

## 不同风化程度下灰岩抗剪强度特性及估算模型研究

邓涛, 廖军, 王陈宾, 唐刚, 钱小龙, 龚洪苇

### A study of shear strength characteristics and estimation model of limestone under different weathering degrees

DENG Tao, LIAO Jun, WANG Chenbin, TANG Gang, QIAN Xiaolong, and GONG Hongwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110044>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

#### 基于孔隙面积比的麦秸秆防腐分析及秸秆对粉土抗剪强度的影响

Wheat straw anticorrosion analysis based on pore area ratio and the effect of straw on the shear strength of silty soil

彭丽云, 李朝成, 刘铭杰, 崔长泽 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 171-180

#### 火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响

Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas

胡卸文, 侯羿腾, 王严, 杨瀛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 106-112

#### 节理分布位置对岩体剪切破裂特征影响试验研究

An experimental study of the influence of discontinuous structural planes at different locations on the shear fracture characteristics of rock mass

郭朋瑜, 吉锋, 何双, 胡如刚, 梁德爽, 易林立, 蒋彦如 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 81-81

#### 泸定大渡河桥冰碛土的结构及现场剪切试验研究

Soil structure and in-site shear test of moraine soil near the Xingkang Bridge over the Daduhe River in Luding

程强, 郭喜峰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 126-133

#### 无胶结粗粒土初始结构强度研究

Research on the critical strength of the initial structure of the uncemented coarse-grained soil

张晨曦, 王洋, 魏玉峰, 梁彭, 贺琮栖 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 54-63



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110044

邓涛, 廖军, 王陈宾, 等. 不同风化程度下灰岩抗剪强度特性及估算模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 71-80.  
DENG Tao, LIAO Jun, WANG Chenbin, *et al.* A study of shear strength characteristics and estimation model of limestone under different weathering degrees[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 71-80.

## 不同风化程度下灰岩抗剪强度特性及估算模型研究

邓涛<sup>1</sup>, 廖军<sup>1</sup>, 王陈宾<sup>1</sup>, 唐刚<sup>1</sup>, 钱小龙<sup>2</sup>, 龚洪苇<sup>1</sup>  
(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;  
2. 自贡市城市建设投资开发集团有限公司, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 工程上常见的灰岩在不同风化程度下的抗剪强度特性鲜有研究, 也没有快速评估灰岩抗剪强度的数学模型, 不能满足大量灰岩工程灾害防治的需要。为探究风化程度对灰岩抗剪强度特性的影响规律, 试验选取现场新鲜灰岩试样, 通过开展室内风化模拟试验制备不同风化程度的岩样, 进行室内岩石强度剪切试验, 探究灰岩剪切应力-剪切位移关系曲线的变化规律和抗剪强度的劣化规律。通过建立风化程度下灰岩抗剪强度估算模型, 揭示风化程度与抗剪强度的量化关系。试验结果表明: 随着风化程度的增加, 灰岩抗剪强度和残余抗剪强度均呈现减小的趋势, 但残余抗剪强度比抗剪强度劣化更严重, 且劣化速度更快; 灰岩随着风化程度的增加, 其黏聚力  $c$  及内摩擦角  $\varphi$  均越来越小, 两者劣化趋势相似; 利用波速比量化风化程度, 建立起风化作用下灰岩抗剪强度估算模型, 通过简单测量计算岩石的波速比, 即可快速评估岩石的抗剪强度特性。研究结果可为灰岩工程抗剪强度特性的评估提供更加简便易行的方法。

**关键词:** 灰岩; 风化程度; 抗剪强度; 估算模型

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0071-10

## A study of shear strength characteristics and estimation model of limestone under different weathering degrees

DENG Tao<sup>1</sup>, LIAO Jun<sup>1</sup>, WANG Chenbin<sup>1</sup>, TANG Gang<sup>1</sup>, QIAN Xiaolong<sup>2</sup>, GONG Hongwei<sup>1</sup>  
(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Zigong City Construction Investment Development Group Co. Ltd., Zigong, Sichuan 643000, China)

**Abstract:** The shear strength characteristics of common limestone in engineering under different weathering degrees were seldom examined, and there is no mathematical model for rapid evaluation of the shear strength of limestone, which cannot meet the needs of prevention and control of a large number of limestone engineering disasters. In order to explore the influence of weathering degree on the shear strength characteristics of limestone, the fresh limestone samples are selected in the test. The rock samples with different weathering degrees are prepared by indoor weathering simulation test. The indoor rock strength shear test is carried out to explore the variation law of the shear stress-shear displacement curve of limestone and the deterioration law of shear strength

收稿日期: 2021-10-27; 修订日期: 2021-12-23

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978088)

第一作者: 邓涛(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土体特性研究。E-mail: [841448397@qq.com](mailto:841448397@qq.com)

通讯作者: 廖军(1971-), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事公路边(滑)坡工程与隧道工程评价防治及岩土体特性研究。

E-mail: [liaojun@mail.cdut.edu.cn](mailto:liaojun@mail.cdut.edu.cn)

and its parameters. The quantitative relationship between the weathering degree and shear strength is revealed by establishing the shear strength estimation model of limestone under weathering degree. The test results show that with the increasing weathering degree, the shear strength and residual shear strength of limestone show a decreasing trend, but the residual shear strength is worse than the shear strength, and the deterioration rate is faster. With the increasing weathering degree, the cohesion  $c$  and internal friction angle  $\phi$  of limestone are getting smaller and smaller, and the deterioration trend is similar. Using the wave velocity ratio to quantify the weathering degree, the shear strength estimation model of limestone under weathering is established. The shear strength characteristics of rock can be quickly evaluated by simply measuring and calculating the wave velocity ratio of rock. The research results can provide a more simple and feasible method for evaluating the shear strength characteristics of limestone engineering.

**Keywords:** limestone; weathering degree; shear strength; estimation model

风化会影响岩石的性质,岩石抗剪强度是工程界关注的问题。机械和化学两种风化作用均可影响岩石的力学特性,在自然界中总是同时存在的,并相互增强。机械风化通过力的作用导致岩石产生更多更大的裂缝,增加化学风化的作用面积,从而加快分解速度。同时,化学风化通过削弱一些岩石的外部来促进机械风化,这反过来使它们更容易被机械风化过程破坏。灰岩作为一种常见的沉积岩,风化程度与抗剪强度之间的变化规律是灰岩边坡设计与防护中亟待解决的问题。针对风化作用对岩石强度的影响,目前学界多从风化岩样制备、风化程度判定及风化作用下的岩石力学特性开展研究。

不同于现场风化岩石取样,室内风化岩样的制备可以保证试样的质量,同时也克服了现场试样易被无关因素干扰的问题。为了获得不同条件下的风化岩样,研究人员在实验室对包括泥岩、花岗岩和灰岩在内的各种岩石进行干湿循环、冻融循环和冷热循环处理,模拟风化过程,得到不同风化程度的岩样<sup>[1-4]</sup>。

岩石风化程度的准确判定为开展不同风化程度岩石强度研究提供了基础。为了准确判定岩石的风化程度,研究人员试图应用一些新的仪器和方法<sup>[5-10]</sup>,对各种岩石提出定量指标,探讨其风化特征规律。Cano 等<sup>[11]</sup>提出了潜在退化指数(PDI),用于描述在非均质岩体中露头的碳酸盐岩的风化行为,消除了由熟化耐久性试验得到的熟化耐久性指数表征方法的缺陷。早已提出的风化岩石与新鲜岩石的波速比方法<sup>[12]</sup>现今也是常用易行的岩石风化程度量化评价手段。

室内风化岩样为风化对岩石力学特性影响研究提供了实验条件,众多研究人员对风化影响岩石力学特性进行探讨。这些试验表明,风化处理后,抗剪强

度、抗压强度等力学特性普遍发生劣化<sup>[13-15]</sup>。可利用不同的分析技术从微观/宏观两方面解释风化对岩石微观/宏观力学性质的影响<sup>[16]</sup>。但上述研究均只讨论了风化的影响,并未探究风化程度对岩石力学特性的影响规律。在探究不同风化程度影响方面,Fan 等<sup>[17]</sup>通过直剪试验研究了不同风化程度对闪长玢岩剪切行为和力学性质的影响。同时,利用定量指标准确预测岩石的工程性质并建立指标与岩石力学强度的关系模型<sup>[18-19]</sup>,对工程上快速评价岩石力学强度具有重要意义。

以往的研究未关注工程上常见的灰岩不同风化程度下的抗剪强度特性,也没有快速评估灰岩抗剪强度的数学模型,不能满足大量灰岩边坡工程灾害防治的需要。因此,本次研究旨在探讨风化程度对灰岩抗剪强度特性的影响并建立灰岩抗剪强度估算模型,开展实验室加工的灰岩岩样干湿循环试验模拟岩石风化作用,通过岩石波速比对岩石风化程度进行表征,利用岩石表面宏观特征讨论,结合灰岩岩石剪切强度试验,探讨灰岩抗剪强度特性的变化规律,并建立波速比与灰岩抗剪强度的估算模型。对在岩体工程中了解不同风化程度下灰岩抗剪强度特性变化规律及快速准确评价灰岩抗剪强度具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料制备

对现场获取的新鲜灰岩试样,进行加工处理得到试样尺寸为 5 cm×5 cm×5 cm(图 1),为确保试样的均一性,对所有试样进行筛选,筛选剔除宏观缺陷试样、称重剔除质量离散型较大试样,避免试样内部出现空洞的现象,保证所选灰岩试样均为未风化,最终制成 20 个试样。



图 1 灰岩试样 (部分)

Fig. 1 Limestone sample (part)

## 1.2 试验方法

本次研究利用干湿循环试验模拟岩石风化作用, 制作 20 个试样, 共分 5 组, 以每 4 个试样为 1 组。试样编号见表 1, 编号为 1—4 的灰岩试样作为对照试验组, 不进行风化试验。

表 1 灰岩风化试验方案

Table 1 Limestone weathering test plan

序号	组号	试样编号	干湿循环试验次数
1	第1组	1—4	0
2	第2组	5—8	10
3	第3组	9—12	20
4	第4组	13—16	30
5	第5组	17—20	40

1 次干湿循环过程是指 1 次吸水饱和与干燥失水过程, 干湿循环具体试验方案设计如下:

(1) 吸水饱和过程: 为使岩石试样尽快达到吸水饱和状态, 本次采用三维浸没吸水法。利用自然浸泡法, 浸泡溶液采用  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液是强电解质, 由于盐效应, 使方解石(灰岩的主要成分为方解石)等难溶解物质的溶解度增大, 对灰岩进行侵蚀<sup>[20]</sup>。在试验过程中将试样浸没于溶液之中, 持续浸泡 24 h。

(2) 干燥失水过程: 根据试验规范要求, 烘干温度一般规定为 105 ~ 110 °C。故本次试验温度选用 110 °C, 烘烤 12 h 进行干燥失水试验。

## 2 风化试验结果

### 2.1 岩石风化程度判定

开展每组灰岩试样风化作用前后的波速测试, 测得不同岩石风化作用的波速值, 计算得到灰岩试样风化作用前后的波速比并进行风化程度判断(表 2)。由表 2 可知, 其各组灰岩试样波速值均发生改变, 实现了对灰岩风化作用的模拟, 得到了不同风化程度的灰岩试样。

表 2 风化作用下灰岩波速测试及风化程度判定

Table 2 Limestone wave speed test and weathering degree judgment under weathering

试样编号	岩石波速值 $V_{ud}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	岩石波速比 $k_v$	风化程度	试样编号	岩石波速值 $V_{ud}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	岩石波速比 $k_v$	风化程度
1	6 572.43	1	未风化	11	5 419.06	0.84	微风化
2	6 376.11	1	未风化	12	5 611.26	0.86	微风化
3	6 453.32	1	未风化	13	4 901.42	0.75	弱风化
4	6 534.22	1	未风化	14	4 947.34	0.77	弱风化
5	6 243.81	0.95	未风化	15	5 289.72	0.8	微风化
6	5 613.35	0.87	微风化	16	4 949.24	0.76	弱风化
7	5 878.76	0.93	未风化	17	4 586.44	0.71	弱风化
8	5 833.17	0.91	未风化	18	4 600.51	0.72	弱风化
9	5 470.51	0.82	微风化	19	4 779.38	0.74	弱风化
10	5 485.59	0.86	微风化	20	4 843.51	0.74	弱风化

注: 现有《公路工程地质勘察规范 JTG C 20—2011》规范给出了岩石风化程度与波速比之间的关系: 新鲜岩石: 0.9 ~ 1.0; 微风化: 0.8 ~ 0.9; 弱风化: 0.6 ~ 0.8; 强风化: 0.4 ~ 0.6; 全风化: <0.4。

### 2.2 不同风化程度灰岩表面宏细观特征

风化模拟过程使得岩石表面宏细观特征形成差异, 呈现出颜色、微裂隙等变化, 这些现象是风化作用引起岩石风化程度变化的直接反映。根据上述试验结果, 对不同风化程度的灰岩试样, 从宏细观的角度去定性分析灰岩表面风化特征。以 1, 6, 10, 16, 20 号试样为例, 探讨风化作用对灰岩的影响。图 2 为显微镜放大 150 倍时岩样表面细观特征。

由图 2 可知, 通过对不同风化灰岩表面的宏细观特征进行分析, 发现不同风化作用下的灰岩表面宏细观特征不尽相同。随着风化程度的增加, 岩石表面出现风化的现象越发明显, 表面裂隙逐步增多且增大, 表面裂隙的增大更加有利于外界影响因素作用向岩石内部的渗入。不同风化作用下灰岩的宏细观特征总结如表 3 所示。

### 2.3 风化作用下岩石风化机理浅析

岩石是由一种或几种矿物组成的集合体, 其力学性质主要取决于矿物成分和矿物颗粒间的连接作用。水化学环境对岩石的作用包括物理和化学两方面的影响。在物理作用方面, 水对岩石内颗粒界面的润滑作用, 导致矿物颗粒间连接作用减弱, 摩擦力降低, 水的孔隙压力会降低围压的有效性, 对微裂隙产生劈裂作用等<sup>[20]</sup>; 在化学作用方面, 水岩化学作用引起岩石的矿物成分发生改变并会使一些矿物溶解, 颗粒被水带走, 导致岩石颗粒大小及形态、微孔隙、微裂隙等细观结构发生变化<sup>[21]</sup>, 从而影响其力学性质。

如果把岩体看作一种理想的均匀介质, 风化作用对岩石的影响是一个由表及里的过程, 表部岩体为风

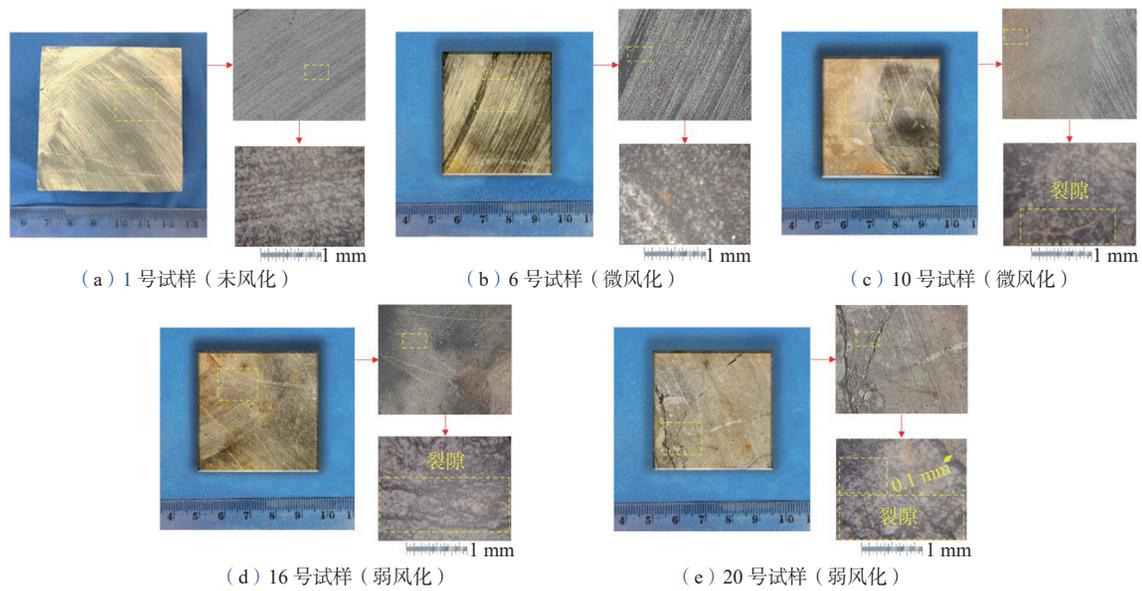


图 2 不同风化程度灰岩的表面宏细观特征

Fig. 2 Surface macro and mesoscopic characteristics of limestone with different weathering degrees

表 3 不同风化程度灰岩的宏观细观特征

Table 3 Macro and mesoscopic characteristics of limestone with different weathering degrees

试样编号	风化程度	宏观特征	细观特征
1	未风化	表面未见风化痕迹, 岩石表面颜色较浅, 岩石表面颜色呈现原岩本身颜色且表面光滑	岩石表面未见风化裂隙, 原生构造结构清晰, 色调明亮
6	微风化	表面偶见风化痕迹, 岩石表面颜色略变深呈褐色, 未见明显风化裂隙	岩石表面未见裂隙, 原生构造结构清晰, 色调明亮, 表面可见部分明亮颗粒
10	微风化	表面少量风化痕迹, 岩石表面可见风化晕, 部分表面颜色略有变深, 表面可见部分微小裂隙	岩石表面裂隙偶见, 构造清晰, 色调较为明亮, 表面明亮颗粒减少
16	弱风化	表面可见风化痕迹, 部分表面颜色略有变深, 表面可见部分裂隙	岩石表面可见明显裂纹, 构造较清晰, 色调较暗淡
20	弱风化	表面有风化痕迹, 大部分变色, 颜色变化较为明显, 岩石表面出现部分锈蚀现象, 表面可见部分贯穿裂隙, 裂隙分布范围较广	岩石表面裂隙较为发育, 岩石表面出现较大裂隙, 裂隙宽度约为 0.1 mm, 色调较为暗淡

化营力提供了更为充分的活动空间, 而在向深部转移的过程中风化营力逐渐减弱, 因此总体上呈现出上部

岩体风化强烈而深部岩体风化微弱直至终止于某一界限的规律, 如图 3 所示。

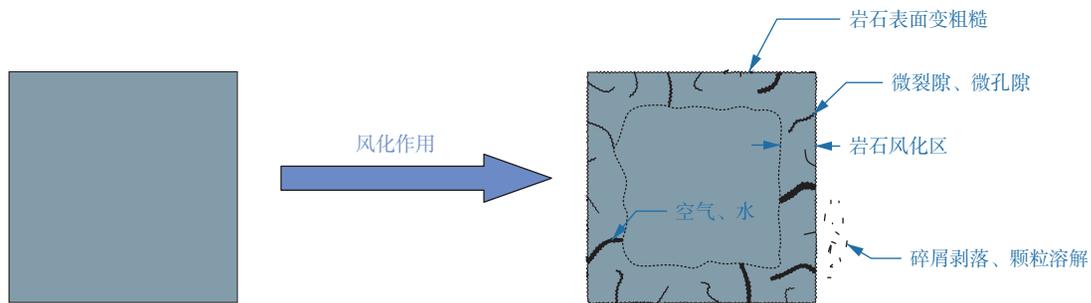


图 3 岩石风化示意图

Fig. 3 Diagram showing rock weathering

### 3 剪切试验结果与分析

本次试验使用 YDS-2 型便携式岩土力学性质多功能试验仪器 (图 4), 对不同风化程度灰岩在法向应力分别为 1, 2, 3, 4 MPa 下进行室内岩石强度剪切试验。

#### 3.1 风化程度对剪切试验过程的影响

图 5 为不同法向应力条件下, 灰岩剪切应力与剪切位移的关系曲线。由图 5 所示的试验结果整体来看, 并结合文献<sup>[22]</sup>, 可将灰岩剪切应力-位移曲线分为



图 4 YDS-2 型便携式岩土力学性质多功能测试仪

Fig. 4 YDS-2 portable multifunctional tester for the mechanical properties of rock and soil

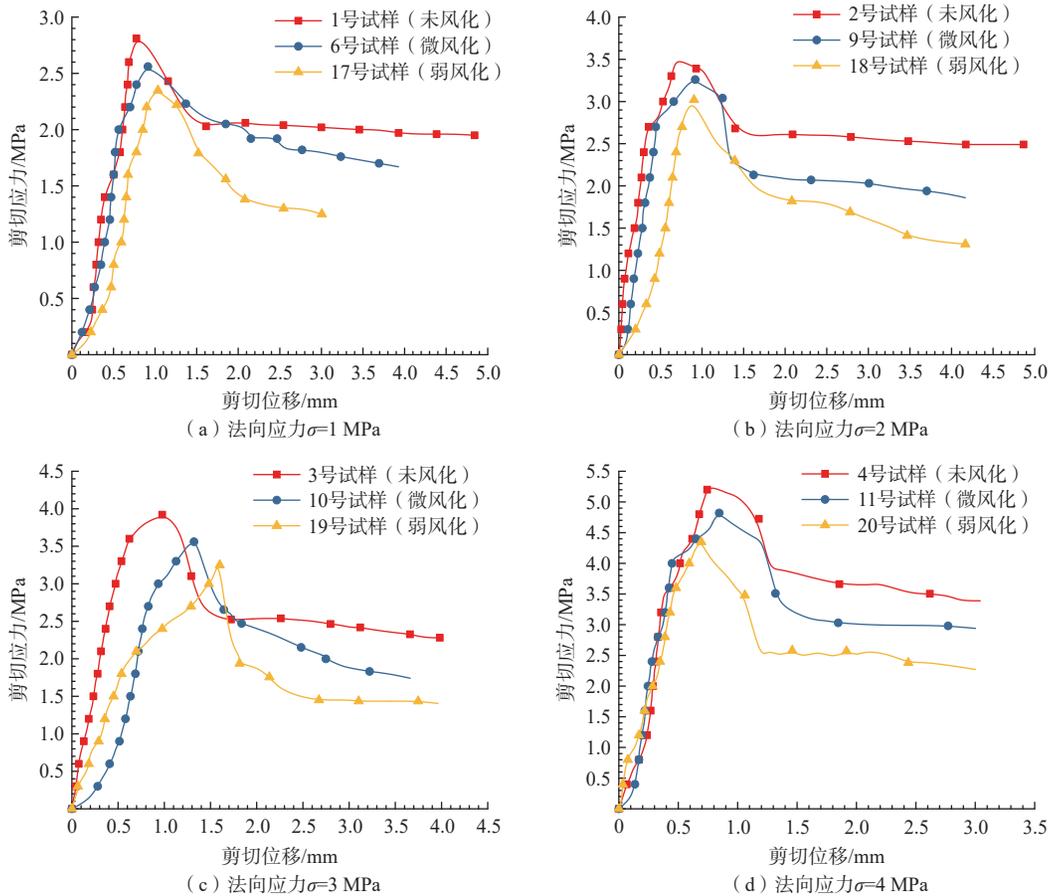


图 5 灰岩剪切应力与剪切位移的关系曲线

Fig. 5 Relationship between the shear stress and shear displacement of limestone

得质密而趋于稳定, 这时在剪切力的作用下, 灰岩发生弹性变形, 曲线近似 1 条直线, 剪切应力随着剪切位移的增大大幅增长。从图 5 中可以看到, 同一法向应力下, 不同风化程度灰岩试样曲线弹性变形阶段斜率大致相同, 风化对剪切弹性变形速率几乎无影响。

剪切破坏阶段: 经过弹性变形阶段, 可以看到之

5 个阶段: 压密阶段、弹性变形阶段、剪切破坏阶段、峰后跌落阶段和滑动摩擦阶段。

压密阶段: 表现为缓慢的变形调整, 剪切应力随剪切位移增长缓慢。其原因为岩石存在微孔隙、微裂隙发育等缺陷, 加载的初期, 在剪切力的作用下, 岩石的微孔隙、微裂隙被压密, 因此剪切应力的增幅较小但是位移却增幅较大, 导致该阶段曲线斜率较小。由图 5 可知, 本次试验中灰岩试样压密阶段均很短, 说明本次所用灰岩试样较为质密, 仅需少量的变形调整。从整体上来看, 灰岩试样剪切变形调整幅度满足风化程度从弱到强的规律。

弹性变形阶段: 经过压密阶段作用, 岩石逐渐变

后很短的一段时间内曲线的斜率减小, 直到剪切应力达到峰值, 试件发生剪切破坏。在同一法向应力下, 不同风化程度试样达到抗剪强度的位移满足风化程度从弱到强的规律。

峰后跌落阶段: 在剪切应力达到峰值之后, 剪切应力大幅度减少, 曲线呈现跌落状, 岩石试件开始出

现滑移趋势。不同试验条件下的灰岩试样曲线峰后跌落阶段并无明显规律。

滑动摩擦阶段:灰岩试样在剪切破坏后,表现为滑动摩擦,保持有一定的残余抗剪强度。不同风化程度灰岩试样残余抗剪强度随剪切位移的变化总体呈近似水平恒定趋势。

### 3.2 风化程度对灰岩变形破坏特性的影响

干湿循环模拟风化作用改变了岩石的微细观结构特性,破坏了岩石颗粒或晶体间的连接,岩石变得更加脆弱,致使其力学特性随之发生变化。不同风化程度灰岩试样抗剪强度与残余抗剪强度结果如表 4 所示。

表 4 抗剪强度与残余抗剪强度数据表  
Table 4 Data of shear strength and residual shear strength

风化程度	试样编号	法向应力/MPa	抗剪强度/MPa	残余抗剪强度/MPa	抗剪强度减量百分比/%	残余抗剪强度减量百分比/%
未风化	1	1	2.81	2.01	/	/
	2	2	3.51	2.55	/	/
	3	3	3.92	2.48	/	/
	4	4	5.25	3.53	/	/
微风化	6	1	2.56	1.86	8.90	7.46
	9	2	3.26	2.06	7.12	19.22
	10	3	3.56	2.20	9.18	11.29
	11	4	4.82	3.01	8.19	14.73
弱风化	17	1	2.35	1.31	16.37	34.83
	18	2	3.02	1.62	13.96	36.47
	19	3	3.25	1.61	17.09	35.08
	20	4	4.35	2.48	17.14	29.75

试验结果表明,在同一法向应力下,灰岩抗剪强度随着风化程度的增加而降低。原因在于风化会使灰岩产生不同程度的软化,由表及里发生微细观结构的改变,产生更多的微孔隙和微裂缝或使原有的孔隙和裂缝进一步扩展,让结构变得更加松散,致使其抗剪强度降低。

岩石峰后曲线表征的是破裂后的岩块材料强度、破裂岩块排列的结构效应以及作用在岩块上的围压这三者共同作用的综合表现<sup>[23]</sup>。由表 4 可知,残余抗剪强度同样随着风化程度的增加而降低,总体变化规律与抗剪强度变化规律保持有良好的一致性,但残余抗剪强度结果离散性略大,可能是由于不同试样破裂面的粗糙程度不同,导致摩擦系数不同。残余抗剪强度比抗剪强度劣化更严重,且随着风化程度的增加劣化速度更快。

### 3.3 风化程度对灰岩抗剪强度参数值的影响

风化作用对岩石力学特性影响最直观的表现

为岩石强度的降低,而岩石的强度受控于其强度参数黏聚力  $c$  及内摩擦角  $\varphi$ 。根据库伦准则,采用式(1)将各组灰岩试样在不同法向应力条件下的岩石抗剪强度曲线分别进行线性拟合,拟合直线的截距和斜率分别为 2 个影响岩石强度的重要力学强度参数  $c$ 、 $\varphi$  (表 5)。

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中:  $\tau$ ——灰岩抗剪强度/MPa;

$\sigma$ ——法向应力/MPa;

$\varphi$ ——内摩擦角/(°);

$c$ ——黏聚力/MPa。

表 5 不同风化程度下灰岩力学参数建议值  
Table 5 Recommended values of the mechanical parameters of limestone under different weathering degrees

序号	风化程度	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	黏聚力 $c$ /MPa	$\varphi$ 减量百分比/%	$c$ 减量百分比/%
1	未风化	37.57	1.95	/	/
2	微风化	35.33	1.77	5.96	9.23
3	弱风化	31.47	1.67	16.24	14.36

图 6 为抗剪强度参数随岩石风化程度变化的关系曲线。总体上,灰岩试样随着风化程度的增加,其黏聚力  $c$  及内摩擦角  $\varphi$  均越来越小,抗剪强度降低。说明灰岩试样在标准硫酸钠溶液浸泡环境下力学性能有一定的劣化,其黏聚力和内摩擦角劣化趋势相似。但其关系曲线集中于风化程度不高的灰岩试样,进一步的工作可通过试验获得风化程度更高的试样,更广泛地探究其力学参数特性劣化机制与规律。

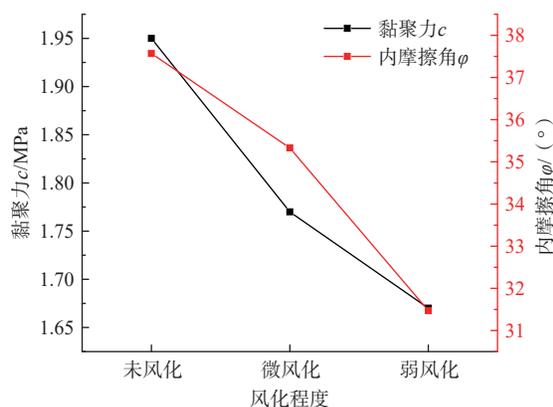


图 6  $c$ 、 $\varphi$  值变化曲线

Fig. 6 Curves of  $c$  and  $\varphi$  value

## 4 风化作用下灰岩抗剪强度估算模型

### 4.1 模型建立

为快速获取不同风化程度下灰岩的力学特性与

强度参数, 需建立灰岩风化程度与抗剪强度关系的数学模型。但由于风化程度是一个定性的判定结果, 不能清楚地量化数学关系, 所以采用波速比这一定量判定风化程度的指标代替风化程度, 建立波速比与抗剪强度关系估算模型, 可有效解决这一问题。根据室内岩石强度剪切试验, 绘制出不同风化程度灰岩在不同法向应力下抗剪强度与波速比之间的关系曲线 (图 7)。

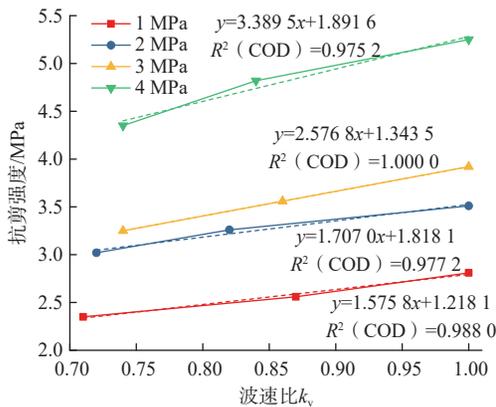


图 7 波速比与抗剪强度关系曲线

Fig. 7 Curves of relationship between the wave speed ratio and shear strength

由图 7 可知, 在同一法向应力条件下, 随着灰岩波速比 ( $k_v$ ) 的减小即风化程度的增大, 灰岩的抗剪强度随之减小, 且二者呈现线性关系。在不同法向应力下, 抗剪强度与波速比之间存在如下关系式:  $y=Ax+B$ , 其中系数  $A$ 、 $B$  与法向应力有关 (图 8)。

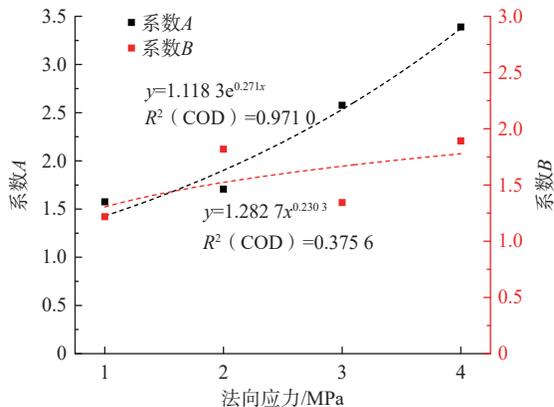


图 8 系数  $A$ 、 $B$  与法向应力关系曲线

Fig. 8 Curves of coefficient  $A$ ,  $B$  and normal stress relationship

由图 7、图 8 曲线拟合得到灰岩抗剪强度与波速比和法向应力的之间的关系为:

$$\tau = 1.1183e^{0.271\sigma} k_v + 1.2827\sigma^{0.2303} \quad (2)$$

## 4.2 模型验证

通过参数数据建模得到了风化作用下灰岩抗剪强度估算模型, 为验证其准确性, 需要与建模的数据、同批次试样未参与建模的数据、与利用文献 [24] 模型计算试验数据比对应 3 个层次进行对比检验。

### (1) 依据室内试验数据的检验

利用 12 个参与建模的数据将对估算模型成果进行反演参数, 得到风化灰岩的抗剪强度等数据信息, 进一步与试验实测值对比验证。同样, 将同批次未参与建模的 8 个试样通过估算模型计算出其抗剪强度值, 再与试验实测值对比检验, 如图 9 所示。其中试样 5, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16 等 8 个试样未参与建模, 其余试样参与建模。

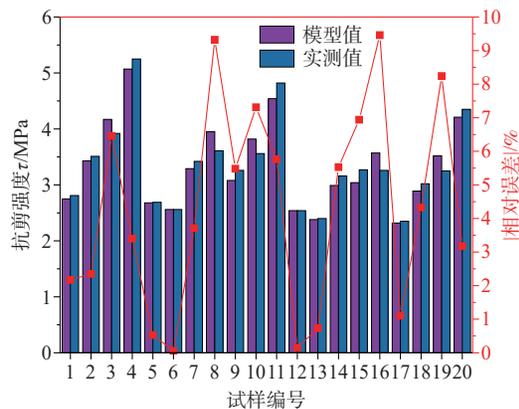


图 9 室内试验数据验证对比图

Fig. 9 Comparison of indoor test data validation

对比发现, 利用建模数据对估算模型进行反演参数, 其抗剪强度模型值与试验实测值相对误差最大仅 8.24%。同样, 同批次试样未参与建模的试验数据与模型计算值相对误差最大也仅只有 9.46%。

### (2) 与文献 [24] 模型的比对

文献 [24] 提出, 对于不同破碎程度与风化程度的岩体而言, 弹性波测试是一种有效的确定岩体工程性质与风化程度的方法。为了进一步研究利用弹性波速测试结果研究岩体强度参数, 引入弹性波速比, 以 Hoek-Brown 强度准则为基础建立了一个岩体强度参数估算模型, 并以贵州灰岩为例, 利用该模型分析弹性波速比对强度参数的影响。本次与文献 [24] 的模型比对从不同波速比与不同法向应力两个方面来进行。由于文献 [24] 中只给出了抗剪强度参数 (黏聚力、内摩擦角) 与波速比或法向应力的关系, 没有直接给出抗剪强度, 而是通过式 (3) 来反演出对应的灰岩抗剪强度, 进而用于与本文提出的风化作用下灰岩抗

剪强度估算模型的计算值进行对比检验。

根据文献 [24] 利用黏聚力与内摩擦角通过式 (3) 反演抗剪强度值:

$$\tau = \sigma_{ni} \tan \varphi_i + c_i \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{ni}$ ——法向应力/MPa;

$\varphi_i$ ——内摩擦角/(°);

$c_i$ ——黏聚力/MPa。

首先,当法向应力  $\sigma_n=10$  MPa时,在不同波速比条件下,文献 [24] 中灰岩黏聚力与内摩擦角的变化如图 10 所示。

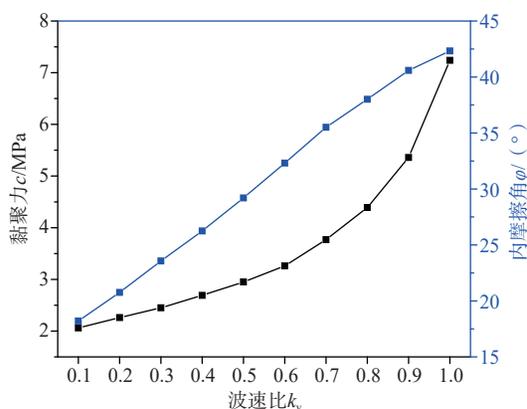


图 10 波速比与抗剪强度参数关系曲线<sup>[24]</sup>

Fig. 10 Relationship between the wave velocity ratio and shear strength parameters<sup>[24]</sup>

再根据式 (3), 通过反演计算图 10 所示的数据得到相应的抗剪强度, 同时将利用本文估算模型计算得到的抗剪强度一并示于图 11 中进行对比。

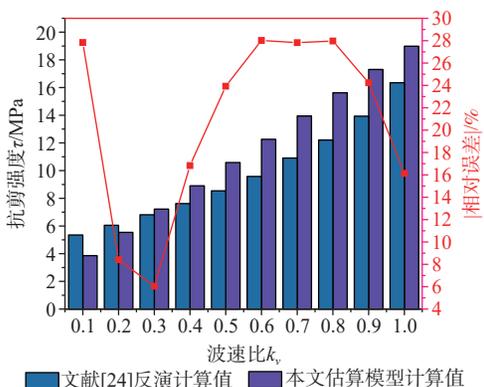


图 11 不同波速比条件下数据验证对比图

Fig. 11 Comparison of data validation under different wave velocity ratios

其次,当波速比  $k_v=0.5$  时,在不同法向应力下,文献 [24] 中灰岩黏聚力与内摩擦角的变化如图 12 所示。

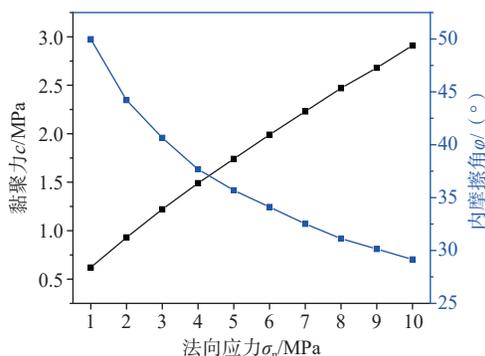


图 12 法向应力与抗剪强度参数关系曲线<sup>[24]</sup>

Fig. 12 Relationship between the normal stress and shear strength parameters<sup>[24]</sup>

再根据式 (3), 通过反演计算图 12 所示的数据得到相应的抗剪强度, 同时将利用本文估算模型计算得到的抗剪强度一并示于图 13 中进行对比。

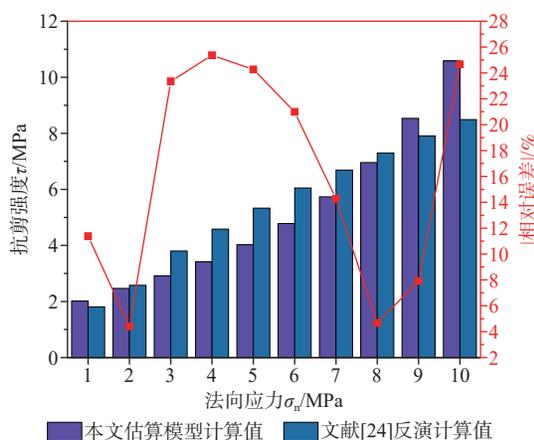


图 13 不同法向应力条件下数据验证对比图

Fig. 13 Comparison of data validation under different normal stresses

对比发现,文献 [24] 不同波速比下的反演计算值与本文估算模型计算值相对误差最大为 28.02%, 同样,文献 [24] 不同法向应力下的反演计算值与本文估算模型计算值相对误差最大为 25.37%。从模型效果对比分析看,本文估算模型与文献 [24] 反演计算值存在一定的差异。差异产生的原因应是人为风化(浸泡  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液 24 h 后在 105 ~ 110 °C 下烘干 12 h 这种循环风化)规律与大自然的风化规律的明显差异(从外往里,人为的快速风化对岩块造成的损伤梯度远远大于自然界缓慢风化。人为风化损伤深度浅,损伤衰减快速,而大自然风化损伤深度深,损伤衰减缓慢)所造成的。

从建模数据、同批次试样未参与建模数据、与文献 [24] 模型比对 3 个层次检验来看,其中室内试验数

据相对误差均小于 10%, 与文献 [24] 模型比对误差均小于 30%。因此, 该风化作用下灰岩抗剪强度估算模型具有良好的可靠性, 可快速有效地估算风化作用下灰岩的抗剪强度。

## 5 结论

(1) 利用干湿循环试验对灰岩进行风化模拟试验, 进行室内风化岩样制备, 对不同风化作用下灰岩的波速值进行测取, 以波速比判定灰岩岩样的风化程度。

(2) 随着风化程度的增加, 灰岩抗剪强度和残余抗剪强度均呈现减小的趋势, 但残余抗剪强度比抗剪强度劣化更严重, 且劣化速度更快。

(3) 灰岩随着风化程度的增加, 其黏聚力  $c$  及内摩擦角  $\varphi$  均越来越小, 两者劣化趋势相似, 但其关系曲线集中于风化程度不高的灰岩试样, 进一步的工作可通过试验获得风化程度更高的试样, 更广泛地探究其力学参数特性劣化机制与规律。

(4) 利用波速比量化风化程度, 建立起风化作用下灰岩抗剪强度估算模型:  $\tau=1.1183e^{0.271\sigma}k_v+1.2827\sigma^{0.2303}$ , 并通过了检验。通过简单测量计算岩石的波速比, 即可快速评估岩石的抗剪强度特性。但该模型是基于室内模拟风化结果建立的, 与自然界的风化存在一定的差异性, 今后可利用天然风化岩石进行研究, 更加符合工程实际。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] ZENG Z X, KONG L W, WANG M, et al. Assessment of engineering behaviour of an intensely weathered swelling mudstone under full range of seasonal variation and the relationships among measured parameters[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(12): 1837 - 1849.
- [ 2 ] LI Z M, CHEN L L, WU F, et al. In situ test study on shear strength properties of weathered silty mudstone[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 146/147: 10 - 13.
- [ 3 ] 陈荣茵, 朱宝龙. 温度、湿度循环条件下砂岩物理特性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(1): 74 - 78. [ CHEN Tangyin, ZHU Baolong. Experimental study of physical properties of sandstone under the cycling conditions of temperature and humidity[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(1): 74 - 78. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 吕文韬, 杨龙, 魏云杰, 等. 新疆塔县地区片麻岩冻融劣化机理与规律试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 95 - 100. [ LYU Wentao, YANG Long, WEI Yunjie, et al. Research on mechanism of freezing-thawing deterioration of gneisses in the Taxian area of Xinjiang[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 95 - 100. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. *地学前缘*, 2003, 10(4): 539 - 544. [ FENG Lianjun, CHU Xuelei, ZHANG Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 539 - 544. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 李日运, 吴林峰. 岩石风化程度特征指标的分析研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(22): 3830 - 3833. [ LI Riyun, WU Linfeng. Research on characteristic indexes of weathering intensity of rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(22): 3830 - 3833. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 张傲, 方云, 徐敏, 等. 龙门石窟碳酸盐岩体文物风化作用模拟试验研究[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(3): 227 - 233. [ ZHANG Ao, FANG Yun, XU Min, et al. Simulation experiment for weathering of culture relic on carbonate rock Palisades in Longmen grottoes[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(3): 227 - 233. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 吴霞, 温世儒, 晏长根, 等. 不同风化程度灰岩的地质雷达波形与频谱特征研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(6): 159 - 164. [ WU Xia, WEN Shiru, YAN Changgen, et al. Study on waveform and frequency spectrum property of GPR for limestone with different weathering degree[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2016, 38(6): 159 - 164. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 杨继清, 张修硕, 李靖, 等. 不同湿度环境对岩石风化产生的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2018, 33(1): 147 - 153. [ YANG Jiqing, ZHANG Xiushuo, LI Jing, et al. Influence of different humidity environments on the rock weathering[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2018, 33(1): 147 - 153. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] CHALA E T, RAO K S. Influence of weathering on the engineering behaviour of rocks under triaxial confining conditions[C]//*Geotechnical Frontiers 2017*. Orlando, Florida, Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2017: 570 - 578.

- [11] CANO M, TOMAS R. Proposal of a new parameter for the weathering characterization of carbonate flysch-like rock masses: The potential degradation index (PDI) [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(7): 2623 – 2640.
- [12] 冯庆祖, 陈龙, 聂德新. 岩体风化程度量化分带研究 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2001, 12(2): 76 – 79. [ FENG Qingzu, CHEN Long, NIE Dexin. Study on quantitative classification rock weathering [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2001, 12(2): 76 – 79. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] OZBEK A. Investigation of the effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73(2): 595 – 609.
- [14] VLASTELICA G, MISCEVI P, PAVIC N. Testing the shear strength of soft rock at different stages of laboratory simulated weathering [J]. *Gradvinar*, 2017, 68(12): 955 – 965.
- [15] PRODAN M V, MILEUSNIĆ M, ARBANAS S M, et al. Influence of weathering processes on the shear strength of siltstones from a flysch rock mass along the northern Adriatic coast of Croatia [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(2): 695 – 711.
- [16] GRGIC D, GIRAUD A, AUVRAY C. Impact of chemical weathering on micro/macro-mechanical properties of oolitic iron ore [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 64: 236 – 245.
- [17] FAN H T, SUN S R, LE H L, et al. An experimental and numerical study of diorite-porphyrites with different weathered degree in the direct shear test [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 7: 352.
- [18] CERYAN S, TUDES S, CERYAN N. Influence of weathering on the engineering properties of Harsit granitic rocks (NE Turkey) [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2008, 67(1): 97 – 104.
- [19] QURESHI M U, TOWHATA I, YAMADA S. Experimental relation between shear strength under low pressure and S-wave velocity of rock subjected to mechanical weathering [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(5): 1468 – 1480.
- [20] 丁梧秀, 陈建平, 徐桃, 等. 化学溶液侵蚀下灰岩的力学及化学溶解特性研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 1825 – 1830. [ DING Wuxiu, CHEN Jianping, XU Tao, et al. Mechanical and chemical characteristics of limestone during chemical erosion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1825 – 1830. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 丁梧秀, 冯夏庭. 灰岩微观结构的化学损伤效应及化学损伤量化研究方法探讨 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(8): 1283 – 1288. [ DING Wuxiu, FENG Xiating. Study on chemical damage effect and quantitative analysis method of meso-structure of limestone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(8): 1283 – 1288. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 廖健, 赵延林, 刘强, 等. 酸化学腐蚀下灰岩剪切强度特性试验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 639 – 646. [ LIAO Jian, ZHAO Yanlin, LIU Qiang, et al. Experimental study on shear strength characteristics of limestone under acidizing corrosion [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 639 – 646. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 张后全, 贺永年, 周纪军, 等. 岩石破损过程强度变化规律实测研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊1): 3273 – 3279. [ ZHANG Houquan, HE Yongnian, ZHOU Jijun, et al. Experimental study of strength evolution laws in rock failure process [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Sup 1): 3273 – 3279. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 王亮清, 梁焯, 吴琼, 等. 基于弹性波速比的岩体强度参数估算方法 [J]. *煤田地质与勘探*, 2010, 38(6): 37 – 42. [ WANG Liangqing, LIANG Ye, WU Qiong, et al. Estimation method of rockmass strength parameters based on elastic wave velocity ratio [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2010, 38(6): 37 – 42. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 张明霞