

肖刚, 金保升, 刘继驰, 等. 2009. 稻壳焦炭导电特性的影响因素 [J]. 环境科学学报, 29(6): 1220–1225

Xiao G, Jin B S, Liu J C, *et al.* 2009. Factors affecting the electrical conductivity of rice hull coke [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(6): 1220–1225

稻壳焦炭导电特性的影响因素

肖刚^{1,2,*}, 金保升¹, 刘继驰¹, 王强¹

1. 东南大学, 能源与环境学院, 南京 210096

2. 浙江大学, 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027

收稿日期: 2008-08-29 修回日期: 2008-10-13 录用日期: 2009-04-09

摘要: 为开发生物质焦炭电磁屏蔽材料, 研究了各种因素对稻壳焦炭导电特性的影响规律. 利用自制的高温炭化试验装置, 考察了炭化终温、升温速率、终温下的保留时间、粒径大小、催化剂种类及配比等因素对焦炭电阻率的影响规律. 研究结果表明: 炭化终温对稻壳焦炭电阻率影响较大, 特别是在 1000℃ 以下, 提高炭化终温可将焦炭电阻率从 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上降低到 $2 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右; 而当炭化终温从 1000℃ 提高到 1400℃ 时, 电阻率仅从 $2 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右降低到 $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右. 提高升温速率会降低焦炭产率, 但对电阻率的影响不大. 延长炭化终温时间对降低电阻率有一定作用, 但当物料粒径较小时其作用几乎可以忽略. Fe_2O_3 和 ND 可作为炭化催化剂降低焦炭电阻率, 两者催化效果相当, 稻壳与催化剂的最佳质量配比在 50:1 左右. 当炭化终温 > 1000℃、升温速率为 $20^\circ \text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 、保留时间为 30 min、稻壳粒径为 0.1~0.3 mm、稻壳: 催化剂 = 50:1 时, 所获焦炭电阻率为 0.2~1.0 $\Omega \cdot \text{cm}$.

关键词: 稻壳; 焦炭; 电阻率; 电磁屏蔽

文章编号: 0253-2468(2009)06-1220-06 中图分类号: TK6 文献标识码: A

Factors affecting the electrical conductivity of rice hull coke

XIAO Gang^{1,2,*}, JIN Baosheng¹, LIU Jichi¹, WANG Qiang¹

1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096

2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received 29 August 2008 received in revised form 13 October 2008 accepted 9 April 2009

Abstract In order to produce electromagnetic shielding materials from rice hulls, experiments were undertaken using a lab-scale furnace at different termination temperatures (TT) and heating rates, different retention times, and using different types of catalysts. When the TT increased from 400°C to 1000°C, electric resistances were from approximately $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ to $2 \Omega \cdot \text{cm}$. When the TT increased from 1000°C to 1400°C, electric resistances decreased from $2 \Omega \cdot \text{cm}$ to $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$. Increasing the heating rate did not decrease the electric resistance, however it decreased the yield. Longer retention time always resulted in the lower electric resistance of coke when the diameter of rice hulls was over 0.3 mm. Fe_2O_3 as well as ND could be used as catalysts to decrease electric resistance. The optimal weight proportion of rice hulls and catalysts was approximately 50:1. When the TT was over 1000°C, the heating rate was $20^\circ \text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, the retention time was 30 min and the proportion between rice hull and catalyst was 50:1 *w/w*, the resulting electric resistances were in the range of 0.2~1.0 $\Omega \cdot \text{cm}$.

Keywords rice hull coke; electric resistance; electromagnetic shielding

1 引言 (Introduction)

我国稻谷产量约占世界的 1/3, 年产量约 1.8 亿吨, 每年稻壳产量约 3600 多万吨. 由于稻壳表面坚硬耐腐、硅含量高、堆积密度小, 故在土壤中难以快速降解, 不易直接还田; 且稻壳中所含粗纤维达

40% 以上, 而蛋白质含量只有 3% 左右, 饲用价值不高. 近年来, 人们对稻壳资源化利用进行了较为广泛的研究 (曹青, 2007; Islam, 2000; George, 2001), 如燃烧、生产活性碳、气体/液体燃料、生物制剂、有机肥料、木纤维混凝土板等. 这些技术有些虽然得到了一定规模的应用, 但资源化品位不高,

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50806013); 教育部博士点新教师基金 (No. 20070286074); 东南大学科技基金资助 (No. XJ2008306)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50806013), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20070286074) and the Science & Technology Foundation of Southeast University (No. XJ2008306)

作者简介: 肖刚 (1979—), 男, 副教授 (博士); * 通讯作者 (责任作者), E-mail: xiaogangtianer@seu.edu.cn

Biography: XIAO Gang (1979—), male, associate professor (Ph.D.); * **Corresponding author** E-mail: xiaogangtianer@seu.edu.cn

经济效益较差,浪费严重. 因此,非常有必要开发新的资源化技术,进一步提高稻壳的资源化品位和利用效率.

随着电子信息、先进制造等行业的迅猛发展,大功率电磁设备被广泛使用. 这使得电磁污染成为继大气污染、水质污染、噪声污染之后的第四大公害,而且每年辐射的能量以 7% ~ 14% 的速度增长(姚智兵, 2007; 杨立军, 2007). 电磁污染隐蔽性强,不仅能干扰或损坏电子设备,而且会在人们毫无警觉的情况下长期危害人体健康,造成人群疲惫、焦虑,严重者甚至损伤中枢神经和生殖系统,对儿童和胎儿的危害更大(干雅平, 2006; 姚智兵, 2007). 电磁屏蔽是防治电磁污染的有效措施之一,一般来说材料电阻率越低,电磁屏蔽效率越好. 由于目前广泛使用的金属系屏蔽材料价格高,还可能带来二次污染,很大程度上限制了该技术的广泛应用.

Suzuki 研究发现, 900℃ 下获得的木质焦炭电阻率在 1~ 10 Ω• cm (Suzuki, 2001). 邵千钧研究认为,竹子在 700~ 850℃ 加热 4~ 6h 后所得竹炭的体积

电阻率小于 10Ω• cm (邵千钧, 2002). 张文标在对竹炭的导电性能进行分析时发现了类似的规律(张文标, 2002). 石原茂久(刘贤森等, 2005)用木炭(67. 5%)和酚醛树脂(32. 5%)混和颗粒体来制造薄板(1 mm),当采用 800℃ 炭化的木炭时,电磁屏蔽效能可为 30 dB 左右,当采用 1200℃ 炭化的木炭时,其电磁屏蔽效能比厚 1. 65 mm 的铁板略好.

本研究中利用自制的生物质炭化试验台,在不同炭化终温、炭化终温下的保留时间、粒径大小、催化剂种类及配比等条件下制备稻壳焦炭,分析焦炭电阻率的变化规律,探索最佳的反应条件,以期为制取高性能电磁屏蔽材料提供基础数据和参考.

2 试验原料与方法 (Experimental materials and methods)

2. 1 试验原料

本文所用稻壳来自南京郊区,其工业分析和元素分析如表 1 所示. 试验开始前将稻壳碾碎,筛分后分别获得粒径为 0. 1~ 0. 3 mm 和 1~ 3 mm 两种粒径的样品.

表 1 稻壳的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of rice hulls

工业分析 Proximate analysis				元素分析 Ultimate analysis					$Q_{h,ad} / (kJ \cdot kg^{-1})$
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	O_{ad}	
4. 04%	16. 67%	63. 37%	15. 92%	39. 71%	4. 94%	0. 49%	0. 08%	34. 07%	15719

试验涉及 2 种催化剂: 氧化镍和氧化铁. 氧化镍由纯镍粉在空气气氛下,利用管式炉在 800℃ 温度下烧制获得; 氧化铁由国药集团化学试剂有限公司提供. 试验时,将催化剂研磨成粉后与稻壳样品充

分混合,然后在炭化炉内按照拟定的程序高温炭化,获得相应的焦炭样品.

2. 2 试验装置

本试验主要在如图 1 所示的固定床试验台上进行. 加热管内径为 50mm、长 600mm,试验过程中管内维持微正压的氮气气氛,管内温度和加热时间由程序控温加热系统控制,反应的气相产物经过冷却后由集气袋收集,焦炭在反应管内温度冷却到 150℃ 后取出,冷却到室温后称重.

2. 3 试验工况与方法

本文试验主要考察了炭化终温、炭化终温下的保留时间、粒径大小、催化剂种类及配比等对稻壳焦炭电阻率的影响,试验工况如表 2 所示.

焦炭样品制备步骤如下: ①配制炭化试验原料,干燥称重后装入方舟内,开启加热管密封法兰,将方舟推至加热管中部,关闭密封法兰. ②开启氮气瓶,测试装置气密性,将氮气流量调到 500 mL• min⁻¹ 左右,维持 20~ 30 min,确保管内空气全

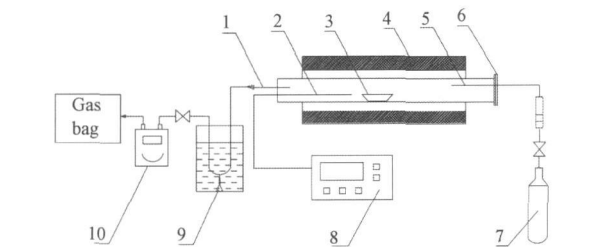


图 1 固定床试验装置示意图 (1 气体出口, 2 热电偶, 3 刚玉瓷舟, 4 电加热炉, 5. 氮气入口, 6. 密封盖, 7 氮气钢瓶, 8. 温度控制装置, 9 冷却装置, 10 煤气表)

Fig. 1 Illustration of the fixed-bed furnace (1 Exit of syngas 2 Thermocouple, 3 Porcelain boat 4 Electric heating furnace 5 Inlet of N₂, 6 Hermetic seal 7 N₂ vessels 8 Temperature controller 9 Cooling trap 10 Gas meter)

部排出. 为及时带出气相产物, 防止焦炭氧化, 试验过程中始终维持氮气气氛. ③设置加热程序, 控制加热速率在 $20\sim 100^{\circ}\text{C}\cdot\text{m in}^{-1}$, 开启加热装置, 按照拟定程序进行炭化试验. ④试验结束后, 需待管内温度冷却至 150°C 以下后, 关闭氮气, 开启密封法

兰, 取出方舟, 完全冷却干燥后称重. ⑤对于添加催化剂的样品, 利用磁铁将金属氧化物的还原产物吸出后 (未添加催化的样品不需此步骤), 利用山西柯木炭公司提供的 CM-II 型测定仪分析电阻率 (工作压力约为 780N).

表 2 炭化试验工况
Table 2 Operation conditions of the experiments

序号 No	最终温度 Termination temp (TT) / $^{\circ}\text{C}$	最终温度下的 保留时间 Retention time at TT / min	粒径 Diameter / mm	催化剂种类 Catalyst type	稻壳: 催化剂 Rice hull catalyst (w / w)
1	400	30	0.1~0.3	—	—
2	400 ^a	30	0.1~0.3	—	—
3	600	30	0.1~0.3	—	—
4	900	30	0.1~0.3	—	—
5	900 ^a	30	0.1~0.3	—	—
6	1000	30	0.1~0.3	—	—
7	1200	30	0.1~0.3	—	—
8	1200 ^a	30	0.1~0.3	—	—
9	1400	30	0.1~0.3	—	—
10	1400 ^a	30	0.1~0.3	—	—
11	900	60	0.1~0.3	—	—
12	900	120	0.1~0.3	—	—
13	900	240	0.1~0.3	—	—
14	900	30	1~3	—	—
15	900	60	1~3	—	—
16	900	120	1~3	—	—
17	900	240	1~3	—	—
18	900	30	0.1~0.3	Fe_2O_3	2:1
19	900	30	0.1~0.3	Fe_2O_3	10:1
20	900	30	0.1~0.3	Fe_2O_3	50:1
21	900	30	0.1~0.3	Fe_2O_3	100:1
22	900	30	0.1~0.3	NiO	2:1
23	900	30	0.1~0.3	NiO	10:1
24	900	30	0.1~0.3	NiO	50:1
25	900	30	0.1~0.3	NiO	50:1
26	1000	30	0.1~0.3	Fe_2O_3	50:1
27	1000	30	0.1~0.3	NiO	50:1
28	1200	30	0.1~0.3	Fe_2O_3	50:1
29	1200	30	0.1~0.3	NiO	50:1
30	1400	30	0.1~0.3	Fe_2O_3	50:1
31	1400	30	0.1~0.3	NiO	50:1

注: * 升温速率 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{m in}^{-1}$, 其余均为 $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{m in}^{-1}$.

对于部分样品, 采用美国 SHIMADZU 公司生产的 XD-3A 型 X-射线衍射仪 (XRD) 分析焦炭样品内的晶体分布 (实验条件为: 铜靶, 管电压 $V=40\text{ kV}$, 管电流 $I=30\text{ mA}$, $\text{CPS}=1\text{ k}$).

3 试验结果 (Experimental results)

3.1 炭化终温和升温速率对焦炭电阻率的影响
在物料粒径 0.1~0.3mm, 保留时间 30min 升

温速率 $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{m in}^{-1}$ 、炭化终温 $400\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 获得焦炭的电阻率和产率如图 2 所示. 为了更为清晰表示电阻率的变化规律, 图中纵轴的数值为焦炭电阻率 ρ 除以 $1\Omega\cdot\text{cm}$ 后 (即无量纲化后) 取对数值, 记为相对电阻率 θ (无量纲). 其中: $\rho=10^{\theta}\Omega\cdot\text{cm}$.

由图可知, 当炭化终温从 400°C 升高到 1000°C 时, 焦炭电阻率从大约 $2\times 10^6\Omega\cdot\text{cm}$ 降低到 2×10^3

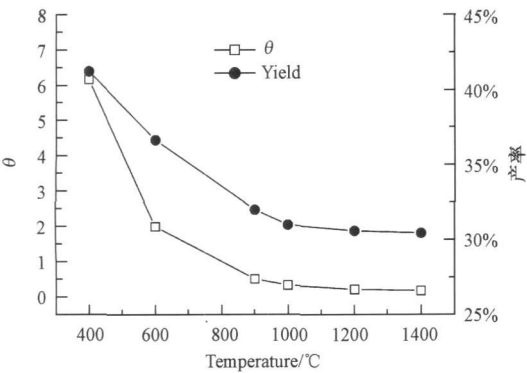


图 2 最终温度的影响 (20°C m in⁻¹)

Fig 2 Effects of temination temperature (20°C m in⁻¹)

Ω·cm, 当炭化终温从 1000°C 提高到 1400°C 时, 电阻率仅从 2.13Ω·cm 降低到 1.49Ω·cm. 提高最终炭化温度能降低焦炭电阻率, 这主要是由于随着炭化终温的提高, 焦炭中的氢元素和氧元素进一步析出, 促进了焦炭内非定型碳结构中离子基的缔合, 增加了导电离子的数量, 从而降低了焦炭电阻率. 但是, 提高炭化终温的作用仅在 1000°C 以下较为明显, 在 1000~1400°C 范围内的影响较小. 这是因为在 1000°C 以下时, 焦炭中的氢元素和氧元素已经基本完全析出, 图中焦炭产率的变化规律也证明了这一点; 此后提高炭化终温对离子基缔合的促进作用随之降低, 所以在 1000°C 以上提高炭化终温对电阻率的影响减弱.

本文分别在 20°C·m in⁻¹ 和 100°C·m in⁻¹ 的升温速率下进行了炭化试验, 试验结果分别见图 2 和图 3

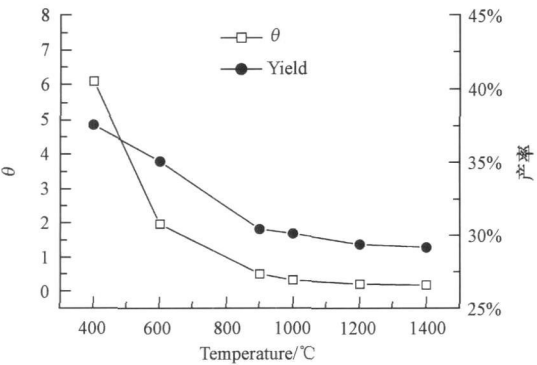


图 3 最终温度的影响 (100°C m in⁻¹)

Fig 3 Effects of temination temperature (100°C m in⁻¹)

对比图 2 可以看出, 升温速率对焦炭电阻率的影响很小; 但对焦炭产率有一定的影响, 即升温速

率越大, 焦炭产率越低, 这与其它相关的研究结论一致 (邓娜, 2005; 曹青, 2007). 故本文中主要分析升温速率 20°C·m in⁻¹ 下获得的焦炭样品. 采用 X 衍射仪分析不同温度下焦炭的衍射图, 结果如图 4 所示.

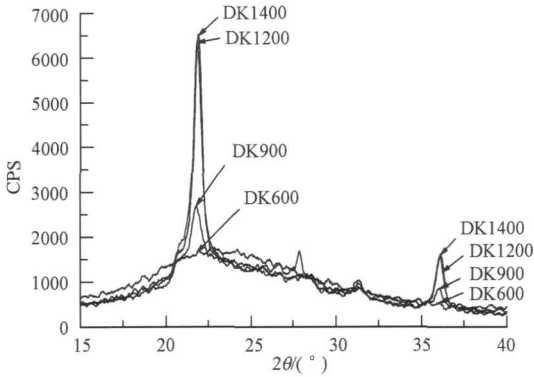


图 4 焦炭 XRD 分析衍射图 (20°C m in⁻¹)

Fig 4 XRD analysis of coke (20°C m in⁻¹)

查找 XRD 图分析的 PDF 卡片 23-0064 可得石墨 002 晶面对应 $2\theta = 26.53^\circ$, 100 晶面对应 $2\theta = 42.437^\circ$, 101 晶面对应 $2\theta = 44.637^\circ$; 即在这 3 个角度附近有明显吸收峰, 这属于典型层状石墨峰. 在炭化温度为 600°C 时没有明显吸收峰, 即在这温度下石墨化不明显. 而炭化终温在 900°C 以上的焦炭, 在 21° 和 36° 附近有明显吸收峰, 说明焦炭结晶程度随温度升高而变大, 这可能是焦炭电阻率随温度增加而降低的主要原因之一.

3.2 保留时间及物料粒径对焦炭电阻率的影响

本试验在炭化终温为 900°C、升温速率 20°C·m in⁻¹ 时, 考察保留时间及物料粒径对电阻率的影响规律. 试验结果如图 5 所示.

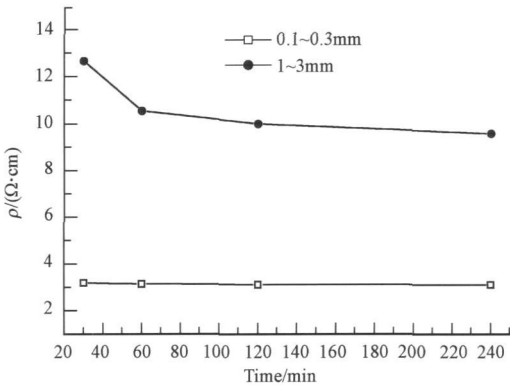


图 5 保留时间和粒径的影响 (20°C m in⁻¹)

Fig 5 Effects of Retention time or size of rice hull (20°C m in⁻¹)

研究表明,延长炭化终温时间有利于降低电阻率.在物料粒径较大(1~3mm)时,如将炭化时间从30min延长至240min,焦炭电阻率可从 $12.66\ \Omega\cdot\text{cm}$ 降低到 $9.56\ \Omega\cdot\text{cm}$,且在30~60min内的效果最为明显.当物料粒径较小(0.1~0.3mm)时,延长炭化终温时间对焦炭电阻的影响较小,如将炭化时间从30min延长至240min,焦炭电阻率仅从 $3.19\ \Omega\cdot\text{cm}$ 降低到 $3.11\ \Omega\cdot\text{cm}$.减小物料粒径可有效降低焦炭电阻率,这可能是由于稻壳粒径较小时传热传质效果较好,能在较短的时间内完成炭化反应;另外,小粒径焦炭的接触紧密,有效降低了焦炭颗粒间的接触电阻,故小颗粒原料获得焦炭的导电性能较大颗粒的好.

3.3 催化剂种类及配比对焦炭电阻率的影响

本文分析比较了镍基和铁基催化剂对稻壳焦炭电阻率的影响规律.当炭化终温为 900°C 、终温下的保留时间为30min、物料粒径为0.1~0.3mm、升温速率为 $20^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,稻壳焦炭电阻率如图6所示(∞ 表示没有添加催化剂).

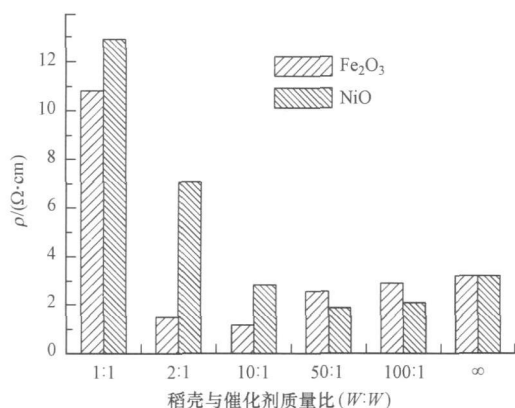


图6 900°C时催化效果分析

Fig. 6 Analysis of catalyst at 900°C

由图可以看出, Fe_2O_3 与NiO对稻壳焦炭的电阻率具有较大影响,这可能是由于铁基与镍基催化剂具有析氢作用,在生物质炭化过程中促进了C-H键的断裂,提高了焦炭的碳结构中离子基的缔合几率造成的.由于 Fe_2O_3 与NiO的电阻率分别为 $6.99 \times 10^5\ \Omega\cdot\text{cm}$ 和 $9.08 \times 10^5\ \Omega\cdot\text{cm}$,所以加入过多的催化剂会使焦炭电阻率增加.从试验结果中可以看出,稻壳与催化剂的最佳质量配比在50:1左右.

此外,本文还对不同炭化终温下催化炭化获得的焦炭电阻率进行了分析(稻壳:催化剂=50:1,稻壳粒径0.1~0.3mm,保留时间为30min),试验结果

如图7所示

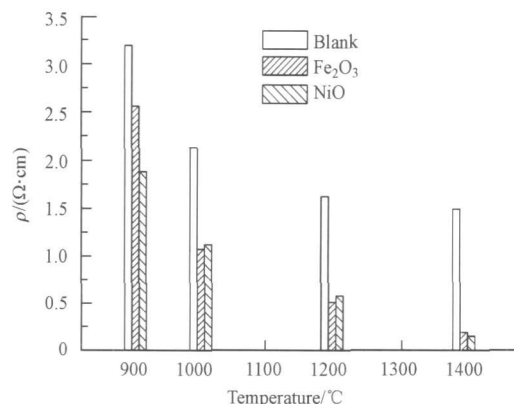


图7 不同温度下催化效果分析

Fig. 7 Analysis of catalyst at different temperatures

由图可以看出, 900°C 时NiO的催化效果略优于 Fe_2O_3 ,但随着炭化终温的提高,两者效果相近;当炭化终温提高到 1000°C 以上时,催化炭化的焦炭电阻率降低到 $1\ \Omega\cdot\text{cm}$ 以下;当炭化终温为 1400°C 时,焦炭电阻率降低到 $0.2\ \Omega\cdot\text{cm}$ 左右.

4 结论 (Conclusions)

1) 炭化终温对稻壳焦炭电阻率有较大影响;特别是在 1000°C 以下,提高炭化终温能将焦炭电阻率从 $10^6\ \Omega\cdot\text{cm}$ 以上降低到 $2.13\ \Omega\cdot\text{cm}$ 左右;而当炭化终温从 1000°C 提高到 1400°C 时,电阻率仅从 $2.13\ \Omega\cdot\text{cm}$ 左右降低到 $1.49\ \Omega\cdot\text{cm}$ 左右.提高升温速率会降低焦炭产率,而对焦炭电阻率的影响不大.焦炭结晶程度随温度升高而变大,这可能是焦炭电阻率随温度增加而降低的主要原因之一.

2) 延长炭化终温时间对降低电阻率有一定效果,但当物料粒径较小时作用几乎可以忽略;小颗粒物料获得焦炭电阻率较小.

3) Fe_2O_3 和NiO作为炭化催化剂,可有效降低焦炭电阻率,且作用效果相当;催化炭化时稻壳与催化剂的最佳配比在50:1左右.当炭化终温 $>1000^\circ\text{C}$ 、保留时间为30min、稻壳粒径0.1~0.3mm、稻壳:催化剂=50:1时,所获焦炭电阻率为 $0.2\sim 1.0\ \Omega\cdot\text{cm}$.

符号说明

A——灰分

C——碳

FC——固定碳

M——水分

Q——发热量 ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)

TT——炭化终温 (Termination Temperature) (°C)

V——挥发份

下角标

ad——空气干燥基

b——弹筒.

责任作者简介: 肖刚 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事生物质资源化, 洁净煤燃烧方面的教学与科研工作, E-mail: xiaogangtianm er@ seu. edu. cn

参考文献 (References):

- 曹青, 刘岗, 鲍卫仁, 等. 2007. 生物质与废轮胎共热解及催化对热解油的影响 [J]. 化工学报, 58(5): 1283—1289
- Cao Q, Liu G, Bao W R, *et al*. 2007. Influence of co-pyrolysis and catalysis of biomass with waste tire on pyrolytic oil properties [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering 58(5): 1283—1289 (in Chinese)
- 邓娜, 张于峰, 牛宝联, 等. 2005 医疗废物典型组分的热重分析及新的动力学模型 [J] 环境科学学报, 25(11): 1484—1490
- Deng N, Zhang Y F, Niu B L, *et al*. 2005. Thermogravimetric study and kinetic model on pyrolysis of medical waste compositions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 25(11): 1484—1490 (in Chinese)
- 干雅平, 申秀英, 许晓路. 2006 微波辐射对中枢神经系统影响的研究进展 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 24(10): 628—630
- Gan Y P, Shen X Y, Xu X L. 2006 Advance of research on effect of microwave on central nervous system [J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases 24(10): 628—630 (in Chinese)
- George L. 2001. High-capacity carbons for lithium-ion batteries prepared from rice husk [J]. Journal of Power Sources 97(2): 47—51
- Islam M N. 2000. Techno-economics of rice husk pyrolysis conversion with catalytic treatment to produce liquid fuel [J]. Bioresource Technology, 73(1): 67—75
- 刘贤森, 傅峰. 2005 木基电磁屏蔽 (导电) 功能复合材料的研究进展 [J]. 世界林业研究, 18(2): 57—62
- Liu X M, Fu F. 2005. Advances in electromagnetic shielding (electroconductive) wood-based composite [J]. World Forestry Research 18(2): 57—62 (in Chinese)
- 邵千钧, 徐群芳, 范志伟, 等. 2002 竹炭导电率及高导电率竹炭制备工艺研究 [J]. 林产化学与工业, 22(2): 54—56
- Shao Q J, Xu Q F, Fan Z W, *et al*. 2002. Study on electro-conductivity of bamboo Charcoal and technology of preparing high electro-conductivity bamboo charcoal [J]. Chemistry and Industry of Forest Products 22(2): 54—56 (in Chinese)
- Suzuki T, Yamada T, Okazaki N, *et al*. 2001. Electromagnetic shielding capacity of wood char loaded with nickel [J]. Materials Science Research International 7(3): 206—212
- 杨立军, 杜小泽, 杨勇平. 2007. 永磁梯度磁场布置方式对空气自然对流换热的影响 [J]. 化工学报, 58(12): 2980—2985
- Yang L J, Du X Z, Yang Y P. 2007. Influences of permanent gradient magnetic field configurations on air natural convection heat transfer [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering 58(12): 2980—2985 (in Chinese)
- 姚智兵, 蒋昊, 吴婷, 等. 2007. 电磁辐射的危害及防护 [J]. 中国社会科学杂志, 24(3): 177—179
- Yao Z B, Jiang H, Wu T, *et al*. 2007. The harm and prevention of electromagnetic radiant [J]. Chinese Journal of Social Medicine 24(3): 177—179 (in Chinese)
- 张文标, 华毓坤, 叶良明. 2002 竹炭导电机理的研究 [J]. 南京林业大学 (自然科学版), 26(4): 47—50
- Zhang W B, Hua J K, Ye L P. 2002. A study on mechanism of electric conduction of bamboo charcoal [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 26(4): 47—50 (in Chinese)