

# 异比重煤泥循环流化床锅炉新型床料及其脱硫特性研究

刘学冰

刘学冰<sup>1</sup>, 程世庆<sup>2</sup>, 李广泉<sup>1</sup>, 公维平<sup>2</sup>, 陈贵阳<sup>3</sup>, 郝敬武<sup>1</sup>, 付从伟<sup>1</sup>

(1. 山东华聚能源股份有限公司, 山东邹城 273500, 2. 山东大学, 山东济南 250061, 3. 兖矿集团环保中心, 山东邹城 273500)

**摘要:** 本文介绍了与山东大学合作在实验室和循环流化床试验台上进行石灰石煅烧、磨损、脱硫等特性试验研究的基础上, 在山东华聚能源股份有限公司兴隆庄分公司煤泥循环流化床锅炉上进行石灰石替代石英砂作异比重煤泥循环流化床锅炉床料的工业试验研究的情况。研究表明石灰石完全可以替代石英砂作异比重煤泥循环流化床锅炉床料; 大颗粒石灰石也可以有较好的脱硫效果, 并可大幅度降低脱硫成本。

**关键词:** 洗煤泥 循环流化床锅炉 石灰石 床料 脱硫 试验研究

## 0 引言

洗煤泥直接在流化床锅炉中燃烧的技术关键之一是异比重流化床技术, 采用比重大、耐磨性好的石英砂作为流化床的基本床料, 使煤泥凝聚团“浮”在床料上部燃烧, 避免沉积。

酸雨及二氧化硫“两控区”对锅炉二氧化硫排放要求日益严格, 而循环流化床锅炉炉内喷钙脱硫技术要求脱硫剂的力度较小, 系统投入及运行费用相对较高。

本文研究的目的是将异重流化床技术和燃烧脱硫结合在一起, 选择颗粒较大的石灰石代替石英砂作为异重流化床床料, 同时又能达到脱硫效果, 降低床料添加及脱硫成本, 以提高经济效益和社会效益。

## 1 研究内容及目标

与石英砂相比, 石灰石比重较小, 约为干煤泥比重的2倍多。由于石灰石在炉膛内存在煅烧反应, 锅炉的热平衡将发生变化, 另外, 由于石灰石煅烧后的产品——生石灰质地疏松, 强度减弱, 在循环流化床内的磨损和破碎特征与石英砂有很大差别。采用石灰石作为床料能否形成稳定运行的异比重流化床是本研究的关键。

本文研究的目的是通过调整燃烧和石灰石的粒度配比, 实现采用石灰石完全替代石英砂作为补充床料; 同时实现煤泥循环流化床锅炉高效脱硫, SO<sub>2</sub>达标排放(排放浓度<450mg/m<sup>3</sup>); 并研究石灰石替代石英砂后, 对锅炉燃烧和除尘的影响, 为指导该类锅炉的运行提供运行参考。

## 安全科普知识

- ◆ 不断发展的三维地震勘探技术
- ◆ 钻探勘查技术
- ◆ 中国煤炭能源新产业发展现状
- ◆ 中国煤炭煤质特征
- ◆ 中国煤炭煤质特征1
- ◆ 中国煤炭分类国家标准中各类煤
- ◆ 怎样做好煤矿新工人安全教育培训
- ◆ 我国煤矿职业危害的防治对策
- ◆ 数字解读山西煤炭
- ◆ 数字化矿井筑起安全保障线

[更多>>](#)

## 专家答疑

- ◆ 煤矿启封密闭的安全技术措施
- ◆ 主井的防腐处理
- ◆ 上隅角瓦斯治理
- ◆ 请问有没有办法让烟煤变成无烟煤变无烟煤
- ◆ 请问缺失挥发份的值怎么计算
- ◆ 证件
- ◆ 皮带断带的问题
- ◆ 抽出式局部风机的用途
- ◆ 为什么挖煤前要请测量人员测

[更多>>](#)

前人对循环流化床锅炉炉内脱硫的研究表明：减小脱硫剂的粒径，脱硫反应的表面积增大，微孔长度减短，扩散阻力减小，脱硫效率提高；但是石灰石粒度太小或使用太易磨损的石灰石会增大其以飞灰形式的逃逸量，使脱硫剂利用率下降。因此，石灰石平均粒径不宜小于 $100\mu\text{m}$ ，一般采用 $0\sim 2\text{mm}$ ，平均 $100\sim 500\mu\text{m}$ 。

上述研究结果对循环流化床内的磨损情况考虑不足。实际上，只要大颗粒的石灰石不排出床外，由于床料的不断磨损和破碎，必然不断产生小颗粒，同时石灰石（或生石灰）表面的 $\text{CaSO}_4$ 薄层不断被破坏而暴露出更新的反应表面，这一结果会促进脱硫反应。特别对于煤泥循环流化床锅炉采用石灰石作为床料时，床内存有大量的石灰石（或生石灰）颗粒，可以保证其足够高的脱硫效率。因此，在研究以石灰石作为煤泥流化床锅炉床料时，将采用较大粒度的石灰石。

### 3 石灰石的煅烧、磨损性能试验研究

#### 3.1 石灰石热破碎性能的试验台研究

在循环流化床试验台上对石灰石的磨损和破碎性能进行了试验研究：采用床下流态化、电加热方式，试验床温控制在 $900^\circ\text{C}$ 左右，床底料采用 $0\sim 2\text{mm}$ 的石灰石颗粒。正常燃烧后，调整阀门开度使床内热态流化风速为 $4\text{m/s}$ 左右。达到试验床温后，分别补充加入 $2\sim 4\text{mm}$ ， $4\sim 6\text{mm}$ 和 $6\sim 8\text{mm}$ 石灰石颗粒，石灰石加入量为 $250\sim 600\text{g/h}$ （ $31.8\sim 76.3\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$ ）。运行时间约1小时，试验结束后，放出床料，进行筛分。

分析实验结果表明：在循环流化床运行床温为 $900^\circ\text{C}$ 时，石灰石的磨损和破碎率很高。运行1小时后，剩余床料与石灰石的加入粒度有关，加入 $6\sim 8\text{mm}$ 石灰石后，剩余量约为 $58.6\%$ ，飞出率约占 $41.4\%$ ；而加入 $2\sim 4\text{mm}$ 的石灰石，剩余量约为 $70.8\%$ ，飞出率占 $29.2\%$ ； $4\sim 6\text{mm}$ 的石灰石，剩余量约为 $61.4\%$ ，飞出率占 $38.6\%$ 。

在试验范围内，石灰石磨损后，粒径范围在 $0.2\sim 5.25\text{mm}$ 之间，并基本呈正态分布，剩余床料的峰值粒径分别为 $2$ ， $1.7$ 和 $1.5\text{mm}$ ，重量平均直径分别为 $1.47$ ， $1.57$ 和 $1.5\text{mm}$ ，大于 $2\text{mm}$ 的颗粒份额分别为 $35.6$ ， $28.3$ 和 $20.7\%$ 。由以上结果看出，随加入石灰石粒径的增大，峰值粒径减小，大颗粒份额反而减少，说明大颗粒的石灰石在受热和磨损中更容易破碎，而这种破碎会产生一些非常细小的颗粒，被气流夹带，而且分离器不能分离，造成飞出率增加。但加入大颗粒石灰石后粒径分布范围拓宽，床料的平均颗粒直径变化不大。上述三种粒度的石灰石磨损后的粒度分布与实际燃煤循环流化床锅炉的粒度范围均相当，因此大颗粒石灰石可以作为循环流化床的补充床料，经过破碎磨损后的颗粒成为循环床料。但是单纯采用石灰石作为床料时，磨损和飞出货量较大，需要大量补充石灰石。

对比几种粒度的石灰石可以看出，添加的石灰石粒度过大，将增加底料的磨耗量。推荐添加粒度为 $2\sim 4\text{mm}$ 的石灰石。

#### 3.2 模拟煤泥循环流化床中床料的试验研究

煤泥循环流化床锅炉实际运行情况下，由于煤泥的加入，会补充一些床料；另外由于煤泥颗粒小、硬度低，可以减轻床料对石灰石的磨损。为了准确模拟实际流化床锅炉内石灰石的磨损状况，采用粒度为0~2mm的石灰石底料，连续补充加入0.9~2.5mm的干煤泥颗粒，补充速度235kg/m<sup>2</sup>.h，床层温度保持900℃，其它试验操作同上。

试验数据分析表明，由于煤泥的加入，床料总量增加，特别是0.7~2.5mm之间的颗粒大量增加，表明干煤泥团本身具有一定维持床料的能力。

为了模拟大颗粒石灰石在实际煤泥循环流化床锅炉中的磨损情况，在原来床料的基础上，补充加入0.9~2.5mm的煤泥颗粒和4~6mm石灰石颗粒，石灰石占干煤泥重量的7%（折算至实际应用的含水量28%左右的煤泥，石灰石重量比为5%左右）。保持给料速度控制在1000kg/m<sup>2</sup>.h，继续运行1小时后，床料总量略有增加，粒度分布变化不大，主要粒度范围仍然在0.7~2.5mm之间，但整体粒度分布向小颗粒偏移。表明实际运行状态下，添加煤泥和石灰石混烧，完全可以维持运行床料，床料的粒度也可以满足循环流化床锅炉的运行条件。

#### 4 工业实验研究

工业试验在山东华聚能源股份有限公司兴隆庄分公司75t/h煤泥循环流化床锅炉（4#炉）上进行，锅炉参数：

锅炉型号：NG-75/3.82-M

额定蒸发量：75t/h

额定蒸汽压力：3.82Mpa

额定蒸汽温度：450℃

燃料种类：洗煤泥

##### 4.1 实验方法

采用当地石灰石作为脱硫剂，粒度范围2—5 mm、2—8mm。石灰石及实验中电除尘器3个电厂的粉煤灰的化学成分分析采用GB176-87《水泥化学分析方法》，分析结果如下：

样品	序号	LOSS	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
石灰石	/	39.80	7.65	1.40	0.47	48.30	1.85	0.05	0.25	0.12
粉煤灰	1#	4.33	46.02	28.14	3.18	11.27	2.63	1.66	1.29	0.47
粉煤灰	2#	5.52	46.21	30.47	2.96	8.07	1.97	0.74	1.19	0.47
粉煤灰	3#	3.13	49.01	32.95	3.18	5.32	1.84	0.45	1.37	0.51

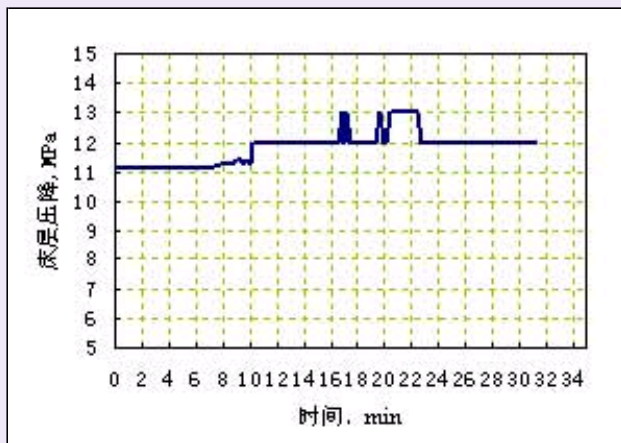
煤泥元素分析和工业分析采用GB/T211（214）-1996, GB/T212-2001, GB/T213-2003等方法，分析结果如下：

煤种	工业分析			元素分析					高位发热量
	W/%, ad			W/%, ad					MJ/kg
	Mad	Aad	Vad	C	H	O	N	S	Qgr, ad
煤泥	1.14	30.28	27.33	62.35	3.54	1.29	0.96	0.44	21.66

试验保持在锅炉90~100%的额定负荷内，床温保持在900左右℃进行，按照钙硫比为2.1（0.6吨/小时），人工连续在炉前添加石灰石。

#### 4.2 床料保持实验

由床层压降曲线可以看出，停止添加石英砂，按每小时添加0.6吨2~8mm石灰石后，在不进行排渣的情况下，床层压降略有增加。

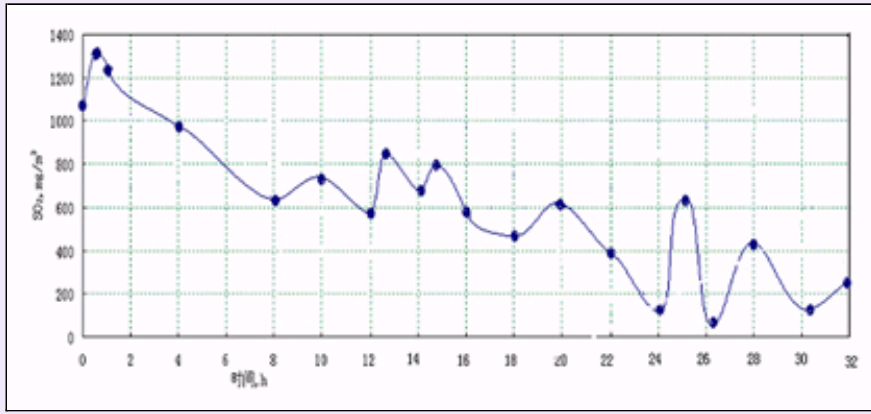


床层压降变化曲线

#### 4.3 脱硫实验

SO<sub>2</sub>浓度测试采用德国York仪器公司的MRV95/3CD烟气分析仪和青岛崂山应用技术研究所的3012H系列自动烟尘（气）测试仪进行。采样时间间隔30min，每次采样时间5min，记录5min内的平均值。

采用炉前给入2~5mm的石灰石颗粒0.6吨/小时（钙硫比为2.1:1，以稳定锅炉料层高度为目标），煤泥中混入0~2mm石灰石颗粒（钙硫比约为1.2:1，保证脱硫所需总体钙硫比3.3:1，在进行试验以前该锅炉采用煤泥中混入0~2mm石灰石颗粒的方法进行脱硫）的方法，试验测得的SO<sub>2</sub>排放浓度（折算至O<sub>2</sub>=6%）曲线如下图：



SO2排放浓度随时间的变化

由上图可以看出，排放烟气中SO2浓度随着试验时间的延长不断降低，开始试验次日下午测试结果：SO2平均排放浓度为272mg/m<sup>3</sup>，脱硫效率为79.9%。

开始试验次日晚进行了降低钙硫比试验，减少煤泥中石灰石粉加入量，总体钙硫比调整为2.8，测试结果表明：排放烟气中SO2浓度平均为285 mg/m<sup>3</sup>，脱硫效率达到78.16%。

根据烟气在线监测系统（测点安装于烟囱，监测3台锅炉烟气）监测记录情况参考、比照，开始试验当天20:00，烟气SO2排放浓度开始降低，直至次日11:30才相对稳定在较低值，次日23:00进行测试后停止向煤泥中添加0~2mm石灰石给料，维持炉前2~5mm的石灰石颗粒给料（钙硫比为2.1），至第三日2:30停止所有石灰石给料。烟气在线监测记录表明：至第三日4:00，烟气SO2排放浓度一直稳定在相对较低值，随后缓慢上升。表明此种运行方式滞后较大，需要较长时间进入稳定状态，经过长期运行后，由于床内石灰石的累积效应，脱硫效果较稳定，有望在维持料层高度需求的石灰石给料量时达到脱硫要求。

#### 4.4 除尘器性能试验

序列	项目	动压	静压	流量	采样时间	采样体积	样品重量	烟尘浓度	除尘效率
		Pa	Pa	m <sup>3</sup> /h	min	L	mg	mg/m <sup>3</sup>	%
实验前	除尘器前	33	-3.62	67956	5	39.4	632.8	16060.91	99.74
	除尘器后	47	-0.25	96154	10	99.3	4.2	42.30	
实验中	除尘器前	32	-3.48	67346	5	40.8	660.2	16181.37	99.35
	除尘器后	32	-0.21	80054	10	113	11.9	105.59	

由上表可以看出，添加石灰石脱硫前后，静电除尘器两次测量的除尘效率分别99.74%和99.35%。表明添加石灰石脱硫后，对静电除尘器的除尘效率影响不大。

对于静电除尘器，灰中CaO、MgO、和NaO 以及烟气中的SO3等因素都会导



致粉尘的比电阻有减小的趋势，从而导致除尘效率的变化。对比前表中粉煤灰的成分分析数据可以看出，三电场除尘器中，从电场1到电场3，收集的粉煤灰中的CaO、MgO及SO<sub>3</sub>含量逐渐减少，而NaO的含量略有增加。由于未利用的脱硫剂和脱硫产物在1电场中大量被分离下来，使后面电场的粉尘条件与不加脱硫剂时相似，致使脱硫对整体除尘效率影响不大。

## 5 结论

综合上述研究，可以得出：

(1) 石灰石完全可以替代石英砂作异比重煤泥循环流化床锅炉的床料，使煤泥流化床锅炉长期稳定运行。

(2) 前人对循环流化床锅炉炉内喷钙脱硫的研究表明，石灰石粒度一般采用0~1mm，平均100~500 $\mu$ m，该结果对循环流化床内的磨损情况考虑不足。本课题研究证明：只要大颗粒的石灰石不排出床外，会不断磨损和破碎成为小颗粒，而且石灰石（或生石灰）表面的CaSO<sub>4</sub>薄层不断被破坏而暴露出更新的反应表面，这一结果会促进脱硫反应。石灰石作为煤泥循环流化床锅炉床料长期运行时，床内积存大量的石灰石、生石灰颗粒，不断磨损破碎，产生一些细小的颗粒，可以保证其较高的脱硫效率。

(3) 山东华聚能源股份有限公司兴隆庄分公司煤泥循环流化床锅炉最佳脱硫运行温度为900℃，在钙硫比为3.3:1时，脱硫效率达到79.9%，平均排放浓度为272mg/m<sup>3</sup>；在钙硫比为2.8:1时，排放浓度为285 mg/m<sup>3</sup>，脱硫效率为78.16%；长期稳定运行的情况下，脱硫效率会更高。

(4) 综合考虑脱硫、维持床料和经济因素，75t/h煤泥循环流化床锅炉推荐补充石灰石的粒度为2~5mm，补充量约0.6吨/小时（煤泥含硫量0.44%时，钙硫比2.1:1）。在此补充量下，床料总量基本平衡，维持床压运行，在床层压力升高或降低时，适当减少或增加炉前石灰石的补充量。

(5) 试验结果表明，脱硫对静电除尘器各电场的出力会产生影响，但对整体除尘效率影响不大。对锅炉运行方面未产生明显影响。

## 6 效益分析

### 6.1 社会效益分析

(1) 随着全社会对环保的日益重视，各级政府环境监管力度不断加大，SO<sub>2</sub>达标排放势在必行，本文为煤泥循环流化床锅炉找到了低成本、高效、稳定的脱硫技术，不仅能使各煤泥电厂SO<sub>2</sub>达标排放，而且由于运行成本较低，可以长期稳定运行，大幅度降低SO<sub>2</sub>排放量。

(2) 目前煤泥流化床燃烧技术已经广泛应用于我国煤炭行业煤泥的综合利用，35t/h、75t/h、130t/h等各种容量的煤泥循环流化床锅炉在大量使用，本课题所研发的技术工艺具有良好的推广前景。

### 6.2 经济效益分析

(1) 山东华聚能源股份有限公司兴隆庄分公司4#锅炉采用该工艺技术进行脱硫, 在总钙硫比2.8时, 脱硫效率78%, 可减少SO<sub>2</sub>排放量86.42kg/h, 每年可减排561730 kg, 按0.63元/kg计算, 应减少排污费35.4万元/年。

(2) 该工艺系统简单, 投资低, 石灰石给料系统仅需30—40万元; 而采用炉内喷钙, 石灰石给料系统需200—500万元。

(3) 脱硫成本较高使得许多企业消极对待, 经常停用脱硫设施。当地粒径5mm左右石灰石子仅10多元/t, 而炉内喷钙所需0—1mm石灰石粉在120元/t左右, 采用该工艺将使脱硫费用大幅度降低。

作者简介: 刘学冰(1964—), 男, 山东华聚能源股份有限公司, 副总工程师, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事洗煤泥流化床锅炉燃烧、脱硫、粉煤灰综合利用等领域的研究。

通信地址: 山东邹城市宏河路459号山东华聚能源股份有限公司

电 话: 13562795498      0537-5380649      邮 编: 273500

[版权声明](#) [商铺介绍](#) [理事会章程](#) [广告招商](#) [CCTE网站联盟](#) [友情链接](#) [帮助中心](#)

主办单位: 煤矿与煤炭城市发展工作委员会

协办单位: 北京嘉诚禾力广告有限公司

联系地址: 北京市海淀区恩济庄18号院4号楼 邮政编码: 100036

电话: 010-88124838 88127046 传真: 010-88127046

E-mail: [master@mtsbxxn.com](mailto:master@mtsbxxn.com) [mtsbxxn@163.com](mailto:mtsbxxn@163.com)

网站备案号: 京ICP备05035317号

