

# 水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂的实用性

冉景煜, 张 力, 崔严鹏

(重庆大学 能源与环境研究所, 重庆 400044)

**摘 要:** 水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂的机理及实验研究表明, 水处理固体废物可以有效地催化脱硫反应, 减缓高温下  $\text{CaSO}_4$  分解速度, 使燃煤脱硫过程的最佳脱硫温度更接近煤的燃烧温度, 提高燃煤脱硫效率及钙利用率; 其用作燃煤脱硫添加剂进行脱硫, 实施系统及流程简单, 既能减少水处理固体废物排放量, 减轻对水体的污染, 也能有效地减少燃煤  $\text{SO}_2$  的排放量。

**关键词:** 水处理固体废物; 燃煤; 脱硫添加剂; 实用性

中图分类号: TQ534.9 文献标识码: A

## 1 前言

环境污染问题越来越成为大众关注的焦点, 其中水处理固体废物排放对水资源的污染、燃煤释放  $\text{SO}_2$  造成的大气污染尤为突出。水处理固体废物的排放量逐年递增, 并且未加处理直接排入了江河, 这无疑对水资源造成极大的危害; 燃煤排放的  $\text{SO}_2$  也对资源和环境造成严重危害。所以保护环境, 综合治理是保证经济可持续发展的一项十分迫切的任务, 为能源工业和环保科学技术发展所必须解决的问题。在脱硫技术中, 选择脱硫剂是关键, 因为它直接影响脱硫的成本和效率。研究表明, 水处理固体废物成份与脱硫剂有许多相似<sup>[1~4]</sup>。但是, 水处理固体废物怎样应用于原燃煤脱硫剂中, 以及燃煤脱硫剂中添加水处理固体废物后是否能够提高脱硫效率以及钙利用率和其应用前景, 仍是一个值得研究的课题。

笔者正是针对水处理固体废物作为燃煤脱硫添加剂的综合治理环境污染技术的实用性进行研究。

## 2 水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂可提高脱硫效率和钙利用率

### 2.1 机理分析

水处理固体废物在高温下发生化学反应, 生成物主要有  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  等, 另外还有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等组合而成的盐类, 当水处理固体废物作为添加剂的钙基脱硫剂与燃煤一起送入炉膛后, 无机盐在炉内高温作用下蒸发, 在钙基脱硫剂内形成多孔结构, 并可进一步扩大  $\text{CaO}$  在煅烧时形成的气孔; 其中有些无机盐由于有爆孔的作用, 也会增加脱硫剂的孔洞的数目和孔径, 因此使脱硫剂的比表面积大大增加, 使  $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_2$  可进入  $\text{CaSO}_4$  与未反应的  $\text{CaO}$  继续作用。同时, 水处理固体废物经炉内高温煅烧生成的氧化物在脱硫反应过程中相互作用, 或者与  $\text{CaO}$  反应, 形成松散的脱硫剂结构, 提高脱硫剂脱硫能力; 或者在脱硫反应过程中相互作用, 形成在高温下不易分解的物相并包围在硫酸钙周围, 阻止和减缓硫酸钙在高温下的分解, 提高脱硫剂的脱硫效率; 或者就直接参与脱硫反应, 减少  $\text{SO}_2$  的排放, 从而达到提高脱硫效率的结果。

而且, 水处理固体废物没有经过高强度挤压, 自然晒干后, 多数将自成粉末状; 再经干燥、碾碎, 粒度就更加细小, 与粉碎的石灰石颗粒混合后, 增大了进行脱硫反应的有效面积。其具体化学反应过程可参见文献[1]。

### 2.2 实验及结果分析

实验装置及系统如图1所示, 具体实验方案为: 在不同的脱硫剂中石灰石和水处理固体废物的掺加比例 ( $A=1:0$ 、 $A=2:1$ 、 $A=1:1$ )、不同的钙硫比(钙硫比为 1.5、1.7、2.0、2.3)以及不同的炉内温度 ( $750^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$ 、 $850^\circ\text{C}$ 、 $900^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C}$ 、 $1100^\circ\text{C}$ ) 的 84 种实验工况<sup>[4]</sup>, 实验结果见图 2~图 7。

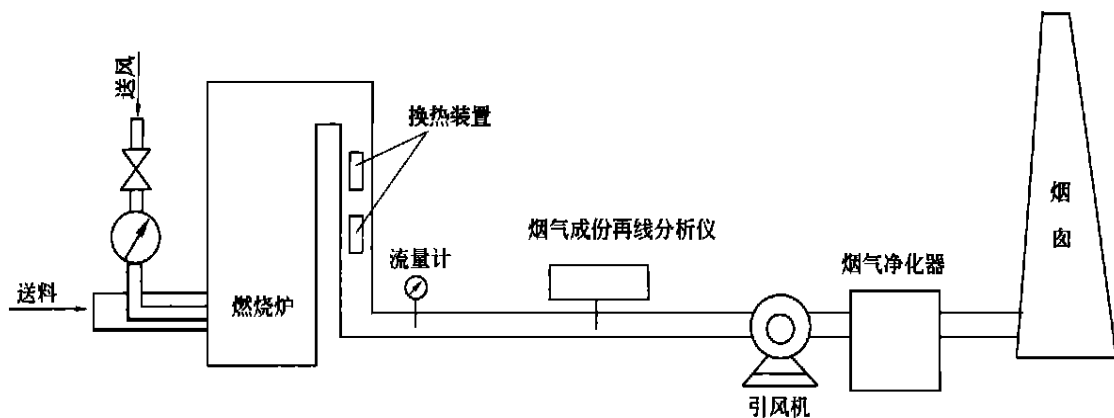


图1 水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂的实验系统图

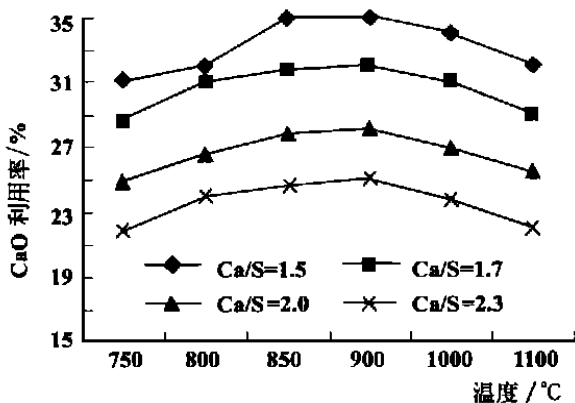


图2 CaO利用率与温度的关系 (A=1:0)

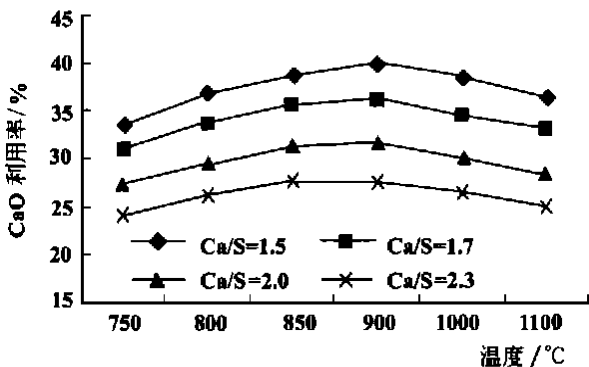


图3 CaO利用率与温度的关系 (A=2:1)

从图2~图7可看出, 不加水处理固体废物实验的钙利用率在 25%~35% 范围内, 脱硫效率在 45%~57% 之间; 向脱硫剂中添加 33% 的水处理固体废物, 脱硫效率上升为 50%~63%, 相同温度下的脱硫效率增幅达到 10.5%~13%; 钙利用率变化范围在 25%~40% 之间, 增加值为 8.4%~13.4%; 继续增加水处理固体废物在脱硫剂中的比例到 50%, 燃煤脱硫实验的脱硫效率达到 55%~65%, 钙

利用率为 30%~40%。与添加 33% 的水处理固体废物相比, 相同温度下脱硫效率的变化幅度为 -0.5%~3.7%, 钙利用率增幅为 0.28%~6.5%。

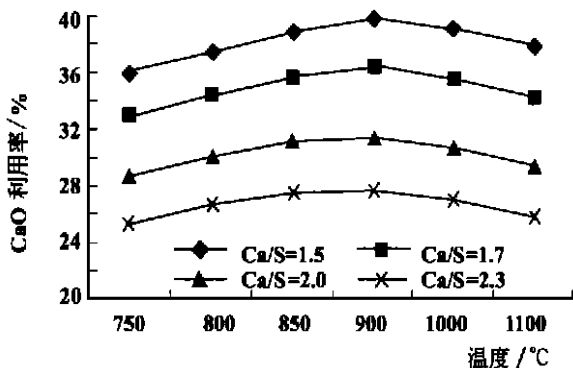


图4 CaO利用率与温度的关系 (A=1:1)

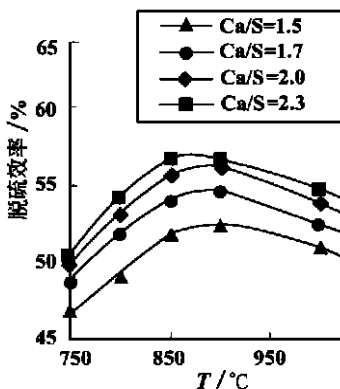


图5 脱硫效率与温度的关系 (A=1:0)

### 2.2.1 水处理固体废物与脱硫效率及钙利用率的关系

与其它温度条件下相比, 750 °C 条件下, 脱硫效率及钙利用率随水处理固体废物含量增加而增加的幅度最大。分析认为混在燃料中的 CaCO<sub>3</sub>, 缘于料层中

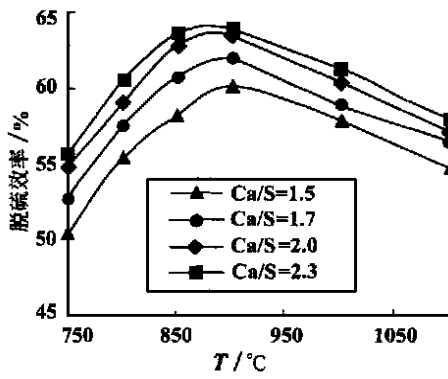


图6 脱硫效率与温度的关系

(A=2:1)

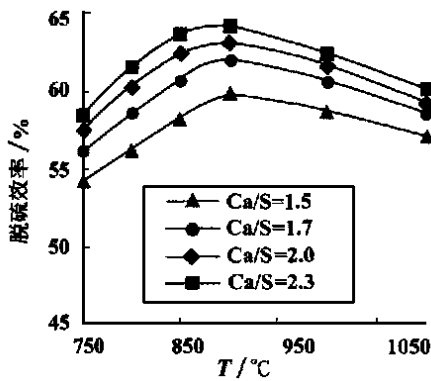


图7 脱硫效率与温度的关系

(A=1:1)

的  $\text{CO}_2$  分解的影响,一般要在  $750\text{ }^\circ\text{C}$  以上才开始分解,而煤中硫分在  $400\text{ }^\circ\text{C}$  左右便开始分解,从而使得以  $\text{CaCO}_3$  为主的钙基固硫剂此时不能及时地捕捉在低温下析出的  $\text{SO}_2$ , 致使脱硫效果欠佳。当在钙基脱硫剂中添加水处理固体废物中存在许多碱性物质<sup>[1]</sup>,

如  $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  可直接与  $\text{SO}_2$  反应,达到固硫作用。因此,与脱硫剂中不加水处理固体废物比较,脱硫效果得到了明显的改善,增幅较大,钙利用率增加。

从图中还可知,随着钙基脱硫剂中水处理固体废物添加量的变化,与不加水处理固体废物时相比,脱硫效率在低温段随温度的增加有着明显的提高,当  $T$  为  $900\text{ }^\circ\text{C}$  时,脱硫效率最大增值达到  $13\%$ ; 在高温段,添加剂提高脱硫效率的作用仍然明显。而且发现,高温条件下,脱硫剂中水处理固体废物的比例越高,燃煤实验的脱硫效率越高,与脱硫剂中不加水处理固体废物相比,脱硫效率及钙利用率的增加值也越大。虽然脱硫效率随脱硫剂中水处理固体废物的比例增大而增大,但是,脱硫效率的增加与添加脱硫剂中水处理固体废物的含量并不成正比,继续增加水处理固体废物在脱硫剂中的含量,不再能够显著地提高固硫率。考虑到水处理固体废物中含有大量颗粒较细的泥沙,这些成份如果在钙基脱硫剂中含量太大,容易盖覆在钙基脱硫剂颗粒周围,减少钙基脱硫剂与  $\text{SO}_2$  的接触,不利于提高脱硫效率。

因此,燃煤脱硫实验中脱硫剂与水处理固体废物的最佳比例约为  $1:1$  (见图5~图7)。

### 2.2.2 脱硫效率及钙利用率与炉内温度的关系

由图2~图7知:脱硫温度对石灰石脱硫剂的脱硫能力有很大影响。在低温段,脱硫效率及钙利用率随温度增加;当温度高于  $900\text{ }^\circ\text{C}$  时,脱硫效率及钙利用率随温度增加反而开始降低。这说明水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂后,进行的煤燃烧脱硫过程存在一个最佳脱硫温度范围,即温度在  $850\text{ }^\circ\text{C}\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$  时,脱硫效果最好,钙利用率最高。

向脱硫剂中添加水处理固体废物能减缓高温下  $\text{CaSO}_4$  分解速度,使燃煤脱硫过程的最佳脱硫温度更加接近煤燃烧温度,稳定在较高值。为解决传统钙基脱硫剂最佳脱硫温度偏低,与煤的流化床燃烧温度差异较大,脱硫生成物  $\text{CaSO}_4$  在高温段分解速度加快,脱硫效率及钙利用率不高等的矛盾有着重要意义。

### 2.2.3 脱硫效率及钙利用率与钙硫摩尔比的关系

分析图2~图7,在同等实验条件下,钙硫比为  $2.0$ 、 $2.3$ 、 $1.7$  与钙硫比为  $1.5$  时的曲线大致相似,不同之处在于脱硫效率随着钙硫比的增加而增加,随钙硫比从  $1.5$ 、 $1.7$ 、 $2.0$  增大到  $2.3$ , 燃煤脱硫实验的脱硫效率不断增加。但是,随着钙硫比的等量增加,脱硫效率的有效增加值却越来越小。与钙硫比为  $1.5$  到  $1.7$  时的相比,脱硫效率随钙硫比从  $2.0$  增到  $2.3$  时的提高效果已经不如前者。

虽然增加钙硫摩尔比值,可以提高脱硫效率,但钙利用率越来越低,且在实际燃烧过程中,过度增加脱硫剂投料量会带来其它副作用,如影响燃烧工况;增加灰渣物理热损失,增加灰渣沥滤物的  $\text{pH}$  值,从而增大灰渣处理成本。所以,水处理固体废物用作燃煤脱硫实验而言,一个比较经济的钙硫摩尔比应该是  $2.0$  左右。在燃煤脱硫实验中,为达到  $65\%$  的脱硫效率,传统脱硫剂须保持  $2.8$  的钙硫比,向脱硫剂中添加  $33\%$  或  $50\%$  水处理固体废物后,在其它条件不变情况下要达到  $65\%$  的脱硫效率,只需钙硫比等于  $2.0$ 。由此证实,水处理固体废物用作添加剂进行燃煤脱硫提高脱硫效率,增加钙利用率,不仅是因为水处理固体废物中含有比传统钙基脱硫剂更容易与  $\text{SO}_2$  反应的物质,而且,某些物质在燃烧脱硫过程中还可以起到催化脱硫反应的作用,在节省脱硫剂用量的同时,还能够有效地改善脱硫效果。

### 3 实施系统及流程

由机理及实验结果分析知,水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂可提高脱硫效率和钙利用率,根据自来水管的实际运行条件及场所,可将水处理固体废物用作燃煤添加剂的具体实施系统及流程如图8所示。对与燃煤的厂矿、水处理固体废物的破碎及输送系统可采用原处理系统,这样系统简单,便于实施。

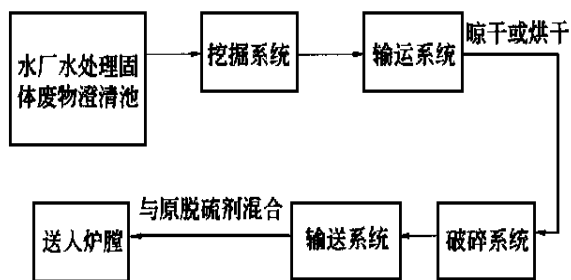


图8 水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂脱硫的实施系统及流程示意

### 4 经济效益

以某城区自来水管固体废物处理为例,分析其效益。该水管是一个制取生活用水的自来水管,平均每日供水22万吨。据统计资料,洪水期间原水的硬度为2.8~3.0毫克/升当量,枯水期为5.5~7.0毫克/升当量,取全年平均硬度4.6毫克/升当量。另外,平均含硅(Si)30毫克/升当量。

表1 效益分析

名称	水厂废物年产量/t·y <sup>-1</sup>	废物处理现况	用作燃煤脱硫添加剂可增加脱硫/t·y <sup>-1</sup>
钙(Ca <sup>2+</sup> )	3 000	未处理,反冲直排	4 800
镁(Mg <sup>2+</sup> )	900	未处理,反冲直排	2 430
硅(Si)	1 400	未处理,反冲直排	3 200
Fe(OH) <sub>3</sub>	1 500	未处理,反冲直排	1 700
Al(OH) <sub>3</sub>	700	未处理,反冲直排	1 400
其它杂质	较大	未处理,反冲直排	

反冲直排方式,每吨固体废物需耗水约12吨,如用来脱硫,而不再采用“压力水反冲洗法”直接排

放,每年可节省用水约101万吨,仅此一项每年可节约资金上百万元。

从表1可看出,应用水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂,不但节省水管处理固体废物的费用,而且对燃煤脱硫的企业,可提高脱硫效率,降低燃煤脱硫成本,大量减少水处理固体废物和SO<sub>2</sub>的排放量,其经济效益与环境效益都非常显著。

### 5 结论

(1) 水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂进行脱硫是可行的,同传统脱硫剂相比,可以有效地催化脱硫反应,提高燃煤脱硫效率和钙利用率。当脱硫剂与水处理固体废物的比例约为1:1时可获取最佳燃煤脱硫效率,脱硫效率比未添加水处理固体废物时增加大约8%。

(2) 向脱硫剂中添加水处理固体废物能减缓高温下CaSO<sub>4</sub>分解速度,使燃煤脱硫过程的最佳脱硫温度更加接近煤燃烧温度,稳定在较高值。这对于改善传统钙基脱硫剂最佳脱硫温度偏低,与煤的流化床燃烧温度差异较大,脱硫生成物CaSO<sub>4</sub>在高温段分解速度加快,脱硫效率及钙利用率不高等矛盾有着重要意义。

(3) 水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂进行脱硫,实施系统及流程简单,同时,实现了以废治废,既能减少水处理固体废物排放量,减轻对水体的污染,又能有效地减少燃煤SO<sub>2</sub>的排放量,带来显著的经济效益和环境效益,有着良好的应用前景。

### 参考文献:

[1] 张力. 水处理固体废物用作燃煤脱硫剂的可行性研究[J]. 重庆环境科学, 1999, 21(3): 47-48.  
 [2] 崔严鹏. 水处理固体废物利用与燃煤脱硫的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1999.  
 [3] 汤龙华. 石灰石颗粒在高温气流中热解脱硫过程的研究[J]. 动力工程, 1997, 17(6): 620-624.  
 [4] 周俊虎. 氧化钙燃烧固硫添加剂的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(3): 131-135.

( 辉 编辑 )

国外全自动燃油燃气燃烧机现状及发展趋势= **The Present Status and Development Trend Worldwide of Full-automatic Oil Combustion Engines** [刊, 汉] / HUANG Si-ming (Hunan Provincial Machinery Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 467 ~ 470  
A description is given concerning oil combustion engines in respect of their product standardization, comprehensive automation and assembly-line production. In addition, the above-cited engines are also analyzed with a focus on the following aspects: atomization mechanism, combustion air distribution, air fan design, air-oil ratio, energy savings potential, environmental protection, automatic control system and engine operation safety and protection. The engine development trend is also briefly discussed with regard to combustion techniques and multi-fuel firing capability, etc. **Key words:** fuel oil, fuel gas, full-automatic combustion engine

水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂的实用性= **The Practical Use of Solid Waste from Water Treatment as a Desulfurization Additive During Coal Combustion** [刊, 汉] / RAN Jing-yu, ZHANG Li, CUI Yan-peng (Energy and Environment Research Institute under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 471 ~ 474  
An experimental research is conducted of the mechanism of using solid waste from water treatment as a desulfurization additive during coal combustion. The experimental research results show that the above-mentioned solid waste can effectively catalyze a desulfurization reaction and lower the  $\text{CaSO}_4$  decomposition speed under high temperatures. As a result, the optimum desulfurization temperature during coal combustion can be made to further approximate the coal burning temperature, thereby enhancing the desulfurization efficiency during coal combustion and increasing the utilization rate of calcium. The use of the solid waste from water treatment as a desulfurization additive involves a simple implementation system and flow process. It is conducive to a decrease in emissions of solid waste from water treatment, thus alleviating pollution to water body. In addition, the emissions of  $\text{SO}_2$  during coal burning can also be effectively diminished. **Key words:** solid waste from water treatment, coal burning, desulfurization additive, usage practicality

一种新型空气加热器的研究= **A Study of a New Type of Air Heater** [刊, 汉] / LI Wen-jiao (Power Engineering Department, Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 110000), LI Ling (Dalian Institute of Architectural Design & Research, Dalian, China, Post Code: 110000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 475 ~ 476, 480  
A novel and high-efficiency air heater is presented along with its theoretical analysis and numerical calculation. The results of the calculation were verified through relevant tests. **Key words:** heater, intensified heat exchange, numerical calculation

切向燃烧锅炉炉膛内旋流数分布的研究= **An Investigation of the Distribution of Swirl Numbers in the Furnace of a Tangentially Fired Boiler** [刊, 汉] / LI Yan-peng, Xu Yi-qian (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), DIAO Yong-fa, Xu Jin-yuan (Thermal Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 477 ~ 480

With regard to a 600 MW tangentially fired boiler cold-state tests and numerical simulation were conducted with an in-depth study on the distribution law of swirl numbers, which characterize gas flow swirl intensity. It has been found that the actual swirl numbers in the boiler are by far greater than those selected during the design verification of the boiler. Some measures are proposed for lessening residual swirl flow from the viewpoint of boiler structural design. The present study can be of immense help for boiler design verification and the prevention of residual swirls. **Key words:** tangentially fired boiler, three-dimensional hot-film anemometer, swirl number, residual swirl