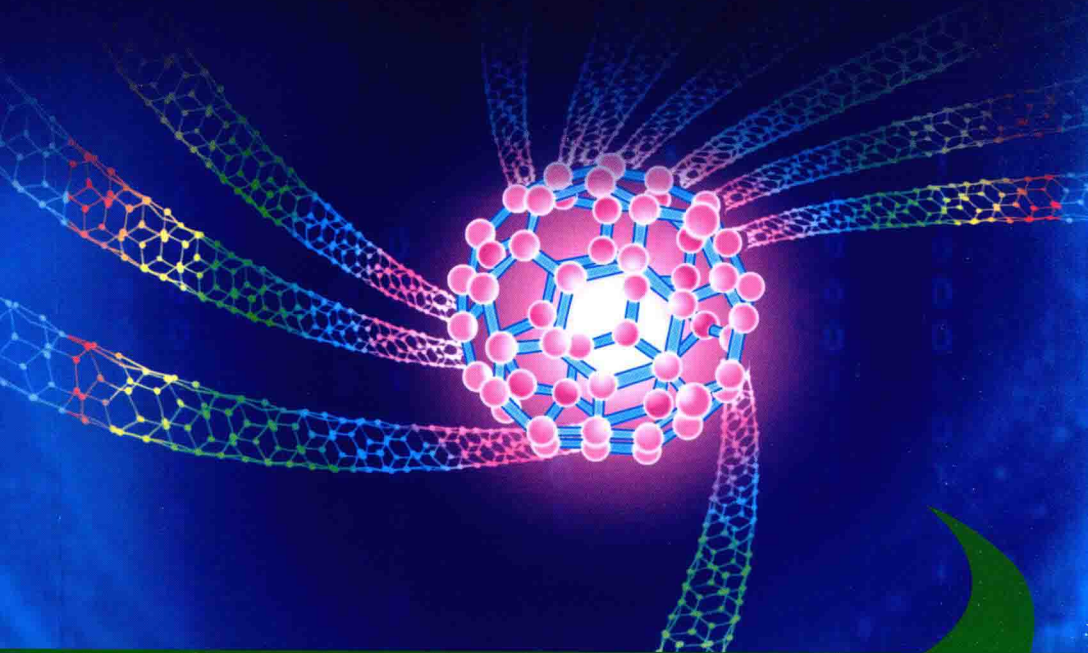




# 图解

# 粉体和纳米材料

田民波 编著



小小的粉体，小到肉眼不能分辨，  
却有惊人的大功用。小身材，大能力。

纳米材料大家不陌生，  
为什么材料到了纳米尺度就会有卓越的性能呢？

石墨烯是最有应用前景的纳米材料之一，  
它的结构非常“神奇”。



化学工业出版社

纳米线问世，太空电梯不再遥远。



图解

# 粉体和纳米材料

TUJIE  
FENTI HE  
NAMI CAILIAO

田民波 编著



RFI



化学工业出版社

· 北京 ·

《图解粉体和纳米材料》是“名师讲科技前沿系列”中的一本，内容包括粉体及其性质、粉体参数如何测量、粉体的制备与操作、粉体的应用、纳米材料和纳米技术、碳纳米管和石墨烯、纳米材料的应用7章。

针对入门者、应用者、研究开发者、决策者等多方面的需求，本书采用每章之下“节节清”的论述方式，图文对照，并给出“本节重点”。力求做到深入浅出，通俗易懂；层次分明，思路清晰；内容丰富，重点突出；选材新颖，强调应用。使粉体和纳米材料的相关知识新起来、动起来、活起来。

本书可作为材料、机械、化工、物理、化学、能源、环境、建筑等专业学生参考书，对于相关行业的科技、工程技术人员，也有参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

图解粉体和纳米材料 / 田民波编著. —北京：化学工业出版社，2019.3  
(名师讲科技前沿系列)  
ISBN 978-7-122-33611-8

I. ①图… II. ①田… III. ①粉体—纳米材料—图解  
IV. ①TB383-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第297595号

---

责任编辑：邢 涛

责任校对：边 涛

装帧设计：王晓宇

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印 装：北京新华印刷有限公司

880mm×1230mm 1/32 印张8½ 字数220千字 2019年6月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询：010-64518888 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：49.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

粉体，是指微小颗粒物的集合体，即颗粒群；而粉体材料一般是指保留原固体键合状态的小尺寸颗粒的松散集合体。

一提到“粉体”，人们按先后次序举出的例子往往是白糖、食盐、胡椒粉、味素、奶粉、速溶咖啡、药粉、洗衣粉、化妆粉等，但对于大多数人来说，能举出 20 种以上也并非容易，说明在日常生活中，身边的粉体似乎并不很多。但实际上，虽然目不见“粉”，但与“粉”密切相关的产品却早已进入我们的日常生活。从平板电视等家电制品，到计算机、手机、汽车等，如果随所用材料及制作工艺去寻找，可以说无一不与粉体相关。

例如，荧光灯管玻璃内壁上所涂的，便是受紫外线（汞蒸气的发光）照射而发可见光的荧光粉；录像带等视频记录介质所涂覆的就是以  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  为首的磁性体粉；复印机复印文字图像采用的是炭粉；TFT LCD 两块玻璃板间放置的是隔离子；锂离子电池正极采用的是层状氧化物粉，负极采用的是石墨粉；汽车车身的涂料中，底层加入提高附着力的粉，中层加入防划伤的粉，上层加入增加美观效果的颜料粉；防紫外线化妆品中加入的是  $\text{TiO}_2$  粉；礼花弹中的爆发剂、燃烧剂、发光剂、发色剂都采用了各种各样的粉体。

另外，尽管最终产品并非粉体，但许多制作过程却离不了粉体。例如，无论是金属冶炼、陶瓷烧结、玻璃熔凝，还是塑料成型，都要从粉体入手。有些材料，例如难熔金属都是由粉体直接做出的。电容器、半导体器件、压电元件等电子器件等采用的是由“精细粉”制作的精细陶瓷（或称先进陶瓷、高技术陶瓷）。这些都是通过粉碎、配料、混料、成形、固化、烧结等工序，充分利用粉体的功能而创造出来的。

进一步，还有保证宇航员安全返回的超耐热瓦，高温超导材料，生物技术和医疗领域等也都离不开粉体。近年来发展火热的纳米材料也属于粉体材料之列。

纳米材料可定义为在三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围（1 ~ 100nm）或由它们作为基本单元而构成的材料。纳米材料的制备，无论采用从上至下（top down），还是从下至上（bottom up）的方式，都是在粉体中做文章。纳米材料的性能、功能、效能都是粉体材料基础之上发挥出来的。

鉴于粉体与纳米材料存在和应用的广泛性与复杂性，有关粉体的知识和技术是多方面的，包括颗粒的自然属性、测量技术、力学特性、运动特性、聚集特性、处理技术、形成和制备技术。

《图解粉体和纳米材料》是“名师讲科技前沿系列”中的一本，本书内容包括粉体及其性质、粉体参数如何测量、粉体的制备与操作、粉体的应用、纳米材料和纳米技术、碳纳米管和石墨烯、

纳米材料的应用等 7 章。

本书采用图文并茂的形式，集趣味性、实用性与理论性为一体，内容涉猎广泛，思维跨度大，将把读者的思维和视野带向一个更为广阔的世界。

通过对本书的学习，理解和掌握粉体与纳米材料的基本概念、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、解决问题的能力和预测问题的能力，激发读者的科研和实践的创新意识和能力，为今后从事与粉体与纳米材料相关的工作打下基础，为培养高级应用型工程技术人才创造必要条件。

本书可作为微电子、材料、物理、化学、计算机、精密仪器等行业人员的专业读物。

本书得到清华大学本科教材立项资助并受到清华大学材料学院的全力支持，在此致谢。作者水平和知识面有限，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

田民波

# 目 录

## 第 1 章 粉体及其性质

1.1 粉体及其特殊性能 (1)	
——小粒径和高比表面积 .....	2
1.1.1 常见粉体的尺寸和大小 .....	2
1.1.2 粉粒越小比表面积越大 .....	4
1.1.3 涂料粒子使光(色)漫反射的原理 .....	6
1.1.4 粉碎成粉体后成形加工变得容易 .....	8
1.2 粉体及其特殊性能 (2)	
——高分散性和易流动性 .....	10
1.2.1 粉体的流动化 .....	10
1.2.2 粉体的流动模式 .....	12
1.2.3 粉体的浮游性——靠空气浮起来运输 .....	14
1.2.4 地震中因低级液化而引起的灾害 .....	16
1.3 粉体及其特殊性能 (3)	
——低熔点和高化学活性 .....	18
1.3.1 颗粒做细,变得易燃、易于溶解 .....	18
1.3.2 礼花弹的构造及粉体材料在其中的应用 .....	20
1.3.3 小麦筒仓发生粉尘爆炸的瞬间 .....	22
1.3.4 电子复印装置(复印机)的工作原理 .....	24
1.3.5 臭氧层孔洞的扩大与微粒子相关? .....	26

### 书角茶桌

为什么夕阳是红色的,而天空是蔚蓝的? .....	28
--------------------------	----

## 第2章 粉体参数如何测量

- 2.1 粉体的特性及测定 (1)
- 粒径和粒径分布的测定 .....30
  - 2.1.1 如何定义粉体的粒径 .....30
  - 2.1.2 不同的测定方法适应不同的粒径范围 .....32
  - 2.1.3 粉体粒径及其计测方法 .....34
  - 2.1.4 复杂的粒子形状可由形状指数表示 .....36
  - 2.1.5 粒径分布如何表示 .....38
  - 2.1.6 纳米粒子大小的测量——微分型电迁移率分析仪  
(DMA)和动态光散射仪 .....40
- 2.2 粉体的特性及测定 (2)
- 密度及比表面积的测定 .....42
  - 2.2.1 粒子密度的测定  
——比重瓶法和贝克曼比重计法 .....42
  - 2.2.2 比表面积的测定——透气法和吸附法 .....44
- 2.3 粉体的特性及测定 (3)
- 折射率和附着力的测定 .....46
  - 2.3.1 粉体的折射率及其测定 .....46
  - 2.3.2 粉体层的附着力和附着力的三个测试方法 .....48
  - 2.3.3 粒子的亲水性与疏水性及其测定 .....50

### 书角茶桌

- 微小水滴构成的宏伟画作——彩虹 .....52

## 第3章 粉体的制备与操作

- 3.1 从上到下(top-down)制备工艺
- 破碎和粉碎 .....54

3.1.1	固体粉碎化技术的变迁 ——从石磨到气流粉碎机 (jet mill) .....	54
3.1.2	粉体越细继续粉碎越难 .....	56
3.1.3	介质搅拌粉碎机 .....	58
3.1.4	粉碎技术的分类及发展动态 .....	60
3.1.5	新型粉碎技术简介 .....	62
3.2	分级和集尘——小粒径和高比表面积 .....	64
3.2.1	振动筛和移动筛 .....	64
3.2.2	干式分级机的工作原理 .....	66
3.2.3	集尘率的定义和代表性的集尘装置 .....	68
3.2.4	布袋集尘器和电气集尘装置 .....	70
3.3	混料及造粒——小粒径和高比表面积 .....	72
3.3.1	代表性的混料机 .....	72
3.3.2	造粒及造粒的目的 .....	74
3.3.3	自足造粒 .....	76
3.3.4	强制造粒 .....	78
3.4	输送及供给——小粒径和高比表面积 .....	80
3.4.1	各种粉体输送机 .....	80
3.4.2	各种粉体供给 (加料) 机 .....	82
3.4.3	各种干式分散机 .....	84
3.4.4	粉体微细化所表现的性质 .....	86
3.5	从下到上 (bottom-up) ——非机械式粉体制作方法 .....	88
3.5.1	PVD 法制作粉体 .....	88
3.5.2	CVD 法制作粉体 .....	90



3.5.3	液相化学反应法制作粉体	92
3.5.4	界面活性剂法制作粉体	94
3.6	粉体精细化技术	
	——粒度精细化及粒子形状的改善	96
3.6.1	粉体的喷雾干燥	96
3.6.2	粉体颗粒附着、凝聚、固结的分类	98
3.6.3	利用界面反应生成球形粒子的机制	100
3.6.4	复合粒子的分类及其制作	102

## 书角茶桌

	沙尘暴和“核冬天”	104
--	-----------	-----

## 第4章 粉体的应用

4.1	日常生活用的粉体	106
4.1.1	主妇的一天——日常生活中的粉体	106
4.1.2	食品、调味品中的粉体	
	——绵白糖与砂糖的对比	108
4.1.3	粉体粒子的附着现象	110
4.1.4	古人用沙子制作的防盗墓机构	112
4.2	粉体在高新技术中的应用	114
4.2.1	液晶显示器中的隔离子	114
4.2.2	CMP用研磨剂	116
4.2.3	粉体技术用于缓释性药物	118
4.2.4	粉体技术用于癌细胞分离	120

## 书角茶桌

	PM10 和 PM2.5	122
--	--------------	-----

## 第5章 纳米材料和纳米技术

5.1 纳米概念及相关技术	124
5.1.1 为什么“纳米”范围定义为1~100nm	124
5.1.2 纳米材料应用实例	126
5.1.3 如何用光窥视纳米世界	128
5.1.4 对原子、分子进行直接操作	130
5.1.5 集成电路芯片——高性能电子产品的核心	132
5.1.6 纳米材料的制备方法	134
5.2 纳米世界和纳米领域	136
5.2.1 纳米世界	136
5.2.2 包罗万象的纳米领域	138
5.2.3 纳米技术应用领域	140
5.2.4 纳米技术之树	142
5.3 纳米技术的应用领域	144
5.3.1 纳米结构与纳米组织	144
5.3.2 半导体集成电路微细化有无极限?	146
5.3.3 纳米光合作用和染料敏化太阳能电池	148
5.3.4 在利用纳米技术的环境中容易实现化学反应	150
5.3.5 干法成膜和湿法成膜技术 (bottom-up 方式)	152
5.3.6 干法刻蚀和湿法刻蚀加工技术 (top-down 方式)	154

### 书角茶桌

纳米材料	156
------	-----

## 第6章 碳纳米管和石墨烯

6.1 碳纳米管的结构	158
6.1.1 最小的管状物质	158
6.1.2 单层石墨片、富勒烯、碳纳米环和碳纳米螺旋管	160
6.1.3 从单层石墨片卷成碳纳米管	162
6.1.4 单层和多层碳纳米管	164
6.2 碳纳米管的制作	166
6.2.1 电弧法制作碳纳米管	166
6.2.2 化学气相沉积等制作碳纳米管	168
6.3 碳纳米管的性质	170
6.3.1 碳纳米管优异的特性	170
6.3.2 需要解决的特异性问题 ——以碳纳米管三极管为例	172
6.4 碳纳米管的应用	174
6.4.1 试探性应用(1)——可能的应用领域	174
6.4.2 试探性应用(2)——场发射显示器(FED)	176
6.4.3 试探性应用(3)——碳纳米管电子枪	178
6.4.4 试探性应用(4)——使用碳纳米管的显示器	180
6.5 石墨烯的结构和制作方法	182
6.5.1 何谓石墨烯	182
6.5.2 石墨烯的制作方法——“自上而下”的方式	184
6.5.3 石墨烯的制作方法——“自下而上”的方式	186
6.6 石墨烯的应用	188
6.6.1 试探性应用(1)——产品的潜在用途	188

6.6.2	试探性应用 (2) ——柔性显示	190
6.6.3	试探性应用 (3) ——石墨烯超级电容器和 锂电池	192
6.6.4	试探性应用 (4) ——石墨烯量子点光源	194
6.6.5	试探性应用 (5) ——石墨烯 3D 打印	196

## 书角茶桌

碳纳米管天梯	198
--------	-----

## 第 7 章 纳米材料的应用

7.1	在微电子及 IC 芯片制作中的应用	202
7.1.1	利用纳米技术改变半导体的特性	202
7.1.2	MOS FET 器件进一步微细化	204
7.1.3	纳米技术引入集成电路制程	206
7.1.4	光刻胶的光化学反应	208
7.1.5	藉由 STM 探针预激活进行自组织化	210
7.1.6	在晶圆表面制作纳米结构	212
7.1.7	单个离子注入法	214
7.2	纳米生物自组装和纳米医疗	216
7.2.1	自然界是纳米技术的宝库	216
7.2.2	纳米技术为生物医学产业插上腾飞的翅膀	218
7.2.3	生物体中发挥重要作用的分子机械	220
7.2.4	在金刚石表面制作生物分子	222
7.2.5	未来有可能利用生物纳米技术制作鸡蛋和雏鸡	224
7.2.6	藉由分子集合改变结构和性质	226
7.2.7	作为药物输送载体的高分子纳米胶态粒子	228

7.2.8	利用高分子纳米胶态粒子实现 DDS	230
7.3	在新材料和新能源领域的应用	232
7.3.1	原子和分子尺度的自组装	232
7.3.2	介孔多孔体纳米材料设计	234
7.3.3	纳米间隙的活用	236
7.3.4	对分子进行分离的色谱管	238
7.3.5	燃料电池提供清洁能源	240
7.3.6	储氢合金——利用氢能的关键	242
7.4	纳米技术用于量子计算机	244
7.4.1	电子通道中也有“行车线” ——基于电子波动性的新现象	244
7.4.2	纳米技术在量子计算机中的应用	246
7.4.3	功能更强的量子计算机	248
7.4.4	量子通信确保信息安全	250

## 书角茶桌

以纳米技术为基础的量子计算机	252
----------------	-----

参考文献	253
------	-----

作者简介	254
------	-----

# 第 1 章

## 粉体及其性质

- 1.1 粉体及其特殊性能 (1)  
——小粒径和高比表面积
- 1.2 粉体及其特殊性能 (2)  
——高分散性和易流动性
- 1.3 粉体及其特殊性能 (3)  
——低熔点和高化学活性

### 书角茶桌

为什么夕阳是红色的，  
而天空是蔚蓝的？

## 1.1 粉体及其特殊性能 (1)

### ——小粒径和高比表面积

#### 1.1.1 常见粉体的尺寸和大小

表示固体大小的单位, 一般用米 (m) 或毫米 (mm); 表示分子大小的单位, 一般用埃 ( $\text{\AA}$ ;  $1\text{\AA}=10^{-1}\text{nm}=10^{-10}\text{m}$ )。粉体既可以由固体粉碎变细得到, 又可以由分子集聚变大得到。因此, 表示粉体大小的单位, 一般用微米 ( $\mu\text{m}$ ;  $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ ) 或纳米 ( $\text{nm}$ ;  $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ )。那么, 所谓微米或纳米的单位到底有多大呢?

若将谷物用石碾或石磨等粉碎, 会得到  $10\sim 100\mu\text{m}$  的粉末。用两个手指一捏, 有颗粒状和非光滑之感。再进一步用非常高性能的粉碎机粉碎, 则颗粒感消失, 代之以明显的光滑感。粗略地讲, 按人对粉体的感觉而言, 在  $10\mu\text{m}$  左右有明显的变化。

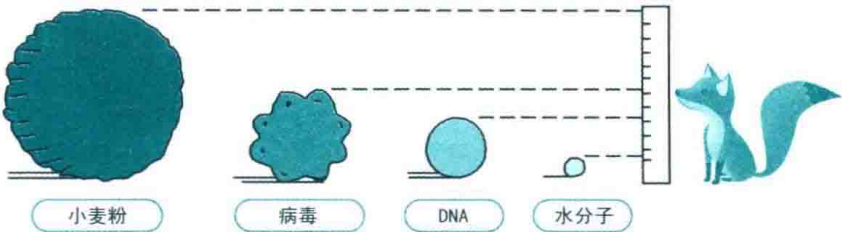
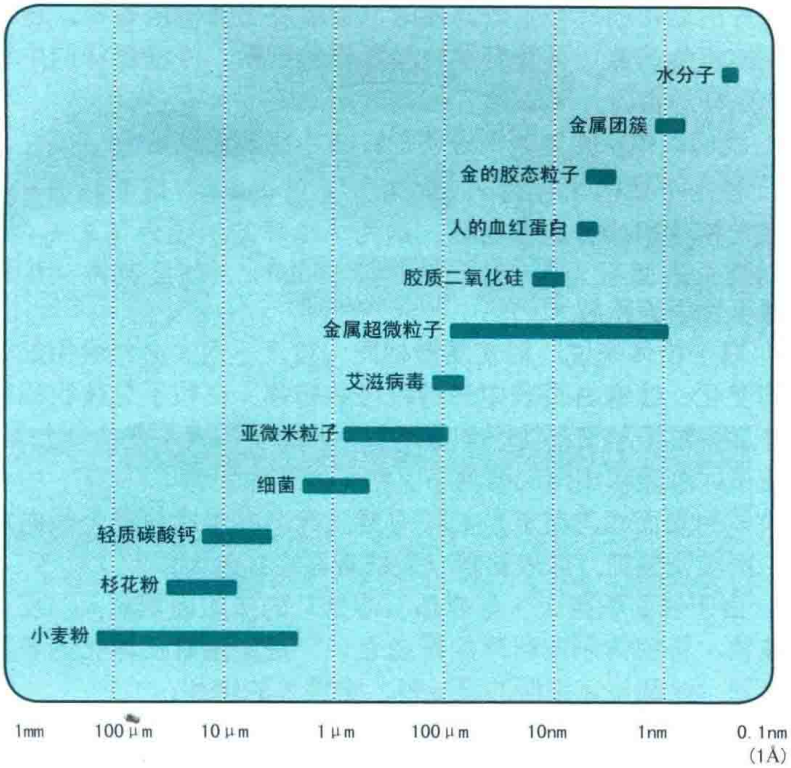
细菌的大小一般在  $1\mu\text{m}$  左右。所谓除菌过滤所采用的就是孔径  $0.2\mu\text{m}$  的细孔径过滤膜。病毒也是小生物的代名词。艾滋病毒的尺寸为  $0.1\mu\text{m}$ , 属于相当大的病毒。有些种类的病毒尺寸只有  $10\text{nm}$ 。DNA 分子的尺寸大约为  $1\text{nm}$ 。一个水分子的大小只有  $0.35\text{nm}$ 。

在金属超微粒子领域, 原子数从几个到 100 个左右的集合体称为原子团簇。这种数目的原子集合体中, 由于电子运动与普通固体中的具有很大差异, 从而会表现出许多新的电磁特性。

近年来, 采用化学方法制备金属及精细陶瓷微细粒子的开发极为活跃。在此领域, 特别将  $0.1\mu\text{m}$  以下的粒子称为超微 (纳米) 粒子。而且, 在微小粒子的捕集技术及计测等领域, 将  $0.1\sim 1\mu\text{m}$  范围的粒子称为亚微米粒子。

- (1) 粉体尺寸分布在块体 ( $1\mu\text{m}$ ) 和分子 ( $1\text{nm}$ ) 间的微米至纳米范围内。
- (2) 各种各样物质的大小范围。
- (3) 粉体性能随尺寸变化的一般规律。

各种各样物质的大小





### 1.1.2 粉粒越小比表面积越大

朋友相聚咖啡浓郁的芳香烘托出优雅的氛围。将烘烤好的咖啡豆放入咖啡机中，用手摇动摇把，发出“咯啦咯啦”的响声。将磨好的咖啡粉转移到过滤器时，会散发出芳醇的香味。通过调整咖啡机的间隙，可获得绵白糖那样的细粉，沙糖那样的中粉和雪花那样的粗粉。

我们以球状物体为例说明粉粒越小比表面积越大。

若一个球的半径为  $r$ ，则其体积为  $\frac{4}{3} \pi r^3$ ，表面积为  $4 \pi r^2$ ，当把它按体积均分为两份后，这两个小球的半径为  $\sqrt[3]{\frac{1}{2}} r$ ，于是它们的总表面积为  $4 \pi (\sqrt[3]{\frac{1}{2}} r)^2 \times 2 > 4 \pi r^2$ 。依此类推，可知粉粒越小比表面积越大。

对于粉体来说，即使质量相同，粒度不同，必然会引起表面积的变化。注意右页表中三种粒径的粉体，在粒子总体积相同的条件下，粒子越细则粒子个数越多。若粒子的大小变为十分之一，在粒子的总体积相同的条件下，粒子的个数变为 1000 倍。由于一个粒子的表面积与其直径的平方成正比，在考虑粒子个数的前提下，则粒子越细，总表面积（表的最右栏）越大。

由于表面积越大，与媒质（溶剂）的接触面积越大，反应速度越快。将固体制成粉体的理由之一，是伴随着粉体化的表面积的增加，以及与之相伴的反应性、溶解性的增加。

- (1) 求相同体积做成不同半径圆球的个数与半径的关系。
- (2) 粉粒越小比表面积越大。
- (3) 粉体粒度越细与媒质的接触面积越大。