 心小世大，心大世小

粉体工程学

Powder Engineering

李玉海 赵旭东 张立雷 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

粉体工程学

Powder Engineering

李玉海 赵旭东 张立雷 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

粉体工程学是一门以工业生产中的颗粒物为研究对象,研究其在生产中的运动规律、性质和应用的综合性的基础学科。

本书的特点是集趣味性、实用性与科学性于一体,结合能量学理论,以颗粒的共性为重点,结合实践,介绍颗粒的测量技术、力学运动和聚集特性、处理与制备技术等;为粉体科学的进一步理论研究和生产实践提供新的理论视角和应用指导。它也是一本以颗粒为核心来认识世界的读物。

本书适合于作为高等院校相关专业教材,教学时数为30~50学时,可根据内容自行调整。

图书在版编目(CIP)数据

粉体工程学/李玉海,赵旭东,张立雷编著. —北京:
国防工业出版社,2013. 12

ISBN 978-7-118-09261-5

I. ①粉… II. ①李… ②赵… ③张… III. ①粉体—
研究 IV. ①TB44

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第015428号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15¼ 字数 359 千字

2013年12月第1版第1次印刷 定价 30.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

所谓粉体是指微小颗粒物的集合,即颗粒群。颗粒物占有一定空间,从颗粒尺寸方面讲,大到星球,小到基本粒子,都叫颗粒,都属于粉体理论的研究范畴。

颗粒也是地球上存在最多、并为人们所熟悉的物质类型之一,在自然界、工业生产以及人们的日常生活中随处可见。譬如,自然界的雨雪、岩石,生物体组织细胞,工业生产中的催化剂颗粒、药片、矿石,生活中的谷物、咖啡,甚至道路交通中的汽车、宇宙中的星球碎片都属于颗粒物。

单个颗粒的物理性质十分简单,但是大量颗粒的集体行为却极其复杂。大量颗粒组成的离散态物质体系表现出许多不同于固、液、气物质的奇特现象,具有独特的性质和运动规律。譬如,山体滑坡、沙丘演化、加压膨胀、粮仓效应、巴西果效应、结拱效应、崩塌等研究理论。

由于对颗粒物运动规律的研究和正确理解具有重要的科学意义和应用价值,所以,近年来颗粒物研究逐步成为物理学研究中的一个活跃领域。Science 杂志于 2005 年把颗粒物运动列为 100 个科学难题之一。

粉体工程学则是以生产中的颗粒物为主要研究对象,研究其在生产中的运动规律和性质的一门集材料、化工、冶金和矿业等专于一体的综合性学科,也是材料科学与工程专业的一门专业基础课程。它也是近代高新技术、新材料发展的产物。

为便于全面系统地掌握粉体的理论和知识,本书特别引入了《能量学与哲学》中的能量理论;从粉体科学的角度,结合工程实践案例,为材料、化工、选矿、冶金、机械等专业人员的科研、设计、管理提供理论指导和帮助。本书的研究重点是以材料工业的科学研究及生产过程中具有普通性或共性内容为主,并介绍与之相关的工程设计和最新理论和技术。

根据粉体存在和应用的广泛性与复杂性,本书将按照单元模块呈现给大家。内容包括:颗粒的自然属性、颗粒的测量技术、颗粒的力学特性、颗粒的运动特性、颗粒的聚集特性、颗粒的处理技术、颗粒的形成和制备技术等。

通过本课程的系统学习,理解和掌握“粉体工程学”的基本概念、基本理论、基础知识,以及有关粉体制备与处理的原理、工艺、流程及装备技术,了解粉体加工设备的工作原理、特性参数与性能使用等知识;培养读者发现问题、分析问题、解决问题和预测问题的能力,激发读者的科研和实践的创新意识和能力,为今后从事有关粉体工程技术工作打下基础,为培养高级应用型工程技术人才创造必要条件。

本书集趣味性、实用性与理论性为一体。在理论研究上,深入浅出;在实践应用上,浅入深出;在阐述中,将文理思想与工程实践原理相结合并蕴于字里行间。内容涉猎广泛,思维跨度大,这虽然给部分读者造成了阅读障碍,但是也可能会把读者的思维和视野带向一个更为深邃的世界。

与其说本书是一本工科教材,不如说是一本以颗粒为核心来认识世界的读物,不如说是一本以颗粒为基点对企业生产乃至对社会和世界进行研究的著作。

参写本书的还有太原理工大学教师赵旭东、张立雷,其中赵旭东编写了第六、七、十二章,张立雷编写了第九、十三章。

书中内容有不当之处,欢迎不吝指正。

编 者

目 录

第一章 颗粒的几何性质	1
第一节 穿越在宏观与微观之间	1
第二节 漫话粉尘	3
第三节 粉尘类型	5
第四节 当量径的计算方法	7
第五节 粒度形状修正	12
第六节 粒度分布	15
第七节 颗粒形状的数学分析	18
第二章 粒度的测量方法	25
第一节 筛分法	25
第二节 显微镜图像法	27
第三节 扫描探针显微镜	30
第四节 激光法	34
第五节 电传感法	37
第六节 气体吸附法	39
第七节 沉降法	42
第八节 其他测试方法	43
第九节 测试技术	44
第三章 颗粒群填充特性	46
第一节 颗粒层填充结构	46
第二节 颗粒最大(小)填充原理	52
第三节 填充率粒度原理	56
第四节 壁效应	59
第五节 影响颗粒填充的因素	61
第四章 湿颗粒群的特性	64
第一节 颗粒的润湿性	64
第二节 界面现象	65
第三节 表面张力	67
第四节 液体桥附着力计算	73
第五章 粉体力学	81
第一节 应力分析	81
第二节 颗粒间的附着力	83

第三节	粉体的摩擦特性	84
第四节	影响粉体摩擦角的因素	89
第五节	粉体贮仓的容量计算	90
第六节	能量扩散原理	91
第七节	粉体压力计算	93
第六章	颗粒群的流动	99
第一节	重力流动	99
第二节	Jenike 理论与质量流料仓设计	105
第三节	压缩流动	107
第四节	偏析现象	112
第七章	颗粒流体力学	116
第一节	粘度	116
第二节	颗粒在流体中的沉降速度方程	119
第三节	沉降速度公式的修正	124
第四节	透过流动现象	126
第五节	悬浮	133
第八章	粉碎	136
第一节	粉碎概述	136
第二节	粉碎机理	141
第三节	粉碎速度理论	144
第四节	粉碎能量理论	148
第五节	硬度	151
第六节	硬度原理	154
第七节	易磨(碎)性	155
第八节	影响粉碎效率的因素	158
第九章	机械能化学	163
第一节	机械能化学概述	163
第二节	机械能活化后物理化学性质的变化	167
第三节	矿物的表面改性	169
第十章	分级与分离	172
第一节	概述	172
第二节	重力原理	173
第三节	浮选式原理	175
第四节	离心原理	178
第五节	过滤原理	180
第六节	电磁原理	182
第七节	物理式分级(离)原理	187
第八节	超细微颗粒的分级(离)处理技术	188
第九节	分级(离)设备的评价	189

第十一章 混合与造粒	194
第一节 混合	194
第二节 造粒	196
第十二章 粉尘的燃烧与爆炸	201
第一节 粉体燃烧	201
第二节 粉尘爆炸	204
第三节 防止粉尘爆炸	209
第四节 从“第一杀手”到“能源新宠”	215
第五节 爆炸加工	216
第十三章 纳米世界	218
第一节 纳米技术	218
第二节 纳米材料	220
第三节 纳米工程	224
第四节 纳米科技是天使还是魔鬼	226
第十四章 颗粒演化及粉体加工	228
第一节 颗粒的演化	228
第二节 能量自然分配原理	229
第三节 能量万有作用原理	231
第四节 粉体加工	233
附录一 标准筛比较表	237
附录二 常用物质密度表	238
附录三 动力粘度单位换算表	238
附录四 水和空气的粘度系数	238
附录五 希腊字母表	239
附录六 表面张力单位换算	239
附录七 英语词汇	240
参考文献	242

第一章 颗粒的几何性质

第一节 穿越在宏观与微观之间

传说中的“道士穿墙”、魔术中的“瓶中取物”、小说中的“遁地术”、曾经幻想的“千里眼,顺风耳”都是人类想象的一种隔物穿越。

一、量子尺寸效应

粒度效应是指随着粒度变小,其活性、熔点、强度、硬度等性能或性质都会发生变化的现象。当颗粒小到几百个纳米时,储存和运输都很不容易。

量子尺寸效应是指微观粒子呈现出一系列与原宏观物体截然不同的特性,是粒度效应的“超级”表现。例如,金属导体在超微颗粒时可以变成绝缘体,比热亦会反常变化,光谱线会产生向短波长方向的移动,这就是量子尺寸效应的宏观表现。

因此,对超微颗粒必须考虑量子尺寸效应,因为原有的宏观规律已不再适用。比如,在微电子、光电子器件的设计制造上,当电路的尺寸接近电子波长时,电子就通过隧道效应而溢出器件,使器件无法正常工作。也就是说,隧道效应成了微电子器件进一步微型化的极限。

二、量子隧道效应

隧道效应是微观粒子运动产生的一个量子效应,又称势垒贯穿。

运动的粒子能否穿越一个高于其能量的势垒?什么是“势垒”?或许可以把它理解成敌对力量,也可以去查阅一下量子力学有关书籍。

经典物理学认为,粒子越过势垒,有一阈值能量,若粒子能量小于此能量,则不能越过;若大于,则可以越过。

量子力学则认为,即使粒子能量小于阈值能量,很多粒子冲向势垒时,除了在势垒处一部分粒子反射外,也会有一些粒子能穿越过去,好像有一个隧道,故名“隧道效应”。实际情况也正是如此。

比如,在经典物理中,光在光纤内部全反射。而在量子物理中,激光可以从一根光纤内通过隧道效应进入相距很近的另一个光纤内部。分光器就是利用量子隧道效应而制成的。

利用隧道效应,1986年开发了原子力显微镜(AFM),可以测出原子间的微作用力。还可以制成分辨率为0.1nm(1Å)量级的扫描隧道显微镜(STM),探测样品的表面形貌。

三、穿越原理

有人认为产生隧道效应的原因是电子的波动性,也有人认为是量子跃迁,电子迅速穿越势垒。本书作者认为,它是一个“能耗、场与概率”的问题。

1. 穿越能耗原理

该原理内容为势垒的厚度越厚,颗粒间宽度越小,则能耗越大,越难穿越。

2. 穿越概率原理

该原理内容为粒子数量越多,其中存在的“高能粒子”的概率越大,越容易贯穿成功。构成势垒的颗粒越大,分布密度越大,贯穿成功的概率就越小。

理论计算表明,对于能量为几电子伏的电子和方势垒,当势垒宽度为 1\AA 时,粒子的透射概率达零点几;而当势垒宽度为 10\AA ①时,粒子透射概率减小到 10^{-10} ,已微乎其微。

3. 穿越场原理

该原理内容为能量场分布越均匀,场强越大,粒子则越难穿越。

四、宏观的“隧道效应”与视觉误差

其实,隧道效应不仅仅是一种微观世界的量子效应,对于宏观现象,实际上也在发生。比如,近年来人们发现一些宏观物理量(比如微颗粒的磁化强度、磁通量)也存在宏观量子隧道效应。

实验方法不同,导致的误差、看法也不同。在微观实验中,我们观察的对象是若干个小微粒;而在宏观现象中,我们看到的是由无数个小颗粒组成的“大颗粒”。这容易引起视觉误差。

一叶障目,不识泰山。很多现象由于熟视无睹而出现感觉误差。比如,近距离旋转的大颗粒球之间构成了一个强“势垒”,一些粉尘能否通过呢?我们不妨这样来看——首先,小颗粒被大颗粒吸附,然后又被“甩”出去,这不就通过了吗!当然微观穿越情形比较复杂,考虑因素也比较多,比如考虑库仑力、万有引力等。

在通常的情况下,隧道效应不影响经典的宏观效应,是因为隧穿几率极小,影响到结果的误差也小。而在微观领域中,宏观上的确定性往往具有不确定性,是因为我们观察实验的误差被放大的缘故。

五、社会中的“隧道效应”

隧道效应在社会中也普遍存在。例如,法律是一个高“势垒”,但依然有人以欺诈、伪装的方式,钻法律“空子”,侵害和掠夺公共利益;监狱是一个高“势垒”,但依然有犯人成功越狱;另外,穿越拥挤的人群、小偷的入门行窃等,都属于“隧道行为”。

人类的进化是否也在上演“穿越”呢?有一个现象——人类多出身材矮小的“强人”,比如拿破仑。你如果注意一下周围的朋友也会发现,一些个子偏小的人都很聪明。

人类的原始生存竞争更多的是来自体力竞争。“大个子”占有先天优势。“小个子”如何不被消灭呢?如何才能穿越无形的剿杀呢?也只有靠聪明和智慧来穿越了。这不由地让人去想:是为了“穿越生存势垒”进化成小个子呢,还是身为小个子为了穿越而进化了智慧呢——人类的智慧表现在利用能量的能力上。也许两者都有吧。

① 埃,记为 \AA 或“ \AA ”,公制长度单位,为纪念瑞典物理学家埃斯特朗而定; $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ 。

六、“隧道效应”例子

1. 隧道二极管

1957年,索尼公司的江崎玲於奈发明了隧道二极管(也称江崎二极管)。

当某一个极上加正电压时,通过管的电流将随电压的增加而很快变大,但在电压达到某一值后,忽而变小,小到一定值后又急剧变大。这种变化关系只能用量子力学中的“隧道效应”加以说明。

由于江崎二极管具有负电阻,并且隧道效应发生速度异常迅速,可用于低噪声的放大器、振荡器或高速开关器件等,尤其可以用来提高电子计算机的运算速度。目前主要用掺杂浓度较高的锗或砷化镓制成。

1973年,江崎和发现超导体中隧道现象的I. 加埃沃、B. D. 约瑟夫森共享了诺贝尔物理学奖。

2. 约瑟夫森效应

1962年,年仅20岁的英国剑桥大学研究生约瑟夫森预言,当两个超导体之间设置一个绝缘薄层构成“SIS”(Superconductor-Insulator-Superconductor)时,电子可以穿过绝缘体从一个超导体到达另一个超导体。这一预言不久也被实验观测所证实,并称之为“约瑟夫森效应”。

3. 隧道巨磁电阻效应

所谓的巨磁电阻效应是指:当外磁场发生改变时,磁性材料和非磁性材料相间的薄膜层(几个纳米厚)中的电阻会发生巨大变化。

1994年发现,在“磁性金属/非磁绝缘体/磁性金属”(FM/I/FM)型隧道结Fe/Al₂O₃/Fe中,磁电阻变化率也出现了异常变化。

巨磁电阻效应使硬盘读取磁头发生了革命性变化——巨磁电阻磁头能够通过电流变化读取存储在硬盘上的磁信息。由于对微磁场高度敏感,巨磁电阻效应使硬盘磁片“大瘦身”——硬盘的体积不断缩小,但容量却不断变大。

2007年,法国科学家艾伯特·费尔和德国科学家彼得·格林贝格尔因在1988年发现巨磁电阻效应荣获诺贝尔物理学奖。

第二节 漫话粉尘

一、粉尘与雨雪

如果天空中没有粉尘,水分再大也无法凝结成水滴,也就没有降雨,也就没有水的循环。因为水分聚合起来的水滴很小,再加上水的饱和蒸汽压很大,所以不易形成降雨。

空气中有了粉尘之后,它能吸附水汽变成溶液并形成水滴,其饱和水汽压力大大减小,使水汽易于凝结,变成云、雾、雪等。在这一变化过程中,粉尘起了“凝结核”的作用。

二、粉尘与气温

大气中粉尘会影响地球温度的变化,过多或过少的粉尘都将对环境产生灾难性的后

果。1816年,印尼爪哇火山喷射出的烟尘反射和吸收了大量阳光,出现“阳伞效应”,导致那一年该地区气温的降低,出现了“寒夏”。

总之,没有粉尘,就没有变幻莫测的云、雾、雨、雪,就没有绚丽的彩虹,自然景观大为逊色。

还会有人类吗?如果有,人会是一个什么模样呢?

三、粉尘与天空色彩变化

如果天空中没有粉尘,就没有蔚蓝的天空。阳光由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光组成。可见光的波长在380~780nm之间,在电磁波谱^①中的位置如图1-1所示。波长越大,散射越强。白光组成的蓝、紫色光波长较短,散射作用最强;红色光波长较长,散射较弱,大部分透过。

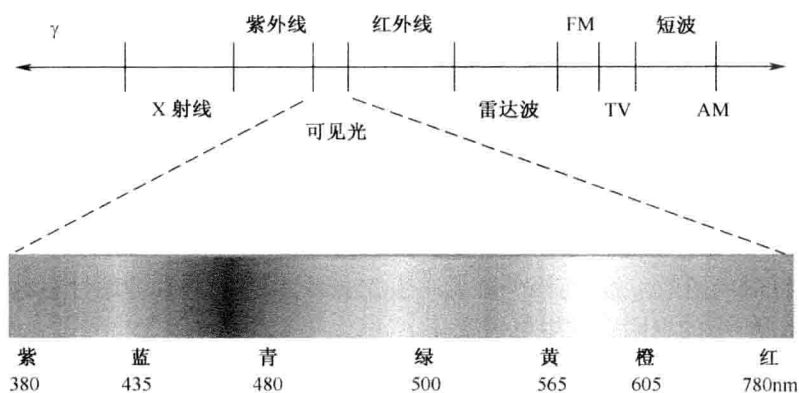


图 1-1 可见光谱与电磁波谱

当阳光进入大气层后,遇到空中的粉尘和水汽就发生散射,波长越短的光越易发生散射,空气密度越大散射光越强。而空气密度是随海拔高度的增加而减小的,因此在8000m以下的低空,波长较短的蓝色光大量被散射,人类就可以从地面上看到“秋水蓝天共一色”的壮丽景观。随着海拔增加,大气对阳光的散射能力越来越弱,8000m以上天空变为青色,13000m以上为暗紫色。在20000m以上,由于散射作用消失,天空几乎变成暗黑色。

如果天空中没有粉尘,就没有朝霞的灿烂和夕阳的绚丽。当太阳在地平线的时候,光线穿过大气,这时,粉尘和水汽把阳光中的蓝光和绿光散射了,而波长较长的红光则直穿过大气,尽收眼底。“日照香炉生紫烟”,出现“紫色”烟汽也缘于散射的作用。

1883年,印尼克拉克脱火山爆发,大量火山灰弥漫天空,当地人们看到的太阳总是火红的,这种景观持续了两年之久。

^① AM, Amplitude Modulation(调幅),即通常说的中波,范围在530~1600kHz。

FM, Frequency Modulation(调频)。

四、粉尘危害

在大气中,粉尘及粉尘与水汽形成的雾霾污染空气,沾污、侵蚀建筑物,危害人类健康,是诱发多种疾病的主要原因。含铬、锰、镉、铅、汞、砷等的“毒尘”,当吸入人体后,小于 $5\mu\text{m}$ 的微粒,极易深入肺部,引起肺炎、矽肺或肺癌。沉积在肺部的污染物一旦被溶解,就会直接侵入血液,引起血液中毒,未被溶解的污染物,也可能被细胞所吸收,导致细胞结构的破坏。

大气中的一些粉尘还可能形成“酸雨”等,影响土壤和庄稼收成。

粉尘还会发生爆炸,造成人员伤亡和财产损失。内容详见第十二章第二节。

五、历史悬疑

所谓“核冬天”假说,是指大规模核爆炸引起的粉尘或因大火产生的浓烟会长时间遮挡住阳光,使地球处于黑暗和严寒之中,植物无法进行光合作用,导致生物链断裂,威胁动植物的生存。

公元6世纪,地球上首次爆发的黑死病席卷了整个罗马帝国。这场瘟疫持续近60年,死亡人数近1亿人,导致了东罗马帝国在公元7世纪的崩溃。这场浩劫的起因是什么呢?答案一直扑朔迷离。

英国科学家研究发现(摘自<http://www.sina.com.cn> 2004年02月07日天府早报),爆发黑死病可能起源于一颗小彗星的爆炸。

在彗星高速进入地球大气层后,在其后形成一个真空区,在强大的不平衡的空气压力之下,彗星最终发生大爆炸,造成灰尘遮天蔽日,引发全球“核冬天”——农作物绝收,食不果腹的人畜尸殍遍野,幸存者也由于身体对疾病的抵抗力下降而接连病倒。乘虚而入的黑死病迅速在欧洲大陆蔓延开来。

证据1:古树年轮生长暂停。科学家们研究了3种树的年轮,从爱尔兰沼泽地里保存下来的橡树,到年代久远的美洲松树,发现在公元536年到545年期间,地球上的植物生长出现了“暂停”和“休眠”。这与“核冬天”假说的情形如出一辙。

证据2:古书记载“遮天蔽日”。中国古书的确有关于当年“灰尘遮天蔽日”的记载。更为巧合的是,地中海地区的历史遗著也有“干雾”笼罩地球长达一年的记述。

彗星不仅(可能)撞垮罗马帝国,而且还可能与恐龙灭绝有关。6500万年前,一颗小行星撞击到墨西哥尤卡坦半岛后,地球上出现了“核冬天”,导致地球温度骤降,使恐龙从此永远从地球上消失。

第三节 粉尘类型

一、粉尘类型

粉尘随处可见。土壤、岩石风化后形成许多细小的砂尘,它们伴随着花粉、孢子以及其他有机颗粒在空中随风飘荡;工业生产和交通运输产生了许多尘粒;燃烧柴草、煤等生成的烟尘;面粉加工产生的扬尘;采石场破碎作业产生的矿尘,火山爆发引发的火山灰,

等等。

粉尘是固体物质细微颗粒的总称。

粉尘的粒径细至 $0.1\mu\text{m}$,粗到数毫米。虽然国际标准化组织规定:粒径小于 $75\mu\text{m}$ 的固体悬浮物定义为粉尘。但是,与粉尘类似的名称还有粉末、灰尘、尘埃,实际上,它们的含义没有明显的大小界限。我们看到的烟尘或烟雾,粒度一般在 $1\mu\text{m}$ 以下,甚至在 $0.5\mu\text{m}$ 以下。

2011年11月1日,我国环保部门实施新的《环境空气PM10和PM2.5的测定——重量法》。在大气污染控制中,根据大气中粉尘微粒的大小可分为:

1. 总悬浮颗粒物

悬浮在空气中的粒径 $\leq 100\mu\text{m}$ 的颗粒物,称为总悬浮颗粒物(TSP),是大气污染的主要指标。

2. 降尘

当颗粒直径 $\geq 10\mu\text{m}$ 时,在重力作用下,可在较短的时间内沉降到地面,所以称其为降尘。

3. PM10与PM2.5

PM,即Particulate Matter简称。

PM10是指颗粒直径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的浮游状固体颗粒物。它能长期飘浮在大气中,有时也称飘尘、浮游粉尘,或可吸入颗粒物。可吸入呼吸道,对人体危害较大。

PM2.5是指颗粒直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物,又称细颗粒物,可入肺,因其对人体危害更大,因此将其单独列出。

4. 粉尘化学种类

粉尘还可以根据其化学机构特征,分为无机粉尘和有机粉尘两大类。

无机粉尘包括矿物性粉尘(如石英、石棉、滑石、煤)、金属性粉尘(如铁、锰、铅、锌)、人工无机粉尘(如金刚砂、水泥、玻璃纤维)等。

有机粉尘包括动物性粉尘(如毛、丝、骨质)、植物性粉尘(如棉、麻、草、甘蔗、谷物、木、茶)、人工有机粉尘(如有机农药、染料、树脂、橡胶、纤维)等。

总之,世界就是由粉尘组合而成的,世界上有多少种物质,就至少有多少种粉尘。

二、颗粒等概念

1. 颗粒

颗粒(particle)是指在一特定范围内具有特定形状的几何体。颗粒形态不仅有固相颗粒,即粉尘,还有液相的雾滴、油珠等“颗粒”。

颗粒大小是相对的,大到宏观星球,小到微观世界的尘埃。我们所说的颗粒一般是指尺寸大小在厘米到埃米级别,甚至更小。

2. 颗粒群或粉体

颗粒群简称粒群,是指不同尺寸的颗粒分散相组合。固相的颗粒群也称为粉体(powder)。从粉体所处位置的情形来看,一类是悬浮的,呈不定形态;一类是堆放的,呈一定形态。相对来说,运动的、悬浮的粉体更难控制。在生产中如何处理、控制和利用粉体是本书的重点。

3. 粒度、粒径、粒级

粒度 (grain size, particle size) 是指颗粒在空间范围所占大小的线形尺度。通俗地说, 单个颗粒的粒度就是单个颗粒的大小。它是一个重要的特性尺寸。

粒径一般指球体颗粒的直径。粒径是描述一个颗粒大小的最直观、最简单的量。

光滑的球形颗粒只有一个尺寸, 即直径, 表达也最简洁; 表面光滑而非球形颗粒则一般用相当量的直径来表示, 而表面不光滑的球形颗粒的尺寸表达则比较复杂。

粒级是指一系列粒度 (径) 大小的排序组合。

4. 当量径 (或称为当量直径、等效粒径、等效径)

在自然界和工业生产当中, 绝大多数颗粒形状是不规则的, 而且千差万别, 有球状、块状、片状、柱状、棒状、条状、针状、粒状、卵状、盘状、鳞 (洋葱头) 状、多孔状、空心状、圆角状、尖角状、纤维状、树枝状、海绵状、毛绒状、聚集体等; 表面有粗糙的、光滑的等。从理论上讲, 它们的粒径大小是很难表达的。为了便于表述不规则的、复杂形状颗粒的大小, 在生产和科研实践中, 人们引入了当量径这个概念。

当量径是指当一个颗粒的某一特性与同质的球形颗粒相同或相近时, 我们就用该球形颗粒的直径来代表这个实际颗粒的直径。那么这个球形颗粒的粒径就是该实际颗粒的当量径。

当量径通常有三种测量形式: 几何当量径、统计平均径和物理当量径, 它们分别是以几何量 (面积、体积等)、统计手段和物理量 (速度、电阻等) 进行测量、计算而得。

第四节 当量径的计算方法

一、单颗粒的粒径计算

粒度的计算分为两类: 单个颗粒和颗粒群。单个粉尘颗粒是不规则的, 一般用其某一特征长度表征。

下面先对单个光滑颗粒的粒度进行分析。先看长度、宽度、高度的定义。

(一) Heywood 规定

如图 1-2 所示。其中图 (a) 为颗粒在垂直平面上的正投影像, 即主视图; 图 (b) 为颗粒在水平面上的正投影像, 即俯视图。

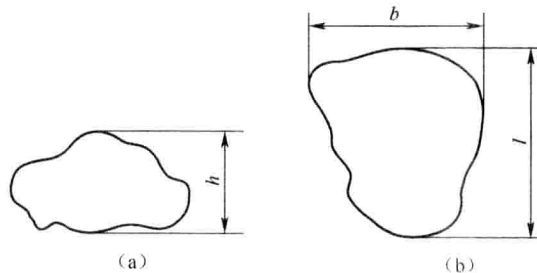


图 1-2 颗粒的主视图和俯视图

(a) 主视图; (b) 俯视图。

1. 高度 h

当一个颗粒在一个平面上势能最小的时候,也就是重心最低的时候,或者说是最稳定的时候,即颗粒常常出现在显微镜下的一种符合“能耗最小”的自然状态。按照 Heywood 规定,它的最高点与平面之间的距离定义为高度 h ,这与生活中的“高度”含义有些不同。

2. 宽度 b

在上述状态下,对其俯视投影,用两平行线夹住旋转,得到的最小距离定义为宽度。

3. 长度 l

按照 Heywood 规定,长度是指与测量宽度的平行线垂直,并夹住投影的一对平行线的最小距离。

(二) 三轴径计算法

以颗粒的长度 l 、宽度 b 、高度 h 定义的粒度平均值称为三轴平均径。计算方法常见的有三种,分别是算术平均直径、几何平均直径和调和平均直径。单个颗粒的计算公式及物理意义见表 1-1。

表 1-1 三轴平均径计算公式

序号	计算式	名称	物理意义
1	$\frac{l+b}{2}$	二轴平均径	平面图形的算术平均
2	$\frac{l+b+h}{3}$	三轴平均径	算术平均
3	$\frac{3}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}}$	三轴调和平均径*	同外接长方体有相同比表面积的球的直径,或立方体的一边长
4	\sqrt{lb}	二轴几何平均径	平面图形的几何平均
5	$\sqrt[3]{lbh}$	三轴几何平均径	同外接长方体有相同体积的立方体的一边长
6	$\sqrt{\frac{2lb+2bh+2lh}{b}}$		同外接长方体有相同表面积的立方体一边长

* 长方体的比表面积 $S_g = 2(lb + lh + bh)/(\rho_p lbh) = b/(\rho_p d)$, 解之可求 d

对颗粒群而言,计算公式如下。

1. 算术平均粒径

算术平均粒径(Arithmetic Mean Diameter)是指各尘粒直径的总和除以尘粒总数。

$$d_1 = \frac{\sum d_i n_i}{N} \quad (1-1)$$

式中: d_i 为第 i 种粉尘的粒径; n_i 为粒径为 d_i 的粉尘的颗粒数; N 为粉尘的颗粒总数。

2. 几何平均径

几何平均径(Geometric Mean Diameter)是指 N 个粉尘粒径的连乘积的 N 次方根。设

粒径为 d_1, d_2, \dots, d_N 的粉尘的颗粒数分别为 n_1, n_2, \dots, n_N , 则其计算公式为

$$D_{\bar{p}} = (d_1^{n_1} \times d_2^{n_2} \times \dots \times d_N^{n_N})^{\frac{1}{N}} \quad (1-2)$$

3. 调和平均直径

$$D_{\bar{p}} = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n}{\frac{n_1}{d_1} + \frac{n_2}{d_2} + \dots + \frac{n}{d_n}} \quad (1-3)$$

(三) 球当量径^①

与颗粒的某一几何量(如面积、体积等)相同时的球直径称为球当量径。有等投影面积径、等体积径、等表面积径、周长径等。

1. 等体积球当量径 d_v

它是指与实际颗粒(或粉尘)体积相同的球的直径,也叫等效体积径。一般认为激光法所测的直径为等效体积径。计算公式为

$$d_v = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.24V_p^{\frac{1}{3}} \quad (1-4)$$

式中: V_p 为尘粒的体积。

2. 等表面积球当量径

它是指与实际颗粒外表面积相同的球的直径,也叫等效表面积径。计算公式为

$$d_s = \left(\frac{S}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-5)$$

式中: d_s 为等表面积球当量径; S 为粉尘的外表面积。

3. 比表面积球当量径

(1) 颗粒群表面积: 单位质量的颗粒的表面积之和。单位为 m^2/kg 或 cm^2/g 。

(2) 表面积粒度原理: 单位质量的颗粒粒度越细, (比) 表面积也越大。但二者变化并不成一定正比例关系。

(3) 球的比表面积: 球体的体积与表面积之比。单位为 m/kg 或 cm/g 。

与颗粒的比表面积相等的情况下计算出来的当量径称为比表面积球当量径。计算公式为

$$d_{sv} = \frac{6V}{S} = \frac{6}{S_v} = \frac{d_v^3}{d_s^2} \quad (1-6)$$

(四) 圆当量径

与颗粒投影轮廓性质相同的圆的直径称为圆当量径。

1. 投影圆当量径

投影圆当量径(Heywood径)是指与颗粒的投影面积相等的圆的直径。计算公式为

$$d_A = \left(\frac{4A_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.128A_p^{\frac{1}{2}} \quad (1-7)$$

式中: A_p 为尘粒的投影面积。

^① 球体积 $V = \frac{3\pi r^3}{3}$; 球表面积 $S = 4\pi r^2$ 。