

生物炭/PAM/秸秆纤维改良黄土抗崩解性试验研究

张海山, 孙明明, 汪佳欣

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年6月17日; 录用日期: 2025年7月8日; 发布日期: 2025年7月18日

摘要

针对黄土易崩解问题, 本研究以西安长安区典型黄土为对象, 探讨生物炭-聚丙烯酰胺-秸秆纤维复合改良剂(BPS)对其崩解特性的影响。通过室内崩解试验, 系统分析不同BPS掺量(0%~5%)及养护龄期(0, 7, 14天)下土体的崩解率与崩解速率变化。结果表明: BPS显著抑制黄土崩解, 3%为最优掺量(崩解率73.99%), 过量(>3%)因孔隙堵塞导致崩解率回升; 随养护时间延长, 改良效果增强, 3%掺量组14天崩解率降至24.46% (较未改良土降幅75.54%); 秸秆纤维加筋、生物炭持水及PAM胶结共同提升土体稳定性, 但高掺量(4%~5%)引发超密实化, 削弱长期抗崩解性。研究证实BPS可有效改良黄土抗崩解性能, 为工程应用提供理论依据。

关键词

黄土改良, 生物炭, 聚丙烯酰胺, 秸秆纤维, 抗崩解性

Experimental Study on Biochar/PAM/Straw Fiber Modified Loess for Anti-Disintegration Performance

Haishan Zhang, Mingming Sun, Jiabin Wang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 17th, 2025; accepted: Jul. 8th, 2025; published: Jul. 18th, 2025

Abstract

To address the susceptibility of loess to disintegration, this study investigated the effects of a bio-char-polyacrylamide-straw fiber composite (BPS) on the disintegration characteristics of typical

文章引用: 张海山, 孙明明, 汪佳欣. 生物炭/PAM/秸秆纤维改良黄土抗崩解性试验研究[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1679-1685. DOI: 10.12677/hjce.2025.147181

loess from Chang'an District, Xi'an. Indoor disintegration tests were systematically conducted to analyze variations in disintegration ratio and rate under different BPS dosages (0%~5%) and curing ages (0, 7, 14 days). The results demonstrate: BPS significantly inhibits loess disintegration, with 3% being the optimal dosage (disintegration ratio: 73.99%). Excessive dosage (>3%) causes pore clogging, leading to a rebound in disintegration ratio. The improvement effect strengthens with extended curing time. At 3% dosage, the disintegration ratio decreased to 24.46% after 14 days (a 75.54% reduction compared to untreated loess). Straw fiber reinforcement, biochar water retention, and PAM cementation collectively enhance soil stability. However, high dosages (4%~5%) induce over-compaction, weakening long-term anti-disintegration performance. This study confirms BPS effectively improves the anti-disintegration properties of loess, providing a theoretical basis for engineering applications.

Keywords

Loess Improvement, Biochar, Polyacrylamide, Straw Fibers, Disintegration Resistance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黄土作为典型水敏性地质体,在我国西北地区分布面积达 640,000 km²,其独特的架空孔隙结构与强崩解特性导致边坡失稳、地基陷落等工程灾害频发[1]-[3]。尤其在季节性降雨作用下,黄土遇水产生的崩解性劣化已成为制约工程安全的核心因素[4]。传统改良方法(如水泥固化)虽可提升土体强度,但存在碳排放量高(每吨水泥排放 0.6~0.9 吨 CO₂)、抑制植物生长等生态负效应[5][6]。因此,开发生态友好型黄土抗崩解改良技术,对推动“双碳”目标下的岩土工程可持续发展具有迫切意义。

微生物改良剂通过活性微生物生理活动改善土壤性能。Li 等[7]对比发现两种微生物改良剂显著提升了大蒜根际微生物定殖能力;Scullett-Dean 等[8]证实微生物与非生物改良剂联用可协同优化土壤结构提高有机碳 37%、降低电导率 21%,加速污染土壤修复进程。

聚丙烯酰胺(PAM)通过黏粒絮凝作用增强土壤稳定性。Busscher 等[9]表明 PAM 能提升水分渗透率 23%;Chan 等[10]发现 0.001%阴离子 PAM 即可显著改变土壤物性,微观结构的改善直接增强了土壤抵抗径流剪切力剥离的能力;李继祥等[11]通过扫描电镜(SEM)观察, PAM 通过抑制土壤表面结皮和缝隙的产生、增强土壤内部颗粒间的黏结力来增强土壤的抗崩解性。

秸秆纤维在抗侵蚀中效果显著:李桂[12]揭示其覆盖量增加使坡面流减速 41%;曾坤翔[13]证实改良土抗冲刷强度提升 3.2 倍;刘凯传等[14]研究表明,在淤泥生物炭中添加秸秆可提升有机碳含量,使黑麦草发芽率和生物量分别提高 23.5%和 66.7%。该结果印证了秸秆纤维加筋在增强土体力学性能的同时,兼有生态效应。本研究创新提出生物炭/PAM/秸秆纤维对黄土崩解特性的改良机制,通过材料协同效应破解黄土崩解难题。定量分析崩解率与崩解速率的动态响应规律。通过临界拐点识别与速率降幅对比,确定兼顾短期防护与长期稳定的最优 BPS 掺量。

2. 试验准备和方法

2.1. 试验材料

本研究选用了位于中国陕西省西安市长安区的典型黄土层作为试验样本。该区域黄土质地均匀、以

黄褐色为主，是典型的第四纪黄土。本研究的试样样本取自地下 2.5 m 处的位置，在取样过程中，使用专用的土工铁锹沿预定的垂直剖面小心地切割土样，以保持其原有结构。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)，采集代表性土样，避免污染和扰动。土样采集后，进行样品处理，包括风干、筛分和密度测定等步骤，从而测得黄土基本物理指标如表 1 所示。

Table 1. Basic physical indicators of loess
表 1. 黄土基本物理指标

土粒比重 G_s	天然含水率 w (%)	天然密度 ρ (g/cm ³)	塑限 w_p (%)	液限 w_L (%)	最大干密度 ρ (g/cm ³)	最优含水率 w (%)
2.71	14.3	1.7	10.54	24.50	1.64	19.8

如图 1 所示，本次试验所使用的生物炭购自立泽环保科技有限公司，是通过对玉米秸秆在无氧条件下进行热解处理而得到的高碳含量产品。研究中使用的 PAM 购自义乌新邦环保技术有限公司，是一种无毒、环保的水溶性聚合物，分子量为 1200 万，具有阴离子特性。秸秆纤维作为一种环保且成本较低的有机土壤改良剂，在提高土壤中的有机质含量和改善其物理结构方面大有作为，在增强水分和养分保持能力方面亦是如此。基本物理力学参数如表 2 所示。

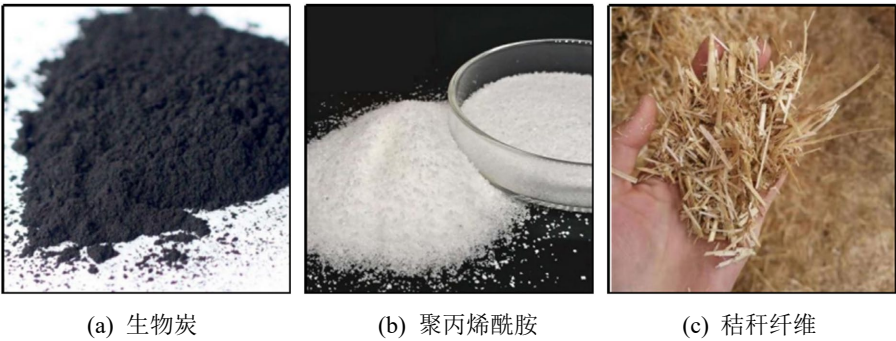


Figure 1. Test material
图 1. 试验材料

Table 2. Characteristics of straw fiber, biochar and PAM
表 2. 秸秆纤维、生物炭和 PAM 的特性

	属性	单位	数量
秸秆纤维	长度	mm	20
	宽度	mm	2~3
	厚度	mm	0.5~0.7
	最大拉伸强度	N	50
	最大伸长率	%	1.2
	pH	-	9.9
生物炭	比重	g/cm ³	1.82
	堆积密度	g/cm ³	0.5
	颗粒间孔隙率	%	49.1
	性质		Anionic
聚丙烯酰胺	分子量		12 million

2.2. 试样制备与测试方法

先将黄土研磨粉碎至无大颗粒状，烘干、过 0.2 mm 筛，随后按照预定比例利用 200 cm³ 的环刀制备不同掺加量的土样。在试验开始之前，在塑料水缸中添加相同高度的水，减少不必要的误差，测试方格网能够完全浸入水中，调整电子秤数据使其归零，清除浮力的作用。将准备好的试样轻轻地放置在方格网的中心，并使用吊架挂起方格网。然后缓慢将其放入水缸中，并在试样开始浸水的那一刻(视为崩解时间的起点)记录读数，随即开始计时崩解时间。试验开始计时后，每隔两分钟记录电子天平的读数，仔细记录下吊架以及剩余试样的质量，以便后续的数据分析。为了更直观地观察试样的崩解过程，利用摄像机进行了全程记录，当试样完全崩解，或者天平读数在长时间内保持恒定，标志着崩解过程已经结束，此时及时停止计时。在试验完成后，对试验数据进行汇总和整理，计算各时间点土体的累计崩解百分比，并基于这些数据绘制试样的崩解率曲线。

3. 结果与讨论

3.1. 不同掺量比例与崩解曲线的关系

图 2 显示，随着 BPS 掺量增加，黄土崩解率呈阶段性递减趋势。掺量 1% 时崩解率由 100% 降至 94.85%，降幅 5.15%；掺量增至 2% 时崩解率骤降 13.85% 至 81.00%，表明材料对土壤结构稳定性和持水能力的强化作用显著。3% 掺量时崩解率进一步降至 73.99%，此时改良效果达到峰值。但当掺量增至 4%~5% 时，崩解率小幅回升至 73.99%~76.46%，揭示过量掺入会导致粘结过密、孔隙堵塞，反而不利于水分排出，形成局部高含水区影响稳定性。出现该现象主要原因是 BPS 通过秸秆纤维加筋、胶结物固结和保水材料协同作用，能有效增强土颗粒间粘结力并延缓崩解进程。即使在高掺量阶段，纤维团聚形成的阻水屏障仍能抑制整体崩解速率。数据拐点表明，3% 为最优掺量阈值，超过此值后材料效能趋于饱和，过量添加反而产生负面效应。

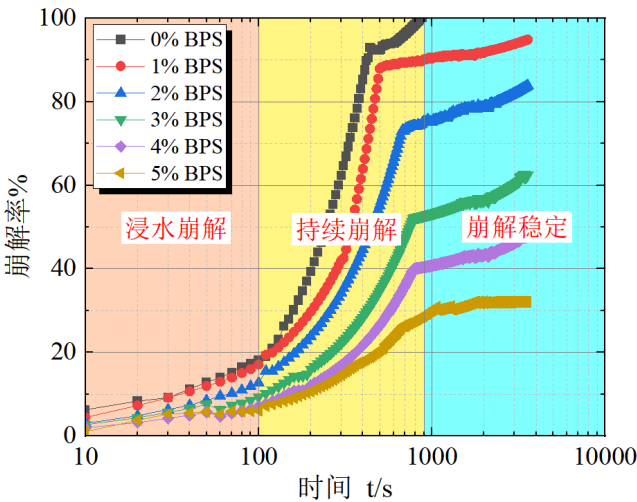


Figure 2. Disintegration curve at 0 days
图 2. 0 天的崩解曲线

3.2. 不同龄期与崩解率的关系

图 3 显示未掺 BPS 的黄土在 0 天和 7 天养护后崩解率均为 100%，14 天仅微降 1.13% 至 98.87%，印证其天然抗崩解能力极弱。通过掺入 BPS，黄土改良效果呈现显著剂量 - 时间耦合效应：当掺量从 1% 增

至 3%时, 7 天崩解率由 94.85%阶梯式下降至 48.36%, 14 天进一步降至 24.46%, 降幅达 75.54%, 揭示 BPS 通过胶结强化与纤维加筋协同作用, 既能短期提升土颗粒粘结力, 又能在长期养护中维持结构稳定。然而, 当掺量超过 3%时出现效能逆转, 4%~5%掺量组 7 天崩解率回升至 52.86%~62.70%, 14 天崩解率较最优组升高 26.36%~76.32%。过量 BPS 导致土体超密实化, 孔隙堵塞引发水分迁移阻滞和内部应力积聚, 形成渗透滞后效应, 反而削弱长期抗崩解性能。研究表明, 3%掺量为兼顾短期抑制效率与长期稳定性的阈值, 过量掺入会因结构致密化引发边际改良效应递减。

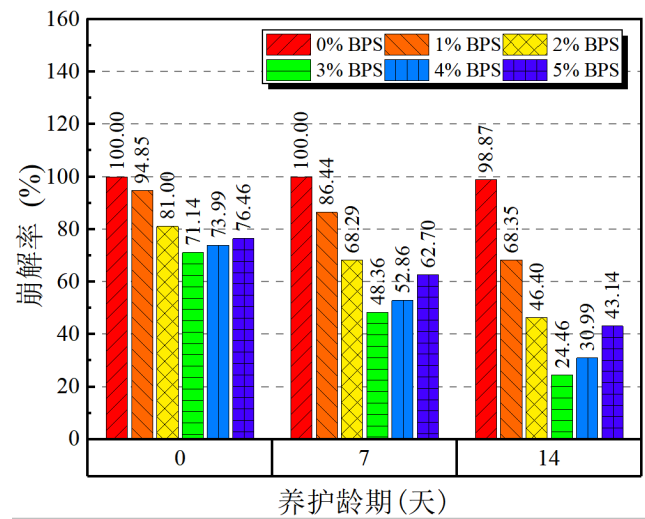
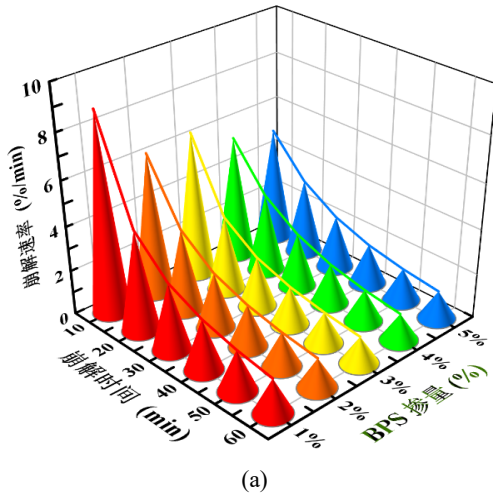


Figure 3. The final disintegration rate of each dosage at different ages
图 3. 不同龄期下各掺量的最终崩解率

3.3. 不同掺量比例与崩解速率的关系

图 4 可知 BPS 掺量对黄土崩解速率具有剂量 - 时间双重调控作用。在 0 天即时试验中, 1%~5%掺量组的 10 分钟崩解速率由 $8.90 \times 10^{-2} \%$ /s 梯度下降至 $5.09 \times 10^{-2} \%$ /s (降幅 42.77%), 其中前 30 分钟降速更为显著(1%~3%掺量时 10 分钟速率降幅达 22.15%), 印证 BPS 能快速提升土壤初期抗水蚀能力。但掺量超过 3%后改良效率递减, 4%~5%掺量组 60 分钟速率降幅降至 7.3%, 揭示过量掺入引发土体超密实化, 孔隙堵塞导致透气排水功能受损。



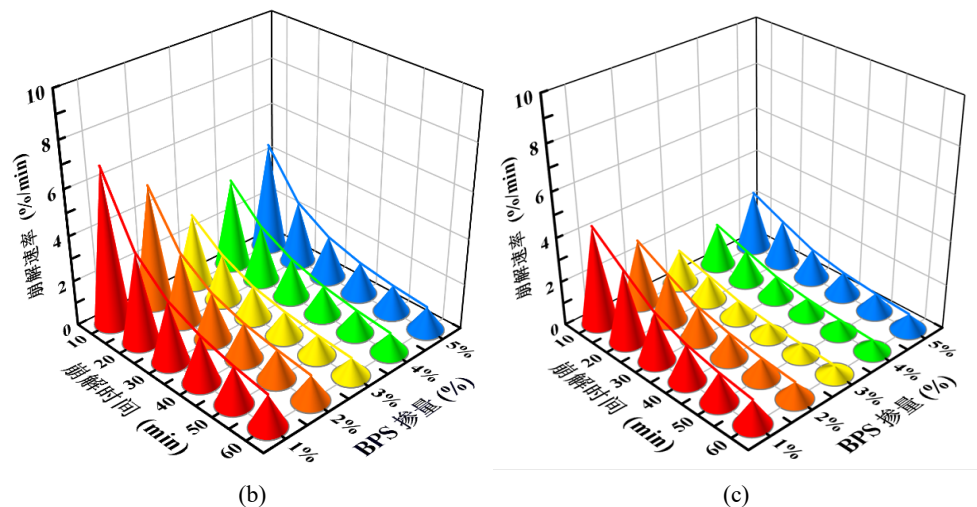


Figure 4. The disintegration rate of each dosage at different curing ages and different time periods; (a) 0 days; (b) 7 days; (c) 14 days

图 4. 不同养护龄期下各掺量不同时间段的崩解速率; (a) 0 天; (b) 7 天; (c) 14 天

随养护龄期延长, BPS 改良效应持续深化: 1%~3%掺量组在 14 天时 60 分钟崩解速率较 0 天分别降低 49.8%、53.6%、75.7%, 其中 3%掺量组 14 天速率($1.57 \times 10^{-2} \text{ %/s}$)较 7 天再降 50.3%, 表明生物炭多孔吸附、秸秆纤维加筋与 PAM 胶结网络形成协同稳定机制。而 4%~5%高掺量组虽速率持续下降, 但 14 天降幅较 3%组减弱 26%~76%, 推测因材料分布不均形成致密屏障, 阻碍水分渗透与应力释放, 导致局部结构失稳。综合表明 3%掺量为兼顾即时防护与长期稳定的最优值。

4. 结果与讨论

本研究通过崩解实验系统揭示了生物聚合物-纤维复合材料(BPS)对黄土崩解性能的改良机制与剂量-时间耦合效应。实验结果表明:

(1) BPS 掺量对崩解率及崩解速率具有显著调控作用, 3%掺量为最优值。掺量 1%~3%时, 黄土崩解率由 94.85%阶梯式降至 73.99% (0 天), 崩解速率同步下降 42.8% (60 分钟)至 22.15% (10 分钟), 其作用机制源于秸秆纤维加筋、胶结物固结与保水材料协同效应, 可快速增强土颗粒粘结力并延缓崩解进程。

(2) 养护龄期延长进一步强化改良效果, 3%掺量组 14 天崩解率降至 24.46%, 较 0 天降幅达 75.5%; 60 分钟崩解速率更降至 $1.57 \times 10^{-2} \text{ %/s}$, 较 7 天再降 50.3%, 归因于生物炭多孔吸附与 PAM 胶结网络的持续稳定作用。

(3) 过量掺入(4%~5%)导致改良效能逆转, 主要是超密实化结构引发孔隙堵塞、水分迁移阻滞及局部应力积聚, 形成渗透滞后效应, 削弱长期稳定性。

参考文献

- [1] 王兰民. 黄土地层大规模地震液化滑移的机理与风险评估[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 1-19.
- [2] 吴功勇, 聂兴信, 李宗利, 等. 岩-土复合边坡研究现状、问题及展望[J]. 有色金属(矿山部分), 2025, 77(1): 1-12+37.
- [3] 戚志宇, 李志清. 黄土蠕变特性研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(3): 485-510.
- [4] 朱彦鹏, 王澳, 黄安平, 等. 降雨作用下框锚加固黄土边坡破坏机理试验研究[J/OL]. 金属矿山, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20240605.1322.002.html>, 2025-06-08.
- [5] 牛晓宇, 周志健, 朱荣贵, 等. 湿陷性黄土路基可持续材料加固效果与机理研究[J]. 科学技术与工程, 2025,

- 25(10): 4309-4316.
- [6] 肖文斌, 李靖, 武科, 等. 湿陷性黄土微观力学特征及其路基沉降规律[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 163-173.
- [7] Li, Y., Liu, S., Yang, X., *et al.* (2021) The Influence of Applying Microbial Amendments to Soil and Plants on the Microbial Diversity in the Rhizosphere Soil of Garlic. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, **15**, 528-535.
- [8] Scullett-Dean, G., Stockwell, K., Myers, L., *et al.* (2023) Coupling Microbial and Abiotic Amendments Accelerates in Situ Remediation of Bauxite Residue at Field Scale. *Science of The Total Environment*, **877**, Article 162699.
- [9] Busscher, W.J., Novak, J.M. and Caesar-TonThat, T.C. (2007) Organic Matter and Polyacrylamide Amendment of Norfolk Loamy Sand. *Soil and Tillage Research*, **93**, 171-178.
- [10] Chan, K.Y. and Sivapragasam, S. (1996) Amelioration of a Degraded Hardsetting Soil Using an Anionic Polymeric Conditioner. *Soil Technology*, **9**, 91-100.
- [11] 李继祥, 段青松, 王忠良, 等. 滇中亚高山棕壤各土层崩解特征及 PAM 加固研究[J]. 贵州农业科学, 2025, 53(3): 140-148.
- [12] 李桂, 曹文华, 马建业, 等. 小麦秸秆覆盖量对坡面流水动力学特性影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 108-116.
- [13] 曾坤翔, 江丽君, 张晓超, 等. 秸秆纤维加筋加固土抗降雨冲刷试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2022, 33(4): 51-58.
- [14] 刘凯传, 刘佳欢, 孙甲玉, 等. 污泥-秸秆混合基生物炭对土壤性质和植物生长的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(6): 1015-1019.