

776771

分类号: TD455

单位代码: 10361

# 安徽理工大学

ANHUI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

## 硕士学位论文



论文题目: 跳汰机新型排料装置的试验研究及回控

作者姓名: 韦民红

学科专业: 矿物加工工程

导师姓名: 贾长龄 副教授

完成时间: 二〇〇五年四月

## 摘 要

排料装置是跳汰机的重要部件。分选精度不仅与原煤能否顺利地按比重分层，而且还与最终产品的排卸方式有关。如果排料不当便会造成床层过厚或排空，都会使已分层的物料混乱，从而影响其分选效果。因此，改进跳汰机排料装置对于提高跳汰机的分选精度和处理能力有非常重要的意义。同时，由于跳汰机是选煤厂的主要分选设备，用量大、覆盖面广，因此它在技术上的每一个进步都将产生较大的经济效益。因此，在理论研究的基础上进一步开发实用技术和设备，将会得到十分广泛的应用。

本论文简述了跳汰的发展过程，跳汰分层和分离的一些基本理论；重点分析了跳汰机内床层按密度、粒度分层的形成过程，特别是对跳汰机排料口附近床层的密度及粒度分布情况；阐述了新型排料装置机构设计及跳汰新型排料装置的灰分回控总体方案

关键词：跳汰机 分层过程 排料装置 灰分回控

中图分类号：TD455

## ABSTRACT

Discharging equipment is the important part of the jigger. the separation accuracy is not only having relation with whether raw coal can successfully separate by specific gravity, but also with having relation with the unloading way of the end product. If discharging is not appropriate ,it will result in the bed layer which is over thick or empty and make the layered material confusion, then it will weakened the separation effect. Therefore it is very magnificent for increasing the separation accuracy and productive capacity of the jig to improve discharging equipment of the jig .In the meantime . because jig is the major separation equipment in the washing plant which is used wildly and coving broadly , it will bring the big and economic performance with making any progress on the technique. Therefore, on the basis of studying theory the further developing on the practical technique and the equipments will be applied extensively.

This thesis generalized the development process of the jigger and the basic theory of the jigger stratification and separation concisely . Making emphasizing on analysis and studying formation process of the bed layer inside the jig on the basis of density and size . especially distribution circumstance of the density and size in bed layer nearby discharging jaws of the jigger .Introducing the framework design and general ash feedback control scheme of the new kind Discharging equipment .

**Keywords:** Jigger stratification process

Discharging equipment ash feedback control

**CBCN:** TD455 .

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得安徽理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：韦民红 签字日期：2005年6月2日

## 学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解安徽理工大学有保留、使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属于安徽理工大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权安徽理工大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：韦民红 导师签名：李长红

签字日期：2005年6月2日

签字日期：2005年6月2日

## 1 绪论

### 1.1 论文的选题依据背景及意义

选煤的方法很多,有重选、浮选、风选、电选和化学选等,其中重选是一种应用最早的选煤方法,跳汰选煤是重力选矿的一种方法。跳汰选煤工艺流程简单,设备维修方便,处理能力强且有一定的分选精度。特别是跳汰选煤处理级别宽,既可分级入选,也可不分级入选。因此,有着广泛的适应性。全世界年入选的煤中有50%是采用跳汰机处理,我国跳汰选煤占全部入选原煤的70%左右,跳汰选煤技术水平的高低将直接影响着产品的质量和成本<sup>[1]</sup>。

目前,跳汰选煤是我国应用较为广泛的一种方法,影响跳汰分选效果的因素有多种,如:入料原煤特性、跳汰机各室进排气阀工作制度、矸石段排料情况、中煤段排料情况、各室顶水情况、风压、水压等。这些因素均对跳汰机的床层状态和所排物料的组成有影响,并且因素之间又相互制约。对于一个跳汰司机来讲,在如此众多的因素影响下,而处理的物料又是大批量的、散状的、性质变化的原煤,要兼顾精煤质量和分选效率,仅凭手动操作是非常困难的。实际情况经常是:以牺牲精煤回收率为代价来换取精煤的质量。

我国目前入洗原煤中70%左右是跳汰洗选,洗选效率每增减1%,全年下来,效益是非常惊人的。因此,对跳汰机进行自动控制,使之在保证精煤质量的前提下最大限度地提高洗选效率是非常重要的。

跳汰机作为我国选煤厂的主选设备,它的生产效益指标对选煤生产关系重大。跳汰机作业受入料、风水、排料、床层松散情况等诸多因素共同作用,因而单靠人工操作,不但劳动强度大,而且很难保证在线产品质量。

其解决的根本途径在于实现跳汰机单机生产过程自动化。跳汰机的自动控制技术的研究归结为:排料自动化、给煤自动化、风水控制自动化、产品质量在线控制自动化等内容。跳汰机过程控制调节是实现跳汰机单机自动化的前提。对跳汰机而言,实现跳汰机单机自动化,能使跳汰机配合给煤特性,控制分选精度及处理量保持在优化水平。而对于今后选煤厂全厂自动化而言,实现跳汰机单机自动化更是势在必行<sup>[2]</sup>。

目前应用于选煤厂跳汰机自动测控系统中,真正覆盖面广、实际使用效果较好的仅是跳汰机自动排料系统,对其它一些诸如给煤自动化、风水控制自动化和产品质量在线控制自动化等内容仅处于尝试阶段,而这些处于尝试阶段的工艺参数在跳汰机洗选过程中又起着与自动排料系统同样重要的作用,有些又是相辅相成的。

在跳汰排料过程中,重产品层的高度是一个重要的参数,无论何种排料方

式，都是寻求是通过检测而得到的重产品厚度与排卸位置有直接或间接的对应关系，这种关系的好坏直接决定了产品分离的精度与效率。

综观跳汰机排料装置结构的发展，实际上是围绕着跳汰产品分离的三原则进行的，其主攻方向是如何稳定床层厚度和分选密度。这个问题之所以长期未能得到圆满解决，其中一个重要原因就是跳汰产品分离的基础研究还不深入。大量实践可以证明，在目前跳汰机结构性能和操作制度下，分层已不是难题，而最大困难在于怎样将已经分层好的物料精确而且快速连续地分离成所需的产品，并保持床层的稳定<sup>[17]</sup>。

排料装置是跳汰机的重要部件。分选精度不仅与原煤能否顺利地按比重分层，而且还与最终产品的排卸方式有关。如果排料不当便会造成床层过厚或排空，都会使已分层的物料混乱，从而影响其分选效果。因此，改进跳汰机排料装置对于提高跳汰机的分选精度和处理能力有非常重要的意义。同时，由于跳汰机是选煤厂的主要分选设备，用量大、覆盖面广，在技术上的每一个进步都将产生较大的经济效益。因此，在理论研究的基础上进一步开发实用技术和设备，将会得到十分广泛的应用。

虽然跳汰机选煤在国外有被重介选取代的趋势，但仍然是主选方法之一，并且由于其具有处理能力大，工艺简单、操作、维修方便及经济合理等优点，仍适合于在中国广泛使用，所以提高跳汰机自动化水平、增强单机处理能力、提高效率就成为煤炭行业的迫切课题，并对中国经济的发展、环境污染的治理、煤炭企业的持续发展都有着重要的社会经济意义。

本论文来源于安徽省教育厅重点课题“跳汰机新型排料装置”。在此之前，课题组的成员已经在实验室和现场做了大量的试验，并已设计了一套排料装置，在本文中称之为原新型排料装置。本论文是在此基础上对新型排料装置的重新设计，试验研究。

## 1.2 跳汰机自动化方向

在跳汰洗选中，跳汰过程自动化的最基本课题可归纳为排料自动化，有时还包括空气振动制度自动化。装有活门型风阀的跳汰机在较大程度上为实现跳汰机制度全盘自动化创造了条件。但是迄今为止，跳汰过程全盘自动化还不具备足够的技术基础。

这个问题的复杂性主要有三个方面的原因：

1、外界的影响因素多，如入料量、入料粒度、浮沉组成和湿润程度等，而在这些因素在很大程度上还会发生偶然变化。

2、最终指标多，相互关系复杂，跳汰条件不一样如分选三种产品时，每种产品表征跳汰效能的指标就有轻、重密度级和中间密度级的数量指标，也就是说共有九个指标。

3、检测控制系统滞后性大，滞后的结果往往是需要修正的跳汰参数还来不及修正，那些因素却已停止或改变了。

进行跳汰自动控制的前提是对跳汰过程的状态和运行参数进行精确测试，跳汰过程状态和运行参数的测试包括很多内容，主要有：

- 1) 跳汰机床层状态的检测；
- 2) 空气室内压力的检测；
- 3) 跳汰室脉动水流运动特性的检测；
- 4) 跳汰床层松散过程的检测等。

跳汰过程的这些参数，在一个跳汰周期中始终处于动态变换过程中，而且这些参数的变化又是相互关联的，只凭简单的理论设想或直观的感觉很难做出可靠的判断。

因此，全面获取跳汰过程状态及运行参数的准确信息，进而对跳汰机进行自动控制，使之在保证精煤质量的前提下最大限度地提高洗选效率就成为重要的研究课题。对于跳汰过程状态和运行参数的测试技术的研究，国外开始于五十年代末，其中风压和垂直水流位移的测试已有较成功的经验；松散过程的测试经历了一段时间的研究，未有成熟的报道；水流脉动速度的测试近几年也有一定程度的进展，已取得了丰富的经验资料，从本质上说，也不成为技术难点；跳汰机床层状态的检测目前仍然是手工探杆探测和浮标探测共存的状态，可以说停留在了目前的自由浮标水平上，从而限制了跳汰机控制水平的提高。

在目前业内应用的跳汰机自动控制系统中，普遍的方法是利用浮标传感器对跳汰机的重物料层进行检测，探知重产物床层厚度，以此为依据对排料进行控制，目标是保持床层厚度的稳定。但是浮标传感器仅仅是对床层状态的局部测量，不能全面反映跳汰机中料层的分层状态，提供确切的分层信息。

跳汰机自动控制首先要排除第一种原因的影响，即消除偏离入料特性的偶然因素。其办法是实现入料均匀化，负荷恒定，筛分作业稳定和运输水量最佳化。

选取最少的检测参数(排除第二种原因的影响)是与减少检测系统的滞后性(排除第三种原因)相互联系的。在研究解决这个综合性课题的时候，曾确定了两个方向：其一是寻找出一个测定参数并制造出一种滞后性小而且能连续检测这个参数的仪器；其二是根据跳汰机中物料状态间接评定跳汰效果，或者有的放矢地改变跳汰流体动力学参数以对物料直接产生作用，并以此来评定跳汰效果。

第一种研究方向在国外得到了发展。如西德研制了采用“Cendrex”放射性同位素测灰仪的跳汰机自动调节系统。该系统在跳汰机筛面各处同时自动采取精煤样(按给定的时间间隔)，并在联合制样机中加工制样。联合制样机包括脱水振动槽、电热烘干机、螺旋给料机、离心粉磨机及缩分器等。采用这种自动调节系统能使精煤质量稳定。但是由于采样到根据试样灰分对跳汰制度进行调

整间隔时间较长，所以它的工作效能受到一定的限制。

前苏联是以矸石中轻密度(煤)含量作为检测参数的，并能够在专用装置中通过对试样进行快速分析而自动测定，这虽然缩短了制样时间，但总的来说时间仍然相当长。

有时采用检测产品自动化手段并不是为了改变跳汰参数，而是使操作人员通过计算机尽快地选择最佳方案。电子计算机能检测数据与给定数据间的偏离并进行分析，从而确定出修正跳汰制度(如筛下水用量、供风量与排料等)的最佳方案。

解决跳汰机自动化课题的第二种研究方向是可取的。它能直接在跳汰机内检测跳汰机过程。这种方法的出发点是把跳汰过程视为两个相联系的作业构成的，即在振动作用下入选物料按密度进行分层和把分了层的物料在排料区分离成产品。分选(第一作业)强度取决于床层的松散度，而且这种从属关系还具有极值关系，即在分散度最小时没有分层作用，而在松散度超过最佳极限时颗粒的运动是杂乱无章的。

因此，为了使自动控制跳汰机正常工作，专家们建议检测两个参数：一是跳汰机的松散度，它取决于对松散物料的流体动力学综合作用，也表征物料的松散程度。另一参数是高比重物料层的高度，它是与排料装置工作制度有关的一个参数，因而它也决定了产品的质量。在电子控制系统中将上述两个信号加以改造，然后由该控制系统指令改变介质振动制度或改变排料制度。该系统既可以在强迫振动条件下工作，也可以在自由振动条件下工作。但是如果说用浮标或同位素传感器可精确地检测高比重料层高度的话，那么到目前为止还没有既精确又可靠的方法来检测床层松散度。如果还要考虑松散度在跳汰机周期的每个阶段都发生变化这一特点，那问题就更为复杂了。

在文献中叙述得最为详细的检测床层松散度的办法是检测床层的流体动力阻尼。但是，床层的流体动力阻尼与床层松散度之间的关系并不是单值的。因此以这种检测方法为基础的自控系统在实际中没有得到应用。较晚一些的研究曾探讨了根据床层中某一特定层厚度的增加和床层处于悬浮状态的时间来评定床层松散度的可能性。这时的自控系统应确保用浮标记录的床层高度增长达到稳定。检测参数与给定浮标之间的偏差引起执行部件的动作，以增减空气室压力。

上述方法在技术上是可行的，但它不是直接而是间接地通过松散度来评定床层的分层。而松散度又是间接地表征床层位置的变化。因此，就其工艺目的而言，这在一定程度上使测量系统抽象化了。库兹涅茨选煤研究院提出的检测床层松散度的办法(根据测深锥在床层中旋转阻力矩的大小)比较接近于解决跳汰机自动化这一课题。这种方法是较精确的，因为它记录的数据与跳汰床层的关系是一直接的函数关系。可以认为，要建立能够工作并足够有效的跳汰机

自控系统,就必须把床层流体动力学参数的测量部件、调节部件和自动控制任一产品质量的装置结合起来,即同时实现跳汰机过程自动化的上述两个研究方向。

### 1.3 国内外研究现状及存在的问题<sup>[4][16]</sup>

跳汰机作为一种主选设备,国内外都把跳汰机操作自动化作为研究方向,但由于跳汰工艺性较强,影响因素多,参数检测困难等原因,目前跳汰机操作自动化水平仍停留在排料控制、给料控制、风压稳定等中低水平阶段。尤其在我国的跳汰选煤所占比例最大,入选煤种杂、入料粒度范围宽(多为不分级入选)、煤质瞬时变化快,使跳汰操作自动化更为困难,以至于一些跳汰机的进口原配自动化系统也不能发挥作用。为此在“九五”期间将“自动化跳汰机”列入国家重点科技项目(攻关)计划,针对我国入选原煤的特点和选煤厂现状,对跳汰机操作自动化进行了研究和实践。并取得了一定的成果。煤科总院唐山煤研分院研制的SKT2D-14时跳汰机自动控制化系统包括下列内容:

1. 风、水、给煤、排料、周期等跳汰机主要参数的控制系统;
2. 跳汰机及周边关联设备的自动启停系统;跳汰机处理量优化控制系统;
3. 入料煤量变化自感知系统;能适应煤质及管理要求的指挥管理系统;
4. 跳汰机分选快速评估系统;
5. 跳汰机分选效果快速评估系统。

具体实施方案为:采用了586工业控制微型计算机配以适量的智能A/D数据采集卡、智能U0卡、D/A模拟输出卡和部分辅助卡来完成上述包括风阀控制和以日常三级快浮为基础的分选效果快速评估系统在内的全部和指挥管理工作。软件用基于WINDOWS95界面VB5.0语言编程,界面友好,图示功能强,容易掌握。操作灵活方便。

相比于国外的原煤入选比高,选煤厂大型化、高度自动化,分选方法由跳汰选向重介选发展等特点,中国选煤入选比例低,选煤厂规模小、自动化程度低、并且以低效率的跳汰选为主,因而差距较大。

近年来,国内外在有关跳汰机单机自动化方面做了许多工作。波兰的科研院校、设计部门着眼于跳汰选的微机电子监控系统的研究工作,逐步实现了工艺流程和工艺环节标准化和定型并已开展跳汰机参数优化配合的数学模型(软件)的研究工国内,如开滦范各庄矿选煤厂引进的巴达克跳汰机自动化程化作度较高,该机采用了电控气动风阀,浮标一闸板液压排料机构和工作风调节装置,对改善跳汰机的分选效果起到了重要作用。唐山天和科技的跳汰机智能检测控制装置用PLC或智能调节器做调控主机,采用前馈或自适应进行控制,对于控制精度有一定的提高。中国矿业大学的李明、雷汝海等在基于单片机的模糊排料控制系统方面有一定进展。太原理工大学机电所熊诗波教授等在跳汰机自动

排料系统模糊控制方面作了研究,并在现场得以应用,取得了很好的控制效果。另外,在自动给煤、自动排料等方面也取得了重大成就。但是,目前跳汰机采用的是自动排料装置,虽已初步实现排料的连续原则,但连续性都不够完善。连续性好坏的标志是底流床层厚度是否有波动以及波动的频率与振幅。影响床层结构稳定性的因素很多,但主要是床层传感器的敏感度还测不出床层的准确厚度,排料系统本身还不够完善。另外对跳汰选煤的理论研究大多还停留在跳汰分层上,对产品分离的研究不够。由于理论研究的薄弱,导致了人们把主要精力放在重产物的分离方面,研制了各式各样类型的排料机构,跳汰机分离的最新技术也大都集中在排料结构的改进和采用不同工艺的自动排料控制技术上,但对物料在跳汰过程中的运动情况,和物料床层在跳汰过程中的动态分层情况,我们了解甚少。

国外,波兰跳汰机自动排料装置系统包括:浮标重产物床层厚度传感器、由微电脑控制的调节器和电液转换系统、能同时改变排料闸门和开启度和跳汰坎板高度的液压系统,控制系统还设有手动变换器,在手动状态下可用手动按钮改变排料闸门开度间隙和跳汰机坎板的位置。

自动排料装置按原理可分为机械式、半机械式和电子式。不同的跳汰机厂家和研究设计部门都有各自的排料系统和装置:如英国西蒙特科公司生产的鲍姆式跳汰机的自动排料是采用筛下浮标作为床层厚度传感器,通过控制部件调节排料室的内的压力。70年代开始使用来使用雷达脉冲反向,系统测定测压管内水位的变化,取消了浮标传感器,出现了雷达排料系统。联邦德国生产的巴达克型跳汰机和美国麦克里公司生产的跳汰机已使用过横向并列闸门进行派料,均收到一定的效果。

国内跳汰机排料装置的研究主要集中于跳汰产品分离技术,跳汰产品分离技术可分为三种方法:闸门排料、透筛排料和综合排料。前两种是产品分离的基本方法。综合排料多指人工床层排料和闸门排料的综合应用。

在立式闸门排料方式中,都使用了溢流堰。溢流堰有高堰式、半堰式和无堰式。目前研究最多的是随动溢流堰,利用这种溢流堰能实现产品的动态分离。陈述等研制的综合排料装置和波兰跳汰机自动排料系统中均使用了随动溢流堰。

目前,主要选煤方法是跳汰。在生产过程中,由于脉动交叉、时段交叉等诸多原因,造成了精煤的产率低,或者产率高,但产品受到不同程度的污染,品质低。解决问题的关键在于产品分离的精确性。

专家们认为在跳汰机产品分离的过程中分选密度线产生脉动交叉的主要原因的跳汰机结构和排料装置不合理。目前,虽然有取消溢流堰,选用水平排料口,采用仓式排料道,减少排料区的脉动等技术措施,在一定程度上改善了产品分离精度,但都未在缩小和防止产品分离脉动交叉方面取得突破性进展。

#### 1.4 问题的提出<sup>[17]</sup>

本文的应用对象跳汰机是一种机械矿物分选设备，在现代化的大型选煤厂的生产中占有重要的地位。它的工作过程可以简单描述为：被选物料给入跳汰机内落到筛板上，形成一个密集的物质层，这个物质层就叫作床层。在给料的同时，从跳汰机下部周期的给入交变水流垂直变速水流透过筛孔进入床层，物料就是在这种水流中经受跳汰的分选分层过程。在每个跳汰周期结束时排料口附近的床层就应该是分好层的床层，在此进行产品分离。产品分离就是指排料，就是把分选过程中已按密度分好层的高密度、高灰分物料连续排出，从而实现煤炭分选。

为了减少煤炭损失，稳定产品质量，跳汰机的排料要求高密度物料有一个厚度适当的料层。因此对高密度料层厚度的控制精度，直接影响到跳汰分选的精度、产品质量和经济效益。所以跳汰机排料的自动控制受到了人们的重视。跳汰机自动排料的控制目的是希望通过控制排料量，维持跳汰室内床层厚度的稳定。排料系统的基本控制原理是：浮标检测跳汰室内床层厚度，然后将床层信号送入控制器，控制器根据给定的床层厚度以及实际反馈的床层厚度，经过控制算法运算后输出控制信号去控制排料阀门或排料滚轮，从而控制排料量，进而稳定床层厚度。排料过程是典型的大滞后、非线性、多参数耦合的复杂系统，存在许多不确定的因素，很难建立精确的数学模型。

目前，跳汰机自动排料多采用PID控制方式或逻辑控制，由于其参数的选择及调整不便以及其固有的缺点，控制品质较差。一旦煤质、风、水等参数发生变化，就很难按要求调节控制器参数，从而导致排料速度过慢或过快：若排料速度过慢，将会使重产物出现堆积，不但影响整个床层松散情况，使得正常分层难以进行，而且污染精煤，影响精煤质量；若排料速度过快，出现大排大放，导致研石层（或中煤层）过薄，甚至排空的情况，整个床层便处于过度松散的不稳定状态，使得原已分好的床层遭到破坏，使重产物中精煤损失加大，从而造成了经济损失。

跳汰机床层状态的动态描述到目前为止还仅仅停留在定性的水平上，尽管我们可以对跳汰机静态（停车后）的床层进行人工分析，但关键问题是不能对床层进行动态检测。

能指导跳汰机操作和控制的跳汰机床层状态的数学描述不具体，建立以模型为基础的控制系統就缺乏可靠的依据。目前应用的一些检测方法不够直接，也未能得到选煤界的认同。

跳汰机是选煤厂的主要洗选设备，跳汰占各种洗选方法的首位。跳汰过程主要由两部分组成，一是物料的分层、二是分层后产品的分离。

物料分层作为跳汰分选过程的主要部分组成，目前已经提出了几种理论模

型, 尽管这些理论模型已经从各个不同侧面触及到问题的核心部分, 但有些问题仍未真正解决, 跳汰机分层状况的动态描述仅仅停留在定性的水平上, 我们可以对跳汰机停车后的静态床层进行人工分析, 但对物料在跳汰过程中的运动情况, 和物料床层在跳汰过程中的动态分层情况, 我们了解甚少。

产品的分离在跳汰分选过程中也是十分重要的, 主要表现在以下三个方面:

- ① 为物料的进一步分离创造条件;
- ② 影响跳汰机的处理量;
- ③ 产品分离的精度直接影响到产品的质量。

分选密度是跳汰产品分离的界线, 若分选密度不稳定, 则会造成跳汰产品污染严重, 回收率下降。在生产实践中, 跳汰司机操作的主要目的是通过调节风量、水量和排料速度来稳定床层厚度, 即稳定分选密度、同时稳定入料原煤质量, 采用配煤入选, 自动排料系统等都是为了稳定床层结构, 增加分选密度的稳定性。在实际生产过程中, 分选密度的变化表现为产品分离线的变化, 因此可以通过床层的厚度大致反映分选密度。如果床层不稳定, 时厚时薄, 分选密度不稳定, 则洗选效果较差。

产品分离发生在跳汰机每段床层的末端(顺排矸), 床层沿水平分为两种产品, 理想的分离方式是某一分选密度分界线将床层分开, 但实际很难实现, 除了床层是处于周期性上下脉动的液流中外, 底流和溢流的排出方式也不可能完全地按照某一分选密度进行。

实际生产过程中这种产品分选密度分离线通常不能稳定在同一深度上, 会出现某些波动的现象, 称为时段交叉。同时因理想的产品分离只要求一个分离线, 这个分离线由于时段交叉的存在也往往呈现出上下波动, 而实际完成分离过程中由于溢流堰的存在, 出现两个相隔一定距离的分离线。这两处分离线受到液流脉动的影响必然有所交叉, 便出现了所谓的脉动交叉。

## 1.5 本文的主要研究意义、目标和内容

### 1.5.1. 研究意义

在我国选煤行业, 实施跳汰机自动化改造一直是一个重要的课题, 关于灰分回控的研究也逐渐加强。跳汰精煤在线自动回控系统的实施具有极大的推广价值。

### 1.5.2. 研究目标

基于对百善矿现场实际运行状况的分析与国内外研究的状况的了解, 我们确定了本课题主要研究目标与内容: 在原有的新型排料装置的基础上, 根据以往的经验, 对排料装置进行改进; 采用能够随床层厚度变化而上下运动的可调铲板, 并设计了能在跳汰垂直交变水流的作用下进行动作的随动铲板; 密集同密度各粒级粒群的分布中心, 稳定跳汰产品分选密度的分界线, 统一跳汰

产品分选密度的分界线；利用浮标与在线测灰仪联合采集信号，使用可编程控制器及 DK-YZ 型电动液动执行机构实现对新型排料装置的自动控制。通过实验室实验和工业现场调试，达到对跳汰机排料系统的自动控制，从而为实现跳汰机单机自动化奠定基础。

经过改造后系统，由于采用了工控机控制，界面友好，数据显示更加直观和准确，操作更方便，数据显示更直观，参数调节更方便，并降低了工人的劳动强度。精煤灰分回控系统根据网络传输的灰分数据，及时调整床层厚度设定，实现真正意义上的自动排料，在保证产品质量的前提下，提高产品效益。

### 1.5.3. 研究内容

本课题由检测、控制、实验三个部分组成，分别由三位同学完成。本人在论文中主要涉及实验部分，主要研究内容有以下几点：

A) 对跳汰机溢流堰附近被分选物料的粒度和密度的动态分布规律和跳汰产品分离的基础进行深入研究，探索能够随分离线同步升降的跳汰产品分离方法；

B) 在项目实施过程中，对系统结构、控制方法、控制系统与现有操作条件如何结合等关键技术予以了特别强调与处理；对有关功能进行了试验、调整和增加，例如：灰分回控存在与闸板的配合问题；

C) 跳汰机实际床层分层状况的采样及数据分析、处理，尽量消除跳汰物料水平移动和产品垂直分离的矛盾，提高产品分离的精度和产率；

D) 完成跳汰机新型排料装置的改造，使铲板切割分离线，与闸板配合更好的进行排料；

## 2 跳汰理论

跳汰选煤是选煤方法中应用最广泛的一种方法，跳汰理论的研究至今也已经有 140 多年的历史。人们一直为找出原本为异类粒群混合物的床层却呈现出以密度差别为主要特征的分层机理，由于影响跳汰过程的因素很多，相互关系复杂，很难用精确的数学表达式描述，只能通过大量的实验来分析其工作机理，所以尽管提出了各种跳汰分层假说和跳汰理论模型，并且也对生产起到了一定的指导作用，但这些理论仅仅反映跳汰过程的某个侧面，不能全面地描述在跳汰过程中矿粒按密度分层的物理实质。

作为跳汰理论，所要研究和讨论的范围应包括一下三个方面：

- (1) 应能解释不同性质的颗粒，之所以能在垂直上下交变的介质按密度为主进行分选的规律及机理；
- (2) 分析水动力学参数与跳汰床层间的相互作用。其中尤其是水动力学参数与床层松散度的关系及被选矿粒向各自平衡层中运动间的关系；
- (3) 探讨在垂直上下交变的水流的作用下，跳汰床层的松散机制。

### 2.1 跳汰理论模型<sup>[6]~[10]</sup>

长期以来，人们提出的关于跳汰分层机理的假说虽然众多，究其实质可以分为两类，第一类假说是从分析单个矿粒在跳汰过程中的运动行为入手，来研究按密度为主要特征的分层过程。属于动力学体系的假说，也是跳汰理论研究中的定因方向。第二类假说是从分析床层整体在跳汰过程中的变化状态着手，从异类粒群构成的床层整体出发，研究如何用一定的物理常量来表征床层中性质各异粒群的运动，而这种表述可看成是各种外力作用于该粒群上所产生的结果，这种表现具有概率统计性质，也就是跳汰分层机理研究工作中的粒群—统计方向，从力学观点看，这种假说属于静力学体系，

定因方向的研究，考虑了颗粒密度、粒度和形状对分层结果的影响，并且能够对促使单个颗粒运动的各种力，作出定量的估计；粒群—统计方向的研究，是着眼于床层整体，从床层整体的内在不平衡因素（悬浮体密度差、能量差等）及形成分层的概率统计规律等来寻找床层分层的依据。

#### 2.1.1 跳汰分层机理的动力学方向

这个研究方向从研究众多颗粒中各单一颗粒之间的运动差异中，探讨跳汰分层过程的机理。把单个颗粒运动时的速度和加速度当作它们的密度、粒度和形状等物理性质的函数来加以研究，这种模型可以定性地估计跳汰过程的参数，近似地确定那些影响颗粒按密度和粒度分层的主要因素，指明物理性质不同的

颗粒的运动趋向。

### 1、自由沉降分层理论

1867年，奥地利学者雷延智提出床层按自由沉降末速分层的假说。这类理论的共同特点是研究单体颗粒在无限静止介质中的自由沉降规律。根据沉降末速建立等沉比公式，依据等沉比概念，只有那些粒度在等沉范围内的颗粒才能在重力场中按密度分选。总结众多研究者的实验结论，所得等沉比的最后结果可以用下面通式概括：

$$e_v = \frac{d_{01}}{d_{02}} = \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^m \left(\frac{\delta_2 - \Delta}{\delta_1 - \Delta}\right)^n \quad (2.1.1.1)$$

式中  $d_{01}$ 、 $d_{02}$ ——粗粒与细粒的当量直径；

$x_1$ 、 $x_2$ ——粗粒的形状修正系数；

$m$ 、 $n$ ——随雷诺数增减的实验指数。

自由沉降速度等沉比理论并未反映重选过程的实质，研究者们的实验结果都是求单体颗粒在无限介质中的沉降末速度，在实际的跳汰过程中，入料不是单体颗粒，介质也非无限和静止，颗粒沉降既不是自由的，其沉降末速也很能达到。在跳汰这样的重选过程中，介质速度是交变的，沉降末速只是瞬间值或者根本不出现，所以用单体颗粒自由沉降规律去解释在跳汰机中的颗粒分层机理是脱离实际的，其结果不能如实地反映粒度和形状等物理性质都不相同的粒群在水支力学参数交变的介质流中的干涉运动。

### 2、干涉沉降分层模型

针对自由沉降分层理论的观点；1888年美国学者H. 门罗提出了床层按颗粒干扰沉降末速分层的假说。他把颗粒在粒群间隙中的运动视为在窄管中的运动。令球形颗粒在直径略大于它的窄管中沉降。从试验结果得到的规律是：

$$v_{干涉} = v_N \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^{1.5}\right] \text{ 或 } v_{干涉} = v_N (1 - \lambda^{0.5}) \quad (2.1.1.2)$$

式中  $v_{干涉}$ 、 $v_N$ ——球体的自由沉降和干涉沉降末速度；

$d$ 、 $D$ ——颗粒粒度与窄管直径；

$\lambda = \left(\frac{d}{D}\right)^3$ ——容积浓度。

门罗公式表明：球体干涉沉降速度与自由沉降速度成线性函数关系；且随球体与窄管的直径比值的增减而变化。介质为无限空间时， $D$ 值为无限大，比值趋近于0，球体获得自由沉降条件。当球体直径越接近于窄管直径时，其干涉沉降末速度就越低。

A. W 伏朗司用小球体（适用于雷诺数  $Re < 1$  的斯托克斯范围）作过类似的试验，所得的规律方程为：

$$v_{\text{干涉}} = v_N \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right) \right]^{2.25} \quad \text{或} \quad v_{\text{干涉}} = v_N (1 - \lambda^{1/3})^{2.25} \quad (2.1.1.3)$$

门罗等干涉沉降论者认为,重选过程是按干涉沉降末速等沉比进行分层的。他们得到的干涉沉降末速等沉比公式为:

$$e_{\text{干涉}} = e_N \left( \frac{1 - \lambda_2^{0.5}}{1 - \lambda_1^{0.5}} \right)^2 \quad (2.1.1.4)$$

式中  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是低密度和高密度球体的容积浓度。利用这个公式,可计算出干涉沉降等沉比较自由沉降等沉比大 7.8 倍。

基于门罗等研究者的理论,1908~1909 年间,美国学者 R. H 李恰兹提出了吸缀作用分层的假说。李恰兹采用另一类试验的模拟条件,以粒度和密度都相同的物料作了同性粒群的干涉沉降试验,他根据实验数据整理出下列试验公式:

$$v_{\text{干涉}} = K \sqrt{d(\delta - \sigma)} = v_N (1 - \lambda)^{0.5} \quad (2.1.1.5)$$

式中  $v_{\text{干涉}}$ ——干涉沉降末速度;

$K$ ——雷廷智公式的数字系数;

$d$ ——沉降颗粒的粒度;

$\delta$ ——沉降颗粒的密度;

$\sigma$ ——介质密度。其密度介于水与颗粒之间。

这个公式表明,干涉沉降速度小于自由沉降速度的原因是粒群改变了介质的密度。另外还有公式未能显示出来的介质粘度增大的原因。

李恰兹还认为,矿粒除在上升水流中按干涉沉降速度分层外,床层回到筛面后,下降水流的吸缀作用对床层按密度分层具有重大意义。

以上这些干涉沉降试验及其速度公式,是学者们在不同时代、不同条件下,用不同的试验方法获得的粒群干涉沉降规律。虽有所区别,但规律相仿,可以用一个简化公式概括:

$$e_{\text{干涉}} = e_0 \left( \frac{1 - \lambda_2^n}{1 - \lambda_1^n} \right)^m \quad (2.1.1.6)$$

式中的  $n$  和  $m$  是与物料的容积浓度相关的指数。

干涉沉降等沉比公式表明,它与自由沉降末速比唯一的重大区别是:粒群干涉沉降末速不仅决定于颗粒的密度、粒度和形状等物理性质,而且还决定于粒群的容积浓度。

### 3、按初加速度分层模型

1939 年, A. D 高登等人提出了初加速度分层的假说,该理论认为物料沉降初期重颗粒的加速度大于轻颗粒,在沉降达到末速之前的加速度运动阶段,

重颗粒可以行进较大的沉降距离，经多次脉动，即可按密度分层。

初加速度分层模型是以牛顿—雷廷智的自由沉降规律为基础理论的，该模型的简化公式为

$$\frac{dv}{dt} = g_0 + a \quad (2.1.1.7)$$

式中  $g_0$ ——颗粒的重力加速度；

$a$ ——介质对颗粒的阻力加速度。

该式表明，颗粒的沉降加速度等于颗粒的重力加速度  $g_0$  及其受到的介质阻力加速度  $a$  的矢量和。 $g_0$  只决定于颗粒与介质的密度差。而  $a$  则决定于颗粒的粒度、形状及其与介质的相对速度。当介质与颗粒同速运动时，则  $a=0$ ，物料仅按密度分层。这说明该模型对物料分层因素的作用是有条件的。在实际生产中，性质不同的颗粒，具有不同的速度，不可能同时与介质同速运动。因此，只有粒度和形状差别不大的颗粒，才有按密度分层的可能性。

鉴于上述结论过分简单，不足以说明跳汰过程的实际情况。本世纪 50 年代苏联一些重选工作者，对实际跳汰过程进行了大量的理论研究。M. M 维尔霍夫斯基和 H. H 维诺格拉道夫等人提出了新的颗粒运动方程：

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\delta - \Delta}{\delta} \cdot g - \frac{\Delta}{\delta} u - \frac{6\varphi\Delta v_c^2}{\pi d \delta} - \frac{6R_m}{\pi d^3 \delta} \quad (2.1.1.8)$$

式中  $u$ ——液流速度；

$v_c$ ——固液相对速度；

$\varphi$ ——阻力系数；

$R_m$ ——颗粒运动的机械阻力；

$d$ ——颗粒直径；

$\delta$ ——颗粒密度；

$\Delta$ ——水介质的密度。

该式的物理意义是：颗粒的运动规律决定于其所受的重力（右端第一项），介质惯性力（第二项），液流对颗粒的动压（第三项）和颗粒之间的机械阻力（最末项）。因此，在跳汰过程中，①尽量减少矿粒与介质之间的相对运动速度是至关重要的。②要选择适当的水速及加速度为矿粒按密度分层创造有利的条件。

该公式只是进行了定性讨论，没有定量地解释跳汰过程。因为他们所研究的都掩盖和忽略了颗粒的粒度和形状的作用。

定因模型考虑了颗粒的粒度、形状和密度对分层结果的影响，并能对引起单个颗粒运动的力作出定量的估算，上述这些是其他模型办不到的。从总体上讲，定因模型的主要缺点是：①实验的模拟条件限制了他们的视野，在干涉沉降分层理论中，未能发现异性粒群相互作用的不等效性，看不到粒群悬浮体的作用。②在分析干涉沉降速度、颗粒加速度和单个颗粒运动的微分方程时，没

有考虑跳汰床层在整个跳汰周期中的真实条件，而这些条件时刻都在变化。因此，单个颗粒的运动方程不能真实地代表跳周期的全过程。但是，对周期的某一阶段，例如跳汰床层处于松散状态，颗粒之间产生相对运动时，这些方程式能如实地反映那些认为分层机理与颗粒物理性质和液流水动力学参数有关的观点。

### 2.1.2 静力学方向

从粒群构成的床层整体出发，以床层内不平衡因素的存在为依据，来探讨不同性质的粒群，在跳汰过程中的分层原因。

#### 1、悬浮分层观点

1924年，纳托尔斯特提出了将跳汰床层比作重悬浮液，即所谓的重液假说。立论者把物料与介质组成的悬浮液，看成一个整体，认为床层的分层是按不同物料和水所构成的悬浮液，因其密度不同而分层。将水流的交变运动，看为是有助于改善各悬浮体的稳定性及减少颗粒运动时的机械阻力。之后，里亚申科又提出按相对密度分层的假说。他认为，矿粒在跳汰机中的分层过程与上升水流中物料的悬浮分层过程相似，在悬浮状态（床层松散）下，相对密度的大小决定分层。

悬浮分层观点的物理实质，是将跳汰室内筛板上的物料与水，均视为重悬浮液，密度不同的粒群在悬浮液中分层，其分层规律类似于物料在普通重介质中分选。悬浮分层观点所研究的不仅是单个颗粒及其在介质中的特殊运动，而是由介质联系起来的粒群整体。

悬浮分层观点主要的不足之处在于：①跳汰床层（筛板以上的介质和物料）与重介质悬浮液仅仅是粗略相似，不能将两者等同。②悬浮分层的观点，忽视了水流脉动对分层的影响，所以分层过程的数学描述就很难与实际相符。

#### 2、位能分层观点

1947年德国学者迈耶尔提出位能假说，他将床层视为一个整体，提出床层分层前所具有的位能，高于分层后床层所具有的位能。分层就是通过性质不同的颗粒在床层中重新分布而达到床层内部位能降低的过程。只要创造一个适当的条件，跳汰分层是一个自发的过程。

分层前床层的位能：

$$E_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} (G_1 + G_2) \quad (2.1.2.1)$$

分层后床层的位能：

$$E_2 = \frac{h_2}{2} G_2 + (h_2 + \frac{h_1}{2}) G_1 \quad (2.1.2.2)$$

分层前后床层位能的降低值：

$$\Delta E = \frac{1}{2}(G_2 h_1 - G_1 h_2) = \frac{h_1 h_2}{2} A(\lambda_2 \delta_2 - \lambda_1 \delta_1) \quad (2.1.2.3)$$

分层前后床层的位能降低率:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\gamma_1(1-\gamma_1)(\delta_2 - \delta_1)}{\gamma_1(\delta_2 - \rho) + (1-\gamma_1)(\delta_1 - \rho)} \quad (2.1.2.4)$$

式中  $G_1$ 、 $G_2$ ——轻重物料的重量  
 $h_1$ 、 $h_2$ ——轻重物料在床层中的高度  
 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ ——轻重物料的容积浓度  
 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ ——轻重物料的密度  
 $\rho$ ——介质密度

由此可见,床层在跳汰过程中,由不同密度颗粒所组成的粒群,其散密度 $\lambda\delta$ 的不同,是分层的基本依据,散密度高者处于最底层。跳汰分层的结果,不仅取决于矿粒密度,还与矿粒形状及粒群粒度组成有关。分层前后床层的位能降低率,是分层难易的标准。

迈耶尔对分层机理的解释同样有很多缺陷:①未能说明跳汰周期各阶段的位能变化与分选速度的关系。②在分析床层内在因素对分层的影响时,忽视了水动力学的作用。

### 2.1.3 粒群—统计方向

粒群—统计方向,从静力学角度,或者说将床层作为一个整体从粒群—统计方向进行新的研究和分析。这种观点认为:在跳汰机中,松散床层内的诸颗粒在不停地运动,每组已确定性质的颗粒都进入各自的平衡层中去,必然导致在运动中去向不同的诸颗粒,发生频繁地碰撞,从而相互变换着能量,由于颗粒间的碰撞与磨擦是随机的,因此无法预计其中某一颗粒的动能变化的多少。基于这一认识,许多研究者指出,密度、粒度及形状都不相同的颗粒,在跳汰机中垂直交变的介质流中,其运动规律,只能借助于统计力学的方法加以描述。工业试验证实“等压强同层位分层机理”能较好地反映生产实际,现主要阐述煤科总院唐山分院的陈迹提出的“等压强同层位重选物料分层机理”。

此理论的主要内容是:决定物料分层的因素除水流的速度和加速度,颗粒的速度和加速度以及容积浓度外,起主要作用的是颗粒的压强,它一方面反映了颗粒的密度、粒度和形状等物理性质,同时也反映了粒群对单个颗粒的介质作用。

一个不规则的颗粒在水中沉降时,设想它可能以竖直或平卧等各种状态运动,因而其沉降速度也不同。而颗粒本身的密度、粒度和形状等物理性质都不会因其运动状态不同而有所改变,所以它对水的压力也是不变的。沉降速度变化的唯一原因是运动状态的差别引起迎流截面的变化,从而导致颗粒压强的变化。

颗粒在水中的压强等于其压力与迎流截面面积的商，即：

$$P_{\text{压}} = \frac{P_{\text{力}}}{S_{\text{迎流}}} = (\delta - \Delta)V / S_{\text{迎流}} = (\delta - \Delta)h \quad (2.1.3.1)$$

式中  $P_{\text{压}}$ 、 $P_{\text{力}}$  ——分别为颗粒在水中的压强和压力；

$\Delta$  ——水的密度，等于 1；

$\delta$  ——颗粒的密度；

$V$  ——颗粒的体积；

$S_{\text{迎流}}$  ——颗粒在水中沉降时迎流截面的面积；

$h$  ——颗粒粒度的近似值。

这个压强公式表达了重选床层得以分层的根本原因。在粒群运动中，密度、粒度和形状完全相同的颗粒有可能仅仅由于运动时迎流截面的不同，有个别颗粒具有与绝大多数同性颗粒不同的压强而混入与它当时压强相同的粒群中去。当然，一旦它的运动状态改变时，其压强就与周围颗粒之间出现差异。这个新出现的差异使它与周围颗粒产生相对运动，再回到与它性质相同的粒群中去。压强公式还表明，密度、粒度和形态各不相同的颗粒，只要它们的压强相同，就完全可能在与其它颗粒相对运动中互相靠拢，并形成等压强颗粒层。总之，压强不同的颗粒在床层中的分层过程形成许多层，按压强大小从上向下越来越大。夹杂在任何分层中的压强不同于该层的颗粒，将因与该层颗粒之间有力差而产生相对运动，并脱离该层向与其压强相同的分层集中。多次脉冲的结果将使各分层中的污染颗粒逐渐离去，直达到动态平衡为止。

上面分析的情况是两种粒度相同或相近的颗粒的分层规律，它们受到的都是水介质的浮力，但对粒度大小不同颗粒来说，大颗粒除了受水的作用外，还受悬浮小颗粒的影响，相当于处在小颗粒组成的悬浮液中，因此有：

$$P_{\text{力}} = V_1 \{ \delta_1 - [\Delta + \lambda_2 (\delta_2 - \Delta)] \} \quad (2.1.3.2)$$

$$P_{\text{压}} = P_{\text{力}} / S_1 = \{ \delta_1 - [\Delta + \lambda_2 (\delta_2 - \Delta)] \} h_1 \quad (2.1.3.3)$$

式中  $P_{\text{压}}$ 、 $P_{\text{力}}$  ——大粒在悬浮液中的压强和压力；

$V_1$ 、 $\delta_1$  ——大粒的体积和密度；

$S_1$ 、 $h_1$  ——大粒在悬浮体中沉降时的迎流截面面积和垂直于迎流截面的高度（颗粒粒度和近似值）；

$\lambda_2$ 、 $\delta_2$  ——组成悬浮体的颗粒容积浓度和平均密度。

粗细颗粒进入同一水平层时应满足下列条件：

$$h_1 \{ \delta_1 - [\Delta + \lambda_2 (\delta_2 - \Delta)] \} = h_2 (\delta_2 - \Delta) \quad (2.1.3.4)$$

式中  $h_2$  ——细粒的体积与迎流截面积的商值。

经过整理后可以得到计算任何粒度分选密度的解析式

$$\delta_1 = \Delta + \left( \lambda_2 + \frac{h_2}{h_1} \right) (\delta_2 - \Delta) \quad (2.1.3.5)$$

此式称为重选方程。

从重选方程可以看出物料分层按颗粒的压强分布，它是颗粒密度、粒度和水流速形状等综合因素的反映，而不是仅按颗粒的密度分层。同时由式(2.1.3.5)可知，在等压强颗粒层中，粗细颗粒的密度并不相等，其密度差决定于悬殊浮体细粒的容积浓度 $\lambda_2$ 和粒度差， $\lambda_2$ 越大，同一层中的密度越接近，混杂就越小。因此， $\lambda_2$ 越大越好，或者说床层要有最大干涉条件，颗粒才有最佳流动性。在跳汰过程中， $\lambda_2$ 的数值随床层紧—松—紧变化而呈浓—稀—浓的周期变化，影响 $\lambda_2$ 变化的主要参数是度和加速度。

另外，还可以看出，在重选过程中颗粒的污染是难免的。对粗颗粒来说，污染的主要原因是颗粒形状不同。重选方程中的 $h$ 值随着颗粒迎流截面积的不同而有所变化。除球形颗粒的迎流截面永远不变之外，任何形状的颗粒都有大小不同的许多截面，以其中任何一个截面作迎流运动的可能性都有存在。所以在粒群运动中同一颗可能有不同的压强。那些截面面积相差越大的颗粒，其压强的变化也越大。因此，污染于其它分层的机会也越多。对于小颗粒来说，造成污染的主要原因是颗粒间水流速度异常引起的。颗粒间水流的速度与间隙截面积成反比，迎流截面积是个随机变量，通道面积小的隙间水流速度大于通道面积大的间隙水流速度，如果两种情况下的水流速度相差过大时，小颗粒精煤和矸石可能被高速水流带到压强不同的床层中去。

## 2.2 跳汰分选的影响因素

影响跳汰分选的因素很多，按其机能特点可分为：包括入料质量特性的工艺因素；表征压缩空气和筛下水参数的水动力学因素；主要与跳汰产品排卸方法有关的结构因素。如图2.1所示。

### 1、入料

原煤入料影响因素包括不可调因素：粒度、筛分组成、浮沉组成，和可调因素：单位负荷。

物料颗粒在向各自的平衡层运动时，粒度越大，受周围颗粒的不良影响越小。随着粒度的减小，其单位表面积增大，与表面积成正比的粘着力的作用也相对增大，而与质量成正比的重力的影响却相对减小。这时，小颗粒按密度进行分选的效率降低。跳汰的总效率不仅与每一粒级的分选效率有关，而且还与各粒级的含量有关。末煤量越大，它们按密度分选的精度越低。入洗物料中各密度级的分布特性，特别是在分选密度区的分布特性是很重要的。密度与分选密度差不多的颗粒量随着分选密度级明显度的下降而增加。对于入料的可调因

素，单位负荷来说，跳汰分选的分选精度随单位负荷的增加而下降。

入料性质的变化影响跳汰制度的变化，影响产品质量和产率，还破坏跳汰机床层结构的稳定性。物料从入料端向排料端运动过程中按压强进行分选，床层结构不断的重新组合。从入料到产品，需要一个稳定的演化条件，入料性质一旦发生变化，必然会打乱已经形成的分层秩序。即使能迅速恢复正常，但在正常与紊乱交替的条件下形成的床层分层精度必然会低于始终正常时的分层结果。

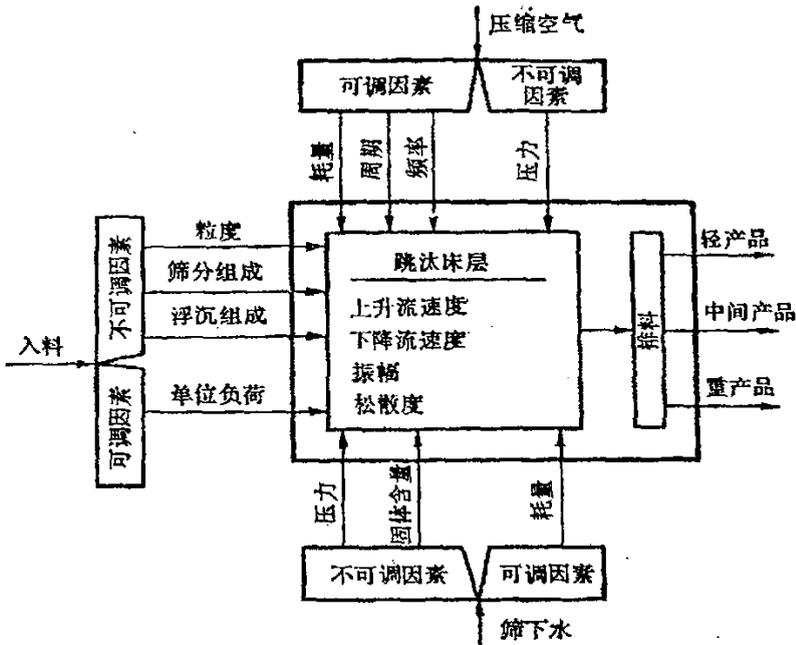


图 2.1 影响分选的因素

## 2、物料分层与跳汰周期

物料在脉动水流中分层时，其比重、粒度和形状都起作用，但跳汰过程要求是按密度分层，这就是说，洗水脉动规律（即跳汰制度）应能保持颗粒的密度在分层中起决定性作用。因此，在跳汰过程中要尽量限制粒度和形状对分层的作用，而且要能加大颗粒的密度差别。

跳汰制度包括跳汰周期、脉动频率和风水调整等因素。跳汰周期分三个部分：床层的起振状态、松散过程和透筛作用。这三方面不仅各有其独立作用，而且有密切联系，共同形成一个完整的跳汰过程。只有各方面的独立作用得到充分发挥，而相互联系又配合密切，才能获得较好的洗选效果和较高的处理能力。

## 3、跳汰频率和跳汰振幅

跳汰频率和跳汰振幅是跳汰过程的重要因素。跳汰脉动水流的振幅决定了床层在上冲期间扬起的高度和跳汰床层的松散条件。床层必须扬起的高度主要与给料的粒度和床层的厚度有关。粒度大、水流振幅床层厚，就要求床层扬起

的高度大，所以要求有较大的振幅与频率必须配合得当。用低频(3540次/min)大振幅跳汰，床层松散度较大，分层较快，故跳汰机的处理量增加。但此时的速度因素、矿粒的粒度和形状因素对分选效果影响较大，而且因频率低，操作时的风水制度和给料等的变化相当敏感，故操作较困难。所以低频，大振幅跳汰只适用于分级块煤分选或易选煤分选。相反，高频跳汰时(5060次/min)工作稳定，加速度影响因素大，粒度和形状因素影响减弱，细粒透筛能力较强，故产品的质量好而稳定。但因松散度减小，分层速度减慢，跳汰机处理能力降低。故适用于末煤和较难洗煤分选。

频率和振幅的合理配合，应根据具体情况由试验确定。频率只能通过改变风阀的转数来调整。振幅主要通过改变风压、风量(调节风门)、风阀的进、排气孔面积及频率加以控制。

#### 4、产品的排卸方法

当床层按密度分层结束时，应及时、连续而合理地将高密度物和低密度物排出机外。重产物的排放是操作中的一个重要环节，一定要使重产物的排放速度与床层分层速度及研石(或中煤)层的水平移动速度相适应，若重产物排放过慢则出现堆积，不但影响整个床层松散状况，使得正常分层难以进行，而且污染精煤，影响精煤质量；如重产物排放过快，又导致研石层(或中煤层)过薄，甚至出现排空的情况，整个床层便处于过度松散的不稳定状态，使得原已分选好的床层遭到破坏，使重产物中精煤损失加大。

排料的目的最终可归结到一点，就是使分层好了的床层在不遭破坏的情况下，使轻重产品分离，产品的排卸方式应该尽量不破坏分层，并减少污染量。

在跳汰排料过程中，重产品层的高度是一个重要的参数，无论何种排料方式，都是寻求是通过检测而得到的重产品厚度与排卸位置有直接或间接的对应关系，这种关系的好坏直接决定了产品分离的精度与效率<sup>[2][4][6][10]</sup>。

### 3 跳汰产品的分离

跳汰选的目的是在介质中，通过脉动液流使物料分层，并借助一定装置实现物料按密度分离出轻、重产品。由此看来，产品的分离是十分重要的，它主要表现为以下三个方面：

#### 1. 为物料的进一步分层创造条件

物料的分层与产品的分离是相互依存、相互制约的，精确的分层是产品分离的前题。如果物料分层不清，分界线难以确定，可能造成精煤中高密度细粒含量增加或尾煤中精煤损失严重。因此，只有有了良好的分层条件，才能分离出质量较好的产品。同时，均匀而适当的排料是稳定床层的必要条件。

#### 2. 影响跳汰机的处理量

产品分离速度是影响跳汰机处理量的主要因素。如果分层完好的物料得不到及时排出，床层变厚，水流振幅变小，高低密度物料错位困难，透筛能力减弱，物料在床层中停留时间加长，这时不得不减小入料量来保证良好的分选条件。增加排料口的高度，分选速度加快，处理量增大，但是低密度材料的损失增加；排料口过小，底层物料水平运动速度降低，影响了排料速率。所以应该在保证产品质量稳定的条件下，适当增加分离速度，提高跳汰机的处理能力。

决定排料能力的另一个关键因素是加快底流物料的水平流速。贴近筛板的底流物料密度高粒度大，在洗水脉动过程中升降幅度小，悬浮时间短，以致水平流速低，位移距离小，因此，提高跳汰机处理能力的关键是加快底流床层的水平流速。

#### 3. 产品分离的精度直接影响产品的质量

分选密度过低，精煤较纯，质量好，但回收率低；当分选密度过高时，精煤产率虽很高，但精煤污染严重。所以，稳定分选密度，保证分选后物料准确分离，可以获得较好的分选效果。

另外，跳汰机的分离也直接影响跳汰机的用电量、耗水量等，所以就要求在跳汰机内物料按密度分层结束后，要及时准确将轻、重物排出机外，还需实现连续排料。

#### 3.1 跳汰产品的分离理论基础

在跳汰分离的过程中，要求满足以下原则<sup>[2][8]</sup>：

- 1、各粒级的分选密度符合最大回收率原则
- 2、在产品分离的过程中不产生或少产生重新污染
- 3、尽可能减少床层的波动，保持分选密度的相对稳定性
- 4、在产品符合质量要求的情况下，适当增加分离速度

跳汰床层的分布规律性，奠定了跳汰机产品分离理论的基础。跳汰床层分布立体模型可以用正态密度函数来表示。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1.1)$$

- 式中  $f(x)$ ——概率密度函数；  
 $x$ ——随机变量（床层深度）；  
 $\sigma$ ——任一随机变量偏离中值的标准偏差；  
 $\mu$ ——数学期望，随机变量的平均值；  
 $e$ ——自然对数的底。

如图 3.1 所示，正态密度函数是一条钟形曲线，根据它讨论跳汰过程，可以看出，正态密度函数曲线的最高峰就是某一筛分浮沉级粒群在跳汰床层中的分布中心，是该粒群最密集的集中点。以此为界向两侧扩展时，该粒群的数量以单调函数的形式迅速下降。在  $x_0 \pm \sigma$  处曲线有拐点，拐点之内曲线向下弯曲，拐点以外曲线向两侧延伸，表现为横坐标的渐近线。可见正态密度函数是一条以数学期望为轴的对称曲线。但由于在跳汰过程中存在着工程因素，其对称性有一定偏离，但已证明不影响对其统计规律的认识。

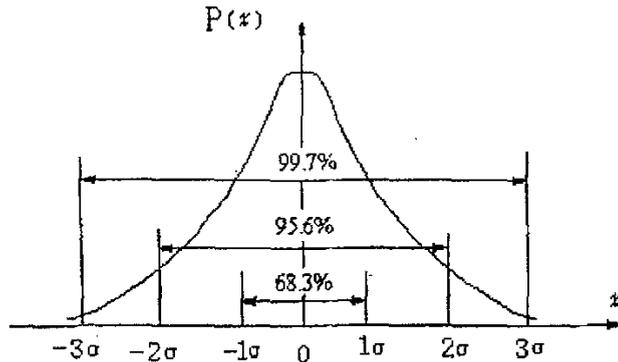


图 3.1 正态密度函数曲线

正态密度函数中，数学期望是一个重要特征量，在跳汰床层中它标志着某一同性（密度和粒度等物理性质相同）粒群的分布中心。从各筛分浮沉级的分布中心相对位置可以判断出它们对产品分离的影响。设有  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三个正态分布粒群。其分布中心之间的关系如图 3.2，离分布中心距离较远的  $a$ 、 $c$  两粒群之间相互污染机会很小，而  $a$  与  $b$  和  $b$  与  $c$  分布中心距离较近，关系密切，正态分布曲线部分相交，表明粒群之间存在污染。而且相交部分越多污染越严重。由此可知，入选物料中颗粒密度越接近，不仅在物料分层中不易分开，而且在产品分离中（已经分层就绪的颗粒）也容易重新污染。

正态密度函数的另一个特征是标准偏差。在床层分布中它表征某一筛分浮

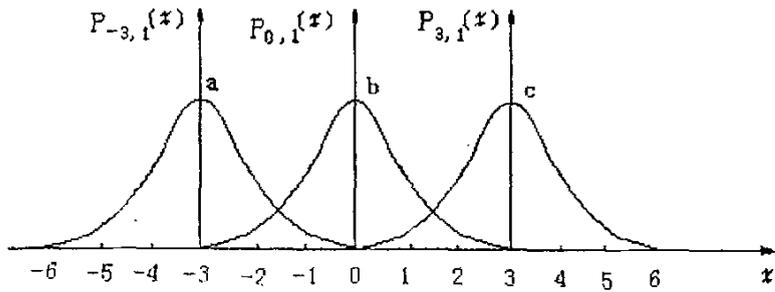


图 3.2 三个粒群间分布中心的关系

沉级粒群的离散程度。由图 3.3 可见标准离差决定着曲线的形状。其值越大曲线越平缓，越小曲线则越陡峭。如果两个颗粒群的分布中心的距离为固定值。仅仅由于标准离差的增大，曲线变得平缓，可使本不相交的曲线变得相交，或相交不多的曲线变为大量相交，它们由互不污染而变为互相污染，或者使本来污染不大的粒群之间污染严重起来。

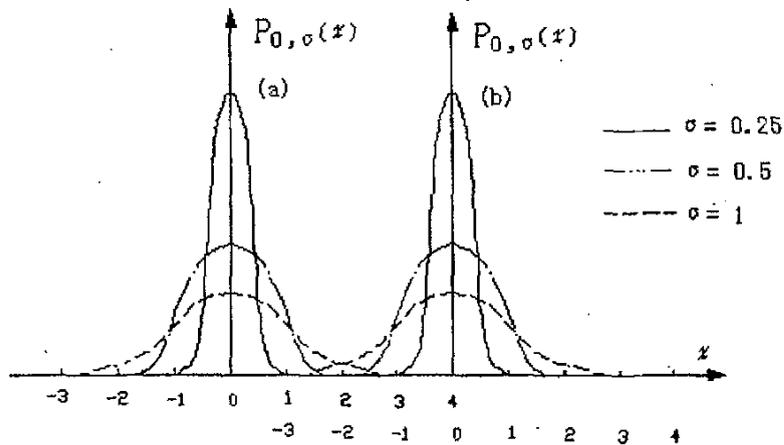


图 3.3 标准离差对产品分离的影响

### 3.2 跳汰产品分离的基本原则

根据各筛分浮沉级粒群在跳汰床层中的正态分布规律和正态分布函数的性质，可以总结出跳汰产品分离技术所必须遵循的三个原则<sup>[7][8]</sup>。

#### 1. 密集同密度各粒级粒群的分布中心

跳汰产品中各粒级粒群的分布中心是不同的。如果要符合最大回收率原则，常常是分离密度应随粒度增大而略有上升。但是，在一般情况下实际结果往往相反。主要表现在：比重相同的粒群，各粒级的分布中心随着粒度的增大而逐渐下移；低比重物料各粒级粒群分布中心靠得较近，而高比重物料各粒级粒群分布中心离得较远。

在跳汰过程中，在任一层中都有任意粒度和密度级的粒群，这使得各密度

级粒群的分布中心有交叉现象，这就增加了跳汰产品分离的难度。造成这种交叉现象的原因是由于颗粒的压强作用。因此，要想获得较纯的跳汰产品，就需设法将具有同一密度的各粒级粒群的分布中心处于同一深度。为了达到这一目的通常的办法是增加下降液流的流动速度，增加吸啜作用，使同一比重级中各粒级粒群的分布中心更加密集，使大小颗粒的分选比重相互接近，实现最大回收率原则，减小对精煤的污染，提高分选效果。

## 2. 稳定跳汰产品分选密度的分界线

分选密度是跳汰产品分离的界线，若分选密度不稳定，即使物料分层效果更好，也会造成跳汰产品污染较严重，回收率下降。

但在实际生产过程当中，产品分选密度的分离线通常不能稳定在同一深度上，更确切地说不能稳定在相同的密度上，会出现某些波动。从排料角度看产品分界线的波动原因可能是原煤性质发生变化引起各密度粒群在床层中厚度比例发生变化，或者操作失调，排料参数（如闸门高度，排料量控制等）不适合产品排放要求，还可能是排料装置的适应能力满足不了床层结构的过大变化。这种产品分界线的波动主要表现地时间过程上，即在一段时间内产品分选密度偏高，过一段时间产品分选密度又偏低。如此反复交叉，程度不同的出现于跳汰全过程，称这种产品密度线的波动为时段交叉。

产品分选密度分界线出现波动的另一个原因是跳汰参数不稳。其结果是，除了产生与床层高度比例变化相仿的害处之外，不均匀脉动严重时还会引起床层松散度及其变化规律的临时失调，增大床层分布的离散程度，致使降低分选精度。

为了得到质量均匀的跳汰产品，必须稳定分选密度的分界线。这需要做到入料性质、跳汰制度和排料参数等三个稳定。其中对产品分选密度分界线的控制起主导作用的是排料系统。它不仅要适应原煤性质的变化，而且要稳定床层中各密度粒群的高度比例，保证产品分选密度稳定。

稳定产品分界线的主要措施是保持产品分离过程的连续性。不仅在任何情况下都要防止间断排料，而且要维持溢流和底流床层厚度比例稳定。否则，床层时厚时薄将引起跳汰制度的时好时坏，不仅降低产品的分离质量，而且影响分层条件，降低分选效果。

## 3. 统一跳汰产品分选密度的分界线

将跳汰床层分离成产品的机构是两个高度。溢流堰上沿将高于它的上部床层作为溢流产品分离出去。排料口的上沿将低于它的下部床层作为底流排出去。跳汰机溢流堰的高度一般为 450~550mm，而排料口的最大高度通常不超过 220mm。两者的最短距离约为 250~350mm。在生产过程中排料口的使用高度还要小得多，所以两者的实际距离还要大一些。产品分离只要求一个分界线。而完成分离过程的却是两个相离很远的分界线。并且，往往两个分界线还有脉动

交叉。跳汰产品分选密度分界线的脉动交叉过程如图 3.4。

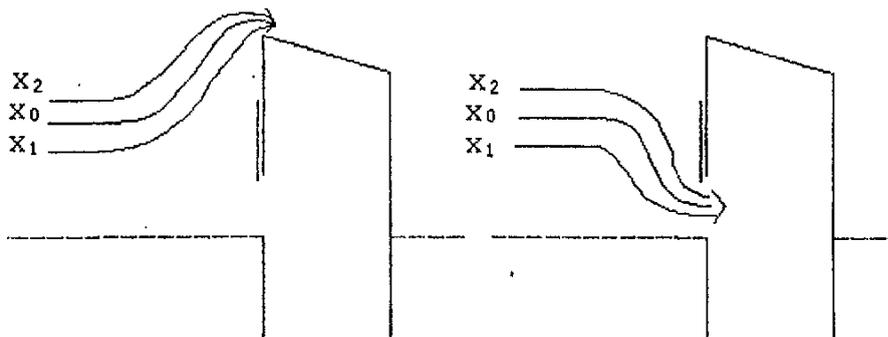


图 3.4 跳汰产品分选密度分界线脉动交叉示意图

图中  $x_0$  为理想的分离密度线,  $x_1$ 、 $x_2$  分别为密度低于和高于  $x_0$  分离密度线。最理想的情况是溢流口和排料口都从  $x_0$  处分离产品, 但实际上是很难做到这一点。一般的情况是床层在悬浮时上升流将高于密度线  $x_1$  以上的物料冲入溢流, 床层密集时下降流又将低于密度线  $x_2$  以下颗粒带入收料斗。

理想的产品分离只要求一个分离线 (这个分离线由于时段交叉的存在也往往呈现上下波动), 而实际完成分离过程时却由于堰的存在, 出现两个相离很远的分离线。这两个分离线受到液流脉动的影响必然有所交叉, 即脉动交叉。从排料的原则看, 脉动交叉对进一步分离技术是不利的, 存在一些难以克服的矛盾。产生脉动交叉的原因很多, 如跳汰机溢流堰结构设计不合理, 使得分层就绪的物料在分离成产品的瞬间与溢流堰垂直碰撞, 没有按一定的密度分离的技术措施: 如排料失控或连续性不好, 床层时厚时薄, 脉动时高时低, 致使分选密度分离线不稳, 却没有溢流堰和闸门高度的变化与之相适应等等。

### 3.3 跳汰产品的分离的机械方式<sup>[2][11][44]</sup>

在产品分离技术上有三种排料方法: 闸门排料 (块煤跳汰用)、透筛排料 (煤泥跳汰和部分末煤跳汰用)、综合排料 (混用闸门和透筛两种排料方法)。

生产现场中使用最多的机械排料可以分为立式闸门和水平闸门 (漏斗型闸门) 两种类型<sup>[2][11][44]</sup>。

目前排料方式的分类概况如图 3.5 所示。

#### (一) 立式闸门排料方法

立式排料闸门一般设在跳汰机每段的末端。只有采用倒排矸时, 才在矸石段的前端再设一个排料口, 以便使过量的矸石或过重的矸石 (黄铁矿等) 尽早排除, 以提高跳汰机的处理能力。

根据筛板是否延伸到排料道内, 可以把立式闸门细分为两类, 一是筛板止于排料口处的闸门, 二是两道排料闸门。

#### 1、筛板止于排料口处的闸门

该类闸门如图 3.6，跳汰筛板的长度止于闸门口处，不再深入到排料道内。这类闸门是利用闸板高度，一方面控制矸石层（或中煤层）厚度，同时又调整矸石排出量。经验表明，兼具这两种功能的闸门，排料效果并不理想。

### (1) 底流口高度可调的手动排料闸门

对于不同地区的选煤厂，入料的粒度组成和密度组成以及对产品质量的要求通常是不一样的，也是变化的，所以在工艺上要求煤矸界面高度  $h_0$  或振幅  $A$  可相应变化。为了提高排料装置的适应性，应把溢流堰和底流口做成高度可调的结构，即分别增设闸板。为了简化结构，通常是将一个高度做成固定的，而将另一高度做成可调的，如图 3.7 所示。

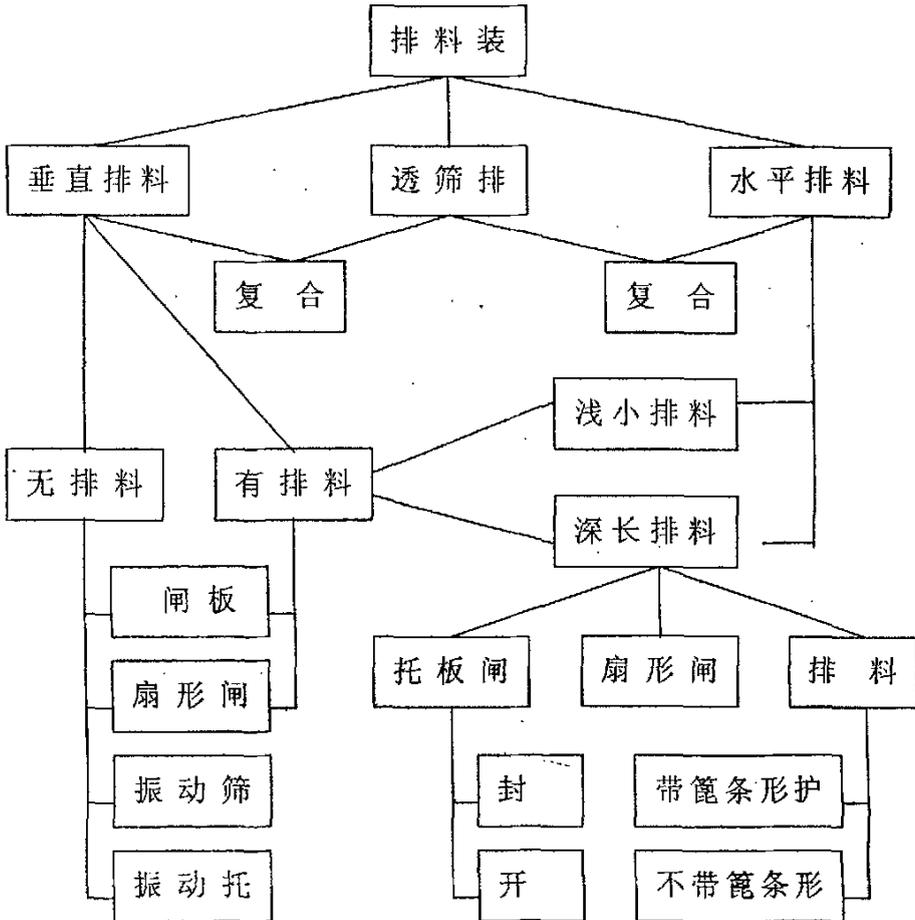


图 3.5 跳汰机排料装置分类图

考虑到防止溢流和底流相互错配，同时考虑到对各段产品的质量要求不同，对于矸石段，宜采用图 3.7(a) 结构，对中煤段宜采用图 3.7(b) 结构。然而因沉物层对入选物料按密度分层的影响较浮物层厚度大，且沉物层厚度容易测得，所以控制沉物层厚度即底流排量较好。故不管是矸石段还是中煤段，一般均采用 3.7(a) 结构。

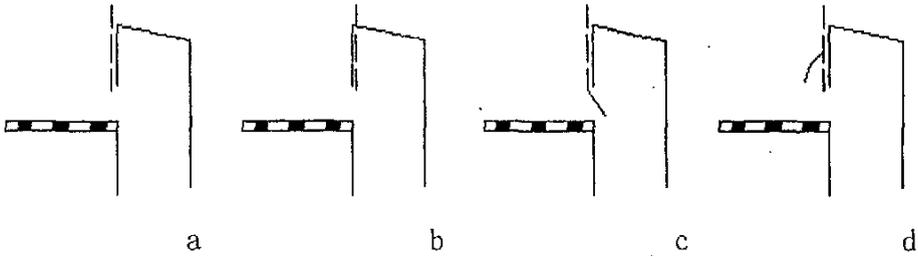
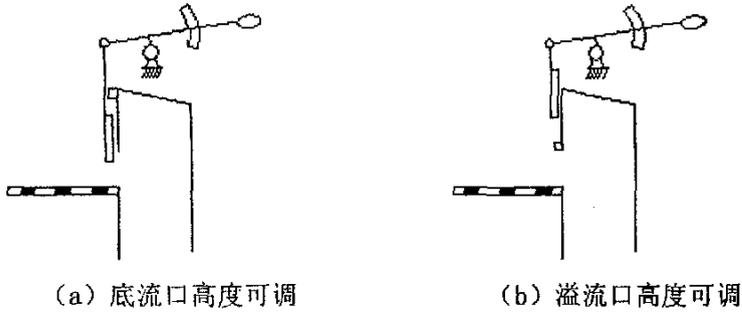


图 3.6 筛板正于闸门口的立式闸门



(a) 底流口高度可调

(b) 溢流口高度可调

图 3.7 手动排料闸门

### (2) 底流口高度可调的自动排料闸门

为了更好地适应原煤性质的变化和改善排料性能，人们研制了自动排料闸门，如图 3.8 所示。

排料闸门的升降可用油（气）缸驱动，也可用角行程电动执行器等其它驱动装置驱动。在跳汰机按一定工作制度运行中，当原煤性质突然发生变化时，筛板上的床层厚度必然改变，利用床层厚度传感器测取位移增量，并将该增量转换成电信号，电控装置将该信号处理后控制驱动装置动作，并带动闸门升降，从而把床层稳定在一定值上。

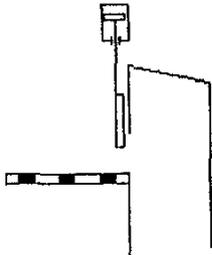


图 3.8 自动排料闸门

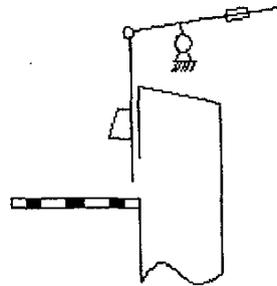


图 3.9 浮标排料闸门

### (3) 底流口高度可调的浮标排料闸门

浮标排料闸门是将闸门刚性地连接在浮标上，浮标是用钢板焊接的中空而密封的容器，具有一定的整体密度，其脉动特性和动态位置与相同密度的床层一样，浮标带动闸门升降，并随床层厚度的变化达到适宜的开度。浮标闸门的结构原理如图 3.9 所示。

与自动闸门相比较，浮标闸门有三个特点。一是自动闸门的升降动作只取决于床层的厚度，当床层厚度稳定时闸门不再运动，而浮标闸门随床层的脉动也不跳地跳动，向下跳动时达到的最低点却绝于床层厚度。也就是说，浮标闸门不仅对床层厚度作出反应，浮标闸门的下缘能随时追随脉动的煤矸界面，从而理想地追随床层，这显然是有利的。第二个特点是浮标闸门结构简单，不设动力、电控装置和床层厚度探测装置。浮标闸门的第三个特点是惯性大，动作迟缓，当跳汰机因操作原因使床层过薄时，浮标会带动闸门“疯跳”，而床层过厚时浮标会被“压住”。

立式闸门根据需要可以在闸板下部开一些小孔（如图 3.10）。因为决定立式闸门高度的因素有两个。一是底流产品的产率。要求的排料量越大闸门越高。另一个是底流产品的粒度。物料粒度越大，含量越多则闸门口越高，否则底流产品难于流畅的通过。但这两个要求有时是矛盾的。例如，底流物料含量少时，排除量小，要求闸门口放低，如果高度低于粗粒粒度的三倍，则粗粒底流物料有可能被闸口卡住，接下来它们又会将小粒组留下来，从而破坏正常的排料秩序。使用手动排料方法的司机都有这方面的经验，出现上述现象时，一方面将闸板放低到与待排量相应的高度，同时要辅以频繁的瞬间调整，即不断的提高闸板高度创造粗粒通过的条件，然后再迅速恢复原来高度继续正常排料。显然，这种调整方法比较笨重。为了解决上述矛盾，有的排料装置在闸板上开些各种小孔，以便保证既能通过处理；又能控制排料量。

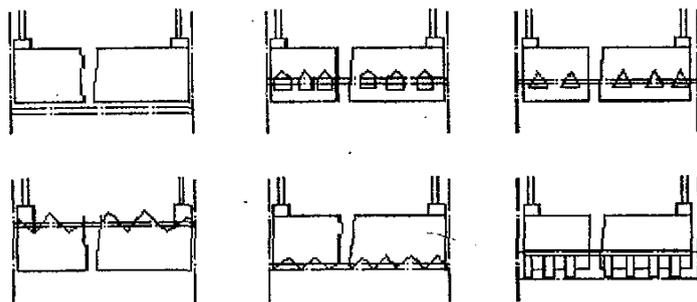


图 3.10 带孔的排料闸门

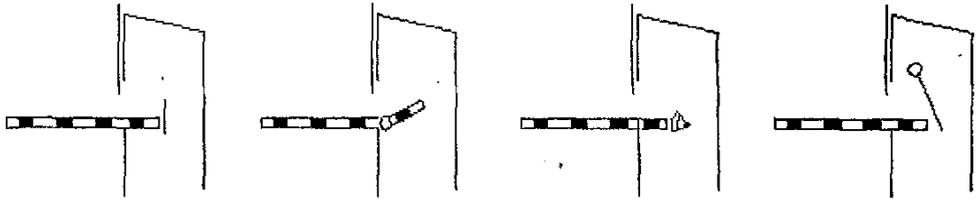
## 2、两道排料闸门

这类立式闸门的特点是将跳汰筛板延伸到排料道内，通常还在筛板末端再增加一道排料装置。这种立式闸门是利用前面的闸门控制底流床层的切割厚度，再用后面的闸门调整重产品的排出量。因此，这类排料方式可以较好的解决前一类立式闸门所遇到的底流产品的质量 and 数量难以兼顾的矛盾。

两道排料闸门又可细分为以下几种形式如图 3.11：

①用伸入排料道的筛板直接控制排料量。如图 3.11a，在排料道内附设一段筛板活节，前端为铰链，后端可上下移动，用控制这段筛板角度的方法控制底

流产品的排出量。另一种如图 3.11b，活节筛板较长，铰链在跳汰室内。调整筛板角度时，不仅可控制排料量，而且还改变了排料口的高度。即同时影响着排出床层的厚度和质量。



(a) 双立式闸门 (b) 立式+铰链闸门 (c) 立式+扇形闸门 (d) 立式+摆动闸门

图 3.11 两道排料闸门

② 筛板末端的排料道内再设调整闸门。这里用的排料闸门种类很多。如垂直移动闸板（图 3.11c）、转动闸板（图 3.11d）和各种形式的扇形闸门。尽管它们的结构形式不同，但其工作状态不外乎以下两种。一种如图 3.11c，闸门挡住最底层物料，从而降低下部底流床层的运动速度，这恰好是在各种情况下移动速度最低的那部分床层。对它阻留的结果，必然降低跳汰机的处理能力。

另一种情况如图 3.11d，调整闸门下降到与筛板相连时停止排料。随着它被提起的高度的增加，排料口从下向上逐渐升高。这种排料方式的特点是，无论闸门口多高被排出的物料始终是最贴近筛板的底层。尽可能的排出这部分质量较纯的粗粒，不仅可提高处理能力，而且会减少低密度物的损失。

③ 动闸门。如图 3.11d 所示，摆动闸门在每段尾部的溢流堰前设一铰链。摆动部分伸入溢流堰下，因此排料道的宽度大于溢流堰。溢流堰的垂直排料口不设立式闸板，其开口高度决定于摆动部件的位置。当摆动部件与其相连的跳汰筛板成直线时排料量适中。摆动部件向上仰起的角度越大，则排料口高度越小，物料爬坡运动的阻力越大，从物料流动速度和流通截面积两个方面减少排料量。由于这时被控制的是最下部的底流床层，所以排出的物料基本上是较上部的底流床层，显然其质量不如最下层的物料好。当摆动部件向下偏移时物料的滑坡角度和排料口截面积同时增加，厚度低于排料口的全部底流床层都可能排出。此外，由于铰链设于溢流堰前，摆动部件下垂时，有可能使高于排料口的中部床层也滑入底流产品，既增大了低密度的损失，有降低了底流产品的纯度。摆动部件一般为筛板和托板。采用摆动筛板时，排料量不仅与摆动角度有关，而且受筛板开孔率参数影响。在排料口高度相同的情况下，它比排料托板的排料量更大。

④ 在筛板伸入排料道的排料方式中具有特点的结构是利用“象鼻子”控制排料量，如图 3.12 所示。“象鼻子”是装在溢流堰上的排气孔。对于筛板止于排料口处的跳汰机来说在进气期，部分洗水进入“象鼻子”，从而减少通过排料口的洗水脉动量，降低闸门前分层就绪的床层重新被顶水冲乱的可能性。更

重要的是，在一般情况下都要借助于“象鼻子”的这种功能，使顶水顺利的上升，将排料道内筛板上的物料顶起而排出。经验证明，如果将矸石段的“象鼻子”完全封住，矸石排出量很少，甚至完全停止。但在中煤段灵敏度差一些，效果不如矸石段好。

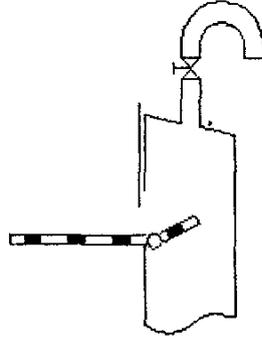


图 3.12 象鼻子管排料装置

⑤ 直闸门、排料轮组合排料装置。以叶轮为主的排料系统（图 3.13）年来发展较快。它是用直闸门调节排料口的大小，让底层物料通过，用排料轮转速调节排料量，排料轮上挂有一排可以摆动的护板，包住排料轮，防止漏料。

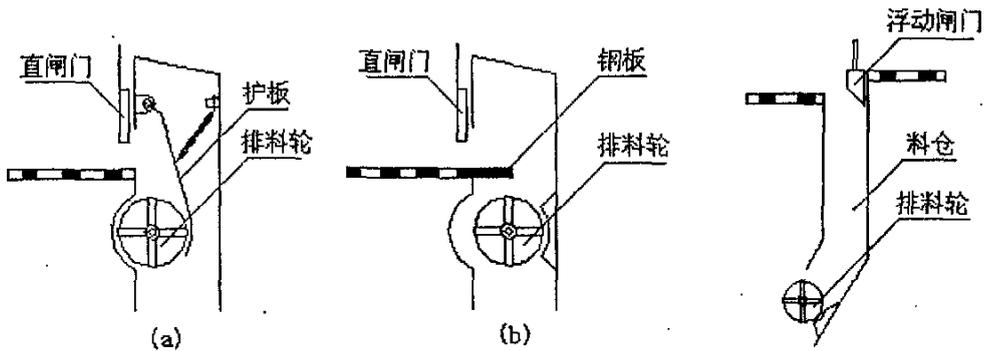


图 3.13 直闸门、排料轮组合排料结构

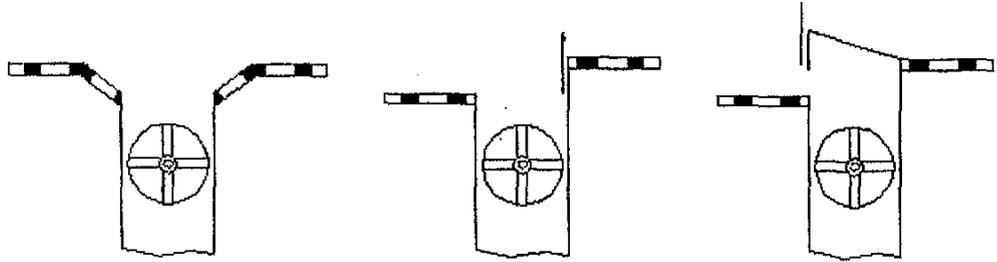
图 3.14 仓式稳静排料结构

⑥ 仓式稳静排料方式。对于筛板止于闸门口处的闸门，希望排料道内的水不要脉动，否则水会从底流口倒入跳汰室，扰乱排料道已经分层的床层。为此，将排料轮下移到排料道底口下方，使排料道形成一个料仓，底层物料充满料仓堆积在排料轮上，排料的位置封住了物料下流的安息角，使物料不能自行流出，料仓因充满物料，无脉动水流的影响（如图 3.14）。这样，排料轮转动时将物料连续稳静地排出，通过控制排料轮的转速可以任意调节排料量。这种结构的优点还在于其排料口过流断面宽度远远大于物料粒度上限，能有效地防止卡轮现象。排料道上口处还设置了活动溢流堤，它可以调节底层物料的厚度。

(二) 漏斗闸门排料（水平排料）方式

鉴于立式闸门排料方式存在上述难以克服的缺点，近代跳汰技术推广无溢流堰排料系统（如图 3.15）。这种排料系统的结构是，在取消了溢流堰的位置

上安装水平排料口，并在排料道的某一深度上设闸门控制排料量。排料口和排料闸门以及联接它们的排料道组成一个封闭的漏斗形收料斗。其中装满底层物料，并使其上部的底流床层保持一定的厚度。收料斗的结构和其中的物料都有减弱脉动液流串动的作用，因此可避免排料区物料床层的紊乱，尤其是液流吸啜的影响。所以称这种排料方式为“稳静排料”。无溢流堰结构，确实改善了水流运动状态，又不影响分层效果，但实践表明，无溢流堰容易造成煤炭损失。



(a) 漏斗收料仓型

(b) 筛板有高度差

(c) 半溢流堰型

图 3.15 无(半)溢流堰式排料装置

在闸门排料中，长期以来都使用立式插板闸门。此种排料方式都以有溢流堰为前提。但是，溢流堰却存在不少缺点，主要表现在三个方面：

### 1. 跳汰物料水平移动和产品垂直分离的矛盾

对于传统的排料装置来说，轻、重产物是在排料道的上方进行分离的。当排料速度和排料道内压力发生变化，以及水平分层的物料碰到垂直的溢流堰时，将会对排料道上方物料的分布状况产生很大的影响，有可能使得原本已充分分层的轻、重产物重新混杂，影响产品的质量和产率，因而传统排料装置的产品分离效果有很大随机性。

### 2. 水平分层与立式闸门切割产品有矛盾

在排料闸门前的洗水脉动微弱到可以忽略不计的情况下，溢流和底流的分界比重基本上于排料口的高度。如果排料口的高度恰好等于分界比重的高度，则产品大致根据分界比重分离成两种产品，如果排料口的高度恰好高于（低于）分界比重的高度，则溢流和底流的排出量非多即少，这时分界比重虽然接近与分选比重，但难于达到分选比重。而在一般情况下，排料闸门前的脉动是不容忽略的。在排料闸门前分离床层，如果正赶上洗水向上起振，床层流动方向也随之向上偏离，大于分选比重的颗粒就会被带入溢流。反之，床层流动方向会向下偏移，临近的小于分选比重的颗粒就会被带入底流。这时，细粒物料最易随脉动水流动，造成产品分离中的相互污染。

3. 在第一段以分层好的产品到中煤溢流堰后突然下落，致使床层产生一定程度的紊乱，不得不在中煤段重新分层。因此，加长了跳汰机的长度，相对地减少了跳汰机的单位面积处理量。

## 4 床层分层形成过程的研究

### 4.1 跳汰过程中床层的状态与规律

#### 1、床层的起振状态

由等压强同层位重选分层机理知,在跳汰床层中每一个水平面上集中的都是等压强颗粒,而且是细颗粒密度一般都高于粗颗粒密度;如果按最大回收率原则要求时,则应是细颗粒密度稍低于粗颗粒密度。在生产实际中通常都有趋向于粗细颗粒密度基本相等。因粗细颗粒之间在流化过程中存在时间差,所以在粗重颗粒还未脱离筛板之前,细轻颗粒已经流化成为床层悬浮体的组成部分,并随液流一起在粗粒之间产生穿隙运动。从跳汰床层的每一个水平层来看,如果基本上已经按压强分层,则集中着各粒度和密度的等压强颗粒层,将由于细颗粒的穿隙流动又使它们分开,而且是粒度越细的颗粒密度越高,上升距离越远,显然这是与分选目的完全相反的过程。因此判断床层起振状态优劣时不应以整起和散起为标准,而应以粗细颗粒之间是否存在相对运动及其运动距离为判据。

但是由于床层散起的原因是液流速度或加速度低,终速不足或者形成终速的时间较迟,粗细颗粒的流化时间差较大,因此,细颗粒在粗颗粒之间产生穿隙流动是难免的,所以床层散起对颗粒分层是不利的。但随着床层起振整体性的加强,其不利作用逐渐减少,直至使床层起振中某些松散对物料分层无影响。这种情况下的松散不仅允许而且需要。因为它可以使床层松散过程提前,从而延长物料的有效分选时间。

在生产实践中,跳汰床层起振状态作用的灵活性是相当大的。必须根据试验结果具体运用。一般的说,整起可以防止粒度分级,加快散起速度可能减少粒度分级。前者床层未松散颗粒之间不具备相对运动的条件;后者床层松散时间短,容积浓度高则相对运动阻力大,颗粒之间不易也来不及换位,因此不致于增大上一脉动结束时同一水平层是粗细颗粒的密度差。通过增大起振时的床层容积浓度,维持上个脉动的分选结果,在下一个脉动中继续扩大已有的分选结果正是跳汰工艺发展的现代化趋向。

#### 2、床层的松散过程

床层的松散过程,实际上是继床层起振后的一个过程,是跳汰制度的关键部分,床层能否按比重分层,主要取决于分层条件。

床层的起振状态决定于液流的速度和加速度,并为物料分层过程打下基础,对后面的分选过程有重大影响。但对物料分层规律而言,决定性因素既不是液流的速度和加速度,也不是颗粒运动的速度和加速度,而是颗粒的有效压

强，有效压强决定于床层松散度及其变化规律。操作者对一切跳汰制度的调整都是寻求和控制合适的床层状态，即床层的松紧及其均匀程度。

随着床层松散度的减小，粗细颗粒分选密度的差值也都缩小。可见床层松散度越小，物料分选结果越接近于最大回收率原则。物料松散度小虽然是较好的分选条件，但在跳汰洗选中床层松散度并非固定值，而是反复经历紧—松—紧的交替过程。表面上看起来对分选不利的较大的床层松散度，不仅对物料分层无害，而且是必不可少的分选条件。可以从两方面说明床层的松散过程都是物料分层的必要条件。

首先，从整个跳汰过程看，从入料端到排料端洗水振幅越来越低，顶水量逐渐减少，床层松散度随之而减小。刚进入跳汰机的物料，其筛分组成较均匀。必然将一些低密度物料压在最下层，而将部分高密度物料堆积在最上层。它们要在跳汰过程中经历床层的一定高度，进入与它们压强相同的颗粒层。因此要求入料端的洗水振幅要高，扩大床层松散度，减少颗粒运动中的磨擦和碰撞，给它们以较多的时间和较大的空间，使其交换位置的过程能较通畅的进行。以后随着颗粒换位距离的缩短以及换位数量的减少，床层松散度即可缩小。创造床层悬浮体密度升高的条件。这一点不仅为物料分层所需要，也是产品分离所必要的最佳条件。

其次，在每次脉动中，床层由紧密转向松散。床层最松散的时段也相当于物料的预选期。紧接着出现床层由松到紧的过渡时段，此时物料向筛板沉落，颗粒所占空间逐渐压缩，床层悬浮体密度上升，使每个等压强颗粒层的粗细颗粒的分选密度逐渐接近。改善松散期的预选结果，达到精选目的。

概括地说，床层松散期为误入每个平衡层的颗粒提供通畅的运动条件，使其在预选中离去，或者使路径颗粒少受阻力迅速通过；继之床层密集期，使预选到各层的颗粒得到精选，再细分成粗细颗粒分选密度更为接近的分层。在多次反复的预选和精选中完成跳汰过程。床层的松与紧，或者悬浮体密度的高与低都是跳汰选的必要条件，其大与小在每一个脉动中的作用是相辅相成的，缺一不可。

### 3、风阀结构与床层松散

跳汰制度系指风水压力及其用量、跳汰频率、周期和洗水振幅等基本参数的使用方法。物料处于悬浮状态时，每个颗粒都要经历粗选和精选等过程，每个过程的延续时间及粗选如何向精选过渡等都决定于床层松散度及其变化规律。悬浮物料在下降期产生精选向补选过渡。粗粒对细粒“随机筛选”作用的效果，包括穿隙流动颗粒的质量与数量，均决定于吸吸开始时的床层状态与吸吸力强弱。所有这些都受控于跳汰制度，其中最主要的调整措施都集中反映着风阀的结构性能。

#### (1) 床层松散度与风阀结构

从风阀结构与跳汰制度看,影响床层松散度的众多因素中主要的是洗水振幅。由它决定物料松散的最大空间。洗水振幅基本上靠跳汰频率和周期以及排气口面积进行调整。实质是控制液流速度及运动时间。通常是,进气时间越长,空气压力越大,则洗水振幅越高。前者给洗水以较长的运动时间,后者使液流速度加快。另一方面排气时间越长,排气前后空气室中的压差越大,液流振幅则越高。同样是前者增加洗水运动时间,后者加快液流速度。所以洗水振幅决定于进气期和排气期的时间,即决定于跳汰周期。

跳汰频率对整个跳汰周期中各阶段的时间都按比例增减,但对水速的影响却较复杂。从总的趋势看,跳汰频率低,则洗水运动时间长,振幅高,所以粗煤泥多用高频,末煤跳汰频率高于55次/分,块煤跳汰频率低于45次/分,不分级跳汰频率为30~60次/分左右。采用这样的跳汰频率所形成的洗水振幅,一般能满足床层松散的需要,得到较好的洗选效果。

风阀的进气口与排气口一般都由连通风包和连通大气的小风门控制。通常所说的进气口或排气口面积,多指小风门的开口面积。进气口开口面积越大则由风包进入空气室的风量越多,因而升压速度快,最高风压形成的时间短,既可以提高洗水的加速度,又可以增大洗水的最高速度,因此洗水振幅高,物料松散的空间大,在正常情况下床层松散度也大。反之则床层松散度减小;排气口面积打开越大,空气室压力下降越快,液流下降速度随之而加快,洗水振幅得到提高。进气口与排气口面积对洗水振幅的影响是互相制约的,只有同时加大进排气面积才能提高洗水振幅。

通过跳汰周期、跳汰频率和进排气口面积的调整都可以改变洗水振幅和影响床层松散度,但对跳汰过程全面考虑时,通过洗水振幅和影响床层松散度的作用,主要用改变进气口面积的办法实行。原因是它可以使空气室内压力迅速提高,给床层以较强烈的爆发力,使其整体抬起,短时间内达到最高值,无形中增加了物料松散和悬浮的时间,使它能更充分的分层。

## (2) 床层松散规律与风阀结构

床层松散规律具有多样性和灵活性,但风阀结构与跳汰制度看,起决定作用的仍然是跳汰频率、跳汰周期与进排气口面积。

跳汰频率对床层松散规律的影响,首先是它对床层起振状态和密集过程的作用。在跳汰周期和风口面积已定的情况下,增多频率即可加快空气室内的升压速度,以较大的爆发力驱动液流运动。反之,升压缓慢液流无力。调整频率会使床层起振、松散和透筛等三个因素同时按比例起变化。在生产实践中,在改变频率的同时,要辅以其它参数的调整,例如调整跳汰周期或改变风水用量等等。

跳汰周期是调整床层松散规律的基本措施。各种床层相互搭配是否恰当取决于它们的时间比例。不同粒级范围的跳汰方法以及筛分浮沉组成不同的原煤

都要求相应的床层松散规律。如果将每个跳汰周期分为  $360^\circ$ 。进气、膨胀、排气和压缩各期角度的任何变化都直接影响着床层规律的变化，因此跳汰周期是调整和控制床层松散规律性的基本措施。

调整进气口面积的实质是改变空气室中的升压速度及进气结束时所形成的最高压力值。进气口面积减小时，空气室内升压速度低，达到最高压力的时间晚，其持续时间也短。反之，随着进气口面积的增大，高压形成时间短持续时间长。一直到小风门的开口面积与卧式风阀转子进气口面积相等时为止，以后继续扩大小风口开口面积已经不再起作用；调整排气口面积的实质是改变空气室内的降压速度及排气结束的剩余压力。随着排气口面积的减小，空气室的降压速度下降。排气口面积越小则余压越高。另外，对床层松散度及其变化规律具有重大影响的不仅是进气口和排气口面积本身，而且这些面积全开或全关的角度的作用也很重要。

尽管跳汰周期、跳汰频率和气口面积的变化都可以改变床层松散规律，但各种规律的变化方式是各不相同的。因此它们的作用只能合理搭配，而不能互相代替。

#### 4、床层的透筛作用

床层的透筛作用是决定不分级跳汰和末煤跳汰效果好坏、跳汰机处理能力大小的关键之一。它出现在排风期，在洗水反向下降时开始，一直持续到洗水回头向上运动为止。借助返筛水流的动力，大比重的小颗粒通过大颗粒的间隙而进入同比重大颗粒层，改善由粒度影响造成的大小颗粒的比重层错位。

透筛作用在于把小于跳汰机筛板筛孔的矽石或中煤在未到排料闸门处部分地通过筛孔排出。透筛作用是否有利于分选，一方面受床层起振状态和松散过程的影响，另一方面与透筛期出现的时机和透筛力强弱有关。

透筛作用是松散过程的继续和发展，反过来又影响松散过程。如果透筛作用出现过早，则整起的床层可能得不到松散或床层松散不充分，小而轻的颗粒不仅难于浮到上层，而且会被排入重产品中。如果透筛作用出现偏晚，则床层返筛后已经压实，难以发挥作用，使该透筛的颗粒不能透筛，该改善的比重层错位得不到纠正。透筛作用的早与晚、强与弱，决定于风阀排风口的全开角度及排风期。

#### 5、床层中物料的分选规律

在一个跳汰周期中，床层首先由紧密转向松散。在此过程中，床层悬浮体产生两种现象。一是将前一脉动末期，由于偶然原因，混入各等压强颗粒层中的非等压强颗粒释放出来，使其靠拢与其压强相等的平衡层中，从而纯化该颗粒层的组成；另一方面，松散后的床层悬浮体密度降低，必然会增大分选密度差。这就是说床层最松散时，相当于物料的预选期即物料的粗选。在由松到紧的过渡时期，容积浓度逐渐增大，同一层位的分选密度逐渐接近，从而改善了

松散期的预选结果，达到精选的目的，经多次反复粗选，精选完成跳汰过程。

物料分层后，在垂直面上的分布并非从上到下按密度从低到高连续变化，而存在密度分布中心。在每一密度分布中心都有相邻密度中心的混杂现象，每一筛分浮沉级粒群基本上都集中在某一床层深度上，并有部分颗粒离开分布中心向上下两个方向扩散而污染其它筛分浮沉级，其偏离程度决定于粒群的平均粒度，平均密度和重量。颗粒在床层中的分布规律是：

1. 在跳汰床层水平面上，颗粒按等压强分布；

2. 在床层垂直面上，每个筛分浮沉粒群都是呈正态分布，可用正态密度函数和正态分布函数来表述<sup>[17]</sup>。

跳汰选煤是极为复杂的过程。在跳汰过程中，有很多随机变动的因素，同时，这些因素之间又互相制约、互相影响和互为条件，致使跳汰分选的理论分析与科学研究遇到了种种困难。虽然已提出了许多跳汰假说或跳汰理论模型，从不同方面或不同角度对跳汰过程进行了研究与探讨，但都只是反映了跳汰分选过程中某方面的规律性，不能成为大家所公认的理论。本章通过在现场观测、采样，对煤样进行筛分、浮沉，了解跳汰机排料道附近，即将进行轻重产品分离的床层密度组成情况，初步确定新型排料装置铲板的位置和闸门的开度。

现场使用的跳汰机是 XD2532B 型筛下空气式跳汰机，分为两段：矸石段和中煤段。矸石段有两室，中煤段三室。根据本论文的要求及跳汰机的结构特性，在跳汰机内选取了 7 个采样点。采样点的布置如图 4.1 所示：

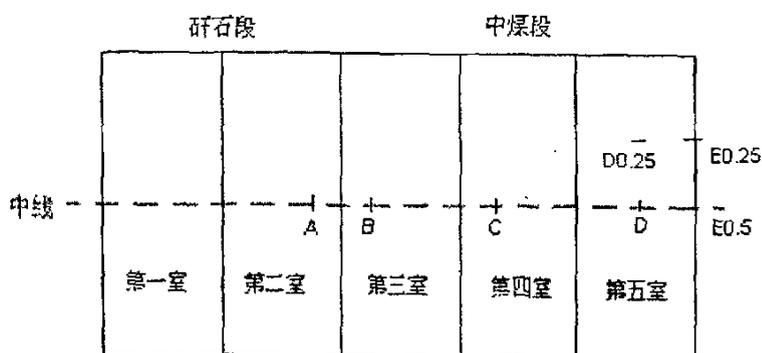


图 4.1 采样点平面布置图

采样点 A 处于矸石段末端、排料口前部，此处物料经过了跳汰机第一室、第二室跳汰过程，中煤段采样点 B、C 分别设在第三室、第四室的始端，D 点和 D0.25 点设在第五室的浮标以上位置，能代表物料料在中煤段的分层过程，E 点和 E0.25 点设在第五室末端，此处物料经过了整个跳汰机，经历全程跳汰过程，等待排料。各采样点的由上而下分 5 层进行取样，各层厚度约 80mm，在 A 处由上而下各层采样量分别为 4.53kg、5.67kg、4.55kg、3.86kg、5.18kg，在 B 处由上而下各层采样量分别为 3.89kg、5.56kg、4.59kg、3.88kg、4.91kg，在

C 处由上而下各层采样量分别为 3.26kg、3.05kg、4.1kg、4.78kg、3.65kg，在 D 处由上而下各层采样量分别为 3.19kg、4.03kg、5.13kg、3.98kg、4.88kg，在 D0.25 处由上而下各层采样量分别为 5.13kg、4.72kg、3.58kg、4.31kg、5.43kg，在 E0.5 处由上而下各层采样量分别为 5.55kg、5.88kg、4.98kg、7.19kg、6.98kg，在 E0.25 处由上而下各层采样量分别为 4.59kg、3.81kg、5.16kg、4.83kg、3.72kg。在跳汰机停机后的静态床层中采样，反复多次采样后，对煤样进行筛分和浮沉实验，分析煤样的粒度、密度组成。选煤方法：跳汰；原煤牌号：无烟煤；末精煤产率/灰分：55.72%/9.5%；末精煤粒度 $\leq 25$  mm，灰分 $\leq 10\%$ ；入洗粒级 75 mm $\sim$ 0.5mm。

#### 4.2 跳汰模拟实验的具体步骤

在现场试验采样后，煤样在本系实验室进行浮沉试验。实验室设备比较齐全，主要设备有制样机、电热鼓风干燥箱、箱式电阻炉、电子天平、浮沉桶及浮沉药剂，还有 25mm、13mm、6mm、3mm 和 0.5mm 等孔径的手工筛和振动筛等。以上设备能够满足筛分、浮沉及灰分测定等试验的要求，可以处理试验过程中所采集的煤样。将上述煤样带回实验室，先进行筛分实验，分成不同的粒级，进行粒度分析；然后再将其混合，进行浮沉实验，分成不同的密度，进行密度分析。

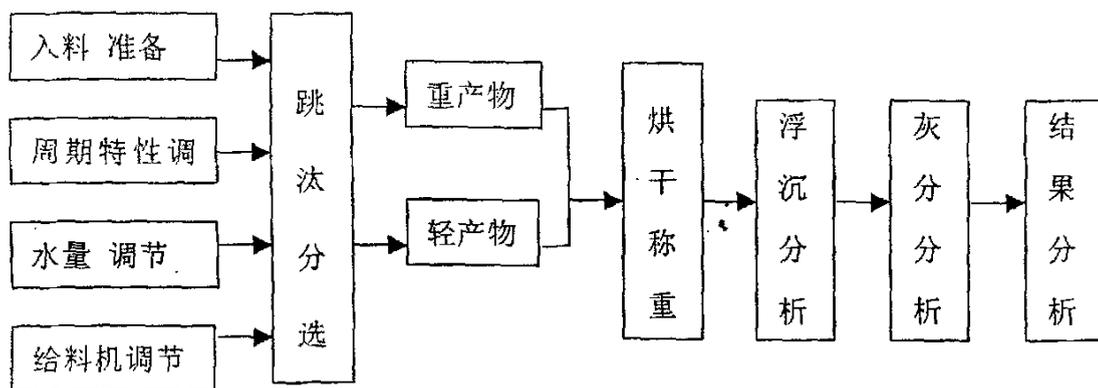


图 4.2 跳汰模拟实验的原则流程图

##### (1) 筛分

筛分过程按 GB/T 477-1998“煤炭筛分实验方法”和 MT57-93“煤炭筛分实验方法”进行，把原煤筛分成 $>25$ 、25 $\sim$ 13、13 $\sim$ 6、6 $\sim$ 3、3 $\sim$ 0.5 等五个粒度级别。

##### (2) 浮沉

浮沉实验按 GB478-87“煤炭浮沉试验方法”进行，重液密度为 1.30、1.40、1.50、1.60、1.80kg/L。煤样的灰分按 GB-212-77 规定进行。

### (3) 灰分测定

煤样的灰分按 GB-212-77 规定进行。

浮沉实验后样品灰分的测定是 GB-212-77 规定进行,主要设备有制样机、电热鼓风干燥机、电子天平等。图 4.2 为跳汰模拟实验的原则流程图。

跳汰分选可分为两个基本过程: 1. 物料在脉动水流作用下基本按密度分层; 2. 已分层产品的分割和分离, 不同密度组成的物料跳汰后, 在床层中按密度由低到高自上而下分布。如果能得到不同性质颗粒在床层中的分布形态和分布函数, 则可以预测在床层任意高度上分割时产品的质量指标, 绘制出产品的分配曲线。由此可见研究颗粒在床层中的分布形态的重要性。

### 4.3 床层粒度分析

由于跳汰机内水流无法达到匀速, 各处必然存在水流速度差。所以颗粒周围介质流速的变化将使颗粒表面各点受到不同的压力, 产生对颗粒运动的阻力。因而颗粒的形状不同, 即使密度相同, 颗粒受水流的影响效果也会不同。必然对以重力为主要分层因素的跳汰洗选效果产生一定影响。现对各采样点的煤样进行筛分实验, 分析粒度对分层效果的影响。在 A、B、C、D、D0.25、E、E0.25 处, 各粒度级物料在各层中的分布情况, 如表图所示。

性质不同的颗粒, 被等速上升水流冲起高度是不同的。在同一悬浮高度处, 干扰沉降速度小于在此高度处的间隙水速的颗粒将继续上升, 而干扰沉降速度恰好等于在此高度处的间隙水速的颗粒就地悬浮。因此可以说, 性质不同干扰沉降速度的颗粒, 按悬浮体自上而下间隙水速的不同, 可个自悬浮在不同的高度, 整个悬浮体便呈现了分层的现象。

表 4.1 各粒度级物料在 A 处各层的分布情况

粒度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)
>25	1.99	4.23	16.48	20.72	22.39
25~13	16.34	17.28	35.39	36.01	37.85
13~6	23.18	27.69	27.47	20.73	19.11
6~3	18.54	18.70	10.11	8.29	8.49
<3	39.95	32.10	10.55	14.25	12.16

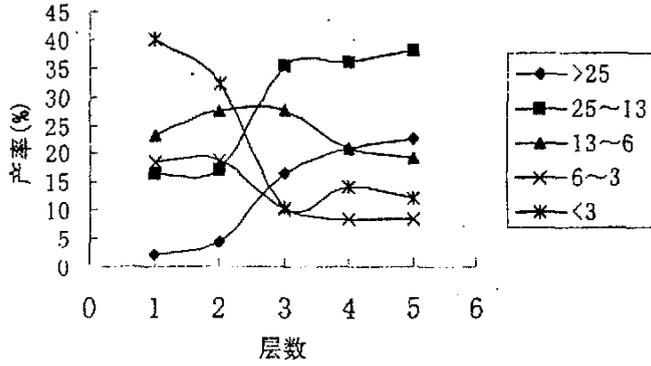


图 4.3 A 处各层的粒度分布状况图

表 4.2 各粒度级物料在 B 处各层的分布情况

粒度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率 (%)				
>25	2.31	5.70	9.86	9.79	11.68
25~13	16.20	24.38	37.34	30.15	35.85
13~6	22.62	24.64	27.75	28.09	24.03
6~3	17.74	17.45	12.85	14.18	17.65
<3	41.13	27.83	12.20	17.79	10.79

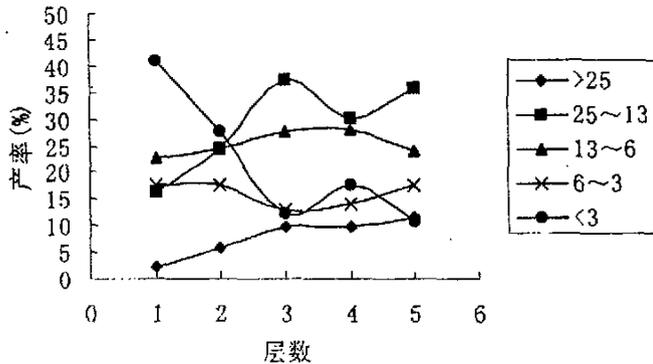


图 4.4 B 处各层的粒度分布状况图

由以上图表可以看出,由 A 到 B 曲线趋势大致一致, >25 的大粒度物料所占的比重大体上呈现出随床层深度的加深而增大的趋势。说明大粒度矽石在重力的作用下,克服介质浮力和介质阻力作用而沉降到床层底部。25~13 粒度的

物料所占的比重大体上呈现随床层深度的加深先增加后减少或基本不变,也就是说中等粒度级物料主要集中在床层的中下部,由于密度不同而粒度相同的粒群,悬浮分层的结果是细粒集中在上层,粗颗粒位居下层,说明粒度大者密度也较大者较多。

从 A 到 B, <13 粒度级物料在床层中的分层是由随着床层深度的加深而减小到随着床层深度的加深而基本不变,同时大粒度级物料的占有量在床层上部也稍有升高。说明粒度小者密度也较小者较多。可以推测,物料从矸石段末端跃过溢流堰到达中煤段,底层的大粒度物料窜到了床层的上部,造成床层上层中的大粒度级、大密度级物料的含量增高,在矸石段初步分层稳定的床层到中煤段出现了一定程度的紊乱状态。

表 4.3 各粒度级物料在 C 处各层的分布情况

粒度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)
>25	0	0.66	4.39	17.99	28.22
25~13	8.59	23.93	41.96	40.59	32.33
13~6	32.82	38.36	33.90	25.73	24.11
6~3	24.85	19.34	12.68	8.79	8.22
<3	33.74	17.71	7.07	6.90	7.12

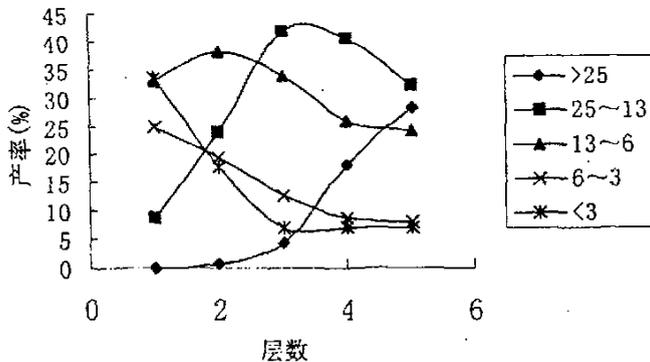


图 4.5 C 处各层的粒度分布状况图

在 C 处 <13 粒度级物料所占的比重大体上呈现出随床层深度的加深而减小的趋势,说明床层上部的细小颗粒主要是轻密度级物料。在 B 处 13~3 粒度级物料所占的比重大体上呈现出随床层深度的加深而增大的趋势,说明由矸石段到中煤段的初始阶段 B 处不稳定,使在矸石段稳定的床层再一次紊乱,到了中煤段

的 C 处床层又基本趋于稳定,床层又基本按粒度进行分层。 $>13$  粒度级物料所占的比重大体上呈现出随床层深度的加深而增大的趋势。

表 4.4 各粒度级物料在 D 处各层的分布情况

粒度级	第一层	第一层	第一层	第一层	第一层
	产率 (%)				
$>25$	0	9.43	22.81	29.90	21.10
$25\sim13$	22.26	36.48	43.08	35.93	39.96
$13\sim6$	32.60	32.25	23.00	22.36	24.59
$6\sim3$	19.44	12.16	5.65	6.78	7.79
$<3$	25.70	9.68	5.46	5.03	6.56

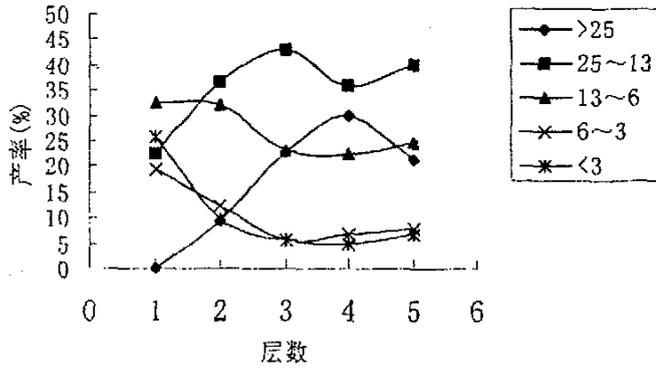


图 4.6 D 处各层的粒度分布状况图

表 4.5 各粒度级物料在 E0.5 处各层的分布情况

粒度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率 (%)				
$>25$	32.25	30.95	30.13	31.71	24.07
$25\sim13$	33.87	35.72	33.53	34.77	37.11
$13\sim6$	20.54	20.07	22.69	21.84	24.20
$6\sim3$	7.93	8.16	7.83	5.42	8.60
$<3$	5.41	5.10	5.82	6.26	6.02

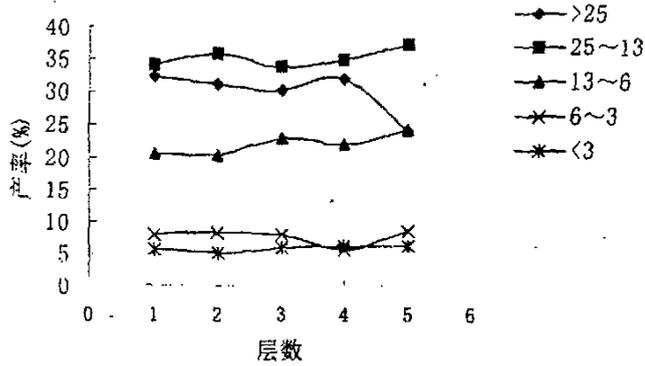


图 4.7 E0.5 处各层的粒度分布状况图

观察对比 D 和 E0.5 两处粒度分布状况图及粒度分布状况表,可以发现物料在采样点 D 处, >13 的大粒度物料所占的比重大体上呈现出随床层深度的加深而增加的趋势, <13 粒度的物料所占的比重大体上呈现随床层深度的加深而减少趋于基本不变, 各粒度级在上面三层中都没有很好的分层, 掺杂比较严重, 下面两层则各粒度级的物料则有良好的分层, 说明床层比较稳定; 物料在采样点 E0.5 处, 各粒度级在各层中的分布情况已基本趋于水平直线, 曲线更平滑, 说明接近排料口处床层基本稳定时各粒度级在各层中的产率大致相同, 此时按粒度分选效果不好, 物料在床层中主要不是按粒度分层的, 不能按照物料的粒度特性确定分离线, 要再进一步结合密度特性确定铲板的插入位置。

表 4.6 各粒度级物料在 D0.25 处各层的分布情况

粒度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率 (%)				
>25	5.46	10.59	37.44	18.33	11.97
25~13	16.57	32.20	27.37	38.51	44.76
13~6	26.12	27.12	18.99	25.06	25.41
6~3	20.86	14.62	7.82	8.82	8.84
<3	30.99	15.47	8.38	9.28	9.02

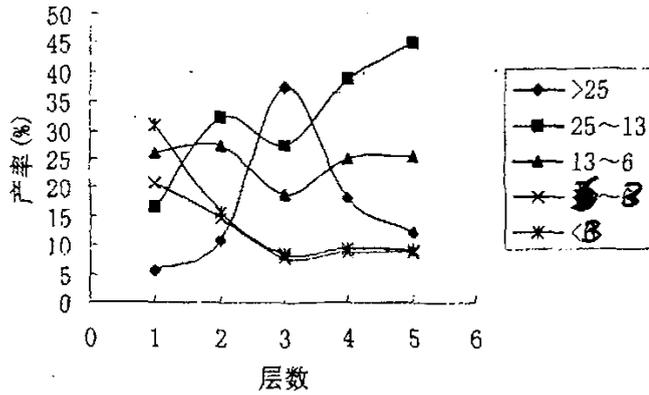


图 4.8 D0.25 处各层的粒度分布状况图

表 4.7 各粒度级物料在 E0.25 处各层的分布情况

粒度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)
>25	10.68	21.26	22.87	20.29	15.59
25~13	25.71	24.41	32.56	32.92	33.06
13~6	16.12	25.20	23.06	24.46	27.15
6~3	22.74	13.38	10.27	10.68	12.63
<3	24.75	15.75	11.24	11.65	11.57

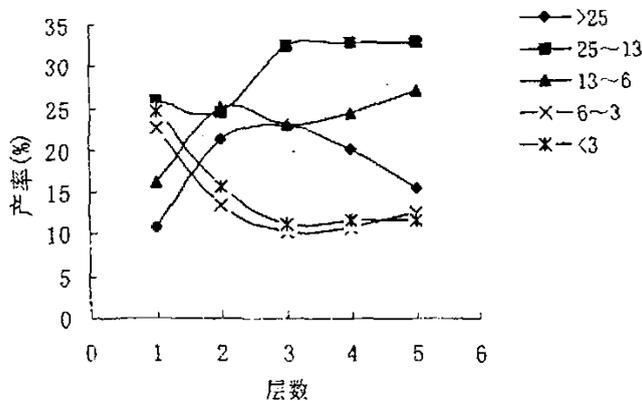


图 4.9 E0.25 处各层的粒度分布状况图

观察对比 E0.25 和 D0.25 两处粒度分布状况图及粒度分布状况表, 可以发现 D0.25 处, >25 粒度级的物料在第三层中最多, 25~13 粒度级的物料呈现随床层深度的加深而增加的现象, 13~6 粒度级的物料呈现随床层深度的加深而基

本不变的现象, <6 粒度级的物料呈现随床层深度的加深而减少的现象, 而 E0. 25 处, 物料的分层情况大致与 D0. 25 处相同, 比 D0. 25 处的物料按粒度分层情况更加好, 说明接近排料口处床层分层已基本完成时床层基本稳定, 此时按粒度分选效果较好。

由以上粒度分析知, 刚进入跳汰机的物料, 其筛分组成较均匀。必然将一些低密度物料压在最下层, 而将部分高密度物料堆积在最上层。它们要在跳汰过程中经历床层的一定高度, 进入与它们压强相同的颗粒层。同时由以上曲线图可以看出随着床层的加深, 各粒度级间的分层效果逐渐变好。但总的情况是物料按粒度分选的效果是不理想的, 为此我们要进一步对物料进行密度分析。

#### 4.4 床层密度分析

了解了物料的密度组成, 就可知物料按密度差别进行重力分选时的难易程度, 从而为确定分选方法、制定分选工艺流程及选择分选设备提供了重要的依据, 浮沉实验部分结果如下图所示。

表 4.8 A 处各层煤样的产率数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)
1.3~1.4	63.39	54.23	17.06	26.50	19.60
1.4~1.5	25.80	33.08	28.60	22.68	15.20
1.5~1.6	4.42	5.38	9.15	6.56	6.00
1.6~1.8	2.46	3.46	13.50	9.02	5.60
>1.8	3.93	3.85	31.58	35.25	53.60
累计	100	100	100	100	100

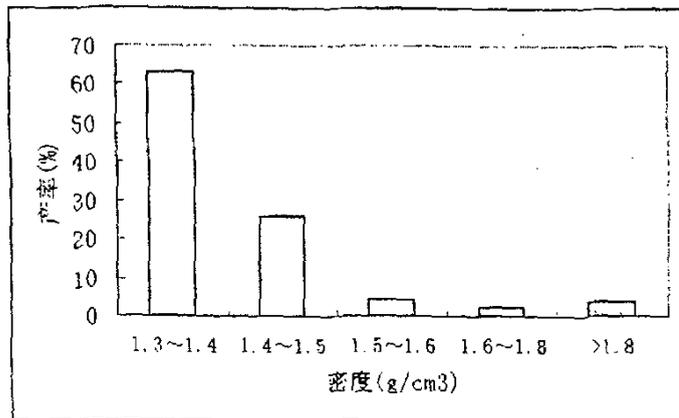


图 4.10 A 处第一层的密度分布状况图

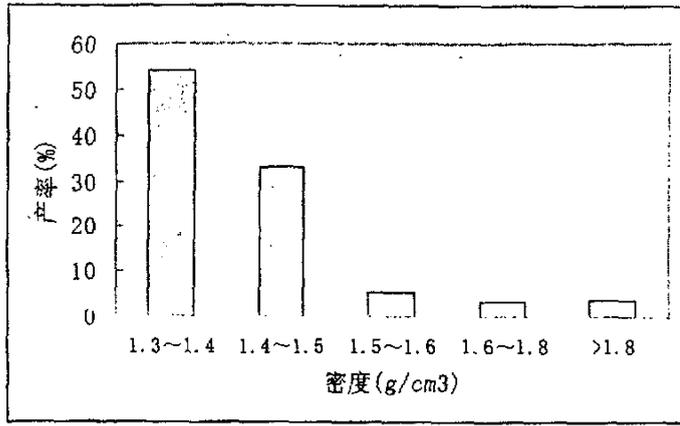


图 4.11 A 处第二层的密度分布状况图

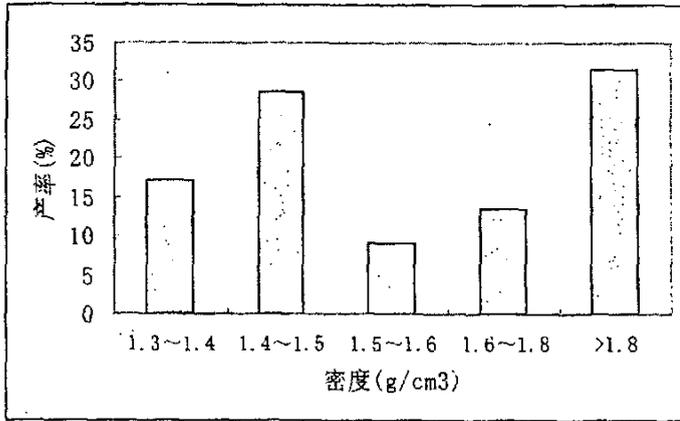


图 4.12 A 处第三层的密度分布状况图

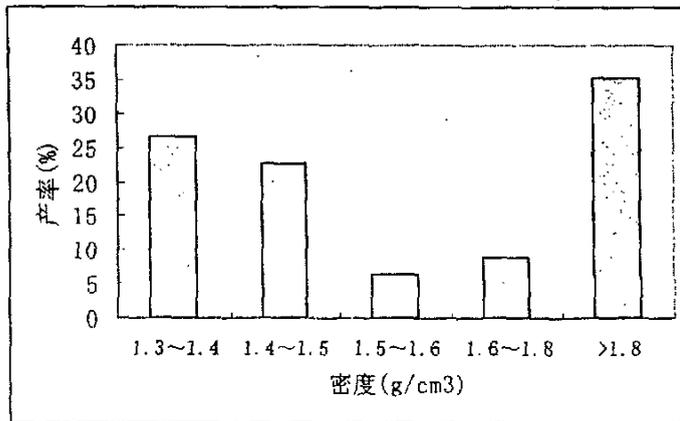


图 4.13 A 处第四层的密度分布状况图

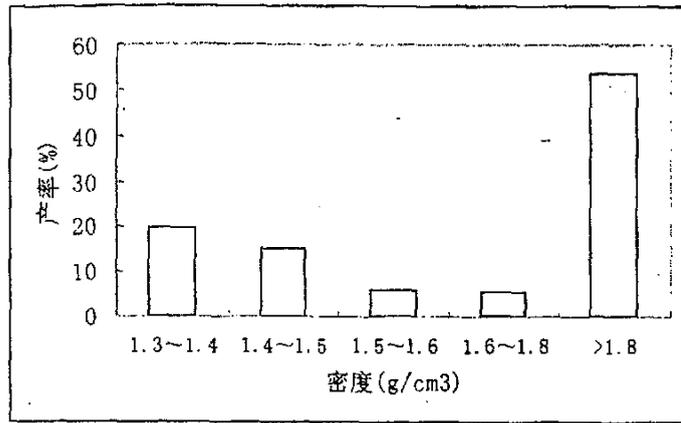


图 4.14 A 处第五层的密度分布状况图

表 4.9 A 处各层煤样的灰分数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	灰分 (%)				
1.3~1.4	4.37	4.14	4.39	4.78	4.40
1.4~1.5	14.77	9.26	9.58	11.00	9.73
1.5~1.6	22.25	19.94	20.57	20.25	20.36
1.6~1.8	32.73	31.96	32.66	32.68	29.10
>1.8	71.20	72.50	78.09	83.30	84.47
累计	11.17	10.28	34.44	37.40	50.47

观察图 4.10~图 4.14, 可以发现, A 处随着床层深度的增加, 密度级>1.8 的占有量呈现出逐渐升高的趋势。而<1.8 密度级, 随着床层深度的增加, 密度级物料的占有量逐步减少。第三层是过渡层, 高密度与低密度物料占有量的差距减小了。由此可以看出, 经过跳汰机研石段两室的脉动水流及水平水流的作用, 原本混合均匀的入洗原煤呈现出初步的按密度分层状态。在此可用等沉比的观点解释, 即物料在分选前, 预先进行粒度分级(筛分), 确保密度不同的物料, 能按沉降末速度的大小分开, 让密度这一物理性质, 在分选过程中起主导作用。在床层中, 上层高密度级物料占有量都相对较小, 在下层低密度级物料的占有量都相对较小, 说明在 A 处, 煤研分层效果较理想, 而且从图 4.9~图 4.13 可以看出, 排研口设置在此处是较佳位置。

表 4.10 B 处各层煤样的产率数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)
1.3~1.4	42.98	38.59	35.68	35.07	22.17
1.4~1.5	47.19	49.62	42.73	48.22	42.22
1.5~1.6	5.06	4.94	6.82	4.93	12.37
1.6~1.8	2.53	3.42	7.27	3.84	14.71
>1.8	2.25	3.42	7.50	7.95	8.53
累计	100	100	100	100	100

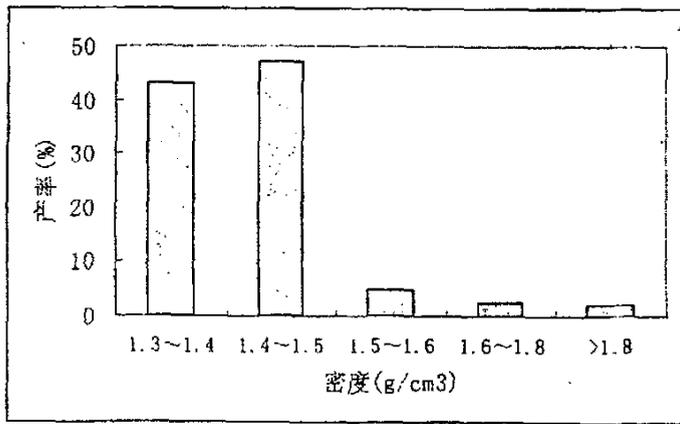


图 4.15 B 处第一层的密度分布状况图

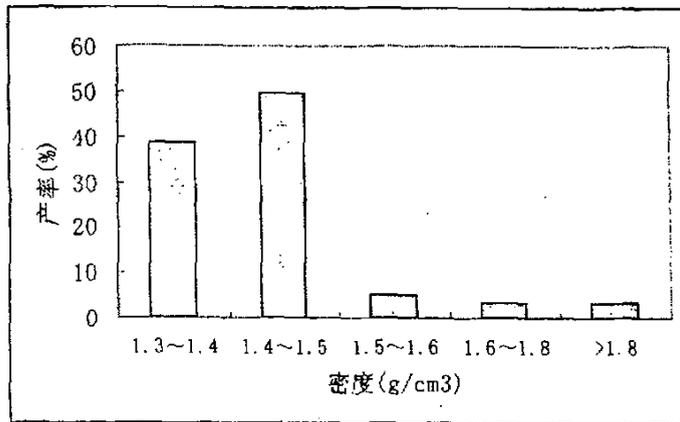


图 4.16 B 处第二层的密度分布状况图

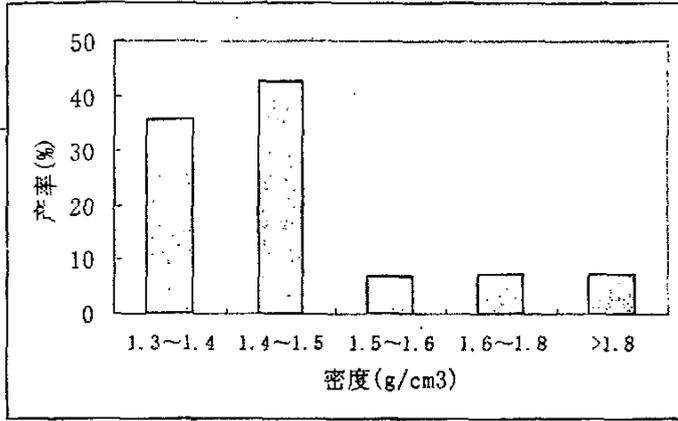


图 4.17 B处第三层的密度分布状况图

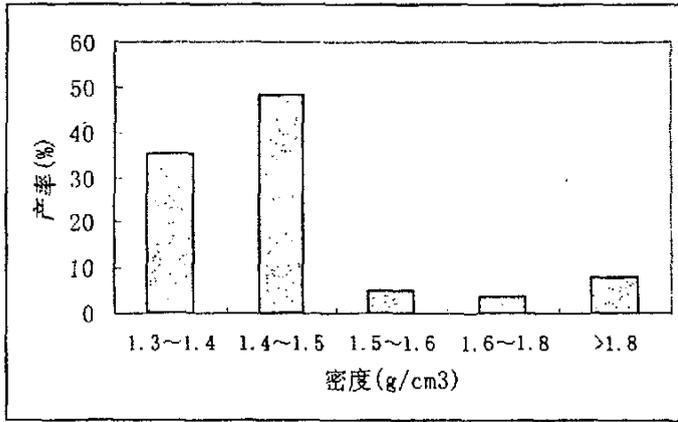


图 4.18 B处第四层的密度分布状况图

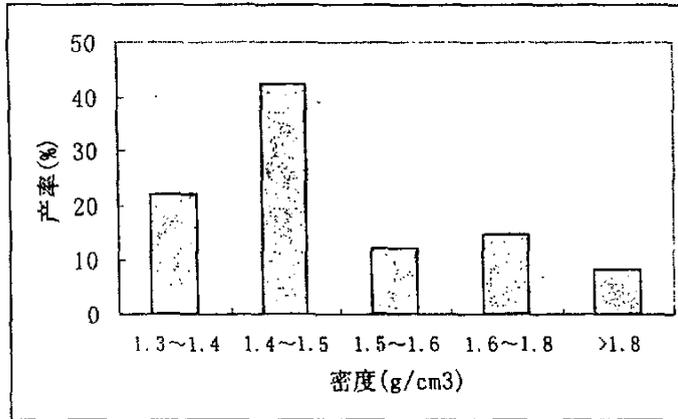


图 4.19 B处第五层的密度分布状况图

表 4.11 B 处各层煤样的灰分数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	灰分 (%)				
1.3~1.4	3.46	3.80	30.25	33.55	12.70
1.4~1.5	8.14	8.13	30.47	76.79	66.92
1.5~1.6	20.14	20.16	71.55	35.54	12.72
1.6~1.8	30.34	32.51	30.27	76.86	66.84
>1.8	66.74	70.14	30.54	33.59	12.71
累计	8.62	10.01	33.18	56.17	43.56

经过跳汰机一段的初步分层及少量排矸，煤流越过矸石段溢流堰进入跳汰机的第二段。采样点 B 即在此处。从 B 处各层煤样密度分布状况图中可以看出，床层按密度分层的趋势更加明显。密度小的颗粒大部分在上层，第 1 层物料中 <1.5 密度级的占有量为 90.17%，第 2 层为 88.21%，第 3、4、5 层分别为：78.41%、83.29%、64.39%，随着床层深度的加深，<1.5 密度级的物料呈现减少的趋势，且减少的幅度较大；相反，密度大的物料在上层含量相对少，在底层含量多，随着床层深度的增加，>1.5 密度级的含量逐渐增加，增幅也较大。采样点 B 与采样点 A 相比较有些不同，就 A、B 两处煤样的浮沉实验结果进行对比，B 处 >1.8 密度级的物料在个层中的产率比 A 处有明显的减少，说明经过矸石段的排矸，大部分的高密度物是矸石已在 A 处排走，重产物与轻产物随着床层的变化而变化不明显，过渡层被破坏，物料分层情况不好。由灰分数据表可以看出经过跳汰机一段的初步分层及少量排矸后，煤流越过矸石段溢流堰进入跳汰机的第二段，灰分明显降低，说明灰分较大的矸石已在 A 处排走，但相对而言，>1.8 密度级的物料的灰分在床层上层的数值较大。原因是：床层越过溢流堰时，轻密度物料进一步借脉动水流的作用浮向上层，大密度的物料也进一步下沉，分层情况也就更加明显。但由于颗粒的惯性作用、水介质及颗粒之间作用力的影响，也有部分原本处于床层中下部的大密度物料悬浮在床层的上部，以致在 B 处上部床层的含矸量增加，出现了一定程度的混乱状态。

表 4.12 C 处各层煤样的产率数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)	产率(%)
1.3~1.4	40.38	30.16	17.82	24.62	14.76
1.4~1.5	51.74	56.07	67.57	57.88	60.17
1.5~1.6	5.05	6.56	8.17	10.15	13.65
1.6~1.8	2.21	5.90	4.95	5.83	8.91
>1.8	0.63	1.31	1.49	1.51	2.51
累计	100	100	100	100	100

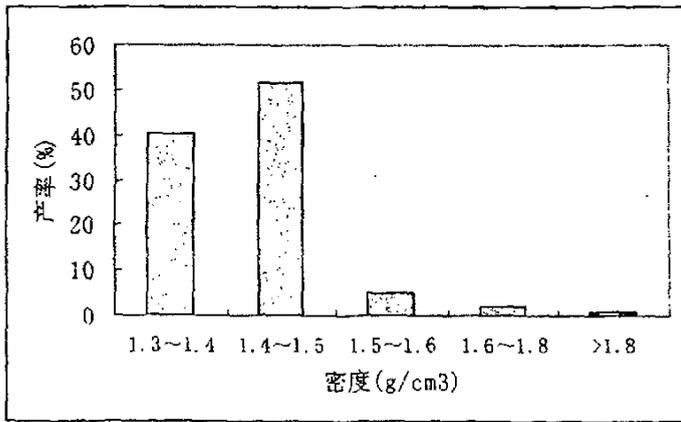


图 4.20 C 处第一层的密度分布状况图

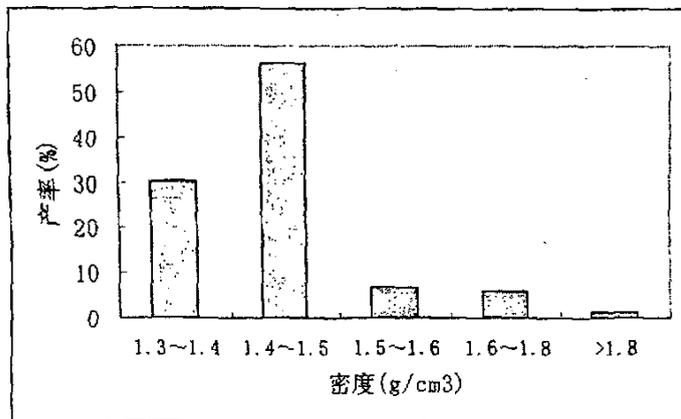


图 4.21 C 处第二层的密度分布状况图

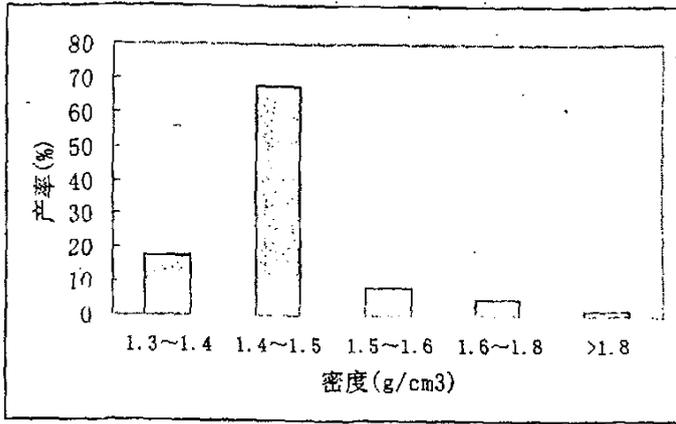


图 4.22 C处第三层的密度分布状况图

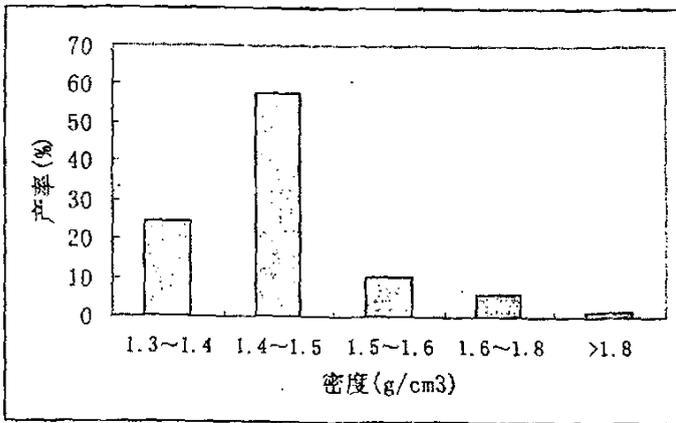


图 4.23 C处第四层的密度分布状况图

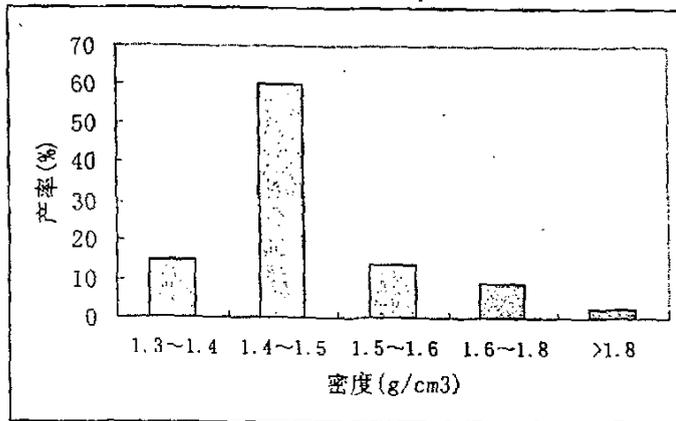


图 4.24 C处第五层的密度分布状况图

表 4.13 C 处各层煤样的灰分数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	灰分 (%)				
1.3~1.4	3.44	3.43	13.88	4.37	3.64
1.4~1.5	9.83	8.05	8.60	9.36	8.76
1.5~1.6	20.88	20.03	20.25	20.61	20.43
1.6~1.8	31.53	32.92	30.89	31.94	32.01
>1.8	62.30	64.37	65.95	64.63	63.82
累计	8.62	9.65	12.45	11.42	13.05

从图 4.20~图 4.24 可以看出,经过中煤段的第一室的脉动水流的脉动作用, C 处的床层按密度分层效果进一步得到改善(相对于 A、B 处)。1.3~1.4 密度级占有量随床层深度的加深而减少, >1.4 密度级占有量随床层深度的加深而增加, 但各层中的各密度级物料的含量变化很小或者已经基本没有变化, 低密度颗粒随床层深度的加深而减小, 但是高密度颗粒没有随床层深度的加深而增加, 没有出现过渡层, 说明床层的分层的稳定程度不够。同时由浮沉实验结果分析图还可以看出, 底层低密度物料的含量和上层的高密度含量还是比较大的, 床层还需进一步的跳汰分层作用。

表 4.14 D0.25 处各层煤样的产率数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率 (%)				
1.3~1.4	63.06	41.51	10.80	11.76	12.66
1.4~1.5	27.96	45.81	39.20	21.41	16.96
1.5~1.6	4.90	6.88	13.64	11.29	7.26
1.6~1.8	2.04	3.87	23.30	11.29	9.68
>1.8	2.04	1.90	13.07	44.24	53.45
累计	100	100	100	100	100

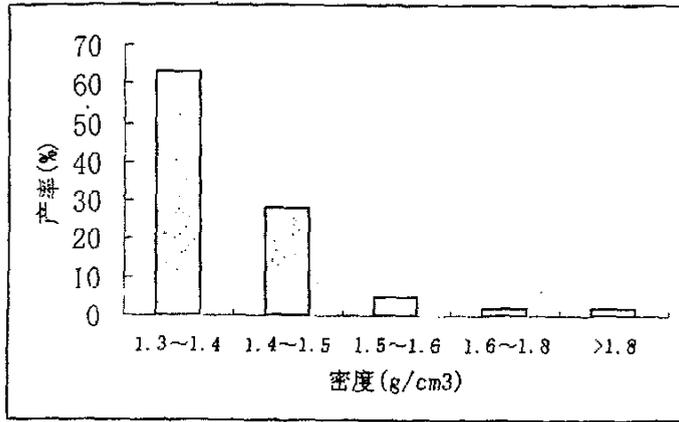


图 4.25 D0.25 处第一层的密度分布状况图

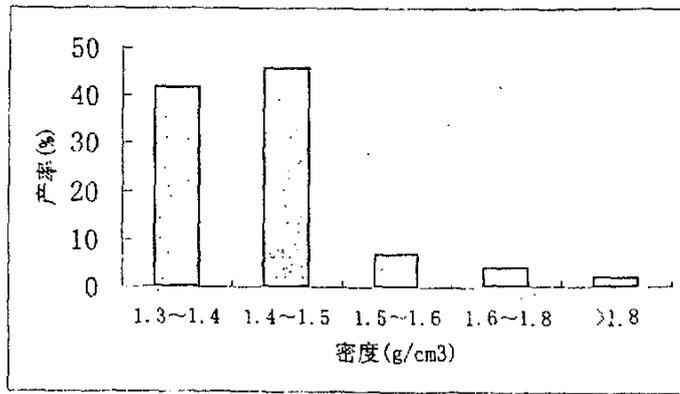


图 4.26 D0.25 处第二层的密度分布状况图

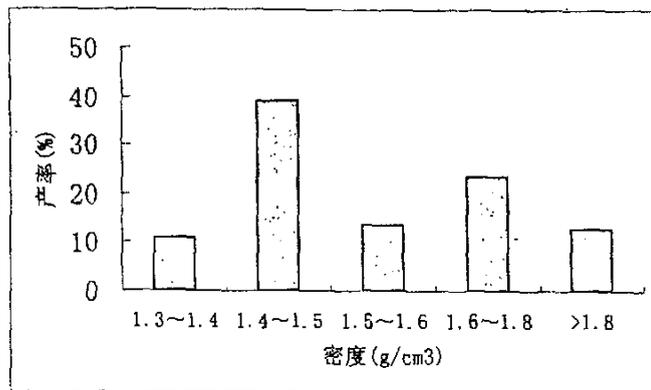


图 4.27 D0.25 处第三层的密度分布状况图

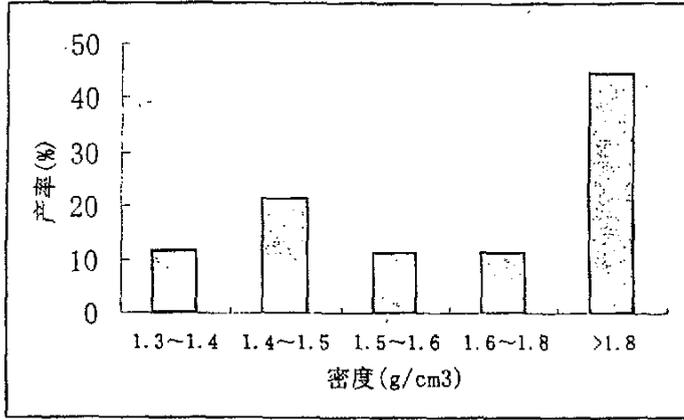


图 4.28 D0.25 处第四层的密度分布状况图

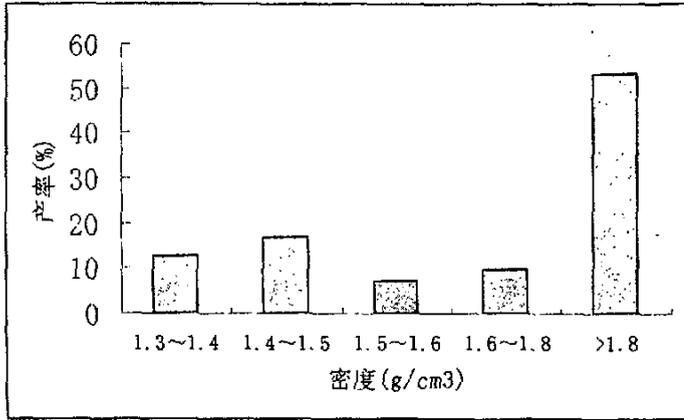


图 4.29 D0.25 处第五层的密度分布状况

表 4.15 D0.25 处各层煤样的灰分数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	灰分 (%)				
1.3~1.4	4.45	4.82	5.16	5.13	5.72
1.4~1.5	10.24	10.15	10.99	11.56	11.64
1.5~1.6	20.58	21.02	21.84	20.63	22.07
1.6~1.8	33.51	32.11	33.03	33.02	35.59
>1.8	26.87	67.54	56.65	77.36	78.75
累计	7.91	10.62	22.94	43.36	49.84

在 D0.25 处, 由图 4.25~图 4.29 可以发现, >1.5 密度级的物料占有量随着床层的加深而逐渐减少, <1.5 密度级的物料占有量随着床层的加深而逐渐增大, 尤其是 >1.8 密度级的物料。随着床层的加深高密度物逐渐增多, 低密度物逐渐减少, 说明此处床层分离效果明显; 说明物料在床层中受脉动水流的作用按密度分层, 低密度级物料向床层表层运动, 高密度级物料向床层底部运动, 说明接近排料口处床层已经基本进入稳定状态, 分层已基本完成。这说明随着跳汰距离的加长, 床层按密度分层状况愈来愈好。在 D0.25 处, 床层中密度分布的总体状况是: 随着床层深度的加深, 大密度级物料在煤样中的比重有明显增加, 而小密度级在煤样中的比重大幅减少, 趋势非常明显, 第三层是过渡层, 高密度与低密度物料占有量的差距减小了。高低密度物料的相互污染的情况要比 A、B、C 三处轻。

表 4.16 E0.25 处各层煤样的产率数据表

密度级	第一层	第一层	第一层	第一层	第一层
	产率 (%)				
1.3~1.4	56.12	9.09	7.83	12.50	12.70
1.4~1.5	24.05	12.83	5.82	10.38	8.11
1.5~1.6	11.14	15.51	12.65	8.47	6.49
1.6~1.8	4.90	39.84	43.78	43.64	35.68
>1.8	3.79	22.73	29.92	25.00	37.03
累计	100	100	100	100	100

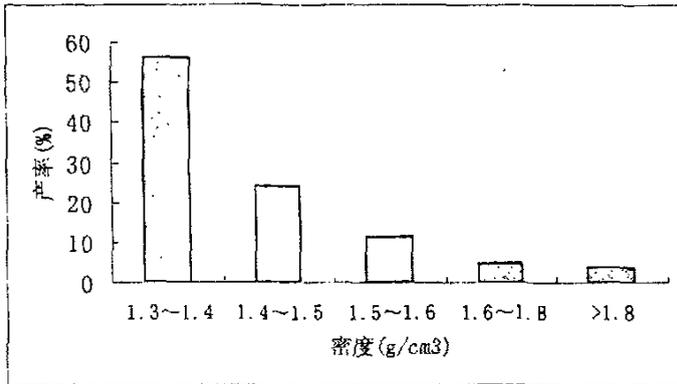


图 4.30 E0.25 处第一层的密度分布状况图

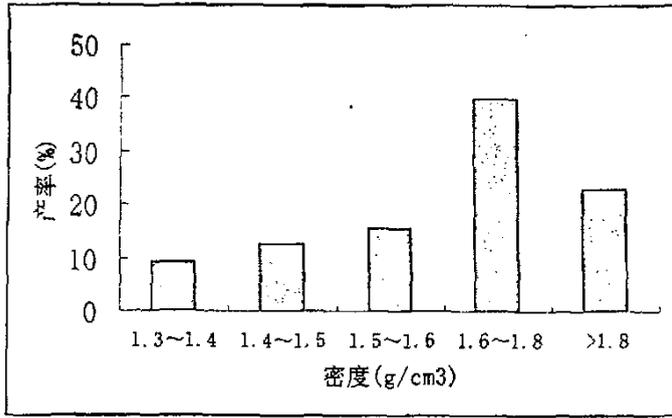


图 4.31 E0.25 处第二层的密度分布状况图

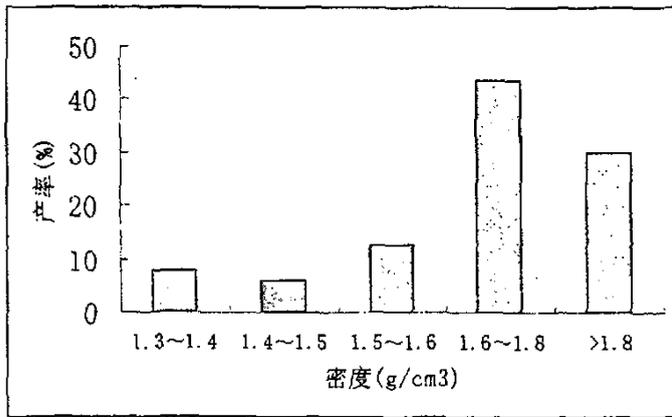


图 4.32 E0.25 处第三层的密度分布状况图

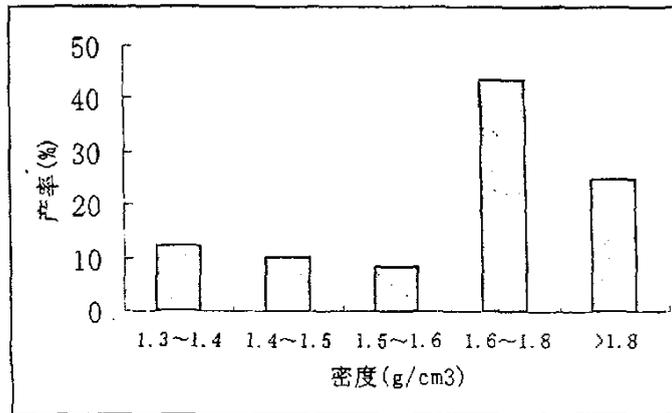


图 4.33 E0.25 处第四层的密度分布状况图

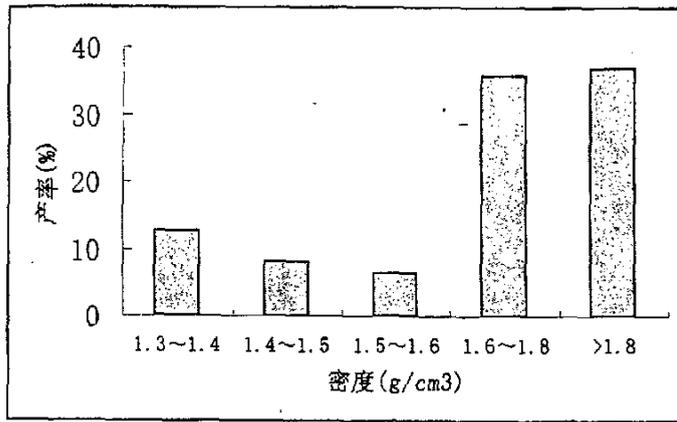


图 4.34 E0.25 处第五层的密度分布状况图

表 4.17 E0.25 处各层煤样的灰分数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	灰分 (%)				
1.3~1.4	5.18	6.15	7.63	7.49	9.14
1.4~1.5	12.37	13.75	13.88	13.52	15.37
1.5~1.6	20.26	22.59	25.64	25.36	39.68
1.6~1.8	32.82	33.51	36.73	37.96	22.60
>1.8	67.36	67.02	62.70	65.37	64.47
累计	12.30	34.41	39.49	37.40	36.92

由图可知,在 E0.25 处第一层中低密度物占有大多数,随着层数的增加而减少并趋于不变,同时,高密度物则相反,在第一层中很少且随着层数的增加而增加, <1.5 密度级占有量随床层深度的加深而减小, >1.6 密度级占有量随床层深度的加深而增加, 1.5~1.6 密度级占有量先微小增加再逐渐减小。说明物料在床层中受脉动水流的作用按密度分层,低密度级物料向床层表层运动,高密度级物料向床层底部运动,说明接近排料口处床层已经基本进入稳定状态,分层已基本完成。

由灰分数据表知,在 E0.25 处第一层中的物料灰分最低累计为 12.30%,其余层中的灰分较大超过 34%,说明床层表层物料灰分小,深层的颗粒其灰分也较大。高密度物料所占比重基本呈现稳定态势,这说明经过研石段和中煤段的脉动水流及水平水流的作用,床层分层良好,达到了按密度分层的效果。

表 4.18 D 处各层煤样的产率数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	产率 (%)				
1.3~1.4	70.16	56.97	45.28	40.31	26.80
1.4~1.5	24.13	31.84	40.35	40.82	18.14
1.5~1.6	3.17	6.97	9.65	12.50	11.15
1.6~1.8	2.54	4.23	4.72	6.38	32.37
>1.8	0	0	0	0	11.13
累计	100	100	100	100	100

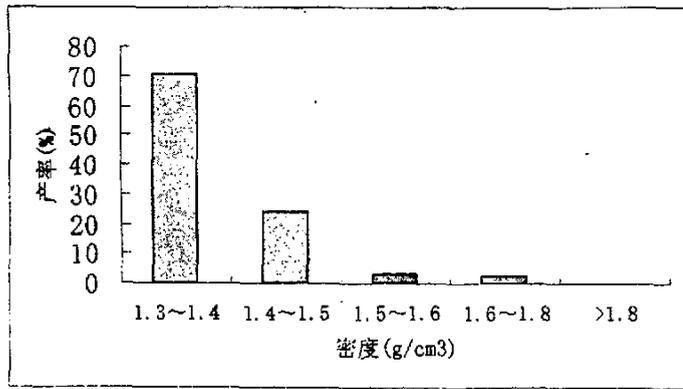


图 4.35 D 处第一层的密度分布状况图

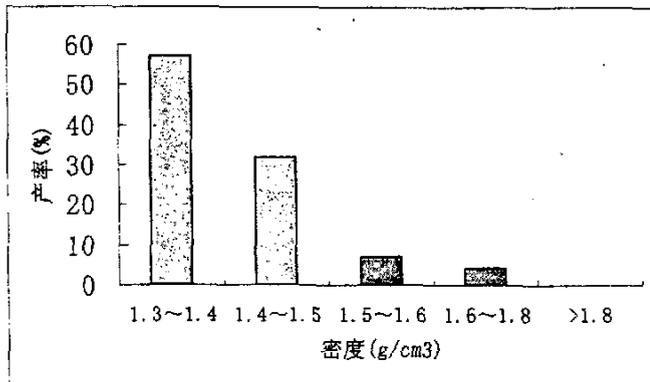


图 4.36 D 处第二层的密度分布状况图

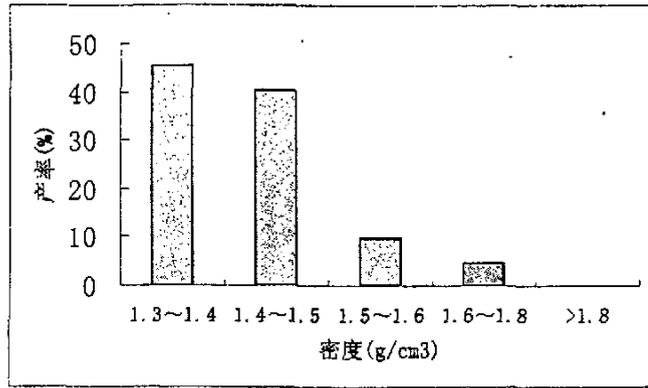


图 4.37 D处第三层的密度分布状况图

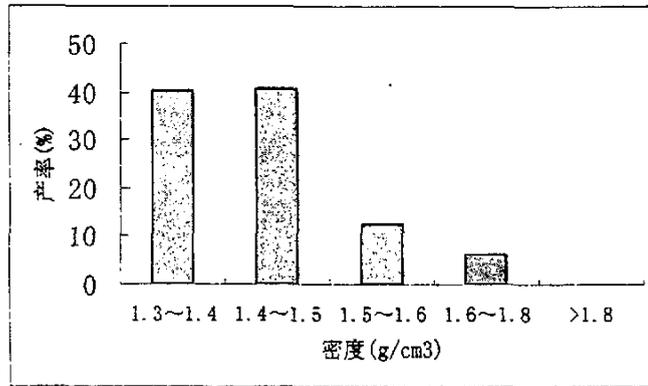


图 4.38 D处第四层的密度分布状况图

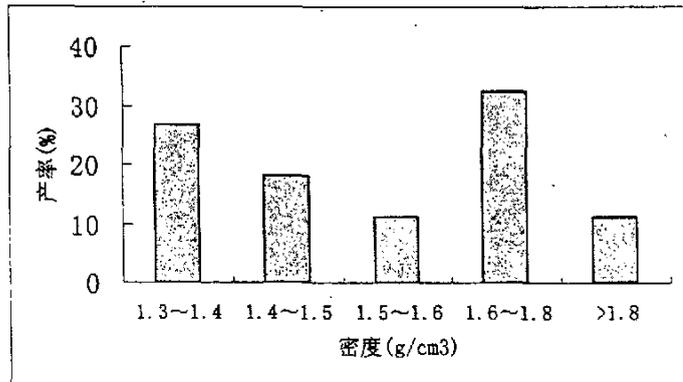


图 4.39 D处第五层的密度分布状况图

表 4.19 D 处各层煤样的灰分数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	灰分 (%)				
1.3~1.4	4.88	5.93	5.44	5.92	5.31
1.4~1.5	11.40	11.27	11.17	11.25	10.69
1.5~1.6	22.22	21.50	20.04	21.48	22.43
1.6~1.8	39.11	41.95	41.12	41.91	33.84
>1.8	0	0	0	0	54.28
累计	7.87	10.24	10.85	12.34	22.86

D 处是在浮标处取样，此处床层较深，故只在浮标往上处取样，所以由图中柱状图可以看出，在 D 处第五层轻产物相对较多，与重产物没有明显的分开，过渡层出现在第五层，高密度与低密度物料占有量的差距减小了。而在 D 处其他层中低密度物偏高，低密度级物料向床层表层运动，随着床层的加深而减小不显著；高密度级物料向床层底部运动，随着床层的加深而增加不显著，说明密度是决定物料分层的主要原因，但分层效果不好。

由灰分数据表可以看出 D 处的累计灰分较小，说明床层上部已基本上是灰分较小的产物，说明浮标往上处物料的灰分较小，物料的分层影响因素很复杂。

表 4.20 E0.5 处各层煤样的产率数据表

密度级	第一层	第一层	第一层	第一层	第一层
	产率 (%)				
1.3~1.4	13.08	3.20	10.04	11.33	11.21
1.4~1.5	25.81	4.38	5.33	12.46	13.72
1.5~1.6	35.48	19.73	7.58	7.08	6.34
1.6~1.8	21.15	55.31	42.62	44.05	19.47
>1.8	4.48	17.37	34.43	25.07	49.26
累计	100	100	100	100	100

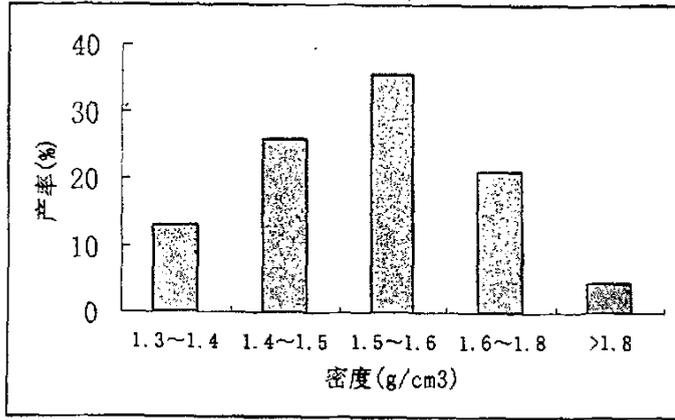


图 4.40 E0.5 处第一层的密度分布状况图

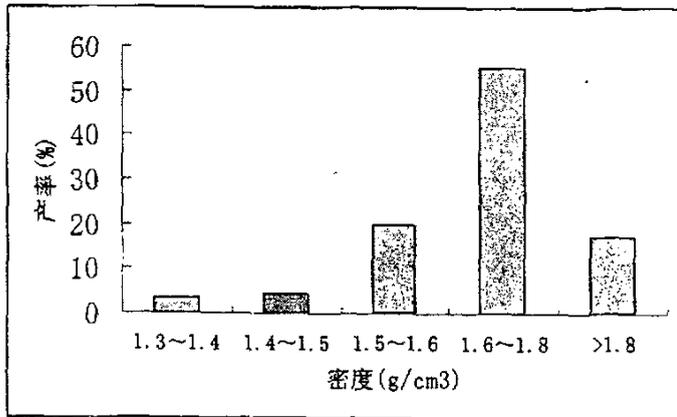


图 4.41 E0.5 处第二层的密度分布状况图

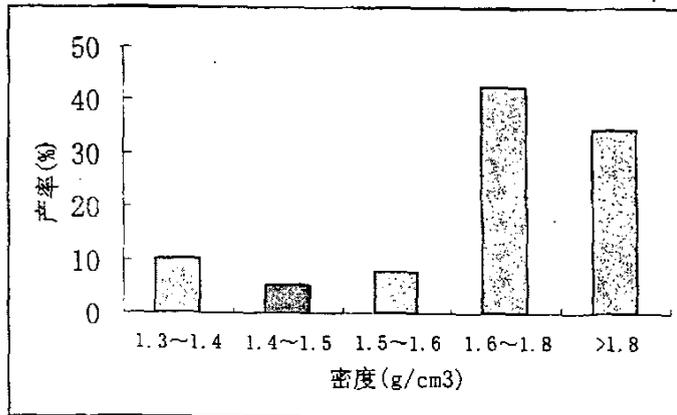


图 4.42 E0.5 处第三层的密度分布状况图

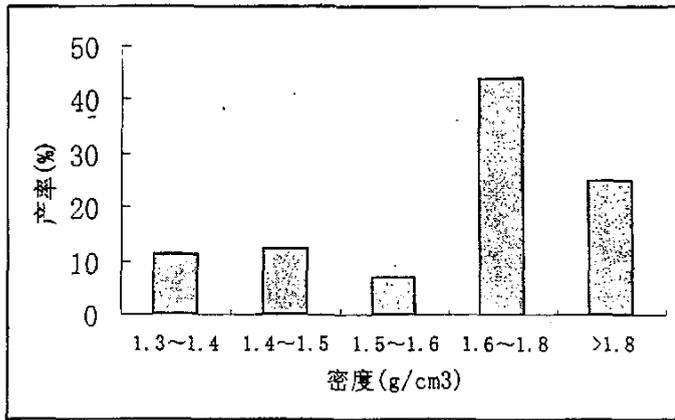


图 4.43 E0.5 处第四层的密度分布状况图

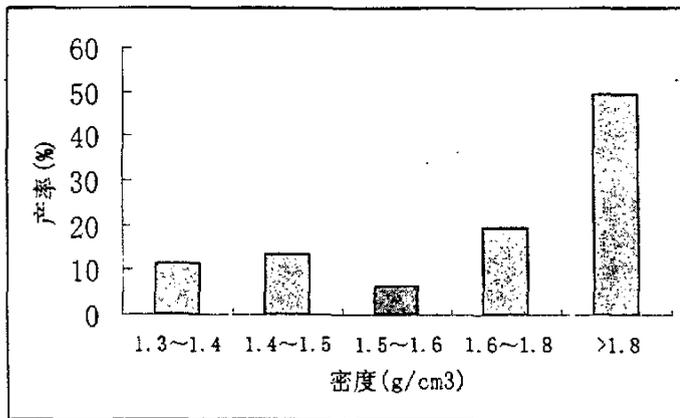


图 4.44 E0.5 处第五层的密度分布状况图

表 4.21 E0.5 处各层煤样的灰分数据表

密度级	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层
	灰分 (%)				
1.3~1.4	5.84	5.68	6.93	5.80	5.35
1.4~1.5	12.82	12.86	12.23	12.83	10.83
1.5~1.6	20.74	21.19	21.29	22.76	19.75
1.6~1.8	33.50	32.82	33.79	35.48	36.74
>1.8	57.85	58.20	59.21	65.02	71.67
累计	21.11	33.19	33.93	35.80	45.80

在 E0.5 处,即排料口附近,从理论上讲,床层在此处的分层效果应该最佳。从图中也可看出,就是在 E0.5 处第一层中,各密度级的物料产率相差不大,过渡层在第一层,高密度与低密度物料占有量的差距减小了,而在以后各层中高密度级物料明显增加,低密度级物料明显减少,说明随着床层的加深物料可以得到更加充分地分离。说明经过矸石段和中煤段的脉动水流及水平水流的作用,床层分层良好,达到了按密度分层的效果。

且 E0.5 处相当于在浮标以下的五层取样,高密度物料偏多,且相当于整个跳汰床层的底部,此处分层已经良好的进行,床层稳定;

综合以上的分析结果,混合均匀的入洗原煤在流过矸石段时,在脉动水流的脉动作用及水平水流的推动作用下,入洗原煤初步分层,部分大密度的矸石沉在下层经排矸口排出,其余物料随水流跃过溢流堰,进入中煤段。刚进入中煤段时,由于颗粒的惯性作用、水介质及颗粒之间相互作用,床层中上层大密度物料的占有量较 A 处有所增加。与矸石段末端相比,床层出现了一定程度的混乱状态。在水平水流的推动作用下,物料继续向中煤段排料口方向移动。在这个过程中,颗粒在脉动水流的作用下进一步分层,随着跳汰行程的增长,分层效果也愈来愈好。高密度物料逐步向床层的底部集中,低密度物料则向床层的上部集中。在此过程中形成了过渡层,即高密度与低密度的占有量相当。但过渡层的位置是变化的,沿水流的前进方向而上升。在到达排料口附近处于最佳分层状态。即高密度物料基本集中在床层的底部,而低密度物料则集中在床层的上部,中间密度层的物料在床层中是均匀分布的。(说明:由于本次实验中 <1.3 密度级的颗粒很少,几乎没有,不对其进行处理)

#### 4.5 床层分析结论

床层中的密度分布状况趋于稳定的时间较粒度分布状况趋于稳定的时间来得晚,这说明物料的粒度大小对床层分层有一定的影响,但影响程度不如物料密度对分层的影响。物料的粒度因素对床层分层起次要作用。

以上从各粒度级物料在各点的各层中的相对含量的差别,分析了沿跳汰机物流方向,床层逐渐分层过程中的粒度分布情况,得出了粒度对床层分层的影响较小的结果。现将跳汰过程看作理想的按粒度扩散过程,观察各粒度级物料在床层中的分布中心的位置及转移情形,从另一角度分析粒度对床层分层的影响效果。

颗粒在床层中实际分布形态的基本规律:①密度越大,相应级别物料在床层中的位置越深;②最低密度级物料在靠近床层表层的含量大,随床层深度增加,含量减小直至为 0,分布形态为单调下降,当其含量足够大时,分布形态接近反“S”型;③最高密度级颗粒在床层中的分布规律与最低密度的相反,在床层底部的含量大,随床层深度减小,含量减小直至为 0,分布形态为单调上

升, 当其含量足够大时, 分布形态接近“S”型; ④当最低或最高密度含量较小时, 次低或次高密度级颗粒在床层中的分布与最低或最高密度级颗粒分布形态相似, 为单调下降或上升, 当最低或最高密度含量较大时, 分布为及不对称的单峰分布, 次低密度级颗粒在床层表层仍有相当大的含量; ⑤中间密度级物料在床层两头含量低, 边界区域含量基本为 0, 中部含量高, 有一定的对称性; ⑥当中间密度级物料含量较大时, 其分布中心附近的区域几乎由本级别颗粒完全占据。

跳汰分层基本上是按密度分层, 同时也受粒度的影响, 分层后, 相同粒度密度大的物料层位相对靠下。相同密度粒度小的物料层位相对靠上; 跳汰过程离不开床层, 床层是矿物粒按密度分层的介质; 跳汰过程是周期性脉动过程, 应保证一定的松散度范围, 松散度过大或过小, 对矿物粒按密度分层都不利。

跳汰床层为一有限区间, 即使分层过程满足 Fokker-Plank 方程, 其解也应是若干正态分布密度函数组成的级数解而非单一正态分布密度函数。尽管如此, 由陈迹的《跳汰选煤的理论与实践》就实际跳汰床层中的颗粒分布进行了分布检验, 认为颗粒在床层中的分布接近正态分布, 说明正态分布对颗粒在床层中的分布有一定的适应性。

可将跳汰过程看作理想的按密度扩散过程, 则颗粒在床层中的分布为正态或半正态分布。正态分布曲线是一条中心的曲线, 其最高峰就代表某粒群在床层中的最集中的点, 是其在床层中的分布中心。所以理论上, 轻重产品的分离线在床层中的位置, 可由分选密度的正态分布中心的位置来确定。

## 5 新型排料装置的机构设计

### 5.1 应用环境介绍

#### 5.1.1 应用场地

本实验的地点选在皖北煤电公司百善选煤厂，该厂属矿井性选煤厂，设计年产量为 60 万吨。百善选煤厂主要是依靠跳汰机选煤为主，该选煤厂厂型较小，有实验所需的  $\gamma$  射线灰分仪，只需要再购买一些小设备即能进行回控实验。

测灰仪的型号为：清华大学工程物理系研制的 ZZ-89 型  $\gamma$  在线煤灰分仪。该厂有一台 XD2532B 型跳汰机，作为试验的基础设备。试验中所需的机械设备通过机构分析和机构设计后由专门的机械制造厂制造，然后运往试验现场安装。

#### 5.1.2 应用装置

现场使用的是 XD2532B 型筛下空气式跳汰机，分为两段：矸石段和中煤段。矸石段有两室，中煤段三室。

跳汰机性能结构指标：

分选粒度：120~0mm	处理能力：175~250t/h
跳汰频率：30~80min <sup>-1</sup>	跳汰振幅：100~150mm
跳汰室宽：2500mm	外形尺寸：7218×4877×7189
跳汰室长：矸石段 2480mm，中煤段 3580mm	
筛板倾角：矸石段 3°30'，中煤段 1°30'	
筛孔尺寸：矸石段 $\phi$ 15mm，中煤段 $\phi$ 12mm	

现场使用的是 执行机构

现场使用的是 灰分仪

### 5.2 跳汰机控制系统参数的测量

对跳汰机系统而言，从控制角度讲应有以下参量<sup>[23][25]</sup>

#### a 原煤输入参数

原煤灰分、原煤粒度、矸石、中煤排量、原煤输入量（电机转速）

原煤灰分用在线灰分仪检测；矸石、中煤排量用称重系统测量；电机转速通过把电机电流经转换处理而获得；原煤粒度由于测量困难又人工设定。

#### b 分层系统参数

松散度、吸吸力、振幅、床层厚度、跳汰频率、风阀周期、水量

床层分层状态的三个量中，松散度与吸吸力对控制的意义较大，但吸吸力不便测量，结合控制方案，最后只测松散度，由松散度测量系统完成。床层厚度由浮标系统测量，风阀周期由风阀控制系统测量，而跳汰频率和水量只设定不测量。

### c 排料系统参数

精煤灰分、由灰分测量系统测量，排料口开度由排料控制系统测量。对于床层重产物厚度，现有的浮标测量系统测量，误差较大。

### 5.3 百善选煤厂跳汰机灰分在线回控方案

产率和质量是跳汰机工作的两个重要指标。跳汰机的洗选效果受到给煤煤量与煤质、分层效果等多种因素的影响，是一个复杂的控制过程。目前的调节方式为：

跳汰司机根据洗选的精煤煤质(灰分),人工通过 PLC 操作面板输入料层(主要是中煤段)高度, PLC 根据指定高度调节排料闸板开度, 实现排料操作; 根据快浮数据和现场观察, 人工调节总水管阀门开度和调整数控风阀的时间与周期, 以调整风水制度, 保证洗选分层效果。

由于洗选质量与料层高度关系复杂, 没有确定的关系, 并且由于人工操作方式存在很大的不足(不及时、经验、责任心等), 使得目前所具备的较好的工艺和设备技术条件不能得到更好的利用, 难以保证排料调节的效果和及时性, 洗选效果也难以稳定地保持在最佳的水平。

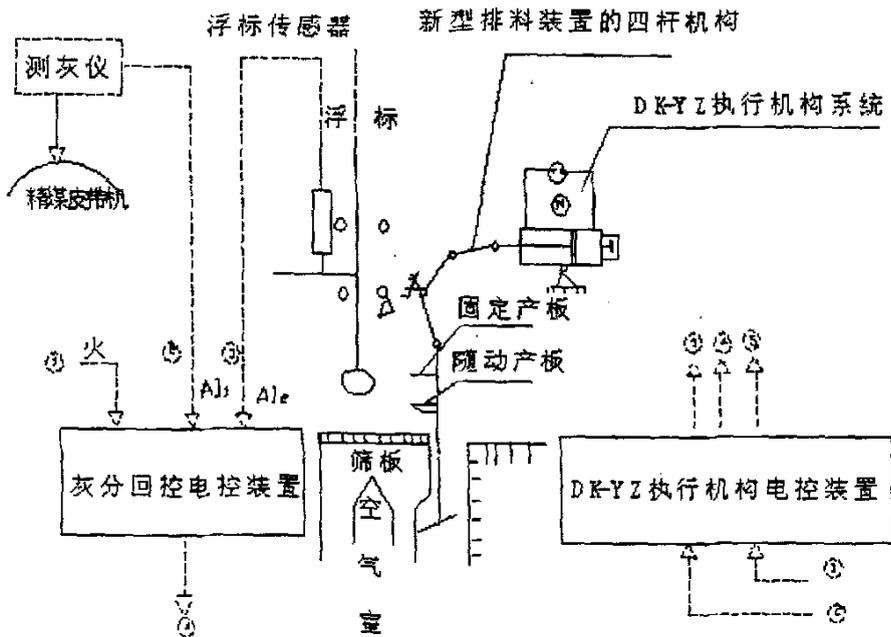


图 5.1 新型排料装置的灰分回控系统示意图

为此, 我们提出实施百善选煤厂跳汰精煤在线回控系统项目<sup>[24]~[26]</sup>。

项目主要内容包括: 根据洗选精煤在线灰分值自动调节料层高度给定值,



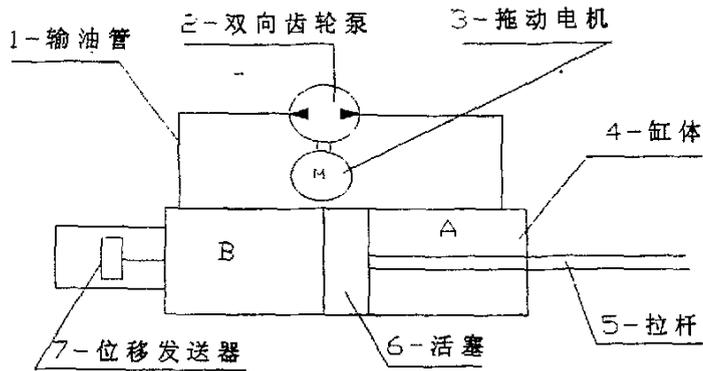


图 5.3 DK-YZ 型电控液动执行机构原理图

非线性误差:	$\pm 2.5\%$
回差:	1.5%
灵敏度 (反映时间)	$\leq 1 \text{ sec}$
电源电压:	220V、380V (AC)
使用环境:	无易燃、易爆及强腐蚀介质
使用环境温度:	$-10 \sim +45^\circ \text{C}$

## c. ZZ-89A 型在线煤灰分仪

百善选煤厂在 21 世纪初引进了清华大学工程物理系研制的 ZZ-89 型  $\gamma$  在线煤灰分仪, 用于洗精煤灰分的在线、快速检测。大家都知道 ZZ-89 型  $\gamma$  在线煤灰分仪采用  $^{241}\text{Am}$  (60keV) 作为低能  $\gamma$  源,  $^{137}\text{Cs}$  (662keV) 作为中能  $\gamma$  源,  $\gamma$  源射线透射物资时, 其质量衰减系数不但与煤当中的含水量有关, 也与煤的粒度有关。

## 5.4 结构设计

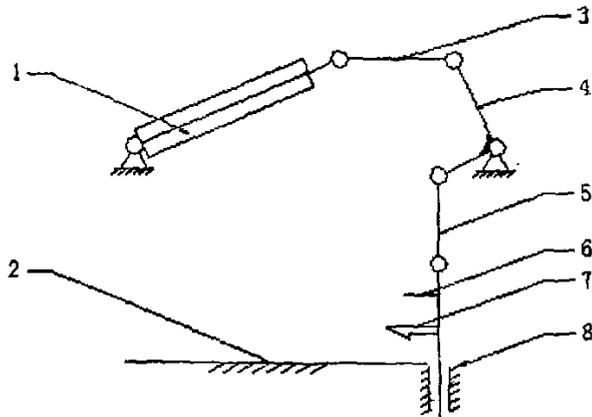
## 1、工作原理

跳汰机正常工作时, 由于入料性质、给料量、操作制度、排料状况等各种因素变化的影响, 跳汰床层厚度会相应地改变, 因而分选密度线随之升高或降低, 新型排料装置在液压缸的带动下, 根据分离线的变化自动调整切割高度。

新型排料装置的机构简图如图 5.4 所示:

当床层厚度变厚时, 分选密度的分离线升高, 自动排料系统控制液压缸 1 伸长, 推动原有排料机构的长臂, 排料道托板向下运动, 重产物排量加大。同时, 液压缸 1 通过联接杆 3 推动摇臂 4 运动, 摇臂 4 与提杆 5 通过销轴组件联接, 所以在提杆 5 的带动下固定铲板 7 向上运动。反之, 当床层变薄时, 分选密度线降低, 油缸缩短, 排料道托板向上运动, 在重力和提杆 5 的作用下固定铲板向下运动。在跳汰机工作过程中, 可以通过调节联接杆的长度来对铲板的

位置进行微调，使之与床层的厚度相适应。



1—液压缸，2—跳汰筛板，3—联杆，4—摇臂  
5—提杆，6—二层铲板，7—固定铲板，8—排料道

图 5.4 机构简图

## 2、结构设计

原有排料装置的结构如图 5.9 所示。图中 S1 型液压油缸  $100 \times 300$  为原有排料装置的动力源。当油缸 7 伸长时，推动摇臂(二)10、轴 17 以及摇臂(一)2 顺时针转动，摇臂(一)向下推动提杆 12，使得排料道托板向下运动，闸门开度增大；反之，当油缸缩短时，托板向上运动，闸门开度减小。由于摇臂(一)的运动轨迹为一弧形，而托板只能在排料道内垂直运动，因此，提杆与摇臂(一)和托板之间通过销轴连接，使之可以绕连接销轴转动。排料道底部为托板，其开度的大小控制排料量。

新型排料装置的结构如图 5.10 所示。主要由梁、轴、联杆、摇臂、提杆、提升板、导向板、铲板、活动板等零部件组成。

图中 S1 型液压油缸  $100 \times 300$  同时作为原有排料装置和新型排料装置的动力源。其机构间的传动过程为：当油缸伸长时，在推动原有排料装置的摇臂顺时针转动的同时，也推动新型排料装置的摇臂 7、轴 20 以及摇臂 8 顺时针转动。由于原有排料机构的摇臂和新型排料装置的摇臂 7 安装位置相对，当液压缸导杆伸长时，提杆 16 带动铲板向上运动，而此时排料道托板向下运动；反之，当液压缸导杆缩短时，铲板向下运动，而托板向上运动。这就实现了固定铲板和托板之间的反向关联运动。

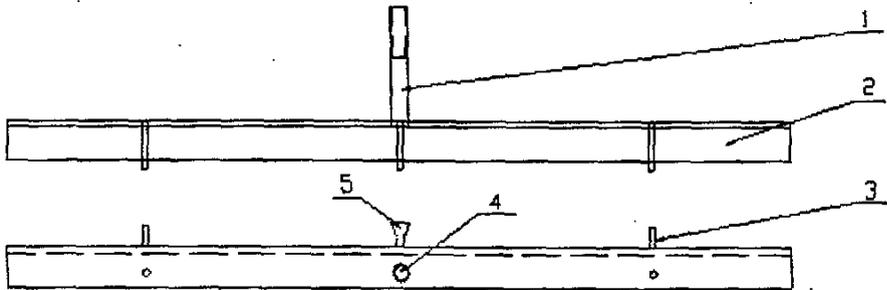
在设计排料装置的结构时，照顾到现场的一些情况，把铲板和活动板分为对称的两部分。由于跳汰机在正常工作过程中，床层上升期对铲板的顶力和下降期对铲板的吸力非常大，所以要在固定铲板上钻出若干小孔，减少顶力与吸力，并且还要对铲板和其它联接部件作应力分析。

外套管 41 焊接在固定铲板的边缘上,其中插入内套管 33 与活动板 28 相联。内套管 33 通过螺栓 34 与固定铲板联接,当固定铲板垂直上下运动时,活动板能够绕与之联接的固定铲板的边灵活转动,在转动过程中改变倾角。活动板 28 起到溢流精煤的导流作用,同时也起到溢流堰的作用。圆钢焊接在活动板的边缘上,其作用是使与原溢流堰相接触的面较圆滑,减小摩擦阻力,防止活动板被排料道卡住。

固定铲板的上下表面均焊接有角钢,用来与提升板 27 和导向板 37 相联,使得固定铲板固定在提升板 27 上,并在提升板 27 和导向板 37 共同作用下,上下稳定运动。提升板 27 和导向板 37 也用厚度为 14 的钢板制成,与改进前新型排料机构不同的是,原先的定位提升板改变成为两块,分别起定位和提升的作用,这样的结构方便安装。其上的两个  $\Phi 18$  的孔通过螺栓与固定铲板相连,提升板 27 上端直径为  $\Phi 50$  的孔通过销轴与提杆相连。提杆上部的螺杆通过通过销轴组件与短摇臂相连,销轴组件上端设有扳手,通过扳手,可以对提杆进行手动上下调节。

考虑到煤流中的垂直方向上的力量较大,固定铲板采用  $\delta 14$  的钢板制成。固定铲板的前端的随动铲板 38,其主要作用是动态的跟踪切割轻重产品的分离线,并可以减小与物料在垂直方向上的接触面积,提高切割精度。如图 5.5 所示,导向块 3、燕尾块 4 与固定铲板的导向槽、燕尾槽相联,在水平面上约束随动铲板的运动,使其自由度为 1,随动铲板只能通过随动提杆 1,在垂直方向上运动。

随动铲板自重用弹簧或配重维持,使其可在脉动水流的作用下上下跳动,动态跟踪产品的分离线。随动铲板的随动范围可用一定长度的螺栓控制,使之只能在一定范围内运动。



1, 4—随动提杆, 2—随动铲板, 3—导向块, 5—燕尾块

图 5.5 随动铲板

### 5.5 新型排料机构的改进

(1) 安装,考虑到该装置仍处于试验阶段,和根据现场实际情况,此次设计采用化整为零的设计思想,摒弃了过去设计过程中的一些弊病,如图 5.10

所示，与销轴 26 连接的提升板 27，改变了在过去设计中贯穿固定铲板，延伸到排料道的大块，变成了仅靠螺栓螺母连接的小块，只贯穿连接受煤流压力较小的二层铲板，原先与提升杆一体，延伸到排料道的部分变成了导向板，只负责固定铲板的导向与平衡作用，与固定铲板靠螺栓连接。虽然导向板在运动过程中，容易受到矸石的挤压而使与固定铲板连接部分发生变形，但是试验证明，只要连接紧密，此种情况可以避免，而且该种形式便于安装，是最佳选择。其他部分也是采用了如此方法，使安装方便了许多。

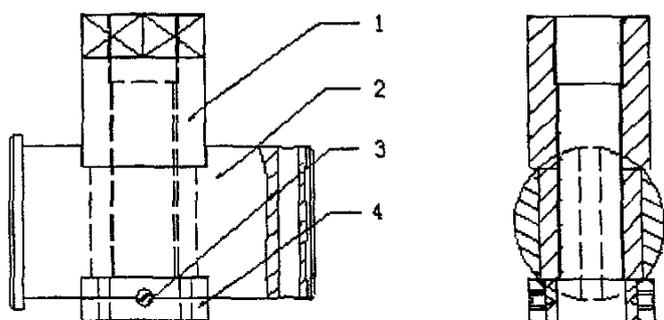
(2) 调试，由于以往试验均属于可行性的初步试验，虽然考虑到了调节问题，但是由于设计考虑不足和现场的工作情况，使以往的设计均无法进行在线调节。在本次设计中，在原有设计的基础上，将原先提杆 16 与销轴 17 之间的直接螺纹联接改变为通过销轴组件 17、18 中的销轴轴套 1 直接联接。

如图 5.6 所示：销轴轴套 1 穿过销轴 2，通过止动环 4 与紧定螺钉 3 与销轴 2 固定联接，销轴轴套 1 可以在销轴 2 中自由转动。销轴轴套 1 的上部设有四方，可通过扳手对销轴轴套旋转，使提杆上升或下降，调节固定铲板位置高度。

正是因为销轴轴套 1 的存在，使得提杆可以随时进行上下的调整，带动整个排料机构的运动，调整固定铲板距离跳汰筛板的高度与托板闸门开度的比例关系，这个调整是小范围动作的，称为微调。使排料机构在工作过程中可以根据一些检测信号进行调节，有利于实现自动控制，在本次正交试验中，也有重要的意义。

(3) 性能，

① 本次试验充分考察了以往多次试验，将每一边的导向板由原来的一块变为二块，减少了机构的自由度，避免了铲板平面的旋转，实践证明，这种改动大大改善了机构的平衡状况，有利于机构的平稳运动。



1—销轴轴套，2—销轴，3—开槽紧定螺钉，4—止动环

图 5.6 销轴组件

② 随动铲板设计主要目的是使排料机构能够动态跟踪跳汰床层的分离线。跳汰床层在跳汰机脉动水流的作用下，不断进行分层，在排料道附近已基本分

层完毕,也就是说在排料机构的前端,床层的分层作用已经很微弱,脉动水流的作用仅仅是使跳汰床层中的轻重产物整体向上移动,轻重产物之间的分离线也会随着脉动水流的作用而上下运动,而不再有继续分层的现象。因此,在新型排料机构固定铲板的前端加一块随动铲板,跟随脉动水流的上下,动态跟踪跳汰床层轻重产品的分离线,提前把合格产品分离出来,减少重产品在轻产品中的混杂。

由于缺乏具体的数学模型,这次试验设计了几种不同尺寸的随动铲板,准备通过正交实验分析的方法,初步定出其大致的尺寸。

③由于现场的一些实际要求和希望进行的一些理论探讨,本次试验设计了二层铲板,希望能够将轻产物按密度进一步分离,把灰分更低的产品分离出来,丰富产品的种类,形成多产品的格局,以满足用户的需要,同时也给选煤厂的配煤等工作创造一定的条件。

④调节比例关系,在以往的实验过程中,根据经验,将固定铲板距离跳汰床层的高度与排料道托板闸门的开度之间的比例关系人为的固定,即当床层变厚时,固定铲板向上抬起一定的高度,排料闸门向下开启相同的开度,反之亦然,在正常工作状态下,铲板开度与闸门开度有一个固定的比例关系。理论分析与以往的实验证明,这种比例关系并不是在所有情况下都适用。所以必须寻取一种可对此种比例关系进行在线调节,并根据检测信号随时可以控制这种关系的结构。

在这次试验中,设计了可通过扳手对比例关系进行调节的销轴联接组件,调节提杆高出销轴的高度,使固定铲板正常工作和闸门关闭时的高度差(铲板开度),与托板闸门开度的比例关系发生变化。并希望通过正交试验,找出固定铲板的开度与托板闸门的开度之间的最佳比例关系。

## 5.6 机动图分析

在机构设计中,为合理设计机构间的联动关系,增强机构的可靠性和牢固性,必须对部件的结构、运动轨迹、受力情况,以及当部件处于极限位置时是否会出现“死锁”等情况做大量分析。

新型排料装置的机动图如图 5.7、5.8,主要考察以下几个方面:

(1)在液压缸导杆的作用下,摇臂会发生运动,在导杆伸缩的范围内,机构有没有“死锁”现象,机构尺寸是否合理。

(2)根据试验的要求,对提杆长度进行改变,确定托板在不同的位置时各部件位置的变化情况,并以此分析各部件的运动轨迹。

(3)但排料闸门的开度不同时,铲板的位置变化情况。

现列出当提杆长度为 494mm 时(微调值为+10mm),4 组有代表性的机动图,分别表示两种机构运动的极端情况,和两种机构正常工作的情况。图中使用的

各种符号表示的意义如下所示：

- 原排料机构中各节点的位置；
- 新型排料机构中各节点的位置；

图 5.7 左图中，新型排料装置采用和原排料装置相同的摇臂，长臂和短臂间的夹角为  $90^\circ$ 。排料口关闭时，液压缸长度为 780mm，两短臂联接提杆的末端几乎处于相同的高度，所以在这个位置，应保证提杆末端的销轴与销轴之间有足够的间隙。从图中还可以看出，固定铲板距离筛板较近。

图 5.7 右图中，新型排料装置也采用和原排料装置相同的摇臂，长臂和短臂间的夹角为  $90^\circ$ 。液压缸长度为 900mm，排料口开度为 74mm，铲板的高度大约在 270mm 左右，处于正常工作状态。从图中可以看出，当排料正常时，其部件受力及传动状况都较好，并且排料道托板下降的距离和铲板提升的高度相同。

在机构运动中，排料口开度与铲板的切割高度相对，通过改变提杆的长度，可以改变两者的比例关系，不同的提杆长度对以不同的比例关系。以上列出了提杆在某种长度下的机动图。以下是油缸长度、排料口开度、铲板的切割高度三者之间的关系(单位：mm)：

表 5.1 油缸长度、排料口开度、铲板的切割高度三者之间的关系

油缸长度	780	855	930	1005	1080
排料口开度	0	50	100	150	200
铲板的切割高度	140	190	240	290	340

图 5.8 左图也是排料机构工作比较正常的情况，液压缸长度为 940mm，排料口开度为 100mm，铲板的高度大约在 290mm 左右。在这种工况下，铲板的高度较为合适，在此处，摇臂的力矩较大，机构部件受力及传动状况都较好。

图 5.8 右图中，随着排料口开度增大，提杆偏离垂直方向的夹角逐渐增大，当排料口开度为 200mm 时，其受力及传动状况变坏。在实际生产中，这种情况一般不会出现。

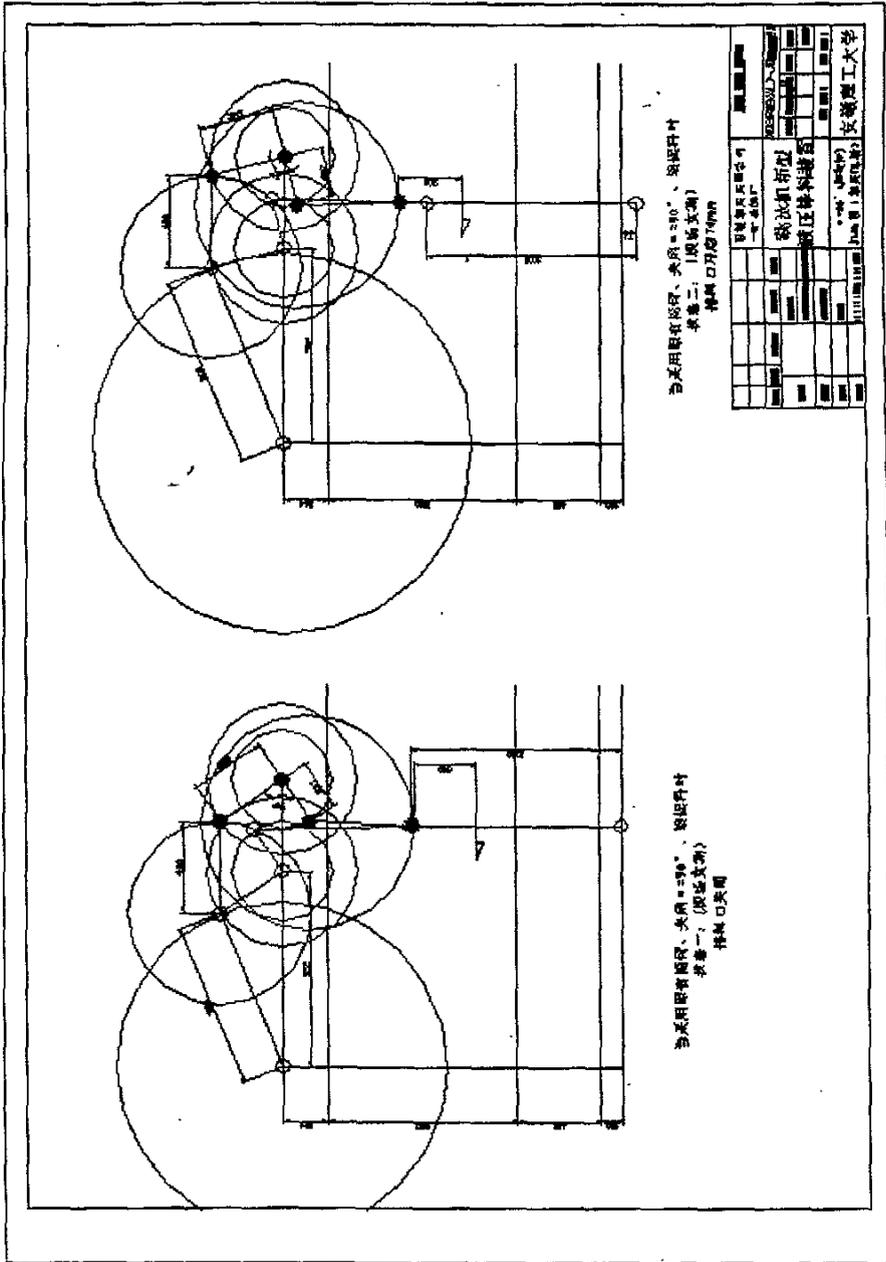


图 5.7 机构运动简图 1

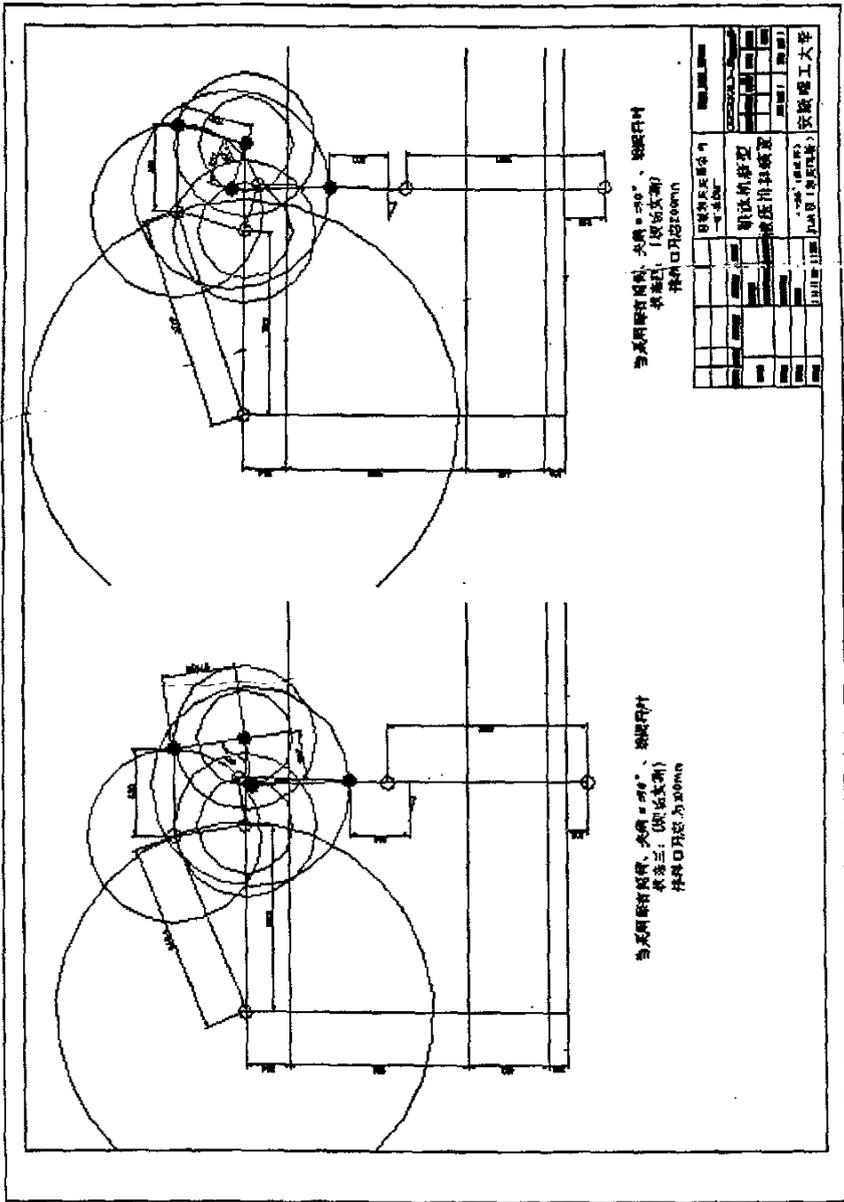


图 5.8 机构运动简图 2

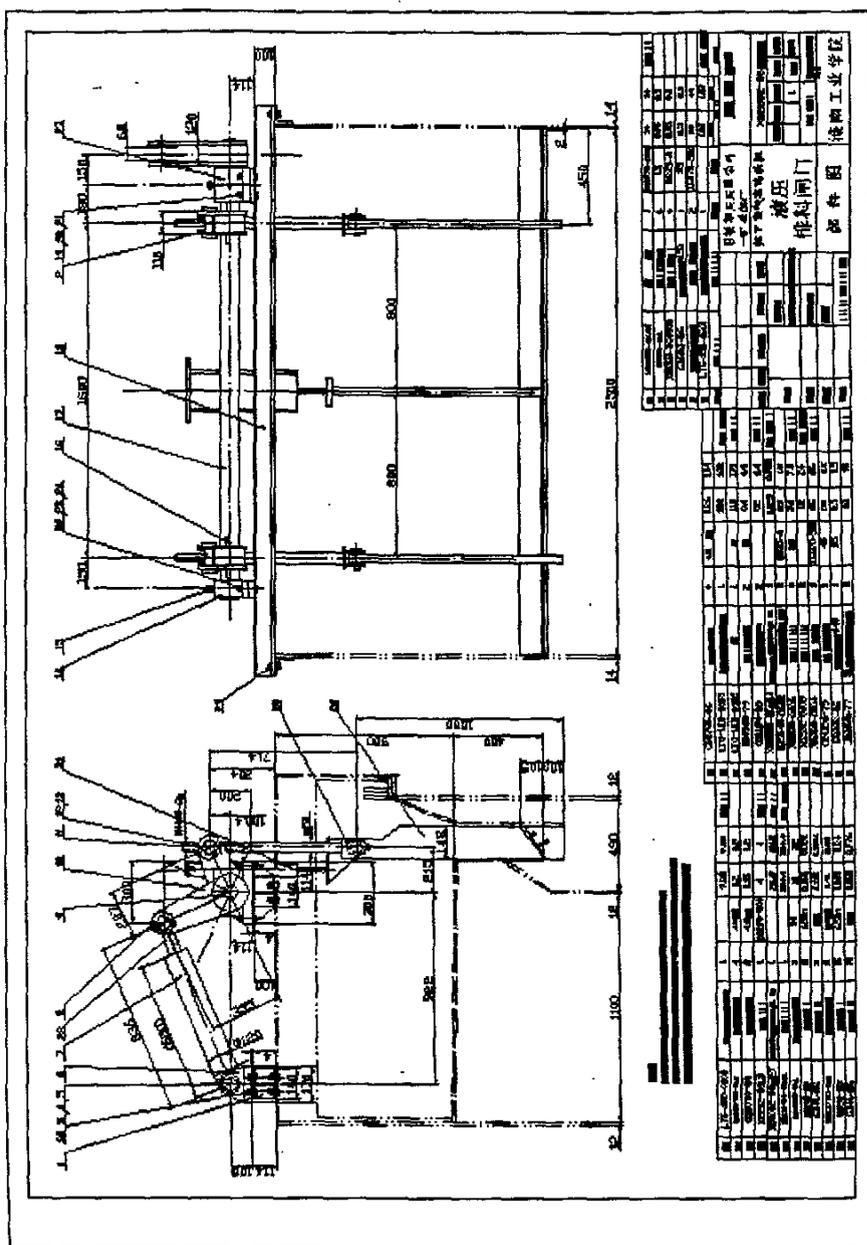


图 5.9 原有排料装置结构



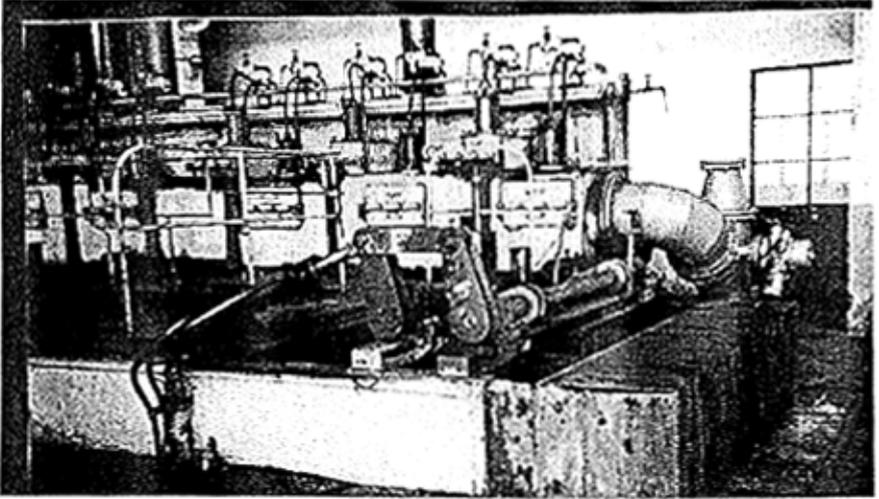


图 5.11 新型排料装置安装图 1

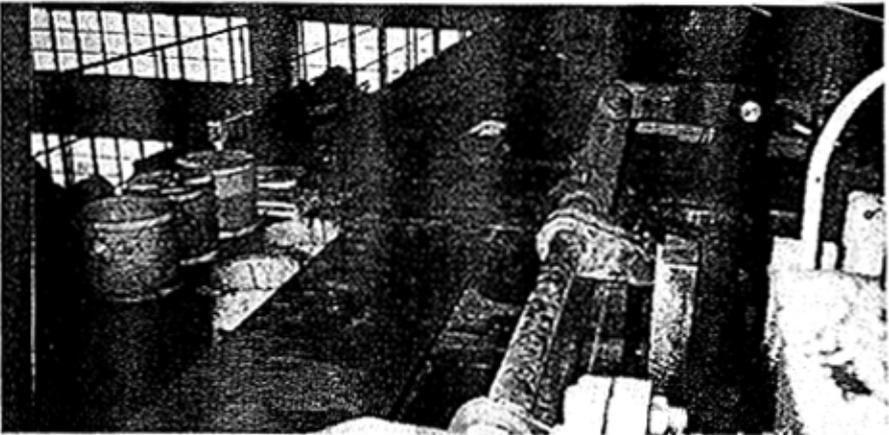


图 5.12 新型排料装置安装图 2

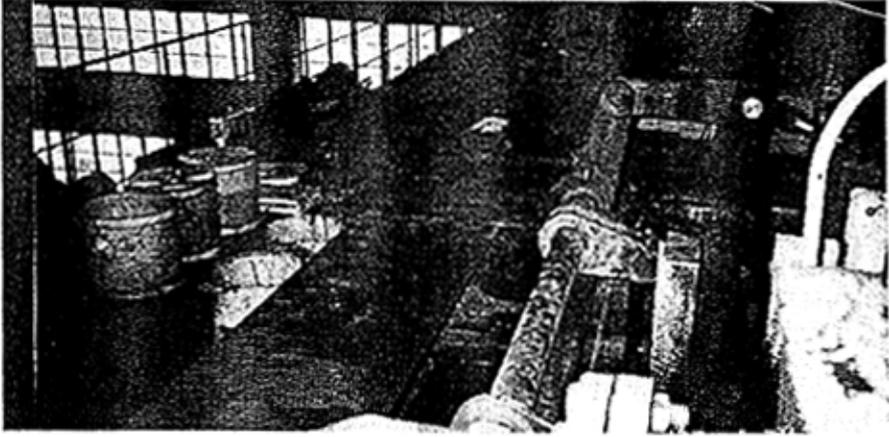


图 5.13 新型排料装置铲板图 1

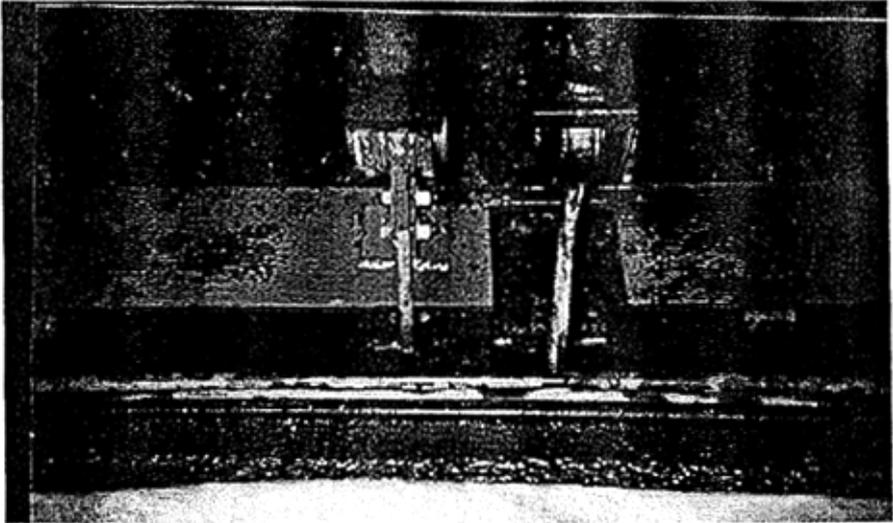


图 5.14 新型排料装置铲板图 2

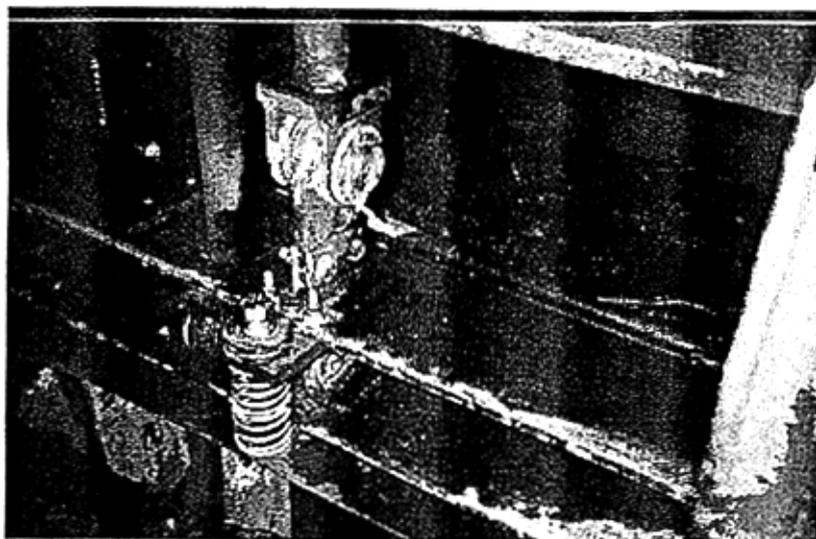


图 5.15 新型排料装置随动铲板

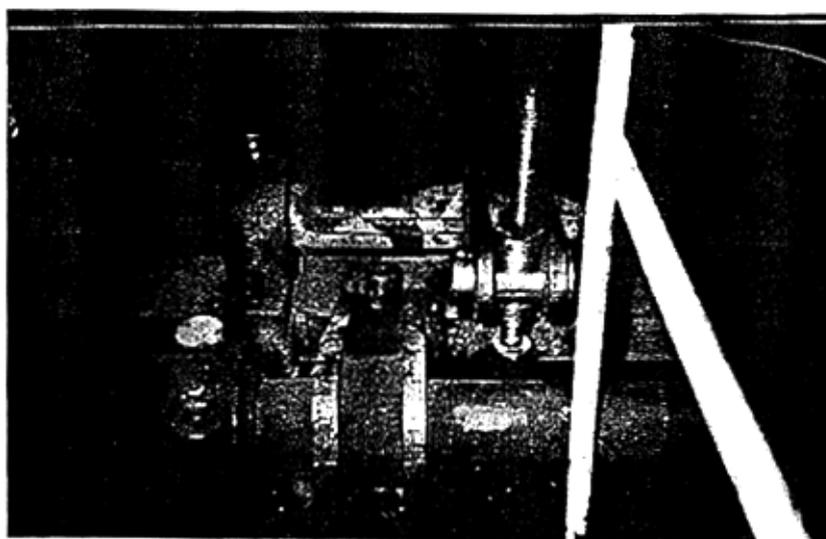


图 5.16 新型排料装置销轴组件图

## 6 主要结论及展望

### 6.1 结论

本文通过在现场跳汰机内不同部位进行分层采样, 对各煤样作筛分及浮沉实验, 分析其密度及粒度组成。对 $<70\text{mm}$ 脱除煤泥的入洗原煤, 在跳汰机内的床层分层过程进行了研究, 即: 沿着煤流的前进方向, 不同密度级物料在空间位置的移动趋势、不同粒度级物料在空间位置的移动趋势; 在垂直于煤流的前进方向, 床层在中煤段末端的分布情形; 床层从矸石段末端转移到中煤段前端物料分布的变化情况; 密度及粒度对床层分层的影响主次关系; 本论文在原有的新型排料装置的基础上, 根据以往的实验经验, 对排料装置进行改进及其精煤在线回控初探。

通过本课题的研究, 可以得出如下结论:

(1) 脉动水流的作用下, 随着跳汰行程的增长, 物料按密度分层效果也愈来愈好。高密度物料的分布中心逐步向床层的底部移动, 低密度物料的分布中心则移向床层的上部, 中间密度层物料的分布中心则几乎不变, 且在床层中是较均匀地分布。

(2) 分层过程中首先形成由中等密度物料组成的中间层, 然后形成低密度层和高密度层; 中等密度物料的分布比低、高密度的物料的分布要分散得多; 各分层的形成过程是同性粒群的分布中心不断向自己平稳位置移动的过程; 开始时分层速度最高, 随着床层上的物料接近平稳分布, 分层的速度越来越慢。跳汰实践表明, 当中间密度的物料较多时, 分选变得困难。

(3) 跳汰产品分离是跳汰选煤过程的最终环节, 也是最关键的环节之一。目前所采用的各种产品分离装置, 大多重视重产物的排放, 忽略了轻产物的分离, 并且当物料行进至筛板末端、排料道上方的区域时, 由于存在物料的水平移动与产品的垂直分离的矛盾, 产生时段交叉与脉动交叉, 不可避免地影响其分离效果。

(4) 床层按密度逐渐分层的, 如果将跳汰过程看作理想的按密度扩散过程, 则颗粒在床层中的分布为正态或半正态分布。正态分布曲线是一条中心的曲线, 其最高峰就代表某粒群在床层中的最集中的点, 是其在床层中的分布中心。所以理论上, 轻重产品的分离线在床层中的位置, 可由分选密度的正态分布中心的位置来确定。

(5) 该新型排料机构在轻产物准确连续分离的前提下使之与重产物的排放相结合, 保持排料道畅通和床层的稳定, 在跳汰物料到达排料端附近而未进入排料道上方时, 对物料按其分层状况进行强行切割, 较好地按照跳汰产

品分离的三原则进行工作,使用精煤灰分在线回控系统实时跟踪分离线变化,很好地在分选密度处对产品进行分离,降低了传统排料方式中所产生的产品相互污染的情况。

(6) 跳汰机自动控制的目的是提高分选效率,减少跳汰机操作的人为因素的影响。跳汰机获得好的分选效果的前提是跳汰过程物料按密度分层清楚,这要求床层必须保持适当的松散。但由于跳汰过程影响因素很多,对其全部因素实行控制非常困难。本文的跳汰机新型排料装置的随动铲板具有在分离线变化的方向上相应移动的功能,虽然实际上没有改善床层松散度,却相当于控制了床层松散度,可以获得更好的分选效果,为跳汰机自动控制提供了一个新方法。

## 6.2 展望

由于时间和本人理论水平有限,本课题的研究尚处于试验研究阶段,在理论和机构的设计上还存在很多需要改进和完善的地方,主要表现在以下几个方面:

(1) 寻求建立跳汰床层的运动模型与动态分离模型的方法,运用计算机技术(如 ANSYS 软件),从跳汰床层的整体运动与分离,和单个颗粒的运动与分离为出发点,对跳汰过程进行仿真模拟,建立合适的动态分离数学模型。

(2) 进一步研究床层中不同高度的物料移动速度和压力,寻找床层移动速度与排料速度的最佳匹配点,改进本排料机构,在保持排料道畅通的前提下使得轻、重产物的排放相适应,提高处理量。

(3) 选择不同类型的选煤厂,针对不同性质的原煤入料进行试验研究,为机构的进一步改进和自动控制的顺利实现积累数据。

(4) 对排料道内颗粒的运动状态进行分析研究,建立床层厚度及产品分离线与排料口开度的关系模型。

(5) 寻求建立跳汰机动态分离模型的方法,建立合适的数学模型,结合智能控制部分,实现跳汰机排料的自动化及智能化,提高原煤洗选的精确度及效率。

(6) 由于时间等原因的限制,本次实验装置的效果有待于进一步的实验验证,排料装置还需进一步的改进,现场实验在以后的工作中将继续。

在机械电子工程迅速发展的今天,对厂矿企业的大型机械实现自动控制是当今机械行业发展的必然趋势。把今天高速发展的计算机技术运用到跳汰机中乃至整个选煤行业是今后的必然发展趋势。

## 参 考 文 献

- [1] 郝凤印等. 选煤手册(工艺与设备). 煤炭工业出版社, 1993. 4
- [2] H. A. 萨梅林等. 跳汰的理论及其应用. 煤炭工业出版社, 1980. 8
- [3] 王敦曾. 选煤新技术的研究与应用. 煤炭工业出版社, 1999. 8
- [4] 姚昆亮. 跳汰机随动溢流坎排料系统. 选煤技术, 1998. 4
- [5] 陶长林. 国外选煤动态分析, 选煤技术, 1999(3)
- [6] 陈迹等译. 跳汰的理论及其应用. 煤炭工业出版社, 1980. 8
- [7] 陈迹. 跳汰床层分布规律及产品分离理论. 煤炭学报, 1982(3)
- [8] 陈迹. 跳汰选煤的理论与实践. 煤炭工业出版社, 1988. 11
- [9] 樊民强. 颗粒在跳汰床层中分布形态的研究. 煤炭学报, 2000(3)
- [10] 王振生. 关于跳汰选煤理论与实践的一些问题. 煤质技术, 2000(5)
- [11] 李贤国, 张荣曾. 重力选矿原理. 煤炭工业出版社, 1992
- [12] 樊民强, 张荣曾. 颗粒在跳汰床层中分布形态的研究. 煤炭学报, 2000(6)
- [13] 刘焕胜. 空气脉动跳汰机的产品分离与排料装置. 矿山机械, 2000(1)
- [14] 党军. 跳汰机的智能控制研究(硕士论文). 西安交通大学, 2001
- [15] 叶旭东. 跳汰机的产品分离方式和新型排料装置的研究(硕士论文). 安徽理工大学, 2002
- [16] 余金华. 跳汰床层分层过程及新型排料装置分离效果的初步分析与研究(硕士论文). 安徽理工大学, 2002
- [17] 孙庆刚. 跳汰机新型排料装置的改进、试验研究及控制系统方案设计(硕士论文). 安徽理工大学, 2003
- [18] 郭洪红. 跳汰产品动态分离装置极其 PLC 控制的研究(硕士论文). 淮南矿业学院, 2001
- [19] 杨毅, 吴力心. 选煤与选矿过程参数的测试技术. 中国矿业大学出版社, 1990. 10
- [20] 费耕. 跳汰机自动控制技术的研究与实践. 选煤技术, 1993(增刊)
- [21] 杨康. 跳汰机自动排料系统问题分析与改造方案. 洁净煤技术, 1997(4)
- [22] 严国彬. 选煤厂机械设备安装使用与检修. 煤炭工业出版社, 1993. 2
- [23]  $\gamma$  射线检测在跳汰选煤中的应用研究(全文); 硕士; 太原理工大学; 20030601 李建民
- [24] 基于 S7-200PLC 的跳汰机智能控制系统研究(全文); 硕士; 太原理工大学; 20030601 张旺林
- [25] 基于模糊 PID 控制方法的跳汰机排料系统研究(全文); 硕士; 太原理工大学; 20030601 李建民

- [26] 杨康. 跳汰机自动排料系统问题分析与改造方案. 洁净煤技术, 1997(4)
- [27] 费耕. 跳汰机自动控制若干技术的研究实践. 煤炭利学技术, 1994(4) 30-35
- [28] 费耕. 先进实用的跳汰机自控系统. 选煤技术, 1991(5) 22
- [29] 张景宽. 跳汰机系统自动控制. 选煤技术, 1988(5) 3036
- [30] 朱永泉. 巴达克跳汰机的自动控制装置. 抚矿科技, 1988(1) 44-47
- [31] 许建宁. 选煤厂跳汰机自动控制的研究. (学位论文). 阜新矿业学院, 1997
- [32] 姚昆亮. 自动化跳汰机研究. 选煤技术, 1999(4) 5-7
- [33] SKT跳汰机控制系统. 科技成果, 唐山精成电子设备
- [34] 东滩选煤厂跳汰机灰分在线回控, 项目技术报告, 2001. 3
- [35] 东滩选煤厂跳汰机灰分在线回控, 项目研制报告, 2001. 9
- [36] 东滩选煤厂跳汰机灰分在线回控, 项目使用报告, 2002. 12
- [37] 许占贤, 周振英. 选煤试验. 煤炭工业出版社, 1994.9
- [38] 王振种等, 跳汰机分层过程计算机模拟研究, 中国矿业大学学报, 2000, No.4
- [39] 徐志强, 皇甫京华, 霍金等. 跳汰机工艺参数检测与控制. 东北煤炭技术, 1997. 10, Vol.5, P44-P46
- [40] 扬洁.  $\gamma$ 射线灰分仪在重介质选煤中的应用. 煤炭加工与综合利用, 2001(4) 29-33
- [41] 李敏恒. 跳汰机与测灰仪的闭环自动控制探讨. 煤质技术, 2004(2) 69-70, 66
- [42] 陈云峰等. 在线测灰仪在镇城底选煤厂的应用. 西山科技, 2001, 8(增刊)
- [43] 关泽龙等. 在线测灰仪在白龙矿选煤厂的应用. 选煤技术, 2001(6) 55-56
- [44] 谢广元等. 选矿学. 中国矿业大学出版社, 2001. 8
- [45] Rui. Xuan. Rong. Fundamental studies of the stratification mechanism of the jig(for degree of Doctor of Philosophy). University of Queensland, 1990
- [46] A. Jonkers, A. j. G. beck, etc. Numerical modeling of particle stratification in batch jig.
- [47] Proceedings of the sixth Australian coal preparation, Paper B3, 120~134
- [48] J. Lyman. Review of Jigging Principle & Control Preparation. 1992, No. 11, P145-165
- [49] R. X. Rong etc. jig performance analysis, vii, australia Coal Preparation conference

## 致 谢

在论文定稿之际，我衷心地感谢给予我悉心指导和谆谆教诲的贾长龄导师。三年来，导师在本人论文选题、调研、撰写以及定稿过程中付出了辛勤劳动，给予我莫大的启迪。导师渊博的学识、严谨务实的治学态度、脚踏实地的工作作风、真挚坦诚的为人更使我受益终生。在研究生学习期间，导师还给了我许多生活上的关心和帮助。论文完成之际，我谨向尊敬的导师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

在现场采样、试验期间，得到百善矿选煤厂陈圩山厂长等的协助和支持；在实验室试验阶段，得到了李平、姚鑫等同学的帮助，在此一并表示感谢！

三年研究生学习、生活中，各位领导老师为我们提供了良好的学习和生活环境，并给予许多指导、关心和帮助，特此表示感谢！

本人在论文撰写过程中，参阅了大量的论文和著作，在此，对启迪作者思路而未能一一署名的国内外学者和前辈致以诚挚的谢意！

最后，衷心感谢各位专家在百忙之中对本论文给予评审。由于作者水平和时间的限制，文中难免有不足、疏漏甚至错误之处，恳请给予批评指正，以便在今后的工作中进一步修正、完善，谢谢。

作者：韦民红  
2005年4