

纳米硅基固沙材料加固机理及抗冲蚀试验研究

袁进科, 裴 钻, 杨森林, 余 浩, 胡孝洪, 刘 海

An experimental study of the reinforcement mechanism and erosion resistance of nano silicon-based sand-fixation material

YUAN Jinke, PEI Zuan, YANG Senlin, YU Hao, HU Xiaohong, and LIU Hai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210019>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改性纳米硅材料加固松散砂土的工程特性研究

A study of the engineering characteristics of reinforced loose sand by modified nano-Si materials

徐岗, 裴向军, 袁进科, 陈杰, 任和 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 142-149

双聚材料改良黄土持水性及生态效应研究

A study of water retention and ecological effects of loess improved by double polymers

朱利君, 裴向军, 张晓超, 任童, 杨晴雯 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 158-166

瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究

An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess

杨万里, 石玉玲, 穆鹏雪, 贾卓龙, 曹怡菡 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 117-124

粉煤灰基地聚物加固土的强度及抗冻融性能试验研究

Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil

陈忠清, 朱泽威, 吕越 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 100-108

膨胀土地区地下结构抗浮失效机理及主动抗浮措施应用

Anti-floating failure mechanism of underground structures in expansive soil area and application of active anti-floating measures

罗益斌, 陈继彬, 王媛媛, 沈攀 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 64-73

基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究

An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology

袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 叶宏峰 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 66-74



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210019

袁进科, 裴钻, 杨森林, 等. 纳米硅基固沙材料加固机理及抗冲蚀试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 80-89.
YUAN Jinke, PEI Zuan, YANG Senlin, *et al.* An experimental study of the reinforcement mechanism and erosion resistance of nano silicon-based sand-fixation material[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 80-89.

纳米硅基固沙材料加固机理及抗冲蚀试验研究

袁进科¹, 裴钻¹, 杨森林¹, 余浩¹, 胡孝洪², 刘海²

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川成都 610059; 2. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队, 西藏拉萨 850007)

摘要: 为了减少荒漠化地区沙坡在降雨冲蚀作用下坡体坍塌、水土流失的发生, 以西藏雅鲁藏布江河谷分布的沙质边坡为研究对象, 提出采用自主研发的纳米硅基固沙材料(nano-silicon/polymer composites, NSPC)对沙坡坡面进行防护。针对 NSPC 固沙材料加固沙体作用效果尚不明确, 基于红外光谱、黏度测试、接触试验以及模拟沙坡降雨冲蚀试验, 探讨 NSPC 固沙材料加固沙体的作用机理, 研究降雨作用下 NSPC 固沙材料加固沙体的抗冲蚀能力。试验结果表明: NSPC 固沙材料与沙粒通过聚合、胶结作用相互交叉缠绕、联结形成立体网状结构, 从而达到加固沙体的目的; NSPC 固沙材料的流变性在初始 1 h 内属于宾汉流体, 后期逐渐转变为牛顿流体; NSPC 固沙材料表面张力为 60.31 mN/m, 与沙体接触角为 48.6°, 黏附力为 0.040 N/m, 因此具有较强的入渗能力; 沙坡表面形成的加固层对雨水冲蚀具有较强的阻滞效果, 并且加固层还具有一定的保水能力。本研究可为 NSPC 固沙材料在荒漠化地区固沙防护工程中的应用及推广提供试验支撑。

关键词: 荒漠化; 纳米硅; 固沙材料; 加固机理; 抗冲蚀能力

中图分类号: TU441; X171.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0080-10

An experimental study of the reinforcement mechanism and erosion resistance of nano silicon-based sand-fixation material

YUAN Jinke¹, PEI Zuan¹, YANG Senlin¹, YU Hao¹, HU Xiaohong², LIU Hai²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Xizang Autonomous Region Geological and Mineral Exploration and Development Bureau Second Geological Unit, Lhasa, Xizang 850007, China)

Abstract: To reduce the slope collapse and soil erosion under the action of rainfall erosion in desertification areas, the self-developed nano silicon-based sand-fixation material (Nano-Silicon/Polymer Composites, NSPC) is proposed to protect the sandy slope surface of the Yarlung Zangbo River Valley in Xizang. In view of the unclear effect of NSPC sand-fixing material on strengthening sand body, based on infrared spectrum, viscosity test, contact test and simulated sandy slope rainfall erosion test, the mechanism of NSPC sand-fixation material to strengthen the sandy slope is discussed, and the anti-erosion ability of the NSPC sand-fixation material under the rainfall is studied. The results show that the NSPC sand-fixation material and sand particles cross and intertwine with each other through polymerization and cementation to form a 3D network structure, so as to achieve the

收稿日期: 2022-10-10; 修订日期: 2022-12-21

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702318); 西藏地质勘查局科研项目(KJ-2021-04)

第一作者: 袁进科(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事荒漠化防治研究工作。E-mail: yuanjingke@163.com

通讯作者: 裴钻(1980-), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 27825683@qq.com

purpose of strengthening the sandy body. The rheological properties of the NSPC sand-fixation material belongs to Bingham fluid in the first 1 h, and gradually changes to Newton fluid in the later period. The surface tension of the NSPC sand-fixation material is 60.31 mN/m, the contact angle with sandy body is 48.6°, and the adhesion force is 0.040 N/m, therefore it has strong infiltration ability. The reinforcement layer formed on the sandy slope surface has strong blocking effect on rainwater erosion, and the reinforcement layer also has water retention ability. This study provides test support for the application and promotion of the NSPC sand-fixation material in sand fixation and protection projects in desertification areas.

Keywords: desertification; nano silicon; sand-fixation material; reinforcement mechanism; anti-erosion ability

西藏地区是我国土地荒漠化、沙漠化的重要区域之一, 给西藏生态环境和人民生产生活造成严重危害^[1-4]。西藏雅鲁藏布江河谷两岸分布大量的沙坡, 沙体具有结构松散、黏结力差、透水性强等特点。沙质边坡在受到降雨冲刷时常发生塌陷、滑坡等灾害, 并极易造成水土流失, 使得西藏地区脆弱的生态系统更加严峻^[5-6]。

目前常用的加固措施包括格构支护、锚喷支护等硬性防护措施, 防治往往只考虑到整个坡体是否稳定而忽视了坡面的抗水流冲蚀能力^[7-8]。目前化学固沙技术已成为全世界在生态环境方面的研究热点, 化学固沙是指在沙质边坡表面施用有机或无机类高分子固化材料, 以提高沙体的稳定性和抗冲蚀性, 加强沙质边坡稳定性^[9-11]。高分子类固沙材料是 20 世纪 60 年代发展的新型化学固沙材料, 采用高分子聚合物改良沙地, 具有施工简便、改良效果较其他材料更加显著更加稳定的特点, 引起了人们的普遍重视^[12]。荣驰等^[13]提出以二元酸酯为基础的新型水玻璃-酯类浆液对沙坡进行加固的思路, 得到的固沙体强度高、稳定性好。王龙威等^[14]通过三轴剪切试验研究了高分子固化剂改良沙土的剪切强度, 结果表明改良后的沙土黏聚力明显提升。黄河等^[15]通过大量室内试验, 研制了 STW 型生态沙土稳定剂, 并采用强度测试、扫描电镜等现代分析方法, 从微观上探讨了 STW 稳定剂固沙强度的形成机制。陈渠昌等^[16]采用物理及化学方法, 以聚丙烯材料为基础研发了复合固沙材料, 可以提高荒漠沙地的抗风蚀能力。Liu 等^[17]采用 PVIN 新型固沙材料提高了沙体的强度、保水性及抗冲蚀性。

当前, 纳米硅(Nano-SiO₂)作为新兴的纳米材料在固沙方面开始应用, 纳米粒子吸附水分子形成凝胶, 通过这种凝胶形成的联结力比靠结合水形成的联结力强^[18-20]。邓陈艳等^[21]对纳米硅溶胶固化后的标准

沙进行三轴固结不排水试验, 表明纳米硅溶胶能显著提高沙体的强度。徐岗等^[22]向纳米硅溶液中掺加可溶性聚丙烯酰胺配置水溶液固沙材料对松散沙体进行加固, 提高了沙体强度并改善其抗冲蚀性。国外 Changizi 等^[23]对掺入纳米硅的沙体力学性质展开研究, 发现最大干密度和强度均有所增加。Conlee 等^[24]用不同浓度硅溶胶固化后的沙体试样进行循环三轴试验, 试验表明硅溶胶加固的试样比未加固的试样在循环加载期间产生的应变小, 有利于抗冲蚀性的提高。

尽管当前对纳米硅材料开展了相应研究, 但主要以固沙体的力学特性试验为主, 并且纳米硅基固沙材料对于沙体的加固效果和固化机制尚不明确。为此, 本研究以西藏雅鲁藏布江河谷分布的沙质边坡为研究对象, 采用红外光谱、黏度测试和接触试验, 探讨纳米硅基固沙材料加固沙体的作用机理, 并基于降雨冲刷模拟试验, 评价降雨作用下纳米硅基固沙材料加固沙体的抗冲蚀能力。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验沙样

本试验沙样选自西藏山南地区雅鲁藏布江河谷荒漠化地区的沙坡, 该荒漠化沙坡的坡体主要由黄褐色的沙土组成(图 1), 沙体颗粒分布均匀, 结构松散, 沙坡坡度约 20°。现场在沙坡表层 0~10 cm 范围内采集沙样, 并将采集的沙体放置在取样盒内。

将沙样进行风干, 粒径主要集中在 0.075~0.250 mm 之间, 占总量的 68%, 属于均质细沙(图 2)。沙样天然密度为 1.43 g/cm³, 天然含水率为 0.5%, 孔隙比为 0.88。

1.1.2 固沙材料

本文所用的新型纳米硅基复合材料为浅白色乳液, 以平均粒径为 20 nm 的纳米二氧化硅(Nano-SiO₂)



图 1 河谷分布的沙坡

Fig. 1 Sandy slopes in the river valley

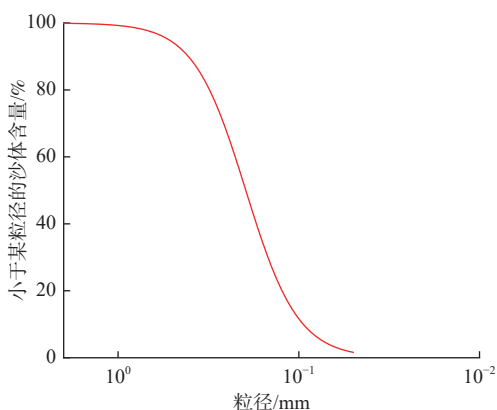


图 2 沙体颗粒级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of the particles

为基础,并结合平均粒径为 300 μm 的羟丙基甲基纤维素(hydroxypropyl methyl cellulose, HPMC)和 2 000 万分分子的阴离子型聚丙烯酰胺(Polyacrylic amide, PAM) 2 种高分子材料组成。其制备方法为:首先向溶质质量分数为 3% 的纳米硅溶液中加入 HPMC 和 PAM,组成物质质量比为 Nano-SiO₂:HPMC:PAM=3:1:0.15,搅拌均匀后再加入 NH₄Cl 作为催化剂进行缩聚反应,最终配制出质量分数 1.7% 的固沙材料(nano silicon/Polymer Composites, NSPC)。NSPC 固沙材料在常温下呈浅白色乳液(图 3),pH 值为 6~7,密度为 1.007 g/cm³,常温下黏度约 73 mPa·s,凝胶时间为 6 h,平均相对分子质量为 132 209。同时对固沙材料进行了毒理性测试,采用《电感耦合等离子体发射光谱分析方法通则》(JY/T 0567—2020)^[25]检测方法分别检测了汞、镉、铊、锑、铅等重金属以及氟、氯、溴等非金属指标,均未检测出相应元素,因此该材料属于无味、无毒、无公害的生态环保材料。

1.2 试验方法

1.2.1 红外光谱试验

NSPC 固沙材料作为一种纳米硅基黏性乳液,采用红外光谱法观测材料结构。依托红外光谱仪(iN10-



图 3 NSPC 固沙材料

Fig. 3 NSPC sand-fixation material

FTIR, 美国 Nicolet 公司)对固沙材料结构进行表征,扫描范围 400~4 000 cm⁻¹。

1.2.2 黏度试验

试验所用设备为美国 Brookfield 公司生产的 Brookfield-III 型旋转黏度计。以 NSPC 固沙材料为研究对象,采用旋转黏度计的六速档位按照《石油天然气工业 钻井液现场测试 第 1 部分:水基钻井液》(GB/T 16783.1—2014)^[26]所示方法测定黏度数据,根据数据计算 NSPC 固沙材料在不同时刻(0, 0.2, 0.5, 1.0, 3.0, 6.0 h)的表观黏度、塑形黏度以及流变性等参数。

1.2.3 接触试验

浆液与被注介质两者界面的接触角(润湿角) θ 可以通过接触试验来测试^[27]。若 $\theta < 90^\circ$ 说明被注介质具备亲浆性,具有浆液自动渗入被注介质和被注介质自动吸吮浆液的双向作用机制即吸渗,且接触角越小,吸渗作用越强;若 $\theta > 90^\circ$ 说明被注介质具有疏浆性,浆液很难渗入被注介质^[28]。采用 JC200D 型接触角测量仪分别测试 NSPC 固沙材料、水与沙体的接触角;同时采用 Sigma700 型表面张力测试仪分别测试 NSPC 固沙材料和水的表面张力。试验采用黏附力评价浆液接触能力大小,计算公式为

$$F = \sigma \cos \theta \tag{1}$$

式中: F ——黏附力/(mN·m⁻¹);
 σ ——表面张力/(mN·m⁻¹);
 θ ——接触角/(°);

1.2.4 冲刷试验

降雨冲刷模拟试验装置示意图如图 4 所示,主要由沙坡模型、降雨装置和测量系统组成。

降雨冲刷模拟试验现场布置如图 5 所示,其中降雨装置是整个模拟试验的主要部分。

(1)沙坡模型:结合冲刷试验模拟装置尺寸,分别堆砌 3 个沙坡模型(图 5)。沙坡模型高均为 60 cm,根

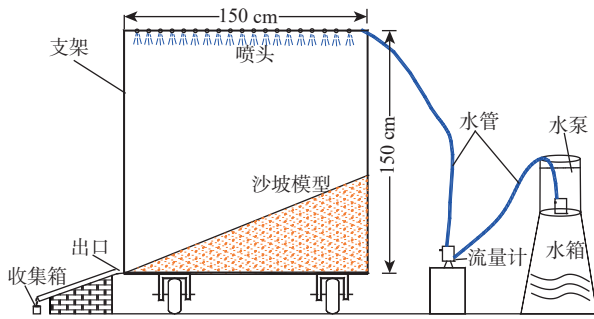


图 4 冲刷试验模型装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of model setup for the scouring experiment



图 5 试验现场布置图

Fig. 5 Layout of the test site

据现场沙坡的实际情况, 沙漠模型的坡度均为 20° , 含水率为 0.5%。其中①号和②号沙坡沿垂直方向分两部分堆填, 下部均为现场采集的沙样。首先通过喷雾器直接将 18 kg NSPC 固沙材料均匀的喷洒在①号沙坡表面, 形成约 5 cm 厚的喷洒加固层; 然后将 18 kg NSPC 固沙材料和 54 kg 沙样在搅拌桶里先进行预制混合, 再将混合料均匀铺设在②号沙坡表面, 形成约 5 cm 厚的拌和加固层。③号沙坡全部为现场沙样堆砌的完整裸坡。沙坡模型的坡脚均设有汇水出口, 用以储存降雨冲刷中沙坡冲出的沙粒。

(2)降雨装置: 降雨装置由水泵、水箱、水管、流量计、降雨喷头构成。试验时, 水由水箱通过水泵、水管、流量计和降雨喷头形成降雨; 通过控流阀门调节流量大小, 达到设计的降雨强度。

(3)测量系统: 测量系统包括传感器、数码相机、水分采集仪以及三维激光扫描等。传感器用于水分的测量, 布设在沙坡模型中部, 沿垂直方向分别布置

在坡面下 5 cm 和 10 cm 位置, 通过采集仪测量沙体水分的变化; 数码相机记录拍摄试验中沙坡冲刷全过程; 三维激光扫描用于试验过程中沙坡模型冲刷变形的微观观测。

3 个沙坡模型在试验装置内堆砌完成后, 在自然条件下养护 14 d 再进行冲刷试验。按照当地的暴雨强度, 本次模拟试验的降雨强度为 42.6 mm/h , 降雨持续时间为 1 h。3 个沙坡模型同时开展冲刷试验, 观察不同沙坡模型的坡面冲刷过程、沙体含水率变化规律以及坡面微观变形过程。

2 结果与分析

2.1 固沙材料理化性质分析

2.1.1 红外光谱特征

图 6 为 NSPC 固沙材料的红外光谱图。从图中可以看出, 在 3400 cm^{-1} 附近相对较宽和较强的频带由纤维素分子羟基 (-OH) 的伸缩振动引起, 这种广泛分布的伸缩振动由羟丙基甲基纤维素 ($\text{C}_{18}\text{H}_{38}\text{O}_{14}$) 强氢键作用导致。在 3000 cm^{-1} 处分布的条带由纤维素分子中 (-CH₂-) 的拉伸振动引起。羰基 (C=O) 的拉伸吸收峰出现在 1653 cm^{-1} , 属于聚丙烯酰胺类分子的酰胺基 (-CONH₂-) 作用。1200 ~ 1300 cm^{-1} 之间的条带由 1261 cm^{-1} 的纤维素醚 (-C-O-H-) 组成。同时在 800 ~ 900 cm^{-1} 之间分布有吸收峰, 表明材料中含有苯环结构, 分布的条带是由苯环的芳香骨架振动引起的。通过红外光谱分析结果表明, NSPC 固沙材料中的羟丙基甲基纤维素与聚丙烯酰胺通过官能团可以产生共聚反应。高分子链上大量的活性基团可以与更多沙粒接触, 长链的弯曲缠绕作用有助于改善固沙体结构并提高其整体稳定性^[29]。

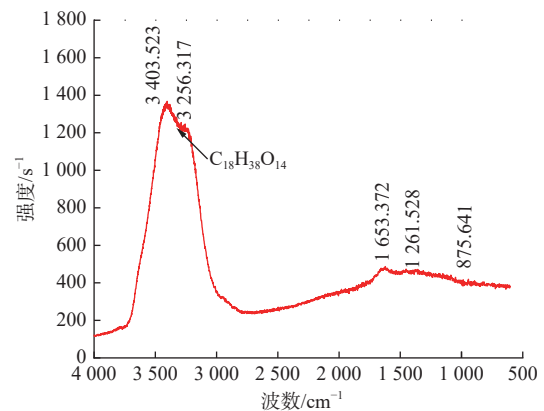


图 6 NSPC 固沙剂吸收光谱图

Fig. 6 FTIR spectra of the NSPC

2.1.2 黏度特性

NSPC 固沙材料在不同时刻的黏度变化如图 7 所示。随着时间的增加, NSPC 固沙材料的黏度在逐渐增加, 其中表观黏度增加较快, 而塑性黏度增加较慢。表观黏度表示浆液内所有颗粒内摩擦力的总和^[30]。材料的表观黏度增加较快说明材料内部的分子作用力较强, 从而固沙材料的内摩擦力随着时间的增加而增大, 从表观黏度趋势上分析固沙材料基本上在 3 h 后处于稳定状态。而塑性黏度表征了浆液静止后胶体系统被破坏的难易程度。从图 7 看出随着时间增加, 材料塑性黏度增加较慢, 说明整体结构稳定, 不易被破坏。

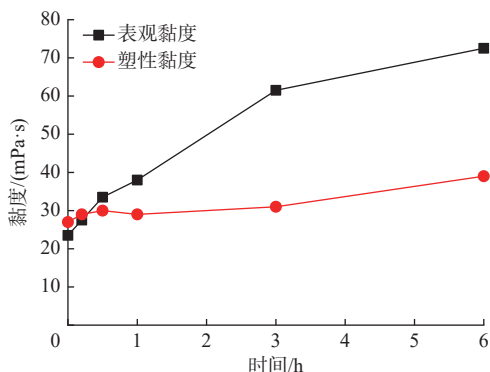


图 7 不同时刻固沙材料黏度变化
Fig. 7 Viscosity change of the sand-fixation material at different times

从图 8 可以看出 NSPC 固沙材料在初始反应时间 1 h 内, 其流变曲线呈线性变化, 说明初始阶段材料流变性为宾汉流体, 即塑性流体。但 1 h 后 NSPC 固沙材料的流变曲线呈非线性特征, 说明材料流变性逐渐转变为牛顿流体。可以看出反应时间 1 h 是宾汉塑性流体与牛顿流体的临界点。

2.1.3 接触试验

NSPC 固沙材料的表面张力为 60.31 mN/m, 与沙体的接触角为 48.6°; 水的表面张力为 71.88 mN/m, 与

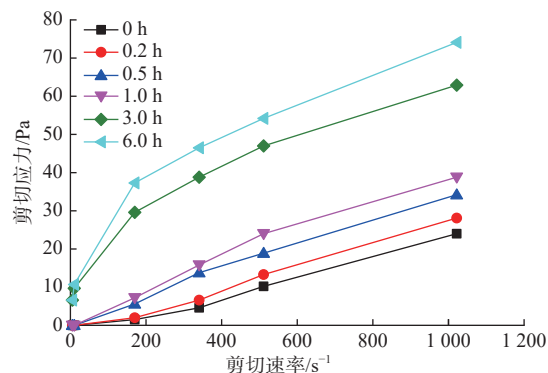


图 8 不同时刻固沙材料流变特征
Fig. 8 Rheological characteristics of the sand-fixation material at different times

沙体的接触角为 43.6°。接触试验表明固沙材料、水与沙体的接触角均小于 90°, 说明沙体与固沙材料的结合与水一样具有亲浆性, NSPC 固沙材料可以靠沙体的吸渗作用进入到沙粒中。同时, 固沙材料的接触角与水相差不大, 说明 NSPC 固沙材料具有与水相当的人渗能力。根据式(1)计算得到 NSPC 固沙材料与沙粒的黏附力为 0.040 N/m, 水与沙粒的黏附力为 0.052 N/m, 由于沙粒粒径很小, 说明固沙材料可以减缓或者阻碍水流在沙粒界面的吸渗作用。

2.2 固沙材料抗冲蚀性分析

2.2.1 坡面冲蚀特征

图 9 为不同时段已加固沙坡与未加固沙坡坡面的冲蚀特征图。其中图 9(a)为初始阶段 20 min 内, 已加固沙坡与未加固沙坡坡面的冲蚀特征图。从图中看出 3 个沙坡均没有明显变形, 此时表面沙体在雨水作用下还处于未饱和状态, 水流还未聚集形成坡面汇流, 所以 3 个沙坡均未发生变形。

随着降雨时间达到 30 min, 坡面逐渐形成汇流并对沙坡产生冲蚀作用。在水流冲蚀作用下, ③号未加固沙坡坡边开始产生沟蚀, 见图 9(b), 逐渐成为坡面冲刷的软弱带, 水土流失严重。而已加固的①号和

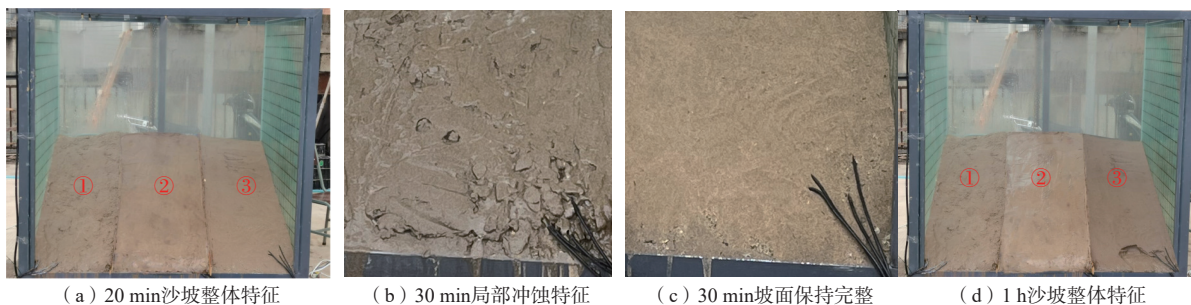


图 9 降雨下不同阶段坡面冲蚀过程
Fig. 9 Surface erosion phenomenon at different stages under rainfall

②号沙坡坡面平整完好, 未产生冲蚀破坏, 见图 9(c), 坡脚也没有沙粒堆积。

在降雨时间达到 1 h 后, ①号和②号加固沙坡整体仍保持完好, 未发生冲蚀变形。而③号未加固沙坡坡面发生明显变形, 同时由于降雨量增加, 雨水从坡面渗流并在坡脚汇集掏蚀形成冲沟, 沙坡前缘冲蚀特征明显, 见图 9(d)。可以看出 NSPC 固沙材料可以增强沙坡的抗冲蚀能力。

2.2.2 雨水入渗规律

图 10 为已加固沙坡与未加固沙坡不同深度沙体含水率随降雨持续时间的变化规律, 可以看出已加固和未加固沙坡的传感器都感应到明显的含水率信号变化。其中①号沙坡由于采用的是喷洒 NSPC 固沙材料的方式, 不同深度的传感器随着降雨时间的增加, 初始阶段含水率逐渐增加。深 5 cm 的传感器

含水率增长较快, 而深 10 cm 的传感器含水率在降雨时间达到 10 min 后开始增长, 这是由于雨水的入渗需要一定时间。当降雨时间达到 20 min 时, 深 5 cm 的传感器含水率为 20%, 而深 10 cm 的传感器含水率为 11%, 后面变化不大, 说明坡表的 NSPC 加固层开始阻滞雨水的进一步下渗; ②号沙坡采用的是铺设加固层方式, 不同深度的传感器在降雨时间达到 10 min 后开始变化, 基本在 20 min 后保持稳定, 深 5 cm 的传感器含水率为 24%, 而深 10 cm 的传感器含水率为 14%, 从中可以看出在坡表采用拌和方式形成的加固层, 其含水率在后后期基本保持稳定, 说明加固层对雨水下渗具有良好的阻滞作用。而③号未加固沙坡的含水率随着降雨持续时间显著增加, 并且在降雨时间达到 20 min 后沙体处于饱和状态, 含水率约 65%。

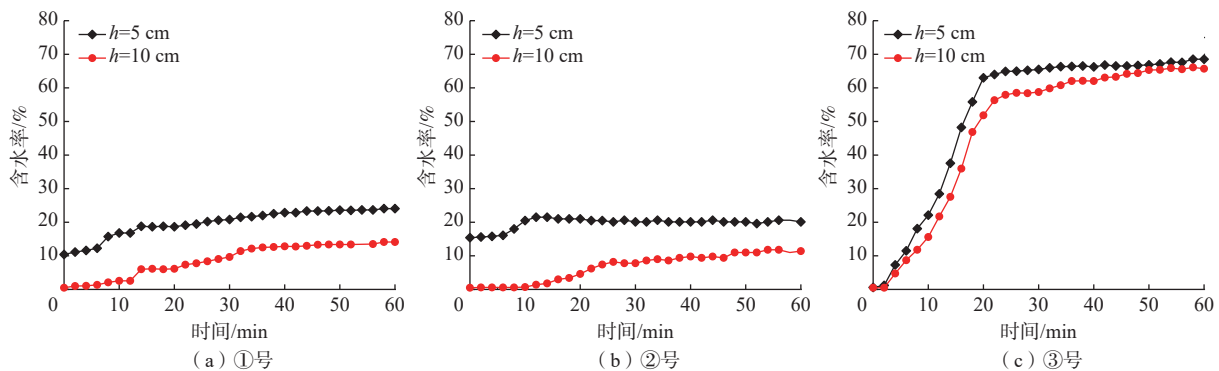


图 10 沙粒体积含水率与时间关系

Fig. 10 Relations between volumetric moisture content and time

总体上可以看出, ①号沙坡采用喷洒加固的方式, 坡表形成的加固层具有阻水性, 表现为已加固沙坡对应深度含水率变化幅度小于未加固沙坡; ②号沙坡采用铺设加固的方式, 坡表形成的加固层具有稳水性, 表现为已加固沙坡含水率增加至某一阈值时将不会继续上升, 且曲线平稳。①号和②号沙坡由于阻水性和稳水性的不同, 水流入渗规律在 10 min 后开始具有不同特征, 而③号未加固沙坡的含水率一开始就随着降雨持续时间显著增加, 并且含水率在 20 min 后达到 65%, 沙体处于饱和状态。由此可以看出不管是喷洒还是铺设的方式, 沙坡表面形成的加固层对雨水冲蚀均有较强的阻滞效果, 使得坡体整体结构保存较好, 并且加固层还具有一定的保水能力, 而这对植被生长是非常有利的。虽然本试验中的沙粒粒径很小, 但由于 NSPC 固沙材料具有较强的胶结能力, 能够将

沙粒牢固胶结在一起, 在加固沙坡坡面形成类似粗颗粒形态的团聚体结构, 坡表的加固层进而发挥出减蚀作用, 这与杨万里等^[31]的降雨冲刷试验结论较为近似。

2.2.3 激光扫描特征

图 11 为已加固沙坡与未加固沙坡在降雨冲蚀前后的三维激光扫描对比图。通过对比, ②号沙坡在降雨冲蚀前后基本无变化, 坡面形态保存完整。①号沙坡在降雨冲蚀过程中只在坡脚前缘发生局部变形形成小冲沟, 但整体形态保存较好。而③号沙坡在降雨过程中发生了大变形, 坡脚前缘在雨水冲蚀作用下形成大冲沟, 这是由于坡面的雨水下渗汇集, 向着坡脚不断冲蚀造成。通过冲蚀试验可以看出经过 NSPC 固沙材料加固的沙坡展现了较好的抗冲蚀能力。

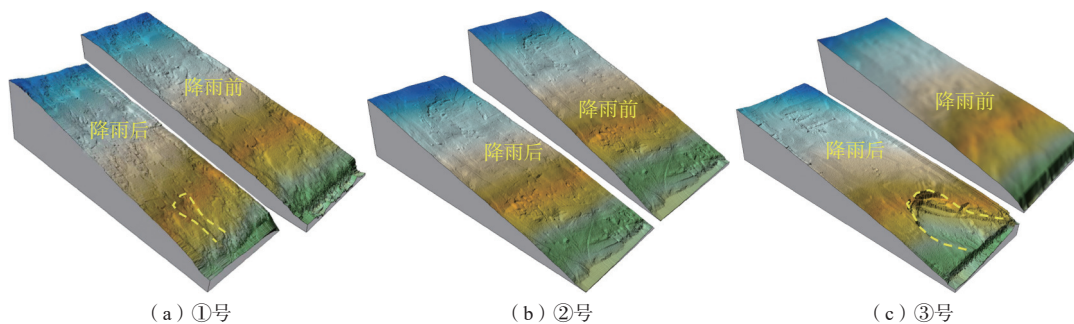


图 11 沙坡冲蚀前后对比图

Fig. 11 Comparison of the sandy slope before and after erosion

3 固沙材料加固机理论论

NSPC 固沙材料中的高聚物为长链高分子, 当作用于沙粒表面时, 由于分子量较高而且相邻链节上均带有正电荷, 同一高分子链可将相邻的沙粒通过高分子链桥搭接, 形成立体网状结构, 进一步填充沙体中的孔隙使得沙粒之间界面黏结强度增加, 沙体结构的稳定性增强。NSPC 固沙材料中的 HPMC 属于高分子聚合物, 为大分子链状结构。甲基纤维素在与其它高聚物接枝聚合后形成含有大量羧基、羧甲基等基团的胶体, 能够增加固化过程中的负电荷数量和阳离子交换量^[32]。高分子聚合物官能团上带有的羟基能与拌和水分子形成氢键, 使拌和水黏度增加。沙体颗粒的主要成分是 SiO₂ 及盐类, 同时在沙土颗粒的表面还有少量的 Si-OH、Mg²⁺、Ca²⁺ 等离子^[33]。高聚物分子链上的羟基和羧基等官能团中的氢键与沙粒表面的 Si-OH 发生络合反应, 同时官能团中的配位键与沙粒中 Mg²⁺、Ca²⁺ 等游离阳离子产生交联反应(图 12)。由于高聚物分子链上分布的大量羧基和羟基, 使其易于进行接枝改性形成不溶于水的凝胶体, 并且长分子链间会相互

吸引, 使得高分子之间相互缠结形成网状结构。当 nano siO₂ 均匀分散在沙体中时, 纳米粒子会吸附周围的水分子形成凝胶, 通过这种凝胶形成的联结力比靠结合水形成的联结力强, 使得沙粒间距离更加紧密。这种纳米硅凝胶体充填分布在高分子链与沙粒之间, 与高分子相互缠结形成的网状结构融合。这些性质决定了 NSPC 固沙材料与沙粒通过聚合、胶结作用相互交叉缠绕、联结形成立体网状结构。

NSPC 固沙材料通过立体网状结构将沙粒包裹、融合成整体(图 13)。NSPC 材料固沙过程包括 3 个作用: 主要是化学聚合、空隙填充和胶体包裹。当 NSPC 材料加固沙粒时, 一方面高聚物通过吸附、交联等化学作用与沙粒产生聚合效应, 另一方面纳米粒子与水产生的凝胶体填充在沙粒的空隙中。因此, NSPC 固沙材料与沙粒之间通过化学物理作用和电子相互作用形成一种具有高稳定性的整体结构。

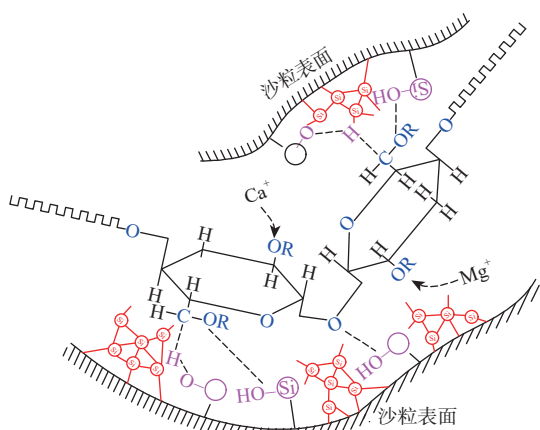


图 12 NSPC 固沙机理模型

Fig. 12 Sand fixation mechanism of the NSPC

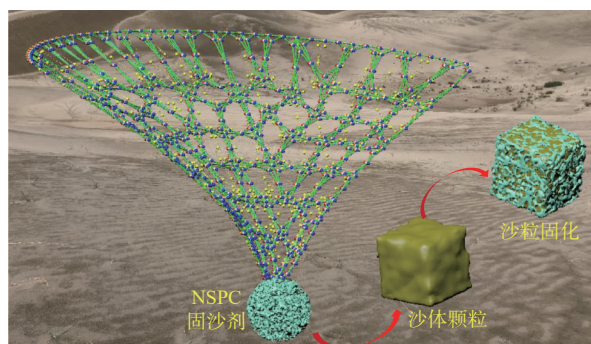


图 13 NSPC 和沙粒结合示意图

Fig. 13 Model of combining forms between the NSPC and sand particles

4 结论

(1) NSPC 固沙材料主要由 nano siO₂、HPMC 和 PAM 组成, 其中 HPMC 可与 PAM 通过官能团可以产生共聚反应。NSPC 固沙材料具有流变性, 在初始 1 h

内属于宾汉流体, 后期逐渐转变为牛顿流体。沙粒对于 NSPC 固沙材料具有亲浆性, 黏附力为 0.040 N/m, 与水与沙粒的黏附力相当, NSPC 固沙材料具有较强的入渗能力, 可以减缓或者阻碍水流在沙粒界面的吸渗作用。

(2) 经过 NSPC 固沙材料加固的沙坡坡面冲蚀特征不发育, 坡面加固层可以有效阻滞雨水的进一步下渗, 减轻沙坡水土流失, 增强沙坡的抗冲蚀性能。同时不管是采用喷洒还是铺设的方式, 沙坡表面形成的加固层均对雨水冲蚀具有较强的阻滞效果, 并且加固层还具有一定的保水能力, 而这对植被生长是非常有利的。

(3) NSPC 材料固沙过程分为 3 个阶段, 主要包括化学聚合、空隙填充和胶体包裹。固沙材料中高聚物分子链上的羟基和羧基等官能团中的氢键与沙粒表面的 Si-OH 发生络合反应, 同时官能团中的配位键与沙粒中 Mg^{2+} , Ca^{2+} 等游离的阳离子产生交联反应。同时纳米粒子与水产生的凝胶体填充在沙粒的空隙中。NSPC 固沙材料与沙粒通过聚合、胶结作用相互交叉缠绕、联结形成立体网状结构, 达到加固沙体的目的。

参考文献 (References) :

- [1] 李森, 杨萍, 董玉祥. 西藏土地沙漠化及其防治 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. [LI Sen, YANG Ping, DONG Yuxiang. Land desertification in Tibet and its prevention and control[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)]
- [2] 杨萍, 魏兴琥, 董玉祥, 等. 西藏沙漠化研究进展与未来防沙治沙思路 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 699 - 708. [YANG Ping, WEI Xinghu, DONG Yuxiang, et al. Progress on sandy desertification research and future combating idea in Tibet, China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(6): 699 - 708. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘淑娟, 魏兴琥, 郑倩倩, 等. 西藏阿里高寒荒漠区土壤有机碳含量特征 [J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 234 - 240. [LIU Shujuan, WEI Xinghu, ZHENG Qianqian, et al. Soil organic carbon contents characteristics in the alpine desert area of Ali, Tibet, China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(4): 234 - 240. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 论珠群培, 李惠, 尼玛卓玛, 等. 近 40 年藏西北荒漠生态功能区风速时空分布特征分析 [J]. 西藏大学学报(自然科学版), 2013, 28(2): 22 - 28. [LUNZHU Qunpei, LI Hui, NIMA Zhuoma, et al. Temporal and spatial distribution of wind speed over NW Tibet in recent forty years[J]. Journal of Tibet University, 2013, 28(2): 22 - 28. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 岑国平, 李林, 刘培炎, 等. 青藏高原地区生态边坡抗冲刷试验研究 [J]. 科技导报, 2016, 34(18): 113 - 117. [CEN Guoping, LI Lin, LIU Jiying, et al. Experimental study on anti erosion of ecological slope in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(18): 113 - 117. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张正德, 张焱, 马鹏飞, 等. 雅鲁藏布江中游风沙区典型下垫面空气动力学参数研究 [J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 997 - 1005. [ZHANG Zhengcai, ZHANG Yan, MA Pengfei, et al. Aerodynamic parameters of typical underlying surfaces in an aeolian region in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 997 - 1005. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 赵明阶, 何光春, 王多垠. 边坡工程处治技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. [ZHAO Mingjie, HE Guangchun, WANG Duoyin. Slope engineering treatment technology[M]. Beijing: Communications Press, 2003. (in Chinese)]
- [8] 邓梦春, 吴和政. 我国地质灾害防治工程的边坡绿化技术与现状 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(增刊 1): 39 - 42. [DENG Mengchun, WU Hezheng. Technology and present situation of slope greening in the hazard control project of China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(Sup 1): 39 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [9] GENIS A, VULFSON L, BEN-ASHER J. Combating wind erosion of sandy soils and crop damage in the coastal deserts: Wind tunnel experiments[J]. *Aeolian Research*, 2013, 9: 69 - 73.
- [10] 米吉福, 汪浩, 刘晶冰, 等. 土壤固化剂的研究及应用进展 [J]. 材料导报, 2017, 31(增刊 1): 388 - 391. [MI Jifu, WANG Hao, LIU Jingbing, et al. Research and application progress of soil stabilizer[J]. Materials Review, 2017, 31(Sup 1): 388 - 391. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王银梅, 韩文峰, 谌文武. 新型高分子材料固沙抗冻性能试验研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 145 - 148. [WANG Yinmei, HAN Wenfeng, CHEN Wenwu. Experimental study on the freezing-

- thawing resistance of sand fixation with a new polymer material[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(4): 145 – 148. (in Chinese with English abstract)
- [12] BEN-HUR M. Using synthetic polymers as soil conditioners to control runoff and soil loss in arid and semi-arid regions—A review[J]. *Soil Research*, 2006, 44(3): 191.
- [13] 荣驰, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 新型水玻璃-酯类注浆材料及其固沙体特性研究 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(6): 2034 – 2042. [RONG Chi, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Study on new sodium silicate-ester grouting material and its properties of grouted-sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 2034 – 2042. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王龙威, 刘瑾, 奚灵智, 等. 基于高分子复合材料改良砂土三轴剪切试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 149 – 157. [WANG Longwei, LIU Jin, XI Lingzhi, et al. Triaxial shear test of sand improved by polymer composite[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 149 – 157. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 黄河, 施斌, 刘瑾, 等. STW 型生态土壤稳定剂用于防风固沙试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(12): 1900 – 1904. [HUANG He, SHI Bin, LIU Jin, et al. Experimental study on application of STW ecotypic soil stabilizer in windbreak and sand fixation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(12): 1900 – 1904. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈渠昌, 雷廷武, 唐泽军. 施用 PAM 防治松散土风蚀的机理及其抵御风沙流能力研究 [J]. *水土保持学报*, 2008, 22(4): 1 – 6. [CHEN Quchang, LEI Tingwu, TANG Zejun. Study on mechanism by use of PAM to keep from wind erosion of loosing soil and its capability to withstand wind flow with sand[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4): 1 – 6. (in Chinese with English abstract)]
- [17] LIU Jin, FENG Qiao, WANG Yong, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of organic polymer reinforced sand[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2018, 2018: 1 – 18.
- [18] MASTRONARDI E, TSAE P, ZHANG Xueru, et al. Strategic role of nanotechnology in fertilizers: Potential and limitations[M]//RAI M, RIBEIRO C, MATTOSO L, et al. *Nanotechnologies in food and agriculture*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 25 – 67.
- [19] 王施涵, 牛富俊, 张恒. 纳米材料在土体改性方面的研究进展 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(4): 209 – 219. [WANG Shihan, NIU Fujun, ZHANG Heng. Progress of study on application of nanomaterials to soil modification[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(4): 209 – 219. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 董吉, 陈筠, 邬忠虎, 等. 木质素纤维红黏土强度及变形特性试验研究 [J]. *地质力学学报*, 2019, 25(3): 421 – 427. [DONG Ji, CHEN Jun, WU Zhonghu, et al. Experimental study on the shear strength and deformation characteristics of lignin-fiber red clay[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(3): 421 – 427. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 邓陈艳, 金炜枫, 程泽海, 等. 纳米硅溶胶加固标准砂三轴试验研究 [J]. *科技通报*, 2019, 35(4): 157 – 162. [DENG Chenyan, JIN Weifeng, CHENG Zehai, et al. Triaxial test study on standard sand modified by nano silica sol[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35(4): 157 – 162. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 徐岗, 裴向军, 袁进科, 等. 改性纳米硅材料加固松散砂土的工程特性研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 142 – 149. [XU Gang, PEI Xiangjun, YUAN Jinke, et al. A study of the engineering characteristics of reinforced loose sand by modified nano-Si materials[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 142 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [23] CHANGIZI F, HADDAD A. Effect of nano-SiO₂ on the geotechnical properties of cohesive soil[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34(2): 725 – 733.
- [24] CONLEE C T, GALLAGHER P M, BOULANGER R W, et al. Centrifuge modeling for liquefaction mitigation using colloidal silica stabilizer[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(11): 1334 – 1345.
- [25] 中华人民共和国教育部. 电感耦合等离子体发射光谱分析方法通则: JY/T 0567—2020[S]. [Ministry of Education of the People's Republic of China. General rules of inductively coupled plasma emission spectroscopy analysis methods: JY/T 0567—2020[S]. (in Chinese)]
- [26] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 石油天然气工业 钻井液现场测试 第 1 部分: 水基钻井液: GB/T 16783.1—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the

- People's Republic of China. Petroleum and natural gas industries—Field testing of drilling fluids—Part 1: Water-based fluids: GB/T 16783.1—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)]
- [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 & Engineering Geology, 2022, 49(4): 144 - 156. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 柴肇云, 刘绪, 杨攀, 等. 硅溶胶物性及其注浆改性泥岩的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2681 - 2691. [CHAI Zhaoyun, LIU Xu, YANG Pan, et al. Experimental study on physical properties of silica soil and grouting modified mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup 1): 2681 - 2691. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 周翠英, 赵珊珊, 杨旭, 等. 生态酯类材料砂土改良及工程护坡应用 [J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4828 - 4837. [ZHOU Cuiying, ZHAO Shanshan, YANG Xu, et al. Improvement of eco-ester materials on sandy soils and engineering slope protection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4828 - 4837. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 刘方远, 李清斌. 新型注浆材料及注浆工艺的研究和应用 [J]. 煤矿机械, 2017, 38(2): 82 - 84. [LIU Fangyuan, LI Qingbin. Research and application of new grouting material and grouting technology[J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(2): 82 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 杨万里, 石玉玲, 穆鹏雪, 等. 瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 117 - 124. [YANG Wanli, SHI Yuling, MU Pengxue, et al. An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 117 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 周书葵, 曾光明, 刘迎九, 等. 改性羧甲基纤维素对铀吸附机理的试验研究 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(9): 1466 - 1471. [ZHOU Shukui, ZENG Guangming, LIU Yingjiu, et al. Equilibrium, kinetic and thermodynamic study of the adsorption of uranium(VI) onto modified CMC[J]. China Environmental Science, 2011, 31(9): 1466 - 1471. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 谢国勋, 李艳霞, 郭富华, 等. 化学固沙剂固沙作用机理研究 [J]. 宁夏农林科技, 2015, 56(12): 94 - 98. [XIE Guoxun, LI Yanxia, GUO Fuhua, et al. Study on sand fixation mechanism of chemical sand fixation agent[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2015, 56(12): 94 - 98. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真