

化工与通用机械参考资料

# 离心机

通用机械研究所

一九七四年八月

# 毛主席语录

我们现在思想战线上的一个重要任务，就是要开展对于修正主义的批判。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

目 录

一、螺旋沉降离心机概述 (苏) ..... (1)

二、螺旋沉降离心机的结构 (苏) ..... (16)

三、卧式螺旋沉降离心机的主要部件 (苏) ..... (27)

四、液体在沉降区运动的研究及转鼓内流体的  
某些特性 (苏) ..... (46)

五、脱水区沉渣脱水机理的研究 (苏) ..... (56)

六、螺旋沉降离心机容积生产能力及沉渣负荷  
的计算 (苏) ..... (64)

七、离心机效率与其结构、工况和物料性质  
的关系 (苏) ..... (82)

八、悬浮液特性对离心分离效果的影响 (英) ..... (110)

九、离心机中液滴运动的理论模型 (英) ..... (123)

十、沉降式离心机分离的综合理论 (瑞典) ..... (129)

十一、沉降式螺旋卸料离心机的操作和用絮凝剂  
帮助矿浆脱水 (西德) ..... (138)

十二、离心机的型式及选择 (日) ..... (144)

十三、离心机性能参数 (美) ..... (168)

# 螺旋沉降离心机概述

在离心力的作用下，分离非均一系统的一切工艺操作，都叫做离心分离。实现这种离心分离的机器和设备叫做离心机。

通常仅把转鼓绕水平的、垂直的或倾斜的轴线回转的机器称为离心机，而把含有悬浮状固体颗粒的液流（或气流）回转而产生离心力的固定设备，称为旋风除尘器。

离心机转鼓的回转速度和从转鼓的回转轴到被分离的非均一系统的距离，是强化力场强度的重要技术特性。

## 一、回转运动的基本规律。离心力

假若具有质量为  $M$  的质点（图 1），相对  $O$  点（转动中心）沿圆周轨迹作运动，而且转角  $\varphi_n$  的改变与时间成正比，这样的运动则称为等速回转运动。

区别回转角速度和圆周速度。

半径  $r$  作等速回转时，经过时间  $t$ ，从某一起始位置  $OA$  量出的角度  $\varphi_n$ ，在半径扫过全部圆周时将等于  $2\pi$  弧度。比值

$$\omega = \frac{2\pi}{t} \quad (1)$$

叫做回转角速度。计算时，采用每分钟转数来计算回转速度比较方便。

假若半径  $r$  在 1 分钟期间内，转了  $n$  转，则一转的时间

$$t = \frac{60}{n}, \text{ 秒} \quad (2)$$

比较 (1) 和 (2)，则得

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \text{ 弧度/秒} \quad (3)$$

作等速回转运动的点（参看图 1）的圆周速度，根据下式确定

$$v_{\text{ок}} = \frac{2\pi r n}{60}, \text{ 米/秒} \quad (4)$$

式中：半径  $r$  以米表示，而回转速度  $n$  以每分钟转数表示。圆周速度的方向同质点  $M$  运动轨迹的切线相吻合。

角速度和圆周速度之间的关系表示为

$$v_{\text{ок}} = \omega r \quad (5)$$

在任何一个回转运动中，都产生向心加速度  $j$ ，以及与其等值而反向的离心加速度  $a_n$ 。两个加速度根据下式计算：

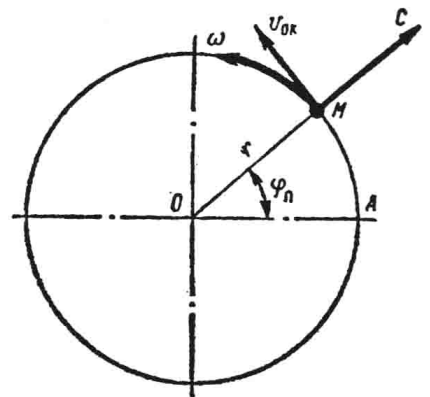


图 1 回转运动系统

$$j = a_n = \frac{2\pi n}{60} v_{0\kappa} \quad (6)$$

将公式 (3) 和 (5) 代入时, 重写式 (6) 得

$$j = a_n = \omega^2 r, \text{ 米/秒}^2 \quad (7)$$

$$j = a_n = \frac{v_{0\kappa}^2}{r}, \text{ 米/秒}^2 \quad (8)$$

利用离心加速度的数值, 求出分离因素  $\Phi_p$ 。从适合于分离不同分散度的非均一物系的观点来看, 分离因数是表示离心力工作的重要标志之一。

离心加速度值  $a_n$  同重力加速度值  $g$  无因次的比, 叫做分离因数。

$$\Phi_p = \frac{a_n}{g} = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (9)$$

通常认为分离因数  $\Phi_p$  和弗鲁德准数  $Fr$  相似。弗鲁德准数是特征速度的平方与特征长度和重力加速度乘积的比。

如果式 (9) 的分子和分母都乘以半径  $r$ , 则

$$\Phi_p = \frac{\omega^2 r^2}{rg} \quad (10)$$

将 (5) 式代入, 改写 (10) 式为

$$\Phi_p = \frac{v_{0\kappa}^2}{rg} \quad (11)$$

即式 (11) 符合了弗鲁德准数的定义。这样一来

$$\Phi_p = Fr \quad (12)$$

然而应该指出, 这个相似是形式上的, 因为两个准数的物理意义完全不同:  $\Phi_p$  是说明由机器所产生的离心力场的强度, 而  $Fr$  表明作用在液流上的惯性力与重力之比。

为实用起见, 分离因数的值是以转鼓的转速表示的。考虑到 (9) 式和 (3) 式, 并进行数值换算后, 则得

$$\Phi_p = \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2 \frac{r}{g} \approx 112 \times 10^{-6} n^2 r \quad (13)$$

式中:  $n$ ——转鼓的转速, 转/分,

$r$ ——回转半径, 米。

因为在计算和实践中经常使用分离因数值, 所以可采用 O.Л. 伯鲁克的计算图表 (图 2), 根据已知的转速和转鼓的直径能够求出  $\Phi_p$ 。图表中, 转鼓的转速及直径的选用范围, 与煤炭工业中采用的螺旋沉降离心机的上述参数相适应。

具有质量为  $M$  的质点沿以  $O$  点为圆心的圆周作运动时 (参看图 1), 作用在它上面的向心力

$$F = M\omega^2 r \quad (14)$$

方向为指向回转中心  $O$ 。数值相等, 但方向相反的力, 叫做离心力。

$$C = M\omega^2 r \quad (15)$$

对于回转的物体, 它的质量等于它的重量与重力加速度之比, 考虑到 (3) 式, 则离心力可以写成下式

$$C = \frac{G}{g} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2 r \approx \frac{Grn^2}{900}, \text{ 公斤} \quad (16)$$

式中：G——物体的重量，公斤；

n——转速，转/分；

r——回转半径，米。

更换成圆周速度，离心力可以表示为

$$C = \frac{G}{g} \cdot \frac{v_{0\kappa}^2}{r} \quad (17)$$

离心力的数值等于分离因数与回转物体的重量的乘积，即

$$C = \Phi_p \cdot G, \text{ 公斤} \quad (18)$$

在提高转鼓的转速时，离心力的增长很快（平方关系），在增大转鼓尺寸（半径）时，离心力的增长较平缓（成正比关系）。

当研究回转运动的特性时，除了离心力外，还必须考虑到可能出现被称为哥里奥利（转动的）惯性力  $F_{\kappa}$ 。哥里奥利加速度是哥里奥力的来源。即加速度不仅由于质点的运动是沿着圆周，而且也在径向上产生的。

哥里奥力按下式确定

$$F_{\kappa} = 2M\omega v_r \sin \alpha \quad (19)$$

式中：M——质点的质量；

$v_r$ ——质点相对于转鼓的速度；

$\alpha$ ——回转轴同相对速度间的夹角。

如果质点处在同回转的转鼓相对静止，或者它的相对位移与回转轴线平行的话，则哥里奥力等于零。

哥里奥力严重地影响着沉降离心机、碟片离心机转鼓内及液力联轴节和离心泵等等内部液流的运动。

多向性及力线的方向由回转中心沿半径方向伸展是离心力场不同于重力场的特点。重力场则是具有平行的定向的力线。离心力场下的水平面（即物体运动时，力沿该面不作功的表面），乃是被描绘成绕轴转动的同心圆柱形面。力线沿着这些表面的法线分布。

一般情况下，在离心机中仅考虑离心力场的作用。在采用低速离心机时（例如，在水介质中选矿），不仅必须考虑离心力场，而且还要考虑重力场。

大家知道，确定少的球形颗粒在粘滞液体中的运动是用斯托克斯阻力定律来说明的。基于斯托克斯定律，颗粒在重力场的最终速度表示为：

$$v_0 = v_{\text{CT}} = \frac{(\rho_{\text{r}} - \rho_{\text{ж}})d^2g}{18\mu_{\text{ж}}}, \quad (20)$$

式中： $\rho_{\text{r}}$ ——固体颗粒的密度；

$\rho_{\text{ж}}$ ——液相密度；

d——固体颗粒的直径；

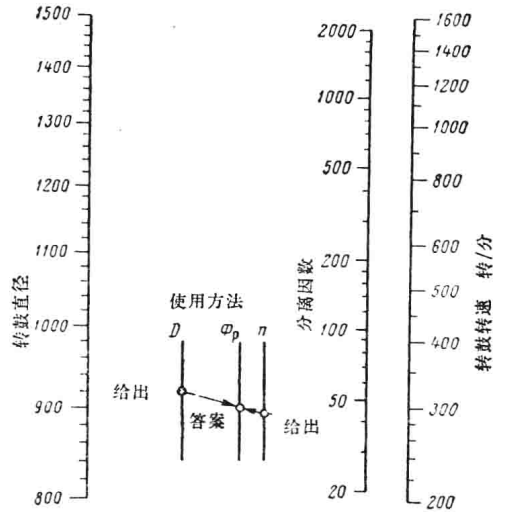


图2 根据转速和转鼓的直径确定分离因数

$g$ ——重力加速度；

$\mu_{\text{ж}}$ ——液相的动力粘度。

当粘滞液体中的球形颗粒，由于离心力的作用，在斯托克斯阻力定律作用的范围内作径向运动时，其运动速度方程式为：

$$v_{\text{и}} = \frac{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})d^2}{18\mu_{\text{ж}}}\omega^2 r, \quad (21)$$

式中： $\omega$ ——回转角速度；

$r$ ——回转半径。

当表示固体颗粒的有效密度为

$$\rho_{\text{эф}} = \rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}$$

改写 (21) 式，则

$$v_{\text{и}} = \frac{\rho_{\text{эф}}d^2}{18\mu_{\text{ж}}}\omega^2 r \quad (22)$$

由 (20) 式和 (21) 式可得出结论，颗粒在离心力场同在重力场的降落速度之比等于离心机的分离因数：

$$\frac{v_{\text{и}}}{v_{\text{сг}}} = \Phi_p \quad (23)$$

当螺旋沉降离心机工作时，处在转鼓中的液体和固体物料层，将给转鼓的内壁以相当大的压力。

在回转的离心机转鼓中（转鼓的内壁半径等于  $R$ ，而溢流面的圆柱形表面的半径  $R_{\text{сн}} = R_0$ ，从液体和固体物料层中在径向方向分离出一个与回转轴线距离为  $r$ ，高度为  $dr$  的小圆柱体（图 3）。

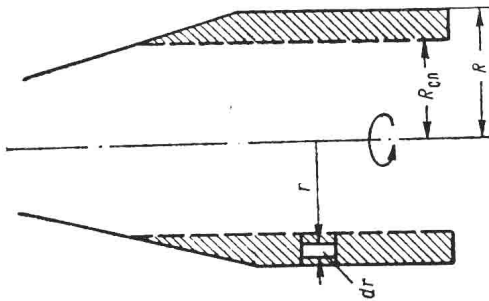


图 3 确定转鼓壁上压力的辅助图

考虑矿浆的密度为  $\rho_{\text{и}}$ ，则这些小圆柱体给转鼓内壁单位面积上的基本压力为：

$$dp = dr \rho_{\text{и}} \frac{\omega^2 r}{g} \quad (24)$$

$r$  从  $R_{\text{сн}}$  到  $R$  的范围内变化时，积分 (24) 式，得出作用在转鼓壁上的比压力

$$P_{y\text{и}} = \frac{\rho_{\text{и}}\omega^2}{g} \int_{R_{\text{сн}}}^R r dr = \frac{\rho_{\text{и}}\omega^2}{g} (R^2 - R_{\text{сн}}^2) \quad (25)$$

作用于转鼓内壁上的全部压力确定为：

$$P_{\Sigma} = P_{y\text{и}} S_{\Sigma} \quad (26)$$

式中： $S_{\Sigma}$ ——在液体覆盖下的转鼓表面积。

例如：НОГЛЛ—1350 工业离心机的圆柱体部分具有下列参数：

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{6.28 \times 700}{60} = 73.2 \text{ 弧度/秒}$$

$$R = 67.5 \text{ 厘米； } R_{\text{сн}} = 50.1 \text{ 厘米；}$$

$$S_{\Sigma} = 2\pi R l_{\text{и}} = 2 \times 3.14 \times 67.5 \times 60 = 25500 \text{ 厘米}^2$$

作用在转鼓内壁上比压力

$$P_{y\pi} = \frac{1 \times 73.2^2}{981} \times (67.5^2 - 50.1^2) \approx 11 \text{ 公斤/厘米}^2$$

全部压力达到

$$P_x = 11 \times 25500 = 280000 \text{ 公斤} = 280 \text{ 吨}$$

为了简化计算起见，取矿浆的密度  $\rho_{\pi}$  假定等于液相密度， $\rho_{\pi} = 1 \text{ 克/厘米}^3$ 。

如果同时计算悬浮在液层中和沉降在转鼓内壁上煤的重量，那么，不仅  $\rho_{\pi}$  值将高些，而总的压力也将相应地增大些。

## 二、离心分离过程和离心机的分类

本节转到按照离心机的用途来研究离心机的分离和分类问题。首先应当从原则上区分两个不同的过程——沉降离心分离和离心过滤，以及相应地区分沉降式离心机和过滤式离心机。

沉降离心分离是在回转的具有完整鼓壁的转鼓中进行的，在离心力的作用下，固体颗粒（分散相）在液体介质（分散介质）中沉淀。

离心过滤是在回转的具有多孔鼓壁（过滤格板）的转鼓中进行的，在离心力的作用下液体介质从固体颗粒中分离掉。

本书仅研究沉降离心分离，按照物理学的情况，它同重力场中进行的沉降具有相似之处（图4）。

沉降离心分离本身又分为沉降分离和离心澄清。后一过程是在高速离心机、超高速离心机及碟片分离机中进行的，而且其特征是从少量液相中进行仔细分离含有极细散的固体颗粒\*。这是在煤炭工业中没有实用价值的过程。〔13、42、94—96〕。

分离含有细的、中等和较粗的分散相，从稀到浓的悬浮液均可借助沉降分离作用来完成。

沉降分离作用可以分为三个物理过程：固体颗粒的沉淀，沉渣形成密集层以及从颗粒的空隙中压出液体。在离心机中被分离的同一批物料，这三个过程在时间上是按顺序进行的。

由于在充满液体的转鼓部分固体颗粒压挤的结果，获得两层：转鼓内壁上的沉渣层及其上面的被澄清的液层。

从机械的观点来看，沉降离心分离过程又分为：往回转的转鼓中送入原料液（矿浆），液相向溢流孔移动并从转鼓中排出分离液，以及向卸料孔输送形成的沉渣并从转鼓中排出沉渣等工序。

对螺旋沉降离心机来说，其运动的特点是，离心分离的最终产品沉渣和分离液，在转鼓中是往相反方向运动的，因之排除了卸料时两种产品再度混合的可能性。

螺旋沉降离心机是这样一种机器，即在选矿设备之后可将矿浆直接送入该机器得到两种最终产品：澄清液和脱水煤。在这方面是螺旋沉降离心机重要的工艺优越性之一。

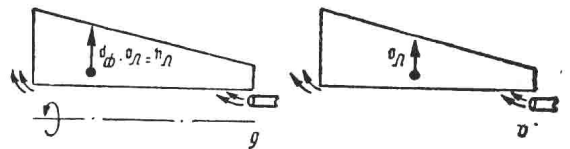


图4 示意图

a. 在重力场中沉淀；b. 在离心力场中沉淀。

\* 在技术术语中，有时把沉降离心分离同离心澄清看作是一个东西。



螺旋沉降离心机的全部过程都是连续进行的。它不同于在有些技术部门中所采用的间歇的和半连续作用的沉降离心机。连续操作的特点是离心机转鼓的转速可以恒定不变，并且具有稳定的生产率。

生产率是离心机的主要技术参数，同时也是离心机分类的重要标志。通常，它指的是在单位时间里所测定的卸料重量或卸料体积<sup>[57]</sup>。沉降离心机的生产率，表示为所输进的矿浆量米<sup>3</sup>/小时，或是以这种矿浆中所含的固相量（吨/小时）表示之；有时也以离心分离后得到的湿的固体产品（吨/小时）表示之。沉降离心机按照生产能力可以分成三类：小生产能力的（固体产品产量不大于1吨/小时），中等生产能力的（产量不大于10吨/小时）和高生产能力的（产量超过10吨/小时）。对于煤炭工业只有高生产能力的离心机适用。

转鼓转速或者表示力场强度的分离因数是离心机的其次的分类标志。

在煤炭工业中几乎不采用转鼓转速高于1300转/分，但直径较小（800毫米或更小）的沉降离心机，主要是因为它的生产能力低，这种离心机的分离因数大约为650(750)到3500\*。应用于选煤场和水力矿井地面总体布置的离心机，一般具有中等的转速，从700转/分（转鼓直径为1350~1500毫米）到1000（1300）转/分（转鼓直径为900~1100毫米）。对于这些机器，分离因数大约为400~500，在个别场合达到1000。最近在水介质中用离心机选矿，开始采用低速机器，转鼓直径为1100毫米，转鼓转速为150~300转/分（ $\Phi_p = 20 \sim 30$ ）。<sup>[59-61]</sup>

根据转鼓回转轴在空间的位置，可分为卧式离心机和立式离心机，苏联全部的和国外大多数的供煤炭工业用的沉降离心机的转鼓都是水平放置的，仅日本供加工矿泥的沉降离心机和 Sharples 公司生产立式结构的离心机。

离心机还可按照转鼓的形状分类。目前存在有圆柱形的，圆锥形的，圆柱—圆锥形的，以及外形比较复杂的机器。<sup>[129]</sup>卸料方式也可作为分类的标志。在煤炭工业中，仅应用连续作用的螺旋卸料沉降离心机。在外国对煤渣的脱水曾试图采用间歇作用的刮刀卸料的大型自动离心机，<sup>[53、130]</sup>然而，这种机器在煤炭工业中没有获得广泛应用。间歇作用的沉降离心机同样具有刮刀式的，惯性的，以及手工卸料的。所有这些机器的缺点都是生产能力低。

从工艺效果的观点来看，转鼓圆柱部分的长度同它的全长的比，转鼓的全长同最大直径的比以及转鼓圆锥部分的锥角是很关键的。但是，离心机按照这些标志来分类是困难的。因为转鼓可以是圆锥形的，这时显然没有圆柱部分。煤炭工业中采用的螺旋沉降离心机，取转鼓圆柱体部分长度同转鼓总长度的比值等于1:2；总长与转鼓最大直径之比大约为1.3:1到2:1，或更大些。

现代沉降离心机转鼓的圆锥角决定着输送不同成分沉渣的可能性，一般采用10°到15°（很少到18°）。

### 三、沉降离心机的转鼓和螺旋的参数

对于沉降离心机转鼓来说，主要参数如下（图5）：最大内径 $D_{max}$ ；总长度 $L$ ；圆柱部分的长度 $l_u^{**}$ ；圆锥部分的锥角 $\alpha_k$ 。充满在回转的转鼓里直到溢流孔位置的液体容积，叫做液体的液环容积，或者叫转鼓的工作容积 $V_{pa6}$ ，该容积在转鼓内壁上呈一同心圆层绕转鼓回

\* 分离因数小于3500的，被称为《常速离心机》，不同于《超速离心机》（分离因素大于3500）。

\*\* 假若转鼓是圆锥形的，那么 $l_u = 0$ ；假若转鼓是圆柱形的，则 $L = l_u$

转轴旋转，液环表面是一圆柱形，这一液环表面叫做溢流圆柱体。到溢流圆柱体表面为止的转鼓里面的圆柱体的腔，叫做溢流圆柱体容积  $V_{c.n}$ 。沿溢流孔（溢流圆柱体）的边缘测量的转鼓的直径用  $D_{c.n}$  来表示。转鼓的最大直径与溢流圆柱体直径之差的一半定为液环的最大深度，并用  $h_{max}$  表示之。

$$h_{max} = \frac{D_{max} - D_{c.n}}{2} = R_{max} - R_{c.n} \quad (27)$$

沉降离心机的转鼓分为沉降区和脱水区。沉降区的长度  $l_{oc}$  是平行于回转轴测量的位于液面之下的转鼓部分的长度；脱水区的长度  $l_{ob}$  是沿圆锥体母线测量的，从沉降区开始到卸料孔止的转鼓锥形部分的长度。

从转鼓里卸除沉渣是用称之为输送机结构亦即螺旋来实现的，螺旋是一整体的或带状的螺旋线，并围绕与转鼓同一轴线和同一方向旋转，但具有大小不同的圆周速率。

转鼓和螺旋之间有着动的联结。当确定离心机的转速时，最常提到的是关于转鼓的绝对转速  $n_p$  转/分（或者简单地用  $n$  转/分表示）。假若必须指出螺旋的绝对转速时，则用  $n_m$  转/分表示。但是经常采用的是螺旋的相对转速的概念，即转鼓和螺旋的绝对转速之差，也即

$$|n_{oro}| = |n_p - n_m|$$

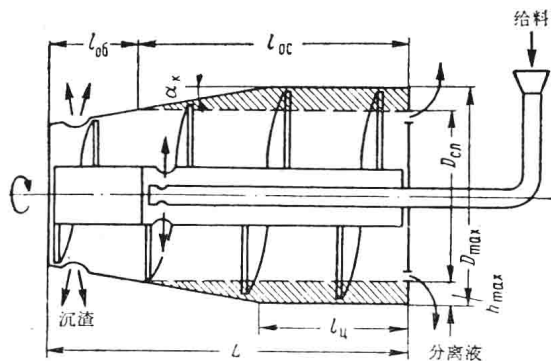


图5 螺旋沉降离心机转鼓的主要参数  
①沉渣；②分离液；③给料。

#### 四、离心分离的物料的特性

煤的粒度组成和密度是其最重要的物理特性。在大多数情况下，煤的或矿物的颗粒，以及沉降在离心机中的煤或矿物的连生物具有从几微米到几毫米的粒度，也就是分散性的物料。个别的颗粒的密度，依其在纯煤中或矿物成分中的含量而定，可在广泛的范围内变化。对于纯煤大约为1.2~1.3克/厘米<sup>3</sup>，对于岩层大约到2.5克/厘米<sup>3</sup>，对于黄铁矿大约到5克/厘米<sup>3</sup>，连生物的密度处于上述密度范围值之间。因而煤不仅是分散性的物料，而且是具有不同密度的多矿物的物料。

粘度、外摩擦系数以及取决于抗剪强度的内摩擦系数等性质影响煤在转鼓中的输送。

煤的粒度组成借助于筛分分析和沉降分析来确定。筛分分析是在干式或湿式筛分机上，借助于一组筛子进行的。在这一组筛子中，最细的筛子的孔眼为0.074毫米。所采用的筛子也有网眼为0.053毫米，甚至是0.04毫米的。通过下面的筛子的物料，再进行沉降分析。对于沉降分析现有很多种不同的方法和设备，在专门文献中有所叙述。〔44、104〕

可以采用平均直径值来估算物料的粒度

$$d_{cp} = \frac{\sum \gamma d}{100} \quad (28)$$

物料的粒度同样可以用比表面积说明，即物料颗粒的表面积同重量之比。煤的颗粒越小，其比表面积越大。

如果某一粒度的物料，其粒子具有平均尺寸  $d_{cp}$  和密度  $\rho_{\tau}$ ，且粒子的数目为  $k$ ，那么，若这些粒子的形状为球形时，则可得到它们的总表面积  $S$  和总重量  $G$ ：

$$S = \pi d_{cp}^2 k \quad (29)$$

$$G = \frac{\pi d_{cp}^3 \rho_{\tau} k}{6} \quad (30)$$

比表面积

$$S_{y\pi} = \frac{S}{G} = \frac{6\pi d_{cp}^2 k}{\pi d_{cp}^3 k \rho_{\tau}} = \frac{6}{d_{cp} \rho_{\tau}} \quad (31)$$

对于总的物料来说，乃是一个各种粒度颗粒的混合物，如果已知它的密度和颗粒组成，参考公式 (28) 和 (31)，比表面可以表示为

$$S_{y\pi} = \frac{600}{\rho_{\tau} \sum r d_{cp}} \quad (32)$$

例如，对具有平均密度  $\rho_{\tau} = 1.5$  克/厘米<sup>3</sup> 的矿泥，其筛选组成如下：

粒度 (毫米) .....	1-3	0.5-1	0.25-0.5	0.15-0.25	0.074-0.15	0-0.074
同级粒子的平均尺寸(厘米)	0.2	0.075	0.0375	0.02	0.0112	0.0037
比例 (%) .....	10	20	15	15	10	30

比表面积将得：

$$S_{y\pi} = \frac{600}{1.5 \times 4.63} \approx 86.5 \text{ 厘米}^2/\text{克} = 8.65 \text{ 米}^2/\text{公斤}$$

通常水作为悬浮液的分散介质（在悬浮液中煤是分散相），因为水中含有这种或那种被溶解的矿物盐。在某些情况下（在重液中离心分离选煤时，分散介质可以是高浓度的盐溶液（如氯化钙））。

用离心机分离矿浆时，液体（水）的性质对分离效率影响很大。

水的物理性质——密度、粘度、使物体湿润的能力，以及腐蚀性的大小——决定于温度、溶解盐的数量和成分及氢离子的浓度（ $pH$  值）等。

表 1 给出化学纯水的密度和粘度的变化与温度的关系〔1〕。

随着温度的提高，水的密度在不大的范围内变化，这对固相沉降速度不会产生大的影响。同时，随着温度的提高，水的粘度将大大降低，从而使颗粒的运动速度增加。在水温由  $10^{\circ}\text{C}$  提高到  $50^{\circ}\text{C}$  的情况下，物料颗粒的沉降速度增大为：

$$\frac{v_{50}}{v_{10}} = \frac{\mu_{10}}{\mu_{50}} = \frac{1.3061}{0.5497} \approx 2.36$$

选矿厂系统的循环水，以及输送给工厂的新鲜工业用水，都含有溶解的化学物质。在水中可能含有阳离子  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^+$ 、 $\text{Mg}^{++}$ 、 $\text{Fe}^{++}$  以及阴离子  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{--}$ 、 $\text{SiO}_3^{--}$ ，在矿井水中含有碘、溴及其他离子等。通常，水中还溶解有各种气体：氧、氢、氮、碳酸气，有时还有氨气。从黄铁矿中分离含硫煤，可能形成游离的硫酸。

表1 水的密度和粘度的变化与温度的关系

温 度 °C	密 度 克/厘米 <sup>3</sup>	动力粘度 厘泊
0	0.99987	1.7887
4	1.00000	—
5	—	1.5155
10	0.99973	1.3061
15	0.99913	1.1406
20	0.99823	1.0046
30	0.99567	0.8019
50	0.98807	0.5497

水的化学成分影响水的物理性质——粘度和表面张力，因而也就间接地影响离心沉降的效果。

离心机的腐蚀，在很大程度上决定于水的化学成分。例如，大家都知道，当沉降离心机的输送螺旋的防护层遭到严重腐蚀时，物料沿转鼓移动的条件和它的分离效果显著变坏。

使煤湿润的能力，也就是煤的含水能量，取决于水的表面张力值和煤本身的表面性质。

水的表面张力随着温度的提高而减小。例如，水的表面张力在 0°C 时，等于 75.6 达因/厘米，而在 60°C 时为 66.2 达因/厘米，表面张力越大，在脱水物料颗粒间的空隙（毛细管）中的液体上升就越高，其残留的含水量也就越高。

向水中增加少量的有机物质，可使水的表面张力明显下降。水中溶解的无机盐，能提高表面张力。

## 五、矿浆中与固相和液相含量有关的规律性

离心机的原料液是可流动的混合物，其中固体颗粒悬浮于液体中。

矿浆中固体物料的重量浓度我们用  $G_T$  公斤/升来表示（实际上经常采用  $G_T$  克/升），如果固体物料的密度为  $\rho_T$  公斤/升，那么，矿浆中单位份额的体积浓度  $\varphi$ ，用方程式表示为

$$\varphi = \frac{G_T}{\rho_T} \quad (33)$$

进入转鼓中的矿浆的平均密度可根据下式计算

$$\rho_n = \rho_T \varphi + \rho_{\text{ж}} (1 - \varphi) \quad (34)$$

而矿浆的单位体积的平均重量

$$G_n = G_T + \rho_{\text{ж}} (1 - \varphi) \quad (35)$$

当考虑到式 (33)，并采用水的密度  $\rho_{\text{ж}} = 1$  克/厘米<sup>3</sup>，我们得到：

$$G_n = G_T + \left(1 - \frac{G_T}{\rho_T}\right) \quad (36)$$

例如：已知矿浆中固体的  $G_T = 80$  克/升（0.08 公斤/升），密度  $\rho_T = 2$  公斤/升，那么，一升矿浆的重量  $G_n$  为：

$$G_n = 0.08 + \left(1 - \frac{0.08}{2}\right) = 1.04 \text{ 公斤}$$

矿浆密度  $\rho_n$ （在数值上等于矿浆的重量  $G_n$ ）的计算与固体浓度及固体密度有关，为了

简化计算可以利用伯鲁克建议的图表<sup>[36]</sup>。

图 6 和图 7 表示的图表，对于稀的矿浆 ( $G_r = 20 \sim 200$  克/升) 和较大浓度的矿浆 ( $G_r = 200 \sim 600$  克/升) 都是适用的。图表对于从已知  $\rho_n(G_n)$  值过渡到以克/升或以固液比表示的固相浓度  $G_r$  都可以采用，后一种形式在实践中是经常应用的。

例如：1 升矿浆重 1060 克，煤的密度  $\rho_r = 1.6$  克/厘米<sup>3</sup>，那么，根据图表（参看图 6）在矿浆中煤的浓度  $G_r = 160$  克/升。这时固液比大约为 1 : 5.7。

在矿浆中相对的水分量  $W_n$  可以由下式确定

$$W_n = \frac{G_n - G_r}{G_n} 100\% \quad (37)$$

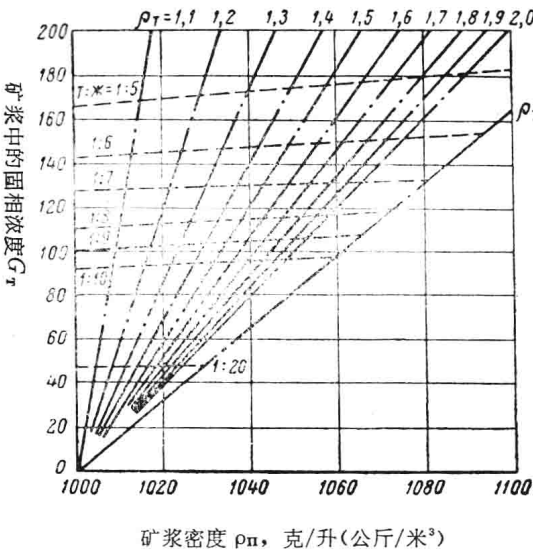


图 6 对低浓度矿浆，根据矿浆密度确定固相成分及固液比（重量比）的图表

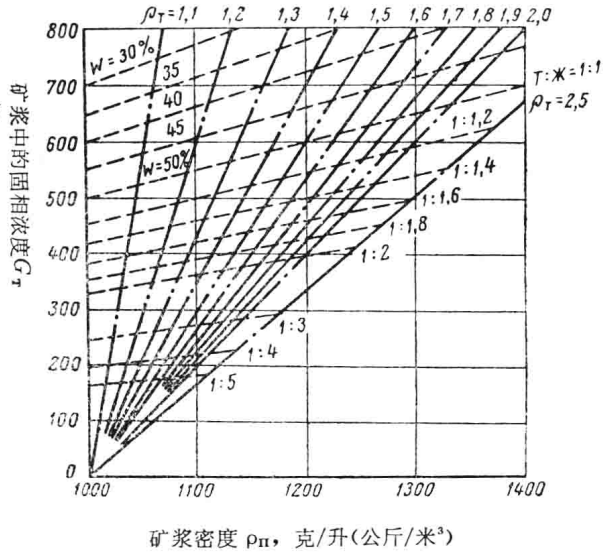


图 7 对高浓度矿浆，根据矿浆密度确定固相成分及固液比（重量比）的图表

为了确定矿浆粘度，我们认为矿浆中没有初始剪应力，这时可以采用巴琴斯基公式得到<sup>[12]</sup>

$$\mu_n = \mu_{ж} (1 + 4.5\varphi) \quad (38)$$

由于受到运动条件所限，转鼓中粒子沉降速度的降低可借助于利亚申科公式（Формула Лященко）确定的系数  $v$  来计算<sup>[75]</sup>。

$$v = (1 - \varphi)^8 \quad (39)$$

多孔性的概念，也是沉降离心分离过程的一个重要的指标，这个概念一般应用于解释由接触的固体粒子形成支架状沉渣时的分离过程。

孔隙的数量  $\theta$  表示在形成的沉渣中液体的相对体积，于是可得：

$$\theta = 1 - \varphi' \quad (40)$$

式中： $\varphi'$ ——单位体积中被固体沉渣占据的那部分体积。

## 六、沉渣中水分的类型、最大分子容水量

沉渣的毛细管结构决定于物料的粒状组分和在脱水后的物料层中粒子的堆积密度。

在粒状物料脱水时，具有或大或小的而同样尺寸的颗粒，形成较大的毛细管。在机械的作用下，从这种毛细管排除水分，比从在大的颗粒间夹有小颗粒而形成弯曲且较狭窄的毛细管中排除水分更容易些。

脱水时，流经毛细管的液体体积，用普阿泽依利方程式（уравнение Пуазейля）计算：

$$q_{\kappa} = \frac{\pi r_{\kappa}^4}{8\mu_{\kappa}} \cdot \frac{dp}{dl} \quad (41)$$

式中： $q_{\kappa}$ ——单位时间里流经毛细管的液体体积；

$r_{\kappa}$ ——毛细管的半径；

$\mu_{\kappa}$ ——液体的动力粘度；

$\frac{dp}{dl}$ ——压力梯度。

这就是说，对于细的毛细管，流经的液体体积显著地减少，因为这部分液体体积与毛细管半径的四次方成正比。

在煤渣层中除了有保持水分的毛细管力外，还具有固相和液相分子间的相互作用力。

同煤的性质有关的水分可分成如下几种类型：

**化合水** 同煤的矿物及有机物组分化合的水分；

**吸附水分** 煤的颗粒表面上以分子力保持的液体呈薄膜状的水分；

**附着水分** 在粒子接触处以及在煤的内部孔隙中由表面张力保持的形成屏障形式的水分；

**毛细水分** 充满在颗粒间间隙和以毛细管力保持的水分；

**重力水分** 在煤层中仅以重力保持的水分。

含水量取决于固相表面的物理化学性质，它的颗粒组分和液相的特性。

从实用的观点看，煤可以分成：绝对干燥的，仅含有化合水；空气干燥的，只含有内在水分或潮解水分（吸附水分和部分附着水分）；湿润的，即含有一定数量的毛细水分和附着水分；以及潮湿的，在煤中除了含有上述各种水分外，还有一定数量的重力水分。

**矿浆** 是煤和水的可流动的混合物，矿浆中实际上不存在可塑性。

内在水分或是吸湿水分的数量是评价各种煤的特性指标。

用现代技术方法有可能排除毛细水分及附着水分。作用在脱过水的煤上的力场越大

$\left[ \frac{dp}{dl} \text{ 在(41)式中} \right]$ ，从细毛细管中排除水分就越多。在这方面离心机是最有前途的装置，因为它能建立强大的力场。

只有把煤烘干才能做到使水分完全排除（除化合水外）。

通常用最大分子容水量的概念来评价同煤紧密结合的湿含量<sup>[27]</sup>，最大分子容水量包括煤的内在水分和毛细管力所保持的水分，这种毛细管力超越了在现代脱水技术水平下所能建立的最强大的力场。从机械脱水的观点来看，最大分子容水量，乃是表示水分（不进行热力干燥，而不可能排除的水分）的上限值（理论极限）。

可以把最大分子含水量看作是分散性物料的物理常数，它表示被该种物料固有的力场所确定的含水量，并且包括了许多大家都知道的水分的形态。对于土壤和滤渣的分级，在实践中广泛采用最大分子含水量的指标，因之，在煤粉脱水的实践中，可以运用最大分子含水量的指标，勿须从工程地质学方面做重大改变。

已知有三个确定最大分子含水量的主要方法：分馏法、离心分离法和介质含湿法。按我们的观点，对于煤粉最可靠的指标可用介质含湿法来得到<sup>[27]</sup>，此方法不须用机械方法从湿的物料中分离出水分，而用比考察的物料的比表面积具有不可比拟大的比表面的介质（例如：用过滤纸包）以更稳定的方法分离水分。最大分子含水量的确定方法，在技术文献中有详细的说明，且在任一工厂实验室中都不提出报告。

## 七、螺旋沉降离心机工作效率的评定

螺旋沉降离心机的工作效率，按照它的作用原理，应当根据液相的澄清程度和煤渣脱水的程度来加以评定。

从固体产品中完全分离出水分是理想的，但实际上则达不到。

在工业沉降离心机中要得到清浄的分离液，只有应用絮凝剂才可能。滤渣在离心分离过程中进行深度脱水是可以获得清浄的分离液的，但这是一个很困难的课题。

在离心机中评定沉降的（澄清）程度可以借助比较简单的公式进行，此公式基于原料和分离液中固相浓度的数据：

$$\eta_{oc} = \left( 1 - \frac{G_{\Phi}}{G_{\Pi}} \right) 100\% \quad (42)$$

式中： $\eta_{oc}$ ——沉降的程度%；

$G_{\Phi}$ 、 $G_{\Pi}$ ——分别为分离液和原料液中的固相浓度，公斤/升。

例如：在沉降离心机中，加工浮选精矿的矿浆，其中  $G_{\Pi} = 0.25$  公斤/升，得到的分离液是  $G_{\Phi} = 0.05$  公斤/升，则

$$\eta_{oc} = \left( 1 - \frac{0.05}{0.25} \right) 100\% = 80\%$$

式（42）给出了作为澄清联合机组的离心机的工作效率的一般概念，但它没有考虑被分离物料的特征、结构参数和机器的工况。

根据所得指标接近于理论极限的程度，能够较正确的评价沉降的效率，这种理论极限，在给定工况及给出分离物料的特性时，对于一定结构的机器是可达到的。

作为这种沉降效率的标准，可采用系数

$$\eta_{oc} = \frac{\gamma_{\Phi \cdot p}}{\gamma_{\Phi}} 100\% \quad (43)$$

式中： $\gamma_{\Phi \cdot p}$  和  $\gamma_{\Phi}$  分别为离心机分离液中计算的和实际的固相带走量占原液中固相的百分比\*。

确定  $\gamma_{\Phi \cdot p}$  和  $\gamma_{\Phi}$  的方法和例子将在下面引证。

在生产条件下直接测量随分离液带走的煤粉量，或者脱水（潮湿）沉渣的产量  $\gamma_{oc}$ ，一般是困难的，因为对此必须系统地选出大量的原料液和脱过水的滤渣（或分离液），要考虑试样选取及干燥物料重量的称量时间，以及对固相带走量进行计算。同时，由于现代沉降离

心机的生产能力可达到200~300米<sup>3</sup>/小时原料液，甚至在几秒钟的时间里就必须选出几百升矿浆。对这样多数量的矿浆进行称量和分析是有相当大的困难的，并且不可避免地要带来极大的误差。此外，在这段时间里人们也不愿意中断离心机的供料，因为这将破坏了所规定的离心机的工况。

同时，用计算的方法确定脱水沉渣的产量（或者随分离液带走的煤粉），是可以具有足够的准确性，因而不必直接称量产品。为此，必须知道离心机的原料液和分离液在单位体积中的固相重量的算术平均值（在实验时间内），脱水沉渣的含水量及原料液中固体部分的密度和随分离液带走的固体部分的密度。

为实用起见，利用公式（37），并将公式（36）得出的  $G_{\Pi}$  值代入。

经变换后，我们得到

$$W_{\Pi} = \frac{\rho_{\tau} - G_{\tau}}{\rho_{\tau}(1 + G_{\tau}) - G_{\tau}} 100\% \quad (44)$$

式（44）不仅对确定沉降离心机原料液中的液相含量  $W_{\Pi}$  适用，而且，对确定分离液中的液相含量  $W_{\Phi}$  也适用。

$$W_{\Phi} = \frac{\rho_{\tau, \Phi} - G_{\tau, \Phi}}{\rho_{\tau, \Phi}(1 + G_{\tau, \Phi}) - G_{\tau, \Phi}} 100\% \quad (45)$$

式中： $\rho_{\tau, \Phi}$  和  $G_{\tau, \Phi}$ ——分别为分离液中的固相密度和浓度，公斤/升。当取  $\rho_{\tau, \Phi}$  和  $\rho_{\tau}$  等于 1.6\*\*时，将得到

$$W_{\Pi} = \frac{1 - 0.625G_{\tau}}{1 + 0.375G_{\tau}} 100\% \quad (46)$$

$$W_{\Phi} = \frac{1 - 0.625G_{\tau, \Phi}}{1 + 0.375G_{\tau, \Phi}} 100\% \quad (47)$$

取原始矿浆的重量为100%，按照水分我们把原料液和离心分离的产品组成平衡式，则

$$100W_{\Pi} = \gamma_{oc} W_{oc} + (100 - \gamma_{oc})W_{\Phi} \quad (48)$$

由此：

$$\gamma_{oc} = \frac{W_{\Phi} - W_{\Pi}}{W_{\Phi} - W_{oc}} 100\% \quad (49)$$

为了把湿煤换算成干煤的沉渣产量，采用式（ $\gamma_{oc}^c$  表示在沉渣中的干煤量占原料液中干煤量的百分比）

$$\gamma_{oc}^c = \gamma_{oc} \frac{100 - W_{oc}}{100 - W_{\Pi}} \% \quad (50)$$

或者由（49）和（50）式得到最后形式

$$\gamma_{oc}^c = \frac{W_{\Phi} - W_{\Pi}}{W_{\Phi} - W_{oc}} \cdot \frac{100 - W_{oc}}{100 - W_{\Pi}} 100\% \quad (51)$$

式中： $W_{\Pi}$ 、 $W_{oc}$  和  $W_{\Phi}$ ——分别为原料液、沉渣和分离液中的含水量，用占湿产品的%来表示。

$W_{oc}$  值是在实验室中用分析的方法确定的，而  $W_{\Pi}$  和  $W_{\Phi}$  根据（46）和（47）式比较容易计算，并具有足够的准确性。

\* 在计算生产能力的大小时，对于分离液带走的煤粉量的符号也采用  $\varepsilon$ 。

\*\*  $\rho_{\tau}$  值在相当广泛的范围内变化时，滤渣的最后流出量影响很小，因之简化计算，采用  $\rho_{\tau} = 1.6$  公斤/升。



例如：供给沉降离心机的浮选精矿的矿浆，其固相含量  $G_T = 0.25$  公斤/升；分离液中的固相含量  $G_{T,\Phi} = 0.05$  公斤/升；沉渣的湿含量  $W_{oc} = 25\%$ 。

按照 (46) 和 (47) 式确定原料液和分离液中的含水量

$$W_{\pi} = \frac{100 - 6.25 \times 0.25}{100 + 3.75 \times 0.25} \times 100\% = 77.1\%$$

$$W_{\Phi} = \frac{100 - 6.25 \times 0.05}{100 + 3.75 \times 0.05} \times 100\% = 95.3\%$$

根据 (51) 式脱水沉渣（干燥状态）的产量

$$\gamma_{oc}^c = \frac{95.3 - 77.1}{95.3 - 25} \times \frac{100 - 25}{100 - 77.1} \times 100\% = 84.8\%$$

而随分离液带走的煤粉（占原料液中煤的%）

$$\gamma_{\Phi} = \varepsilon = 100 - \gamma_{oc}^c = 15.2\%$$

在研究离心机中的脱水效果时，一般都把注意力集中到脱水产品的最终的总湿含量上，而不提供脱水指标的实际特性，因为此时没有考虑分离产品本身联结水分的能力。在国外技术文献中，离心机脱水效果首先是按照脱水煤中所谓外在水分的含量来鉴定的，外在水分是以产品的总水分同它在空气干燥状态的水分差别计算出来的。

根据沉渣湿含量接近于理论上所能达到的机械脱水的极限（此极限借助于最大分子容水量来确定）程度，鉴定煤粉离心脱水效率更为正确。

然而，对具体的物料来说，在实验中获得的最大分子容水量的数值中，还须加进最细粒级的修正值，其必要性是基于实验的方法。

细煤泥的脱水是在具有很高分离因数（例如20000）的超速离心机中进行的，大量实验室研究表明，沉渣的最终含水量平均超出最大分子容水量的1.7倍。对于渗透性和弹性不良的土壤，得到了近似的修正数值（67）。修正系数仅仅应当用于稳定地保持毛细水分的最细级煤粒（例如小于0.074毫米）。对于较大的颗粒，实验表明，不修正的最大分子容水量，可以做为机械脱水的有效界限。

对考虑到细分散颗粒的修正系数所采取的最大分子容水量数值，我们称为称出的最大分子容水量  $W_{\text{мол}}^*$ 。那么，在所考察的脱水沉渣的试样中确定大于  $74\mu$  的颗粒级 ( $\gamma^+$ %) 和小于  $74\mu$  的颗粒级 ( $\gamma^-$ %) 的产量后，以及确定他们各自的最大分子容水量 ( $W_{\text{мол}}^+$  和  $W_{\text{мол}}^-$ ) 值之后，我们得到称出的最大分子容水量

$$W_{\text{мол}}^* = \frac{W_{\text{мол}}^+ \gamma^+ + 1.7 W_{\text{мол}}^- \gamma^-}{100} \% \quad (52)$$

在换算最大分子容水量的基础上建议以下式来鉴定脱水过程的效率

$$\eta_{oc} = \frac{W_{\text{мол}}^*}{W_{oc}} 100\% \quad (53)$$

例如：确定在螺旋沉降离心机中浮选精矿脱水过程的效率，如果  $W_{oc} = 23.4\%$ ， $\gamma^+ = 50.6\%$ ， $\gamma^- = 49.4\%$ ， $W_{\text{мол}}^+ = 5.55\%$ ， $W_{\text{мол}}^- = 13.95\%$ 。

我们确定称出的分子容水量为：

$$W_{\text{мол}}^* = \frac{50.6 \times 5.55 + 1.7 \times 49.4 \times 13.95}{100} = 14.5\%$$

脱水过程的效率：