

烟气湿法脱硫用石灰石溶解速率定量分析

肖刚^{1,2} 金保升¹ 刘继驰¹ 仲兆平¹ 肖睿¹ 黄亚继¹
钟文琪¹ 王小芳¹ 徐艳³

(¹ 东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

(² 浙江大学能源洁净利用国家重点实验室, 杭州 310027)

(³ 江苏省太仓华能电厂, 太仓 215424)

摘要: 利用 EDTA 络合滴定法测量了 6 种湿法脱硫用灰石中的 CaCO_3 和 MgCO_3 含量, 其中 CaCO_3 含量较为稳定, 一般都在 89% ~ 93% 范围内, 而 MgCO_3 含量的波动较大, 可在 1.0% ~ 8.5% 之间变化. 依照我国电力行业标准(DL/T 943—2005), 对石灰石反应速率的时间指标进行分析, 其值在 25 ~ 120 min 之间变化. 结合实验数据和颗粒溶解缩核模型, 提出具有明确物理意义的石灰石溶解速率定量分析方法. 以溶液温度 50 °C, pH 值 5.5 为标准溶解条件, 6 种石灰石颗粒在单位半径(半径为 1 m)下的溶解速率为 0.3 ~ 1.0 $\mu\text{mol/s}$. 该定量分析方法对烟气湿法脱硫用石灰石的选取与系统的优化具有一定的指导意义.

关键词: 石灰石; 湿法脱硫; 溶解速率; 定量分析

中图分类号: X701.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0505(2008)06-1029-05

Quantitative analysis of dissolution rate of limestone used in WFGD

Xiao Gang^{1,2} Jin Baosheng¹ Liu Jichi¹ Zhong Zhaoping¹ Xiao Rui¹
Huang Yaji¹ Zhong Wenqi¹ Wang Xiaofang¹ Xu Yan³

(¹ School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(² State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(³ Jiangsu Taicang Huaneng Power Plant, Taicang 215424, China)

Abstract: The contents of CaCO_3 and MgCO_3 in six kinds of limestone were detected using EDTA titration method. The results indicate that the content of CaCO_3 is stable, which lies in range of 89% to 93%; while the content of MgCO_3 fluctuates greatly, ranging from 1.0% to 8.5%. The time parameter of limestone reaction is analyzed according to Electrical Trade Criteria (DL/T 943—2005), and it lies in range of 25 to 120 min. Based on the results and shrinking model, a quantitative analysis method of limestone dissolution rate is proposed, which has a legible and comprehensible physics signification. It is defined as the standard condition when temperature and pH scale of solution is 50 °C and 5.5 respectively. With the new definition, the dissolution rate of six kinds of limestone ranges from 0.3 to 1.0 $\mu\text{mol/s}$ when radii of particles are 1 m. The proposed method is helpful for limestone selection and system optimization in wet flue gas desulfurization (WFGD).

Key words: limestone; wet flue gas desulfurization; dissolution rate; quantitative analysis

石灰石/石膏湿法烟气脱硫工艺(WFGD)是 当前应用最广泛的二氧化硫脱除技术之一^[1-5]. 该

收稿日期: 2008-05-16. 作者简介: 肖刚(1979—), 男, 博士, 副教授, xiaogangtianmen@seu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50806013)、教育部博士点新教师基金资助项目(20070286074)、东南大学科技基金资助项目(XJ2008306)、国家重点实验室开放基金资助项目(ZJUCEU2006004)、国家重大基础研究计划(973 计划)资助项目(2007CB210208)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA020101).

引文格式: 肖刚, 金保升, 刘继驰, 等. 烟气湿法脱硫用石灰石溶解速率定量分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(6): 1029-1033.
万方数据

技术工艺成熟、吸收剂来源广泛、脱硫效率高,目前市场占有率达到 70% 左右. WFGD 工艺中石灰石浆吸收 SO_2 的过程十分复杂^[1-2],其反应过程一般简化为如下 5 个阶段:① 溶质 SO_2 由气相主体扩散到气液两相界面的气相一侧;② SO_2 在相界面上溶解,并转入液相;③ SO_2 电离,同时剩余的 SO_2 由液相界面扩散到液相主体;④ 石灰石溶解、电离与扩散;⑤ 反应产物向液相的扩散及反应产物沉淀的生成.

这 5 个阶段是同时进行的,阶段 2、阶段 3 和阶段 5 是快速离子反应,根据化学反应动力学可知湿法脱硫反应速率主要由阶段 1 和 4 控制. 阶段 1 主要由脱硫塔内气液流场特征决定,阶段 4 主要由石灰石溶解特性决定. 由此可见,石灰石溶解特性是湿法脱硫工艺设计的一个重要技术指标.

影响石灰石溶解特性的因素很多,国内外学者对此进行了大量的研究^[6-12]. 朱天乐等^[6]选取 4 种天然石灰石,对其化学成分、比表面积等特性进行分析,并利用硫酸滴定法定性地考察了石灰石的反应活性,认为石灰石中 CaCO_3 的含量对脱硫反应影响较大. 时正海等^[7]研究认为氟离子和氯离子等对石灰石脱硫反应具有负面影响. 钟秦^[9]比较了石灰石和石灰、强制氧化和自然氧化对湿法脱硫的影响,并建立相应的理论模型. Ahlbeck 等^[10]利用激光散射法测量反应过程中石灰石颗粒粒径与溶解速率的关系,发现溶解缩核模型能够很好地解释石灰石的溶解过程. Hosten 等^[11]考察了恒 pH 值的条件下 ($\text{pH} = 5$),石灰石在 120 min 内的溶解百分数,发现该指标在 0.25 ~ 0.95 间变化.

以上研究分别从不同侧面分析了石灰石的反应特性,但没能提出系统可行的定量分析方法,而且这些报道中(特别是国内研究文献)所用研究方法繁多,但却未见有采用《中华人民共和国电力行业标准——烟气湿法脱硫用石灰石粉反应速率的测定(DL/T 943—2005)》(以下简称《标准》)对石灰石反应速率进行测量和分析的报道. 这可能是由于该《标准》中表征反应速率所用的时间指标难以表述,难以直接应用于脱硫模型和工程设计所致. 所以,非常有必要根据现有的研究成果,进一步改进和完善《标准》中的相关内容,提出一套完整的石灰石溶解速率定量分析方法,以期对湿法脱硫技术中石灰石的选择、脱硫模型建立与系统优化提供测量依据和理论指导.

万方数据

1 实验方法

1.1 实验原料与仪器

实验涉及的 6 种石灰石原料分别来自于江苏、内蒙古、广东、浙江、重庆和河北的火力发电厂. 石灰石样品加工为 250 ~ 270 目的石灰石粉后,存储在装有变色硅胶的干燥皿内备用.

实验所采用的主要仪器有:中科院南京土壤研究所技术服务中心提供的 FJA-2 型自动滴定仪,滴定误差不大于 0.2%;江苏金坛市大地自动化仪器厂提供的 85-2 型恒温磁力搅拌器,温度误差 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$;上海多那电子有限公司提供的 JPO1 型便携式 pH 计,精度 0.1;上海天平仪器厂提供的 FA2104 型电子天平,精度 0.1 mg.

1.2 石灰石中 CaCO_3 和 MgCO_3 含量测定方法

实验采用 EDTA 络合滴定法,对样品中 CaCO_3 和 MgCO_3 含量进行了分析. 实验步骤为:① 配制 0.01 mol/L 左右的 EDTA 溶液,利用 0.01 mol/L 标准钙溶液标定 EDTA 浓度(记做 C),存放于聚乙烯瓶中备用;② 利用电子天平称取 100 mg 干燥石灰石粉末,将其完全溶于适量 HCl 溶液中并定容到 1 L 的容量瓶内;③ 配备酸性铬蓝 K-萘酚绿 B-NaCl 混合粉末指示剂,并保存于干燥皿内;④ 取 2 份 25 mL 石灰石溶液,将其煮沸除去溶于水中的 CO_2 ,加入适量氨水中和后,一份加入 3.5 mL pH10 缓冲熔剂用于测量样品中 Ca, Mg 离子总量,另一份加入 2 mL NaOH 溶液(4 mol/L),使其 pH 值达到 12 左右,用于测量样品中 Ca 离子含量;⑤ 选用自动滴定仪中的光度滴定模块和相应的传感器,对 2 个样品进行 EDTA 滴定,随着滴定剂的不断加入,电极电位不断发生变化,电极电位发生突跃时,说明滴定到达终点. 假定上述 2 份样品达到滴定终点所消耗的 EDTA 溶液量分别为 V_1 和 V_2 ,则石灰石中的 CaCO_3 和 MgCO_3 含量分别可表示为

$$w_{\text{CaCO}_3} = V_2 C \times 100\%$$

$$w_{\text{MgCO}_3} = 1.4(V_1 - V_2) C \times 100\%$$

为保证实验精确,每种石灰石分别测量 7 次,取平均值作为 CaCO_3 和 MgCO_3 含量的测定值,本实验在多功能滴定实验系统平台上完成,系统示意图如图 1 所示.

1.3 石灰石反应速率测定方法

按照《标准》,对石灰石的反应速率进行分析,实验系统平台如图 1 所示,其实验流程为:① 配制 0.1 mol/L 盐酸溶液 2 L,0.1 mol/L 氯化钙溶液 2

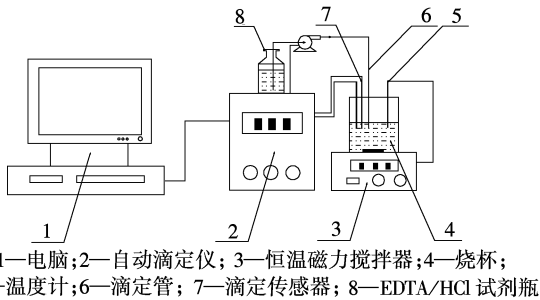


图1 多功能自动滴定实验台示意图

L;②量取 250 mL 0.1 mol/L 氯化钙溶液注入 500 mL 的烧杯中,将烧杯放置在恒温搅拌器上,控制温度在 $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$,磁力搅拌速度为 800 r/min;③称取 150 mg 石灰石粉加入烧杯中;④搅拌 5 min 后,将自动滴定仪的 pH 电极插入到石灰石悬浮液内,保持滴定过程中 pH 值恒定在 5.5 ± 0.1 ;⑤采用 0.1 mol/L 盐酸进行滴定,当 HCl 溶液耗量达到 80% 的 CaCO_3 和 MgCO_3 完全反应所需的理论耗量时,即为滴定实验终点.本实验分别重复 5 次,取时间平均值作为石灰石反应速率的时间指标.石灰石反应百分数与时间关系式为

$$X(t) = \frac{\frac{1}{2} C_{\text{HCl}} V_{\text{HCl}}(t)}{\frac{W w_{\text{CaCO}_3}}{M_r(\text{CaCO}_3)} + \frac{W w_{\text{MgCO}_3}}{M_r(\text{MgCO}_3)}}$$

式中, $X(t)$ 为 t 时刻时石灰石粉的反应百分数,%; C_{HCl} 为盐酸的浓度,取 0.01 mol/L; $V_{\text{HCl}}(t)$ 为 t 时刻时滴定所消耗的盐酸体积,mL; W 为石灰石粉的质量,取 0.150 g; w_{CaCO_3} 为石灰石粉中 CaCO_3 的质量分数; w_{MgCO_3} 为石灰石粉中 MgCO_3 的质量分数;

$M_r(\text{CaCO}_3)$ 为碳酸钙的分子量,取 100; $M_r(\text{MgCO}_3)$ 为碳酸镁的分子量,取 84.

2 实验结果与分析

2.1 石灰石中 CaCO_3 和 MgCO_3 含量

本文涉及的 6 种石灰石中 CaCO_3 和 MgCO_3 含量,如表 1 所示.可以看出,我国石灰石中 CaCO_3 含量较为稳定,一般都在 89% ~ 93% 范围内; MgCO_3 含量的波动比较大,可在 1.0% ~ 8.5% 之间变化.

表1 石灰石样品的主要成分

来源地	$w_{\text{CaCO}_3}/\%$	$w_{\text{MgCO}_3}/\%$
江苏	92.68	1.20
内蒙古	91.45	4.32
广东	91.30	4.33
浙江	90.94	3.77
重庆	90.67	2.33
河北	89.75	8.21

2.2 石灰石反应速率的时间指标

根据我国电力行业《标准》,测定的石灰石质量分数与时间的关系如图 2 所示,在溶液温度 $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$,pH 值 5.5 ± 0.1 的条件下,当石灰石质量分数为 80% 时,所需的反应时间可在 25 ~ 120 min 之间变化.《标准》中的测量方法操作性较强,反应工况与实践情况接近,分析指标对湿法脱硫用石灰石品质判定有一定的指导意义,但由于《标准》中石灰石反应速率的表征指标为时间,在实际应用时容易产生误解,且难以直接应用到工程设计与系统优化模型中,所以,很有必要进行进一步的深化提炼.

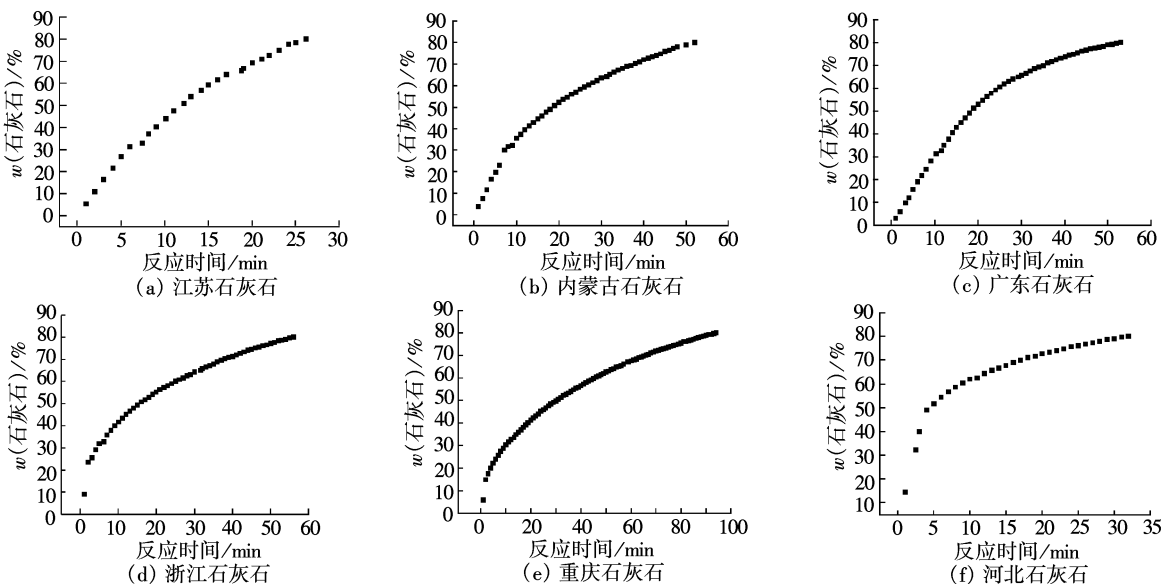


图2 6种石灰石质量分数与时间关系

3 石灰石溶解速率定量评价

研究表明^[1-2,11-12],酸性环境下 CO_3^{2-} 与 H^+ 的反应是快速离子反应,石灰石在 pH 值为 5.5 的酸性环境中的反应速率主要由石灰石本身的溶解速率决定,而对于石灰石颗粒的溶解,可用缩核模型进行描述^[1-3],对于半径为 r_i 的石灰石颗粒,其溶解速率可表示为(以 CaCO_3 为代表,也可适用于 MgCO_3 的溶解)

$$r_{\text{CaCO}_3,i} = 4\pi r_i D_{\text{L,Ca}^{2+}} (c_s(\text{Ca}^{2+}) - c_0(\text{Ca}^{2+})) \quad (1)$$

式中, $r_{\text{CaCO}_3,i}$ 为半径为 r_i 的石灰石颗粒的溶解速率; $D_{\text{L,Ca}^{2+}}$ 为 Ca^{2+} 在液相中的扩散系数; $c_s(\text{Ca}^{2+})$ 为石灰石颗粒表面 Ca^{2+} 浓度; $c_0(\text{Ca}^{2+})$ 为液相主体中 Ca^{2+} 的浓度。

可将式(1)整理为

$$\frac{r_{\text{CaCO}_3,i}}{r_i} = 4\pi D_{\text{L,Ca}^{2+}} (c_s(\text{Ca}^{2+}) - c_0(\text{Ca}^{2+})) \quad (2)$$

式中, $r_{\text{CaCO}_3,i}/r_i$ 为溶解速率随半径变化函数曲线斜率,其值等于单位半径($r_i = 1 \text{ m}$)石灰石颗粒的溶解速率.在本实验中,反应溶液液相主体浓度为 0.1 mol/L 的 250 mL 氯化钙溶液,而仅混合 0.150 g 石灰石粉,即使石灰石完全溶解或反应,其产生的 Ca^{2+} 对液相主体中 Ca^{2+} 的浓度影响甚微,可以忽略,即 $c_0(\text{Ca}^{2+})$ 为 100 mol/m^3 ,是定值; $c_s(\text{Ca}^{2+})$ 是石灰石颗粒表面液膜中 Ca^{2+} 浓度,仅与石灰石本身及溶液特性相关,在本实验条件下可取定值; $D_{\text{L,Ca}^{2+}}$ 是 Ca^{2+} 在液相中的扩散系数,本实验中反应条件稳定,故也可取定值.由此可以看出,

对于某种石灰石的实验来说,等式(2)右边为定值,即等式左边 $\frac{r_{\text{CaCO}_3,i}}{r_i}$ 也为定值.这就是说,石灰石颗粒的溶解速率仅与其半径呈正比,即如果以石灰石颗粒半径为横坐标,以溶解速率为纵坐标,则实验数据点可近似表示为直线。

本文所涉及的实验中,石灰石的反应速率可近似认为等于其溶解速率,并满足如下假设:①石灰石质地均匀,平均密度 2.7 g/cm^3 ,石灰石粉均为等径球形颗粒,平均直径取 $58 \mu\text{m}$ ($250 \sim 270$ 目);②石灰石中仅含有 CaCO_3 和 MgCO_3 两种可溶成分,其他均为惰性物质,其混合物分子量为 CaCO_3 和 MgCO_3 按其含量比例加权平均值;③石灰石粉在溶液内分布均匀,溶解条件相近,每个石灰石颗粒溶解过程同步且溶解规律相同;④石灰石颗粒溶解按照缩核模型进行,由于等摩尔的 CaCO_3 和 MgCO_3 消耗的 HCl 摩尔量相同,石灰石溶解速率以 mol/s 表示。

根据假设, 150 mg 石灰石粉中约含有 5.438×10^4 个石灰石颗粒,如以颗粒半径为横坐标作图,其变化规律如图 3 所示。

由于实验误差、假设条件与实际溶解过程的差异,实验数据略有发散,但总的来看,石灰石溶解速率实验数据与颗粒半径呈较好的线性关系,这与理论分析结果相近,其规律可用最小二乘法拟合的直线表示.这就说明,利用该方法定量分析石灰石的溶解速率是合理的.该方法中拟合直线的斜率在数值上等于单位半径石灰石颗粒($r_i = 1 \text{ m}$)在

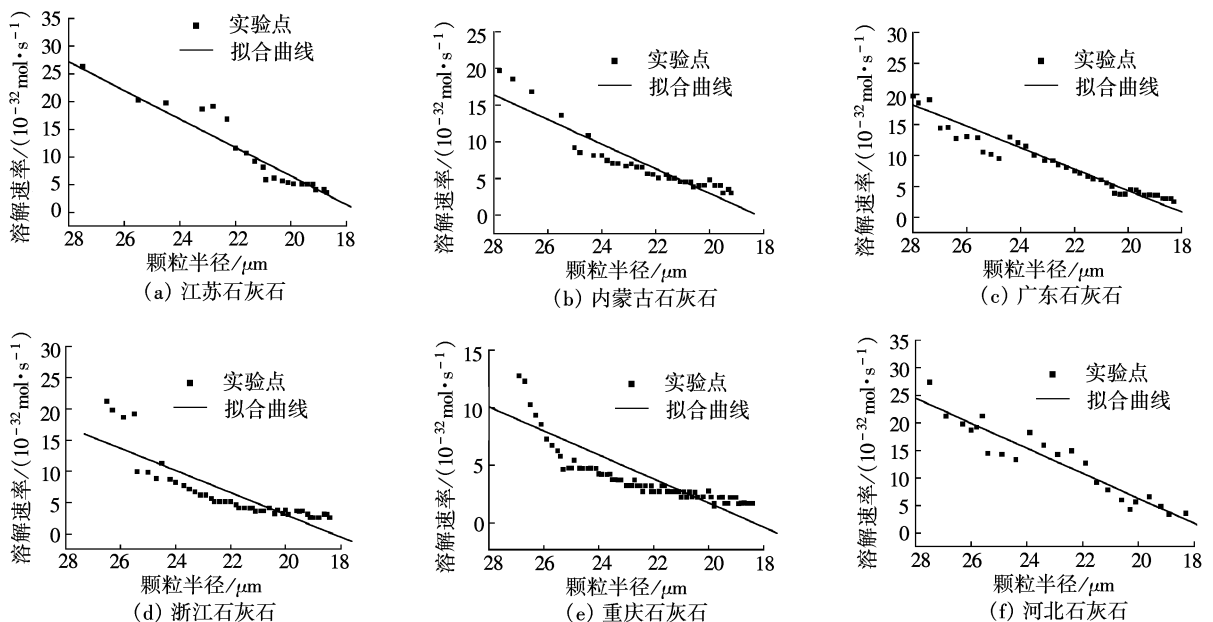


图 3 石灰石颗粒溶解速率随半径的变化规律

pH = 5.5, 溶液温度为 50 °C 条件下的溶解速率, 本文称之为石灰石在标准条件下的溶解速率, 记为 W_{bz} . 实验所涉及的 6 种石灰石样品的 W_{bz} 如表 2 所示, 其值在 0.3 ~ 1.0 $\mu\text{mol/s}$ 范围内变化. 利用该方法作为湿法脱硫用石灰石品质的评价标准, 不仅能够定量地判定石灰石的品质, 而且具有较为明晰的物理意义, 并且可以直接应用于 WFGD 湿法脱硫工艺模型中^[1-2,9].

表 2 石灰石样品在标准条件下的溶解速率

来源地	$W_{bz}/(\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$
江苏	0.964
内蒙古	0.586
广东	0.653
浙江	0.611
重庆	0.346
河北	0.864

以上分析方法和结果仅仅表征了石灰石的表观溶解速率, 没有涉及石灰石含量、其他离子、孔隙率等因素对石灰石溶解速率的影响, 这在以后的研究中还有待进行深入研究, 以期全面掌握石灰石溶解规律, 建立石灰石溶解速率预测模型, 为石灰石脱硫系统的优化运行提供更为全面参考依据.

4 结论

1) 分析了 6 种湿法脱硫用石灰石样品中的 CaCO_3 和 MgCO_3 含量, 其中, CaCO_3 含量较为稳定, 一般都在 89% ~ 93% 范围内, 而 MgCO_3 含量的波动较大, 在 1.0% ~ 8.5% 之间变化.

2) 依照《标准》, 对石灰石反应速率的时间指标进行分析, 其值在 25 ~ 100 min 范围内变化.

3) 结合实验数据和颗粒溶解缩核模型, 提出具有明确物理意义的石灰石溶解速率定量分析方法, 该方法理论分析与实验结果吻合良好. 以溶液温度为 50 °C、pH 值为 5.5 的标准溶解条件下, 6 种单位半径的石灰石颗粒的溶解速率为 0.3 ~ 1.0 $\mu\text{mol/s}$.

参考文献 (References)

[1] 钟秦. 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 3-18.

[2] Shih S, Lin J, Shiau G. Dissolution rates of limestones of different sources[J]. *Journal of Hazardous Materials B*, 2000, **79**(1): 159-171. (in Chinese)

[3] 钟毅, 林永明, 高翔, 等. 石灰石/石膏湿法烟气脱硫系统石灰石活性影响因素研究[J]. *电站系统工程*, 2005, **21**(4): 1-4.

Zhong Yi, Lin Yongming, Gao Xiang, et al. Study on influence factors of reactivity of limestone in limestone/

gypsum wet FGD System[J]. *Power System Engineering*, 2005, **21**(4): 1-4. (in Chinese)

- [4] 陈传敏, 赵长遂, 赵毅, 等. 利用热重分析-X 射线衍射分析法研究氧/二氧化碳气氛下石灰石硫化特性[J]. *中国电机工程学报*, 2006, **26**(13): 108-112.
- Chen Chuanmin, Zhao Changsui, Zhao Yi, et al. Investigation on sulfation characteristics of limestone under O_2/CO_2 atmosphere by TGA-XRD[J]. *Proceedings of CSEE*, 2006, **26**(13): 108-112. (in Chinese)
- [5] 吕清刚, 雍玉梅, 那永洁, 等. 循环流化床燃煤锅炉的 SO_2 和 NO_x 排放的实验和数值计算[J]. *中国电机工程学报*, 2005, **25**(1): 142-146.
- Lü Qinggang, Yong Yumei, Na Yongjie, et al. Influence of coal on SO_2 and NO_x emissions of circulating fluidized bed combustion[J]. *Proceedings of CSEE*, 2005, **25**(1): 142-146. (in Chinese)
- [6] 朱天乐, 李曜, 凌炫, 等. 湿法烟气脱硫中石灰石反应活性[J]. *环境科学*, 2005, **26**(6): 15-18.
- Zhu Tianle, Li Yao, Ling Xuan, et al. Reactivity of the limestone in wet flue gas desulfurization[J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(6): 15-18. (in Chinese)
- [7] 时正海, 赵彩虹, 周屈兰, 等. 微型鼓泡床中石灰石溶解特性的实验研究[J]. *热能动力工程*, 2004, **19**(3): 234-237.
- Shi Zhenghai, Zhao Caihong, Zhou Qulan, et al. Experimental investigation of limestone dissolution characteristics in a micro-sized bubbling bed[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2004, **19**(3): 234-237. (in Chinese)
- [8] 王春波, 李永华, 陈鸿伟, 等. 石灰石煅烧过程中孔隙网络结构的动态可视化数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2005, **25**(17): 88-92.
- Wang Chunbo, Li Yonghua, Chen Hongwei, et al. The visual simulation of dynamic pore structure of limestone during its calcinations[J]. *Proceedings of CSEE*, 2005, **25**(17): 88-92. (in Chinese)
- [9] 钟秦. 湿法烟气脱硫的理论和实验研究 III—工艺实验和脱硫模型的验证[J]. *南京理工大学学报*, 1999, **23**(2): 157-161.
- Zhong Qin. Theoretical and experimental investigation of wet flue gas desulfurization III—the technological experiments and verification of desulfurization model[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 1999, **23**(2): 157-161. (in Chinese)
- [10] Ahlbeck J, Engman T, Falten S, et al. Measuring the reactivity of limestone for wet flue-gas desulfurization[J]. *Chem Eng Sci*, 1995, **50**(7): 1081-1089.
- [11] Hosten Ç, Gülsün M. Reactivity of limestones from different sources in Turkey[J]. *Minerals Engineering*, 2004, **17**(1): 97-99.
- [12] Sören K, Michelsen Michael L, Kim D J. Experimental investigation and modeling of a wet flue gas desulfurization pilot plant [J]. *Industry and Engineering Chemical Research*, 1998, **37**(7): 2792-2806.

烟气湿法脱硫用石灰石溶解速率定量分析

作者: [肖刚](#), [金保升](#), [刘继驰](#), [仲兆平](#), [肖睿](#), [黄亚继](#), [钟文琪](#), [王小芳](#), [徐艳](#), [Xiao Gang](#), [Jin Baosheng](#), [Liu Jichi](#), [Zhong Zhaoping](#), [Xiao Rui](#), [Huang Yaji](#), [Zhong Wenqi](#), [Wang Xiaofang](#), [Xu Yan](#)

作者单位: [肖刚, Xiao Gang \(东南大学能源与环境学院, 南京210096; 浙江大学能源洁净利用国家重点实验室, 杭州310027\)](#), [金保升, 刘继驰, 仲兆平, 肖睿, 黄亚继, 钟文琪, 王小芳, Jin Baosheng, Liu Jichi, Zhong Zhaoping, Xiao Rui, Huang Yaji, Zhong Wenqi, Wang Xiaofang \(东南大学能源与环境学院, 南京, 210096\)](#), [徐艳, Xu Yan \(江苏省太仓华能电厂, 太仓, 215424\)](#)

刊名: [东南大学学报 \(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF SOUTHEAST UNIVERSITY \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2008, 38(6)

参考文献(12条)

1. [钟秦 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例](#) 2002
2. [Soren K;Michelsen Michael L;Kim D J Experimental investigation and modeling of a wet flue gas desulfurization pilot plant](#)[外文期刊] 1998(07)
3. [Hosten C;Gills/in M Reactivity of limesones from different sources in Turkey](#)[外文期刊] 2004(01)
4. [Ahlbeck J;Engrnan T;Falten S Measuring the reactivity of limestone for wet flue-gas desulfurization](#)[外文期刊] 1995(07)
5. [钟秦 湿法烟气脱硫的理论和实验研究III-工艺实验和脱硫模型的验证](#)[期刊论文]-[南京理工大学学报](#) 1999(02)
6. [王春波;李永华;陈鸿伟 石灰石煅烧过程中孔隙网络结构的动态可视化数值模拟](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2005(17)
7. [时正海;赵彩虹;周屈兰 微型鼓泡床中石灰石溶解特性的实验研究](#)[期刊论文]-[热能动力工程](#) 2004(03)
8. [朱天乐;李曜;凌炫 湿法烟气脱硫中石灰石反应活性](#)[期刊论文]-[环境科学](#) 2005(06)
9. [吕清刚;雍玉梅;那永洁 循环流化床燃煤锅炉的SO₂和NO_x排放的实验和数值计算](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2005(01)
10. [陈传敏;赵长遂;赵毅 利用热重分析-x射线衍射分析法研究K/二氧化碳气氛下石灰石硫化特性](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2006(13)
11. [钟毅;林永明;高翔 石灰石/石膏湿法烟气脱硫系统石灰石活性影响因素研究](#)[期刊论文]-[电站系统工程](#) 2005(04)
12. [Shih S;Lin J;Shiau G Dissolution rates of limestones of different sources](#)[外文期刊] 2000(01)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dndxxb200806018.aspx