

煤与垃圾衍生燃料的混烧技术

赵明举 孙红杰 赵不凋

(大连民族学院化工系, 辽宁 大连 116600)

摘要:简要分析了我国的城市垃圾处理现状,介绍了垃圾衍生燃料的种类、制作方法及国内外研究进展。鉴于我国城市垃圾热值低、灰分高的特点,建议将垃圾制成垃圾衍生燃料后掺混到现运行的燃煤锅炉中,以实现资源化利用。统计了该方法在国外的运行情况,并对我国采取该方法的可行性进行了分析。论证结果表明,该方法投资省、污染低,对我国的环境卫生建设和经济建设具有重要意义。

关键词:煤;城市垃圾;垃圾衍生燃料;混烧

中图分类号:X705

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2003)08-0050-04

Co-firing technology of coal and refuse derived fuel

ZHAO Ming-ju, SUN Hong-jie, ZHAO Bu-diao

(Department of Chemical Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China)

Abstract: The current situation of treating municipal solid waste in China is briefly analyzed. The kind, manufacture and research progress at home and abroad of refuse derived fuel (RDF) are introduced. Based on the characteristic of the municipal solid waste (MSW) with lower heating value and higher ash contents in China, a method is suggested as processing MSW to RDF, and adding RDF to existing coal-fire-boilers to deal with MSW. A statistics of this method in the world is made, and its feasibility and investment in China is also analyzed. It is concluded that adding RDF to existing boilers for co-firing is of advantage to the Chinese governments, because of its lower cost and less pollution.

Key words: coal; municipal solid waste; refuse derived fuel; co-firing

城市生活垃圾已经成为当今世界最严重的公害之一。笔者曾运用数理统计方法,计算出全国城镇垃圾 1980~2000 年的年均增长率为 7.56%^[1],照此速度推算,到 2005 年城市垃圾年产量将达到 2 亿 t;到 2015 年产量可达 4.2 亿 t,形势非常严峻。

城市生活垃圾处理方式主要有填埋法、堆肥法和焚烧法,从全球范围内看,以填埋法为主。从 20 世纪 80 年代到 90 年代,部分发达国家的平均填埋比例由原来的 57% 略降为 55%,而平均焚烧比例由 26% 增加到 35%,可见焚烧比例在逐年增加。在我国,填埋法占 95% 以上^[2],焚烧处理方法在近几年发展较快,一些大城市正在建设或刚刚投产了垃圾焚烧电站。垃圾焚烧处理方法有许多种,其中将垃圾制成垃圾衍生燃料后掺混到现运行的燃煤锅炉中进行混烧是一种投资少、污染低的方法。

1 垃圾衍生燃料

截至目前,国家环境卫生术语标准^[3]尚未对垃圾衍生燃料(refuse derived fuel, RDF)给出定义。垃圾衍生燃料是垃圾经分拣、破碎、涡电流除铝、磁选除铁、再破碎、风选、压缩和干燥等工序制成的一种固体燃料^[4]。

美国材料测试协会(American Society of Testing Materials, ASTM)依据 RDF 的制作工艺,将 RDF 分为 7 类。RDF-3 和 RDF-4 都为絮状颗粒,只是粒径不同;RDF-5 是经济压成型后的燃料,粒度均一,品质较高,加入防腐剂可长期保存,是目前商业化燃料的主要品种,特别适合于流化床燃烧炉,但其制作成本要比 RDF-3 和 RDF-4 高数倍^[5];它们的热值较高,一般可达 10~20 MJ/kg。据报道^[6],日本川崎重工

业公司的 RDF 加工设备可使生活垃圾的低位热值由原来的 8.4 MJ/kg 提高到 15.9 MJ/kg,从而大大提高了垃圾的燃烧效率。

国内 RDF 的研究起步较晚,主要研究单位为中国科学院广州能源研究所固体废弃物能利用实验室和太原理工大学煤科学与技术山西省重点实验室,1996 年两单位在国内率先开展一系列 RDF 成型、热解、气化、污染物控制等方面的研究,并联合培养了 RDF 技术领域方面的博士生^[7]。

目前,国内工业化的 RDF 生产企业为数很少,主要代理国外的生产技术和设备。另据报道^[8],2001 年 10 月中国科学院工程热物理研究所与日本石川岛播磨重工业公司在环境能源领域进行了技术合作,并接受了一套对方赠送的价值 6 000 万日元的 RDF 生产设备,安装于北京市延庆县。

RDF 一般用作流化床燃烧炉的燃料,既可单独燃烧,也可与煤或其他固体燃料混合燃烧,还可气体制气。与炉排式垃圾焚烧炉相比,RDF 流化床焚烧炉的有害物排放量低,其中二噁英类物质的排放量只是炉排焚烧炉的 27%^[9],因而近几年备受各国的青睐。特别是在日本,由于日本 80% 的二噁英类物质来自垃圾焚烧^[10],所以近几年已有十几家大公司对 RDF 工艺投入大量资金进行研究和开发,如日本川崎重工业公司、三菱重工业公司、日立造船公司等。

2 煤与垃圾衍生燃料的混烧

2.1 国内状况

有关煤与 RDF 的混烧研究,国内文献报道很少。笔者^[1]分别采用实验室规模流化床和流化床试验台研究了煤与 RDF 的流化床混烧,以及酸性气体 SO₂ 和 HCl 的炉内石灰石共脱除,研究目的是将 RDF 掺混到现运行的流化床锅炉中。分别考察了 RDF 掺混比例、空气过剩量、钙硫摩尔比和床层温度等因素对燃烧和酸性气体脱除的影响,并开发了一种新型内循环流化床^[11]。结果表明,与煤的燃烧相比,混烧需要较高的空气过剩量,RDF 的掺烧比例越大,所需的空气过剩量越大;混烧可以使尾气中的 SO₂ 和 HCl 气体大幅降低;石灰石可脱除烟气中 90% 以上的 SO₂,对 HCl 的脱除率较低,最大不超过 30%;HCl 的存在可以促进石灰石对 SO₂ 的脱除;石灰石脱除 HCl 气体主要在自由空间进行,而脱除 SO₂ 主要在床层内进行。

此外,已有一些煤与原生垃圾混烧的文献报道^[12-13],其酸性气体脱除过程同煤与 RDF 混烧过

程相似。

2.2 国外状况

在国外,煤与 RDF 的混烧技术基本成熟,且已进入商业化运营阶段。

2.2.1 美国 Ames 混烧电厂

最早的煤与 RDF 混烧工业性试验可追溯到 1976 年,在美国能源部(DOE)和环保局(EPA)的共同资助下,Ames 电厂进行了煤与 RDF 的工业性混烧试验,主要评估混烧的环境影响、经济性和技术可行性等几项指标^[14]。

Ames 电厂共有 3 座燃煤锅炉,即 2 座抛煤炉(stoker)和 1 座喷粉炉。RDF 的掺烧比例最高为 20%,整个试验历时 3 年。研究表明:技术上是可行的;掺烧 10% 和 20% 的 RDF,喷粉炉的热效率分别下降了 1.3% 和 3.3%,而抛煤炉的热效率下降不明显;掺烧 20% 的 RDF,抛煤炉的尾气中 SO₂ 的体积分数明显下降,由原来的 477×10^{-6} 下降为 271×10^{-6} ,NO_x 的体积分数由原来的 200×10^{-6} 下降为 150×10^{-6} ,但尾气中 HCl 由原来的 37×10^{-6} 增加到 115×10^{-6} ,粉尘的质量浓度由原来的 145 mg/m³ 增加到 323 mg/m³。

2.2.2 美国华盛顿州塔科马城 2# 蒸汽厂

1991 年美国华盛顿州塔科马城(Tacoma) 2# 蒸汽厂投入煤与 RDF 混烧的商业化运行^[15]。该厂拥有 2 座鼓泡流化床锅炉,原来是以煤为原料,1991 年后改为燃烧废木材、RDF 和煤;1994 年后,纠正了原设计的一些不足和机械缺陷,建立了一套可靠的运行模式。从 1993 年到 1997 年,平均每天使用当地 RDF 为 71 ~ 121 t,经几年的摸索,RDF 的质量配比稳定在 20%。

该厂将石灰石直接加入床内用于脱除 SO₂,床温为 843℃。每座流化床燃烧炉配 2 个旋风除尘器,后部还有 1 个袋式除尘器。为提高脱硫和脱氯效果,还使用了 Ca(OH)₂。实践过程中发现,原设计的石灰石炉内脱硫脱氯计划并不理想,对 SO₂ 气体的脱除率较高,但对 HCl 气体的脱除率较低,故而 1997 年在袋式除尘器内加装了除氯装置,使用天然碱(trona,碳酸氢三钠)作除氯剂,使 HCl 质量浓度由原来的 424 mg/m³ 下降为 31 mg/m³,脱氯效率提高了 93%。

此外,还有芬兰 Lahti 市的 Kymijarvi 电厂(240 MW,1998 年投运,循环流化床)等。

2.2.3 美国能源部的示范工程

1992 年,美国能源部工业技术办公室组织了国家可再生能源实验室(NREL)、Otter Tail 电力公司、

Eden Prairie 废弃物回收公司、XL Disposal 公司和 Argonne 国家实验室 (ANL)^[16] 共同进行加有添加剂的成型 RDF (即 RDF-5) 与煤混烧的工业性试验研究, 主要目的是研究排放污染物的情况。Eden Prairie 公司和 XL Disposal 公司负责制作 RDF, 在 Otter Tail 电厂的 440 MW 锅炉中与煤混烧, 掺烧质量比为 20%, Argonne 国家实验室负责各种分析和测试。研究结果表明, 通过在 RDF 中添加试剂, 可使尾气中的酸性气体大大降低^[16]。

3 经济分析

1990 年 Kiser^[17] 统计了美国 68 座炉排焚烧炉和 13 座 RDF 焚烧炉 (包括 RDF 生产设备) 的建设投资和操作维护费用, 炉排焚烧炉的平均建设投资为 10.6 万美元/(t·d), 平均操作和维护费用为 26.5 美元/t; RDF 生产与焚烧设施的平均投资为 9.8 万美元/(t·d), 平均操作和维护费用为 36 美元/t。可以看出, 2 种工艺的建设投资费用相差不多, 直接焚烧工艺略高。

另一组数据来自美国 Southeastern Public Service Authority of Virginia 的一座日处理 2 000 t 的 RDF 电厂^[18]。1994 到 1995 年期间, 该厂共生产了 51.6 万 t RDF, 操作和维护费用为 1 306 万美元, 平均操作维护成本为 25.3 美元/t; RDF 电厂共使用了 36.7 万 t, 操作和维护费用为 1 500 万美元, 平均操作和维护费用为 40.9 美元/t, 两者加权平均的操作成本为 31.8 美元/t, 高于直接燃烧的处理成本 (26.5 美元/t)。还有 14.9 万 t RDF 作为商品燃料出售给其他企业。

笔者统计了美国能源部的一份研究报告^[19], 经计算, 炉排焚烧炉的平均寿命为 14.3 年 (14 座的统计数据), RDF 焚烧炉的平均寿命为 7.9 年 (25 座的统计数据)。

一般来讲, RDF 生产设备的建设投资约占“RDF 生产 + RDF 焚烧”工艺总投资的 1/5^[20-21], 也就是说占直接焚烧工艺投资的 1/5 (前已提到 2 种工艺的投资相当)。

1988 年, 美国能源部和电力研究院 (Electric Power Research Institute, EPRI) 联合发行了一部关于煤与 RDF 混烧的指南, 该指南共分 3 卷, 给出了煤与 RDF 混烧的设计规范、投资费用和操作维护费用等因素的模型。1991 年 McGowin 公布了该指南的主要结果^[20]。该指南分析了几个实际运行中的混烧电厂的多年运行情况, 结果表明, 建设 1 座 200 MW 电厂的投资情况是: 纯燃煤电厂 17 美元/kW, 混

烧电厂 22 美元/kW, 高出约 30%。如果将运行中的电厂改造成混烧电厂, 则每度电的运行成本增加 0.0012 美元, 当时每度电平均成本是 0.05 美元, 即运行成本增加 2.4%。因此, 与燃煤电厂相比, 混烧电厂不具市场竞争力, 政府必须给予一定的财政补贴, 平均每吨原生垃圾补贴 41.65 美元即可抵消这部分损失, 与垃圾的直接焚烧平均补贴 74.4 美元/t 相比, 政府的财政支出相对少了许多。所以, 单从政府部门的角度来看, 煤与 RDF 混烧要比直接焚烧的总运营成本更为低廉, 更有市场潜力。

4 在我国实施的可行性分析

我国大多数城市垃圾的热值不高, 一般为 3 500 ~ 5 000 kJ/kg^[22], 不适宜直接焚烧, 大量不可燃的无机物被无效地加热和冷却, 影响了垃圾焚烧的燃烧效率。尽管垃圾分类可使垃圾的热值提高, 但由于拾荒者已将大量的低水分可燃物回收, 致使此项工作难以实施, 垃圾仍以混装方式被运往焚烧厂, 使得垃圾焚烧过程中不得不补充煤或燃油等高品质燃料, 从而增加了运行操作成本。只有少数大城市的垃圾热值可以达到 5 000 ~ 8 000 kJ/kg^[22], 勉强维持焚烧。建设一座日处理 1 000 t 的电站需要一次性投资 6 亿 ~ 7 亿元人民币^[23-24], 投资费用较高, 并且垃圾焚烧处理还需要大量的财政补贴, 所以短期内难以大面积推广。

参照国外的实例, 建设一座“RDF 生产 + RDF 焚烧”的垃圾电站, 其投资与垃圾焚烧电站相当, 若只建设 RDF 生产设施, 将生产出的 RDF 燃料提供给现运行的燃煤锅炉, 投资费用只是建设垃圾焚烧炉的 1/5。即建设日处理 1 000 t 城市垃圾的 RDF 工厂, 投资约为 1.2 亿 ~ 1.4 亿元人民币。通常情况下, RDF 工厂的日处理能力为 2 000 t, 按照工程经验公式 $1\ 000 \times (2\ 000/1\ 000)^{0.6}$ 估算^[25], 建设投资约为 1.8 亿 ~ 2.1 亿元人民币, 这样可节约大量的一次性投资。同时, 一方面使城市垃圾得以消纳, 另一方面实现垃圾的资源化利用。此外, 从 1998 年起, 国家电力部开始实施逐步关停中小电站的政策, 如果将中小电站改造成垃圾混烧电站, 可减少投资浪费。

从技术角度考虑, 煤与垃圾衍生燃料的混烧是可行的, 可能会带来的问题是混烧电站可执行的国家排放标准无可参考。笔者综合了《锅炉大气污染物排放标准 GWPB3—1999》、《火电厂大气污染物排放标准 GB13223—1996》和《生活垃圾焚烧污染控制标准 GWKB3—2000》三项排放标准制成表 1。

表1 几种相关标准的有害物排放限值

序号	项目	单位	数值含义	GWKB3—2000 限值	GB13223—1996 限值	GWPB3—1999 限值
1	烟尘	mg/m ³	测定均值	80	200~600	80~250
2	烟气黑度	林格曼黑度,级	测定值	1	1	1
3	一氧化碳	mg/m ³	小时均值	150		
4	氮氧化物	mg/m ³	小时均值	400	650 ^① /1000 ^②	
5	二氧化硫	mg/m ³	小时均值	260	1200 ^③ /2100 ^④	900 ^⑤ /1200 ^⑥
6	氯化氢	mg/m ³	小时均值	75		
7	汞	mg/m ³	测定均值	0.2		
8	镉	mg/m ³	测定均值	0.1		
9	铅	mg/m ³	测定均值	1.6		
10	二■英类	TEQ ng/m ³	测定均值	1.0		

注:①固态排渣;②液态排渣;③燃料收到基硫分 $\leq 1.0\%$;④燃料收到基硫分 $> 1.0\%$;⑤2001年1月1日起建成使用的锅炉;⑥2000年12月31日前建成使用的锅炉。

由表1可以看出,“生活垃圾焚烧污染控制标准”有较多的限制项目,但对SO₂气体的排放限值比燃煤锅炉的排放限值要苛刻得多。如果要求混烧RDF的燃煤锅炉按照这一标准执行排放,企业必然要增加脱硫设施,从而增加了运营成本,所以此方法推行起来有一定的困难;如果参考发达国家的混烧排放标准,因相差一个数量级,也无法执行。因为这一方法在我国才刚刚开展,相信随着今后的发展,相应的污染控制标准会出台。

同时,有研究文献表明^[26-27],RDF与煤混合燃烧可使尾气中SO₂、NO_x和二■英类物质的含量大大降低,因而这种方法是一种非常有前景的城市垃圾处理方法。

另据美国综合废物服务协会(IWSA,成立于1991年,会员几乎包括美国所有的垃圾焚烧企业)2000年的统计^[28],1999年美国有垃圾焚烧炉102座(指带热电厂部分的),焚烧处理城市垃圾3010万t,焚烧比率为13.5%。其中有12家企业采用“RDF生产+RDF焚烧”工艺,年处理RDF为520万t;7家采用RDF生产工艺,年产量190万t;7家采用RDF焚烧工艺,年消纳RDF为150万t,另外的40万tRDF则出售给燃煤电厂进行混烧,混烧的比例较上次统计增加了26%,可见这一方法呈现上升的趋势。

5 结语

从世界各国城市垃圾处理的历史来看,随着城市化的发展,土地日益紧张,征地费用和运输费用逐年增加,传统填埋技术的成本逐渐加大,向焚烧处理成本靠近,因而焚烧处理的比率逐年增加。选择的

处理方法会因地理环境、垃圾成分、经济发展水平等因素的不同而有很大的差异。将垃圾制成垃圾衍生燃料后掺混到现运行的燃煤锅炉中进行混烧,是一种适合于我国大多数城市的高灰分、低热值垃圾的处理方法。该方法投资省、污染低,还可盘活已关闭或即将关闭的中小电站,对我国的环境卫生建设和经济建设有着重要的意义。

参考文献

- [1] 赵明举.煤与垃圾衍生燃料(RDF)的流化床混烧研究及酸性气体的脱除[D].太原:太原理工大学,2002.
- [2] 赵由才,柴晓利.生活垃圾资源化原理与技术[M].北京:化学工业出版社,2002.1-2.
- [3] CJJ65-95,中华人民共和国行业标准环境卫生术语标准[S].北京:中华人民共和国建设部,1996.
- [4] 郭小汾,陈勇,谢克昌.[J].煤炭转化,1998,21(3):1-5.
- [5] USEPA. Municipal Waste Combustion: background information document for promulgated standards and guidelines[R]. EPA-453/R-95-0136. Washington, DC: USEPA, 1995.
- [6] 张焕芬,喜文华.[J].甘肃科学学报,1999,11(3):13-16.
- [7] 郭小汾.垃圾衍生燃料(RDF)洁净燃烧技术的基础性研究[D].太原:太原理工大学,2000.
- [8] 《资源与环境》产业信息网.北京新建垃圾处理产业化基地[EB/OL]. <http://www.myearth.com.cn/message/20011226/20011226.asp>, 2003-4-2/2003-6-10.
- [9] Gupta B, Shepherd P. Data summary of municipal solid waste management alternatives[R]. NREL/TP-431-4988A. Golden, Colorado: US-NREL, 1992.
- [10] 田洪海,吉田幸弘.[J].环境科学研究,2000,13(3):31-32.
- [11] 太原理工大学.一种气体分布板[P].CN 2463043,2001-12-05.
- [12] 蒋旭光,杨家林,严建华,等.[J].煤炭学报,2000,25(2):186-189.

(下转第61页)

未开始开展纳米技术的研究,近3年出资3亿元支持了500多项纳米技术研究。对传统产业的改造升级也已展开,特别在纳米涂料、纳米抗菌材料、纳米粉体加工技术等方面取得了不少成果,据1996~2000年间美国科学引文索引系统《SCI》收录的关于纳米研究论文的统计分析表明,我国在这一领域发表的论文数量仅次于美国和日本,居世界第三,占总论文数9%,其中在从事纳米技术研发的73个国家或地区的2.7万多个机构中,中国有8个机构进入世界发表论文数量前50名。我国已形成了以北京、上海、深圳为中心的三大纳米技术产业带,但在全国已建成的30多条纳米材料生产线中,产品大多集中于纳米氧化物、纳米金属粉末、纳米复合粉体等表面改性和添加应用,我国纳米技术产业化尚缺乏力度较大的实用技术,科技成果转化还有待加快。以纳米粉体材料为例,现已有30多条20 t/a以上的纳米材料生产线,产品种类也很多,但缺乏市场目标去发展应用技术,难以将技术优势转化为市场优势。

纳米科技是当今引导产业化革命的重要技术,纳米技术的发展将对石油化工领域催化材料的革新、三大合成材料的改性产生重要影响。我们应从

国家战略需求出发,从GDP增长出发,全面部署纳米技术向各个产业的渗透应用,包括能源、化工、材料等传统行业,也包括微电子、IT等高科技产业。美国标准研究院早已展开对纳米标准的研究和制订,为顺应纳米技术的发展潮流,中国制定的第一个“纳米标准”也可望出台。还必须切实重视专利、知识产权工作,学习国外经验建立行业协会,进行行业自律,为我国纳米技术产业化以及走向世界营造良好的外部环境。

参考文献

- [1] Wreeter G J. [J]. C & EN, 2002, 22(7): 17-19.
 - [2] 石板川. [J]. 工业材料(日), 2002, 50(1): 10.
 - [3] 仁川横二. [J]. 化学工业日报(日), 2002, 第2454号: 1-2.
 - [4] Grier K. [J]. Chemical Week, 2002, 164(29): 26.
 - [5] Porter S K. [J]. C & EN, 2002, 80(7): 46.
 - [6] Rodney P. [J]. C & EN, 2003, 81(4): 21.
 - [7] Harry F. [J]. Chemical Week, 2002, 164(25): 59.
 - [8] Weirauch W. [J]. Chemical Engineering, 2002, 109(6): 27.
 - [9] Sigler T. [J]. Chemical Engineering, 2003, 110(1): 27-29.
 - [10] Kane L. [J]. Chemical Engineering, 2002, 109(2): 15.
 - [11] Jackson K. [J]. Chemical Week, 2002, 164(15): 26.
 - [12] Anon. [J]. Chemical Engineering, 2002, 109(6): 23.
 - [13] Kelly J. [J]. Hydrocarbon Processing, 2002, 81(7): 36. ■
-
- (上接第53页)
- [13] 魏小林, 田文栋, 盛宏至, 等. [J]. 环境工程, 2000, 18(4): 37-39.
 - [14] Hall J L, Joensen A W, van Meter D, *et al.* Co-firing of solid wastes and coal at ames: stoker boilers [R]. EPA/600/S2-85/114. Cincinnati: USEPA & Cincinnati Hazardous Research Laboratory, 1985.
 - [15] Tacoma Steam Plant No. 2, APPEL Consultants Inc. Co-firing of coal and Refuse derived fuel [R]. Tacoma, Washington: USNREL, 2000.
 - [16] National Renewable Energy Laboratory. Commercial power plant tests blend of refuse-derived fuel and coal to generate electricity advances in industrial energy-efficiency technologies [R]. DOE/CH10093-194 (DF93000059), Washington, DC: USDOE, 1993.
 - [17] Kiser J V I. Comprehensive report on the status of municipal waste combustion [J]. Waste Age, 1990, 21(6): 37-40.
 - [18] Municipal and Industrial Solid Waste Division. Full cost accounting in action: Case studies of six solid waste management agencies, Section 6: Southeastern Public Service Authority of Virginia [R]. EPA530-R-98-018, Washington, DC: USEPA, 1998. 36.
 - [19] Carlin J. Impact of environmental regulation on capital costs of municipal waste combustion facilities: 1960-1998 [R]. DOE/EIA-0628 (2000). Washington, DC: Energy Information Administration & USDOE, 2001. 41-69.
 - [20] McGowin C R. Guidelines for cofiring refuse-derived fuel in electric utility boilers, Executive Summary [A]. In: Electric Power Research Institute. Proceedings of 1989 Conference on Municipal Solid Waste as a Utility Fuel [C]. Palo Alto, California: EPRI, 1991.
 - [21] Electric Power Research Institute. Technical Assessment Guide [R]. EPRI TR-102276S, Palo Alto, California: EPRI, 1993.
 - [22] 曹青, 赵明举, 田园宇, 等. [J]. 中国资源综合利用, 2001, 180(11): 21-24.
 - [23] 习慧泽. 全国首座千吨级垃圾焚烧发电厂选址浦东 [N]. 新民晚报, 2000-09-02(3).
 - [24] 三实. 北京将建首座垃圾发电站 [N]. 中国电力报, 2001-02-20(4).
 - [25] 宋航, 付超. 化工技术经济 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 16-17.
 - [26] Gullett Brian K, Raghunathan K, Bruce K R. Process demonstration: Dioxin prevention in waste combustors by coal cofiring [R]. Final Technical Report, ICCI/96-1/5. 2B-1, Illinois: Illinois Clean Coal Institute, 1997.
 - [27] Lawless Pat, Zhao Ming-Ju, Pan Wei-Ping, *et al.* Retention of sulfur dioxide by limestone in the presence of hydrogen chloride [A]. In: Li Bao-Qing, Liu Zhen-Yu. Proceedings of the 10th International Conference on Coal Science [C]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1999. 1521-1524.
 - [28] Kiser J V I, Maria Z. The IWSA directory of Waste-To-Energy Plants Year 2000 [R]. Washington, DC: Integrated Waste Services Association, 2000. ■