

国家自然科学基金青年科学基金项目 (51404267) 资助

国家自然科学基金面上项目 (51274196) 资助

燃煤电厂磨煤机返料在 振动气固流化床中的颗粒分离行为

王 帅 何亚群 魏 华 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

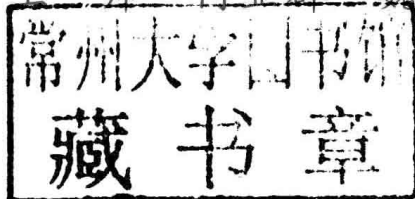
非外借

国家自然科学基金青年科学基金项目(51404267)资助

国家自然科学基金面上项目(51274196)资助

燃煤电厂磨煤机返料在振动气固 流化床中的颗粒分离行为

王 帅 何亚群 魏 华 著



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书将流化床干法分选技术引入电厂磨煤制粉过程,围绕燃煤电厂磨煤机返料中黄铁矿等高密度、高硬度矿物质组分的去除,开展了振动流化床分选 0.5 mm 以下粒级物料的相关基础研究。本研究构建了颗粒运动动力学模型并解释了颗粒分离机理,设计了振动流化床连续分选装置并进行了连续分选试验,为细粒物料在振动流化床中的分选提供了研究基础。

本书可作为矿业工程、环境工程等相关专业的高等院校师生和研究院所的研究人员及企业的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤电厂磨煤机返料在振动气固流化床中的颗粒分离行为/王帅,何亚群,魏华著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3436 - 0

I. ①燃… II. ①王… ②何… ③魏… III. ①燃煤发电厂—磨煤机—流化床—分选技术—研究 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 227225 号

书 名 燃煤电厂磨煤机返料在振动气固流化床中的颗粒分离行为
著 者 王 帅 何亚群 魏 华
责任编辑 黄本斌 赵朋举
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 9.5 字数 186 千字
版次印次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

气固流化床分选技术已成为干法选煤研究的热点,细粒煤流化床分选技术及理论也得到了快速发展。本书在综述了国内外流化床分选技术及相关文献的基础上,从节能减排的目的出发,将流化床干法分选技术引入电厂磨煤制粉过程中,围绕燃煤电厂磨煤机返料中黄铁矿等高密度、高硬度矿物质组分的去除,开展了振动流化床分选0.5 mm以下粒级物料的相关基础研究。本书研究了在无外加重介质条件下颗粒在流化床中的受力情况,研究了颗粒在不同雷诺数下运动时的阻力系数差异,并加入振动作用在颗粒上的正弦力,建立了振动流化床不同区域内颗粒运动动力学模型,得到颗粒加速度公式。解释了颗粒在振动流化床中的分离机理,设计了振动流化床连续分选装置并进行了连续分选试验,为细粒物料在无外加重介质条件下的振动流化床分选提供了研究基础。

对颗粒运动动力学模型的数值模拟结果表明,该模型适用于计算和描述颗粒在振动流化床中的运动速度和轨迹。计算流体力学模拟结果表明,在稀相和密相两种流化状态的作用下,不同颗粒在流化床中的不同区域运动、聚集,最终按密度进行了分层。

磨煤机返料粒度较细,主要集中于0.125~0.25 mm,属 Geldart B类颗粒。模拟物料和实际物料流化特性试验结果表明:振动可显著降低流化床起始流化速度和床层膨胀率;分选特性实验结果表明:模拟物料和实际物料均存在按粒度分级现象,并按密度进行了分层。在流化数为3、振动频率为55 Hz时,物料分选效率较高,各层产物粒度、密度分布较均匀,其中实际物料的重产物灰分为78.46%,轻、重产品灰分差值为37.39%,分选效率为51.14%,可燃体回收率达到了94.05%。扫描电镜背散射成像和能谱仪元素面分布研究表明,返料中的黏土矿物、黄铁矿等高密度组分得到分离。研究还表明,磨煤机

返料中微细粒级煤粉的存在,使流化床层粒度和密度分布更稳定。

本书研究了振动力场的加入对分选过程的影响。高速动态摄像分析结果表明:振动促进了气泡的兼并,并在流化床径向截面形成向上做周期规律的运动气塞,尽管气塞的运动对床层的稳定性有影响,但对颗粒按密度分离有利。颗粒在振动流化床中的分离机理表明,颗粒通过气泡稀相和粒群密相的协同作用,最终在干扰沉降过程中通过沉降末速的不同而得到分离。

本书还进行了磨煤机返料连续分选试验,研究了轻、重产物灰分值、分选效率和可燃体回收率与操作气速、振动频率和給料速度之间的关系。结果表明:当操作气速为 13.2 cm/s 、振动频率为 55 Hz 、給料速度为 1.5 kg/min 时,综合分选效果最好,轻、重产物灰分分别为 45.37% 和 75.67% ,分选效率和可燃体回收率最高,分别为 58.33% 和 88.64% 。试验结果证明了磨煤机返料振动流化床分选的可行性。

作 者

2017 年 3 月

变量注释表

字母	含义	字母	含义
A_0	振幅, mm	A_d	灰分, %
A_r	阿基米德数	C_D	曳力系数
C_{Df}	稀相内颗粒曳力系数	C_{Dc}	密相内颗粒曳力系数
C_{Di}	相互作用相团聚物曳力系数	d_p	颗粒直径, mm
D	流化床直径, mm	d_{cl}	颗粒团聚物当量直径, m
E	可燃体回收率, %	e_0	等沉比
F_i	惯性力, N	F_g	重力, N
F_b	浮力, N	F_d	曳力, N
F_c	升力, N	F_x	水平方向振动力, N
F_y	垂直方向振动力, N	F_{pg}	压力梯度力, N
F_{am}	附加质量力, N	F_B	Basset 力, N
F_s	Saffman 力, N	F_m	Magnus 力, N
f	振动频率, Hz	G_s	颗粒质量流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
g	重力加速度, m/s^2	H	流化床层高度, mm
H_0	静床高, mm	Δh	测压点高度差, mm
K	振动强度	m	颗粒质量, g
Δp_{mf}	振动流化床起始流化压降, kPa	Δp_{mf}	普通流化床起始流化压降, kPa
Δp	床层压降, kPa	Q_l	浮物中的轻产物质量, g
Q_r	入料中的轻产物质量, g	Re	雷诺数
S_t	硫分, %	S_d	粒度分布均匀系数
S_r	密度分布均匀系数	t	时间, s
t_0	起始时间, s	U_{mf}	振动流化床起始流化速度, cm/s
U_{mf}	流化床起始流化速度, cm/s	U_{sf}	稀相表观滑移速度, m/s
U_{sc}	密相表观滑移速度, m/s	U_{si}	稀密两相滑移速度, m/s
U_g	表观速度, m/s	v_p	颗粒速度, cm/s

续表

字母	含义	字母	含义
v_a	气流速度,cm/s	v_t	自由沉降末速,cm/s
v_q	给料速度,kg/min	Z_f	沉物中的重组分质量,g
Z_r	入料中的重组分质量,g	ϵ_{mf}	起始流化床层孔隙率,%
ϵ	床层孔隙率,%	ϵ_f	稀相孔隙率,%
ϵ_c	密相孔隙率,%	η	背散射系数
μ_a	空气运动黏度, $1.56\times10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$	μ_f	流体剪切黏度
ξ	分选效率,%	ρ_a	空气密度,g/cm ³
ρ_b	流化床密度,g/cm ³	ρ_f	流体密度,g/cm ³
ω	颗粒旋转角速度,rad/s	α	密相体积分数
Φ	颗粒形状系数		

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 课题的提出	2
1.3 研究内容及方法	3
2 研究现状及理论基础	5
2.1 电厂制粉系统及磨煤机返料	5
2.2 流态化及气固流化床分选	11
2.3 振动流化床	18
2.4 流化床中颗粒的分级	20
2.5 两相模型	21
2.6 流体动力学数值模拟	24
2.7 本章小结	26
3 实验研究系统	27
3.1 实验系统	27
3.2 实验物料	27
3.3 检测设备及实验室配置	32
3.4 本章小结	36
4 稀相振动气固流化床分选理论研究	37
4.1 颗粒运动动力学研究	37
4.2 稀相振动气固流化床流化特性模型	44
4.3 本章小结	47
5 动力学模型及计算流体力学数值模拟	48
5.1 模拟物料	48
5.2 动力学模型研究	49

5.3	计算流体力学研究	54
5.4	本章小结	64
6	稀相振动流化床流化及分选特性研究	65
6.1	流化特性研究	65
6.2	分选特性研究	72
6.3	本章小结	87
7	磨煤机返料流化及分选特性研究	89
7.1	流化特性研究	89
7.2	分选特性研究	92
7.3	分选效果分析	95
7.4	扫描电镜背散射及能谱分析	97
7.5	微细颗粒对分选过程的影响	106
7.6	本章小结	111
8	磨煤机返料连续分选实验	113
8.1	分选实验	113
8.2	实验结果分析	117
8.3	本章小结	129
9	结论和展望	130
9.1	结论	130
9.2	创新点	132
9.3	展望	132
	参考文献	134

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

世界煤炭消耗量由 2000 年的 42.98 亿 t 增长到 2015 年的 79.30 亿 t,其中,我国煤炭消费量占全球煤炭消费量的 50.6%^[1]。尽管近年来新能源的开发利用有了一定的进展,但煤炭作为我国的主要能源,在一次能源消费结构仍占 65%左右,其主导地位在中长期内不会改变,燃煤电厂发电用煤的增加对煤炭消费总量上升有较大影响。2010 年我国煤炭消费量达到 31.8 亿 t,其中约 50%用于火力发电。据统计,2010 年我国发电装机容量达到 9.62 亿 kW,总发电量 42 280 亿 kW·h,同比增长 14.85%。其中火电容量为 7 亿 kW,占 72.77%左右;全年累计火力发电量为 34 145 亿 kW·h,占总发电量的 80.76%,同比增长 13.37%,供电标准煤耗 335 g/(kW·h)^[2]。另一方面,相关数据表明,随着经济结构及模式的变化,我国大气的污染物类型正在发生改变,而不是之前单一的燃煤污染型,但燃煤污染物的排放量在我国大气污染物排放量中的比例仍然高居不下^[3],煤烟型污染是目前我国大气污染的基本特征。近年的统计数据表明,我国煤炭燃烧产生的 SO₂、CO₂、NO_x 及 TSP 排放量分别约占总排放量的 90%、85%、60%和 70%。其中 PM_{2.5} 是指 TSP 中粒径小于 2.5 μm 的浮物颗粒,而燃煤发电是产生 PM_{2.5} 的重要行业之一。随着环境恶化的加剧,国际社会越来越关注节能减排和环境保护。在 2009 年,我国政府提出了节能减排目标,即到 2020 年单位 GDP 二氧化碳的排放量比 2005 年下降 40%~45%。在当前我国以煤炭能源为主体的形势下,提高燃煤效率和减少燃煤污染物排放是必然选择^[3]。

目前,我国燃煤电厂中 90%以上采用煤粉(pulverized fuel, PF)燃烧方式,磨煤制粉系统是必备环节。在火力发电厂的电能生产过程中,有 5%~10%的总发电量将被其自身的设备所消耗,即厂用电率为 5%~10%。电力行业统计数据显示,磨煤制粉系统的能耗在辅助设备中最大^[4],磨煤机工作效率直接影响电厂的发电成本及节能降耗目标的实现。虽然我国一些技术先进的电厂,如五大发电集团所属的部分电厂发电煤耗已达到世界领先水平,整体而言,全国火电

机组平均发电煤耗 2009 年为 $342 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 2010 年有所下降, 为 $335 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 但全国发展很不平衡, 有些火电厂供电煤耗甚至超过 $380 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。目前火电发电煤耗世界先进水平为 $260 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 若我国火电厂磨煤制粉系统的节能水平达到 $300 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 的发达国家平均水平, 按火电发电量计算每年可节约煤炭资源约 1.2 亿 t, 相当于节约 4 000 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 发电量。此外, 由于大部分技术从国外引进, 磨煤效率及电力设备装备的知识产权和自主化水平亟待提高^[5]。

在磨煤制粉过程中产生的粗粒煤粉(返料)往往要返回到磨煤机中重新磨制, 这部分粗粒煤粉中富集了原煤中大多数硬度大、可磨性差的有害矿物质, 其将在磨煤机中多次循环, 导致磨煤机循环倍率的增大。已有研究表明, 电厂磨煤机内部循环倍率有时高达 $8 \sim 10$, 严重降低了磨煤机出力。返料中的矿物质在磨煤机中多次循环不仅影响磨煤机的效率, 增加了能耗和设备的磨损, 进而导致磨煤机的保养和维修压力加大, 而且这部有害矿物质除少量以石子煤排出外, 大多数最终磨成细粉进入锅炉燃烧, 使锅炉燃烧效率降低, 增加污染物排放^[6]。以黄铁矿为例, 作为燃煤污染物 SO_2 的主要来源之一, 虽经过初期选煤使得部分黄铁矿得以去除, 但随着燃煤在磨煤机中进一步破碎, 一部分剩余黄铁矿被解离出来, 因为矿物质成分与煤粉破碎特性不同, 将在磨煤机中多次循环, 磨损设备并增加能耗, 进入炉膛后燃烧, 不仅产生 SO_2 污染大气, 而且生成附着物贴于炉膛内壁, 影响燃烧效率和锅炉的使用寿命。因此, 去除返料中有害矿物质, 对于降低磨煤机的磨损、磨煤能耗以及减少燃煤污染物的排放都具有重要意义, 是实现燃煤电厂减少污染物排放、提高磨煤机效率和经济环境效益的有效途径。

1.2 课题的提出

煤炭是由有机成分和无机成分组成的, 煤的有机成分是指煤的显微组分, 无机成分是指在显微镜下能观察到的煤中矿物, 以及与有机质结合的各种金属、非金属元素和化合物(无机质)。煤中矿物质主要有黏土类矿物质、硫化物类矿物质、碳酸盐类矿物质、氧化物类矿物质和硫酸盐类矿物质。其中, 黏土类矿物质是煤中最常见、最重要的矿物质, 它在煤中所占比例很大, 分布很广。常见的黏土类矿物质有高岭石、水云母、伊利石等, 通过燃前选煤环节可有效去除这部分矿物质。硫化物类矿物质包括黄铁矿和白铁矿等。其中黄铁矿是煤中大量存在的矿物质之一, 常呈晶粒、透镜体、鲕状和球状结核在煤中出现。硫酸盐类矿物质主要是指石膏, 往往沿裂缝或层面呈微小晶粒出现。

硫是煤中最有害的元素, 燃烧过程中, 煤中的硫元素会生成 SO_2 和 SO_3 排

放到大气中形成酸雨,严重影响了人类的身体健康和生态环境,同时,黄铁矿等可磨性差的矿物质由于密度较大,会在磨煤机内不断循环,会对磨辊造成严重的磨损,降低磨煤机的效率。

针对传统的电厂脱硫技术和工艺的缺点,本书提出从磨煤机和分离器工作原理及分离器返料性质入手,将气固流化床分选技术引入磨煤过程中,对电厂磨煤过程进行在线脱硫研究。由于分离器返料粒度较细,在这种情况下,要使黄铁矿等矿物质与煤炭充分解离,应从微细粉煤流化床分选入手研究微细颗粒物料在气固流化床中的分离行为,利用黄铁矿等高密度矿物质与煤炭的密度差异对分离器返料进行在线燃前脱硫。

本课题来源于“亚太清洁发展和气候合作计划”(Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate, APCDC)的子课题“*Efficiency Improvements in Coal Fired Utilities*”,以及国家自然科学基金面上项目“燃煤电厂制粉系统提效及磨煤机返料矿物质去除对节能减排的协调作用(51274196)”。本书通过对电厂磨煤机分离器返料性质的分析,对电厂磨煤机分离器返料进行采样并进行实验室分选实验,研究其在稀相振动气固流化床中的运动规律和颗粒分离行为机理,对分离器返料在流化床分选过程中的运动动力学进行研究,并建立动力学模型;运用高性能计算机和计算流体力学软件对磨煤机分离器返料在稀相振动气固流化床中的分离行为及两相流流场进行数值模拟;进行磨煤机分离器返料在稀相振动气固流化床中的连续分选实验,评价分选效果并提出合理的磨煤机分离器返料在线脱硫工艺技术方案。

1.3 研究内容及方法

1.3.1 研究内容

综上所述,由于电厂磨煤机分离器返料粒度较细,主要集中在 0.5 mm 以下,其粒度范围与固体介质颗粒粒度近似,根据气固流化床的前期理论和应用,传统的空气重介质分选流化床以及空气跳汰等干法分选技术无法对其进行分选。对于其中黄铁矿等矿物质的脱除,需要研究在没有加重质的条件下的颗粒分离机理。

针对磨煤机分离器返料的性质和电厂生产的经济性,本书将对电厂磨煤机分离器返料稀相振动流化床分选进行研究。利用黄铁矿和煤较大的密度差,研究黄铁矿等高密度硬组分的去除,并通过实验数据验证颗粒分离的动力学模型,对微粉煤在无加重质条件下分离黄铁矿的过程进行解释。主要研究内容包括以下几方面:

① 运用先进分析仪器及手段对电厂磨煤机返料进行矿物学分析,研究物料表面性质、晶体结构、矿物质的嵌布规律、元素定量、物相组成等与颗粒运动行为

相关的物料矿物学特性。

② 对不同粒度与密度的示踪颗粒进行分选实验,研究颗粒在稀相振动流化床分选过程中的分离机理与颗粒运动动力学行为。

③ 对电厂磨煤机返料采样物料进行分选试验,研究磨煤机分离器返料在稀相振动气固流化床中的分选效果,确定分选机的结构与操作参数。

④ 运用高性能计算机和计算流体力学软件对磨煤机分离器返料在稀相振动气固流化床中的分离行为及两相流流场进行数值模拟。

本书在前人对气固流化床干法分选技术研究的基础上,首次在国内对电厂磨煤机分离器进行开孔取样,并首次运用振动气固流化床在无外加介质的情况下对采样物料进行分选研究,以便为磨煤机返料实现在线脱硫分选提供理论依据,并提出分选可行性方案,最终达到去除磨煤机分离器返料中难磨的黄铁矿等其他矿物质的目的,从而实现电厂的节能减排目标。

1.3.2 研究方法

① 本书将运用先进的现代分析仪器及手段对电厂磨煤机分离器返料进行矿物学分析。通过筛分和浮沉实验分析物料的粒度和密度组成;运用扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDX)对物料进行形貌和矿物元素分布研究;运用X射线荧光光谱仪(XRF)对物料的相关元素(S、Fe)进行精确定量分析;运用X射线衍射仪(XRD)对物料中矿物的物相组成进行分析,确定硫的赋存状态,全面了解物料基本的物理和化学性质。

② 根据物料的矿物学分析结果,选择合适的示踪颗粒,通过不同性质示踪颗粒的组合,用振动流化床进行分选试验。调节振动流化床的各项操作参数等实验条件,运用高速动态摄像和分析系统研究示踪颗粒在流化床中的运动及分层行为,初步得出颗粒运动的动力学方程。

③ 对磨煤机分离器返料实际采样物料进行稀相振动流化床分选试验,研究各种试验参数对分选过程的影响,研究采样物料在流化床内的运动情况及按密度及粒度分层过程,建立颗粒分层数学模型,并根据高速动态摄像和分析系统对示踪颗粒运动的受力情况及能量传递机理进行研究,建立颗粒在稀相振动流化床中运动的动力学方程。

④ 用 Gambit 软件建立稀相振动流化床物理模型,运用计算流体力学软件 Fluent 对分选试验过程中的流体——颗粒系统进行模拟,研究并验证磨煤机分离器返料在稀相振动流化床中的颗粒分离行为及机理,对试验和理论研究作进一步补充。

⑤ 对实际物料分选试验结果、示踪颗粒分离过程的运动动力学特性,以及数值模拟的结果进行对比与系统研究,揭示稀相振动流化床颗粒分离行为机理与颗粒运动动力学特征。

2 研究现状及理论基础

2.1 电厂制粉系统及磨煤机返料

2.1.1 电厂制粉系统

燃煤电厂制粉系统包括给煤机、磨煤机、粗粉分离器、排粉机等,其中磨煤机是制粉系统核心设备。目前,国内采用的中速磨煤机主要有平盘磨、碗式磨、E型磨和 MPS 磨。中速磨煤机主要组成部件有磨辊、磨碗、煤粉分离器、落煤管与文丘里管和出口阀门等。中速磨煤机有着共同的工作原理:都有两组相对运动的研磨部件,研磨部件在弹簧力、液压力或其他外力作用下,将其间的原煤挤压或研磨,最终破碎成煤粉,通过研磨部件旋转,把破碎的煤粉甩到风环室,流经风环室的热空气流将这些煤粉带到中速磨煤机上部的煤粉分离器,过粗的煤粉被分离下来重新再磨。在这个过程中,热风还伴随着对煤粉的干燥。在磨煤过程中,同时被甩到风环室的还有原煤中夹带的少量石块和铁器等杂物,它们最后落入杂物箱,被定期排出。如图 2-1 所示为 MPS 型中速磨煤机的结构原理图。

2.1.2 分离器及磨煤机返料

煤粉分离器作为制粉系统的主要设备,其工作性能优劣直接影响着磨煤机出力、煤粉循环量、煤粉细度、电耗以及锅炉的燃烧效率。在直吹式制粉系统中,磨煤机研磨后的煤粉经过分离器之后直接被送入燃烧器进入炉膛燃烧,煤粉分离器的性能优劣直接影响锅炉机组运行的安全性和经济性^[7,8]。由此可见,电厂中速磨煤机的磨煤效率及对后续节能减排的影响,不仅取决于磨煤机的效率,在一定程度上也取决于煤粉分离器分离性能的优劣。中速磨煤机的分离器结构示意图见图 2-2。

在磨煤过程中,磨煤机产生的风粉混合物在管道中以一定速度进入分离器外锥体,由于通流截面的突然扩大,流速降低,气流中颗粒较大的煤粉因重力而分离,经回粉管回到磨煤机。气流经切向挡板导向而旋转时,由于离心力作用煤粉再次分离。当气流向下进入出口管后急转向上,由于重力和惯性力作用,煤粉中粗粉得到最后一次的分离。性能理想的煤粉分离器,不仅能将合格煤粉随气

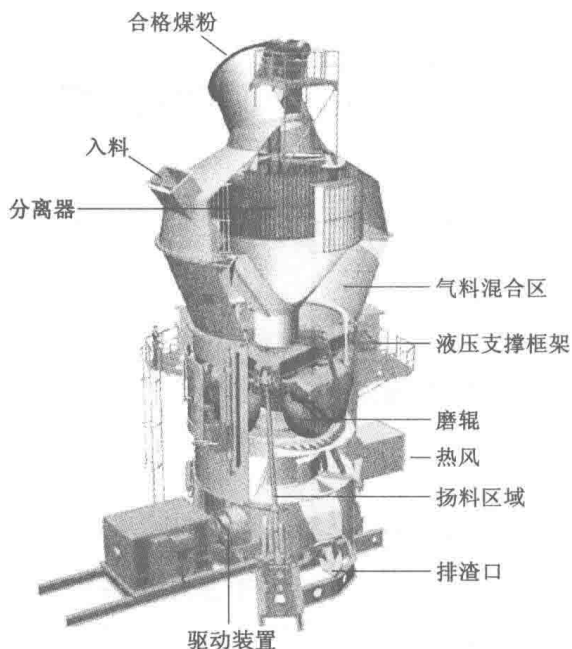


图 2-1 MPS 型中速磨煤机的结构原理图

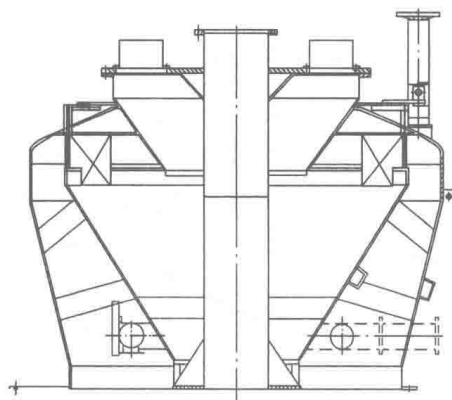


图 2-2 MPS 型中速磨煤机的分离器结构

流输出,使其不混入返回磨煤机的粗粉中去,无谓地增加磨煤机负荷,影响其出力,而且能把大于规定粒度级的不合格煤粉全部分离出来并返回磨煤机重磨,使其不随气流与合格煤粉进入炉膛,影响锅炉燃烧效率^[9,10]。

如前所述,煤粉经分离器后,合格煤粉随着热风经煤粉管道进入炉膛燃烧,不合格的煤粉,即粒度较大和密度较大的重颗粒则经分离器锥体落回磨煤机磨盘重新研磨,这部分物料就是分离器返料。目前,由于我国电厂用煤一般煤质较差,多为质量较好的煤和劣质煤的混合配煤,其中含有大量黄铁矿等难磨组分,

这样就增加了磨煤机磨制煤粉的不合格率,从而增加了分离器返料的量,使磨煤机循环倍率增大。经研究,电厂磨煤机物料循环倍率一般为 5~8,最高可达到 10 以上。由于难磨,分离器返料中的难磨硬物料在磨煤机内长时间存在并不断经分离器循环,降低了磨煤效率,增加了磨煤功耗。

煤中硬物料,特别是黄铁矿的存在,加速了磨辊的磨损,缩短了磨煤机维修周期,使磨煤机运行成本增加。图 2-3 所示为煤中黄铁矿,它的摩氏硬度达 6~6.5,解理极不完全。图 2-4 所示为磨煤机磨辊磨损图,可见黄铁矿的存在严重影响了磨煤机的工作。

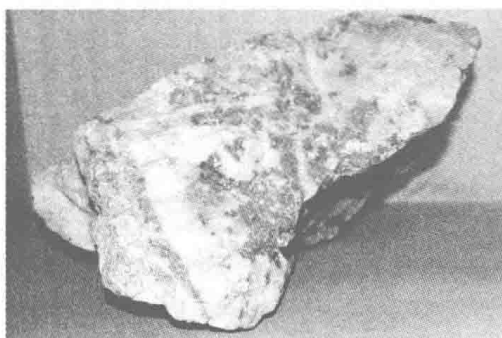


图 2-3 黄铁矿

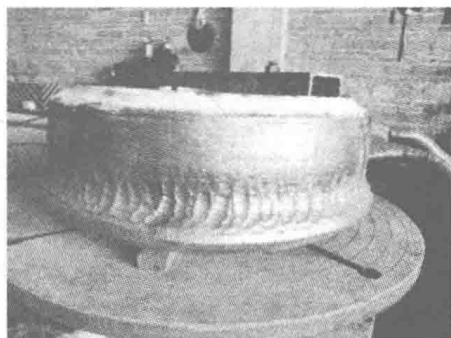


图 2-4 磨损磨辊

煤中黄铁矿等矿物在分离器作用下,一部分以石子煤的形式排出磨煤机,一部分被粉碎之后随着热风通过煤粉管道进入炉膛进行燃烧。大量黄铁矿的燃烧产生 SO_2 和少量 SO_3 , 反应如下:



烟气中 SO_3 与水蒸气结合生成硫酸蒸气,会显著提高烟气的酸露点温度,而会在低温受热面上凝结造成酸腐蚀。当受热面壁温接近或低于烟气露点时,烟气中的硫酸蒸气将在壁面凝结并对壁面产生腐蚀,同时烟气中的飞灰极易被酸液反应会生成水硬性硫酸盐,引起积灰硬化,形成很难清除的低温积灰,使结露腐蚀和积灰加剧,产生恶性循环,从而使空气预热器产生严重金属腐蚀和堵灰,导致烟道阻力增加,送风不足,影响锅炉可用率和热效率^[11-13]。图 2-5 所示为电厂水冷及脱硫等设备腐蚀照片。

对水冷壁腐蚀产物进行的分析表明,腐蚀产物中铁的含量为 60%~70%,硫的含量为 15%~37%,硅的含量为 1%~7%,铝的含量为 2%~6%;对腐蚀产物的物相分析结果为 Fe_2O_3 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 FeS 和 FeI-XS ,腐蚀产物中没有硫酸盐。

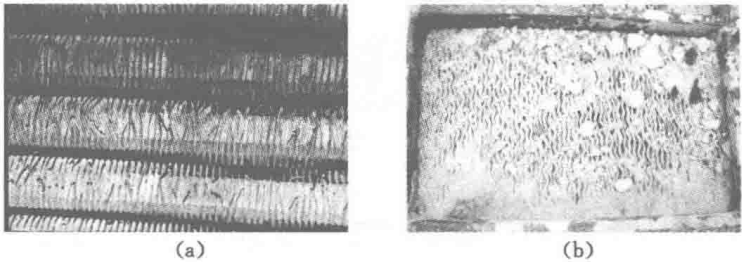


图 2-5 电厂部分腐蚀设备
(a) 水冷设备内部;(b) 脱硫设备内部

可见,黄铁矿等矿物成分的存在,会严重影响电厂的生产,增加运行成本,因此,对磨煤机返料进行燃前脱硫对电厂的节能减排有重要意义。

2.1.3 火电厂污染物排放的影响

我国的大气环境污染主要以煤烟型污染为主,主要污染物是 SO_2 、烟尘和氮氧化物。这与我国以煤炭为主要能源的能源消费结构密切相关。在煤炭燃烧过程中,大量的二氧化硫、氮氧化物、粉尘等有毒有害物质的排放,对生态环境造成严重的破坏,危害人类的身体健康,造成巨大的经济损失。2006 年电力行业能源消耗和污染物排放量全国占比情况见表 2-1,可以看出我国要实现“十二五”节能减排的目标,电力行业的节能减排是关键。

表 2-1 2006 年电力行业污染物排放量全国占比情况

序号	项目	电力行业全国占比/%
1	二氧化硫排放量	54
2	火电用水	40
3	烟尘排放量	20
4	灰渣	70

燃煤发电在我国能源生产中所占的主导地位,华能、大唐、华电、国电和中电这五大电力集团公司的二氧化硫排放量占全国排放总量的 60% 以上。图 2-6 所示 2007~2009 年三年中国五大电力集团公司燃煤发电二氧化硫排放量情况。2005 年和 2006 年中国电力行业二氧化硫排放量约为 1 300 万 t 和 1 350 万 t。而每排放 1 t 二氧化硫,就会造成 2 万元的经济损失。

大量的二氧化硫排放,导致我国多个地区频发酸雨灾害,造成巨大的经济损失。我国大部分经济发达地区均属于酸雨区,经过计算,我国目前每年因酸雨和二氧化硫污染对生态环境损害和人体健康影响造成的经济损失在 1 200 亿元人民币左右^[14]。同时燃烧过程中,煤炭中含有的汞、砷和铅等有害元素会随着烟