DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.007
周琳,胡斐南,许晨阳,等.基于动态振荡剪切的砒砂岩浆体流变行为研究[J].水土保持学报,2024,38(3):45-53.
ZHOU Lin, HU Feinan, XU Chenyang, et al. Study of the rheological behavior of pisha sandstone slurry based on dynamic oscillatory shear[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):45-53.

基于动态振荡剪切的砒砂岩浆体流变行为研究

周 琳[1,4], 胡斐南[1,2], 许晨阳[3], 杜 伟[3], 张亚楠[3]
(1.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西 杨凌 712100;
3.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;4.中国科学院大学,北京 100049)

摘　要:[**目的**]随着全球变暖及强降水极端事件频发,砒砂岩区滑塌泥流灾害可能将不断增加。为探明水-土互馈作用如何导致脆弱岩土松动变形进而发展为泥流,系统认识其演化过程的关键科学问题。[**方法**]以 4 种典型砒砂岩为研究对象,采用流变学方法,开展动态振荡剪切下砒砂岩浆体的流变特性研究,探索砒砂岩浆体的液化过程及流变特性。[**结果**](1)随着剪切应变增加,4 种砒砂岩浆体储能模量和损耗模量减小,表现出应变变稀特点。(2)在含水率较低($w<50\%$)的样品中,紫、棕色砒砂岩浆体与红、白色砒砂岩浆体相比,线性黏弹区的应力和应变更大。在含水率较高($w\geqslant50\%$)的样品中,红、白色砒砂岩浆体与紫、棕色砒砂岩浆体相比,流动点的应力和应变更大。(3)随含水率增加,4 种砒砂岩浆体的储能模量和损耗模量降低,线性黏弹区的应力和应变降低。[**结论**]细颗粒物质可增加浆体在线性黏弹区的抗剪强度和弹性,但细颗粒浆体受含水率影响较大,水分加入后,浆体结构破坏、抵抗变形的能力立即减弱,同时,更容易发生相态转变。粗颗粒的存在使浆体非线性黏弹区弹性主导的范围增大,阻碍浆体的相态转变。该研究结果为砒砂岩区泥流灾害的认识和防治提供一定的科学基础。

关键词: 动态振荡剪切;泥流;线性黏弹区;流动点;砒砂岩
中图分类号:P642.2　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)03-0045-09

Study of the Rheological Behavior of Pisha Sandstone Slurry Based on Dynamic Oscillatory Shear

ZHOU Lin[1,4], HU Feinan[1,2], XU Chenyang[3], DU Wei[3], ZHANG Yanan[3]
(1.*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3. *College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: [**Objective**] With global warming and increased occurrences of heavy precipitation, the frequency of landslide mudflow disasters in the Pisha sandstone area will increase significantly. Understanding how water-soil interaction affect the loosening and deformation of fragile soils, ultimately leading to mudflow development, is a crucial scientific question in the evolutionary process. [**Methods**] This study focuses on investigating the rheological properties of Pisha sandstone (PS) slurry using a rheological method that involves dynamic oscillatory shear. The primary objective is to examine the liquefaction process and initial rheological properties of PS slurry. [**Results**] (1) With the increase of shear strain, the energy storage modulus (G') and loss modulus (G'') of the four PS slurries decreased and exhibited strain thinning characteristics. (2) In the samples with lower water content ($w<50\%$), the stress and strain in the linear viscoelastic region (LVE) of purple and brown PS slurries were larger than red and white PS slurries. In the samples with higher water content ($w\geqslant50\%$), the stress and strain at the flow point of red and white PS

收稿日期:2023-08-24　　**修回日期:**2023-12-15　　**录用日期:**2023-12-27　　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-04-09
资助项目:国家自然科学基金项目(41977024)
第一作者:周琳(1997—),女,河南南阳人,博士研究生,主要从事土壤结构稳定性研究。E-mail:zhoulin20@mails.ucas.ac.cn
通信作者:胡斐南(1986—),男,甘肃平凉人,研究员,博士,博士生导师,主要从事土壤学与水土保持研究。E-mail:hufn@nwafu.edu.cn

slurries were larger than purple and brown PS slurries. (3) With increasing water content, G' and G'' of the four PS slurries decreased, and the stress and strain in the LVE decreased. [**Conclusion**] Fine particles could increase the shear strength and elasticity of the slurry in the LVE, but the fine-grained slurry was more affected by the moisture content, and the ability of the slurry structure to destroy and resist deformation was weakened immediately after the addition of water, while the phase transition was more likely to occur. The presence of coarse particles increased the extent of the elastic dominance of the nonlinear viscoelastic region and hindered the phase transition of the slurry. The results of the study can provide scientific basis for further mudflow research and disaster control in the Pisha sandstone area.

Keywords: dynamic oscillatory shear; slurry; linear viscoelastic region; flow point; Pisha sandstone

Received: 2023-08-24 **Revised**: 2023-12-15 **Accepted**: 2023-12-27 **Online**(www.cnki.net): 2024-04-09

砒砂岩胶结能力弱,结构强度差,遇水成泥,遇风成砂,导致当地生态脆弱,碎屑物源丰富[1]。随着全球气候变暖及强降水极端事件频发,砒砂岩区滑塌泥流致灾率将大幅增加。泥流是土质斜坡失稳的形式之一,其运动呈塑性或黏性流体性质,并具有强烈内部变形。受降雨诱发的浅层泥流,在西北地区分布广泛,其具有流速快、冲击力强、发育范围广、难以防御及致灾频率高等特点。脆弱岩土具有流变特性,动态荷载和水分入渗加速岩土液化流动,是岩土地质灾害的重要外部动力和诱发因素[2]。近些年,泥流灾害造成大量人员伤亡和财产损失,亟需加强泥流形成机制与演变过程的研究[3]。

流变学研究[4]认为,材料流动过程中发生着弹性、黏性和塑性的演变。其中,动态剪切模式可更好地表征岩土体的黏弹性,试验所得到的储能模量(G')、损耗模量(G'')、相位角(δ)和积分(z)可有效地表征土体的弹性临时变形、黏性永久变形和黏弹性比例的变化[5]。史泽华[6]通过动态振荡试验测定黄土泥流样品在相对静态条件下对外力的流变响应认为,当剪切应变和剪切应力足够大时,试样从黏弹性变形过渡为流动性变形;NI等[7]测试高岭土、蒙脱土、伊利土3种纯矿物黏土及其混合模拟黏土的储能模量和损耗模量指出,含水率和矿物成分对黏弹性的影响较大;STOPPE等[8]认为,通过流变学方法研究土壤微观结构过程,可更好地理解从中尺度(土壤团聚体)到宏观尺度(大块土壤)的土壤行为,表明土壤微观结构的弹性明显依赖于质地和含水量。可见,流变学法为土壤物理性质表征提供丰富的参数指标且已广泛应用于不同的土体研究,然而,大部分主要针对高含水率的泥沙或黏性土壤,对于黏粒含量较少的砂岩,尤其是抗侵蚀能力较弱的砒砂岩研究鲜有报道。

砒砂岩区泥流流变响应特征的相关研究非常有限,极大地限制对该区泥流演化过程的认识和灾害风险评价。因此,以4种砒砂岩浆体(紫色、棕色、红色、白色砒砂岩)为研究对象,以流变学理论为基础,采用流变仪等现代分析设备,开展动态振荡剪切下砒砂岩浆体的流变特性研究,初步探索砒砂岩浆体的液化失稳过程,为砒砂岩区泥流触发机理与活动规律提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 原状砒砂岩的采集

砒砂岩土壤采自内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗地区,紫色砒砂岩土壤采自准格尔旗五字湾古城梁(40°04′28″N,111°00′83″E),棕色砒砂岩土壤采自准格尔旗暖水乡(39°43′62″N,110°31′27″E),红、白2色砒砂岩土壤采自准格尔旗沙圪堵镇安定壕村(39°69′79″N,110°88′24″E)。准格尔旗位于内蒙古自治区西南部,地处山西、陕西、内蒙古3省区交界处,全旗总面积约7 692 km^2。全区属于典型的中温带半干旱大陆性季风气候。年平均气温为6.2~8.7 ℃,年平均降水量约400 mm,主要集中于7—9月,且多以暴雨出现。全年蒸发量是降水量的5~6倍,约为2 093 mm。

选取代表性样地采集表层(0—20 cm)砒砂岩土壤样品,带回实验室自然风干,剔除石块和植物残根等杂质后研磨过2 mm筛装袋备用。砒砂岩土壤样品基本理化性质采用常规土壤分析方法[9]。有机质采用$K_2Cr_2O_7$加热法测定;pH采用电极法测定,土水比设定为1∶2.5;碳酸钙采用气量法测定;矿物百分含量及种类通过X衍射分析得到;样品颗粒组成采用吸管法测定,并按照国际制标准分为砂粒(0.02~2 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和黏粒(<0.002 mm)3个粒级。供试土壤的基本理化性质见表1。

表 1　4 种砒砂岩土壤基本理化性质

Table 1　The basic physical and chemical properties of four Pisha sandstone

砒砂岩种类	颗粒组成/%			pH	$CaCO_3$ 含量/($g \cdot kg^{-1}$)	有机质含量/($g \cdot kg^{-1}$)	<2 μm 黏土矿物/%			
	砂粒	粉粒	黏粒				蒙脱石	蛭石	高岭石	绿泥石
紫色砒砂岩	53.85	37.20	8.95	6.74±0.03	12.01±0.83	3.63±0.13	59	12	12	13
棕色砒砂岩	64.04	33.06	2.90	7.84±0.04	49.04±1.53	3.49±0.13	49	3	20	16
红色砒砂岩	90.80	6.90	2.31	6.68±0.06	38.07±1.79	3.36±0.27	57	18	16	9
白色砒砂岩	95.68	1.42	2.90	6.42±0.05	19.68±2.52	3.45±0.09	82	—	9	9

注:表中数据为平均值±标准差。

1.2　试验方法与设计

流变试验于 2022 年 7 月在水土保持研究所西区进行,试验采用奥地利安东帕公司生产的 MCR 302 流变仪,搭配十字板转子(型号为 ST22－4V－40),转子沿转轴方向的长度为 40 mm,直径为 22 mm,盛放试样的外筒直径为 28.92 mm。由于商业流变仪对测试样品尺寸的限制[7],在样品制备过程中,将 4 种砒砂岩土壤研磨过 0.5 mm 筛,颗粒级配曲线见图 1,计算得到颗粒不均匀系数(coefficient uniformity,*Cu*)和曲率系数(coefficient of curvature,*Cc*)见表 2。

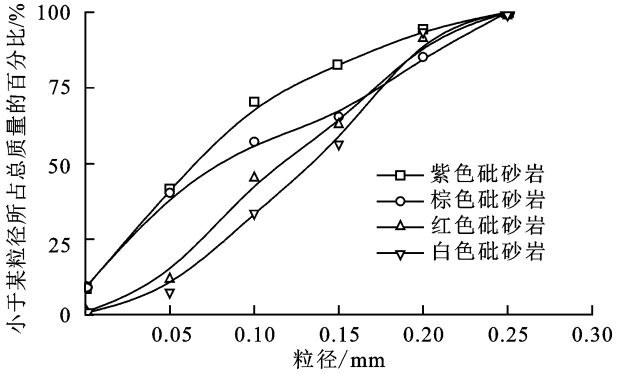

图 1　4 种砒砂岩试样粒径级配曲线

Fig. 1　Particle size distribution curves of the four Pisha sandstone soil samples

表 2　4 种砒砂岩土壤颗粒不均匀系数(*Cu*)和曲率系数(*Cc*)

Table 2　The coefficient of uniformity (*Cu*) and curvature coefficient (*Cc*) of the four Pisha sandstone soils

指标	紫色砒砂岩	棕色砒砂岩	红色砒砂岩	白色砒砂岩
Cu	42.50	60.00	3.78	3.17
Cc	6.41	5.40	1.21	1.21

随后,将 4 种砒砂岩试样与蒸馏水配置成含水率分别为 40%,50%,60%,70%,80%的样品,手动搅拌 3 min,静置 5 min,保证样品充分饱和[10]。试验时,流变仪的测量转子在装有试验土样的测量圆筒中转动,对土样进行动态振荡剪切(图 2)。剪切应变范围为 0.001%～1 000%,频率固定为 0.5 Hz,测试温度为 20 ℃,测量数据点为 25 个。每个试样至少 3 次重复。

1.3　振幅扫描测试原理

动态振荡试验主要通过对材料施加交变外力或应变作用,获取振幅扫描曲线以分析材料的黏弹性。振荡试验中,流变仪首先对样品施加正弦波规律的应变,样品会相应反馈 1 个正弦波规律的应力曲线(图 3),2 个正弦波之间存在 1 个相位角(δ),理想流体的 δ 为 90°,理想固体的 δ 为 0,土体具有黏弹性,其中 δ 为 0～90°[11]。

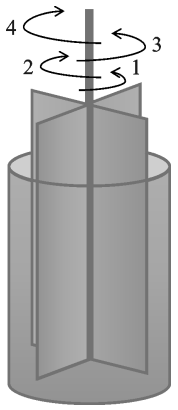

图 2　动态振荡剪切示意

Fig. 2　Schematic diagram of dynamic oscillatory shear

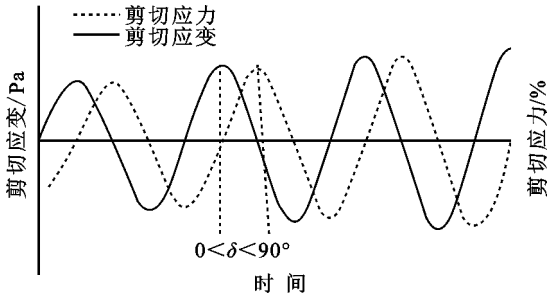

图 3　剪切应变和剪切应力随时间变化示意[11]

Fig. 3　Schematic diagram of the variation over time of shear strain and shear stress

根据经典力学中的胡克定律,完全弹性材料在单轴应力条件下剪切模量(G)是恒定的[12]。在振荡剪切时,根据公式(1)可获得复合剪切模量(G^*,Pa),再依据正弦波间相位差根据公式(2)和(3)分别计算储能模量(G',Pa)和损耗模量(G'',Pa)。

$$G^* = \tau_A / \gamma_A \tag{1}$$

式中:τ_A 为剪切应力振幅(Pa);γ_A 为剪切应变振幅(无量纲)。

$$G' = |G^*| \cos\delta \tag{2}$$

$$G''=|G^*|\sin\delta \tag{3}$$

储能模量(G')为物质的弹性分量,即由外部应力产生的可被暂时储存的能量。损耗模量(G'')为由热量、摩擦以及其他形式损耗的能量,即材料开始流动所要损失的能量。G'、G''与剪切应变的曲线可确定样品的线性黏弹区(linear viscoelastic range,LVE)(G'偏差<5%的平台区),LVE表征形变前材料内部结构的强度,且在此区域内材料内部结构的变化是可逆的。

损耗因子($\tan\delta$)为G''与G'之比,为材料形变所损失能量的比值,用于描述材料黏性和弹性比的行为,测试初期$G'>G''$,即$\tan\delta<1$,样品表现出固体弹性行为;当$G'=G''$,即$\tan\delta=1$,样品的弹性分量与黏性分量相等,表示样品的结构完全被破坏或开始流动,此点称为流动点(flow point,FP)或固体-流体相态转变点;随后$G'<G''$,即$\tan\delta>1$,样品主要表现出流动黏性特征。

Iz是剪切应变从0.001%到屈服点应变(γ_{FP})所对应的$\tan\delta$曲线与$\tan\delta=1$所围成的积分面积(图4),又称为积分Z(Integral Z),其值越大,弹性变形的总体比例越高[13],计算公式为:

$$I_Z=\int_{0.001}^{YP}(1-\tan\delta)\mathrm{d}x \tag{4}$$

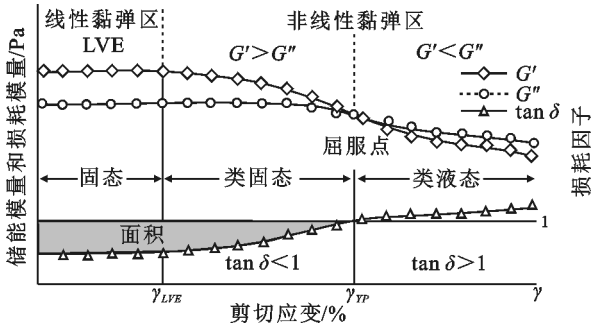

图4 振幅扫描试验结果示意

Fig. 4 Schematic diagram of the results of amplitude scanning test

2 结果与分析

2.1 剪切应变对砒砂岩浆体模量的影响

图5为4种砒砂岩浆体流变特征参数储能模量(G')、损耗模量(G'')随剪切应变(γ)的变化关系。由图5可知,随着γ增大,G'和G''均减小,浆体表现出应变变稀特点。4种砒砂岩浆体的模量变化有明显不同,以含水率为40%为例,紫、棕色砒砂岩浆体黏弹性变化有3个阶段,当紫色、棕色砒砂岩浆体的γ分别<0.068%和<0.096%时,G'和G''恒定,不随γ变化而变化,且G'比G''大1个量级,浆体表现出线性黏弹性行为且以固态弹性为主导。浆体受到的剪切是小振幅振荡剪切;当紫色、棕色砒砂岩浆体γ分别>0.068%和>0.096%时,浆体表现出非线性黏弹性行为。浆体受到的剪切是大振幅振荡剪切,在非线性黏弹性变形区域内,G'和G''为剪切应变γ的函数,G'和G''随着γ的增大急剧减小。此时,浆体表现出弹性为主的非线性黏弹性行为,即类固态;当紫色砒砂岩浆体和棕色砒砂岩浆体γ分别为19.633%和15.167%时,2个黏弹性模量出现交点。随着应变继续增加,$G'<G''$,浆体呈黏性为主的非线性黏弹性行为,表现为类液态。在G'与G''的交点(即流动点)处,浆体完成类固态向类液态的相态转变。而红色、白色砒砂岩浆体弹性阶段的平台区较短,在振荡剪切初期表现出弹性为主的非线性黏弹性行为,流动点所对应的剪切应变分别为124.667%和115.167%,当γ大于流动点应变时,浆体完成相态转变。

紫、棕色砒砂岩G'和G''的变化受含水率的影响比红、白色砒砂岩浆体更大,当含水率从40%增加到80%,紫、棕色砒砂岩浆体线性黏弹区终点的储能模量分别下降75.997,64.673 kPa,而红、白色砒砂岩浆体线性黏弹区终点的储能模量仅下降24.416,49.984 kPa,说明紫、棕色砒砂岩浆体的结构强度对水分的变化较为敏感。此外,当含水率为40%时,紫、棕色砒砂岩浆体G'大于红、白色砒砂岩浆体,即此含水率条件下,紫、棕色砒砂岩浆体的结构强度大于红、白色砒砂岩浆体,而当含水率>40%时,红、白色砒砂岩浆体的G'反而大于紫、棕色砒砂岩浆体。

2.2 剪切应变对砒砂岩浆体损耗因子的影响

图6为4种砒砂岩浆体的损耗因子($\tan\delta$)变化曲线。对于紫、棕色砒砂岩浆体,在线性黏弹区(LVE),随着含水率增大,$\tan\delta$逐渐趋近于1,即浆体弹性固体状态逐渐减弱,黏性流体状态逐渐增强,不可恢复的形变量逐渐增加。在LVE阶段,相同含水率条件下$\tan\delta$不随剪切应变增大而变化。在非LVE下以弹性为主阶段,$\tan\delta$变化不随含水率变化而变化,随剪切应变增大而增大,表明紫、棕色砒砂岩浆体在小应变范围内,黏弹性主要受含水率影响,在大应变范围内,浆体黏弹性主要受剪切应变影响。对于红、白色砒砂岩浆体,$\tan\delta$曲线变化受含水率影响较小。紫、棕色砒砂岩浆体流动点所对应的应变<10^2%,而红、白色砒砂岩浆体流动点的所对应的应变>10^2%。

2.3 含水率对砒砂岩浆体黏弹性参数的影响

图7a为紫色、棕色、红色、白色4种砒砂岩浆体线性黏弹区终点处的剪切应力(τ_{LVE})随含水率变化的趋势,τ_{LVE}反映浆体在线性黏弹区下的抗剪强度,即浆体发生可逆形变所需要的最大剪切应力。随着含水率的增加,

τ_{LVE}呈减小趋势,当含水率>50%时,浆体发生可逆形变的应力几乎为零,即几乎无法发生可逆形变。当含水率<50%时,紫、棕色砒砂岩浆体的 τ_{LVE} 约为红、白色砒砂岩浆体的 3 倍。4 种砒砂岩浆体抵抗变形的能力(τ_{LVE})依次为紫色砒砂岩大于棕色砒砂岩大于白色砒砂岩大于红色砒砂岩。

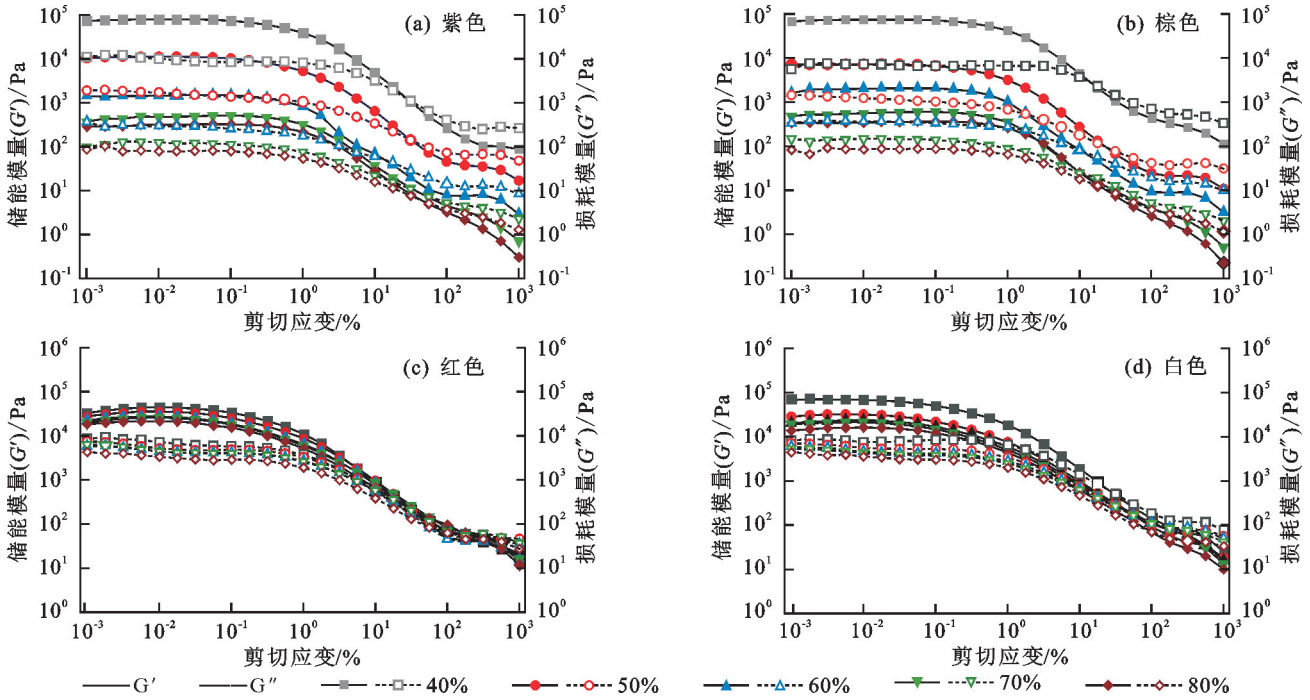

图 5　4 种砒砂岩各含水率下模量与剪切应变的关系

Fig. 5　The relationship between modulus and shear strain at various moisture contents for the four Pisha sandstone (PS) slurry

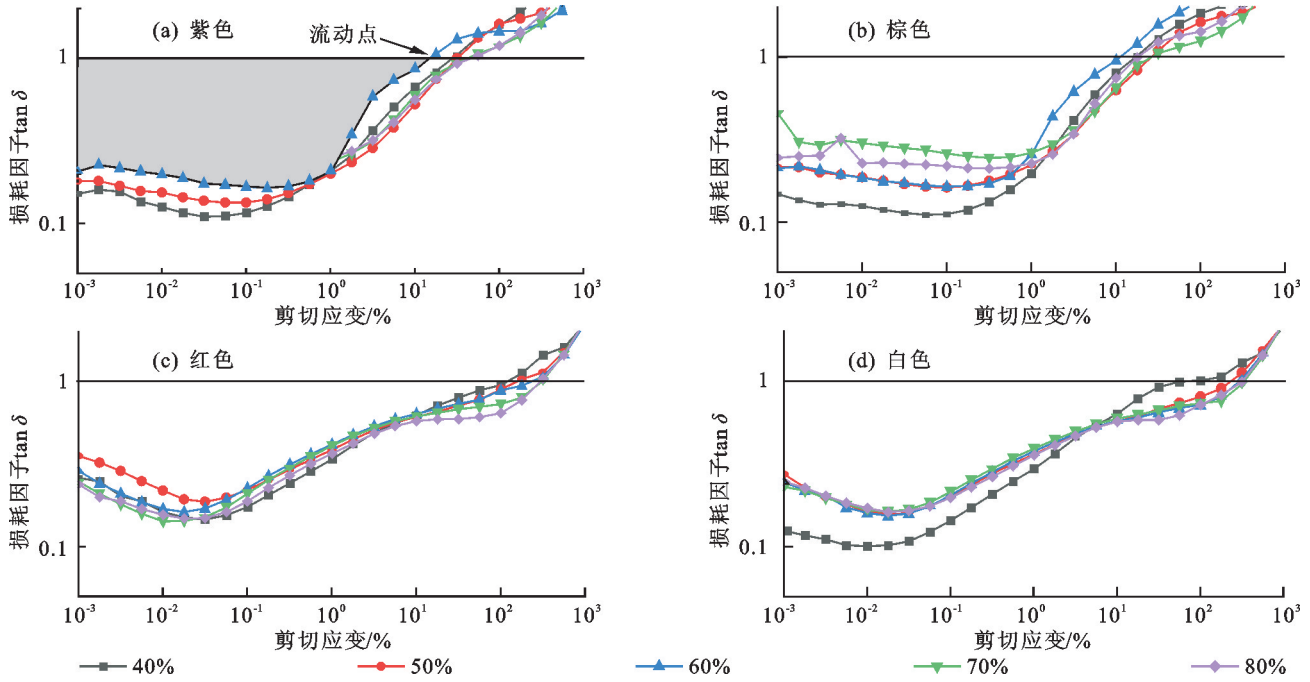

图 6　4 种砒砂岩浆体损耗因子曲线

Fig. 6　Viscoelastic loss factor curves of the four Pisha sandstone (PS) slurry

图 7b 为 4 种砒砂岩浆体线性黏弹区终点处的剪切应变(γ_{LVE})随含水率变化的趋势,γ_{LVE}反映浆体在线性黏弹区的弹性,即浆体发生可逆形变所产生的相对形变量。

随着含水率的增加,γ_{LVE}呈减小趋势。红、白色砒砂岩浆体线性黏弹区的剪切应变趋近于零,几乎未表现出弹性,与图 5c、图 5d 一致。紫、棕色砒砂岩浆体的 γ_{LVE}逐渐减小,在含水率超过 70%后趋于零。4 种砒砂岩浆体在线性黏弹区的弹性为紫、棕色砒砂岩大于红、白色砒砂岩。

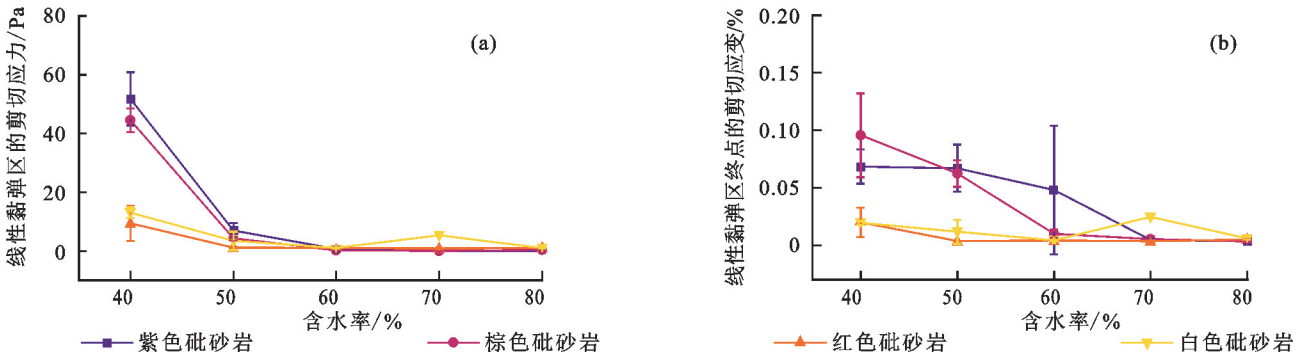

图 7 4 种砒砂岩浆体线性黏弹区终点处的剪切应力和剪切应变

Fig. 7 Shear stress and shear strain at the end of the linear viscoelastic region of the four Pisha sandstone slurry

图 8a 为 4 种砒砂岩浆体流动点的剪切应力(τ_{FP})随含水率变化的趋势,τ_{FP}反映浆体开始流动时的抗剪强度,即浆体发生相态转变所需要的最大剪切应力。紫、棕色砒砂岩浆体的 τ_{FP}随着含水率的增加先骤然减小后趋于稳定,含水率从 40%增加到 50%时,τ_{FP}减小约 450 Pa,而含水率继续增加,τ_{FP}减小约 50 Pa,即含水率 50%是 τ_{FP}较为明显的转折点。红、白色砒砂岩浆体 τ_{FP}随着含水率出现波动变化,但总体上剪切应力为 125~240 Pa。当含水率<50%时,τ_{FP}紫、棕色砒砂岩浆体大于红、白色砒砂岩浆体,而当含水率≥50%时,τ_{FP}表现为紫、棕色砒砂岩浆体小于红、白色砒砂岩浆体。

图 8b 为 4 种砒砂岩浆体流动点的剪切应变(γ_{FP})随含水率变化的趋势,γ_{FP}反映浆体开始流动的弹性,即浆体发生相态转变所产生的相对形变量。随着含水率的增加,紫、棕色砒砂岩浆体 γ_{FP}发生波动变化,紫、棕色砒砂岩浆体发生相态转化的相对形变量远远小于红、白色砒砂岩浆体,完成相态转变所需要的剪切应变仅需要 11.467%~52.600%,即紫、棕色砒砂岩浆体更容易发生相态转化。整体上,4 种砒砂岩浆体在流动点的应力应变参数响应为红、白色砒砂岩大于紫色砒砂岩大于棕色砒砂岩。

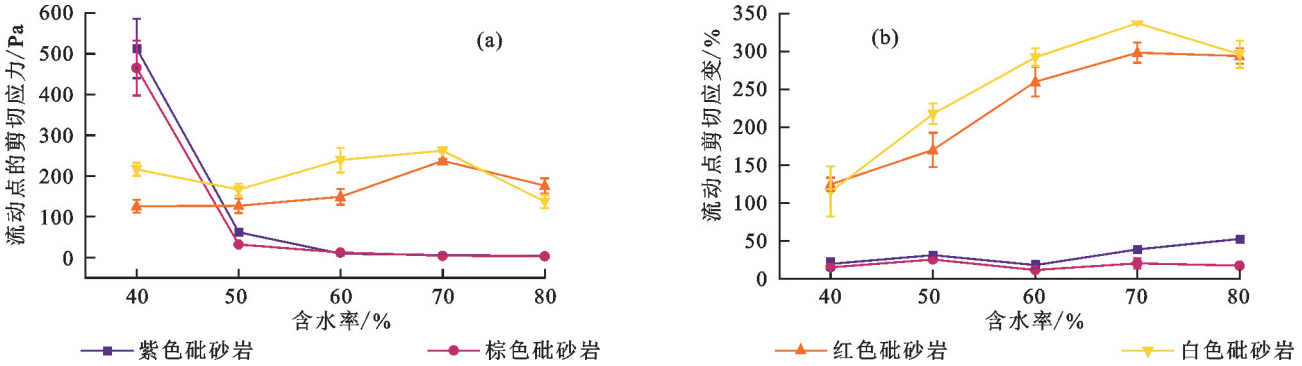

图 8 4 种砒砂岩浆体流动点的剪切应力和应变

Fig. 8 Shear stress and strain at the flow point of the four Pisha sandstone slurry

图 9 为 4 种砒砂岩浆体的积分(Z)随含水率变化的趋势,积分(Z)反映浆体发生相态转变前弹性变形的总体比例。随着含水率增加,紫、棕色砒砂岩浆体的积分(Z)呈波动式缓慢增加;红、白色砒砂岩浆体的积分(Z)随含水率增加表现为先增大后降低趋势,其中,在含水率为 70%时达到峰值。红、白色砒砂岩浆体的积分(Z)远大于紫、棕色砒砂岩浆体。

3 讨 论

3.1 剪切应变对砒砂岩浆体黏弹性的影响

本研究发现,紫、棕色砒砂岩浆体在小应变剪切下保持储能模量(G')和损耗模量(G'')的恒定(图 5a、图 5b),主要是由于紫、棕色砒砂岩浆体中细颗粒占比较高。在表面电场作用下,细颗粒吸附的水分子紧密排列而形成结合水,结合水具有单向传压性质,有利于浆体内部颗粒的相互结合,产生"自絮凝作用"[14]。同时,颗粒在絮凝作用下链接形成絮团,絮团相互连接,最终形成絮网状结构,因此,与红、白色砒砂岩浆体相比,存在一定的弹性。当剪切应变超过线性黏弹区范围时,随着应变增加,4 种浆体 G'和 G''减小,表现出应变变稀的特点,与稳态剪切荷载下剪切变稀的行为类似,该现象在高岭土、伊利土配制的浆体中同样存在[7]。一般认为,应变变稀过程与粒子网络结构的重新定向和微观结构的变化有关[15],主要是由样品微观结构与流动方向的一致性引起的,在小应变范围内,分子间的相互作用,尤其相互纠缠和颗粒的絮凝作用使浆体结构各向异性减小,G'和 G''

处于恒定状态，随着应变增加，浆体结构中的絮凝结构或颗粒链打开，且与流场方向对齐，导致模量减小[16]。

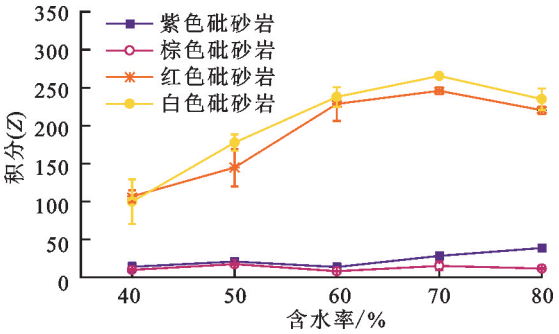

图 9　4 种砒砂岩浆体的积分 Z

Fig. 9　The integral Z of the four types of Pisha sandstone slurry

基于振荡剪切结果(图 5)，可将紫、棕色砒砂岩浆体的流动过程分为 3 阶段，即固体弹性阶段、类固态及类液态阶段。与 YANG 等[17]研究结果一致，流动点是浆体发生相态转变的临界点，当应变超过流动点应变时，泥浆表现得像流体，并发生流化。任路滨[18]通过 GDS 双向振动三轴仪模拟地震作用引起的黄土液化过程，同样将孔隙水压力随震次的增长阶段分为 3 个阶段，即弹性应变阶段、塑性应变阶段和液化破坏阶段。在 JEONG 等[19]对海底沉积物的流变研究中，将样品的振幅扫描结果分为弹性相($G'>G''$)、屈服相($G'=G''$)和黏性相($G'<G''$)。因此，G'和 G''的交叉点，即流动点，可当作浆体发生相态转变时的临界点。本研究中，4 种砒砂岩浆体线性黏弹区范围在 0.01%～0.10%内，与 HYUN 等[16]研究的范围一致。

本研究发现，积分(Z)随含水率变化趋势(图 9)与流动点应变随含水率变化趋势(图 8b)相似，表明积分(Z)与流动点应变密切相关[13]。同时紫、棕色含细颗粒较多的砒砂岩浆体的积分(Z)远小于红、白色含粗颗粒较多的砒砂岩浆体，在 STOPPE 等[8]研究中也存在相似的结果。样品在饱和条件下，积分(Z)随着中值粒径的增大而增大，主要是因为在大应变剪切下，G'仍然大于 G''。由图 6c、图 6d 可知，在非线性黏弹区，红、白色砒砂岩浆体的 γ_{FP}明显更大，导致积分(Z)的大幅增加。在振荡剪切条件下，浆体的初始弹性随着形变的增加而降低，但由于颗粒间的相对运动，如旋转、联锁、堆积、重组等，较粗的颗粒能够获得能量上更有利(即更稳定)的排列，孔隙比减小，增加颗粒间的强度和刚度，从而延迟微观结构的完全破坏；而细颗粒的增加导致滑动剪切行为，进而导致剪切强度快速降低[20]。因此，细颗粒含量越大，颗粒间的连锁越少，弹性随着剪切变形的增加而逐渐降低。

3.2　含水率和颗粒组成对砒砂岩浆体黏弹性的影响

本研究发现，随着含水率增加，浆体中固体浓度减小，G'和 G''减小，与 JEONG 等[19]研究结果一致。含水率增加使颗粒表面的结合水膜增厚，导致颗粒间黏附力降低，颗粒间凝聚力减弱；另一方面，水分分散浆体中的颗粒，增加颗粒间的润滑程度，促进浆体的流动。其中，含细颗粒较多的浆体对水分变化极为敏感，尤其是在低含水率下或细颗粒含量较多的情况下[21]。当浆体中水分含量少时，细颗粒相互黏结碰撞，有利于形成絮凝结构，当浆体中水分增加，细颗粒悬浮在浆体中，流动性增加，同时，减少颗粒形成絮团和絮网结构的机会，很好地解释图 5 中紫、棕色砒砂岩浆体的模量曲线较为分散而红、白色砒砂岩浆体的模量曲线较为集中的结果。线性黏弹区的剪切应力和剪切应变均随含水率的增加而减小(图 7)，也是由于水分加入使黏附力降低，絮凝结构被破坏，进而导致抗剪强度和弹性减弱。

本研究表明，在低含水率下，紫、棕色砒砂岩浆体的模量大于红、白色砒砂岩浆体(图 5)，在 SHAKEEL 等[22]对比蒙脱石和高岭石悬浮液中也发现类似现象，颗粒较小的悬浮液其模量值较高。此种更强的结构可能与粒子较高的表面积有关，从而导致颗粒与颗粒相互作用的增强，从而有助于增大结构网络强度。同时，颗粒较小的悬浮液表现出较大的线性黏弹区范围，与本研究中紫、棕色砒砂岩浆体在线性黏弹区时的剪切应力和剪切应变大于红、白色砒砂岩浆体(图 7)结果一致。线性黏弹区的剪切应力与应变表征浆体发生可逆变形时的抗剪强度和弹性。HOLTHUSEN 等[23]发现，抗剪强度主要取决于颗粒间接触强度及其表面特性。通常而言，在低含水率条件下，浆体中有机质和细颗粒含量越高，颗粒间黏结作用越强，浆体的抗剪强度和弹性越大。

本研究发现，紫、棕色砒砂岩浆体流动点的剪切应变仅为 11.467%～52.600%，而红、白色砒砂岩浆体流动点的剪切应变>100%(图 8)，说明含紫、棕色砒砂岩浆体更容易发生相态转变。杨闻宇[24]在泥沙样本流变特性研究中发现，振动荷载作用下黏性泥沙液化明显，对比振荡荷载前后泥沙样品的电子扫描图像发现，原始样品中多个颗粒相互黏结，而振荡后其微观结构发生巨大变化，原始颗粒破碎，大量细小颗粒被释放，样品中颗粒明显增加，说明浆体的相态转变与其微观结构有着直接联系。紫、棕色砒砂岩浆体

中细颗粒含量占比较大，前文提到细颗粒的增加导致滑动剪切行为[20]，当含水率增加，破坏浆体的絮凝结构，细颗粒悬浮在浆体中，颗粒分散，浆体更容易发生流动；另一方面，振荡作用使浆体中颗粒破碎，小颗粒释放，进一步使浆体均质化，且浆体结构更分散，细颗粒的“润滑”作用削弱浆体内部的摩擦力，加速液化的发生。衡朝阳等[25]在研究粗颗粒级配对含黏粒砂土抗液化性能的影响中发现，随着其粗颗粒由大变小，含黏粒砂土的抗液化能力逐渐降低。相对而言，红、白色砒砂岩浆体中粗颗粒含量较多，粗颗粒在振荡作用下不可避免地发生沉降，此时，浆体固液相分层，上层为细颗粒悬浮液，下层为粗颗粒沉降层，浆体质地不均一，粗颗粒不能继续破碎或起到润滑作用，导致浆体难以发生流动。

4 结 论

(1)随着剪切应变的增加，4种砒砂岩浆体储能模量和损耗模量减小，表现出应变变稀的特点。在含水率较低($w<50\%$)的样品中，紫、棕色砒砂岩浆体与红、白色砒砂岩浆体相比，线性黏弹区的应力和应变更大。在含水率较高($w\geqslant50\%$)的样品中，红、白色砒砂岩浆体与紫、棕色砒砂岩浆体相比，流动点的应力和应变更大。

(2)随含水率的增加，4种砒砂岩浆体的储能模量和损耗模量降低，线性黏弹区的应力和应变降低。

(3)细颗粒可增加浆体在线性黏弹区的抗剪强度和弹性，但细颗粒浆体受含水率影响较大，水分加入后，浆体结构破坏、抵抗变形的能力立即减弱，更容易发生相态转变。粗颗粒的存在使浆体非线性黏弹区弹性主导的范围增大，阻碍浆体的相态转变。

参考文献：

[1] 姚文艺，刘国彬.新时期黄河流域水土保持战略目标的转变与发展对策[J].水土保持通报，2020，40(5)：333-340.
YAO W Y，LIU G B. Strategic goal change and development countermeasures of soil and water conservation in Yellow river basin in new period[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(5)：333-340.

[2] 胡华，顾恒星，俞登荣.淤泥质软土动态流变特性与流变参数研究[J].岩土力学，2008，29(3)：696-700.
HU H，GU H X，YU D R. Research on dynamic rheological characteristics and rheologic parameters of sludge soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics，2008，29(3)：696-700.

[3] 辛鹏，吴树仁，石菊松，等.降雨诱发浅层黄土泥流的研究进展、存在问题与对策思考[J].地质论评，2015，61(3)：485-493.
XIN P，WU S R，SHI J S，et al. Comment on the progress in，problems and countermeasure on mudflow induced by rainfall[J]. Geological Review，2015，61(3)：485-493.

[4] HYUN K，WILHELM M，KLEIN C O，et al. A review of nonlinear oscillatory shear tests：Analysis and application of large amplitude oscillatory shear (LAOS)[J]. Progress in Polymer Science，2011，36(12)：1697-1753.

[5] HOLTHUSEN D，BATISTO A C，REICHERT J M. Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micromechanics：Brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content[J]. Rheologica Acta，2020，59(8)：545-563.

[6] 史泽华.黄土流变特性试验研究[D].兰州：兰州大学，2019.
SHI Z H. Experimental study on theological properties of loess[D]. Lanzhou：Lanzhou University，2019.

[7] NI H T，HUANG Y B. Rheological study on influence of mineral composition on viscoelastic properties of clay[J]. Applied Clay Science，2020，187：e105493.

[8] STOPPE N，HORN R. Microstructural strength of tidal soils：A rheometric approach to develop pedotransfer functions[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics，2018，66：87-96.

[9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京：中国农业出版社，2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd. Beijing：China Agriculture Press，2000.

[10] SOSIO R，CROSTA G B. Rheology of concentrated granular suspensions and possible implications for debris flow modeling[J]. Water Resources Research，2009，45(3)：eW03412.

[11] 王金晓，胡斐南，许晨阳，等.基于流变学法研究容重和含水率对土壤结构力学稳定性的影响[J].农业工程学报，2021，37(19)：147-155.
WANG J X，HU F N，XU C Y，et al. Effects of soil bulk density and water content on the mechanical stability of soil structure using rheological method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2021，37(19)：147-155.

[12] PÉRTILE P，HOLTHUSEN D，GUBIANI P I，et al. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry：Properties，difficulties and opportunities[J]. Scientia Agricola，2018，75(2)：154-162.

[13] MARKGRAF W，WATTS C W，WHALLEY W R，et al. Influence of organic matter on rheological properties of soil[J]. Applied Clay Science，2012，64(8)：25-33.

[14] 杨美卿.细泥沙絮凝的微观结构[J].泥沙研究，1986(3)：

73-78.

YANG M Q. Microscopic structure of fine mud aggregation and coagulation[J]. Journal of Sediment Research, 1986,(3):73-78.

[15] DESHPANDE A P. Oscillatory shear rheology for probing nonlinear viscoelasticity of complex fluids: Large amplitude oscillatory shear[M]. Rheology of Complex Fluids. New York: Springer,2010,31:87-110.

[16] HYUN K, KIM S H, AHN K H, et al. Large amplitude oscillatory shear as a way to classify the complex fluids[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2002,107(1/2/3):51-65.

[17] YANG W Y, YU G L. Rheological response of natural soft coastal mud under oscillatory shear loadings[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,2018,144(4):129-136.

[18] 任路滨.地震诱发泥流型黄土滑坡形成机理[D].西安:西安科技大学,2016.

REN L B. Forming mechanism of the mudflow-Landslides in loess triggered by the earthquake[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology,2016.

[19] JEONG S W, URGELES R, BAHK J J, et al. Rheological characteristics of marine sediments from the Ulleung Basin, east sea to estimate the mobility of submarine landslides[J]. Marine Geophysical Research, 2022, 43(2):e16.

[20] SMITH D W, REITSMA M, VULLIET L, et al. Towards an explanation for the residual friction angle in montmorillonite clay soil[J]. Environmental Geomechanics,2002:27-44.

[21] MAJOR J J, PIERSON T C. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries[J]. Water Resources Research,1992,28(3):841-857.

[22] SHAKEEL A, KIRICHEK A, CHASSAGNE C. Rheology and yielding transitions in mixed kaolinite/bentonite suspensions[J]. Applied Clay Science, 2021, 211: e106206.

[23] HOLTHUSEN D, PÉRTILE P, REICHERT J M, et al. Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2019,191:282-293.

[24] 杨闻宇.剪切载荷作用下高浓度黏性泥沙流变特性的实验研究[D].上海:上海交通大学,2014.

YANG W Y. Experimental study on the rheological properties of dense cohesive sediments under shear loadings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2014.

[25] 衡朝阳,裘以惠.颗粒级配对含蒙脱石砂土抗液化性能的影响[J].中国矿业大学学报,2002,31(2):31-34.

HENG C Y, QIU Y H. Experimental research on influence of grain size gradation on anti-liquefaction characteristics of clayey sand with montmorillonite[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2002,31(2):31-34.