

Separation Theory of Fluidization

流态化分选理论

骆振福 赵跃民 著

中国矿业大学出版社

流态化分选理论

骆振福 赵跃民 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

流态化分选理论/骆振福,赵跃民著. —徐州:中国矿业大学出版社,2002.9

ISBN 7-81070-604-7

I. 流... II. ①骆... ②赵... III. 流态化—选煤 IV. TD94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 087526 号

书 名 流态化分选理论

著 者 骆振福 赵跃民

责任编辑 褚建萍

责任校对 崔永春

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 江苏省徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 7 字数 200 千字

版次印次 2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

印 数 1~1000 册

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

选煤是洁净煤技术的基础,其任务是去除煤中所含杂质,提高煤炭质量。

煤炭分选理论及技术的发展已有一百多年的历史,其间主要采用湿法选煤方法,如跳汰选、浮选、重介质选等。在选煤科学技术的发展过程中,由于湿法分选的局限性,以及水资源的短缺,人们对于干法选煤的探索和研究始终没有停止过。早在1916年美国就开发了风力选煤技术,并得到工业应用。随着社会经济的不断发展和进步,资源和环境可持续发展越来越成为人们的共识,因此,先进选煤方法的研究显得十分重要。由于干法选煤的独特优势,高效干法选煤研究开发更为重要,这在世界各国都取得了共识。前苏联、美国、加拿大等国率先开展了流化床干法分选研究。由于流化床干法选煤属多学科交叉领域,它必然随相关学科的发展而发展,尤其是流态化技术。适用于煤炭分选的流化床不同于化工上传统的稀相流化床,所以研究流化床干法分选难度较大。我国从20世纪80年代开始进行浓相高密度流化床选煤的研究,经过努力取得了很大进展,前景广阔。

作者长期从事流态化分选基础研究和技术开发,高水平地完成了硕士和博士论文,近年来还承担了国家自然科学基金、煤炭科学基金、“九五”国家重点科技(攻关)等项目,在流态化分选理论研

究上作出了创造性贡献,先后在国际国内学术刊物上发表论文 60 余篇。《流态化分选理论》是流态化分选领域的首部专著,书中较为系统地阐述了普通流态化分选理论和外加力场流态化分选理论,这将为干法分选的发展起到指导和推动作用。

我高兴地将这本书介绍给从事干法分选研究的人员以及高校有关专业的师生,相信大家会从中得到收益。

中国工程院院士



前 言

煤炭一直是世界上最重要的一次能源。由于煤炭是不洁净的能源,所以它的直接利用会造成严重污染和资源浪费。为此,早在 19 世纪末,人们就开始对煤炭分选加工。由于干法分选具有不用水的突出优点,故 20 世纪初,风力选煤就得以开发成功并得到工业应用。然而由于风力选煤存在分选效率低、适应性差等缺点,没能得到广泛应用。此后,人们就开始探索应用化工上的气固流态化技术对煤炭进行分选,由于这是交叉学科领域,其研究开发同时受分选技术和流态化技术的制约,所以没能取得突破性进展。近 40 年来,随着分选技术和流态化技术的不断发展,流化床高效干法分选研究进入新阶段,其中以空气重介质流化床分选理论及技术为代表,并相继出现了引入外来能量(如振动、磁场)形成高性能流化床的分选方法,这是多学科交叉渗透的成果,已成为矿物特别是煤炭分选领域的一个重要发展方向。

煤炭分选理论及应用方面的著作已有不少,但都是基于湿法分选方法的,干法分选特别是流态化高效干法分选理论及技术方面的专著还是空白。在此背景下,作者将近年来在干法分选领域取得的成果系统化,并着重介绍空气重介质流化床分选和外力场流化床分选的理论研究成果。全书共分五章,第一章描述了气固流态化的基本性质,详细研究了适合于矿物分选的浓相高密度流化床

的特性。第二章提出了空气重介质流化床选煤理论,讨论了加重质的级配原则及流化性能,建立了两元加重质流化床的密度模型,对矿粒在流化床中的受力进行了全面分析,并详细介绍了煤炭在流化床中的三级分布理论。第三章分析了流态化分选过程,对流化床密度的动态稳定性及分选介质的动态平衡进行了研究,建立了相关的数学模型。第四章首先分析了振动流化床的形成过程,揭示了振动抑制气泡生成的机理,并详细研究了振动流化床的空气动力学,提出了描述加重质流动状态的振动流化床流动模型,给出了振动流化床分选细粒煤的几组实验结果,较为系统地提出了振动流化床的分选理论。第五章研究了磁场流化床的稳定性,提出了用四种状态模型描述磁场作用下的气固颗粒系统的流态化过程,给出了磁场流化床分选下限的确定区间,并列举了几组磁场流化床对细粒煤的分选实验结果。

本书是作者多年在流态化干法分选领域的研究成果总结,在这些研究工作过程中得到了国家自然科学基金(59974030)、国家杰出青年科学基金(50025411)、国家教育委员会高等学校博士点基金、煤炭科学基金等的财政资助。

作者在研究生期间师从陈清如院士,他那优秀的品德、严谨的治学态度以及敢为人先的拼搏和创新精神一直鼓舞着作者去克服困难、奋勇进取。是他把作者带进了矿物加工工程学科的科学殿堂,可以说,此书的诞生是与他的关心和指导分不开的。

作者在科学研究工作中自始至终得到了中国矿业大学选矿工程研究中心的各位同仁的帮助和支持,他们是可以信赖的合作者,在此一并表示感谢。

目 录

绪论	1
第一章 气固流态化及其分选特性	4
1.1 导论	4
1.2 颗粒的流态化	5
1.2.1 流态化现象	5
1.2.2 流态化类型	8
1.3 流化床的流体力学特性	9
1.3.1 影响流态化质量的因素	9
1.3.2 经典散式流态化	13
1.3.3 经典聚式流态化	18
1.4 流态化的发展回顾	23
1.5 矿物分选流化床的特性	26
1.5.1 气体分布器的设计原则	26
1.5.2 流化床层的密度及其均匀性	33
第二章 空气重介质流化床选煤理论	36
2.1 干法选煤研究回顾	36
2.2 加重质的级配原则及流化性能	42

2.2.1	加重质粒度级配原则	42
2.2.2	加重质的物理性质	45
2.2.3	加重质的流化特性	46
2.2.4	水分对加重质流化性能的影响	51
2.3	两元加重质流化床的密度模型	52
2.3.1	理论计算模型	53
2.3.2	经验模型	56
2.4	矿粒在流化床中的受力分析	57
2.5	煤炭在流化床中的三级分布理论	63
2.5.1	理论分析	63
2.5.2	三级分布理论的应用	67
第三章	流态化分选过程的数学模型	72
3.1	床层密度的动态稳定性	72
3.1.1	试验系统	72
3.1.2	几种计算方法	74
3.1.3	分选前床层密度的稳定性	75
3.1.4	床层密度的动态稳定性	78
3.1.5	床层密度的模型预测	81
3.2	分选介质的动态平衡模型	83
3.2.1	介质平衡计算及其数学模型	84
3.2.2	介质平衡模型的应用	88
第四章	振动流化床分选理论	91

4.1	导论	91
4.1.1	振动流化床研究回顾	91
4.1.2	振动流化床深度分选的理论基础	96
4.2	振动流化床的形成	100
4.2.1	振动能量的传递规律	100
4.2.2	振动抑制气泡生成的机理	104
4.3	振动流化床的空气动力学	110
4.3.1	床层压降	110
4.3.2	最小流化速度及鼓泡速度	114
4.3.3	振动流化床的床层特性	116
4.3.4	床层粘度	125
4.4	振动流化床的流动模型	131
4.4.1	试验装置及工作原理	131
4.4.2	加重质流动模型的建立	134
4.4.3	振动及气流参数对加重质流动的影响	141
4.5	振动流化床对细粒煤的分选	159
4.5.1	振动流化床静态分选	160
4.5.2	振动流化床动态连续分选	167
第五章	磁场流化床分选理论	185
5.1	导论	185
5.2	磁场流化床的稳定性	186
5.2.1	磁场流化床的形成	186
5.2.2	状态模型	189

5.2.3 磁场流化床散式化的机理	190
5.3 磁场流化床分选下限的确定	193
5.4 磁场流化床对细粒煤的分选	195
参考文献	198

绪 论

煤炭作为主要化石能源,在世界能源结构中一直占据着重要位置,对经济发展起着至关重要的作用,由于煤炭储量十分丰富,这一格局在今后相当长时间内仍不会改变。然而,由于煤炭的不洁净利用,煤烟型大气污染已严重威胁着人类的健康和可持续发展,因此,发展洁净煤技术,实现煤炭能源高效率、低污染利用已成为世界各国的共识。

煤炭占我国一次能源的 70% 左右,是我国的主要能源,在国民经济中发挥着重要的作用,但煤烟型大气污染非常严重。据统计,2000 年全国烟尘排放量为 1165 万 t,SO₂ 排放量为 1995 万 t,酸雨影响面积占国土面积的 30%,这其中燃煤造成的 SO₂ 和烟尘排放量分别占 80% 和 70%,因此煤炭能源高效低污染利用已十分迫切。而要实现煤炭能源高效低污染利用,从根源上治理是上策,即燃前的净化。

我国作为一个发展中国家,煤炭的分选加工现状与发达国家有明显的差距。西方发达国家的煤炭入选比例很高,有的高达 100%,燃烧用煤灰分较低(如美国供应电厂的煤炭灰分为 8% 以下),而我国的煤炭入选率只有 25%,动力煤入选率仅 18%,将近 80% 的动力煤是不经分选加工的原煤,供应电厂的煤炭平均灰分达 28%,因而燃烧效率低和污染严重。可见,随着国家对煤烟型污

染的严格控制和市场对煤炭质量要求的提高,研究开发拥有自主知识产权的高效干法分选技术,对煤炭进行分选洁净,提高煤炭产品质量十分重要。对于实现动力煤优质化工程,提高燃煤效率,实现煤炭洁净利用,减少环境污染,具有重要意义。

选煤是煤炭本身的净化方法,是合理利用煤炭资源以保护环境的最经济、有效的方法,是使电站和工业燃煤大大减少烟尘、 SO_2 排放量的最经济和有效途径,是煤炭深加工的前提,是国际公认的洁净煤技术的重点,据统计,每入选 1 亿 t 原煤,脱除其中大部分的黄铁矿硫,就可减少 SO_2 排放量 100 万~150 万 t,而其成本仅为煤炭燃后的洗涤烟气脱硫的 1/10,并可回收和利用煤中有用的共生矿物。

目前,在国内外普遍采用基于水的湿法分选,而我国的煤炭资源有 2/3 以上分布在山西、陕西、内蒙古西部等干旱、严重缺水地区。传统的选煤方法已难以满足我国洁净煤战略的实施和发展,研究适合我国特点的高效干法选煤技术十分迫切。

干法选煤在选煤领域的地位及重要性在世界各国早已取得共识。干法分选主要有空气重介质流化床选煤和风力选煤(风力摇床、风力跳汰)。风力选煤的发展已有近百年的历史,由于风力选煤的分选精度(E_p 值 >0.2)和分选效率(约 70%)都很低,适应性差,主要用于易选煤的排矸,所以应用很少。为解决缺水地区煤炭的高效分选,节约水资源,综合利用煤炭资源,提高燃烧效率,减少环境污染,前苏联、美国、加拿大等国曾先后开展了流化床干法分选研究。流化床干法选煤属多学科交叉领域,它必然随相关学科的发展而发展,尤其是流态化技术。由于适用于煤炭分选的流化床不同于

化工上传统的稀相流化床,所以研究流化床干法分选难度较大。进入 20 世纪六七十年代,随着世界各国对环境保护及综合利用煤炭资源的认识的日益提高,美国 E. Douglas、加拿大 J. M. Beeckmans、苏联 J. Laskowski 等人分别开展此项研究,并研制了模型机,进行了实验室分选研究,因而引起了许多国家的重视。但由于他们只是以化工上流化床反应器物料置换原理为基础,没有深入研究适合煤炭分选的浓相高密度流化特性,所以分选精度不很理想,未能实现工业化。

中国矿业大学自 20 世纪 80 年代起开始浓相高密度流化床干法选煤研究,在学术上实现了创新,取得了很大进展,对于解决中国的煤炭资源合理利用以及改善环境具有重要意义。由于缺水是全球性的,因此干法选煤在国际上也受到了普遍关注和重视。随着水资源的日益缺乏,煤炭高效干法分选理论及技术的研究已成为选煤领域研究热点之一,相继提出了复合式干法风力分选、空气重介质流化床分选、外加力场流化床分选、摩擦电选等理论及技术。

近年来,作者及合作者在有关基金的资助下,开展了普通气固流化床干法分选、复合力场(振动力场、磁场)作用下的流化床分选研究,取得了一些成绩,但还不够深入,有些只是刚刚起步。我们将近年来的一些研究成果整理总结出版这本专著,意在抛砖引玉,对从事选煤科研工作者、高校教师、研究生和本科生有所借鉴和裨益,共同为实现煤炭的高效洁净利用而奋斗。

第一章 气固流态化及其分选特性

1.1 导 论

我国是煤炭生产和消费大国,煤炭在一次能源消费结构中占75%左右,这种状况在今后相当长时间内不会改变。因此,加快发展选煤技术对于实现煤炭资源的综合利用,保护环境具有十分重要的作用。目前我国煤炭入选比例只有25%,动力煤的入选比例更低,这造成了严重的资源浪费和燃煤污染。长期以来,湿法分选方法及理论一直是主导选煤技术发展的基础。但由于一是我国水资源十分贫乏,尤其是西北地区,而我国的煤炭资源主要分布在西部干旱缺水地区,无法采用耗水量大的湿法分选方法;二是相当数量的年轻煤种遇水易泥化,不宜湿法分选;三是湿法分选产品外在水分高达12%以上,造成严寒地区冬季冻结,贮运困难;四是现有湿法选煤方法工艺复杂,耗水多,投资大。这些都使得传统的湿法选煤理论及方法已难以满足选煤的发展需要,必须创立高效干法分选理论体系,指导相关技术的研究开发,为改善我国乃至世界煤炭分选加工现状(因为水资源短缺是全球性的),高效、洁净、综合利用煤炭资源而奠定基础。

那么,研究高效干法分选从何着手呢?重力分选的基本原理是

入选物料在重力场或离心力场中按其沉降末速不同而分选。分选介质的密度越小,不同密度物料的沉降末速受粒度的影响越大,物料必须分成很窄的粒级才能得到有效分选。风力选煤的分选介质为空气,其密度仅为 1.293 kg/m^3 ,物料中不同密度颗粒的沉降末速极为接近,达到沉降末速的时间也很长,故在分选机有限的空间和分选时间中难以实现有效分选。这就导致风力选煤很难在空气中按物料的沉降末速的差别分选,而是在速度很大的气流场中进行分选,物料粒度和形状对分选的影响极大,导致分选效果差,可能偏差 E_p 值大于 0.20,这种方法在世界各国已很少采用。从上述原理可以看出,介质密度越接近分选密度,则分选效果越好,如水介质跳汰选煤,介质密度为 1000 kg/m^3 ,较为接近分选密度,不同密度入料的沉降末速之差值和等沉比提高了许多,所以分选效果得到改善。湿法重介质分选,介质密度基本上等于分选密度,小于及大于介质密度的入料得到浮沉方向相反的分层,分选效果最好。

可见,高效干法分选的关键是如何形成可任意调节的与要求的分选密度一致的分选介质,同时针对浓相高密度流态化形成的复杂性,以及宽筛分多组分的物料分离特点,进行基于上述特性的流态化形成及分选动力学研究。流态化分选理论正是基于此而研究并形成的。

1.2 颗粒的流态化

1.2.1 流态化现象

固体颗粒本身没有流动性,当固体颗粒与流动的气体或液体

接触时,固体颗粒能够像流体一样流动,并有流体的特性,把这种现象叫做固体颗粒流态化。

流态化是一门研究固体颗粒与流体(气体或液体)相互作用规律,旨在强化颗粒与流体之间接触和传递的工程科学和技术。

流化床通常由床体(圆形立柱)和安装在其下端的分布板组成。其结构型式很多,一般由壳体、气体分布装置、换热装置、气固分离装置、内部构件等组成,如图 1-1 所示。

在床中装有一定量的固体颗粒物料,流体从床底给入,通过分布板及颗粒床层向上流动。当流体通过颗粒床层时,由于流体与颗粒表面摩擦,流体对颗粒产生一种作用力即曳力。显然,这种曳力随流速的增加而增大,使颗粒倾向振动和运动,同时颗粒由于自身的重

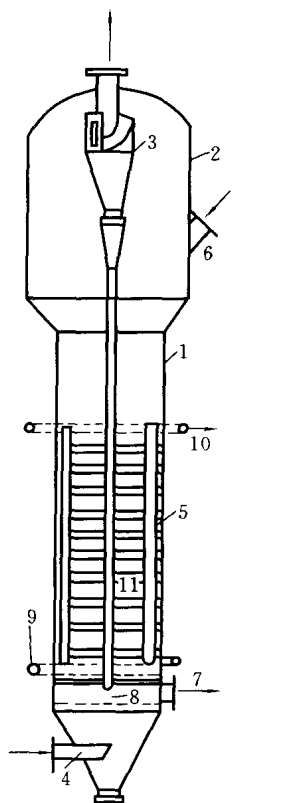


图 1-1 流化床结构示意图

- 1——壳体； 2——扩大段；
- 3——旋风分离器； 4——进口气口；
- 5——换热管； 6——物料入口；
- 7——物料出口； 8——气体分布器；
- 9——冷却水进口； 10——冷却水出口；
- 11——内部构件