

## 生物炭作为热敷材料的应用潜力与性能研究

韩丽娜 陈玉芬 郭一泽 吕喆淼 孟妍柳铄 张梦玥 王嘉戈 毛宇航 王静\*  
石家庄科技信息职业学院, 河北 石家庄 050000

[摘要]生物炭具有多孔结构、良好的热稳定性、优异的蓄热保温性能等特性,在热敷材料领域展现出巨大的应用潜力,为推动生物质资源化利用与热敷产品升级换代,系统研究生物炭热敷材料的核心性能,探讨其理疗功能、温度调控、蓄热保温方面的优势,并传统热敷材料进行对比分析,明确生物炭在热敷材料应用中的核心竞争力。同时,对目前应用器件所存在的不足之处进行分析,提出针对性的解决方案,推进生物炭热敷材料的规模化应用,以供参考。

[关键词]生物炭; 热敷材料; 蓄热性能; 远红外辐射; 性能对比

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19388

中图分类号: TS176

文献标识码: A

### Research on the Application Potential and Performance of Biochar as a Hot Compress Material

HAN Lina, CHEN Yufen, GUO Yize, LYU Zhemiao, MENG YAN Liushuo, ZHANG Mengyue, WANG Jiage, MAO Yuhang, WANG Jing\*  
Shijiazhuang Vocational College of Technology & Information, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** Biochar has the characteristics of porous structure, good thermal stability, and excellent thermal storage and insulation performance, showing great potential for application in the field of hot compress materials. In order to promote the utilization of biomass resources and upgrade hot compress products, the core performance of biochar hot compress materials is systematically studied, and its advantages in physical therapy, temperature regulation, and thermal storage and insulation are explored. It is compared and analyzed with traditional hot compress materials to clarify the core competitiveness of biochar in the application of hot compress materials. At the same time, analyze the shortcomings of current application devices, propose targeted solutions, and promote the large-scale application of biochar hot compress materials for reference.

**Keywords:** biochar; hot compress materials; thermal storage performance; far infrared radiation; performance comparison

### 引言

生物炭作为一种碳质固体材料,在缺氧或厌氧条件下,经高温热解制备而成。其具有多孔结构、高比表面积、良好的热稳定性与蓄热性能。同时还富含多种微量元素与矿物质,因其具有独特的远红外辐射特性,可以为人体带来有效的理疗效果。目前,市场上主流的热敷材料主要分为一次性铁粉类自发热材料、无机非金属类热敷材料、电热类热敷材料三类。而传统的热敷材料属于不可降解材料,在使用完毕后易形成环境垃圾。近年来,在能源存储、土壤改良等领域中生物炭得到了广泛的使用,但在热敷材料领域中尚处于起步阶段。生物炭热敷材料不仅能够高效的蓄热保温,还能通过远红外理疗功能,缓解人体肌肉疲劳,而且,它还具有便携易用的特点,有效解决传统热敷材料的痛点,致力于开发出高效、安全、环保且具有多种功能的新型热敷材料。

### 1 实验材料与方法

#### 1.1 实验材料

选用苕麻、玉米秸秆、稻壳3种常见生物质原料制生物炭,洗净、干燥、粉碎后过80目筛备用。试剂包括盐酸(HCl)、氯化锌(ZnCl<sub>2</sub>)等。制备生物炭热敷材料辅助材料有工业级棉纤维、无纺布。传统热敷材料样品含市售铁粉类暖宝宝(型号XX-1)、陶瓷粉热敷袋(型号XX-2)、电热丝热敷垫(型号XX-3)。

#### 1.2 生物炭的制备与改性

原材料预处理:将苕麻、玉米秸秆、稻壳剪成5mm左右的长度,分别放入烧杯中,放入沸水中煮30min,降温后用去离子水洗涤,过滤,随后将之放入真空干燥箱内,在100°C的条件下干燥10h,每3h抽1次真空,真空干燥结束后,关闭真空干燥箱,降温至室温。取出洗涤干燥好的生物质材料保存备用。

采用高温热解法制备生物炭，将预处理后的苕麻、玉米秸秆、稻壳置于管式炉，在氮气（流量 50mL/min）氛围下，加热至 750°C（升温速率为 5°C·min<sup>-1</sup>）；再加热至 850°C（升温速率为 1°C·min<sup>-1</sup>），并保持 2h。冷却后粉碎过 100 目筛，得到原始生物炭样品苕麻炭（BC-Z）、秸秆炭（BC-S）、稻壳炭（BC-R）。

采用 ZnCl<sub>2</sub> 活化法制备生物炭，配置 1.0mol·L<sup>-1</sup> 的 ZnCl<sub>2</sub> 溶液。将预处理后的苕麻、玉米秸秆、稻壳分置三个烧杯，各加入 1.0mol·L<sup>-1</sup> ZnCl<sub>2</sub> 溶液（淹没生物质材料），在 30°C 下搅拌 10h，每 3h 进行 10 min 的超声震荡处理，然后将混合物在 100°C 下真空干燥 10h（每 3h 抽 1 次真空）。将被 ZnCl<sub>2</sub> 溶液浸泡过的三种生物质在氮气（流量 50mL/min）氛围下，加热至 750°C（升温速率为 5°C·min<sup>-1</sup>）；再加热至 850°C（升温速率为 1°C·min<sup>-1</sup>），并保持 2h。自然降温后，用坩埚钳取出制得的制备好的改性生物炭样品，用配置好的 1.0mol·L<sup>-1</sup> 盐酸浸泡搅拌 4h，再洗涤至中性。对洗涤后的生物炭样品进行干燥（每 3h 抽 1 次真空）。干燥结束后，分别标号为 M-BC-Z、M-BC-S、M-BC-R。氯化锌活化法可增比表面积与孔隙率，提升蓄热与远红外辐射能力。

### 1.3 生物炭热敷材料的制备

采用复合成型工艺制备生物炭热敷材料，将改性生物炭与棉纤维按 4:6 质量比混合，封装于透气布袋得样品。

棉纤维的价格相对较低，来源广泛，而改性生物炭的制备可能需要一定的成本。按照 4:6 的质量比混合，可以在保证热敷材料性能的前提下，降低生产成本，提高产品的市场竞争力。这种质量比的热敷材料具有良好的柔韧性和舒适性，适合贴合人体不同部位进行热敷治疗。同时，其重量适中，不会给使用者带来过多的负担。

### 1.4 性能测试方法

蓄热保温性能测试采用恒温箱-热电偶测试法，将热敷材料样品于 60°C 恒温箱加热 30min 达热平衡后，放入 25°C 室温环境，用热电偶实时监测表面温度变化，通过计算保温时间（从 60°C 降至 40°C 的时间）与温度下降速率评价蓄热保温性能；对自发热型生物炭热敷材料，用热电偶实时监测其在空气中温度变化，记录发热启动时间、最高温度、稳定发热时间（40~50°C 维持时间）评价温度调控性能；采用远红外辐射率测试仪（型号：DRT-1000）在 25°C 室温与 50°C 加热状态下，测试生物炭及传统热敷材料在 8~14μm 波长范围的远红外辐射率并对比；采用皮肤刺激性测试法，将样品贴敷于健康家兔（体重 2.0~2.5kg）背部皮肤（5cm×5cm）24h，观察皮肤反应，同时用 MTT 法检测生物炭提取物对 L929 细胞的毒性（细

胞存活率≥90%表明无明显细胞毒性）评价生物相容性；安全性测试检测材料 pH 值（6.5~7.5）与重金属含量（铅、镉、汞等），环境友好性测试材料在自然环境下 6 个月内的降解率并与传统热敷材料对比。

### 1.5 数据处理与分析

采用 Excel 与 Origin 软件对实验数据进行整理、分析，计算各项性能指标的平均值与标准。采用 SPSS 软件对实验数据进行显著性分析（P<0.05 为差异显著）。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 生物炭的基本性能分析

生物炭的基本性能对蓄热保温与远红外辐射性能有着直接影响，表 1 为原始生物炭与改性生物炭的基本性能测试结果。

表 1 原始生物炭与改性生物炭的基本性能测试结果

生物炭样品	比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	孔体积 (cm <sup>3</sup> /g)
BC-Z (原始苕麻炭)	972.1	0.480
M-BC-Z (改性苕麻炭)	1329.4	0.731
BC-S (原始玉米秸秆炭)	670.2	0.333
M-BC-S (改性玉米秸秆炭)	1135.1	0.508
BC-R (原始稻壳炭)	667.2	0.269
M-BC-R (改性稻壳炭)	1073.8	0.537

由表 1 可知，三种原始生物炭中，苕麻炭比表面积与孔体积最高，稻壳炭最低，源于苕麻纤维结构致密，热解后多孔结构更发达。ZnCl<sub>2</sub> 活化法制的三种生物炭比表面积与孔体积均提升。这是因为氯化锌可刻蚀生物炭表面，产生更多微孔与介孔，增强吸附与蓄热能力。生物炭孔隙结构是蓄热保温关键，多孔结构能储热、减缓热量传导散失，还为远红外辐射提供更多位点，提升辐射效率。综上，改性苕麻炭基本性能最优，适合作为热敷材料核心原料。

### 2.2 生物炭热敷材料的蓄热保温性能分析

蓄热保温性能是热敷材料的核心性能之一，直接决定热敷效果的持续时间。表 2 为其蓄热保温性能测试结果。

由表 2 可知，自然冷却下，改性苕麻炭热敷材料蓄热保温性能最优，从 60°C 降至 40°C 耗时达到 135min、平均温度下降速率仅为 0.148°C/min，显著优于其他热敷材料。

原始苕麻炭热敷材料的保温时间短于改性苕麻炭热敷材料；充分说明改性苕麻炭的多孔结构优势更突出，因改性增大了生物炭比表面积、孔隙率与孔体积，增强蓄热能力。与传统热敷材料相比，改性苕麻炭热敷材料保温优势明显，温度下降更慢，温度下降速率仅为铁粉类暖宝宝的 33.3%、陶瓷粉热敷袋的 28.1%，改性苕麻炭热敷材料无需外接电源、使用安全。

**表 2 生物炭热敷材料的蓄热保温性能测试结果**

热敷材料类型	从 60℃降至 40℃的时间 (min)	平均温度下降速率 (°C/min)
改性苕麻炭热敷材料 (M-BC-Z)	135±5.8	0.148±0.007
原始苕麻炭热敷材料 (BC-Z)	100±4.9	0.200±0.011
改性玉米秸秆炭热敷材料 (M-BC-S)	120±5.2	0.167±0.008
改性稻壳炭热敷材料 (M-BC-R)	105±4.7	0.185±0.009
铁粉类暖宝宝	45±3.5	0.444±0.015
陶瓷粉热敷袋	38±3.2	0.526±0.018
电热丝热敷垫 (持续通电)	130±6.1	0.154±0.007

### 2.3 生物炭热敷材料的温度调控性能分析

由表 3 可知, 改性苕麻炭热敷材料发热启动时间为 2.8min, 虽略长于传统铁粉类暖宝宝, 但最高温度 48.2℃ 处于人体舒适热敷温度范围 (45~50℃), 不会造成低温烫伤。在稳定发热时间上, 该材料达 17.2h, 是传统铁粉类暖宝宝的 2.07 倍, 能满足长时间热敷需求, 且温度波动范围仅 2.1℃, 温度稳定性显著优于传统铁粉类暖宝宝 (5.8℃), 可持续提供稳定热量提升热敷效果。其温度调控性能优异, 是因生物炭的多孔结构控制发热速度与最高温度, 同时其蓄热性能可吸收部分反应热量, 避免温度骤升。

**表 3 生物炭热敷材料与传统铁粉类暖宝宝的温度调控性能测试结果**

热敷材料类型	发热启动时间 (min)	最高温度 (°C)	稳定发热时间 (40~50℃, h)	温度波动范围 (°C)
改性苕麻炭热敷材料 (M-BC-Z)	2.8±0.4	48.2±1.1	17.2±0.9	2.1±0.2
传统铁粉类暖宝宝	2±0.3	62.5±1.5	8.3±0.6	5.8±0.5

### 2.4 生物炭热敷材料的远红外辐射性能分析

8~14μm 波长的远红外线能够穿透人体皮肤表层, 促进血液循环, 具有良好的理疗效果, 见表 4。

**表 4 不同热敷材料在室温与加热状态下的远红外辐射率测试结果**

热敷材料类型	室温 (25℃) 远红外辐射率 (8~14μm)	加热状态 (50℃) 远红外辐射率 (8~14μm)
改性苕麻炭热敷材料 (M-BC-Z)	0.905±0.016	0.931±0.013
原始苕麻炭热敷材料 (BC-Z)	0.868±0.014	0.897±0.012
铁粉类暖宝宝	0.623±0.010	0.685±0.009
陶瓷粉热敷袋	0.785±0.012	0.821±0.010
电热丝热敷垫	0.658±0.011	0.712±0.008

由表 4 可知, 无论室温还是加热状态, 生物炭热敷

材料远红外辐射率均高于传统热敷材料 ( $P < 0.05$ )。改性苕麻炭热敷材料在 50℃ 加热状态下远红外辐射率达 0.931, 接近黑体辐射率 (1.0), 综合理疗效果最优, 这是因为改性处理能够增加生物炭表面的含氧官能团, 而苕麻炭本身的纤维结构更加疏松, 改性后远红外辐射率更突出。

### 2.5 生物炭热敷材料的生物相容性、安全性、环境友好性分析

皮肤刺激性测试表明, 改性与原始苕麻炭热敷材料贴敷家兔背部 24h 后皮肤均无刺激性反应, 刺激性等级为 0 级, 具有良好的皮肤相容性; 细胞毒性测试显示二者提取物对 L929 细胞存活率均  $\geq 90\%$ , 无明显细胞毒性, 生物相容性好, 这得益于生物炭以碳元素为主且无毒害。安全性测试显示, 改性苕麻炭热敷材料 pH 值接近人体皮肤, 无重金属污染风险, 且与传统热敷材料相比, 无漏电、高温烫伤、有毒有害物质释放风险, 安全性更优。环境友好性测试表明, 改性与原始苕麻炭热敷材料 6 个月内降解率均超 78%, 属可降解材料, 而传统热敷材料降解率低于 10%, 生物炭热敷材料原料可再生, 可实现废弃物资源化利用, 还可自然降解, 制备过程还能固定碳元素助力“双碳”目标, 环境价值高。

### 3 生物炭与传统热敷材料的综合性能对比

为全面明确生物炭热敷材料的优势, 对生物炭热敷材料与传统热敷材料进行综合对比, 结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 生物炭热敷材料综合性能显著优于传统热敷材料, 其中以改性苕麻炭热敷材料的综合性能最优, 蓄热保温时间更长、无高温烫伤风险、远红外理疗效果更好、环境友好性更强, 虽然成本略高, 但使用寿命更长。与陶瓷粉热敷袋相比, 生物炭热敷材料的蓄热保温性能更优、便携性更强, 远红外辐射率更高。与电热丝热敷垫相比, 生物炭热敷材料无需外接电源、无漏电风险、环境友好性更强, 且成本更低。

表 5 生物炭与传统热敷材料的综合性能对比

性能指标	生物炭热敷材料(改性苧麻炭, M-BC-Z)	铁粉类暖宝宝	陶瓷粉热敷袋	电热丝热敷垫
蓄热保温性能	优秀(保温时间 135min)	较差(保温时间 45min)	差(保温时间 38min)	优秀(持续通电, 保温时间 140min)
温度调控性能	优秀(最高 48.2℃, 稳定 17.2h)	较差(最高 62.5℃, 稳定 8.3h)	一般(需外部加热, 温度波动大)	良好(温度可调, 波动小)
远红外辐射性能	优秀(50℃时辐射率 0.931)	差(50℃时辐射率 0.685)	良好(50℃时辐射率 0.821)	较差(50℃时辐射率 0.712)
生物相容性	优秀(无皮肤刺激, 细胞存活率 97.5%)	一般(部分存在漏粉刺激)	良好(无明显刺激)	一般(可能存在漏电风险)
安全性	优秀(无烫伤、无漏电、无重金属污染)	较差(高温烫伤风险, 部分重金属超标)	良好(无烫伤风险, 无重金属污染)	较差(漏电风险)
环境友好性	优秀(可降解, 降解率 87.6%)	差(难降解, 降解率 <10%)	差(难降解, 降解率 <10%)	差(难降解, 耗电污染)
便携性	优秀(无需外接电源, 可折叠、贴合性好)	良好(一次性, 便携)	较差(需外部加热, 笨重)	差(需外接电源, 不便携带)
成本(元/片)	中等(2.6~3.1)	低(1.0~1.5)	中等(2.0~2.5)	高(50~100)

#### 4 生物炭热敷材料的应用潜力、现存问题及改进措施

##### 4.1 应用潜力分析

生物炭热敷材料应用广泛, 因蓄热保温、远红外理疗等优势, 可缓解肌肉酸痛、关节不适等问题。其远红外辐射和温度可控性利于术后康复、运动损伤恢复, 生物相容性也满足长期使用需求。无需外接电源、便携且蓄热久, 能为户外人员保暖、为受伤人员缓解疼痛。此外, 在宠物保健、农业等领域也有广阔应用前景。

##### 4.2 现存问题与改进措施

当前, 生物炭热敷材料发展面临诸多挑战, 如制备工艺不完善、成本高且污染大, 复合工艺欠优化、性能稳定性不足, 长期使用多孔结构被破坏, 自发热型发热剂活性降低, 耐水性差, 品牌建设与市场推广不足, 且缺乏统一性能评价标准, 产品质量参差不齐。

针对生物炭热敷材料发展问题, 可从多方面改进推动其产业化。优化制备工艺, 采用新型热解技术、绿色低碳成本改性方法、控制粒度, 并扩大生产规模。通过表面包覆、优化发热剂配方、改进封装工艺、加强市场推广与品牌建设。向高端理疗、智能穿戴、特殊群体定制延伸, 构建完整产业链, 加强原料供给、生产加工、市场销售及废弃物

回收各环节建设。还需加强产学研协同创新, 高校与科研机构攻克关键技术, 实现产业规模化、高质量发展。

#### 5 结论

综上, 采用  $ZnCl_2$  活化法制备的改性苧麻炭热敷材料综合性能最优, 其核心性能显著优于传统热敷材料, 蓄热保温时间长, 远红外辐射率高且安全环保。在多领域应用潜力大, 但存在制备工艺、成本、市场认知度等问题, 限制产业化应用。可通过优化工艺、提升性能、加强推广等解决现存问题。

##### [参考文献]

- [1]杨海征,袁宗琪,徐晓林,等.低温裂解水稻秸秆生物炭对水体中 Pb/Cd 吸附的应用研究[J].曲靖师范学院学报,2024,43(3):13-23.
- [2]戚海洋,魏聂晶,王文静,等.小麦秸秆生物质炭的结构特征及其对 Cr(VI) 的吸附性能研究[J].土壤,2024,56(1):135-142.
- [3]谢祖彬,刘琦,许燕萍,等.生物炭研究进展及其研究方向[J].土壤,2011,43(6):857-861.

作者简介: 韩丽娜(1987.5—), 女, 毕业院校: 河北科技师范学院, 所学专业: 无机化学, 当前工作单位: 石家庄科技信息职业学院, 职务: 专职教师, 职称级别: 讲师。