

中文引用格式:田新宇,梅源,孙天慧,等. 太阳辐照与干湿循环耦合作用下压实黄土裂隙演化机制[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(5): 207-214.

英文引用格式:Tian Xinyu, Mei Yuan, Sun Tianhui, et al. Mechanism of crack evolution in compacted loess under coupled solar irradiance and wetting-drying cycles[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5): 207-214.

# 太阳辐照与干湿循环耦合作用下压实黄土 裂隙演化机制\*

田新宇<sup>1,2</sup>, 梅源<sup>1,2</sup>教授, 孙天慧<sup>1,2</sup>, 余雅楠<sup>1,2</sup>, 张雨<sup>1,2</sup>

(1 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

中图分类号:X948, TU444 文献标志码:A DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.1794

基金项目:国家自然科学基金资助(52178302)。

**【摘要】** 为分析太阳辐照与干湿循环对压实黄土裂隙演化的影响及其作用机制,采用氙灯模拟太阳辐照,开展不同辐照度、干密度及干湿循环条件下的压实黄土室内试验,自制图像获取装置定时采集试样表面裂隙图像,利用颗粒与裂隙分析系统(PCAS)提取裂隙形态参数,结合扫描电镜(SEM)图像定量分析微观孔隙结构,从宏-微观尺度系统分析裂隙演化机制。结果表明:辐照度提高使裂隙起裂时间提前,裂隙率、主裂隙长度及分形维数整体增大;干密度 $1.5\sim 1.7\text{ g/cm}^3$ 范围内,干密度提高可有效降低裂隙率及连通性,抑制裂隙扩展;干湿循环作用下,孔隙率总体增加,孔隙圆度降低,分形维数先增大后波动,与宏观裂隙演化显著关联;太阳辐照加速土体表层水分蒸发,强化水分迁移与体积变形不均匀性,促进压实黄土由孔隙结构调整向宏观裂隙扩展演化。

**【关键词】** 压实黄土; 太阳辐照; 干湿循环; 裂隙演化; 微观结构

## Mechanism of crack evolution in compacted loess under coupled solar irradiance and wetting-drying cycles

Tian Xinyu<sup>1,2</sup>, Mei Yuan<sup>1,2</sup>, Sun Tianhui<sup>1,2</sup>, Yu Yanan<sup>1,2</sup>, Zhang Yu<sup>1,2</sup>

(1 College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,

Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Space Engineering, Xi'an Shaanxi 710055, China)

**Abstract:** To investigate the effects of solar irradiation and wetting-drying cycles on the crack evolution of compacted loess and clarify the underlying mechanisms, laboratory tests were conducted using a xenon lamp to simulate solar irradiation under varying irradiance levels, dry densities, and wetting-drying cycles. Surface crack images were periodically captured using a self-developed acquisition system. Crack morphological parameters were extracted using the Particle and Crack Analysis System (PCAS), and micro-pore structures were quantitatively analyzed based on scanning electron microscopy (SEM) images, enabling a systematic macro-micro analysis of crack evolution characteristics. Results indicate that increasing irradiance accelerates crack initiation and increases crack ratio, main crack length, and overall

fractal dimension. Within the dry density range of 1.5–1.7 g/cm<sup>3</sup>, higher dry density effectively reduces crack ratio and connectivity, thereby inhibiting crack propagation. Under wetting-drying cycles, porosity generally increases, pore circularity decreases, and fractal dimension shows an initial increase followed by fluctuations, corresponding well with macroscopic crack evolution. Solar irradiation enhances surface evaporation, intensifies moisture migration and deformation heterogeneity, and promotes the transition from pore structure adjustment to macroscopic crack propagation.

**Keywords:** compacted loess; solar radiation; wetting-drying cycles; crack evolution; microstructure

0 引言

黄土是我国西北地区典型的特殊土,其工程性质直接影响路基结构稳定性。压实黄土广泛用于公路路基,但在太阳辐照与干湿循环作用下,表层土体易发生不均匀收缩并产生裂隙,诱发湿陷、边坡失稳及不均匀沉降等工程问题,已成为制约路基长期服役性能的关键因素<sup>[1-4]</sup>。

土体裂隙萌生与扩展是内外部因素共同作用的复杂过程。国内外学者已对裂隙演化机制开展了大量研究。周峙等<sup>[5]</sup>基于单向干燥开裂试验,建立了土体干缩裂隙演化物理模型;艾传井等<sup>[6]</sup>指出,气候条件是膨胀土裂隙发育的关键控制因素;Liu Jundong 等<sup>[7]</sup>通过多周期干湿循环试验,阐明了干缩与环境变化对堤坝土体裂隙的影响与致灾机制;Tang Chaosheng<sup>[8]</sup>、Li Tao<sup>[9]</sup>等也从不同角度探讨了干湿循环对裂隙形态参数演化的影响规律。随着测试技术的发展,裂隙观测手段已由人工量测转向高精度数字化。早期的钢尺法精度低、效率差,数码摄影、激光扫描、计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)及 X 射线检测等技术现已逐步推广。刘德仁<sup>[10]</sup>、Xu Jinjian<sup>[11]</sup>、唐朝生<sup>[12]</sup>、苏立君<sup>[13]</sup>等开发的颗粒与裂隙分析系统(Particle and Crack Analysis System, PCAS)、裂隙图像分析系统(Crack Image Analysis System, CIAS)等图像处理系统可实现裂隙几何参数自动提取;朱传奇等<sup>[14]</sup>利用 CT 扫描技术开展煤体三轴压缩试验,揭示了裂隙分布形态与特征参数演化规律。然而,现有研究多聚焦常规干湿循环过程,对太阳辐照与水汽变化耦合下的裂隙演化机制关注不足<sup>[15-18]</sup>。

鉴于此,笔者拟以压实黄土为研究对象,针对太阳辐照度与干湿循环耦合作用,分析不同工况下裂隙的宏观形态特征及几何参数变化特征,并通过扫描电镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)试验,阐明路基服役环境下太阳辐照与干湿循环耦合作用对

压实黄土裂隙演化的影响机制,为黄土地区路基稳定性分析与病害防控提供科学依据。

1 太阳辐照与干湿循环耦合试验方案

1.1 试验材料与基本性质

试验土样取自陕西省延安市近郊,具有典型区域代表性。取样后密封保存,依据《土工试验方法标准》<sup>[19]</sup>测定土样基本物理指标(表 1)。

表 1 土样基本物理指标

| Table 1 Basic physical indices of soil samples |       |
|------------------------------------------------|-------|
| 参数                                             | 数值    |
| 比重                                             | 2.78  |
| 液限 $w_L/\%$                                    | 27.20 |
| 塑限 $w_p/\%$                                    | 21.50 |
| 最大干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$          | 1.71  |

1.2 试验图像获取装置

裂隙演化过程监测采用高分辨率数码相机定时拍摄试样表面;电子天平实时监测试样质量变化,反映干湿循环水分迁移特征。图像获取装置如图 1 所示。

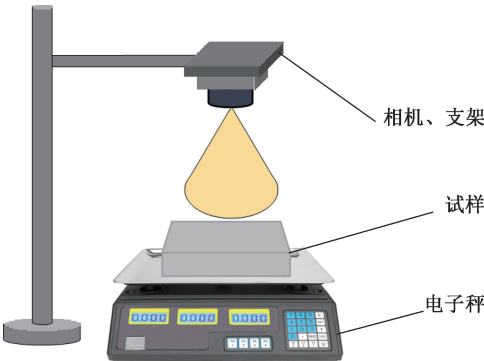


图 1 图像获取装置

Fig. 1 Image acquisition device

1.3 试验工况设计

延安市位于黄土高原腹地,夏季太阳辐照强烈、蒸发显著。据近 10 年气象资料,5—9 月为辐照及

水分变化最为剧烈时期。试验采用带有氙灯光源的人工气候箱模拟环境温湿度及辐照度,雾化加湿方式增湿。氙灯连续辐照实现能量累积输入,加速模拟路基工程夏季强辐照服役条件。试验采用控制变量法, $N$  为干湿循环次数,变量取值如下:

- 1) 太阳辐照度组。干密度与干湿循环次数恒定,辐照度取  $450\text{ W/m}^2$  (区域平均水平) 和  $950\text{ W/m}^2$  (夏季高值水平)。
- 2) 压实度组。辐照度与干湿循环次数恒定,干密度取  $1.5、1.6、1.7\text{ g/cm}^3$ ,对应黄土地区路基工程不同压实控制水平。
- 3) 干湿循环组。预试验表明:循环 9 次后,裂隙发育趋于稳定。故  $N$  设定为 9 次。

裂隙发育试验工况见表 2。

表 2 裂隙发育试验工况

| Table 2 Experimental conditions for crack development |                         |                        |     |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------|-----|
| 组别                                                    | 干密度/( $\text{g/cm}^3$ ) | 辐照度/( $\text{W/m}^2$ ) | $N$ |
| 1                                                     | 1.5                     | 450                    | 9   |
| 2                                                     | 1.5                     | 950                    | 9   |
| 3                                                     | 1.6                     | 450                    | 9   |
| 4                                                     | 1.6                     | 950                    | 9   |
| 5                                                     | 1.7                     | 450                    | 9   |
| 6                                                     | 1.7                     | 950                    | 9   |

1.4 试验步骤与数据处理方法

1.4.1 表观裂隙演化试验

- 1) 试样制备。按《土工试验方法标准》<sup>[19]</sup>,原状黄土经烘干、研碎、过筛后,按最优含水率调湿并密封静置,确保含水量均匀。试样尺寸为  $30\text{ cm}\times30\text{ cm}\times2\text{ cm}$ ,钢模中分层压实至设计高度,密封静置备用。
- 2) 干湿循环过程。干湿循环以试样饱和为起始状态,质量稳定为干燥判据。增湿采用气压雾化喷洒补水,干燥利用带氙灯光源的人工气候箱模拟气候环境,定时记录试样质量及表面裂隙图像。连续 2 次质量差小于  $0.1\text{ g}$  视为干燥。试样含水率计算如下:
$$\omega = \frac{m_{\omega}}{m_d} = \frac{m - m_r - m_d}{m_d} \tag{1}$$
式中: $\omega$  为试样含水率,%; $m_d$  为干土质量,g; $m_{\omega}$  为试样中水的质量,g; $m$  为试样与容器总质量,g; $m_r$  为容器质量,g。
- 3) 表面裂隙观测与分析。采用高清数码相机记录试样表面裂隙形态,并利用 PCAS 软件提取裂隙率、平均宽度、长度及连通度等几何参数。

1.4.2 微观孔隙结构演化试验

- 1) 样品制备。采用锋利刀具切取约  $3\text{ mm}\times3\text{ mm}\times3\text{ mm}$  立方体样块,轻刷表面碎屑后自然干燥,减少取样扰动。
- 2) 导电处理。将样品固定于导电胶带上,采用离子溅射仪喷金处理,提高导电性并抑制荷电效应。
- 3) SEM 观测与分析。使用 SEM 观测颗粒排列及孔隙结构,并利用 ImageJ 软件定量分析孔隙率及颗粒特征参数。

2 压实黄土裂隙演化特征与定量分析

2.1 表观裂隙发育特征

2.1.1 裂隙演化过程

以干密度  $1.6\text{ g/cm}^3$ 、辐照度  $950\text{ W/m}^2$ 、干湿循环 9 次为例,裂隙演化机制如图 2 所示。裂隙发育可分为 3 个阶段:

- 1) 快速发育阶段。首次干燥后表层产生少量未贯通裂隙;第 2 次循环时,土体快速脱水,裂隙数量和连贯性显著增加;第 3 次循环时,裂隙总长度与平均宽度达到阶段性峰值。
- 2) 调整稳定阶段。第 4、5 次循环时,裂隙周边土体粉末化,部分裂隙宽度较前期减小,整体形态趋于稳定。
- 3) 局部愈合再分布阶段。第 6—9 次循环时,裂隙两侧颗粒迁移、塌落并填充原有裂隙,局部裂隙闭合,伴随新裂隙萌生,裂隙网络整体趋于稳定。

2.1.2 不同辐照度下裂隙发育特征

干密度  $1.5\text{ g/cm}^3$  试样在不同辐照度下干湿循环 9 次后的裂隙分布如图 3 所示。辐照度显著控制裂隙形态及空间分布: $450\text{ W/m}^2$  条件下裂隙数量较少、间距较大,以少量主裂隙为主; $950\text{ W/m}^2$  条件下裂隙数量显著增多、间距减小,单条裂隙宽度相对较小,呈致密网状结构。

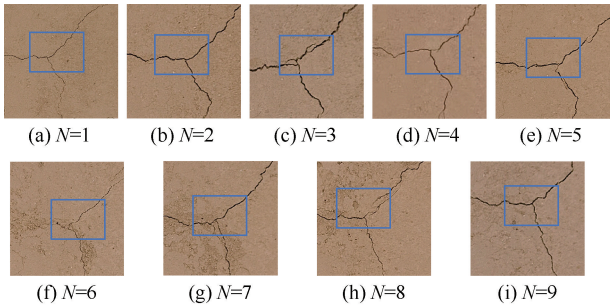


图 2 压实黄土裂隙发育过程

Fig. 2 Crack development of compacted loess

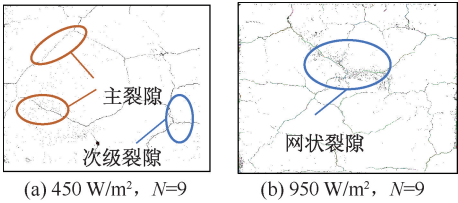


图3 不同辐照度下裂隙分布

Fig. 3 Crack patterns under different irradiances

2.1.3 不同干密度下裂隙发育特征

辐照度 950 W/m<sup>2</sup> 条件下,不同干密度试样的裂隙发育过程如图 4 所示。

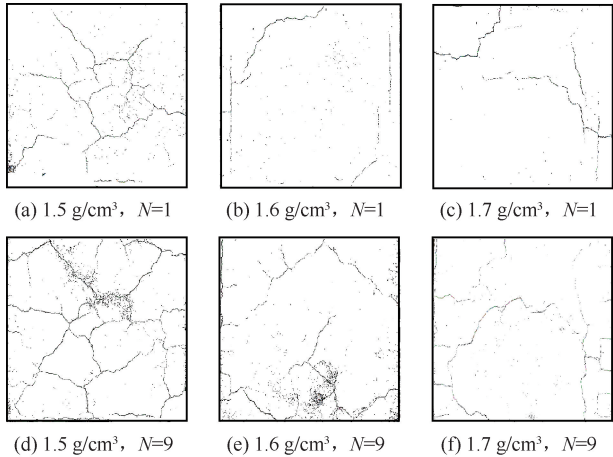


图4 不同干密度试样的裂隙发育过程

Fig. 4 Crack development of compacted loess under different dry densities

由图 4 可知:1.5 g/cm<sup>3</sup> 试样裂隙数量多、连通性强,第 9 次循环后形成明显网状结构;干密度增至 1.6、1.7 g/cm<sup>3</sup>,裂隙数量与宽度均显著降低,第 9 次循环后仅形成局部贯通的骨架状裂隙。总体来看,干密度显著影响裂隙发育程度,且干密度增加使裂隙发育程度逐渐减弱。

2.2 表观裂隙演化定量分析

2.2.1 不同辐照度下裂隙定量分析

不同辐照度下裂隙指标变化如图 5 所示。裂隙

率呈先增后降最终稳定趋势(图 5a): $N \leq 3$  阶段快速增加,950 W/m<sup>2</sup> 条件下始终高于 450 W/m<sup>2</sup>; $N = 4$  阶段,450 W/m<sup>2</sup> 条件下达到峰值; $N = 5$  阶段,950 W/m<sup>2</sup> 条件下达到峰值,450 W/m<sup>2</sup> 条件下裂隙率显著下降,归因于裂隙边缘细颗粒增湿回填引起的局部愈合; $6 \leq N \leq 9$  阶段,裂隙率均明显下降后趋于稳定。950 W/m<sup>2</sup> 条件下裂隙总长在中期循环达到峰值后逐步回落,裂隙均宽呈波动减小趋势(图 5b)。分形维数在 0.95~1.10 间小幅波动,无持续增减趋势(图 5c)。

2.2.2 不同干密度下裂隙定量分析

不同干密度下裂隙指标变化如图 6 所示。裂隙率随干密度增加显著递减(图 6a):第 9 次循环时,1.5、1.6、1.7 g/cm<sup>3</sup> 试样裂隙率分别为 1.72%、0.96%、0.72%,表明提高干密度可有效抑制裂隙发育规模。裂隙总长与均宽变化幅度较小(图 6b),表明干密度对裂隙几何尺度影响有限。分形维数在各干密度下整体变化较稳定(图 6c),且相同循环次数下随干密度增加而减小,高干密度条件下裂隙网络复杂程度较低。

2.3 微观结构演化特征

2.3.1 不同干密度下微观结构演化特征

不同干密度试样 SEM 图像如图 7 所示,由图 7a—图 7c 可知:初始状态颗粒多呈棱角状,以面—面接触为主,孔隙以架空孔及架空—镶嵌孔为主;干密度越大,颗粒排列越紧密。由图 7d—图 7f 可知:干湿循环后颗粒棱角逐渐钝化,胶结物发生溶蚀与破坏,颗粒重排细化,部分细颗粒填充原有孔隙,整体表现为孔隙结构重组,微裂隙产生,两者呈协同但非同步特征。

2.3.2 不同辐照度下微观结构演化特征

不同辐照度试样 SEM 图像如图 8 所示,由图 8 可知:950 W/m<sup>2</sup> 条件下颗粒间胶结破坏显著,局部

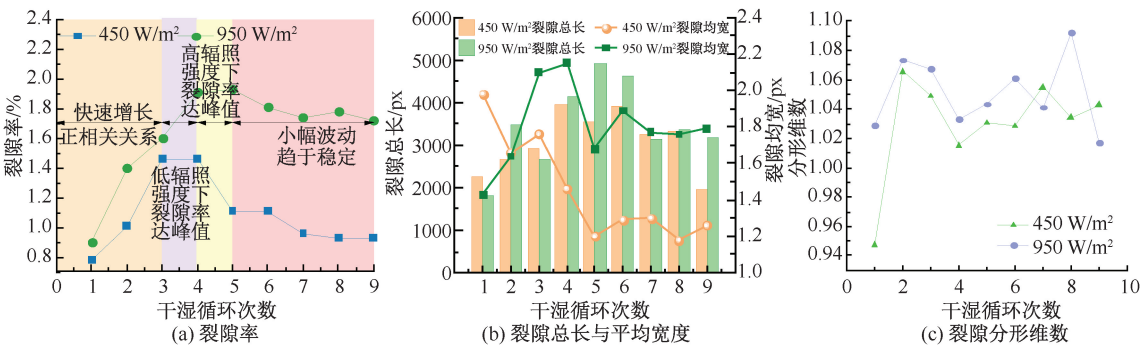


图5 不同辐照度下裂隙指标变化

Fig. 5 Crack indices under different irradiances

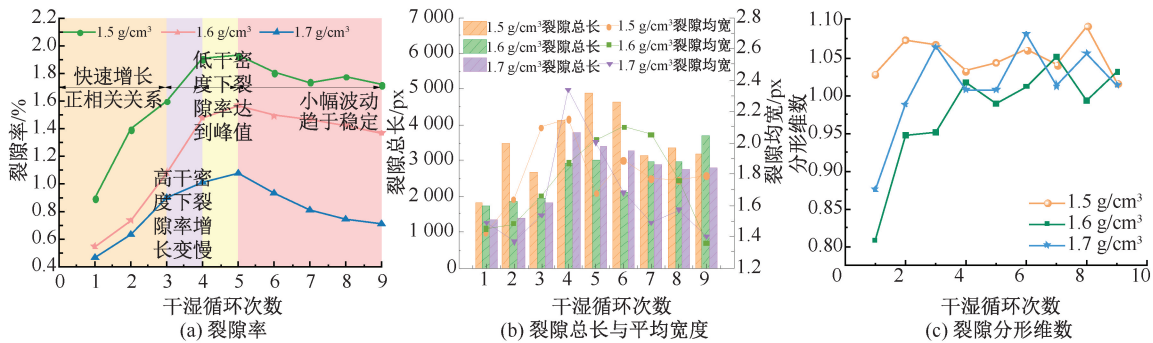


图 6 不同干密度下裂隙指标变化  
Fig. 6 Crack indices under different dry densities

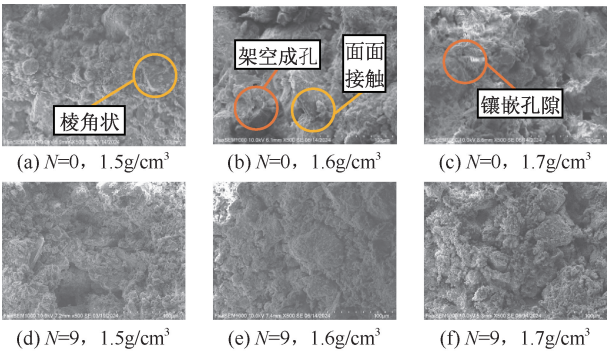


图 7 不同干密度试样 SEM 图像

Fig. 7 SEM images under different dry densities

颗粒破碎呈次圆状,孔隙结构复杂化;450 W/m<sup>2</sup> 条件下颗粒结构破坏与重排程度较弱,孔隙结构保持较高完整性。

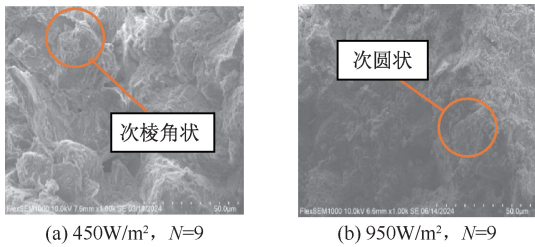


图 8 不同辐照试样 SEM 图像

Fig. 8 SEM images under different irradiances

2.4 微观结构演化定量分析

2.4.1 不同干密度下微观结构定量分析

辐照度 950 W/m<sup>2</sup> 条件下,不同干密度下孔隙指标变化如图 9 所示,由图 9a 可知:孔隙率与干密度负相关,干湿循环后呈先快速增长后平缓趋势;1.7 g/cm<sup>3</sup> 试样孔隙率增幅 18.68%,显著高于 1.6 g/cm<sup>3</sup> (11.50%) 和 1.5 g/cm<sup>3</sup> (11.10%),表明高干密度试样在干湿循环下重构幅度更显著。由图 9b 可知:圆形态度[0.00,0.49]为棱角状孔隙,[0.50,1.00]为圆状孔隙;干密度增加使初始棱角状孔隙

占比增大,圆状孔隙占比减小,但整体孔隙边界紧凑度更高,平均圆度偏大;干湿循环后各试样平均圆度均上升,孔隙形态趋于规则化。由图 9c 可知:初始分形维数与干密度显著负相关;干湿循环下,各试样均在 N=5 时达到阶段性峰值,5<N≤7 阶段短暂下降后再次回升,总增幅随干密度提高显著减小。由图 9d—图 9f 可知:初始孔隙长轴集中于[30°,45°]、[75°,90°]和[120°,135°]区间,具有方向性特征;干密度增加使主方向相对频率由 0.605 降至 0.504,初始孔隙定向性减弱。干湿循环后,各试样主方向集中度均提高,高干密度试样增幅更显著。

2.4.2 不同辐照度下微观结构定量分析

干密度 1.6 g/cm<sup>3</sup> 试样在不同辐照度下孔隙指标变化如图 10 所示。由图 10a 可知:不同辐照度下,孔隙率均逐渐增大;950 W/m<sup>2</sup> 条件下的孔隙率始终较高,高辐照度加速早期结构重构。由图 10b 可知:干湿循环下,各试样棱角状占比减小,平均圆度持续增大;高辐照度下平均圆度较高,孔隙边界圆化程度更显著。由图 10c 可知:干湿循环下,各试样分形维数均呈增长趋势;450 W/m<sup>2</sup> 条件下的分形维数变化较为平缓,950 W/m<sup>2</sup> 条件下的分形维数在中期达到较高水平后略有波动,且始终高于低辐照度。由图 10d—图 10e 可知:[30°,45°]、[75°,90°]及[120°,135°]为主方向区间,干湿循环使孔隙向主方向集中,高辐照度条件下定向性始终较强。

3 裂隙演化机制与多尺度耦合分析

3.1 裂隙萌生与演化机制

压实黄土裂隙演化受水分迁移驱动的体积收缩差异控制。干燥阶段,水-气界面形成收缩膜,表面张力与基质吸力满足:

$$(u_a - u_w) = 2T_s/R_s \tag{2}$$

式中:u<sub>a</sub> 为空气压力,Pa;u<sub>w</sub> 为孔隙水压力,Pa;

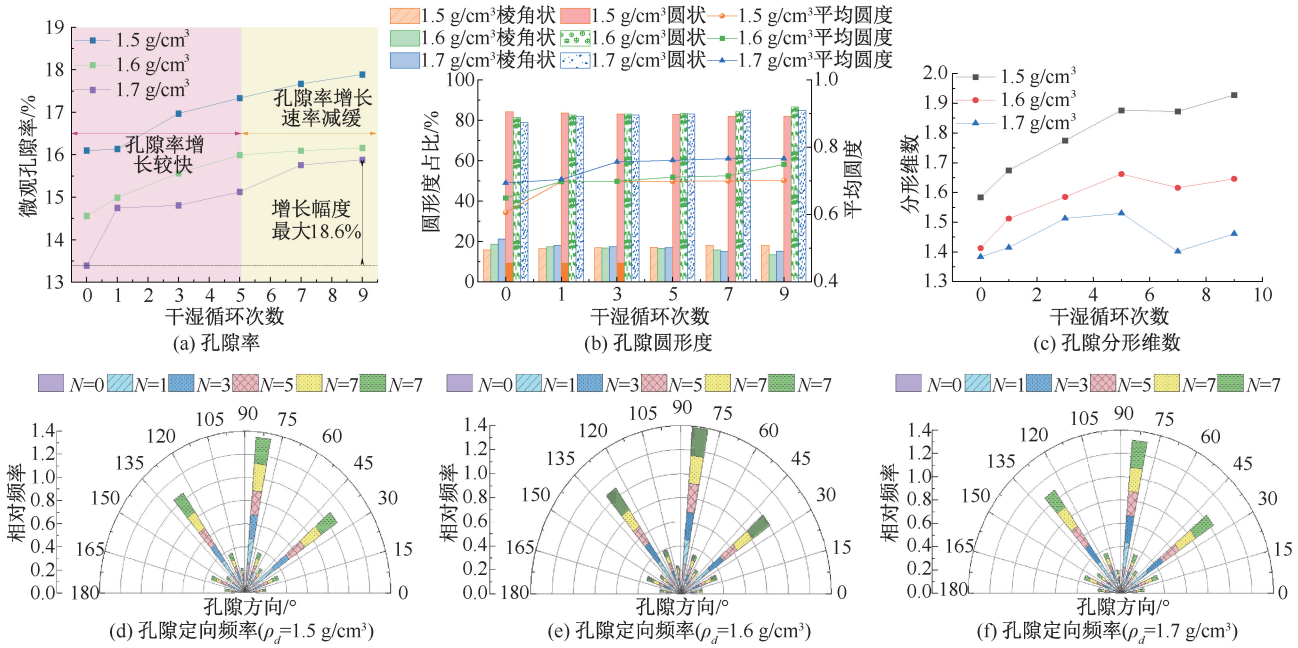


图9 不同干密度下孔隙指标变化

Fig. 9 Variations in pore indices under different dry densities

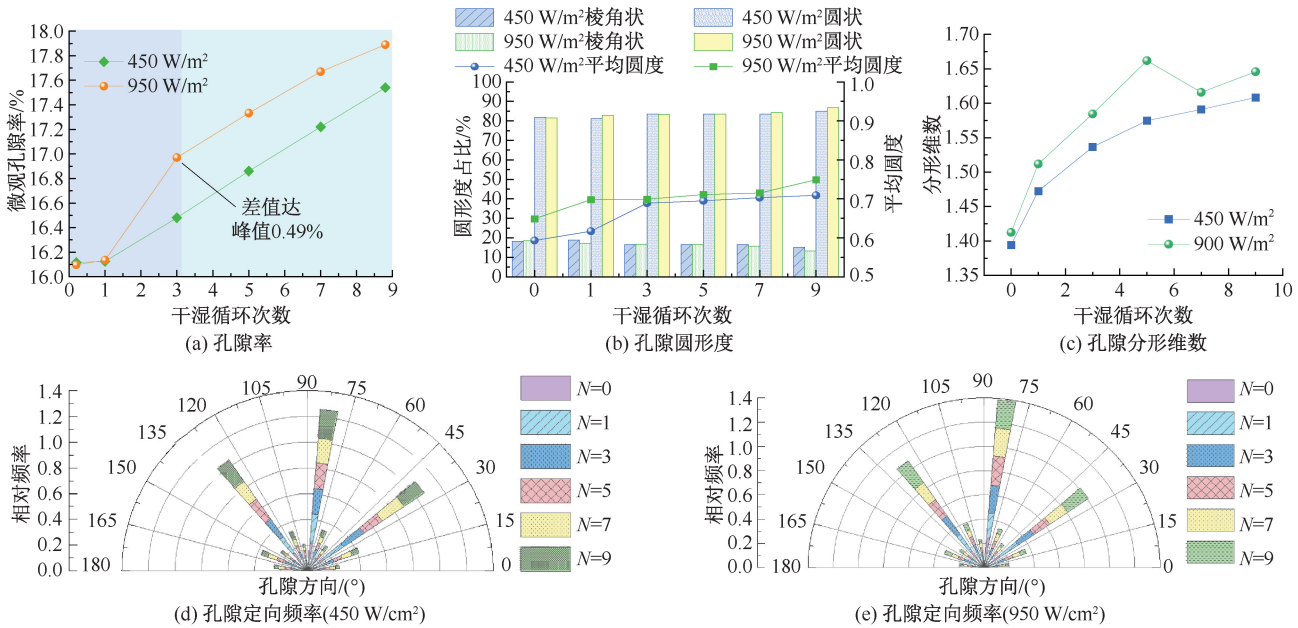


图10 不同辐照度下孔隙指标变化

Fig. 10 Variations in pore indices under different irradiance levels

$u_w$  为收缩膜表面张力, N/m;  $R_s$  为收缩膜曲率半径, m。  $R_s$  可表示为:

$$R_s = r / \cos \alpha \tag{3}$$

式中:  $\alpha$  为液固接触角, ( $^\circ$ );  $r$  为孔隙半径, m。联立式(2)、式(3)得:

$$(u_a - u_w) = 2T_s / R_s = 2T_s \cos \alpha / r \tag{4}$$

由式(4)可知: 基质吸力与孔隙半径成反比。辐照度提升加速蒸发, 孔隙半径减小, 基质吸力增

大, 颗粒间拉应力增强。当拉应力超过土体抗拉强度时, 裂隙在薄弱区萌生扩展。增湿阶段, 土体吸水膨胀, 细颗粒迁移填充部分裂隙, 但填充区结构松散、强度有限。再次干燥时, 填充区应力集中, 裂隙反复张开扩展, 最终形成稳定裂隙网络。

3.2 微观孔隙-宏观裂隙耦合机制

压实黄土裂隙演化是微观孔隙结构调整与宏观应

力重分布耦合作用的结果。干湿循环中,颗粒重排与胶结弱化使孔隙率增加、连通性增强,微观孔隙逐步扩展并形成连续结构;不均匀收缩诱发应力集中,促使微裂隙沿孔隙薄弱区扩展贯通,形成宏观裂隙网络。

干燥阶段基质吸力升高,诱发裂隙萌生;湿润阶段结构膨胀与胶结削弱,使裂隙局部闭合,但难以恢复强度。多次循环后,孔隙结构由相对封闭向连通转变,裂隙逐渐成为水分迁移主通道。

总体来看,孔隙率增加对应裂隙发育空间扩大,分形维数提高反映裂隙网络复杂化,孔隙定向性控制裂隙优先生长方向,形成“孔隙扩展—应力集中—裂隙贯通”演化路径,体现微观结构与宏观破坏的协同演化。

## 4 结 论

1) 太阳辐照强度显著控制裂隙发育特征,辐照

强度提高使裂隙起裂时间提前,裂隙率及主裂隙长度增大,裂隙发育程度整体增强。高辐照条件下表层水分蒸发速率增大,表层干缩应变集中,加速裂隙萌生与扩展。

2) 干密度抑制裂隙发育。干密度由  $1.5 \text{ g/cm}^3$  提高至  $1.7 \text{ g/cm}^3$ ,裂隙率降低、连贯性减弱,结构致密化提高抗裂性能;该干密度范围内,提高压实度有利于增强抗裂性能。

3) 微观结构与宏观裂隙演化显著相关。干湿循环过程中,孔隙率增加、孔隙圆度降低,分形维数先增大后波动,裂隙由分散逐步贯通发展,微观结构劣化控制宏观破坏。

4) 太阳辐照通过强化蒸发作用,加剧干湿循环过程中水分迁移与体积变形的不均匀性,促使孔隙结构调整与裂隙扩展。

## 参 考 文 献

- [1] 董建军,姜浩,闫斌,等. 高海拔剧烈干湿循环在役排土场安全状态评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10): 94–103.  
Dong Jianjun, Jiang Hao, Yan Bin, et al. Evaluation of safety state for dump in-service under severe drying-wetting cycles at high altitude [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(10): 94–103.
- [2] Wang Xueyan, Chen Che. Vibration table test of prefabricated L-shaped column concrete structure[J]. Buildings, 2025, 15(13): DOI:10. 3390/buildings15132329.
- [3] 孙畅,唐朝生,程青,等. 土体-大气相互作用下土质边坡稳定性研究[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3 701–3 722.  
Sun Chang, Tang Chaosheng, Cheng Qing, et al. Stability of soil slope under soil-atmosphere interaction[J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3 701–3 722.
- [4] 田森,龚远恒,李永新,等. 寒区露天矿边坡裂隙岩体冻-动联合损伤劣化特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(4): 85–93.  
Tian Sen, Gong Yuanheng, Li Yongxin, et al. Study on freezing-dynamic combined damage and deterioration characteristics of open-pit slope fractured rock mass in cold region[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(4): 85–93.
- [5] 周峙,张表志,张家铭,等. 基于 COD 断裂准则的土体干缩裂隙萌生扩展力学机制[J]. 土木工程学报, 2022, 55(11): 62–71.  
Zhou Zhi, Zhang Biaozi, Zhang Jiaming, et al. Mechanical mechanism of shrinkage crack initiation and propagation based on COD fracture criterion[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(11): 62–71.
- [6] 艾传井,尹镇龙,吴怀义,等. 荆门变电站膨胀土裂隙带发育深度及成因研究[J]. 人民长江, 2010, 41(1): 61–63, 100.  
Ai Chuanjing, Yin Zhenlong, Wu Huaiyi, et al. Fracture development depth and its genesis of expansive soil at Jinmen Substation[J]. Yangtze River, 2010, 41(1): 61–63, 100.
- [7] 刘俊东,唐朝生,曾浩,等. 干湿循环条件下黏性土干缩裂隙演化特征[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2 763–2 772.  
Liu Jundong, Tang Chaosheng, Zeng Hao, et al. Evolution of desiccation cracking behavior of clays under drying-wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2 763–2 772.
- [8] Tang Chaosheng, Cheng Qing, Leng Ting, et al. Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil[J]. Catena, 2020, 194: DOI:10. 1016/j. catena. 2 020. 104721.

[9] Li Tao, He Yangqing, Liu Guokun, et al. Experimental study on cracking behaviour and strength properties of an expansive soil under cyclic wetting and drying[J]. Shock and Vibration, 2021; DOI:10. 1155/2021/1170770.

[10] 刘德仁, 安政山, 徐硕昌, 等. 靖远地区大厚度黄土地基浸水湿陷过程及土中竖向应力特征试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 268-278.

Liu Deren, An Zhengshan, Xu Shuochang, et al. Experimental study on immersion collapsibility process and vertical stress characteristics of large thickness loess foundation in Jingyuan area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 268-278.

[11] Xu Jinjian, Zhang Hao, Tang Chaosheng, et al. Automatic soil crack recognition under uneven illumination condition with the application of artificial intelligence[J]. Engineering Geology, 2022, 296; DOI: 10. 1016/j. enggeo. 2 021. 106495.

[12] 唐朝生, 崔玉军, Tang Anhminh, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2 181-2 187.

Tang Chaosheng, Cui Yujun, Tang Anhminh, et al. Shrinkage and desiccation cracking process of expansive soil and its temperature-dependent behaviour[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2 181-2 187.

[13] 苏立君, 赵茜, 刘华, 等. 干湿交替过程中原状黄土的胀缩变形特性及裂隙形态演化规律[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(3): 255-267.

Su Lijun, Zhao Qian, Liu Hua, et al. Swelling and shrinkage behaviors and evolution law of crack morphology of undisturbed loess during wetting-drying cycles[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(3): 255-267.

[14] 朱传奇, 谢广祥, 王磊. 基于 CT 扫描的煤体裂隙演化与破坏状态表征[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(1): 93-105.

Zhu Chuanqi, Xie Guangxiang, Wang Lei. Evolution of fracture and failure state characterization of coal based on CT scanning [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(1): 93-105.

[15] 胡长明, 胡婷婷, 朱武卫, 等. 干湿循环作用下压实黄土裂隙演化特征[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(8): 96-103,112.

Hu Changming, Hu Tingting, Zhu Wuwei, et al. Evolution characteristics of cracks in compacted loess under drying wetting cycles[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(8): 96-103,112.

[16] 杨涛, 姜海波, 赵海蛟. 干湿循环作用下渠道膨胀土裂隙演化规律及强度特性[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(6): 136-142.

Yang Tao, Jiang Haibo, Zhao Haijiao. Fracture evolution and strength characteristics of channel expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(6): 136-142.

[17] 张继伟, 汪时机, 骆赵刚. 膨胀土裂隙演化规律及掺砂改良效果试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(8): 176-184.

Zhang Jiwei, Wang Shiji, Luo Zhaogang. Experimental study on crack evolution law of expansive soil and improvement effect of sand mixing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(8): 176-184.

[18] 靳福杰, 王叶娇, 徐永福, 等. 蒸发-降雨条件下膨胀土边坡裂隙演化模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 239-249.

Jin Fujie, Wang Yejiao, Xu Yongfu, et al. Simulation of cracks evolution in expansive soil slope under evaporation-rainfall condition[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 239-249.

[19] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].

GT/T 50123-2019 Standard for geotechnical testing method[S].



作者简介： 田新宇 (1994—),女,陕西西安人,博士研究生,主要研究方向为土木工程施工安全控制理论与工程应用。E-mail:tianxinyu1112@ xauat. edu. cn。