第一章　概述

1.除尘器试验目的

在工业生产过程中，除尘器的作用是多方面的，它可以保护环境，保证安全连续生产，保障人们的健康。在有些生产工艺中，它是制造产品流程中不可缺少的生产设备（这时常称为“收尘器”或“分离器”）。所以，除尘器试验的目的可以是单一的，也可以兼顾数个，主要有：

1）评价除尘器状况，调查其是否符合排放标准及环境法规的规定。

2）查明设备使用情况，为消除缺陷、改进设备提供依据。

3）掌握除尘器性能，为充分发挥其持久、稳定、高效运行，制订出合理的操作方式，以便节省动力消耗、运行费用。

4）了解除尘器特性，研制、开发新型除尘器。

5）回收某些经济价值较大的粉尘，或者为了物尽其用，将粉尘进行分级分类。

2.除尘器试验分类

除尘器试验根据不同的试验目的，可分为模型试验、模型半工业性热态试验和工业性试验三类。

（1）模型试验　在试验室或试验场建造试验台，按照相似准则，以缩小的比例尺寸制作模型，模拟工业上实际安装使用的除尘器，研究和测定除尘器性能及其影响因素。例如，电除尘器气流分布均匀性试验台、极板极线结构选型对

需要全本请访问 www.ertongbook.com

比试验台等。由于试验室内的模型试验大都在室温条件下，用空气模拟烟气介质，故模型试验又称为冷态试验。

（2）模型半工业性热态试验　将缩小比例尺寸的模型安装于工业设备上，抽取含尘烟气进行试验。它是模型试验到工业设备上推广使用的过渡阶段，是新技术从形成到应用过程中不可缺少的一个环节。虽然半工业性热态试验时，烟气和粉尘的成分及性质与工业设备一致或很接近，但由于规模大小不同，烟气和粉尘的运动和受力状况总有所差别，因此，半工业性热态试验同样存在建立相似准则的问题。只有按一定的相似准则进行设计和试验，获得的试验结果才能定量地反映工业设备的真实情况。

（3）工业性试验　在工业设备的除尘器上，于正常生产工况条件下进行试验。对于锅炉等烟气介质温度较高的工业炉窑，其工业性试验，又称为热态试验。工业性试验时，表征烟尘特性的各参数之间的关系比冷态时复杂得多，因此，对粉尘的运载介质——烟气的特性参数，包括成分、温度、湿度、流速、流量、静压及粉尘浓度等都应认真测定。由于测量断面大，断面上各点的烟气参数不够稳定、均匀，因此，需要合理布置采样位置和采样点，才能使测得的数据比较真实地反映整个断面上含尘气流的状况。

无论模型试验、模型半工业性热态试验，还是工业性试验，都应满足以下要求：采样装置尽量简单、轻便、安全、可靠，并有足够的灵敏度与较好的适应性；采集的样品有代表性；测试数据能准确地反映除尘器的性能及污染物的数量与质量。

3.除尘器试验注意事项

除尘器性能测试是一项细致而繁琐的工作。如果一个环

节出现差错，就可能导致整个试验失败。所以，在测试过程中，必须自始至终保持认真负责、吃苦耐劳、实事求是的作风，并对以下一些问题，予以足够的重视。

（1）测试前应结合除尘器特点和锅炉负荷调度的情况，制订详细的试验计划。试验计划的内容一般包括：试验的任务和要求、除尘器及辅助设施的状况、测试项目及测点布置、试验程序及进度、试验的技术准备工作、试验的安全措施、人员的分工及培训等。

（2）熟练的测试队伍是完成试验任务的保证。测试前，需安排一定的时间，对测试人员进行技术培训，并根据实际情况进行一、二次预备性试验，以全面熟悉试验的组织、测试操作的要领及相互的配合，同时也可以初步掌握设备的运行特性。

（3）为了保证试验的顺利进行，测试前应对各种测试仪器进行认真的检查，发现有泄漏、破损、刻度不准等现象，均需及时更换。易损仪器或部件，需有一定的备品。

（4）测试前应充分征求锅炉运行人员的意见，力求试验期间保持规定的试验工况。工况不稳定，不安排试验。

（5）试验期间，试验人员应坚守岗位，各负其责，精心操作，并认真做好各项原始数据的记录。记录字迹要端正清晰，记录纸不得污损、丢失。

（6）试验负责人在测试过程中应经常监督锅炉和除尘器运行的主要工况参数，并巡回检查各处测试和采样工作，发现问题，及时解决。

（7）测试采集到的样品，是试验人员的劳动成果，也是下一步进行样品称量或分析的物质准备，必须指定专人用专用器皿妥善保管，不允许样品有所散失，也不允许样品中

掺入外界的杂质。

（ 8 ）测试工作应遵守安全规程的有关规定。高空测点处应搭脚手架，并设栏杆；晚间测试应有灯光照明，确保人身安全。对有可能影响设备安全运行的试验内容和方法，预先应进行事故预想，妥善制订相应的预防和处理措施，防止造成设备运行故障。

（ 9 ）测试数据应及时整理或计算。条件许可时，最好做到当天测试的数据，当天处理完毕，以便及时发现当天试验中的问题或不足，在以后的试验中予以弥补。

通常一个完整的测试过程包括计划、准备、测定、样品分析、计算、总结等六个部分。关于介质各项参数测定，样品采集、分析，试验资料的计算、归纳等将在以后各章中详细介绍。

第二章　燃煤及粉尘理化特性的测定

除尘就是从气体介质中把粉尘粒子分离出来，并加以捕集的过程。了解粉尘的理化特性，是正确选择除尘器参数，确定结构特点的基础，也是决定除尘器能否高效率运行的重要条件。

一、燃煤煤质的测定

燃煤的低位发热量Q_{Dw}^{y}、全水分W^{y}、含氢量H^{y}、含硫量S^{y}、灰分A^{y}，直接影响进入除尘器烟气的温度、湿度、二氧化硫浓度、粉尘浓度和烟气的成分。在进行除尘器性能试验时，必须对燃煤煤质预先有所了解。其中Q_{Dw}^{y}、W^{y}、A^{y}三项是发电厂每个运行班都应做的燃煤工业分析的内容，容易获得比较准确的数据。因此，本节主要介绍含硫量和含氢量的测定。

1.煤中全硫的测定

测定煤中硫元素含量的方法较多，但分析原理基本相同，都是将试样置于高温下燃烧，使其中各种形态的硫都转化为硫的氧化物，用适当试剂与此氧化物作用，成为硫酸或硫酸盐，然后用重量法或容量法测定硫酸根，最后计算出硫的含量。

(1)艾氏法

此法是测定全硫的经典方法，准确度高，重现性好，是国际上公认的标准方法；缺点是操作繁琐、费时较多。艾氏

需要全本请访问 www.ertongbook.com

法的要点是将试样与艾氏剂（比例为2:1的氧化镁与无水碳酸钠的混合物）混合，在有空气渗入的情况下，慢慢灼烧（逐渐升温至850℃），这时试样中的各种形态的硫全部氧化成二氧化硫，并立即被碳酸钠吸收为亚硫酸钠，进一步氧化后成为硫酸钠。用水将硫酸钠浸出后，再加入氯化钡溶液，使硫酸钠转化为硫酸钡沉淀，称出硫酸钡的重量，即可计算出试样中硫的含量。

艾氏法的主要化学反应如下：

$$煤 \xrightarrow[空气]{O_2} CO_2\uparrow + H_2O + N_2\uparrow + SO_2\uparrow + SO_3\uparrow$$

$$2Na_2CO_3 + 2SO_2 + O_2 \xrightarrow{\triangle} 2Na_2SO_4 + 2CO_2\uparrow$$

$$Na_2CO_3 + SO_3 \xrightarrow{\triangle} Na_2SO_4 + CO_2\uparrow$$

$$2MgO + 2SO_2 + O_2 \xrightarrow{\triangle} 2MgSO_4$$

$$MgO + SO_3 \xrightarrow{\triangle} MgSO_4$$

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 \xrightarrow{\triangle} CaCO_3 + Na_2SO_4$$

$$MgSO_4 + Na_2SO_4 + 2BaCl_2 = 2BaSO_4\downarrow + 2NaCl + MgCl_2$$

测定步骤如下：

1）精确称取分析试样1g（全硫含量超过8%时，称取0.5g）和2g艾氏剂，仔细混匀，盛于30ml坩埚内，再用1g（准确到0.1g）艾氏剂均匀覆盖在混合物上。

2）将装有试样的坩埚移入通风良好的高温炉中，必须在1～2h内将电炉从室温升至800～850℃，并在该温度下灼烧1～2h。

3）将坩埚取出，冷却到室温，用玻璃棒搅松坩埚中的

试样，如有未燃尽的黑色颗粒，应在800～850℃继续灼烧0.5h，待燃尽后用玻璃棒仔细捣碎，移入400ml烧杯中，用热水冲洗坩埚内壁，冲洗液倒入烧杯中，再加入100～150ml刚煮沸的水，充分搅拌，若有未燃尽的煤颗粒飘浮在液面上，则试验作废。

4）用倾泻法以定性滤纸过滤，用热水冲洗三次。然后将残渣移入漏斗中，用热水仔细冲洗，其次数不得少于10次。洗液总体积为250～300ml。

5）在滤液中滴入甲基橙指示剂2～3滴，然后滴加1:1盐酸溶液中和，再过量2ml，使溶液呈微酸性。将溶液加热到沸腾，用玻璃棒不断搅拌，并滴入10%氯化钡溶液10ml保持近沸腾状态2h，最后体积为200ml左右。

6）用致密定量滤纸过滤，并用热水洗至无氯离子为止（用硝酸银检验）。

7）将沉淀连同滤纸移入已知重量的瓷坩埚中，先在低温下碳化，然后在800～850℃下灼烧20～40min，取出坩埚，在空气中稍冷后，放入干燥器中冷却到室温，称重。

8）艾氏剂应作空白试验，即在不加试样的条件下，以相同的操作手续测定艾氏剂中硫酸根的含量。取硫酸钡（重量的绝对误差不超过0.001g）三次测定结果的平均值作为空白试验的结果。

测定结果按下式计算：

$$S_Q^f=\frac{(G_1-G_2)\times 0.1374}{G}\times 100 \qquad (2\text{-}1)$$

式中 G_1——硫酸钡重量，g；

G_2——空白试验硫酸钡重量，g；

G——煤样重量，g；

0.1374—— 硫酸钡换算为硫的系数；

S_{ad}^{t}——分析试样的全硫含量，%。

（2）高温燃烧中和法

此法的要点是将试样置于高温下（＞1350℃）充足的氧气流中燃烧，这时煤中各种形态的硫化物被氧化或分解成流的氧化物，然后用过氧化氢吸收，使其形成硫酸溶液，再用标准氢氧化钠溶液进行滴定。根据所消耗标准溶液的浓度和毫升数，即可计算出煤中全硫的含量。

高温燃烧中和法的主要化学反应如下：

$$\text{煤}+O_2 \xrightarrow[1250℃]{\text{石英砂}} SO_2+SO_3+CO_2+H_2O+Cl_2$$
$$+NO_2+\cdots$$
$$SO_2+H_2O_2=\!=\!=H_2SO_4$$
$$H_2SO_4+2NaOH=\!=\!=Na_2SO_4+2H_2O$$

测定步骤如下：

1）按图2-1组装好仪器设备，并事先测知燃烧管内各部位的温度分布，在镍铬推进棒上作好由管口至500℃和1250℃两个温度区域的距离标记。

2）进行气密试验，确定系统漏气与否。

3）取0.2～0.3g石英砂在燃烧舟的底部铺平，然后精确称取0.4～0.5g煤样放在石英砂上，再取0.2～0.3g石英砂覆盖在煤样上。

4）用量筒分别量取100ml已中和的过氧化氢吸收液，倒入2个吸收瓶中，塞好带有气体过滤器的橡皮塞。

5）将炉温控制在1250±5℃，并在燃烧管的细颈端上接2个吸收瓶，把盛有煤样的燃烧舟放在燃烧管端，随即用带有T形管的橡胶塞封闭燃烧管，往燃烧管内通人氧气，并

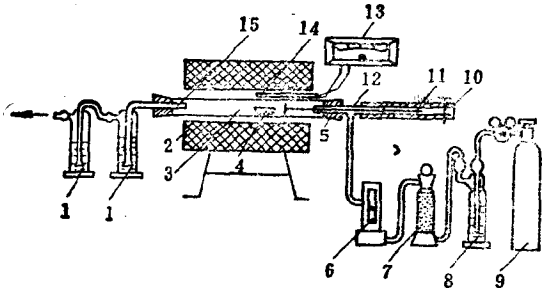


图 2-1　高温燃烧中和法测定全硫装置

1—吸收瓶；2—加热炉；3—燃烧管；4—燃烧舟；5—橡胶塞；6—浮子流量计；7—干燥塔；8—洗气瓶；9—氧气瓶；10—橡胶管；11—样品推入棒；12—T形玻璃管；13—高温计；14—热电偶；15—接受器

保持每分钟 350ml。把镍铬丝推棒推到预热的记号处，使燃烧舟前端处在500℃左右的区域内，预热5min；再用镍铬丝推棒把煤样推到高温带的记号处，立即把推棒往后抽出，以免熔化，煤样则留在高温带燃烧10min。

6）燃烧终了后，停止供氧，取下吸收瓶。

7）打开燃烧管末端橡胶塞，取下接受器，用镍铬丝钩取出燃烧舟。

8）打开吸收瓶的橡胶塞，将吸收液倾入500ml锥形瓶或烧杯中，用水冲洗吸收瓶、接受器及气体过滤器2～3遍，将其洗液合并于上述锥形瓶或烧杯中。在洗液中加入数滴混合指示剂，用氢氧化钠标准溶液滴定，溶液由桃红色变为钢灰色即为终点。

9）在燃烧舟内装入0.4～0.6g石英砂（不加煤样），按上述步骤测定空白值。

测定结果按下式计算：

此式仅对京西等地区特殊年老无烟煤不适用，这类特殊无烟煤的H^r约为1%。

（2）V^r为8%～24%的各种煤（主要为焦煤、瘦煤和贫煤以及少数年轻无烟煤）

$$H^r=0.075V^r+3.29 \qquad (2\text{-}5)$$

（3）$V^r>24\%$，焦渣特征为1～2号的烟煤（主要为不粘煤及部分长焰煤）

$$H^r=0.074V^r+2.16 \qquad (2\text{-}6)$$

（4）V^r为24%～40%，焦渣特征为3～8号的烟煤

$$H^r=0.053V^r+3.61 \qquad (2\text{-}7)$$

（5）$V^r>40\%$，焦渣特征为3～8号的烟煤

$$H^r=0.094V^r+1.92 \qquad (2\text{-}8)$$

（6）各种褐煤

$$H^r=0.0835V^r+1.205 \qquad (2\text{-}9)$$

利用上述各公式计算出的含氢量，与实测值之差一般小于±0.3%，少数误差大的也不超过±5%。对于高灰分煤，因煤中矿物质常常使V^r值偏高，而对H^r却影响不大，故在计算灰分大于25%煤的H^r时，应先对V^r进行校正，然后用校正值去计算H^r。

$$V^r_{校正}=V^r-(A^f-25)\times 0.3 \qquad (2\text{-}10)$$

式中 V^r—— 实测的可燃基挥发分，%

A^f——煤中分析基灰分，%

上述各公式计算出的H^r为可燃基含氢量，必须按下式换算成应用基含氢量。

$$H^y=H^r\left(\frac{100-W^y-A^y}{100}\right) \qquad (计算)$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

式中 H^y——煤中应用基含氢量，%；

W^y——煤中应用基水分，%；

A^y——煤中应用基灰分，%。

二、粉尘化学成分的全分析

煤灰的化学成分全分析至少应包括SiO_2、Al_2O_3、Na_2O、K_2O、CaO、MgO、Fe_2O_3及飞灰中可燃物的含量。若有条件分析出LiO、P_2O_5、TiO_2，则更全面。

煤灰成分分析中，Na_2O、K_2O需借助火焰光度计、原子吸收光谱仪或X射线荧光分析仪测定。其它成分均可用常规化学成分重量分析法测定。它们的测定方法可参阅有关资料和手册。

三、粉尘真密度的测定

粉尘是非常微细尘粒的集合体，尘粒之间存在着空隙，并为空气所充满。所以，堆积状态下包括空隙体积在内的粉尘密度叫松装密度；而将组成粉尘物质的密度称真密度。

如果某一粉尘不含空心微珠，测定其真密度可采用液体置换法，即比重瓶法。设空比重瓶质量为m_0，体积为V_0（一般为15～30ml），内部充满密度为ρ_y的液体，则总质量m_1为：

$$m_1 = m_0 + \rho_y V_0 \qquad (2\text{-}12)$$

测定时，将质量为m_c（一般为5～10g）、体积为V_c的粉尘装入比重瓶内，再加入液体到规定的体积V_0，这时瓶内液体的体积为$V_0 - V_c$，尘粒、液体和比重瓶的总质量为：

$$m_2 = m_0 + \rho_y(V_0 - V_c) + m_c \qquad (2\text{-}13)$$

将式(2-12)、(2-13)整理后，得粉尘的体积V_c为：

$$V_c=\frac{m_1-m_2+m_c}{\rho_y} \qquad (2\text{-}14)$$

因此，粉尘的真密度ρ_c为：

$$\rho_c=\frac{m_c}{V_c}=\frac{m_c\rho_y}{m_1-m_2+m_c} \qquad (2\text{-}15)$$

测试中充分排出粉尘空隙内的气体是很重要的，最好采用减压至1333Pa(10mmHg)以下的抽真空排气法，也可用加温或振荡的方法排气，但后者效果稍差。粉尘真密度的测定结果，以两个平行样品的算术平均值为准，两个样品测定结果的绝对误差不得大于 $\pm 0.02g/cm^3$。

应当指出，燃煤电厂粉煤灰中存在着空心微珠、漂珠，由于珠体内部含有N_2、CO_2等气体，用液体置换法仅能测得视密度，只有将珠体破碎，排除珠内气体，才能测得其真密度。

四、粉尘分散度的测定

粉尘分散度的测定方法很多，早期常用显微镜法、筛分法；现在常用气体分离法、液体沉降法、电传感法、惯性冲击分离法等。无论采用何种方法，都必须按等速采样原则采集具有代表性的样品。采集到的样品，如数量充足，应用圆锥体法加以混合和缩分，为测定准备好试样。

1. 显微镜法

尘粒外形愈接近于球体、四方体或多面体，用显微镜所测得的粒径愈接近其实际平均值。若尘粒呈片状，则测量经常带有某些固定的误差。这种方法的优点是可以观察粒子的形状，但只能直接了解粒径大小分布的情况，而不能得到按质量分级的数据。

2.筛分法

筛分法是将粉尘依次通过孔眼大小逐渐递减的筛子．在进行筛分时，尘粒的几何尺寸是区分粒度的主要标志。此时，尘粒大小相同而重量不等的粉尘将落在一个分级内。因此，筛分法测定的粉尘分散度不足以代表粉尘在气流中运动的特性。另外，小于10μm的粉尘，筛分法无法分级.

3.气体分离法

利用气体分离法测定粉尘分散度的典型仪器是巴柯 (Bahco)气体筛,其结构如图2-2所示。将10g粉尘样品以1～2g/min的速度，经给料漏斗送至转盘中心处。转盘的转速约3000r/min，由于离心力的作用，尘粒被甩向转盘边缘，并继续向外周运动。这时，它与经下部进口抽入的空气相遇，

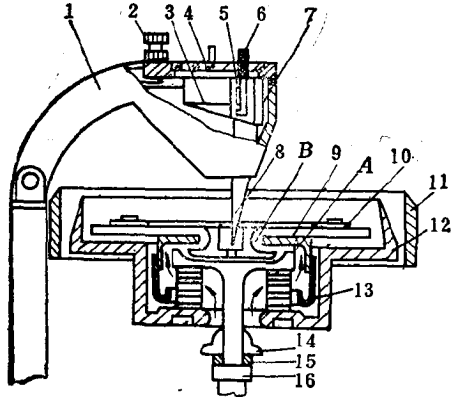


图 2-2 巴柯气体筛结构

1—活动支架；2—调节螺钉；3—金属筛；4—透明盖板； 5—垂直遮板；6—调节螺钉； 7—振导器； 8—给料漏斗；9—风扇叶轮； 10—挡环； 11—保护圈；12—转盘护圈；13—储尘容器；14—风挡；15—隔距片；16—定位螺母

在环缝 A 处受到气体的阻力。当某一粒径的尘粒的离心力大于气流对它的阻力时，尘粒即被甩向外周，最后被收集于下部的储尘容器中；当气流阻力大于尘粒离心力时，尘粒则被吹向轴心，随气流在 B 处转弯后向外周运动，此后由于气流速度逐渐降低而被收集于上部转盘护圈中。根据力的平衡关系可推导出，在环缝 A 处被分离的尘粒，其直径与气流速度的平方根成正比，故环缝处的气流速度愈大，在该处分离出的尘粒也愈大。这样，改变下部进口处挡板的位置，即可控制进气风量，从而可分离出不同大小的尘粒。由于其工作原理与旋风除尘器颇为相近，操作也较简单，故使用比较普遍。

4.液体沉降法

根据斯托克斯定律，当雷诺数 Re 小于1时，微小粉尘在介质中的沉降过程存在如下关系：

$$d=\sqrt{\frac{18H\eta}{g(\rho_c-\rho_y)\tau}} \qquad (2\text{-}16)$$

式中 H ——粉尘在介质中沉降高度，cm；

d ——粉尘粒径，cm；

τ ——粉尘沉降时间，s；

ρ_c ——粉尘的真密度（若含空心微珠则为视密度），g/cm^3；

ρ_y ——介质的密度，g/cm^3；

η ——介质的动力粘度，$g/(cm\cdot s)$。

从式(2-16)可看出，只要预先测定粉尘的真密度（或视密度）ρ_c，并测出液体的动力粘度 η、密度 ρ_y，经过一定的沉降时间 τ 后，不同的粒径的粉尘将分布在不同的高度上。这时采用沉降天平或光电分析，就可确定粉尘的分散度。这种方法操作要求比较严格，但测定结果的重现性较好。

5.电传感法

电传感仪器是根据库尔特原理制成的：通过压力差迫使液体中悬浮的粉尘颗粒随悬浮液一个接一个地穿越一小孔口，孔口两边各设置一个电极，当粉尘颗粒穿越孔口时，由于电阻发生变化引起电压脉冲，而脉冲振幅的大小与颗粒的大小成正比。通过放大装置把脉冲加以放大，根据测出的数据就可确定颗粒的大小与颗粒的数目，从而求得粉尘的分散度（见图 2-3 ）。这种方法的优点是快速，测定结果的重现性好。

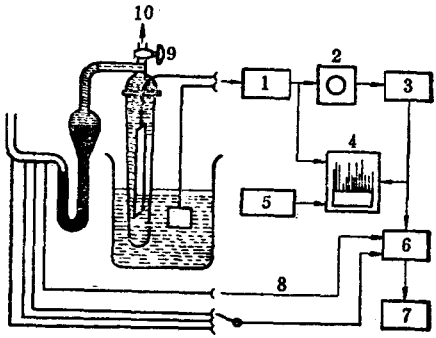


图 2-3　库尔特运转原理

1—主放大器；2—门槛线圈；　3—脉冲放大器；　4—记录；5—水平扫描；6—计算驱动；7—数字记录器；8—计算器开关；9—阀；10—接真空

6.惯性冲击分离法

串联冲击器由采样嘴、旋风式预分离器和10级缝隙形冲击板组成。每级冲击板在直径位置开有 4条互相垂直的缝隙喷口，上下两级缝隙喷口错开45°。含尘气体通过喷口冲击衬有滤膜的冲击板，在惯性作用下，粉尘粘附在滤膜上。利用惯性碰撞参数，可计算出惯性碰撞效率为 50%时被捕集的

粉尘粒径。若将10级冲击板串联起来，就可分别计算出各级冲击板捕集的粉尘粒径，并称出各粒径范围的重量。

五、粉尘摩擦角的测定

摩擦角是粉状物料静止和运动力学特性的物理量。了解粉尘的摩擦角，对正确设计除尘器管道和灰斗很有帮助。摩擦角包括静止角ϕ_t、内部摩擦角φ_{nm}、壁面摩擦角ϕ_{bm}。

1.静止角ϕ_t

静止角又叫休止角、安息角或堆积角。粉尘从漏斗状小孔连续落到水平面上，形成一个圆锥体，这一圆锥体母线与水平面的夹角就称作静止角，测定方法有图2-4所示的几种。

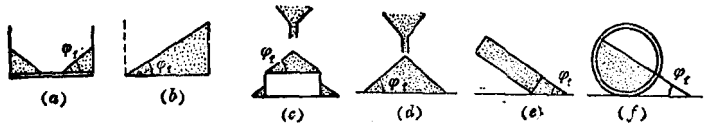


图 2-4 静止角的测定方法

a、b—排出法；c、d—注入法；e、f—倾斜法

通常煤灰或煤渣的松装密度$\rho=0.67\text{g/cm}^3$，$\phi_t=35°$；飞灰的松装密度$\rho=0.72\text{g/cm}^3$，$\phi_t=42°$。

2.内部摩擦角ϕ_{nm}

将物料沿内部某一断面切断产生滑动，作用于此面的剪切力与垂直力之比的反正切，称为内部摩擦角。测定内部摩擦角最简单的方法是直接切断法，如图2-5所示。测定产生滑动的切断力F和垂直方向的总作用力ΣG，则可计算内部摩擦角φ_{nm}。

$$\phi_{nm}=\text{tg}^{-1}\left(\frac{F}{\Sigma G}\right) \qquad (2\text{-}17)$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com