

专论与综述

柳州市中小型燃煤污染源脱硫总体方案研究*

徐康富 郝吉明 席德立

陈学明

(清华大学环境工程系, 北京 100084)

(柳州市环境保护局)

摘要 以国内开发的中小型燃煤污染源 SO_2 排放控制技术为基础, 通过完善化研究和技术经济分析, 提出了切合柳州市污染源实际情况的脱硫总体方案: 即以配煤为协调手段, 保证型煤燃烧固硫和流化床燃烧脱硫对高硫低热值煤种的适用性; 利用燃烧脱硫所需的过量碱性物质, 改造现有湿法除尘设备, 提高重点源的脱硫深度, 从而以规模化的实用脱硫技术保证总量控制削减方案的实施。

关键词 燃煤污染, SO_2 排放控制, 脱硫费用, 脱硫总体方案。

我国长江以南和东部地区已普遍发现酸雨, 尤以西南、华南及其邻近地区的酸雨污染为严重。现已查明, 主致酸物 SO_2 基本上来自区域内的燃煤排放源。在我国能源结构中, 燃煤占 76%, 特别是中小型燃煤污染源占有相当大的比例, 仅工业层燃炉就有 40 余万台, 年耗煤约 3.5 亿 t, 每年排入大气的 SO_2 约占全国总排量的 40%。柳州市的情况更为典型, 因大量燃用高硫劣质煤, 城市大气污染和地区性的酸雨污染在“七五”期间就已十分严重。2000 年煤耗的预测值将比 1990 年成倍增加。大幅度地削减 SO_2 排放量已成为地方经济持续发展的当务之急, 并应考虑对中小型燃煤排硫源的有效削减。

1 污染源概况及特征

柳州市中小型燃煤工业点源约有 380 个, 主烧合山煤和由合山煤与贵州煤对开组成的区内外混合煤。合山煤平均热值不足 15000 kJ/kg, 含硫 4.5%—5%。据 1990 年统计数据, 合山煤用量占总煤耗量的 42%; 燃煤排放的 SO_2 约占总排放量的 80%, 其中由合山煤燃烧排放的 SO_2 也占 80%。而在污染源类型及其环境影响方面还有与燃料构成相应的下述特征:

1.1 沸腾炉群体规模可观

为了多利用本地区的合山煤, 沸腾炉在柳州市的应用较为普遍。1990 年的拥有量已近 40 台, 年耗煤 33 万 t, 排放 SO_2 2.2 万 t, 依次占同年对应总量的 20% 和 35%。现有沸腾炉已达 48 台, 年耗煤 41 万 t, 排放 SO_2 2.87 万 t。筹建中的集中供热工程也采用流化床燃烧方案, 近期内的规模还会有所扩展。

1.2 工业层燃炉群体作用不可忽视

柳州市有 4 t/h 及以下工业层燃锅炉 180 余台, 1990 年耗煤 15.6 万 t, 排放 SO_2 0.85 万 t。在各类工业窑炉中, 适合改烧型煤的, 如热风炉, 隧道窑烘干炉, 热处理工艺加热炉, 砖瓦生产和玻璃加工用炉等, 其累计耗煤量亦达 10 多万 t, 年排 SO_2 0.55 万 t。2 项相加, 共排放 SO_2 1.4 万 t, 约占燃煤总排放量的 22%。

1.3 环境影响与燃用煤种和燃烧方式一致对应

参照以大气环境国家二级标准为控制目标和按平权削减原则对现状污染源所作的总量控制研究结果^{*, **}; 结合污染源的燃用煤种和燃烧方式分类的情况作了对比分析。结果表明, 由总量控制研究识别出来的重点源, 无一例外都烧合山煤, 除柳州电厂这一大污染源外, 皆属沸腾炉; 达标所要求的 SO_2 削减率在 78%—92% 之间, 仅有个别例外。从年削减 SO_2 100 t 以上的污染源的整体情况看, 有半数以上污染源都烧合山煤, 其余以烧区内外混合煤为主; 对流化床燃烧合山煤的非重点削减源, 所要求的 SO_2 削减率基本上都在 80% 以下, 以层燃方式烧区内外混合煤的则在 40%—60% 之间。这种对应关系既对脱硫技术措施选择的针对性和规模化提出了更高要求, 同时又为该问题的解决提供了有利条件。

* 国家“八五”科技攻关项目

** 赵德山, 柳州市大气污染总量控制与对策研究报告, 1991 年。

收稿日期: 1996-06-03

2 脱硫技术的选择及尚存问题的解决

2.1 流化床燃烧脱硫技术

该技术不需专用脱硫设备,将脱硫剂按一定钙硫比配入流化床锅炉进煤线,即可在炉膛中实现燃烧脱硫。因流化床燃烧温度与脱硫反应温度正好相一致,燃烧脱硫效果最好。我国已开发出在 <2 的低钙硫比下能脱硫80%的廉价脱硫剂^[1]。已能满足非重点源流化床锅炉的脱硫要求。针对柳州市沸腾炉群的规模,清华大学于“七五”期间在柳州市印染厂10 t/h 沸腾炉上成功地进行了工业脱硫实验。此后在柳州市东风化工厂建成了3万t脱硫剂生产线,其产品已在市内3台由沸腾炉改成的循环流化床锅炉上使用,效果良好。这些工作为流化床燃烧脱硫技术的推广应用提供了技术保证和有利条件。

因合山煤热值波动幅度大,低者仅为10000 kJ/kg,含硫又高,不能保证历次来煤都能按给定的钙硫比投料而不影响锅炉正常燃烧运行,需通过配煤来保证燃烧脱硫运行的可靠性。经核算,只需配入20%的贵州煤(约23000 kJ/kg)即可解决此问题。

2.2 型煤燃烧固硫技术

此技术能全面改善散煤层燃所产生大气污染。经数届国家科技攻关,国内型煤固硫及设备研究已达国际先进水平。现已建成若干型煤厂,炉前成型也有初步的工业应用;型煤燃烧能消烟至黑度林格曼一级以下,减少燃烧排尘50%以下,节煤8%以上,加入固硫剂还能固硫^[2]。国内实用固硫添加剂的研究已达到在1200℃左右温度下固硫50%—60%的效果。柳州市工业层燃炉燃用的区内外混合煤平均热值约18800 kJ/kg,平均含硫约3.5%,最高燃烧温度在1200℃左右。高的硫分和低的燃烧温度都对型煤固硫有利,因而也能满足对层燃炉的脱硫要求。

鉴于柳州地区几乎2天一雨的气候特点和国内现有集中成型工艺的弱点,如需建设配套的粘结剂生产厂,型煤需经烘干并需防水和防潮解,在柳州还需增加湿煤烘干系统等,故宜采用炉前成型技术路线。从炉前成型应用的初步实践来看,需解决统一配煤问题,以保持原先烧散煤所具有的可操作性,并籍以保证燃烧脱硫的效果。

为了验明高硫低热值煤种固硫型煤对正常燃烧的不利影响,利用柳州市二棉厂6 t/h 往复炉已配置炉前成型机的现有条件作了工业试验。结果表明,在区内外混煤中加入重量百分比10%—12%的石灰后,均能正常燃烧;与混煤散烧相比,锅炉出力减少的最大值仅为360 kg/h。试验取得的脱硫率,经X衍射分析热工测试

所采集的煤样、飞灰样和炉渣样,结果见表1。3次试验按固相分析测定结果所求得平均固硫率达48%,平均钙硫比仅为1.72,显示出高硫劣质煤型煤固硫的独到优势。

表1 型煤燃烧固硫工业试验结果¹⁾

灰硫分 /%	渣硫分 /%	料煤硫分 /%	料煤灰分 /%	Ca/S	固硫率 /%
6.98	6.92	5.51	44.64	1.67	56
6.51	4.55	5.31	43.81	1.61	42
5.45	6.37	5.83	44.31	1.89	46

1) 数据由X衍射分析所得,料煤灰分为总固体氧化物之和,比地方工业分析的灰分值低约3个百分点,折合为SO₂给出的硫分数据低约0.3个百分点

在上述试验基础上,经核算将混煤中合山煤和贵州煤的配比调整为2:3,外加5%蔗渣,使固硫型煤料煤的挥发分略高于原混煤,以消除固硫型煤对链条炉可能产生的不良影响。为此,新开发的炉前成型机采用型槽-齿齿嵌入式对辊成型,以提高压缩比;并增设了料煤预实机构和对辊不下机的快速装卸等机构,以确保成型的可靠性,并不影响锅炉系统原有的运行可靠性、可操作性和可维修性。

2.3 湿法除尘兼二级脱硫技术

上述2项技术的单独使用,尚不能解决柳州市重点源和层燃炉中部分环境影响较大的污染源的脱硫要求。柳州市现有60余台湿法除尘设备,恰好都配置在这类污染源上。在流化床燃烧脱硫或型煤燃烧固硫之后,必须继续发挥它们的除尘作用。若同时开发其脱硫功能,则可取得事半功倍的效果。

计算表明,在型煤固硫或流化床燃烧脱硫之后,系统中剩余碱性组分和残留SO₂的Ca/S分别为2.2和5.6,能为二级湿法脱硫提供充裕的碱性物质。对柳州市二棉厂炉前型煤燃烧工业试验的灰渣样所作的游离氧化钙测定和碱性物浸出试验结果表明:炉渣和飞灰中总碱平均含量分别达16.2%和42%,游离氧化钙平均含量分别为13.2%和38.8%;特别是飞灰中游离氧化钙的平均含量为原煤散烧飞灰的4.5倍;在pH5条件下飞灰中碱性物质在前15 min内的浸出率即达30%。上述数据表明,对流化床燃烧脱硫烟气,湿法除尘脱硫所需碱性物质已十分充裕;对型煤燃烧固硫后的烟气,设法提高碱性物质溶出率自然更好,而从灰渣混合液脱硫的试验结果看,飞灰和炉渣的固硫能力比混煤散烧飞灰分别高出一个量级和70%,仍有强化脱硫的显著效果,能满足和提高层燃锅炉脱硫深度。

以往湿法除尘设备的设计重在强化气液接触以提高除尘效率。在液相脱硫反应相对缓慢和 SO_2 溶解度随液体升温显著下降的情况下,一定液气比下强化液气接触对脱硫反而不利。要从降低液相操作温度和延长气液接触时间 2 个方面加强湿法除尘设备的脱硫能力。

2.4 煤种替换和配煤减排 SO_2

按等热值消耗原煤计算煤种替换的单位脱硫费用,在柳州市现有来煤种类中以贵州煤替换合山煤最经济,但其脱硫费用已与本市炉前型煤固硫费用相近。山西晋城煤减硫效益虽最好,脱硫费用也低于山西大同煤、湖南资兴煤和河南平顶山煤,但比贵州煤高出 50% 以上。在已满足近期脱硫要求的情况下,自然以贵州煤部分取代合山煤为好。

经相关措施的脱硫能力估算和脱硫总体方案的经济性分析,煤种替换和配煤的近期方案为:在流化床燃用的合山煤中配入 20% 的贵州煤,在层燃型煤料煤中配入 60% 贵州煤,以保证流化床燃烧脱硫和型煤燃烧固硫的正常运行;粗筛出的贵州煤不破碎,以代替层燃窑炉现用的区内外混煤。按 1990 年各煤种煤耗基数计算,此方案需多进贵州煤 10.2 万 t,代替合山煤 16 万 t,分别占同年各自进煤量的 14.3% 和 24.4%,基本上避免了配煤与其制约因素的冲突。

3 脱硫技术措施的优化组合及环境经济效益分析

3.1 脱硫技术措施的组合原则

脱硫技术措施的组合方案即为上述配煤方案加上重点源的湿法除尘系统改造。这除了削减量和燃烧脱硫可靠性的要求外,还在于提高脱硫总体方案的经济性并尽量发挥各类措施本身的脱硫能力。在组合措施中,后续措施的减硫量随配煤后原煤含硫量的降低而下降。尽管贵州煤配比的提高可减少后续措施的脱硫费用,但计算表明远不如省去工业窑炉型煤固硫工程,改以贵州块煤代替区内外混煤的效益好。

3.2 组合措施的脱硫能力估算

组合措施现有的脱硫能力采用保守估算。型煤固硫加节煤少排硫按 50% 脱硫率计;不计循环流化床因热效率提高所减少的排硫量,流化床燃烧脱硫取 80%;二级湿法除尘脱硫取 50%,并对层燃烟气脱硫再取 0.5 作权重系数。所得结果见表 2。

组合措施在中小型燃煤污染源上共削减 SO_2 2.87 万 t,加上按 1990 年基数计的电站烟气脱硫量 1.04 万 t,三期煤气工程减排硫 0.76 万 t,总削减 SO_2 4.67 万 t,以超过按同年基数计算求出的总量控制所要求的削减量(4 万 t),占当年 SO_2 排放量的 76% 以上。在污染源类型结构无明显变化的情况下,此削减率也相对稳定。

筹建中的柳电烟气脱硫工程将削减 SO_2 2.34 万 t,筹建中的集中供热工程将使层燃锅炉现有规模约减少 1/3,使近期内 SO_2 的总削减率保持在 80%—85%。

表 2 组合措施的脱硫能力/万 t

项 目	流化床燃 烧脱硫	层燃炉 型煤固硫	窑炉配煤 减排硫
1990 年耗煤量	33	15	10
SO_2 年排放量	2.20	0.85	0.55
贵州煤配比/%	20	60	100
贵州煤增量	5.92	1.12	3.17
合山煤减量	9.32	1.76	5
配煤减硫量	0.50	0.09	0.27
配煤后固硫量	1.36	0.38	0
湿法除尘脱硫量	0.17	0.10	0
SO_2 总削减量	2.03	0.57	0.27

3.3 脱硫措施的经济性分析

脱硫措施的经济性最终体现在单位脱硫费用上。对流化床燃烧脱硫主要计消耗的脱硫剂费和相应的运输费。因总体配煤效益好,流化床配煤工艺与现有合山煤加工工艺又无实质区别,两者加工费用相当。加上燃烧运行多少要增加的动力消耗费,单位脱硫费用约 800 元/t。

炉前型煤固硫费用按较宽松的投资和较低的效益计。其投资包括从火车卸煤至用户炉前成型的全部设备费,仓、棚和厂房建设费以及整地费、安装调试费、设计费、预备费和办公用具费等。因型煤配煤取代了原来的动力配煤,其节煤效益又是由型煤燃烧直接产生的,故在计入蔗渣热值的情况下,按 6.5% 的节煤率计算脱硫费用。脱除 1 t SO_2 的费用按不含税价和含税价计分别为 440 元和 550 元。若成型辊轴一次耐磨寿命能达一年,则单位脱硫费还可下降百元以上。

二级湿法除尘脱硫费用本应参照现有湿法除尘改造费用计,在未经工业验证之前,按设计方案估计的费用实际意义不大。故按费用最高的文丘里麻石水膜除尘器的除尘费用,加上需耗石灰费用和除尘用水系统改造费和折旧费,以多管旋风除尘费做底扣计脱硫费用。在原煤含硫 3%,脱硫率 50% 和 35% 的情况下,单位脱硫费用分别为 380 元和 400 元;扣除所耗石灰费用,分别折算为流化床燃烧脱硫 80% 和型煤固硫 50% 时的二级脱硫费用依次为 270 元和 220 元。

工业窑炉煤种替换减排硫的费用按等热值原则求替换量,代入替换煤种各自的含税价和硫分求得。贵州煤代替合山煤的脱硫费用为 365 元/t SO_2 。贵州块煤代

(下转第 80 页)

研究干旱区植被恢复与营造技术, 建设公路沿线和矿区的绿色林带, 沙生灌木固沙工程, 稳定沙丘, 防止沙漠化发展, 减轻煤尘、粉尘污染和沙暴危害, 净化空气, 美化环境.

3.4 建立矿区水土保持综合防治体系

水土保持是减轻矿区土壤侵蚀、河道输沙与洪水、人为滑坡与泥石流的根本. 综合治理应以小流域为单元, 实行工程与生物措施、治沟与治坡并重的原则. 植被稀少或地表扰动的地方应以乔、灌、草相结合, 尽快恢复植被; 弃渣堆积集中和地层破坏的地方, 以拦挡工程为主, 可修建拦渣淤地坝、谷坊、护岸堤等, 使废弃土地恢复利用, 形成层层拦蓄利用的水土保持综合防治体系.

3.5 建立工业废水处理设施, 合理利用废水

目前矿区虽已建立污水和工业废水处理设施, 但尚未投入使用, 随着大规模生产的进行, 排污量将大量增加, 污水(废水)净化处理刻不容缓. 净化水或污染较轻

的水应尽可能用于灌溉, 以合理利用有限的水资源.

3.6 建立环境监测与预警系统

在煤田开发与环境治理的同时, 应加强现代科技防灾工程研究, 建立暴雨洪水、水质、沙暴、侵蚀泥沙与泥石流的监测预警系统. 拟在矿区建立若干个雨情、水情(质)、气象监测站, 应用航天、航空遥感技术, 对环境变化进行高精度监测, 并同步反馈到信息中心联网分析, 预报灾害可能发生的时间、地点和强度, 以便及时采取有效防治措施.

参 考 文 献

1 唐克丽, 晋陕蒙接壤区土壤侵蚀及其治理问题, 黄土高原综合开发治理研究论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 1993; 93—95
2 张平仑等, 神府东胜矿区开发人为滑坡泥石流及其防治. 水土保持研究, 1994, 1(4); 46—49
3 王百群等, 神府东胜煤田大柳塔矿区水质及其污染评价. 水土保持研究, 1994, 1(4); 103—106

(上接第 73 页)

替区内外混合煤的脱硫费用则计入了加工费和节煤调整价, 为 258 元/t.

表 3 汇总了上述计算的相关结果, 用户实际承担的费用应从表 3 数据中扣除少交的排硫费.

表 3 柳州市所选脱硫技术措施的脱硫费用¹⁾/元·t⁻¹

措施类别	流化床锅炉	层燃锅炉	工业窑炉
流化床燃烧脱硫	800		贵州块煤替换
型煤固硫		400	区内外混煤
配煤减排硫	365	365	258
湿法二级脱硫	<270	<220	

1) 按 1995 年价格计

4 结论和建议

以统一配煤为协调手段, 用贵州煤部分取代合山煤, 保证并发挥流化床燃烧脱硫和型煤固硫技术对高硫低热值煤燃烧脱硫优势; 副产贵州块煤用于工业窑炉燃烧减排硫; 利用和改造现有湿法除尘设备, 开发其脱硫功能以促成重点源脱硫达标. 此脱硫组合方案切合当地污染源实际情况, 以规模化的实用脱硫技术保证了总量控制削减分配方案的实施, 经济实用性强, 可操作性好. 建议限制合山煤采掘规模, 随着经济发展加大配煤力度和提高煤种替换措施的减硫率, 以扼制 SO₂ 排放量的增长.

参 考 文 献

1 国家环境保护局. 燃煤固硫、烟气脱硫技术与酸雨研究. 北京: 科学出版社, 1992; 362
2 国家环境保护局. 工业型煤开发. 北京: 科学出版社, 1992; 62

the specific activities of ^{45}Ca are 39 532 cpm/g in skin, 38 116 cpm/g in skeleton, 25 495 cpm/g in gill and 1 651 cpm/g in muscle respectively after exposed to pH 7.10 (control) for 96 h. Compared with the control, the specific activities of ^{45}Ca decline about 81.07% in skin, 84.41% in skeleton, 80.11% in gill and 5.88% in muscle after exposed to pH 4.70 without aluminum. Under the condition of pH 4.70 with the addition of aluminum (1.0 mg/L), the specific activities of ^{45}Ca decline about 89.87% in skin, 88.83% in skeleton, 86.17% in gill and 26.47% in muscle respectively. The effects of acid rain on the calcium metabolism in fish were discussed.

Key words: low pH, aluminum, ^{45}Ca , uptake, *Misgurnus anguillicaudatus*.

The Removal of Some Organic Pollutants in Rapid Infiltration Treatment System of Waste Water. Wu Yongfeng et al. (China University of Geosciences, Environmental Science Department, Beijing, 100083); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 60—62

The removal of some organic pollutants trichloromethane, tetrachloromethane, trichloroethylene, benzene and toluene in rapid infiltration treatment system of waste water have been simulated in large scale soil columns. The three kinds of chlorinated aliphatic hydrocarbons were rapidly removed from influent concentration of 2000—6000 $\mu\text{g/L}$ to effluent concentration of less than 100 $\mu\text{g/L}$. The removal effects of benzene and toluene depended on the flooding time. In the early part of flooding period, benzene and toluene could be removed rapidly from influent concentration of 1000—1700 $\mu\text{g/L}$ to effluent concentration of less than 100 $\mu\text{g/L}$. With the increase of flooding time, the removal effect became lower and lower until the effluent concentration of benzene and toluene almost equal to the influent concentration.

Key words: rapid infiltration, chlorinated aliphatic hydrocarbons, aromatic hydrocarbons simulated test.

Study on the Treatment of Wastewater from the Production Processes of Vitamin B₁₂ and Starch by Using UASB Reactor. Yang Jingliang et al. (Dept. of Environ. Eng., Hebei Institute of Chemical Technology and Light Industry, Shi jiazhuang 050018); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 63—65

In Order to research the feasibility of treating wastewater from the production processes of vitamin B₁₂ and starch by anaerobic process, the study on treating the wastewater by UASB reactor was made. The results indicated that the volumetric loading of COD was 30 kg/(m³·d), removal rate of COD was 80% and volumetric producing gas rate was 16.80 m³/(m³·d) when influent concentration of COD was 10⁴—1.2×10⁴ mg/L.

Key words: upflow anaerobic sludge blanket reactor, mixed wastewater of vitamin B₁₂ and starch.

Spectrophotometric Method for the Simultaneous Determination of Phenols and Aromatic Amines in Sewage with 4-AAP. Li Meirong and Yuan Cunguang et al. (Dept. of Chemical Engineering, University of

Petroleum, Shandong, 257062); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 66—68

A modified spectrophotometric method of determination for phenols and aromatic amines of sewage was described. It was found that the peak ranges of phenols were 500—540 nm and that of aromatic amines were 530—480 nm using 4-aminoantipyrine (4-AAP) with potassium hexacyanoferrate and ammonium peroxydisulfate in the medium of pH 5.5 HCl-(CH₂)₆N₄. Phenols of 0.1—30 mg/L and aromatic amines of 0.008—3.0 mg/L were determined simultaneously by spectrophotometry without pre-distillation and extraction. Lower than that 0.3 mg/L of sulphide and co-oil in sewage have no interference with determination of phenols and aromatic amines. The interference of Cu²⁺ and Fe³⁺ could be removed by EDTA masking. The recovery for phenols and aromatic amines were 98%—105% and 95%—105%, respectively. The sensitivities samples of 10 phenols and 13 aromatic amines were studied.

Key words: spectrophotometry, 4-aminoantipyrine, phenols, aromatic amines.

Pretreatment and Detection of Organophosphorus Pesticide Residue in Environmental Sample. Liu Feng et al. (Institute of Environmental Science of Suzhou, 215004); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 69—70

Detection of methamidophos, dimethoate and parathion-methyl pesticide residue by FPD, NPD and ECD can be accurately determined. Extraction of solid sample into methanol aqueous solution solvent and direct aqueous solution injection not only simplify pretreatment steps but also with enough accuracy. Addition standard recovery rate of soil samples was in range of 93%—98%. The detection limits of dimethoate in water sample were 0.05 mg/L for FPD, 0.001 mg/L for NPD and 0.002 mg/L for ECD, respectively.

Key words: organophosphorus pesticide residue, methanol aqueous solution, direct aqueous solution injection, determination.

Study on the Overall Control Plan of SO₂ Emission from Small and Mid-scale Coal Combustors in Liuzhou City. Xu Kangfu et al. (Dept. of Environ. Eng., Tsinghua University, Beijing 100084); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 71—73

Toward the SO₂ emission control technology developed in China for small and mid-scale coal combustors, a research was carried out on the technology perfection and cost-effectiveness analysis, and a practical overall plan for SO₂ emission abatement in Liuzhou city was presented. This plan can ensure the fitness of briquette combustion-vent sulfur and fluidized-bed combustion desulfurization by means of mixing for the high sulfur content low heating value coal and can improve the depth of desulfurization by utilizing the excessive base material and innovating the current wet collection device.

Key words: coal-combustion pollution, SO₂ emission control, desulphurization cost, desulphurization overall control plan.