

# W-OH 砒砂岩固结体干湿循环特性及其细观机理

马雯波<sup>1,2</sup>, 丁哲<sup>1,2</sup>, 吴智仁<sup>4</sup>, 梁止水<sup>3</sup>, 杨才千<sup>1,3</sup>

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 湘潭大学 湖南岩土力学与工程安全重点实验室, 湖南 湘潭 411105; 3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京, 210096; 4. 江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** [目的] 对 W-OH 砒砂岩固结体干湿循环特性及其细观机理进行研究, 为实现 W-OH 固结改良砒砂岩及其耐久性研究提供科学依据。[方法] 采用 W-OH(亲水性聚氨酯材料)对砒砂岩进行固结处理, 基于无侧限抗压试验、三轴抗压试验, 研究其在干湿循环条件下的力学性能, 并结合 SEM, EDS 和称重法对其干湿循环后样品微观结构、元素和质量损失进行分析, 以获得其破坏机理。[结果] W-OH 砒砂岩固结体的无侧限抗压强度、弹性模量和黏聚力在 1~3 次干湿循环后升高; 在 3~9 次干湿循环后, 固结体的力学强度降低; 9 次之后, 剩下高黏结力的 W-OH 胶结体包裹于砒砂岩颗粒表面, 力学强度趋于稳定。内摩擦角在 1~9 次干湿循环后上下波动, 9 次干湿循环后趋于稳定。采用碳元素分析和质量损失分析相结合的方法对土样中 W-OH 流失特性进行评价, 发现土样在 1~9 次干湿循环中 W-OH 胶结体逐渐降低, 并在 9 次干湿循环后达到稳定, 这与上述宏观力学变化的规律相似, 验证了破坏机理, 为判断其长期特性提供理论依据。[结论] 研究表明可将 9 次干湿循环后达到稳定的 W-OH 砒砂岩固结体的力学性质作为土体的长期力学特性。

**关键词:** 干湿循环; W-OH 砒砂岩固结体; 无侧限抗压强度; 三轴抗压强度; 微观结构分析

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2018)06-0022-07

**中图分类号:** TU411.2, S157

**文献参数:** 马雯波, 丁哲, 吴智仁, 等. W-OH 砒砂岩固结体干湿循环特性及其细观机理[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 22-28. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.004. Ma Wenbo, Ding Zhe, Wu Zhiren, et al. Mechanical properties and meso-mechanism of Pisha sandstone with W-OH solidified under drying-wetting cycles[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 22-28.

## Mechanical Properties and Meso-mechanism of Pisha Sandstone with W-OH Solidified Under Drying-wetting Cycles

MA Wenbo<sup>1,2</sup>, DING Zhe<sup>1,2</sup>, WU Zhiren<sup>4</sup>, LIANG Zhishui<sup>3</sup>, YANG Caiqian<sup>1,3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hu'nan 411105, China; 2. Hunan Key Laboratory of Geomechanics and Engineering Safety, Xiangtan University, Xiangtan, Hu'nan 411105, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 4. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract:** The effects of drying-wetting cycles on the mechanical properties and meso-mechanism of the hydrophilic polyurethane material(W-OH) solidified Pisha sandstone were conducted to provide scientific basis for the study of W-OH consolidation amending Pisha sandstone and its durability. W-OH was used to consolidate the Pisha sandstone in this study. Macroscopic mechanical properties of the W-OH solidified Pisha sandstone were tested by unconfined compression experiment and triaxial compression experiment. To obtain the meso-mechanism, SEM, EDS and weighing methods were used to analyze the microstructure, elements, and quality losses of the sample after drying-wetting cycles. The results showed that unconfined compressive strength, elastic modulus, and cohesion of the W-OH solidified Pisha sandstone increased after drying-wetting cycles of 1~3 times. During drying-wetting cycles of 3~9 times, the mechanical strength of the W-OH solidified Pisha sandstone decreased. the rest solidified W-OH with high cohesive forces remained on the

收稿日期: 2018-05-22

修回日期: 2018-06-21

资助项目: 国家重点研发计划项目“砒砂岩区生态安全保障技术”(2017YFC0504505); 国家自然科学基金项目(11502226); 湖南省重点研发项目(2017WK2032)

第一作者: 马雯波(1986—), 男(汉族), 浙江省宁波市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土力学研究。E-mail: mawenbo@xtu.edu.cn.

通讯作者: 杨才千(1974—), 男(汉族), 河南省邓州市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事砒砂岩固结促生技术方面的研发。E-mail: yccqjxx@hotmail.com.

surface of the Pisha sandstone particles and the mechanical strength tended to be stable after drying-wetting cycles 9 times. The internal friction angle varied with fluctuation from 1 to 9 time drying-wetting cycles and stabilized after 9 times. The W-OH loss in the solidified soil samples was evaluated by the carbon element analysis and mass loss analysis. The solidified W-OH gradually decreased during drying-wetting cycles of 1~9 times and became stable after 9 times, which proved meso-mechanism of macroscopic mechanical properties above-mentioned and provided theoretical basis for long-term characteristics of W-OH consolidated Pisha sandstone. The results of this study suggest that the mechanical properties of W-OH solidified Pisha sandstone after 9 drying-wetting cycles can be considered as the long-term mechanical properties of this material.

**Keywords: drying-wetting cycles; W-OH solidified Pisha sandstone; unconfined compressive strength; triaxial compressive strength; microstructure**

砒砂岩极易受水力的侵蚀,遇水后其物理、力学性质急剧变差,无水坚硬如顽石,有水则松软如烂泥<sup>[1-3]</sup>。因此,砒砂岩区进入黄河的泥沙量多年平均近  $2.0 \times 10^8$  t,淤积到黄河下游河道的粗泥沙约为  $1.0 \times 10^8$  t,占到黄河下游每年平均淤积量的 25%<sup>[4]</sup>。大量的泥沙进入黄河,对当地经济和整个黄河中游地区的生态环境产生了极其恶劣的影响,已经发展到了不得不治的地步<sup>[5]</sup>。国家建设了一系列水土保持工程和治理技术研究项目,强调对砒砂岩区的治理。目前生物措施<sup>[6-8]</sup>和工程措施<sup>[9]</sup>是治理砒砂岩区水土流失问题的主要对策。对于生物措施,植物仅能在砒砂岩侵蚀沟的底部种植,不能达到抗蚀、固土和促生治理的综合性要求。对于工程措施,由于砒砂岩基本没有抗水流冲刷能力,因此砒砂岩作为筑坝材料,限制了该地区淤地坝的施工。因此,需对砒砂岩进行固化处理,以解决砒砂岩流失的问题。国内外学者针对工程应用开发了一系列土体固化剂,并从传统的单一无机固化材料发展为复杂而全面的材料,国内外目前正在研究和使用的土壤固化剂有数百种,根据固化机理分为两种,一种为传统土壤固化剂,即石灰、水泥、粉煤灰等等;另一种为新型固化剂,可分为高分子类固化剂、离子类固化剂等。近年来,众多学者应用上述固化剂对土壤进行固化,并对固化土的力学特性退化问题进行了较深入的研究,其中 Ahmed 等<sup>[10]</sup>试验分析了废石膏稳定土的耐久性影响;王天等<sup>[11]</sup>探究了多种材料和纤维复合固化砂土的力学性质;Kampala 等<sup>[12]</sup>和 Aldaood 等<sup>[13]</sup>研究了粉煤灰对固化土壤无侧限抗压强度和剪切强度的影响;郑军等<sup>[14]</sup>研究了干湿循环对 CMSC 型固化土壤的力学特性影响,该型号的固化剂对土壤的固化作用比传统的固化剂作用更显著。程佳明等<sup>[15]</sup>对干湿循环后的 SH 固化黄土进行了力学特性研究;苏涛等<sup>[16]</sup>对 EN-1 固化剂提高砒砂岩坡面径流冲刷的稳定性进行了研究,但综合效果尚有不足。通过对已有文献的研究进行梳理,早在“十二五”国家的战略规划中就已经将该类型的问

题立项,在原有亲水性聚氨酯材料的基础上融合纳米改性、组成结构改变及功能材料复合技术,由异氰酸酯、聚醚多元醇以及多种功能性改性原料在特定温度、时间、配比条件下,经过聚合而获得的改性亲水性聚氨酯复合材料(W-OH)。由于亲水性聚氨酯材料(W-OH)和水反应可快速聚合形成弹性凝胶体,具有很强的附着力。本课题组将其应用于固结砒砂岩,形成的 W-OH 砒砂岩固结体不仅有一定力学性能,还有抗蚀、促生、防水固土(沙)作用及很强的抗紫外线性能,证明了 W-OH 凝胶体用于固结砒砂岩有一定的效果,对砒砂岩具有很好的包裹和连结作用<sup>[17-19]</sup>。W-OH 固化砒砂岩有着优越的性能,但砒砂岩广泛分布于黄河流域,以晋陕蒙接壤区为中心的区域,该地区冬夏寒暑变化大,降水集中,多为短历时暴雨,年最大蒸发量集中,季节性的气候变化使得固化土承受反复干湿循环的影响,使其力学性质发生不可逆转的变化<sup>[20]</sup>。所以,国家重点研发计划项目“砒砂岩区生态安全保障技术”要求对砒砂岩固结体的力学特性、抗干湿循环能力、耐久性进行更深入探讨。本文利用新型固结剂 W-OH 对砒砂岩进行固化改良,进行干湿循环变化的室内模拟,研究干湿循环次数以及不同 W-OH 浓度对砒砂岩无侧限抗压强度和三轴抗压强度的影响,获取砒砂岩固结体在干湿循环作用下的强度变动特性。再通过 SEM 电镜和 EDS 能谱仪分析,从微观结构的角度来解释干湿循环对固结体力学性质影响的机理。这对 W-OH 实现固结改良砒砂岩及其耐久性具有重要意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

砒砂岩试样在黄河一级支流皇甫川流域的二老虎沟取样,该区多年平均降水量为 350 mm,属于典型砒砂岩严重裸露地区。取样时采用人工与机械挖掘相结合的水平分层取样方法,所取土样基本在 2 m 深度以内。

W-OH 是一种亲水性聚氨酯树脂,和水反应可迅速聚合形成弹性凝胶体,对沙、土等具有很好的黏结性,具有生态安全性,其固化反应式<sup>[17]</sup>为:



## 1.2 试验设备

试验仪器及设备包括 JSM-6360LV 电子扫描显微镜 (SEM), MCA-X-STREAM 能谱仪 (EDS), CMT5504/5105 万能试验机, SLB-1 型三轴剪切试验仪, 101-3A 型电热鼓风干燥箱, 标准筛子, 分析天平, 烧杯, 量筒, 玻璃棒, 39.1 mm×80 mm (直径×高度) 的模具等。

## 1.3 试验方法

将风化后的砒砂岩首先进行分选, 筛出粒径为 2.36 mm 以下的连续均匀砒砂岩颗粒, 试验选取喷洒量为 25 g/100g 的 W-OH 溶液, 25.0g/100.0 g 表示在 100 g 砒砂岩中喷洒 25.0 g 复合材料溶液<sup>[19]</sup>。选定 W-OH 浓度为 4%, 5%, 6%, 再加上高浓度 8% 对照。控制固化反应前砒砂岩的干密度为 1.62 g/cm<sup>3</sup>, 然后配制不同浓度的 W-OH 溶液与砒砂岩进行均匀拌和, 迅速放置到内径为 39.1 mm, 高度为 80 mm 的模具中压实制备试样, 72 h 基本完成固化过程, 最后将样品风干 28 d, 取出试样称重待用。

参考 (ASTM) D4843-88 和 D559-03<sup>[21]</sup>, 模拟当地的干湿气候。将每个样品放入已知皮重的烧杯中 (精度至 0.01 g), 并标记, 向烧杯中加入 20±3 °C 蒸馏水, 将水覆盖的样品在该温度下储存 23 h, 然后使用钳子将他们转移到新烧杯中风干 2 h, 再转移到干燥箱中保存 24 h, 考虑到现场表面温度, 干燥箱将温度保持在 50 °C±3 °C。再对标本进行观察, 包括: 开裂、断裂, 完整性和表面粗糙度, 并称量, 以上为一次干湿循环。取循环次数 N=0, 1, 3, 5, 7, 9, 12 的试样, 根据《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999) 分别用万能试验机、三轴剪切试验仪对其进行无侧限抗压强度试验和不固结不排水静力三轴试验, 三轴抗压试验中围压选取 50, 100, 200 kPa, 测试试样的三轴抗压参数, 并反测试样破坏后的含水率。

# 2 试验结果

## 2.1 干湿循环对固结体无侧限抗压强度的影响

将破坏后的试样反测其含水率, 含水率稳定在 8%~10%, 在砒砂岩自然含水率范围之内。试验结果如图 1 所示, 4% 和 5% 的 W-OH 砒砂岩固结试样在第 1 次干湿循环后, 固结体无侧限抗压强度略微降低, 之后又有所恢复。6% 和 8% 的 W-OH 砒砂岩固结试样在 1~3 次干湿循环后, 无侧限抗压强度上升。

从第 3 次干湿循环以后, 不同 W-OH 浓度的固结试样强度都随循环次数的增大, 无侧限抗压强度减小, 在经历 9 次干湿循环后达到最小值, 随后趋于稳定。经过 12 次干湿循环, 它们的无侧限抗压强度分别减少了 53.9%, 50.7%, 45.8%, 19.0%。与自然状态下原岩的无侧限抗压强度 (0.15~0.30 MPa) 相比较, 当加入的 W-OH 浓度为 5% 及以上时, 稳定后的固结体无侧限抗压强度有较大提高, 说明 W-OH 用于砒砂岩固化有明显效果。

选取固结体无侧限抗压应力应变曲线弹性变形阶段的直线斜率作为弹性模量。由图 2 可知, 不同 W-OH 浓度砒砂岩固结体的弹性模量由于 W-OH 胶结体再固化过程, 在前 3 次随干湿循环次数增加, 之后开始降低, 在第 9 次干湿循环以后趋于稳定。在干湿循环过程中, 由于增湿和脱湿过程中水份的变化, 造成水和固结体之间的相互作用, 形成干缩湿胀循环, 试件内部结构变得松散, 造成固结体的弹性模量下降, 进而导致无侧限抗压强度下降。另外 W-OH 浓度增大, 溶液黏度增加, 胶结作用增强, 颗粒间的黏结强度增大, 从而弹性模量增大, 无侧限抗压强度增大, 干湿循环后强度损失率减小。

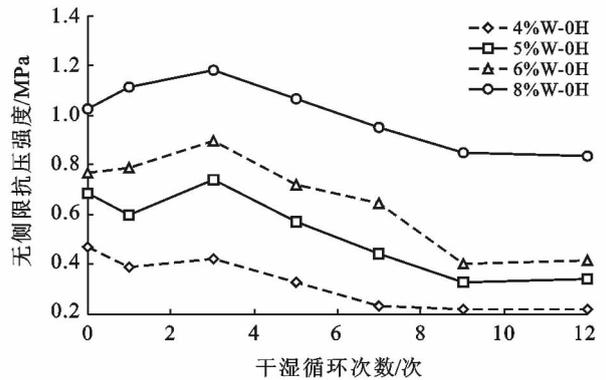


图 1 干湿循环作用下无侧限抗压强度变化规律

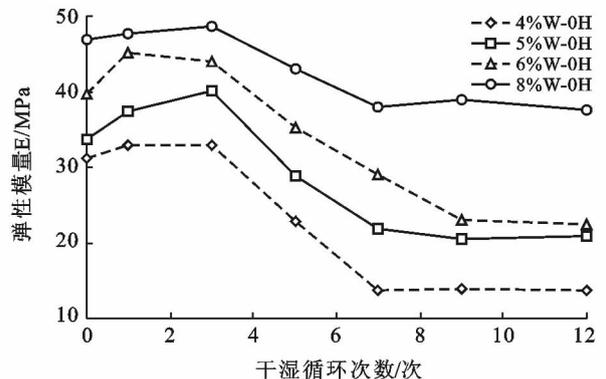


图 2 干湿循环作用下弹性模量变化规律

### 2.2 干湿循环对三轴抗压的影响

自然状态下原岩的黏聚力为 0.92~18.8kPa, 内摩擦角为 19.45°~29.9°。由图 3 可以看出, 原岩具有遇水迅速软化分散的特性, 遇水分散后没有强度。

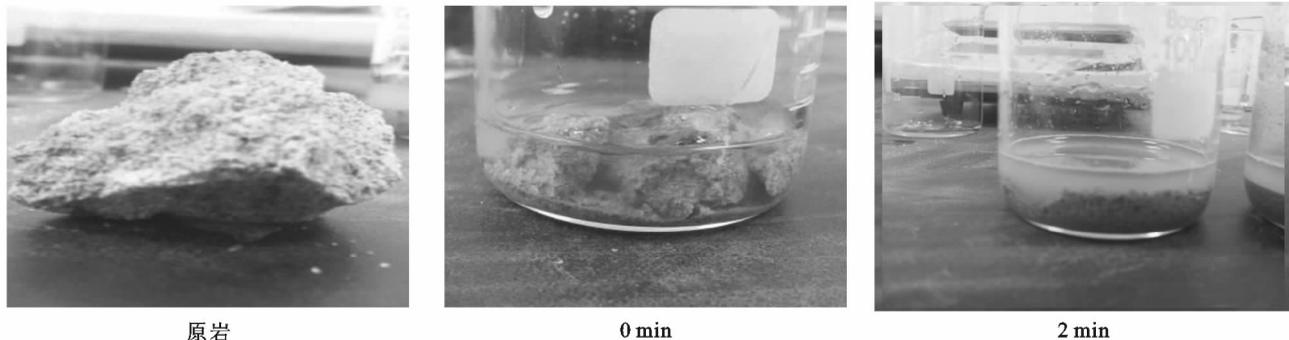


图 3 砒砂岩在水中的分散过程

2.2.1 干湿循环对砒砂岩固结体应力—应变关系曲线的影响 土体三轴抗压强度是由很多因素决定的, 在实践中为了方便应用, 一般应用具有 2 个参数(黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ) 的莫尔—库仑破坏准则, 取 3 个相同的土样分别在围压为 50, 100, 200 kPa 的作用下进行不固结不排水三轴抗压试验, 在正应力  $\sigma$  与剪应力  $\tau$  坐标图上, 以  $(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, 0)$  为圆心,  $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$  为半径得到一组极限应力圆, 由于这些试样均被破坏, 绘极限应力圆的公切线, 即为该土样的三轴抗压强度包线(图 4)。包线与横坐标的夹角即为土的内摩擦角  $\varphi$ , 与纵坐标的截距即为土的黏聚力  $c$ [22]。

试验测定了不同 W-OH 浓度砒砂岩固结体在干湿循环次数下的三轴抗压强度参数, 加入 W-OH 固化剂之后, 干湿循环稳定后的固结体黏聚力和内摩擦角有显著提高。

三轴试验中, 土体所受的偏应力与其轴向应变之间的关系一般有应变硬化型和应变软化型 2 种[23]。图 5 给出了 6% W-OH 砒砂岩固结体经历干湿循环以后的偏应力—轴向应变曲线, 固结体在三轴试验条件下, 应力应变关系曲线均表现为应变软化型, 这是

由于 W-OH 砒砂岩固结体属于密实砂土类型, 所以表现出应变软化的特征。在小应变时压应力上升很快, 这是由于在前期固结压力下试件处于超固结应力状态, 且固化土结构较致密, 故其初始压应力增加较快, 但是随着压应变的增加, 其压胀作用会越来越小导致应力增加不再明显。

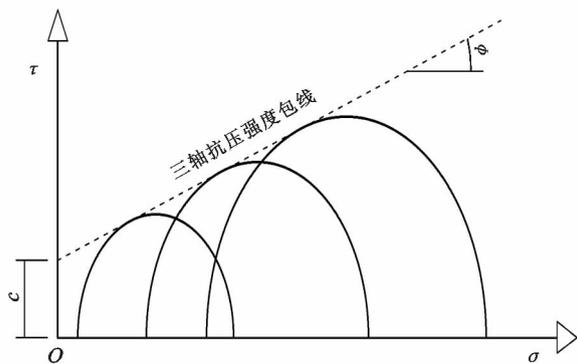


图 4 三轴试验的强度破坏包线

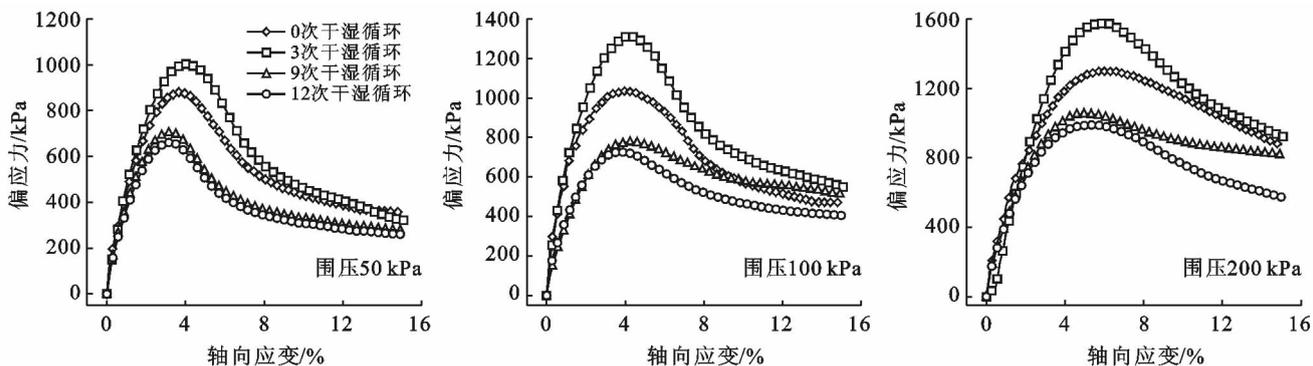


图 5 6%W-OH 固结砒砂岩的偏应力与轴向应变关系曲线

此外,砒砂岩固结体的静强度(取值为其偏应力的峰值点)在前 3 次干湿循环,呈上升趋势,这是因为在前 3 次干湿循环过程中,部分 W-OH 胶结体在水中再固化使颗粒表面所包裹的 W-OH 胶结体继续增加,从而 W-OH 砒砂岩固结体静强度增强。3 次干湿循环以后开始降低,砒砂岩固结的颗粒间联接产生了不可逆的损伤,以低黏结力的 W-OH 胶结体的脱落为主,造成固结体的强度特性下降,并且随着围压的增大,三轴抗压强度增大。

**2.2.2 干湿循环对 W-OH 砒砂岩固结体黏聚力和内摩擦角的影响** 由图 6 可知,4% W-OH 砒砂岩固结试样随着干湿循环次数的增加,黏聚力下降,9 次干湿循环以后开始稳定;5% 和 6% W-OH 砒砂岩固结试样在第 1 次干湿循环黏聚力略有下降,之后开始上升,到第 3 次干湿循环后,黏聚力逐渐降低,9 次干湿循环后趋于平缓;8% W-OH 砒砂岩固结试样在 1~3 次干湿循环,黏聚力上升,3 次干湿循环以后开始降低,从第 7 次干湿循环后开始稳定。经过 12 次干湿循环后,它们的黏聚力分别减少了 50.4%,43.9%,24.2%,3.5%。由图 7 可知,在 1~5 次干湿循环内,内摩擦角随着干湿循环次数增加整体呈现出上下波动的趋势。且随干湿循环次数增多内摩擦角渐趋稳定,变化幅度不大,7~9 次干湿循环以后稳定在 30°~40°。内摩擦角反映了颗粒间的摩擦性质,W-OH 胶结体在前期干湿循环中未固化完全,造成了固结体内摩擦角不稳定。9 次干湿循环以后,W-OH 胶结体已与水完成充分固结,W-OH 胶结体的破坏和流失达到稳定,内摩擦角也趋于稳定。

由实验结果可知,干湿循环对砒砂岩固结体的三轴抗压强度的影响主要在于对黏聚力的影响。经 3 次干湿循环,黏聚力增加,之后黏聚力降低并在 9 次干湿循环后趋于稳定。这是因为在 1~3 次干湿循环过程中,仍有部分 W-OH 胶结体在水中继续固化,颗粒表面所包裹的 W-OH 胶结体继续增加,宏观表现为 W-OH 砒砂岩固结体力学性质增强,且对于 W-OH 浓度越高的砒砂岩固结体,在水中再固化的 W-OH 胶结体越多,颗粒与颗粒之间的黏结力增加越多,使力学性质也增强更多;在 3 次干湿循环后,W-OH 胶结体与水完成充分固结,后续的干湿循环过程会造成部分低黏结力的 W-OH 胶结体与砒砂岩颗粒脱离,宏观表现为 W-OH 砒砂岩固结体的力学强度降低;而在 9 次干湿循环后,低黏结力的 W-OH 胶结体已基本脱离了砒砂岩颗粒,剩下高黏结力的 W-OH 胶结体包裹于砒砂岩颗粒表面,宏观表现为 W-OH 砒砂岩固结体的力学强度趋于稳定。

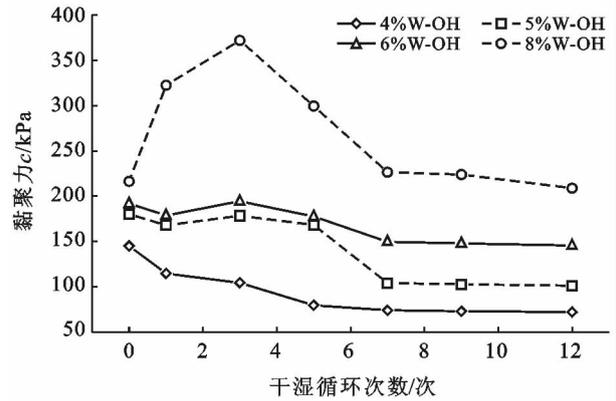


图 6 黏聚力和干湿循环次数的关系

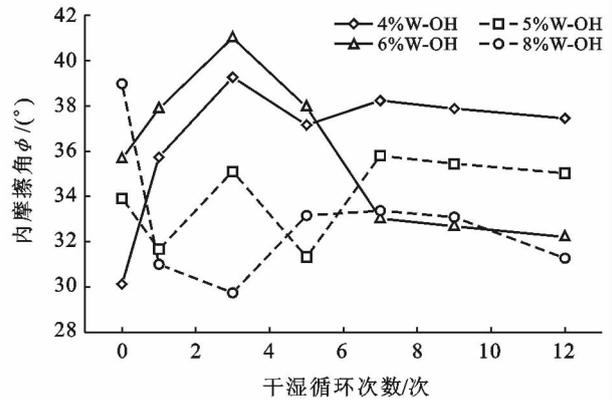


图 7 内摩擦角和干湿循环次数的关系

### 3 结果分析

#### 3.1 固结体微观形态变化分析

用 SEM 扫描砒砂岩原岩(图 8),发现有明显突出的尖棱角,颗粒间的孔隙分布无规则且基本无黏性物质填充,黏结性差。SEM 扫描喷洒了同一 W-OH 浓度的砒砂岩固结体,溶液在砒砂岩颗粒表面形成包裹,使得砒砂岩颗粒变大,表面变得粗糙,密实性提高,从而提高了颗粒间的有效接触面积和黏结性。结合 W-OH 砒砂岩固结体黏聚力和干湿循环次数的关系(图 6),SEM 扫描显示 1~3 次干湿循环后土样(图 8)并未出现明显的裂缝,W-OH 胶结体比干湿循环前密实且接触紧密,这在微观层面上证实了部分 W-OH 胶结体在水中继续固化,颗粒表面所包裹的 W-OH 胶结体继续增加,颗粒与颗粒之间的黏结力增加,宏观表现为 W-OH 砒砂岩固结体黏聚力增强。在干湿循环 9 次以后(图 8),固结体颗粒松散,部分低黏结力的 W-OH 胶结体与砒砂岩颗粒脱离,W-OH 胶结体的破坏和流失达到稳定,剩下高黏结力的 W-OH 胶结体包裹于砒砂岩颗粒表面,宏观表现为 W-OH 砒砂岩固结体的黏聚力降低后趋于稳定,证明了干湿循环对 W-OH 砒砂岩固结体的破坏作用。

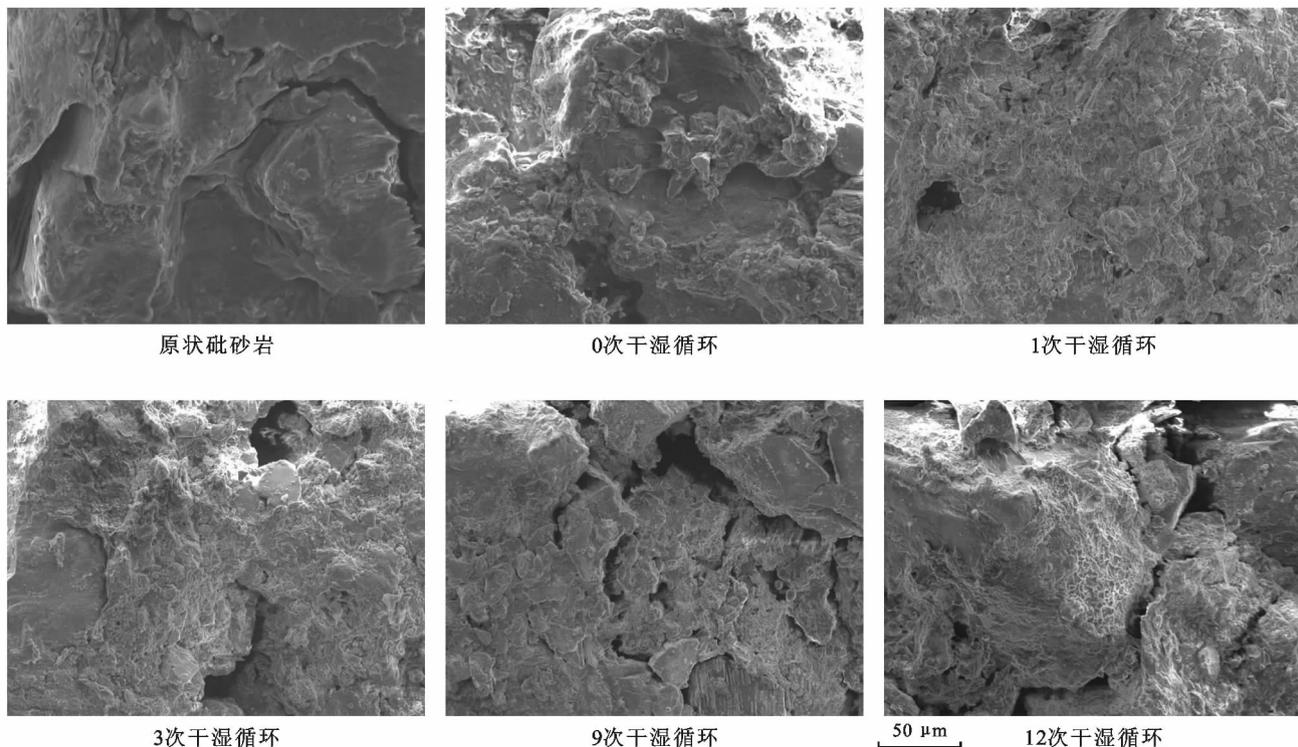


图 8 原岩和 W-OH 固结砒砂岩 SEM 图像

### 3.2 固结体元素和质量亏损分析

利用 EDS 能谱仪对原岩、W-OH 砒砂岩固结体和干湿循环后的 W-OH 砒砂岩固结体进行微观观测,并对每个试样的 5 个重点区域进行元素成分及含量分析,最后取平均值(图 9 为原岩与 W-OH 砒砂岩固结体检测结果对比)。

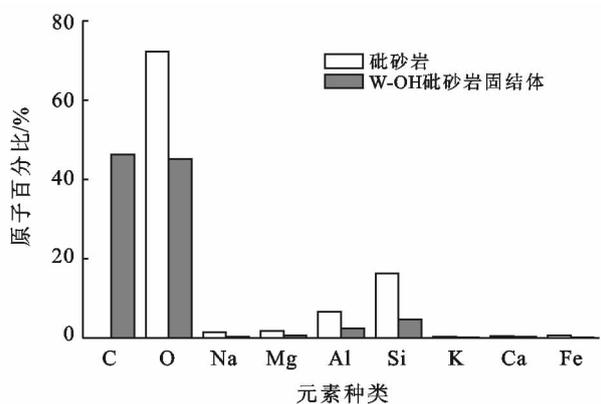


图 9 砒砂岩与 W-OH 砒砂岩固结体元素成分及原子百分比对比

结果显示原岩基本不含有碳元素,W-OH 固结后,W-OH 砒砂岩固结体碳元素百分比迅速增加,由 W-OH 固化反应方程(1)可知,增加的碳元素来自反应生成的 W-OH 胶结体。如图 10,可以利用碳元素原子百分比变化体现干湿循环后 W-OH 胶结体的流

失情况。同时通过公式(2)计算其质量亏损,试验结果见图 11,随着干湿循环次数的增加,使土样固结性能降低,会使试样产生一些损伤和颗粒脱落。

$$A = \frac{m_0 - m_e}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:A——质量亏损(%);  $m_0$ ——初始质量(g);  $m_e$ ——干湿循环后测试所得质量(g)。

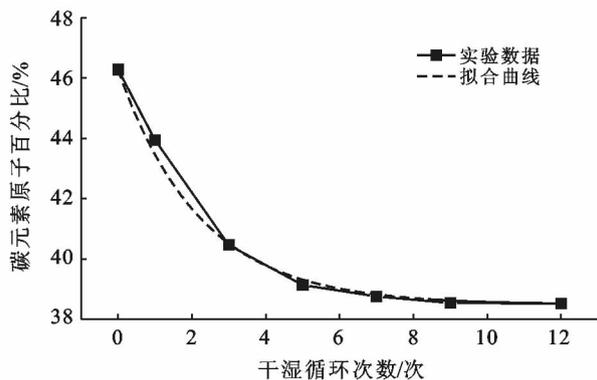


图 10 干湿循环作用下碳元素原子百分比变化规律

结合质量亏损计算和 EDS 能谱仪分析可知,随着干湿循环次数的增加,固结体质量有所亏损,W-OH 浓度越高,固结体质量亏损越少,变化曲线也更平缓。质量亏损在微观上表现为碳元素原子百分比逐渐降低,再次证明了 W-OH 凝胶体的脱落,并在 9 次干湿循环后达到稳定。这与上述无侧限抗压强

度、弹性模量、黏聚力随循环次数增加而变化的规律相似,也可以判断出 W-OH 砒砂岩固结体能在 9 次干湿循环后形成稳定的微观结构且 W-OH 不再流失,可将此强度、弹性模量和黏聚力作为后期土体评估的重要参数。通过图 10 拟合实验数据,能预测不同干湿循环次数下的碳原子百分比,并粗略估计砒砂岩固结体的强度。因此,适当提高 W-OH 浓度,有助于减小固结试样的质量亏损,提升砒砂岩颗粒间的连接点数量和强度,从而使得在部分连接点失效脱落的情况下,剩余连接点依旧能提供较好的固结效果。

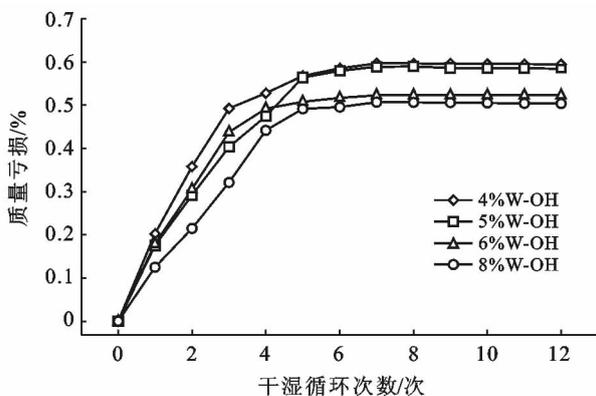


图 11 固结体质量损失试验结果

## 4 结论

(1) 经过不同次数干湿循环的 W-OH 砒砂岩固结体的应力-应变关系曲线具有应变软化特征。在 1~3 次干湿循环, W-OH 胶结体在水中再固化, W-OH 砒砂岩固结体的无侧限抗压强度、弹性模量和黏聚力上升;在 3~9 次干湿循环, W-OH 胶结体充分固结,干湿循环过程造成了部分低黏结力的 W-OH 胶结体与砒砂岩颗粒之间的脱离,固结体的力学强度降低;9 次干湿循环之后,低黏结力的 W-OH 胶结体已基本脱离了砒砂岩颗粒,剩下高黏结力的 W-OH 胶结体包裹于砒砂岩颗粒表面,固结体力学强度趋于稳定。对于内摩擦角,在 1~9 次干湿循环,由于 W-OH 胶结体未固化完全,内摩擦角值上下波动;9 次干湿循环后,胶结体的固化、破坏和流失达到稳定,内摩擦角也达到稳定值。

(2) 微观结构现象表明固结体在 1~3 次干湿循环后颗粒表面所包裹的 W-OH 胶结体继续增加,证实了 W-OH 胶结体在水中再固化;随着干湿循环次数增加, W-OH 胶结体固结完成并脱落;在干湿循环 9 次以后, W-OH 胶结体的破坏和流失达到稳定。通过 EDS 能谱仪分析得到碳元素来自 W-OH 胶结体,结合质量亏损分析对土样中 W-OH 胶结体流失特性

进行评价,发现 W-OH 胶结体在 1~9 次干湿循环中逐渐降低,并在 9 次干湿循环后达到稳定,这与上述无侧限抗压强度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角随循环次数增加而变化的规律一致,验证了干湿循环的破坏机理,可将此强度、弹性模量和黏聚力作为后期土体评估的重要参数。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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.
- [2] Zhao G, Mu X, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the loess plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(5): 499-510.
- [3] Guo Jiao, Shi Yingchun, Wu Lijie. Gravity erosion and lithology in Pisha sandstone in southern Inner Mongolia [J]. Journal of Ground water Science and Engineering, 2015, 3(1): 45-58.
- [4] 肖培青,姚文艺,刘慧. 砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J]. 人民黄河, 2014, 36(10): 92-94.
- [5] 王愿昌,吴永红,寇权,等. 砒砂岩分布范围界定与类型区分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18.
- [6] 拾兵,曹叔尤. 沟道植物坝的水土保持功效[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 15-20.
- [7] 毕慈芬,李桂芬. 砒砂岩地区沟道沙棘植物“柔性坝”原型拦沙研究[J]. 国际沙棘研究与开发, 2003, 1(1): 6-12.
- [8] Yang Fangshe, Cao Mingming, Li Huaian E. Simulation of sediment retention effects of the single seabuckthorn flexible dam in the Pisha sandstone area[J]. Ecological Engineering, 2013, 52(3): 228-237.
- [9] 韩霁昌,刘彦随,罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学, 2012, 26(8): 87-94.
- [10] Ahmed A, Keizo U. Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 66(2): 84-92.
- [11] 王天,翁兴中,张俊,等. 干湿循环条件下复合固化砂土抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(4): 721-729.
- [12] Kampala A, Horpibulsuk S, Prongmanee N. Influence of wet-dry cycles on compressive strength of calcium carbide residue-fly ash stabilized clay[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(4): 633-643.
- [13] Aldaood A, Bouasker M, Al-Mukhtar M. Impact of wetting-drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils[J]. Engineering Geology, 2014, 174(1): 11-21.

发和幼苗生长,也说明水分是窄叶鲜卑花种子萌发和幼苗形成的主导因素之一,在较干旱地区种植需要考虑水分的供给。

### [参 考 文 献]

- [1] Omami E N, Haigh A M, Medd R W, et al. Changes in germinability, dormancy and viability of *Amaranthus retroflexus* as affected by depth and duration of burial [J]. *Weed Research*, 1999, 39(5): 345-354.
- [2] Hardegree S P, Emmerich W E. Effect of polyethylene glycol exclusion on the water potential of solution-saturated filter paper [J]. *Plant Physiology*, 1990, 92(2): 462-466.
- [3] 赵晓英,任继周,王彦荣,等. 3种锦鸡儿种子萌发对温度和湿度的响应[J]. *西北植物学报*, 2005, 25(2): 211-217.
- [4] 吴宁. 川西北窄叶鲜卑花灌丛的类型和生物量及其与环境因子的关系[J]. *植物学报*, 1998, 40(9): 860-870.
- [5] 陶婷婷, 濂井康雄, 王天志, 等. 窄叶鲜卑花的化学成分[J]. *中国天然药物*, 2006, 4(4): 257-259.
- [6] 姚莉, 鞠洋. 窄叶鲜卑花促消化作用的实验研究[J]. *中国中西医结合消化杂志*, 2009, 17(6): 376-378.
- [7] 卫阳飞. 柳茶对四氧嘧啶糖尿病小鼠降糖作用和对高脂血症大鼠游离脂肪酸影响的实验研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2012.
- [8] 谢勇辉, 俞颂华, 余银芳, 等. 窄叶鲜卑花的化学成分及药理活性研究进展[J]. *江西中医学院学报*, 2014, 26(5): 97-100.
- [9] 王进, 罗光宏, 颜霞, 等. 干旱胁迫对苦豆子种子吸胀萌发和幼苗生长的影响[J]. *中草药*, 2011, 42(9): 1807-1811.
- [10] 李文娆, 张岁岐, 山仑. 水分胁迫下紫花苜蓿和高粱种子萌发特性及幼苗耐旱性[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 556-563.
- [11] 何学青, 呼天明, 许岳飞, 等. PEG-6000 模拟水分胁迫对柳稷种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *草地学报*, 2014, 22(3): 1007-0435.
- [12] Scott S J, Jones R A, Williams W A. Review of data-analysis methods for seed germination [J]. *Crop Science*, 1984, 24(6): 1192-1199.
- [13] 岳勇丽. 干旱胁迫在不同品种杨梅苗期生长和生理生化特性[D]. 福建 福州: 福建农林大学, 2012.
- [14] 杨景宁, 王彦荣. PEG 模拟干旱胁迫对四种荒漠植物种子萌发的影响[J]. *草业学报*, 2012, 21(6): 23-29.
- [15] 徐建新, 杨洁, 吴景, 等. 聚乙二醇模拟干旱对新疆橡胶草种子萌发与幼苗生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(5): 96-100.
- [16] 喻泽莉, 何平, 张春平, 等. 干旱胁迫对决明种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(2): 39-44.
- [17] 郝楠, 李月明, 吴玉群, 等. 玉米种子萌芽期抗旱性的初步筛选[J]. *辽宁农业科学*, 2010(5): 40-42.
- [18] 孙霞. 聚乙二醇(PEG)模拟干旱胁迫对干旱河谷 5 种木蓝种子萌发的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(3): 317-322.
- [19] 杨旭东. PEG 模拟干旱胁迫对向日葵种子种子活力影响的研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [14] 郑军, 阎长虹, 夏文俊, 等. 干湿循环对新型固化土承载强度影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(S1): 3051-3056.
- [15] 程佳明, 王银梅, 苗世超, 等. 固化黄土的干湿循环特性研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(2): 226-232.
- [16] 苏涛, 张兴昌. EN-1 对砒砂岩固化土坡面径流水动力学特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11): 68-75.
- [17] 梁止水, 吴智仁, 杨才千, 等. 基于 W-OH 的砒砂岩抗蚀促生机理研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(9): 1160-1166.
- [18] 梁止水, 吴智仁, 杨才千, 等. 砒砂岩固结体防水抗蚀及紫外耐久性能研究[J]. *人民黄河*, 2016, 38(6): 46-48.
- [19] 梁止水, 杨才千, 吴智仁. W-OH 与砒砂岩固结体力学性能研究[J]. *人民黄河*, 2016, 38(6): 30-34.
- [20] Goh G S, Rahardjo H, Choon L E. Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(4): 594-606.
- [21] American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures [M]. West Conshohocken: ASTM, USA, ASTM D, 2004: 559-03.
- [22] 杨同, 徐川, 王宝学, 等. 岩土三轴试验中的黏聚力与内摩擦角[J]. *中国矿业*, 2007, 16(12): 104-107.
- [23] 何利军, 孔令伟. 土的应力—应变关系的一种描述模式[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(6): 900-905.

(上接第 28 页)