



中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

跳汰分选机理及专家知识库研究

TIAOTAI FENXUAN JILI JI ZHUANJIA ZHISHIKU YANJIU

匡亚莉 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

跳汰分选机理 及专家知识库研究

匡亚莉 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

跳汰分选机理及专家知识库研究/匡亚莉著. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2006. 3
ISBN 7 - 81107 - 253 - X

I. 跳… II. 匡… III. 跳汰选煤—研究
IV. TD942. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 001642 号

书 名 跳汰分选机理及专家知识库研究
著 者 匡亚莉
责任编辑 褚建萍
责任校对 徐 玮
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 850×1168 1/32 印张 5.5 字数 143千字
版次印次 2006年3月第1版 2006年3月第1次印刷
定 价 38.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

跳汰分选已有100多年的历史,是煤炭分选的最主要工艺之一。实现跳汰过程的人工智能控制,是近年来研究的热点。

本书面向跳汰过程智能控制的需要,尝试将机理研究更紧密地与跳汰过程的操作变量、检测参数联系起来,尝试将跳汰理论研究的知识以计算机能够接受的形式整理和表达出来,从而便于应用于实际的控制。

本书采用了比较先进的实验分析仪器——高速动态分析仪,将跳汰过程在1/100 s时间段的变化展现出来,从而得到一些常规手段观测不到的现象。

本书主要研究了以下内容:

跳汰分层机理、跳汰分层过程、跳汰过程中各操作变量的影响,以及跳汰过程中水流和粒群的各运动参数的变化规律。利用高速动态分析仪,分析床层运动参数,建立各影响因素与运动参数间的关系。研究跳汰专家知识库的结构,以及跳汰专家知识的收集、整理,知识表达方式的选择。

通过分析研究,提出了跳汰过程的“综合作用分层理论”,建立了颗粒与水流运动的振动方程。初步提出了适用于跳汰过程控制的专家系统结构。

此书研究内容已经受国家自然科学基金面上项目资助(项目名称:基于高速动态分析的跳汰分层模拟及控制策略研究,项目编号:50474065)。

著 者

2006.1

目 录

1 引言	1
2 研究现状综述	3
2.1 跳汰理论的研究	3
2.1.1 经典研究	3
2.1.2 当代的有关研究	11
2.2 水流及颗粒运动方程研究	15
2.2.1 水流运动方程	15
2.2.2 基于振动理论的液体振动方程	19
2.2.3 已有的颗粒运动方程	23
2.3 跳汰过程自动控制的研究	26
2.3.1 重产物排出机构的研究	26
2.3.2 跳汰分层自动控制的研究	27
2.3.3 在线检测	29
2.3.4 工业应用的控制研究	31
2.3.5 控制策略	32
2.4 专家系统的研究	35
2.4.1 研究现状	35
2.4.2 专家系统的结构	38
2.5 本章小结	39
3 实验装置及条件	40
3.1 实验装置	40
3.1.1 半工业性实验系统	40

3.1.2	模型实验系统	42
3.1.3	控制系统	42
3.2	高速动态分析系统	43
3.3	实验过程描述	44
3.3.1	模型机分选实验	44
3.3.2	高速动态摄像实验	50
3.3.3	高速动态摄像的图像分析过程	52
4	跳汰分层过程分析	59
4.1	跳汰分层过程	59
4.1.1	颗粒与水的运动过程	59
4.1.2	分层过程描述	63
4.2	跳汰分层过程分析	71
4.2.1	颗粒的沉降末速计算	71
4.2.2	显著影响分层的运动参数	71
4.2.3	水的运动情况	77
4.3	跳汰过程中的典型现象	78
4.3.1	床层运动的不均匀性	78
4.3.2	床层由静止起跳时的激烈运动	81
4.3.3	筛下空气压力分布不均匀	82
4.3.4	粒度的影响	84
4.4	本章小结	86
5	跳汰分选过程操作参数的影响分析	89
5.1	跳汰周期的影响	91
5.2	进气期的影响	92
5.3	排气期的影响	96
5.4	膨胀期的影响	96

5.5	补气期的影响	103
5.6	风包压力的影响	103
5.7	进风量的影响	107
5.8	调节参数的过程对床层的影响	107
5.9	容器的边壁效应	107
5.10	本章小结	109
6	跳汰过程运动方程及跳汰理论体系的表述	110
6.1	水流运动方程	110
6.1.1	实验得到曲线	110
6.1.2	根据实验资料建立的水流运动方程	116
6.1.3	关于强迫力——风压的讨论	121
6.2	颗粒的运动方程	121
6.2.1	实验曲线分析	122
6.2.2	根据实验数据建立的颗粒(床层) 运动方程	122
6.2.3	对所得运动方程的分析	127
6.3	跳汰理论的系统表述	129
7	控制策略及专家知识库	132
7.1	基于专家系统的控制策略	132
7.2	专家控制系统的构造	135
7.3	专家知识的获取和表达	136
7.3.1	知识的获取	137
7.3.2	知识的表达	138
7.4	利用现有知识模拟专家控制	144
7.5	进一步的研究工作	153

8 结论	155
后记	158
参考文献	160

1 引 言

跳汰分选已有 100 多年的历史,是煤炭分选的最主要工艺之一。全国 350 多家国有重点煤矿选煤厂和 1 500 多家地方煤矿选煤厂中,60%以上全部或部分使用跳汰分选工艺。跳汰分选工艺以它成熟、生产能力大、运行成本低而见长,因而得到广泛应用。但因其生产中调节因素多,运动规律复杂,多年来,人们力图对跳汰分选过程从机理上进行研究,提出了很多假设、经验公式等,都没有得到公认。因此,到目前为止,跳汰分选的工艺操作都是凭经验,且大部分是手工操作,致使分选精度低、产品质量不稳定、回收率低等,一般数量效率只有 80%左右,使大量有用矿物损失。

许多自动控制领域的专家学者都力图攻克跳汰过程控制的问题。但由于跳汰分选的理论研究大都面向分选机理,且没有成熟、公认的结论,因此对跳汰分选过程的控制研究面临着“研究对象没有确定数学关系”、只能采用“模糊控制”方法的局面,使研究进展缓慢,控制效果也不理想。

近年来,随着信息技术的发展,计算机控制、人工智能技术等 在矿物加工领域得到逐步应用。在从事信息技术在矿物加工领域的应用研究工作中,作者越来越感觉到收集、整理和细化矿物加工领域的专家知识的必要性和紧迫性。因为此项工作是决定用高新技术提升传统的矿物加工产业所必不可少的环节,关系到产业提升的水平、可靠性和实用性。许多同行正在进行此项工作。

本书面向跳汰过程自动控制的需要,试图将跳汰理论研究的知识以计算机能够接受的形式整理和表达出来,将机理研究更紧密地与跳汰过程的操作变量、检测参数联系起来,从而便于应用于

实际的控制。

本书采用了比较先进的实验分析手段——高速动态分析仪,将跳汰过程在 $1/100\text{ s}$ 时间段的变化展现出来,使我们能够直观、反复、细致地观察和分析实验现象,从而得到一些常规手段观测不到的现象。当然,实验是在特定条件下进行的。由于时间限制,只进行了有限的实验和分析,实验结果与生产实际可能有一定差别,所得结论也是有局限性的。想必这一点同行们都会理解。

本书主要研究跳汰分层机理、跳汰分层过程、跳汰过程中各操作变量的影响,以及跳汰过程中水流和粒群的各运动参数的变化规律。利用高速动态分析仪,分析床层运动参数,建立各影响因素与运动参数间的关系。建立跳汰专家知识库,主要包括:跳汰专家知识的收集、整理,知识表达方式的选择。

通过分析研究,提出了跳汰过程的“综合作用分层理论”,以及颗粒与水流运动的振动方程。初步提出了适用于跳汰过程控制的专家系统结构。

2 研究现状综述

2.1 跳汰理论的研究

跳汰分选的应用,早在 1556 年便有报道^[1],其现代的发展是以 1891 年 9 月德国工程师弗里茨·鲍姆获得“空气脉动跳汰机”专利为标志的。跳汰理论的研究也是早在 19 世纪 80 年代便有报道^[2]。多年来,跳汰理论的研究从来没有间断过。

2.1.1 经典研究^[2]

经典跳汰理论的研究可以分为 5 个流派。

(1) 颗粒运动假说

该流派试图从颗粒运动速度和加速度中找到物料分层的依据。代表理论有:自由沉降理论、干涉沉降的重选分层理论、吸吸分层理论、加速度分层理论等。

① 自由沉降理论

早期的重选分层理论是以自由沉降末速为基础的。理论工作者首先注意到,密度不同的颗粒在水中沉降时不仅受密度的作用,而且受颗粒粒度的影响。从颗粒沉降的角度看,粒度相同的颗粒,随着密度的增大,沉降速度也加快;密度相同的颗粒,随着粒度增大,沉降速度加快。不言而喻,两种不同密度的矿物混合物可以在水介质中按密度分层的条件是:如果二者粒度相同,它们在水介质中沉降时,密度高的颗粒比密度低的颗粒的沉降速度要快,经过一段时间二者即可分开。随着高密度颗粒的粒度减小,其沉降速度要下降,但只要它的沉降速度仍大于低密度、粗颗粒的沉降速度,仍可以使二者分开。

以此为基础,推导出了一批著名的沉降末速公式,如:

雷廷智公式:

$$v_0 = 51.1 \sqrt{d \frac{(\delta - \Delta)}{\Delta}} \quad (\text{cm/s}) \quad (2-1)$$

适用于紊流状态下的球体颗粒。

斯托克斯公式:

$$v_0 = 54.5 \left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta} \right) d^2 \quad (\text{cm/s}) \quad (2-2)$$

适用于层流状态下的球体颗粒。

阿连公式:

$$v_0 = 25.8 \sqrt[3]{\left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta} \right)^2 \left(\frac{\Delta}{\mu} \right)} d \quad (\text{cm/s}) \quad (2-3)$$

适用于过渡区条件下的球体颗粒。

在式(2-1)至式(2-3)中: v_0 表示颗粒沉降末速; Δ 表示液体密度; δ 表示颗粒密度; μ 表示液体的粘性系数; d 表示颗粒直径。

早期研究还认为,高密度颗粒的粒度小到其沉降速度比低密度大颗粒的沉降速度还低时,就会混杂在低密度颗粒中,而不再分开了。显然,这两种颗粒能否按密度分开的界限是相同的沉降速度。因此,出现了按等沉比分层的概念,其计算公式为:

$$e_0 = \frac{d_1}{d_2} > 1 \quad (2-4)$$

式中 e_0 ——等沉比;

d_1, d_2 ——分别为沉降速度相同的低密度和高密度颗粒的粒度。

等沉比理论表明,只有在等沉范围内的颗粒才能按密度分选,但实际中,不分级物料在跳汰机中也能得到较好的分选效果。

② 干涉沉降的重选分层理论

门罗(Munroe)和李恰兹(R. Richards)认为,单体颗粒在无限

介质中的沉降条件与重选实际不符,并分别进行了颗粒在窄管中和粒群中的沉降实验,得出一些结论。

门罗发现,球体的干涉沉降与自由沉降的速度成线性函数关系,即

$$e_g = e_0 \left(\frac{1 - \lambda_2^{0.5}}{1 - \lambda_1^{0.5}} \right)^2 \quad (2-5)$$

式中 e_g, e_0 ——分别为干涉沉降和自由沉降的等沉比;

λ_2, λ_1 ——分别为低密度和高密度球体的容积浓度。

李恰兹发现干涉沉降速度小于自由沉降速度,颗粒越大,两者差别越小。他还提出了跳汰过程中下降液流的吸吸作用,认为该作用对粒度粗的颗粒无用,对密度差别大的同粒度颗粒有害,对密度差别小的不分级物料是必要的。

③ 吸吸分层理论

该理论的代表人物是李恰兹。该理论认为:矿粒除在上升水流中按干扰沉降速度分层外,床层回到筛面后,下降水流的吸吸作用对分层仍有影响。下降水流的吸吸作用在分选宽级别及不分级入料时才有利,而在分选窄级别入料时,不但没有作用,反而会降低跳汰机的处理量。该理论指出的下降水流的吸吸分层作用在生产实际中确实存在,但该理论不能解释跳汰分选的全过程。

④ 加速度分层理论

此理论以颗粒受力分析为基础,建立了颗粒运动方程。高登以及苏联的一些科学家研究了颗粒的受力情况,认为颗粒在跳汰过程中受到的力有重力 G 、浮力 P_1 、水流运动阻力 P_2 、惯性力 P_3 和机械阻力 P_4 ,其受力方程为:

$$G_0 = G - P_1 - P_2 - P_3 - P_4$$

其中, $G_0 = m \frac{dv}{dt} = V\delta \frac{dv}{dt}$; $G = V\delta g$; $P_1 = V\Delta g$;

$$P_2 = \varphi d^2 v^2 \Delta; \quad P_3 = V\Delta \bar{u}; \quad P_4 = R_m$$

将各种力的表达式代入上式,整理之后有:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\delta - \Delta}{\delta} g - \frac{6\varphi v^2 \Delta}{\pi d \delta} - \frac{\Delta}{\delta} \bar{u} - \frac{6R_m}{\pi d^3 \delta} \quad (2-6)$$

式中 φ ——介质阻力系数;

v ——颗粒沉降速度;

d ——颗粒直径;

δ ——颗粒密度;

R_m ——颗粒在床层中的相互作用力;

$\bar{u}$ ——介质在垂直方向上的运动加速度;

Δ ——介质密度;

g ——重力加速度。

此理论还认为,在颗粒沉降初期,运动速度小,颗粒处于加速过程,故可以忽略阻力,沉降状态只与密度有关,与粒度无关,即

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\delta - \Delta}{\delta} g \quad (2-7)$$

密度大的颗粒运动加速度大,沉降于下层;密度小的颗粒沉降加速度小,落在高密度之上。

此理论的各种阻力的验证困难,但某些思路可以借鉴。

上述理论都是从研究单个矿粒在跳汰分层过程中的运动规律出发,分析整个跳汰过程,考虑了分层是矿粒运动的结果,但忽视了矿粒是在床层中运动这一物理现象。因而在所有的理论中都没有充分考虑床层的全部性质对分层的影响,都是从自由沉降或干扰沉降的角度研究颗粒的运动。虽然第一种和第三种理论提到了床层的空隙度对颗粒运动的影响,但研究的条件过于简单,只是研究了跳汰分层的个别现象,并不能解释全部跳汰分选过程,因而结论有一定的局限性,但其中的某些结论对分析跳汰分选的作用机理有一定的借鉴作用。

(2) 床层悬浮体与重介假说

① 重介假说

重介假说的主要内容为:把跳汰床层看做重悬浮液,把颗粒在跳汰机中的分层比做在重悬浮液中按密度分层,其中入选颗粒本身和人工床层被看成是悬浮体。

该假说的依据来自生产实际。最初是勃德(B. M. Bird)、米切尔(D. R. Mitchell)等人根据美国某选煤厂的跳汰产品密度与床层实际测量的密度相近,掺入高密度细粒矽石后,分选难选煤效果更好等现象总结出来的。他们认为,跳汰床层中应该加入密度为 1.7 g/cm^3 以上的细粒矽石,并注重吸吸期的操作,以保证高密度细粒不进入精煤。他们还总结了一套生产操作办法。

为了进一步验证该理论,托马斯用中间隔开的连通试管进行实验,认为在高密度细颗粒的联合作用下,可将低密度粗颗粒推向上方。由此,他得出结论:任何颗粒与其他颗粒的关系,就像它处于由周围颗粒平均密度所形成的悬浮体中。他认为,入选物料受力有颗粒的重力、周围颗粒组成的悬浮体的浮力和绕流液体的绕流压力。其受力方程为:

$$R = mg - Vg\Delta - F \quad (2-8)$$

式中 R ——作用于颗粒的综合作用力;

F ——液体对颗粒的绕流压力,是向上的补充浮力;

Δ ——液体的密度;

V ——颗粒的体积。

颗粒是上升还是下降,由 R 的符号决定。

② 相对密度假说

该假说认为,粒群按相对密度分层,群体各自组成类液体,相当于两种互不相溶的液体那样按相对密度分层。添加到悬浮体中的物料,其重量全部转化为悬浮体的静压力。

$$p_g = \frac{\sum G_0}{S} \quad (2-9)$$

式中 p_k ——静压力；

G_0 ——物料在液体中的所受重力；

S ——容器截面积。

③ 底层悬浮体假说

该假说认为,跳汰物料按阿基米得原理进行分层,低密度颗粒受底层高密度颗粒群悬浮体的浮力而分层。

此假说实际上与重介假说类似。

④ 运动学假说

该假说提出了床层悬浮体的“统计不稳定性”,即床层在上升中由于吸收能量的不完全,使床层的悬浮体体积变化较大,处于不稳定状态,此时颗粒才能按密度进行有效分层。

底层悬浮体与重介假说的不足之处在于:它是根据床层上、下层中悬浮体相对密度的差别来解释跳汰分选过程的,但这只是分层的结果,而不是分层的原因,实际上分层作用首先是在矿粒与水流间的水动力作用下进行的。此外,对跳汰床层的人工加重、悬浮液性质及其在下降期的作用缺乏足够的理论依据和实验验证,且在上述所有的分析中,都没有触及到在跳汰周期的各期中流体动力学参数对跳汰床层有一定影响这一问题。

(3) 位能假说

位能假说的主要内容为:把未经分层的跳汰床层看做是有一定位能的力学不稳定体系,向这个体系引入外部能量时,例如在跳汰机中引入脉动水流,颗粒之间的结合力和摩擦力将减少,跳汰床层中的每个颗粒都在其他颗粒中占据着与其自身位能相应的位置,高密度颗粒沉降到下层,将低密度颗粒挤到上层去,整个体系趋于位能最低的状态。这时,位能的主要部分都转化为克服颗粒之间的各种阻力的功。

分层后的位能变化为:

$$\Delta E = \frac{1}{2}(G_2 h_2 - G_1 h_1) \quad (2-10)$$

式中 G_1, G_2 ——分别为低密度和高密度物所受重力；

h_1, h_2 ——分别为两种矿物在床层中的高度。

该理论认为，分层过程是系统释放能量的过程，分层速度和效果的判据是位能变化率，其表达式为：

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\gamma(1-\gamma)(\delta_2 - \delta_1)}{\gamma(\delta_2 - \Delta) + (1-\gamma)(\delta_1 - \Delta)} \quad (2-11)$$

式中 E ——物料的初始位能；

ΔE ——物料的位能差；

Δ ——液体的密度；

δ_1, δ_2 ——分别为低密度和高密度物的密度；

γ ——物料在床层中的质量百分数。

该理论的正确之处在于：从跳汰分选过程中床层内部位能降低的观点研究了分层过程，从理论上阐明了跳汰分层的内在原因，并且分析了床层本身的某些参数（如矿粒的密度、介质的密度等）对分层作用的影响，揭示了跳汰分选的一般统计实质，确定了分选质量与时间因素之间的内在联系。

该理论的不足之处在于：该理论只涉及了分层的结果，没有阐明分层的具体过程；只论证了分层的必然趋势，没有指出加速分层作用的途径；只分析了床层的部分内在因素对分层的影响，忽视了客观条件（如水动力学参数、水流速度、加速度等）对分选的影响，把按密度分选解释成仅仅是未分层物料的位能释放；只考虑到位能降低是由于重力场的影响，没有考虑在分选过程中，位能降低也受流体动力场的影响，是两种因素综合影响的结果。

(4) 概率统计假说

该假说利用统计学的方法研究重选问题，认为物料分层过程具有随跳汰时间变化的统计规律。