

燃煤电厂输灰系统及

RANMEI DIANCHANG SHUHUI XITONG JI

控制技术

KONGZHI JISHU

■ 齐立强 王少平 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

燃煤电厂 输灰系统及控制技术

齐立强 王少平 编著

北 京
冶金工业出版社
2014

内 容 提 要

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,燃煤电厂气力输灰技术得到了广泛的应用。本书对燃煤电厂气力输灰系统的运行方式、工作原理、系统控制及运行维护中常见故障的分析处理进行了系统的讲述。全书分为气力输灰系统和输灰系统控制技术两篇,共10章,内容包括粉煤灰物理化学特性及气力输送基础理论、燃煤电厂气力输送设备及系统运行、自动控制基础、开关量控制及可编程序控制器等,并对当前燃煤电厂应用较广泛的气力输送系统的控制过程进行了详细的阐述。

本书可供从事燃煤电厂气力输送技术的基础研究人员、运行和检修等工程技术人员及生产管理人员参考,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

燃煤电厂输灰系统及控制技术/齐立强,王少平编著. —北京:冶金工业出版社,2014.9

ISBN 978-7-5024-6726-5

I. ①燃… II. ①齐… ②王… III. ①燃煤发电厂—输灰系统—控制系统—研究 IV. ①X773.012

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第209174号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6726-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京佳诚信缘彩印有限公司印刷

2014年9月第1版,2014年9月第1次印刷

169mm×239mm;14.75印张;285千字;226页

58.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

随着国民经济的快速发展，燃煤发电厂发电机组的单机容量不断增大，其所排放的粉煤灰量大幅增加。而我国水资源、土地资源日益紧张，国家对环境保护的要求也越来越高，使得燃煤电厂气力输灰技术逐步推广。气力输灰具有大量节省冲灰水、利于粉煤灰的综合利用、减少灰场占地、避免灰场对地下水及大气环境的污染等优点。此外，干式除灰所得的粉煤灰已作为一种资源被广泛开发利用，在建工、建材等领域开辟了前所未有的市场，取得了明显的经济效益和社会效益。因此，近年来，气力输送技术在我国燃煤电厂的应用进入了快速发展阶段。并且，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，燃煤电厂气力输灰技术的应用前景将会越来越好。

在国内应用气力输灰系统的燃煤电厂中，有的是直接从国外引进的系统及设备，有的则通过合资方式，利用国外技术在国内生产的系统及设备。但在实际运行中，都存在着一些问题，如出力不足、堵管频繁以及管道磨损严重等。因此，对于气力输灰技术的基本理论及控制技术的研究与普及就显得尤为重要。

全书共两篇十章，第一篇介绍了粉煤灰气力输送应用基础和输送原理、气力除灰设备及除灰系统的组成；第二篇介绍了自动控制及开量控制系统基础，以及气力输灰系统的安装、运行控制，系统运行维护与故障分析等。

本书第一、二、四、六、七、八章由华北电力大学齐立强编写，第三、五、九、十章由福建龙净环保股份有限公司王少平编写，由于

II 前 言

经验和编撰水平有限，内容也难免有诸多不尽妥切之处，敬请读者指正。

本书在编著过程中华北电力大学原永涛教授给予了热情支持，并提供了不少宝贵资料，在此谨致敬意。

作 者
2014 年 5 月

目 录

第一篇 燃煤电厂气力输灰系统

第一章 粉煤灰物理化学特性	3
第一节 粉煤灰的矿物特征与化学成分	3
第二节 粉煤灰的密度、孔隙率和密实度	6
第三节 粉煤灰的粒径	9
第四节 粉煤灰的磨蚀性	11
第五节 粉煤灰的黏附性	14
第六节 粉体的流态化特性	17
第二章 粉煤灰气力输送基础	23
第一节 灰气混合物的基本参数	23
第二节 粉尘颗粒的沉降速度与悬浮速度	26
第三节 输灰管中粉体的运动特征	30
第四节 悬浮颗粒群在管道中的运动方程	35
第五节 气固两相管流的压力损失	44
第三章 气力输灰设备	46
第一节 供料系统	46
第二节 集料系统	65
第三节 气源设备及空气干燥装置	75

第四节 输灰管道及布置方式	83
第四章 气力输灰系统与运行	92
第一节 气力除灰系统的特点和基本类型	92
第二节 正压气力除灰系统	94
第三节 负压气力除灰系统	98
第四节 微正压气力除灰系统	101
第五章 高浓度气力输送技术	105
第一节 紊流双套管气力除灰技术	105
第二节 脉冲栓流气力除灰技术	108
第三节 小仓泵正压气力除灰系统	113
 第二篇 输灰系统控制技术	
第六章 自动控制基础	121
第一节 自动控制系统的基本概念	121
第二节 自动控制系统的动态过程	125
第三节 拉氏变换及传递函数	129
第七章 开关量控制系统	139
第一节 顺序控制基础	139
第二节 顺序控制系统和装置的分类	143
第三节 开关量发送基本原理	146
第四节 气动执行器	155



第八章 可编程序控制器	160
第一节 绪论	160
第二节 PLC 的结构与原理	168
第三节 PLC 的编程语言	173
第四节 PLC 的指令系统	177
第九章 气力除灰控制系统	193
第一节 正压气力除灰控制系统	193
第二节 负压气力除灰控制系统	202
第三节 微正压气力除灰控制系统	204
第十章 气力输灰系统的安装、调试、运行及常见故障	206
第一节 系统及设备的安装要求和注意事项	206
第二节 气力输灰系统的调试及常见故障分析	212
第三节 气力输灰系统的运行中常见故障分析	221
参考文献	226

第一篇

燃煤电厂气力输灰系统

RANMEI DIANCHANG QILI SHUHUI XITONG

第一章 粉煤灰物理化学特性

粉煤灰的粒度大小、形状及密度、电性质等物理性质和化学性质对其气力输送过程均有一定的影响。此外，湿度、颗粒紧密程度、透气性的好坏以及其他参数的变化也都会对输送过程产生影响。因此，我们常常面临这样的课题，即利用有限的知识来预测系统的操作性能，如物料在贮仓、料斗及管道中如何流动，自由流动还是强制性流动，均匀性移动还是非均匀性移动；透气性是否充分；吸收潮气并结块否；腐蚀或风化作用的影响；在料斗或贮仓中物料架桥、起拱或溢流；由于静电作用引起物料附着或黏着等。

上述的这些问题都和散状固体物料的基本性质和特征有关，而这些问题又决定了工艺过程、输送和贮存的方法以及选择系统适用的设备和器材类型。

第一节 粉煤灰的矿物特征与化学成分

一、粉煤灰的矿物特征

粉煤灰中大部分颗粒是无定形的玻璃体和含量变化很大的碳，而结晶相则以莫来石和石英为主，此外尚有少量磁铁矿、赤铁矿、方解石、长石、金红石等。

在显微镜下以透射光观察粉煤灰，除形状不规则的不透明炭粒和少量明晰可辨的玻璃屑、石英等颗粒外，主要是颜色深浅不一的圆球状和形状不规则的半透明颗粒。后者在正交镜下呈现出微弱的轮廓不明的干涉色，称为多孔玻璃体，造成干涉色的正是其玻璃体内所包裹着的莫来石等晶体。至于那些圆球，其颜色可在无色-红棕色-全黑之间变化。显然，它们主要是由玻璃体组成的。颜色的差异是由玻璃体中铁、钛之类着色能力很强的氧化物含量不同所致的，浅色的含铁量较低，深色的含铁量较高。那些不透明的富铁圆球又往往具有很强的顺磁性，能通过磁选把它们与密实玻璃珠分开，因此可以把它分成独立的一类——磁性玻璃珠。

我国粉煤灰颗粒的矿物组成见表 1-1。

二、粉煤灰形态特征

粉体形状是以其外表面状况来表示的颗粒特性。不规则度是实测的颗粒外表

表 1-1 我国粉煤灰矿物成分大致分布

矿物名称	莫来石	石 英	一般玻璃体	磁性玻璃体	碳
分布值/%	11.3~30.6	3.1~15.9	42.2~72.8	0~21.0	1.2~23.6
平均值/%	20.7	6.4	59.7	4.5	8.2

注：一般玻璃体包括密实玻璃体和多孔玻璃体，磁性玻璃体为包括有磁铁矿、赤铁矿晶体的富铁玻璃珠。

面积和把颗粒假想成球形的表面积之比，这样就可部分地确定颗粒的形状。颗粒形状对粉体许多性能的影响程度与粒度相比，往往是有过之而无不及。例如，颗粒的比表面积、流动性、密实度、填充层对流体透过的阻力以及在流体中的运动阻力（会影响气力输送速度）等。但是，颗粒形状的测量与表达都远远难于粒度。

粉煤灰颗粒的形态分类在国内外文献资料中很不统一，但一般可以分为三种颗粒：

（1）球形颗粒。这种颗粒由硅铝玻璃体组成，呈圆球形，表面一般比较光滑，有的有微小的 α -石英和莫来石析晶。

当经过高温区的时间较长，且燃烧温度较高时，煤粉颗粒很容易形成熔融体；或者温度虽然不是很高，但当煤粉颗粒含高熔点物质少、含低熔点的物质相对较多时，也很容易形成熔融体。熔融体有较低的黏度和较大的表面张力，在表面张力的作用下，熔融液滴很容易形成球形，若该液滴迅速冷却，即形成球形玻璃体。在这类球形玻璃体颗粒中，其中一种颗粒表面极其光滑，它富集了原灰中钙（CaO），称之为富钙玻璃体或富钙玻璃珠，简称 SRC，也称密实玻璃体或密实玻璃微珠；这些颗粒较细，尺寸多在几微米至几十微米。另一类微珠颗粒表面光滑程度较差，但外形仍呈球状，它富集了原灰中的铁（ Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 ），称之为富铁玻璃体或富铁玻璃微珠（简称 SRF），也称磁铁玻璃体或磁性玻璃珠，这些颗粒较大，尺寸在几十微米左右。

（2）不规则的多孔颗粒。这种颗粒分为两类：一类为多孔碳粒，另一类是由熔融的硅铝玻璃体组成的。

当燃烧温度比形成球形玻璃体温度低，煤粉经过高温区时间较短，颗粒中含有高熔点的物质较多时，不能使煤粉颗粒完全熔融，并具有较高黏度和较小的表面张力，不容易形成圆球形颗粒。煤粉在燃烧过程中，气体的形成和逸出使熔滴的体积急剧膨胀并形成多孔，冷却后即形成多孔玻璃体。在其颗粒形成过程中，若有一部分气体逸出，则此多孔玻璃体具有开放性孔穴，表面形成蜂窝状结构，用扫描电子显微镜即可观察出它的形貌；若有一部分气体未逸出，仍包裹于颗粒之中，则此多孔玻璃体具有封闭性空穴，内部形成蜂窝状结构。多孔玻璃体具有



较大的内比表面积，它的表面黏附有很多细小的密实玻璃微珠，还黏附有部分晶体矿物。这些颗粒很大，多在几十微米至几百微米。通过对多孔玻璃体进行机械磨细处理，可以使被黏附的微珠释放出来，并将改变多孔玻璃体的一系列物理特性。多孔玻璃体富集了粉煤灰中的硅和铝，但很少称它为富硅或富铝玻璃体，而仍称它为多孔玻璃体（PVG）。一般的多孔玻璃体既有开放性空穴，也有封闭性空穴。

（3）不规则颗粒。这类颗粒由两部分组成：一部分是结晶矿物的颗粒及碎片，另一部分是玻璃碎屑。晶体矿物主要有石英、莫来石、赤铁矿、磁铁矿等，还有少量碎屑状炭粒。

粉煤灰中玻璃体颗粒极其稳定，在堆场中经过三十余年的风化作用后，几乎没有发现任何裂纹、析晶和其他破坏的痕迹。

除了部分玻璃体、玻璃碎屑和石英颗粒外，显微镜下很少能找到某一物相组成的单独颗粒，即各种物相一般都以多相聚合体的颗粒形式存在。如在漂珠、密实玻璃珠、多孔玻璃体、玻璃碎屑及磁性玻璃珠中均存在玻璃体，但因其成分及与之共存的物相、结构特征上的差异，出现了不同的颗粒组分，而粉煤灰的一系列特征一般均由这些颗粒的性质反映出来。在尽可能不破坏其颗粒结构的条件下，对密实玻璃珠、多孔玻璃体、磁性玻璃体、炭粒及石英等主要颗粒组成进行分选是一种难度较大但又非常有意义的工作，特别是对粉煤灰中的石英和莫来石等晶体矿物，要选出来更是不易。

除以上三种颗粒外，粉煤灰中还有一种相对密度很小的漂珠，其相对密度小于1，是制造保温、耐火材料的良好原料。若不注意收集，会随水漂走流失，造成资源浪费。

三、粉煤灰的化学组成

通常粉煤灰化学成分全分析包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 SO_3 及飞灰中可燃物含量分析。若需要的话，还应分析出 Li_2O 、 P_2O_5 。

粉煤灰的化学成分主要为氧化硅、氧化铝，两者总含量一般在60%以上。有些原煤成分特殊，使粉煤灰的氧化钙含量在10%以上；有些原煤中黄铁矿含量很高，致使粉煤灰中 Fe_2O_3 含量较高。

国内外很多研究学者根据含钙量将粉煤灰分为两大类：即低钙型粉煤灰和高钙型粉煤灰。当燃用烟煤和无烟煤时，所得多为低钙型粉煤灰；燃用次烟煤或褐煤时，所得多为高钙型粉煤灰。高、低钙型粉煤灰的界限，并无一个定值，一般将 CaO 含量在8%以上者视为高钙型粉煤灰。按联合国组织欧洲经济委员会的推荐，粉煤灰可分为硅酸盐粉煤灰、铝质粉煤灰和钙质粉煤灰。也有人建议将粉煤

灰按硅质、钙质和铁质划分类别。

我国粉煤灰中 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SO_3 含量偏低，烧失量偏高，熔融矿物总量（即 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 ）也低。我国粉煤灰化学成分如表 1-2 所示。

表 1-2 我国粉煤灰的化学成分分布

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	C
含量/%	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

炭粒尽管不属于粉煤灰的化学成分，但却是粉煤灰极为重要的物质组分。因此在对粉煤灰的化学成分分析报告中，粉煤灰的含碳量是不可缺少的一项指标。

粉煤灰含碳量与煤种、煤粉细度、锅炉燃烧方式、容重和收尘方式等有关，而炭粒的结构类型则与煤种关系最为密切。烟煤煤粉燃烧时，除含有较多的碳外，还有较多的挥发分和煤焦油等组分，加热时产生胶质体，在短暂的高温热动力作用下，挥发份和煤焦油等组分急剧膨胀，发泡排气，氧化燃烧和熔融。其中大部分经氧化损失掉之外，少量经急冷残留下来的颗粒形成了多孔炭粒。无烟煤颗粒燃烧时，含碳量很高，挥发分和焦油很少，质地致密，在短暂的高温热动力作用下，除主要因氧化燃烧损失外，很少发泡排气、膨胀和熔融，只是质地变得较燃烧之前疏松，所以在急剧冷却后，仍保持着稍加钝化了的棱角和外形。

若将粉煤灰中的漂珠、密实玻璃体、磁性玻璃体，多孔玻璃体与炭粒进行比较，在物理特性方面亦有很大的差异。富铁玻璃体、密实玻璃体的相对密度、容重均较大，粒径及比表面积均较小；而炭粒和多孔玻璃体，相对密度和容重均较小，粒径和比表面积均较大。这些都对粉煤灰的输送有着一定的影响。

第二节 粉煤灰的密度、孔隙率和密实度

一、粉煤灰密度

物质的密度即为单位体积或容积内该物质的质量，即 $\rho = m/V$ 。对于一种单相物质，如液体、气体及玻璃、钢材、塑料等密实固体材料，质量 m 和体积 V 存在着一定的相关性，其体积 V 在常温、常压下是一常数，当温度、压力发生变化时，其密度可以通过一定的函数关系计算出来。而诸如粉煤灰等粉体物料却不同，它是由无数微细固体颗粒聚合在一起的松散物质，属于非单相物质。从表面上看，它似乎属于固体，但是在颗粒之间及颗粒表面的孔隙和缝隙中充满了气体，因此粉料是由固体和气体组成的气固混合物，属于两相物质。如果将其吸附

的水分考虑在内, 则成为更为复杂的气、固、液三相混合体。因此粉料的体积密度不能单纯按固体考虑。粉煤灰的情况更为复杂, 因为粉煤灰中不同的颗粒, 其粒度、比表面积、表面形状等均有很大不同, 因而灰体松散性和孔隙率也就不同。灰的粒度越细, 比表面积越大, 孔隙率就越高, 体积 V 也就越大, 因而密度也就越小。即使同一种粉煤灰, 其密度也会因所处的环境温度、压力的不同而不同。

在工程上, 根据用途的不同, 一般将粉料密度划分为堆积密度、视在密度、真密度和气化密度等几类。在粉体气力输送技术中应用最多的是堆积密度、真密度和气化密度。

(一) 堆积密度 ρ_d

粉体的颗粒与颗粒间有许多空隙, 在粒群自然堆积时, 单位体积的质量就是其堆积密度, 或以一定的方法将颗粒物料充填到已知的容器中, 容器中粉料的质量除以容器的体积即为粉体物料的堆积密度。

堆积密度通常采用量筒测定, 按下式计算:

$$\rho_d = (G_2 - G_1) / V_d \times 1000 \quad (1-1)$$

式中 ρ_d ——粉煤灰的堆积密度, kg/m^3 ;

G_1 ——量筒质量, kg ;

G_2 ——量筒与灰样的总质量, kg ;

V_d ——量筒的容积, L 。

粉煤灰的堆积密度大多在 $500 \sim 800 \text{kg}/\text{m}^3$ 之间变化。粉煤灰的堆积密度是灰斗、灰库设计的主要参数之一。

(二) 真密度 ρ_p

真密度特指粉料质量 m 与其固体颗粒净体积 V_s 之比, 即:

$$\rho_p = m / V_s \quad (1-2)$$

颗粒净体积不包括颗粒之间及颗粒的表面孔隙和缝隙中的气体体积。由于颗粒表面孔隙和缝隙中的气体与颗粒之间的附着力很强, 常规的液体浸泡法 (如长颈比重瓶法) 是不能将之排除的。目前有效的方法是抽真空法和煮沸法。

真密度被广泛应用于燃煤电厂除尘和除灰技术中, 是除尘除灰系统设计计算的最基本参数。需要指出的是, 粉煤灰中存在大量的空心漂珠, 空心漂珠中含有 N_2 、 O_2 等气体。这部分特殊颗粒内的气体是处于封闭状态的, 无法也不必将其排除, 在除尘、除灰技术领域将此部分气体视为颗粒的一部分, 因此粉煤灰真密度的“颗粒净体积”应该包括空心漂珠内部的封闭气体。粉煤灰的真密度通常在 $1.8 \sim 2.4 \text{g}/\text{cm}^3$ 之间波动 (表 1-3)。

表 1-3 我国若干电厂粉煤灰物理性质

名称	表观密度 /g · cm ⁻³	堆积密度 /g · cm ⁻³	真密度 /g · cm ⁻³	80μm 筛余量 /%	45μm 筛余量 /%	透气法 比表面积 /cm ² · g ⁻¹	标准稠度 需水量 /%
范围	1.92~2.85	0.5~1.3	1.8~2.4	0.6~77.8	2.7~86.6	1176~6531	27.3~66.7
平均值	2.14	0.75	2.1	22.7	40.6	3255	48.0

(三) 气化密度 ρ_q

粉煤灰的气化密度是专门针对灰层处于气化状态时定义的。当灰层在气化风的作用下处于气化状态时, 体积膨胀, 孔隙率大大增加。此时单位体积粉煤灰的质量称为气化密度。很显然, 粉煤灰的气化密度 ρ_q 小于堆积密度 ρ_d 。气化密度的大小取决于气化效果的好坏, 而气化效果与气化设备形式、气化风量和风压、粉煤灰性质等因素有关。从理论上讲, 当风量达到使灰层充分流态化的临界气化风量时, 粉煤灰的孔隙率达到最大, 此时气化密度 ρ_q 最小; 当气化风量为零时, $\rho_q = \rho_d$ 。在同等气化风量下, 气化效果的好坏还取决于粉煤灰自身的粒度、湿度、温度以及灰层厚度等一系列因素。因此, 在工程设计中, 粉煤灰的气化密度 ρ_q 应通过实测确定。当无法获得实测数据时, 也可按下式确定:

$$\rho_q = 0.75\rho_d \quad (1-3)$$

气化密度 ρ_q 也是粉煤灰气力输送系统某些设备, 如灰斗气化装置、灰库气化装置、空气斜槽以及流态化仓泵设计中的主要参数之一。

二、孔隙率和密实度

当粉煤灰处于自然堆积状态时, 其含有的气体体积与其堆积体积之百分比即为孔隙率, 用 ε 表示; 同理, 其颗粒体积与堆积体积之比即为密实度, 用 ψ 表示。孔隙率与密实度为互补关系, 即:

$$\varepsilon + \psi = 1 \quad (1-4)$$

因为

$$\psi = V_s / (V_s + V_a) \quad (1-5)$$

$$\psi = [m / (V_s + V_a)] / (m / V_s) \quad (1-6)$$

所以, 密实度与堆积密度、真密度存在下列关系:

$$\psi = \rho_d / \rho_p \quad (1-7)$$

同理, 孔隙率可用下式表示:

$$\varepsilon = 1 - \rho_d / \rho_p \quad (1-8)$$



第三节 粉煤灰的粒径

一、粉体颗粒的粒径

粉体颗粒的大小是粉尘最基本的特性之一。颗粒大小通常以粒径表示，可是，粉尘一般都指包含各种不同大小颗粒在内的粒子群，单个颗粒的粒径是用肉眼难以直接观察得到的，因此，对于粉尘的大小通常以粒子群的“粒度”来表示。

粉煤灰的许多物化性质都与粒度有着密切的联系。粉煤灰作为大量固体微粒的聚合体，其整体粒度的“大小”取决于单一颗粒的“粒径”分布。粒径一般用来描述单个粒子的“大小”，粒度通常用于描述粉料的“粗细”，这也是“粒度”和“粒径”的微小区别所在。

在不同的应用领域，由于对粒径“大小”的观测方法不同，形成了几十种不同的粒径定义。但总体上不外乎两大类型：一类是几何粒径，一类是物理粒径。

所谓几何粒径，是对颗粒的“几何尺寸”大小的度量，如用显微镜法测量的长轴径、短轴径、定向径，用筛分法测量的筛分径等。这类粒径主要与颗粒的外形尺寸有关，而与其密度、质量等物理特性无关。

所谓物理粒径，是指与颗粒的诸如阻力特性、沉降速度等某种物理特性相关的粒径，如阻力径、自由沉降径、空气动力径和斯托克斯（Stokes）径等，分别定义如下：

（1）阻力径 d_d 。在相同气体中，如果尘粒的运动阻力与某一处于相同运动速度的假想规则球体的运动阻力相同，则该球体的直径即被定义为尘粒的阻力径。

（2）自由沉降径 d_f 。当尘粒在特定介质（气体或液体）中作自由沉降运动时，如果其自由沉降速度与某一密度相等的假想规则球体相同，则该球体的直径即被定义为尘粒的自由沉降径。

（3）空气动力径 d_a 。当尘粒的沉降速度与处于相同气体中的，且密度等于 1g/cm^3 的球体沉降速度相同时，则该球体的直径即被定义为尘粒的空气动力径。

（4）Stokes 径 d_s 。特指在斯托克斯流态下（层流流态，颗粒的雷诺数 $Re < 0.2$ ）的自由沉降径。其数学表达式为：

$$d_s = [18\mu v_c / (\rho_p - \rho_a)g]^{1/2} \quad (1-9)$$

式中 μ ——空气动力黏性系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；