第 59 卷 第 2 期
2026 年（总 246 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 2
2026(Sum246)



引文格式：亓燕秋，王宗金，艾子涵，等. 煤矿钻井泥浆–木质素复合固化风积沙试验研究[J]. 西北地质，2026，59(2)：99−106. DOI：10.12401/j.nwg.2025065

Citation：QI Yanqiu，WANG Zongjin，AI Zihan，et al. Study of the Solidification Process of Wind-Transported Sand Utilizing a Composite of Coal Mine Drilling Slurry and Lignin[J]. Northwestern Geology，2026，59(2)：99−106. DOI：10.12401/j.nwg.2025065

煤矿钻井泥浆–木质素复合固化风积沙试验研究

亓燕秋[1]，王宗金[1]，艾子涵[2]，王蕾[3]，辜超颖[2]，李金雨[2]，王新刚[2,*]

（1. 中煤特殊凿井有限责任公司，安徽 合肥 230001；2. 西北大学 地质学系，数字孪生与重大设施灾害防控陕西省高等学校重点实验室，陕西 西安 710069；3. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司，陕西 西安 710054）

摘 要：随着新时代西部大开发的推进，中国西北沙漠周边地区建筑材料的短缺问题愈发严重，致使风积沙作为主要的建筑选择成为一项迫切需求。本研究创新性的利用当地废弃钻井泥浆与木质素的复合材料对风积沙的进行改良，探索了不同配比的复合固化材料对于沙土样本的无侧限抗压强度及其抗渗特性的影响。研究结果表明：①钻井泥浆与木质素作为固化剂能够显著提升沙土样本的无侧限抗压强度，其强度表现出线性递增的趋势，并且随着养护时间的延长，先是减小然后趋于平稳。②随着固化剂的添加，样品的抗渗能力有明显提升，并且在龄期的延续中这一趋势表现为初期下降后趋于平稳；适当比例的钻井泥浆与木质素通过填充样品内部的孔隙、包裹土壤颗粒并优化其结构，使土体变得更为紧实；结合离子固化剂的粘结作用，能够有效降低孔隙的尺寸和连通性，从而提升其抗水渗透的能力。③提出了一种复合风积沙固化剂，其最优配比为3%的钻井泥浆与8%的木质素，该固化剂经济实惠且生态环保。本研究可为西北风积沙地区建筑材料的改善及钻井泥浆的资源化利用提供一种新思路。

关键词：煤矿；钻井泥浆；木质素；风积沙；复合固化

中图分类号：P642.3；TU45 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)02-0099-08

Study of the Solidification Process of Wind-Transported Sand Utilizing a Composite of Coal Mine Drilling Slurry and Lignin

QI Yanqiu[1], WANG Zongjin[1], AI Zihan[2], WANG Lei[3], GU Chaoying[2], LI Jinyu[2], WANG Xingang[2,*]

（1. China Coal Special Sinking Co., Ltd., Anhui 230001, Hefei, China；2. Department of Geology, Northwest University, Digital Twin and Major Facility Disaster Prevention and Control Key Laboratory of Higher Education in Shaanxi Province, Xi'an 710069, Shaanxi, China；3. Xi'an Engineering Investigation & Design Research Institute, China National Nonferrous Metals Industry Co.Ld., Xi'an 710054, Shaanxi, China）

Abstract：With the promotion of the national policy of developing the western region, the shortage of building

收稿日期：2025-03-03；**修回日期**：2025-04-27；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：国家重点研发计划项目“黄土高原基础设施密集区重大链生灾害时空演化与成灾放大效应”（2023YFC3008401），陕西省自然科学基础研究计划重点项目“秦岭矿集区地质灾害链成灾机理与防控关键技术研究”（2024JC-ZDXM-19）联合资助。

作者简介：亓燕秋（1984−），男，工程师，主要从事特殊法凿井（冻结、钻井）及土建工作。E−mail：583894571@qq.com。

*通讯作者：王新刚（1984−），男，博士，教授，主要从事地质灾害机理与防控研究工作。E−mail：xgwang@nwu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

materials in the surrounding areas of the northwest desert in China has become increasingly severe, making wind blown sand the main building choice an urgent need. This study innovatively utilized local waste drilling mud and lignin composite materials to improve aeolian sand, exploring the effects of different ratios of composite solidification materials on the unconfined compressive strength and impermeability characteristics of sand samples. The research results show that: ① Drilling mud and lignin as solidifiers can significantly improve the unconfined compressive strength of sand samples, and its strength shows a linear increasing trend, and with the extension of curing time, it first decreases and then tends to stabilize. ② With the addition of curing agent, the impermeability of the sample has been significantly improved, and this trend shows an initial decrease followed by a stabilization over time. The appropriate proportion of drilling mud and lignin fills the pores inside the sample, wraps around soil particles, and optimizes their structure, making the soil more compact. At the same time, combined with the bonding effect of ion curing agents, it can effectively reduce the size and connectivity of pores, thereby enhancing their ability to resist water infiltration. ③ A composite wind blown sand solidifier was proposed, with an optimal ratio of 3% drilling mud and 8% lignin. This solidifier is economical and environmentally friendly. This study can provide a new idea for the improvement of building materials and the resource utilization of drilling mud in the northwest wind blown sand area.

Keywords：coal mines；drilling mud；lignin；aeolian sand；composite curding

近年来，中国西北地区风积沙区域由于基础设施建设的不断增加，使得使用风积沙作为主要建材的需求愈发迫切（高玉生等，2013）。然而，作为工程填料或建筑基础时，风积沙往往未能达到工程强度和抗渗透的标准，导致地基和路基出现不均匀沉降以及侧向变形等工程问题愈发严重，这些问题严重影响了建筑物的安全性和使用寿命。因此，针对风积沙的加固和改良技术的研究受到了广泛的关注（张玉等，2017）。

风积沙的改良技术可主要归类为物理和化学性质改良两类（鲁先龙等，2018）。物理方面的改良主要是通过加固材料的力学特性，与土壤颗粒之间的物理相互作用来改善土体的结构及工程性质。例如，尹文华等（2021）的研究表明，压实法在稳定性上表现优异。然而，物理改良方法通常面临工程量较大、优缺点明显及适用性有限等挑战。化学改良是通过使用固化剂对土壤实施化学处理，以改变土壤的成分和工程性能，从而提升土质的强度和改善压实效果，这种方法施工方便、效率高，并且固化剂的种类丰富，适用领域广泛（陈欣等，2025）。风积沙的化学改良材料主要由水泥和二灰等常见无机结合料组成，Zhang et al.（2024）指出，橡胶颗粒的添加能够增强风积沙材料的旁向变形能力和韧性，风积沙路基在劈裂拉伸和压缩方面的性能也略有改善。Yang et al.（2024）研究表明，通过引入纤维、淤泥及水泥，可以显著增强风积沙的抗压强度与延展性。尽管传统材料因其低成本和易于获取而被广泛采用，但其缺点也逐渐浮现。例如，肆意收缩、易出现裂缝、早期强度不足，以及对抗水和抗冻能力较弱等问题，同时还伴随高能耗和污染，不符合可持续发展的要求。因此，自 21 世纪以来，岩土化学、有机化学以及高分子材料学等领域迅猛发展，促使各国的工程师们推出了多种新型的化学改良材料。Salvatore et al.（2020）指出，通过应用胶体纳米二氧化硅进行灌浆，可以有效减轻风积沙的液化现象，同时改善其流变特性和剪切强度。朱旭芬等（2023）指出，采用有机聚合物复合纤维能显著强化沙土的压缩强度。因此，合理有效地应用固化剂，使风积沙能够被持续固化，以便满足更高标准的工程需求，将是未来研究的重要方向。

近些年，钻井法技术在西部地区得到普遍应用，但随之而来的泥浆等工业废物处理问题已成为企业和政府面临的环保挑战（刘志强，2013）。此外，在工程建设中综合利用各类废物，可有效减少资源消耗和降低碳排放（包含等，2025）。目前，已有学者将其应用到矿山生态修复中，发现钻井所使用的泥浆中含有丰富的水分和细颗粒土壤，这为改善风积沙提供了必要的水源和物质支持（李金雨，2025）。通过综合评估国内外的研究进展，笔者选取毛乌素的风积沙作为实验材料，并结合传统无机固化剂钻井泥浆与木质素固化剂，优化其使用效果，以提升固化效果。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

所采集的试验风积沙来自于毛乌素沙漠（图 1），



图1　研究区位置

Fig. 1　Location of the study area

沉积深度范围为 1.0 至 3.0 m, 颜色从棕黄到黄褐色不等, 这些材料可归类为第四纪形成的风成沙。其基本物理参数(表 1)。

研究所使用的水基废弃钻井泥浆来源于位于榆林可可盖钻井区域(图 2a), 属于中煤特殊凿井有限责任公司。该水基废弃钻井泥浆呈现胶体状态, 主要成分是膨润土, 固体与液体的质量比为 0.5, 重金属等污染物的含量符合 pH＞7.5 的标准要求。鉴于废弃钻井泥浆中的水分含量各异, 因此将煤矿钻井泥浆在 105 ℃的环境下烘干其水分, 保留其干基成分, 通过干基含量进行实验, 以便在使用时根据水分含量精确计算固液相的混合泥浆比例。此外, 通过优化泥浆的烘干和运输流程, 可以降低处理费用, 减少可能的二次污染。

表 1　风积沙的物理特性

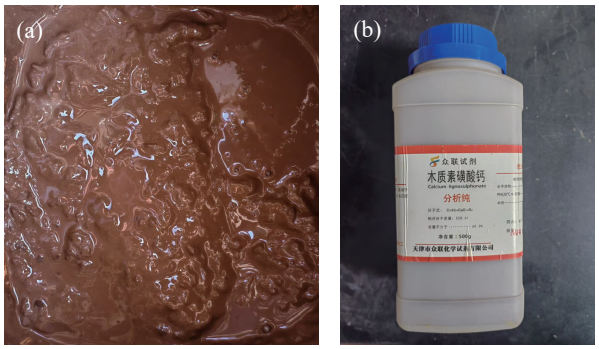
Tab. 1　Physical features of sand driven by wind

比重	天然干密度(g/cm^3)	天然含水率(%)	粒度组成(%)		
			＜250 μm	250 ~500 μm	>500 μm
2.61	1.65	3.6%	64.22	29.13	1.64

木质素是一种广泛存在于植物中的天然高分子结构, 属于芳香族聚合物, 它是由苯丙烷结构单元通过醚键与 C–C 键交联形成的三维聚合物。其外观为棕色粉末, 具有刺鼻的气味, 容于水中, 且表现出良好的稳定性, 兼具较强的分散性和粘合作用, 同时其水溶液展现出胶体特性。在本次研究中, 所使用的木质素由天津市众联化学试剂有限公司生产(图 2b)。

为了确保改良风积沙能实现最佳的强度性能, 本研究进行了前期的击实试验(GB/T 50123-2019 土工试验方法标准), 确定了土样的最佳含水量(12.7%)及最大干密度(1.78 g/cm^3)(图 3)。

对沙样进行处理时, 首先需筛除杂质, 经过 2 mm 筛后, 再将其置于 105 ℃ 的烘箱中进行干燥, 以备后续使用。将改良材料的投入比例定义为其质量与干燥土壤质量的比值。在准备样品的过程中, 先选择 3%、6%、9%、12% 的钻井泥浆配比, 再选择 2%、4%、6%、8% 的木质素, 经过充分混合搅拌后, 将其添加到风积沙中。需向混合物中加入适量的水, 继续搅拌均



a. 钻井泥浆；b. 木质素

图2 试验材料：

Fig. 2 Experimental materials

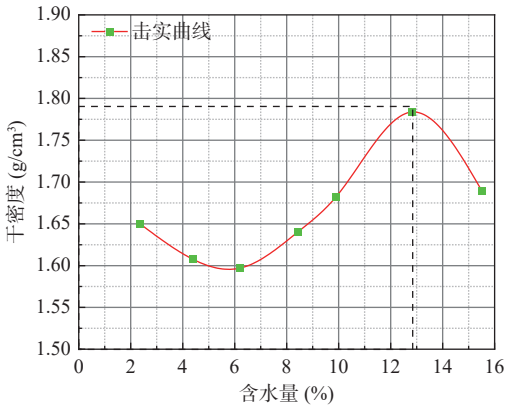


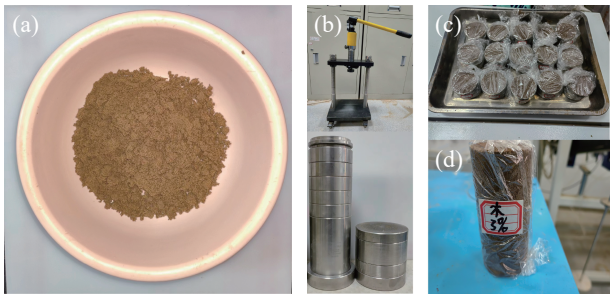
图3 风积沙击实曲线

Fig. 3 Aeolian sand compaction curve

匀；将混合物放入容器并用保鲜膜密封，静置 24 h，以确保水分能够充分融合。在制作样品时，应当使用环刀模具与无侧限试样模具，并采用静态加压的方法来制备，确保样品的最大干密度为 1.78 g/cm^3，最佳含水量为 12.7%。鉴于沙漠地区的干燥炎热气候及其相对较高的温度能有效增强高分子材料的性能，建议将样品的养护温度设定为 40 ℃，在用保鲜膜进行封装后分别静置 7 d、14 d 和 28 d 再进行测试(图 4)。

1.2 试验方案

为探究煤矿钻井泥浆–木质素复合固化风积沙物理性质变化规律，笔者设计了一系列抗压强度和渗透强度试验，试验工况为不同复合掺量(煤矿钻井泥浆为 3%、6%、9%、12% 和木质素为 2%、4%、6%、8%)和不同龄期(7 d、14 d、21 d)。抗压强度土样制备为直径×高度为 39.1 mm×80 mm 的圆柱体试样，仪器为采用南京土壤仪器厂公司生产的 YSH 型应变控制无侧限抗压仪，试验进行的加载速率为 2.4 mm/min。渗透试验所制备的固化土样呈现为直径×高度为 61.8 mm×40 mm 的环刀形状，测试方法采用变水头渗透法，并



a. 混合风积沙；b. 制样设备；c. 渗透试样；d. 无侧限抗压试样

图4 样品制备图，

Fig. 4 Sample preparation illustration

使用南京土壤仪器厂的 TST-55 型渗透仪进行试验。

2 试验结果与分析

2.1 抗压力学结果分析

固化风积沙无侧限抗压强度应力–应变曲线(图 5)显示，初始阶段–线性弹性阶段：在孔隙被压缩时，应变曲线将进入弹性形变，此时的应力–应变曲线将呈现近乎直线的特征，而掺固化剂的样品同样显示出类似的线性增长趋势。28 d 固化的样本在应力–应变曲线上的上升斜率显著高于 7 d 和 14 d 的样本，这是由于在此阶段样本内部的固化剂已完全结合，同时固化剂的添加在一定程度上增强了样本的强度。在第二阶段的发展期(b～c 段)，随着外部施加的负荷逐步增大，所形成的应力–应变曲线显示出向上凸起的趋势，曲线的斜率会随着负载的上升逐渐减缓，直到达到固化样品的抗压强度极限。高掺固化剂的试样在不同的养护时间和掺量下(图 3)，其峰值强度均明显高于低掺量试样。向样本中加入钻井泥浆以及木质素的方式，能够显著提升材料的抗压性能，且随着这些材料的添加比例增加，样本所承受的最大应力对应的轴向应变也会有所上升(图 3)。在第 3 阶段，即峰值破坏阶段(c～d 段)，所测固化样品在达到最大强度后会迅速下降至零，强度瞬间衰减。相比之下，低掺量的样品则显示出相对平滑的应力–应变关系。掺量越高的胶结材料，其在峰值后应力下降的斜率也更大，说明添加固化剂显著改变了其残余强度。经过 14 d 的固化，添加 8% 钻井泥浆和 6% 木质素的样本展现出显著的强化效果(图 5)，超越了其他所有试样，说明在这个范围内，这种配比的增强效果最佳。

试件在不同工况下的无侧限抗压强度变化趋势

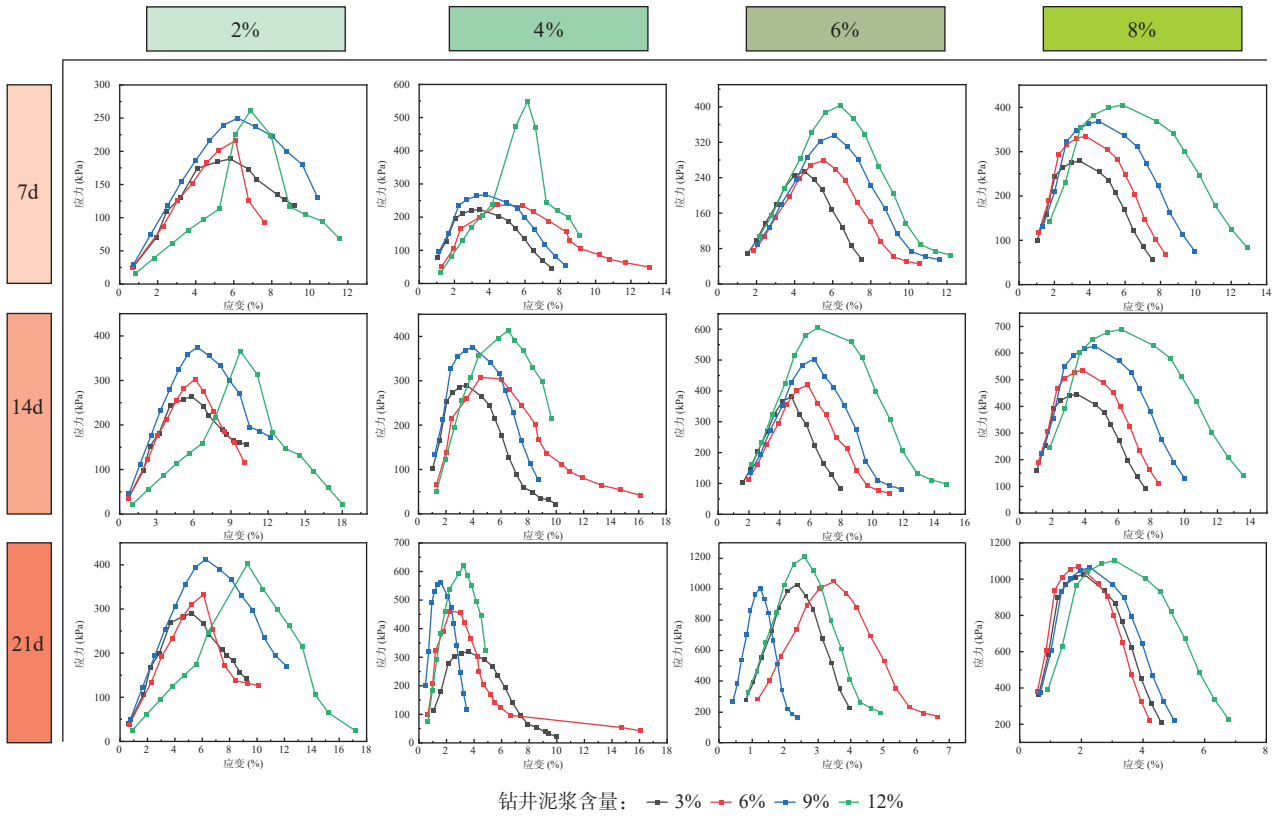


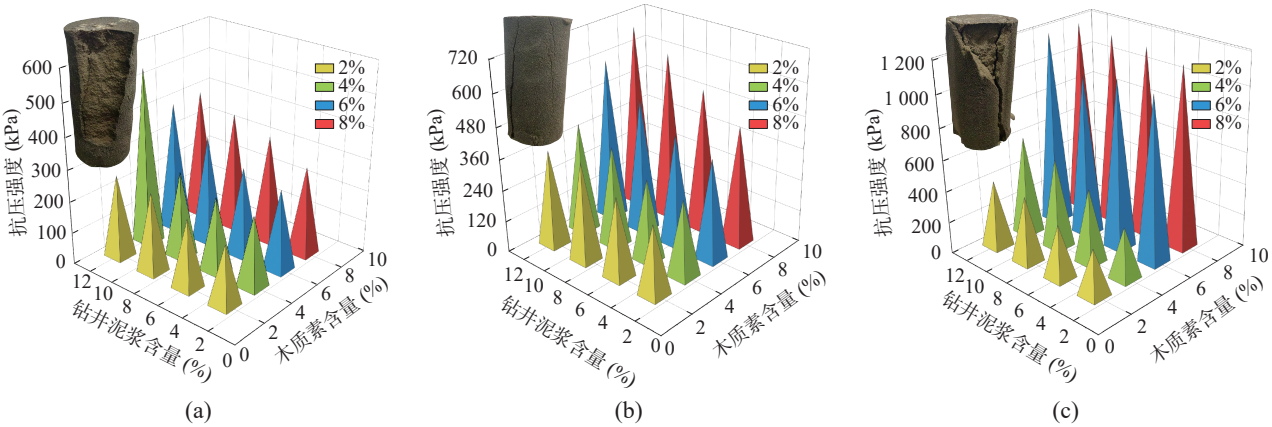
图5　固化风积沙无侧限抗压强度应力–应变曲线

Fig. 5　The stress-strain relationship associated with the unconfined compressive strength of treated aeolian sand.

(图 6)显示，试样的无侧限抗压强度呈现出提升趋势，最低值在 7 d 时为 0.26 MPa，而在 28 d 时则达到了 1.20 MPa，显示出显著的增强。通过分析发现，当木质素的掺入量较低时，与 3% 钻井泥浆和 2% 木质素相比，当护养时间达到 28 d 时，钻井泥浆的比例从 9% 增加到 12%，样本的无侧限抗压强度相应增长了 14.82%、42.07% 和 45.51%。在低掺量的钻井泥浆中，当木质素的比例从 4% 上升至 8% 时，样品的无侧限抗压强度分别提升了 10.0%、254.83% 和 357.59%。随着养护时间的不同，以 3% 钻井泥浆和 2% 木质素作为参考，与 7d、14 d 的样本进行对比，所测得的样本强度分别提升了 54.25% 和 10.27%。

2.2　抗渗性试验结果分析

经过 7 d 养护后，渗透系数随钻井泥浆和木质素



a. 7 d；b. 14 d；c. 21 d

图6　无侧限抗压强度变化图

Fig. 6　Shows the variation of unconfined compressive strength

掺量的增加呈现显著下降趋势(图 7)。在钻井泥浆掺量为 3% 与木质素掺量为 2% 的配比下,渗透系数达到最大值。当钻井泥浆掺量为 3% 不变时,随着木质素掺量从 2% 增至 8%,试样的渗透系数依次变化为 2.115×10^{-5}、1.89×10^{-5}、4.715×10^{-6} 及 5.08×10^{-6}。当木质素掺量为 2% 时,钻井泥浆掺量由 3% 递增至 12%,渗透系数依次为 2.115×10^{-5}、2.05×10^{-5}、1.88×10^{-5} 及 1.605×10^{-5}。在煤矿钻井泥浆和木质素不变条件下,渗透系数随养护时间延长呈现阶段性变化。以钻井泥浆掺量为 3% 和木质素掺量为 2% 配比为例,7 d、14 d 及 21 d 对应的渗透系数分别为 2.115×10^{-5}、$1.903\,5\times10^{-5}$ 和 $9.094\,5\times10^{-6}$。

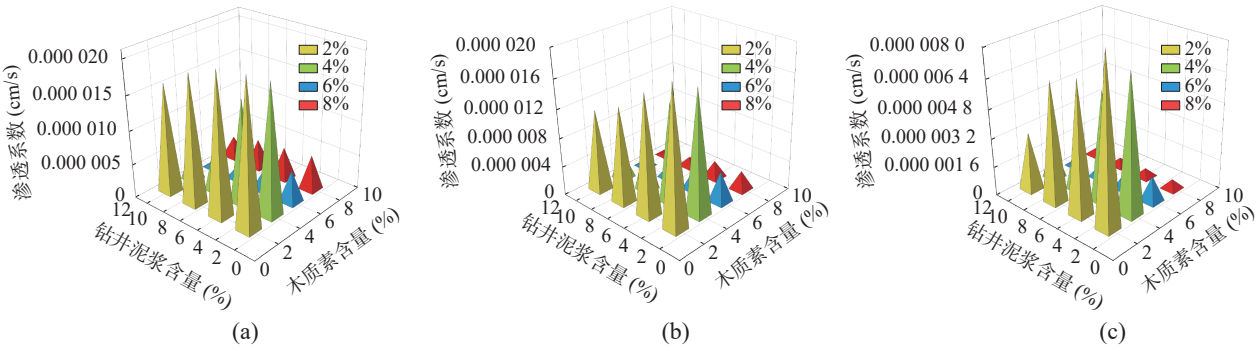


图7 固化风积沙渗透系数变化图(a 为 7 d; b 是 14 d; c 为 21 d)

Fig. 7 Shows the variation of permeability coefficient of solidified aeolian sand (a is 7 d; b is 14 d; c is 21 d)

3 讨论

在木质素的改良过程里,其质子化反应会引发一定数量的水分释放(图 8)。然而,如果水分过量,则可能会导致固化效果降低,甚至对试样的结构强度产生不良影响(何怡等, 2024; Li et al., 2022)。煤矿钻井泥浆的使用有助于适当控制木质素的水分释放,从而减少因过度水化而导致的固化剂与矿物质的溶解与损失。通过合理的水分管理,煤矿钻井浆料与木质素结合而成的复合材料能保持在固化阶段的优良化学稳定性和物理强度。

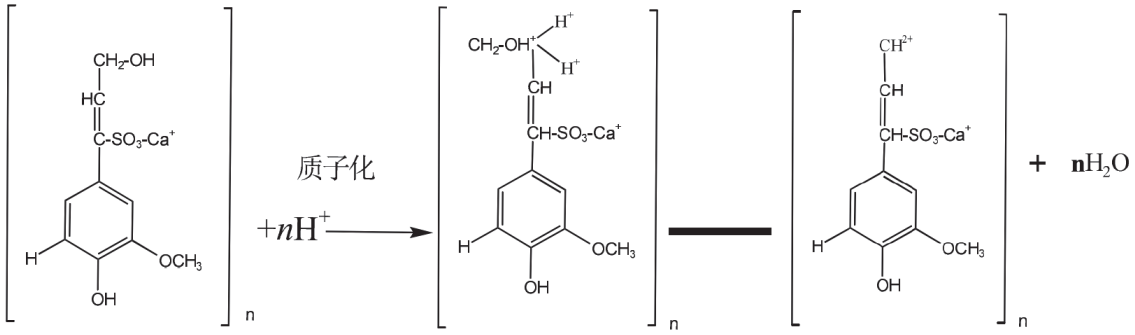


图8 木质素的质子化水解作用图

Fig. 8 Depicts the process of protonation and hydrolysis involving lignin

加入木质素后,煤矿钻井泥浆能够与其中的黏土矿物及其他聚合物形成复合物(图 9)。木质素中所含的钙离子可与钻井泥浆里的钾离子和钠离子进行阳离子交换,进而提升孔隙中的离子价态,增加阳离子浓度。这一过程会导致双电层的厚度减薄,矿物之间的间距也随之减少,增强颗粒的连接能力,改变双电层的结构,进一步提升煤矿钻井泥浆的粘附性(白镇滔, 2023)。这种增强的粘结特性不仅使煤矿钻井泥浆在与风积沙的结合力上得到提升,还能显著提高泥浆的稳定性,防止其流失。木质素与泥浆中多种成分发生作用,构建出一种强韧的复合体,显著增强了煤矿钻井泥浆在风沙条件下的粘附性能。

当煤矿钻井中使用的泥浆与木质素的复合材料与风积沙相结合时,木质素会通过化学作用与风积沙的表面产生联系。这种化学反应不仅提升了泥浆与风积沙之间的粘合力,还促成了复合材料的固化过程,

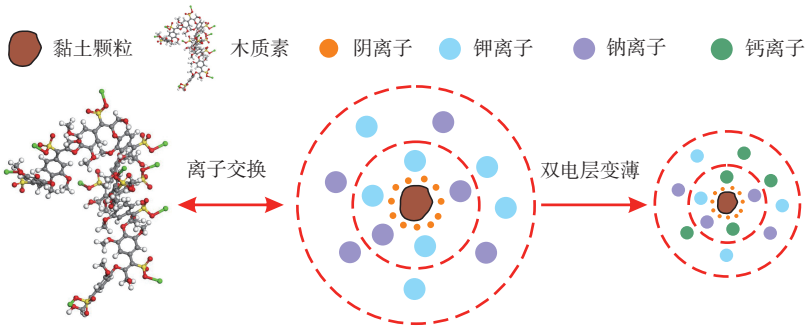


图9　煤矿钻井泥浆–木质素变化图

Fig. 9　Illustrates the variation diagram of lignin in the drilling mud used in coal mining

形成了更为坚固的结晶体。此外，正电荷的木质素类聚合物在静电引力的作用下，与微带负电的钻井泥浆中的黏土矿物发生相互作用，形成稳定的共价连接，在接触部位产生胶结，提高土壤的整体强度。这一固化过程显著减少了风积沙中的空隙，使沙粒之间的结合更为紧密，使得松散的沙粒转变为一种更加稳固的固态结构。添加复合固化材料能够显著增强风积沙的物理强度（图 10；王爱琴，2024；王芮芮等，2025）。

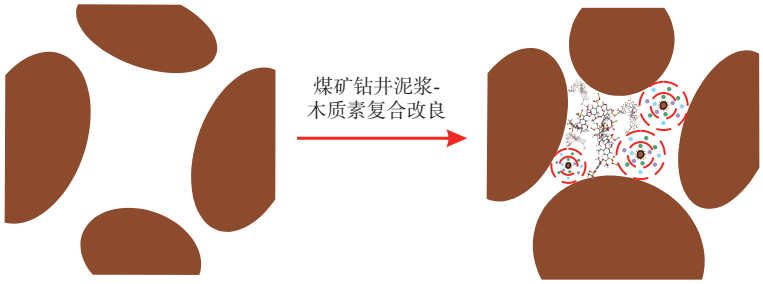


图10　煤矿钻井泥浆–木质素改良风积沙机理图

Fig. 10　Shows the mechanism involved in enhancing wind-blown sand using lignin derived from coal mine drilling mud

4　结论

（1）利用钻井浆液与木质素固化剂的组合，能够显著提高风积沙的无侧限抗压强度。试验结果表明，随着该浆液和木质素的使用比例增加，样品的无侧限抗压强度也逐渐增强。但在材料养护过程中的后期，其强度呈现出先增后稳的趋势。随着固化剂添加量的增加，试样的渗透性系数呈现逐步降低的趋势，同时随着龄期的推移，试样渗透性系数表现出初期降低而后趋于稳定的特点。

（2）适量的钻井泥浆和木质素能够有效填充样品内部的空隙，同时在土体中形成黏合物质，封闭土颗粒，从而优化土壤结构，使其更加紧凑。固化剂的引入能有效增强土粒间的结合力，促使土体颗粒的排列和结构发生变化，因此减少孔隙的大小和其连通性，从而降低水分的渗透性。

（3）探索了一种生态改良沙土固化剂，其最佳配比为 3% 的钻井泥浆与 8% 的木质素。该固化剂使用简便且成本效益高，为西北地区的钻井泥浆处理和利用提供了新的思考方向，同时在风积沙区域的路基填料改善方面也展示了广泛的应用潜力。

利益冲突声明（Conflict of Interests）：

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献（References）：

白镇滔. 木质素磺酸钙改性湿陷性黄土的力学性质与微观机理研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.

BAI Zhentao. Study on mechanical properties and microscopic mechanism of calcium lignosulfonate modified collapsible loess [D].Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.

包含, 王耿, 晏长根, 等. 公路建设碳排放核算与岩土工程低碳

措施及碳补偿研究综述[J]. 中国公路学报, 2025, 38(1): 46−72.

BAO Han, WANG Geng, YAN Changgen, et al. Highway Construction Carbon Emission Assessment and Low-carbon Measures and Carbon Compensation for Geotechnical Engineering: A Review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(1): 46−72.

陈欣, 安然, 张先伟, 等. MICP 固化花岗岩残积土的崩解特性[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(2): 138−144+171.

CHEN Xin, AN Ran, ZHANG Xianwei, et al. Disintegration Characteristics of MICP-treated Granite Residual Soils[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(2): 138−144+171.

高玉生, 程汝恩, 屈志勇, 等. 中国沙漠风积沙工程性质研究及工程应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

何怡, 张迎新, 李成龙, 等. 工业废弃木质素固化土特性及其在岩土工程中的应用进展[J]. 南京工业大学学报 (自然科学版), 2024, 46(4): 397−406.

HE Yi, ZHANG Yingxin, LI Chenglong, et al. Characteristics of industrial waste lignin stabilized soil and its application progress in geotechnical engineering[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 46(4): 397−406.

李金雨, 王新刚, 亓秋燕, 等. 钻井法泥浆用于陕北榆林地区矿山生态修复资源化利用试验研究[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 197-208.

LI Jinyu, WANG Xingang, QI Qiuyan, et al. Experimental Study on the Use of Drilling Mud for Ecological Restoration of Mines in Yulin, Northern Shaanxi[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 197−208.

刘志强. 机械井筒钻进技术发展及展望[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1116−1122.

LIU Zhiqiang. Development and Prospect of Mechanical Wellbore Drilling Technology[J]. Journal of Coal Industry, 2013, 38(7): 1116−1122.

鲁先龙, 乾增珍, 杨文智, 等. 沙漠风积沙地基的水泥固化及其性能试验[J]. 工业建筑, 2018, 48(3): 103-108.

LU Xianlong, QIAN Zengzhen, YANG Wenzhi, et al. Cement solidification and performance test of desert aeolian sand foundation [J]. Industrial Architecture, 2018, 48 (3): 103-108.

王爱琴. 木质素和木质素磺酸钙固化黄土的路用性能研究[J]. 甘肃科技, 2024, 40(11): 55−59.

WANG Aiqin. Study on the Road Performance of Lignin and Lignosulfonate Calcium Cured Loess[J]. Gansu Science and Technology, 2024, 40(11): 55−59.

王芮芮, 项伟, 周游, 等. 木质素磺酸钙改良黄土的水理性质及微观结构研究 [J/OL]. 宁夏大学学报 (自然科学版), 2025, 1−10.

WANG Ruirui, XIANG Wei, ZHOU You, et al. Study on the Water Physical Properties and Microstructure of Loess Modified by Lignosulfonate Calcium [J/OL]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition),2025, 1−10.

尹文华, 王旭, 张继周, 等. 沙漠腹地高速公路风积沙填料压实特性及填筑方法试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1177−1187.

YIN Wenhua, WANG Xu, ZHANG Jizhou, et al. Experimental study on compaction characteristics and filling methods of wind blown sand filling materials for highways in desert hinterland[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1177−1187.

张玉, 张向东, 陈铁林, 等. 风积土地区工程病害分类和防治系统化研究[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 11-16+21.

ZHANG Yu, ZHANG Xiangdong, CHEN Tielin, et al. Systematic study on the classification and prevention of engineering diseases in wind blown soil areas [J]. Disaster Science, 2017, 32 (1): 11-16+21.

朱旭芬, 黄庭伟, 刘瑾, 等. 有机聚合物复合纤维改良砂土无侧限抗压强度研究[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51(6): 90−98+116.

ZHU Xufen, HUANG Tingwei, LIU Jin, et al. Study on Unconfined Compressive Strength of Organic Polymer Composite Fiber Modified Sand Soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 90−98+116.

Li H, Huang Y, Lin X, et al. Microwave-assisted depolymerization of lignin with synergic alkali catalysts and a transition metal catalyst in the aqueous system[J]. Reaction Chemistry & Engineering, 2022, 7(8): 1750−1761.

Salvatore E, Modoni G, Mascolo M C, et al. Experimental Evidence of the Effectiveness and Applicability of Colloidal Nanosilica Grouting for Liquefaction [J]. Mitigation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2020, 146(10).

Yang X, Hu Z, Wang Y, et al. Aeolian sand stabilized by using fiber- and silt-reinforced cement: Mechanical properties, microstructure evolution, and reinforcement mechanism [J]. Construction and Building Materials, 2024, 411, 134750.

Zhang X, Geng J, Hu G, et al. Toughening characteristics of rubber granule-improved alkali-activated slag-stabilized aeolian sand [J]. Construction and Building Materials, 2024, 438, 137059.