DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2019.05.004

砒砂岩抗剪强度与其结构特征关系

伍 艳[1,2],蔡怀森[2],刘 慧[2],杨忠芳[1]

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083; 2. 黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003)

摘要:通过直剪试验、X 射线衍射、电镜分析的方法,分析了红色砒砂岩和白色砒砂岩力学性能随含水率的变化规律,观测了砒砂岩的颗粒粒径分布、矿物组成及微观形貌,探讨了砒砂岩结构特征对抗剪强度的影响。结果表明,含水率对红色和白色砒砂岩抗剪强度的影响不同,红色砒砂岩抗剪强度随含水率增大先增大后减小,黏聚力起主导主用,白色砒砂岩抗剪强度随含水率增大而减小,摩擦力和咬合力起主导作用;红色和白色砒砂岩的主要矿物是石英、长石、蒙脱石和方解石,长石的易于风化,蒙脱石的遇水膨胀及方解石的易分解,导致砒砂岩力学性能较差;白色砒砂岩以粗砂为主,含少量细砂,颗粒有明显棱角,孔隙较大,导致颗粒间具有较强的摩擦力和咬合力,而红色砒砂岩细砂含量较多,结构连接较致密,导致滑动过程中以黏聚力为主导,咬合摩擦作用较弱。

关键词:抗剪强度;微观形貌;结构特征;砒砂岩;含水率

中图分类号:TV882.1;TU457 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-7647(2019)05-0021-06

Relationship between shear strength and structural characteristics of Pisha sandstone//WU Yan[1,2], CAI Huaisen[2], LIU Hui[2], YANG Zhongfang[1] (1. *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*; 2. *Yellow River Institute of Hydraulic Research*, *Zhengzhou* 450003, *China*)

Abstract: The mechanical properties of red and white Pisha sandstone with moisture content were investigated by direct shear test, X-ray diffraction and electron microscope analysis. The particle size distribution, mineral composition and micromorphology of Pisha sandstone were observed, and the influence of structural characteristics of Pisha sandstone on shear strength was also discussed. The results show that moisture content has different effects on the shear strength of red and white Pisha sandstone. The shear strength of red Pisha sandstone increases first and then decreases with the increase of moisture content dominated by the cohesive force, and the shear strength of white Pisha sandstone decreases with the increase of moisture content dominated by the friction and bite force. The main minerals of red and white Pisha sandstone are quartz, feldspar, montmorillonite and calcite. The easy weathering of feldspar, easy water expansion of montmorillonite, and the easy decomposition of calcite lead to the poor mechanical properties of Pisha sandstone. The white Pisha sandstone is composed of coarse sand and a small amount of fine sands. The particles have obvious edges and large pores, which lead to strong friction and bite force among the particles. The red Pisha sandstone is mainly composed of fine sand, and the structure is more compact, so in the sliding process, cohesion is the dominant factor, and the frictional action is less important.

Key words: shear strength; micromorphology; structure characteristics; Pisha sandstone; moisture content

砒砂岩是一种特殊的地质体,主要分布于我国的鄂尔多斯高原,其总面积为 1.67 万 km^2[1]。砒砂岩成岩程度低,无水如石,遇水如泥,加之砒砂岩区属于我国北方由半干旱向干旱、由黄土高原向沙漠的过渡区,风蚀、水蚀、冻融侵蚀等交替发生,土壤侵蚀剧烈,区域土壤侵蚀模数可高达 3 万 $t/(a \cdot km^2)$ 以上,且产生的泥沙有 80% 左右的粒径大于 0.05 mm,该区成为黄河粗泥沙的核心来源区。砒砂岩是由砂岩、砂页岩、泥质砂岩所构成的岩石互层,外观呈现红、白、黄等多颜色相间,以红色、白色居多。砒砂岩区强烈的侵蚀与砒砂岩的力学性质有着密切关系,其力学性质是砒砂岩发生一系列地质问题的内在原因[2-4]。岩体力学性能与岩石组分、结构有直接关系,因此研究砒砂岩抗剪强度与其岩性结构特征关系对于揭示砒砂岩侵蚀机理,深化对砒砂岩侵蚀规律的认识,研发砒砂岩侵蚀治理技术,具有重大的现实意义与理论价值。

目前,一般取抗压、抗剪、抗拉强度表征砒砂岩的力学性质[4-5]。根据李晓丽等[6]研究,砒砂岩具有剪

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0504503);"十二五"国家科技支撑计划(2013BAC05B01);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2016-23)

作者简介:伍艳(1981—),女,高级工程师,博士研究生,主要从事环境岩土工程研究。E-mail: 21131474@qq.com

切应力峰值现象,含水率增加到一定程度时,峰值强度降低,同时残余强度变化也有相似规律,而且在反复剪切试验过程中,会出现明显的剪缩、剪胀规律。不少研究认为,组成砒砂岩的岩石矿物易被风化,加之矿物颗粒间为孔隙式胶结[7],砒砂岩的力学性质与其矿物成分、化学成分、岩性组合、微结构等特征密切相关[8]。例如,砒砂岩颗粒粒径、颗粒平面分维和颗粒定向分维越小,其抗压、抗拉强度越大[4];砒砂岩晶层间内外溶液中电解质粒子(离子、分子等)浓度差引起的渗透压力差,是导致蒙脱石晶体胀缩引发砒砂岩结构破坏的主要动力之一[9];砒砂岩颗粒大小不均,抗风化能力弱,易于产生渗透破坏[7]。另外,含水率对砒砂岩的抗剪强度等力学性质也有影响,尤其是对无侧限抗压强度影响较大[9]。由于砒砂岩区位的独特性,未见国外学者相关成果的报道,仅对单一的砂岩孔隙结构、矿物颗粒组成、微裂隙、冻融作用下力学性能变化等方面有一些研究[10-13]。总起来说,目前从微观特征和宏观现象相结合对砒砂岩抗剪强度方面的研究还是比较薄弱的,难以深化认识砒砂岩遇水溃散的机理。为此,本文利用水岩试验、X 射线衍射、电镜分析的方法,从砒砂岩矿物成分、微观形貌及结构等宏观、微观特征相结合的角度,研究相同试样区不同颜色砒砂岩的抗剪强度与其微观结构特征的关系,以期为揭示砒砂岩无水坚如磐石、遇水溃散分解的侵蚀机理提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 取样方法

以准格尔旗暖水乡砒砂岩区黄河一级支流皇甫川流域的二老虎沟小流域作为研究区域(图 1),研究对象是红色、白色砒砂岩。取样部位主要在二老虎沟坡面,取样方法为机械挖掘。首先将坡面开挖至 1 ~2 m 深,该深度基本上可以保证取到红、白砒砂岩

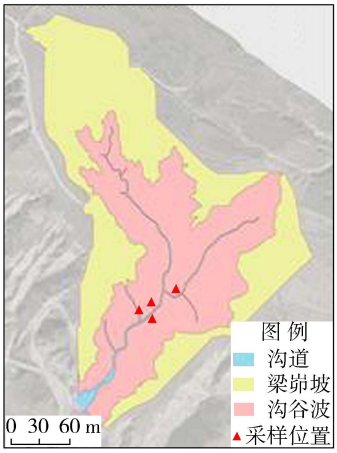


图 1 二老虎沟地貌

试样,然后人工水平分层取样。在图 1 中所示 4 个采样位置分别采集红色、白色砒砂岩样品各 4 件,试样取出后利用保鲜膜进行封装。试样的干密度为 1.39 ~1.60 g/cm^3,含水率为 17.6% ~18.5%。

1.2 直剪试验方法

利用南京电力自动化设备厂生产的直剪仪进行抗剪强度试验。首先将红色、白色砒砂岩的原状样品自然风干,再通过机械碾碎,过 2 mm 筛并均匀喷水,置于密闭容器内 24 h 以上。然后,分别按含水率为 5%、8%、11%、14%,制备两种颜色砒砂岩的试件各 4 份,共计 8 份。以红色砒砂岩干密度 ρ_d = 1.59 g/cm^3、白色砒砂岩干密度 ρ_d = 1.50 g/cm^3 作为密度控制指标,利用击实方法将散状砒砂岩击入环刀内,制成高度为 2 mm、截面积为 30 cm^2 的试样。将红、白两组砒砂岩各取 4 个试样,分别施以垂直压力 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 进行直剪试验,剪切速率为 0.8 mm/min。

1.3 矿物成分分析方法

利用日本理学 D/max-2500PC 型 X 射线衍射仪分析砒砂岩矿物成分。扫描范围(2θ)为 5° ~80°,扫描速率为 2°/min,扫描步长为 0.02°。衍射图的横坐标为 2θ,纵坐标设为 X 射线衍射强度 I 与最强衍射峰强度 I_0 的比值 I/I_0,由此生成用于矿物成分分析的 X 射线衍射图。

根据从 X 射线衍射图提取晶面间距 d、强度、峰形等衍射特征参数,以标准矿物成分的衍射特征作为基准,对两者进行定性对比。在此基础上,通过计算衍射峰强度、高度关系等各矿物成分的质量分数,进一步开展定量分析。

1.4 微观形貌观测方法

采用日本电子 SM-6700F 扫描电子显微镜分析砒砂岩试样的微观结构。首先用锯条将砒砂岩试样小心地制成约为 5 mm×3 mm×2 mm 的长方体,使其自然风干脱水,用砂纸由粗到细依次对观测面进行打磨,并避免留下划痕,然后将打磨好的表面颗粒及碎屑用吹管清理干净。为防止电荷积累和放电现象对拍摄图像清晰度的影响,在观测面镀一层金膜。把处理好的样品置于显微镜下,旋转放大旋钮到合适的放大倍数,再通过比较不同放大倍数的图片效果,最后确定放大倍数为 1 000 倍时,图像达到最佳聚焦状态。

2 试验结果及分析

2.1 抗剪强度特性

2.1.1 抗剪形貌特征

红色砒砂岩和白色砒砂岩分别在竖向压力 300 kPa作用下进行直剪试验后的试样形貌见图 2。

随着剪切的进行,在荷载的作用下砒砂岩颗粒被不断挤压,孔隙率变小,垂直方向的颗粒不断倾斜压密,当颗粒间接触力不能抵抗水平推力时,发生剪切破坏。红色砒砂岩剪切后基本上保持了原有形貌,没有出现破碎或裂缝等现象,而白色砒砂岩试样则出现了明显的约 2 cm 的裂痕和缺损现象,产生的破碎颗粒较多,其重量是红色砒砂岩试样的 2 倍,说明红色砒砂岩的抗剪强度较白色的大。

(a) 红色砒砂岩

(b) 白色砒砂岩

图 2　剪切试验后砒砂岩形貌

2.1.2　黏聚力及内摩擦角特性

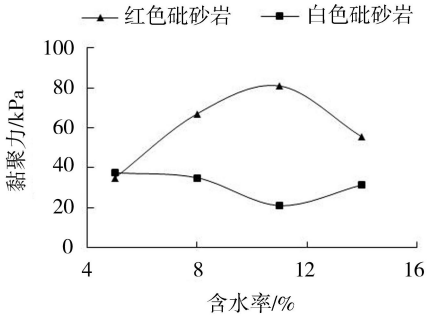
黏聚力和内摩擦角是构成土体抗剪强度的重要指标[14-15]。莫尔应力圆公式为

$$\tau_f = c + \sigma \mathrm{tg}\varphi \tag{1}$$

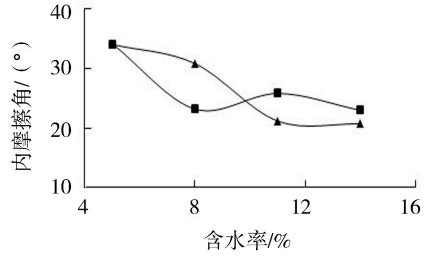
式中:τ_f 为抗剪强度,kPa;σ 为滑动面上的法向应力,kPa;c 为黏聚力,kPa;φ 为内摩擦角,(°)。

利用式(1)计算了红色砒砂岩和白色砒砂岩分别在含水率为 5%、8%、11%、14% 条件下的黏聚力和内摩擦角(图 3)。

对于红白两种颜色的砒砂岩来说,黏聚力随含水率的变化规律是完全不同的。红色砒砂岩的黏聚力随着含水率变化的曲线呈现为上凸型,即先增大后减小;而白色砒砂岩的则呈下凹型,即低含水率和高含水率时黏聚力大而中等含水率时小。例如,对于红色砒砂岩试样而言,含水率从 5% 增加到 11% 时,黏聚力从 35.0 kPa 增大到 81.0 kPa;含水率为 11% 时,黏聚力达到最大,随后黏聚力随着含水率的进一步增大反而降低。试样含水率较低时,砒砂岩颗粒间只存在连结力较大的强结合水,并随着含水率的增大而增大。随含水率进一步增加,砒砂岩颗粒间的弱结合水含量开始增大,连结力下降,黏聚力



(a) 黏聚力



(b) 内摩擦角

图 3　含水率对砒砂岩黏聚力和内摩擦角的影响

随之减小,此时的试样具有一定的可塑性。当含水率继续增加,砒砂岩中薄膜水层越来越厚,甚至开始存在自由水时,砒砂岩颗粒间的连结力大幅降低,黏聚力也急剧降低。

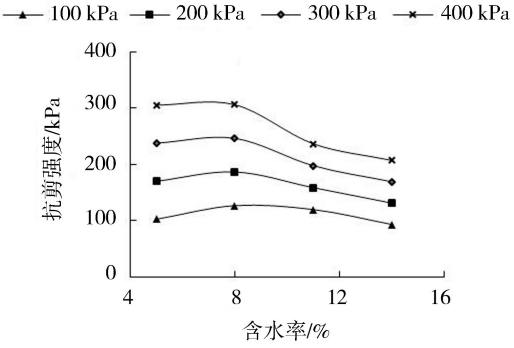
白色砒砂岩的黏聚力随着含水率的增大先减小而后增大。例如随着含水率从 5% 增加到 11%,黏聚力从 37.5 kPa 减小至 21.1 kPa;含水率为 11% 时,黏聚力达到最小值,仅约为 5% 含水率的 56%,随后黏聚力随着含水率的进一步增大而增大,在含水率为 14% 时,黏聚力增加到 30 kPa 以上。与红色砒砂岩相比,由于白色砒砂岩黏粒较少、离散大,故含水率对其黏聚力影响相对较小。

整体来看,红色砒砂岩黏聚力明显高于白色砒砂岩的黏聚力,说明白色砒砂岩颗粒之间的连接牢固程度较低。不过,红、白两种颜色的砒砂岩的内摩擦角随含水率的变化规律基本一致,均随含水率的增大整体呈减小趋势,只是当含水率大于 10% 以后,红色砒砂岩试样的内摩擦角递减率较白色的大。随含水率增加内摩擦角减小的主要原因是由于随着含水率的增加,砒砂岩颗粒间的水膜会增厚,润滑作用增大,从而削弱了摩擦力和咬合力。

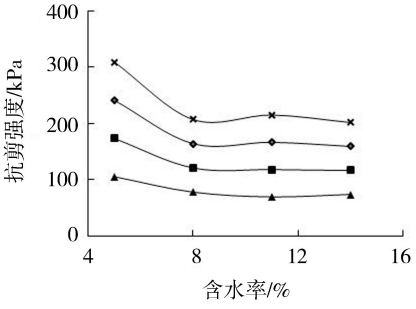
2.1.3　抗剪强度特性

图 4 是在 5%、8%、11%、14% 含水率和 100 kPa、200 kPa、300 kPa 、400 kPa 竖向压力下红色、白色砒砂岩试样的直剪试验结果。含水率对红色、白色砒砂岩抗剪强度的影响都是明显的,随含水率增加,两种砒砂岩试样抗剪强度均随含水率增大呈整体减小趋势,但是,两者的变化过程有一定差别。红色砒砂岩试样的含水率从 5% 增加至 8% 时,

其抗剪强度处于微增状态,其后随含水率增加而不断降低,且降低较为明显;白色砒砂岩试样的含水率从5%增加至8%时,抗剪强度明显降低,其后趋于平稳。不过,两者的抗剪强度均在含水率为8%时发生了转折,表明含水率8%可能是砒砂岩抗剪强度变化的临界,这还有待更多的试验加以验证。



(a)红色砒砂岩



(b)白色砒砂岩

图4 不同颜色砒砂岩抗剪强度与含水率关系

2.2 抗剪强度与结构特征关系

2.2.1 抗剪强度与矿物组成关系

矿物组成是岩体结构的主要参数。不少研究均表明[7-8,16-17],石英、长石(钾长石和斜长石)、蒙脱石及方解石是砒砂岩的主要矿物成分,但不同颜色的砒砂岩所含矿物成分的质量分数是不同的(表1),其中白色砒砂岩中石英的质量分数较高,蒙脱石的质量分数较低,分别为40%和15%,而红色砒砂岩中石英的质量分数相对较低,蒙脱石的质量分数相对较高,分别为35%和20%,由此也就造成了红色砒砂岩与白色砒砂岩的力学性质的差异。总起来说,相对于自然界其他砂岩中石英的质量分数而言,红色、白色砒砂岩中石英的质量分数均较低,而蒙脱石的质量分数又相对较高。

表1 砒砂岩各矿物成分质量分数 %

色别	石英	长石		黏土矿物			方解石	白云石	赤铁矿
		钾长石	斜长石	蒙脱石	伊利石	高岭石			
红色	35	18	18	20	1	2	3	1	1
白色	40	15	20	15	1	3	2	3	1

白色、红色砒砂岩中蒙脱石的质量分数分别为15%、20%,从图3可以看出红白两种砒砂岩中蒙脱石的质量分数对黏聚力和内摩擦角的影响。在各含水率(5%、8%、11%、14%)条件下,蒙脱石质量分数的变化对黏聚力的影响相较于对内摩擦角的影响大,除含水率为5%时黏聚力变化不明显外,含水率为8%、11%、14%下的黏聚力均随蒙脱石质量分数的增大而增大,特别是含水率为11%时,增大最为明显。由于蒙脱石是一种2∶1型的黏土矿物,其在形成过程中会发生阳离子置换,引起蒙脱石的晶格形变,使得蒙脱石晶胞带负电荷,一些外部带正电的金属阳离子就被吸附到晶层表面。此时,外部水分子易渗入到蒙脱石晶层间,使得吸附在晶层间的金属阳离子与水分子发生水合反应,形成水合力,加之其他外部因素的影响作用,蒙脱石随之发生膨胀,膨胀严重时其体积可以达到原体积的40倍[9]。膨胀后,岩体中部分空隙关闭,气压增大,这是红色砒砂岩随着含水率增加,抗剪能力最终变差的主要原因之一。

白色、红色砒砂岩中长石(钾长石、斜长石)质量分数差别不大,分别为35%和36%,长石作为一种不稳定的矿物,解理和双晶都很发育,极易风化形成高岭石,导致岩石结构被破坏,抵抗侵蚀能力减弱。白色、红色砒砂岩中方解石的质量分数较接近,分别为2%和3%,方解石化学性质较为活泼,在长期的水蚀作用下,易与岩体裂缝及孔隙中的水和二氧化碳发生反应,生成易溶的碳酸氢钙,并会溶解流失,在砒砂岩体内形成新的孔隙,孔隙率将随之增大,进而导致砒砂岩随含水率增加而抗剪强度随之降低。

2.2.2 抗剪强度与颗粒组成关系

白色砒砂岩级配较红色的粗(表2),白色砒砂岩的粒径主要分布在0.25~0.1 mm,其质量分数为57.6%,其次是0.25~0.5 mm和0.075~0.005 mm,其质量分数分别为19.5%和13.6%。而红色砒砂岩的粒径则主要分布在0.075~0.005 mm,其质量分数为54.6%,其次是0.25~0.1 mm,其质量分数为31.1%。

表2 砒砂岩颗粒粒径分布

色别	不同粒径组质量分数/%					
	≥0.5 mm	0.25~0.5 mm	0.25~0.1 mm	0.1~0.075 mm	0.075~0.005 mm	≤0.005 mm
红色	0	1.4	31.1	5.9	54.6	7.0
白色	1.7	19.5	57.6	6.2	13.6	1.4

由于白色砒砂岩以粗颗粒为主,细颗粒含量少,因此其滑动作用在剪切过程中逐渐被减弱,后期以咬合摩擦为主。红色砒砂岩的细颗粒含量较多,滑动过程中以黏聚力为主导,咬合摩擦作用较弱,因此这也是其力学性能低于白色砒砂岩的原因之一。

根据粒径分布曲线图,红色和白色砒砂岩的级配指标值如表3所示,表中d_{10}、d_{30}、d_{60}分别为在粒

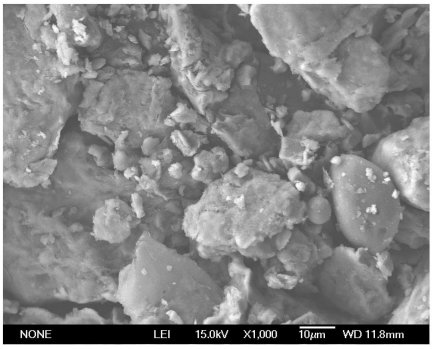
径分布曲线上小于该粒径的颗粒含量占总质量10%、30%和60%的粒径；C_u 为不均匀系数；C_c 为曲率系数。从表3中可以看出，红色砒砂岩的 C_u 和 C_c 分别为9.865和1.251，白色砒砂岩的 C_u 值和 C_c 值则分别为5.500和2.457，红色和白色砒砂岩的不均匀系数均大于5，且曲率系数均在1～3范围内，说明两种颜色砒砂岩均级配良好，但相比于白色砂岩，红色砂岩的粒径范围更大，导致两种砒砂岩抗剪强度随含水率的增加变化规律不同，白色砒砂岩由于细颗粒含量少，级配相对较差，抗剪强度在含水率从5%增加到8%时发生骤降。

表3　砒砂岩级配指标

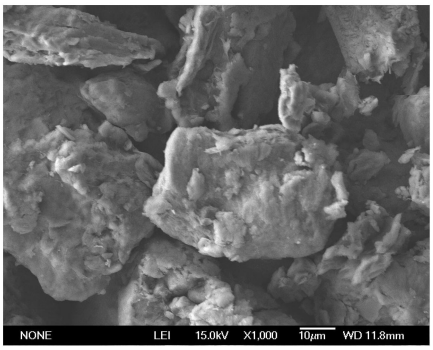
色别	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{60}/mm	C_u	C_c
红色	0.0074	0.026	0.073	9.865	1.251
白色	0.0340	0.125	0.187	5.500	2.457

2.2.3　抗剪强度与微观形貌关系

根据放大1000倍的扫描电镜图片分析，红色砒砂岩(图5(a))颗粒表面凹凸不平，有层片状板结颗粒，絮状结构中分布有细小的空洞，表明构成砒砂岩颗粒的物质是致密的，渗透性较差，雨水不易下渗。白色砒砂岩(图5(b))有明显突出的尖棱角，颗粒粒径较大，相对单一且独立，颗粒之间的孔隙连通性较好，黏结物质较少，颗粒间具有较强的摩擦力和咬合力，且渗透性较好，雨水容易下渗，降低砒砂岩的抗剪强度，尤其是加之在重力作用下，容易造成崩塌、塌陷。另外，颗粒级配越粗，孔隙率往往越大，更利于水分渗入，发生水岩作用，溶解产生的矿物转化量也就越大，进一步加大孔隙度，使砒砂岩力学性质降低[18-19]。



(a)红色砒砂岩



(b)白色砒砂岩

图5　砒砂岩电镜扫描图片

3　结　论

a. 含水率对红、白砒砂岩抗剪强度的影响不同，红色砒砂岩抗剪强度随含水率增大先增大后减小，黏聚力起主导作用，白色砒砂岩抗剪强度随含水率增大而减小，颗粒间的摩擦力和咬合力起主导作用。红色和白色砒砂岩力学性能的差异与矿物组成、颗粒组成及微观形貌有着密切联系。

b. 红色和白色砒砂岩的主要矿物是石英、长石、蒙脱石和方解石。白色砒砂岩中这4种矿物组成的质量分数分别为40%、35%、15%和2%，红色砒砂岩中这4种矿物组成的质量分数分别为35%、36%、20%和3%。在当地特殊的自然条件下，长石的易风蚀，方解石的易水蚀，以及蒙脱石的遇水膨胀特性，使岩体完全失去抵抗风蚀和水蚀的能力，从而引起水土流失。

c. 红色和白色砒砂岩均级配良好，但相比于白色砂岩，红色砂岩的粒径范围更大，使得白色砒砂岩抗剪强度在含水率从5%增加到8%时发生骤降。白色砒砂岩的粒径主要分布在0.25～0.1mm，其质量分数为57.6%，其次是0.25～0.5 mm和0.075～0.005 mm，其质量分数分别为19.5%和13.6%，白色砒砂岩以粗砂为主，含少量细砂，颗粒有明显棱角，孔隙较大，颗粒间具有较强的摩擦力和咬合力，而黏聚力较弱；而红色砒砂岩的粒径主要分布在0.075～0.005 mm，其质量分数为54.6%，其次是0.25～0.1 mm，质量分数为31.1%，细砂含量较多，絮状结构连接较致密，导致滑动过程中以黏聚力为主导，咬合摩擦作用较弱。

参考文献：

[1] 王愿昌，吴永红，李敏，等. 砒砂岩地区水土流失及其治理途径研究[M]. 郑州：黄河水利出版社，2007.

[2] 姚文艺，肖培青，王愿昌，等. 砒砂岩区侵蚀治理技术研究进展[J]. 水利水电科技进展，2019，39(5)：1-9.(YAO Wenyi，XIAO Peiqing，WANG Yuanchang，et al. Research progress on soil erosion control technologies in Pisha sandstone areas[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2019，39(5)：1-9.(in Chinese))

[3] 毕慈芬，王富贵. 砒砂岩地区土壤侵蚀机理研究[J]. 泥沙研究，2008(1)：70-73.(BI Cifen，WANG Fugui. Research on soilerosion mechanism in soft rock regions[J]. Journal of Sediment Research，2008(1)：70-73.(in Chinese))

[4] 叶浩，石建省，侯宏冰，等. 内蒙古南部砒砂岩岩性特

征对重力侵蚀的影响[J]. 干旱区研究, 2008, 2(3): 403-405. (YE Hao, SHI Jiansheng, HOU Hongbing, et al. Effect of the lithological characters of Pisha sandstone on gravity erosion in south Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(3): 403-405. (in Chinese))

[5] 吴利杰,李新勇,石建省,等. 砒砂岩的微结构定量化特征研究[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 597-602. (WU Lijie, LI Xinyong, SHI Jiansheng, et al. Quantitative characteristics of the microstructure of Pisha-sandstone [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2007, 28(6): 597-602. (in Chinese))

[6] 李晓丽, 翟涛, 张强. 反复剪切作用下砒砂岩土壤力学性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 154-159. (LI Xiaoli, ZHAI Tao, ZHANG Qiang. Experiment on mechanical properties of Pisha-sandstone at recurrent shear [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 154-159. (in Chinese))

[7] 叶浩,石建省,李向全,等. 砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析[J]. 地球学报, 2006, 27(2): 145-150. (YE Hao, SHI Jian sheng, LI Xiangquan, et al. The effect of soft rock lithology upon its anti-erodibility [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(2): 145-150. (in Chinese))

[8] 石迎春,叶浩,侯宏冰,等. 内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J]. 地球学报, 2004, 25(6): 659-664. (SHI Yingchun, YE Hao, HOU Hongbing, et al. The internal cause of the erosion in "Pisha" sandstone area, southern Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(6): 659-664. (in Chinese))

[9] 谭罗荣. 蒙脱石晶体膨胀和收缩机理研究[J]. 岩土力学, 1997, 18(3): 13-18. (TAN Luorong. Study on mechanism of expansion and shrinkage of the montmorillonite crystal[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(3): 13-18. (in Chinese))

[10] LIN M L, JENG F S, TSAI L S, et al. Wetting weakening of tertiary sandstones-microscopic mechanism [J]. Environmental Geology, 2005, 48(2): 265-275.

[11] WORSTER M G, WETTLAUFER J S. Premelting dynamics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38(1): 427-452.

[12] MUTLUTÜRK M, ALTINDAG R, TÜRK G. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 237-244.

[13] MARTÍNEZ-MARTÍNEZ J, BENAVENTE D, GOMEZ-HERAS M, et al. Nonlinear decay of building stones during freeze-thaw weathering processes[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38(1): 443-454.

[14] 介玉新,李伟瀚,张彬. 用加速度方法分析隧洞的稳定性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 301-306. (JIE Yuxin, LI Weihan, ZHANG Bin. Stability analysis of tunnel using the acceleration method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(4): 301-306. (in Chinese))

[15] 褚福永,朱俊高,翁厚洋,等. 堆石料强度及变形特性缩尺效应试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 381-386. (CHU Fuyong, ZHU Jungao, WENG Houyang, et al. Experimental study of scale effect on strength and deformation characteristics of rock-fill materials [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 381-386. (in Chinese))

[16] 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): 181-13. (LI Xiaoli, YU Jiwei, LIU Lijie, et al. The experimental research on mechanical properties of Pisha-sandstone of Erdos[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 181-13. (in Chinese))

[17] 姚文艺, 肖培青, 刘慧, 等. 黄河流域砒砂岩区辨识与抗蚀促生关键技术及应用[R]. 郑州:黄河水利科学研究院, 2017.

[18] 王强恒, 孙旭, 刘昀, 等. 室内模拟水岩作用对砒砂岩风化侵蚀的影响[J]. 人民黄河, 2013, 35(4): 45-47. (WANG Qiangheng, SUN Xu, LIU Yun, et al. Indoor modeling the effect of water-rock interaction on the weathering and erosion of Pi-sandstone[J]. Yellow River, 2013, 35(4): 45-47. (in Chinese))

[19] 杨才千,刘强,瞿冯,等. 砒砂岩风化特性试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(5): 10-15. (YANG Caiqian, LIU Qiang, QU Feng, et al. Experimental study on weathering degree of Pisha sandstone[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(5): 10-15. (in Chinese))

(收稿日期:2018-08-13　编辑:雷燕)

(上接第 20 页)

[15] SOMASUNDARAN P, MARKOVIC B, KRISHNAKUMAR S, et al. Handbook of surface and colloid chemeistry [M]. New York: CRC Press, 1997.

[16] TEPPEN D J, HEMMINGER J C. Getting specific about specific ion effects science [J]. Science, 2008, 319(5867): 1197-1198.

[17] NIGHTINGALE Jr E R. Phenomenological theory of ion solvation effective radii of hydrated Ions[J]. Journal of Physical Chemistry, 1959, 63(9): 1381-1387.

[18] NORRISH K. The swelling of montmorillonite [J]. Discussions of the Faraday Society, 1954, 18(18): 120-134.

[19] 李长明. 砒砂岩中蒙脱石膨胀抑制机理及改性试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.

(收稿日期:2018-07-24　编辑:雷燕)