

## 孔隙环境特征对高岭土超声波波速影响机理研究

金李皓琳, 张 敏, 苑成旺, 王 占

### Influence mechanism of pore environment characteristics on ultrasonic wave velocity of kaolin

JIN Lihao, ZHANG Min, YUAN Chengwang, and WANG Zhan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209011>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于应力修正的土体抗剪强度影响因素分析

An analysis of the factors affecting shear strength parameters of soils based on stress correction

龚琰, 朱建群, 陈浩锋 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 95-95

#### 典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

王新刚, 刘凯, 王友林, 张培栋, 石卫, 罗力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 137-143

#### 颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil

丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108-108

#### 无黏性土的压缩特性及模型

Compression characteristics and models of cohesionless soil

马露 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 72-77

#### 渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41-47

#### 基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126-136



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209011

金李皓琳, 张敏, 苑成旺, 等. 孔隙环境特征对高岭土超声波波速影响机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 89-95.  
JIN Lihaolin, ZHANG Min, YUAN Chengwang, *et al.* Influence mechanism of pore environment characteristics on ultrasonic wave velocity of kaolin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 89-95.

## 孔隙环境特征对高岭土超声波波速影响机理研究

金李皓琳, 张敏, 苑成旺, 王占  
(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130015)

**摘要:** 高岭土是工程中常见的黏性土体, 其微观结构对孔隙环境的变化十分敏感。目前针对高岭土孔隙环境特征与声波波速关系的研究还有待深入。基于超声波测试理论, 采用 RSM-SY6 超声波检测仪, 研究了不同孔隙环境条件下, 高岭土超声波波速的变化规律, 并从黏土颗粒的排列方式及其与孔隙溶液的相互作用等微观角度, 分析了孔隙环境特征对高岭土超声波波速的影响机理, 为超声波检测技术在土体中的应用提供了一定的理论依据。结果表明: (1) 孔隙比越大, 高岭土超声波波速越低; (2) 随着含水率的增加, 高岭土超声波波速先小幅度降低, 后大幅度升高; (3) 孔隙溶液酸碱度对高岭土超声波波速的影响与边缘等电 pH 值有关, 当孔隙溶液 pH 值等于边缘等电 pH 值时, 超声波波速最大; (4) 盐分的加入使高岭土超声波波速降低, 当盐溶液浓度在  $0 \sim 0.5 \text{ mol/L}$  时, 波速下降最快。相同阴离子条件下, 高价阳离子对超声波波速的降低作用更明显。研究结果可为黏性土体声学特性研究提供参考, 同时也为超声波检测技术在土体中的应用提供了一定的理论依据。

**关键词:** 高岭土; 超声波波速; 孔隙比; 含水率; 边缘等电 pH 值; 盐溶液

中图分类号: TU442

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0089-07

## Influence mechanism of pore environment characteristics on ultrasonic wave velocity of kaolin

JIN Lihaolin, ZHANG Min, YUAN Chengwang, WANG Zhan  
(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130015, China)

**Abstract:** Kaolin is a common clay in engineering. The microstructure of kaolin is very sensitive to the change of pore environment. At present, the research on the relationship between pore environment characteristics and acoustic wave velocity of kaolin remains to be further studied. In this paper, based on the ultrasonic test theory, RSM-SY6 ultrasonic detector is used to study the change rule of ultrasonic wave velocity of kaolin under different pore environment conditions. In addition, the influence mechanism of pore environment characteristics on ultrasonic wave velocity of kaolin is analyzed from the microscopic perspective of the arrangement mode of clay particles and the interaction between clay particles and pore solution. The results show that (1) the ultrasonic wave velocity of kaolin decreases with the increasing void ratio. (2) With the increasing water content, the ultrasonic wave velocity of kaolin decreases slightly at first and then increases greatly. (3) The effect of pore solution pH value on ultrasonic wave velocity of kaolin is related to the edge isoelectric pH value. When the pore solution pH value is equal to the edge isoelectric pH value, the ultrasonic wave velocity is the maximum. (4) The addition of

收稿日期: 2022-09-06; 修订日期: 2022-12-29

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20220101166JC)

第一作者: 金李皓琳(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事岩土体力学性质研究。E-mail: [jlhl21@mails.jlu.edu.cn](mailto:jlhl21@mails.jlu.edu.cn)

通讯作者: 张敏(1986-), 女, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害防控及岩土体力学分析研究。E-mail: [minzhang@jlu.edu.cn](mailto:minzhang@jlu.edu.cn)

salt reduces the ultrasonic wave velocity of kaolin. When the concentration of saline solution ranges from 0 to 0.5 mol/L, the wave velocity decreases rapidly. Under the same anion condition, the high valence cation has a more obvious effect on the reduction of ultrasonic wave velocity. This paper provides a reference for the study of the acoustic characteristics of viscous soil, and also provides a theoretical basis for the application of ultrasonic detection technology in soil.

**Keywords:** kaolin; ultrasonic wave velocity; void ratio; water content; edge isoelectric pH; saline solution

黏土是岩土工程环境中的重要组成部分,广泛分布于地壳表层,工程性质较差,具有复杂的非线性微观结构。超声波检测技术具有方便、无损的特点,能够在更加接近自然状态的情况下了解土体的微观特征,反映土体的物理力学性质<sup>[1]</sup>,已经被广泛应用于岩土工程探测领域以及各种室内试验研究当中。例如,Stephenson<sup>[2]</sup>研究了无侧限黏土含水率和孔隙比对声波波速的影响;Alba 等<sup>[3]</sup>对 6 个不同区域的砂土进行了研究,建立了砂土声波波速与抗液化特性之间的特征关系;王大雁等<sup>[4]</sup>研究了冻结黏土在不同温度和密度条件下超声波波速的变化规律,并给出了土质类型与纵横波速比的对应关系;韦秉旭等<sup>[5]</sup>、刘鹏等<sup>[6]</sup>研究了干湿循环作用下膨胀土声波波速与其微观结构变化之间的相关关系;李君等<sup>[7]</sup>研究了土壤体含水率、温度以及超声波波速三者之间的关系,建立了利用超声波技术预测土壤含水率的温度效应模型;张智等<sup>[8]</sup>研究了密实度和含水率对膨胀土声波波速的影响。

目前国内外学者针对高岭土声学特性的研究较少。罗津辉等<sup>[9]</sup>对高岭土容重、含水率与声波波速的相关关系进行了研究,主要探讨了高岭土物理力学性质与声波波速之间的关系,但没有考虑土体孔隙环境特征对声波波速的影响。高岭土等黏性土的形成与其沉积环境息息相关,土体中的强亲水性矿物对孔隙水环境的变化十分敏感。当孔隙溶液环境改变时,黏粒-水-电解质系统间的相互作用力也将发生变化,进而导致土体微观结构改变<sup>[10-11]</sup>。Kaya 等<sup>[12]</sup>和 Wang 等<sup>[13]</sup>研究了高岭土在不同盐浓度、不同 pH 值溶液条件下的沉降特性,发现高岭土的微观结构随着盐溶液离子浓度和溶液 pH 值的变化发生改变;于海浩等<sup>[14]</sup>、Liu 等<sup>[15]</sup>研究了软黏土在不同孔隙溶液浓度条件下的微观结构变化,发现孔隙盐溶液使土体形成凝聚结构团粒。黏土团粒结构构型的改变会影响土体的物理力学性质,使土体表现出强烈的不均匀性和理化特征各向异性<sup>[16]</sup>,从而引起超声波波速的变化。因此,研究孔隙环境特征对高岭土超声波波速的影响机理,对

利用超声波技术了解黏土体性质具有极其重要的现实意义。

本文基于超声波测试理论,利用 RSM-SY6 超声波检测仪,研究不同孔隙环境条件下高岭土超声波波速的变化规律,并从微观结构角度,分析孔隙环境特征对高岭土超声波波速的影响机理,为研究黏性土体声学特性提供参考和借鉴,同时也为在实际工程中应用超声波检测技术获得土体工程性质参数提供了一定的理论依据。

## 1 高岭土声波波速试验

### 1.1 试验材料

试验采用重塑高岭土环刀试样。试验基础土样天然含水率 17.2%,塑限 24.8%,液限 54.3%,比重 2.73。试验土样的主要成分为黏土矿物高岭石,质量分数为 60%,非黏土矿物有石英、白云母和赤铁矿,质量分数分别为 29%、7% 和 4%<sup>[17]</sup>。

### 1.2 试验方法

本文研究的高岭土孔隙环境特征包括孔隙比、含水率、孔隙溶液 pH 值、孔隙盐溶液浓度以及盐溶液种类。参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[18]</sup>,在不同压力荷载条件下进行土体固结,改变基础土样孔隙比。为研究孔隙中水溶液对超声波波速的影响,通过自然风干和自然泡水改变高岭土含水率<sup>[19]</sup>。试验土体中含有非黏土矿物石英、白云母和赤铁矿,石英的物理性质和化学性质稳定,不溶于酸(除 HF 外),微溶于 KOH,白云母具有较强的抗酸抗碱能力,赤铁矿虽然会与 HCl 发生反应,但其在试验土体中的含量极少,不会对试验结果造成影响<sup>[20]</sup>,因此试验中孔隙溶液 pH 值采用 NaOH 和 HCl 进行调节。研究所用的盐溶液由分析纯级的 NaCl、MgCl<sub>2</sub> 与去离子水配制而成。每组试验设置 3 个土体样本进行重复试验。

试验开始前对超声波检测仪进行调试,并在设置界面输入测试环刀试样的高度。换能器频率为

50 kHz。为减少超声波在土样界面处产生的能量反射损失, 试验时在换能器表面涂抹耦合剂, 并将换能器紧贴于环刀土样表面, 如图 1 所示。读取数值前对起跳点进行校正, 记录起跳点声时。超声波波速为土样高度除以声时, 每个土样测定 3 次, 取平均值作为最终结果。

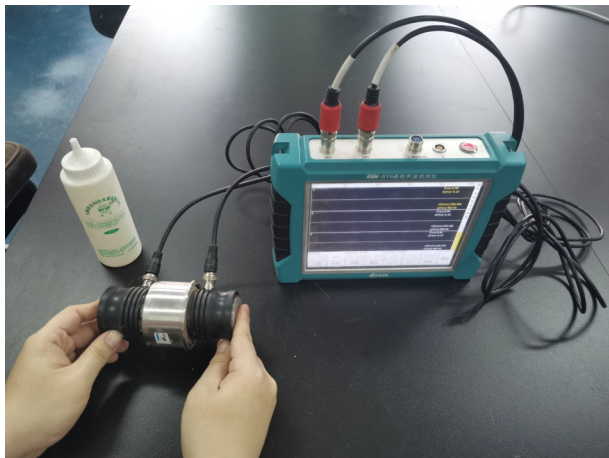


图 1 高岭土超声波波速测试  
Fig. 1 Ultrasonic wave velocity measurement of kaolin

2 试验结果

不同孔隙比高岭土的超声波波速如表 1 所示。随着高岭土孔隙比的增大, 超声波波速逐渐减小, 两者之间呈现负相关关系, 这一变化趋势与大多数学者的研究结果一致<sup>[19,21]</sup>。

表 3 高岭土孔隙溶液 pH 值与超声波波速  
Table 3 Pore solution pH value and ultrasonic wave velocity of kaolin

| 参数取值                     | pH值   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| 波速/(km·s <sup>-1</sup> ) | 1.010 | 1.017 | 1.028 | 1.036 | 1.040 | 1.035 | 1.032 | 1.028 | 1.027 | 1.017 | 0.980 | 0.970 |

高岭土超声波波速与不同种类孔隙盐溶液浓度的关系曲线如图 2 所示。由图 2 可得, 盐分的加入使得高岭土超声波波速降低。孔隙盐溶液浓度越高, 高岭土超声波波速越低, 整体上呈现单调递减的趋势。其中, 在盐溶液浓度为 0~0.5 mol/L 阶段时, 超声波波速急剧下降: 在 NaCl 孔隙溶液环境中, 高岭土超声波波速下降了 12.7%, 在 MgCl<sub>2</sub> 孔隙溶液环境中, 超声波波速下降了 15.3%。当盐溶液浓度高于 0.5 mol/L 时, 高岭土超声波波速下降的速度变缓。

比较图 2 中的 2 条曲线, 发现在相同的盐溶液浓度下, 孔隙溶液中添加 MgCl<sub>2</sub> 时的超声波波速明显低

表 1 高岭土孔隙比与超声波波速  
Table 1 Void ratio and ultrasonic wave velocity of kaolin

| 参数取值                     | 孔隙比   |       |       |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          | 0.89  | 0.93  | 0.97  | 1.08  | 1.20  | 1.32  |
| 波速/(km·s <sup>-1</sup> ) | 1.110 | 1.080 | 1.030 | 0.975 | 0.901 | 0.864 |

不同含水率高岭土的超声波波速如表 2 所示。当高岭土土样含水率小于 14.5% 时, 其声波波速随着含水率的增加逐渐减小; 当土样含水率大于 14.5% 时, 声波波速随着含水率的增加而增大。总体上来看, 随着含水率的增加, 高岭土超声波波速呈现先小幅度降低, 后大幅度升高的变化规律, 这与张丹等<sup>[19]</sup>对贵阳市红黏土的含水率与声波波速关系研究中得到的规律类似。

表 2 高岭土含水率与超声波波速  
Table 2 Water content and ultrasonic wave velocity of kaolin

| 参数取值                     | 含水率/% |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          | 3.41  | 8.93  | 14.50 | 21.20 | 23.40 | 27.63 | 33.72 |
| 波速/(km·s <sup>-1</sup> ) | 1.210 | 1.030 | 0.897 | 1.003 | 1.178 | 1.531 | 1.977 |

不同孔隙溶液 pH 值条件下的高岭土超声波波速如表 3 所示。高岭土超声波波速在孔隙溶液 pH 值为 5 时最大。当孔隙溶液的 pH 值为 1~5 时, 高岭土超声波波速随着 pH 值的增加逐渐增大; 当孔隙溶液的 pH 值超过 5 时, 高岭土超声波波速开始缓慢下降; 当 pH 值为 10~11 时, 超声波波速迅速降低; 当 pH 值大于 11 时, 高岭土超声波波速变化趋于平缓。

于添加 NaCl 时的超声波波速, MgCl<sub>2</sub> 孔隙溶液环境中的超声波波速与 NaCl 孔隙溶液环境中的超声波波速相比, 低 4% 左右。

3 分析与讨论

3.1 孔隙体积对超声波波速的影响机理

土体孔隙中充满空气和水, 而超声波在空气和水中的传播速率要远小于固体土颗粒, 土样孔隙比越大, 超声波在土体中传播时经过的孔隙体积就越大, 超声波波速越低。此外, 土体内部孔隙越多, 超声波传播经过土颗粒-空气界面、土颗粒-水界面以及空气-

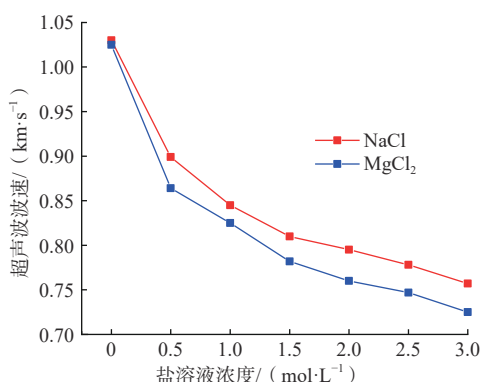


图 2 高岭土超声波波速与孔隙盐溶液浓度的关系曲线

Fig. 2 Relation curves between ultrasonic wave velocity of kaolin and concentration of pore saline solutions

水界面时损失的能量就越多,导致超声波波速降低。当高岭土孔隙比减小时,黏土颗粒之间接触紧密,超声波在土体中主要沿着固体土颗粒骨架传播,传播速度较快,同时超声波能量损失减少,超声波波速上升。

### 3.2 孔隙水溶液对超声波波速的影响机理

当土体含水率增大时,孔隙中自由水含量增多,水的体积增加,与气体相比,超声波在液体中的传播速度更大,因此,当高岭土土样含水率大于 14.5% 时,声波波速随着含水率的增加而增大。当土体中含水率减少,孔隙中空气体积增加,理论上声波波速应该减小,但由试验结果来看,当高岭土含水率小于 14.5% 时,随着含水率的减少,声波波速却逐渐增大,分析原因是由于含水率降低,土体中自由水流失,结合水的比例上升并且发挥主要的粘结作用,使得土颗粒密集<sup>[21-23]</sup>。此外,由于结合水中水分子排列紧密,使得结合水的密度比一般自由液态水的密度大,甚至接近于土体的干密度,强结合水的密度可达 2.4 g/cm<sup>3</sup>,弱结合水中水分子排列不如强结合水紧密,但其密度仍可达 1.3 ~ 1.7 g/cm<sup>3</sup><sup>[24-25]</sup>,与自由水相比,结合水的致密程度更大,超声波在结合水中的波速大于自由水,所以高岭土超声波波速增加。

### 3.3 孔隙溶液酸碱度对超声波波速的影响机理

分析表 3 可得,孔隙溶液 pH 值的大小会对高岭土超声波波速产生影响。这是因为孔隙溶液的酸碱度会改变黏土颗粒的排列形式和接触方式<sup>[26]</sup>,随着孔隙溶液酸碱度的改变,高岭土孔隙体积会发生相应的变化,具体分析如下:

在范德华引力、库仑力以及双电层排斥力的相互作用下,高岭土黏土颗粒之间会产生边与边、边与面、面与面 3 种类型的接触方式,如图 3 所示。

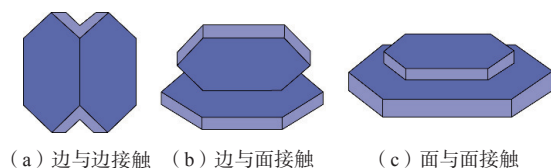


图 3 高岭土黏土颗粒间的 3 种接触方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three contact modes between kaolin clay particles

高岭石晶体的晶型为一边伸长的六边形,晶格中对 Al<sup>3+</sup>等离子子的同晶替代作用使得高岭石晶体平面与边缘的电荷呈负电性。孔隙溶液 pH 值的大小会对分布在晶体边缘电荷的性质产生影响,进而改变高岭土的微观颗粒结构,对超声波波速产生影响。Wang 等<sup>[13]</sup>、Braggs 等<sup>[27]</sup>的研究表明,当孔隙溶液 pH 值小于边缘等电 pH 值时,高岭石晶体边缘正电荷的密度较大,晶体间的连接以边与边和边与面 2 种接触方式为主,黏土颗粒之间的孔隙体积较大,此时高岭土呈孔隙比较大的絮凝结构;当 pH 值大于边缘等电 pH 值时,晶体间的接触方式以面与面的形式为主,此时黏土颗粒形成分散结构。本文的试验结果显示,当高岭土孔隙溶液的 pH 值小于 5,随着 pH 值的增大,高岭土超声波波速升高;当 pH 值超过 5,超声波波速开始下降;波速在 pH 值等于 5 时两侧变化趋势相反,因此认为试验高岭土的边缘等电 pH 值为 5,这与 Wang 等<sup>[13]</sup>的研究结果一致。

絮凝结构具有较大的孔隙体积,超声波在孔隙中的传播速度小于固体土颗粒,因此超声波波速较小。当 pH 值不断减小,晶体边缘正电荷的数量不断增多,使得絮凝结构由边与边的接触形式逐步转变为边与面的接触形式<sup>[28]</sup>,孔隙比在这个转变过程中逐渐增大,故高岭土孔隙溶液 pH 值从 5 减至 1 时,超声波在土体中传播时经过的孔隙体积进一步增加,超声波波速下降。当孔隙溶液 pH 值高于 5 时,土体为分散结构,此时孔隙比较小,超声波传播时经过的孔隙体积减少,波速应该有所上升,但由试验结果来看,随着孔隙溶液 pH 值的升高,高岭土超声波波速逐渐下降。分析原因是因为随着孔隙溶液 pH 值的升高,高岭土中黏土矿物晶体边缘的负电荷密度逐渐增大,黏土颗粒表面电场强度加强,黏粒扩散层在电场的作用下加厚,土颗粒之间的粘结力下降,排斥力增加,颗粒排列比较松散。由于高岭土黏土矿物颗粒很细,具有较大的比表面积,使得双电层厚度的增大程度比较明显。因此,虽然高岭土在孔隙溶液 pH 值超过 5 时应该形成孔隙比较小的分散结构,但黏土颗粒双电层厚度增

加的变化更加明显, 所以孔隙溶液 pH 值大于 5 时, 波速降低。

### 3.4 孔隙盐溶液对超声波波速的影响机理

孔隙中的盐溶液对高岭土微观结构的变化主要有以下两方面的影响: 一方面盐溶液使黏土颗粒扩散层被压缩, 使得土体中的孔隙体积有一定程度的减小, 从而导致高岭土超声波波速具有增加的趋势; 另一方面, 盐溶液会使黏土颗粒之间的库伦力增强, 颗粒表面双电层的排斥力减小, 土体由分散结构逐步转变为孔隙比较大的絮凝结构<sup>[17]</sup>, 超声波在高岭土中传播时所经过的孔隙体积增加, 因此超声波波速有下降的趋势。上述两方面对超声波波速的贡献相反。Kang 等<sup>[29]</sup>、Ma 等<sup>[30]</sup>、Chen 等<sup>[31]</sup>的研究表明, 当孔隙盐溶液浓度增加, 高岭土孔隙比增大, 因此可以推测孔隙中的盐溶液使高岭土超声波波速降低的原因是: 黏土颗粒表面的扩散层厚度不大, 故盐溶液对扩散层的压缩量较小, 孔隙减少量较低, 超声波波速增加的趋势较小, 而盐溶液使高岭土黏粒组构发生显著变化, 形成孔隙比较大的絮凝结构, 超声波波速降低趋势明显。此外, 随着高岭土孔隙中盐分浓度的增加, 黏粒组构将进一步发生变化, 絮凝结构由边与边向边与面的接触形式过渡<sup>[29]</sup>, 在这个过程中, 土体的孔隙体积进一步增大, 从而导致高岭土超声波波速下降。

在相同阴离子条件下, 不同种类的阳离子对高岭土超声波波速的影响程度也是不同的。这是因为高化合价阳离子的电荷量大, 电性强, 离子交换能力也更强, 形成的絮凝结构具有更大的孔隙比<sup>[17]</sup>, 因此超声波波速降低的幅度增大。

## 4 结论

(1) 孔隙比是影响高岭土超声波波速的重要因素, 高岭土孔隙比与超声波波速呈负相关关系, 即超声波波速随着孔隙比的增加而减小。

(2) 随着高岭土含水率的增加, 超声波波速整体呈现先小幅度降低, 后大幅度升高的变化规律, 两者的关系曲线呈“V”形。

(3) 孔隙溶液酸碱度对高岭土超声波波速的影响与边缘等电 pH 值有关。当孔隙溶液 pH 值小于边缘等电 pH 值时, 黏土颗粒间库仑力起主导作用, 促使高岭土形成以边与边接触为主的絮凝结构, 随着 pH 的降低, 高岭土絮凝结构由边与边的接触形式逐步过渡为边与面的接触形式, 孔隙比在这个过程中进一步增大, 超声波波速降低; 当孔隙溶液 pH 值大于边缘等

电 pH 值时, 高岭土呈分散结构, 但由于高岭土比表面积较大, 颗粒表面双电层厚度增大比较明显, 颗粒排列松散, 孔隙比增加, 超声波波速降低。

(4) 孔隙盐溶液使高岭土黏粒组构改变, 形成孔隙比较大的絮凝结构, 导致超声波波速降低。随着盐溶液浓度升高, 絮凝程度增强, 孔隙体积增大, 超声波波速下降。相同阴离子条件下, 高价阳离子使土体超声波波速降低的程度更大。

## 参考文献 (References):

- [1] 刘建刚, 刘明玮, 牛传业. 声呐之所以不能用来进行渗流测试之我见 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 214 – 216. [LIU Jiangang, LIU Mingwei, NIU Chuanye. My opinion on why sonar can't be used for seepage test [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 214 – 216. (in Chinese with English abstract)]
- [2] STEPHENSON R W. Ultrasonic testing for determining dynamic soil moduli [M]//American Society for Testing and Materials. Dynamic Geotechnical Testing. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1978: 179 – 195.
- [3] ALBA P D, BALDWIN K, CELIKKOL B, et al. Elastic-wave velocities and liquefaction potential [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1984, 7(2): 77 – 88.
- [4] 王大雁, 朱元林, 马巍, 等. 冻土超声波波速与冻土物理力学性质试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1837 – 1840. [WANG Dayan, ZHU Yuanlin, MA Wei, et al. Testing study on relationship between ultrasonic wave velocities and physico-mechanical property of frozen soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1837 – 1840. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 韦秉旭, 龚树, 刘斌, 等. 膨胀土细观结构变化及与声波波速的关系 [J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 93 – 97. [WEI Bingxu, GONG Shu, LIU Bin, et al. Changes of expansive soil's meso-structure and its relation with acoustic velocity [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(9): 93 – 97. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘鹏, 韦秉旭, 欧阳运清, 等. 膨胀土纵波波速与裂隙率关系试验 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2016, 13(3): 12 – 18. [LIU Peng, WEI Bingxu, OUYANG Yunqing, et al. The longitudinal wave velocity of expansive soil and experimental study of the relationship between fracture rate [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural

- Science), 2016, 13(3): 12 – 18. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 李君, 徐岩, 姜锐, 等. 超声波土壤含水量检测装置的模型建立与验证 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 127 – 133. [ LI Jun, XU Yan, JIANG Rui, et al. Establishment and verification of model for ultrasonic soil water content detector[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(13): 127 – 133. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 张智, 周黎明, 徐涛, 等. 膨胀土力学特性参数的声-电响应特征分析 [J]. 人民长江, 2022, 53(10): 183 – 188. [ ZHANG Zhi, ZHOU Liming, XU Tao, et al. Analysis on acoustic-electrical response characteristics of mechanical parameters of expansive soil[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(10): 183 – 188. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 罗津辉, 蔡忠理. 高岭土容重、含水量、结构特性与声波速度及动力学参数相关性的实验研究 [J]. 岩土力学, 1991, 12(2): 75 – 80. [ LUO Jinhui, CAI Zhongli. Experimental study on the correlativity between physical-structural characteristics and wave velocities in kaolinite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1991, 12(2): 75 – 80. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] DING Wuquan, LIU Xinmin, HU Feinan, et al. How the particle interaction forces determine soil water infiltration: Specific ion effects[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 492 – 500.
- [ 11 ] MITCHELL J K. Components of pore water pressure and their engineering significance[C]//INGERSON E. Clays and Clay Minerals-Proceeding of the Ninth National Conference on Clays and Clay Minerals. Amsterdam: Elsevier, 1962: 162 – 184.
- [ 12 ] KAYA A, ÖREN A H, YÜKSELEN Y. Settling of kaolinite in different aqueous environment[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2006, 24(3): 203 – 218.
- [ 13 ] WANG Yuxing, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characterizations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(6): 587 – 600.
- [ 14 ] 于海浩, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 孔隙溶液浓度的变化对黏土强度的影响 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 564 – 569. [ YU Haihao, WEI Changfu, YAN Rongtao, et al. Effects of pore solution concentrations on shear strength of clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(3): 564 – 569. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] LIU Di, EDRAKI M, BERRY L. Investigating the settling behaviour of saline tailing suspensions using kaolinite, bentonite, and illite clay minerals[J]. *Powder Technology*, 2018, 326: 228 – 236.
- [ 16 ] 康馨, 苏晨曦, 陈仁朋, 等. 不同水化环境下高岭土微观结构各向异性研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 161 – 170. [ KANG Xin, SU Chenxi, CHEN Renpeng, et al. Study on microstructure anisotropy of kaolin under different hydration environments[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(1): 161 – 170. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 杨德欢. 孔隙水溶液对高岭土变形特性的影响机理 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2016. [ YANG Dehuan. Influencing mechanism of pore water chemistry on volume change behavior of kaolinite[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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 Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese) ]
- [ 19 ] 张丹, 晏鄂川, 梁凤. 红黏土物理力学性质与声波波速关系的初步研究 [J]. 安全与环境工程, 2019, 26(2): 190 – 194. [ ZHANG Dan, YAN E'chuan, LIANG Feng. Preliminary research on the relationship between physical and mechanical properties of red clay and acoustic wave velocity[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(2): 190 – 194. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 郭守国, 何斌. 非金属矿产开发利用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 219 – 271. [ GUO Shouguo, He Bin. Development and utilization of nonmetallic minerals[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 219 – 271. (in Chinese) ]
- [ 21 ] 王峥辉. 下蜀黄土超声波波速与物理力学性质试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007. [ WANG Zhenghui. Testing study on relationship among P-wave velocity and physico-mechanical in Xiashu loess[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 刘佳婷, 付昱凯, 李同录, 等. 黄土与其矿物颗粒表面水膜类型及其定量表征 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 105 – 113. [ LIU Jiating, FU Yukai, LI Tonglu, et al. Types of water film on the surface of loess and related mineral particles and their quantitative

- characterization[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 105 – 113. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 李强, 李同录, 李华, 等. 毛细水作用下非饱和土压缩过程的微观非连续变形数值分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 135 – 143. [ LI Qiang, LI Tonglu, LI Hua, et al. Numerical analysis of evolution of the unsaturated soil microstructure with capillary action during compression[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 135 – 143. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 孟祥波. 土质与土力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 12 – 13. [ MENG Xiangbo. Soil quality and soil mechanics[M]. Beijing: China Communications Press, 2002: 12 – 13. (in Chinese) ]
- [25] 曾立峰, 邵龙潭, 牛庚, 等. 考虑孔隙水微观赋存形态的非饱和粉土有效应力方程及其验证 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 37 – 46. [ ZENG Lifeng, SHAO Longtan, NIU Geng, et al. An effective stress equation for unsaturated silt considering the microstructure of pore water and its verification[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 37 – 46. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 常锦, 杨和平, 肖杰, 等. 酸性环境对百色膨胀土胀缩性能的影响及其微观解释 [J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(1): 24 – 32. [ CHANG Jin, YANG Heping, XIAO Jie, et al. Effect of acid environment on swelling-shrinkage properties of Baise expansive soil and its microscopic interpretation[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(1): 24 – 32. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] BRAGGS B, FORNASIERO D, RALSTON J, et al. The effect of surface modification by an organosilane on the electrochemical properties of kaolinite[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1994, 42(2): 123 – 136.
- [28] 常锦, 杨和平, 肖杰, 等. 酸雨湿干循环作用下百色膨胀土裂隙发育规律及其微观机制 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 47 – 56. [ CHANG Jin, YANG Heping, XIAO Jie, et al. Fissure development law and micro-mechanism of Baise expansive soil under wet-dry cycles of acid rain[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(1): 47 – 56. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] KANG Xin, XIA Zhao, CHEN Renpeng, et al. Effects of inorganic cations and organic polymers on the physicochemical properties and microfabrics of kaolinite suspensions[J]. *Applied Clay Science*, 2019, 176: 38 – 48.
- [30] MA Kunsong, PIERRE A C. Clay sediment-structure formation in aqueous kaolinite suspensions[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1999, 47(4): 522 – 526.
- [31] CHEN Jie, ANANDARAJAH A. Influence of pore fluid composition on volume of sediments in kaolinite suspensions[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1998, 46(2): 145 – 152.

编辑: 刘真真