



引文格式:康孝森,刘鑫,陈涛,等.基于 MICP 的红层泥岩崩解抑制规律试验研究[J].西北地质,2026,59(4): 376–386. DOI: 10.12401/j.nwg.2025150

Citation: KANG Xiaosen, LIU Xin, CHEN Tao, et al. Experimental Study on the Disintegration Inhibition of Red-Bed Mudstone Solidified by MICP[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 376–386. DOI: 10.12401/j.nwg.2025150

基于 MICP 的红层泥岩崩解抑制规律试验研究

康孝森¹, 刘鑫¹, 陈涛¹, 杜建中², 黄强兵^{1,*}, 吕龙龙³

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730020; 3. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 极端气候背景下西北地区流域沟道红层泥岩崩解、剥蚀及崩塌问题突出, 流域沟道泥石流灾害链风险增大, 研发流域沟道灾害链削链技术对于控制泥石流物源量具有重要意义。笔者选取西宁盆地第三系红层泥岩, 制备微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 固化红层泥岩样品, 采用自主研发的可控温度和压力的岩土崩解性测试装置及测试方法, 开展 MICP 固化红层泥岩的崩解试验, 研究温度、压力、含水状态及养护时间等因素影响下 MICP 固化红层泥岩的崩解规律与防护效果。研究表明: 含水状态对红层泥岩崩解性影响显著, 干燥状态红层泥岩崩解性强, 饱和状态红层泥岩崩解性较弱, 水压力增大和温度升高均促进干燥状态红层泥岩崩解进程, 但水压力在红层泥岩崩解过程中发挥力学约束与水力驱动的双重作用; MICP 固化养护时间延长对崩解过程的抑制作用显著, 经过 3 d、7 d、14 d 养护后 MICP 固化红层泥岩的初始阶段崩解率平均下降 13%、33% 和 39%, 崩解速率平均下降 13%、27% 和 36%; 常温养护过程中矿物颗粒接触从“点接触”转变为“面接触”, 表面形成钙质胶结壳, 促使强烈崩解阶段的崩解率和崩解速率减小, 明显缓解了红层泥岩崩解进程。该结果可为西北地区流域沟道红层泥岩坡面生态防护提供依据。

关键词: 地质灾害; 红层泥岩; 崩解试验; 微生物诱导碳酸钙沉淀; 初始含水率

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0376-11

Experimental Study on the Disintegration Inhibition of Red-Bed Mudstone Solidified by MICP

KANG Xiaosen¹, LIU Xin¹, CHEN Tao¹, DU Jianzhong², HUANG Qiangbing^{1,*}, LYU Longlong³

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. The Second Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: The disintegration, erosion, and collapse of red-bed mudstone slopes in watershed gullies is prominent in the extreme climate, heightening the risk of disaster chains related to debris flows in these channels. De-

收稿日期: 2025-09-28; 修回日期: 2025-12-26; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发计划“黄土高原基础设施密集区重大链生灾害防控技术体系”(2023YFC3008400)资助。

作者简介: 康孝森(1990–), 男, 副教授, 博士, 从事岩土力学与地质灾害方面研究工作。E-mail: kangxs@chd.edu.cn。

* 通讯作者: 黄强兵(1972–), 男, 教授, 博士, 从事地质工程、岩土及地下工程等方面研究工作。E-mail: hqb@chd.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

veloping hazard chain-cutting technology in watershed gullies is of great significance for controlling the sediment supply of debris flows. This study selects Tertiary red-bed mudstone from the Xining Basin, and utilizes a self-developed testing apparatus for measuring the disintegration indexes of untreated red-bed mudstone and MICP-treated red-bed mudstone. A list of disintegration tests were conducted to explore the disintegration characteristics and protective effects of MICP-solidified red-bed mudstones under the influence of factors such as temperature, pressure, initial moisture content and curing time. The results indicate that MICP mitigates the disintegration process of red-bed mudstone, which is significantly influenced by initial water content. At low water content, the disintegration process of red-bed mudstone is considerable, which is also accelerated by higher temperatures and pressures. The pressure plays a dual role of mechanical constraint and hydraulic driving in the disintegration process of red bed mudstone. The prolongation of curing time exerts a significant inhibitory effect on the disintegration process of MICP-solidified red-bed mudstones. Specifically, for the specimens cured for 3, 7, and 14 days, the disintegration ratio at initial-stage decreases by an average of 13%, 33%, and 39%, respectively. The disintegration rate drops by an average of 13%, 27%, and 36%, respectively. This is because MICP converts particle contacts from point contact to surface contact, and a calcareous cementation crust forms on the surface of the red-bed mudstone, resulting in a notably lower disintegration ratio and rate during the intense disintegration stage. The findings offer support for ecological protection of red-bed mudstone slopes in weathered gullies of Northwest China.

Keywords: geological hazard; red-bed mudstone; disintegration test; MICP; initial moisture content

西北地区第三系红层泥岩广泛分布, 流域沟道红层泥岩崩解、剥蚀与崩塌问题突出, 增大了极端气候下红层地区流域沟道泥石流灾害链风险。因此, 如何研发流域沟道灾害链削链技术, 抑制或缓解红层泥岩崩解进程, 实现泥石流物源量控制, 对于西北红层地区灾害链韧性防控至关重要(汪美华等, 2020; 高波等, 2024; 孙富强等, 2025)。西北第三系红层泥岩富含黏土矿物, 遇水后岩石体积膨胀和崩解, 受天然应力、浓度、温度、水头及气压等因素影响(郭永春等, 2012; Liu et al., 2021)。泥岩中黏土矿物遇水会产生切应力和拉应力, 温度变化也引起拉应力变化, 超过抗拉强度则内部裂隙开始扩展, 促进了泥岩崩解(Hu et al., 2019; Wang et al., 2022)。水分入渗过程中孔隙裂隙中残余流体压力增加, 裂隙扩展形成优势通道(Su et al., 2020; Fu et al., 2023)。为抑制或减缓红层泥岩这种崩解进程, 需要开展相关技术方法研究。以往研究通过添加水泥、石灰、粉煤灰等固化剂实现了泥岩填料的化学改良(余云燕等, 2024), 但生态环境效应方面存在局限性, 不适用于红层泥岩大范围边坡防护(赵润涛, 2021; Wang et al., 2022)。拌和黄土和砂岩的物理改良在红层泥岩坡面实施难度大, 也不适用于红层泥岩坡面防护(李国维等, 2021; 张渭军等, 2022)。微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP)通过微生物代谢活动产生碳酸钙沉淀,

填充孔隙与胶结颗粒, 改善岩土体力学性能, 已被广泛应用于砂土固化、裂缝修复、防渗处理等领域。例如, MICP 固化砂柱抗剪强度提升(DeJong et al., 2006), 抑制土壤内部侵蚀(Jiang et al., 2017), 在泥岩填料胶结与土体改良等方面发挥强度提升和渗透性降低的功能(程留全, 2024; 肖瑶等, 2025)。目前, MICP 固化技术研究大多侧重于重塑土样或泥岩填料的强度提升, 而基于微生物矿化抑制或缓解原状红层泥岩崩解的研究较少, 特别是考虑温度和压力影响的微生物矿化红层泥岩的崩解抑制规律及机制研究缺乏。

因此, 笔者针对红层泥岩崩解进程抑制规律及其机制的问题, 以西宁盆地第三系红层泥岩为研究对象, 开展基于 MICP 的红层泥岩崩解抑制规律试验研究, 分析 MICP 固化前后泥岩的微观结构与崩解性指标, 阐明温度、压力、初始含水率及养护时间等因素对红层泥岩崩解进程的影响规律, 揭示 MICP 固化技术抑制或缓解红层泥岩崩解的宏微观机制, 为西北地区流域沟道红层泥岩坡面生态防护提供理论依据。

1 区域背景

研究区位于西宁盆地的海东市乐都区高家湾滑

坡,地处青藏高原与黄土高原过渡地带,兼具高原山地和黄土红层丘陵复合类型地貌(张森琦等, 2013)。区域构造南受拉脊山断裂控制,北受达坂山断裂控制,地质构造复杂,新构造运动和地震活动频繁(石维栋等, 2006; Xie et al., 2025)。特别是西宁盆地分布厚层第三系红层泥岩,流域沟道红层泥岩崩解、剥蚀与崩塌问题突出,极端气候下红层地区流域沟道泥石流灾害链风险增大(图 1)。

2 研究方法

2.1 试验材料

本次试验样品取自西宁盆地海东市乐都区高家湾滑坡沟道第三系红层泥岩(图 1c)。采用 D/max 2 500 型 X 射线粉晶衍射仪分析红层泥岩矿物成分,主要有伊利石、石英、方解石、绿泥石、钾长石、斜长石、钠长石及赤铁矿(图 2)。黏土矿物含量>40%。黏土矿物的含量是红层软岩发生崩解的主要内因,且与崩解呈正相关(刘风云等, 2022; 党孟琪等, 2024),本次试验样品属于易崩解性红层泥岩。

按照《工程岩体试验方法标准》(GBT50266—2013)要求,将岩块切割加工为直径 5 cm,高 2.5 cm 的

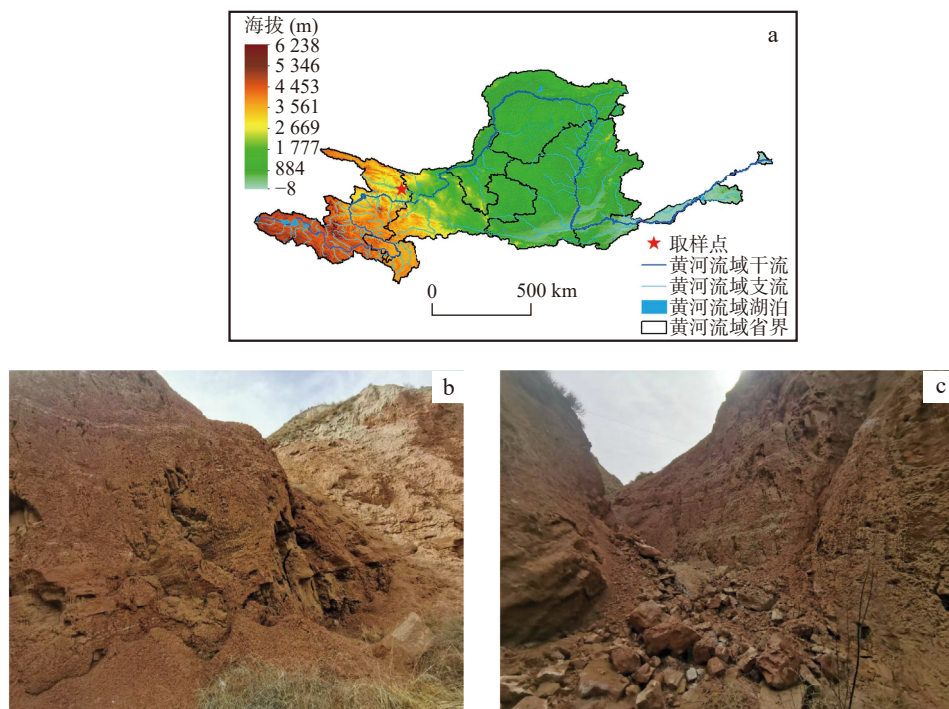
圆柱试样。试样烘干后打磨至 95 ± 0.5 g,制备未固化干燥试样 1 组,采用真空饱和法制备未固化饱和试样 1 组(图 3)。制备 MICP 固化红层泥岩试样 3 组,试验菌种是 BJMCC 公司的巴氏芽孢杆菌菌液(编号 DSM33=ATCC 11 859),试验胶结液为 1mol/L 尿素溶液与 1mol/L 氯化钙溶液等体积的混合溶液,为微生物诱导碳酸钙沉淀提供营养物质与钙源。样品制备过程中,在红层泥岩样品表面喷洒菌液,养护时间分别为 3 d、7 d 和 14 d。

2.2 试验装置与测试方法

采用所研制的可控温度和压力的岩土崩解性测试装置及使用方法(授权国家发明专利:ZL 2022 1 1 635 270.0),实现对温度和压力的稳定控制(图 4a)。采用 TESCAN CLARA 泰思肯超高分辨场发射扫描电镜获取 MICP 固化泥岩表面微观结构特征。

所研制的可控温度和压力的岩土崩解性测试装置由升降系统(包括支撑框架、提升轴及金属吊篮)、温度控制系统(包括恒温水箱、进水管、回水管及导热管)、压力控制系统(包括空压机与压力室,通过空压机施加压力)、数据采集系统(包括温度传感器、质量传感器及数据采集仪)4 部分构成(图 4)。

采用实时崩解率(A_t)与瞬时崩解速率(I_t)量化评



a. 取样位置; b. 坡面崩解与剥蚀; c. 坡面崩塌

图1 西宁盆地流域沟道红层泥岩坡面病害

Fig. 1 Defect characteristics of red-bed mudstone slopes in watershed gullies of the Xining basin

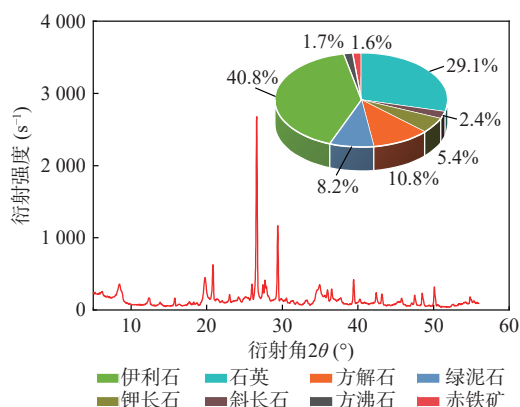


图2 红层泥岩的矿物组成

Fig. 2 Mineral composition of the red-bed mudstone

价 MICP 固化红层泥岩的崩解性质。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019), 采用计算崩解进程中任意时刻的实时崩解率公式。

$$A_t = 1 - \frac{M_t - M_d + M_{df}}{M_c - M_d + M_{df}}$$

式中: A_t 为实时崩解率(%); M_t 为 t 时刻质量传感器读数(g); M_d 为吊篮未浸入液面时质量传感器读数(g); M_{df} 为空吊篮浸水前后质量传感器读数差(g); M_c 为试样完全浸入液面时质量传感器读数(g); 瞬时崩解速率 I_t 为实时崩解率 $A_t \sim t$ 曲线的切线斜率($\% \cdot \text{min}^{-1}$)。

2.3 试验方案

为研究不同温度和压力条件下 MICP 固化红层泥岩崩解性, 根据极端气候条件及流域沟道水文条件, 选取 15 °C、25 °C、35 °C 等 3 个温度条件, 100 kPa、200 kPa、300 kPa 等 3 个压力条件, 初始含水率设为 0%(干燥)和 15%(饱和)(表 1)。

3 研究结果

3.1 崩解物与残留物特征

泥岩样品与 MICP 固化泥岩样品的崩解物与残留物对比(图 5)显示, 固化后样品表面形成钙质胶结壳, 崩解进程中表面遇水逐渐开裂, 呈片状或小块状剥落。养护时间越长, 胶结壳脱落尺寸越大, 从颗粒状逐渐发展为片状和块状, 微生物诱导碳酸钙沉淀增强了泥岩颗粒间的黏结性, 一定程度上抑制了干燥状态红层泥岩的崩解进程。

3.2 泥岩崩解率的变化规律

3.2.1 温度对红层泥岩崩解进程的影响规律

不同温度条件下红层泥岩崩解规律(图 6)显示, 随着温度升高, 干燥状态红层泥岩崩解进程加快, 35 °C 下崩解率曲线趋于稳定的时间比 15 °C 下平均缩短 27%, 但最终状态基本不受影响。相比之下, 饱和状态

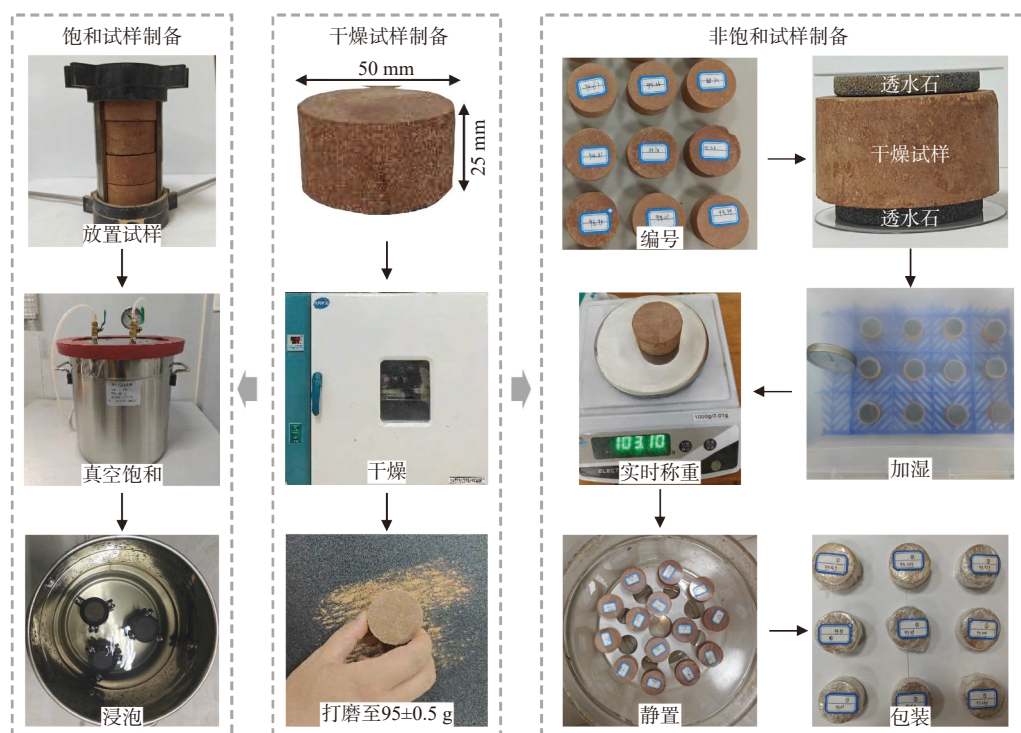


图3 样品制备过程

Fig. 3 Sample preparation process

表 1 红层泥岩样品的试验条件
Tab. 1 Test conditions of red-bed mudstone

固化方式	试样编号	含水状态/养护时间(d)	压力(kPa)	温度(℃)
未固化	HC_D	干燥/0	100、200、300	15、25、35
	HC_S	饱和/0	100、200、300	15、25、35
MICP固化	MHC_D1	干燥/3	100、200、300	15、25、35
	MHC_D2	干燥/7	100、200、300	15、25、35
	MHC_D3	干燥/14	100、200、300	15、25、35

注：编号中D、S分别表示干燥与饱和状态。

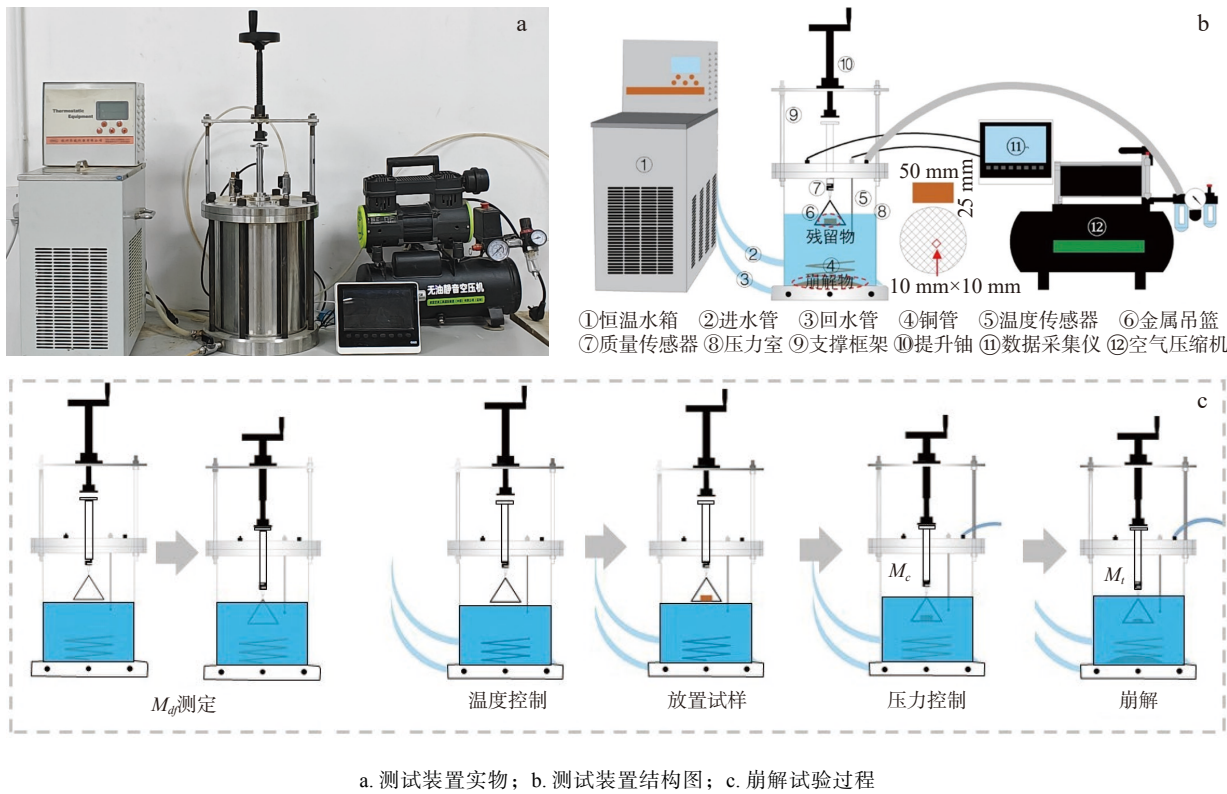


图4 可控温度和压力的岩土崩解性测试装置及崩解试验过程

Fig. 4 Disintegration testing apparatus for geomaterials under controllable temperature and pressure and the disintegration test process

红层泥岩的崩解进程受温度影响较小，同一时刻不同温度条件下崩解率差异小于10%。由此可见，温度对泥岩崩解的影响与其含水状态密切相关，升温明显加快干燥状态下崩解进程，对饱和状态试样影响较弱。

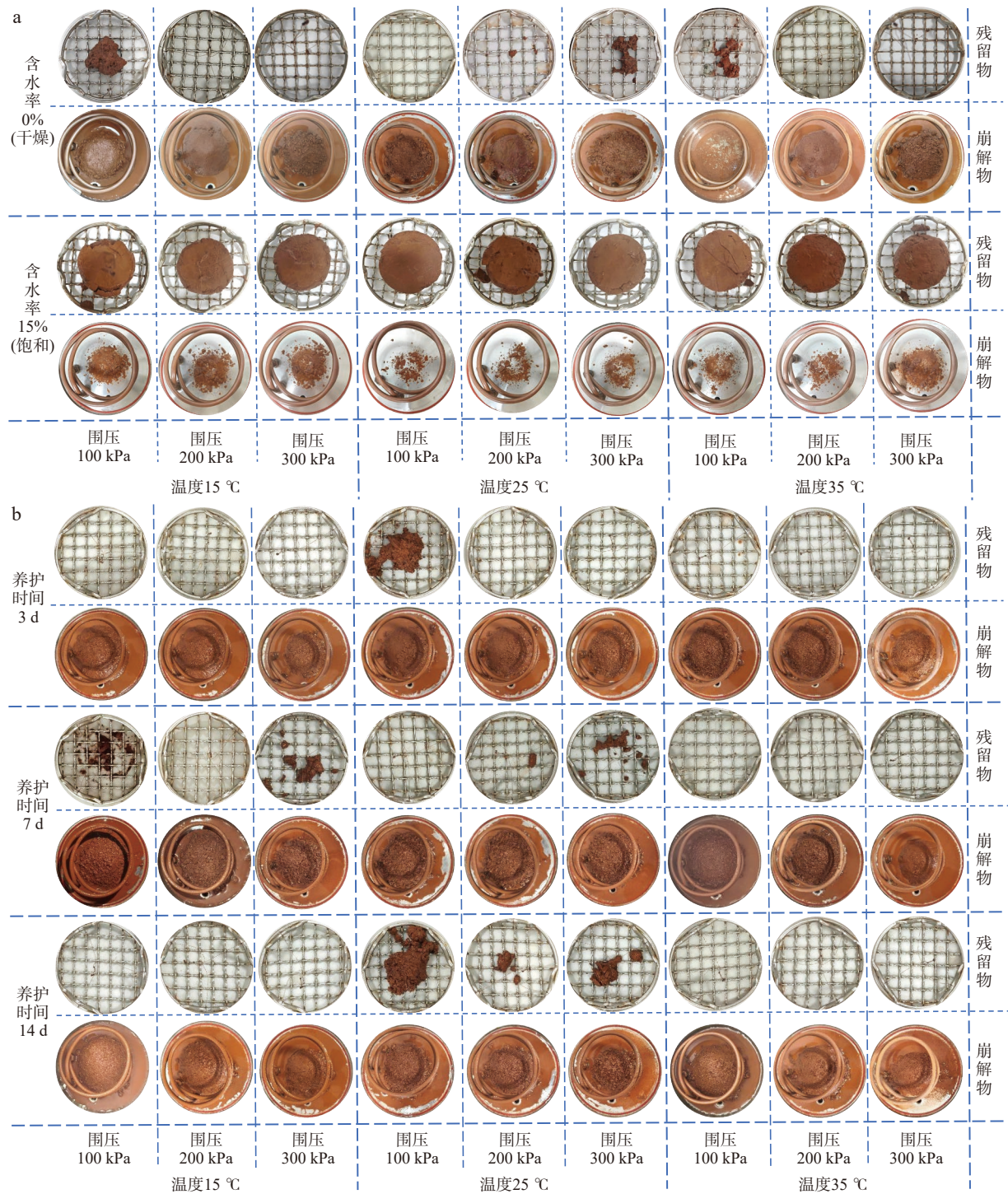
3.2.2 压力对红层泥岩崩解进程的影响规律

不同压力条件下红层泥岩的崩解率变化曲线图(图7)显示，在相同温度条件下，干燥状态红层泥岩在200 kPa和300 kPa下崩解曲线斜率明显大于100 kPa，较高压力促进泥岩崩解进程。然而，干燥和较高

温度的条件下，200 kPa下泥岩的崩解率曲线斜率大于300 kPa，说明压力对泥岩崩解性的影响并非单调促进作用，存在一定的影响范围，同时这种规律受初始含水率与环境温度制约。

3.2.3 MICP固化养护时间对红层泥岩崩解的影响

MICP固化红层泥岩的崩解性明显弱化，养护7 d和14 d的崩解抑制效果更显著(图8)。在15℃温度条件下，养护7 d样品崩解率平均下降6%；在25℃温度条件下，养护7 d、14 d的样品崩解率分别平均下降17%、43%；35℃温度条件下，温度促进崩解效应突出，



a. 泥岩样品; b. MICP 固化泥岩样品

图5 红层泥岩的崩解物与残留物

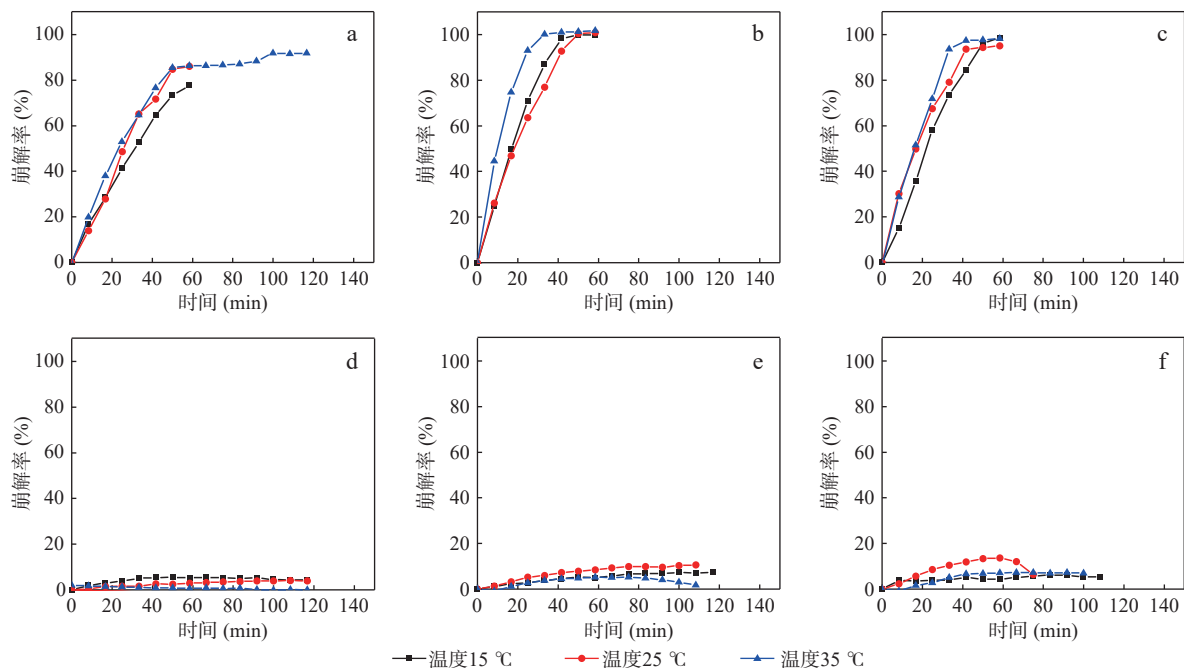
Fig. 5 Residues and collapse materials of red-bed mudstone

MICP 固化效果不显著。常温条件下 MICP 抑制崩解进程显著, 养护时间延长可增强抑制效果。

3.3 MICP 固化红层泥岩的崩解速率规律

固化后泥岩崩解率仍受温度与压力的影响, 但整体随养护天数增加呈下降趋势; 养护 3 d、7 d、14 d 的

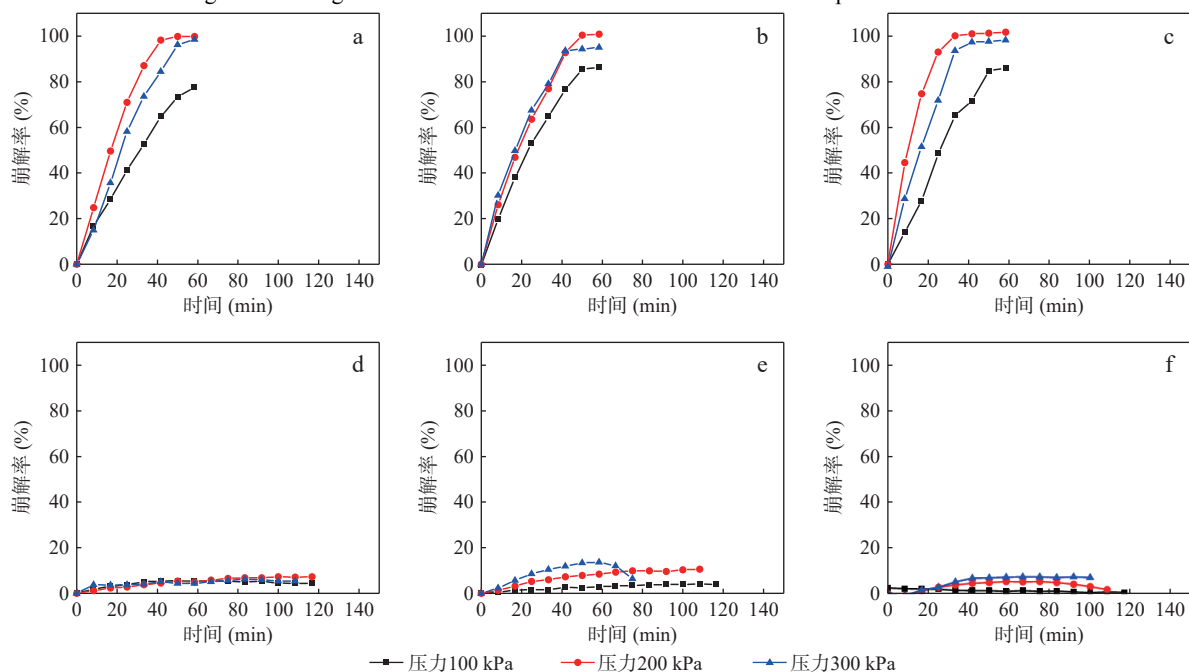
MICP 固化红层泥岩与未处理红层泥岩相比, 初始崩解阶段崩解率平均下降 13%、33%、39%, MICP 养护时间延长可降低崩解率(图 9a)。根据崩解率曲线的切线斜率确定崩解速率, 35 °C 时崩解速率较高, 25 °C 时最低, 随温度升高先降后增趋势, 压力对崩解速率



a. 干燥、压力 100 kPa; b. 干燥、压力 200 kPa; c. 干燥、压力 300 kPa; d. 饱和、压力 100 kPa; e. 饱和、压力 200 kPa; f. 饱和、压力 300 kPa

图6 不同温度条件下红层泥岩的崩解率变化曲线

Fig. 6 Disintegration ratio of red-bed mudstone under different temperature conditions



a. 干燥、温度 15 °C; b. 干燥、温度 25 °C; c. 干燥、温度 35 °C; d. 饱和、温度 15 °C; e. 饱和、温度 25 °C; f. 饱和、温度 35 °C

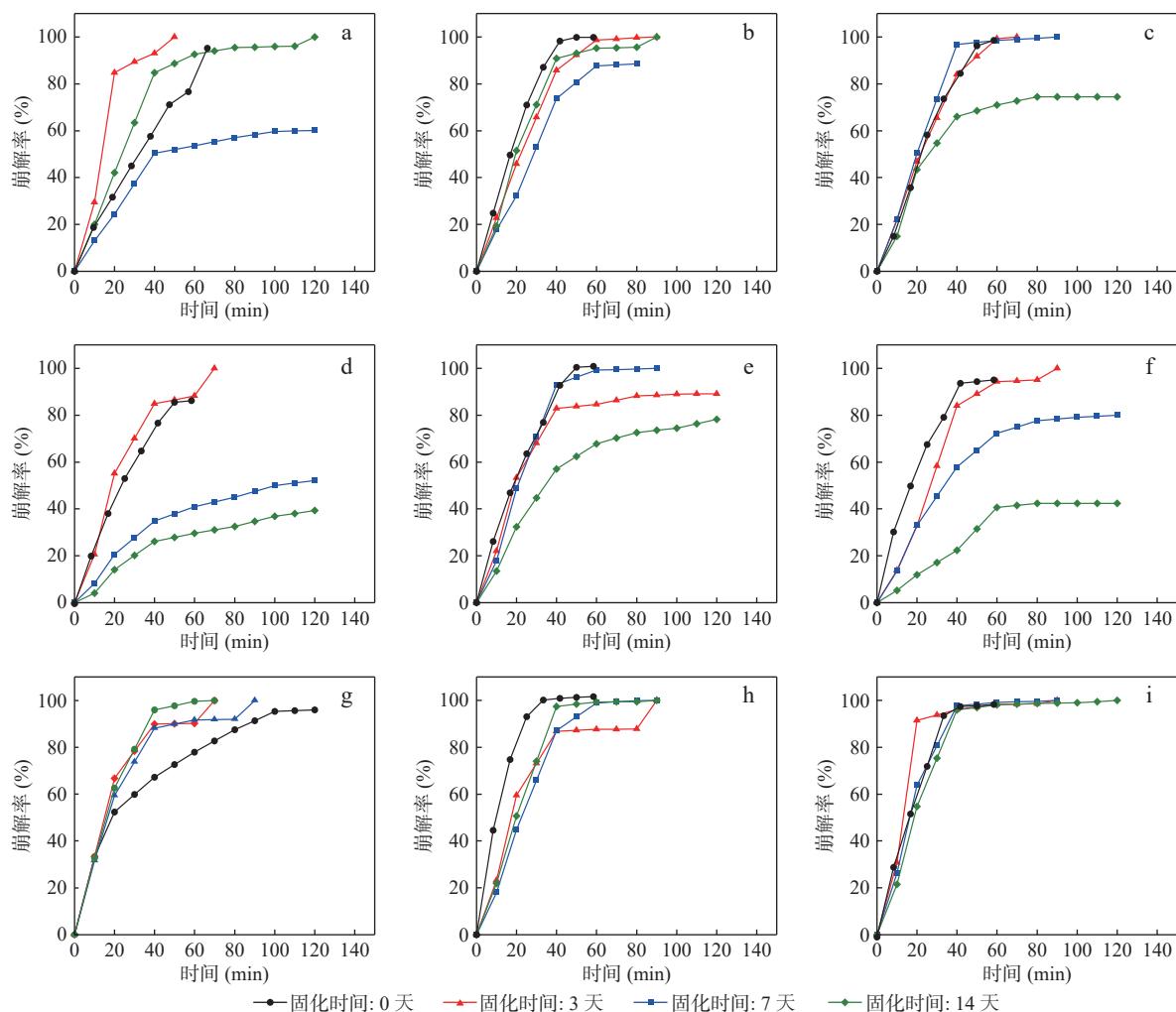
图7 不同压力条件下红层泥岩崩解率变化曲线

Fig. 7 Disintegration ratio of red-bed mudstone under different pressure conditions

的影响不具有单调性; 养护 3 d、7 d、14 d 的 MICP 固化红层泥岩与未固化红层泥岩相比, 初始崩解阶段崩解速率平均下降 13%、27%、36%; MICP 固化可显著降低泥岩崩解速率, 且随养护时长逐渐下降(图 9b)。

4 讨论

红层泥岩的崩解性强弱与其黏土矿物含量呈显



a. 温度 15℃、压力 100 kPa; b. 温度 15℃、压力 200 kPa; c. 温度 15℃、压力 300 kPa; d. 温度 25℃、压力 100 kPa; e. 温度 25℃、压力 200 kPa; f. 温度 25℃、压力 300 kPa; g. 温度 35℃、压力 100 kPa; h. 温度 35℃、压力 200 kPa; i. 温度 35℃、压力 300 kPa

图8 MICP 固化红层泥岩的崩解率曲线

Fig. 8 Disintegration ratio curves of red-bed mudstone reinforced by MICP

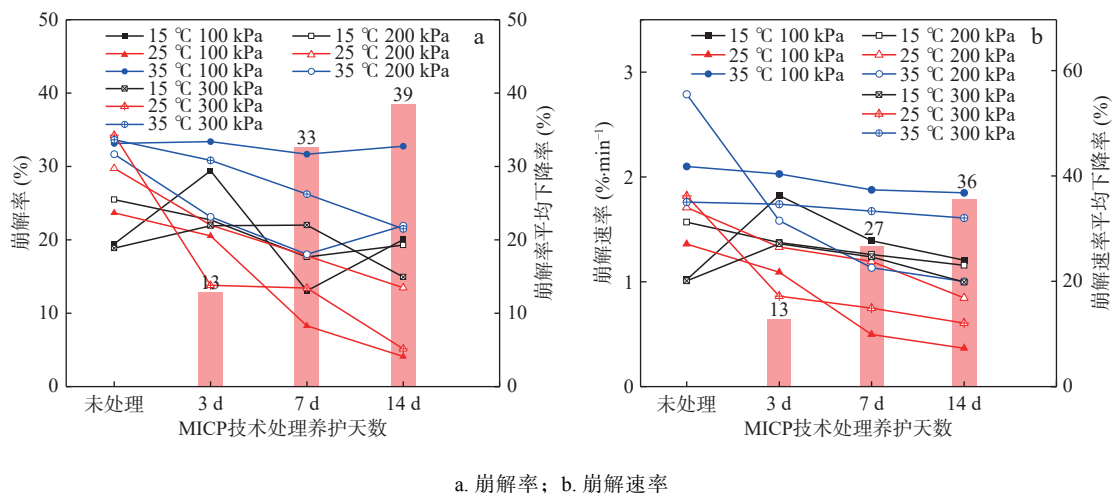


图9 不同 MICP 固化养护时间下初始崩解阶段红层泥岩的崩解率与崩解速率

Fig. 9 Disintegration rate curve under different curing durations during the initial disintegration stage

著正相关,黏土矿物水化作用受层间阳离子类型、温度及水分子迁移速率等影响(Chen et al., 2022; Gong et al., 2024)。温度升高引起岩石胀缩产生热应力(Zhang et al., 2015),增强水溶液和岩石内部的分子活性,促进水分子向微孔和微裂隙中渗透,加速水化反应(Lu et al., 2017; Meng et al., 2021)。崩解过程中水压直接施加于岩石表面矿物、孔隙及裂隙,孔隙和裂隙中的渗透压力随着水压逐步增大,加剧崩解(Ding et al., 2024)。所研究红层泥岩黏土矿物主要是伊利石(含量>40%),温度上升增强了伊利石晶胞层间水分子和阳离子扩散,加剧了红层泥岩崩解进程(图 10a)。水压力发挥水力驱动与力学约束的双重作用,驱动红层泥岩气相和液相流动,促进孔隙裂隙发展,还对红层泥岩固体颗粒产生侧向约束(图 10b)。伊利石等黏土矿物层间水化作用及双电层扩展,层间距增大,颗粒

间联结力减弱(Li et al., 2023),水分渗入黏土矿物晶胞层间,矿物内部形成层间水层(周翠英等, 2005),导致黏土矿物膨胀,红层泥岩内部产生不均匀应力,诱发大量微裂隙萌生,导致红层泥岩发生渐进式崩解。

MICP 固化红层泥岩表面孔隙裂隙被碳酸钙晶体胶结,颗粒间连接紧密,固化效果随养护天数增加而增强,试样表面连续裂隙和微孔隙减少是抑制崩解的重要因素(图 11a)。养护 3 d 的试样表面微裂隙中开始生成钙质结晶,形成“点接触”;养护 7 天后表面连续裂隙减少,微孔隙被胶结填充;养护 14 d 后试样表面残留少量干燥孔隙,微裂隙被填充,粒间形成“面接触”,表层形成了钙质胶结壳,大量碳酸钙结晶填充红层泥岩孔隙裂隙,孔隙率下降(图 11b)。碳酸钙结晶在颗粒间起胶结与连结作用,接触方式由“点接触”改善为“面接触”,形成矿物颗粒之间形

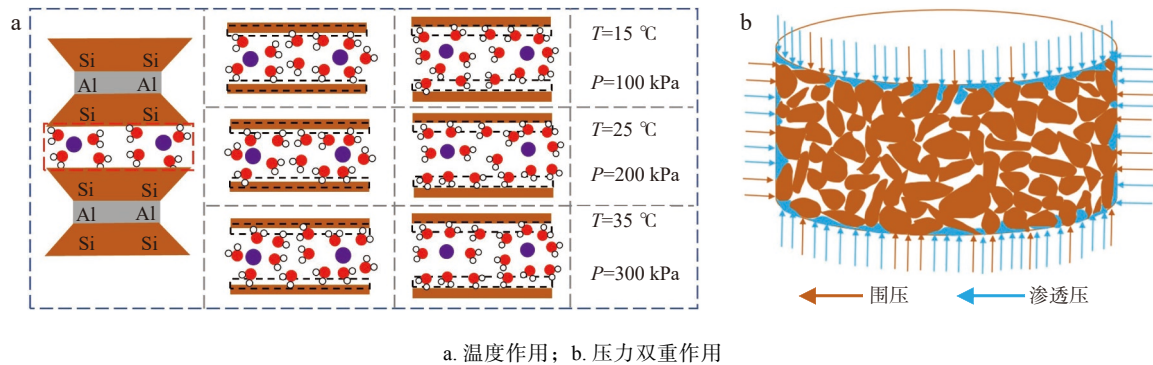


图10 温度与压力作用示意图

Fig. 10 Diagram showing the effects of temperature and pressure

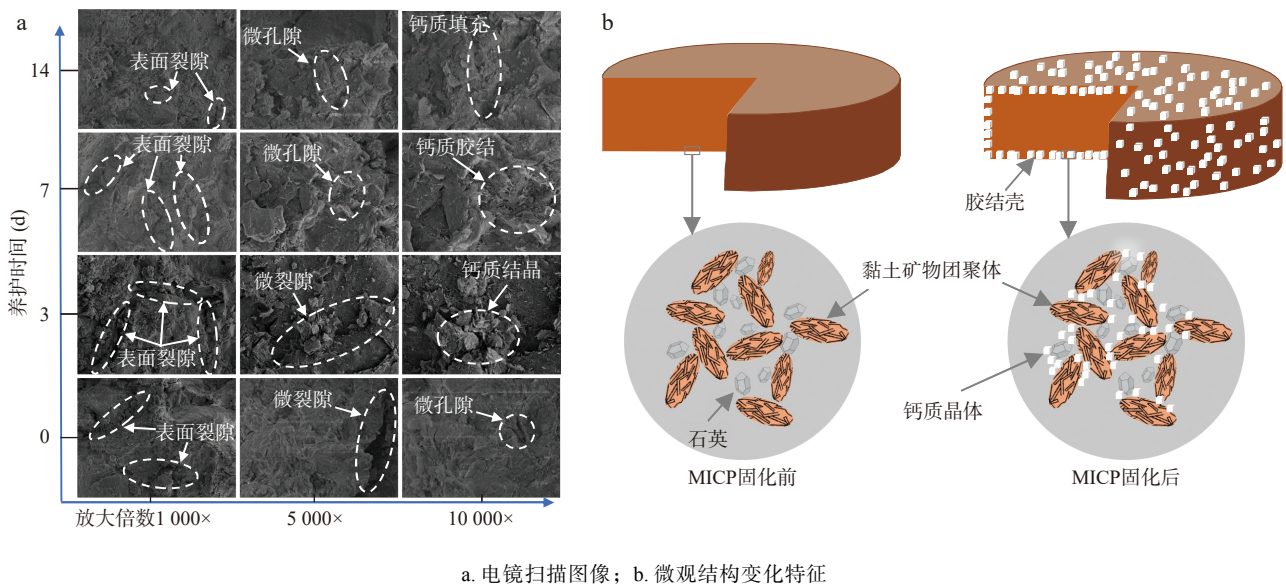


图11 MICP 固化泥岩表面颗粒间微观特征

Fig. 11 Microscopic characteristics of the intergranular pores on the surface of mudstone reinforced by MICP

成“架桥”结构,一定程度上抑制了泥岩的崩解性。

5 结论

(1)红层泥岩黏土矿物含量高,其崩解性受初始含水率显著影响,干燥红层泥岩的崩解性强,崩解物呈颗粒至粉末状,且温度越高颗粒越细,越分散;红层泥岩在饱和状态下崩解性弱,表现出片状剥落,崩解率曲线斜率显著低于干燥状态。

(2)温度和压力对红层泥岩崩解性的影响依赖于含水状态,干燥状态红层泥岩崩解对温度敏感,35℃下崩解曲线趋于稳定的时间比15℃下平均缩短27%,饱和状态红层泥岩崩解对温度不敏感,不同温度下崩解率差异小于10%,压力在红层泥岩崩解过程中发挥力学约束与水力驱动的双重作用,随压力增大崩解性呈先增强后减弱的特征。

(3)MICP 固化养护时间延长对崩解过程的抑制作用显著。养护3d、7d、14d的MICP固化红层泥岩与未固化红层泥岩相比,初始阶段崩解率平均下降13%、33%、39%,崩解速率平均下降13%、27%、36%。常温条件下MICP缓解崩解效果明显,养护7d、14d样品崩解率分别平均下降17%、43%。

(4)MICP 固化红层泥岩表面形成碳酸钙胶结壳,填充孔隙降低孔隙度,颗粒接触从“点接触”转变为“面接触”,增强颗粒黏聚力,阻滞水分入渗,有效减缓红层泥岩崩解进程。该方法适用于常温条件下红层泥岩表面防护,建议开展小尺度模型试验和现场试验,评价红层泥岩坡面MICP防护实际效果;研究成果可为西北地区流域沟道红层泥岩坡面生态防护提供理论依据。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

程留全. 微生物诱导碳酸钙沉淀技术优化及其在粉土固化中的应用[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2024.
CHENG Liuquan. Optimization of Microbial - induced Calcium Carbonate Precipitation and Its Application in Silt Solidified[D]. Zhouzhou: North China University of Water Resources and

Electric Power, 2024.
党孟琪, 赵其华, 王博, 等. 红层软岩崩解演化规律与强度弱化试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 57-64.
DANG Mengqi, ZHAO Qihua, WANG Bo, et al. Experimental Study on the Evolution Law of Red Layer Soft Rock Disintegration and Strength Weakening[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2024, 46(6): 57-64.
高波, 董英, 贾俊, 等. 甘肃临夏积石山县6.2级地震地质灾害发育特征及危险性评价[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 209-219.
GAO Bo, DONG Ying, JIA Jun, et al. Development Feature and Risk Assessment of Geological Hazards Caused by the Ms 6.2 Earthquake in Jishishan County, Linxia, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 209-219.
郭永春, 谢强, 文江泉. 水热交替对红层泥岩崩解的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 69-73.
GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Effect of the alternation of heat and water on the slaking phenomenon of redbeds[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 69-73.
刘凤云, 谢飞, 邱恩喜, 等. 川西红层软岩崩解演变特征与微响应机理试验研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1597-1608.
LIU Fengyun, XIE Fei, QIU Enxi, et al. Experimental study on disintegration evolution characteristics and microscopic response mechanism of red-bed soft rock in western Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1597-1608.
李国维, 巩齐齐, 李涛, 等. 崩解性砂岩改良弱膨胀土性状实验研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(1): 34-43.
LI Guowei, GONG Qiqi, LI Tao, et al. Experimental study on properties of weak expansive soil improved by disintegrated sandstone[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1): 34-43.
孙富强, 张永军, 喻生波, 等. 兰州皋兰山Ⅲ-2号滑坡变形特征及复活条件预测[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 267-276.
SUN Fuqiang, ZHANG Yongjun, YU Shengbo, et al. Deformation Characteristics and Prediction of Resurrection Conditions of Landslide Ⅲ-2 in Gaolan Mountain, Lanzhou[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 267-276.
石维栋, 张森琦, 周金元, 等. 西宁盆地北西缘地下热水分布特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1131-1136.
SHI Weidong, ZHANG Senqi, ZHOU Jinyuan, et al. Distribution characteristics of geothermal water on the northwestern margin of the Xining basin[J]. Geology in China, 2006, 33(5): 1131-1136.
汪美华, 赵慧, 倪天翔, 等. 基于不连续布局优化法的那勒寺古滑坡稳定性分析[J]. 西北地质, 2020, 53(1): 234-242.
WANG Meihua, ZHAO Hui, NI Tianxiang, et al. Stability Analysis of the Nalesi Ancient Landslide Based on the Discontinuous Layout Optimization.[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1): 234-242.
肖瑶, 邓华锋, 程雷, 等. MICP 增强水泥改良红层泥岩填料力学性能及作用机理[J]. 材料导报, 2025, 39(15): 104-111.

- XIAO Yao, DENG Huafeng, CHENG Lei, et al. Mechanical Properties and Mechanism of MICP Enhanced Cement Modified Red Mudstone Filler[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(15): 104–111.
- 余云燕, 丁小刚, 黄志勤. 粉煤灰改良红层泥岩填料静三轴试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2024, 20(3): 838–847.
- YU Yunyan, DING Xiaogang, HUANG Zhiqin. Experimental Study on Static Triaxial Test of Fly Ash Modified Red Mudstone Filler[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, 20(3): 838–847.
- 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, (3): 394–400.
- ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on Softening Mechanism of Special Soft Rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, (3): 394–400.
- 赵润涛. 高液限膨胀性黏土化学改良试验研究[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(5): 75–79.
- ZHAO Runtao. Experimental Study on Chemical Improvement of Expansive Clay with High Liquid Limit. [J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(5): 75–79.
- 张渭军, 王永胜, 马滔. 基于正交设计的红层软岩改良土压缩模量试验研究[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(2): 264–269.
- ZHANG Weijun, WANG Yongsheng, MA Tao. Experimental study on the compression modulus of red-bed soft rock improved soil based on orthogonal design[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(2): 264–269.
- 张森琦, 许伟林, 严维德, 等. 西宁盆地地热地质 [M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- Chen W L, Grabowski Robert C, Goel Saurav. Clay Swelling: Role of Cations in Stabilizing/Destabilizing Mechanisms[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(4): 3185–3191.
- Dejong J T, Fritzges M B, Klaus N. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381–1392.
- Ding Shun, Tang Shibin. Mechanical behavior evolution and failure characteristics of saturated and dry rocks under different water pressure environments[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 178: 105777.
- Fu Hongyuan, Zha Huanyi, Zeng Ling, et al. Disintegration behavior and mechanism of carbonaceous mudstone under acidic corrosion and wetting-drying cycles[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82: 168.
- Gong Fengming, Hou Dali, Xiang Xueni, et al. Mechanistic study of the effect of clay hydration swelling on CH₄/CO₂ competitive adsorption[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2024, 80: 102666.
- Hu Ming, Liu Yuanxue, Ren Jianbo, et al. Laboratory test on crack development in mudstone under the action of dry-wet cycles[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78: 543–556.
- Jiang N J, Soga K. The Applicability of Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Internal Erosion Control in Gravel-Sand Mixtures[J]. *Géotechnique*, 2017, 67(1): 42–55.
- Li Tianyu, Chai Zhaoyun, Yang Zeqian, et al. Insights into the influence mechanism of different interlayer cations on the hydration activity of montmorillonite surface: A DFT calculation[J]. *Applied Clay Science*, 2023, 239: 106965.
- Liu Changdong, Cheng Yi, Jiao Yuyong, et al. Experimental study on the effect of water on mechanical properties of swelling mudstone[J]. *Engineering Geology*, 2021, 295: 106448.
- Lu Yinlong, Wang Lianguo, Sun Xiaokan, et al. Experimental study of the influence of water and temperature on the mechanical behavior of mudstone and sandstone[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(2): 645–660.
- Meng Lingdong, Han Lijun, Zhu Hexuan, et al. Study on the Influence of Formation Temperature on the Water Absorption and Weathering of Swelling Rock in Marine Coal Mines[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(11): 4207–4220.
- Su Xuexue, Tang Huiming, Huang Lei, et al. The role of pH in red-stratum mudstone disintegration in the Three Gorges reservoir area, China, and the associated micromechanisms[J]. *Engineering Geology*, 2020, 279: 105873.
- Wang Tie, Yan Chengzeng, Zheng Hong, et al. Microfracture behavior and energy evolution of heterogeneous mudstone subjected to moisture diffusion[J]. *Computers & Geosciences*, 2022, 150: 104918.
- Xie Qingyu, Huang Qiangbin, Zhao Junyan, et al. Key factors in the reactivation of thick loess mudstone ancient landslides: a case study of the Gaojiawan landslide, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2025, 84(6): 1–15.
- Zhang Dan, Chen Anqiang, Wang Xuemei, et al. Quantitative determination of the effect of temperature on mudstone decay during wet-dry cycles: A case study of ‘purple mudstone’ from south-western China[J]. *Geomorphology*, 2015, 246: 1–6.