

超疏水材料改良黄土的宏微观抗渗机制研究

何玉琪, 廖红建, 倪诗雨, 牛波

(西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为有效提高黄土的抗渗性,改善其遇水后的稳定性,并预防由水诱发的黄土地质灾害,本文采用一种有机硅憎水粉末疏水材料对黄土进行改良。开展三轴渗透试验测量不同掺量疏水材料改良黄土的渗透系数,结合土水接触角试验和扫描电镜(SEM)试验,从宏观表面接触特性和微观结构特性的角度综合分析抗渗机制。研究表明:改良黄土的渗透系数会随着渗透时间逐渐减小至稳定,与渗透时间符合幂函数关系。固结围压的升高会导致改良黄土渗透系数降低,主要表现为土体孔隙收缩,渗流通道数减少,有效渗流压力降低。掺入疏水材料的最优质量分数为1%~2%,此时饱和黄土渗透系数下降达到90%以上。疏水材料改良黄土抗渗性的宏观机制表现为土体表面粗糙度增加,疏水基憎水,导致土水接触角增大,表面自由能减小;微观机制在于疏水材料通过表面附着、胶结团聚、填充孔隙等方式改变了黄土的内部结构。

关键词: 改进黄土;疏水材料;渗透系数;抗渗机制

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202211007 **文章编号:** 0253-987X(2022)11-0062-10

Experimental Study on the Anti-Permeability Mechanism of Hydrophobic-Powder-Improved Loess from Macro and Micro Perspectives

HE Yuqi, LIAO Hongjian, NI Shiyu, NIU Bo

(School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, a novel environmental-friendly hydrophobic powder is used to improve the properties of loess so as to significantly improve its anti-permeability and enhance its stability under wet conditions, as well as preventing water-induced geological disasters in loess terrain. A series of triaxial permeability tests are carried out to investigate the permeability coefficient of the loess mixed with hydrophobic powder in different concentrations. Furthermore, SEM tests and soil-water contact angle tests are carried out to investigate the mechanism of hydrophobic powder improving the anti-permeability of loess from the aspects of surface contact and internal structure characteristics. The results show that the permeability coefficient of the improved loess gradually decreases with the increase of permeation time, and the relationship between these two parameters can be depicted by the power function. Meanwhile, the permeability coefficient decreases with the increase of confining pressure, which is mainly represented by the shrinkage of soil pores, the decrease in seepage channels, and the decrease in the effective seepage pressure. The optimal hydrophobic powder dosage is 1%—2%, which reduces the permeability coefficient of loess by 90%. The macro and micro anti-permeability mechanisms of the hydrophobic-powder-

收稿日期: 2022-05-26。 作者简介: 何玉琪(1993—),男,博士生;廖红建(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879212,41630639);陕西省重点研发计划资助项目(2019KWZ-09)。

网络出版时间: 2022-07-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220720.1313.005.html>

improved loess are as follows: on the one hand, the surface roughness of the improved loess is increased, and of the existence of the hydrophobic group results in a larger soil-water contact angle and lower free surface energy; on the other hand, the internal structure of loess is changed by the hydrophobic powder blocking the pores in the loess body by adsorption, cementation, and aggregation on the primary grains.

Keywords: improved loess; hydrophobic powder; permeability coefficient; anti-permeability mechanism

天然黄土呈现高强度性和低压缩性,遇水之后,结构快速破坏,强度急剧下降,并发生大幅变形^[1-2]。黄土因其结构特殊所具有的水力敏感性会导致以湿陷性为代表的多种地质灾害,而湿陷性的发展由黄土的渗透性直接影响^[3],因此,改善黄土的抗渗性并提升其遇水后的稳定性,对防治黄土地质灾害具有重要意义。

影响土体渗透性的因素可概括为两类:一是土体的力学因素,例如粒径、形状、孔隙、几何排列等,这类因素会直接影响渗流通道的尺寸和渗流路径的曲折程度;二是土体的物理-化学因素,例如土颗粒的分散或团聚程度,这类因素会影响土体内部的微小渗流通道和主渗流通道数^[4]。针对以上特点,目前国内外多采用机械加固法和添加材料改良法对土体进行抗渗处理。

常用的机械加固法为灌浆法和夯实法,灌浆使得土体内部的裂缝和大孔隙被水泥等材料填充,夯实降低了土的压缩性,提升了其密实度^[5]。添加材料改良法是在土体中加入一定的物理化学材料,使土体与这些材料发生物理或化学反应,造成土体的团聚状态、孔隙分布、渗流通道等发生变化。传统添加材料有石灰、水泥、膨润土、赤泥、固化剂、化学溶液以及几种材料的混合体等^[6]。研究表明,土体经过改良后,其抗渗性会得到一定程度的改善,但改良侧重点与改良程度不同,例如石灰、水泥等材料侧重于对土体强度的改良^[7],对抗渗性改良能力不强,仅提升 1 个数量级左右。膨润土、赤泥等对抗渗性改良效果较好,但是要求掺量(本文均指质量分数)较高,一般在 10% 左右^[8]。固化剂改良后土体的最大干密度增大,最优含水量小,相比于石灰改良土,具有更好的抗渗性^[9]。在土体中加入酸性溶液后,土骨架的连接方式会发生改变,造成土体大孔隙消散,小孔隙增多,使得有效渗流孔隙减小^[10]。使用混合材料,例如二灰土、聚丙烯纤维与水泥混合土、偏高岭土和石灰混合土等对土体改良时^[11],对抗渗性的提升能力往往大于一种材料的改良效果。

传统添加材料对土体抗渗性的改善能力并不出众,此外,使用固化剂和化学试剂对土体改良不符合绿色发展理念。近年来,人们开始采用纳米级材料、绿色材料、微生物加固技术等对土体抗渗性进行改良。Ng 等^[12]选用纳米氧化铜粉末对黏土进行改良,结果表明,经改良后的黏土部分孔隙会被纳米材料堵塞,最大孔径减少 20%,水力传导率降低 30% 左右。刘钊钊等^[13]的研究证明木质素可有效改善土体的抗崩解性和持水特性,但是木质素掺量过高则会降低土体强度,并削弱水稳性^[14]。微生物加固技术具有环境友好,可持续性强的特点^[15],对裂隙岩体抗渗性的改良效果可达 80%^[16]。此外,由于含水状态可对岩土体特性产生较大影响^[17-19],故也有研究利用有机硅烷等疏水性材料对土体渗透性进行改良,如将有机硅烷加入高岭土后^[20-21],会使颗粒级配发生变化,粒间黏附性变强,吸水性能降低。在此基础上,Saulick 等^[22]首先将砂子硅烷化改变它们的表面化学性质,然后将二氧化硅粉混合黏附到砂子上改变它们的疏水性,结果表明,混合后砂土的土-水接触角可增加 10%~20%。利用材料疏水性对土体进行改良的方法在金属土及粗粒土中有一定研究,但是在黄土中还鲜见应用,且其宏观改良机制也未进行深入探讨。

针对提高黄土抗渗性的必要性和传统改良材料的不足,本文首次采用一种有机硅憎水粉末疏水材料对黄土进行改良,定量分析疏水材料对黄土抗渗性的改良效果,测定疏水材料最优配比,并从宏观表面接触特性和微观结构变化的角度揭示改良机制。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

选用的有机硅憎水粉末疏水材料为 Dow Corning SHP 60+ (Silicone Hydrophobic Powder 60+), 以下简称 SHP。该材料成本低,耐久性强,其主要成分为硅氧烷树脂,外表为一种粒径极小可自由流动的白色粉末。相比于其他改良材料,SHP 的优

势在于易与土体等颗粒材料混合,绿色无污染,且具有出色的分散性和可加工性,材料中精细分散的硅基活性物质提供了良好的储存稳定性和活性成分,遇水之后可快速释放,发挥其强大的疏水能力。

本文的试验用土为陕西省延安市桃花山 Q3 黄土,地理位置为东经 109.29°,北纬 36.39°,取样深度为 3 m。采用密度计法测得小于某粒径土的颗粒粒径分布特性,结果如图 1 所示,黄土物理性质指标见表 1。

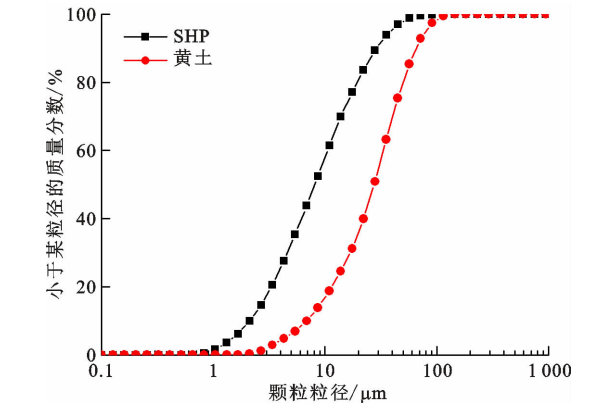


图 1 颗粒粒径分布特性曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves

表 1 黄土物理性质指标

Table 1 Physical properties of tested loess

密度/ (g · cm ⁻³)	含水率 (质量分 数)/%	塑性 指数	塑限 /%	液限 /%	相对 密度	孔隙 比 <i>e</i>
1.58	12.35	16.9	13.01	29.9	2.69	0.92

1.2 试验方案

1.2.1 三轴渗透试验

首先将取来的黄土样碾碎烘干并过 1 mm 标准筛后,配置 SHP 掺量(本文均指质量分数)分别为 0%、0.5%、1%、2%、3%的试样土,充分搅拌振动;待 SHP 与黄土混合均匀后,喷洒一定的水,再次充分拌合,控制土样含水率为 15%左右;然后将土样用塑料膜密封,放置 48 h 后取出;最后利用制样器将土样分两层压制干密度为 1.50 g/cm³、高度为 80 mm、直径为 39.1 mm 的圆柱三轴试样,并放入饱和缸中进行初步饱和。

将初步饱和好的试样放入三轴压力室中依次进行反压饱和与固结,固结完成后,开始三轴渗透试验。固结围压分别为 50、100、200 kPa,渗透围压均为 100 kPa。渗流持续时间为 130 h,每间隔 10 h 采

集一次数据,并依据《土工试验规程》(SL237—1999)^[23]求出渗透系数。

1.2.2 土水接触角试验

进一步开展 SHP 改良黄土的土-水接触角试验^[24],利用接触角计算改良黄土的表面自由能,从表面接触特性的角度探究 SHP 改良黄土抗渗性的机制。

利用光学接触角测量仪器,采用二滴法测量 SHP 改良黄土的土-水接触角(前进接触角),滴定液体采用极性液体水和色散液体二碘甲烷。SHP 质量分数分别设为 0%、1%、3%、5%、10%、15%、20%。需注意的是,SHP 掺量与三轴渗透试验 SHP 掺量并不一致,其原因是测量接触角时水滴与试样接触部分面积小,若依旧采用小比例 SHP 掺量,试验效果并不理想。试样在测量前经过压片,并保证所有试样孔隙比、含水量、干密度一致,室温控制在 20℃,共进行 3 组平行试验,最终土-水接触角取其平均值。

下面说明 SHP 改良黄土表面能的计算方法。若考虑土体分子间色散力和极性力的作用,则土体的总表面能可以表示为

$$\gamma_{sg}^{tot} = \gamma_{sg}^d + \gamma_{sg}^p \tag{1}$$

式中: γ_{sg}^{tot} 为土体的总表面能; γ_{sg}^d 为土体分子间色散力作用项; γ_{sg}^p 为土体分子间极性力作用项。采用 OWRK 模型^[25]计算 γ_{sg}^p ,表达式如下

$$\sqrt{\gamma_{sg}^d \gamma_{lg}^d} + \sqrt{\gamma_{sg}^p \gamma_{lg}^p} = 0.5 \gamma_{lg}^{tot} (1 + \cos \theta_i) \tag{2}$$

式中: γ_{lg}^d 和 γ_{lg}^p 分别为液体的色散力作用项和极性力作用项; γ_{lg}^{tot} 为液体的总表面能; θ_i 代表某种液体与土体的接触角,如 θ_w 代表土-水接触角, θ_d 代表土-二碘甲烷接触角。

式(2)中有 γ_{sg}^d 和 γ_{sg}^p 两个未知项,20℃时水和二碘甲烷的表面能参数见表 2,结合测得的土-水接触角和土-二碘甲烷接触角便可计算出土体的总表面能。

表 2 20℃时水和二碘甲烷的表面能参数

Table 2 Surface energy parameters of water and diiodomethane at 20℃

液体类型	$\gamma_{lg}^d /$ (mN · m ⁻¹)	$\gamma_{lg}^p /$ (mN · m ⁻¹)	$\gamma_{lg}^{tot} /$ (mN · m ⁻¹)
水	21.8	51	72.8
二碘甲烷	50.8	0	50.8

1.2.3 SEM 试验

开展扫描电镜(SEM)试验,从微观结构变化的角度研究 SHP 改良黄土抗渗性的机制。所用试样

取自渗透试验之前以及渗透试验结束后的三轴土样,在每个三轴土样的中心位置切下 1 cm×1 cm×0.5 cm 的小块,表面镀金后进行电镜扫描。本文共制作了 24 个 SEM 试样,分别为:渗流前 SHP 掺量分别为 0%和 2%的 SEM 试样,每组制备 3 个平行试样,共 6 个试样;50 kPa 和 200 kPa 固结围压下渗流后,SHP 掺量分别为 0%、2%、3%下的 SEM 试样,每组制备 3 个平行试样,共 18 个试样。然后对这 24 个试样进行不同放大倍数、不同区域位置的多次扫描观测,从中筛选观测结果较为明显、具有代表性的结果进行分析,着重分析渗流前后和改良前后土体的胶结方式、孔隙分布、渗流通道等变化情况。

2 试验结果分析

2.1 SHP 改良黄土的渗透系数

2.1.1 渗透时间的影响

图 2 为未加 SHP 时黄土渗透系数与时间的关系,图中 σ_c 代表固结围压, R^2 为拟合曲线的决定系数。结果表明,渗透系数会随着渗透时间逐渐减小至稳定,与渗透时间符合幂函数关系。这是因为在渗透压力的作用下,试样内部的胶结团聚体不断解体,土颗粒间黏聚力不断损失,小颗粒土脱离团聚体,然后随渗流水慢慢运移,逐渐堵塞渗流通道,使得渗透系数减小。渗流初期有效渗流通道较多,小土颗粒运移频繁,可快速流入大孔隙内,造成有效渗流通道大幅度减少,故渗透系数快速衰减。渗透后期小土颗粒运移速率大大降低,有效渗流通道逐步减少至极限值,故渗透系数逐渐趋于稳定。

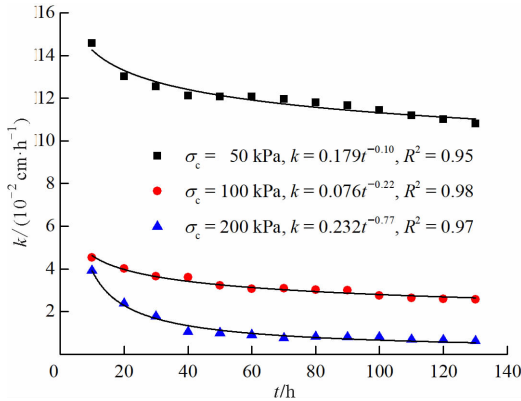


图 2 重塑黄土渗透系数与时间的关系
Fig.2 The relationship between permeability coefficient and time of reconstituted loess soils

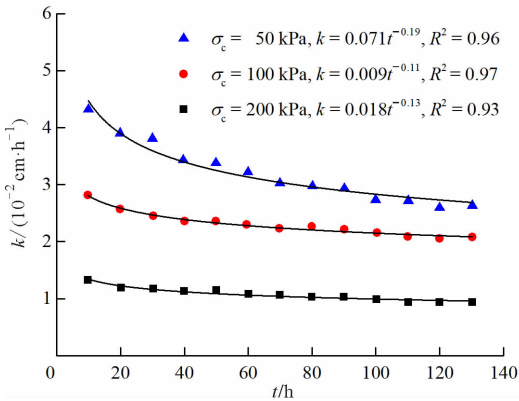
图 3 为 SHP 改良黄土渗透系数与时间的关系,结果表明,加入 SHP 后,同等级围压下土体渗透系数明显减小,但是渗透系数随时间变化的整体规律

不变。根据长期渗流条件下渗透系数不断衰减的特点,结合 1.50 g/cm³ 干密度、不同围压条件下的三轴渗透试验渗透系数随时间的变化规律,可以拟合得到渗透系数与渗透时间的关系式

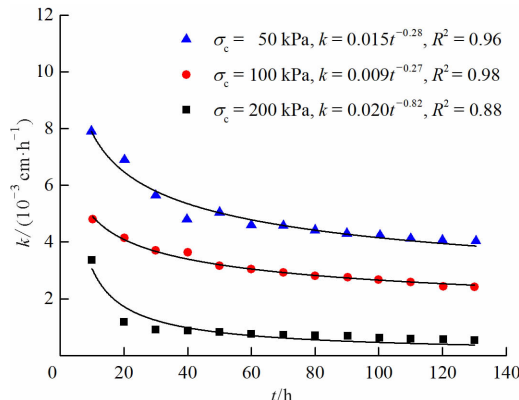
$$k = k_0 t^{-b} \tag{3}$$

式中: k 为初始渗透系数; b 为衰减系数,均可通过试验拟合得到; t 为渗透时间。

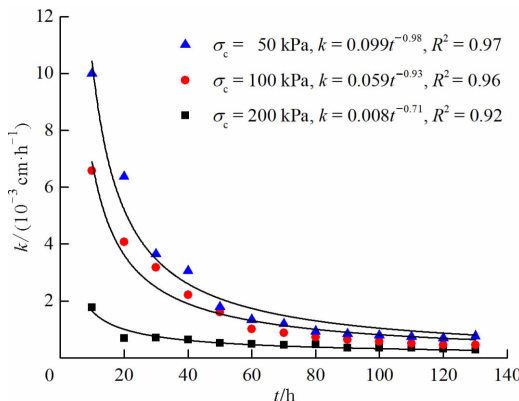
图 2 和图 3 的高精度拟合结果表明,式(3)可以较好地反映渗透系数与渗流时间的关系,即只要确定了试样的初始渗透系数和衰减系数,便可预测不



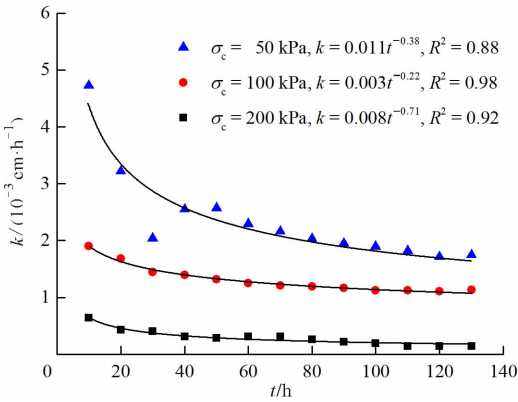
(a)0.5%SHP 掺量



(b)1%SHP 掺量



(c)2%SHP 掺量



(d)3%SHP 掺量

图 3 SHP 改良黄土渗透系数与时间的关系

Fig. 3 The relationship between permeability coefficient and time of SHP improved loess soils

同固结围压下,任意时刻改良黄土对应的渗透系数。

2.1.2 SHP 掺量的影响

采用渗透系数的平均值来定量描述 SHP 掺量对渗透性的影响,计算公式如下

$$k_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \tag{4}$$

式中: k_a 为平均渗透系数; n 为数据点数。因每 10 h 记录一次数据,故共计 $n=13$ 个数据点, k_i 代表第 $i \times 10$ h 所对应的渗透系数。

图 4 为不同固结围压下,平均渗透系数与 SHP 掺量的关系曲线。以 50 kPa 围压为例分析,未加 SHP 时黄土的平均渗透系数为 0.12 cm/h,加入掺量为 0.5%、1%、2%、3% 的 SHP 后,平均渗透系数依次减小约 73%、95%、98%、98%,具体试验数据见表 3。可见 SHP 对黄土渗透性产生了显著影响,当 SHP 掺量小于 1% 时,随着 SHP 掺量的提升,土体渗透系数呈现近似线性衰减的变化趋势,但是当 SHP 掺量大于 1% 后,继续添加 SHP,土体的渗透系数不再发生较大幅度减小,而是逐渐趋于稳定,说明 SHP 添加量存在一个最优配比 1%~2%。

表 3 不同 SHP 掺量改良黄土的平均渗透系数
Table 3 Average permeability coefficient of improved loess with different SHP concentrations

围压/ kPa	0%	0.5%	1.0%	2.0%	3.0%
50	0.120	0.032	0.005 00	0.002 50	0.002 40
100	0.032	0.023	0.003 20	0.001 80	0.001 30
200	0.012	0.011	0.000 96	0.000 57	0.000 29

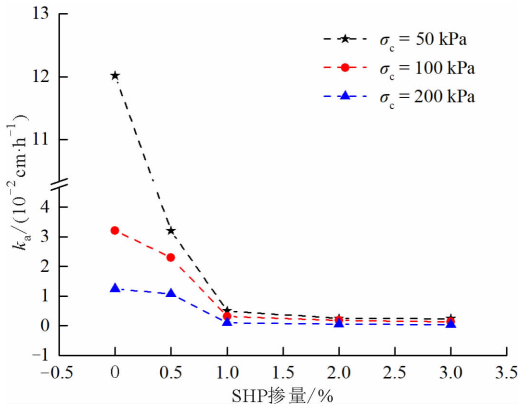


图 4 SHP 掺量对平均渗透系数的影响

Fig. 4 The effect of SHP concentrations on average permeability coefficient

2.1.3 固结围压的影响

根据试样固结后的排水量可以计算出土体在不同固结围压下的孔隙比,进而得到土体渗透系数随固结围压和孔隙比演化的三维视图,如图 5 所示。结果表明,随着围压的升高,试样受到的外力增大,一方面,会改变试样内部的微观结构,即土体中的弱胶结被压坏,土颗粒骨架被压缩,造成土体孔隙收缩,孔隙比减小,渗流通道数降低;另一方面,围压的升高会减小有效渗流压力,使得单位时间内通过土体的水流量减小,导致渗透系数明显降低。

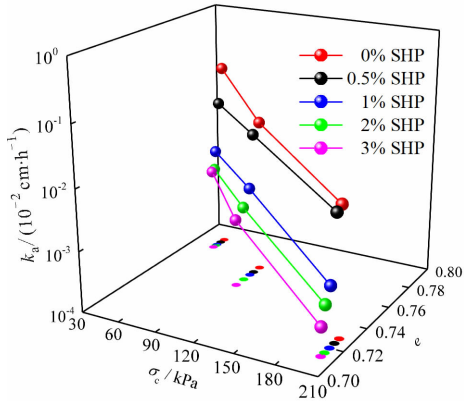
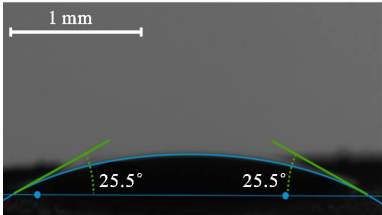


图 5 SHP 改良黄土平均渗透系数与围压和孔隙比的关系
Fig. 5 The relationship between average permeability coefficient, confining pressure, and void ratio of SHP improved loess

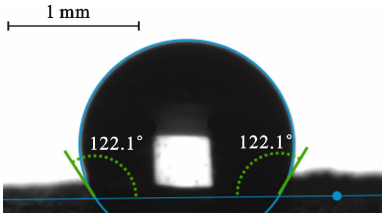
2.2 SHP 改良黄土的土水接触特性

图 6(a)和图 6(b)分别为某一组试验时,掺入 SHP 前后土体的土-水接触角测量结果。结果表明,未加 SHP 时黄土的土-水接触角为 25.5°,此时水滴在黄土试样上会被土体瞬间吸收,并不会滞留在土体表面。掺入 10% 的 SHP 后,土体的土-水接

触角增加至 122.1° ,此时水滴在土体表面后,并不会瞬间被土体吸收,而是缓慢渗入土体,说明了 SHP 可对土-水接触角产生显著影响。此外,根据试验现象,发现当接触角小于 90° 时,水渗入土体的速度相对快一些,当接触角超过 90° 时,水滴在土表面会滞留较长时间,入渗速率肉眼难以观测。



(a)0%SHP 掺量

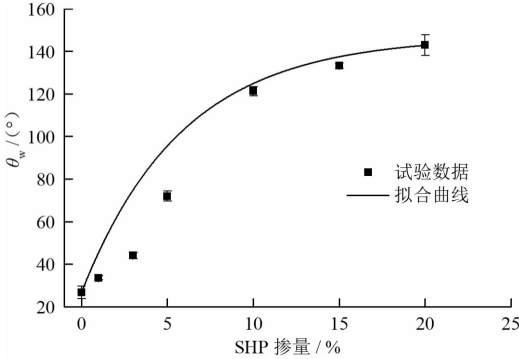


(b)10%SHP 掺量

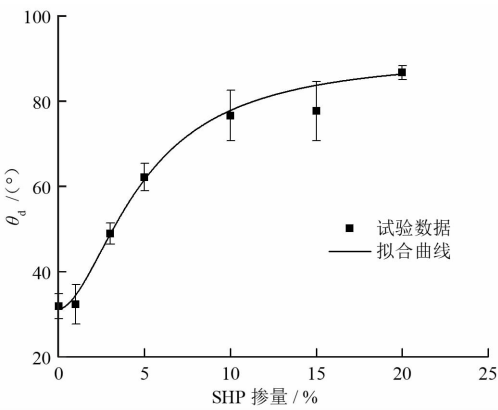
图 6 土-水接触角试验结果

Fig. 6 Soil-water contact angle test

图 7(a)和图 7(b)分别为土-水接触角和土-二碘甲烷接触角随 SHP 掺量的整体变化曲线,其中试验点为 3 组数据平均值,误差棒表示土标准差。结果表明,未加 SHP 时,土-水接触角和土-二碘甲烷接触角最小, $\theta_w=27.6^{\circ}$ 和 $\theta_d=31.8^{\circ}$,添加 SHP 后,二者均呈现出非线性增加趋势,当 SHP 掺量低于 10%时,固-液接触角会随着 SHP 掺量的增加显著增大,但是当 SHP 掺量超过 10%后,固-液接触角的增加趋势逐渐变缓,并趋于稳定,该结论与研究结果^[26]一致。本研究中土-水接触角稳定在 133° 左右,土-二碘甲烷接触角稳定在 78° 左右。



(a)土-水接触角



(b)土-二碘甲烷接触角

图 7 接触角与 SHP 掺量的关系

Fig. 7 The relationship between contact angles and SHP concentrations

图 8 为改良土体表面能随 SHP 掺量的变化曲线,由图 8 可知,未加 SHP 时,土体表面能最大,为 71.8 mN/m ,当 SHP 掺量低于 10%时,土体表面能随 SHP 掺量的增加快速减小,当 SHP 掺量达到 10%以上时,表面能则不再继续衰减,而是基本稳定于 21 mN/m 左右。图 9 为土体表面能随着固-液接触角变化的曲线,结果表明,土体表面能与土-水接触角和土-二碘甲烷接触角均呈现线性变化关系,随着固-液接触角的增大,土体表面的自由能逐渐减小,渗透性不断降低,疏水性能变得更加优异。

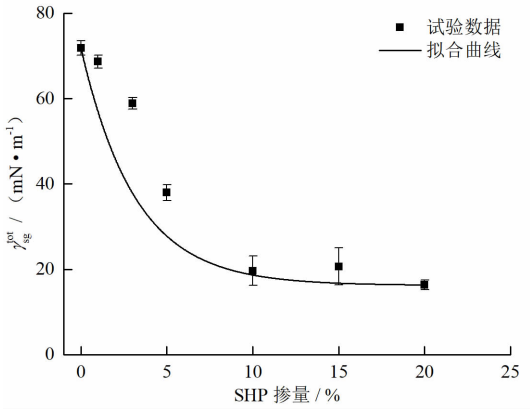
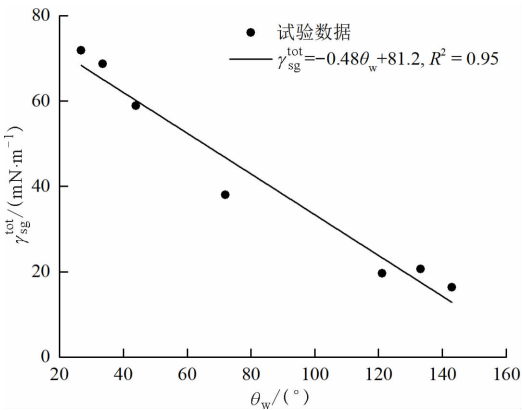


图 8 表面能与 SHP 掺量的关系

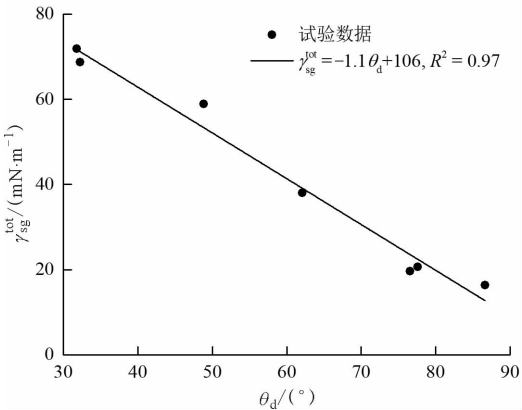
Fig. 8 The relationship between surface free energy and SHP concentrations

2.3 SHP 改良黄土的微观结构

图 10 为渗流前 2%SHP 改良土的微观结构,此时尚未发生渗流,可以明显观测到 SHP 颗粒会附着到部分黄土颗粒表面,对原有的黄土颗粒进行了包裹。一方面,更为细小的 SHP 颗粒会落在黄土颗粒



(a)土-水接触角



(b)土-二碘甲烷接触角

图 9 表面能与接触角的关系

Fig. 9 The relationship between surface free energy and contact angles

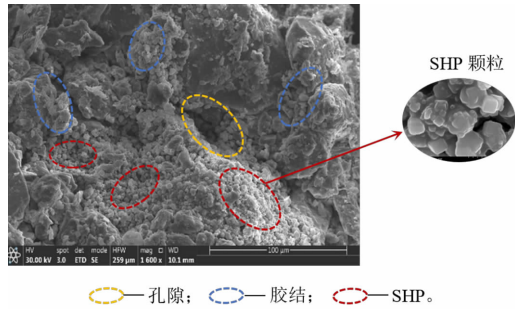
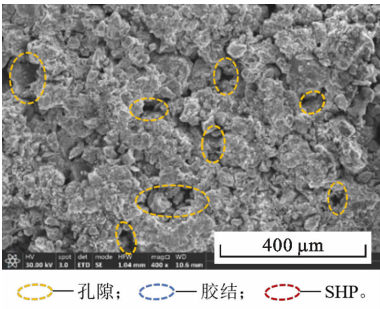
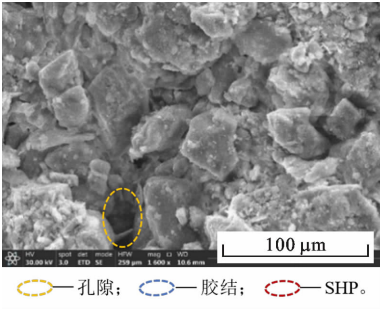


图 10 SHP 改良黄土微观结构图(放大 1 600 倍)

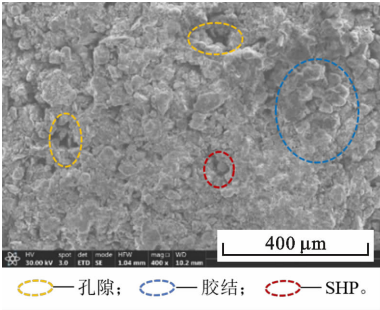
Fig. 10 Micro-structure of SHP improved loess



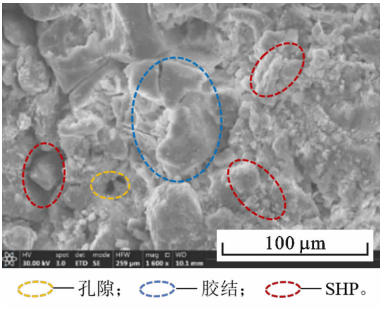
(a)0%SHP 掺量



(b)0%SHP 掺量



(c)2%SHP 掺量



(d)2%SHP 掺量

图 11 50 kPa 围压下黄土微观结构图

Fig. 11 Micro-structure of loess at 50 kPa confining pressure

接触之间的间隙中,起到黏结作用,使得黄土中原有的一些粒间接触转变为胶结接触,并将黄土中的一些小颗粒黏聚成团;另一方面,SHP 颗粒会填充到部分较大的孔隙中,导致黄土的孔隙率初步下降,渗流通道曲折度增加。

图 11 给出了 50 kPa 围压渗流后黄土的微观结构视图,其中图 11(a)、图 11(b)为未加入 SHP 时的视图,此时可以观测到多个明显小孔隙,孔隙率较

大,且颗粒之间存在明显棱角,渗流通道较多,在渗流压力的作用下,水会沿此通道渗流。图 11(c)、图 11(d)对应为加入 SHP 后的视图,相比于渗透前,可观测到的 SHP 颗粒减少,但是土颗粒之间的排列更为紧密,说明 SHP 在渗流压力的作用下进一步填充到了黄土的孔隙中,与黄土颗粒紧密结合,导致孔隙

率进一步减小。此外,土体颗粒的棱角变得更模糊,在其表面还可观测到一层胶结物质,说明 SHP 遇水后发生了一定的化学反应,会在土体表面形成一层疏水性的保护膜,对土颗粒产生更强的包裹作用,导致在同等渗透压力下,水的渗流更为困难,从而造成有效渗流通道减少,渗透系数降低。

3 改良机制探讨

结合上述土-水接触角试验和 SEM 试验,从 SHP 颗粒与土体的表面接触特性,以及黄土内部微观结构变化的角度探讨 SHP 对黄土抗渗性的改良机制。

3.1 表面接触特性

图 12 和图 13 分别为 SHP 的微观结构图和化学结构图。从物理形态来分析,SHP 为微米级的棱角颗粒,加入土体后,一部分细小颗粒会附着于黄土表面,造成黄土表面凹凸不平,表面粗糙度增加,水滴到黄土表面后,有一些空气会滞留在水滴与黄土表面之间的凹槽中,形成一层空气薄膜,阻碍了水与黄土的直接接触,导致水滴大部分与空气薄膜接触,与土体表面直接接触的面积反而大大减小,从而造成土-水接触角增大,土体表面自由能减小,疏水性能变强,渗透系数减小。土-水接触示意图如图 14 所示。



图 12 SHP 的微观结构
Fig. 12 Micro-structure of SHP

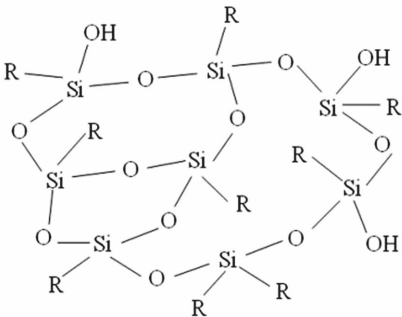
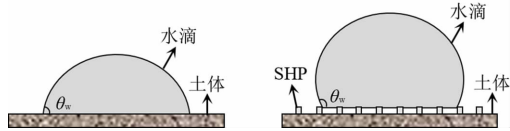


图 13 SHP 的化学结构
Fig. 13 Chemical structure of SHP



(a)与未改良黄土接触 (b)与 SHP 改良黄土接触

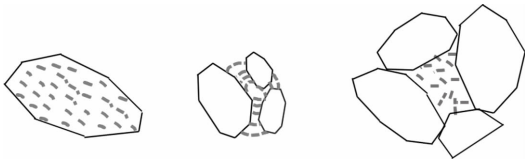
图 14 水滴与黄土接触示意图

Fig. 14 Diagram of contact patterns between water drops and loess soils

从化学成分来分析,有机硅树脂是通过控制硅烷的水解和缩合反应生产的,其主链是一条由硅原子和氧原子集体组成的稳定骨架,侧链通过硅原子与有机 R 基相连。有机硅树脂中存在一定的硅氢键,遇水后硅氢键水解成硅醇基,硅醇基的化学性质十分活泼,它与天然存在于土体中,以及水解作用生成的游离羟基发生化学反应,两个分子间通过缩水作用而使化学键连接起来,使黄土的表面上形成一个具有拒水效能的烃基。同时 R 基为甲基、乙基等长链烷基,具有一定的憎水性,环绕在硅氧键外部,增加了膜层的厚度,有利于憎水膜中相邻烷基的聚集作用,更能充分发挥相邻烷基之间的疏水作用,使水分子向膜层内部扩散困难,从而提高其疏水性能。

3.2 内部结构特性

结合 SEM 试验结果可知,在黄土中加入一定量的 SHP 后,黄土的微观结构共发生了 3 种变化:①SHP 成分中包含有树脂,具有一定的黏附性,与黄土混合后,许多 SHP 颗粒会附着于黄土表面,对黄土颗粒经行包裹,使得黄土表面的小孔隙减少;②由于 SHP 材料中的黏粒含量要多余黄土中的黏粒含量,故与黄土混合后,SHP 中的一些细小黏粒会落在黄土颗粒与颗粒接触之间的小间隙中,并逐渐形成胶结,促使临近的黄土颗粒不断团聚,最终形成较大的团聚体;③SHP 中的更小颗粒会填充于黄土较大的孔隙中,造成黄土中的大孔隙数减小,大渗流通道减少,且渗流通道曲折度增加。3 种微观结构示意图如图 15 所示。



(a)表面附着 (b)胶结团聚 (c)填充孔隙

图 15 SHP 改良黄土的微观结构示意图

Fig. 15 Particle patterns of SHP improved loess soils

4 结 论

本文利用一种有机硅憎水粉末疏水材料对黄土抗渗性进行改良,从宏观表面接触特性和微观结构特性角度对其抗渗机制进行深入解释,主要研究结论如下:

(1)在黄土中掺入少量疏水材料便可显著降低黄土的渗透系数。黄土渗透系数随着疏水材料掺量的增加先快速减小,后趋于稳定,最优疏水材料掺量为1%~2%,此时饱和黄土渗透系数下降达到90%以上。

(2)疏水材料改良黄土的渗透系数随固结围压的升高而降低,此外,随渗透时间的增加,改良土的渗透系数逐渐减小至稳定,二者符合幂函数关系。

(3)疏水材料改良黄土抗渗性的宏观观机制主要包含两方面:一是宏观表面接触特性的改变,即疏水材料增加了黄土表面的粗糙度,同时在疏水基的拒水效应下,土-水接触角变大,表面自由能减小;二是微观结构的改变,疏水材料可以附着于黄土表面,并填充黄土中的大孔隙,使得黄土孔隙比降低,同时疏水材料具有增强黄土粒间胶结的作用,可以使小颗粒土团聚成块,导致黄土中大的渗流通道被堵塞,小的渗流通道曲折度增加,抗渗性得到改善。

参考文献:

- [1] 刘健, 廖红建, 李杭州. 饱和重塑黄土动力反应的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 101-105.
LIU Jian, LIAO Hongjian, LI Hangzhou. Numerical simulation on dynamic response of saturated remolded loess soil [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(1): 101-105.
- [2] 吕龙龙, 廖红建, 伏映鹏, 等. 基于应变能密度映射的黄土结构性参数研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(2): 399-411.
LÜ Longlong, LIAO Hongjian, FU Yingpeng, et al. Study on structural parameter of loess based on the mapping of the strain energy density [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(2): 399-411.
- [3] 李喜安, 洪勃, 李林翠, 等. 黄土湿陷对渗透系数影响的试验研究 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 198-208, 222.
LI Xian, HONG Bo, LI Lincui, et al. Experimental research on permeability coefficient under influence of loess collapsibility [J]. China Journal of Highway and

Transport, 2017, 30(6): 198-208, 222.

- [4] MESRI G, OLSON R E. Mechanisms controlling the permeability of clays [J]. Clays and Clay Minerals, 1971, 19(3): 151-158.
- [5] 黄雪峰, 陈正汉, 方祥位, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理厚度与处理方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4332-4338.
HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, FANG Xiangwei, et al. Study on foundation treatment thickness and treatment method for collapse loess with large thickness [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4332-4338.
- [6] 何玉琪, 廖红建, 董琪, 等. 加筋材料改良黄土强度特性的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 181-185.
HE Yuqi, LIAO Hongjian, DONG Qi, et al. Experimental study on strength characteristics of geogrid-reinforced loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 181-185.
- [7] 胡再强, 梁志超, 郭婧, 等. 非饱和石灰改良黄土的渗水系数预测 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 26-31.
HU Zaiqiang, LIANG Zhichao, GUO Jing, et al. Prediction of permeability coefficient of unsaturated lime-improved loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 26-31.
- [8] 田高源, 米栋云, 卢仪思, 等. 不同因素对赤泥改良黄土渗透系数的影响 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(22): 301-305.
TIAN Gaoyuan, MI Dongyun, LU Yisi, et al. Effect of different factors on permeability coefficient of loess improved by red mud [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(22): 301-305.
- [9] 方祥位, 孙树国, 陈正汉, 等. GT型土壤固化剂改良土的工程特性研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1545-1548.
FANG Xiangwei, SUN Shuguo, CHEN Zhenghan, et al. Study on engineering properties of improved soil by GT soil firming agent [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1545-1548.
- [10] 刘华, 何江涛, 赵茜, 等. 酸污染原状黄土渗透微观特征演变规律试验研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 765-772.
LIU Hua, HE Jiangtao, ZHAO Qian, et al. Experimental study on evolution of micro-permeability characteristics of acid-contaminated undisturbed loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 765-772.
- [11] 谈云志, 胡焱, 曹玲, 等. 偏高岭土协同石灰钝化红

- 黏土水敏性的机制 [J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2207-2214, 2282.
- TAN Yunzhi, HU Yan, CAO Ling, et al. Mechanism of metakaolin and lime modification of water sensitivity for compacted laterite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2207-2214, 2282.
- [12] NG C W W, COO J L. Hydraulic conductivity of clay mixed with nanomaterials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(6): 808-811.
- [13] 刘钊钊, 王谦, 钟秀梅, 等. 木质素改良黄土的持水性和水稳性 [J]. 岩土力学与工程学报, 2020, 39(12): 2582-2592.
- LIU Zhaozhao, WANG Qian, ZHONG Xiumei, et al. Water holding capacity and water stability of lignin-modified loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2582-2592.
- [14] 张涛, 蔡国军, 刘松玉, 等. 工业副产品木质素改良路基粉土的微观机制研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1665-1672.
- ZHANG Tao, CAI Guojun, LIU Songyu, et al. Research on stabilization microcosmic mechanism of lignin based industrial by-product treated subgrade silt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1665-1672.
- [15] 崔昊, 肖杨, 孙增春, 等. 微生物加固砂土弹塑性本构模型 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 474-482.
- CUI Hao, XIAO Yang, SUN Zengchun, et al. Elasto-plastic constitutive model for biocemented sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 474-482.
- [16] 支永艳, 邓华锋, 肖瑶, 等. 微生物灌浆加固裂隙岩体的渗流特性分析 [J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 237-244.
- ZHI Yongyan, DENG Huafeng, XIAO Yao, et al. Analysis of seepage characteristics of fractured rock mass reinforced by microbial grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 237-244.
- [17] 吕龙龙, 廖红建, 伏映鹏, 等. 干湿状态对红层软岩脆延特性影响的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(4): 162-171.
- LÜ Longlong, LIAO Hongjian, FU Yingpeng, et al. Experimental research on effects of dry and natural states on brittle-ductile transition property for red-bed soft rock [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(4): 162-171.
- [18] 俞茂宏, 武霞霞, 史俊, 等. 确定土体破坏准则的一个新方法 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(8): 1-10.
- YU Maohong, WU Xiaxia, SHI Jun, et al. A new strategy for determining failure criteria of soil [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(8): 1-10.
- [19] 宋丽, 廖红建. 应变空间的软岩统一弹塑性软化本构模型 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 857-861.
- SONG Li, LIAO Hongjian. Unified elasto-plastic softening constitutive model of soft rock in strain space [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7): 857-861.
- [20] CHOI Y, CHOO H, YUN T S, et al. Engineering characteristics of chemically treated water-repellent kaolin [J]. Materials, 2016, 9(12): 978.
- [21] HAQUIE A M S, HART M L. Inducing hydrophobicity to improve long term engineering performance of kaolinite clay [C]//Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics: Volume 2. Berlin, Germany: Springer, 2019: 481-488.
- [22] SAULICK Y, LOURENÇO S D N, BAUDET B A. Optimising the hydrophobicity of sands by silanisation and powder coating [J]. Géotechnique, 2021, 71(3): 250-259.
- [23] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL 237—1999 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [24] 伏映鹏, 廖红建, 吕龙龙, 等. 考虑接触角及粒径级配影响的土水特征曲线滞回模型 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 502-513.
- FU Yingpeng, LIAO Hongjian, LÜ Longlong, et al. Hysteretic model for fitting soil-water characteristic curves considering contact angle and grain-size distribution [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 502-513.
- [25] GAO Yue, GUO Ruifeng, FAN Renjun, et al. Wettability of pear leaves from three regions characterized at different stages after flowering using the OWRK method [J]. Pest Management Science, 2018, 74(8): 1804-1809.
- [26] LEELAMANIE D A L, KARUBE J, YOSHIDA A. Characterizing water repellency indices: contact angle and water drop penetration time of hydrophobized sand [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2008, 54(2): 179-187.

(编辑 武红江 亢列梅)