徐宏,徐蕾,余宏宝,等.超疏水材料改良黄土力学特性及水稳定性研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1312-1320.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241219001

Xu Hong, Xu Lei, Yu Hongbao, et al. Improvement of mechanical properties and water stability of loess using super-hydrophobic materials[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1312-1320. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20241219001

# 超疏水材料改良黄土力学特性及水稳定性研究

徐 宏[1], 徐 蕾[1], 余宏宝[1], 陈 伟[1], 陈俊礼[1],
陈锡琪[2], 杨琴琴[1], 范文晓[1]

(1. 新疆工程学院 土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830023;
2. 武义县水利水电质量安全监督站,浙江 金华 321200)

**摘要**: 为有效提高黄土的工程性能,通过掺入不同掺量的超疏水材料(CN)来改性黄土,开展无侧限抗压强度、土-水接触角、水滴入渗试验,并通过扫描电子显微镜(SEM)和X射线衍射(XRD)进行微观结构分析。研究结果表明,CN的掺入可显著提高黄土的力学性能和疏水性能。当掺入2%的CN时,黄土的无侧限抗压强度由0.64 MPa提高至1.06 MPa,但是强度的提升率随CN掺量的增加呈先增后减;掺入CN后,黄土在静水中浸泡7天无剥落现象,显著提高其抗崩解性;CN的掺入降低了黄土的表面自由能,增大了土-水接触角,增强了黄土的斥水性能。掺入8% CN后,土体孔隙单元体形态分布分维数从3.118减小至1.930,孔隙数量和复杂性减少,土体内部结构更加紧密和稳定。CN可以有效提升黄土力学特性及水稳定性,研究成果可为改性黄土的实际应用提供理论依据。

**关键词**: 黄土;超疏水材料;力学特性;水稳定性

**中图分类号**: TU43 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2026)06-1312-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20241219001

# Improvement of mechanical properties and water stability of loess using super-hydrophobic materials

Xu Hong[1], Xu Lei[1], Yu Hongbao[1], Chen Wei[1], Chen Junli[1], Chen Xiqi[2],
Yang Qinqin[1], Fan Wenxiao[1]

(*1.School of Civil Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, Xinjiang, China;*
*2.Wuyi County Water Conservancy and Hydropower Quality and Safety Supervision Station, Jinhua 321200, Zhejiang, China*)

**Abstract**: To improve the engineering properties of loess, different dosages of a superhydrophobic material, CN, were incorporated into the loess. Unconfined compressive strength (UCS) tests, soil-water contact angle measurements, and water droplet infiltration tests were conducted. Microstruc-

**收稿日期**:2024-12-19

**基金项目**:国家自然科学基金(41662017);自治区高校基本科研业务费科研项目(XJEDU2024P082);大学生创新创业训练计划项目(S202410994015);中央引导地方科技发展专项资金项目(ZYYD2023B02)

**第一作者简介**:徐 宏(1995-),男,助教,主要从事土体加固改良方面的研究。E-mail:1640938244@qq.com。

**通信作者**:徐 蕾(1979-),女,教授,主要从事主要从事钢筋混凝土抗震结构及材料的研究。E-mail: 20873134@qq.com。

tural analysis was performed using scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The results indicate that the addition of CN markedly enhances both the mechanical and hydrophobic properties of the loess. With 2% CN addition, the UCS of the loess increases from 0.64 MPa to 1.06 MPa; however, the rate of strength improvement first increases and then decreases with increasing CN content. After CN addition, the loess exhibits no disintegration after seven days of immersion in static water, indicating a marked improvement in water stability. The incorporation of CN reduces the surface free energy of the loess and increases the soil-water contact angle, thereby enhancing its water repellency. With 8% CN addition, the fractal dimension of the pore unit morphology distribution decreases from 3.118 to 1.930, reflecting a reduction in the number and complexity of pores and resulting in a more compact and stable internal structure. In summary, the superhydrophobic material CN can effectively improve the mechanical properties and water stability of loess, providing a theoretical basis for the practical application of modified loess.

**Keywords**: loess; super-hydrophobic material; mechanical properties; water stability

## 0　引言

黄土作为一种广泛分布于我国北方的特殊土质，其在基础设施建设中具有重要的应用价值。然而，黄土由于其特有的物理和化学特性，在遇水后易发生软化、崩解，导致其力学性能显著下降，会出现地基、路基沉降，失稳破坏等工程事故[1]，严重影响了工程结构的稳定性和耐久性。因此，如何提高黄土在遇水环境下的力学性能与水稳定性，一直是岩土工程领域研究的热点问题。

改良黄土的方法主要有物理改良法：采用强夯法[2-3]提高黄土的密实度和强度，减少孔隙率，增强其承载力；添加剂改良法：在黄土中掺入不同类型的一种或者组合添加剂，如水泥[4-6]、石灰[7-8]、膨润土[9-10]、赤泥[11-13]、矿渣[14-15]等，使其与土体发生物理或化学反应，使得土体的团聚状态、孔隙分布、渗流通道等发生变化，以改善其物理性能和力学性能[16]；离子交换法：通过添加特定的离子固化剂[17]，引发离子交换反应，改变黄土的矿物组成和结构，增强其稳定性。传统土体改良方式多存在环保性不足的问题，难以契合当下绿色发展理念，因此新型环保加固改良技术逐步成为黄土改性领域的研究热点。刘伟等[1]将木质素掺入天然黄土开展试验研究，证实木质素改性可有效弱化黄土湿陷特性，减轻湿陷灾害风险；田威等[18]以环保型木钙替代传统钙源优化胶凝体系，改良土体酶诱导碳酸钙沉淀（Enzyme-Induced Carbonate Precipitation，EICP）加固方案，试验表明改良后的EICP溶液能够显著提升黄土动力强度；许天驰等[19]依托微生物诱导碳酸钙沉淀技术改良黄土，有效改善了土体抗崩解性能。实际工程中，可结合工程需求与黄土自身物理力学特性，对各类环保改良技术进行优选与复合联用，从而实现最优的黄土改良效果。依托材料疏水性改良土体的技术，目前已在混凝土、盐渍土领域得到一定研究与应用，但在黄土改良中仍鲜有涉足，相关作用机理及微观演化机制亦缺乏系统性深入探究。超疏水材料具备极低表面能特性，可使水滴于材料表面聚集成球状并快速滑落，有效阻隔水分入渗与土体吸水作用[16]。凭借特殊的微观形貌与化学组分优势，超疏水材料能够显著提升土体抗水侵蚀能力，增强黄土在水环境作用下的结构稳定性与长期耐久性。

综上，将超疏水改性技术引入黄土改良领域，对完善黄土水敏性改良理论、提升黄土工程服役性能，具有重要的理论研究价值与工程实践意义。本研究旨在探讨超疏水材料对黄土力学特性及水稳定性的改良效果。通过系统试验，分析不同掺量的超疏水材料对黄土抗压强度、土-水接触角、表面自由能、微观结构以及矿物组成的影响，以期为提高黄土工程应用的可靠性和持久性提供科学依据和技术支持，同时也为超疏水材料在土木工程领域的应用探索新的途径。

## 1　试验材料

### 1.1　试验土样

试验土样取自新疆乌鲁木齐某工地，深度距离地表面1～2 m。土样经过干燥、过筛处理（孔径：2 mm），得到粒径均匀的试样。经过界限含水率与击

实试验[20]得出，土样塑限为14.8%，液限为28.6%，最大干密度为1.76 g/cm$^3$，最优含水率为16.36%。

### 1.2 超疏水材料

本次试验采用浙江疏科纳米疏水科技（嘉兴）有限公司生产的泥土超疏水材料，型号CN01C（简称CN），如图1所示。该材料主要成分有水、活性物、乳化剂。其中，活性物为含氢硅氧烷聚合物，其分子式为$(R)_3Si_0[RHSi_0]_nSi(R)_3$，R为1～5个碳的烷基；乳化剂由中性表面活性剂和阴离子表面活性剂组成，中性表面活性剂为脂肪醇类化合物阴离子，表面活性剂为脂肪硫酸盐（详情见相应专利）。该材料的主要性能指标[21]列于表1。



图1 超疏水乳液

Fig. 1 Superhydrophobic emulsion

## 2 试验方法

### 2.1 无侧限抗压强度试验

为探究CN掺量对黄土力学特性的影响，试验设置CN掺量依次为0、2%、4%、6%、8%、10%，将其与原状黄土、去离子水充分拌合均匀，制备不同配比的CN改性黄土混合料。试验统一控制压实度为95%、含水率为16.36%，采用静压成型法制备$\Phi$50 mm×$H$50 mm标准圆柱形试样。

根据材料厂家提供的CN技术说明，试样表面干燥后即可获得较高力学强度与良好水稳定性能。结合前期预试验验证：在环境温度20～23 ℃条件下，试样自然风干养护3 d可满足试验要求。因此，本文所有改性黄土试样均在20～23 ℃室温环境下自然风干养护3 d后开展后续测试，预试验具体过程不再赘述。

试验采用YYW-2型应变控制式无侧限压力仪，设定轴向加载速率为2 mm/min，以恒定速率单向加载，直至试样发生破坏。同步采集全程荷载数据，计算各组试样的无侧限抗压强度（Unconfined Compressive Strength，UCS），通过对比不同CN掺量下的UCS变化规律，系统分析超疏水改性材料对黄土抗压力学性能的作用机制。

### 2.2 崩解试验

土体崩解是指土样在浸水之后发生松散解体、塌落的现象[22-23]。本试验将素黄土及不同CN掺量改性黄土试样分别置于盛水烧杯中开展静水崩解试验，全程观测素土与改性土试样的崩解演化过程及表观特征，并记录各组试样的完全崩解历时。

### 2.3 土–水接触角试验及表面自由能

固-液接触角是表征固体表面润湿特性的重要参数[24]。土-水接触角指水滴静置在土体试样表面时，气、液、固三相接触处所形成的夹角，可直观反映水分子与土颗粒表面分子间的相互作用特征。本文采用SUC-200SH型光学接触角测量仪，依托二滴法[16]测定素土及不同CN掺量改性黄土的土-水接触角。

表面自由能是表征物体表面能量状态的物理量，体现了表面分子间的相互作用效应[25]。采用几何平均法[26]计算素土及不同CN掺量土体试样的表面自由能，其计算方法如下：

$$\gamma_S^L + \gamma_{LV}\cos\theta = \gamma_{SV} \tag{1}$$

$$\gamma_S^L = \gamma_S + \gamma_L - 2\sqrt{\gamma_S^d\gamma_S^d} - \sqrt{\gamma_S^p\gamma_L^p} \tag{2}$$

将式1、式2联立可以得到式(3)：

表1 CN主要性能指标

Table 1 Main performance indices of CN

| 项目 | 技术指标 | 项目 | 技术指标 |
|---|---|---|---|
| 气味 | 无味 | 固体质量分数/% | ≥30 |
| 外观 | 乳白色均质液体 | 有毒有害物质 | 符合规范[22]要求 |
| 耐候性 | 无变形、无裂缝 | 黏性 | 水珠可自由流动 |
| 黏度/(Pa·s) | 0.5 | 乳液稳定性 | 600 r/min离心后无明显沉淀、无漂油、无分层 |
| 疏水角/(°) | ≥100 | 挥发性有机化合物含量/% | ≤3 |
| PH | 7±1 | 单位面积吸水量/(g/m$^2$) | ≤1 000 |

$$\gamma_L(\cos\theta+1)=2\left(\sqrt{\gamma_S^d\gamma_L^d}+\sqrt{\gamma_S^p\gamma_L^p}\right) \quad (3)$$

式中：$\gamma_S^L$表示固-液相界面的张力；$\gamma_{LV}(\gamma_L)$表示液-气相界面的张力；$\gamma_{SV}(\gamma_S)$表示固-气相界面的张力；$\gamma_S^p$和$\gamma_L^p$分别为固体和液体的极性分量；$\gamma_S^p$、$\gamma_S^d$为未知量。本研究通过测定蒸馏水、甲酰胺、二碘甲烷三种测试液体的$\gamma_L$、$\gamma_L^p$、$\gamma_L^d$及其在土体试样表面的接触角，进而求解素土及不同 CN 掺量改性黄土的表面自由能。

### 2.4　水滴入渗试验

滴水穿透时间法是评价土体斥水性的常用测试手段，通过测定单位体积水滴在土样表面的入渗历时表征土体斥水性能，入渗时间越长，土体斥水性越强。土体斥水性等级划分标准如表 2 所列[27]。

**表 2　土的斥水等级划分**

**Table 2　Classification of soil water repellency levels**

| | $t\geqslant3\,600$ | $600\leqslant t<3\,600$ | $60\leqslant t<600$ | $5\leqslant t<60$ | $t<5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 斥水等级 | 超斥水性 | 严重斥水性 | 强斥水性 | 轻微斥水性 | 亲水性 |

注：$t$表示记录水滴接触试样表面至完全入渗的时间，单位：s

试验采用标准滴定管，分别对素土及 1%、2%、3% 的CN改性黄土试样开展滴水穿透测试。控制单次水滴体积为 0.05 mL，滴定管口与试样表面间距恒定为 5 mm，减小水滴下落重力冲击对试验结果的影响。每组试样重复开展 10 次平行试验，求取各组测试数据的平均值作为最终试验结果。

### 2.5　SEM 及 XRD 试验

选取素土及不同CN掺量改性黄土制备扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope，SEM）微观试样，对试样剖面微观结构进行观测与分析。土样先经液氮冷冻及真空升华干燥预处理，采用涂抹凡士林的钢丝锯制取剪切面毛坯，再用钢刀修整为边长约 1 cm 的立方体试样。将试样置于液氮中快速冷冻后，转入－45 ℃真空冷冻干燥仪中冻干 24 h[27]。采用SU-8010型SEM观测土体微观结构，并借助 Image J 软件对 SEM 图像进行定量分析，表征孔隙、土颗粒等微观形貌特征。

采用 X 射线衍射（X-ray Diffraction，XRD）方法，对素土及不同 CN 掺量试样开展矿物成分测试。先将土样研磨过 0.25 mm 标准筛，再制备厚度 1.0～2.0 mm 的平整试片。将试片置于 105 ℃烘箱中烘干 6 h，冷却后室内静置 10 d，使土样与空气水汽充分达到平衡。采用布鲁克 D8 advance 型 X 射线衍射仪进行测试，设定扫描起始角 10°、终止角 80°，步长 0.02°，采样时间 0.05 s，管压 30 kV、管流 20 mA。

## 3　试验结果分析

### 3.1　无侧限抗压强度试验结果

素土以及不同CN掺量试样的无侧限抗压强度值如图 2 所示。CN掺量为0%、2%、4%、6%、8%、10% 时，UCS 值分别对应为 0.64 MPa、1.06 MPa、2.18 MPa、3.04 MPa、3.48 MPa、3.65 MPa。较前者分别增大了 65.63%、105%、39.45%、14.47%、4.88%。可以看出，CN的掺入可以明显提高黄土的UCS值，且UCS值与CN掺量呈正相关。但是，掺量超过4%后，强度增长幅度逐渐放缓。

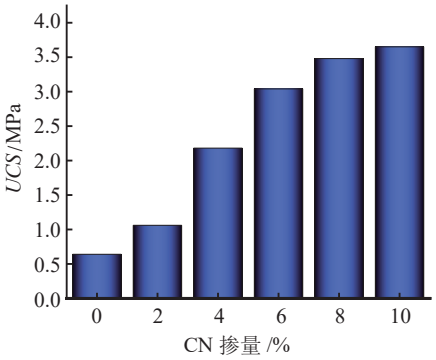



图 2　无侧限抗压强度值

Fig. 2　Unconfined compressive strength values

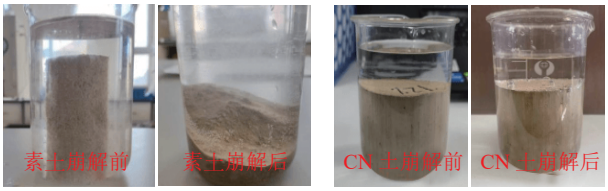
掺入CN后，可在黄土颗粒表面形成均匀包覆润湿膜，有效改善土颗粒间黏结作用与内聚力，提升土体整体胶结性能。土体受荷时可更有效地传递与分散应力，宏观抗压强度得以提升。同时，CN可在土颗粒表面生成树枝状纳米微观结构，结构间相互搭接聚合，增多颗粒接触点数，填充内部孔隙、减小孔隙体积，提高土体密实度[21]。这种孔隙填充效应可降低土体孔隙率，约束外力作用下的结构变形，进一步增强土体抗压承载能力。

当CN掺量增至一定水平后，黄土内部孔隙逐渐被填充，孔隙率趋于稳定；继续增加掺量，土颗粒表面包覆效果逐渐达到饱和，CN对土体微观结构的改性增益逐步减弱，颗粒间胶结强度不再显著提升，最终表现为UCS的增长速率持续回落。

### 3.2　崩解试验结果分析

崩解试验结果如图3所示。素土试样置于静水

烧杯中后，崩解过程可划分为表面吸水剥落、土体软化溃散、整体完全解体三个阶段，完全崩解历时仅66 s。反观掺入2%、4%、6%、8%、10% CN的改性黄土试样，经静水浸泡7 d后仍未出现任何剥落与溃散现象。由此表明，CN掺入可大幅提升黄土抗崩解能力，显著改善黄土遇水条件下的结构水稳定性。




(a) 素土 (b) 掺入CN土

图3 崩解试验图

Fig. 3 Graph of slaking test

究其机理，CN与黄土均匀拌和后，可在土颗粒表面生成均匀分布的树杈状纳米微观结构，并形成一层高疏水保护膜。该疏水膜能够有效阻隔水分与土颗粒直接接触，削弱水分对颗粒表面的浸润与侵蚀作用，从根本上避免了黄土遇水后发生崩解。

同时，CN可与黄土颗粒产生良好胶结作用，强化土体内部联结，提升土体内聚力与抗剪强度，使土颗粒间联结更为紧密稳固，难以在水分入渗作用下发生分离与结构破坏，有效维持土体整体完整性。此外，CN还可调控土体含水率及内部水分分布，使黄土在水环境变化下仍保持较为稳定的结构形态与力学特性，进一步弱化水分对土体结构的劣化作用，最终使改性黄土在静水条件下具备优异的抗崩解性能。

### 3.3 土-水接触角试验及表面自由能结果分析

土-水接触角测试形貌见图4，不同CN掺量下土-水接触角的变化规律如图5所示。素土及4%、8%、12%的CN掺量试样的土-水接触角依次为20.5°、118.5°、131.4°、137.1°。可见，掺入CN可显著增大土-水接触角，且随CN掺量增加，接触角呈持续增大趋势；当CN掺量超过4%后，接触角增长速率明显变缓，其变化规律与无侧限抗压强度随CN掺量的演化特征基本一致。

依据式(3)计算可得到素土及不同CN掺量黄土表面的自由能变化规律，结果如图6所示。素土与4%、8%、12% CN掺量试样的表面自由能依次为76.06 mN/m、37.62 mN/m、28.25 mN/m、21.86 mN/m。可以发现，掺入CN可显著降低黄土表面自由能，且表面自由能随CN掺量增大呈负相关递减规律。

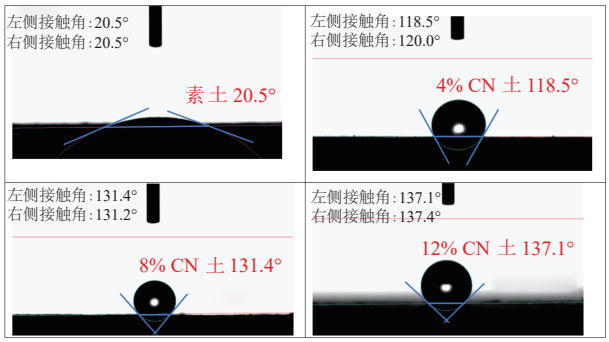



图4 土-水接触角

Fig. 4 Soil-water contact angle

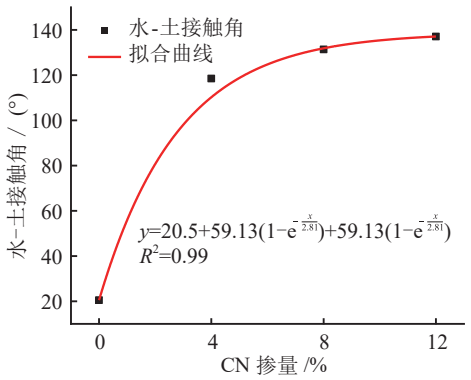



图5 不同CN掺量的土-水接触角

Fig. 5 Soil-water contact angles with different CN contents

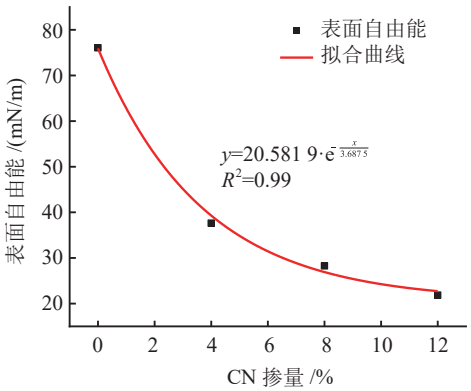



图6 表面自由能随CN掺量变化规律

Fig. 6 Variation of surface free energy with CN content

CN掺入后可在黄土颗粒表面形成均匀包覆层，该包覆层本身具有低表面能特性，弱化了水分子与黄土表面的浸润亲和作用，宏观表现为土-水接触角增大。同时，CN可优化土体表面微观粗糙度，固体表面粗糙化会增大固液有效接触界面效应[16]，

进一步放大低表面能的疏水效果，促使接触角提升。

此外，CN能在土颗粒表面构筑均匀分布的树杈状纳米微纳结构[21]，此类微观孔隙结构可截留空气并形成空气垫层，减小水滴与土体表观实际接触面积，进一步提升疏水性能与接触角。与此同时，CN可降低固-液界面张力，由于接触角与界面张力呈反比关联，界面张力的减小也会进一步促使土-水接触角增大。

综上所述，黄土掺入CN改性材料后，土体表面自由能显著降低，微观粗糙度明显提升，固液界面张力亦发生改变，共同促使土-水接触角大幅增大，使改性黄土具备优异的超疏水特性。该疏水效应能够有效抵御水分入渗与水流侵蚀，对改善黄土抗水性能、提升水稳性与工程服役稳定性具有重要作用。

### 3.4　水滴入渗试验结果分析

滴水入渗试验结果如图7所示。素黄土的土-水接触角仅为20.5°，水滴可迅速被土体吸收，无法在表面滞留。掺入1% CN的改性土样，水滴入渗速率明显减缓，完全入渗历时达416 s，依据表2所列的评判标准，该试样达到强斥水性等级；当CN掺量分别增至2%、3%时，试样表面水滴滞留时间均超过3 600 s，斥水性等级达到超斥水性。由此可见，掺入CN可显著提升黄土的表面疏水与抗入渗性能。




图7　水滴入渗试验

Fig. 7　Water droplet infiltration test

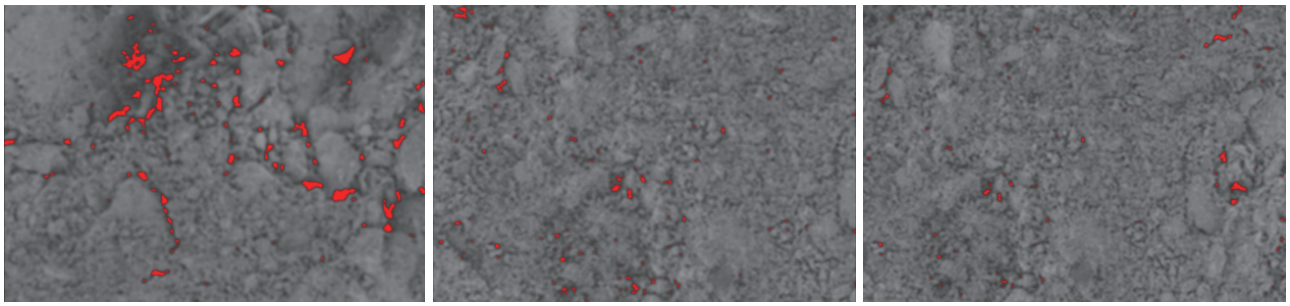
### 3.5　SEM及XRD试验结果分析

#### 3.5.1　SEM试验结果分析

由图8可知，素黄土内部发育大量不规则孔隙与微裂隙，结构较为松散。掺入CN改性后，土颗粒间联结更为紧密，土体孔隙明显被填充、孔隙度显著降低，整体微观结构更趋致密。借助Image J软件分别提取素土、4% CN及8% CN改性土微观孔隙的等效周长与等效面积，并依据式(4)计算各组土体孔隙单元体的形态分布分维数：

$$\lg P=\frac{M}{2}\lg A+C \tag{4}$$

式中：$M$为孔隙形态分布分形维数；$C$为常数；$A$为孔隙等效面积；$P$为孔隙等效周长。绘制lg$P$-lg$A$双对数[28]如图9所示。




注：*EHT*：扫描电镜电子加速高压，单位：kV；*WD*：样品与物镜间距，单位：mm；Signal：镜筒内探测器信号；*Mag*：放大倍率

图8　SEM图

Fig. 8　SEM images

孔隙单元体形态分布分维数结果如图9所示。素土分维数$M$为3.118，4%CN改性土为2.066，8%CN改性土降至1.930，可见掺入CN后土体孔隙分维数显著降低。分维数可定量表征土体微观孔隙结构的复杂程度，分维数的值越大，孔隙形态越复杂、不规则程度越高[29]。

分析其原因可知，CN的掺入可有效减少土体孔隙数量，降低孔隙结构复杂程度，使原本杂乱无章的孔隙形态趋于规整、分布更为均匀。一方面，CN可增强黄土颗粒间的胶结联结作用，有效填充并缩减颗粒间的间隙与微裂隙，使土体内部结构更为密实稳定，弱化了微观孔隙的不规则发育特征。

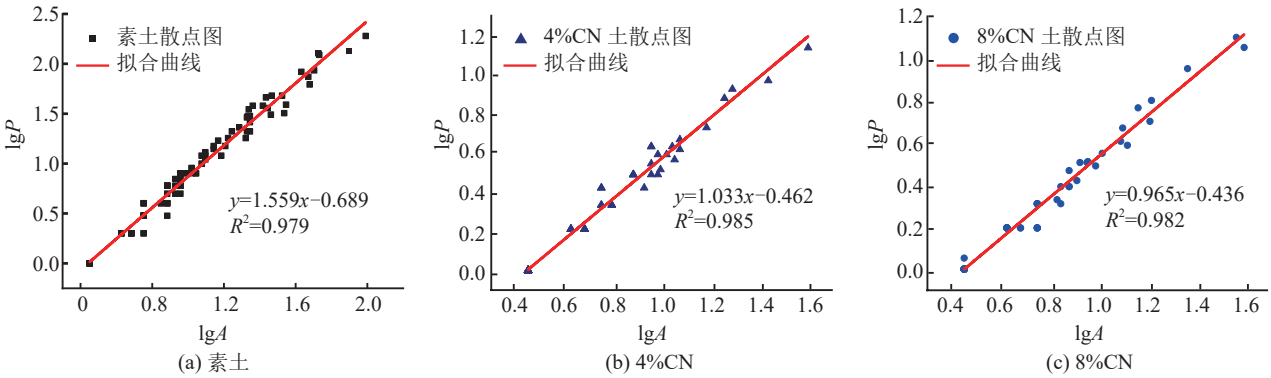



图 9 土样孔隙单元体形态分布分维数图

Fig. 9 Fractal dimension of pore unit morphology distribution of soil samples

另一方面，CN 具备良好的表面改性效应，可在土颗粒表面形成均匀包覆层；该包覆层不仅赋予颗粒表面疏水特性，还可优化颗粒微观形貌，使表面结构更加平整规整，进而抑制不规则孔隙的生成与发育，最终实现孔隙结构复杂程度的显著降低。

3.5.2 XRD 试验结果分析

XRD 测试结果如图 10 所示。对比 CN 掺入前后的衍射图谱可知，改性前后黄土的矿物组成与晶体结构存在一定差异。未掺 CN 时，XRD 图谱主要呈现黄土中石英、斜长石、钙长石、钠长石等主要矿物的特征衍射峰；掺入 CN 改性后，图谱中出现若干新的弱衍射峰。新特征峰的出现表明，CN 组分与黄土矿物之间产生了相互作用，发生了物质掺杂与界面结合效应。

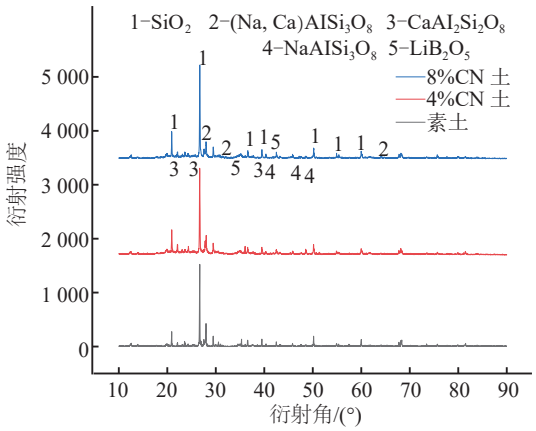



图 10 XRD 图

Fig. 10 XRD pattern

### 3.6 机理分析

黄土颗粒表面普遍存在结合水膜，水膜的厚度及理化性质对黄土的力学强度与渗透特性具有显著影响。超疏水材料 CN 掺入后，可改变黄土颗粒表面亲水特性，削弱水分子与颗粒表面的吸附作用，进而降低结合水膜的稳定性并减小其厚度。随 CN 掺量增大，原有亲水吸附水膜逐步被取代或消减，土体表面表现出明显疏水斥水效应，抗渗透性能与力学特性得以同步改善。同时，CN 可促使土颗粒表面水膜向疏水化转变，进一步调控黄土结构强度与抗崩解性能。

黄土由黏土矿物、石英、长石等多种矿物组分构成，各类矿物具有不同的表面化学特性。其中黏土矿物表面富含羟基与硅氧基团，可与超疏水材料 CN 中的活性基团产生氢键作用与范德华力作用，并将矿物表面羟基转化为氧化硅结构，使 CN 牢固吸附于矿物颗粒表面，赋予土体良好疏水特性[30]。这种界面吸附作用既可显著提升黄土疏水抗水能力，又能优化颗粒间胶结状态，有效改善土体整体力学性能。

## 4 结论

文章从宏观力学、水稳特性及微观结构多维度开展系列试验，系统探究了超疏水材料 CN 对黄土改良效果及作用机理，主要研究结论如下：

（1）掺入 CN 可显著提升黄土无侧限抗压强度，未掺 CN 素土强度为 0.64 MPa，掺量 2% 时强度即可提升至 1.06 MPa；随 CN 掺量增大，黄土强度持续提高，但强度增幅呈现先增大后放缓的变化规律。

（2）素黄土静水崩解依次经历表面吸水剥落、土体软化、整体解体三个阶段；掺入 CN 改性后的黄土长期浸水无剥落、溃散现象，抗崩解能力大幅提升，显著改善了黄土遇水失稳的工程特性。

（3）CN 改性可有效降低黄土表面自由能、增

大土-水接触角，显著增强土体表面斥水性；改性黄土水滴入渗速率明显减小，能够有效抵御水分入渗与水土侵蚀，对提升黄土抗水性能具有重要作用。

（4）SEM微观观测与XRD测试结果表明，掺入8%CN后，土体孔隙分维数由3.118降至1.930。CN可有效减少孔隙数量、降低孔隙结构复杂程度，优化土体微观孔隙形态，使内部结构更为密实稳定。

经超疏水材料CN改良后的黄土具备优良的力学性能与水稳定特性，可为黄土地区地基处理、边坡防护等工程实践提供新的改良思路与技术参考。后续可进一步探究不同类型超疏水材料对黄土改良效果的差异，及其在实际岩土工程中的推广应用潜力。

## 参考文献（References）


[1] 刘伟，连佳胜，赵吉祥. 木质素抑制黄土湿陷性试验研究[J]. 地震工程学报，2024，46(3)：557-565.
Liu Wei，Lian Jiasheng，Zhao Jixiang. Collapsibility test on the loess inhibited by lignin[J]. China Earthquake Engineering Journal，2024，46(3)：557-565.

[2] 腊润涛，张荣. 强夯法处理湿陷性黄土地基的效果评价[J]. 公路，2020，65(1)：54-57.
La Runtao，Zhang Rong. Effect evaluation of dynamic compaction method in treating collapsible loess foundation[J]. Highway，2020，65(1)：54-57.

[3] 滕光亮. 大厚度黄土地区单击夯击能影响强夯加固效果的试验研究[J]. 地震工程学报，2020，42(3)：759-763.
Teng Guangliang. Experimental study on the effect of single tamping energy on dynamic compaction reinforcement in large-thickness-loess area[J]. China Earthquake Engineering Journal，2020，42(3)：759-763.

[4] 赵雪，谷天峰，范楠楠. 水泥改良黄土崩解试验研究[J]. 西北大学学报(自然科学版)，2024，54(1)：18-25.
Zhao Xue，Gu Tianfeng，Fan Nannan. Experimental study on disintegration of loess improved by cement[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition)，2024，54(1)：18-25.

[5] 金明亮，韦正鹏. 湿陷性黄土地区水泥改良土路床的现场试验研究[J]. 兰州理工大学学报，2023，49(3)：135-139.
Jin Mingliang，Wei Zhengpeng. Study of field test of cement-modified soil road bed in collapsible loess area[J]. Journal of Lanzhou University of Technology，2023，49(3)：135-139.

[6] 祁晓强，袁可佳，蔡露瑶，等. 水泥改良黄土抗冲刷性能影响因素研究[J]. 硅酸盐通报，2021，40(7)：2418-2427.
Qi Xiaoqiang，Yuan Kejia，Cai Luyao，et al. Influencing factors of anti-erosion performance of cement improved loess[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2021，40(7)：2418-2427.

[7] 阮立龙. 石灰改良黄土膨胀特性及其影响因素试验研究[J]. 公路交通科技，2023，40(4)：88-93，102.
Ruan Lilong. Experimental study on swelling characteristics and influencing factors of lime improved loess[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2023，40(4)：88-93，102.

[8] 王翰越，蒋应军. 石灰改良黄土路基填料抗冻性能分析[J]. 中国科技论文，2020，15(2)：154-159.
Wang Hanyue，Jiang Yingjun. Analysis of frost resistance performance of lime improved loess roadbed filler[J]. China Sciencepaper，2020，15(2)：154-159.

[9] 高梦娜，王旭，李建东，等. 膨润土石灰改良黄土强度及微观结构试验研究[J]. 水利水运工程学报，2022(5)：86-93.
Gao Mengna，Wang Xu，Li Jiandong，et al. Experiment study on the strength and microstructure of bentonite-lime improved loess[J]. Hydro-Science and Engineering，2022(5)：86-93.

[10] 朱敏，倪万魁，苑康泽，等. 黄土渗透和强度性能的改良优化[J]. 煤田地质与勘探，2020，48(6)：195-200.
Zhu Min，Ni Wankui，Yuan Kangze，et al. Improvement and optimization of permeability and strength properties of loess[J]. Coal Geology & Exploration，2020，48(6)：195-200.

[11] 郭强，张晓雷，史晨曦，等. 赤泥-矿渣基地聚物固化黄土冻融后力学特性研究[J]. 硅酸盐通报，2024，43(4)：1482-1489.
Guo Qiang，Zhang Xiaolei，Shi Chenxi，et al. Mechanical properties of red mud-slag based geopolymer solidified loess after freeze-thaw cycle[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2024，43(4)：1482-1489.

[12] 宋志伟，韩素丽，秦鹏举，等. 氧化钙改性赤泥固化黄土的电阻率特性及机理[J]. 太原理工大学学报，2024，55(2)：331-337.
Song Zhiwei，Han Suli，Qin Pengju，et al. Electrical resistivity characteristics and mechanism of solidified loess mixed with calcium oxide-modified red mud[J]. Journal of Taiyuan University of Technology，2024，55(2)：331-337.

[13] 陈瑞锋，田高源，米栋云，等. 赤泥改性黄土的基本工程性质研究[J]. 岩土力学，2018，39(增刊1)：89-97.
Chen Ruifeng，Tian Gaoyuan，Mi Dongyun，et al. Study of basic engineering properties of loess modified by red mud[J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(S1)：89-97.

[14] 杨国辉，李驰，商艳，等. 基于CT扫描技术矿渣微粉改良黄土孔隙特性的试验研究[J]. 水利水电技术(中英文)，2023，54(9)：201-209.
Yang Guohui，Li Chi，Shang Yan，et al. Experimental study on improving loess pore properties by slag powder based on CT scanning technology[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2023，54(9)：201-209.

[15] 朱苗森，朱武卫. 矿渣与工业废渣改良黄土的性能与机理研究进展[J]. 灾害学，2022，37(1)：129-133.
Zhu Miaomiao，Zhu Wuwei. Research progress on properties and mechanism of loess modified by slag and industrial waste

residue [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37 (1): 129-133.

[16] 何玉琪, 廖红建, 倪诗雨, 等. 超疏水材料改良黄土的宏微观抗渗机制研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(11): 62-71.
He Yuqi, Liao Hongjian, Ni Shiyu, et al. Experimental study on the anti-permeability mechanism of hydrophobic-powder-improved loess from macro and micro perspectives[J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2022, 56(11): 62-71.

[17] 王景龙, 王旭, 李建东, 等. F1离子固化剂加固试验黄土的物理力学特性变化机理[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 70-75.
Wang Jinglong, Wang Xu, Li Jiandong, et al. Mechanism of experimental loess reinforced by F1 ionic soil stabilizer in physical and mechanical properties [J]. Materials Review, 2021, 35(8): 70-75.

[18] 田威, 云伟, 党可欣, 等. 不同钙源EICP溶液改良路基黄土动力特性研究[J]. 材料导报, 2024, 38(9): 53-61.
Tian Wei, Yun Wei, Dang Kexin, et al. Study on dynamic characteristics of subgrade loess improved by EICP solution with different calcium sources[J]. Materials Reports, 2024, 38(9): 53-61.

[19] 许天驰, 张浩男, 贾苍琴, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀改良黄土的崩解性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 674-681, 707.
Xu Tianchi, Zhang Haonan, Jia Cangqin, et al. Experimental study on disintegration properties of microbially induced calcite precipitation modified loess [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(2): 674-681, 707.

[20] GB/T 10102—2023 铁路工程土工试验规程[S].
GB/T 10102—2023 Specification for soil test of railway engineering[S].

[21] 王清, 汪洲, 韩梦霞, 等. 疏水材料处理吉林西部乾安地区盐渍土的力学强度试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 804-814.
Wang Qing, Wang Zhou, Han Mengxia, et al. Mechanical strength of saline soil treated by hydrophobic soil material in Qian′an area, western Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 804-814.

[22] JC 1066—2008 建筑防水涂料中有害物质限量[S].
JC 1066—2008 Limit of harmful substances of building waterproof coatings[S].

[23] 李善梅, 寿凯, 刘之葵, 等. 红黏土崩解性试验方法[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(4): 804-809.
Li Shanmei, Shou Kai, Liu Zhikui, et al. Test method for disintegration of red clay [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(4): 804-809.

[24] 吴玉琴, 杨蕊, 代启亮, 等. 无黏性土增湿-脱湿过程中接触角的特性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 167-172, 181.
Wu Yuqin, Yang Rui, Dai Qiliang, et al. Contact angle characteristics of cohesionless soil during humidification and dehumidification [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 167-172, 181.

[25] 李楠楠, 李国禄, 王海斗, 等. 表面自由能的计算方法及其对材料表面性能影响机制的研究现状[J]. 材料导报, 2015, 29(11): 30-35, 40.
Li Nannan, Li Guolu, Wang Haidou, et al. Research progress of surface free energy′s computing methods and the influence on the properties of material surface [J]. Materials Review, 2015, 29(11): 30-35, 40.

[26] Owens D K, Wendt R C. Estimation of the surface free energy of polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1969, 13(8): 1741-1747.

[27] 汤连生, 刘其鑫, 孙银磊, 等. 改良花岗岩残积土进失水能力及接触角试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 144-156.
Tang Liansheng, Liu Qixin, Sun Yinlei, et al. Water entrance-and-release capacity and contact angle of improved granite residual soil[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2022, 49(4): 144-156.

[28] 毛雯婷, 屈文俊, 朱鹏. 稻壳灰在超高性能混凝土中的研究应用进展[J]. 江西科学, 2014, 32(1): 66-72.
Mao Wenting, Qu Wenjun, Zhu Peng. Progress of research on the application of rice husk ash in ultra-high performance concrete[J]. Jiangxi Science, 2014, 32(1): 66-72.

[29] 李建东, 王旭, 张延杰, 等. F1离子固化剂加固黄土强度及微观结构试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 618-624.
Li Jiandong, Wang Xu, Zhang Yanjie, et al. Experimental study on strength and microstructure of loess reinforced with FI ionic soil stabilizer [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(4): 618-624.

[30] 董庆杰. 冻融作用下疏水材料路基隔水层隔水效应试验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
Dong Qingjie. Experimental study on water isolation effect of hydrophobic material subgrade waterproof layer under freezing and thawing action[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

(本文编辑:任 栋)