

不同区域原状黄土颗粒和孔隙特征分析^①

胡海军¹, 周 康¹, 骆亚生¹, 胡 全², 赵文鹏¹, 张志毅²

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 信息工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 研究不同区域黄土颗粒和孔隙大小、形状和排列的定量差异, 针对甘肃兰州、陕西西安和山西运城的原状黄土的电镜照片进行定量分析。首先应用 Autocad 描绘获得颗粒和孔隙的边界, 拉开各对象后填充, 然后导入到图像分析软件中获得各对象的长轴、短轴、周长、面积和长轴方向角; 其次应用得到的参数计算反映对象大小、形状和定向排列的定量参数; 最后比较不同区域原状黄土中颗粒和孔隙的定量参数差异。结果表明: 甘肃兰州黄土颗粒的平均直径最大, 形状最偏离圆形, 三个区域颗粒排布在空间分布均匀; 甘肃兰州黄土的孔隙平均直径与陕西西安的接近, 形状更偏离圆形; 颗粒的平均直径接近于孔隙的平均直径, 颗粒形状更接近于圆形。

关键词: 原状黄土; 颗粒; 孔隙; 微结构

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 1-0022-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0563

The Particle and Pore Characteristics of Natural Loess in Different Regions

HU Hai-jun¹, ZHOU Kang¹, LUO Ya-sheng¹, HU Quan², ZHAO Wen-peng¹, ZHANG Zhi-yi²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To study the quantitative difference of particle and pore size, shape, and arrangement in the natural loess in the different geographic regions of China, scanning electron microscope analysis of undisturbed loess in Lanzhou, Xi'an, and Yuncheng were obtained. Using autocad, the boundaries of the particles and pores of the material were mapped, then the boundaries were pulled away and color coded. These objects were then imported into image analysis software to obtain the long axis, short axis, perimeter, area, and long axis direction angle of each object. Next, the resulting analysis parameters were obtained to calculate the quantitative parameters that reflect size, shape, and directional arrangement of each object. Finally, the quantitative parameters of the natural loess particle and pore from different areas were compared. The analysis results showed that the mean diameter of particles in Lanzhou is the largest and the particles in this area are the furthest from being circular. The particles of loess in the three regions are uniformly arranged in space. The mean diameter of particle pores in Lanzhou material is close to that found in Xi'an and the shape of particle is closer to a circle. The mean diameter of the particles is near to the mean diameter of pore and the shape of particles is close to a circle.

Key words: natural loess; particle; pore; microstructure

^① 收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目(2014YB049); 国家自然科学基金项目(51409220); 国家自然科学基金项目(51178392)

作者简介: 胡海军(1982-), 男, 研究方向为非饱和原状黄土的宏微观特性及本构理论、颗粒介质力学。E-mail: hu.hai-jun@163.com

0 引言

黄土的宏观力学特性与其微观结构密切相关。刘东生等^[1]出版了以我国黄土结构和物质成分为研究对象的专著,目的是为黄土的工程性质提供参考。王永焱等^[2]出版了中国黄土微结构和物理力学性质的专著,对两者之间的关系进行了研究,为利用黄土结构对黄土工程性质预测评价提供参考。这两部专著都重点关注了黄土中颗粒、孔隙的形状以及主要胶结物质 CaCO_3 形状和分布,但均未给出统计的定量参数。雷祥义^[3]应用压汞试验给出了原状黄土的孔隙定量分布。胡瑞林等^[4]对黏土的微结构采用定量描述方法,为定量描述微结构开辟了新途径。有很多学者^[5]借助电镜扫描仪,获得了大量高分辨率的黄土原状照片,能够识别出颗粒、胶结和孔隙,但通常将试样掰断出一个新鲜断面,镀金后进行电镜扫描得到的颗粒和孔隙不在一个层面上。王梅^[6]应用抽真空对原状黄土注入树脂固化后,研磨抛光获得断面,再应用电镜扫描得到清晰的微结构照片,克服了手掰断面颗粒不位于同一层面,不宜用于定量分析的缺点。本文针对王梅^[6]所得电镜照片,人工描绘出颗粒和孔隙边界后进行定量分析,与通常采用图像处理软件分析方法相比,可克服图形处理软件通常对相临近的颗粒辨识为一个颗粒的缺陷。

1 微结构信息提取方法

利用文献^[6]得到的甘肃兰州、陕西西安和山西运城黄土的电镜照片,采用 CAD 中描绘颗粒和孔隙边界,分离各对象以满足靠近的对象不被判断是一个对象,然后分别填充颗粒和孔隙边界,再导入到图像处理软件 Image-pro-plus (IPP) 中获得颗粒和孔隙大小、形状的定量参数,如长轴长度、短轴长度、面积和长轴方向角。根据这些参数在 Excel 中计算平均直径、形状系数、丰度、外接圆圆形度和定向概率熵。

平均直径:

$$D_i = \frac{L_{li} + L_{si}}{2} \quad (1)$$

式中: L_{li} 为颗粒长轴长度; L_{si} 为颗粒短轴长度。

形状系数:

$$K_i = \frac{2L_{si}}{L_{li} + L_{si}} \quad (2)$$

丰度:

$$C_i = \frac{L_{si}}{L_{li}} \quad (3)$$

外接圆圆形度:

$$R_{ci} = \frac{A_i}{A'_i} \quad (4)$$

式中: A_i 为颗粒或孔隙的实际面积; A'_i 为颗粒或孔隙的外接圆面积。

根据式(5)计算定向概率熵^[7]。其中定向概率熵接近于 1,表示颗粒长轴方向排列无序,排列近似各向同性。

$$H_m = - \sum_{i=1}^l F_i(\alpha) \lg F_i(\alpha) \quad (5)$$

式中: $F_i(\alpha) = \frac{m_i}{M} \times 100\%$, M 为颗粒总个数, m_i 为颗粒长轴方向在第 i 个区位的个数,共 l 个区位, $l = \frac{180^\circ}{\alpha}$,一般取 $\alpha = 10^\circ$, $l = 18$ 。

以上参数表达了颗粒或孔隙的大小、形状和排列情况。其中平均直径表示颗粒或孔隙的大小;形状系数、丰度和外接圆圆形度表示颗粒的近圆特性,参数越接近 1 表明离圆形越近;定向概率熵表示颗粒长轴方向排列的有序性,越接近于 1 表示颗粒长轴方向在空间分布越均匀。

2 不同区域黄土微结构信息结果及分析

2.1 颗粒微结构信息

取土深度 2 m 的甘肃兰州原状黄土水平面、竖直面电镜照片和人工 Autocad 描绘的颗粒图(图 1),取土深度 7 m 的陕西西安原状黄土相应电镜照片和描绘的颗粒图(图 2),取土深度 8 m 的山西运城原状黄土电镜照片和描绘的颗粒图(图 3)。将颗粒距离拉开后导入到 IPP 软件获得了各颗粒的参数,然后求得平均值,得到的定量参数见表 1。颗粒尺寸方面,颗粒平均粒径甘肃兰州最大,山西运城次之,陕西西安最小,从电镜照片上也可以看出西安黄土存在较多的团粒结构,黏粒的存在使得其平均直径减少。颗粒形状方面,运城黄土最接近圆形,西安黄土次之,兰州黄土最偏离圆形,证明兰州黄土颗粒未经过太多磨圆运动,棱角较为明显。颗粒定向排列方面,定向概率熵三者相差不大,均接近于 1,说明颗粒在空间排列均匀。

2.2 孔隙微结构信息

通过 Autocad 描绘孔隙边界,拉开各孔隙距离后导入到 IPP 软件获得各孔隙的参数,然后求得平均值,平均定量参数见表 2。孔隙尺寸方面,甘肃兰

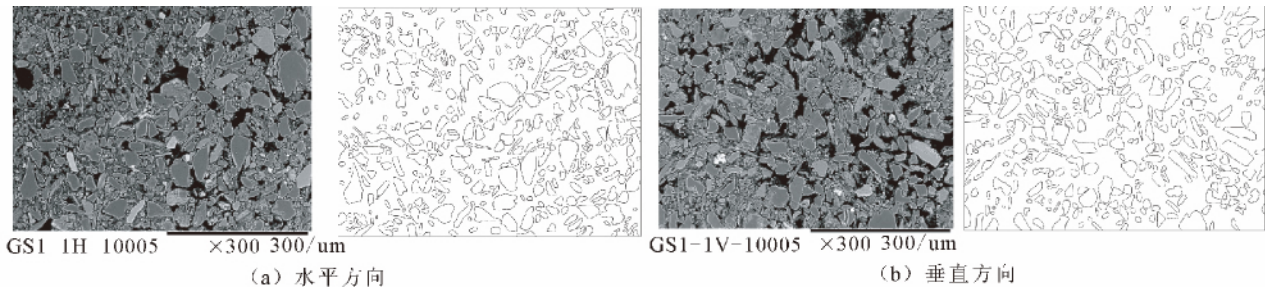


图1 甘肃兰州原状黄土镜扫描图和人工描绘的颗粒图

Fig. 1 SEM images of natural loess in Lanzhou, Gansu and particle images outlined manually

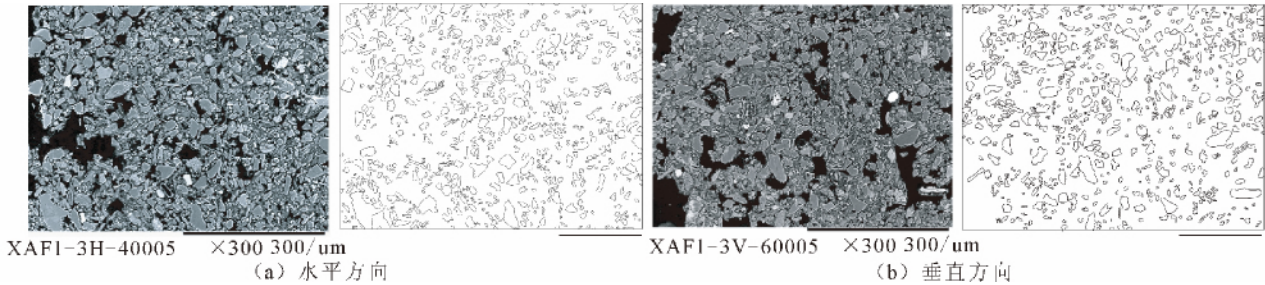


图2 陕西西安原状黄土电镜扫描图和人工描绘的颗粒图

Fig. 2 SEM images of natural loess in Xi'an, Shaanxi and particle images outlined manually

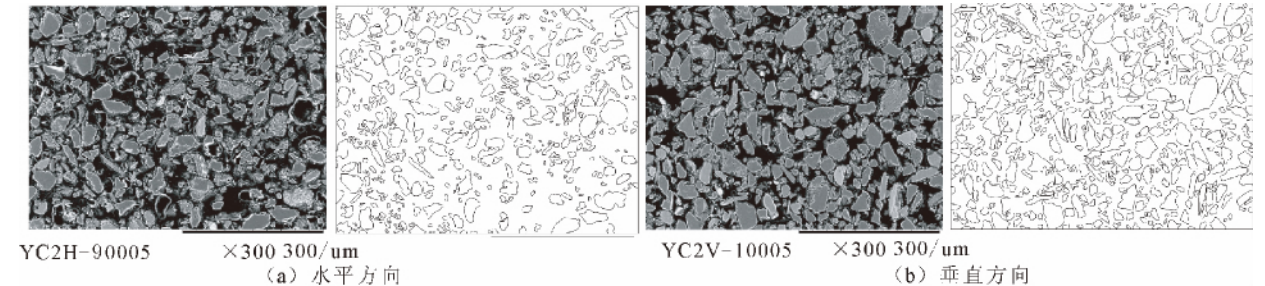


图3 山西运城原状黄土电镜扫描图和人工描绘的颗粒图

Fig. 3 SEM images of natural loess in Yuncheng, Shanxi and particle images outlined manually

表1 各地区土颗粒参数对比表

Table 1 Comparison between particle parameters of natural loess in different areas

区域	对应图	平均直径/um	形状系数	丰度	外接圆圆形度	定向概率熵
甘肃兰州	图1(a)	19.92	0.732 5	0.599 1	0.655 5	0.985 3
	图1(b)	24.58	0.728 3	0.593 6	0.665 0	0.987 8
	平均值	22.25	0.730 4	0.596 4	0.660 2	0.986 6
陕西西安	图2(a)	10.62	0.741 4	0.609 1	0.660 3	0.984 8
	图2(b)	11.46	0.730 8	0.591 9	0.657 1	0.983 7
	平均值	11.04	0.736 1	0.600 5	0.658 7	0.984 3
山西运城	图3(a)	17.37	0.756 5	0.626 4	0.672 1	0.976 7
	图3(b)	20.83	0.753 2	0.621 3	0.668 8	0.992 2
	平均值	19.10	0.754 9	0.623 9	0.670 5	0.984 5

州土的孔隙平均直径与陕西西安的较为接近;孔隙形状方面,甘肃兰州比陕西西安更偏离圆形,即更倾向于狭长形。

2.3 颗粒与孔隙结构的差异

对比表1和表2可得,颗粒的平均直径要接近

于孔隙的平均直径,颗粒和孔隙与圆相似性上具有相近的值,孔隙形状更偏离圆形。

3 结论

本文针对甘肃兰州、陕西西安和山西运城原状黄土的电镜照片,得到不同原状黄土颗粒和孔隙的

定量微结构参数,结果表明:

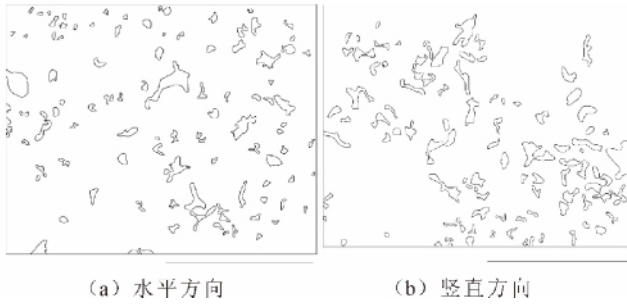


图 4 甘肃兰州原状黄土人工描绘的孔隙图

Fig. 4 Picture of pores of natural loess in Lanzhou, Gansu outlined manually

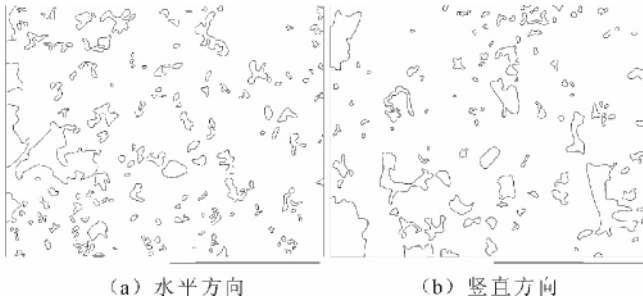


图 5 陕西西安原状黄土人工描绘的孔隙图

Fig. 5 Picture of pores of natural loess in Xi'an, Shaanxi outlined manually

表 2 各地区土孔隙参数对比表

Table 2 Comparison between pore parameters of natural loess in different areas

区域	对应图	平均直径/ μm	形状系数	丰度	外接圆圆形度
甘肃兰州	图 4(a)	17.23	0.718 3	0.579 1	0.597 4
	图 4(b)	22.64	0.666 8	0.521 0	0.536 7
	平均值	19.94	0.692 6	0.550 1	0.567 1
陕西西安	图 5(a)	16.81	0.745 5	0.610 6	0.657 1
	图 5(b)	20.34	0.727 5	0.588 0	0.618 1
	平均值	18.58	0.736 5	0.599 3	0.637 6

(1) 甘肃兰州颗粒平均直径最大,山西运城次之,陕西西安最小;运城黄土颗粒形状最接近圆形,西安黄土次之,兰州黄土颗粒形状最偏离圆形,其颗粒棱角较为明显;颗粒定向排列方面,三个区域的黄土颗粒在空间排布上接近均匀分布。

(2) 甘肃兰州的平均孔隙直径与陕西西安的接近,形状较偏离圆形,即更狭长。

(3) 甘肃兰州、陕西西安的颗粒与孔隙在尺寸和形状对比表明,颗粒的平均直径与孔隙的平均直径接近,颗粒更接近于圆形。

由于 Autocad 描绘工作量大,目前作者正在开发图像处理软件以处理大批量的电镜照片,本文中的工作也为以后图像处理软件提取信息的准确性提供了参考。

参考文献(References)

[1] 刘东生. 黄土的物质成分和结构[M]. 北京: 科学出版社, 1966.
 [2] 王永焱,林在贵. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
 [3] 雷祥义. 西安附近黄土孔隙特征[J]. 水文地质工程地质, 1984 (4):34-37.
 [4] 胡瑞林,李向全,官国琳,等. 粘性土微结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
 [5] 方祥位,申春妮,汪龙,等. 黄土浸水前后微观结构变化研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1319-1324.
 [6] 王梅. 中国湿陷性黄土的结构性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
 [7] 房后国,于立新,刘婷慧. 结构性淤泥土固结机理及模型研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008.