的研究、设计、设备制造等专业技术人员,尤其是火力发电厂除灰专业设计、运行、检修、管理人员参考,也可供冶金、建材、化工、粮食等行业从事气力输送的工程技术人员参考,同时可作为高等院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤发电厂粉煤灰气力输送系统/崔功龙编著. —北京:中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-3383-7

I. 燃... II. 崔... III. 火电厂-燃煤锅炉-粉煤灰-管道气力运输 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 049053 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 9 月第一版 2005 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 328 千字

印数 0001—3000 册 定价 23.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

燃煤发电厂锅炉所排放的炉底渣及干灰（统称粉煤灰）已作为一种资源被开发利用，并以商品的形式进入市场，气力输送电厂的干灰（或炉底渣）已被广泛应用，并取得明显的经济效益和社会效益。

在国内燃煤发电厂中，有的从国外引进型式众多的气力输送系统及其设备，有的则使用通过合资方式、利用国外技术生产的国产气力输送系统及其设备。但在实际工程应用中，也仍存在一些问题，如输送系统考核指标达不到设计要求，输送系统及其设备故障率较高，设备及其输送管道磨损严重等。

无论是从国外引进的气力输送系统，还是通过合资方式生产的气力输送系统，虽然型式众多，但大致可归纳为柱塞输送、栓状流输送、团状流输送、绳状流输送和稀相输送等几种类型。被输送物料在输送管道内的流动状态，是由被输送物料的特性所决定的，因此在实际工程设计时，必须针对被输送物料的特性、需要输送量、输送距离、环境条件等因素，正确设计和选择气力输送系统。由此可见，选择气力输送类型与发电机组容量没有直接关系。

气力输送系统的输送能力一般按锅炉额定排灰量的 1.2 ~ 2.0 倍计算，其主要目的是为了缩短输送系统运行时间和适应锅炉燃烧煤质的变化。当静电除尘器灰斗采用不存灰状态下运行时，输送系统必须与锅炉同步运行，其输送系统出力只能等于锅炉最大排灰量；当静电除尘器灰斗采用定期出灰方式时，则输送系统既要达到缩短运行时间的要求，又要适应锅炉燃烧煤质变化。由此可见气力输送系统的输送能力与静电除尘器灰斗运行方式有直接关系。

浓相气力输送技术已被广泛应用于燃煤发电厂的气力除灰系统。区别浓相气力输送与稀相气力输送的基本要素，应该是被输送物料在输送管道内的流动状态，不应该是单纯的输送灰气比大小。如果采用同样的气力输送系统，在短距离输送时，很容易达到输送灰气比 20kg (灰) / kg (气) ，然而延长输送距离后，输送系统达不到输送灰气比 20kg (灰) / kg (气) 的要求，无法判断该输送系统属于浓相输送还是稀相输送，因此机械行业标准 JB/T 470—1996《正压浓相气力输送系统》需要考虑输送距离的条件。

气力输送主要由压缩空气作为输送介质，当输送易燃易爆物料时，由于空气中含有氧，很不安全，就需要用惰性气体，如用氮气。天津某厂输送氧化铁粉，就采用工厂的附属产品——氮气作为输送载体。输送压缩空气系统是气力输送系统的重要组成部分，因此采用任何类型的气力输送系统，都必须根据工程具体条件进行输送压缩空气量的平衡计算，其计算结果作为选择输送压缩机容量的依据。

由于不同类型的气力输送系统都有特定的输送条件，因此不能用一种单一方法来计算

气力输送系统。采用输送管道起始段管径、起始流速计算输送管道起始段技术参数，在初步设定输送起始点压力的状态下，计算输送管道末段技术参数，和采用各段输送管道末端气灰混合物密度计算输送管道压力损失的计算方法，其计算结果更接近输送系统实际运行状况。

本文按被输送物料在输送管道内的流动状态，对栓状流（浓物）、绳状流（浓物）和稀相流气力输送系统及其计算方法进行详细论述。对于其他流动状态的气力输送系统，由于作者掌握资料不够全面，又无工程实践经验，因此没有编写。

本文中气力输送的许多基础数据是通过镇江市电站辅机厂气力输送系统工业试验台，进行多次试验后取得的，有部分数据是在南京顺风气力输送系统有限公司试验台上通过试验取得的。所取得的基础数据又在燃煤发电厂气力输送系统中应用，通过测试部门测试验证，所采用的基础数据可靠，但还不具备通用性，因此无法提出适用各种类型气力输送系统的计算公式。

气力输送系统设计原则，同样适用于锅炉烟气采用布袋除尘器的干灰输送系统，但由于各系统布袋除尘器收集的灰量、灰斗数量不同，因此在系统设计、计算、系统运行方式等均应根据布袋除尘器技术参数作相应调整。

目前，设计院、制造厂家的设计软件仍采用千克力/米²（kgf/m²，1kgf/m² = 9.8Pa）作为压力的单位，而且有些公式采用的因数是由 kgf/m² 计量的，无法直接改为法定计量单位帕斯卡（Pa），因此本书在计算过程中的压力计量单位仍用 kgf/m²。在计算结束后统一换算成以压力的法定计量单位帕斯卡（Pa）表示的数值，提供给使用者。在本书中也给出了各种压力单位的换算方法，便于读者使用。

本书得到中国电力企业联合会张绍贤副理事长的亲笔题词，和北京中联动力技术责任有限公司刘学良总经理、江苏省电力设计院、镇江市电站辅机厂等有关领导的关心和支持，在出版过程中又得到魏国强、刘志梅、范玉明等同志的热情帮助和蒋学典同志的认真校审，在此一并表示感谢。

由于作者工作接触面的局限性和理论水平的限制，文中所提出的一些技术论点、计算方法难免有不当之处，敬请读者批评指正。

崔功龙

2005 年 3 月

目 录

前言

第一章 气力输送系统概况

1

第一节 气力输送技术概述

1

一、气力输送技术的发展过程

1

二、气力输送系统在实际应用中需要注意的问题

2

第二节 气力输送系统的分类

和特点

4

一、气力输送系统的分类

4

二、气力输送系统的基本特点

4

三、气力输送发电厂灰渣的优势

7

第二章 气力输送基本知识

9

第一节 压缩空气

9

一、空气的物理特性

9

二、有关压缩空气的基本概念

11

第二节 气灰混合物基本参数

15

一、气灰混合物温度计算

15

二、气灰混合物密度计算

16

三、输送浓度计算

17

四、输送灰气比

17

第三节 被输送物料在输送管道内

流动基本状况和输送速度

18

一、悬浮速度

19

二、输送管道内气流速度分布状况

19

三、被输送物料在输送管道内的运动状态

20

四、输送速度

21

第四节 两相流气力输送压力损失

22

一、产生输送管道内压力损失的主要原因

22

二、输送管道压力损失计算方法

22

第五节 浓相气力输送技术

24

一、概况

24

二、浓相气力输送技术基本常识

24

三、浓相气力输送技术基本特征

26

四、浓相气力输送系统基本类型

26

第六节 旁路管道输送技术

27

一、输送基本原理

27

二、旁路管道管径及开口间距计算

28

三、旁路管道布置方式

28

四、旁路管道防堵措施

29

第七节 发送设备容积与浓相气力输

送系统的关系

29

一、输入输送管道起始段气灰混

合物浓度

29

二、发送设备容积与装料时间、气动阀

门型式与动作次数的关系

30

三、气动进料阀耗气量比较

30

第八节 气力输送系统技术经济指标

考核计算

31

第三章 负压气力输送系统

33

第一节 负压气力输送系统基本特点

与使用条件

33

一、国内发展与应用概况

33

二、负压气力输送系统基本特点

33

三、负压气力输送系统使用条件

34

第二节 负压气力输送系统配置

34

一、系统工艺流程

34

二、气灰分离装置工作原理

35

三、系统补气方式

36

四、输送灰气比

36

五、输送管道内流速

36

六、终端灰库气灰分离装置配

置原则	36
七、抽真空设备	37
八、系统真空破坏阀	37
九、静电除尘器灰斗排灰方式	37
十、辅助输送系统	37
十一、典型系统	40
第三节 负压气力输送系统主要	
设备	40
一、抽真空设备	40
二、受灰设备	43
三、气灰分离设备	45
四、主要气动阀门	49
第四节 负压气力输送系统计算	51
一、计算基本条件	51
二、系统基本数据计算	51
三、系统压力损失计算	54
四、抽真空设备选型计算	56
五、系统主要技术参数汇总	57
第五节 负压气力输送系统计算	
例题	57
一、计算基本条件	57
二、系统基本数据计算	57
三、系统压力损失计算	59
四、选择抽真空设备	60
五、系统运行数据计算	61
六、系统主要技术参数汇总	62
第六节 系统运行及系统调试要点	62
一、系统运行程序	62
二、系统调试要点	63
第四章 低速栓状流气力输送系统	66
第一节 概况	66
一、基本概念	66
二、L型仓泵的结构和组成	67
三、L型仓泵输送基本原理及	
输送程序	67
第二节 低速栓状流气力输送系统	
工艺流程及组成	69
一、系统工艺流程	69

二、输送压缩空气系统和仪用压缩	
空气系统	69
三、L型仓泵的应用特点	73
四、输送系统出力	73
五、输送灰气比	73
六、输送管道	75
七、灰库顶气灰分离设备	75
八、辅助输送系统	75
九、系统特点	75
十、疏通输送管道装置	77
十一、典型系统	77
第三节 低速栓状流气力输送系统	
计算	79
一、与常规正压气力输送系统计算的	
不同点	79
二、系统出力	79
三、L型仓泵有效容积	79
四、输送管道内径	80
五、L型仓泵内气灰混合物输出时间	80
六、输送灰气比	80
七、气灰混合物料栓密度	81
八、输送系统压降计算	81
九、输送需要标准状况下的空气量	82
十、输送管道末端数据计算	82
十一、L型仓泵输送一次时间	82
十二、输送系统参数计算	83
第四节 低速栓状流气力输送系统	
选型计算	84
一、选型计算基本条件	84
二、L型仓泵输出数据计算	84
三、输送管道压降及起始端压力计算	85
四、输送管道末端参数及输送时间	
计算	85
五、系统基本参数	86
六、输送距离与系统参数之间的	
关系	87
第五节 低速栓状流气力输送系统	
计算例题	87
一、计算基本条件	87
二、输送系统基本配置	87

三、输送系统基本数据计算	87	第五节 输送管道的疏通装置	123
四、输送系统压降计算	90	一、在一定间距内采用输送压缩空气 吹堵	123
五、输送管道末端数据计算	91	二、采用专用补气环向输送管道内补 充输送压缩空气	123
六、输送系统参数计算	92	三、利用锅炉尾部烟道负压进行反抽 正吹疏通管道装置	124
第六节 输送系统运行程序及调试		四、利用旁路管道静压疏通管道 装置	125
要点	93	第六节 气锁阀正压浓相气力输送	
一、系统运行程序	93	系统计算	126
二、输送系统调试要点	96	一、确定输送系统出力的基本原则	126
第五章 气锁阀正压浓相气力输		二、输送系统出力计算	126
送系统	99	三、气锁阀发送设备容积计算	127
第一节 系统概况	99	四、气锁阀发送设备技术数据计算	127
第二节 输送基本原理	100	五、输送灰气比及输送浓度计算	128
一、气锁阀发送设备组成	100	六、计算标准状况下需要输送的 空气量	129
二、输送原理	101	七、输送管道末端参数计算	129
三、输送压降与输送浓度、输送 速度的关系	101	八、输送管道压降计算	130
四、气锁阀发送设备工作程序	102	九、输送系统总压降计算	130
五、气锁阀发送设备输送曲线	103	十、输送压缩机选型计算	130
第三节 气锁阀正压浓相气力输送		十一、辅助输送系统计算	131
系统设备配置及工艺		十二、输送单位能耗、气耗计算	132
流程	104	第七节 气锁阀正压浓相气力输	
一、系统组成及工艺流程	104	送系统计算例题	133
二、输送单元组合	105	一、计算基本条件	133
三、输送单元系统出力确定原则	105	二、输送系统基本配置	133
四、输送压缩空气系统	106	三、输送系统基本数据计算	134
五、气锁阀发送设备选型原则	109	四、输送管道末端参数计算	135
六、输送浓度与输送灰气比	110	五、输送管道压力损失计算	136
七、输送管道	112	六、气锁阀发送设备输送次数及系统 运行时间计算	139
八、灰库工艺配置	113	七、输送系统运行设定值	139
九、辅助输送系统	114	第八节 输送系统运行程序及调试	
十、与其他正压浓相气力输送系统 的区别	114	要点	140
十一、输送系统适应性	117	一、输送系统运行程序	140
十二、典型输送系统	117	二、输送系统故障运行程序	142
第四节 气锁阀发送设备的气		三、输送系统运行程序主要设定值	143
动阀门选型	119	四、输送系统内主要受控设备	144
一、气动阀门使用部位的工作状态	119		
二、气动阀门主要类型	120		

五、系统调试要点	144	二、流态化仓泵技术数据计算	171
第六章 流态化并联仓泵浓相气力 输送系统	148	三、输送管道技术参数计算	172
第一节 系统概况	148	四、输送系统参数计算	174
一、与常规流态化仓泵的异同	148	五、并联仓泵装灰时间计算	176
二、输送系统出力和输送距离	148	六、辅助输送系统计算	177
三、静电除尘器灰斗运行方式	148	第六节 流态化并联仓泵浓相气力 输送系统计算例题	177
四、输送压缩空气的供气方式	149	一、计算条件	177
五、保持输送系统可靠性的措施	149	二、输送系统图	178
第二节 流态化并联仓泵输送类型 及输送原理	149	三、输送单元出力计算	178
一、并联仓泵浓相气力输送类型	149	四、流态化仓泵技术数据计算	178
二、流态化并联仓泵输送单元组成 及其工艺流程	150	五、输送管道技术参数计算	180
三、输送原理及工作程序	151	六、输送系统参数计算	184
第三节 流态化并联仓泵浓相气力 输送系统组成、特点及 设计原则	152	七、并联仓泵装灰时间计算	185
一、静电除尘器灰斗运行特点	152	八、输送系统计算结果汇总	186
二、输送压缩空气系统和仪用压 缩空气系统	154	第七节 输送系统运行程序及调试 要点	187
三、并联仓泵输送系统设计原则	156	一、输送系统运行程序	187
四、输送系统的组成及其工艺流程	158	二、输送系统调试要点	190
五、输送管道及其疏通管道系统	161	第七章 气力输送系统常见故障及其 主要原因	194
六、输送灰气比	162	第一节 输送系统设计难以预见 的故障	194
七、静电除尘器灰斗气化风系统	164	一、除尘器灰斗内出现异物故障	194
八、灰库顶设备及其灰库气化 风系统	164	二、突然出现黏结性灰	194
九、公用气动出料阀磨损问题	165	第二节 发送设备装料超时或装料 不到位	194
十、输送系统特点	165	一、故障产生原因	194
十一、典型输送系统	166	二、处理方法	195
第四节 流态化并联仓泵系列	168	第三节 输送超时	195
一、并联仓泵布置形式	168	一、输送超时的原因	195
二、流态化仓泵外形尺寸	169	二、处理方法	196
第五节 流态化并联仓泵浓相气力 输送系统计算	170	第四节 输送超压及堵管	196
一、输送单元出力和输送系统出力 计算	170	一、输送超压的主要原因	196
		二、输送管道堵管的主要原因	197
		三、处理方法	197
		第五节 输送管道及阀门磨损 严重	197

一、输送管道及阀门磨损的主要原因	197	六、灰库贮灰容积计算	208
二、处理方法	198	七、灰库总体布置要求	209
第六节 输送压缩空气系统存在问题	198	第三节 灰库中转运输系统	210
一、存在问题的主要原因	199	一、设计基本条件	210
二、输送压缩空气系统设计不合理	199	二、设计基本要求	210
第七节 气力输送系统选型错误	201	三、灰库中转运输系统组成	210
一、被输送物料的物理性能对输送系统的影响	201	四、典型中转运输系统示例	212
二、各种类型气力输送系统局限性对输送系统的影响	201	第四节 中转运输系统运行程序	214
三、影响输送系统出力的主要因素	202	一、系统配置及投运状态	214
第八节 发送设备内干灰输出时间设定和输送管道配置不合理	202	二、系统运行程序	214
一、压力差对发送设备输出时间的影响	202	第五节 灰库辅助建筑物	216
二、确定输送管道起始段管径的主要因素	203	一、灰库气化风机、仪用空气压缩机房	216
三、发送设备输出管道与输送管道的连接方法	203	二、粉煤灰综合利用办公楼	216
第八章 灰库区域设施及中转运输系统	204	第六节 灰库中转运输系统计算例题	216
第一节 概况	204	一、计算条件	216
一、灰库区主要功能	204	二、灰库需要容积	217
二、灰库区设施设计主要项目	204	三、车辆载重量计算	217
第二节 贮灰库设计	204	四、装车时间核算	218
一、贮灰库类型	204	五、中转运输系统每天运行时间计算	218
二、贮灰库容积确定原则	205	附录一 气力输送系统设计基础资料	220
三、贮灰库设计基础数据	205	附录二 锅炉排灰量计算	220
四、贮灰库典型布置形式	206	附录三 回转式压缩机轴功率计算	221
五、影响灰库贮存时间的主要因素	207	附录四 罗茨风机风压计算	221
		附录五 输送管道、空气管道位移量计算	222
		附录六 干灰物理特性表	222
		附录七 介绍一种新型的 DPV 型下引式发送设备	222
		参考文献	225

第一节 气力输送技术概述

一、气力输送技术的发展过程

19 世纪初, 气力输送技术已被应用于工业领域, 当时主要用于港口码头和工厂内的谷物输送。当时的气体压缩技术和输送系统控制水平等客观因素, 限制了气力输送技术的发展与应用。

在 20 世纪 30 年代初期, 气力输送技术已在燃煤发电厂应用于输送锅炉排放的干灰和锅炉炉底渣, 但当时发电机组容量较小, 输送系统的输送能力低、输送距离短、设备磨损严重、输送系统运行可靠性差, 而且当时环境保护意识落后, 因此粉煤灰没有作为一种资源加以开发利用。燃煤发电厂均采用以水力除灰系统为主的除灰方式, 限制了气力输送技术的推广和应用。

随着国民经济快速发展, 燃煤发电厂发电机组的单机容量不断增大, 国家对环境保护的要求越来越高, 发电厂粉煤灰已作为一种资源被开发利用。20 世纪 70 年代中期, 在粉煤灰有了市场需求的条件下, 国内有关科研机构和一些设备制造厂开始研究开发气力输送技术及其设备, 并在燃煤发电厂中以水力除灰为主, 气力除灰系统为辅的条件下, 气力除灰、气力除渣系统才被逐步应用。

从 20 世纪 80 年代开始, 随着我国改革开放的不断深入, 国内电力行业在引进整套发电机组中, 大多数电厂均采用气力除灰系统, 虽然气力除灰系统样式众多, 但通过运行实践考核, 所有配套引进的气力除灰系统及其设备运行均安全可靠。因此, 国内科研机构和设备制造厂在吸收消化引进系统及其设备的基础上, 对气力除灰系统逐步实现国产化。另一方面, 通过与外资合作, 利用国外技术合资生产气力输送系统及其设备。

由于发电机组的单机容量不断增大, 燃煤发电厂的粉煤灰综合利用需求量不断扩大, 在对气力输送系统运行安全可靠、经济性和环境保护要求严格的情况下, 合资国产化气力输送系统及其设备已基本能达到上述要求, 并已占有国内燃煤发电厂气力输送系统的主要市场, 因此在燃煤发电厂中, 气力输送系统已作为主要除灰系统, 并逐步取消备用的水力除灰系统或其他备用除灰系统。

近二十多年来, 浓相气力输送技术发展很快, 已在燃煤发电厂气力除灰系统中得到广泛应用。由于燃煤电厂粉煤灰的物理特性, 采用浓相气力输送系统具有能降低输送速度、减少磨损、提高输送能力、提高输送灰气比和降低输送单位能耗等优点, 因此浓相气力除灰系统应用最为普遍。

由于浓相气力输送系统一般在静电除尘器每个灰斗下安装一套发送设备, 因此它是静电除尘器灰斗内干灰集中与输送为一体的输送系统; 由于在一套输送系统中可以由多个输送单元组成, 因此可以适应不同发电机组容量输送干灰的需要。

根据被输送物料的物理特性、需要输送量、输送距离等客观条件进行正确的计算，可以合理选择气力输送系统的类型，即使在长距离输送时，也能保证输送系统安全可靠运行，同时又能达到输送能力大、输送灰气比高、输送单位能耗低等经济指标。

二、气力输送系统在实际应用中需要注意的问题

目前，由于浓相气力输送技术发展很快，在国内还没有一个统一标准来衡量，因此在燃煤发电厂中有型式众多的浓相气力除灰系统。由于对工程具体条件，被输送物料的物理特性研究深度不够，设备部件使用部位不当，以及人为等等的因素存在，因此在决定发电厂气力除灰系统类型时经常出现一些概念性偏差的提法，下面进行具体分析。

(一) 发电机组单机容量与气力输送系统类型的关系

1. 决定气力输送系统类型的主要因素

被输送干灰的物理特性，需要输送灰量，对输送系统的技术要求，输送距离和干灰在输送管道内的流动状态等等是决定气力除灰系统类型的主要因素，而发电机组的单机容量不能决定气力除灰系统的类型，因为单机容量大，并不等于需要输送灰量大。为便于说明问题，现以江苏沙洲、徐州发电厂和贵州发电厂的设计、校核煤质资料，600MW 机组与 300MW 机组发电标准煤耗均按 $0.294\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算，其锅炉排灰量如表 1-1 所示。

表 1-1 600MW 机组与 300MW 机组的耗煤量、排灰量

名 称	燃烧煤质		锅炉耗煤量 (t/h)		锅炉排灰量 (t/h)	
	$Q_{\text{net, ar}}$ (MJ/kg)	A_{ar} (%)	600MW	300MW	600MW	300MW
江苏沙洲 发电厂	24	7.7	216.62	108.31	16.68	8.34
	20.98	13.07	208.02	124.01	32.42	16.21
江苏徐州 发电厂	22.26	28.8	233.38	116.69	67.22	33.61
	18.41	37.5	282.6	141.3	105.96	52.98
贵州发 电厂	22.82	24.64	227.82	113.91	56.14	28.07
	19.98	28.6	259.96	129.98	74.36	37.18

从表 1-1 可见，发电机组的排灰量与锅炉燃烧煤质有直接关系，如一台 600MW 机组锅炉燃煤低位发热量为 20.98MJ/kg ，灰分为 13.07% ，其排灰量为 32.42t/h ，而一台 300MW 机组锅炉燃煤低位发热量为 22.26MJ/kg ，灰分为 28.8% ，其排灰量为 33.61t/h ，两者排灰量基本相同，因此采用同样一套气力输送系统既可以适应 600MW 机组，也可以适应 300MW 机组。可以说，决定气力输送系统类型的主要因素不是发电机组单机容量。

2. 发电机组单机容量与气力输送系统设计、制造等级的关系

在工程设计中，经常会遇到必须具有 600MW 机组设计制造等级单位才有资格设计制造。从上述可见，同样一套气力输送系统既能适应 600MW 机组要求，也能适应 300MW 机组的要求，因此气力输送系统不能以发电机组单机容量来区分设计、制造等级，否则会影响 600MW 发电机组选择更先进的气力输送系统。

(二) 气力输送系统与气力输送技术的关系

气力输送技术是各种类型气力输送系统设计、设备制造、输送系统运行的基础。

1. 气力输送技术的基本要素

被输送物料的物理特征、发送设备类型（又称給料设备）、输送机理、输送速度和输送灰气比（输送浓度）等，被称为基本要素。浓相气力输送技术只是气力输送技术组成的一部分。

由于国内燃煤发电厂锅炉燃煤的煤种多而杂，煤质差异很大，锅炉燃煤制粉系统所采用的磨煤机类型也不完全一样，锅炉烟气经过脱硫后，其干灰物理特性发生变化（如颗粒形状改变），因此燃煤发电厂锅炉所排放的干灰处理方式不可能采用某一种固定模式，需要根据气力输送技术基本要素，通过计算来选择气力输送系统类型。

2. 决定气力输送系统的基本程序

被输送物料的物理特性是决定气力输送机理的主要依据，而决定输送机理又是确定发送设备（給料设备）的基础，确定发送设备类型是决定气力输送系统类型的最后一个环节。任何类型气力输送系统的输送速度、输送灰气比等技术参数都需要通过计算后确定，不能简单地事先确定。

3. 气力输送基本规律

（1）输送管道压力损失与输送速度成平方关系，输送速度与磨损成立方关系。因此降低输送速度是延长输送距离和减少磨损的有效措施。

（2）灰气比与输送距离的关系是：当采用间断式输送系统时，输送距离与输送灰气比成反比例关系；当采用连续式输送系统时，输送距离不是影响输送灰气比的主要因素，改变了输送距离与输送灰气比的关系。

（三）浓相气力输送技术与输送灰气比的关系

1. 区别浓相气力输送与稀相气力输送的基本要素

当输送管道内具有足够高的气体速度时，被输送物料在输送管道截面中呈均匀分布的状态下进行输送，灰气比往往较低，被称为稀相气力输送。

当输送管道内气体速度降低，被输送物料逐步集中在输送管道截面的底部，以绳状流，伴随着间歇沙丘流、不规则球状流或充满输送管道截面的栓状流进行输送时，灰气比往往较高，被称为浓相气力输送。

采用单一输送灰气比大小来区分浓相与稀相气力输送不够确切。

2. 输送浓度与输送灰气比

输送体积浓度是指气灰混合物体积流量中干灰体积流量所占百分数。在同一条输送管道中，输送浓度是随着压力降低而降低，是一个变数。根据不同输送类型的气力输送系统，控制输送管道入口输送浓度是输送系统安全可靠运行主要因素之一。

输送灰气比是指被输送干灰量与输送这些干灰量所消耗的输送压缩空气重量之比，用 $\text{kg}(\text{灰})/\text{kg}(\text{气})$ 表示。在同一条输送管道中，输送灰气比始终保持不变，是一个常数，因此可作为气力输送系统考核标准。

3. 考核输送灰气比的简易计算方法

采用输送系统出力与输送压缩机容量直接计算方法，即

$$\mu = \frac{q_m}{60 q_{V,N} \rho_N}$$

式中 μ ——输送气灰比, kg (灰) /kg (气);

q_m ——输送系统出力, kg/h;

$q_{V,N}$ ——输送压缩机容量, Nm³/min;

ρ_N ——在标准状况下的空气密度, 为 1.2kg/m³。

第二节 气力输送系统的分类和特点

一、气力输送系统的分类

在一般情况下, 气力输送是以压缩空气作为输送介质和输送动力的。物料通过发送设备和输送管道被输送到料库, 是一种两相流气力输送系统。气力输送系统类型众多, 因此按以下原则进行分类。

1. 按输送压力分类

- (1) 负压气力输送系统。一般为稀相输送。
- (2) 正压气力输送系统。有稀相输送和浓相输送。

2. 负压气力输送系统分类

- (1) 按受灰设备分类。有立式受灰器、CF 型受灰器、E 型受灰器。
- (2) 按真空设备分类。有蒸汽、水力抽气器负压气力输送系统, 水环式真空泵负压气力输送系统和负压风机 (罗茨风机) 负压气力输送系统。

3. 正压气力输送系统分类

- (1) 正压稀相气力输送系统。其发送设备有仓式泵 (上引式、中引式、下引式)、气力提升泵、喷射泵、螺旋输送泵、旋转喂料机等。
- (2) 正压浓相气力输送系统。按输送机理分类, 有柱塞流气力输送系统、低速栓状流气力输送系统、团状流 (球状流) 气力输送系统和绳状流气力输送系统。

4. 按输送方式分类

- (1) 间断式气力输送系统。在输送过程中受开泵压力和关泵压力控制, 发送设备内物料必须被输送到料库后才能输送下一套发送设备内的物料。
- (2) 连续式气力输送系统。发送设备一个接着一个地向输送管道内给料进行连续输送, 在输送过程中不受开泵压力和关泵压力的影响。

二、气力输送系统的基本特点

(一) 负压气力输送系统

负压气力输送系统是利用抽真空设备的抽吸作用, 使系统内的输送管道和设备处于负压状态, 将物料输送到气固分离设备进行气固分离, 固体物料被输送到料库贮存, 被分离

出来的净化空气通过抽真空设备排到大气。其系统基本特点如下：

(1) 在每个除尘器灰斗下安装一套受灰设备。数套受灰设备采用一条输灰管道串联，因此负压气力输送系统是一种静电除尘器灰斗内干灰集中与输送为一体的输送系统。同时，静电除尘器灰斗必须处于存灰状态下以定期出灰方式运行，在一条输送管道上所串联的受灰设备可以一套接一套地向输送管道送灰，因此又是一种连续输送系统。

(2) 由于受灰设备处于负压最低状态，因此对受灰设备的密封性能要求不高，设备结构简单。气固分离设备处于负压最高状态，对设备、阀门的密封性能要求很高，设备结构复杂，是负压气力输送系统的关键设备。

(3) 由于整套系统及其设备均处于负压状态下运行，因此不可能有气体或粉体向外泄漏，工作环境良好。

(4) 负压气力输送系统可以由多个输送单元系统组成，因此整套系统出力应是同时运行的输送单元出力之和。

(5) 由于受负压条件的限制，当输送发电厂静电除尘器灰斗内干灰时，其输送距离一般不应超过 300m。

(二) 正压气力输送系统

所有正压气力输送都是指从高压（即输送管道起始端）向低压（即输送管道末端）输送，但是正压气力输送系统类型众多，为便于叙述，按其输送基本流态，介绍其特点。

1. 栓状流气力输送系统

由 L 型仓泵向输送管道内输送一定料栓长度的物料，与输送压缩空气混合后形成气固混合物料栓。不论 L 型仓泵容积大小，在输送管道内的料栓长度都基本相同，是一种栓状流浓相气力输送系统，其基本特点如下：

(1) 在每个静电除尘器灰斗下安装一套 L 型仓泵。采用一条输送管道串联规格相同的同电场 L 型仓泵，但只能有一套 L 型仓泵向输送管道内送灰，不能两套 L 型仓泵同时向输送管道内送灰。栓状流气力输送系统是一种静电除尘器灰斗内干灰集中与输送为一体的输送系统；无论静电除尘器灰斗处于不存灰状态还是处于存灰状态下运行，其 L 型仓泵内干灰都必须被输送到灰库后才能输送第二套 L 型仓泵内干灰，因此是一种间断式输送系统。

(2) 与常规仓式泵气力输送一样，输送灰气比与输送距离成反比例关系。同时，由于栓状流气力输送的输送管道不能变径，在输送管道起始端（即高压端）向输送管道末端（即低压端）的输送过程中，输送压缩空气体积沿输送管道不断膨胀。这是输送管道末端流速高的主要原因，也是栓状流气力输送距离受到限制的重要因素。当输送静电除尘器灰斗内干灰时，其输送距离一般不大于 300m。

(3) 栓状流气力输送系统可以由多个输送单元组成，输送系统出力应是同时运行的输送单元出力之和。如果静电除尘器灰斗在不存灰状态下运行时，则其输送系统实际出力只能等于锅炉最大排灰量。

(4) 通常，静电除尘器灰斗下按一、二电场配置规格相同的 L 型仓泵和一条输送管道；三、四电场配置规格相同的 L 型仓泵和一条输送管道。两条输送管道因管径不同，不能互相切换运行。

2. 气锁阀正压浓相气力输送系统

气锁阀正压浓相气力输送是利用气锁阀发送器内流化装置将干灰经过流化后,由单个或多个气锁阀发送器同时向输送管道内输送流化灰,与从输送管道起始端输入的输送压缩空气混合后被输送到灰库。在输送过程中,流化灰利用颗粒周围的紊流所产生的动压进行输送。属于悬浮浓相气力输送类型。其基本特点如下:

(1) 在每个静电除尘器灰斗下安装一套规格相同的气锁阀发送器,采用一条输送管道串联同电场(或同排)气锁阀发送器,是一种将静电除尘器灰斗内干灰集中与输送为一体的气力输送系统。同时当静电除尘器灰斗处于定期出灰状态下运行时,气锁阀发送器具备一套接一套地向输送管道内输送流化灰的能力,因此又是一种连续式输送系统。

(2) 气锁阀正压浓相气力输送系统是一种连续式输送系统,改变了间断式输送系统在输送过程中输送灰气比与输送距离成反比例关系。影响输送灰气比的主要因素不是输送距离,而是需要根据输送系统各项参数通过计算确定。

(3) 由于输送压缩空气不通过气锁阀发送器,因此与仓泵型发送器相比,可以节省 $0.05 \sim 0.15\text{MPa}$ 仓泵本体压力损失。根据干灰在输送管道内的流态,可以适应输送管道分段变径的条件,因此可以优化计算输送管道末流速,为提高输送灰气比、延长输送距离创造了有利条件。

(4) 当静电除尘器灰斗采用定期出灰方式运行时,其输送系统出力可以按需要进行设计,即一般按锅炉8h内产生的灰量,输送系统在4h之内输送完毕设计,因此输送系统出力是锅炉额定排灰量的2倍。

(5) 由于气锁阀发送器装灰时间与输送时间之和一般不大于1min,因此干灰在发送设备内不容易被冷却,能保持干灰在良好的流动状态下被输送。

3. 流态化并联仓泵浓相气力输送系统

流态化并联仓泵浓相气力输送系统是一条输送管道上将同电场(或同排)流态化仓泵并联在一起,采用一台公用气动进气阀、一台公用气动出料阀和其中一只仓泵压力开关。在输送过程中,被并联仓泵同时装灰、同时输入压缩空气,进行增压、流化和输送。经过流化后的干灰在输送管道内沉积在管道底部,以绳状流进行流化输送,其系统主要特点如下:

(1) 在每个静电除尘器灰斗下安装一套流态化仓泵,采用一条输送管道串联同电场(或同排)流态化仓泵,按电场依次输送。是一种将静电除尘器灰斗内干灰集中与输送为一体的输送系统。同时由于并联仓泵在输送过程中受开泵压力和关泵压力的影响,必须将并联仓泵内干灰输送到灰库后才能输送第二个并联仓泵内的干灰,因此又是一种间断式输送系统。

(2) 采用多仓泵并联输送,可以提高输送灰气比,缩短输送时间,提高输送效率,但在输送过程中,由于受开泵压力和关泵压力的影响,因此不能改变输送灰气比与输送距离成反比例关系。

(3) 当静电除尘器灰斗处于不存灰状态下运行时,并联仓泵装灰时间始终大于输送时间,因此输送系统实际出力只能等于锅炉最大排灰量。同时,由于干灰在并联仓泵内停留

时间过长, 极容易因冷却吸潮, 因此增加了输送难度。

(4) 静电除尘器灰斗下, 按一、二电场配置规格相同的流态化仓泵, 配置一条输送管道; 三、四电场配置规格相同的流态化仓泵, 配置一条输送管道。当两条输送管道采用相同管径时, 可以互为备用。对于烟气布袋除尘器, 各排灰斗存灰量相同, 因此各排可配置规格相同的流态化仓泵。

(三) 几种气力输送系统技术参数比较 (见表 1-2)

表 1-2

几种气力输送系统的比较

序号	项 目	负压气力输送系统	正压气力输送系统		
			L 型仓泵	气锁阀	并联仓泵
1	每台锅炉额定排灰量(t/h)	13.5	28	28	28
2	输送当量长度(m)	275	300	1500	1000
3	输送系统最大出力(t/h)	27	34.5	65.57	41.78
4	需要输送空气量(m^3/min)	56.5	$13.60^{\text{①}} \text{Nm}^3/\text{min}$	$38.7^{\text{①}} \text{Nm}^3/\text{min}$	$26.33^{\text{①}} \text{Nm}^3/\text{min}$
5	输送灰气比	$15\text{kg(灰)}/\text{kg(气)}$	$34.76\text{kg(灰)}/\text{kg(气)}$	$23.35\text{kg(灰)}/\text{kg(气)}$	$22.12\text{kg(灰)}/\text{kg(气)}$
6	输送管道管径(mm)	$\phi 245 \times 8$	$\phi 168 \times 8$	$\phi 219 \rightarrow \phi 245 \rightarrow \phi 273$	$\phi 180 \rightarrow \phi 194 \rightarrow \phi 219$
7	输送速度(初始/末端, m/s)	14.89/22.04	5/18.23	7.56/13.75	8.06/15.39
8	系统压降($\times 9.8\text{Pa}$)	4400	20860	28450	28550
9	输送单位能耗 $\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{t}\cdot\text{km})$	3.17	7.25	2.28	3.30

注 1. 表内数据是根据计算例题的计算结果汇总而成。

2. 输送静电除尘器灰斗内干灰, 其堆积密度 $\rho_h = 0.75\text{t}/\text{m}^3$, 平均粒径 $d = 0.04\text{mm}$, 干灰温度 $t = 110^\circ\text{C}$ 。

3. 标准状态下, 空气密度 $\rho_N = 1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。

① 在标准状态下。

三、气力输送发电厂灰渣的优势

1. 与水力输送灰(渣)系统相比

(1) 不需要大量冲灰(渣)水量, 具有明显的节水效果, 对于缺水地区更重要。

(2) 没有灰场废水处理, 不存在灰场废水对厂区周围水系统的水质污染和灰场灰水对周围环境造成的污染, 具有明显的环境效益。

(3) 由于输送介质是压缩空气, 在输送过程中在一般情况下灰渣不会发生化学变化, 能保持灰渣活性, 有利于粉煤灰综合。

2. 投资效益

(1) 一般水力除灰系统有: 厂内除灰、厂外除灰、贮灰场和灰场回水等几个单项工程组成。虽然厂内除灰系统投资一般要比气力输送系统低, 但包括厂外除灰, 贮灰场及灰场回水等单项工程的投资费用, 则气力输送系统总投资要比水力输送系统低很多。

(2) 干灰(渣)可作为一种商品销售, 进行综合利用。例如在华东地区某发电厂, 气力输送系统总投资约 1000 万元, 而每年灰渣销售收入为 300~400 万元, 扣除成本后, 可在 3~5 年内回收气力输送系统总投资。