

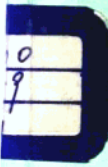
重选技术

首届重选技术研讨会论文汇编

中国选矿科技情报网

一九八四年

北 京



中国选矿科技情报网
PDG

300
59
1

前 言

中国选矿科技情报网于1984年3月在北京召开了“首届重选技术研讨会”。会议收到了论文32篇，并举行了五个学术讲座，较全面地反映了我国在重选工艺、设备及理论方面所取得的进展。

为了总结经验，扩大交流，会议决定对讲座及论文的资料进行汇编。

资料分为两大部分，（1）学术讲座讲稿的全文，（2）会议论文的缩编。

限于编者的水平，“缩篇”中难免会有不少缺点、错误，敬请论文作者、读者批评指正。

编 者

目 录

中国选矿科技情报网首届重选技术研讨会纪要	(1)
----------------------	-----

第一部分 学术讲座

一、薄流膜选矿理论的最新发展	黄 枢 (3)
二、重选分层理论	孙玉波 (14)
三、激光测速和激光粒度分析	罗 茜 (23)
四、离心选矿机的分选原理研究和转鼓结构参数计算	孙玉波 (34)
五、重介质选矿的几个问题	姚书典 (43)
六、水力旋流器的理论基础与应用	黄 枢 (59)

第二部分 论文编

一、重选与流膜选矿理论	(73)
(一) 球体自由沉降末速的通用解法	(73)
(二) 流膜的液流特性研究	(77)
二、摇床与摇动溜槽	(79)
(一) 摇动溜槽的分选理论	(79)
(二) 惯性摇床头的运动特性分析	(90)
三、螺旋溜槽	(107)
(一) 螺旋溜槽的选别机理	(107)
(二) 颗粒回收几粒的研究	(110)
(三) 保持回收几粒不变的放大准则	(112)
(四) 离心塔形螺旋溜槽的研究	(115)
(五) 螺旋溜槽选别赤铁矿的进展	(118)
四、离心选矿设备	(119)
(一) 离心选矿机流膜运动规律的研究	(119)
(二) $\phi 2$ 米双鼓离心选矿机的研究	(123)
(三) 离心选矿机的多层化探讨	(124)
(四) 离心盘选机的分选原理初探	(125)
(五) 离心跳汰机研究	(129)
五、旋流器	(130)
(一) 水介质旋流器脱硫	(130)
(二) 瓷土脱砂旋流器	(131)
(三) 母子旋流器	(132)

六、跳汰机.....	(134)
(一) 液压径向跳汰机.....	(134)
(二) 跳汰机示波测试技术及初步结果.....	(138)
七、新设备与新设想.....	(146)
(一) 重选在脉金选别中的应用.....	(146)
(二) 垂振场内粒群按比重分层.....	(147)
(三) 横流皮带溜槽的研制.....	(149)
(四) 细泥重选设备的发展和改进途径.....	(149)
(五) 冲击式两端排矿分选仪.....	(149)
会议论文目录.....	(150)

首届重选技术研讨会纪要

一九八四年三月九日

中国选矿科技情报网首届重选技术研讨会于1984年3月5日~10日在北京召开。

全国18个省市122名代表参加了会议，他们来自冶金、煤炭、化工、地质、建材、核工业部等六个部所属的59个科研、设计、院校、厂矿及编辑出版等单位。这次会议共收到论文32篇。内容包括工艺流程及设备的研究及生产实践的总结等，分别在大会及分组会上进行了发言与讨论。与会代表在会内外进行了热烈的讨论与交流。

三个高校的付教授为大会作了五个学术讲座，得到了与会代表们的好评。地质部广东第九实验室研制的矿物自动重力分选仪，引起了与会代表们的兴趣。

一

会议代表认为我国在重选生产工艺、设备研究、选厂设计等方面均具有一定的水平。在某些方面有自己的特色。因此定期召开这种学术讨论会是很有必要的，以促进重选工艺、设备、选厂设计等领域的研究、设计、生产、教学工作。

由于重选技术在冶金、煤炭、地质、化工、建材等部门均有应用，会议的召开对加强横向的联系是有益的。

二

会议中对流膜选矿、离心选矿及跳汰理论等问题进行了较深入的探讨，对一些问题发表了不同的见解，例如：对薄流膜的流态是层流还是紊流问题，各种观点进行了争鸣。代表们认为：

1. 微细粒物料的重选仍是一个迫切需要解决的课题。应集中力量加以研究。特别是微细粒料的精选设备尤需投入力量进行研究。70年代出现的横流皮带溜槽是一种较好的精选设备，可考虑与离心选矿机配套使用，以改善矿泥选别。

2. 建国来，我国在重选工艺与设备上均取得了不少进展，近年来在重选理论的研究方面也有了良好的开端，但仍不能满足我国四化建设的需要。重选虽是一门古老的技术，但仍有很大的潜力，应加强理论研究与设备研究。理论研究应紧密结合实际，对实际起指导作用。

3. 近年来，我国重选界对拜格诺的剪切理论进行了较多的论述与探讨并取得了一定的进展，是可喜的现象，值得进一步研究。但对垂直振动引起的比重分层以及其它的分层机理也应进行研究，思路应该开阔而不宜局限于某一假说或学派的理论。

多种力联合作用，添加药剂使微粒团聚以加速其沉降。高浓度矿浆的流变特性等均应进行研究考虑。

4. 应加强重选技术测试手段的研究。

5. 数学模拟与相似模拟方法是加快研究工作, 改善生产控制的有效手段, 已日益引起国内外的选矿界重视, 我国也进行了初步探索, 这是一个可喜的苗头, 应给予足够的重视与支持。

三

代表们通过讨论建议,

1. 这次会议开得成功, 收益不小, 建议每 4—5 年召开一次重选技术研讨会。
2. 委托会务组负责缩编出版《首届重选技术研讨会文集》。

一、薄流膜选矿理论的最新发展

黄 枢

流膜选矿用于回收细微粒重矿物已有一百多年的历史。由于离心力和摇动作用的引用,最近二十年来流膜选矿又有了新的发展,成为矿泥选别的一种主要方法。现代矿泥重选设备中流膜厚度只有1毫米至数毫米,因此称之为薄流膜选矿,以有别于其他厚度较大的流膜选矿过程。薄流膜在流动特性和矿粒的分选行为上都具有自己的特点。本文简要介绍目前在薄流膜选矿理论研究所取得的成就,为进一步提高其选别效率,发展新的选别设备提供依据。

一、平面溜槽中薄流膜的流动特性

1. 薄流膜的流态及表面波

弗汝德门^[1]第一次提出薄流膜流动时有三种流态,用管流中的雷诺数(Re)判断:

$$Re = \frac{4q}{\nu}$$

式中 q ——单位湿边的流量; ν ——运动粘滞系数。

当 $Re < 25$,为层流; $Re = 25 \sim 1500$ 为准层流; $Re > 1500$ 为紊流。若采用斜面水流常用的雷诺数($Re = v/q$)表示,则三种流态的临界雷诺数为6.25和375,后一值相当于明渠中的下限临界雷诺数(即300)。

弗汝德门指出准层流的特点为:(1)流膜中出现表面波;(2)界面(气—液)流速高于按层流公式计算的速度;(3)保持层流中的雷诺数与阻力系数关系及平均流速与流量的关系。除靠近液面的很薄一层处于紊流状态外,其余流膜仍属层流。

矿泥溜槽的流膜厚度约为1毫米,雷诺数多在100左右^[2],其流态应属准层流。顾枫^[3]等曾测定过平面溜槽中厚度为0.58—2.64毫米,雷诺数为97,194,485的薄流膜流态,证明接近液面处存在一层波动层,其厚度介于0—0.4毫米,平均约0.3毫米,其余流层属层流。余仁焕^[4]测定过薄流膜的波动层厚度介于0.2—0.3毫米。在上述测定中还证实流膜的平均流速低于按层流公式计算的速度。后者与弗汝德门的结论相反。

列维奇^[5]解释了表面波的产生原因,总的归结毛细力和重力。毛细力的出现,力图使液体总表面收缩而成平衡形状,还有重力作用,它使扰动后的表面回复到平面形状。这两种力都要使离开平衡位置的液体质点力图回复到平衡位置。但是由于惯性,它们将越过平衡位置,重又受到恢复力的作用,如此继续下去,受到偶然扰动的液体表面就产生了波。如果产生波的主要原因是表面张力,则称为毛细波,当起作用的是重力则称为重力波。

表面波的传播速度 C 与波长 λ ,重力加速度 g 和表面张力 σ 有关,计算公式如下:

$$\text{重力波 } C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

$$\text{毛细波 } C = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}}$$

式中 ρ —液体密度。对于水 ($\rho = 1$ 克/厘米³, $\sigma = 72$ 达因/厘米), 波长大于1.72厘米的波为重力波, 波长小于1.72厘米的波为毛细波。

根据依万诺夫等⁶最近的研究, 认为在重力选矿设备中同时存在毛细波和重力波。在平面溜槽中当雷诺数较小 ($Re = 50 \sim 70$), 傅劳德数 $F_r = 3$ 时, 出现交替的毛细波。随着 Re 和 F_r 的增大, 毛细波的频率和速度增大, 继续增大 Re 和 F_r , 毛细波消失。在螺旋溜槽中, 毛细波存在于精矿带和第一中矿带中, 重力波则存在于中矿和尾矿带中。波对矿粒有搬运作用, 它参与分选过程。据推算, 在重力波的作用下, 小于0.02毫米的石英颗粒将处于悬浮状态。因此在矿泥溜槽中表面波的存在是细粒损失的一个原因。向矿浆中加入表面活性剂, 可以减小表面波。芬纳斯⁷曾用松油 (136克/吨) 改善自动溜槽的分选, 降低尾矿品位。

列维奇列举表面活性剂的镇波理论有: (1) 使空气与水之间的摩擦系数减小; (2) 液体表面张力的降低; (3) 复盖着表面的薄膜的变形引起膜中能量的耗散; (4) 液体边界条件的改变。 $\frac{\partial\sigma}{\partial\Gamma}$ 最大的表面活性剂具有最大的镇波作用。 (σ —表面张力, Γ —浓度)

2. 清水流膜的流动特性

最主要的流动特性是平均流速和流速分布。层流水流的平均流速 U_m 和流速分布 $\frac{U_h}{U_H}$ 可用下列理论公式表示:

$$U_m = \frac{gH^3 \sin\alpha}{3\nu} \quad (4)$$

$$\frac{U_h}{U_H} = 2 \frac{h}{H} - \left(\frac{h}{H} \right)^2 \quad (5)$$

式中 H ——流膜总厚度, h ——某一流层与槽底的距离, α ——坡度, U_h, U_H ——距底 h 和 H 的流层流速。

如上所述, 根据弗汝德门等的试验, 薄流膜的平均流速实验值与层流公式理论值非常吻合。但他们的试验是在光滑表面中进行的。最近依万诺夫⁸在涂上石英颗粒的粗糙槽面上进行的试验表明, 平均流速还与槽面的粗糙度有关, 它引用两个表示粗糙度的系数:

$\frac{H}{H+1}$ ——考虑凸起高度 I 的系数;

$\frac{S_1}{S_1+S_2}$ ——考虑面积粗糙度系数 (S_1 ——非粗糙面积与槽底面积之比, S_2 ——粗糙面积与槽底面积之比)。

根据试验, 得出层流时粗糙表面上薄流膜的平均流速公式 ($Re < 300$):

$$U_m = C \cdot \frac{gH^3 \sin\alpha}{\nu} \cdot \frac{H}{H+I} \cdot \left(\frac{S_1}{S_1+S_2} \right)^{1.1} \quad (6)$$

系数 C 与傅劳德数成正比。显然可见,当槽面是光滑时,此公式回复到层流理论式。

由于波动层的存在,改变了层流的流速分布规律。因此薄流膜的流速分布不服从层流理论式,这点已得到实验证明。顾枫等用电解液测速法测定雷诺数范围102—306,流膜厚度0.95~2.2毫米下的流速分布,它们服从指数流速分布公式:

$$\frac{U_h}{U_H} = \left(\frac{h}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

公式的 n 值随雷诺数的增大和流膜厚度的减小而增大,但对厚度最敏感。当 $H \approx 1$ 毫米时, $n = 6.9 \sim 7.53$; $H \approx 1.5$ 毫米时, $n = 2.44 \sim 5.13$; $H = 2$ 毫米时, $n = 1.44 \sim 3.1$ 。

余仁焕用皮托管测速法得出 n 值的回归方程式为:

$$n = K(\text{Sin} \alpha)^{0.288} \cdot q^{-0.248} \quad (8)$$

即 n 值随坡度的增加和单位流量(与 Re 成正比)的减小而增大。当流量相同时,坡度增大流膜厚度就减小,这点与顾枫所得结论一致。但坡度一定时, n 值随流量的增加而减小则与前者所得结论相反。因此有关薄流膜的流速分布问题,有必要作进一步的研究。

孙玉波¹⁰认为薄流膜的流速分布应分别按层流边层和紊流层计算。层流边层的流速遵从层流理论式,但 h 与 H 相比很小,故公式可化简为:

$$U_h = \frac{Hg \text{Sin} \alpha}{\nu} h \quad (9)$$

紊流层的流速用对数式(卡尔曼——普兰特公式)表示为:

$$U_h = \frac{1}{K} \sqrt{gHj} \left(\ln \frac{h}{\sigma} + KN \right) \quad (10)$$

式中 K 为卡尔曼常数,在重力场厚水层中约等于0.4; σ 为层流边层厚度; N 为普兰特准数,对斜面流可取 $N = 11.6$ 。

3. 矿浆流膜的流动特性

矿浆是固液两相流,对厚流膜的两相流特性研究得较多,见诸泥沙运动学的专著。但对薄流膜中矿浆的流动则研究得很少,因此还未能获得系统的知识。根据初步研究^[2,3,6],薄的矿浆流膜具有下列特点:

(1) 矿浆流膜的流态可以用矿浆雷诺数 Re' 来判断:

$$Re' = \frac{H' U_M'}{\nu'} \quad (11)$$

式中 H' , U_M' , ν' ——分别代表矿浆流膜的厚度、平均流速和运动粘滞系数。

当流量和坡度相同时,矿浆流膜厚度 H' 与清水流膜厚度 H 存在下列关系:

$$H' = H \cdot \sqrt[3]{\frac{\nu'}{\nu}} \quad (12)$$

由于矿浆的运动粘滞系数大于清水,故矿浆流膜的雷诺数比同流量下的清水流膜雷诺数小,流膜厚度较大而平均流速则较小。

(2) 清水流膜中出现的表面波,在矿浆流膜中仍存在。且由于固相的存在,使表面波更清晰而易于观察。

(3) 固体颗粒的存在对紊流起到抑制作用。这种制紊作用使矿浆流膜的流速分布接近于层流,其流速分布可用层流式(5)表示。

(4) 矿浆流膜的表面流速与平均流速比值介于 1.4~1.6, 接近于层流理论公式的比值 1.5。

矿浆流膜还有一个重要特性是流速分布。目前还缺乏薄流膜的浓度分布实验数据。作者曾借用^[2]以卡尔曼——勃兰德流速分布公式为依据的浓度分布公式计算过几种重力矿泥溜槽的浓度分布, 公式为:

$$\frac{S}{S_a} = \left[\frac{\frac{H}{h} - 1}{\frac{H}{a} - 1} \right]^{k\sqrt{\frac{V}{gH}}} \quad (13)$$

式中 S, S_a ——流膜中任意层 h 和指定层 a 的矿浆浓度; U 为颗粒沉降速度。

公式(13)中的指数 $\frac{V}{k\sqrt{gH}}$ 称为悬浮指标, 它反映了重力和流体动力作用的相互关系, 指数值越小, 浓度分布越均匀。作者计算得到的悬浮指标值介于 0.075~0.133, 因此矿泥溜槽上矿浆的浓度差别不大。但是公式(13)是用紊流扩散观点导出的, 薄流膜属于层流, 不能完全套用, 所得结论还值得商讨。

伊万诺夫^[10]在研究流膜运动中曾观察到矿浆中有时出现条带状的空穴, 矿粒在空穴两侧富集, 形成与槽的方向一致互相平行的条带。他推论这是由于矿浆流膜沿槽向下流动时, 在横向还产生环流的缘故。环流是一种内部循环流, 它冲刷槽底上的矿粒使之形成空穴。空穴的距离可达 0.2—0.6 厘米, 它等于环流直径的两倍。如果伊万诺夫的推论是正确的话, 则内部横向循环流的垂直分速对矿粒的松散有作用。

二、摇动作用下薄流膜的流动特性

二、摇动作用下清水流膜的流动特性

1. 摇动作用下清水流膜的流动特性

摇动作用下的液流运动可分两部分, 一是斜面水流固有的运动, 其速度可用层流公式计算; 另一是由于床面运动所引起的摆动液流运动, 其速流将视摇动方式而定。目前生产应用的摇动方式有三种: (1) 对称往复运动; (2) 不对称往复运动; (3) 圆形轨道运动。后两种虽较常用, 但运动复杂, 为便于分析下面只研究在对称往复运动下的摇动作用和摆动液流流速。

当床面作对称的简谐运动时, 床面的瞬时运动速度为:

$$u = u_0 \cos \omega t \quad (14)$$

其上的流膜由于摇动产生的摆动流速为:

$$u_h' = u_0 e^{-\beta h} \cos(\omega t - \beta h) \quad (15)$$

式中 u_0 ——床面运动最大速度; ω ——摇动作用的角速度; t ——时间; $\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}$ 。

式(15)具有减幅简谐运动的形式, 紧贴床面的液层是随床面运动的, 其上的液层随距离的增加迅速减小。当摇动频率为 300 次/分时, 距离床面 1 毫米的液层摆动最大速度只有床面运动最大速度的 1.9%。因此受床面运动影响的液层厚度是很薄的, 但其底部的流速梯度则甚大。

液流的合速度等于固有流速 U 和摆动流速 U_h' 之代数和,

$$\begin{aligned}\Sigma u &= u_h + u_h' \\ &= u_H \left[2 \frac{h}{H} - \left(\frac{h}{H} \right)^2 \right]' + u_0 e^{-\beta h} \cos(\omega t - \beta h)\end{aligned}\quad (16)$$

对公式(16)微分,得液流合速度的流速梯度:

$$\begin{aligned}\frac{d(\Sigma u)}{dh} &= \frac{du_h}{dh} + \frac{du_h'}{dh} \\ &= 2u_H \frac{H-h}{H^2} \\ &\quad + \beta u_0 e^{-\beta h} [-\cos(\omega t - \beta h) + \sin(\omega t - \beta h)]\end{aligned}\quad (17)$$

令 $h=0$,且以 $u_H=1.5u_M$ 代入,得接近床面处液流的总流速梯度:

$$\frac{d(\Sigma u)}{dh} = \frac{3u_M}{H} + \beta\sqrt{2}u_0\sin(\omega t - \frac{\pi}{4})\quad (18)$$

由式(18)知,接近床面处的流速梯度也是随时间 t 而变的。当 $\sin(\omega t - \frac{\pi}{4})=1$ 时,达到最大值,此时流速梯度为:

$$\begin{aligned}\frac{d(\Sigma u)}{dh} &= \frac{3u_M}{H} + \beta\sqrt{2}u_0 \\ &= \frac{3u_M}{H} + 0.012n^{1.5}1v^{-0.5}\end{aligned}\quad (19)$$

式中 n —摇动频率(次/分); 1 —摇动冲程。

式(19)可用以衡量摇动作用的附加剪切松散作用的强弱。由式可见,附加剪切作用与摇动频率的1.5次方和摇动冲程一次方的相乘积成比例的。根据作者^[11]在试验室摇动溜槽的试验,在较佳的分选条件下摇动剪切松散作用约为固有水流动剪切松散作用的1.2~1.6倍。

布什^[12]曾提出当平面作圆形轨道运动时引起的摆动水流流速梯度公式:

$$\frac{du}{dh} = r\omega \sqrt{\frac{\omega}{v}}\quad (20)$$

式中 r —剪切运动半径($r=\frac{1}{2}$)。这个公式与纵向摇动摆动水流的最大流速梯度公式(19)是一致的。作者曾按此式计算出摇动翻床和横流皮带溜槽的摇动剪切作用为固有水流动剪切作用的1.9~2倍。

对摇动作用下清水流膜的流态研究得很少。由于摇动引起的水速越远离床面就越小,可以推论它对表面波的影响是不大的。

2. 摇动作用下矿浆流膜的流动特性

由于测试的困难,现在还缺乏摇动作用下矿浆流动特性的实验数据。巴兹列夫斯基^[13]最近提出根据摇动溜槽上产品的取样分析,利用物料平衡式计算矿浆运动参数的方法。用这个方法可以求出:(1)床面上的固体容积浓度 $\bar{c}$;(2)矿浓流的厚度 H ;(3)某一指定密度和粒度矿粒沿床面的平均运动速度 U_i ;(4)该级别矿粒的分布中心高度 y_i 。

床面上固体容积浓度 $\bar{c}$ 和矿浆流厚度 H 可解下列两联立方程求出:

$$\frac{\bar{c}}{c} = \frac{V_s}{V_c} = \frac{\gamma \theta_i t_i}{L H b \rho_s} \quad (21)$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{3\mu_c Q}{g \sin \alpha \rho_c b}} = \sqrt[3]{\frac{3\mu_c \exp(3.18 \bar{c}) \cdot Q}{g \sin \alpha [\rho_s \bar{c} + \rho(1-\bar{c})] b}} \quad (22)$$

式中 V_s —固体体积； V_c —矿浆体积； γ —精矿产率； Q_s —固体生产率； t_i —给矿时间； L —床面长度； b —床面宽度； ρ_s —固体密度； Q —矿浆体积流量； μ_c —矿浆粘度； ρ_c —矿浆密度。

用上二式解 $\bar{c}$ 和 H 的最适当办法是用迭代法（逐步逼近法）。先假设 H 值（一般先取 $H=1$ 毫米），从 (21) 式计算出 $\bar{c}$ ，再将计算所得 $\bar{c}$ 值代入 (22) 式，这样逐步逼近，直至 H 和 $\bar{c}$ 接近恒值。

任一粒级 i 的平均运动速度 v_i 等于：

$$v_i = \frac{L}{e_i t_i} \quad (23)$$

式中 e_i ——粒级 i 在精矿中的回收率。

粒级的分布中心高度用等于其运动速度 U_i 的流层在流膜（层流）中所占相对高度 $y_i = \frac{y}{H}$ 来表示，计算公式为：

$$v_i = \frac{3}{2} u_m y_i (2 - y_i) \quad (24)$$

$$y_i = 1 - \sqrt[3]{1 - \frac{2}{3} \frac{v_i}{u_m}} \quad (25)$$

式中 u_m ——水流沿高度的平均流速，用下式计算：

$$u_m = \frac{g \sin \alpha}{3\nu} \left(\frac{Q}{b} \right)^2 \quad (26)$$

根据计算结果，得出下列结论：

(1) 床面上矿浆的固体浓度，显著地高于给矿，当给矿容积浓度为 3.7% 时，床面矿液容积浓度可达 19—27%。

(2) 矿粒沿床面的平均移动速度比矿浆的平均移动速度慢，对脉石矿物将慢 3~5 倍，对重矿物慢 10~15 倍。

(3) 矿粒的分配中心平均相对高度约为矿流总高度的 3~10%，重矿粒的分配中心低于轻矿粒。

(4) 同一比重的不同粒度矿粒在平均移动速度和分配中心平均高度上的分配没有一定的规律性。在三个试样中，有两个试样是中间粒级（44~20 微米）的移动速度最慢，分配中心高度最低。

巴兹列夫斯基提出的方法无疑为解决矿浆流膜运动参数问题提供一个可行的简便途径。但必须指出他的方法是以床面上的矿浆全部呈运动状态，没有沉积物时才是正确的。实际矿泥溜槽中沉积有固定的精矿层，不能将床面上的全部矿浆都看作是流动的。因此用他的方法计算得到的床面上矿浆浓度值必然比实际流动层的浓度偏高得多。

三、离心力作用下薄流膜的流动特性

我国研制的离心选矿机是目前唯一以离心力作用为主的流膜选矿设备。离心选矿机中的流膜属于非均匀流,其运动非常复杂。根据孙玉波和金世斌^[14]最近的研究,认为此种流膜具有如下特点:

(1) 离心选矿机中矿浆除纵向流速外,还存在切向滞后流速。因此除纵向流速梯度外,还存在切向流速梯度。不过靠近给矿端的切向剪切作用较强烈,靠近排矿端减弱而已。

(2) 由于转鼓的旋转与流体的相对运动,出现科里奥利效应,它使流体质点产生一种相应的惯性力,造成新的切向滞后流速。

(3) 由于离心选矿机采用集中给矿方式,流膜厚度在转鼓内的分布很不均匀,因而形成一种传递波。随着波的传播,水质点也发生传递。它使液面急剧增高,流速增大,传递的能量往往很大。因此流膜具有更大的波动性质。

离心选矿机流膜的纵向流速和流速梯度可用一般公式计算,不过要用离心加速度代替重力加速度。但关于流膜的切向流速和流速梯度则尚缺乏公认的计算方法。范象波和佟庆理^[15]最近提出按照平板突然起动的情况计算切向流速梯度的方法,可供使用。计算公式为:

$$\frac{du}{dh} = \frac{u_0 \left(\frac{u_2 - u_1}{u_0 - u_0} \right)}{h_2 - h_1} \quad (27)$$

式中 u_0 —鼓壁的运动速度; $\frac{u_1}{u_0}$, $\frac{u_2}{u_0}$ —距壁的径向距离为 h_1 和 h_2 的流层流速与鼓壁速度的比值,此比值随距离 h 和时间 t 而变,按表1选用。

不同时间中各流层的流速与鼓壁速度之比

表 1

时 间 距 离 厘 米	流速比 $\frac{u_x}{u_0}$				
	0.1秒	0.2秒	0.3秒	0.4秒	0.5秒
0.01	0.8408	0.8871	0.9077	0.9200	0.9284
0.02	0.6880	0.7764	0.8166	0.8408	0.8574
0.03	0.5483	0.6703	0.7299	0.7705	0.7928
0.04	0.4280	0.5711	0.6421	0.6880	0.7195
0.05	0.3330	0.4810	0.5632	0.6161	0.6537

已知矿浆在鼓面上的停留时间,就可计算出各流层间的流速梯度。作者曾按此方法计算出离心选矿机的切向剪切松散作用为纵向剪切松散作用的2.65倍,前者起主导作用。

四、矿粒在薄流膜中的松散与分层

1. 拜格诺理论在薄流膜选矿中的应用

拜格诺^[16]提出当悬浮液的颗粒受到剪切作用时,垂直于剪切方向将产生一种分散压,这种分散压足以与一部分颗粒的重力平衡而使颗粒保持悬浮状态。这就是拜格诺的剪切松散

理论。

均匀球体的剪切分散压实验式：

$$\text{惯性剪切 } P_{\text{惯}} = 0.04\rho_s (\lambda d)^2 \left(\frac{du}{dh} \right)^2 \quad (28)$$

$$\text{粘性剪切 } P_{\text{粘}} = 3\lambda^{1.5}\mu \frac{du}{dh} \quad (29)$$

式中 d —颗粒直径； λ —颗粒的线性浓度即颗粒直径与平均间隙距离之比，与悬浮液固体的容积浓度 c 存在下列关系：

$$\lambda = \frac{1}{\left(\frac{c_0}{c} \right)^{\frac{1}{3}} - 1}, \quad (30)$$

式中 c_0 为颗粒静态堆置的最大容积浓度，对于球体 $c_0 = 0.74$ ，圆滑而均匀的天然颗粒 $c_0 = 0.65$ 。

惯性剪切是由于颗粒的弹性碰撞发生的，粘性剪切是由于液体的粘性作用而来（因颗粒的存在而大大增大了）。两种剪切类型可用 N 值判断：

$$N = \frac{\lambda^{0.5}\rho_s d^2}{\mu} \frac{du}{dh} \quad (31)$$

当 $N < 40$ 属粘性剪切， $N > 450$ 属惯性剪切， $N = 40 \sim 450$ 为过渡状态。通过计算知，各种重力作用的矿泥溜槽流膜应属粘性剪切，只有离心选矿机属过渡状态。

拜格诺理论指出在流膜选矿中，除了紊流脉动水速所起的紊动扩散作用使颗粒悬浮外，还有颗粒间的剪切松散作用使颗粒悬浮，后者是层流运动时唯一的松散手段。用拜格诺理论可以解释许多过去不能解释的现象，如矿泥溜槽中矿粒的悬浮运动。

根据拜格诺理论，当颗粒需要完全依赖分散压悬浮时，任一层面上的分散压，必定等于单位层面上运动颗粒在水中重量的垂直于层面的分力（简称有效重力）。溜槽底面上单位面积的运动颗粒有效重力为：

$$G_0 = (p_s - p) g \cos \alpha H C_m \quad (32)$$

$$\text{悬浮条件为 } P \geq G_0 \quad (33)$$

式中 C_m 为床面上矿浆的平均容积浓度。

作者^[17]曾利用拜格诺分散压经验式计算过六种矿泥溜槽的矿浆有效重力 G_0 和分散压 P （包括流体固有运动的剪切分散压和由于离心运动或机械摇动而产生的附加剪切分散压），其计算结果列于表 2。由表可见，它们的总分散压与有效重力之比介于 0.74~1.75，证明其中矿粒的大部分或全部是借分散压悬浮的。特别是离心选矿机、皮带溜槽和振摆皮带溜磨这三种国内常用设备的松散作用最大。又对具有附加剪切作用的设备，可以用附加剪切分散压与固有的流体剪切分散压的比值作为衡量附加剪切作用的标志。表中四种设备此比值达 1.9~4.8，可见在这些设备中附加剪切起主导作用。

由于拜格诺的经验式是在特定的条件下导出的，直接应用于计算矿泥溜槽必然产生误差，必须按实际条件进行修正。顾枫等曾根据在固定溜槽上石英颗粒的悬浮条件，得出修正的粘性剪切分散压公式如下：

各种矿泥重选设备中矿浆的分散压

表 2

设备名称	分散压, P 达因/厘米			有效重力 G_0 达因/厘米 ²	$\frac{\Sigma P}{G_0}$
	固有流体剪切	附加剪切	合计 ΣP		
自动溜槽	12.48	—	12.48	13.90	0.90
离心选矿机	342.2	907.2	1249.4	821.5	1.52
摇动翻床	3.64	7.4	11.04	14.02	0.79
皮带溜槽	17.23	—	17.23	10.90	1.58
振摆皮带溜槽	5.58	26.94	32.52	18.53	1.75
横流皮带溜槽	3.93	7.4	11.33	15.24	0.74

$$P_{\text{粘}} = 5.07 \lambda^{2.5} \mu \frac{du}{dh} \quad (34)$$

这个公式直接采用给矿的平均浓度代替剪切界面上的矿浆浓度（目前尚无公式计算薄流膜的浓度分布，无法准确得出剪切界面上的矿浆浓度值），使用起来较方便。

凯利^[18]认为颗粒的平衡条件是分散压应等于单位颗粒横断面上有效重力，用公式表示为：

$$P = \frac{2(\rho_s - \rho)gd}{3} \quad (35)$$

$$\left(\text{因球形颗粒: } \frac{\text{有效重力}}{\text{横断面积}} = \frac{\frac{\pi d^3 (\rho_s - \rho)g}{6}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{2(\rho_s - \rho)gd}{3} \right)$$

$$\text{惯性剪切时 } \lambda^2 d \left(\frac{du}{dh} \right)^2 = \frac{(\rho_s - \rho)g}{0.06\rho_s} \quad (36)$$

$$\text{粘性剪切时 } \lambda^{1.5} \frac{du}{dh} = \frac{2(\rho_s - \rho)g}{9\mu} \quad (37)$$

凯利从惯性剪切时 $d\alpha / \left(\frac{du}{dh} \right)^2$ 关系，得出该时粗粒将因析离位于上层的结论，这和早些时候布特认为惯性剪切分散压与颗粒直径的平方成比例，因此粗粒进入上层的结论是一致的。但当粘性剪切时，则分散压与粒度将无关。由于影响分散压的因素多，要分析剪切作用与矿粒的分层关系不大容易。

2. 薄流膜中矿粒的析离与分层

一般认为析离是细颗粒通过粗颗粒的间隙下沉或粗颗粒通过细颗粒的床层上浮。析离结果是粗粒在上，细粒在下。它是一种按粒度分层的现象，有时称为反分级。

在流膜选矿中析离现象很普遍，象摇床，尖缩溜槽中部发生矿粒按粒度的析离。摇动作用会加强析离。但对薄流膜中是否存在析离现象则研究得较少。

作者^[2]曾分析过各种矿泥溜槽的精矿和尾矿的粒度特性，它们按粒度分离的现象不显著，除离心选矿机外，精矿的粒度都略粗于尾矿粒度。顾枫^[19]也曾对固定溜槽上的产品，包括槽面上的各段精矿和尾矿进行水析，表明各产品的粒度特性非常接近，无显著的析离现

象发生。用拜格诺理论解释可认为在粘性剪切条件下,不存在按粒度分离的现象。

根据作者^[11]最近的研究,在摇动溜槽中,不同摇动强度下矿粒可出现三种不同的按粒度分层情况:

(1) 低速摇动 ($n^{1/3} \leq 3100$): 轻重矿粒都是精矿中的粒度大于尾矿。选矿效率低。

(2) 中速摇动 ($n^{1/3} = 3350 \sim 4610$), 轻矿粒在尾矿中的粒度大于精矿, 重矿粒在精矿中的粒度大于尾矿。选矿效率最高。

(3) 高速摇动 ($n^{1/3} \geq 5240$), 轻重矿粒都是尾矿中的粒度大于精矿。选矿效率低。

由此可见, 摇动强度越大, 析离现象越显著。但过大的摇动强度, 破坏颗粒按比重分层, 与摇动强度不足时 (此时床层不够松散) 一样, 都会使选矿效率下降。

五、薄流膜选矿中的电动现象

米歇尔和布特^[20, 21]等研究了矿泥重选中矿粒和床面的动电性质, 探讨了矿浆 PH, 床面材料和添加金属阳离子对分选效率的影响, 归结如下:

(1) PH 对矿浆粘度的影响 矿泥脉石成分中的石英和粘土矿物常带负电, 当提高矿浆的 PH, 它们的负电荷增加, 溶剂化膜易保持而有利于分散, 因此粘度降低。

(2) PH 对矿粒表面电性的影响 一般床面带负电, 而锡石也带负电 (锡石零电点为 PH = 2.6 ~ 5), 与床面互相排斥, 不利于分选。因此从矿粒与床面的作用来说, PH 过高也不利。当分选锡石——石英矿泥时, 最适宜的 PH = 6.5。

(3) PH 对床面电性的影响 研究了四种床面, 其负电位大小次序为: 漆布 > 聚氯乙烯 > 橡胶 > 木质。试验证明床面的负电性过大, 则分选不好。原因是矿粒与床面的斥力过大, 缩短其停留时间。橡胶床面和木质床面的分选效果较好。

(4) 添加金属阳离子的影响 在矿浆中添加 Cu^{2+} , Fe^{3+} 等金带阳离子可以使矿物的零电点升高, 石英由带负电变成零电点为 PH = 7.6 ~ 8.5, 锡石变成在所有 PH 下都带不大的正值电动电位, 与床面的吸引力增大, 动电迁移率减小, 分选效率提高。

以上说明, 动电性质对薄流膜中矿泥的选别有很大的影响, 但在这方面的研究工作目前还开展得不够。

简短的结语

本文概述了近年来薄流膜选矿理论的发展, 探讨了薄流膜的流动特性和矿粒的松散分层过程, 分析了在摇动作用和离心力作用下对流动特性和松散作用的影响。由此可见薄流膜处理微细粒矿物仍有很大的发展前途, 特别是利用摇动作用以强化剪切, 在离心力场下强化分选过程以及研究矿泥和铺面的表面电性改善分选条件是当前三大研究方向。

参 考 文 献

[1] Fyiedman, S.I., Miller C.O., 《Ind. Eng. Chem.》, 33 (1941), No 7, 885.

[2] 黄 枢; 《中南矿冶学院学报》, 1979, No 2, 20.

[3] 顾 枫等, 《中南矿冶学院学报》, 1982, No 4, 37.

[4] 余仁焕, 选矿流膜特性的测定及分析, 东北工学院科技情报科, 1984.

- [5] 列维奇, 物理化学流体力学 (中译本), 上海科学技术出版社, 1965。
- [6] Иванов В.Д., 《Изв.ВУЗ.Цвет.Мет-Гия》, 1983, №2, 9。
- [7] Thunauer A.等, 《Trans.A.I.M.E.》, 187 (1950), 879。
- [8] Иванов В.Д., 《Изв.ВУЗ.Цвет.Мет-Гия》, 1983, №1, 35。
- [9] 孙玉波主编, 重力选矿, 冶金工业出版社, 1982。
- [10] Иванов В.Д., 《Изв.ВУЗ.Цвет.Мет-гия》, 1981, №4, 116。
- [11] 黄 枢, 摇动溜槽分选行为的研究, 中南矿冶学院科技情报科, 1983。
- [12] Burch C.R. 《Bul.I.M.M.》 71 (1962), part7, 406。
- [13] Базилевский А.М.等, 《Обог.руд》, 1981, №6, 20。
- [14] 金世斌, 孙玉波, 离心选矿机流膜的测定及运动规律分析, 东北工学院科技情报资料科, 1983。
- [15] 范象波, 佟庆理, 《有色金属 (选矿部分)》, 1982, №1, 33。
- [16] Bagnold R.A., 《Proc.Royal Society》, 225 (1954), A, №1160, 49。
- [17] 黄 枢, 《中南矿冶学院学报》, 1983, №2, 8。
- [18] Kelley E.G.等, Introduction to Mineral Processing, 1982。
- [19] 顾 枫, 矿泥溜槽的流膜特性及分选行为的研究, 硕士研究生论文, 1981。
- [20] Michell F.B, 8th, International Congr. of Miner. Proc., 1968, 292
- [21] Burt R.O., 《InternAtional Jour.of Miner. Proc.》, 5 (1978), №1, 39。