

# 煤泥水的过滤

[苏] O.Л.勃鲁克 著

煤炭工业出版社

TD94

22

3

# 煤 泥 水 的 过 滤

〔苏〕O.П.勃鲁克 著

谈宏烈 王敦曾 高鸿翔 译  
洪瑞燮 张占安

煤 炭 工 业 出 版 社

## 内 容 提 要

本书阐述工业过滤的理论基础，煤悬浮液的性质和过滤过程的规律，介绍选煤厂使用的圆盘式、筒式和带式真空过滤机，以及现代的卧式、立式压滤机和辅助设备。

详细论述未经洗选的和经过洗选的烟煤、无烟煤和页岩的煤泥，用真空过滤机和压滤机的过滤工艺，并介绍煤悬浮液过滤过程的强化和最佳化方法。

本书适用于选煤厂的工程技术人员、科研及设计工作者，也可供高、中等矿业院校的学生作参考。

责任编辑：施文华

О.Л.Брук

Фильтрование

угольных суспензий

Издательство «Недра», 1978

煤 泥 水 的 过 滤

〔苏〕О.Л.勃鲁克 著

谈宏烈 王敦曾 高鸿翔 译  
洪瑞葵 张占安

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本787×1092mm<sup>1/32</sup> 印张10<sup>1/4</sup>

字数226千字 印数1—1,460

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

ISBN 7-5020-0062-3/TD·60

书号 2974

定价 4.35元



## 前 言

机械化采煤方法的广泛应用使煤炭工业的生产效率大大提高，但由此也增加了原煤中的细粒级和泥质组分。在这种情况下，要保证以高质量的选煤产品满足国民经济的需要，就特别困难了。

末煤洗选量的增加，要求扩大选煤厂浮选-过滤车间的处理能力。这种影响不能不反映到浮选产品的脱水设备上来，亦即要求强化中型真空过滤设备的工作，制造大型的圆盘式、筒式和带式真空过滤机。新设备的使用从根本上改变了浮选精煤和煤泥的真空过滤工艺。

浮选尾煤的过滤，则产生了更大的变化。环境保护和防止工业污染对生产提出了新的要求，致使必须制造和使用过去在选煤工业中极少使用的压滤设备。现已生产了大型压滤机，设计并建造了使用这些大型压滤机的过滤站，以取得便于运输的浮选尾煤滤饼和澄清的复用水，从而将排到厂区外的废水全部消灭。

近年来在过滤机上进行煤悬浮液的固液分离和脱水理论的研究，尤其在这些过程的预测及最佳化方面得到了很大的发展。

但现有的文献不足以反映现代选煤工业中使用的过滤技术状况。

在献给读者的这本书中，提供了多年来国内外在煤悬浮液过滤生产实践中积累的系统而又丰富的材料。研究这些

材料，将有助于过滤理论的发展，有助于提高过滤设备的使用效率，并使选煤厂的煤悬浮液过滤工艺更趋完善。

“圆盘真空过滤机”一节（第二章）是由作者和B.Л.拉杜史凯维奇共同完成的。

作者谨向科学技术博士B.C.卡明斯基教授表示谢意，并向固体燃料精选研究所的同志们致谢。他们在本书的编排及文章的修饰方面均给予了很大的帮助。

# 目 录

<b>第一章 煤悬浮液过滤的理论基础</b> .....	1
1. 关于过滤过程的一般概念 .....	1
2. 过滤用煤悬浮液的特性 .....	2
3. 研究悬浮液可滤性的实验室设备 .....	13
4. 过滤的基本规律 .....	17
5. 过滤方程式中几个常数的确定 .....	23
6. 煤泥滤饼干燥过程的规律 .....	29
7. 煤泥滤饼冲洗的规律 .....	35
8. 影响过滤工艺指标的基本因素 .....	39
<b>第二章 煤悬浮液的过滤设备</b> .....	49
1. 过滤设备的分类 .....	49
2. 圆盘真空过滤机 .....	50
3. 筒式真空过滤机 .....	87
4. 带式真空过滤机 .....	101
5. 真空过滤浓缩机 .....	105
6. 卧式压滤机 .....	112
7. 立式压滤机 .....	138
8. 管式压滤机 .....	144
9. 脉动过滤机 .....	149
10. 过滤介质 .....	154
11. 辅助设备 .....	161
<b>第三章 煤悬浮液的过滤工艺</b> .....	178

1. 用真空过滤机进行浮选精煤的过滤 .....	179
2. 用压滤机进行浮选精煤的过滤 .....	193
3. 用真空过滤机进行浮选尾煤的过滤 .....	201
4. 用压滤机进行浮选尾煤的过滤 .....	210
5. 原煤泥悬浮液的过滤 .....	227
6. 无烟煤煤泥悬浮液的过滤 .....	233
7. 重液选煤产品的过滤与洗涤 .....	237
8. 页岩泥浆悬浮液的过滤 .....	241
<b>第四章 煤悬浮液过滤过程的强化措施 .....</b>	<b>245</b>
1. 煤悬浮液的预先浓缩 .....	245
2. 浓缩和过滤过程的联合 .....	254
3. 掺入粗粒物料 .....	260
4. 低分子药剂——强化剂的应用 .....	262
5. 高分子化合物的应用 .....	270
6. 用加热方法强化过滤 .....	283
7. 用合成纤维制成的过滤介质的应用 .....	296
8. 过滤过程最佳化 .....	300
<b>参考文献 .....</b>	<b>312</b>

# 第一章 煤悬浮液过滤的理论基础

---

## 1. 关于过滤过程的一般概念

**过滤**是利用多孔介质分离悬浮液的水力动力学过程，多孔介质可让悬浮液中的液相（滤液）通过，而将固相（沉淀物）截住。这也是工业过滤〔66, 82, 204, 213〕区别于自然过滤〔3, 101〕之处。后者是在自然条件下液体通过多孔土层的一种过程。

用过滤方法分离悬浮液，是在装有平面形或圆柱形过滤介质的过滤机上进行的。

过滤过程的动力是过滤介质两边的压力差。这种压力差的产生可以有几种方法。其中最简单的就是静水压头，即由一定高度的悬浮液层所造成的压力。在生产条件下，这种方法极少使用，一般只在沙滤净水时才用。更为复杂的是靠真空（真空过滤机）和压力（压滤机）所形成的压力差来实现悬浮液的过滤。此外，还可以用离心力作为过滤过程的动力〔89, 182〕。

如果过滤介质后面的空间和恒定的真空源相连，或者悬浮液前面的空间和恒定的压力源相连，则称为**恒压过滤**。此时由于沉淀物厚度不断增加，沉淀层的阻力也增加，而抽出的滤液量则逐渐减少。如果悬浮液用恒定转速的电机所驱动的活塞泵给入，则称之为**恒速过滤**。此时压力差将是一变量，它随沉淀物阻力的增加而变化。如果悬浮液由离心泵给入，则泵的给量和沉淀物的阻力有关，过滤就将在变化着的压力



2

差和速度下进行。

过滤过程可用于以下的目的：分离悬浮液，即分离固体颗粒和液体；浓缩悬浮液，即通过过滤介质排除一定量的液体，从而增加悬浮液中固体颗粒的含量；净化液体，即减少液体中固体颗粒的含量，尤其是极细的悬浮颗粒量。

在一般情况下，过滤指的是在过滤介质上形成沉淀物，但在某些情况下，为净化液体分离悬浮液时，固体颗粒则渗入并滞留在过滤介质的孔隙中而不形成沉淀物〔4〕。也有介于这两者之间的过滤形式，就是固体颗粒既滞留在过滤介质的孔隙中，又在其上面形成沉淀物。在选煤方面使用最广的是形成沉淀物的过滤过程。

在分离悬浮液时所生成的沉淀物，可大致分为不可压缩的和可压缩的两种。不可压缩沉淀物中的孔隙不会因压力差的增加而减小。这类原则上不可压缩的沉淀物以石英砂和大于 $100\mu\text{m}$ 的碳酸钙结晶为代表。可压缩沉淀物中的孔隙则随压力差的增加而减小，而水力阻力却增加。这类沉淀物的代表是金属的氧化物和一些易变形的细粒物料。在选煤厂中，粗粒精煤是属于压缩性小的物料，而煤泥浮选后的尾矿则属于易压缩的物料。

悬浮液的过滤分离过程由三个阶段组成：过滤本身，包括形成沉淀并挤出多余的液体；沉淀物的压缩或压实；沉淀物的干燥，剩余的液体成气雾状排出，并得到含不饱和水分的沉淀物。在一些情况下可能没有挤压和干燥阶段；在另一些情况下则可能增加清洗沉淀物的作业。

## 2. 过滤用煤悬浮液的特性

在湿法选煤的选煤厂中，必须将洗选过程中所产生的煤

悬浮液过滤，把固相和液相分开。煤悬浮液为一分散系统，其中分散相是细粒煤，而分散介质是水，在个别情况下可以是无机盐溶液和高密度的有机液体<sup>[164]</sup>，这主要在试验研究中采用。

煤悬浮液的液相具有下列性质：密度、粘度、矿化程度和氢离子浓度。这些性质之间还存在着一定的相互联系。

悬浮液中液相的密度 $\gamma$ 用液体的质量 $m$ 和它的容积 $V$ 的比值来表示。液体的密度随温度的增加而减小，但是温度的变化范围在选煤厂里是很小的。譬如水的温度从277K提高到323K（即由4°C到50°C）时，纯水的密度由1000kg/m<sup>3</sup>降到988kg/m<sup>3</sup>。因此在技术上可以取水的密度为1000kg/m<sup>3</sup>而不致引起实质性的计算错误。而溶液中溶解盐的含量大小对悬浮液液相的密度却有显著的影响。

粘度（内阻力） $\mu$ 是液相的一种性质，它表示在外力作用下下一个液层相对另一液层运动时的阻力。随着温度的增加，水的粘度显著减小，因而在技术计算中不应忽略不计。例如水的温度由277K提高到323K，它的粘度由0.001降到0.00055N·s/m<sup>2</sup>（即由1到0.55厘泊）。而液相中的溶解物质对粘度的影响就更大了。

在湿法洗选选煤厂中，所用的循环水含有大量固体悬浮颗粒。此外，洗水中也含有大量的溶解物，其中有阳离子Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>++</sup>、Mg<sup>++</sup>、Fe<sup>++</sup>及阴离子Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>--</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SiO<sub>2</sub><sup>-</sup>等。在生产用水中还可能溶有气体CO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S、N<sub>2</sub>等。

根据固体燃料精选研究所（ИОГТ）和乌克兰选煤科学研究院（УкрНИИобогащение）提供的数据，选煤厂的循环水中溶解的矿物质有400g/m<sup>3</sup>（特克瓦契里中央选煤厂）

到 $4800\text{g}/\text{m}^3$ （诺伏格鲁鲍夫卡中央选煤厂），这主要是钠、钙和镁的氯化物和硫酸盐，氢离子浓度（pH）为 $6.6\sim 7.8$ 〔19,175〕。

洗水中悬浮着的固体颗粒和溶解物质的存在，对沉淀和过滤过程有显著的影响，它们改变了需要分离的煤悬浮液中分散介质的密度、粘度和表面张力。

现在重介质选煤虽得到广泛的发展，但是用无机盐的水溶液选煤也具有一定的优越性，这就是重液分选末煤的方法之所以能存在的原因。在工业生产中所用的重液有氯化钙、氯化钾和硝酸钙的水溶液，而在实验室用的是氯化锌水溶液。

在选煤厂所采用的重介悬浮液中，固相是具有不同性质的煤粒。其中主要是上限（视跳汰和浮选的洗选深度而定）为 $0.5\text{mm}$ 的未经洗选的煤泥。煤泥是属于多分散性的物料，它由不同形状、粒度和物质成分的颗粒所组成。从过滤的角度来看，这些煤泥悬浮液可以大致分成易过滤的和难过滤的两种；前者是以大于 $50\mu\text{m}$ 颗粒为主的粗煤泥，后者是以小于 $50\mu\text{m}$ 颗粒为主的细煤泥。

在选煤厂中用过滤处理的物料有煤泥浮选后的产品（浮选精煤和浮选尾煤），以及湿法选煤和分级的产品，或者是细粒煤用旋流器、分级机和浓缩机浓缩以后的悬浮液。沉降式离心机的离心液，个别情况下真空过滤机的滤液有时也进行过滤处理。悬浮液中固相的性质主要是颗粒的密度、粒度和物质成分。

真密度 $\gamma_n$ 是固相本身的质量与其容积的比值。煤粒中有机质的密度在 $1200\sim 1500\text{kg}/\text{m}^3$ 间波动，而矿物质的密度则在 $1800\sim 2500\text{kg}/\text{m}^3$ 之间。

假密度 $\gamma_k$ 是三相系（固体物、水和空气）多孔物质的质

量与其容积之比。显然，假密度值一般要小于真密度值。

带水沉淀物的密度 $\gamma_{oc}$ ，是经脱水压缩后的沉淀物的质量与其容积之比。 $\gamma_{oc}$ 值（对煤泥水悬浮液的沉淀物来说）大于 $\gamma_k$ ，而小于 $\gamma_n$ 。在一定条件下对于两相（固体和水，没有空气）的沉淀物：

$$\gamma_{oc} = \frac{W\gamma_k + (100 - W)\gamma_n}{100} \quad (1)$$

式中  $W$  —— 沉淀物中液相的含量（按重量计），%；

$\gamma_k$  —— 液相的密度。

但由于孔隙的存在，里面充满了空气，所以沉淀物的实际密度要比按方程式（1）计算的 $\gamma_{oc}$ 略小一些。

煤悬浮液的固相是一种多分散性的物料，它的**粒度组成**是最复杂的一种性质。它的粒度组成由筛分分析法（大于 $40 \sim 75 \mu\text{m}$ 的颗粒）和沉降分析法（小于 $40 \sim 75 \mu\text{m}$ 的颗粒）来测定，也可用显微镜测量的方法测得。将数值列成表格，或画成各粒度级的数量分布曲线，其中包括各粒级的和累计的分布曲线。

人们曾经作了很多努力，试图将固相的粒度组成用简单的方式来表达，但任何试图都不能充分地表达出这个概念，所以得不到广泛的应用。最常用的评定物料粒度大小的方法，是用下列公式算出平径直径：

$$d_{cp} = \frac{\sum \Delta i \Delta d}{100} \quad (2)$$

式中  $\Delta i$  和  $\Delta d$  —— 各粒度级的数量和平均直径。

还有使用最大和最小粒度的直径差、小于某一直径的颗粒含量及其它一些数据来表示的。

为了表达多分散性混合物的粒度特征，A.A.克列施尼

内提出了“粒度参数”的概念：

$$P = \frac{d_c}{d_0} \quad (3)$$

它是大颗粒的直径 $d_c$ 和小颗粒的直径 $d_0$ 之比，前者可认为是颗粒混合物的骨架，后者则认为是骨架空间的填充物。

但是对物料的分散程度更有代表性的表示方法，应能反映出大小颗粒的数量分布情况。现代的研究工作要求能把粒度组成以其分布的函数形式表示出来。

大家知道，煤粒按其大小的数量分布并不是正态的，也就是说，相对于平均粒径的纵轴是非对称性的。

但是最细颗粒的分布曲线用对数坐标画出时是对称的，因此符合对数正态分布定律（根据A.H.卡莫格洛夫的极限破碎定律）。

用相应的经验方程式去修正试验数据的分布曲线可以得到颗粒物料分散度的近似方程式。这些方程式一般不是出于某些严格的、能揭示出各种大小颗粒产生过程规律的理论根据，而是出自试验数据，对我们来说，就是出自在选煤厂的具体工作条件下所取得的数据。

在一般情况下建议用下列经验公式中的 $a$ ——分散指数来评定煤悬浮液中固相的粒度特征<sup>[175]</sup>：

$$\Delta = e^{a d} \quad (4)$$

式中  $\Delta$ ——平均值为 $d$ 粒级的产率；

$d$ ——该粒级颗粒的平均尺寸， $\mu\text{m}$ 。

全级物料的分散指数等于各粒度级分散指数的加权平均值：

$$a = \frac{\sum \Delta_i a_i}{100}$$

分散指数的值越大，物料越细。其数值在0.006（粗分散性）到0.15（细分散性）之间。

在一些文献中提出了一系列更详尽、更全面的方程式，表示出三个或四个参数的关系〔2, 92, 178〕。但是最便于运用的是戈登-安德列耶夫和洛金-拉姆列尔的双参数方程式。

戈登-安德列耶夫方程式是：

$$\Delta = c\delta^m \quad (5)$$

用对数坐标画出来是一条直线，相当于方程式：

$$\lg \Delta = A + m \lg \delta \quad (6)$$

式中  $\Delta$ ——某粒级的产率，按重量计，%；

$\delta$ ——某粒级最小颗粒的尺寸；

$c$ 和 $m$ ——与物料性质有关的常数；

$A = \lg c$ ——直线在纵坐标上的截距。

$m$ 的值决定了分布曲线的特征：当 $m = 1$ 时，分布曲线就成为一条直线。根据 $m$ 值的大小就可以判断物料中是以粗粒为主还是以细粒为主。

洛金-拉姆列尔方程式得到了更广泛的应用，其式如下：

$$R = 100e^{-b\delta^n} \quad (7)$$

式中  $R$ ——大于 $\delta$ 级的累计产率，%；

$\delta$ ——颗粒（筛网孔眼）尺寸， $\mu\text{m}$ ；

$b$ 和 $n$ ——与物料性质及 $\delta$ 大小相关的常数。

在很多情况下，方程式（7）比（5）更符合于实验数据。

B.Φ.帕甚达耶夫和E.M.波罗金斯基的研究〔14〕证明，煤粒的累计出量分布曲线具有或然率特性；在粒度范围很宽时，用修正后的洛金-拉姆列尔方程式可将它们确切地反映出来。这个方程式也是双参数的，并反映了两个筛子的筛分

结果。例如，用30种不同粒度特征的浮选精煤和25种不同的无烟煤煤泥来确定能正确反映出对各种不同物料所求得的累计分布曲线的参数（不用沉降分析）所适应的筛孔尺寸的上、下限。这种筛孔尺寸对浮选精煤来说是0.5和0.063mm，而对无烟煤煤泥为0.5和0.125mm。

在已知用几个筛子进行筛分的筛分结果情况下，E.M. 波罗金斯基拟定了用粒度概率分布的经验矩的方法来计算累积分布曲线的参数。作者并举例说明了累积分布曲线特性参数的计算方法。

固体物料粒度组成的间接特性是它的孔隙率和比表面积。

**孔隙率** (пористость) 是指固体颗粒之间空隙的容积与堆料所占全部容积之比。它以下式表示：

$$\varepsilon = \frac{V_{\Pi} - V_{\Gamma}}{V_{\Pi}} \quad (8)$$

式中  $V_{\Pi}$ ——物料所占的全部容积；

$V_{\Gamma}$ ——固体颗粒的容积。

实际上，孔隙率经常是用真假密度来计算的：

$$\varepsilon = \frac{\gamma_{\text{д}} - \gamma_{\text{т}}}{\gamma_{\text{д}}} \quad (9)$$

有时用孔隙度 (коэффициент пористости) 来代替孔隙率：

$$E = \frac{V_{\Pi} - V_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} = \frac{\gamma_{\text{д}} - \gamma_{\text{т}}}{\gamma_{\text{т}}} \quad (10)$$

$E$ 和 $\varepsilon$ 之间的关系为：

$$\varepsilon = \frac{E}{1 + E} \quad \text{而} \quad E = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (11)$$

由单一的球状颗粒组成的理想介质，其孔隙率与堆放方式有关，一般在0.26~0.78之间变动。由煤粒组成的介质其孔隙率波动范围较窄，在0.35~0.65之间。煤粒越细，孔隙率越大。这是因为细颗粒较强的表面可能吸附更多的空气，致使许多细粒不能更紧密地相互靠拢的缘故。窄粒级煤的孔隙率比宽粒级的要大，因为在后一种情况下细颗粒将充填在大颗粒间的孔隙之中。

固体物料的**比表面积**是指固体颗粒的表面积和它所占的容积之比：

$$S = \frac{S_r}{V_n} \text{m}^2/\text{m}^3 \quad (12)$$

式中  $S_r$ ——固体颗粒的表面积。

若有一种理想介质，由 $n$ 个同样的球状颗粒组成，其容积为 $V_n$ ，球直径为 $d$ ，则其比表面积将为：

$$S = \frac{S_r}{V_n} = \frac{S_r(1-\varepsilon)}{V_r} = \frac{n\pi d^2(1-\varepsilon)}{\frac{n\pi d^3}{6}} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \quad (13)$$

若介质由煤粒组成，则其比表面积是按粒度组成计算得出，它考虑了按各粒级平均直径求得的煤粒表面积。这个比表面积的计算值还要加上一个修正系数，对颗粒的不均匀性和形状的不规则性进行修正。煤粒的修正系数为1.6~2.0。如用洛金-拉姆列尔方程式来计算物料的比表面积，那就有了更充分的依据。

一般使用流体力学的方法在实验室测定多孔物料的比表面积。其原理是，在接近于大气压的压力下让空气透过料层，并测定其透气性；也可在高真空下让空气透过，进行测定。前一种方法用来测定粗分散性煤泥 ( $d_{cp} > 10\mu\text{m}$ ) 的比



表面积；第二种方法用来测定细分散性煤泥( $d_{50} < 10\mu\text{m}$ )的比表面积。对于选煤产品，建议采用第一种方法测定。一般浮选精煤的比表面积约为  $150\text{m}^2/\text{kg}$ ，浮选尾煤则达  $600\text{m}^2/\text{kg}$ 。

进入过滤作业的煤悬浮液的另一重要性质是悬浮液中的固体含量。为了快速分析煤泥水中的固体含量，可以采用适合于浓度范围较窄的图表、曲线或计算公式。文献中提出的麦耶尔曲线适用于煤在高浓度重介质中分选的过程。它不包括悬浮液中固、液相重量比的数据（缺少  $T:K$  常数曲线）〔162, 211〕。浓缩和过滤作业使用图1a和6〔22〕所示诺模图

