凹土棒石的物理力学性质实验及数值模拟研究

朱海燕^{1,2*}, 党益珂¹, 刘清友², 邓星桥²

1. 西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610500;

2. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610059

*联系人, E-mail: zhuhaiyan040129@163.com

收稿日期: 2019-08-13; 接受日期: 2019-09-02; 网络出版日期: 2019-11-08

国家自然科学基金青年科学基金(编号: 51604232)、国家自然科学基金面上项目(编号: 51874253)和四川省重点研发项目(编号: 2018FZ0069)资助

摘要 针对凹土棒石前期处理环节中的破碎机粘刀和刀具损耗严重等问题, 开展一系列的室内实验对凹土棒石的力学性质进行研究. 首先由力学实验得到: 随着含水率的增加, 凹土的单轴抗压强度逐渐降低; 三轴试验测得凹土弹性模量为0.98 GPa, 黏聚力为2.40 MPa. 进而开展离散元数值模拟实验, 标定不同含水率下模型的细观力学参数并与室内实验结果进行对比验证, 深入分析不同含水率下凹土的宏细观力学特性. 结果表明: 随着含水率的增大, 试样内部的有效配位数在减小; 含水率越大的试样加载结束后孔隙率增加的程度越大, 孔隙率的增大将导致宏观力学性质的衰减. 所得结果有利于优化凹土棒石在不同含水率下的工业处理流程.

关键词 凹土, 物理力学性质, 含水率, 离散元, 细观力学

PACS: 45.90.+t, 46.50.+a, 46.09.+s, 62.20.-s, 62.20.Fe

1 引言

凹土, 学名凹凸棒石黏土, 是一种稀少的天然非金属黏土矿物, 凹土具有特殊的纤维结构、不同寻常的胶体和吸附性能, 被称为“千用之土, 万土之王”^[1]. 国内外关于凹土的提纯利用环节研究已经非常丰富, 但是前期处理环节的研究却鲜有见闻. 刚出矿的凹土由于地下水的影响、本身的吸附性能和吸水性等特点, 其含水率往往很高, 可达到50%左右. 目前, 通常采用暴晒的方式对凹土进行烘干, 利用破碎机对其进行

粗破, 这就对凹土的烘干质量提出了一定的要求. 通过延长暴晒的时间来控制烘干质量, 甚至完全烘干, 但完全烘干的凹土强度已经达到了一般软岩的强度, 对破碎机的破碎效率和寿命产生了一定的影响; 破碎机粗破没有达到烘干要求的凹土又会造成粘刀的困扰. 因此, 对于凹土的物理性质、力学性质尤其是含水率对其力学性质影响的研究就极为重要.

近年来, 国内外学者对砂岩、泥质砂岩和松软煤岩等岩体不同含水率下的力学性质研究较多, 但对凹土棒石这种特殊的岩体的研究却鲜有见闻. Hawkins

引用格式: 朱海燕, 党益珂, 刘清友, 等. 凹土棒石的物理力学性质实验及数值模拟研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 124601
Zhu H Y, Dang Y K, Liu Q Y, et al. Experimental and numerical simulation research of the physical and mechanical properties of Attapulgite clay (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 124601, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0290](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0290)

和McConnell^[2]研究了砂岩含水率与岩石强度的关系, 结果表明砂岩含水率越低, 其强度损失越大. Bursh-tein^[3]研究了含水率对含泥质砂岩的影响, 含水率越低, 强度衰减也越迅速. Vászrhelyi和Ván^[4]的研究发现, 砂岩对水的敏感度与岩石的有效孔隙度有着密切的联系. 朱珍德等人^[5]研究了泥板岩不同吸水率下的单轴压缩强度的变化, 发现泥板岩抗压强度的变化与含水率密切相关. 朱传奇等人^[6,7]对不同含水率下的松软煤体的力学特征开展实验研究. 结果表明含水率及孔隙率通过影响液体饱和度, 改变煤体颗粒间的液桥形态和液桥力的大小, 引起煤体强度特征发生变化. 贾海梁等人^[8]研究了泥质粉砂岩在不同饱和度下的力学性质, 随着饱和度的增加, 试样的强度和弹性模量均呈降低趋势, 且超过60%的强度损失发生在低饱和度状态下. 熊德国等人^[9]对3种不同岩石在自然饱水状态下进行了一系列力学实验, 给出了3种岩石饱水后抗拉强度、单轴抗压强度等力学参数.

本文针对甘肃省临泽县的凹土开展了基础物性实验、考虑含水率的单三轴力学实验及考虑含水率变化的离散元数值模拟实验. 物理实验主要包括界限含水率、比重、颗粒分析、密度等实验; 力学实验包括不同围压下的三轴压缩实验以及不同含水率下的力学性质(单轴抗压强度、单轴压缩弹性模量等); 综合上述室内实验结果, 开展了不同含水率下的凹土单轴压缩数值模拟, 旨在从微观参数上对凹土单轴压缩过程进行描述, 以期对凹土的前期处理应用提供指导.

2 凹土基本物理性质研究

凹土土样是由各种不同的土粒按不同的比例组成的集合体, 土样^[10]为固相、气相、液相组成的三相体系. 实验采用的土样来自甘肃省临泽县某矿, 物理实验样品采用粗破后的凹土粉末, 且最大限度地保证了土的原状性. 物理实验严格按照指导书进行^[11]. 对实验样品凹土进行了界限含水率、比重、颗粒分析、密度等实验, 得到其基本物理指标如表1所示, 颗粒分析曲线如图1所示.

由表1可以看出, 实验样品凹土的天然含水率较高, 为44.35%; 可塑状态与半固体状态之间的界限含水率为40.18%, 可塑状态与流动状态之间的界限含水率为66.27%, 塑性指数为37.98%, 比重为2.61, 表观密

表1 凹土的物理指标

Table 1 Physical properties of Attapulgit clay

指标	数值
含水率 (%)	44.35
塑限 (%)	40.18
液限 (%)	66.27
塑性指数 (%)	37.98
比重	2.61
密度 (kg/m ³)	1.18

图1 (网络版彩图) 粒径分配曲线

Figure 1 (Color online) Particle size distribution curve.

度 1.74 g/cm^3 , 密度 1.18 g/cm^3 . 由图1可以看, 其黏粒($F < 0.002 \text{ mm}$)含量为0.85%, 粉粒($0.002 < F < 0.075 \text{ mm}$)含量为6.51%, 砂粒($0.075 < F < 2 \text{ mm}$)含量为92.64%.

在土力学^[10]中, 常以压缩系数 a_{1-2} 和压缩模量 E_s 这两个指标来表示侧限条件下土的压缩性, 并且它们之间可以相互转化, E_s 越大, 土的压缩性较小, 表明土质较好; a_{1-2} 越大, 土的压缩性越大, 表明土质相对较差. 针对实验凹土, 在其天然状态下进行压缩实验, 确定凹土试样压缩系数. 加载等级为12.5, 25, 50, 100, 200和300 kPa共6个荷载水平.

得到不同压实度凹土的 $\lg(1+e)-\lg P$ 曲线如图2所示, 曲线任意一点的斜率 a 表示了对应压力 P 下的土的压缩性, 称 a 为土的压缩系数; 压缩模量 E_s 是竖向附加压力与应变模量的比值. 表2给出了凹土的压缩指标, 结合表3土的压缩性评价表, 凹土属于高压缩性土.

图 2 (网络版彩图)凹土压缩实验曲线
Figure 2 (Color online) Compression experimental curve of Attapulgit clay.

表 2 压缩系数与压缩模量表
Table 2 Compression coefficient and compression modulus

指标	数值
试样名称	凹土
压缩系数 a_{1-2} (MPa ⁻¹)	1.12
压缩模量 (MPa)	1.99
屈服应力 (kPa)	43.91
压缩指数 C_c	0.17

表 3 压缩性评价表
Table 3 Compressibility evaluation table

压缩系数 a_{1-2} (MPa ⁻¹)	压缩性评价
<0.1	低压缩性土
0.1–0.5	中压缩性土
>0.5	高压缩性土

3 凹土的力学性质实验

3.1 试样制备

严格按照规范^[12]中的要求, 将凹土制成直径 25 mm, 高度 50 mm 的标准试样用于单轴压缩实验和三轴压缩实验(见表 4). 饱和试样制备方法参照贾海梁等人^[8]的方法. 由于采用真空抽气饱和的方法对试样进行饱和, 吸水中的质量难以控制, 因此采用先饱和, 后控制脱水的方法来获得不同饱和度的试样. 并按照下式计算不同脱水时间下的饱和度:

表 4 试样统计
Table 4 Statistics of Attapulgit clay samples

实验类型	试样编号	试样尺寸 (mm)	含水率 (%)
单轴实验	2-1	50.01×25.04	10
	2-2	49.98×25.01	20
	2-3	50.08×24.98	30
	2-4	50.08×25.01	40
三轴实验	1-1	50.01×25.01	10
	1-2	50.01×24.96	10
	1-3	50.03×25.02	10
	1-4	49.97×24.99	10

$$w_t = \frac{m_t - m_d}{m_d}, \quad (1)$$

式中, w_t 为试样在 t 时刻含水率, m_t 为试样在 t 时刻的质量(g), m_d 为试样的干燥质量. 脱水在实验室环境下进行, 温度为 20°C, 湿度为 80% 左右.

3.2 三轴压缩实验

实验采用长春朝阳实验仪器设备公司生产的 TAW-2000 型多场耦合实验系统, 系统承载最大轴压 2000 kN, 最大围压 100 MPa(图 3). 实验采取的围压等级为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa, 温度设定在 20°C, 试样的含水率为 10%. 采用位移控制加载的方式, 位移控制加载的速度为 0.02 mm/min, 先加载至目标围压, 再对试样进行轴向加载.

由图 4 凹土的应力-应变曲线可以看出, 峰前阶段主要有两个阶段: 孔隙压密阶段和弹性变形阶段. 峰

图 3 (网络版彩图)TAW-2000 型多场耦合实验系统
Figure 3 (Color online) The multi-field coupling experimental system of TAW-2000.

图 4 (网络版彩图)凹土三轴实验测试曲线
Figure 4 (Color online) Triaxial test curves of Attapulgitic clay.

前阶段的曲线较为平滑, 不同围压下的曲线具有较好的规律性. 峰值阶段整体呈现出平台期长的特点; 峰后较为平缓, 峰值破坏后多成塑性变形. 实验曲线同时表明, 凹土具有明显的应变硬化与软化行为. 由图5可以看出, 凹土试样的破坏主要以剪切破坏和压裂片

图 5 (网络版彩图)凹土试样破坏图
Figure 5 (Color online) Deformation diagrams of Attapulgitic clay samples.

状剥落为主, 而剪切外的其余部分相对完整, 无多余裂隙. 实验测得的凹土力学参数见表5.

以抗压强度为纵坐标, 围压为横坐标绘制 σ_1 - σ_3 最佳关系曲线, 如图6所示, 由最佳关系曲线可以计算得到凹土棒石的内摩擦角为 33.91° , 黏聚力为2.40 MPa. 内摩擦角越大表明岩石颗粒表面越粗糙, 棱角越多, 密实度越大, 而黏聚力的大小则反映了岩石颗粒间的连接程度.

3.3 不同含水率下的单轴压缩实验

用于单轴压缩实验的试样共4组, 含水率分别为10%, 20%, 30%, 40%. 实验开展之前, 将达到设定含水率的试样用保鲜膜包好置于保湿缸中, 静置一周, 使试样中的水均匀分布, 方可进行实验. 单轴压缩实验中, 温度设定在 20°C , 采用位移控制加载的方式, 加载速度为 0.02 mm/min , 加载至试样破坏. 图7说明了单轴抗压强度随着含水率的增加而降低. 含水率从10%到

表 5 完整凹土力学参数

Table 5 Mechanical property parameters of Attapulgitic clay

围压 (MPa)	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比	黏聚力 (MPa)	内摩擦角 ($^\circ$)
0.5	11.16	0.98	0.22	2.40	33.91
1	12.26				
1.5	14.39				
2	16.58

图 6 (网络版彩图) σ_1 - σ_3 最佳关系曲线
Figure 6 (Color online) The best relationship curve of σ_1 - σ_3 .

图 7 (网络版彩图)抗压强度与含水率的关系

Figure 7 (Color online) Relationship between uniaxial compressive strength and moisture content.

20%单轴抗压强度迅速降低,降低幅度达到了30%;含水率从20%开始,试样的单轴抗压强度下降趋势变缓;当含水率到30%之后,试样的抗压强度降低很小,基本稳定在4 MPa左右.试样的单轴抗压强度损失约为44.35%,其中38.6%均发生在低含水率下(含水率小于30%).图8表明了弹性模量随着含水率的增大而降低.弹性模量的变化没有明显的阶段性,基本呈线性降低趋势.结合单轴抗压强度的分类^[13-16],软岩的单轴抗压强度为5-15 MPa,因此可以判定凹土棒石属于软岩

图 8 (网络版彩图)弹性模量与含水率的关系

Figure 8 (Color online) Relationship between elastic modulus and moisture content.

的一种.

4 凹土不同含水率下的多尺度力学分析

室内实验对于凹土的研究仅停留在宏观力学参数的获得,对于试样内部颗粒间的应力变化规律及孔隙率的变化却无法了解,为了弥补室内实验中无法观测到试样内部各种颗粒变化的缺陷,采用离散元软件模拟不同含水率下的单轴压缩实验,通过调节微观参数,得出微观的颗粒间应力场、位移场、孔隙率等的变化规律,从而再现单轴压缩实验过程中内部颗粒的运动规律,有利于进一步探究凹土在不同含水率下受到单轴加载时的力学行为.

4.1 建立模型及细观力学参数的标定

如图9所示,建立与室内试样尺寸一致的数值模型(高度为50 mm,直径为25 mm),根据粒径分析实验得到的级配曲线来建立凹土体模型,若数值模型中球体数目越多,则越能反映真实凹土的力学性质,但这也会降低离散元的计算效率,因此为了获得一个可接受的效率,下文中的模拟在颗粒粒径的选择和数值计算效率之间做了一个折中处理,保证了颗粒数目适中且能反映宏观力学性质,以提高模拟效率,图10为初始模型中间纵截面(xoz 平面)上的颗粒和颗粒间的接触力.

李识博等人^[17]采用多套细观参数来模拟不同含

图 9 (网络版彩图)单轴压缩加载示意图

Figure 9 (Color online) Schematic diagram of uniaxial compression loading.

图 10 (网络版彩图)初始接触力分布剖面图

Figure 10 (Color online) Profile of initial contact force distribution.

水率条件下黄土的三轴实验,这是目前离散元方法模拟岩石土体考虑含水率影响的最佳方法.根据上述建立的模型,结合凹土棒石不同含水率下的单轴压缩实验进行参数标定.根据凹土颗粒的接触特性,标定过程中土体颗粒间的接触用平行黏结模型(Linearbond Model)进行模拟,获得了不同含水率下的凹土体细观接触模型参数,见表6.

图11给出了凹土不同含水率下的单轴压缩实验与数值实验对比结果,可以看出,数值实验获得的应力-应变曲线与室内实验曲线的吻合度较好,误差限在6%–10%.

4.2 凹土不同含水率下单轴压缩实验细观机制分析

采用标定出的细观参数,分别开展10%, 20%, 30%, 40%等含水率下的单轴压缩数值模拟实验,根据模拟结果进行如下分析.

表 6 单轴实验细观接触模型参数

Table 6 Meso-mechanical parameters for uniaxial tests

含水率	密度 (kg/m^{-3})	摩擦系数	内摩擦角 ($^{\circ}$)	黏聚力 (MPa)	刚度比	有效模量 (GPa)
$w=10\%$	1180	0.5	50	2.6	1.4	0.6
$w=20\%$				1.9	1.1	0.5
$w=30\%$				1.6	1.0	0.4
$w=40\%$				1.4	0.8	0.35

4.2.1 颗粒间配位数分析

颗粒配位数是指目标颗粒与周边颗粒发生接触的数目,它是用来反映颗粒集合体内部结构特征的重要参数之一,也是评价一个颗粒体系接触是否良好、密实的重要指标.

本文采用Thornton^[18]对有效配位数的定义,有两个及两个以上接触的颗粒为承力颗粒,除去试样中颗粒接触数目小于2的悬浮颗粒后试样的平均配位数为试样有效配位数 CN_{eff} ,可表示为

$$CN_{\text{eff}} = \frac{2C - N_1}{N_{\text{tot}} - N_1 - N_0}, \quad (2)$$

式中, C 为试样中的接触总数, N_{tot} , N_0 和 N_1 分别为试样中颗粒的总数、配位数为0的颗粒数目和配位数为1的颗粒数目.

模拟实验结束后有效配位数随含水率的变化曲线如图12所示.模型初始的配位数 CN_{eff} 为9.67,单轴压缩结束后,模型的配位数均发生了不同程度的减少,且含水率越高的模型,配位数的减少程度越小.这是由于加载过程中,含水率低的试样较含水率高的试样更容易破坏,部分大粒径的承力颗粒破碎后,碎片会填充于颗粒间的空隙中;随着承力颗粒的数目变小,模型的有效配位数也在减小,有效配位数越低,表明试样在加载过程中的承力结构也越稀疏,试样也越容易破坏.此外,有效配位数的减小也对应着试样的剪胀.

4.2.2 颗粒间接触力链分析

通过分析不同含水率下单轴压缩实验试样内部颗粒间接触力的力链演化过程,揭示凹土试样在破坏过程中内部颗粒间接触力的传递演化.

图13给出了实验加载结束后,模型中间纵截面(xoz 平面)上的颗粒和颗粒间的接触力,图中颗粒由三维球体在截面上的投影表示,接触力由黑色线条表示,

图 11 (网络版彩图)细观力学参数标定对比曲线. (a) 10%和20%含水率; (b) 30%和40%含水率

Figure 11 (Color online) Calibration curves of meso-mechanical parameters. (a) 10% and 20% moisture content; (b) 30% and 40% moisture content.

图 12 (网络版彩图)含水率-配位数关系图

Figure 12 (Color online) Relationship between moisture content and coordination number.

黑色线条越粗则代表接触力越大; 黑色线条部分颜色越深, 表明接触数目也越多. 颗粒与加载板接触部位应力比较集中, 4种不同含水率下的接触力剖面图中, 与加载板接触处的接触力都比较大, 初始接触力大小分布均匀. 加载过程中, 为抵抗轴向载荷的增加, 试样内部的力链均发生了明显的变化, 表现在粗力链骨架开始逐渐呈现.

(1) 含水率为10%的试样, 加载结束后接触力的大小分布比较集中. 接触力较大的颗粒主要集中在红色标识线上部分, 红色标识线下部分均匀分布相对较小的接触力, 大小接触力中间存在明显的分界线. 接触力较大的颗粒带动接触力小的颗粒发生微观滑移, 进

图 13 (网络版彩图)试样宏观破坏与微观接触力分布对比图. (a) $w=10\%$; (b) $w=20\%$; (c) $w=30\%$; (d) $w=40\%$

Figure 13 (Color online) Sample comparison of macroscopic damage and microscopic contact force distribution. (a) $w=10\%$; (b) $w=20\%$; (c) $w=30\%$; (d) $w=40\%$.

而形成大的剪切裂缝. 对比室内实验破坏图, 单轴压缩实验结束后, 也是形成了一条清晰的剪切裂缝.

(2) 含水率为20%的试样, 形成了多条剪切裂缝; 随着含水率的增加, 红色标识线下方的接触数目及接触力也在减少, 并且较图13(a)更早的发生剪切破坏.

(3) 含水率为30%的试样中, 中间部分区域, 接触力的数目及大小进一步减小, 甚至有些颗粒已经与周围颗粒不存在接触(圆形标识线), 此时试样的破坏方式主要为剪胀破坏; 实验过程中发现, 破坏前夕, 试样

仍大致呈现出剪切破坏的特征, 之后从试样中间部分断裂破坏成很多小块.

(4) 含水率为40%的试样中, 模型内部的接触数目及接触力, 此时较初始的模型有了大幅度的减少, 中间不存在接触力的区域也进一步扩大, 下方的接触数目变得很稀疏, 模型整体的结构也越稀疏.

4.2.3 孔隙率演化分析

在室内不同含水率下的单轴压缩的基础上, 开展数值模拟研究凹土内部的孔隙率及含水率综合影响凹土强度的演化特征, 为解释凹土含水率变化的力学机制提供微观解释. 初始孔隙率分布如图14(a)所示. 加载结束后, 4种不同含水率下的试样孔隙率均发生了明显的变化, 主要表现在剪切带两侧区域的孔隙率均

不同程度的增加, 含水率越大的试样则表现为加载结束后孔隙率增加的程度越大.

含水率较高的试样在加载结束时, 内部的孔隙空间越容易被压缩或拉伸. 对于连通性差的孔隙网络, 当孔隙空间小于孔隙内自由水的体积时, 内部的自由水由于受到挤压而导致孔隙内水压力的升高, 进而加剧孔隙端部的拉应力集中, 促进裂隙的扩展, 导致新的裂隙产生, 这一过程也会导致孔隙率的增大, 而孔隙率的增大将导致凹土宏观力学性质的衰减.

邓华锋等人^[19]对含水状态下的红层软岩力学特性的研究表明, 饱水状态下的试样内部黏土矿物会吸水膨胀, 使得岩体结构变得松散, 并且孔隙多被水充填, 这些微观结构的改变导致了红层软岩力学性质的变化. 黄宏伟和车平^[20]通过对泥岩软化微观机制研究

图 14 (网络版彩图)孔隙率演化等值线图. (a) 初始孔隙率分布; (b) $w=10\%$; (c) $w=20\%$; (d) $w=30\%$; (e) $w=40\%$

Figure 14 (Color online) Contour map of porosity evolution. (a) Initial porosity distribution; (b) $w=10\%$; (c) $w=20\%$; (d) $w=30\%$; (e) $w=40\%$.

发现, 由于泥岩遇水膨胀的不均匀性, 使得岩石内部产生了不均匀的应力, 进而产生了大量的微孔隙, 导致了力学性质的变化. Hadizadeh和Law^[21]发现砂岩孔隙的几何尺寸以及是否存在黏土矿物, 在控制孔隙水的物理化学作用对岩石力学性质的影响方面具有显著作用. 周翠英等人^[22]对粉砂质泥岩和泥质粉砂岩软化机制的研究认为, 黏土矿物吸水膨胀、孔隙率增大是软岩力学性质降低的原因之一. 凹土棒石原土中含有包括蒙脱石、绿泥石等黏土矿物, 饱水状态下, 黏土矿物之间的胶结物会破坏, 并且黏土矿物不均匀吸水膨胀后会导致内部孔隙率增大, 这也是导致凹土宏观力学性质衰减的原因之一.

5 结论

(1) 常规三轴压缩应力-应变曲线整体呈现软化型,

大致经历了4个阶段, 即压密、弹性、屈服和破坏阶段; 围压越大, 试样破坏时峰后的延性也越明显, 结合三轴实验结果, 得到凹土棒石的弹性模量为0.98 GPa, 泊松比为0.22, 内摩擦角为33.91°, 黏聚力为2.40 MPa.

(2) 开展4种不同含水率下的单轴压缩实验, 实验结果表明: 凹土的抗拉强度随着含水率的增大而降低, 且降低速率先快后慢. 弹性模量的变化没有明显的阶段性, 基本呈线性降低趋势.

(3) 数值实验结果表明, 随着含水率的增大, 试样内部的有效配位数在减小. 有效配位数的减小也对应着试样的剪胀. 不同含水率下的试样剪切带的形成演化过程是不同的, 表现在剪切带的发育部位、破坏形态有所不同; 含水率越大的试样加载结束后孔隙率增加的程度越大, 孔隙率的增大则导致了宏观力学性质的衰减.

参考文献

- 1 Zhou J Y, Ding B B, Gu J L, et al. Restudy on present situation of application of Attapulgitic clay & its high added value product development (in Chinese). *Non-metall Mines*, 2006, 29: 1–5 [周济元, 丁彬彬, 顾金龙, 等. 再论凹土棒石黏土应用现状及高附加值产品开发. *非金属矿*, 2006, 29: 1–5]
- 2 Hawkins A B, McConnell B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content. *Q J Eng Geol Hydrogeol*, 1992, 25: 115–130
- 3 Burshtein L S. Effect of moisture on the strength and deformability of sandstone. *Soviet Min Sci*, 1969, 5: 573–576
- 4 Vásárhelyi B, Ván P. Influence of water content on the strength of rock. *Eng Geol*, 2006, 84: 70–74
- 5 Zhu Z D, Xing F D, Wang S J, et al. Analysis on strength softening of argillite under groundwater by damage mechanics (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2004, 23(Suppl2): 4739–4743 [朱珍德, 邢福东, 王思敬, 等. 地下水对泥板岩强度软化的损伤力学分析. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(增刊2): 4739–4743]
- 6 Zhu C Q, Li C M, Yin Z Q, et al. Experimental study of soft coal mechanics characteristics with different moistures and clay contents (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2017, 36(Suppl1): 3259–3265 [朱传奇, 李传明, 殷志强, 等. 不同含水率及黏土含量下松软煤体力学特征实验研究. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(增刊1): 3259–3265]
- 7 Zhu C Q, Xie G X, Wang L, et al. Experimental study on the influence of moisture content and porosity on soft coal strength characteristics (in Chinese). *J Min Safety Eng*, 2017, 34: 601–607 [朱传奇, 谢广祥, 王磊, 等. 含水率及孔隙率对松软煤体强度特征影响的实验研究. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34: 601–607]
- 8 Jia H L, Wang T, Xiang W, et al. Influence of water content on the physical and mechanical behaviour of argillaceous siltstone and some microscopic explanations (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37: 1618–1628 [贾海梁, 王婷, 项伟, 等. 含水率对泥质粉砂岩物理力学性质影响的规律与机制. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37: 1618–1628]
- 9 Xiong D G, Zhao Z M, Su C D, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30: 998–1006 [熊德国, 赵忠明, 苏承东, 等. 饱水对煤系地层岩石力学性质影响的实验研究. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30: 998–1006]
- 10 Liao H J. *Soil Mechanics* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2018 [廖红建. *土力学*. 北京: 高等教育出版社, 2018]
- 11 Nie L Z, Xiang W. *Geotechnical Test Instruction* (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009 [聂良佐, 项伟. *土工实验指*

导书. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009]

- 12 The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DLT 5368-2007 Code for Rock Tests of Hydroelectric and Water Conservancy Engineering (in Chinese). Beijing: China Electric Power Press, 2007 [中华人民共和国行业标准编写组. DLT5368-2007 水利水电工程岩石实验规范. 北京: 中国电力出版社, 2007]
- 13 He M C, Jing H H, Sun X M. Engineering Mechanics of Soft Rock (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002 [何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学. 北京: 科学出版社, 2002]
- 14 Al-Harathi A A, Al-Amri R M, Shehata W M. The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia. [Eng Geol](#), 1999, 54: 313–320
- 15 Shen M R, Chen J F. Mechanics of Rock (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 2006 [沈明荣, 陈建峰. 岩体力学. 上海: 同济大学出版社, 2006]
- 16 Hudyma N, Avar B B, Karakouzian M. Compressive strength and failure modes of lithophysae-rich Topopah Spring tuff specimens and analog models containing cavities. [Eng Geol](#), 2004, 73: 179–190
- 17 Li S B, Wang C M, Wang N Q, et al. Numerical simulation of loess triaxial shear test by PFC^{3D} (in Chinese). China J Highway Transport, 2013, 26: 22–28 [李识博, 王常明, 王念秦, 等. 黄土三轴实验的颗粒流数值模拟. 中国公路学报, 2013, 26: 22–28]
- 18 Thornton C. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media. [Géotechnique](#), 2000, 50: 43–53
- 19 Deng H F, Fang J C, Li J L, et al. Mechanical properties of red-bed soft rock on saturated state (in Chinese). J China Coal Soc, 2017, 42: 1994–2001 [邓华锋, 方景成, 李建林, 等. 含水状态对红层软岩力学特性影响机理. 煤炭学报, 2017, 42: 1994–2001]
- 20 Huang H W, Che P. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of sandstone (in Chinese). J Tongji Univ: Nat Sci, 2007, 35: 866–870 [黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35: 866–870]
- 21 Hadizadeh J, Law R D. Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates. [Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstracts](#), 1991, 28: 431–439
- 22 Zhou C Y, Tan X S, Deng Y M, et al. Research on softening of micromechanism of physical soft rock (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2005, 24: 394–400 [周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24: 394–400]

Experimental and numerical simulation research of the physical and mechanical properties of Attapulgite clay

ZHU HaiYan^{1,2*}, DANG YiKe¹, LIU QingYou² & DENG XingQiao²

¹ State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

² State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University Of Technology, Chengdu 610059, China

A series of laboratory experiments were carried out in this paper, around the problems of crusher sticking and tool wear in the pre-treatment of Attapulgite clay. Firstly, the results of mechanical experiments showed that the uniaxial compressive strength of Attapulgite clay decreases gradually with the increase of moisture content. And the triaxial test measured the elastic modulus of the Attapulgite clay to be 0.98 GPa, the cohesive force to be 2.40 MPa. Secondly, the meso-mechanical parameters of the numerical model were calibrated by the discrete element numerical experiment, with the condition of different moisture content, and compared with the laboratory test results to verify. Then the macro- and micro- mechanical properties of Attapulgite clay with different moisture content were deeply analyzed. As the moisture content increases, the effective coordination number inside the sample decreases. The larger the moisture content, the greater the increase in porosity after loading, and the increase in porosity will result in the attenuation of macroscopic mechanical properties. The conclusions in this paper are helpful to optimize the industrial treatment process under different moisture content of Attapulgite clay.

Attapulgite clay, physical and mechanical property, moisture content, discrete element method, meso-mechanics

PACS: 45.90.+t, 46.50.+a, 46.09.+s, 62.20.-s, 62.20.Fe

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0290](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0290)