

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911003

双聚材料改良黄土持水性及生态效应研究

朱利君,裴向军,张晓超,任童,杨晴雯

(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)

摘要: 黄土的强水敏性问题是黄土地区生态修复的难点。选取双聚材料,开展崩解试验、变水头渗透试验、土水特征曲线试验以及植物生长生理指标测试等,探讨了双聚材料对重塑黄土工程性能的持水性和生态效应的影响,结合 X 射线衍射(XRD)、压汞和扫描电子显微镜(SEM)等微观试验,从成分、孔隙分布和颗粒结构等方面综合分析了其加固机理。研究表明:双聚材料的掺加能有效提高土样的抗崩解性,耐崩解系数随材料增加而增大。双聚材料能有效增强材料的持水性能,表现为渗透系数减小,土水特征曲线整体上移。双聚材料的掺加能有效提高植物生长和抗旱能力,表现为根冠比更大、根长更长以及超氧化物歧化酶(SOD)值受干旱影响变化量更小。双聚材料的添加并无新物质生成,其作用主要是增强颗粒间联结,生成大量黏聚体,孔隙分布由中孔隙向大孔隙和微小孔隙转化。双聚材料中含有大量极性活性基团酰胺基($-\text{CONH}_2$)吸附架桥使得土颗粒团聚,羟基($-\text{OH}$)和羧基($-\text{COOH}$)附着于表面形成保护膜,由团聚粒至团聚体层层包裹促进土壤稳定。

关键词: 双聚材料;耐崩解性;持水性;生态效应;加固机理

中图分类号: P642.16;TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0158-09

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

ZHU Lijun, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, REN Tong, YANG Qingwen

(State key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The problem of strong water sensitivity of loess is a difficult point for ecological restoration in the loess regions. In this study, a dual polymer material was selected, and a disintegration test, a variable water head penetration test, a soil water characteristic curve test, and a plant growth physiological index test were conducted. The effect of polymer materials on the water holding capacity and the ecological effects of the engineering properties of reshaped loess, combined with micro-tests such as XRD, mercury intrusion, and SEM, were comprehensively analyzed, and its reinforcement mechanism from the aspects of composition, pore distribution and particle structure was examined. The results show that the addition of polymer mixtures can effectively improve the disintegration resistance of the soil samples, and the disintegration coefficient increases with the increase of the materials. The polymer mixtures can effectively enhance the water retention properties of the material. The coefficient of permeability is reduced and the soil-water characteristic curve is shifted upwards. The addition of polymer mixtures can effectively increase plant growth and drought resistance. The root-shoot ratio is larger, the root length is longer, and the SOD value is more affected by drought. The addition of double-poly material does not produce new substances. Its role is mainly to enhance the

收稿日期: 2019-11-03; 修订日期: 2020-01-05

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41790445);国家自然科学基金创新性研究群体(41521002);国家自然科学基金青年基金(41702335)

第一作者: 朱利君(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向为岩土工程与生态恢复。E-mail:2227013635@qq.com

通讯作者: 裴向军(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事地质工程的教学与研究。E-mail:peixj0119@tom.com

interparticle bonding, generate a large number of cohesive bodies, and the pore distribution is transformed from medium pores to large pores and minute pores. The dimerized material is enriched with a large number of polar active group amide groups ($-\text{CONH}_2$) to adsorb and bridge the soil particles, and the Hydroxyl ($-\text{OH}$) and carboxyl ($-\text{COOH}$) adhere to the surface to form a protective film. The layers of agglomerates are wrapped to promote soil stabilization.

Keywords:bipoly material; disintegration; water retention; ecological effects; reinforcement mechanism

黄土在我国西北及华北等地区占地面积约 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其中湿陷性黄土占地面积达 $3.1 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占该地域黄土面积的 50%。黄土脱敏一直是西北地区地基和建筑处理的重点和难点。黄土中有大量孔隙, 这是其区别于其他土类的主要特征之一^[1]。由于过去大面积使用无机胶凝材料加固黄土, 引发土体结构性破坏和当地环境污染, 导致后期处理成本高昂。为此, 环境友好型固化剂成为研究热点。目前新型化学加固材料的研究和应用有很多, 杨博瀚等^[2-3]通过改性聚丙烯纤维和水泥对黄土进行改良, 并探究了其加固土力学性能的影响。唐朝生等^[4]对聚丙烯纤维加固软土进行了力学性能研究。刘瑾等^[5]以丙烯酸单体为主体合成了一种新型高分子材料, 并对其加固机理进行了探讨。湛文武等^[6-7]、王银梅等^[8-10]、周瑾等^[11]自主研发了新型高分子材料 SH, 并将其应用于改良黄土, 对其加固黄土的力学性能、渗透性等工程性质以及采用物理模拟实验对加固土抗冲蚀性进行了研究。裴向军等^[12-17]研发出新型高分子材料, 将其应用于沙土、碎石土和黄土加固中, 对其水稳性、渗透性及抗压抗剪强度等进行了研究; 同时该材料已经用于土质边坡现场加固工程实践中, 如我国西藏雅江边坡水土流失、若尔盖草原生态受损和延安革命老区边坡剥蚀等。但目前关于双聚材料的研究多集中在物理力学性能以及边坡土壤侵蚀变形特征上, 较少讨论其持水性能与生态效应以及其与微观结构的响应关系。

本文主要针对本课题组自主研发的新型高分子材料(双聚材料)应用于加固重塑黄土, 采用静水崩解试验、变水头渗透试验、土水特征曲线试验以及植物生长生理指标测试等对加固土的持水性及生态效应进行探讨。结合 XRD 矿物成分分析、扫描电镜试验、压汞试验等微观分析, 探讨加固黄土持水性、生态效应以及微观特征的响应关系, 探求材料加固黄土的内在机制。

1 改良黄土的试验设计

1.1 加固材料

加固材料由两种高分子材料和两种无机助剂交联

聚合而成, 其中 A、D 是无机助剂, B、C 是高分子材料, 其物理性质和聚合物交联方式见表 1 和图 1。

表 1 试验用材料性质

Table 1 Properties of the materials

添加剂	A	B	C	D
固体形态	白色颗粒状晶体	白色粉末	白色晶体	白色晶体
溶液固含量/%	1	1	5	2
表观黏度/(mPa·s)	3	10	5	4
溶解时间/h	>0.5	>24	>24	/
溶液挥发性/%	<1	<1	<1	<1

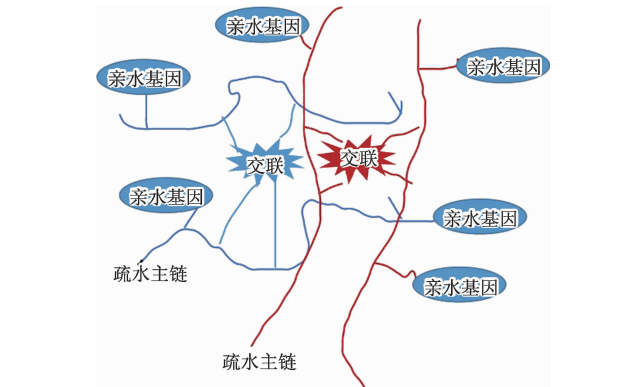


图 1 聚合物交联方式示意图

Fig.1 Schematic diagram showing polymer cross-linking

1.2 试样制备

土样取自延安安塞南沟, 颗分曲线见图 2, 其黏粒含量小于 20%, 以粉粒为主, 属于粉质黏土(代号 N)。

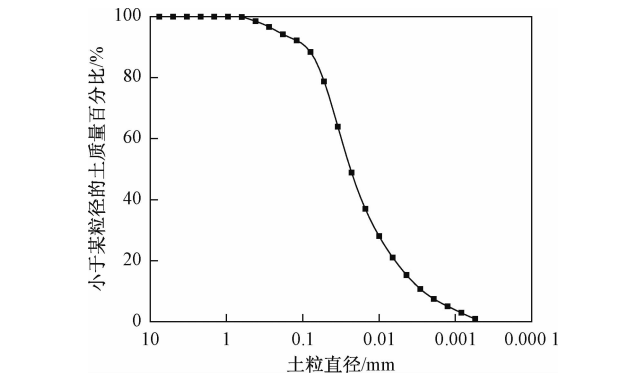


图 2 颗粒分析曲线

Fig.2 particle analysis curve

土样的其他性质见表 2。首先将取回的土样风干碾碎,过 2 mm 筛,筛去大块砾石以及其他杂质。而后将浓度为 0%、0.10%、0.22% 和 0.34% 的双聚材料溶液分别与土按 1:5 的比例拌和,混合后密封 24 h,以 1.45 g/cm^3 (试样的密度和含水率均是参照双聚材料

加固土的最大干密度的 90% 和最优含水率设计)按规定的方法填充到标准模具中,采用千斤顶静压法一次静压成型,削平试验两端并脱模。崩解性试验和土水特征曲线试验采用的是直径 61.9 mm、高 20 mm 的试样,渗透性测试试样直径 61.9 mm、高 40 mm。

表 2 黄土的物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indicators of loess

最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最优含水率/%	饱和含水率/%	相对密度 G_s	孔隙比 e	塑限/%	液限/%	渗透系数 $k_s/(\times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$	黏粒含量/%
1.73	15.7	27	2.71	0.81	18.5	29.6	3.68	17.1

1.3 试验和数据分析方法

湿化崩解试验是将土样放在特质的镂空网篮内,网篮悬挂在水中,上部吊有弹簧测力计。通过计算弹簧测力计的变化值探讨 48 h 内不同掺量固化土随时间变化的吸水和崩解特性。48 h 后将篮中残余的土体取出,采用 100°C 烘箱烘干,称取质量为 m_1 ,同时考虑土样的吸水性或崩解性,提出计算公式:

$$N_i = (a_i - 87)/87 \quad (1)$$

$$N_k = m_1/87 \quad (2)$$

式中: N ——双聚材料加固土吸水或崩解率,当 $N > 0$ 时表示吸水, $N < 0$ 时表示崩解;

N_k ——耐吸水或崩解系数,当 $N_k > 0$ 时表示吸水, $N_k < 0$ 时表示崩解。

渗透试验和直剪试验成型试样自然风干后按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[18]进行。

土水特征曲线试验采用地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的压力板仪进行。将成型试样自然风干后抽真空饱和,将饱和试样安置于密封容器中,下置陶土板,分级加压,每级压力下样品排水恒定后加下一级,测算每一级压力下试样排水量。直至最后一级压力,稳定后取出试样,测定样品含水量和干质量,以此类推,得到土壤特征曲线。

生态效应测试主要是将不同掺量的材料进行植草养护,于 24°C 恒温、60% 湿度人工培养室培养,至一定时间后对其生长指标和生理指标进行测试。

XRD 试验采用理学 DMAX-3C 衍射仪进行。取加固前后成型试样自然风干样品 50 g,过 0.15 mm 筛后研磨成粉末(320 目粒度),然后把样品粉末制成有平整平面试片进行观测。

SEM 微观结构测试采用成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的扫描电镜设备进行。将成型试样掰成小块,用吸球把表面的扰动颗粒除去,获得新鲜完整且保持原状结构的天然断口,自

然风干后研磨成 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的方块,在试样表面喷镀导电金属薄膜后进行镜下观察。

压汞实验采用的是 micromeritics AutoPore IV 9500 V 1.09 号仪器。将成型的样品放入仪器,通过不同压力将汞压入土体孔隙中,根据不同压力和进汞量绘制孔隙含量与孔隙直径的关系曲线。

2 试验结果与分析

2.1 静水崩解试验

天然粉质黏土重塑试样放入水中后不久完全崩解,呈散沙状,并且由于粉粒和黏粒在水中分散,杯中水变得浑浊(图 3a)。而双聚材料加固土随着浓度的增加,其崩解破坏程度减弱,水中悬浮粒骤减,土样从在水中大面积开裂(图 3b)发展为少面积开裂(图 3c)最终向不崩解(图 3d)发展。

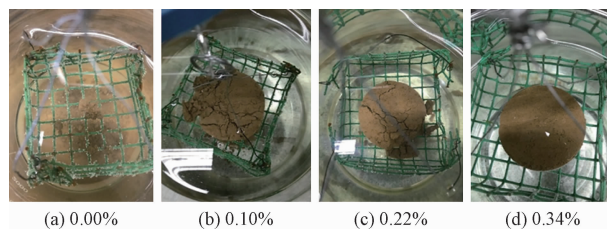


图 3 崩解测试土样

Fig. 3 Schematic diagram showing the disintegration test soil sample

根据式(1)~(2)计算得出的结果,在双聚材料掺量为 0%、0.10%、0.16%、0.22%、0.28% 和 0.34% 时加固土的耐崩解系数分别为 0,0,0,0.089,0.603 和 0.905,试样的耐崩解能力随着双聚材料掺量的增加而增加。结合图 4 的崩解过程曲线,在静水崩解试验过程中,随双聚材料掺量的增加土样吸水的时间和达到同等崩解状态下的时间都得到延长,并且随着材料掺量的增加吸水能力逐渐增强。重塑黄土随着材料的掺加耐崩解性和吸水性明显提高。

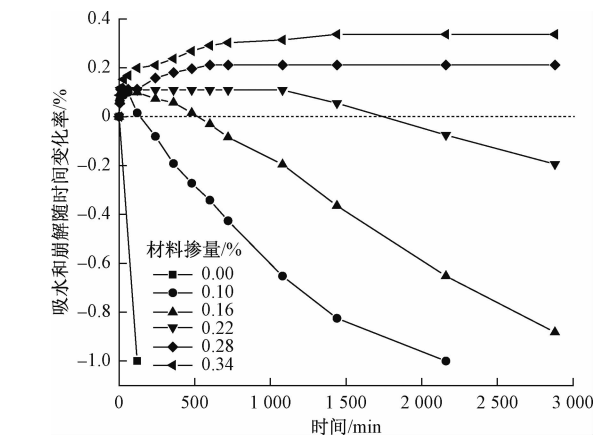


图 4 不同材料掺量崩解率测试

Fig. 4 Disintegration rate test of different materials

注: y 轴数值大于 0 表示吸水率, 小于 0 表示崩解率。

2.2 变水头渗透系数

影响土渗透系数的因素可分为两方面, 土骨架和流体性质, 双聚材料对黄土系数的影响主要是对土骨架的影响。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[18] 中的计算方法, 计算不同材料掺量下土样的变水头渗透系数结果, 见表 3。

表 3 不同材料掺量下的渗透系数

Table 3 Coefficient of permeability of different materials

材料掺量/%	0.00	0.10	0.22	0.34
渗透系数/($\times 10^{-5} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.68	2.47	1.55	1.00

由表 3 可知, 随着材料掺量的增加, 土样的渗透系数逐级递减, 但都在 10^{-5} 这个量级内。将渗透试验后的双聚材料改良重塑样(0.34%)取出, 并切开, 式样内部含水率差异出现颜色分区, 深色表示含水率高, 浅色反之。结果表明双聚材料能够极大减缓水分渗入, 同等条件下吸力会增加, 孔隙水压力减小, 水稳定性提高。

2.3 土水特征曲线分析

土水特征曲线的实质是土骨架的亲水性。其决定因素为土颗粒组成和土骨架的密实程度。采用 Van Genuchten 模型作拟合曲线对比图(图 5), 从土与水的相互作用方面考量, 将两种土样的脱湿曲线分为 3 部分, 三个区段分别表征重力、毛细力和热力驱动下运动的重力水、毛细水和结合水。

达到进气值之前, 土体处于饱和状态, 受重力驱动下的自由水排出(图 5 中区域①), 由曲线可知, 较小的含水率变化就能使基质吸力快速增加, 这是土体从饱和状态向非饱和状态的转变。这个阶段两条曲线基本一致, 但固化黄土的饱和含水率高于未固化黄土, 说明材料的掺加对土中水分的影响主要是毛细水和结合

水。达到进气值后, 随着吸力的增大, 重力作用被抵消, 毛细力代替重力作用抵抗外力, 降湿率能表征土体内部毛细力抵抗外力的重要指标, 加固土的降湿率为 -0.31, 未加固土的降湿率为 -0.74, 加固土的降湿率明显大于未加固土, 即斜率明显更小(图 5 中区域②)。随着吸力的增加, 固化土中的毛细水更难排出, 毛细力作用更强。最后随着基质吸力的增加, 曲线进入第三阶段, 体积含水率随基质吸力变化较小, 这一部分的水分主要是与土颗粒结合更加紧密的结合水(图 5 中区域③), 需要其它力如热力驱动才能流失, 而加固土的残余含水率远大于未加固土。

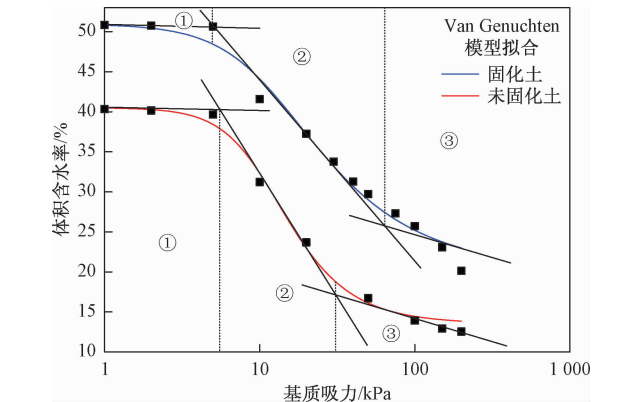


图 5 Van Genuchten 模型拟合曲线对比图^[19-21]

Fig. 5 Comparison of the Van Genuchten model fitting curves^[19-21]

注: 图中①区域表示重力水失水区; ②区域表示毛细水失水区; ③区域表示结合水失水区。

经双聚材料固化后的黄土具有更强的持水性能, 表征为水稳性增强, 饱和含水率增大, 渗透系数减小等。

2.4 盆栽试验结果分析

采用西北地区较为常见的紫花苜蓿研究材料应用于土壤的生态效应。由于植物生长速率较慢, 以下指标测试及分析均是播种 30 d 后开始。

2.4.1 生长指标对比分析

观测从播种之日起算, 0~30 d 花盆中植物的株高、叶宽和分叶数都相近, 图 6 是培育至第 30 天几种不同材料掺量下植株情况对比, 相比非固化土, 加固黄土培养的植被更加茂密, 但材料掺量导致的植株长势差异并不明显。

在植被培育至 30 d 时, 对其生长指标如根冠比及根长等进行分析。

由表 4 和图 6 可知, 随着材料掺量的增加, 根长和根冠比都呈增长趋势, 其中 0.34% 的根长最长, 为

12.47 cm。根的长度和数量被认为是抗旱的一个重要特征^[22],说明材料的掺加能有效提高植株的抗旱能力,由生理指标测试进行进一步论证。

2.4.2 生理指标对比分析

SOD 是细胞膜系统的重要保护酶之一,它具有消除自由基、降低膜脂过氧化及维持细胞稳定性的功能。



图 6 植株根茎生长情况图

Fig. 6 Diagram showing plant roots growth

由图 7 可知,随着干旱天数的增加,所有材料掺量固化土培育出的紫花苜蓿植株的 SOD 值都呈增长势。干旱胁迫前,SOD 值随材料掺量增量增大,但差异不大,其中空白对照组为 335.83 U/(g·FW),掺量为 0.34% 的固化土培育出的紫花苜蓿植株的 SOD 值为 362.76 U/(g·FW)。

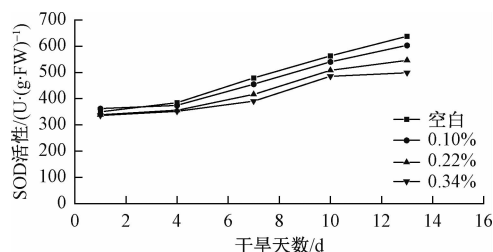


图 7 SOD 活性变化曲线图

Fig. 7 SOD activity curve

随着时间的推移,材料掺量的差异引起的 SOD 值受干旱胁迫影响的差异逐渐拉大。至第 13 天,空白对照组的 SOD 值为 638.44 U/(g·FW),材料掺量为 0.34% 的固化土培育出的紫花苜蓿植株的 SOD 值为 498.85 U/(g·FW),其他两个掺量在两者之间。

研究表明材料的掺加能有效抑制干旱胁迫对植株活性酶的影响,植物在干旱胁迫时受到较小的伤害,具有更好的抗逆性。

3 机理研究

3.1 矿物成分分析

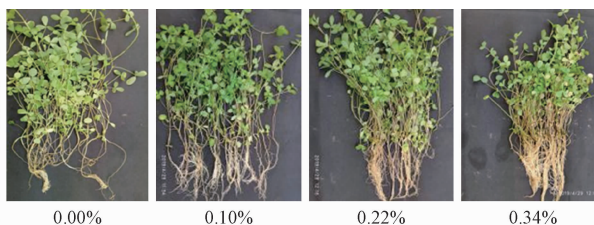
根据 XRD 矿物能谱分析结果可知,双聚材料加固前后其 XRD 衍射曲线基本吻合(图 8),加固土的衍射曲线没有新峰产生,说明没有产生新物相,主要成分为

其值越低越说明植株具有更好的抗干旱能力^[23]。

表 4 生长指标数据统计

Table 4 Statistics of growth indicators

材料掺量/%	0	0.10	0.22	0.34
根长/cm	7.38	8.14	8.92	12.47
根冠比	0.15	0.21	0.28	0.57



石英、长石和方解石等。双聚材料与土颗粒间没有发生化学反应生成新的化合物。

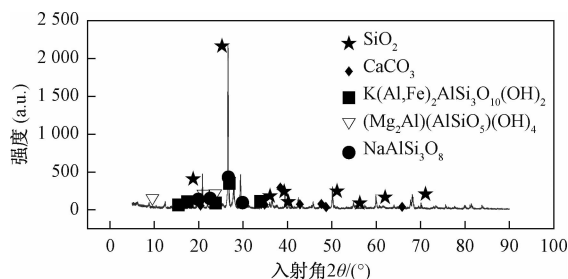


图 8 矿物能谱分析图

Fig. 8 Analysis of mineral energy spectrum

从土壤和双聚材料的化学结构上分析,黄土的主要组成石英(SiO_2)是一种表面粗糙的极性分子,水分子与其因相似的电子云结构容易产生耦合,在少量含水率情况下能成型并且具有较高的强度。但是随着含水率的增加,黄土结构内部的黏聚力不足,粉粒和黏粒分界,土骨架分散。土体在水中强度的产生和消失都与毛细力的产生和消失有关。一方面,双聚材料组分 C 中含有大量的亲水基团羧基($-\text{COOH}$)和羟基($-\text{OH}$),这些基团能够吸附于颗粒表面形成一层保护膜,减缓了土颗粒与水分子直接接触破坏颗粒结构,进而增强其耐崩解性。另一方面,组分 B 中含有大量的长链分子,侧链上聚集大量极性活性基团酰胺基($-\text{CONH}_2$),基团通过氢键、范德华力、静电引力等方式作用于土颗粒表面,在颗粒与颗粒之间形成架桥作用。这是加固黄土在水中能保持试样完整以及水面清澈的化学机理。

3.2 加固土孔隙分布分析

从不同材料掺量土样的压汞实验曲线以及孔隙结构特征可以发现:重塑黄土在加入不同掺量的双聚材料后,孔隙率和孔隙体积不同程度的减小,最可几孔径(指的是孔分布曲线中峰最高处所对应的孔径,即孔出现概率最大的孔)减小; D_{50} (总进汞量 50% 时对应的入孔孔径)减小,表征随着材料掺量增加,小孔隙占比增大;分形维数减小,表面孔隙内部结构形态变的更为简单,形成一个整体,粗糙程度更低,颗粒间黏成一个整体,不利于摩擦力的发挥。

孔隙分类采用的是雷祥义^[1]的分类方法。由图 9 和表 5 可知,随着材料掺量的增加,土壤内部孔隙分布发生了变化,总体表现为大于 32 μm 范围内的大孔隙在一定程度上数量增加,8 ~ 32 μm 范围内的中孔隙数量减少。说明在有机材料作用下,土颗粒的粒度成分、颗粒形状、结构排列发生改变。推测是由于原来土体中的小颗粒胶结在一起组成较大的颗粒,导致细小颗粒间的中孔隙一部分转化为大孔隙,一部分转化为小孔隙和微孔隙。

表 5 土样孔结构特征值

Table 5 Pore cumulative curve before and after curing					
材料掺量/%	孔隙体积/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	孔隙率/%	最可几孔径/ μm	$D_{50}/\mu\text{m}$	分形系数
0	0.31	44.10	13.966	11.474	2.61
0.10	0.30	43.88	13.959	12.075	2.55
0.12	0.30	43.76	11.314	11.800	2.54
0.34	0.20	32.45	6.037	7.646	2.11

3.3 加固土微观结构分析

为了进一步论证压汞实验的推论,对加固前后土样的微观结构进行分析。从孔隙分布的角度分析,可以发现放大至 250 倍的非加固土样孔隙结构分布较为均匀,几乎不见大颗粒存在(图 10a),相比未加固土,

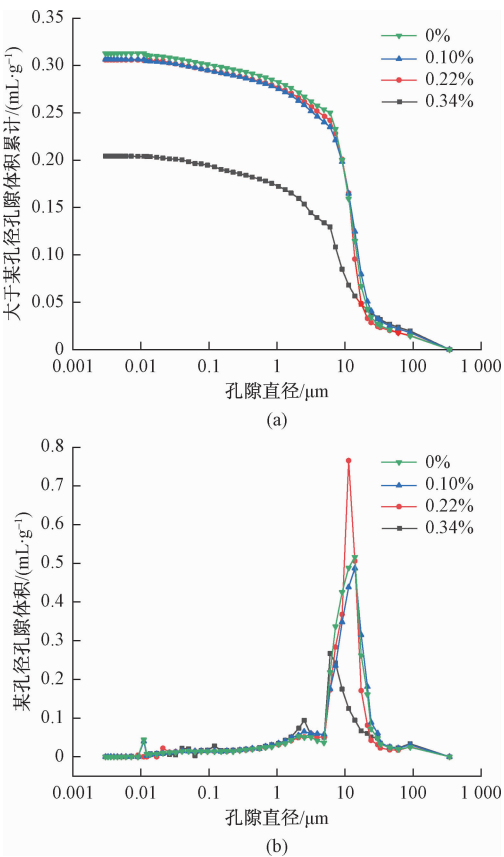


图 9 不同材料掺量孔隙累计曲线和分布曲线
Fig. 9 Cumulative curve and distribution curve of pore volume of different materials

可发现加固土土样内部孔隙分布不均匀,大孔隙和小孔隙都明显增多,颗粒有明显的团聚现象(图 10b)。与压汞实验获取结果一致。

从结构的角度的分析,将范围缩小,放大至 1 000 倍,可以发现非加固土颗粒界线明晰,分布均匀,连通性较差(图 10c)。加固土颗粒表面附着大量胶结物质,包裹在颗粒表面,形成团聚粒。团聚粒与团聚粒之

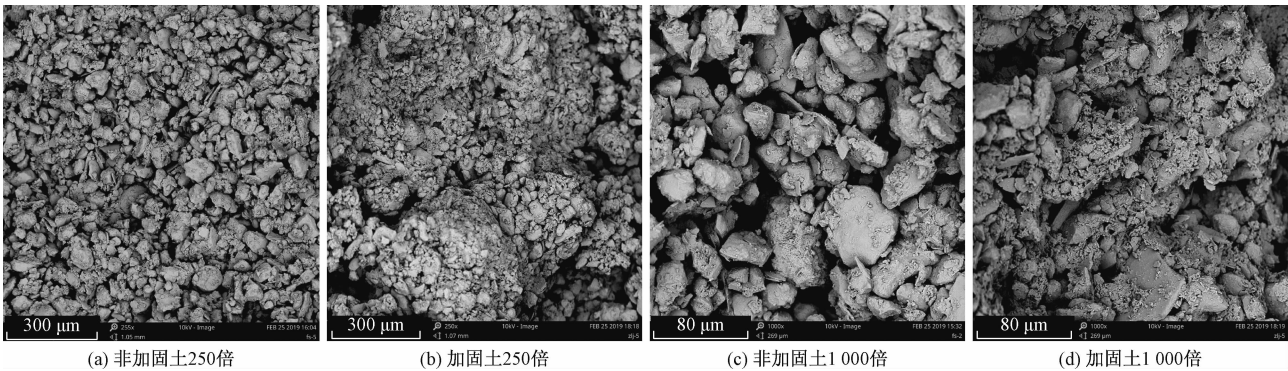


图 10 电镜扫描对比图
Fig. 10 SEM scan comparison

间,团聚粒与大颗粒之间又能形成架桥连结,使得团聚粒发展成结构更稳定、粒径更大的团聚体(图 10d)。

3.4 加固土机理分析

在微观上,天然重塑黄土颗粒较为分散,粒间边界明细,能见明显棱角(图 10a、c),但是双聚材料加固土在同等放大条件下大量团聚,有颗粒与颗粒之间团聚,有团聚粒与团聚粒之间桥接,颗粒界线模糊,表面类似有大量包裹和胶结存在(图 10b、d)。这就导致原本中孔隙较多的天然重塑黄土中的中等颗粒一方面向小孔隙转换,另一方面向大孔隙转化。这主要是由于双聚材料 C 组分中大量富含的羧基和羟基,在土壤表面阻隔了颗粒与水分子的直接接触,将黏粒、粉粒等锁入团聚粒中,增强其耐崩解能力。另一方面,B 组分侧链中大量富集活性酰胺基与土颗粒通过氢键、范德华力和静电引力等方式吸附颗粒,使得粒间界线愈加模糊。

在宏观上,当材料浓度较高(不低于 0.34%)时,

改良土黏聚性显著增强,进而提高土壤耐水崩解能力,在水中浸泡 48 d 仍能保持试样完整,显著提高抗侵蚀性能;渗透试验中表征为渗透系数减小,切开土样发现土样内部颜色不均,外圈层湿度远大于内圈层,由于阻水分子羧基和羟基大量附着土颗粒表面,水分难以直接接触土壤,层层阻隔使得直接渗透难以实现;土水特征曲线试验中,材料对土样的影响主要体现在毛细水排出更困难,这是阻隔水分子进入孔隙分散颗粒的结果。

因此将双聚材料与土颗粒作用关系归为 3 种:(1)材料对颗粒外部包裹作用;(2)土颗粒与土颗粒间桥接作用;(3)团聚粒与团聚粒间吸附与包裹作用。基于此,参照 Volikov 等^[24],杨晴雯等^[25]提出的土壤团聚胶结模型,在此提出了双聚材料改良重塑黄土的结构模型,见图 11。

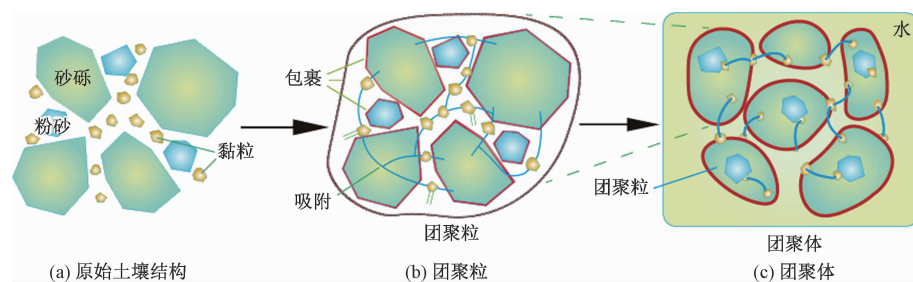


图 11 双聚加固机理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the double-polymerization reinforcement

4 结论

本文采用双聚材料对黄土进行改良,开展了崩解试验、常水头渗透试验、土水特征曲线试验和植物生长生理指标测试,并结合微观分析深入探讨改良机理,得出结论如下:

(1)少量双聚材料的掺加就能大大改善黄土遇水崩解问题,在掺量达到 0.28% 时基本不崩解。

(2)经双聚材料固化后的黄土具有更强的持水性,表现为渗透系数减小、饱和含水率增大、毛细水更难排出。

(3)结合植被培育生长和生理指标测试,表明双聚材料的增加对植物根冠和根系生长有促进作用,有效提高了植物抗旱能力。

(4)双聚材料中富集大量的极性活性基团酰胺基($-\text{CONH}_2$)吸附架桥使得土颗粒团聚,而羧基($-\text{OH}$)和羧基($-\text{COOH}$)附着于表面形成保护膜,由

团聚粒发展至团聚体层层包裹促进土体稳定。

由于少量的材料掺量就能引起改良土的性质产生转变,掺量只做到了 0.34%,为了进一步研究其作用规律,后续研究可考虑增大浓度变化梯度,对总体规律作进一步把控。

参考文献 (References):

- [1] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B 辑), 1987, 17(12): 1309 - 1318. [LEI X Y. Pore types and collapsibility of loess in China[J]. Science in China (Series B), 1987, 17(12): 1309 - 1318. (in Chinese)]
- [2] YANG B H, WENG X Z, LIU J Z, et al. Strength characteristics of modified polypropylene fiber and cement-reinforced loess[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(3): 560 - 568.
- [3] 杨博瀚, 翁兴中, 刘军忠, 等. 改性聚丙烯纤维和水泥加固黄土的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2016,

- 19(4):694-701. [YANG B J, WENG X Z, LIU J Z, et al. Mechanical properties of modified polypropylene fiber reinforced cement stabilized loess. [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 694-701. (in Chinese)]
- [4] 唐朝生, 施斌, 蔡奕, 等. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1796-1800. [TANG C S, SHI B, CAI Y, et al. Experimental study on polypropylene fiber improving soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1796-1800. (in Chinese)]
- [5] 刘瑾, 陈晓明, 张峰君, 等. 高分子土固化剂的合成及固化机理研究[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(2): 230-234. [LIU J, CHEN X M, ZHANG F J, et al. Studies on synthesis and harding mechanism of the polymeric soil consolidator[J]. Materials Science and Engineering, 2002, 20(2): 230-234. (in Chinese)]
- [6] 谌文武, 张起勇, 刘宏伟. SH 固土剂在遗址土中的渗透注浆扩散规律[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 429-435. [BIAN W W, ZHANG Q Y, LIU H W. Infiltration grouting diffusion law of SH agent in earthen sites[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 429-435. (in Chinese)]
- [7] 谌文武, 刘宏伟, 张起勇. SH 加固酸碱污染黄土的抗压强度特性试验研究[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 422-428. [CHEN W W, LIU H W, ZHANG Q Y. Compressive strength properties of soil polluted by acid and alkali consolidated by SH[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(3): 422-428. (in Chinese)]
- [8] 王银梅, 徐鹏飞. 新型高分子材料固化黄土边坡的抗冲刷试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(6): 92-96. [WANG Y M, XU P F. Experimental study on erosion resistance of loess slope solidified with new high polymer material[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(6): 92-96. (in Chinese)]
- [9] 王银梅. 新型高分子材料固化黄土的抗剪强度特性[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(2): 116-118. [WANG Y M. Shear strength characteristics of new polymer material solidified loess[J]. Low Temperature Construction Technology, 2016, 38(2): 116-118. (in Chinese)]
- [10] 王银梅, 高立成. 黄土化学改良试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 1071-1077. [WANG Y M, GAO L C. Experimental research on chemical improvement of loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 1071-1077. (in Chinese)]
- [11] 周瑾. SH 材料对夯筑遗址土的加固效果试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [ZHOU J. Experimental study on the reinforcement effect of the SH material on rammed site soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. (in Chinese)]
- [12] 朱利君, 裴向军, 张晓超, 等. 双聚材料固化黄土直接剪切性能研究[J]. 人民珠江, 2020, 41(3): 78-84. [ZHU L J, PEI X J, ZHANG X C, et al. Study on direct shear properties of cured loess with double-poly material[J]. People's Pearl River, 2020, 41(3): 78-84. (in Chinese)]
- [13] 裴向军, 罗阳楚君, 杨晴雯. 含水率及掺砂量对双聚材料改良碎石土性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(9): 48-52. [PEI X J, LUO Y C J, YANG Q W. Impact of water content and sand content on performance of improved gravel soil with dimeric materials[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2018, 37(9): 48-52. (in Chinese)]
- [14] 任童, 裴向军, 罗阳楚君. HP-1 护坡浆液固化黄土的抗压强度和渗透性试验[J]. 中国科技论文, 2018, 13(3): 275-278. [REN T, PEI X J, LUO Y C J. Study on compressive strength and permeability of solidified loess with HP-1 slope protection slurry[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(3): 275-278. (in Chinese)]
- [15] 常志璐, 裴向军, 吴梦秋, 等. 植物纤维加筋固化土抗压强度和渗透试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 912-919. [CHANG Z L, PEI X J, WU M Q, et al. Experimental study on compressive strength and permeability of soil solidified with coconut-fiber and double polyethylene material[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 912-919. (in Chinese)]
- [16] 杨晴雯. 旱寒区公路边坡土体防渗固化新材料研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015. [YANG Q W. A new materials research which keep soil impermeable and rugged in highway slope in the cold and arid region[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)]
- [17] 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 G, PEI X J, YUAN J K, 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)]
- [18] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019. [Ministry of water resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical test method:GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [19] VAN GENUCHTEN M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892 – 898.
- [22] MARSHALL T J. A relation between permeability and size distribution of pores[J]. *Journal of Soil Science*, 1958, 9(1): 1 – 8.
- [21] 李萍,李同录,王红,等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数 Childs & Collis-Geroge 模型预测[J]. *岩土力学*, 2013, 34(增刊2): 184 – 189. [LI P, LI T L, WANG H, et al. Soil-water characteristic curve and permeability prediction on Childs & Collis-Geroge model of unsaturated loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34 (Sup2): 184 – 189. (in Chinese)]
- [22] SALAIZ T A, SHEARMAN R C, RIORDAN T P, et al. Creeping bentgrass cultivar water use and rooting response[J]. *Crop Science*, 1991, 31(5): 1331 – 1334.
- [23] 朱新强,张新颖,师尚礼,等. 干旱胁迫下 4 个苜蓿品种根系抗旱性的比较[J]. *甘肃农业大学学报*, 2012, 47(1): 103 – 107. [ZHU X Q, ZHANG X X, SHI S L, et al. Comprison on the root drought resistance of four alfalfa cultiars under drought stress [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2012, 47 (1): 103 – 107. (in Chinese)]
- [24] VOLIKOV A B, KHOLODOV V A, KULIKOVA N A, et al. Silanized humic substances act as hydrophobic modifiers of soil separates inducing formation of water-stable aggregates in soils [J]. *Catena*, 2016, 137: 229 – 236.
- [25] 杨晴雯,裴向军,黄润秋. 改性钠羧甲基纤维素加固粉砂土水稳性及稳定机理分析[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(12): 107 – 112. [YANG Q W, PEI X J, HUANG R Q. Research on the water stability of modified carboxymethyl cellulose stabilized silty sand and mechanism of stabilization [J]. *Journal of the Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36 (12): 107 – 112. (in Chinese)]

编辑:张若琳