

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.01.005 CSTR:32310.14.stbxb.2026.01.005

陈德,王云琦,张晓明,等.层理结构对砭砂岩抗剪特性的影响[J].水土保持学报,2026,40(1):110-119.

CHEN De, WANG Yunqi, ZHANG Xiaoming, et al. Influence of bedding structure on shear characteristics of Pisha sandstone[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):110-119.

## 层理结构对砭砂岩抗剪特性的影响

陈德<sup>1,2</sup>, 王云琦<sup>1,2</sup>, 张晓明<sup>3</sup>, 祁子寒<sup>1,2</sup>, 张广贺<sup>1,2</sup>, 闫相君<sup>1,2</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站,北京 100083; 2.北京林业大学水土保持学院重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083; 3.中国水利水电科学研究院,北京 100083)

**摘要:** [目的] 为深化对砭砂岩侵蚀机制的认识。 [方法] 通过设计不同层理结构[R、W、WR、WR(45°)、WRW、WRW(45°)、RWR、RWR(45°)]的重塑土进行固结不排水三轴试验,以研究层理结构对砭砂岩变形和失效、弹性指标和塑性指标的影响。 [结果] 1) 试样破坏模式多为劈裂、鼓胀2种破坏模式,在层理结构为WRW(45°)时,出现明显剪切贯穿面破裂带。 2) 层理结构对抗剪强度的影响主要体现在黏聚力上,对内摩擦角的影响无明显特征。对于红色砭砂岩和白色砭砂岩,不同层理结构砭砂岩的黏聚力均降低,且随着层理数增加,黏聚力逐渐降低。W黏聚力比WR增大52.39%,WR黏聚力比RWR、WR(45°)分别增大30.23%、13.02%。 3) 砭砂岩的初始切线模量随着层理结构由水平变倾斜(45°)而减小,破坏比随层理结构由水平变倾斜(45°)而增大。 [结论] 砭砂岩存在劈裂破坏(低围压100、200 kPa及倾斜层理)和鼓胀破坏(高围压300 kPa)2种主要破坏模式;层理倾角和数量的增加导致黏聚力及初始切线模量降低、破坏比增大。研究结果可为深化认识砭砂岩侵蚀机制提供科学参考和理论支持。

**关键词:** 砭砂岩; 三轴试验; 层理结构; 抗剪特性; 初始切线模量

中图分类号: TU411.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)01-0110-10

## Influence of Bedding Structure on Shear Characteristics of Pisha Sandstone

CHEN De<sup>1,2</sup>, WANG Yunqi<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>3</sup>, QI Zihan<sup>1,2</sup>, ZHANG Guanghe<sup>1,2</sup>, YAN Xiangjun<sup>1,2</sup>

(1. Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jinyun Mountain Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] To deepen the understanding of the erosion mechanism of Pisha sandstone. [Methods] By conducting consolidation undrained triaxial tests on remolded soil with different bedding structures [R, W, WR, WR(45°), WRW, WRW(45°), RWR, RWR(45°)], the influence of bedding structures on the deformation, failure, elastic parameters, and plastic parameters of Pisha sandstone was investigated. [Results] 1) The failure patterns were mainly splitting and bulging, and a distinct through-going shear rupture zone was observed when the bedding structure was WRW(45°). 2) The influence of bedding structure on shear strength was mainly reflected in cohesion, with no significant influence on the internal friction angle. For both red and white Pisha sandstone, cohesion decreased under different bedding structures and gradually declined with an increasing number of bedding layers. The cohesion of W specimens was 52.39% higher than that of WR specimens, the cohesion of WR specimens was 30.23% higher than that of RWR specimens, and the cohesion of WR specimens was 13.02% higher than that of WR(45°) specimens. 3) The initial tangent modulus of Pisha sandstone decreased when the bedding structure changed from horizontal to

收稿日期: 2025-04-27 修回日期: 2025-06-20 录用日期: 2025-06-30 网络收发日期(www.cnki.net): 2025-08-11

资助项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题项目(SKL2024TS10); 国家重点研发计划项目(2022YFF1300801); 国家自然科学基金项目(52379082); 国家电网有限公司总部管理科技项目(5200~202055134A-0-0-00)

第一作者: 陈德(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: 18335958420@163.com

通信作者: 王云琦(1979—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

inclined ( $45^\circ$ ), while the failure ratio increased with this change. [Conclusion] Pisha sandstone exhibits two main failure patterns: splitting failure under low confining pressures (100, and 200 kPa) and inclined bedding structures, and bulging failure under high confining pressure of 300 kPa. Increases in bedding inclination and quantity led to decreases in cohesion and initial tangent modulus, along with an increase in the failure ratio. The findings provide scientific reference and theoretical support for deepening the understanding of the erosion mechanism of Pisha sandstone.

**Keywords:** Pisha sandstone; triaxial test; bedding structure; shear characteristics; initial tangent modulus

Received: 2025-04-27

Revised: 2025-06-20

Accepted: 2025-06-30

Online(www.cnki.net): 2025-08-11

砒砂岩作为广泛分布于黄河流域的特殊沉积岩,因其浸水崩解、失水硬化、淋雨成泥、见风成沙的高度水敏特性,已成为水土流失灾害和工程地质风险的关键诱因。据调查<sup>[1-2]</sup>,砒砂岩区年均侵蚀模数高达3~4万 t/km<sup>2</sup>,所贡献的泥沙量在黄河中游泥沙总量中占比高达62%,在黄河下游泥沙淤积总量中占据25%,其力学性能的快速劣化直接威胁水利工程、边坡稳定及生态修复工程的长期安全性。抗剪强度作为表征岩土体结构稳定性的核心参数,研究其影响机制对地质灾害防治具有重要科学意义。

近年来,围绕砒砂岩或类似结构软岩抗剪特性的研究<sup>[3-4]</sup>已取得显著成果,砒砂岩的力学特性受多维因素的耦合控制,通过典型文献梳理得出,在水土耦合影响方面,因砒砂岩中矿物质对水响应差异,其黏聚力随体积含水率变化曲线分别为抛物线型和单调递减型,分异源于红色蒙脱石高膨胀性(膨胀压力2~5 MPa)易导致裂隙损伤,而白色方解石中水解的弱碱离子Ca<sup>2+</sup>吸附效应则有益于颗粒咬合力增强;在孔隙连通效应影响方面,向杰<sup>[5]</sup>、余敏等<sup>[6]</sup>用辐射显微CT观察揭示,红色和白色砒砂岩样品孤立状分布(孔隙率9.3%),白色砒砂岩管状连通孔隙(孔隙率14.7%)微观差异,因此,红白砒砂岩有效接触面积和吸水能力的不同,必然导致基质吸力主导的凝聚力不同;在颗粒级配和胶结机制影响方面,伍艳<sup>[7]</sup>、马勇等<sup>[8]</sup>的激光粒度分析与纳米压痕试验表明,红色砒砂岩剪切过程中较白色砒砂岩更容易出现界面脱黏现象,红色砒砂岩细颗粒( $d < 0.075$  mm 占比 $> 60\%$ )为团簇状胶结结构,而白色砒砂岩粗颗粒( $d > 0.25$  mm 占比 $> 45\%$ )以碳酸盐胶结为主,红层黏土-赤铁矿界面的结合能(1.8 eV/A<sup>2</sup>)方解石-石英胶结界面结合能(3.6 eV/A<sup>2</sup>)是黏土-赤铁矿胶结界面(3.6 eV/A<sup>2</sup>)的2倍。在外界因素方面,如冻融循环、干湿交替次数的增多导致砒砂岩黏聚力和内摩擦角呈指数型衰减,且黏聚力的衰减幅度高于内摩擦角,6次冻融循环后才趋于稳定,冻融和干湿环境的循环变化通过化学-物理协同作用加剧砒砂岩劣化和侵蚀<sup>[3,9]</sup>。

以往研究主要为砒砂岩矿物组成或微观颗粒尺度影响机理,砒砂岩的红色和白色矿物组成介于土和岩石间,兼具岩石的部分脆性特点和土壤部分黏性特点,一些学者借鉴混凝土本构<sup>[10]</sup>或邓肯-张本构<sup>[11-12]</sup>探讨该特点。目前研究成果多基于均质矿物成分的砒砂岩试验,但对其原生沉积构造-红白交替层理的结构效应仍缺乏系统性研究。层理结构是砒砂岩层状分布的一大特征,是原始成土过程和沉积环境的直接产物,因此,也是砒砂岩力学性质研究从微观颗粒到宏观剪切带跨尺度结合的关键因素。

因此,本研究基于摩尔-库伦强度理论<sup>[13]</sup>、邓肯-张双曲线理论<sup>[14]</sup>,通过设计层理数量、层理角度2个因素控制下,重塑砒砂岩试样的固结不排水三轴试验,探究层理结构对砒砂岩抗剪特性的影响,揭示不同层理结构下砒砂岩变形和失效、弹性指标和塑性指标的变化规律,以期为黄河流域砒砂岩地区地质灾害防治、水利工程及生态修复等工程实践提供关键力学参数和理论依据,对深化理解砒砂岩的侵蚀机制及地质灾害防治具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 砒砂岩的基本物理特性

试验用土取自鄂尔多斯市西南部的准格尔旗满连沟小流域,流域地处晋陕蒙交界的黄土丘陵交错区( $39^\circ 16' \sim 40^\circ 20' N$ ,  $110^\circ 05' \sim 111^\circ 27' E$ )(图1),属典型的中温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 $6.2 \sim 8.7$  °C,年平均降水量350~400 mm,集中于7—9月,且多以短历时暴雨出现,全年蒸发量是降水量的5~6倍,约为2 093 mm。满连沟流域沟谷网络密集,沟壑密度达3.2 km/km<sup>2</sup>,主沟道纵比下降12%~15%,沟道以黄绵土坡、砒砂岩风化母质夹层及少数裸岩立壁组成。因沉积环境多变,不同抗蚀性的红白砂岩或自然水平沉积,或因构造运动倾斜断裂,形成白色状凹-红色状凸的“五花肉景观”。试验所用红色砒砂岩干体积质量为植被格局以梁峁顶部、坡趾处的黄土分布一致,主要类型为原生针茅(*Stipa capillata* L.)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)

Spreng.)等草本,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、山杏(*Prunus sibirica* L.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)等人工林草措施,覆盖率不足40%。该自然条件塑造区域水力重力冻融复合侵蚀的典型特征,即使有退耕还林(草)、梯田整修及淤地坝建设等工程措施,侵蚀模数依然高于0.8万t/(km<sup>2</sup>·a),其中植被无法覆盖的砒砂岩沟壁和夹层依然是溯源侵蚀的重点区域。砒砂岩各项基本物理指标见表1。

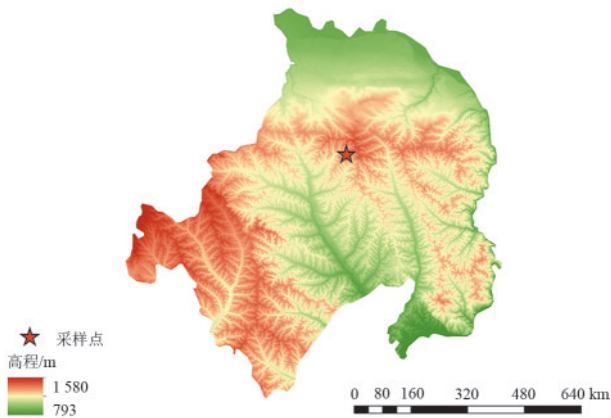


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographic location of the study area

## 1.2 试验方案

土样采集于砒砂岩研究区内坍塌沟壁,采用水平取样方式,取样时剥除强风化的表层50 cm土体,采样后将土样密封带回实验室,将土样风干、碾碎、过2 mm筛去除碎根系和砾石杂质,1 m土层深度内正常

固结砒砂岩的平均体积质量分别为1.6、1.5 g/cm<sup>3</sup>,自然体积含水率为9%~15%。因此,预设体积含水率为12%,均匀喷水搅匀,保鲜膜密封过夜备用。据砒砂岩沟壁自然壁面观察,砒砂岩的红白层理厚度为几到十几厘米不等,倾斜角度以近似水平为主,同时考虑自然状态下在不同深度或坡位主应力的角度随机性,设置0、1、2层理,分别为单一颜色红和白砒砂岩试样、红白二等分体积组合砒砂岩试样、三等分体积的红白砒砂岩相间组合试样,同时在2层理和3层理试样中控制层理的角度为0°和45°,共形成层理数量(3个水平)和层理角度(2个水平)的8种试样,分别为红白分布(RW)、红白红分布(RWR)、白红白分布(WRW)、倾斜层理(45°)的红白分布(RW45°)、红白红分布(RWR45°)、白红白分布(WRW45°)、纯红(R)和纯白(W)试样(图2)。具体做法为采用直径50 mm、高度100 mm的标准环刀制备试样,以层理面上下体积对称为原则,参考土工试验方法计算每环刀所需干燥的白色和红色砒砂岩试样质量,称量误差控制在0.1 g以内。装填时按照环刀高度多次等分,逐层填入,击实至预设高度后刮毛,然后填入下层砒砂岩,确保同色砒砂岩内无不均匀结构面存在。当有红白结构面角度设置时(45°),则将标准落锤替换为定制的45°楔截面PVC实心块,进行击实。土体压实完成后,将表面用切土刀刮至与环刀边缘齐平,随后进行脱模,装入三轴专用橡胶膜保湿备用。

表1 砒砂岩基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of Pisha sandstone

砒砂岩类型	体积质量/(g·cm <sup>-3</sup> )	比重	饱和含水率/%	饱和渗透系数/(mm·s <sup>-1</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
R	1.6	2.36	0.42	6.09×10 <sup>-8</sup>	28.98	19.43
W	1.5	2.36	0.39	5.84×10 <sup>-6</sup>	42.54	20.32

注:R、W分别为纯红色砒砂岩、纯白色砒砂岩试样;所测物理性质为3个土样的平均值。下同。

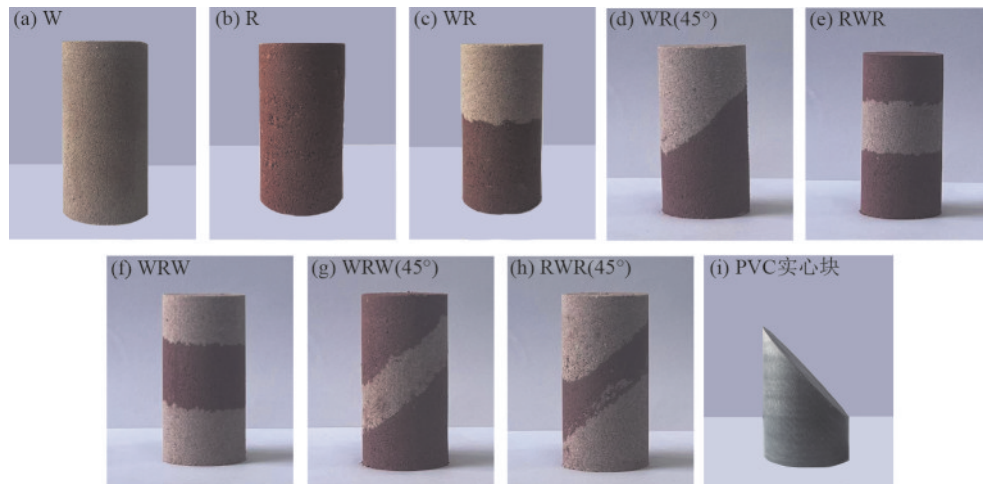


图2 不同层理结构的砒砂岩试样及定制实心块

Fig. 2 Pisha sandstone specimens with different bedding structures and customized solid blocks

三轴试验设备为GDSTTS应力路径三轴试验系统,采取固结不排水(CU)方案,使用标准应力路径三轴试验仪进行试验。对制备好的试样先采用真空抽气饱和和法饱和 2 h,严格按照规程进行装样及剪切,试验剪切加载速率设置为 0.1 mm/min,围压梯度设置分别为 100、200、300 kPa,统一剪切至 20% 应变,优先取峰值应力为强度值,无峰值取应变为 15% 对应的强度为破坏强度<sup>[15]</sup>。试验统计 24 个成功剪切试样的数据进行结果与分析。

1.3 砒砂岩弹性指标、塑性指标和强度指标的测算

砒砂岩的弹性指标包括初始切线模量和泊松比,初始切线模量的计算采用邓肯-张双曲线模型计算,邓肯-张模型<sup>[14]</sup>为:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$ 为轴向应力,kPa; $\sigma_3$ 为围压,kPa; $\sigma_1 - \sigma_3$ 为偏差应力,kPa; $\epsilon_1$ 为轴向应变,%; $a$ 、 $b$ 分别为反映土体的特征参数, $a$ 的倒数为应力-应变关系的初始切线模量,主要表示由围压引起的压硬性影响; $b$ 的倒数表示应力-应变曲线的渐进值,反映土体的极限抗剪强度。

根据该模型,对应力-应变曲线进行坐标转化,并通过线性拟合得到直线 $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ ,用该直线在 $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 轴上的截距 $a$ 来计算初始切线模量,计算公式为:

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_1 \quad (2)$$

泊松比是指材料在单向受拉或受压时,横向正应变与轴向正应变的比值,计算公式<sup>[16]</sup>为:

$$\nu = -\frac{\epsilon_r}{\epsilon_z} \quad (3)$$

式中: $\nu$ 为泊松比,1; $\epsilon_r$ 为径向应变,1; $\epsilon_z$ 为轴向应变,1。

砒砂岩的塑性指标包括黏聚力和内摩擦角,由不同围压梯度下对应的偏差应力值绘制莫尔圆,求公切线得到。

砒砂岩破坏比表示土样破坏时的应力差与应力差极限的比值,根据邓肯-张模型定义<sup>[17]</sup>,计算公式为:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = b(\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (4)$$

式中: $R_f$ 为破坏比,一般为 0.5~1.0; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏应力差,kPa; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为极限主应力差,kPa。

2 结果与分析

2.1 不同层理结构与围压下砒砂岩变形特征与破坏模式

对所有剪切试样应力-应变数据整理,由图 3 可知,采用邓肯-张模型拟合效果绝大多数试样均呈应变硬化规律,即随着剪切位移的增大,偏差应力先线性增大,而后缓慢屈服,偏差应力随着剪切应变缓慢增大,无明显的偏差应力峰值出现,而在个别高围压试样中应力-应变曲线中出现应力下降,表现为应变软化现象。整体而言,邓肯-张模型拟合的理想本构曲线与实测的应力应变散点几乎重合( $R^2 > 0.93$ ,  $p < 0.05$ ),而部分应变软化型试样因出现偏差应力峰值(图 3b)。模型拟合曲线在轴向应变较大时与试验值基本接近,轴向应变较小时,拟合曲线明显大于试验值,当应力应变曲线达到峰值点时,拟合曲线值小于试验值,出现明显的离散性。由图 4 可知,所有试样的剪切破坏类型统计,成功试验的 24 个土样中,应变软化试样共计 21 个,该现象多出现在 WRW(45°)和 RWR(45°)试样中,且在中低围压条件下(100、200 kPa)更为普遍,而在高围压条件下(300 kPa)则表现为应变硬化型曲线(3 个),无偏差应力峰值出现。

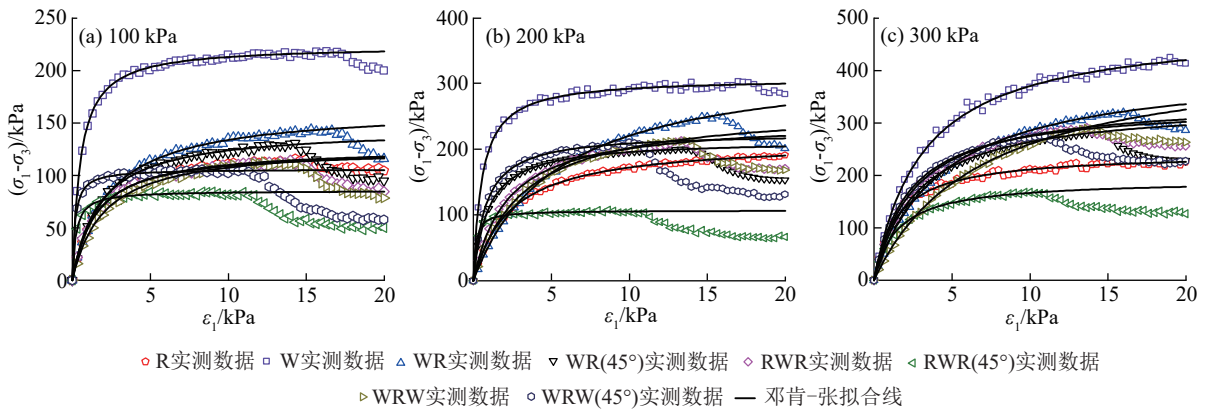


图 3 不同层理结构试样的应力-应变拟合曲线  
 Fig. 3 Stress-strain fitting curves of specimens with different bedding structures  
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

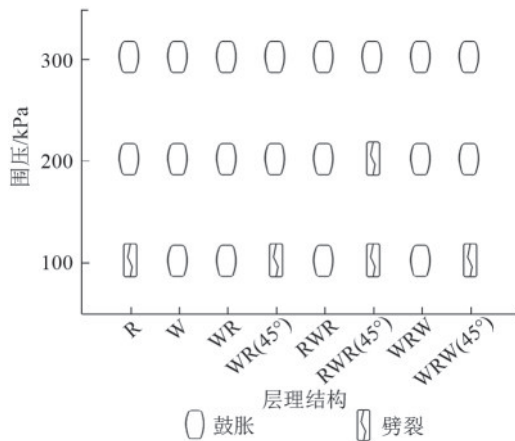


图 4 不同层理结构和围压下试样的破坏模式

Fig. 4 Failure patterns of specimens under different bedding structures and confining pressures

所有试样的剪切破坏模式统计(图 5)可知,砒砂岩在三轴应力环境下有劈裂、鼓胀 2 种破坏模式,劈裂破坏发生在低围压和倾斜层理结构[WR(45°)、WRW(45°)、RWR(45°)],鼓胀破坏出现在高围压(300 kPa),是典型的塑性变形,试验后试样外鼓,轴向缩短,没有明显的剪裂面。试样的破坏模式受层理结构和围压的显著影响。由图 4e 与图 4f 比较可知,剪切后试样中部明显鼓出,轴向变短,没有明显的断裂面;在倾斜层理结构中,图 4f 与图 4h 比较可知,鼓胀更为明显,试样出现明显的贯穿剪切破坏面;对比图 4c 和图 4d 可以发现,随着层理结构由水平变倾斜,鼓出变大,说明层理结构影响土体破坏模式。



图 5 不同层理试样的剪切破坏示意

Fig. 5 Schematic diagram of shear failure in specimens with different bedding structures

2.2 不同层理结构与围压下砒砂岩弹性指标

24 个成功试验的试样应力-应变曲线采用邓肯-张模型线性拟合[公式(2)]而成。由图 6 可知,除部分剪切初始阶段的应力应变散点落在拟合线上方外,点( $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3), \epsilon_1$ )基本落在拟合线上,但部分应变软化的试样散点分布存在偏差(图 6g),由图 6 中拟合曲线换算的初始切线模量[公式(2)]和由试验应变计算[公式(3)]的泊松比(图 7b)可知,单因素方差分析(表 2)表明,层理角度和围压对初始切线模量的影响均达到显著水平( $p < 0.1$ ),而泊松比未受到显著影响。

围压从 100 增至 300 kPa 时,3 类试样的  $E_0$  均呈增高趋势(图 7a)。以 W 试样为例,其  $E_0$  从 100 kPa 时的 156.49 MPa 显著提升至 300 kPa 时的 560.8 MPa

(增幅 258.4%),且误差线范围随围压增大逐渐收窄,表明高围压下材料弹性响应趋于稳定。在相同围压下,层理结构对  $E_0$  的影响强度排序为  $R > W > WR > WR(45^\circ) > RWR > RWR(45^\circ) > WRW > WRW(45^\circ)$ 。300 kPa 时, R 试样的  $E_0$  (689.3 MPa) 较 W 试样 (293.8 MPa) 高 84.3%, 倾斜层理试样的初始切线模量则相对小于同等材料排列数量的水平层理试样。300 kPa 时, WRW(45°) 试样的  $E_0$  (118.69 MPa) 较 WRW 试样 (181.75 MPa) 低 34.7%。此差异源于不同砒砂岩材料层间黏结强度与应力传递方向的综合影响,试样的水平层理方向与主应力轴一致,层间红白砒砂岩颗粒的定向排列促进轴向荷载的高效传递;而试样的倾斜层理方向在垂直的偏差应力下倾

向于诱发层间应力集中和剪切滑移。

泊松比变化规律与  $E_0$  呈弱正相关(图 7b), R 试样的  $\nu$  从 0.25 增至 0.3, W 试样从 0.21 增至 0.26, 而 RWR 试样的  $\nu$  介于二者之间(0.24~0.28)。值得注意的是, 当围压  $\geq 200$  kPa 时, R 与 W 试样的泊松比( $\nu$ )

差异由初始的 0.06 缩小至 0.04, 表明高围压可部分抵消层理方向导致的变形各向异性。泊松比( $\nu$ )随围压的变化较初始切线模量相对平缓, 围压的升高对材料的侧向膨胀变形有明显的抑制作用, 从而增强轴向承载能力。

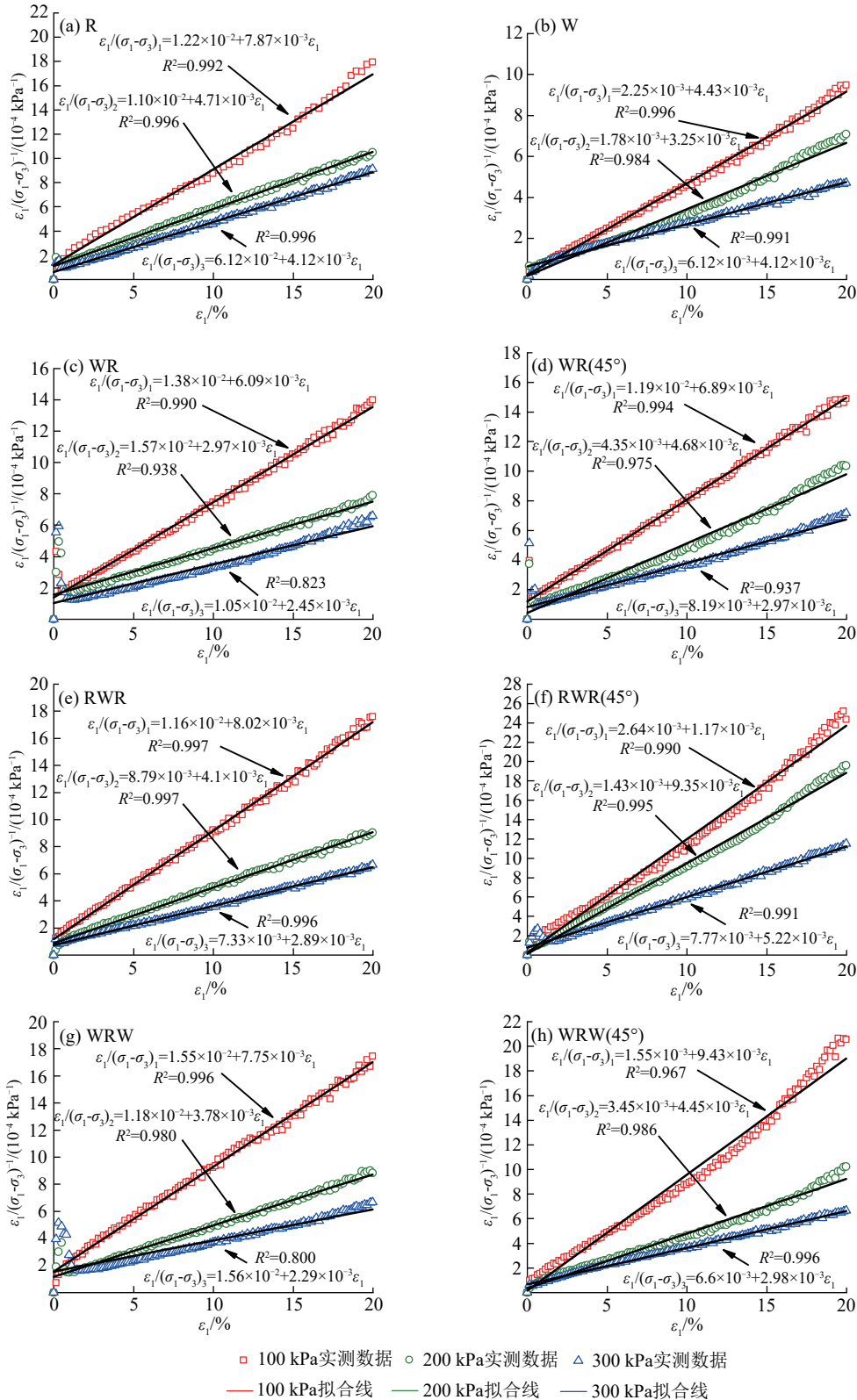


图 6 不同层理结构试样的初始切线模量拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of initial tangent modulus for specimens with different bedding structures

表 2 层理结构和围压对不同指标的显著性  
Table 2 Significance of bedding structure and confining pressure on different indicators

指标类型	指标	围压/kPa	层理数量 $p$	层理倾角 $p$
弹性	初始切线模量	100	0.075*	0.088*
		200	0.001**	0.057*
		300	0.083*	0.015**
	泊松比	100	0.105	0.094*
		200	0.815	0.192
		300	0.879	1.000
塑性	黏聚力	100		
		200	0.006**	0.585
		300		
	内摩擦角	100		
		200	0.725	0.633
		300		
强度	破坏比	100	0.021**	0.016**
		200	0.017**	0.023**
		300	<0.001**	<0.001**

注:表中  $p$  用于衡量组间平均值差异的显著性;\*,\*\* 分别表示边缘显著、极显著。

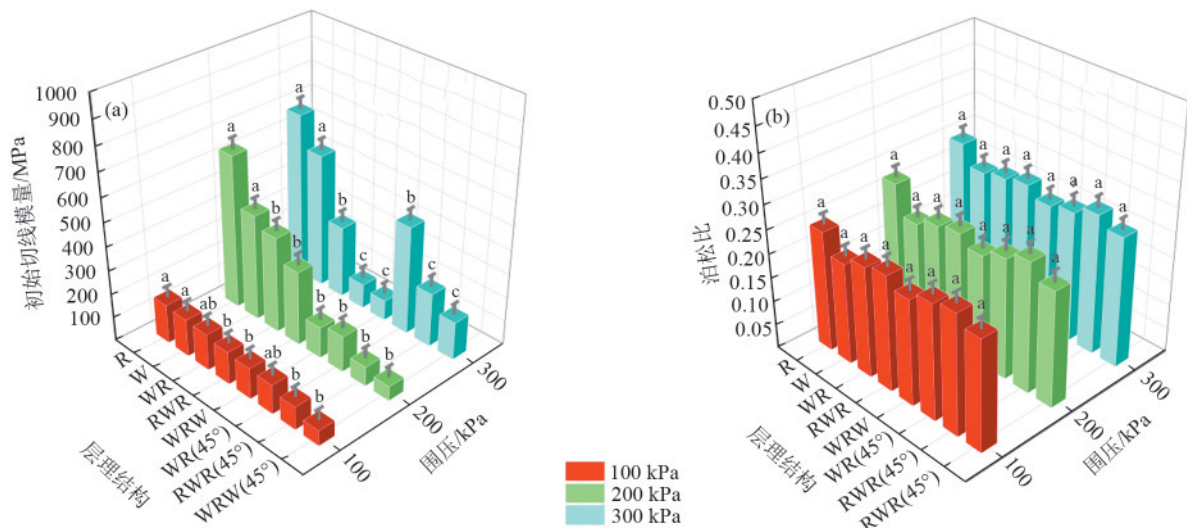
### 2.3 层理结构对砒砂岩抗剪特性的影响

由图 8 试样抗剪强度指标可知,层理结构对砒砂岩抗剪强度的影响主要在于黏聚力。当层理角度一定时,随着层理数量的增多,黏聚力下降。在 45° 层理

角度试样中,WR(45°)、RWR(45°)试样的黏聚力分别为 21.5、17.45 kPa, WR(45°)的黏聚力比 RWR(45°)增大 23.21%;当层理数量一定时,随着层理角度的增大,黏聚力下降。在层理数量为 2 层试样中,WRW、WRW(45°)试样黏聚力分别为 11.96、11.13 kPa。而内摩擦角随层理数量和层理角度间的变化无明显规律,为 12.72°~25.58°,表明层理结构对砒砂岩的力学性质有显著影响。水平层理和倾斜层理的存在破坏材料的均匀性,导致黏聚力下降,但增加层理结构面上材料的咬合摩擦。

### 2.4 不同层理结构与围压下砒砂岩强度指标

由图 9 可知,砒砂岩试样破坏比,由层理结构和围压对不同指标的显著性分析(表 2)可知,层理结构的改变对于破坏比影响显著。当层理角度和围压一定时,随着层理数量增多,破坏比增大。围压为 100 kPa 水平层理角度试样中,W、WR、WRW 试样破坏比分别为 0.88、0.89、0.94;当层理角度和层理数量一定时,随着围压增大,破坏比增大。在水平层理角度、层理数量为 2 层试样中,RWR 试样在 100、200、300 kPa 下的破坏比分别为 0.87、0.91、0.95;当层理数量和围压一定时,随着层理角度的增大,破坏比增大。在围压为 100 kPa、层理数量为 2 层试样中,WRW、WRW(45°)试样破坏比分别为 0.91、0.93。



注:图柱上方不同小写字母表示不同类型试样同一参数间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 7 不同层理结构试样的初始切线模量和泊松比

Fig.7 Initial tangent modulus and Poisson's ratio of specimens with different bedding structures

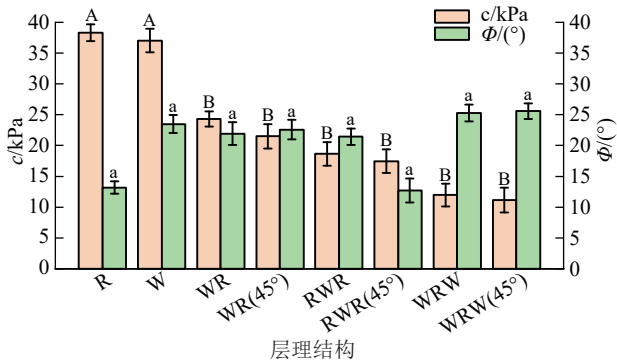
## 3 讨论

### 3.1 层理结构对变形特征及破坏模式的影响

砒砂岩因成岩程度低、胶结性差的特点<sup>[18]</sup>,导致层理面成为力学薄弱带。本研究表明,不同围压下多倾斜层理的砒砂岩试样出现劈裂失效现象。阳军生等<sup>[19]</sup>对层状砂岩研究表明,低围压条件下,层理面与主应力方向呈 45° 时,剪切应力沿层理结构面集中,

引发层理间滑移和失效,最终形成劈裂破坏。与砂岩在低围压下的剪切劈裂现象机理一致<sup>[20]</sup>,而在高围压下,围压抑制层理面的剪切滑移,迫使颗粒重排和孔隙压缩,表现为鼓胀破坏<sup>[21]</sup>。骆丕昭等<sup>[15]</sup>对根土复合体研究发现,较低围压梯度出现劈裂现象,而在较高围压下则多表现为鼓胀变形,说明砒砂岩的抗剪特性中保留常规土体甚至含根土体的共性特

点。考虑到砒砂岩具备部分岩性特点,李晓丽等<sup>[3,11]</sup>在对砒砂岩单轴压缩试验中发现,干燥砒砂岩(含水率 $<7\%$ )抗压强度在进入塑性阶段后,随应变环面增大,达到峰值后又急剧下降,该现象与土的抗压特性迥然不同,因此借鉴混凝土本构-萨恩斯模型<sup>[22]</sup>来描述其应力应变关系;在重塑砒砂岩试样三轴试验中通过邓肯-张本构验证了砒砂岩应力应变曲线形态的适用性(应变硬化型),低围压下应变软化型曲线的宏观结果则可通过模型估算的极限偏差应力和破坏比换算得到。本研究在前人基础上增加“层理数量”和“层理”角度 2 个方面因素的考虑,得到类似结论。但不可否认,应变软化型曲线的散点和理想化邓肯-张曲线的离散程度很高,除破坏比转化的极限偏差应力可和试验观测的偏差应力值吻合外,其他应力应变散点距离邓肯-张曲线相差甚远,无法胜任砒砂岩应力应变行为的准确预测,也反映当前砒砂岩力学性质的研究局限性,单一采用双曲线的假设建立本构关系未必是最合理的选择,诸如“二次抛物线型”“四分之一椭圆型”等<sup>[23]</sup>曲线的假设还有待未来采用数值手段进行验证。



注:图柱上方不同大写字母表示不同试样间黏聚力差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示不同试样间内摩擦角差异显著( $p < 0.05$ )。

图 8 不同层理结构试样的黏聚力和内摩擦角

Fig. 8 Cohesion and internal friction angle of specimens with different bedding structures

### 3.2 层理结构对初始切线模量的非线性影响

本研究表明,砒砂岩初始切线模量对层理角度具有显著敏感性,其数值随层理角度增大呈非线性衰减趋势(图 7a)。当层理角度由水平 $0^{\circ}$ 增至 $45^{\circ}$ 时,初始切线模量降幅达 $23.5\%$ ,与LIU等<sup>[24]</sup>针对层状砂岩的力学响应规律具有相似性。本研究观测的模量呈持续下降趋势,与LIU等<sup>[24]</sup>提出的“先降低-后升高-再降低”3阶段变化特征存在差异,可能源于砒砂岩弱胶结特性与常规砂岩成岩差异导致的层理面力学行为分异<sup>[25]</sup>。从细观力学角度分析,层理面作为弱胶结界面(胶结度仅为完整岩体 $30\% \sim 50\%$ <sup>[26]</sup>)。在层理角度方面,层理面是岩石内部弱面,层理角度为 $0^{\circ}$ 时,砂

岩的破坏模式主要表现为沿层理面的剪切破坏,当层理角度增加时,层理面与加载方向形成一定角度,层理面处的材料不连续性和应力传递效率的降低,促成应力的局部集中,使得岩石更容易沿着层理面发生剪切破坏<sup>[27]</sup>;在层理数量方面,层理数量增多增加砒砂岩试样内的异质性结构面数量,同时初始切线模量和塑性参数相对较小的白色砒砂岩材料的体积比也增多,同等受力条件下,层理两侧的材料变形比例不一致更容易导致局部渐进破坏的积累。

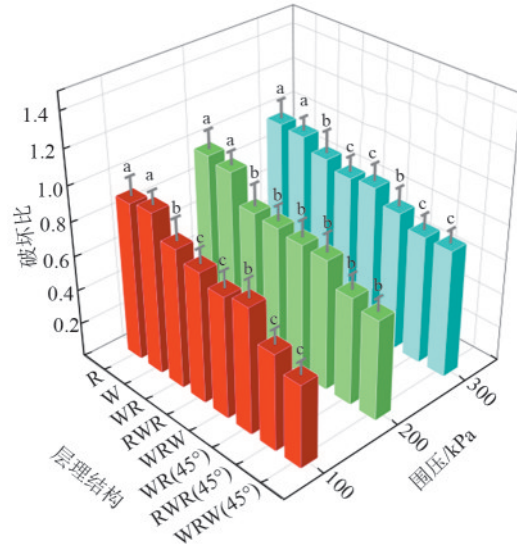


图 9 不同层理结构试样的破坏比关系

Fig. 9 Relationship of failure ratio of specimens with different bedding structures

### 3.3 层理结构对黏聚力与内摩擦角的影响

本试验中,当层理结构由水平变倾斜时,黏聚力下降,与GAO等<sup>[28]</sup>在层理结构对黏聚力的影响方面研究结论一致,且随着层理数增多,黏聚力下降,层理数和层理角度的变化对内摩擦角影响并无明显规律,主要与砒砂岩颗粒组成情况及其内部间摩擦特性和胶结物的性质有关<sup>[4]</sup>。红色砒砂岩中细砂含量较多,结构连接较致密,导致滑动过程中以黏聚力为主,而白色砒砂岩以粗砂为主,颗粒间具有较强的摩擦力和咬合力<sup>[4]</sup>;红色砒砂岩的胶结物质主要为蒙脱石和方解石,白色砒砂岩的胶结物质主要是高岭石<sup>[29]</sup>,蒙脱石遇水膨胀,方解石易分解,而高岭石较稳定。该特性使得红色砒砂岩和白色砒砂岩混合后,试样颗粒组成、颗粒物间孔隙分布及胶结物质发生改变,从而使得黏聚力受到显著影响。

综上,当层理结构由水平变倾斜( $45^{\circ}$ )时,砒砂岩的层理结构对抗剪特性的影响主要体现在破坏模式、黏聚力和内摩擦角、初始切线模量和破坏比等方面,而对于内摩擦角和泊松比无明显影响。本研究采用分层装样与表面整平工艺制备试样<sup>[18]</sup>,尽可能

模拟原状土的结构特征,系统分析层理结构差异对砒砂岩多维度指标的影响机制。虽然能够很好地控制和模拟原状土的性质,但在实际应用中角度可能部分存在差异且自然区域内可能存在更复杂的层理组合模式。此外,土壤水分、植物根系等因素也是影响土壤抗剪特性重要参数<sup>[30-31]</sup>。未来研究不同区域的砒砂岩应更关注于原位试验或采集原状样品,以更全面地评估该地区土壤的力学行为,为工程实践提供更具普适性的理论支持。

## 4 结论

1) 砒砂岩存在劈裂破坏(低围压 100、200 kPa 及倾斜层理)与鼓胀破坏(高围压 300 kPa) 2 种主要破坏模式,层理结构和围压对土体变形有显著影响( $p < 0.05$ ),低围压下,应力应变关系呈弹性变形-塑性应变硬化-峰值-应变软化-残余强度的发展模式;高围压下,应力应变关系表现为应变硬化,无峰值出现。

2) 层理结构对砒砂岩抗剪强度的影响主要在于黏聚力,黏聚力随层理数量的增多和层理角度的增大而下降。内摩擦角随层理数量和角度的变化无明显规律,为  $12.72^{\circ} \sim 25.58^{\circ}$ 。

3) 砒砂岩的初始切线模量和破坏比受层理结构与围压条件的显著影响( $p < 0.05$ )。初始切线模量随着层理数量增加、层理角度增大及围压的增加而降低,破坏比则相应增大。

### 参考文献:

- [1] LI C M, ZHANG T T, WANG L J. Effect of dosage of fly ash and NaOH on properties of Pisha sandstone-based mortar[J]. *Aci Materials Journal*, 2016, 113(2): 173-183.
- [2] 乔荣荣, 韩艳, 季树新, 等. 基于地形指数的砒砂岩黄土区土壤侵蚀分析[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(5): 175-182.  
QIAO R R, HAN Y, JI S X, et al. Analysis of soil erosion in loess area of sandstone based on terrain index[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(5): 175-182.
- [3] 耿凯强, 李晓丽. 冻融循环下红色砒砂岩水泥土力学性能试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(6): 643-648.  
GENG K Q, LI X L. Experimental study on mechanical properties of red Pisha-sandstone cement soil under freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(6): 643-648.
- [4] 伍艳, 蔡怀森, 刘慧, 等. 砒砂岩抗剪强度与其结构特征关系[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(5): 21-26.  
WU Y, CAI H S, LIU H, et al. Relationship between shear strength and structural characteristics of Pisha sandstone[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(5): 21-26.
- [5] 向杰. 基于 CT 扫描试验的砒砂岩孔隙分布特征研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(5): 112-115.

XIANG J. Microstructure and pore distribution of the siltstone based on X-ray scanning[J]. *Yellow River*, 2020, 42(5): 112-115.

- [6] 余敏, 寿建峰, 郑兴平, 等. 基于 CT 成像的三维高精度储集层表征技术及应用[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(6): 664-666.  
SHE M, SHOU J F, ZHENG X P, et al. 3D high resolution reservoir characterization technique based on CT imaging and application[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(6): 664-666.
- [7] 伍艳. 黄河中游砒砂岩物化特性与侵蚀机理研究及小流域二元治理模式集成与示范[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.  
WU Y. Study on physical and chemical characteristics and erosion mechanism of soft sandstone in the Middle Yellow River and integration and demonstration of dual governance model in small watershed[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- [8] 马勇, 杨程宇, 蔡超, 等. 红层砂岩纳米级致色剂赋存状态及地质意义: 以鄂尔多斯盆地白垩统志丹群红层砂岩为例[J]. *地质学报*, 2024, 98(6): 1803-1813.  
MA Y, YANG C Y, CAI C, et al. The occurrence state and geological significance of nanoscale colorants in red bed sandstones: A case study of red sandstone of Lower Cretaceous Zhidan Group, Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(6): 1803-1813.
- [9] 余长超, 陈涛, 韩流, 等. 冻融循环下排土场软岩边坡抗剪特性及时效性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(10): 50-57.  
SHE C C, CHEN T, HAN L, et al. Research on shear characteristics and timeliness of soft rock slope of dump under freezing-thawing cycle[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(10): 50-57.
- [10] 李晓丽, 于际伟, 刘李杰, 等. 鄂尔多斯砒砂岩力学特性的试验研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(5): 118-123.  
LI X L, YU J W, LIU L J, et al. The experimental research on mechanical properties of Pisha-sandstone of Erdos[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(5): 118-123.
- [11] 李明玉. 冻融循环下砒砂岩重塑土力学性能及本构模型的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.  
LI M Y. Study on mechanical properties and constitutive model of soft rock remodeled soil under freeze-thaw cycle[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [12] 郭雒敏, 李晓丽, 王文, 等. 坡度对紫红色砒砂岩击溅侵蚀的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(1): 1-9.  
GUO L M, LI X L, WANG W, et al. Influence of slope on the splash erosion of mauve Pisha-sandstone in bare areas[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(1): 1-9.
- [13] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

- LI G X. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [14] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5):1629-1653.
- [15] 骆丕昭, 王云琦, 李通, 等. 基于三轴 UU 试验的土体含水率对根土复合体强度特性的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6):153-160.
- LUO P Z, WANG Y Q, LI T, et al. Effect of soil moisture content on strength characteristics of root-soil complex based on triaxial UU test [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6):153-160.
- [16] 刘娜, 刘方成, 张小强, 等. 三轴试验中橡胶-砂混合物泊松比计算方法研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(6):16-22.
- LIU N, LIU F C, ZHANG X Q, et al. Study of Poisson's ratio calculation method for rubber-sand mixture under the triaxial test[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(6):16-22.
- [17] 覃诗卉, 江学良, 杨慧, 等. 木质素-稻草改良土的力学特性与修正 Duncan-Chang 模型[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2025, 34(1):8-15.
- QIN S H, JIANG X L, YANG H, et al. Mechanical properties and modified Duncan-Chang model of lignin-rice straw improved soil[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2025, 34(1):8-15.
- [18] 李晓丽, 翟涛, 张强. 反复剪切作用下砒砂岩土体力学性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):154-159.
- LI X L, ZHAI T, ZHANG Q. Experiment on mechanical properties of Pisha-sandstone at recurrent shear [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21):154-159.
- [19] 阳军生, 张聪, 肖小文, 等. 基于岩体层理特性的非线性抗剪强度准则研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(1):126-131.
- YANG J S, ZHANG C, XIAO X W, et al. Research on non-linear shear strength criterion for layered rock mass with micro-discontinuity[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(1):126-131.
- [20] 邢鲜丽, 李同录, 巨昆仑, 等. 非饱和黄土强度参数的试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2):252-259.
- XING X L, LI T L, JU K L, et al. Research on the strength parameters of unsaturated loess [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(2):252-259.
- [21] 丁旭升, 张凌凯, 樊培培. 不同排水方式的湿陷性黄土力学特性试验及邓肯-张模型的改进[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6):20-26.
- DING X S, ZHANG L K, FAN P P. Mechanical property test of collapsible loess with different drainage methods and improvement of Duncan-Chang model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6):20-26.
- [22] 余小伍. CFRP-混凝土-钢管组合柱轴压性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- YU X W. Research on behaviors of hybrid CFRP-concrete-steel double-skin tubular columns [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [23] 陈丽华, 余新晓, 刘秀萍, 等. 林木根系本构关系[J]. 山地学报, 2007, 25(2):224-228.
- CHEN L H, YU X X, LIU X P, et al. Study on the constitutive relation of forest root system [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(2):224-228.
- [24] LIU D Q, GUO Y P, LING K, et al. A whole process damage constitutive model for layered sandstone under uniaxial compression based on Logistic function[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(7):2411-2430.
- [25] 李斌, 黄达, 姜清辉, 等. 层理方向对砂岩断裂模式及韧度的影响规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10):1854-1862.
- LI B, HUANG D, JIANG Q H, et al. Fracture pattern and toughness of layered sandstone influenced by layer orientation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10):1854-1862.
- [26] 李斌, 黄达, 马文著. 层理面特性对砂岩断裂力学行为的影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3):858-868.
- LI B, HUANG D, MA W Z. Study on the influence of bedding plane on fracturing behavior of sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3):858-868.
- [27] 宋战平, 刘洪珂, 郑方, 等. 考虑层理倾角的硬质砂岩力学行为及破裂响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(12):167-175.
- SONG Z P, LIU H K, ZHENG F, et al. Mechanical behavior and failure response characteristics of hard sandstones considering bedding dip angles [J]. Coal Geology and Exploration, 2023, 51(12):167-175.
- [28] GAO T, SUN W, LI Z Y, et al. Study on shear characteristics and failure mechanism of inclined layered backfill in mining solid waste utilization [J]. Minerals, 2022, 12(12):e1540.
- [29] 伍艳, 杨忠芳, 刘慧, 等. 砒砂岩物质组成及其对养分含量的影响[J]. 人民黄河, 2016, 38(6):18-21.
- WU Y, YANG Z F, LIU H, et al. Effect of composition on nutrient of Pisha sandstone [J]. Yellow River, 2016, 38(6):18-21.
- [30] 李姜瑶, 余冬梅, 张西营, 等. 西宁盆地黄土区边坡土体含水量对植物根-土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2):281-292.
- LI J Y, YU D M, ZHANG X Y, et al. Effect of soil moisture content on shear strength of rooted soil in Loess regions of Xining basin [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2):281-292.
- [31] XU R, HE Y S, CHENG H, et al. Mechanical mechanism of soil consolidation by plant roots in loess area of northern Shaanxi [J]. Scientific Reports, 2025, 15:e8014.