

## 海外纵横

# 全球石化领域中纳米科技产业化现状

钱伯章

(中国石化集团公司上海高桥石化公司, 上海 200127)

**摘要:** 针对国内外纳米科技发展现状, 阐述了纳米技术市场、各国研发投资以及在石油化工领域的研发和应用成果, 包括碳纳米管、纳米催化剂、纳米复合材料(纳米轮胎、纳米塑料、纳米纤维)、纳米/聚合物膜、纳米润滑油和燃油添加剂, 并对我国纳米科技产业化现状提出了发展建议。

**关键词:** 纳米技术; 产业化; 石油化工

中图分类号: F407.7

文献标识码: C

文章编号: 0253-4320(2003)08-0057-05

## Current industrial situation of nano technology applied in global petrochemical industry

QIAN Bo-zhang

(Shanghai Gaoqiao Petrochemical Co., SINOPEC, Shanghai 200127, China)

**Abstract:** The market and investment situation of nano technology in the world, research and development, application of this technology in petrochemical industry are reviewed, including nanotube, nano catalyst, nano composite (nano tyre, nano plastics and nano fibre), nano/polymer membrane, nano lubricant and fuel additive. Some advice on industrialization of nano technology in China was put forward.

**Key words:** nano technology; industrialization; petrochemical industry

纳米技术与信息技术、生物技术一起被并列为当代三大技术。纳米材料自从 20 世纪 80 年代开发问世之后, 引起世界各国的极大关注。当普通材料被制成纳米材料后, 不但光、电、热、磁等特性发生了变化, 而且会增加辐射、吸收、催化、杀菌、吸附等新特性。从发展趋势看, 纳米材料已渗透到石油化工三大合成材料及化学加工等领域。

## 1 纳米技术产业发展现状<sup>[1]</sup>

全球 500 强企业中已有 43% 将发展纳米实用化技术作为今后几年的发展战略。据统计, 全世界的纳米研发投资已由 1997 年的 4 亿美元、1998 年的 6 亿美元、1999 年的 7 亿美元增加到 2000 年的 9 亿美元、2001 年的 14.5 亿美元和 2002 年的 22 亿美元。目前纳米技术的全球市场为 455 亿美元/a, 预计后 7 年内将超过 5 000 亿美元/a, 到 2010 年全球纳米市场将达到 2 万亿美元。

纳米技术在近几年取得的一系列重大突破, 昭

示着纳米技术将大大推动经济发展和社会进步。在由中国科学院和中国工程院两院院士评选的 2001 年世界十大科技进展中, 纳米技术就占了 2 项。在美国《科学》杂志评选出的 2001 年十大科技突破中, 纳米技术的突破压倒人类基因组研究而荣登榜首。

美国政府制定了新的纳米科技发展战略目标, 拟用 10~15 年时间使纳米技术创造 1 万亿美元/a 的价值。美国 1999 年制订了“国家纳米技术发展计划”, 投资 4.22 亿美元, 2001 年又投资 4.87 亿美元, 2002 年投资 6.04 亿美元, 2003 年将投资 7.10 亿美元, 全面发展纳米科技, 并成立了以发展纳米技术实用化为宗旨的行业协会。2002 年 3 月, 世界第一条纳米芯片生产线已在美国硅谷建成。现有 93% 的工业部门和 58% 的科学实验室都在进行纳米技术的研发。

欧盟 2002 年投资纳米技术达 3 亿欧元, 后 4 年内还将投资 7 亿美元研发纳米技术。德国将纳米科技定位于重点发展能源、环保、生物领域, 带动纳米

技术全方位的发展;英国纳米科技发展的重点是医药、生物技术;法国则成立纳米科技中心,建立了全国纳米网,设立了纳米产业基金。

日本将发展纳米技术作为 21 世纪前 30 年的立国之本,前 4 年内日本投资纳米技术 4.66 亿美元,2002 年投资近 5 亿美元研发纳米技术。日本文部省在 2002 年拨款 301 亿日元(约合 2.34 亿美元)实施“纳米技术综合支援计划”。日本各大公司也制定了发展纳米实用化技术的实施计划,三菱化工公司建立了富勒烯碳纳米管生产线,力争将碳纳米管的成本降低至 5 美元/g 以下。

韩国科技部公布的“2002 年纳米技术开发计划”,投入 2 031 亿韩元(约合 1.56 亿美元)的政府预算。并在汉阳大学成立了纳米技术研究院,三星公

司也投资 5 000 万美元成立纳米研究中心,研究重点是发展新一代纳米显示技术,韩国政府已在这一领域投资 1.5 亿美元,并已利用全新的纳米显示技术研制成功 0.5 m×1 m 的大型平面显示器。

我国台湾地区 2002 年投资 155 亿新台币(约 37 亿人民币)发展应用于 IT 行业的纳米技术,研究重点是利用纳米技术改善传统的电镀工艺和减轻电脑外壳质量。新加坡成立纳米材料技术公司,研发和推动纳米技术的实用化进程。

## 2 各国在化工、石化领域纳米技术项目

国内外已有诸多公司、研究院和大学从事纳米技术在化工和石化领域的研究和工业化应用,典型实例见表 1。

表 1 纳米技术在化工和石化领域近期研发和应用成果

公司或研究机构	研发内容和现状	应用领域
日本群馬大学 <sup>[2]</sup>	由丙烯酸酯和甲基丙烯酸酯制取碳纳米管	熔融纺丝
日本三井化学公司	生产碳纳米管,能力 120 t/a	塑料增强等
日本昭和电工公司 <sup>[3-4]</sup>	生产碳纳米纤维,能力 10 t/a	纤维增强
德国菲利浦斯大学	研发聚合物纳米管	用作催化剂
瑞士技术研究院	二氧化钛-二氧化硅纳米颗粒	环氧化催化剂
中科院化学所	纳米金属簇	化工催化剂
美国 Hyphenon 催化公司	生产纳米管增强氟聚合物	塑料增强
美国大陆菲利浦斯公司/西南纳米技术公司	生产碳纳米管,能力 165 kg/a	塑料增强
北京化工大学/新加坡纳米材料技术公司	碳酸钙纳米颗粒/塑料复合材料	塑料改性
中科院化学所有机固体重点实验室/北京大学	利用 C <sub>60</sub> 直接构筑 C <sub>60</sub> 纳米管	材料改性
中科院成都有机化学公司/深圳市纳米港公司	移动床催化法批量制备碳纳米管(以天然气、液化气等为原料,铁、钴或镍与碱土元素复合氧化物为催化剂,通过催化裂解法制备)	材料改性
中科院化学所/成都正光科技公司	纳米聚丙烯管专用料(采用插层复合技术,将有机蒙脱土经处理,用熔融插层方法,以纳米尺寸均匀分散在聚丙烯基体中)	NPP-R 纳米聚丙烯管材和管件,有抑菌功能
美国 CNI 公司/KBR 公司	研发碳纳米管	改进纤维性能
日本 Shimadzu 大学和三菱化学公司 <sup>[4]</sup>	生产碳纳米纤维,能力 5 t/a(通过 CO <sub>2</sub> 与甲烷在催化剂存在下,转化成碳和水的技术,抽取碳用作纳米纤维)	改性纤维
美国 Nanocor 公司	研发和生产聚合物/黏土纳米材料	聚合物改性
中科院化学所	黏土纳米/塑料材料	聚合物改性
美国亚利桑纳大学 <sup>[5]</sup>	开发金属纳米颗粒形成线状和三维结构新图案技术,应用于制造三维电子、光学及光电子器件。已设计成含配合基包覆的金属纳米颗粒、金属盐及光致还原染料的复合物复合材料	材料改性
巴斯夫公司	纳米颗粒/聚氨酯材料	塑料增强
南京工业大学	纳米水性聚氨酯乳液,已在镇江投产	增强涂料、胶粘剂、皮革、橡胶制品等稳定性、抗老化、耐化学品、耐磨、抗静电性能
巴斯夫公司	纳米颗粒	便携式燃料电池储氢
美国密歇根大学	氧化锌/对苯二甲酸组成的无机/有机结构纳米材料	燃料电池储氢
巴斯夫公司 <sup>[6]</sup>	羟基磷灰石纳米颗粒	用于牙膏,在刷牙后留下缺陷上形成连续薄膜,以修补受损伤的牙釉
Novamont 公司/固特异公司	生产纳米淀粉/聚合物材料	减少轮胎摩擦
美国膜技术公司/卡罗来纳州立大学	氧化硅纳米颗粒/聚合物膜	气体分离

## 2.1 碳纳米管<sup>[7-9]</sup>

碳纳米管属碳材料家族中新的一类,呈空心管状纤维结构,可制成高强度碳纤维材料、储氢材料等。据预测,到2020年以纳米管为主的纳米材料市场将达到约37.48亿美元。碳纳米管可用作燃料电池电极的支撑材料,但现生产工艺昂贵。日本丰桥(Toyohashi)技术科学与Tokai碳素公司和Futaba公司联合开发的新方法,因在大气气氛中制取,可大大节减费用。日本三井化学公司建成世界最大规模的碳纳米管生产装置,生产能力为120 t/a,碳纳米管价格略低于90美元/kg。日本昭和电工公司开发成功在纤维素纳米管(纤维直径20 nm)与气相法碳素纤维(纤维直径150 nm)范围之间的80 nm碳纳米纤维,建立了10 t/a的生产装置。德国由菲利普斯大学和Max Planck微细结构学院组成的研究集团开发了生产均一聚合物纳米管的简易技术,生产的聚甲基丙烯酸甲酯、聚苯乙烯和聚四氟乙烯功能纳米管(长度100 μm)用作催化剂具有应用潜力<sup>[10]</sup>。

Hyperion催化国际公司也是世界上吨位级碳纳米管生产商,最近引入新的导电纳米管增强氟聚合物,扩展了其纳米管增强的塑料家族,其中包括乙烯-四氟乙烯(ETFE)和聚偏二氟乙烯(PVDF)。

大陆菲利普斯与美国西南纳米技术公司(SweNT)组建技术联盟,也加快了低成本碳纳米管的商业化步伐,应用于塑料掺混物是其目标市场之一。现有碳纳米管的生产成本一般高达500美元/g, SweNT期望使用其技术可使成本降低30%~50%。该公司与常用的电弧法和莱塞法合成碳纳米管技术不同,推出新的流化床反应器工艺,组合了Daniel Resasco公司开发的催化剂。SweNT公司实验生产的单壁碳纳米管(SWNT)商品名称为CoMoCAT。SweNT与大陆菲利普斯公司已在美国俄克拉荷马大学研发园区投资建设中型装置,单壁碳纳米管(SWNT)生产能力将提高到165 kg/a。

据估算,全球掺混塑料市场到2005年将达50亿美元/a,单壁碳纳米管(SWNT)可使聚合物提高抗静电、静电分散和电磁干扰屏蔽能力,其掺混聚合物市场可达10亿美元/a。

美国CNI公司与KBR公司采用CNI Hipco工艺建造了200~400 g/d高纯度碳纳米管中型装置。2002年初,日本昭和电工采用蒸气增长法碳纤维(VGCF)技术,投运了10 t/a装置生产碳纳米纤维(直径80 nm)。

## 2.2 纳米催化剂

一些纳米材料可用作加氢催化剂,粒径小于0.3 nm的镍和铜-锌合金的纳米颗粒的催化效率比常规镍催化剂高出10倍,超细铂粉、碳化钨粉是高效的加氢催化剂。

瑞士技术研究院开发了一种低费用、高效的纳米颗粒二氧化钛-二氧化硅催化剂,可应用于环氧化反应,可大大提高转化率,但采用火焰反应器制造的这种催化剂尚未用于工业规模。

纳米金属簇是一类具有独特结构-反应性能关系的新型催化剂材料,素有“第四代催化剂”之称,可以得到用传统的催化剂制备方法无法获得的具有独特的结构及反应性能的新材料。我国中科院化学所历经10余年攻关,在纳米金属簇催化剂研究领域获得重大突破,取得多项成果,为纳米金属簇催化剂的工业应用提供了坚实的理论基础和实施方案。

有序介孔材料也为重油、渣油等催化裂化开辟了新天地。其具有较大的比表面积,相对大的孔径以及规整的孔道结构,可以处理较大的分子或基团,是很好的择形催化剂。除了直接酸催化作用外,还可在有序介孔材料骨架中掺杂具有氧化还原能力的过渡元素、稀土元素或者负载氧化还原催化剂制造接枝材料。这种接枝材料具有更高的催化活性和择形性,这也是目前开发介孔分子筛催化剂最活跃领域。

复合稀土化合物的纳米级粉体是无可比拟的汽车尾气净化催化剂,它的应用可彻底消除尾气中的一氧化碳和氮氧化合物,而更新一代的纳米催化剂将使汽油在燃烧时不产生有害尾气。

## 2.3 纳米复合材料

纳米聚合物在轮胎中应用能收到节能成效。意大利Novamont公司与固特异(Goodyear)轮胎和橡胶公司合作,开发了由谷物生产的纳米淀粉聚合物,它可大大减少轮胎的滚动阻力。利用该技术已在欧洲推出固特异公司的Biotred GT3轮胎,与掺有氧化硅的轮胎相比,该轮胎可减少燃料消耗5%<sup>[11]</sup>。

20世纪80年代末,日本首先研发了两步法制备尼龙-6/蒙脱土纳米复合材料,此后美国nanocor公司也进行了聚合物/黏土纳米复合材料的工业化研究。我国中科院化学所工程塑料国家重点实验室用天然黏土矿物蒙脱土作为分散相,利用插层复合、熔融插层复合等方法制备了纳米塑料。纳米聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET聚酯)已在燕山石化公司聚酯厂完成了工业放大。

碳酸钙纳米颗粒生产也已在中国工业化,采用北京化工大学的工艺,并由新加坡纳米材料技术公司(NMT)进行技术转让。广东恩平广平化工公司采用北京化工大学超重力法合成纳米碳酸钙专利技术,建成 3 000 t/a 纳米碳酸钙生产线。上海华明超细碳酸钙公司将 3 000 t/a 超细碳酸钙生产能力扩增至 8 000 t/a,产品也通过 ISO9002 质量认证。

NMT 公司在中国山西省有一合资装置,已于 2001 年 11 月投产,另外四川和安徽省的 1 万 t/a 装置于 2002 年投产,山东省的装置将于 2003 年投产。其他的  $\text{CaCO}_3$  纳米颗粒供应商有比利时索尔维公司和日本白石公司。

浙江巨化公司电化厂完成纳米碳酸钙原位聚合聚氯乙烯(PVC)树脂工业性试验,已工业化试产出适用于化学建材的高性能原位聚合 PVC 树脂。山东太化集团公司化工厂与浙江杭州华纳化工公司合作开发生产成功纳米碳酸钙原位聚合 PVC, PVC 材料性能大幅度提高。武汉石化厂研制和生产了纳米阻燃聚丙烯复合材料,经复合后的聚丙烯不仅可阻燃,而且能增强增韧。

中科院化学所研制成功超高分子质量聚乙烯/黏土纳米复合材料,使得超高分子质量聚乙烯能用普通挤出成型方法连续生产管材和异型材。贵州省纳米材料工程中心研制成功纳米材料添加剂,添加在农用棚膜中,具有使用寿命长、防尘和防雾滴等特性,使用寿命也比普通棚膜高出 1 倍以上。

我国纳米  $\text{TiO}_2$  的生产和应用尚处于初期发展阶段。四川攀枝花钢铁公司自主开发了纳米二氧化钛制备技术,200 t/a 的生产基地计划于 2003 年投产。

目前聚合物系纳米复合材料的应用处于市场开发期。发展最早的聚酰胺(PA)系纳米复合材料 2001 年市场规模为 1 850 t。美国 2010 年纳米复合材料总需求和按塑料种类需求的预测表明,今后纳米复合材料将有较大发展,到 2010 年聚合物系纳米复合材料营业额将达 40.07 亿美元,其中聚烯烃系(特别是聚丙烯系)约占总量的 50%左右,各种聚合物纳米复合材料未来市场和占有份额为:聚丙烯系达 16.54 亿美元,占总量 41.3%;其次是聚乙烯和其他聚烯烃系 4.31 亿美元,占 10.8%;热固性树脂系 3.94 亿美元,占 9.8%,居第三;聚苯乙烯系 3.69 亿美元,占 9.2%;聚酰胺系 3.18 亿美元,占 7.9%;其他工程塑料和特种聚合物系总销售额为 5.42 亿美元,占总市场 13.5%。

## 2.4 纳米功能性纤维

日本的帝人、尤尼吉卡、东洋纺、三菱人造丝、钟纺等公司相继开发出含有纳米材料的功能性聚酯(如 PET)等纤维产品。我国东华大学、上海第十七化纤厂等也在从事防紫外线 PET 聚酯纤维的开发,天津石化公司应用纳米技术开发的抗菌纤维、远红外纤维和抗紫外纤维已批量推向市场。

## 2.5 纳米/聚合物膜

美国膜技术和研究公司与澳大利亚 Csiro 公司和美国卡罗来纳州立大学开发的新的聚合物膜,用于气体分离的选择性是现在市售的聚合物膜的 2 倍。这种新聚合物膜的丁烷一次通过选择性为 21,而工业上用于丁烷-甲烷分离的橡胶状聚合物膜对丁烷的选择性为  $9 \sim 10^{[12]}$ 。

美国 RTI 公司开发了一种纳米工程膜,可使大分子渗透快于小分子,通过使用纳米颗粒,可改进塑料膜的分子结构。美国能源部正在加快推广其应用,研发项目包括从燃料电池产氢、从燃料中脱硫和脱硝酸盐物质。该技术现已通过物理分离验证,将来将应用于化学品分离,特定设计的纳米膜可阻隔特定的化学物质,可望用于优化氢提纯回收,特别是从加工物流中回收氢气<sup>[13]</sup>。

## 2.6 纳米润滑油和燃油添加剂

美国 Petron Plus 公司推出了纳米润滑油,能最大限度地减少金属与金属间微孔的摩擦。与高级润滑油或固态添加剂相比,其极压可增大 3~4 倍,磨损面减少 16 倍。由于金属表面得到了处理,减少了摩擦磨损,能耗可大大减少,并使机械寿命成倍增长。目前 Petron Plus 纳米润滑油已在中国找到代理商,并在沈阳、青岛等地应用推广。

我国武汉博大科技集团技术中心开发了纳米铜润滑油添加剂,克服了纳米铜在润滑油中的自憎现象,能均匀、稳定地分散在润滑油中,并可防止纳米铜的二次积聚和沉淀。纳米铜作为一种无机润滑剂,对发动机无腐蚀性且对环境友好,为汽车发动机润滑油升级换代提供了一种新型抗磨添加剂产品。

一种叫 Vita-Saving 的纳米节油晶也在我国由北京时代祝强科技公司研制成功,并通过中国环境科学研究院、中国石化集团公司石油产品质量监督检验中心检测。据称 25 L 燃油只需加入一粒 Vita-Saving 纳米节油晶,就能使柴油和汽油充分燃烧,平均节省燃油 10%。

## 3 我国纳米技术产业化面临发展机遇

我国纳米技术研究起步较早,20 世纪 80 年代

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. ■