

# SPSS 软件分析木屑气化碳黑制备衍生环保燃料技术经济性最优化条件

吕嘉弘, 罗智耀

育达商业技术学院资讯管理学系, 台湾苗栗 36143

**摘要:** 运用 SPSS 统计软件, 分析研究了木屑气化碳黑后形成的衍生燃料的商业化条件. 根据商业化性能要求(抗压强度、挥发成分及热值)与制备条件(粘接剂、成型温度及成型压力)的相关性, 以确定最优制备条件. 由衍生燃料燃烧温度、燃烧值、燃烧时间、灰分、含水率、总硫分及燃烧现象与传统商用木炭燃烧性质的对比, 确定最优应用条件. 最后, 通过市场现状分析, 表明该衍生燃料具备价格和环保效益等多方面竞争优势. 研究结果说明, 在综合考虑技术可行与经济效益后, 该衍生燃料的最优制备条件是: PVA-1000 粘接剂添加量 5%, 成型温度 150 °C, 成型压力 130 kg/cm<sup>2</sup>, 制备出的产品符合目前商业化产品规范. 其最优应用条件是: 最高温度可达 550 °C, 平均燃烧温度约 350 °C, 热值约 24.284 MJ, 燃烧时间 87 min/kg. 整个燃烧过程温度释放均匀, 无烟无臭无味, 总硫分仅 0.19%. 燃烧后氮氧化物与硫氧化物的排放量比市售传统木炭低, 粒状污染物也在排放标准内, 燃烧后维持原型, 易清除, 最优市场价格为 6 元/kg. 该项技术具有良好的环保及经济效益, 预计将有广泛的市场应用前景.

**关键词:** 衍生燃料; SPSS 统计软件; 最优条件.

中图分类号: X72

文章编号: 1000-2383(2007)03-0433-08

收稿日期: 2006-11-28

## Optimal Conditions for Manufacture of Refuse Derived Fuel (RDF) from Carbon Black of Wood Chips by SPSS Statistic Analysis Software

L Ü Jia-hong, LUO Zhi-yao

Information Management Department, Yu Da College of Business, Miaoli 36143 Taiwan

**Abstract:** This paper aims at analyzing by SPSS software the manufacture and commercialization conditions of RDF from carbon black of wood chips. The optimal manufacture conditions were determined by correlation analyses between the commercial application requirements (compression strength, volatile content & heat value) and control parameters (additive, press temperature & press stress). And, the optimal application conditions were determined by combustion temperature, released heat, combustion duration, ash content, moisture content, total sulfur content & combustion phenomena in addition to the basic property comparison between commercial charcoal & the RDF. Finally, the analysis of the market indicated the competitive advantages of RDF in both price and environmental benefit. By taking the technical feasibilities and economic evaluation into account, the optimal manufacture conditions of the RDF are: 5% PVA-1000 additive, 150 °C press temperature, 130 kg/cm<sup>2</sup> press stress for fitting the specifications of the present commercial charcoal. The optimal application conditions are: 550 °C reach combustion temperature, 350 °C average combustion temperature, heating value 24.284 MJ and 87 min/kg combustion duration. Different from the commercial charcoal, the RDF is characterized by uniform heat release, clean smell and low NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emission during the combustion. In addition, particle emission also accords with the emission regulations of Taiwan and its shape remains unchanged after combustion. The competitive marketing price is estimated to be 6 Nt \$/kg. With great environmental and economic benefit, the RDF is bound to be popular in the market.

作者简介: 吕嘉弘(1965—), 男, 助理教授, 成功大学航天所博士. E-mail: jahonleu@yahoo.com.tw

**Key words:** refused derived fuel; SPSS statistic software; optimal condition.

中国台湾地区的自产能源较为贫乏,大多数能源需求依赖国外进口,随着台湾本地环保意识的增强,自主开发新的洁净能源被提上日程.当地行政部门曾于 1998 年举行能源会议,计划到 2020 年新的洁净能源达到总量的 1%~3%.为响应新的洁净能源开发规划,专家学者对绿色再生能源领域进行了深入探讨与规划分析,拟定了各项发展前景.当地行政部门也制定了再生能源发展条例,加强了台湾再生能源发展的政策强度.

全球气候的变迁与台湾再生能源的发展要求,造就了再生能源衍生燃料的重要发展契机.由于生物质热裂解气化技术的废弃物碳黑具有质轻与易飘散的特性,如控制不当将会造成严重的环境危害.同时,台湾对农林废弃物制备衍生燃料的技术缺乏相关文献.因此,本研究运用统计产品与服务整体解决方案软件(Statistical Product Service Solution,简称 SPSS)分析木屑气化碳黑后衍生的环保燃料应用性质(抗压强度、挥发成分及热值)与制备条件(粘接剂、成型温度及成型压力)的相关性,可以为生物质衍生燃料造粒技术与未来生物质衍生燃料生产流程和工厂建设规划提供参考依据.

生物质原料在转换为燃料使用时,造粒过程相当重要.造粒过程可分为下列 3 种(Grover and Mishra, 1996; Le and Pecher, 2003):(1)常温高压造粒成型;(2)高温中压造粒成型;(3)添加粘接剂低压造粒成型.在高压下造粒成型,通常不须添加粘接剂与加温,但能源消耗大,经济效益不高.适量添加粘接剂,将原物料颗粒粘接,可以极大地提升衍生环保燃料产品的抗压强度与内聚力(Searle and Le, 1987; Karve *et al.*, 2001; Estela, 2002).

传统造粒通常经过下列步骤(Eriksson and Prior, 1990; Wardlet, 2001):(1)前处理.原物料破碎、筛选、干燥,制备成适当的造粒颗粒条件.(2)混合搅拌.将原物料与粘接剂以适当比例充分搅拌均匀混合.(3)造粒成型.将均匀搅拌完成的原物料与粘接剂,经适当温度与压力,造粒成型.(4)干燥.造粒成型后的衍生燃料半成品,通过干燥程序提升产品强度,有利于燃料的仓储运输.

## 1 材料与方法

### 1.1 农林废弃物—木屑生物质气化发电成为废弃物—生物质碳黑

农林废弃物——木屑,来源于家具加工厂的下脚料与废弃物,或者是资源回收所取得的废木材与漂流木.经破碎机初级破碎与进一步粉碎,将木质材料破碎到长度 20 mm 以下,宽度与厚度在 5 mm 以下.生物质气化发电的过程中,以生物质废木屑作为原料,使用高温热裂解气化技术,在高温高压缺氧的环境下,产出低热值可燃气体.发电过程中所产生的废弃物碳黑具有质轻与易飘散的特性,因此废弃物碳黑控制不当,将会对环境造成重大的污染.所以,本研究采用生物质气化发电所产生的生物质碳黑,作为生物质衍生燃料的原料.废弃物碳黑从炉体内高达 230 °C 高温输送到碳黑储存区,并且在开放性空间中降温冷却至 60 °C,再送至碳黑储料塔中保存,以作后续利用.在降温过程中碳黑吸收了空气中水分,平均含水率约为 18.55%,平均气干比重为 0.18.为使试验材料粒径均匀,利用分别为 0.5 cm 及 0.8 cm 的筛网粉碎机,将生物质碳黑予以均质化.

### 1.2 粘接剂的选用

考虑到衍生燃料是一种居民生活的必需品,如烧烤等用炭,消费者会直接接触,所以,粘接剂的选用要非常慎重.由于存在直接吸入少量粉尘或少量与皮肤接触的情况,粘接剂必须无毒,对人体无危害.综合考虑衍生燃料产品的特性,粘接剂必须有效抗菌,以防商品遭受微生物污染或寄生.对人体无危害且符合生物可分解特性,能够有效降低对生态环境的危害,是粘接剂选择的依据.

本文实验选择日本昭和化工所生产的一级聚乙烯醇(PVA)药剂,分别选用 PVA-100、PVA-500 及 PVA-1000 三种型号的粘接剂.其差异在于合成聚合度分别为 100、500 及 1000.聚合度不同,则具有不同的应用性能.

### 1.3 生物质碳黑加工成衍生燃料 RDF

通过造粒技术的加工,将生物质气化发电所产生的生物质碳黑制造成衍生燃料 RDF,造粒条件与粘接剂选用是一个关键.本文研究中,将造粒温度设定在 120、150、180 °C,造粒压力设定在 100、130、

表1 更正因子

Table 1 Correction factors

$L/D$	1.75	1.50	1.25	1.10	1.00
强度更正因子	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87

$L/D$  为圆柱试样高度与直径比。

160 kg/cm<sup>2</sup>, 粘接剂选用 PVA-100、PVA-500 与 PVA-1000。试样裁切为直径和长度均为 6 cm 的圆柱体。在不同的造粒温度、压力及粘接剂条件下, 将粘接剂均匀溶解于水中, 使粘接剂水溶液与生物质碳黑混合。再将生物质碳黑进行加工造粒处理, 制作成为 RDF 衍生燃料。

#### 1.4 抗压强度试验

生物质衍生燃料的抗压强度关系到产品的性质, 如果抗压强度过低, 将会造成商品在搬运过程中发生碰撞破损等情况。本文测试生物质衍生燃料的抗压强度, 采用单轴抗压强度小于 100 kg/cm<sup>2</sup> 的固化物。每种固化物进行三次重复试验, 以确保实验的正确性。试验步骤与实验数据处理方式如下: (1) 使用合适工具 (如卡尺) 测量试样平均高度 ( $L$ ) 及直径, 由直径计算试样最初平均横截面积 ( $A$ ), 高度与直径的比值须在 1~2.5 之间。当试样高度与直径比小于 2 时, 乘以表 1 的更正因子, 可求得抗压强度 (表 1 未列入的比值, 可用插入法求出); (2) 将试验后整个试样作含水量试验, 试验法概述如下: ①进行抗压强度试验; ②试验后整个湿试样先称重; ③置于 105 °C 烘箱中烘干至恒重, 冷却至常温后称重。

#### 1.5 灰分试验

经过前期预处理的生物质碳黑制成生物质衍生燃料成品, 需要进行灰分的试验, 以充分了解生物质衍生燃料的灰分比例。定量生物质衍生燃料样品置于 800 °C 高温炉中灰化, 冷却后称重求其残余重量, 即为样品灰分。本研究生物质衍生燃料的灰分测试, 每个试验重复进行 3 次, 以确保实验的正确性。废弃物灰分测定方法试验步骤与实验数据处理方式如下: 测试前将附有盖子的坩锅洗净后, 置于高温炉中 1200 °C 空烧 30 min, 空烧后降低炉温至 300 °C, 将坩锅移至干燥器冷却备用, 使用前称重。

(1) 样品水分测定: ①称取适量经粉碎的废弃物样品 (粒径 1 mm 以下, 精称至 0.001 g) 约 5~10 g, 置于上述已称重坩锅中, 以烘箱在 (105 ± 5) °C 干燥 2 h, 取出移入干燥器, 冷却至室温; ②重复以上步骤, 直至前后两次重量差小于 0.005 g 为止。

(2) 样品灰分测定: ①将经水分测定的样品及坩

锅置于 (800 ± 50) °C 高温炉中加热燃烧 3 h; ②降低炉温至 300 °C 时, 将坩锅及样品移入干燥器中冷却至室温。

(3) 样品可燃分测定: 样品可燃分不直接测定, 而由样品总重量减去水分和灰分得到。

#### 1.6 可燃成分试验

定量粉碎后的生物质衍生燃料样品置于 800 °C 高温炉中灰化, 冷却后称重求其残余重量, 即为样品灰分。样品可燃成分通常不直接测定, 而由样品总量减去其水分和灰分得到。

#### 1.7 挥发成分试验

搅拌均匀的生物质衍生燃料样品置于已知重量的蒸发皿中, 移入 103~105 °C 烘箱续烘至恒重, 扣除蒸发皿重量后其所增加的重量即为总固体量; 再将此蒸发皿移入 550 °C 高温炉高温灰化至恒重, 所减少重量即为挥发性固体量, 残余重量为固定性固体量。

本研究生物质衍生燃料的挥发分测试, 采用废弃物灰分测定方法相同的试验步骤与实验数据。处理方式如下: (1) 蒸发皿准备: 将洗净的蒸发皿置于 550 °C 高温炉中燃烧 1 h, 若仅需分析总固体含量, 则放入 103~105 °C 的烘箱加热 24 h, 将蒸发皿移入干燥器内冷却备用, 使用前再称重; (2) 总固体含量测定: 若样品具有流动性则须将其混合搅拌均匀, 若样品为固态, 如污泥饼之类, 则须先将其磨碎均匀。取 25~50 g 样品置于蒸发皿, 并称重。若样品水分含量高时, 须先将蒸发皿进行水浴蒸发至近干, 再将其移入 103~105 °C 烘箱内烘 24 h, 随后移入干燥器内, 冷却至温度平衡后称重。将蒸发皿重复烘干 (1 h)、冷却、干燥及称重步骤直到恒重为止 (前后两次的重量差须在 50 mg 范围内或小于前重的 4%); (3) 固定性及挥发性固体含量测定: 将经过总固体含量分析的蒸发皿置于 550 °C 高温炉中燃烧 1 h (若样品中含有大量有机物, 则建议须先在抽风柜中进行燃烧, 并确保含有适量空气, 避免还原状态的产生及减少实验室产生气味)。若分析燃烧的样品数量较多则要延长燃烧时间。重复上述燃烧 (30 min)、冷却、干燥及称重步骤直到恒重为止 (前后两次的重量差须在 50 mg 范围内或小于前重的 4%)。

#### 1.8 固定碳试验

生物质衍生燃料的固定碳, 采用间接定量的方式处理。通过下列的公式可以简单计算出固定碳的含量。

总重量 = 水分 + 灰分 + 可燃成分,

固定碳 (%) = 可燃成分 (%) - 挥发成分 (%)。

## 1.9 热值试验

生物质衍生燃料的热值是一个重要检测项目。热值过低则商品无利用价值,致使产品滞销或销售困难。本文对生物质衍生燃料的热值分析,采用 Parr 1 563 Calorimeter 测量造粒成型后的生物质衍生燃料成品。

## 1.10 燃烧污染物试验

在 25 °C、一个标准大气压、含氧充足的情况下进行开放式燃烧。燃烧排放管道中排放粒状物及气状物以等速的方式被抽取,经采样管、滤纸及吸附管(充填吸附剂)处理后进行收集。

(1)总氮氧化物:①将所得吸收液置于 100 mL 量瓶,用蒸馏水洗净采集瓶,并将洗液一并移入量瓶内,加水稀释至标线,得到分析用检液;②将所得分析用检液,分取 10.0 mL 置于 200 mL 蒸发皿上;③向蒸发皿溶液中加入氢氧化钠溶液,直到石蕊试纸呈现碱性为止,将蒸发皿置于水浴上蒸干,冷却后,小心加入 2 mL 酚二磺酸溶液于残渣上,使用玻璃棒压碎残渣,并使其与酚二磺酸溶液充分接触;④于蒸发皿加入蒸馏水 1 mL 及浓硫酸 4 滴,置于水浴加热 3 min,并小心搅拌,冷却后加入蒸馏水 10 mL 并充分搅拌;⑤最后加入 15 mL 冷氨水,此时将产生中和热,使溶液成沸腾状态,为避免溶液溅出,务必小心慢慢加入,并用石蕊试纸确认有过量氨水存在为止;⑥随即以直径 11 cm 滤纸将溶液过滤到 100 mL 褐色量瓶内,以少量蒸馏水清洗蒸发皿数次,并以此洗液将滤纸洗净一并收集于该褐色量瓶中,加蒸馏水至标线;⑦将空白试验所得溶液,当作比色对照液,于 405 nm 测定样品吸光度,由检量线求出 NO<sub>2</sub> 的体积。

(2)总硫氧化物:①将采气后的吸收液,移置于 250 mL 量瓶,用蒸馏水洗净吸收瓶,并将洗液一并移入量瓶内,稀释至标线,此即为检液;②分取 10.0 mL 检液,置于 200 mL 三角烧瓶;③加入 40 mL 异丙醇,1 mL 醋酸及 4~6 滴磷紫 II 指示剂,溶液呈紫色;④使用 N/100 醋酸钡—醋酸铅滴定液,当测定液呈现蓝色并维持 1 min 时,即达滴定终点,记录滴定液量(amL)。

(3)粒状污染物:①捕集粒状物前滤纸先于 105~110 °C 干燥 1 h 以上,置于干燥器中冷却至室温称量,需重复干燥、冷却至室温步骤称至恒重,所谓恒重系指本次称重值与前次称重值的差值不大于 0.5 mg,但排气温度在 100 °C 以上时,需将滤纸预

先以 250 °C 以上加热 1 h 以上,置于干燥器中冷却至室温称量,需重复加热、冷却至室温步骤称至恒重。称量时,最好在相对湿度 50% 左右的环境下进行;②称量后的滤纸,使用前应妥善保存在防尘容器中,不能使其沾有粒状物;③捕集粒状物后的滤纸,原则上于 105~110 °C 干燥 1 h 以上,置于干燥器中冷却至室温称量,需重复干燥、冷却至室温步骤称至恒重。如果使用液滴共存情况的采样也需将液滴回收充分干燥后冷却称重;④排气中含有硫酸液滴等,会对测定值带来影响时,除了须采用对其不会引起反应的滤纸外,也需将已采到样品的滤纸在 250 °C 以上加热约 2 h,置于干燥器中冷却至室温后称量,若是这种情况则滤纸采样前的干燥温度也需在 250 °C 以上;⑤普通型采样装置为 2 型时,由吸气嘴到滤纸间的管路内面所附着的粒状物量,需加至所捕集的粒状物量中;⑥由捕集前后滤纸与粒状物捕集器的质量差,求出捕集粒状物的质量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 衍生燃料的抗压强度

生物质碳黑添加粘接剂,在成型造粒机的温度与压力控制下,造粒成型所获得的生物质衍生燃料,重要因素与所制衍生燃料性质的关系如表 2 所示。经过 SPSS 的分析,可以发现对生物质衍生燃料来说,粘接剂的种类与造粒成型温度及造粒成型压力,有显著性的影响,即适宜的粘接剂对生物质衍生燃料的性质有显著的改善。

2.1.1 粘接剂对抗压强度的影响 由 ANOVA 检验生物质衍生燃料的粘接剂(ADD)对抗压强度(CS)的影响结果如表 3 所示,其中抗压强度有显著影响( $P < 0.05$ )。由 F 检定得知,粘接剂是抗压强度的一个重要变异因子,由表 2 观察到,当选用 PVA-1000 时,抗压强度可以得到明显提升。由表 4 知聚乙烯醇[Poly(vinyl Alcohol),简称 PVA]是一种水溶性高分子化合物。由醋酸乙烯酯 VAc 先聚合成聚醋酸乙烯酯 PVAc 再经碱化得到聚乙烯醇,并非直接由乙烯醇聚合而成。其性质取决于聚合度和碱化度。聚合度越大,分子量越大,黏度越高。PVA-1000 的分子聚合度比起 PVA-500 跟 PVA-100 高出许多,因此对粒子间的粘着力也有实质的改善作用。选用 PVA-1000,可以明显发现由于粘接剂粘着性增加,衍生燃料抗压强度有较大的提高。

表 2 衍生环保燃料关键制程因素与成品基本性质实验数据

Table 2 Experimental data between key-factors and basic properties of produced RDF

粘着添加剂 种类	成型温度 (°C)	成型压力 (kg/cm <sup>2</sup> )	抗压强度 (kg/cm <sup>2</sup> )	灰分 (%)	可燃分 (%)	挥发分 (%)	固定碳 (%)	热值 (MJ)
PVA-100	120	100	4.52	23.71	68.92	13.54	55.38	20.056
		130	5.15	23.69	69.12	13.52	55.60	21.397
		160	7.35	23.62	69.27	13.53	55.74	21.928
	150	100	4.83	24.07	69.12	13.31	55.81	19.505
		130	5.51	24.15	69.27	13.32	55.95	20.937
		160	7.85	24.23	69.21	13.19	56.02	21.484
	180	100	5.26	24.54	69.18	12.77	56.41	19.090
		130	5.10	24.35	69.63	12.88	56.75	20.390
		160	8.47	24.22	69.72	12.68	57.04	20.928
PVA-500	120	100	5.02	23.86	69.40	13.96	55.44	20.639
		130	5.95	24.02	69.30	13.95	55.35	21.973
		160	9.14	24.09	69.35	13.96	55.39	22.721
	150	100	5.40	24.15	69.61	13.79	55.82	20.048
		130	6.47	24.47	69.55	13.76	55.78	21.491
		160	9.70	24.61	69.36	13.58	55.78	22.113
	180	100	6.62	25.14	69.05	13.15	55.90	19.454
		130	6.13	24.86	69.61	13.22	56.38	20.966
		160	10.27	24.35	70.05	13.05	57.00	21.705
PVA-1000	120	100	6.60	23.83	70.11	14.94	55.17	20.639
		130	7.00	24.21	69.75	14.95	54.80	21.973
		160	10.81	24.28	69.79	14.90	54.89	22.721
	150	100	7.10	24.47	69.90	14.82	55.08	20.048
		130	7.44	24.54	70.07	14.76	55.31	21.493
		160	11.82	24.50	70.07	14.40	55.67	22.113
	180	100	7.54	25.48	69.29	14.03	55.25	19.454
		130	7.39	24.96	70.08	14.09	55.99	20.966
		160	12.83	24.62	70.36	14.04	56.32	21.705

表 3 衍生环保燃料关键制程因素与成品基本性质关联性分析数据

Table 3 Correlation (P value and F test) between test key-factors and basic properties of produced RDF

基本性质	粘着添加剂		挤压成型温度		挤压成型压力	
	F 检定(ANOVA)	显著性(P value)	F 检定(ANOVA)	显著性(P value)	F 检定(ANOVA)	显著性(P value)
抗压强度	104.554	0	11.295	0	264.880	0
灰分	0.333	0.718	0.890	0.413	0.011	0.989
可燃分	0.607	0.546	0.062	0.94	0.115	0.891
挥发分	9.872	0	3.553	0.031	0.097	0.907
固定碳	0.644	0.527	1.388	0.253	0.204	0.815
热值	15.434	0	35.781	0	142.823	0

ANOVA 为 analysis of variance; F 为以自由度分析变异显著性的方法。

2.1.2 造粒成型温度对抗压强度的影响 由表 2 观察到,当造粒成型温度提高时,抗压强度可以得到明显提升。造粒温度的提升对衍生燃料表面的细纤毛的碳化效果有明显的增加,同时有助于降低产品内部的含水率,使其更为干燥,可以有效地提升抗压强度。

2.1.3 造粒成型压力对抗压强度的影响 造粒压力的提高,可以强化粒子与粒子间的结合,有效减少

产品内的孔隙,确实强化了产品本身的内聚力,内聚力提升反映在抗压强度上使它有明显的增加。

## 2.2 衍生燃料的挥发成分

2.2.1 粘接剂对挥发成分的影响 粘接剂本身具有挥发成分(表 4),而且 PVA-1000 的挥发成分比 PVA-100 高。因此粘接剂的种类,对挥发成分有直接且明显的变异关系。

表 4 粘着添加剂 PVA 种类与规格

Table 4 PVA grades and specifications

种类	水解度 (%)	挥发分 (%)	聚合度 (DP)	热值 (MJ)	灰分 (%)
PVA-1000	98.5~99.2	< 5.3	1 000	28.969	< 0.7
PVA-500	98.5~99.2	< 4.7	500	24.196	< 0.7
PVA-100	95~97	< 4.6	100	19.294	< 1

**2.2.2 造粒成型温度对挥发成分的挥发影响** 在造粒成型过程中,由于造粒温度的提高,将加强粘接剂的干燥,使粘接剂挥发成分加速挥发。即温度越高,粘接剂挥发成分挥发越快,因此造粒温度对挥发成分的挥发有显著影响,此结果与抗压强度呈现相反影响,必须综合商业化操作条件进行应用考虑。

### 2.3 衍生燃料的热值

**2.3.1 粘接剂对热值的影响** 由表 4 可知, PVA 添加剂本身热值高达 19.294~28.969 MJ, 因此粘接剂的种类对热值有明显的影响。PVA-1000 的热值高于 PVA-500 和 PVA-100, 因此添加 PVA-1000 对提高热值有明显的帮助, 在商业生产时, 添加剂造成额外成本, 故其添加量是重要的操作数据。

**2.3.2 造粒成型温度对热值的影响** 造粒温度的降低能够有效的将粘接剂挥发成分予以保留, 同时可以将生物质衍生燃料原料本身的挥发成分予以保留, 减少其耗损, 所以造粒温度的降低对热值有显著的提升, 此结果与抗压强度呈现相反的影响, 必须综合商业化生产条件综合考虑。

**2.3.3 造粒成型压力对热值的影响** 造粒成型压力的提高有助于密度的提升, 因此对粒子与粒子间的键结有显著的提升, 从而对热值有显著的提升。

### 2.4 衍生燃料与传统木炭的热值比较

**2.4.1 燃烧温度比较** 根据厂商提供的资料, 传统木炭的燃烧温度最高约 650 °C, 平均燃烧温度约 280 °C。本研究中衍生燃料经测试后最高温度约 550 °C, 平均燃烧温度约 350 °C, 且具备燃烧时温度释放均匀的特性。因此, 消费者在烧烤时, 使用本研究的衍生燃料可以更有效的控制火候, 避免烧烤食物烧焦。换言之该衍生燃料将提供更优良的操控性与便利性。

**2.4.2 单位重量燃烧热值比较** 根据文献的记载与厂商所提供的资料, 传统木炭的燃烧热值约 22.644~27.560 MJ (依据树种与制造厂的碳化程度不同而有所差异), 如表 5 所示。经测试本研究衍生燃料的热值约 24.284 MJ, 因此就消费者使用的直觉

表 5 商用炭与衍生环保燃料基本性质比较

Table 5 Comparison of basic properties between commercial charcoal and produced RDF

项目	测试方法	衍生燃料	木质炭	烤肉炭 (大陆)	烤肉炭 (泰国)
含水率 (%)	ASTM D3173	4.75	3.55	5.28	4.5
灰分 (%)	ASTM D3174	18.62	2.6	8.35	15.2
挥发分 (%)	ASTM D3175	21.55	22.26	25.46	25.5
含碳量 (%)	ASTM D3172	55.08	71.83	60.91	54.8
可燃硫分 (%)	ASTM D4239	0.19	0.048	2.79	0.3
热值 (MJ)	ASTM D5865	24.284	27.560	22.644	24.133

感受而言, 其差异性不大, 并不容易察觉。但该衍生燃料放热均匀, 提供有效的稳定的和均匀的热源供应, 又具备环保功用, 故对消费者来说使用效益更大。

**2.4.3 单位重量燃烧时间比较** 依据厂商所提供的数据, 每单位重量传统木炭的燃烧时间为 103 min/kg, 而本研究中经过测试的传统木炭其每单位重量的燃烧时间为 92 min/kg。衍生燃料经测试燃烧时间较短, 仅为 87 min/kg。但是衍生燃料比重较高, 因此单位重量的体积相对较小, 这不仅有利于营销与运输, 且相同的单位体积所提供的燃烧时间比传统木炭更长。而就消费者的消费行为主观观点来判别, 烧燃时间差异相当小, 不容易察觉。另一方面衍生燃料由于比重高, 抗压强度高, 经燃烧测试后, 依然维持原成型状态, 清除方便。

**2.4.4 消费使用直接感受比较** 传统木炭内含大量的天然焦油与不纯物质, 因此在烧烤的过程中, 会产生大量的烟雾与异味。本研究的衍生燃料有效地改善了传统木炭的缺点 (因已先气化过, 故焦油与杂质已先一步去除), 在燃烧过程中, 全程无烟无臭无味, 提供稳定且安全的热值, 并且不会有燃烧微爆的不良现象。因此衍生燃料是一种良好、环保、安全且健康的能源燃料, 将是取代传统木炭的一种新趋势。

**2.4.5 化学分析比较** 本研究中衍生燃料与市售其他木炭化学实验的分析数据比较, 如表 5 所示。就含水率而言, 本研究中衍生燃料含水率与市售传统木炭及环保炭相当接近。而灰分较传统木炭高出约 16.02%, 其原因是本研究所使用的碳黑, 第一阶段的热裂解气化系统已经利用部分挥发物发电, 因此

表 6 市售商用烤肉炭与衍生环保炭燃烧后污染排放比较

Table 6 Comparison of pollutant emission after combustion between produced RDF and charcoal in present market

污染排放物	衍生环保炭	中国大陆制烤肉炭	中国台湾制烤肉炭
NO <sub>x</sub> (10 <sup>-6</sup> )	500	2 600	1 700
SO <sub>x</sub> (10 <sup>-6</sup> )	630	1 850	750
PM10(g/Nm <sup>3</sup> )	23	17	15

表 7 中国台湾商用炭进口数量

Table 7 Import quantities of charcoal in Taiwan

进口量(t)	2002	2003	2004	2005(1~4月)	备注
印度尼西亚	15 834	18 258	19 888	6 574	约 53%
中国大陆	9 723	8 592	4 330	560	约 25%
马来西亚	4 207	5 918	8 311	2 734	约 17%
其他国家	2 125	1 676	1 556	526	约 4.27%
总数量	31 889	34 444	34 085	10 394	

表 8 中国台湾商用炭进口价格

Table 8 Import prices of charcoal in Taiwan

年份	印度尼西亚 (Nt \$/kg)	中国大陆 (Nt \$/kg)	马来西亚 (Nt \$/kg)
2002	6.539	6.623	6.624
2003	6.082	7.373	6.005
2004	5.844	8.301	5.941
2005	5.779	14.627	5.037

注: Nt \$ 为新台币; 人民币/新台币=1:4.3

衍生燃料灰分会较高, 但已证明该灰分的提高对燃烧热值与消费者使用感受的影响微乎其微, 同时高灰分对燃烧后维持成型有正面影响, 因此不影响该衍生燃料未来的市场营销。而其余如挥发成分、固定碳等皆与市售传统木炭或是环保炭差异不大, 且该衍生燃料经过热裂解气化过程已经将总硫分部分去除, 总硫分只有 0.19%, 比大陆生产的环保炭总硫量还要低, 同时符合 CNS0.3% 的规范。

**2.4.6 燃烧污染物分析比较** 从表 6 可以看出, 该衍生燃料在燃烧污染物方面的表现, 较大陆市售传统木炭与台湾市售传统木炭有更优异的表现。在氮氧化物与硫氧化物方面, 衍生燃料远低于市售传统木炭, 有利于环境保护与生态保育。而该衍生燃料在制备过程中将木屑有效地碳化使其含碳量提高, 在气化过程中将部分杂质挥发, 因此有利于提高衍生燃料的质量。在粒状污染物方面, 该衍生燃料略高于传统木炭, 但仍属于可接受范围。究其原因, 衍生燃料在气化过程中, 已经将木屑粒子予以精致化与细

致化, 因此较细致的粒子在燃烧过程中容易有飘散现象发生, 但与传统木炭数据相差不远, 属于消费者可接受的范围。

**2.4.7 衍生燃料的市场优势与未来前景分析** 从表 7 可看出, 目前台湾地区对木炭的需求量与日俱增, 因此, 本研究中衍生燃料在实现量产后, 将极具市场潜力。同时由表 8 可知该衍生燃料批发价预计每公斤将可达新台币 6 元。对生物质气化发电所衍生碳黑废弃物予以资源化回收再利用, 不仅有效解决废弃物处理的问题, 同时也可创造高经济附加值, 此项技术未来的发展前景, 将可为衍生燃料工业投入另一个全新的可行商机。

### 3 结论

粘着性的增加、成型温度提高与造粒压力的提高, 都明显的影响衍生燃料(RDF)的抗压、热值与挥发成分等重要商业运用所需基本性质。经本研究测试, 综合经济性考虑, 建议以 PVA-1000 为添加剂 (5% 比例), 在成型温度 150 °C 和成型压力 130 kg/cm<sup>2</sup> 条件下造粒成型, 即可达目前商业化产品规范。本研究中, 衍生燃料的实际燃烧测试最高温度约 550 °C, 平均燃烧温度约 350 °C, 具备燃烧时温度释放均匀的特性。传统木炭的燃烧热值约 22.644~27.560 MJ (依据树种与制造厂碳化程度不同而有所差异), 而本研究衍生燃料的热值约 24.284 MJ, 与现有商品相当。传统木炭每单位重量的燃烧时间为 92 min/kg, 本研究的衍生燃料燃烧时间较短, 仅为 87 min/kg, 但比重大, 单位体积燃烧较久且燃烧后大部份维持原型而易清除。本研究的衍生燃料因已先气化去除焦油与杂质而有效的改善了传统木炭的缺点, 衍生燃料在燃烧过程中, 全程无烟无臭无味, 提供稳定且安全的热值, 并且不会有燃烧微爆的不良现象。含水率方面, 本研究的衍生燃料含水率与市售传统木炭及环保炭比较, 相当接近。而灰分方面, 本研究衍生燃料比传统木炭高出约 16.02%, 但该灰分的提高对消费者使用的热质感受影响微乎其微, 因此不影响该衍生燃料未来市场营销。其余挥发成分、固定碳皆与市售传统木炭或是环保炭差异不大。另一方面, 该衍生燃料, 因为于热裂解气化系统, 已经将总硫分做部分去除, 因此总硫分只有 0.19%, 比起大陆所生产环保炭的总硫量可说相当低, 同时符合 CNS0.3% 的规范, 燃烧后排放

的氮氧化物与硫氧化物比市售传统木炭低而排放粒状污染物也在可接受范围内。预计该衍生燃料批发价可达每公斤新台币 6 元，依目前台湾市场每年约有 3 至 4 万吨的进口量计算，约有 2—3 亿台币市场，且可外销他国。

生物质气化发电所衍生的碳黑废弃物予以资源化回收再利用，不仅有效解决废弃物处理的问题，同时又具有高经济价值，其未来的发展前景可观，可开创出一个全新的商机。

致谢：本研究计划承再生能科技股份有限公司计划经费支持，试材承再生能科技股份有限公司提供，特此致谢！

**References**

Eriksson, S., Prior, M., 1990. The briquetting of agricultural wastes for fuel. *FAO Forestry Paper*, 45: 11—31.  
 Estela, A., 2002. Rice husk—An alternative fuel in Perú.

*Boiling Point*, 48: 35—61.  
 Grover, P. D., Mishra, S. K., 1996. Biomass briquetting: Technology and practices. *FAO forestry paper*, 51: 45—58.  
 Karve, P., Mahajan, H. Y., Salunkhe, R. M., et al., 2001. A chain of technologies for using sugarcane trash as a household fuel. *Boiling Point*, 47: 16—38.  
 Le, A., Pecher, C., 2003. Fuel briquetting: Theory and applications from around the world. The Legacy Foundation Press, Rome, Italy.  
 Searle, G. H., Le, A., 1987. A chain of technologies for using sugarcane trash as a household fuel— Simple technologies for charcoal making. *FAO Forestry Paper*, 41: 37—61.  
 Wardlet, D., 2001. A low cost and high quality solid fuel from biomass and coal fines. Final Report, US DOE Contract No. DE—AC26—99FT40157.

\*\*\*\*\*

《地球科学——中国地质大学学报》  
 2007 年 第 32 卷 第 4 期 要目预告

华北地区地壳 P 波三维速度结构 .....	魏文博等
高压密封舱与磁场传感器的综合频响变异及其实验验证 .....	邓明等
海底环境参数采集电路的硬件实现及其驱动软件设计 .....	张启升等
井间电磁波层析成像中的高精度时间域正演计算 .....	林树海等
中国大陆科学钻探主孔榴辉岩的分类及测井识别 .....	景建恩等
海底大地电磁探测的实时数据备份技术 .....	王猛等
青藏高原西缘壳幔电性结构与断裂构造: 札达—泉水湖剖面大地电磁探测提供的依据.....	金胜等
复杂形体重力场、梯度及磁场计算方法.....	骆遥等