

国家高技术研究发展计划 (863计划)
国家重点基础研究发展规划 (973计划)

微粉煤电选脱硫降灰

章新喜 著

Weifenmei Dianxuan
Tuoliu Jianghui

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

前 言

在中国能源结构中,煤炭在相当长的时期内仍将占主导地位。但是,目前燃用煤(特别是直接应用原煤)所造成的环境污染已十分突出,以火力发电行业为例,1999 年全国火电厂 SO_2 排放量 810 万 t,占全国 SO_2 排放量的 43.6%,燃煤平均灰分 26%,燃煤含硫量 $>1\%$ 的火电厂 100 多个,相应装机容量 4 000 多万千瓦,约占全国火电装机容量的 14%。

要想解决日益严峻的燃煤环境问题,必须应用现代洁净煤技术,提高煤炭利用效率。在燃(用)前对煤进行有效的去除黄铁矿等矿物质以提高煤质,就是洁净煤技术的源头技术。目前,煤炭的分选还主要是利用物理分选方法,物理分选主要是依据煤和其中矿物质的物理性质的差异来达到分选目的,这其中包括跳汰、重介、旋流器、螺旋、摇床等。要想获得高质量的低硫低灰煤,就应该瞄准微粉煤和超微粉煤的分选,因为在这个级别中大部分矿物质都已得到充分解离,因而存在着更大的分选潜能,但因为现有的分选方法对这个级别煤的分选效率不高而使这种潜能未能得到充分发掘。现在的微粉煤湿法分选技术伴随着分选过程总存在着不同程度的环境污染,并且分选的产品随着粒度越小面临的脱水困难越大,而且投资比重大、能耗大。

随着煤的粒度减小,给湿法分选带来了困难,但却提供了根据其电、磁性质差异应用电、磁场进行干法分选的可行性,特别是结合火电站制粉系统的工艺特点,进行燃前煤粉在线干法脱硫降灰的可行性。

由于干法分选不需液体,故省略了昂贵的脱水、煤泥水处理和

产品干燥系统,同时也大大减少了分选过程中带来的环境污染,因此,干法分选微粉煤具有明显的优点。

本书着重介绍了作者在应用电选进行微粉煤脱硫降灰方面的理论和实践研究结果,主要包括以下内容:① 煤的介电性质研究;② 高压电选机内电晕电流和场强的分布规律研究;③ 电选过程动力学分析研究;④ 电选机电极结构的选择和给料方法的改善;⑤ 脱硫降灰试验研究;⑥ 应用高压电选制备超纯煤的研究;⑦ 电选可选性的分析研究;⑧ 应用摩擦电选技术进行煤粉电站燃前煤粉在线脱硫降灰研究。

在本书所介绍成果的研究过程中先后得到了国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家重点基础研究发展规划(973 计划)、国家自然科学基金、煤炭科学基金、煤炭高校优秀青年基金的财政资助。

本书得以出版,首先要感谢导师陈清如院士的精心指导和谆谆教诲!

作者在科学研究工作中得到了前辈王淀佐院士、黄其励院士、徐旭常院士、岑可法院士、陈昌河教授、卢寿慈教授、杨毅教授、张荣曾教授、郭梦熊教授、顾民兆教授级高工、蒋志伟教授级高工的关心和指导!还得到了中国矿业大学选矿工程研究中心同事的帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢!

作者

2002 年 10 月

目 录

前言	1
第 1 章 绪论	1
1.1 微粉煤电选脱硫降灰发展回顾	1
1.2 微粉煤静电选脱硫降灰原理	5
1.3 微粉煤摩擦电选脱硫降灰原理	6
第 2 章 煤的介电性质研究	7
2.1 意义	7
2.2 介电常数的测定	8
2.2.1 介电常数的物理意义	8
2.2.2 介电常数的测定方法	8
2.3 煤的介电性质研究	12
2.3.1 介电常数测量装置及完善方法	12
2.3.2 不同煤化程度煤的介电常数	16
2.3.3 煤中伴生矿物的介电常数	20
2.3.4 不同密度级煤的介电常数	21
2.3.5 煤岩组分的介电常数	26
2.3.6 煤的粒度对介电常数的影响	32
2.3.7 物料温度对介电常数的影响	33
2.3.8 空气湿度对介电常数的影响	35
2.3.9 煤样外水对介电常数的影响	36

第3章 电选机分选区内滚筒表面电晕电流和场强的

分布规律 38

3.1 电选机内电晕电流和场强分布规律的研究方法 38

3.2 单电晕电极的电晕电流特点 41

3.2.1 电晕电流与极间电压的关系 41

3.2.2 电晕放电的过程和特点 42

3.3 单电晕电极的场强与电压的关系 47

3.4 电极极距对电晕电流和场强的影响 52

3.5 电晕电流和场强在滚筒表面的分布规律 53

3.6 静电极的场强及其对电晕放电的影响 55

3.6.1 极间电压对静电极场强的影响 55

3.6.2 静电极对电晕放电的屏蔽作用 56

3.7 多根电晕电极的电晕电流分布规律 58

3.8 多根静电极的场强分布规律 59

第4章 电选过程的动力学分析 60

4.1 电选过程中颗粒的受力分析 60

4.1.1 分子力(表面力)的分析 60

4.1.2 机械力的分析 61

4.1.3 电场力的分析 64

4.2 电选过程中颗粒脱离滚筒表面的条件 68

4.3 颗粒在电晕电场中的荷电及放电 72

4.3.1 颗粒荷、放电的现有理论 72

4.3.2 对颗粒荷、放电过程的研究 74

第5章 电极结构的设计原则和给料方法的改善 77

5.1 不同电极结构时颗粒的荷、放电规律 77

5.1.1 单电晕电极的电极结构 77

5.1.2	单静电电极的电极结构	79
5.1.3	一根电晕极和一根静电电极的电极结构	81
5.1.4	多根电晕电极的电极结构	81
5.1.5	多根电晕电极与静电的复合电极结构	84
5.2	分选过程中电极结构的选择	84
5.2.1	分选导电性好的原煤时的电极结构	84
5.2.2	分选导电性差的原煤时的电极结构	86
5.2.3	分选粗粒物料时的电极结构	86
5.2.4	分选微细物料时的电极结构	86
5.3	电选机给料方法的改善	86
5.3.1	给料状态对物料荷、放电及分离行为的影响	87
5.3.2	现有电选机给料装置的特点	88
5.3.3	现有电选机给料装置的缺点	89
5.3.4	电选机给料装置的改进	92
第 6 章	电选脱硫降灰的试验研究	98
6.1	电选脱硫降灰效果的评定标准	98
6.1.1	效率指数	98
6.1.2	灰分脱除百分率和全硫脱除百分率	99
6.1.3	精煤可燃体回收率	100
6.1.4	分选效果的辅助评定标准	100
6.2	试样性质和试验步骤	100
6.2.1	试样性质	100
6.2.2	试验步骤	102
6.3	电极电压对脱硫降灰效果的影响	102
6.3.1	试验条件	102
6.3.2	试验结果与分析	103
6.4	极距对分选效果的影响	105

6.4.1	试验条件	106
6.4.2	试验结果与分析	106
6.5	滚筒转速对分选效果的影响	108
6.5.1	试验条件	109
6.5.2	试验结果与分析	109
6.6	给料速度对分选效果的影响	112
6.6.1	试验条件	112
6.6.2	试验结果与分析	112
6.7	电极结构的选择对分选效果的影响	115
6.7.1	试验条件	116
6.7.2	试验结果与分析	116
6.8	物料性质对分选效果的影响	116
6.8.1	给料粒度对分选效果的影响	118
6.8.2	给料水分对分选效果的影响	120
6.9	正交试验	121
6.9.1	正交试验设计的思路	123
6.9.2	0.3~1 mm 粒级粉煤正交试验	123
6.9.3	0.043~0.3 mm 粒级微粉煤正交试验	136
6.10	流程试验设计	142
6.10.1	0.3~1 mm 粒级的流程试验设计	142
6.10.2	0.043~0.3 mm 粒级的流程试验设计	145

第7章 应用高压静电选制备超纯煤..... 148

7.1	工艺煤岩学研究	148
7.1.1	煤质分析	148
7.1.2	显微煤岩分析	154
7.2	应用高压静电选制备超纯煤的试验研究	155
7.2.1	原料煤分级电选试验	155

7.2.2 精选流程试验	156
第8章 煤的电选可选性研究	158
8.1 电选可选性的影响因素	158
8.1.1 煤的显微组成对电选可选性的影响	158
8.1.2 煤中伴生杂质对电选可选性的影响	159
8.1.3 煤的变质程度对电选可选性的影响	159
8.1.4 煤的介电组成对电选可选性的影响	159
8.1.5 微粉煤的粒度组成对电选可选性的影响	160
8.1.6 煤的氧化程度及表面性质对电选可选性 的影响	160
8.1.7 电选过程的工艺条件对电选可选性的影响	160
8.2 微粉煤电选可选性的评定方法	160
8.2.1 微粉煤电选可选性的定性分析	161
8.2.2 微粉煤电选可选性的定量评定	167
8.2.3 微粉煤电选的理论分选指标	168
8.3 电选过程数量效率的预测模型	169
8.3.1 模型形式的选择	170
8.3.2 模型参数的拟合	171
8.3.3 模型的检验	173
第9章 应用摩擦电选技术进行火电站燃前煤粉在线 脱硫降灰	174
9.1 意义	174
9.2 应用摩擦电选技术进行火电站燃前煤粉在线脱硫 降灰的可行性	175
9.2.1 应用摩擦电选技术进行燃前煤粉在线脱硫降灰 的原理	175

9.2.2	应用摩擦电选技术进行燃前煤粉在线脱硫降灰 的合理性、可行性·····	177
9.3	应用摩擦电选技术进行火电站燃前煤粉在线脱硫 降灰的技术实现方式·····	178
9.4	实现燃前煤粉在线脱硫降灰对锅炉燃烧特性 的影响·····	180
9.5	应用摩擦电选技术进行火电站燃前煤粉在线脱硫 降灰的技术创新性·····	181
参考文献·····		183

第1章 绪 论

1.1 微粉煤电选脱硫降灰发展回顾

自从19世纪80年代,人们就设计了物料的电选装置。早期由Osborne, Edison, Blake 和 Morscher 等人设计的电选机,是由数目不同的转动和传动部分组成的,变压装置和机械装置可根据需要调整工作条件。今天普遍采用的滚筒电选机,在20世纪初就已出现。Blake 和 Morscher 在他们的专利中描述了带接地滚筒电极和在其上方由给料箱给料的电选机。20世纪40年代,Carperter 公司研究出一种聚焦型电极,它是今天所有高压电选机的基础;为了使细粒物料相互分散,M. Carta 研制出了稀相回旋电选机;同样是为了有效分选细粒矿物,60年代又出现了沸腾电选机(即流化床电选机),70年代又出现了静电振动流化床分选机;从80年代开始相继研究开发出了多种摩擦电选机。

电选机的种类按其中物料的带电方式可分为三类:

(1) 如果物料由电离电极(又叫电晕电极)产生离子带电,并根据其个体表面导电性差异来分离,这种带电方式叫离子轰击带电(又叫电晕带电),这种电选机叫电晕电选机,这也包括现在普遍使用的电晕—静电复合电场电选机,也有人称为动电分选机(electro-dynamic separator)。这种电选机从结构特征来说主要有滚筒式、室式电选机等。

(2) 如果物料是置于静电场中而感应带电,并根据其表面导电性差异来分离,这种带电方式叫感应带电,这种电选机叫静电电

选机(electro-static separator)。这种电选机从结构特征来说主要有筒式、板式、筛式、电场摇床等。

(3) 如果物料是因相互接触或与其他材料表面接触而带电,并根据其所带电荷极性不同而分离,这种带电方式叫接触或摩擦带电,这种电选机叫摩擦电选机。这种电选机主要有自由落下式(即室式)、回旋气流分离式、喷射气流分离式以及流化床电选机等。

当前,电选的主要发展方向和研究重点有两个:一是电选设备的大型化,以提高设备的处理能力;二是微细和超微细物料的分选。因为要想获得高品质的精矿,必须将矿石磨碎以使矿物中的脉石充分解离(或使煤与矿物质充分解离),所以细粒电选越来越受到重视。

应用电选方法进行煤的分选试验和研究从 20 世纪 40 年代就已开始。日本的牧野、黑川、须藤等人分别利用平板式、滚筒式电选机和摩擦电选的方法进行了煤的电选试验。在第二次世界大战期间及其后,一些研究人员试图把筒式电选机应用于选煤。1961 年 Battelle Memomrial 研究所进行了题为“用静电分选法从煤中分选黄铁矿”的研究,其目的是为了证实是否可以从煤中脱除黄铁矿(其中 -0.074 mm 粒级占 $50\%\sim 70\%$),结果获得了黄铁矿脱除率为 37% 的效果。

在 20 世纪 70 年代,加拿大的 Bergougnon 和 Inculet 等人开展了煤的电选研究。他们研制了两种不同的电选机进行实验,一种是分选塔,另一种是稀相回旋分选机。煤样磨至 -0.074 mm ,并在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 真空条件下干燥 12 h,干燥煤样被流化摩擦带电后,在两种分选机内进行分选,均得到良好的分选效果,黄铁矿脱除率分别达到 48% 和 47%,脱灰率分别达到 57.5% 和 68.6%。

进入 20 世纪 80 年代后,随着人们对环境污染(酸雨污染)的重视,美国、澳大利亚、意大利等国家对煤的干法电选给予了高度

重视。特别是对微粉煤和超微粉煤的分选给予大力研究资助,因为只有当煤磨至很细时,其中的黄铁矿等矿物质才能充分解离,因而把微粉煤的干法电选作为一个重要目标。

意大利的 R. Ciccu 等人对微粉煤和其中各种矿物质的摩擦带电物理特性进行了较深入的研究,并在他们研制的透平荷电分选机内进行了分选实验。该分选机采用螺旋管式电极以清扫电极表面积尘。试验给料粒度为 $0\sim 0.5\text{ mm}$,分选效果达到:黄铁矿脱除率 $60\%\sim 90\%$ 、脱灰率 $42\%\sim 93\%$ 、可燃体回收率 $57\%\sim 93\%$ 。其中间试验厂的处理量可达 $0.5\sim 1.6\text{ t/h}$ 。

澳大利亚对微粉煤的干法电选也给予了高度重视。政府给予了研究资助。

美国为了解决酸雨带来的污染问题,加强了对微粉煤的干法电选研究。美国能源部(DOE)对微粉煤和超微粉煤的研究给予了资助。D. Gidaspow, Saxena. S. 等人对美国 Illinois 煤进行了静电和静电流化床及静电筛分输送机脱除黄铁矿的研究。试验结果表明,当 Illinois No. 2、No. 6 号煤磨至 $100\text{ }\mu\text{m}$ 左右时,一半的黄铁矿可在静电流化床中除去,要想更充分地脱除黄铁矿,煤必须磨得更细。当磨至 $40\text{ }\mu\text{m}$ 以下,用静电筛分输送机进行分选时,黄铁矿含量可由 2.3% 降至 0.86% 。D. Gidaspow 还在文章中对湿法分选和干法静电选的能耗进行了比较,每小时处理吨煤的能耗分别为:浮选 $876\text{ kW}\cdot\text{h}$,湿法高梯度磁选 $765\text{ kW}\cdot\text{h}$,静电筛分输送机 $220\text{ kW}\cdot\text{h}$,静电流化床 $42\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。从比较中可以看出干法分选的能耗相对湿法要低得多。Tucholski D. R. 进行了煤的摩擦带电特性研究以及在循环流化床中进行分选的研究。

美国 AED 公司于 1980 年开始微粉煤(Fine Coal, 简写 FC)的电选研究,其设备为滚筒式电选机。给料水分一般控制在 $2\%\sim 4\%$ 左右(全水)。首先用空气分级方法将原煤筛成 $246\sim 53\text{ }\mu\text{m}$ 、 $53\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $<20\text{ }\mu\text{m}$ 三个级别,然后将前两个级别分别进行分选,而

把 $<20\text{ }\mu\text{m}$ 粒级并入产品中,可得到黄铁矿脱除率 $23\%\sim 68\%$ 、脱灰率 $50\%\sim 59\%$ 的效果。第一座处理能力为 4.5 t/h 的FC试验工厂坐落于俄亥俄州,实验厂的试验证明可达到脱灰率和脱硫率各为 40% 的效果。AED公司又从1981年开始研究处理超微粉煤(Ultra-Fine Coal,简称UFC)的电选技术。该技术经过了两个研究阶段,1985年以前研制的是“Charger/Disks 盘式摩擦电选机”简称C/D系统,可处理 $140\sim 0$ 网目的超微粉煤。1985年11月能源部(DOE)与AED公司签订了UFC研究合同,以进行UFC系统在处理能力为 1 t/h 条件下的实验。在AED进行UFC—C/D系统研究的同时,又开始了另一个系统UFC: 竖直一带式分选机(Vertical-Belt Separator,简称VBS系统)的研究。与此同时UFC—C/D系统的长时间运转试验揭示了其分选效果随时间延续而恶化的趋势。而分析表明UFC—VBS系统在处理能力、造价等方面均优于UFC—C/D系统,基于这一点,AED公司向能源部(DOE)建议用UFC—VBS系统代替原来的系统。在美国能源部1989年度计划中,对UFC—VBS项目给予了支持。大型的VBS系统尺寸为 3.05 m 长(有效分选带为 1.52 m),对三种煤的实验结果为脱灰率 $44\%\sim 62\%$,黄铁矿脱除率 $25\%\sim 77\%$ 。

匹兹堡能源研究中心(PETC)于1984年也开展了题为“摩擦电干法选煤”的研究工作。试验设备(实验室型)于1984年10月研究成功,超微粉煤悬浮在高速气流中摩擦带电,然后在一个板式电选机中分离。试验效果达到脱灰率为 80% 、脱硫率为 50% 。目前还处于实验室研究阶段。在1987年财政年度中,美国能源部还与Arthur D. Little Inc 鉴定了题为“Enhancement of Electrostatic Separation”的研究合同。在1991年财政年度计划中专门列出了对微粉煤干法电选的资助计划,以进一步开展此项研究。

1994年美国能源部还资助了J. M. Stencel等人开展了应用摩擦电选技术进行火电站炉前煤粉在线脱硫降灰的基础理论研究。

我国也正在开展静电选与摩擦电选技术在微粉煤脱硫降灰以及其他矿物分选和二次资源回收利用方面的研究工作。作者在中国矿业大学对该技术已进行了十多年的研究。目前,在应用静电选及摩擦电选制备超低灰煤方面正承担国家重点工业性试验项目的研究工作;在应用摩擦电选技术进行煤粉电站燃前在线脱硫降灰方面正承担国家高技术研究发展计划(863 计划)项目和国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目的研究工作。同时作者还进行了静电选、摩擦电选技术在金属矿、非金属矿分选、粉煤灰除炭、废塑料分离、电子废弃物及其他二次资源回收利用方面的研究工作。我们相信静电选、摩擦电选技术必将拥有广阔的应用前景。

1.2 微粉煤静电选脱硫降灰原理

煤和其中的矿物质在电性质上存在着差异,煤中有机质具有较低的介电常数和电导率,而煤中黄铁矿和大部分矿物质具有较高的介电常数和电导率。如图 1-1 所示,当微粉煤给入滚筒式电选机时,在电晕电场中煤和其中矿物质由于具有不同的介电常数而荷电不同,同样由于导电性不同,它们通过接地滚筒泄漏电荷的速度也就不同,净煤由于导电性较差,因而保留大部分与滚筒极性相反的电荷而吸附在滚筒表面上;而黄铁矿等矿物质则相反,很快释放掉全部电荷并在静电场作用下感应带上与滚筒极性相同的电荷,与此同时在静电场及重力场作用下飞离滚筒表面,从而实现了煤与其中矿物质的分离,达到脱硫降灰的目的。

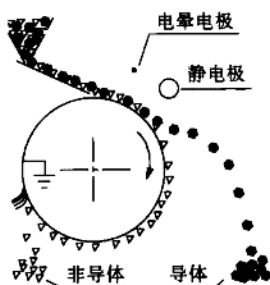


图 1-1 静电选脱硫降灰原理图

1.3 微粉煤摩擦电选脱硫降灰原理

应用摩擦电选技术进行微粉煤深度脱硫降灰的基本原理如图 1-2 所示。煤粉被气流输送经过摩擦带电器时,煤中有机质(煤)和无机质(矿物质)颗粒之间以及颗粒与摩擦带电器器壁间碰撞摩擦分别带上正、负电荷,荷电颗粒群被气流送入高压静电场,正、负电荷粒子受到相反方向的电场力作用,分别向相反电极极板方向运动,形成两股物料流,从而实现有机质与无机质(特别是黄铁矿硫)的精确分离。由于摩擦电选技术以气体作为载体介质,能有效地克服分子力引起的颗粒团聚现象,因此,能有效地分选粒度小于 0.074 mm 的微粉煤,而在这个级别中大部分无机质(特别是黄铁矿硫)已充分解离,从理论上讲更容易实现深度脱硫降灰,实践也已给予了充分证明。

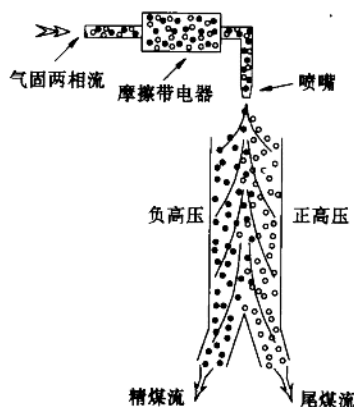


图 1-2 摩擦电选脱硫降灰原理图

第2章 煤的介电性质研究

2.1 意 义

煤的分选不管采用什么方法,其原理都是依据煤与其中矿物质之间的一定物理性质或化学性质差异,来达到相互分离的目的。重选主要是根据密度差别进行分选,浮选主要是根据颗粒表面性质差异进行分选,高梯度磁选则主要是根据磁性质差异达到分离黄铁矿的目的,而电选则是根据电性质的差异进行分选。

任何一种选煤方法对煤的分选都不是万能的,都受到一定的煤质条件及自身方法完善程度的限制。正因为如此,在应用某种方法对某一特定原煤进行分选前都应进行煤质分析和可选性分析。目前这些试验方法和规程都已比较成熟,并已在实际科研和生产中得到广泛应用。因此,建立煤的物性差异分析方法对煤的分选方法选择是非常必要的。

作者为了深入地研究煤的电选脱硫降灰,对煤及其中矿物质进行了系统的介电性质定量研究,并从理论上对改进测试手段和提高测试精度进行了研究,给出了进行电选可选性判断的依据。对煤的介电特性研究主要从以下几个方面进行:

- (1) 不同煤化程度煤的介电常数。
- (2) 煤中伴生矿物的介电性质。
- (3) 不同密度级煤的介电常数。
- (4) 煤岩组分的介电常数。
- (5) 粒度对介电常数的影响。

- (6) 温度对介电常数的影响。
- (7) 空气湿度及水分对介电常数的影响。

2.2 介电常数的测定

2.2.1 介电常数的物理意义

介电常数 ϵ 是综合反映电介质极化行为的宏观物理量。电介质在电场作用下极化能力愈强,其介电常数 ϵ 值则愈大,导电性也愈好,反之则导电性差。

我们知道:对一个平板电容器来说,当以电介质代替真空时,电容器的电容量将增大,增大的倍数就叫该电介质的相对介电常数 ϵ_r (在工程上简称介电常数,记作 ϵ ,真空的相对介电常数为 1),从这个意义上说介电常数 ϵ 就是电容率,由此用公式可表示为

$$\epsilon = C/C_0 \quad (2.1)$$

式中 ϵ ——介质介电常数;

C_0 ——电容器极板间为真空时的电容量, F;

C ——电容器极板间为介质时的电容量, F。

2.2.2 介电常数的测定方法

矿物介电常数的测定方法,一般有 4 种。

1. 比较电容器电容量的方法

该方法的基本原理是建立在式(2.1)的基础上的。通过测定同一规则平板电容器在极板间分别为真空和介质时的电容量,代入式(2.1),即可求出介质的介电常数 ϵ 。

但是极板间为真空状态不易实现,而空气的相对介电常数为 1.000 8,近似地等于真空的相对介电常数 1,所以在实际测量中,可以以极板间充满空气时的电容 C_a 代替充满真空时的电容 C_0 。