

中国洁净煤技术丛书

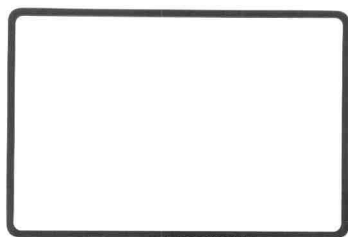
选 煤

XUAN MEI

▶ 陈贵锋 主编
▶ 唐海香 王续良 吴立新 副主编



化学工业出版社



国洁净煤技术丛书

第 一 卷

选 煤

X U A N M E I

► 陈贵锋 主编
► 唐海香 王续良 吴立新 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书系统地叙述了破碎和筛分、各种选煤方法的基本原理及主要设备、选后产品脱水、煤泥水处理、选煤产品预测、选煤厂节能减排等内容，并注意将国内外生产科研中的一些最新研究成果充实到书中，体现了当代选煤的科技水平。

本书可供从事煤炭加工技术研究开发工作的工程技术和研究人员，相关政策研究人员以及大专院校相关学科的教师和学生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

选煤/陈贵锋主编. —北京: 化学工业出版社, 2010.8
(中国洁净煤技术丛书)
ISBN 978-7-122-08869-7

I. 选… II. 陈… III. 选煤 IV. TD94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 117570 号

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 陶燕华

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 391 千字 2011 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

《中国洁净煤技术丛书》编写委员会

组织编写单位：煤炭科学研究总院北京煤化工研究分院

编委会主任：徐振刚

编委会副主任：范韶刚 陈亚飞 曲思建 陈贵锋 何国锋 王利斌
姜 英 王乃计 梁大明

编委（按姓名笔画排序）：

马伟伟	王 彬	王 琳	王 鹏	王乃计	王小磊
王利斌	王国房	王燕芳	文 芳	白向飞	冯现河
刘立麟	孙仲超	孙淑君	纪任山	李艳芳	步学朋
肖翠微	吴立新	何国锋	何海军	张 颀	陈文敏
陈明波	陈贵锋	陈洪博	罗隽飞	周建明	段清兵
姜 英	贾传凯	唐海香	涂 华	商铁成	梁 兴
梁大明	董卫果	傅 丛	裴贤丰		

序

低碳经济和节能减排是目前社会经济活动的主旋律之一。所谓低碳经济,是指在可持续发展理念指导下,通过技术创新、制度创新、产业转型、新能源开发等多种手段,尽可能地减少煤炭石油等高碳能源消耗,减少温室气体排放,达到经济社会发展与生态环境保护双赢的一种经济发展形态。低碳技术包括洁净煤技术和二氧化碳捕集与储存技术(CCS)等。显然,洁净煤技术是低碳经济和节能减排的核心技术之一。煤炭是我国的基础能源,要实现到2020年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%的目标,不断研究开发和推广应用洁净煤技术是最切实可行的技术途径。

我国富煤贫油缺气的资源特点决定了煤炭在我国一次能源生产和消费结构中的主导地位。我国煤炭生产和消费量占一次能源生产和消费总量的70%左右。预测到2020年,煤炭在一次能源消费构成中的比重不会低于60%。煤炭消费绝对量仍将逐年增加。因此保证煤炭能源的生产和供应是我国能源安全的根本要求,而大量煤炭能源的开发和利用必须以洁净煤技术的开发和应用为基础。

洁净煤技术(clean coal technology, CCT)是煤炭开发和利用中减少污染和提高效率的煤炭加工、转化、燃烧和污染控制等一系列技术的总称。我国洁净煤技术在20世纪90年代得到了高度的重视和快速的发展,于1995年成立了国家洁净煤技术推广规划领导小组,1997年制定了《中国洁净煤技术“九五”计划和2010年发展纲要》,成为促进中国洁净煤技术发展的指导性文件。《中国洁净煤技术“九五”计划和2010年发展纲要》指出,洁净煤技术主要包括煤炭洗选、加工、转化、先进燃烧技术、烟气净化等方面。随着洁净煤技术的发展,现阶段中国洁净煤技术包含四个领域、二十项技术,具体如下。

① 煤炭加工技术:选煤、型煤、配煤、水煤浆、低阶煤提质。

② 煤炭高效燃烧及先进发电技术:超临界和超超临界发电、循环流化床(CFBC)、煤气化联合循环发电(IGCC)、低 NO_x 燃烧、高效工业锅炉与窑炉。

③ 先进煤炭转化技术:煤炭气化、煤炭液化、煤基多联产、煤炭制氢与燃料电池、煤制天然气。

④ 污染控制与资源化利用:烟气净化、电厂粉煤灰综合利用、煤层气开发利用、矿区生态环境技术、矿井水与煤矸石利用及资源化等。

在我国一系列技术政策和发展规划中,明确指出了洁净煤技术的科技发展方向。同时,通过一些产业政策和激励政策,鼓励洁净煤技术的发展和利用;在国家技术政策、环境政策以及激励机制的引导下,洁净煤技术的推广和应用取得了良好的效果。在推进全国能效水平逐步提高的同时,促进了环境状况的改善。

随着技术、经济的发展和市场需求的扩大,可生产洁净能源与化工品的新型煤化工技术得到了很大的发展,已有了较好的基础,能够生产车用燃料、石油化工品、电和热等能源产品,是我国未来煤炭利用的重要方向之一。新型煤化工产业在常规污染物治理和二氧化碳捕集方面也有独特的技术优势。可实现近零排放的煤基多联产系统是实现煤炭超清洁利用的重

要发展方向，是未来煤炭高效、洁净利用的发展趋势。我国对二氧化碳减排技术的重视程度日益提高。

本系列丛书以煤炭科学研究总院北京煤化工研究分院的中青年专家学者为主，并邀请有关方面的专家学者参与，比较全面地论述了洁净煤技术体系中的一些具体技术，包括其发展过程、发展现状和发展方向等，涉及洁净煤技术的诸多方方面面，是专业性较强的综合性参考资料，希望通过本系列丛书的出版，能够对我国洁净煤技术的发展和應用起到积极的推动作用，为我国节能减排目标的完成作出贡献。

濮洪九

2010 年 10 月

前言

我国是煤炭的生产和消费大国，煤炭占我国一次能源的 70% 左右，这种能源结构在相当长的时间内不会改变。煤炭不仅可以燃烧，还是重要的化工原料，煤炭经过转化可获得气态、液态清洁燃料及多种产品。原煤直接燃烧，不仅严重污染环境，我国由此造成的酸雨区和二氧化硫污染区已达国土面积的 40% 以上；同时造成极大的资源浪费。为保证国民经济的可持续发展，提高煤炭利用率，减少燃煤污染，发展洁净煤技术是我国的能源战略方向。

选煤是洁净煤技术的基础，也是煤炭深加工（制水煤浆、焦化、气化、液化）和洁净、高效利用的前提。通过选煤可以提高煤炭质量，原煤经过洗选加工可以除去原煤中大部分矿物杂质，可以降低 60%~70% 的灰分和脱除 50%~70% 的黄铁矿，减少燃煤对大气的污染，有着十分显著的环境效益。

近几年来，我国选煤工业发展很快，原煤入选比重也有较大的增长，选煤技术和装置有很大提高。今后发展选煤势在必行，国家也已制定了大力发展选煤的规划。到 2015 年，我国将新建一批大、中型高技术含量的先进选煤厂，并改造现有的部分选煤厂，增加原煤入选率达到 75% 以上。

本书由多年来从事选煤教学、科研工作的教师编写，全书共分六章，第 1 章由郭德编写，第 2 章原煤准备：筛分和破碎由唐海香、张英花编写，第 3 章煤炭分选由马瑞欣、郭德、石常省、王续良编写，第 4 章选煤效果的预测和评定由张秀梅编写，第 5 章水力分级与煤泥水处理由唐荣辉、陈群彪编写，第 6 章选煤厂节能减排由张有东编写。全书由陈贵锋、唐海香、王续良、吴立新统稿。

由于选煤知识内容较多，编写过程中，尽量提炼基本内容，同时注意知识体系的完整性。书中还介绍了国内外选煤新技术和新工艺。可供选煤厂、高等院校及其他人员参考。

由于时间仓促，书中疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2010 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 选煤的定义	1
1.2 选煤的意义	1
1.3 国内外选煤技术总体发展状况	1
1.3.1 跳汰选煤技术研究现状及发展	1
1.3.2 重介质选煤技术研究现状	4
1.3.3 煤泥分选技术研究现状及发展	6
1.3.4 浮选技术研究现状及发展	7
1.3.5 干选机的发展	8
第 2 章 原煤准备：筛分和破碎	10
2.1 原煤准备工艺	10
2.2 煤炭筛分	11
2.2.1 粒度及其表示方法	11
2.2.2 筛分机械	11
2.2.3 筛分机工作效果和影响因素	26
2.3 煤炭破碎	30
2.3.1 破碎的基本概念	30
2.3.2 破碎机械	33
2.3.3 破碎机工作效果的评定	40
第 3 章 煤炭分选	41
3.1 跳汰选煤	41
3.1.1 概述	41
3.1.2 跳汰选煤的基本原理	42
3.1.3 选煤用跳汰机	49
3.1.4 跳汰选煤工艺	63
3.2 重介质选煤	65
3.2.1 概述	65
3.2.2 重介质分选机	66
3.2.3 重介质旋流器	73
3.2.4 重介质选煤的生产控制与管理	89
3.2.5 重介质选煤生产工艺	91
3.3 浮游选煤	95
3.3.1 概述	95
3.3.2 浮游选煤的基本原理	96

3.3.3	浮选剂	101
3.3.4	浮选机及主要辅助设备	107
3.3.5	影响浮选效果的主要因素	118
3.4	其他选煤方法	123
3.4.1	概述	123
3.4.2	空气重介质流化床分选	123
3.4.3	复合式干法选煤	124
3.4.4	干法电选制备超纯煤	127
3.4.5	摇床、斜槽和螺旋分选机选煤	128
3.4.6	螺旋滚筒选煤	132
3.4.7	新型粗煤泥分选方法	133
3.5	产品脱水	134
3.5.1	概述	134
3.5.2	筛分脱水	135
3.5.3	离心脱水	135
3.5.4	圆盘式真空过滤	140
3.5.5	加压过滤	142
3.5.6	压滤	144
第4章	选煤效果的预测和评定	145
4.1	筛分试验和浮沉试验	145
4.1.1	原煤粒度组成与分析	145
4.1.2	煤炭浮沉试验	150
4.2	原煤可选性曲线	155
4.2.1	原煤可选性曲线 (H-R 曲线) 的绘制及应用	155
4.2.2	迈耶尔曲线 (M 曲线) 的绘制及应用	161
4.3	分配曲线	163
4.3.1	矿粒在产物中的分布	163
4.3.2	分配率的计算	163
4.3.3	分配曲线的绘制	164
4.3.4	分配曲线的特性参数	165
4.4	选煤效果预测	167
4.4.1	重选效果的预测	167
4.4.2	浮选效果的预测	169
4.5	选煤工艺效果评价	170
4.5.1	重力选煤工艺效果评价	170
4.5.2	浮选工艺效果评价	171
第5章	水力分级及煤泥水处理	174
5.1	煤泥水的特性	174
5.1.1	煤泥水中煤泥的性质	174
5.1.2	煤泥水的浓度	175
5.1.3	煤泥水的黏度	176
5.2	煤泥水絮凝	177

5.2.1	凝聚与絮凝原理	177
5.2.2	选煤厂常用的絮凝剂	179
5.2.3	絮凝剂的应用	181
5.3	煤泥水分级、浓缩和澄清	182
5.3.1	分级设备及其工作原理	182
5.3.2	浓缩和澄清设备及其工作原理	190
5.4	倾斜板沉淀设备	194
5.4.1	倾斜板设备工作原理	194
5.4.2	倾斜板沉淀设备	195
5.5	分级、浓缩效果评定	196
5.5.1	定性分析	196
5.5.2	评价指标	197
5.6	煤泥水处理系统	198
5.6.1	煤泥水原则流程	198
5.6.2	粗煤泥回收流程	202
5.6.3	尾煤处理系统	204
第6章	选煤厂节能减排	206
6.1	节能的基本原理	206
6.1.1	节能的基本原理	206
6.1.2	企业能耗技术指标	207
6.1.3	生产系统节能的潜力	209
6.2	选煤厂节能	210
6.2.1	节能原则	210
6.2.2	选煤厂节能的基本途径	210
6.3	电动机的合理使用	215
6.3.1	异步电动机的效率及经济负荷系数	215
6.3.2	提高电动机效率的措施	215
6.4	功率因数的人工补偿	217
6.4.1	电容器并联补偿的工作原理	218
6.4.2	电容器容量的选择	218
6.4.3	并联电容器的补偿方式	219
6.4.4	无功功率补偿的技术经济效益分析	220
6.5	选煤厂减排	221
6.5.1	粉尘的产生、性质、危害及防治	221
6.5.2	噪声的产生与防治	221
6.5.3	选煤厂洗水闭路循环	222
6.6	选煤厂资源综合利用	223
6.6.1	煤矸石的利用	223
6.6.2	煤泥的综合利用	230
参考文献		232

第1章 绪论

1.1 选煤的定义

众所周知，煤炭是由植物形成的。距现在约 2.5 亿年以前，植物在湖泊、沼泽地带埋藏在水底和泥沙中，经过漫长的地质年代和地壳运动，在隔绝空气的情况下，在细菌、高温、高压的作用下，经生物、物理、化学作用，植物逐步演变成今天的煤炭。

成煤过程经过两个阶段：泥炭化阶段和煤化阶段。原煤在形成过程中混入各种矿物杂质，在开采和运输过程中又不可避免地混入顶板和底板的岩石及其他杂质（如木材、金属和其他杂物）。随着机械化采煤程度的提高和地质条件的变化，原煤质量越来越差，表现在原煤中的矸石量增加、原煤灰分提高、细粒煤含量增长、水分提高。为降低原煤中的杂质，把煤炭按质量、规格分成各种产品，以满足不同用户对煤炭质量的要求，有效合理地利用煤炭资源，提高煤炭利用率，减少燃煤对大气的污染，保证国民经济的可持续发展，就要对煤炭进行机械加工。对煤炭进行机械加工的过程称为选煤。选煤是煤炭工业的重要组成部分。

选煤是利用煤炭与其他矿物质间的不同物理、物理-化学性质，在选煤厂内用机械方法除去原煤中的杂质，把它分成不同质量、规格的产品，以满足不同用户的要求。

1.2 选煤的意义

选煤作为洁净煤技术的源头技术，其意义主要体现在以下几方面。

- ① 去除或降低原煤中的杂质，降低灰分和硫分，提高煤炭质量，满足用户的需求。
- ② 把煤炭分成不同质量、规格的产品，在适应用户需要的基础上，有效合理地利用煤炭，提高煤炭利用效率，节约用煤。
- ③ 煤炭经过洗选，排除绝大部分矸石，减少无效运输，同时为综合利用煤矸石创造条件。
- ④ 煤炭经过洗选可以除去大部分的灰分和 50%~70% 的黄铁矿硫，减少燃煤对大气的污染。

1.3 国内外选煤技术总体发展状况

1.3.1 跳汰选煤技术研究现状及发展

跳汰选煤是煤炭分选的主要工艺之一，目前我国约有 40% 的原煤采用跳汰工艺分选。

跳汰选煤的优点在于工艺流程简单、设备操作维修方便、处理能力大,且有足够的分选精确度;另外,跳汰选煤入料粒度范围宽,能处理 0.15~150mm 粒级原料煤。跳汰选煤的适应性较强,除极难选煤外,均可采用跳汰分选方法处理。因此,未来很长一段时间内,跳汰选煤仍将在我国选煤行业中占有一定地位。

1.3.1.1 跳汰设备的研究现状及存在的问题

(1) 国外跳汰设备研究现状

国外跳汰机主要在机体大型化、风阀工作方式以及自动排料方面做了大量工作。亚历山大洛茨成功地用两个并列设置的风阀分别产生主冲程和叠加冲程,使上升期分解为三次脉动,扩大了脉动的上升周期,使床层松散状态时间占总脉动周期的比例由过去的 40% 延长到 70% 以上。实现物料快速分层,提高了分选精度,节省了顶水量,为减少洗水循环量创造了条件。德国 Batac 跳汰机也采用了这种方式,最新的 Batac 跳汰机用旋转蝶式风阀代替了过去的盖板阀,为实现叠加冲程创造了条件。日本利用电子技术等高科技手段,研制出了可变波形跳汰机,这种跳汰机需要两种不同压力的工作风源,一种低压风,一种高压风,采用两套风阀工作,目前我国盘北选煤厂已投入使用。该跳汰机利用电子控制装置控制风阀的运动,使两种风产生不同的叠加,改变跳汰机的脉动水流,实现变波跳汰。这种变波跳汰对细粒煤的分选有明显改善。波兰研制出双侧室结构的筛侧跳汰机,以增大跳汰机的面积。这种跳汰机是两台筛侧跳汰机共用一套风阀来工作。

Batac 跳汰机还针对末煤和块煤采用了两种不同的排料结构。末煤跳汰机采用液压闸门调节排料口的大小,而块煤跳汰机则是用液压缸闸门调节筛板倾角来调节排料口的大小。波兰的 BOSS-2000 型跳汰机,采用排料闸门和溢流堰互动的排料方法,动力源是伺服马达,通过调整伺服马达的静态和动态工作参数确定产品的排出量。Apic 跳汰机的排料方式是在溢流堰和闸门内部设置脉动隔板,隔板由冲孔板制成,确保闸门区域到床层末端能够连续脉动,同时闸门开口也会随着脉动开闭,既不会被堵塞,大粒度物料也会顺利通过。

(2) 国内跳汰设备研究现状

我国对跳汰机及其自动控制研究也做了大量工作,并取得多项成果。目前常用的跳汰机有 LTX 型、LTG 型、X 型、SKT 型。LTX 型和 LTG 型是早期设计的机型,均采用溢流堰、直闸门、排料轮和护板组成的排料机构。由于排料轮距下料口太近,排料轮上的物料易受脉动水流作用而自行流出,难以控制排料量。此外,排料轮放在排料道内容易被大块物料卡住,因此这种结构一直未能达到良好的应用效果。

X 型跳汰机采用液压托板排料方式,通过托板调节排料口大小来控制排料量。因末煤流动性较好,受粒度变化影响小,排料口大小与排料量基本呈线性对应关系,因此这种结构较适用于末煤跳汰机。

SKT 型跳汰机是目前我国开发较成功的一类跳汰机。它采用无溢流堰深仓式准静排料方式。取消溢流堰可防止已经分层的物料撞击和翻越溢流堰造成二次混杂。排料轮设在排料仓底口的物料下滑安息角之外,只有当其转动时才能排料,解决了卡轮、跑料等弊端。因排料轮是强制性的主动排料,其转速可无级调整并和排料量呈线性对应,从而使跳汰机可以连续、稳定、准确地控制排料量,产品质量易于保障。其机体有以下结构特点:采用洗水 U 形振荡的筛下空气室结构,使各隔室不易产生互相干扰,减少了能耗,同时也防止在进气期或排气期内洗水撞击,使洗水平稳升降,改善了物料的分选条件;顶水沿机体全宽度均匀给入;机体设计成漏斗形单隔室组合结构,每个隔室自成一体。采用数控气动立式滑阀,汽缸

带动阀芯在阀套内滑动,当阀芯和阀套上的开口重合时,完成进气或排气。阀芯运动不受风压影响,也不和其他部件撞击,因此需要的动力小,工作可靠,噪声很小。

动筛跳汰机是近年兴起的新型洗选设备,主要用于大块煤排矸和动力煤分选,具有工艺操作简便、节能节水、投资少和运行成本低等优点。自1989年我国自行研制的首台TD型动筛跳汰机试运行成功以来,十几年来已有液压式和机械式两大类4个国产系列和1个引进系列产品,分别应用于炼焦煤选煤厂和动力煤选煤厂(含褐煤),既用作预先排矸,也用作主要分选作业。与其他分选设备一样,动筛跳汰机也有其自身限制条件。例如,由于动筛机构笨重,设备的大型化受限;由于筛板长度的限制,加之调节参数少,不适于处理20mm以下的物料等。

目前我国在跳汰机方面存在的主要问题是:机械结构、数控风阀、自动排料控制系统以及分选指标等方面与国外跳汰机相比技术各具特色;但在设备的制造水平和使用可靠性方面差距明显;在检测技术手段、检测数据精度和可靠性以及系统控制完善性方面也存在较大差距。

1.3.1.2 跳汰选煤理论的研究与发展

在已有跳汰分选机理(主要有古典理论、重介质理论、位能理论、概率统计理论等)认知的基础上,借助现代先进的测试仪器、仪表,应用计算机技术,通过过程仿真、图像识别、信息分析处理等手段模拟和跟踪跳汰分选过程,对跳汰分选机理的研究取得了新进展。研究得出以下共识:跳汰分层基本上是按密度进行分层,同时也受到粒度的影响。分层后,相同粒度下,密度大的物料分布层位相对靠下;相同密度下,粒度大的物料分布层位也相对靠下;跳汰过程离不开床层,床层是矿粒按密度分层的介质;跳汰过程是周期性脉动过程,以保证一定的松散度范围。松散度上限过大或过小,对矿物按密度分层都不利;跳汰过程的主要矛盾为:按密度分层与松散度、整体托起的松散形式与数控风阀、高初加速度与松散度、宽级别或不分级入选的矛盾等。

跳汰理论今后研究的重点方向主要为运用计算流体力学的方法研究流体流场变化对分选效果的影响,并对物料的分选机制进行研究。

1.3.1.3 跳汰机控制的研究及进展

近来跳汰机的现代控制理论逐步形成了以最优控制、自适应控制、智能控制、模糊控制、专家系统、神经网络控制等为代表的现代控制理论分析和设计方法,并且取得了很大的进展。但是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便面临研究对象没有确定数学关系的局面,控制效果也不理想。目前实际应用的跳汰机自动控制系统主要有:风阀控制系统、跳汰机自动排料系统、给煤量控制系统及精煤灰分在线检测系统等。

① 风阀控制系统。即控制跳汰机的跳汰制度,包括风水制度、跳汰周期、跳汰频率以及跳汰的进气期、膨胀期、排料期、停止期等。目前,风阀控制一般有两种形式,一种是由单片机构成的专门风阀控制器;另一种是通过PLC实现控制,并由上位机显示并修改跳汰制度。这两种控制系统均为开环控制方式。

② 跳汰机自动排料系统。其基本原理是:检测跳汰床层厚度,然后将床层厚度信号送入控制器,控制器根据设定的床层厚度与反馈的实际床层厚度进行比较,经过调节器输出控制信号来控制排料闸门或排料滚轮,从而控制排料量,稳定床层厚度。

③ 给煤量控制系统。给煤量控制的基本原理是:检测实际给煤量,然后通过给煤机控制跳汰入料量大小。

④ 精煤灰分在线检测系统。在线灰分监测仪以它在线实时的特点,为跳汰机产品灰分控制奠定了基础。但同时对于在线灰分监测仪的精度要求也越来越高。目前,国内外用于煤炭洗选产品灰分测量的仪器装置大都是核辐射在线监测仪。

目前应用于选煤厂跳汰机的自动测控系统中,真正覆盖面广、实际使用效果较好的是跳汰自动排料系统,其他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仅处于尝试阶段,而这些处于试验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,有些是相辅相成的。因此,今后跳汰机控制系统的攻关任务仍然很艰巨。

1.3.2 重介质选煤技术研究现状

重介质选煤是一种效率很高的选煤方法,自问世以来,便以其高效率、高分选精度而得到迅速推广,在世界各主要产煤国,重介质选煤已上升为主导地位。另外,重介质分选工艺可以以低密度选出超低灰分精煤,这也是其他工艺所无法做到的。大型、高效、简化重介质选煤工艺及设备将成为选煤技术发展的方向,尤其是重介质旋流器选煤技术得到了快速发展和广泛使用。

1.3.2.1 块煤重介质分选机发展现状

块煤重介质分选机分为三类,即立轮重介质分选机、斜轮重介质分选机和浅槽刮板式分选机。

立轮重介质分选机作为块煤分选设备,在国外使用较多。常见的有德国生产的太司卡型和波兰生产的滴萨型立轮重介质分选机。我国20世纪70年代初期也研制了JL1.8型立轮重介质分选机,在国内的选煤厂使用中获得了良好的效果。在此基础上20世纪80年代初又设计了JL2.5型立轮重介质分选机,用以50~300mm粒级的块煤排矸。目前立轮重介质分选机的槽宽达到了4.5m。斜轮重介质分选机目前有LZX-1.6、LZX-1.6(双边入料)、LZX-2.0、LZX-2.6、LZX-3.2、LZX-4.0、LZX-5.0几种型号。虽然国外开发出了三产品重介质分选机,但使用效果并不理想。立轮重介质分选机与斜轮重介质分选机工作原理基本相同,其差别仅在于分选槽槽体形式和排矸轮安放位置等机械结构上有所区别。但在相同处理能力的情况下,立轮重介质分选机具有体积小、重量轻、功耗少、分选效率高、分选效果好和传动装置简单等特点。随着自动化大型选煤厂的发展,相应的选煤设备也要朝着自动、大型化发展,对国内的选煤设备研究提出了严峻的课题,国内的选煤技术和设备的先进程度也还远远不够。特别是近10多年,重介质旋流器发展迅速,人们的注意力重点不在块煤重介质分选机的研发上,所以近年块煤分选设备没有大的进展。

刮板式重介质分选机也称槽式重介质分选机,种类较多。在山西平朔安太堡露天矿选煤厂和神华集团神东公司选煤厂均有使用。

1.3.2.2 重介质旋流器的发展及研究现状

(1) 重介质旋流器的发展

自1945年荷兰国家矿山局(Duth State Mines)在分级旋流器的基础上研制成功第一台圆柱圆锥形重介质旋流器以来,世界各国陆续将其应用于工业生产。同时对圆柱圆锥形重介质旋流器做了不同的改进,衍生出一大批不同型号的重介质旋流器,如1956年美国维尔莫特(Wilmont)公司研制成功的无压给煤圆筒形重介质旋流器(简称DWP)、20世纪60年代英国研制成功的有压给料圆筒形沃赛尔(Vorsyl)重介质旋流器、1966年前苏联研制成功的两台旋流器串联组成的三产品重介质旋流器、20世纪80年代初意大利研制成功的两台

圆筒形旋流器串联组成的三产品重介质旋流器以及 20 世纪 80 年代中期英国煤炭局推出的直径为 1200mm 的中心给料圆筒形重介质旋流器等。

我国于 1956 年开始重介质选煤技术的研究, 1966 年煤炭科学研究总院唐山分院在辽宁彩屯煤矿选煤厂建成重介质旋流器选煤车间, 采用该院设计的 500mm 圆柱圆锥旋流器分选 6~0.5mm 级原煤。1969 年河南省平顶山矿务局建成一座 350 万吨/年的田庄选煤厂, 采用 $\phi 500$ mm 重介质旋流器处理 13~0.5mm 级原煤。随后, 唐山分院又相继研制成功了 $\phi 600$ mm、 $\phi 700$ mm 两产品圆柱圆锥形重介质旋流器, 并于 20 世纪 70 年代末开始研制三产品重介质旋流器、非磁性介质重介质旋流器和微细介质重介质旋流器。80 年代初, 唐山分院研制的 3NZX 系列有压给料三产品重介质旋流器通过国家鉴定。上述旋流器继承了国外三产品旋流器的优点, 并且根据我国的实际情况作了重大改进, 设计水平与制造质量均达到了国际先进水平。1989 年, 唐山分院开始研究采用无压给料方式的 3NWX710/500 型三产品重介质旋流器选煤工艺及设备, 1993 年 2 月研制成功并首次应用于选煤工业生产的 3NWX710/500 型三产品重介质旋流器具有分选精度高、二段分选密度在线调节、工艺简单、操作方便、投资省、电耗低的特点。“九五”期间完成 3NWX1200/850 型无压给料三产品重介质旋流器的研制, 该旋流器的适宜入料范围为 80~0mm, 处理能力为 250~350t/(h·台)。近些年来, 我国重介质选煤技术发展迅速, 其中最重要的标志是广泛应用以无压三产品重介质旋流器选煤为核心、用一套低密度悬浮液实现三产品分选的选煤工艺。加之三产品重介质旋流器的大型化发展、入料粒度上限 (50~100mm) 的提高和不脱泥直接入选工艺的应用, 使重介质选煤工艺大为简化, 建厂投资和运行费用减小, 生产效率大幅度提高。2002 年 1 月, 唐山国华科技有限公司研制的 3GDMC1300/920A 型重介质旋流器和 3DMC1400/1000A 型重介质旋流器相继在火铺矿选煤厂和大同煤矿集团有限公司四台矿选煤厂投入工业应用, 其单机处理量达 450~550t/h, 取得了显著的经济效益和社会效益。2004 年 12 月, 唐山分院研制的 3SNWX1300/920 型双给介无压给料三产品重介质旋流器, 其单机处理能力达 350~450t/h, 该型号旋流器是唐山分院针对国家“十五”攻关课题《重介质旋流器选煤新工艺关键技术的研究》而研制的新型选煤设备。该旋流器由圆筒型旋流器作为一段和由圆筒-圆锥形旋流器作为二段串联而成, 其结构参数是通过 CFD 技术对重介质旋流器流场进行研究和优化后确定的。2005 年至今, 3SNWX1100/780、3SNWX1200/850、3SNW1350/950 型双给介无压给料三产品重介质旋流器相继在重庆、内蒙古、山东等地投入工业应用, 均取得了显著的效益。

唐山分院又研制成功了 3GSNWX 型预先排矸双给介无压给料三产品重介质旋流器。该型旋流器非常适合含矸量高的原煤的洗选, 且由于两段共用一套介质系统, 简化了工艺, 节约了能源。

(2) 重介质旋流器技术理论研究现状

在重介质旋流器迅速发展的同时, 人们对重介质旋流选煤技术的理论研究越来越重视, 但总体上来看, 理论研究滞后于重介质旋流器设备的发展。

目前对旋流器的理论研究主要集中在颗粒分层运动分析和密度场的形式研究两个方面。试验研究则侧重于优化旋流器结构和参数。为了提高重介质选煤的分选效率, 探索重介质分选过程参数和设备结构参数对分选过程的影响, 各国加强了对重介质分选过程的理论研究, 并取得了一定进展。研究人员利用高速摄像、示踪粒子等手段, 从理论上对重介质旋流器内速度场分布、离心力场分布、密度场、颗粒分选过程等进行分析, 确定其分选原理和各参数间的相互关系, 并提出了一些新的论点。

20 世纪 70 年代以来, 随着计算机的普及以及计算能力的不断提高, 基于数值计算的计

算流体力学方法正在冲击并改变着传统的工业过程设计方法。这种数值方法是通过建立各种条件下的基本守恒方程实现模拟真实过程各种场（流场、温度场、浓度场等）的分布。澳大利亚的 M. S. Breanan 利用 Fluent 软件对 $\phi 350\text{mm}$ 重介质旋流器的密度场分布进行了研究。结果证明，采用 Fluent 软件，选取 RSM 湍流模型，可以较好地对重介质旋流器流场进行数值模拟。南非的 N. L. Ourens 和 J. Bosman 利用 CFD 模拟技术对重介质旋流器进行了不同程度的数值模拟。杨建国等针对重介质旋流器入口流道磨损的成因，分析了流态化颗粒的运动规律和对器壁的冲击力作用，提出了颗粒冲蚀参数计算的数学模型。结合煤炭重介质分选的实际情况，分析了各种颗粒和旋流器不同结构参数对冲蚀作用的实际影响，为旋流器的结构参数优化提供了理论依据。刘峰等利用 Fluent 软件，选用 RSM 湍流模型，对目前常用的 DSM 和 DWP 两产品重介质旋流器流场进行了数值模拟，并对重介质旋流器的结构和能耗的关系进行了研究。

旋流器内的流体是一个复杂的三维旋转流体，目前尚不能完全用理论的分析方法来阐明旋流器内部的流体力学规律。众多学者采用计算流体力学理论对重介质旋流器的相关研究为今后的研究工作提供了一种新的手段，运用计算机图形学及图像处理技术，形象直观地显示科学计算的中间结果及最终结果并进行交互处理已经成为可能。因此，可以应用 CFD 技术对选煤用重介质旋流器流场进行计算机模拟，使研究结果可视化、直观化，为旋流器参数的优化提供坚实的技术基础。

1.3.3 煤泥分选技术研究现状及发展

高效、简单、经济的煤泥分选设备及工艺尤其是以脱硫、降灰为宗旨的高性能粗煤泥分选设备的研制是目前选煤技术研究的重点。比较现实的、有效的煤泥分选设备，主要有以下三种：螺旋分选机、液固流化床分选机和煤泥重介质旋流器。

螺旋分选机具有结构简单、单位处理能力大（可达摇床的 10 倍）、吨煤投资低、本身不需要动力、操作维护简便、无传动部件、维修量小等优点，是一种简易有效的粗煤泥分选设备，在许多炼焦煤选煤厂和中、小地方选煤厂中得到了应用，它不仅降灰，而且脱硫效果显著，是处理煤泥的成功设备。在国外，螺旋分选机一直是分选细粒煤最普遍的设备之一，在我国作为粗煤泥的精选设备也已经得到较好的应用。螺旋分选机的缺点是：设备的分选效率比重介质分选方法低，对煤质的适应性差，对入料的数量、质量要求比较严格，而且其分选密度偏高，机身高度大，给料和循环的中矿需要砂泵输送，本身参数不易调节，较低密度分选时效果差等。但对于一些氧化程度高、硫分较高，不宜采用浮选的易选煤泥，采用螺旋分选机分选可望得到良好的分选效果。

液固流化床分选机 TBS (Teeter-bed Separator) 在国外应用于分级已经有几十年的历史，但用于细粒煤的分选却是最近 20 年才开始的，它利用入料中的重产物在上升水流作用下实现流态化以提高悬浮液的密度，从而将物料按照沉降速度的不同进行分离，当入料的粒度范围较窄时，密度对沉降速度的影响起主导作用，这时可视为按密度分选。液固流化床分选机主要由给料系统、排料系统、密度控制回路和分选机床体等四部分构成。澳大利亚许多矿山倾向于采用液固流化床分选机分选细粒矿石。近几年我国许多高校和生产研究单位也着力这种设备的研发，虽然名称和型号不同，但原理相同，生产中应用也取得了良好的使用效果。液固流化床分选机用于分选细粒煤的优点是：分选密度可控、可调且在入料粒度范围较窄时按密度分选效率较高、不需要复杂的工艺系统、运行成本低、单位处理量大、维护工作量少。液固流化床分选机的缺点在于要求入料的粒度范围较窄，用于分选细粒煤时溢流产品一般还需经过脱泥才能达到灰分要求。分选精度也不十分令人满意，而且其控制也有一定的

难度。

煤泥重介质旋流器一般采用小直径旋流器、较高入料压力(150kPa)和微细磁铁矿介质($-10\mu\text{m}$ 占50%)进行分选。煤泥重介质并不是一个新概念,在南非、澳大利亚等国已经成功应用多年,例如建于1957年的比利时 Tertre 选煤厂是第一个采用重介质工艺分选粉煤的选煤厂,在其17年左右的生产期间内取得了令人满意的结果;又如南非的 Greenside 选煤厂的粉煤重介质工艺至今已经运转18年的时间,成功地生产出了7%的低灰精煤;微细磁铁矿粉重介质旋流器工艺是美国能源部匹兹堡能源中心20世纪80年代末开发的,1996年3月开始在美国 Custom 煤炭总公司的500t/h选煤厂中进行工业性试验。国外采用微细介质小直径重介质旋流器分选细粒煤,可使有效分选下限达到0.045mm,且 E 值在0.06~0.08左右,0.5~0.045mm级无机硫脱硫率可达65%以上。这种分选工艺的主要弊病在于:系统较为复杂(需要单独设立一套微细介质循环和回收系统)、操作难度大、特细粒介质回收困难、生产成本高等。国外目前研究的方向是采用大直径、低压给料和目前市场可得到的超细介质实现细颗粒的精确分选。

为简化工艺系统,我国选煤科技工作者利用大直径重介质旋流器对加重质的分级、浓缩作用,将煤泥和精煤脱介筛(或弧形筛)筛下合格介质分流一同进入小直径煤泥重介质旋流器再选的分选工艺。这种工艺减少了特细介质的制备环节(利用了大直径重介质旋流器分级浓缩作用产生的特细介质),将溢流和底流分别进入精煤磁选机和中煤磁选机,生产工艺大幅度简化。目前我国煤泥重介质旋流器直径已达到400~500mm,入料压力为(40~50) D (水柱高度, D 为旋流器直径)。缺点为煤泥重介质旋流器的分选精度受到大直径重介质旋流器运行状况的影响,由于细粒煤在两个旋流器中随介质高速旋转,次生煤泥略有提高,增加了后续浮选作业的负荷,介耗较高。

目前煤泥重介质旋流器在我国应用所出现的问题主要有以下几点。

① 只有部分煤泥随主旋流器精煤合格介质分流进入煤泥重介质旋流器分选,其余煤泥仍随未分流的合格介质在系统中循环并产生过粉碎,增加了介质黏度、损失了部分细粒精煤。

② 煤泥重介质旋流器组的有效分选下限虽然已达0.045mm,但尚缺乏有效的精煤产品脱泥设备来清除其中的高灰细泥以保证精煤泥的质量和降低后续浮选作业的入料量。

③ 选后微细介质的净化回收设备及流程仍待研究、改进。

④ 主选大直径旋流器与煤泥重介质旋流器之间的配合问题,部分煤泥被重复分选。

另外最近还出现了离心重选煤泥分选设备,如美国目前倾向于采用 Falcon 离心分选机和 Altair 离心跳汰机对细粒煤进行分选,澳大利亚则更多地使用 Kelsey 离心跳汰机,国内在细粒煤离心重选技术设备的研发上还仅仅是刚刚起步。

1.3.4 浮选技术研究现状及发展

就目前国内外的发展水平而言,在多种细煤泥分选技术中,浮游选煤技术的分选效果最好。随着采煤机械化程度的提高,选煤厂的原料煤中粉煤量越来越多,浮选作业也就越来越重要。

20世纪50年代我国选煤厂使用的浮选机大多从前苏联进口,主要型号有 $\phi\text{M}-2.5$ 型和CAM-2.8型。70年代末,有一些厂使用了前苏联的M $\phi\text{y}-12$ 型浮选机。60年代中期,波兰的PA3型浮选机引入我国,根据有关图纸,国内厂家制造并使用了该型浮选机。70~80年代,钱家营选煤厂、白龙选煤厂使用了波兰IZ-12型浮选机,单槽容积为12m³。