

悬浮液选矿 理论与工艺新发展

[苏] B. H. 寿辛 著

袁楚雄 译

23

中国建材工业出版社

TD923

13

2

悬浮液选矿 理论与工艺新发展

[苏] B.H. 寿辛 著

袁 楚 雄 译



中国建筑工业出版社

B 168540

本书综述了悬浮液选矿理论和工艺的新发展。介绍了颗粒在悬浮液中的运动规律、分选动力学、悬浮液介质流变学特性等方面的研究成果。对于研究物理现象的解析法、图解分析法、在电子模拟装置中运动微分方程式和分层动力学的数值分析法以及统计分析法给予了说明。书中还列举了静力分选和动力分选条件下的悬浮液分选机选别的最佳工艺制度，黑色金属矿石悬浮液分选过程的技术经济效果评价和应用前景。

本书供选矿厂，有关的科学研究和设计单位的工程技术人员参考，也适合学校的师生阅读。

本书第一、二、三、四章由姚书典审校，第五、六、七章由王栋知审校，最后由姚书典统校全书。贺德仁同志也参加了审校工作。

« Новое в теории и технологии обогащения руд в суспензиях »

В. Н. Шохин

Москва « Недра » 1977

悬浮液选矿理论与工艺新发展

袁 楚 雄 译

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 4³/₄ 字数: 105千字

1984年10月第一版 1984年10月第一次印刷

印数: 1—2,400册 定价: 0.55元

统一书号: 15040·4643

序 言

矿物悬浮液分选是有用矿物选别的先进而完善的方法之一。目前在国内外选矿实践中这种方法广泛地应用于煤，黑色、有色和稀有金属矿石及非金属有用矿物的分选。同一系列其他重力选矿过程相比，这种选矿过程的影响在逐年增大。

在苏联，重悬浮液选矿过程应用于顿巴斯、卡拉冈达和库兹涅茨地区的选煤厂。在兹良诺夫铅业公司、克拉斯诺列钦采选联合企业等企业已有工业规模的应用。在捷开里铅锌公司、印给奇基和达拉松矿山管理局等选矿厂中正准备应用[27, 29—31, 38]。

在其它国家，重悬浮液选煤仅次于跳汰而居第二位。在美国、加拿大、法国、瑞典、英国、联邦德国等国的选矿厂里，悬浮液选矿过程得到了特别广泛的发展[14, 23, 34, 37]。

在苏联，对有色、稀有金属和黄金等一系列矿床的矿石进行了可选性研究。按照乌拉尔选矿研究设计院的设计，建设了铬矿石重悬浮液选矿厂。此外，完成了克里沃罗格氧化铁矿石的悬浮液选矿厂设计[37]。

现在，对这一选矿过程的完善给予很大的注意。但是到目前为止，对矿物在悬浮液中的分选、分选机的工艺计算、采用电子技术控制选矿过程及其他一些问题从理论上研究得很少，这就使悬浮液选矿过程的推广应用受到影响。在这一方面做了大量工作的有：选矿研究设计院、选矿研究设计院

乌拉尔分院、全苏有色金属矿冶科学研究所、黑色金属选矿研究设计院、固体可燃矿产选矿研究所、东方煤炭化学科学研究所、乌克兰选煤科学研究所，国立有色金属科学研究所、中央地质勘探科学研究所、国立稀有金属科学研究所伊尔库茨克分院等单位。

在被引用的研究成果中，得到了不仅在静力学条件下而且在动力学条件下进行的悬浮液选矿过程的物理本质的新概念。在理论与试验研究的基础上拟订了新的模型。这种模型应用于矿物颗粒在悬浮液中分选机理的数学分析。关于矿粒在悬浮液中的运动和分层提出了一些假说，这些假说是提出悬浮液选矿过程理论的前奏。

悬浮液选矿的发展现状和趋势表明，近年来矿物原料特别是一些要求分选精确度高的难选矿物用重悬浮液处理的数量急剧增长。

新的选矿过程的实现，对提高劳动生产率，提高生产过程的机械化和自动化程度以及确定生产能力大的大型采选联合企业的发展远景是相当重要的。近15~20年来得到发展的悬浮液选矿能适应所有这些要求。

作者向教授、技术科学博士H.H.维诺格拉多夫、B.И.克拉辛和Г.Д.克拉斯诺夫，技术科学副博士И.М.柯斯金、H.A.凡尔拉莫夫、H.Г.哈洛多夫和P.Ю.帕茨，以及马格尼托哥尔斯克诺索夫矿冶学院选矿教研室的全体同志表示感谢，他们在本书稿的准备直至交付印刷前提出了宝贵意见并给予帮助。

目 录

第一章 悬浮液的基本特性	1
§1 作为有用矿物分选介质的悬浮液的工艺性质	1
§2 悬浮液的流变特性与外界作用的关系	2
第二章 研究有用矿物在悬浮液中分层的现代方法	21
§1 研究用的试验台	21
§2 记录矿物颗粒在悬浮液中分层用的控制—测量仪器	29
§3 应用放射性同位素研究颗粒在悬浮液中的运动	34
§4 悬浮液选矿分选质量的控制和效率的评价	37
第三章 颗粒在悬浮液中运动的基本规律	43
§1 颗粒在悬浮液中运动的特性	43
§2 矿物颗粒在非结构化的悬浮液中运动时的阻力 系数和雷诺数	47
§3 关于颗粒在悬浮液中运动的假说	52
§4 颗粒在悬浮液中自由运动和干扰运动范围的确定	53
§5 矿物颗粒在非结构化的悬浮液中运动时阻力系数 与雷诺数、浓度的关系	54
§6 确定矿物颗粒在悬浮液中运动时的阻力系数与 雷诺数的图解法	56
§7 矿物颗粒在悬浮液中运动末速的计算方法	58
第四章 悬浮液与矿物颗粒在分选设备中运动 的动力学	67
§1 悬浮液分选机的分类	67
§2 悬浮液在振动分选机中运动的基本规律	68

§ 3	矿物颗粒在振动分选机中分层运动的动力学	71
§ 4	应用电子模拟装置求解描述矿物颗粒在振动分选 机中分层运动机理的微分方程式	75
第五章	矿物颗粒在悬浮液中分层的动力学	85
§ 1	矿物颗粒在悬浮液中分层的计算模型	85
§ 2	矿物颗粒在悬浮液中分层的动力学方程式	87
§ 3	悬浮液分选机的工作区内取决于原矿的物理—机械 特性和分层状况的各层物理参数变化的动力学	90
§ 4	应用电子计算机研究矿物颗粒在悬浮液中分层的 动力学	94
第六章	有用矿物悬浮液分选过程的强化	106
§ 1	有用矿物悬浮液分选过程强化的潜力	106
§ 2	完善和强化重悬浮液分选工艺过程的基本方向	107
§ 3	悬浮液分选工艺的推荐制度	108
§ 4	有用矿物重悬浮液分选现有工艺流程的完善和 新流程的拟订	119
第七章	黑色金属矿石重悬浮液选矿过程的经 济效果和发展远景	131
参考文献		141

第一章 悬浮液的基本特性

§1 作为有用矿物分选介质的悬浮液的工艺性质

在重力选矿过程中，固体颗粒处于悬浮状态是其分选的必要条件。颗粒的这种状态是在垂直流、水平流、脉动流、切向流和联合流的作用下获得的。这种或那种介质流的应用是由固相的稳定方式决定的。

水平流和垂直流造成具有静力分选条件的稳定悬浮液，而切向流、脉动流和联合流则造成具有动力分选条件的稳定悬浮液。

在有用矿物分选过程中，不仅有被分选的矿物颗粒及其连生体参与，而且悬浮液的加重剂颗粒也参与分选。在水力分级、跳汰、摇床、溜槽和其他设备中，不专门添加为加重分选介质用的加重剂。在这些过程中，介质被加重是由于被分选矿物颗粒及其连生体的存在。在这种情况下悬浮体指的是矿石悬浮液。矿石悬浮液体现了悬浮液选矿过程本身的许多规律性。在悬浮液选矿过程中不仅有矿石悬浮液参与，而且有专门配制的悬浮液参与。

在具有静力分选条件的选矿设备（圆锥型、鼓型及其他类型分选设备）的工作区中，悬浮液形成向排矿处运动的轻组分层，而重组分则沿设备的整个断面沉到设备底部并由运输装置排出。具有动力分选条件的设备，其特点是形成悬浮

体——床层。与跳汰过程相似，床层指的是应当分选的矿粒和在分选过程中促使介质加重的颗粒（即加重剂颗粒）的总体。在床层形成的过程中，也形成了轻重产物层。后者借助于介质流或传动机构的作用向排矿处运动。

所有重力选矿过程按悬浮体的性质可分为三类：矿石分选（悬浮体由窄分级的矿粒组成）；矿石——悬浮液分选（悬浮体由不分级的矿粒组成）；悬浮液分选（悬浮体由矿粒和专门添加的加重剂颗粒组成）。

按悬浮液的一系列特征又可分为以下几类：按分散介质的种类可分为空气悬浮的和水平悬浮的；按悬浮液的状态可分为静力稳定的和静力不稳定的；按分散相的粒度可分为细粒分散（加重剂的粒度小于0.1毫米）的和粗粒分散（加重剂粒度为3毫米或更大）的；按分散相的成分可分为单矿物的和多矿物的；按流变特征可分为非结构化的和结构化的；按分散相的浓度可分为低浓度（固体体积浓度小于25%）的和高浓度（固体体积浓度大于25%）的；按采用的加重剂种类可分为矿物（磁铁矿、铬铁矿、重晶石、石英等等）的和人造物质（硅铁合金、黄铁矿烧渣、铁屑、高炉灰等等）制备的。

§ 2 悬浮液的流变特性与外界作用的关系

悬浮液流变性、稳定性和耐久性的必然变化，决定了悬浮液需要一定的外界作用。水平流和垂直流的动力作用、振动作用、离心流的作用和表面活性物质的应用是外界因素作用于悬浮液的基本方法。

水平流和垂直流（上升流或下降流）的动力作用根本地改善了悬浮液和悬浮体的流变特性。在均匀的水平悬浮液流

中，加重剂颗粒在分选机中偏离水平线向下呈扇形轨迹运动。轨迹的偏离角取决于水平流的速度和颗粒的沉降速度。水平悬浮液流中，加重剂按密度和粒度的有规律分布，导致悬浮体的密度沿高度发生变化。液流沿高度任一点上的悬浮液密度，取决于固相的浓度、加重剂的粒度组成、密度和悬浮液流的速度（呈层流或紊流状态）。

加重剂粒度组成的均一性、加重剂的单矿物组成和悬浮体在整个容积内浓度不变，是悬浮液沿单元水平层保持密度相等的条件。在悬浮液的给入区，液流截面的任意一点实际上具有相同的粒度组成、相同的加重剂浓度和密度。

随着悬浮液向排矿流槽的运动，悬浮液的密度沿单元层发生变化。其密度朝液流的下层增大。加重剂粒度组成和浓度的变化，是在液流运动方向上沿单元层密度变化的基本原因。可见，沿液流的运动方向，在某一深度处总可以找到一单元层，该层具有给料区悬浮液固有的流变学参数。

在悬浮液流速度不变的情况下，粗颗粒运动的轨迹与水平线的夹角比细颗粒的大。由于沿悬浮体高度加重剂的有规律分布，可以画出与初始悬浮液密度相应的等密度面。这一情况被悬浮液设备的试验所证实。悬浮液试样用虹吸管从分选机长度 L 的四个地点，沿槽高 H 在三点上采取（图1）。在悬浮液流的速度为6厘米/秒，初始悬浮液的密度为1.45克/厘米³的条件下，采样深度与最大粒度加重剂的运动轨迹位置相对应。

在采样点上悬浮液的密度等于1.45克/厘米³，这与等密度面的位置相符。从排矿流槽附近的液流表面选取的悬浮液密度为1.4克/厘米³。

由图1可以看出，在均匀的水平悬浮液流中，加重剂颗粒

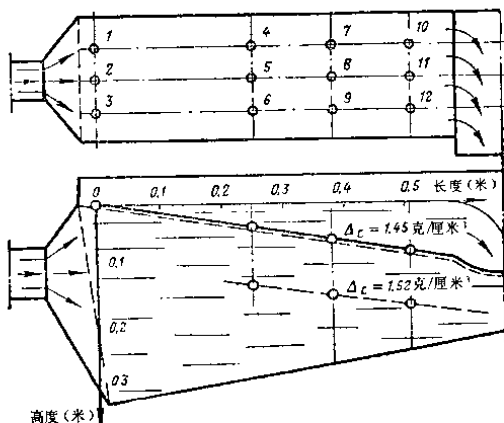


图 1 等密度面曲线的测定
(直线——等密度面曲线 虚线——颗粒的运动轨迹)

沉降并聚集在分选机的下层。运输装置——皮带运输机或刮板运输机以及改变分选机槽子的形状即均匀地减小它的横截面，能阻止加重剂的聚集。分选槽横断面积的均匀减小，可以造成速度沿槽的长度逐渐增加的匀加速悬浮液流。

悬浮液中加重剂的稳定平衡可通过垂直上升流的作用来达到。上升流的速度要大于大多数最粗和最重的加重剂的沉降速度。举例说，当加重剂的密度为 4.2 克/厘米^3 、粒度为 0.2 毫米 时，为了稳定密度为 1.5 克/厘米^3 、粘度为 0.03 泊 的悬浮液流，上升流的速度必须不小于 3 厘米/秒 。从理论上说，在层流条件下的这种液流中能够分选粒度大于 2 毫米 的

矿粒。所有小于这一尺寸的矿粒将被垂直流向上带至轻组分中。应当指出，在轻组分中同时将带走一些密度大于1.5克/厘米³、粒度小于2毫米的重矿粒。所以在垂直流的分选机中，选别前的预先分级是必需的。实际上，选煤时分级下限通常为8毫米。

振动作用能改善悬浮液的粘度和初始抗剪强度等流变学参数，而稳定性没有本质上的降低[18, 19]。Г·Д·克拉斯诺夫证明，细分散悬浮液的垂直振动，导致环绕矿粒的悬浮液层中涡流结构的破坏，同时提高了被振动的悬浮液的结构强度，因而提高了悬浮液的粘度并改善了它的稳定性。这一结论与П·А·列宾捷尔的数据吻合。列宾捷尔提出，在一定的条件下，振动能够大大地提高悬浮液的结构强度[35]。振动促进矿粒更精确地分选，使被分选矿粒的密度接近分选密度，因为矿粒的运动速度比在平静的悬浮液中增大了。所有这些表明，振动使得应用粗粒加重剂和添加粘土质稳定剂成为可能。从分选效果来看，采用大振幅低频率的振动是合理的。因为这样消耗的介质少，并且降低了任何密度的矿粒运动速度[18, 19]。

马格尼托哥尔斯克矿冶学院进行的研究表明，振动降低了由粒度为-2毫米的加重剂组成的粗分散、高浓度悬浮液的粘度和初始抗剪强度。这是由于振动破坏了高浓度悬浮液结构网的联系。振动的频率和振幅对粘度和初始抗剪强度的影响如图2所示。试验是在实验室型和工业试验型的顺流式振动分选机中进行的。流变学参数用电动机机械式粘度计测量。在研究中磁铁矿悬浮液的密度保持不变并等于2.99克/厘米³。分选机中床层的高度为21厘米。

由图2可得出，槽子振动频率和振幅的增加不仅降低了

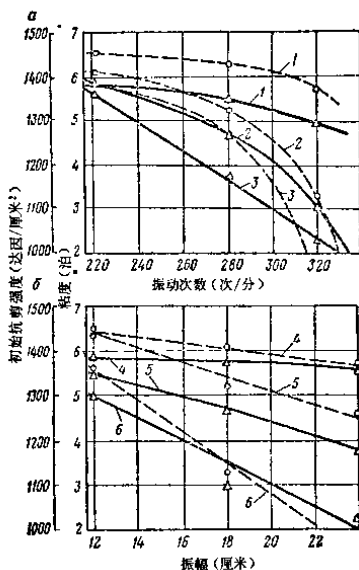


图 2 粘度和初始抗剪强度与振动频率(α)及振幅(δ)的关系

1, 2, 3—振幅相应为12, 18, 24厘米, 4, 5, 6—振动频率相应为220, 280, 320转/分
(直线——粘度 虚线——初始抗剪强度)

粘度, 而且降低了初始抗剪强度。增强振动作用创造了雪崩式的破坏介质结构和脱除部分水分的条件。这是由于增强了接触处的破裂, 减小了结合强度。显然, 在进一步增强振动作用的条件下, 空隙水将转化成为游离水。这时介质结构遭

到最大破坏，这是与介质的完全液体化有关的。

振动严重地影响加重剂沿槽长度方向的粒度组成。例如，在振动槽中，从距悬浮液给入处不同的三个区域中，深度为15厘米处，采取的试样，其粒度组成由于在外部的扰动流作用下而有显著不同。

当频率不变（每分钟振动 280 次）时，振幅由12毫米增大到24毫米，同样地，当振幅不变（24毫米）时，频率由每分钟振动220次增加到320次，在分选机的任何区域创造了加重剂按粒度比较均匀地分布的条件。在图 3 和图 4 上，这一点可由曲线 3 比曲线 1 更凹得到证明。曲线 3 更凹，说明含有较多的细粒。随着远离给料区，在振动作用下，悬浮液的粒度组成变得比较粗，特别是在振动频率和振幅都较小的范围内。在频率为每分钟振动280次和振幅为 24 毫米时，加重剂沿振动槽长度方向的粒度组成实际上始终不变。

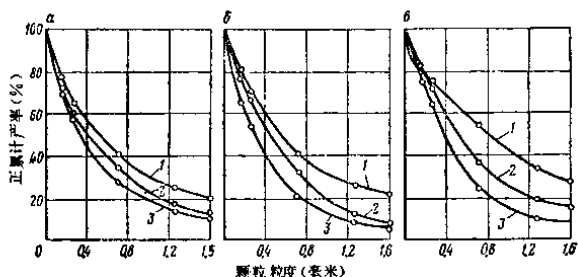


图 3 当振动槽振动频率为每分钟 280 次时，在振动槽15厘米深度处采取的悬浮液试样的粒度特性

α —I 区(给料区)； δ —II 区(距给料区120厘米处)； θ —III 区(距给料区300厘米处)

1, 2, 3—振幅相应为12, 18, 24厘米

在离心力场中，悬浮液发生分层，形成加重剂密度和粒度组成彼此不同的区域。加重剂的最粗颗粒集中在水力旋流器的器壁附近，特别是在圆锥部分。悬浮液的密度由中心向周边增大，而在圆锥部分，则向沉砂口方向增大。旋流器中悬浮液的浓缩作用允许采用比要求的临界分选密度小的初始悬浮液密度。离心悬浮液流显著地改变了溢流和沉砂的特性。试验表明，旋流器入口矿浆压力愈高，采用的加重剂粒度愈粗，则沉砂的密度愈大。图5中表示了在直径为100毫米的三产品旋流器的沉砂中，悬浮液密度的变化与入口压力的关系。该旋流器在采用不同粒度的磁铁矿加重剂的情况下工作，磁铁矿加重剂的粒度特性如图6所示。

在所有的试验中，悬浮液的密度不变并等于2克/厘米³。

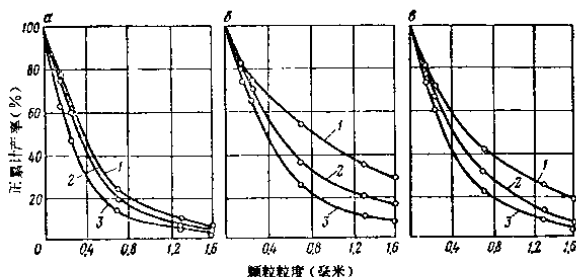


图4 当振动槽振幅为24毫米时，在振动槽15厘米深度处采取的悬浮液试样的粒度特性

α —I区(给料区)； δ —II区(距给料区120厘米处)； δ —III区(距给料区300厘米处)；

1、2、3—振动频率相应为220、280、320转/分

由图5可以得出，在旋流器入口矿浆压力不很高的条件

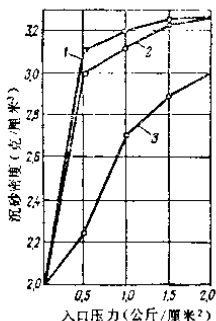


图 5 采用不同粒度的加重剂时，旋流器沉砂中悬浮液密度与入口压力的关系

1—粗粒加重剂；2—中粒加重剂；
3—细粒加重剂

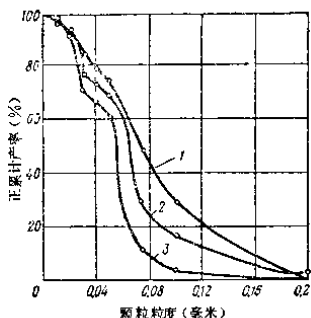


图 6 闭路循环的旋流器装置中应用的加重剂的粒度特性

1—粗粒加重剂；2—中粒加重剂；
3—细粒加重剂

下，采用粗粒加重剂可以得到大的沉砂密度。三产品旋流器入口压力的变化决定着矿浆流有规律的分配。有人进行了选矿产品中悬浮液、加重剂、水和矿石分配情况的研究试验。试验的固定条件是：矿石为粒度 $-3+0.25$ 毫米的氧化铁矿石；矿石重量与加重剂重量之比为 $1:10$ （按干产物计算）；加重剂为粒度 -0.074 毫米级别占 52.06% 的磁铁矿精矿；旋流器垂直配置；旋流器各产物管的直径为：沉砂管—20 毫米，中间产品管—62 毫米；溢流管—29 毫米；入料管— 38×22 毫米。

通过试验得知，随着入口压力的增加，经过旋流器沉砂口产物的产率降低。这是由于旋流器中负压的显著增大和通过沉砂口吸入的空气是增加，以及强大的涡流破坏了中央空气

柱的稳定性所致[25、50、51]。

通过试验同时得知了沉砂产物排出的不同特性。当入口压力低时，沉砂口没有完全被产物充满。排矿呈扇形。当压力大于1.5公斤/厘米²时，沉砂产物的排出呈棒形。

根据所有的试验，旋流器按物料体积计的生产率随着入口压力的增大而增加。

为了进一步弄清旋流器中矿浆流的分配情况，有人进行了在不同的初始悬浮液密度，沉砂口大小和加重剂粒度条件下的试验。试验条件为中间产物排出口和溢流口的大小不变，相应为62毫米和31毫米；给料中 $P:Y$ （矿石：加重剂）=1:10；旋流器入口压力为1~1.1公斤/厘米²；加重剂中-0.074毫米级别含量为52.06%时，沉砂口的大小由30毫米改变为12毫米。通过试验得知，随着沉砂口直径的减小，沉砂产物的密度增大，沉砂产物中矿浆各组分的产率显著降低。同时沉砂产物中矿石重量与加重剂重量之比减小。

沉砂产物中的固体颗粒有一定的饱和限度。实际上，当初始悬浮液的密度由2.1增大到2.6克/厘米³时，并不导致沉砂产物密度的增大。这是由于旋流器内部形成了能使沉砂产物沿旋流器的轴线移动的分选区。分选区的位置对采用的分选参数来说是一定的。这一位置决定于沉砂产物中悬浮液的最大密度。

分选区向旋流器圆锥部分的移动，在减小沉砂口直径和增加旋流器入口压力时特别明显地表现出来。除此之外，分选区的位置还决定于加重剂的粒度组成，初始悬浮液的密度和旋流器的锥角。

分选区的特征是分选密度和粘度为定值，在这样的分选密度和粘度下，矿粒呈现接近于理论值的精确分选。应当指