

# 粉体工程实验手册

〔日〕 三轮茂雄 日高重助 著 杨伦 谢淑娴 译

# 粉体工程实验手册

[日]三輪茂雄 日高重助 著  
杨 伦 谢淑娟 译

中国建筑工业出版社

## 序 言

物质以微小颗粒集合体状态存在时，称为粉体。粉体工程（Power Technology）是研究该状态下物质的特性及其应用的学科。

本书是1981年日本出版的《粉体工程通论》<sup>①</sup>的姊妹篇，以详细阐述实验技术为其目的。

近来，随着新型材料的开发，在各种工业领域中，粉体处理过程的重要性有着与日俱增的倾向。从事这些开发的工作者首先碰到的是粉体物性的测定。测定些什么？应采用何种测定装置？测定数据具有怎样的意义？应如何处理数据？这些就都成为具体的技术问题。

为了使本书能对从事这种实际工作的业务人员有所帮助，并成为实验指导用书，编写时注意了以下事项：

1）粉体工程的一般问题和原理，已作为基础知识纳入《粉体工程通论》一书。为了便于进行实验，所以每当涉及有关实验项目的这方面内容时，就需要注明参照该书的页数，以便及时参考。

2）对实验装置和仪器设备的准备、实验步骤、计算方法以及最后的总结尽量详细记述。上述内容都是笔者在研究室指导学生实验工作的经验，因此学生借助于取得的本实验指导书几乎不加解释就可以完成实验。为了达到此目的，所以处处要十分详细地考虑注意事项，并注意写入本书。

3）尽量多列图示和实测事例，通过具体实例来加强理解，并附有数据表，以供实验参考。

---

① 《粉体工学通論》日刊工業新聞社，1981——译注。

4) 对于市售的实验装置,若制造厂附有详细说明书,书中就予以省略;即使简单的仪器设备,但难以得到详细说明书,本书也要详加叙述。在普及应用性能完善的高级测定装置的情况下,也要尽可能选择简单的测定装置来加以叙述,这是为了培养实验者对实验现象本质的理解和观察能力。在确实掌握了上述的基本过程之后,就要完善测定操作与数据处理。有效地熟练掌握带有精密电子仪器的高级测定装置,以提高研究效率。

5) 不可能将粉体工程所有必需的实验方法都编写进本书,所以只能精选其中基本的实验方法,而且还只限于都是笔者所进行过的实验及其数据处理。

6) 文字叙述以浅显易懂为主,而不以专门知识作为前题。

本书内容,系十年来按实验步骤说明书形式逐项分别发表在日本杂志《粉体工程会志》上的文章经修改汇集而成。在那期间,听取各方面的批评与指正,进行了反复修改。最后,仅向给予指导及协助进行实验的各位先生,致以衷心感谢。

[日] 三輪茂雄 日高重助

1984年6月

## 通用符号表

- $D_p$ ——粒径 (particle diameter)  
 $D_{pv}$ ——等体积球当量径 (equivalent volume diameter)  

$$D_{pv} = (6v/\pi)^{1/3} = 6(\varphi_c S_v)$$
 $D_{ps}$ ——比表面积球当量径 (specific surface diameter)  

$$D_{ps} = 6/S_v$$
 $D_{50}$ ——50% 径, 即中等径 (median diameter)  
 $g$ ——重力加速度 (acceleration due to gravity)  
 $\Delta P$ ——压力降 (pressure drop)  
 $P$ ——压力 (pressure)  
 $R$ ①——累积筛上 (超过筛孔尺寸的) % (cumulative residue)  
 $S_v$ ——体积比表面积 (surface area per unit volume of particle)  

$$S_v = S/v$$
 $S_w$ ——质量比表面积 (specific surface on mass basis)  

$$S_w = S_v/\rho_p$$
 $U$ ——累积筛下 (小于筛孔尺寸的) % (cumulative undersize)  
 $S$ ——单个颗粒的表面积  
 $u$ ②——速度 (velocity)  
 $u_m$ ——终端速度 (terminal velocity)  
 $v$ ——单个颗粒的体积  
 $s$ ——空隙率 (fractional voidage of bed of particles)  
 $\mu$ ——流体的粘度 (fluid viscosity)  
 $\pi$ ——圆周率 (Ludolphian number)  
 $\rho$ ——流体密度 (density of fluid)  
 $\rho_B$ ——松密度 (bulk density)

① 原文为  $P$ , 应为  $R$  (见表 3-3); 原文遗漏 % ——译注。

② 原文空白, 应为  $u$  ——译注。

$\rho_p$ ——颗粒密度 (particle density)

$\varphi_s$ ——表面积形状系数 (surface shape factor)

$\varphi_v$ ——体积形状系数 (volume shape factor)

$\varphi_c$ ——Carman形状系数 (Carman's shape factor)

$$\varphi_c = 6/\varphi$$

$\Psi$ ——比表面积形状系数 (specific surface shapefactor)

$$\varphi = \varphi_s/\varphi_v$$

$\varphi_i$ ——内摩擦角 (angle of internal friction)

$\varphi_r$ ——休止角 (angle of repose)

# 目 录

## 第一章 试样的划分与缩分

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1.1 双划分器 .....             | 1  |
| 1.1.1 双划分操作的实习 .....       | 1  |
| 1.1.2 Carpenter左右相抵法 ..... | 3  |
| 1.1.3 32划分的实验 .....        | 3  |
| 1.2 圆锥四分法 .....            | 6  |
| 1.2.1 圆锥四分法操作的实习 .....     | 6  |
| 1.2.2 Carpenter法的应用 .....  | 8  |
| 1.3 层叠交替铲分法 .....          | 8  |
| 1.4 旋转划分机 .....            | 8  |
| 1.5 料流切断法 .....            | 9  |
| 参考文献 .....                 | 11 |

## 第二章 颗粒密度与松密度

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 2.1 浸液法 .....                | 13 |
| 2.1.1 浸液法的原理研究 .....         | 13 |
| 2.1.2 Le Chatelier比重瓶法 ..... | 16 |
| 2.1.3 比重瓶法 .....             | 17 |
| 2.1.4 悬吊法 .....              | 19 |
| 2.2 气体容积法 .....              | 22 |
| 2.2.1 定容积压缩法的原理 .....        | 22 |
| 2.2.2 定容积压缩法的测定步骤 .....      | 24 |
| 2.2.3 定容积膨胀法 .....           | 29 |
| 2.2.4 不定容积法 .....            | 29 |
| 2.3 压力比较法 .....              | 31 |
| 2.4 其他方法 .....               | 32 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| 2.4.1 密度变更法 ..... | 32 |
| 2.4.2 重液分离法 ..... | 34 |
| 2.4.3 气体透过法 ..... | 34 |
| 2.5 松密度 .....     | 36 |
| 参考文献 .....        | 37 |

### 第三章 粒 度 测 定

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 3.1 显微镜法 .....       | 39  |
| 3.1.1 颗粒观察 .....     | 39  |
| 3.1.2 粒径测定 .....     | 39  |
| 3.1.3 称量计算法 .....    | 47  |
| 3.2 筛分法 .....        | 49  |
| 3.2.1 标准筛 .....      | 49  |
| 3.2.2 摇筛机(振动机) ..... | 56  |
| 3.2.3 测定步骤 .....     | 59  |
| 3.2.4 有效孔径法 .....    | 61  |
| 3.3 吸移管法 .....       | 74  |
| 3.3.1 装置与仪器设备 .....  | 74  |
| 3.3.2 吸移管的检定 .....   | 78  |
| 3.3.3 测定准备 .....     | 81  |
| 3.3.4 测定操作 .....     | 83  |
| 3.4 比重计法 .....       | 87  |
| 3.4.1 原理 .....       | 87  |
| 3.4.2 装置与仪器设备 .....  | 93  |
| 3.4.3 比重计的检定 .....   | 94  |
| 3.4.4 测定准备 .....     | 94  |
| 3.4.5 测定操作 .....     | 96  |
| 3.5 光透过法 .....       | 98  |
| 3.5.1 原理 .....       | 99  |
| 3.5.2 装置与仪器设备 .....  | 100 |
| 3.5.3 测定准备 .....     | 102 |
| 3.5.4 测定操作 .....     | 105 |

|       |             |     |
|-------|-------------|-----|
| 3.6   | Werner管法    | 114 |
| 3.6.1 | 装置与仪器设备     | 114 |
| 3.6.2 | 测定准备        | 115 |
| 3.6.3 | 测定操作        | 116 |
| 3.6.4 | 数据整理        | 116 |
| 3.6.5 | 检定方法与测定实例   | 118 |
| 4.7   | 流体透过法       | 120 |
| 3.7.1 | Carman液体透过法 | 121 |
| 3.7.2 | Blaine装置    | 122 |
| 3.7.3 | 透过仪         | 126 |
|       | 参考文献        | 130 |

## 第四章 力学特性

|       |           |     |
|-------|-----------|-----|
| 4.1   | 休止角       | 133 |
| 4.1.1 | 各种测定方法    | 133 |
| 4.1.2 | 影响因素      | 133 |
| 4.2   | 粉体综合特性测定仪 | 137 |
| 4.2.1 | 装置与用品类    | 137 |
| 4.2.2 | 测定操作      | 137 |
| 4.3   | 剪切试验      | 152 |
| 4.3.1 | 正方形剪切盒    | 152 |
| 4.3.2 | Jenike剪切盒 | 156 |
| 4.4   | 贯入试验      | 158 |
| 4.4.1 | 各种测定方法    | 158 |
| 4.4.2 | 贯入过程曲线的分析 | 161 |
|       | 参考文献      | 167 |

## 第五章 粉体装置

|       |           |     |
|-------|-----------|-----|
| 5.1   | 孔流        | 170 |
| 5.1.1 | 实验装置与仪器设备 | 170 |
| 5.1.2 | 孔流实验      | 172 |
| 5.1.3 | 粉体的各种孔流现象 | 175 |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 5.1.4 | 测定器及其应用 .....       | 181 |
| 5.1.5 | 粉体孔流算式 .....        | 183 |
| 5.2   | 筛网全通指数 .....        | 188 |
| 5.2.1 | 稳定质量流量 .....        | 188 |
| 5.2.2 | 粉体孔流的类推 .....       | 189 |
| 5.2.3 | 筛网全通指数 .....        | 191 |
| 5.3   | 粉体贮仓 .....          | 194 |
| 5.3.1 | 流动状态的观察 .....       | 194 |
| 5.3.2 | 粒度偏析 .....          | 195 |
| 5.3.3 | 底压与容量 .....         | 197 |
| 5.4   | 部分分离效率曲线 .....      | 199 |
| 5.4.1 | 装置与仪器设备 .....       | 200 |
| 5.4.2 | 测定准备 .....          | 200 |
| 5.4.3 | 试验操作 .....          | 201 |
| 5.4.4 | 数据整理 .....          | 201 |
| 5.4.5 | 参考数据 .....          | 204 |
| 5.5   | Bond粉碎工作指数 .....    | 205 |
| 5.5.1 | 装置与仪器设备 .....       | 206 |
| 5.5.2 | 测定准备 .....          | 208 |
| 5.5.3 | 粉碎用试料的配制 .....      | 208 |
| 5.5.4 | 进料粒度的测定 .....       | 209 |
| 5.5.5 | 粉碎操作 .....          | 209 |
| 5.5.6 | $W_i$ 的应用及其范围 ..... | 214 |
| 5.5.7 | 粉碎速度法 .....         | 219 |
| 5.6   | 闭路粉碎过程 .....        | 223 |
| 5.6.1 | 备用数据的收集 .....       | 223 |
| 5.6.2 | 运转条件的试验研究 .....     | 224 |
| 5.6.3 | 分级效率的解释 .....       | 227 |
|       | 参考文献 .....          | 229 |

## 附 录

|      |             |     |
|------|-------------|-----|
| 附录 1 | 单位换算表 ..... | 235 |
|------|-------------|-----|

|      |                                                     |     |
|------|-----------------------------------------------------|-----|
| 附录 2 | 水与空气的粘度与密度 .....                                    | 238 |
| 附录 3 | 蔗糖 (Sucrose, $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) 水溶液的密度与粘度 ..... | 239 |
| 附录 4 | 接触空气的液体表面张力 .....                                   | 240 |
| 附录 5 | 正态分布表 .....                                         | 240 |
| 附录 6 | 标准数 (JIS Z8601-1954) .....                          | 241 |
| 附录 7 | JIS标准筛表 (JIS Z8801-1982) .....                      | 242 |
| 附录 8 | 合成纤维网标准筛特性表 .....                                   | 244 |
| 附录 9 | 日本规格协会的常用正态概率纸 .....                                | 245 |
| 附录10 | 精密筛分粒度测定用的对数正态概率粒度分布线图 .....                        | 246 |
| 附录11 | Rosin-Rammler线图 .....                               | 247 |
| 附录12 | 砂的粒度与 $\phi$ 尺度 .....                               | 248 |
| 附录13 | 花粉、孢子的粒度分布 .....                                    | 252 |
| 附录14 | 惯用筛目与粒度 .....                                       | 252 |
| 附录15 | 粉体容器的损失系数表 .....                                    | 253 |
| 附录16 | 临界孔径 .....                                          | 254 |
| 附录17 | 粉体物性值 .....                                         | 255 |
| 附录18 | 希腊语字母及俄语字母对照表 .....                                 | 267 |
| 附录19 | 粒度概观图 .....                                         | 268 |
| 附录20 | 平均粒径的计算式及其物理意义一览表 .....                             | 269 |
| 索引   | .....                                               | 271 |

# 第一章 试样的划分与缩分

液体和气体一经搅拌就均匀化，采取其代表性试样就不需要特别下功夫。可是，粉体在流动和搅拌情况下，会因粒度或比重差而引起分离、偏析。不管试验方法是如何正确，如果取样的操作方法不适当，就不能获得足以信赖的结果。所以，试样的划分与缩分为粉体工程实验的基础。

所谓划分就是把大量粉体试样分为组成相同的复数份数的操作。将原料粉体分成为复数份数，是机械装置性能实验、粉体制品试制试验时所需要的一定条件。

所谓缩分就是指粉体制品的进厂检查、出厂检查和工程管理时，从大量粉体中，选取少量的代表性试样的操作。一种情况是反复上述的划分操作后进行缩分；另一种情况是系统地进行抽样，把这些试样合并后，再重复划分操作来取得缩分的试样。

## 1.1 双划分离器 ( chule riffler )

如图1-1所示，以左右交错的斜槽装置，使粉体料流分为左右两个方向，成为分别由两个受料箱接料的结构。必须使所含的最大颗粒试料不堵塞斜槽，所选成的双划分离器，其缝隙宽度要与粉体粒度相适应。该器适用于比较干燥的流动性好的粉体，而不适用于扬尘性、粘附凝聚性的粉体。后者以采用带有特殊加料器的旋转划分机（如后所述）为佳。

受料箱至少备有三只。此箱是不可缺少的容器，但容易挪作它用而散失，所以使用后必须整理齐备，妥善保管。

### 1.1.1 双划分操作的实习

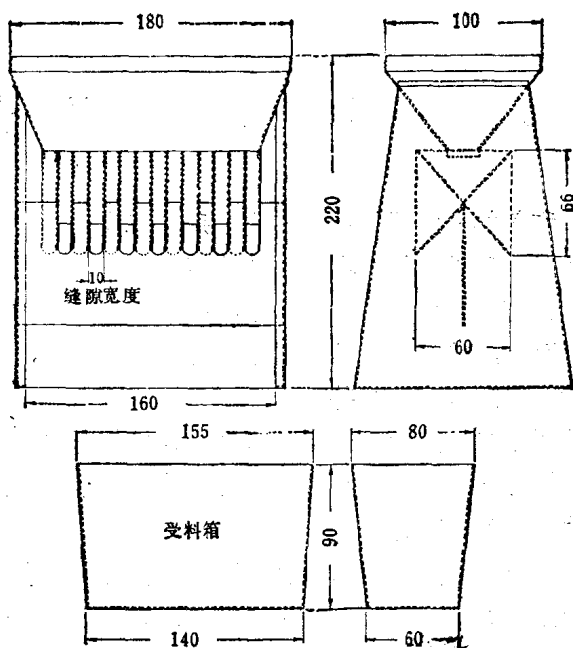


图 1-1-(a) 中型双划分器简图尺寸

使一个受料箱准备接受来自八个分缝的粉体试样，在进行划分操作时，应注意如下事项：

- 将附着在斜槽和受料箱上的料尘，用刷子或压缩空气仔细地除净，必要时可用水清洗。
- 把应划分的试样向受料箱投入时，一边沿着受料箱长边方向振动，同时使试样能在受料箱中逐层地叠积。这对粒度分布范围宽而容易偏析的试样，显得更为重要。
- 使受料箱长边与斜槽缝隙方向垂直，慢慢地倾斜给料容器使试样流出。如果向划分器急剧地倒入粉料，则将使斜槽的两侧流出的粉体量互不平衡，而使划分精度降低。这是由于倒入时的惯性，容易使粉料在斜槽的某一侧流出的原故。所以，应该保持细流而且与斜槽缝隙方向垂直的方向撒料。

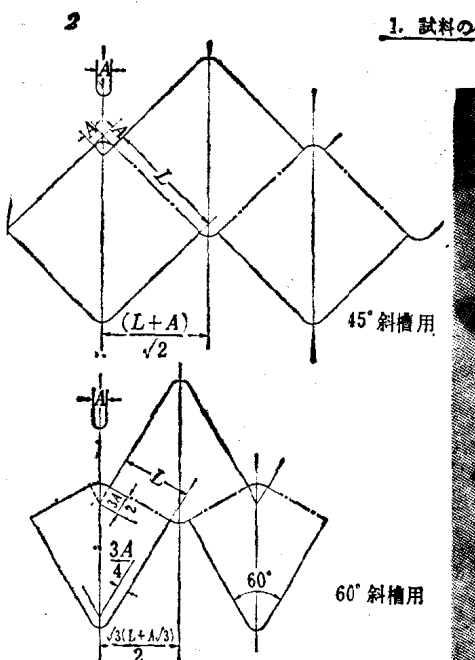


图 1-1 (b) 无缝隙斜槽结构的  
制造方法 (为了不使少量试样混  
入杂质, 斜槽用薄的金属板制成)



图 1-1 (c) 双划分器

### 1.1.2 Carpenter 左右相抵法

双划分器的制造精度即使很好, 但从斜槽左右两侧流出的粉体量与粒度也多少存在着偏差。因此, Carpenter<sup>3)</sup> 提出了以下的左右相抵法。

如图1-2所示, 反复进行划分操作, 得到编号①~⑧的划分试样, 然后将①与⑧、②与⑦等分别合并, 得到四个划分试样。从表1-1可以看出试样从左右侧流出的次数, 而上述四个试样具有相同的左右侧流出的次数。

### 1.1.3 32划分的实验

将试样划分为 $2^5 = 32$ 时, 分别采用双划分器反复进行单纯的划分和左右相抵法进行划分, 两者间存在怎样的差别, 对此可通

过实验观察。Carpenter采用粒度分布范围为 $50\mu\text{m}\sim 2\text{mm}$ 的玻璃球进行实验，以得到划分试样重量分配的均等性来作为左右相抵法的有效性标准。表1-2所示系采用上述相同的方法，将粒

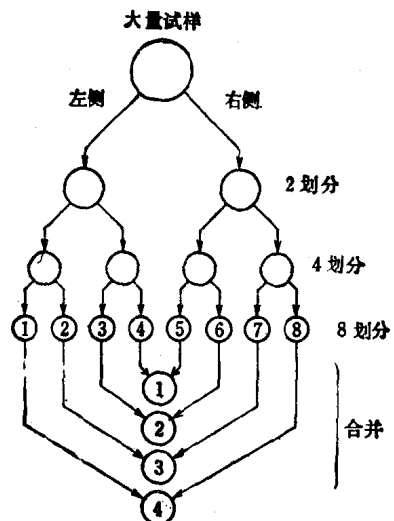


图 1-2 Carpenter 左右相抵法的四划分

左右相抵法的意义 表 1-1

| 划分试样编号 | 左右侧流出的次数 |   |
|--------|----------|---|
|        | 左        | 右 |
| ①      | 3        | 0 |
| ②      | 2        | 1 |
| ③      | 2        | 1 |
| ④      | 1        | 2 |
| ⑤      | 2        | 1 |
| ⑥      | 1        | 2 |
| ⑦      | 1        | 2 |
| ⑧      | 0        | 3 |
| ①+⑧    | 3        | 3 |
| ②+⑦    | 3        | 3 |
| ③+⑥    | 3        | 3 |
| ④+⑤    | 3        | 3 |

### 32划分情况下双划分器的划分精度

(以重量分配值表示)(g)

表 1-2

(a) 反复划分

(b) 左右相抵法

| 大量<br>试样 | 第一<br>次<br>划分 | 第二<br>次<br>划分 | 第三<br>次<br>划分 | 第四<br>次<br>划分 | 划分<br>试样 | 大量<br>试样 | 第一<br>次<br>划分 | 第二<br>次<br>划分 | 划分<br>试样 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|---------------|---------------|----------|
| 3075     | 1513          | 750           | 372           | 184           | 90       | 2779     | 1387          | 348           | 85       |
|          |               |               |               |               | 94       |          |               |               | 84       |
|          |               |               |               | 188           | 92       |          |               |               | 88       |
|          |               |               |               |               | 96       |          |               |               | 91       |
|          |               |               | 378           | 186           | 91       |          |               |               | 90       |
|          |               |               |               |               | 95       |          |               |               | 86       |
|          |               |               |               | 192           | 91       |          |               |               | 85       |
|          |               |               |               |               | 101      |          |               |               | 87       |
|          |               | 763           | 373           | 185           | 90       |          |               | 352           | 90       |
|          |               |               |               |               | 94       |          |               |               | 84       |
|          |               |               |               | 188           | 94       |          |               |               | 89       |
|          |               |               |               |               | 94       |          |               |               | 89       |
|          |               |               | 390           | 185           | 88       |          |               |               | 83       |
|          |               |               |               |               | 97       |          |               |               | 85       |
|          |               |               |               | 205           | 99       |          |               | 339           | 86       |
|          |               |               |               |               | 106      |          |               |               | 85       |
|          | 1562          | 749           | 363           | 175           | 84       |          |               |               | 86       |
|          |               |               |               |               | 91       |          |               |               | 87       |
|          |               |               |               | 188           | 89       |          |               | 344           | 84       |
|          |               |               |               |               | 99       |          |               |               | 87       |
|          |               |               | 386           | 189           | 93       |          |               |               | 86       |
|          |               |               |               |               | 96       |          |               |               | 88       |
|          |               |               |               | 197           | 95       |          |               | 344           | 85       |
|          |               |               |               |               | 102      |          |               |               | 85       |
|          |               | 813           | 410           | 202           | 104      |          |               |               | 89       |
|          |               |               |               |               | 98       |          |               |               | 88       |
|          |               |               |               | 208           | 102      |          |               | 350           | 84       |
|          |               |               |               |               | 106      |          |               |               | 89       |
|          |               |               | 403           | 200           | 100      |          |               |               | 83       |
|          |               |               |               |               | 100      |          |               |               | 89       |
|          |               |               |               | 203           | 102      |          |               | 354           | 89       |
|          |               |               |               |               | 101      |          |               |               | 88       |

平均96.06 标准偏差5.37

平均86.84 标准偏差2.11

度分布范围为 $10\mu\text{m} \sim 3\text{mm}$ 的碳化硅球磨机粉碎物料（耐火材料用物料）进行划分的32划分数数据。制造厂方面的出厂检查数据与用户方面的进厂检查数据互不一致，常会引起纠纷。解决的办法应是双方都检查各自所采用的划分方法。如采用左右相抵法进行第二次划分时，将①+⑧与②+⑦或③+⑥与④+⑤分别汇集一起。

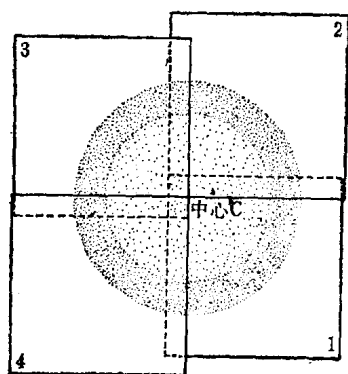
比较划分试样重量分配的标准偏差值，显然以左右相抵法为佳。

## 1.2 圆锥四分法 (cone and quartering)

此法就是众所周知的历来作为化学分析用的试样缩分法。此法对流动性好的粉体试料，由于粒度偏析使其划分精度远远不及双划分器的划分精度。可是，双划分器不适用于粘附凝集性、潮湿等的粉体，而圆锥四分法由于不需要添配特殊的仪器设备，所以仍然常被采用。

### 1.2.1 圆锥四分法操作的实习

- 如图1-3(a)所示，将铝箔1、2、3、4，顺次叠放。



(a)



(b)



(c)

图 1-3 圆锥四分法