

基于模糊数学的泥质白云岩力学性能评价

谢财进^{1,2}

(1. 贵州开放大学建筑工程学院, 贵州 贵阳 550023; 2. 贵州职业技术学院建筑工程学院, 贵州 贵阳 550023)

摘要: 为研究影响泥质白云岩力学性能的主要因素,对泥质白云岩细观裂隙的倾角、长度密度和数量密度进行了统计,并对其开展了电镜扫描试验和单轴压缩试验。研究表明:泥质白云岩微观结构的平均隶属度和权重值都为最大,裂隙数量密度次之,说明微观结构对岩石强度的影响较大,裂隙数量密度的影响次之,微观结构有可能是影响泥质白云岩强度的最主要因素;裂隙倾角的权重最小,裂隙长度密度的平均隶属度最低,说明这2个因素虽对岩石强度有一定影响,却不是主要影响因素;泥质白云岩单轴抗压强度第 j 个指标的变异系数值与岩石强度综合指数的排名规律一致,而稳定系数值刚好相反;微观结构对岩石单轴抗压强度的影响最大,且微观结构的多样化会使岩石的强度值波动极大,进一步证实微观结构是影响岩石强度的最主要因素。

关键词: 泥质白云岩;力学性能;细观裂隙;微观结构;模糊数学

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0073-05

Evaluation of Mechanical Properties of Argillaceous Dolomite Based on Fuzzy Mathematics

XIE Caijin^{1,2}

(1. School of Architectural Engineering, Guizhou Open University, Guiyang 550023, China; 2. School of Architectural Engineering, Guizhou Vocational Technology Institute, Guiyang 550023, China)

Abstract: To assess the main variables controlling the mechanical performance of argillaceous dolomite, this paper makes statistics on the inclination angle, length density and quantitative density of meso-cracks of argillaceous dolomite, and carries out electron microscope scanning test and uniaxial compression test. The results show that: (1) the average membership degree and weight of the microstructure of argillaceous dolomite are the largest, followed by the quantitative density of fissures, indicating that the microstructure has a great influence on the strength of rocks, followed by the quantitative density of fissures. Microstructure may be the most important factor affecting the strength of argillaceous dolomite. (2) the fracture dip angle makes the least contribution, with the fracture length density having the lowest average membership degree in comparison, indicating that although the latter two influencing factors have certain influence on rock strength, they are not the main factors affecting rock strength. (3) the variation coefficient C_{vj} of the j index of uniaxial compressive strength of argillaceous dolomite is consistent with that of the comprehensive rock strength index R_{Si} , while the value of stability coefficient S_{Gj} is just the opposite, the microstructure is the primary controlling factor for the rock's uniaxial compressive strength, and the diversification of microstructure will make the strength value of rock fluctuate greatly. This finding substantiates that microstructure serves as the principal determinant of rock strength.

Keywords: argillaceous dolomite; mechanical properties; meso-fissures; microstructure; fuzzy mathematics

0 引言

近年来,我国基础交通建设持续加强,路网密度逐年增加,高速公路和高速铁路里程迅速增长。在

西部地区,由于地形多以山地、丘陵为主,交通工程中桥梁和隧道的比例较高。因此,准确掌握工程建设场区岩体的力学性能,是工程建设的关键环节。研究岩石力学性能,并寻找出影响岩石力学性能的主要因素,对山地工程建造具有一定现实意义^[1-3]。

从国内外学者的研究成果来看,岩石力学性能的影响因素主要有岩石的物质组分、微观结构、节理裂隙、孔隙率、含水率、容重、泊松比及弹性模型等。Marigo等^[4]、Zhu等^[5]通过理论研究和室内试验,对

收稿日期: 2025-12-04

基金项目: 贵州开放大学(贵州职业技术学院)校级青年课题(2025QN01)

作者简介: 谢财进(1994—),男,博士,讲师,从事岩石力学与地下工程方面的科研工作。

岩石的力学性能开展分析,但涉及岩石力学性能影响因素的分析不多。郭建强等^[6]采用不同试验条件,对泥质白云岩的物理力学特性开展研究,但主要研究的是外在环境对岩石力学特性的影响,而未能从岩石本身开展研究。周宗红等^[7]采用改进的三维动静组合加载装置,开展三维加载试验和冲击试验,分析轴压、围压和应变率对白云岩力学性能的影响,但其仅仅关注力学效应。Shen等^[8]、张智宇等^[9]不仅考虑到岩石的力学效应影响,还研究了岩石细观裂纹对岩石强度的影响。牛亮等^[10]统计和观察了白云岩的天然裂隙数量及其微观结构,并开展了相应的力学性能试验,但并未量化上述因素对白云岩力学性能的影响。

以往对于岩石力学特性的研究多从岩石的宏观、宏-微观、宏-细观方面出发,而从宏-细-微观多角度出发的分析则相对较少,也并未给出影响岩石力学性能的主要因素。故本文以泥质白云岩为基础,从宏-细-微观多角度出发进行分析,并基于模糊数学理论,对泥质白云岩的试验数据进行处理,以量化各影响因素,揭示影响泥质白云岩力学性能的主因,充实泥质白云岩力学性能研究成果,为设计施工提供理论支撑和数据参考^[11-15]。

1 岩样来源

岩样取自位于昭(通)-沪(州)高速公路云南昭

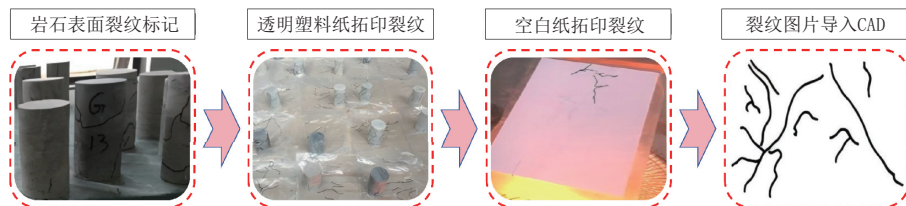


图1 岩样表面微裂隙统计

表征微裂隙的初始统计参数为裂隙数量、长度和倾角。其中裂隙数量是指单一未连通裂隙的数量之和;长度是通过将拓印裂隙导入CAD后,根据软件自动求解后得到的裂隙长度之和;裂隙倾角则定义为裂隙总体走向与轴向加载方向的夹角(即各裂隙走向与轴向加载方向夹角的平均值)。由此衍生出裂隙数量密度、裂隙长度密度的概念。裂隙数量密度、裂隙长度密度分别是通过裂隙总数量、裂隙总长度与岩样表面积比值计算得到的。用于力学试验的岩样微裂隙统计结果见表1。

2.2 泥质白云岩电镜扫描试验

将岩样加工时多余的部分用于电镜扫描试验,

通段的某隧道。隧道进口段围岩的等级为V级,岩性主要以白云岩为主,层理发育,呈碎裂状,岩体结构松散,且富含地下水;隧道中部至出口段主要为IV级围岩,岩体以强风化至中风化白云岩及泥质白云岩为主,多呈碎裂状、中厚层状结构,局部存在岩溶空腔,富水性强。

2 泥质白云岩力学性能的控制因素

利用直径100 mm的岩石钻机在小湾隧道中取出试验岩样,并将其制备成规格为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体岩样,共计25个。

首先,采用拓印法描绘所取岩样表面微裂隙;然后,将岩样加工时多余的部分加工成厚度为5~10 mm、直径小于20 mm的标准小试块,用于开展电镜扫描试验;最后,对岩样开展力学性能试验,再将岩样的力学参数同其微裂隙及微观构造等相结合进行综合分析。

2.1 泥质白云岩岩样表面微裂隙统计

在较好光线环境下,首先用放大镜、黑色记号笔描绘各岩样表面的毫米级裂隙;然后用透明塑料纸包裹岩样,并用黑色记号笔将岩样上的裂隙绘制于塑料纸表面,再将塑料纸置于透明玻璃上并在其上面覆盖空白纸,通过强光将塑料纸上的微裂隙拓印到白纸上;最后将拓印的微裂隙形态导入Auto CAD软件进行定量统计(见图1)。

目的在于测定岩样的微观结构。按照试验规范将其加工成厚度为5~10 mm、直径小于20 mm的小试块。对25个泥质白云岩试块在2、10、100 μm 尺度下的微观结构进行观察,统计结果见图2。

由图2可见,泥质白云岩的微观结构主要包括3种类型:(1)微观颗粒多呈不规则形态且排列杂乱,胶结较弱,孔隙发育,将这类岩样的微观结构定义为碎屑状结构,共有14个,占比56%;(2)结构面较为粗糙,但颗粒排列较密实,同时存在一定数量的微裂隙和孔洞,将这类岩样的微观结构定义为似羽状结构,共有8个,占比32%;(3)颗粒之间的排列整齐致密,形成的结构面整体完整且呈现出平滑状态,无明

表 1 力学试验岩样微裂隙统计结果

岩样 编号	裂隙数 量/条	裂隙总 长/mm	数量密度/ (条·mm ⁻²)	长度密度/ (mm·mm ⁻²)	裂隙倾 角/(°)
1	9	280.15	0.000 54	0.016 66	30
2	11	638.17	0.000 67	0.038 97	15
3	6	257.19	0.000 35	0.015 20	0
4	10	684.98	0.000 59	0.040 61	15
5	13	649.67	0.000 76	0.038 04	45
6	3	476.55	0.000 18	0.028 70	30
7	5	281.86	0.000 30	0.016 79	15
8	13	712.97	0.000 79	0.043 53	45
9	12	333.51	0.000 71	0.019 75	30
10	8	350.61	0.000 47	0.020 57	45
11	10	635.67	0.000 58	0.037 18	60
12	12	474.87	0.000 70	0.027 88	45
13	4	208.92	0.000 24	0.012 42	0
14	7	270.53	0.000 41	0.015 90	60
15	12	631.56	0.000 71	0.037 19	45
16	7	430.69	0.000 41	0.025 31	15
17	8	200.25	0.000 47	0.011 88	60
18	7	437.16	0.000 41	0.025 82	15
19	14	542.21	0.000 84	0.032 37	30
20	2	79.57	0.000 12	0.004 66	30
21	11	593.04	0.000 54	0.034 89	0
22	2	102.61	0.000 12	0.006 53	60
23	13	672.38	0.000 76	0.042 81	0
24	10	552.18	0.000 58	0.035 15	60
25	8	469.06	0.000 47	0.029 86	0

显缺陷,将这类岩样的微观结构定义为片状结构,共有 3 个,占比 12%。

3 泥质白云岩强度综合指数计算

本文定义岩石强度综合指数 R_{si} ,用以综合评估多因素对泥质白云岩力学性能的影响大小; R_{si} 值越高,表明岩石整体力学性能越好。由于还未知悉影响泥质白云岩强度的最大因素,在评价过程中,选用变异系数法对其进行评价,该方法能客观、便捷地确定各构成要素内部指标的权重^[16-19]。

特定指标对岩石力学性能影响的变异系数 C_{vj} 为:

$$C_{vj} = \frac{\sigma_j}{\bar{X}_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: j 为影响岩石力学性能的第 j 个指标; σ 为特定

指标对岩石力学性能影响后的标准差; $\bar{X}$ 为特定指标对岩石力学性能控制影响因素的平均值。

特定指标对岩石力学性能的影响所占的权重 W_j 为:

$$W_j = \frac{C_{vj}}{\sum_{j=1}^n C_{vj}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

R_{si} 与 W_j 的关系式为:

$$R_{si} = Q_j \times W_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: Q_j 为特定指标对岩石力学性能影响的隶属度。

由式(1)~(3)可知, R_{si} 的确定主要涉及 3 个关键环节:岩石强度指标的选取、各指标 W_j 的确定以及 Q 函数的建立。

(1)选择强度指标:采用由单轴压缩试验测得的单轴抗压强度。

(2)确定指标权重:基于各因素对强度指标的影响分析进行赋值。

(3)计算隶属度:构建隶属函数以量化特定指标的影响,实现数据无量纲化。隶属度越高,代表该指标受因素影响越大。

无量纲化平均隶属度 $Q(X)$ 的计算式为:

$$Q(X) = \begin{cases} 1.0 & X > X_2 \\ 0.1 + 0.9 \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} & X_1 \leq X \leq X_2 \\ 0.1 & X_1 > X \end{cases} \quad (4)$$

式中: X_1 、 X_2 为各研究对象力学强度的下、上临界强度。

基于岩石力学试验系统开展单轴压缩试验,以获取泥质白云岩强度指标的上、下临界强度值,相关试验结果见图 3。

3.1 泥质白云岩综合强度验证及显著性检验

鉴于泥质白云岩的力学强度受多因素影响而表现出较大的波动性,选取以下 3 个指标来综合表征其强度:平均强度值($\bar{X}$)、变异系数(C_v)以及稳定系数(S_c)。

S_c 的表达式为:

$$S_c = \frac{\bar{X}_j - \sigma_j}{\sigma_{MAX}} \quad (5)$$

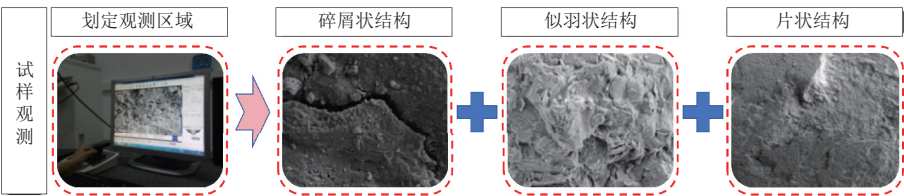


图 2 泥质白云岩部分岩样的微观结构观测结果

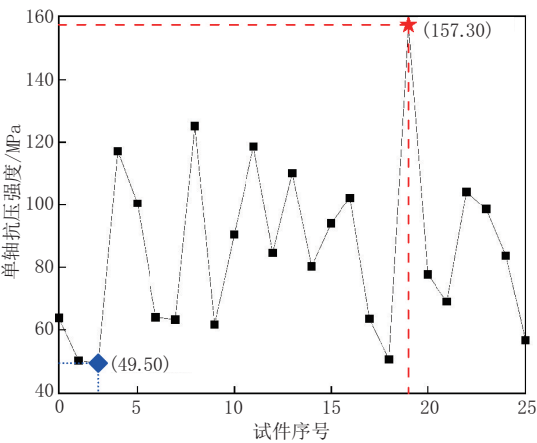


图3 泥质白云岩单轴抗压强度

表2 不同因素对泥质白云岩强度的影响

影响因素		单轴抗压强度/MPa	影响因素		单轴抗压强度/MPa
裂隙数量密度/ (条·mm ⁻²)	0~0.000 16	103.11a	裂隙长度密度/ (mm·mm ⁻²)	0~0.00870	95.24a
	0.000 17~0.000 33	83.77c		0.008 71~0.017 40	90.99b
	0.000 34~0.000 50	90.99b		0.017 41~0.026 10	90.64b
	0.000 51~0.000 67	67.63d		0.02 611~0.034 80	76.27c
	0.000 68~0.000 84	79.12c		0.034 81~0.043 55	68.39d
裂隙倾角/(°)	0	72.80c	微观结构	碎屑状	62.61c
	15	76.77c		似羽状	100.23b
	30	84.87b		片状	133.69a
	45	98.94a			
	60	90.04b			

注:a~d表示某一因素显著性由大到小排序,且各因素均在0.05水平上具有显著性差异。

3.2 泥质白云岩综合强度评价

将表2中的数据分别代入式(1)、式(2)和式(4),即可获取影响泥质白云岩单轴抗压强度的各指标权重和平均隶属度,结果见表3。将表3中的相关数据绘制成雷达图,见图4。

表3 泥质白云岩单轴抗压强度影响因素的权重和平均隶属度					
影响因素	强度平均值/MPa	强度标准差/MPa	变异系数 C_{vj}	权重 W_j	平均隶属度 $Q(X)$
裂隙数量密度	84.924	11.846	0.139 5	0.209 9	0.540 5
裂隙长度密度	84.306	10.220	0.121 2	0.182 4	0.529 2
裂隙倾角	84.684	9.336	0.110 2	0.165 8	0.536 1
微观结构	98.843	29.035	0.293 7	0.441 9	0.859 7

由图4可知:微观结构的平均隶属度和权重值都为最大,其次是裂隙数量密度,说明微观结构对岩石强度的影响较大,裂隙数量密度的影响次之,微观结构有可能是影响泥质白云岩强度的最主要因素;裂隙倾角的权重最小,裂隙长度密度的平均隶属度最低,说明这2个因素虽对岩石强度有一定影响,却可能不是主要因素。

将表3中的数据代入式(3)、式(5)后,可得各影响因素的 R_{si} 和 S_{cj} 值。将各 C_{vj} 、 S_{cj} 和 R_{si} 值绘制成雷

式中: σ_{MAX} 为泥质白云岩在外荷载作用下的最大强度值。显然,强度标准差越大,则变异性越大,而稳定性越差。

将所得数据通过SPSS开展方差分析,并基于Duncan法进行显著性检验。

不同因素对泥质白云岩强度的影响见表2。

由表2可知,岩石内的裂隙数量密度、裂隙长度密度、裂隙倾角和微观结构都对岩石的强度有着显著影响。在这几种因素影响下,岩石单轴抗压强度分别变化了35.48、26.85、26.14、71.08 MPa。这进一步表明,岩石的裂隙数量密度和微观结构对岩石强度的影响较大,其中微观结构对其影响是最大的。

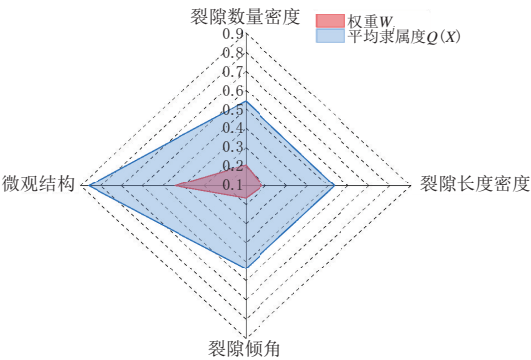


图4 泥质白云岩强度各影响因素的 W_j 和 $Q(X)$ 雷达图

达图,见图5。

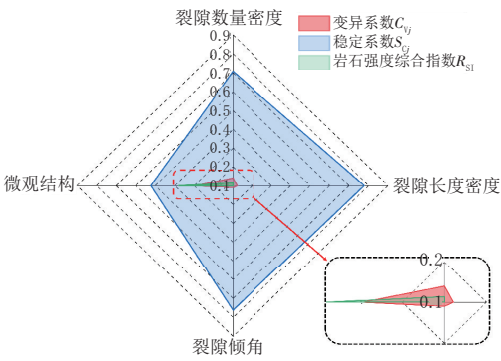


图5 泥质白云岩强度各影响因素的 C_{vj} 、 S_{cj} 和 R_{si} 雷达图

要最终确定泥质白云岩强度的最主要影响因素,还需将各影响因素的 $\bar{X}_j$ 、 C_{vj} 、 S_{cj} 和 R_{si} 值进行对比

分析。

泥质白云岩强度各影响因素的模糊评价值对比见表 4。

表 4 泥质白云岩单轴抗压强度各影响因素的模糊评价值对比

影响因素	变异系数 C_{Vj}		稳定系数 S_{Gj}		岩石强度综合指数 R_{Sj}	
	大小	排名	大小	排名	大小	排名
裂隙数量密度	0.139 5	2	0.708 7	3	0.113 5	2
裂隙长度密度	0.121 2	3	0.777 9	1	0.096 5	3
裂隙倾角	0.110 2	4	0.761 6	2	0.088 9	4
微观结构	0.293 7	1	0.522 2	4	0.379 9	1

由表 4 可知,泥质白云岩单轴抗压强度各影响因素的 C_{Vj} 值与 R_{Sj} 值排名规律一致,而 S_{Gj} 值刚好相反。微观结构对岩石单轴抗压强度的影响最大,而且微观结构的多样化会使得岩石的强度值波动极大,这也进一步证实微观结构是影响岩石强度的最主要因素。

4 结 语

(1)对所获取的数据进行分析后发现,岩石内部的裂隙数量密度、裂隙长度密度、裂隙倾角和微观结构都对岩石强度有着显著影响。其中岩石的微观结构和裂隙数量密度对岩石强度的影响最大。

(2)微观结构的平均隶属度和权重值都为最大,其次是裂隙数量密度,说明微观结构对岩石的强度影响较大,裂隙数量密度的影响次之,微观结构有可能是影响泥质白云岩强度的最主要因素。裂隙倾角的权重最小,裂隙长度密度的平均隶属度最低,说明这 2 个因素虽对岩石强度有一定影响,却不是强度的主要影响因素。

(3)各影响因素下,泥质白云岩单轴抗压强度各影响因素的 C_{Vj} 值与 R_{Sj} 值的排名规律一致,而 S_{Gj} 值刚好相反。微观结构对岩石单轴抗压强度的影响最大,且微观结构的多样化会使岩石的强度值波动极大,这进一步证实了微观结构是影响岩石强度的最主要因素。

参考文献:

[1] 吴疆宇.胶结充填体的宏细观力学特性及蠕变模型[D].徐州:中国矿业大学,2019.

[2] 李夕兵,陶明,宫凤强,等.冲击载荷作用下硬岩层裂破坏的理论和试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1081-1088.

[3] 黄培东,饶军应,谢涛,等.裂隙对白云岩抗压性能的影响研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(4):990-1000.

[4] MARIGO J J, CHAMBOLLE A, FRANCFORT G A. When and how do cracks propagate[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2009, 57(9): 1614-1622.

[5] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43(2): 236-252.

[6] 郭建强,黄质宏.不同试验条件下泥质白云岩物理力学特性试验研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(3):110-113;136.

[7] 周宗红,章雅琦,杨安国,等.白云岩三维动静组合加载力学特性试验研究[J].煤炭学报,2015,40(5):1030-1036.

[8] SHEN B T. The mechanism of fracture coalescence in compression—experimental study and numerical simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 51(1): 73-85.

[9] 张智宇,王建国,黄永辉,等.白云岩动力学特性及破坏模式试验研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1195-1201.

[10] 牛亮,穆锐,陈俊.含天然微裂隙岩石的力学特性试验研究[J].长江科学院院报,2020,37(2):141-146.

[11] 刘军忠,许金余,吕晓聪,等.围压下岩石的冲击力学行为及动态统计损伤本构模型研究[J].工程力学,2012,29(1):55-63.

[12] 刘泉声,黄诗冰,康永水,等.裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考[J].岩石力学与工程学报,2015,34(3):452-471.

[13] HEIDARI M, KHANLARI G R, KAVEH M T, et al. Predicting the uniaxial compressive and tensile strengths of gypsum rock by point load testing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(2): 265-273.

[14] 孙朝阳.不同裂隙角度对岩体强度影响研究[J].煤炭技术,2015,34(6):113-115.

[15] 刘厚彬,崔帅,孟英峰,等.裂缝性碳酸盐岩微细观组构及力学性能研究[J].特种油气藏,2020,27(1):155-161.

[16] 郭济鸣.基于模糊动态故障树的动车制动系统可靠性分析[D].兰州:兰州交通大学,2019.

[17] 唐建新,李欣怡.基于模糊数学的地铁深基坑稳定性评价[J].安全与环境学报,2018,18(6):2135-2140.

[18] 范添,田江伟,旦增顿珠,等.基于模糊数学的高性能纤维混凝土服役性能评价[J].科技创新与应用,2024,14(22):54-57.

[19] 刘俊卿,韩晶.基于模糊数学理论的沥青路面结构可靠度分析[J].应用数学和力学,2018,39(9):1081-1090.