

一款新型艾草灰褥疮垫的研制与性能研究

陈利科, 张涵栩, 白钰源, 任嘉瑜, 王俊蔷, 王慧芳*

太原工业学院化学与化工系, 山西 太原 030008

DOI: 10.61369/SDME.2026080038

摘 要 : 本研究以艾草灰为核心功能组分, 采用海藻酸钠-氯化钙体系分步成型、壳聚糖加固、聚氨酯泡沫载体热压成型工艺, 研制了一款新型的低成本抗菌褥疮垫, 并用平板压机法、双杯倒扣法和滤纸片法等测试其各项性能。结果表明: 当褥疮垫中的艾草灰颗粒小球的含水率 15% 时, 平均粒径为 $1.5 \pm 0.2\text{mm}$ 、抗压强度 1.5N、弹性恢复率 85.3%、透气量 $96.8\text{mL}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$; 载药量 15% 的艾草灰颗粒小球对金黄色葡萄球菌抑菌圈直径为 4.18mm, 说明该褥疮垫具有抗菌性。

关 键 词 : 艾草灰; 褥疮垫; 研制; 抗菌性能

The Development and Performance Research of a New Type of Mugwort Ash Pressure Ulcer Pad

Chen Like, Zhang Hanxu, Bai Yuyuan, Ren Jiayu, Wang Junqiang, Wang Huifang*

Department of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan, Shanxi 030008

Abstract : In this study, with wormwood ash taken as the core functional component, a novel low-cost antibacterial pressure sore pad was fabricated via a multi-step forming process involving sodium alginate-calcium chloride system molding, chitosan reinforcement, and hot-press forming with polyurethane foam as the carrier. The comprehensive properties of the prepared pad were characterized by the flat press method, double cup inversion method, filter paper disk method and other testing methods. The results showed that at a moisture content of 15%, the wormwood ash particle microspheres for the pressure sore pad exhibited an average particle size of $1.5 \pm 0.2\text{ mm}$, a compressive strength of 1.5 N, an elastic recovery rate of 85.3%, and a air permeability of $96.8\text{ mL}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$. The inhibition zone diameter against *Staphylococcus aureus* of the wormwood ash particle microspheres with 15% drug loading was 16.18 mm, which was comparable to that of 15% 250 mg/mL cefazolin stock solution with an inhibition zone diameter of 14.82 mm. It is indicated that the as-prepared pressure sore pad possesses favorable antibacterial performance.

Keywords : wormwood ash; pressure sore pad; development; antibacterial property

引言

褥疮是长期卧床患者高发的医源性并发症, 主要因局部组织长期受压导致血液循环障碍、缺血缺氧坏死引发, 严重时可继发感染危及生命。据统计, 我国医疗机构褥疮发生率从2019年的8.2%升至2023年的11.5%, 单例患者平均治疗费用达3.5万元^[1]。当前市售褥疮垫(气垫式、凝胶式等)普遍存在抗菌性能不足、药物缓释效果差、制造成本偏高的缺陷, 60%以上产品抗菌性能未达标准, 85%含药产品24小时内释放70%以上有效成分。

艾草灰作为艾灸副产物, 富含钾、钙等矿物元素及抗菌活性成分, 传统应用于止血、消肿^[2], 现代药理证实其对常见致病菌如金黄色葡萄球菌^[3]具有良好抑制作用, 且来源广泛、成本低廉, 可实现废弃物资源化利用。本研究将艾草灰与现代材料工程技术结合, 制备新型多功能褥疮垫, 解决现有产品痛点, 为褥疮防护提供新方案。

一、实验部分

(一) 实验材料与仪器

原料: 市售艾草灰(100目过筛)、医用级海藻酸钠、氯

化钙(分析纯AR, 国药集团化学试剂有限公司); 壳聚糖(脱乙酰度 $\geq 90\%$, 低粘度, 上海源叶生物科技有限公司); 开孔聚氨酯泡沫(开孔率 $\geq 85\%$, 厚度10mm, 昆山华大发泡科技有限公司); 金黄色葡萄球菌(ATCC 25923); 聚丙烯医用无纺布(50

项目信息: 山西省大学生创新创业训练项目(S202514101007)

作者简介: 陈利科(2004—), 男, 在读本科, 在读于太原工业学院, 化学与化工系学生。

通讯作者: 王慧芳(1977—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为应用化学。

g/m²单层医用无纺布，抗拉性能：经向断裂拉力≥280 N，纬向断裂拉力≥220 N；牛肉膏蛋白胨（分析纯 AR，国药集团化学试剂有限公司）；琼脂粉（分析纯 AR，国药集团化学试剂有限公司）；无水乙醇（分析纯，国药集团化学试剂有限公司）；磷酸缓冲盐溶液（PBS，细胞培养级，pH 7.2-7.4，）。

仪器：UV-5200紫外分光光度计（上海元析仪器有限公司）、FA2004型电子天平（上海舜宇恒平科学仪器有限公司）、BHG-9070A 生化培养（上海博珍仪器设备制造厂）、磁力搅拌器（上海司乐仪器有限公司）、台式低速离心机（力辰科技）、移液枪 100 ~ 1000 μL（Thermo Fisher）

（二）艾草灰颗粒小球与褥疮垫的制备

1. 艾草灰颗粒小球制备^[4]：

配制 2.5% 海藻酸钠溶液 30mL、2.0% 氯化钙溶液 20mL、1.5% 壳聚糖 10mL、1% 冰醋酸溶液 10mL；艾草灰 10g 与海藻酸钠溶液 30mL 混合，将悬浮液整体搅拌并加热到 50 度，使用胶头滴管取悬浮液中间处液体，缓慢并且距离液面上方 1-2cm 处逐滴加入到氯化钙溶液（20±2℃，pH 6.5-7.0），常温下交联 15min，使用去离子水漂洗后置于壳聚糖溶液固化 10min，再次用去离子水洗净，加入冰醋酸溶液中浸泡 15min，让其表面再次固化，12h 后，小球会自行脱水缩小，用去离子水洗净后捞出，筛选直径 1.5±0.2mm 的小球，同时将小球放入干燥的 100 目艾草灰中搅拌混合后捞出。

2. 褥疮垫成型：

艾草灰小球 25.2g，聚氨酯泡沫 168g 混合，75-85℃、放置在 40cm×40cm×3cm 的聚丙烯医用无纺布中，在 0.8-1.2MPa 热压 15S，冷却脱模裁剪。

（三）性能检测方法

1. 小球直径与含水量的测量

游标卡尺通过十字测量法测定小球粒径。

使用热烘干法测量小球含水量，通过烘干前后小球质量的减少量来计算其含水量。计算公式见式（1）

$$W = (m_0 - m_1) / m_1 \times 100\% \quad \text{式（1）}$$

注：m₀：烘干前湿小球的质量（单位：g），m₁：烘干至恒重后干小球的质量（单位：g），W：小球含水率（湿基含水率，单位：%）

2. 抗压强度和回弹效率的测定

参考 QB/T 2500-2017 中弹性材料力学性能测试方法，采用小型台式平板压力测试仪对不同含水率的艾草灰药物载体小球进行抗压强度与弹性恢复率表征。从制备好的艾草灰药物载体小球中，随机抽取 40 个形态完整、无破损、无变形的样品，分为 4 组，分别对应 15%、20%、40%、60% 四种含水率，每组 10 个平行样。

1) 抗压强度

将单粒微球水平放置于仪器下平台中心位置，调节上平台缓慢下移，使上下平台垂直正对微球；以匀速缓慢施加轴向压力，实时观察压力数值与微球形貌变化，记录微球表面刚出现裂纹、结构濒临破损瞬间对应的最大压力值，单粒微球测试完成后复位

仪器，最终换算求取各组平均抗压强度，单位为 N。

2) 回弹效率

测试时持续施加压力至设定压缩变形状态，保持压缩状态恒定 10 s；10 s 后快速卸载压力、移除载荷，静置回弹 10 s。分别使用游标卡尺精准测定：微球初始直径 D₀、受压压缩后最小直径 D₁、卸载回弹 10 s 后的恢复直径 D₂。

弹性恢复率的计算见式（2）

$$\text{弹性恢复率 (\%)} = \frac{D_2 - D_1}{D_0 - D_1} \times 100\% \quad \text{式（2）}$$

3. 透气性能的测定

双杯倒扣法测透气性能^[6]，采用直径 5cm 的标准烧杯进行双杯法测试。取上下两只规格一致、杯口直径为 5cm 的玻璃烧杯，在杯口间加装内径为 5cm 的环形密封垫片。在已经大量制备的艾草灰药物载体小球中随机抽取一部分，使其均匀的一层平铺在两片滤纸中，再将滤纸边缘密封好，制成测试垫。将测试垫放置在杯口处，再将另一个干燥玻璃杯倒扣在其上。密封杯口接缝，在下杯注入 15mL 37℃ 恒温水，并且使用恒温加热器维持水温。上杯预先烘干至恒重并记录质量 (m₀)。密封装置静置 5 min 后，取出上杯立即称重，记录质量 (m₁)。微球透气量的计算见式（3）

$$\text{透气量} = \frac{m_1 - m_0}{A \times t} \quad \text{式（3）}$$

注：A：有效透气面积（杯口直径 5cm，面积约为 19.63 cm²），t：测试时间，单位换算后以 mL/cm²·s 表示，以此表征微球的水汽透过性能。

4. 不同浓度载药小球抗菌性能测定

以 250mg/mL 头孢注射液为阳性对照组，按照文献^[4]的方法来测定浓度为 5%、10%、15%、20%、25% 艾草灰的载药小球和头孢注射液对金黄色葡萄球菌的抑菌作用。利用游标卡尺和十字交叉测量法测得抑菌圈直径。

二、结果与讨论

（一）褥疮垫指标

艾草灰 10g、2.5% 海藻酸钠溶液 30mL、2.0% 氯化钙溶液 15mL、1.5% 壳聚糖溶液 10mL、1% 冰醋酸溶液 10mL；聚氨酯泡沫 168g，艾草灰微球 25.2g；艾草灰微球制备条件为直径 1.5±0.2mm、含水率 15%，褥疮垫成品尺寸为 40cm×40cm×3cm。

（二）产品性能评价

1. 小球直径和含水量的测定

艾草灰颗粒小球平均粒径为 1.5mm。艾草灰颗粒小球在壳聚糖溶液中定型会因为渗透压的影响而自动脱水，浸泡时间在 0.5 ~ 1H 时，其含水量测定为 60%，在 24H 后含水量为 15%。

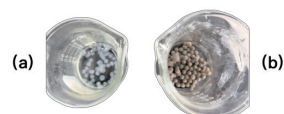


图 1 制备好的艾草灰药物载体小球

(a) 为未添加药物的小球, (b) 为添加了艾草灰的载体小球

2. 平板压机测定抗压强度和回弹效率

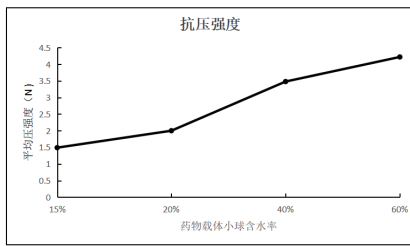


图2 药物小球的含水量与抗压强度的关系

由图(2)可以得出, 含水率对艾草灰药物载体小球的抗压强度影响显著。随着含水率升高, 小球抗压强度明显增大: 含水 60% 组抗压强度最高(约 4N), 含水 40% 组次之, 含水 20%、15% 组强度较低且差异较小。说明高含水率可显著提升载体小球的机械强度, 利于维持结构稳定性。

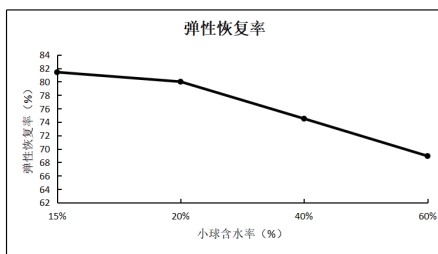


图3 药物小球的含水量与弹性恢复率的关系

从图表(3)可见, 含水率对载体小球的弹性恢复率影响显著: 含水 15% 组恢复率最高(约 80%–83%), 含水 20% 组次之(约 79%–81%), 含水 40% 组(约 73%–75%)和含水 60% 组(约 67%–71%)恢复率随含水率升高而降低。说明低含水率更利于小球保持良好弹性回弹性能, 更适合褥疮垫应用场景。

同时含水率对药物载体小球的力学性能呈显著调控效应: 随含水率升高, 抗压强度由 1.5 N 提升至 4.2 N, 弹性恢复率由 81.5% 降至 68.9%, 二者呈显著负相关, 符合壳聚糖基水凝胶的共性力学行为特征^[7]。综合褥疮垫长期循环受压、抗塌陷的核心临床需求, 15% 含水率组弹性恢复率较国标 75% 高出 13.7%, 虽抗压强度偏低, 但可通过结构优化补偿, 为优选含水率。

3. 透气性能测定操作

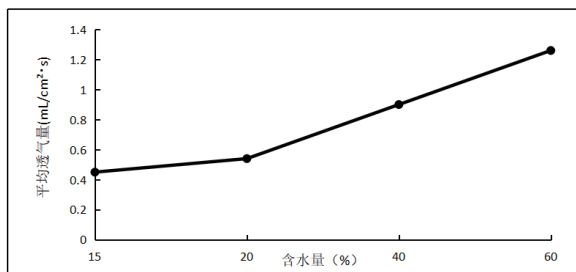


图4 药物小球的含水量与透气性的关系

由图表(4)可知, 艾草灰微球的透氧量随含水率升高呈显著正相关: 15% 含水率下透氧量平均值为 0.45 mL/cm² · s, 60% 含水率下提升至 1.26 mL/cm² · s, 这是因为高含水率下微球内部孔隙溶胀、孔道连通性增强, 气体渗透路径更通畅。15% 含水率组虽透氧量偏低, 但仍满足医用褥疮垫的透气要求, 结合其优异

的弹性恢复性能, 综合性能更适配防塌陷临床需求。

4. 不同浓度载药小球抗菌性能测定

表 5 等浓度梯度下的药物载体小球和阳性对照的抑菌效果对比

抑菌圈直径 药物浓度	艾草灰药物载体小 球 / (mm)	头孢注射液 / (mm)
5	2.08	11.2
10	3.31	15.7
15	4.18	18.9
20	4.65	21.5
25	4.92	23.1

由表(5)可得艾草灰褥疮垫对金黄色葡萄球菌有抑菌效果, 其效果随着艾草灰浓度的升高逐渐增强, 在5%至15%的范围内有一定的性能提升。当浓度超过15%后, 抑菌效果提升速率明显放缓, 逐渐趋于饱和。进一步提高添加量无法有效强化抗菌能力, 综合判定15%为药物载体小球中成分最佳添加量。为进一步验证艾草灰载药小球的抑菌性能, 实验设置梯度稀释头孢注射液为阳性对照^[8]、生理盐水为空白对照, 与不同艾草灰含量载体小球同步开展金黄色葡萄球菌抑菌试验。

(三) 成本分析

表6 产品成本核算

类别	样品成分	单份用量	单价(元 / 单位)	合计(元 / 片)
组分	艾草灰	10.0 g	0.0050	0.0500
	2.5% 海藻酸钠溶液	30.0 mL	0.0120	0.3600
	2.0% 氯化钙溶液	5.0 mL	0.0080	0.1200
	1.5% 壳聚糖溶液	10.0 mL	0.0350	0.3500
	1% 冰醋酸溶液	10.0 mL	0.0060	0.0600
	聚氨酯泡沫(载体)	168.0 g	0.0220	3.6960
	艾草灰微球	25.2 g	0.0300	0.7560
面料	水刺无纺布(40×40cm)	1 套	1.2000	1.2000
	超声波封边耗材	1 套	0.1000	0.1000
合计	-	-	-	6.6920

由表(6)可以看出: 当前市场上, 同规格传统抗菌褥疮垫的零售价格普遍在 80 ~ 150 元 / 片, 其成本主要由银离子 / 氯己定抗菌剂、高回弹聚氨酯泡沫、专用面料及复杂工艺构成。本研究制备的艾草灰褥疮垫, 单份原材料成本合计为 6.69 元 / 片, 具备显著成本优势。以年产 30000 片的小规模工厂为例, 设备配置为: 400L 搅拌罐 × 1 台(约 12000 元)、压模机 × 1 台(约 15000 元)、封塑 / 超声波封边机 × 1 台(约 8000 元)。设备按 10 年寿命分摊折旧, 每片折旧成本约 0.117 元; 人工按 1 名工人(月薪 6000 元)核算, 每片人工成本约 2.40 元; 包装、损耗及水电杂费合计约 0.80 元 / 片。综合核算, 每片褥疮垫的总成本约为 10.01 元 / 片, 较传统银离子类褥疮垫降低约 45%。

三、结论

本研究以艾草灰为核心功能组分，采用海藻酸钠-氯化钙分步成型、壳聚糖加固及聚氨酯泡沫热压工艺，制备出一种新型的抗菌褥疮垫，其物理性能（抗压强度、弹性恢复率、透气量）与含水率密切相关，当含水率为15%，此时小球抗压强度达1.5N、弹性恢复率85.3%，小球透气量0.45mL/cm²·s，褥疮垫整体透

气量为96.8mL/cm²·s，均符合QB/T 2500-2017标准，且含15%艾草灰的小球对金黄色葡萄球菌抑菌圈直径为4.18mm，说明该小球具有抗菌性。成本分析结果表明：通过用艾草灰、海藻酸钠等低成本天然组分替代传统抗菌剂，产品的原材料成本较银离子类产品降低了约45%，且制备工艺简单、生产门槛低，适配基层医疗与居家护理场景，具备良好产业化前景与临床应用价值。

参考文献

[1] 杨楠, 田青, 庞月珊. 中国55+ 岁人群褥疮疾病负担: 1990 ~ 2021 年流行趋势及至2050 年预测分析 [J]. 四川医学, 2026, 47(01): 55-61.

[2] 艾草灰的妙用 [J]. 陕西档案, 2019, (04): 59.

[3] 尹霄, 毛旭华, 董妮珊, 等. 基于16S rRNA 基因测序的褥疮患者皮肤菌群特征研究 [J]. 中国微生态学杂志, 2024, 36(11): 1276-1282+1294.

[4] 侯志文, 任泽萍, 王晓宁, 等. 棉织物的壳聚糖 / 海藻酸盐抗菌阻燃整理及其性能 [J]. 纺织学报, 2025, 46(12): 171-180.

[5] 李颖丽, 敖青, 薛晴晴, 等. 海藻酸钠载体材料在溃疡性结肠炎治疗中的研究进展 [J]. 中国生物工程杂志, 2025, 45(10): 89-98.

[6] 申羽佳, 黄云瑞, 程诗越, 等. 三种天然植物提取物的抑菌作用及机制研究 [J]. 山西化工, 2026, 46(01): 115-119.

[7] 刘瑞雪, 李迎博, 李义梦, 等. 壳聚糖-柠檬酸 / 聚丙烯酰胺双网络水凝胶的构筑与性能研究 [J]. 轻工学报, 2020, 35(1): 63-71.

[8] 陈新飞等. 抗微生物药物敏感性试验体系 EUCAST 标准操作规程 [J]. 检验医学, 2009, 24 (1) : 63-66.

