

酸性环境下黄土细观结构演变的定量研究

杨意凡*, 张耀, 秦健翔, 卞明松, 邵明航, 张衡, 冯子杰, 王一雄

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年6月1日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月29日

摘要

研究了酸性环境下黄土的细观结构与宏观物理力学性质的变化特征。对原状黄土进行了不同酸浓度的湿陷试验, 采用颗粒分析试验与压汞试验对上述试验土样的SEM扫描照片进行处理, 并计算了土样的粒度分维值和大、中孔隙占比。试验测试并计算了不同土样颗粒和团粒间的范德华力与库仑力。从细观定量角度解释了土样粒级熵、排列熵和能级熵的变化特性, 从而引起土体宏观性质的变化。结论如下: 当应力条件持续变化时, 土样颗粒和团粒经历了较大幅度的调整过程, 以适应外部应力的变化, 这种周期性的变化特征与增湿和加酸条件下黄土结构的变化是一致的; 随着压力的增大, 含水量的增加, 酸性的增强, 土颗粒之间的孔隙间距及土粒粒径由此减小; 中孔隙和大孔隙的数量和含量均减小, 微孔隙以及小孔隙的数量和含量均增加; 土颗粒和团粒之间的范德华力与库仑力微重比随之增大。由此证明, 黄土在侵酸条件下, 内部结构的演变加剧了其宏观物理力学性质的变化。

关键词

SEM扫描, 预处理, 土颗粒, 孔隙, 微重比

Quantitative Study on Micro Structure Volution of Loess under Acid Environment

Yifan Yang*, Yao Zhang, Jianxiang Qin, Mingsong Bian, Minghang Shao, Heng Zhang,
Zijie Feng, Yixiong Wang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 1st, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jun. 29th, 2024

Abstract

The characteristics of changes in fine structure and macroscopic physical and mechanical proper-

*通讯作者。

文章引用: 杨意凡, 张耀, 秦健翔, 卞明松, 邵明航, 张衡, 冯子杰, 王一雄. 酸性环境下黄土细观结构演变的定量研究[J]. 土木工程, 2024, 13(6): 1059-1070. DOI: 10.12677/hjce.2024.136115

ties of loess under acidic environment were studied. The SEM scans of the above test soil samples were processed by particle analysis tests and mercury compression tests, and the particle size fractional dimensional values and the percentage of large and medium pores of the soil samples were calculated. The Van der Waals and Coulomb forces between particles and agglomerates of different soil samples were tested and calculated. The variation characteristics of grain level entropy, alignment entropy and energy level entropy of soil samples were explained from a fine quantitative point of view, which caused changes in the macroscopic properties of the soil. The conclusions are as follows: when the stress conditions continue to change, the soil sample particles and agglomerates undergo a relatively large adjustment process to adapt to the changes in external stresses, and this periodic change characteristic is consistent with the changes in the structure of loess under humidified and acidified conditions; with the increase of pressure, water content and acidity, the pore spacing between soil particles and the soil particle size decrease as a result; the number and the content of medium and large pores. The number and content of mesopores and macropores decreased, and the number and content of micropores and small pores increased; the van der Waals force and Coulomb force microgravity ratio between soil particles and agglomerates increased. This proves that the evolution of the internal structure of the loess under acid attack conditions exacerbates the changes in its macroscopic physical and mechanical properties.

Keywords

SEM Scanning, Pretreated, Soil Particles, Pores, Micro-Weight Ratio

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黄土作为一种典型的结构性土,在我国和世界其他许多国家都有着广泛的分布[1][2]。黄土的结构性主要在于其孔隙比大、密度低、碳酸钙含量高的特点[3]。然而,黄土特殊的结构性使其具有不同于同一时期其他沉积物的独特性质—湿陷性、震陷性和液化性[4]。这些不良特性往往给修建在黄土地基上的建筑物带来严重的危害。其根本原因在于黄土具有架空结构的特点,使其具有较大的压缩空间,在受到特殊外力作用,例如浸水或者地震时,就会发生塌陷或液化[5]-[7]。所以,对黄土细、微观结构的研究更能从本质上了解并改进它的宏观物理与力学属性。

随着科技的发展,细微观测试技术在土力学的发展中发挥了重要作用,学者们对岩土体的细微观研究也越来越深入。较典型的有:Tovey [3]首次用电子显微镜对天然黏性土的结构进行了观察和研究。Xu [5]等人基于土的破损原理,利用 SEM 技术研究了黄土的损伤模型。Michell [6]提出了土的结构性的定义,并详细阐述了结构性的概念和结构损失的机理。胡再强和张耀[7]等人基于黄土的湿陷敏感性的概念、不同酸溶液侵蚀黄土的湿陷试验及其微观 SEM 图片,提出了湿陷敏感性的判定方法。陈泰徐[8]等人通过分形理论分析 SEM 图像,提出在 IPP 软件中获取颗粒三维分形维数的计算方法。高国瑞[9]通过电子扫描照片对黄土结构的特点做了较详尽的阐述,并按照颗粒形态、排列状况、连接形式对其微结构作了系统的划分等。这些研究成果多是利用不同方法对土体的细微观结构进行的定性或定量研究,但是尚未有对酸性环境下黄土细观结构(颗粒、孔隙和连接)演变的定量研究。

本文以破坏黄土中由碳酸钙等盐晶胶结造成的孔隙结构,从而使得黄土的结构得到重组和增强这一

理论为基础[10]-[12],研究其细观结构特征与宏观力学性质的关联。从定量角度计算和研究了黄土粒级熵、排列熵和能级熵在不同酸性环境下的变化特征。本文在对土样电镜扫描的基础上,通过压缩试验、湿陷试验、颗粒分析试验和压汞试验对土体颗粒、团粒及孔隙几何参数的进行提取,并计算其相应的微观定量参数。通过实验测试了土颗粒和团粒之间的范德华力和库仑力,进而实现对酸性环境下黄土细观结构演变特征的定量分析与研究。

2. 试验材料与方法

2.1. 试验材料

(1) 土料: 本试验采样地点为西安市北郊某建筑施工基坑,天然黄土的基本物理性质见表 1。取土深度为 3.8~4.5 m,系马兰黄土,颜色呈褐黄色,湿陷系数为 0.062,为湿陷性中等的黄土。

(2) 硝酸溶液: 硝酸化学式为 HNO_3 , 分子量为 63.01, 配置浓度为 0.3 mol/L 和 2 mol/L 的硝酸溶液。

2.2. 试验方法

本文研究酸性环境下黄土结构的演变,同时控制所加入酸的浓度和压力值 2 个因素,在室温(20℃)条件下分析两者共同作用对土微观结构的影响。

(1) 制作 21 个大环刀土样,将土样平均分为三组,预浸入蒸馏水,0.3 mol/L 和 2 mol/L 的硝酸溶液。每组 7 个土样,分别施加 25、50、100、200、400、800、1600 kPa 荷载。

(2) 在上述压缩变形稳定的试样中,分别浸入上述不同酸浓度的试验溶液,按照 0.10、0.25、0.5、1.00、2.25、4.00、6.25、9.00、12.25、16.00、20.25、25.00、30.25、36.00、42.25、49.00、64.00 min,之后每隔半个小时记录一次数值,直到湿陷变形稳定为止(每小时变形不大于 0.01 mm)。

(3) 将上述条件的土样削至直径小于 8 mm,高度在 8~13 mm 的土样,风干 2 周后进行电镜扫描试验,先对其进行喷金,使其导电,喷金完成后把样品放入 Quanta2000 环境扫描电子显微镜进行观察,从中尽量取出较平整的部分,放大 50、100、200、500、1000、2000 倍。

(4) 对上述压缩过的原状土、浸水、浸入不同浓度酸的土样进行颗粒分析试验,该试验在 Bettersize2000 激光粒度分布仪进行,通过颗粒分析试验可以得到压缩后土样的各级粒径含量。

(5) 使用细钢丝锯将上述压缩后的试样切取 1 cm³ 的小方块,进行压汞试验。实际操作过程应尽量避免对试样的破坏,保证试验结果的可靠性。控制进汞压力和进汞速度,将汞压入试样孔隙中,使汞充斥孔隙,记录每一级进汞压力时的进汞体积,利用公式将进汞压力换算成孔隙孔径,得到试样的孔隙孔径分布结果。

Table 1. Basic physical indicators of natural loess

表 1. 天然黄土的基本物理指标

相对密度 (g/cm ³)	干密度 (g/cm ³)	孔隙比	液限 (%)	塑限 (%)	塑性 指数	碳酸钙 含量 (%)	颗粒组成(mm, %)		
							砂粒 >0.05	粉粒 0.05~0.005	黏粒 <0.005
2.71	1.31	1.07	29.94	19.66	10.28	11.22	35.49	60.88	3.63

3. 试验研究

3.1. 压缩试验

图 1 是通过压缩试验测得的 e-logp 曲线图。在 25~100 kPa 范围内,浸不同溶液前,黄土的压缩变形

无显著差异。在 200~800 kPa 范围内，由于黄土的结构差异，其压缩变形差异较大。在 1600 kPa 荷载下，由于上部荷载远大于黄土试样的结构强度，四个试样的压缩变形结果很接近。

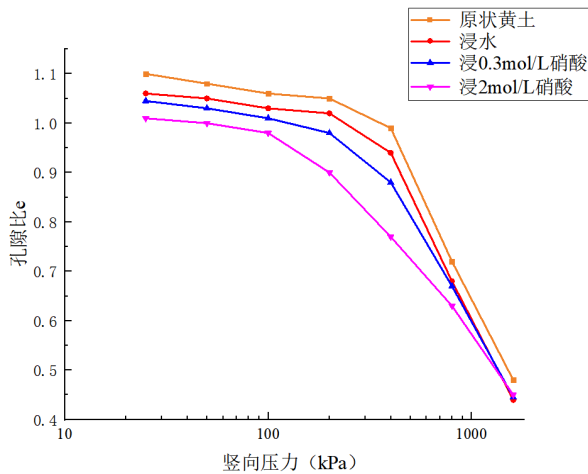


Figure 1. e-lgp curves of different soil samples before soaking
图 1. 不同土样浸入溶液前的 e-lgp 曲线图

3.2. 湿陷试验

图 2 是 3 种浸入不同溶液黄土的湿陷系数随压力变化的曲线图。对于浸水黄土，湿陷系数从 25 kPa 到 400 kPa 时增大，400 kPa 为湿陷变形的峰值，400 kPa 至 1600 kPa 时降低。浸酸黄土的湿陷系数从 25 kPa 到 200 kPa 时增大，200 kPa 为湿陷变形的峰值，200 kPa 至 1600 kPa 时降低。因为硝酸系强酸，氢离子在水中迅速电离，溶液中有充足的氢离子与土中的碳酸钙发生反应。相比于水，硝酸溶液可以在更低的压力下让黄土发生更为彻底的湿陷。溶液酸浓度越高，这一现象越显著[7] [13]。在高压下(大于 400 kPa)，由于较高的荷载远大于原状黄土的屈服应力，使得不同土样在浸入溶液前已经得到充分压缩，所以浸入不同溶液的黄土在高压下的湿陷系数相差不大，且无较好的规律性，主要因为在前期压缩阶段，不同土样的压缩系数存在较大差异[14]。

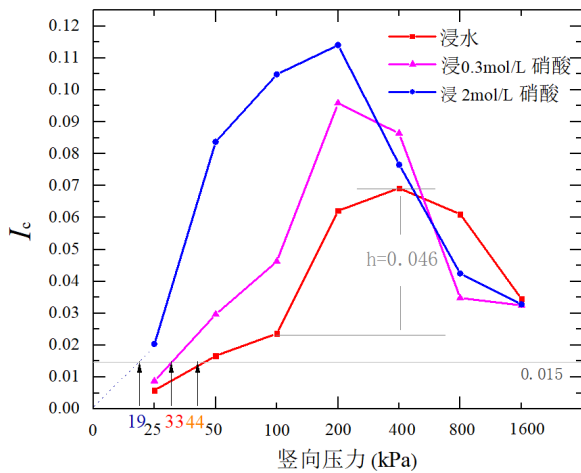
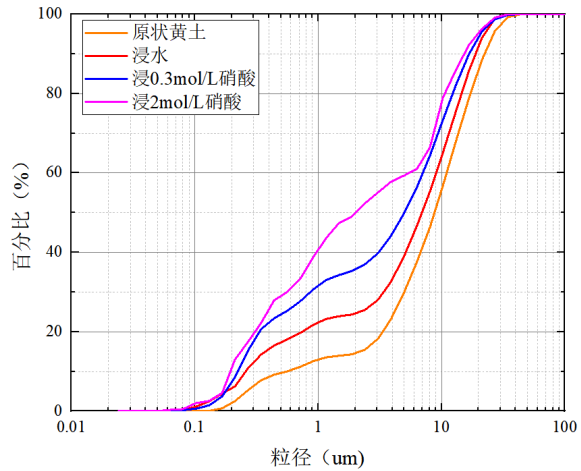


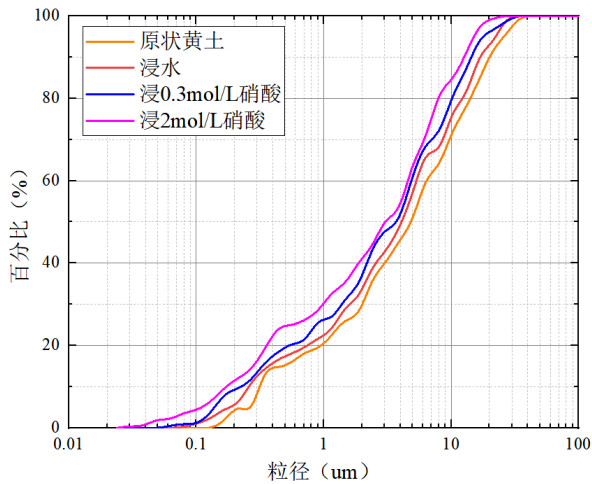
Figure 2. Relation between collapsible coefficient and vertical pressure in different solution
图 2. 不同溶液中，湿陷系数与压力的关系

3.3. 颗粒分析试验

为了得到土样中各级粒径的分布情况，对原状土样和浸不同溶液的土样进行颗粒分析试验，该试验是在 Bettersize2000 激光粒度分布仪上进行的。图 3 为不同压力下原状土和浸入三种不同溶液的颗粒级配曲线。



(a) 50 kPa 压力下原状土和浸入不同溶液的颗粒级配曲线



(b) 800 kPa 压力下原状土和浸入不同溶液的颗粒级配曲线

Figure 3. Particle gradation curves of different solutions and *in situ* soils immersed under different pressures

图 3. 不同压力下原状土和浸入不同溶液的颗粒级配曲线

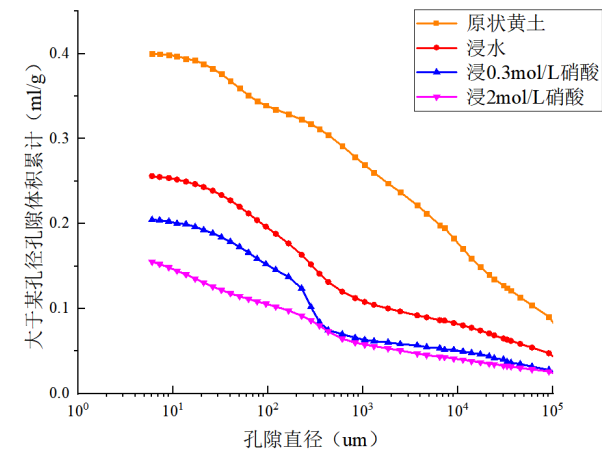
如图 3(a)所示，原状黄土的大粒径颗粒含量最多，其次是浸水的土样，而浸 2 mol/L 硝酸的大粒径颗粒含量最少。酸改良黄土的粒径要比天然黄土更细小，大粒径颗粒含量明显降低，中等粒径颗粒含量升高，但是细小粒径颗粒含量变化不大。可能是因为酸的作用能使得黄土中的较大的粒径颗粒得到分解变成中等粒径，但是没有办法分解成细小的粒径。

如图 3(b)所示，当压力增加到 800 kPa 时，小粒径颗粒的个数基本变化不大，其原因在于这种粒径的颗粒可能是自然条件下组成黄土的基本元素，仅依靠压力不易继续分解。而四种条件下中、小粒径所对应的颗粒个数不断增加的原因在于较坚硬的大颗粒或团粒在这样大的压力条件和浸酸的条件下也已经开始碎裂，导致其他较小粒径的颗粒有所增加。四种土样在 800 kPa 压力条件下，级配曲线基本一致。当

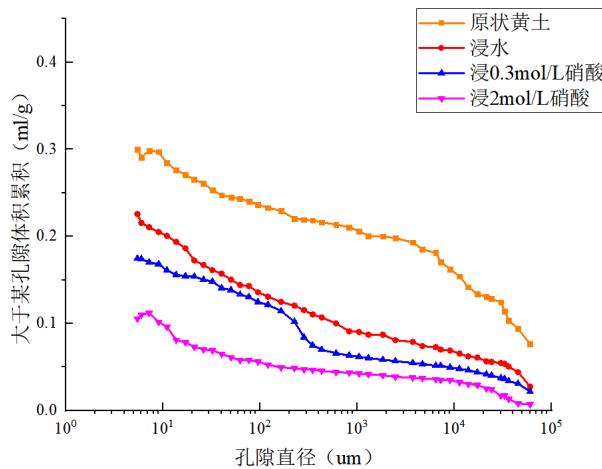
黄土含有较多的细颗粒时，粗颗粒之间的大孔隙就会被填充，土样的压实性更强，颗粒间的接触面更大，连接性也更好，相应的黄土粘聚力会有所增加。

3.4. 压汞试验

为了得到土样中孔隙的大小和数量情况，对原状土样和浸入不同溶液的土样进行压汞试验，该试验是在压汞仪上进行的。图 4 为不同压力下原状土和浸入不同溶液的压汞曲线。



(a) 50 kPa 压力下原状土和浸入不同溶液的压汞曲线



(b) 800 kPa 压力下原状土和浸入不同溶液的压汞曲线

Figure 4. Piezometric curves of *in-situ* soil and immersed in different solutions under different pressures

图 4. 不同压力下原状土和浸入不同溶液的压汞曲线

如图 4(a)所示，在 50 kPa 压力下，浸有 2 mol/L 浓度硝酸的土样细小孔隙数量最多，之后依次是浸 0.3 mol/L 硝酸的，浸水的和原状土的。原状土中含有大量的中孔隙，而经过浸水后的黄土，其内部的中孔隙数量迅速减小，但是中孔隙的数量却保持较高的水平。所以，此时在浸水情况下，如果压力增大，依旧会产生明显的湿陷现象。相比而言，浸 0.3 mol/L 硝酸溶液和浸 2 mol/L 硝酸溶液的黄土两者差别很小，但是，相比于浸水黄土的中孔隙含量却明显降低。当竖向压力大小为 50 kPa 时，大孔数量最多的是原状土，然后依次分别是浸水、浸 0.3 mol/L 和浸 2 mol/L 硝酸的黄土，大孔隙数量的迅速降低能够说明

土体本身稳定性的增加。

如图 4(b)所示, 在 800 kPa 压力下时, 更多中孔隙和大孔隙被破坏, 使得更多的小孔隙或微孔隙增多, 进而提高稳定性。浸酸后的黄土对应的中孔隙接近消失, 说明此时黄土已不存在湿陷性。而经过浸水的黄土, 中孔数量也迅速降低。原状土却仍然存在。相比于浸水黄土, 此时浸酸的作用效果已经不明显, 由此进一步证明在高压下, 酸溶液对黄土结构改良的效果不大。在 800 kPa 压力下, 浸水和原状黄土中还存在一定的大孔隙, 但是大孔隙的数量却显著下降。这也说明了如果有足够大的压力可以破坏黄土中的碳酸钙胶结, 但是在酸的作用下, 大孔隙能去除的更彻底。

4. SEM 定量计算与分析

土细观结构的稳定性是由土的粒级熵、排列熵和能级熵共同决定的, 可根据其熵值的大小对其结构的优劣进行分析和评价[15] [16]。本文按照下述方法对不同条件下黄土的细观结构熵进行定量计算和分析, 计算结果如表 2 所示。

4.1. 不同环境条件下黄土粒级熵的比较

粒级熵(E_g)反应的是土中颗粒大小的不均匀情况, 可用黄土颗粒的粒度分维 D_{ps} 来衡量, 如式(1)所示[17] [18]。 D_{ps} 值的大小可反映土颗粒的均一化程度, 拥有和土的不均匀系数相同的含义。当对其进行相关计算时, 将双对数坐标系的横坐标定义为粒径 r , 纵坐标定义为大于该粒径的颗粒数 N , 坐标系所包含的直线斜率即为 D_{ps} 。由颗粒级配曲线得出不同直径颗粒的多少, 然后即可绘制出不同应力条件下的黄土的粒度分布曲线, 如图 5 所示, 式(1)可转变为式(2)。

$$N(r) \propto r^{-D_{ps}} \quad (1)$$

$$\ln N = -D_{ps} \cdot \ln r + k \quad (2)$$

式中, k 为式(1)取对数后的常数项。

图 6 为不同条件下土样的粒度分维值。由图 5 可知, 在不同压力条件下, 黄土的粒度分维值保持一致的规律。四条曲线都呈现出一个“阻尼波”状的结构调整过程。浸 2 mol/L 硝酸, 浸 0.3 mol/L 硝酸, 浸水和原状土的粒度分维值的波动范围分别系 0~0.8, 0~0.8, 0~0.6, 0~0.4。粒度分维值越大, 土的不均匀性越好, 其力学特性也越好。在不同压力 and 不同酸浸入的作用下, 土体原先结构被不同程度的破坏, 随着土体结构程度的降低, 土体原先骨架和很多大颗粒物质被分解, 从有序平衡状态向无序非平衡状态过渡, 其熵值增加。熵值越大, 物质越分散, 混乱度越高, 这样的物质就越稳定。土颗粒和团粒经过较大幅度调整, 4 种土样适应新环境的能力都变的更好。

4.2. 不同环境条件下黄土排列熵的比较

黄土排列熵 E_o 反映黄土的骨架排列情况, 即黄土颗粒之间孔隙的大小和多少。研究发现, 土体中不同孔隙占有的面积大小满足 Rayleigh 分布规律, 中孔隙指的是等效直径大于 4 μm 的孔隙。通过压汞试验得出各土样在不同条件下对应的不同大小孔隙的面积, 按照式(3)计算图像中所有孔隙面积之和, 按照式(4)计算图像中大中孔隙面积之和, 按照式(5)计算图像中大中孔隙面积占比, 即 e 。

$$S_e = \sum_{R=0}^{R_{\max}} S_R \quad (3)$$

$$S_{e,\max} = \sum_{R=4}^{R_{\max}} S_R \quad (4)$$

$$e = \frac{S_{e,\max}}{S_e} = \frac{\sum_{R=4}^{R_{\max}} S_R}{\sum_{R=0}^{R_{\max}} S_R} \quad (5)$$

式中, R 为孔隙半径, $R_{\max}$ 为土样可测得的最大孔隙半径, S_R 为不同等效直径的孔隙面积, S_e 为孔隙总面积, $S_{e,\max}$ 为大中孔隙面积之和。

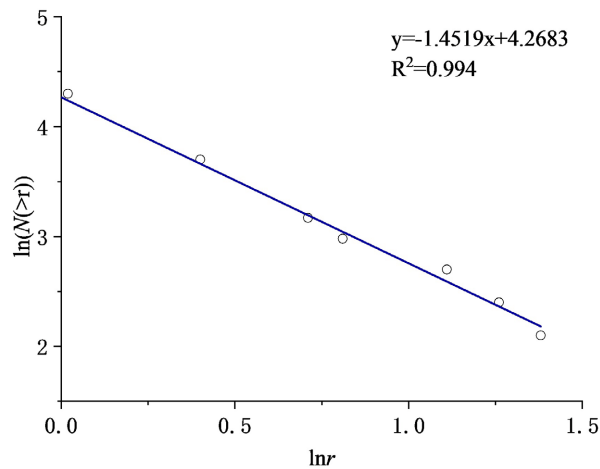


Figure 5. Grain size distribution curve of intact loess
图 5. 原状黄土的粒度分布曲线

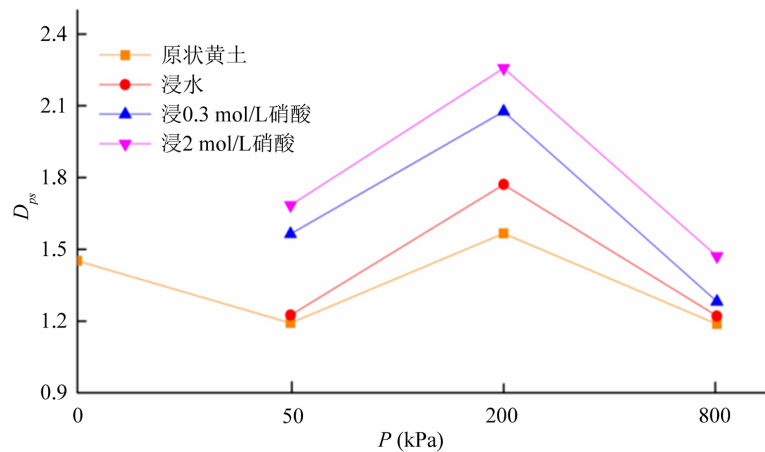


Figure 6. The relationship between pressure and the fractal dimension of the intact loess in different environments in compression process
图 6. 压缩过程中不同环境下原状黄土粒度分维与压力关系曲线

图 7(a)系土样在不同条件下的微小孔隙的含量变动情况。随着压力的增大, 原状黄土中的微小孔隙和小孔隙的总含量急剧增加, 而浸水之后的黄土, 其微小孔隙和小孔隙总含量变化并不明显。浸酸溶液的黄土, 其微小孔隙和小孔隙总含量的变化的曲线较为平缓。其原因是原状和浸水黄土在低压下有较多的大中孔隙, 在高压下, 颗粒填充, 大中孔隙被逐渐碾压成为较多的微小孔隙。而浸酸黄土在低压下的大中孔隙已经很少, 所以微小孔隙在低压下的占比就很高, 即使压力增大, 微小孔隙的占比变化也不明显。

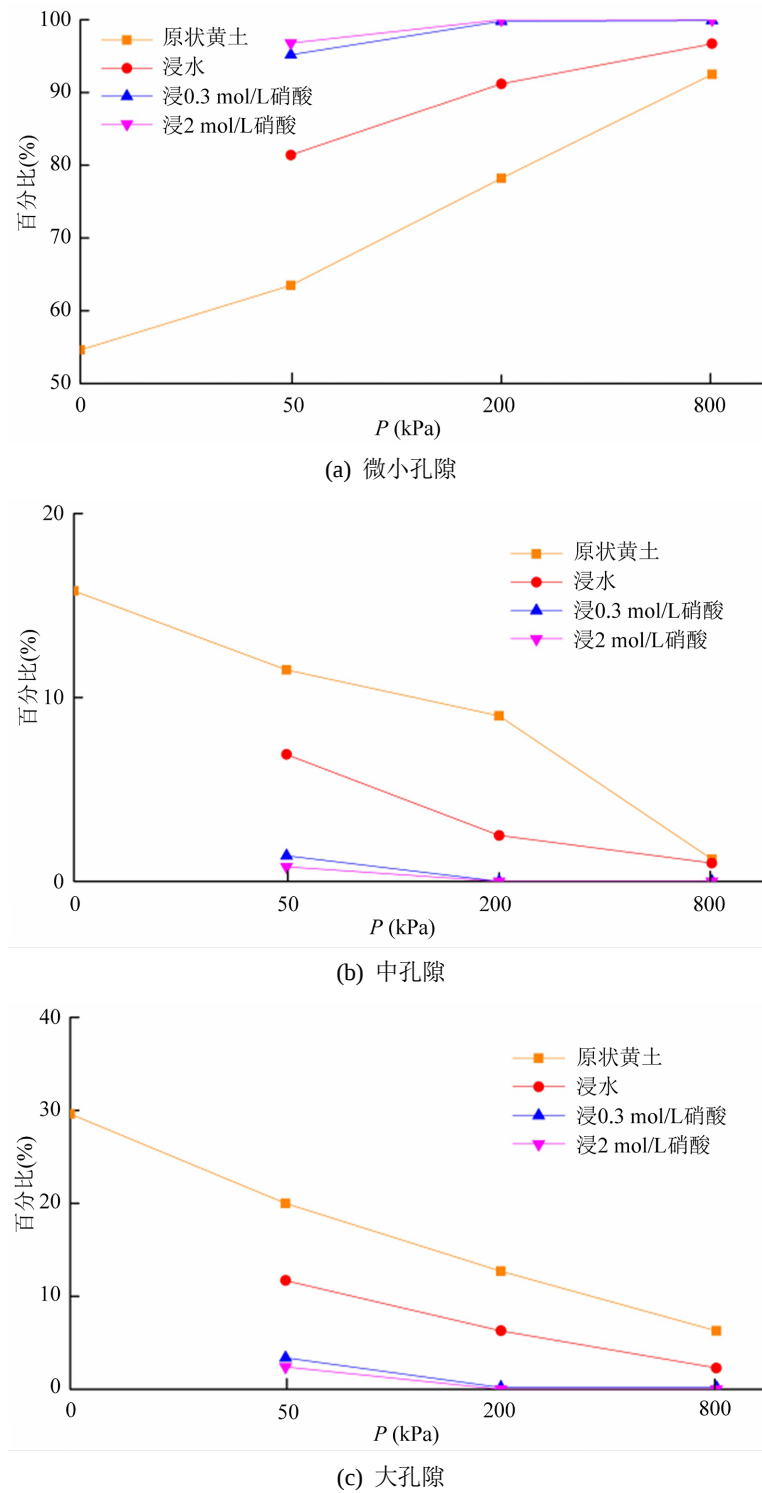


Figure 7. The relationship between the content of the original loess pores and the pressure curve under different environments during compression

图 7. 压缩过程中不同环境下原状黄土孔隙含量与压力关系曲线

图 7(b)和图 7(c)系土样在不同条件下的大中孔隙的含量变动情况。随着压力的增大,原状黄土和浸水后的黄土对应的大中孔隙含量迅速减小。浸酸黄土在 50 kPa 的低压下的大中孔隙含量很低,但仍有继

续被压缩的空间。达到 200 kPa 时, 浸酸黄土的大中孔隙的含量接近于 0。大、中孔隙占比高, 说明黄土还有较大的压缩性, 且密度低, 强度低; 大中孔隙含量的迅速降低说明土体稳定性增强。因此, 黄土的大、中孔隙占比可直观的反映黄土工程性质的好坏, 包括湿陷性和震陷性的大小, 以及稳定性的强弱。

4.3. 不同环境条件下黄土能级熵的比较

用土的能级熵(E_e)来表示土颗粒的连接强弱。 E_e 越大, 则土的连接能力越大, 稳定性越好。可以用土壤颗粒间的相互作用力(即范德华力和库仑力与土壤颗粒重力的比值)去定量判断不同环境条件下黄土颗粒间连接的强弱(即定量判定能级熵 E_e 的大小[19] [20])。

1) 范德华力微重比

土壤颗粒重量 W , 可用式(6)表示:

$$W = \rho' g v = \frac{\rho' g \pi D^3}{6} \quad (6)$$

式中, ρ' 为土壤颗粒的质量密度, 石英颗粒为 2.68 g/cm^3 , 蒙脱石颗粒为 2.52 g/cm^3 ; v 为土壤颗粒的等效体积; g 为重力加速度; D 为不同大小颗粒的直径。

土壤颗粒间范德华力 F_w , 可用式(7)表示:

$$F_w = \frac{AD}{24H^2} \quad (7)$$

式中, A (Hamaker) 为不同物质的计算参数, 石英颗粒为 $8.86 \times 10^{-20} \text{ J}$, 蒙脱石颗粒为 $9.32 \times 10^{-20} \text{ J}$; H 为颗粒间的平均距离。

土壤颗粒的范德华力微重比 ϖ_w , 可用式(8)表示:

$$\varpi_w = \frac{F_w}{W} = \frac{6A}{24H^2 \rho' g \pi D^2} \quad (8)$$

2) 库伦力微重比

由双电子层理论可知, 单一平面平板的电势 $\bar{\phi}$ 可用式(9)表示:

$$\bar{\phi} = \bar{\phi}_0 e^{-Kx} \quad (9)$$

式中, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; x 是距离颗粒表面的位置; $1/K$ 是颗粒表面双电子层厚度, K 为 $3 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$; $\bar{\phi}_0$ 是带电颗粒表面电位, 本次研究选用美国分散技术公司(DTI)的多孔固体和表面电位分析仪 DT-330 进行测试。原状黄土的颗粒表面电位 115 mv, 0.3 mol/L 硝酸溶液浸泡的黄土颗粒的表面电位是 121 mv, 2 mol/L 硝酸溶液浸泡的黄土颗粒的表面电位是 111 mv。

单平板之间的平均电场强度 E , 可用式(10)表示:

$$\bar{E} = \frac{1}{d} \int_0^d E dx = \frac{1}{d} \int_0^d \frac{d\bar{\phi}}{dx} dx = \frac{1}{d} \left[\bar{\phi}(x) \right]_0^d \quad (10)$$

式中, d 为颗粒间的净距离, 取 $d = 50 \text{ nm}$; E 为颗粒间的电场强度。

联立(9) (10)两式可得式(11):

$$\bar{E} = \frac{\bar{\phi}_0}{d} (e^{-Kd} - 1) \quad (11)$$

因此, 双平板之间土壤颗粒间库仑力可用式(12)表示:

$$F_e = q \cdot \bar{E} = 2 \cdot e \cdot \frac{\bar{\phi}_0}{d} (e^{-Kd} - 1) \quad (12)$$

由此，可按照式(13)计算土壤颗粒库仑力的微重比：

$$\varpi_e = \frac{F_e}{W} = \frac{\overline{e} \cdot \frac{\overline{\phi_0}}{d} (e^{-Kd} - 1) \cdot 12}{\rho' g \pi d D^3}$$

(13)

由表 2 可知，不同土样的范德华力和库仑力的微重比都有如下关系：浸 2 mol/L 硝酸的黄土 > 浸 0.3 mol/L 硝酸的黄土 > 浸水黄土 > 原状黄土。其主要原因是酸溶液浸入后的化学作用，使得土壤颗粒之间的孔隙距离更小，颗粒粒径也更细小。从而使得加酸以后，黄土的原始粘聚力有较大提高。对于同一酸浓度下的黄土，随着压力的增加，其微重比统一的表现均为增大，尤其是在 200 kPa 以后，土样孔隙有较大减小，范德华力微重比增加的更为迅速。相比于范德华力微重比，库仑力的微重比增加的幅度较小。所以，加酸以后黄土的固化粘聚力也有所增加，但增幅相对较小[13] [14]。

土颗粒之间较大的范德华力可以反映土颗粒之间有较大的原始粘聚力，较大的库仑力可以反映土颗粒之间有较大的固化粘聚力，这些都有助于增强土体的整体稳定性。因此，随着酸性增强，压力增大，土颗粒之间范德华力微重比和库仑力微重比的增加，土体的稳定性增强。

Table 2. Entropy comparison of loess particle structure under different environmental condition
表 2. 不同环境条件下黄土的细观结构熵

颗粒类别	粒级熵(E _g)	排列熵(E _o)	能级熵(E _e)	
	粒度分维 D _{ps}	大、中孔隙占比(%)	F _e /W	F _w /W
原状黄土	1.452	98.0%	-0.19	0.77
50 kPa	1.192	96.9%	-0.22	0.89
200 kPa	1.566	95.4%	-0.31	2.04
800 kPa	1.188	71.8%	-0.53	25.4
50 kPa + 水	1.225	94.5%	-0.25	1.28
200 kPa + 水	1.771	88.3%	-0.44	4.09
800 kPa + 水	1.211	64.0%	-1.11	92.04
50 kPa + 0.3 mol/L 硝酸	1.564	87.7%	-0.50	1.64
200 kPa + 0.3 mol/L 硝酸	2.077	8.9%	-0.84	6.88
800 kPa + 0.3 mol/L 硝酸	1.281	8.6%	-1.75	78.48
50 kPa + 2 mol/L 硝酸	1.684	80.9%	-1.27	2.45
200 kPa + 2 mol/L 硝酸	2.258	0.0%	-2.28	10.88
800 kPa + 2 mol/L 硝酸	1.471	0.0%	-4.11	103.44

5. 结论

通过以上试验，主要研究了黄土在浸酸、浸水条件下黄土细观结构的定量指标：粒级熵、排列熵、能级熵的变化特征，得到以下结论：

- (1) 当压力增加时，不同土样的颗粒粒度分维值(粒级熵)均表现为“阻尼波”状。此时，土样中团粒破损，变为更细小的颗粒或者团粒，并随着外界应力条件会持续变化。这种现象说明土样在外界应力变化时，会发生一个自我调整的过程，以适应外部应力的变化。
- (2) 当压力增加时，小、微孔隙的数量和含量会随之增多。中孔隙和大孔隙的数量和含量会随之降低。

浸水和浸酸以后,这一现象更为明显,说明土的排列结构(排列熵)在外界作用力影响下得到了优化。从宏观属性表现出来的就是整个土体的强度得到提高,结构性降低,稳定性增强。

(3) 采用范德华力和库仑力的微重比,定量计算和判断不同土样原始粘聚力和固化粘聚力(能级熵)的大小。随着压力的增大,这两个数值都有所增加,尤其是范德华力微重比,主要是因为土壤之间的孔隙间距和土的粒径均有所减小。在浸水和浸酸条件下,这一现象更为明显。

(4) 对土的粒级熵、排列熵和能级熵的综合定量计算与评价,较客观的反映不同土样的结构特征的优劣。其结果也进一步证明了酸性环境有助于黄土结构,包括颗粒级配、排列组成以及颗粒连接的改良。

(5) 以得到的试验对象宏观力学指标和细观试验数据为基础,对黄土宏细观关系思想进行突破创新,得到能较好反映黄土力学性质与细观结构特征的关联性规律,这对于揭示黄土变形破坏本质和解决黄土地质灾害问题具有一定参考价值。

基金项目

陕西省教育厅服务地方专项研究计划项目(22JE018, 23JE018, 23JE019), 长江科学院开放研究基金项目(CKWV20231170/KY)。

参考文献

- [1] Li, Y., Shi, W., Aydin, A., Beroya-Eitner, M.A. and Gao, G. (2020) Loess Genesis and Worldwide Distribution. *Earth-Science Reviews*, **201**, Article 102947. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102947>
- [2] Wang, L. and Deng, J. (2013) The Loess Microstructure Kinds and Its Seismic Subsidence. *Natural Science*, **5**, 792-795. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.57095>
- [3] Tovey, N.K. (1973) Quantitative Analysis of Electron Micrographs of Soil Microstructure. *Proceeding of the International Symposium on Soil Structure*, Gothenburg, 1-2 August 1973, 50-57.
- [4] Yuan, Z.X. and Wang, L.M. (2009) Collapsibility and Seismic Settlement of Loess. *Engineering Geology*, **105**, 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.002>
- [5] Xu, J., Li, Y., Ren, C. and Lan, W. (2020) Damage of Saline Intact Loess after Dry-Wet and Its Interpretation Based on SEM and NMR. *Soils and Foundations*, **60**, 911-928. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.06.006>
- [6] Michell, J.K. (1993) *Fundamentals of Soil Behavior*. 2nd Edition, Wiley.
- [7] 胡再强, 张耀, 岳文青, 等. 酸性环境下黄土湿陷性试验与湿陷敏感性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1748-1756.
- [8] 陈泰徐, 陈筠, 沙运斌, 等. 基于 SEM 图像的既有地基红黏土颗粒微观结构及分形特征研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 635-642.
- [9] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1-10.
- [10] 谢定义, 姚仰平, 党发宁. 高等土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [11] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4142-4146.
- [12] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 775-779.
- [13] Zhang, Y., Hu, Z., Li, L. and Xue, Z. (2018) Improving the Structure and Mechanical Properties of Loess by Acid Solutions—An Experimental Study. *Engineering Geology*, **244**, 132-145. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.023>
- [14] Zhang, Y., Hu, Z. and Xue, Z. (2018) A New Method of Assessing the Collapse Sensitivity of Loess. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **77**, 1287-1298. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1372-9>
- [15] 汤连生, 廖化荣, 张庆华. 土的结构熵及结构性量化探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1997-2002.
- [16] 邢修三. 物理熵、信息熵及其演化过程[J]. 中国科学(A 辑), 2001, 31(1): 77-84.
- [17] 胡瑞林, 官国琳. 黄土湿陷性的微结构效应[J]. 工程地质学, 1999, 7(2): 161-167.
- [18] 侯春梅, 刘小伟, 李明. 甘肃黄土的粒度分维特征及意义[J]. 地质科学, 2005, 40(4): 539-546.
- [19] 房莹光, 冯德奎. 土体力学特性颗粒尺度效应的理论与试验研究[C]//中国土木工程学会土力学及岩土工程分会. 中国土木工程学会第十二届全国土力学及岩土工程学术大会论文摘要集: 2015 年卷. 2015: 7.
- [20] 冯德奎. 土体介质多尺度耦合力学特性的理论与试验研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.