不同应力路径下含泥质风化白云岩的力学特性和破坏特征①

魏威，陈冲，沈晓杰，崔冰，陈天浩
（北方矿业有限责任公司，北京 100035）

摘　要：为研究含泥质风化白云岩的力学响应及其对工程稳定性的影响，以某矿区风化白云岩为研究对象，通过单轴压缩、单轴劈裂及常规三轴压缩等室内试验，系统分析其在不同应力路径下的力学特性与破坏模式。结果表明：相较于不含泥质风化白云岩，含泥质风化白云岩的抗压强度与抗拉强度显著降低，变形能力增强；含水条件下风化白云岩抗压强度明显衰减，含泥质风化白云岩更为敏感；三轴压缩试验中围压升高可有效提升岩石强度与韧性；含泥质风化白云岩更易发生塑性变形及剪切破坏，而不含泥质风化白云岩在高围压条件下倾向于发生脆性破坏。

关键词：白云岩；力学特性；破坏特征；应力路径；破坏准则；三轴压缩；单轴压缩；泥质；风化；饱水
中图分类号：TD313　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.010
文章编号：0253-6099(2026)02-0066-07

Mechanical Properties and Failure Characteristics of Argillaceous Weathered Dolomite Under Different Stress Paths

WEI Wei, CHEN Chong, SHEN Xiaojie, CUI Bing, CHEN Tianhao
(*Norin Mining Co., Ltd., Beijing* 100035, *China*)

Abstract: To investigate the mechanical response of argillaceous weathered dolomite and its effect on engineering stability, the weathered dolomite from a mining area was taken for research. Laboratory tests including uniaxial compression, uniaxial splitting and conventional triaxial compression were carried out to systematically analyze its mechanical properties and failure modes under different stress paths. The results show that: Compared with non-argillaceous weathered dolomite, the compressive strength and tensile strength of argillaceous weathered dolomite decrease significantly, while the deformation capacity is enhanced; the compressive strength of weathered dolomite decreases obviously under water-bearing conditions, and argillaceous weathered dolomite is more sensitive to water; in triaxial compression tests, the increase of confining pressure can effectively improve the strength and toughness of rock; argillaceous weathered dolomite is prone to plastic deformation and shear failure, whereas non-argillaceous weathered dolomite tends to brittle failure under high confining pressure.

Key words: dolomite; mechanical property; failure characteristics; stress path; failure criterion; triaxial compression; uniaxial compression; argillaceous matter; weathering; water saturation

自然环境中的白云岩常常受到风化作用的影响，其物理力学性质发生显著变化[1-3]。国内外学者对含泥质岩石的力学特性进行了广泛研究，如泥质含量、岩石的矿物组成、孔隙结构等[4-7]。研究表明，泥质含量增多会致使岩石的强度减弱、变形增大。此外，岩石的矿物组成和孔隙结构也会对其力学特性产生重要影响[8]，含有较多黏土矿物的岩石更容易发生塑性变形，而孔隙结构的差异则会影响岩石的渗透性和强度。

在地质工程中，岩石还常受到多种复杂应力的作用[9-11]。例如，在地下工程中，岩石不仅受到上覆岩层的重力作用，还可能受到地下水压力、构造应力等多种因素的影响[12]。这些应力的作用路径和大小各不相同，导致岩石的力学响应和破坏特征也各不相同[13-16]。因此，研究不同应力路径作用下岩石的力学

① **收稿日期**：2025-11-03
基金项目：兵器工业集团自主科技创新项目(JM012023220)
作者简介：魏威(1987—)，男，辽宁阜新人，高级工程师，主要从事矿山安全开采及岩石力学方面的研究工作。E-mail：weiw1987@outlook.com
通讯作者：陈冲(1989—)，男，安徽宿州人，博士(后)，主要研究方向为金属矿开采。E-mail：chenchong2020@hotmail.com

特性和破坏特征,对于准确评估岩石的稳定性和安全性、设计合理的工程结构具有重要意义。国内外学者通过开展多种试验研究,如单轴压缩试验、拉伸试验、三轴压缩试验等,探讨了不同应力路径下岩石强度、变形特性和破坏模式[17-18],研究发现应力路径的变化会导致岩石的力学响应发生显著改变[19]。现有研究尚未充分揭示含泥质风化白云岩在不同应力路径下的力学特性。因此,有必要对含泥质风化白云岩在不同应力路径下的力学特性和破坏特征进行系统研究。本文通过室内试验,比较含泥质和不含泥质风化白云岩在单轴受压、受拉和三轴压缩等应力路径下的力学行为,揭示泥质成分对风化白云岩力学特性的影响机制。

1　试验设计

1.1　试件准备

将岩石加工制作成 2 种岩心试件,总共 64 块。其中,长岩心样尺寸为 Φ50 mm×100 mm,53 块;短岩心样尺寸为 Φ50 mm×50 mm,11 块。对应的岩心试件数量及试验类型见表 1。试件编号按照岩样代号、试验类型和试件序号标注,试验类型为 Y 表示压缩试验,L 表示拉伸试验,S 表示三轴压缩试验,数字表示试件序号。

表 1　岩心试件数量及试验类型

Table 1　Number and test type of core specimens

试件类别	试验类型	试件数量/块			试件编号
		E1	F1	合计	
长岩心样	单轴压缩试验(自然)	6	6	12	Y
	单轴压缩试验(饱水)	6	5	11	Y
	三轴压缩试验	15	15	30	S
短岩心样	单轴抗拉试验	6	5	11	L

1.2　试验装置

试验装置为 INSTRON 万能材料试验机。

1) 岩石单轴压缩试验装置如图 1 所示。试件有 2 种含水状态:室内自然状态和饱水状态。室内自然状态下的单轴压缩试验:试件制备完成后在实验室自然环境下(温度约 25 ℃,相对湿度约 30%)养护至试验前,其含水率保持基本稳定,初始含水率约 2%,不同批次试件之间的含水率差异控制在±0.5%以内。饱水状态下的单轴压缩试验:采用自由浸水法对试件进行饱和处理,参考《水利水电工程岩石试验规程》,采用 48 h 作为吸水稳定的标准反映岩石试样的吸水特征。单轴压缩试验采用位移加载方式,加载速率为 0.002 mm/s,直至试件破坏。



图 1　单轴压缩试验装置

Fig. 1　Uniaxial compression testing equipment

2) 岩石单轴抗拉强度的测定方式主要有直接拉伸法和间接拉伸法。直接拉伸法在试件制备以及试验技术方面相对复杂,因此,主要使用间接拉伸法,即劈裂试验。劈裂试验是通过向试件的直径方向施加一对线性荷载,使得试件沿直径方向破裂,进而间接获取岩石的抗拉强度。单轴抗拉试验装置如图 2 所示。本次试验采取劈裂试验测试岩石抗拉强度,选取标准尺寸的圆柱形或圆盘形岩石试件放置在试验机上,通过 2 条相对加载条在试件直径方向施加均匀线性荷载,逐渐增加荷载直至试件破坏,记录此时的最大荷载 P,根据劈裂公式计算岩石的抗拉强度。单轴抗拉试验采用位移加载模式,加载速率为 0.001 mm/s,加载至试件破坏。

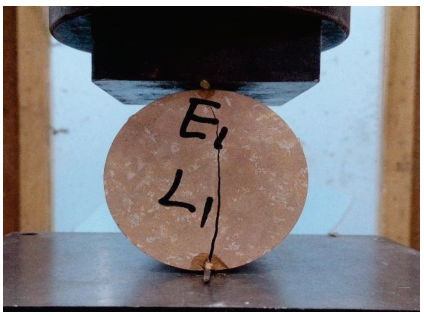


图 2　单轴抗拉试验装置

Fig. 2　Uniaxial tensile testing equipment

3) 岩石三轴压缩试验测定不同侧压条件下岩石试件的三向压缩强度,从而计算岩石在三轴压缩条件下的强度参数。三轴压缩试验装置如图 3 所示。常规三轴压缩试验设置 5 个围压水平,分别为 5,10,15,20 和 25 MPa。试验过程中围压和轴压同时以 0.8 MPa/s 速率加载至设定围压值,之后采用位移加载,速率为 0.002 mm/s,加载过程中保证围压恒定。由于试样处于干燥、低含水率状态,未设置排水与孔压测量装置,因此试验在不排水条件下进行。



图 3 三轴压缩试验装置

Fig. 3 Triaxial compression strength testing equipment

2 试验结果与讨论

2.1 单轴压缩试验

单轴压缩试验结果见表 2。

表 2 单轴压缩试验结果

Table 2 Uniaxial compression testing results

试件状态	试件编号	单轴抗压强度/MPa	试件状态	试件编号	单轴抗压强度/MPa
室内自然条件	E1-Y1	65.64	饱水状态	E1-Y7	53.65
	E1-Y2	53.26		E1-Y8	40.72
	E1-Y3	66.79		E1-Y9	43.57
	E1-Y4	64.80		E1-Y10	47.50
	E1-Y5	51.49		E1-Y11	34.97
	E1-Y6	56.86		E1-Y12	38.87
	平均值	59.81		平均值	43.21
	F1-Y1	83.45		F1-Y7	61.85
	F1-Y2	65.78		F1-Y8	52.67
	F1-Y3	47.67		F1-Y9	37.11
	F1-Y4	48.96		F1-Y10	45.17
	F1-Y5	53.85		F1-Y11	41.48
	F1-Y6	75.97		F1-Y12	38.87
	平均值	62.61		平均值	47.66

从表 2 可知，不含泥质风化白云岩（F1 系列）在 2 种含水状态下的平均抗压强度均高于含泥质风化白云岩（E1 系列），泥质的存在显著削弱了风化白云岩的抗压强度。此外，E1 岩样饱水状态下的抗压强度比室内自然条件下降了约27.8%；而 F1 岩样饱水状态下的抗压强度比室内自然条件下降了约 23.9%。这充分说明，含水状态对 2 种岩样的抗压强度产生了极显著影响。水的渗入会增大岩石内部的孔隙压力，进而降低岩石结构完整性与抗压能力。此外，从离散性的角度进行分析，F1 岩样在室内自然条件下的抗压强度范围相对较宽，介于 47.67～83.45 MPa，这反映出无泥质风化白云岩在自然状态下的材料特性可能具有更大的变化幅度。相比之下，E1 岩样的抗压强度范围较窄，这很可能是因为泥质的存在致使岩石结构的一致性较差。因此，泥质的存在对风化白云岩的抗压强度有着显著的负面影响，特别是在饱水状态下，泥质更容易成为岩石的薄弱环节。

单轴压缩荷载下，2 种岩样的破坏情况如图 4 所示。含泥质和不含泥质风化白云岩在单轴压缩时，均呈现出典型的剪切破坏模式。试验结束后，岩样普遍出现沿斜面或多条破裂面形成的破坏面，并且伴有纵向裂纹的产生。裂纹的形成通常源于岩样在加载过程中出现局部应力集中。此外，2 种岩样在破坏后都存在不同程度的块状崩解，部分碎片从主体岩石脱落。这一现象表明，即便泥质含量有所不同，2 种风化白云岩在受压条件下的初始破坏机制较为相似。含泥质风化白云岩在单轴压缩下呈现出明显的脆性破坏特征，易形成不规则的裂缝并致使结构崩解，反映出泥质对岩石整体强度和稳定性的负面作用。不含泥质风化白云岩因其均匀的材料特性，在受压状态下表现出更高的抗压强度和结构稳定性。



（a）完整测试试件；（b）加载破坏试件

图 4 单轴压缩荷载下岩样的破坏情况

Fig. 4 Failure characteristics under uniaxial compression load

2.2 单轴抗拉试验

2 种岩样劈裂试验结果如表 3 所示。含泥质风化白云岩单轴抗拉强度介于 1.85～3.45 MPa，平均抗拉强度为 2.64 MPa。试验结果采用 Grubbs 检验进行有效性检查，经检验，试验结果均未达到统计学异常值的

判定标准,测试结果准确可靠。这些结果显示,含泥质风化白云岩在拉伸应力作用下呈现出较大的离散性和不稳定性。不含泥质风化白云岩单轴抗拉强度介于2.28~3.82 MPa,平均抗拉强度为 3.10 MPa,数据分布较为集中,表明其材料均质性良好,整体抗拉性能较强。现有关于白云岩微观结构研究表明,白云岩的微观结构(裂缝、孔隙、胶结物/泥质胶结或围岩)在不同岩样中存在较大差异[20-21],而岩石中泥质成分的不均匀分布会导致裂纹在界面处萌生并沿不同路径扩展[22],从而引起抗拉强度结果波动。

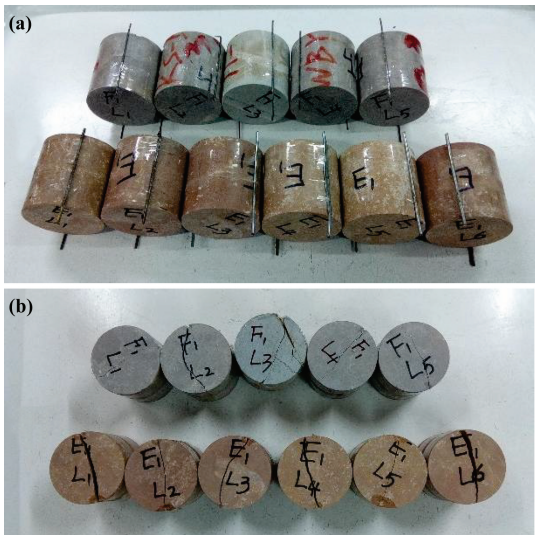
表 3　劈裂试验结果

Table 3　Splitting testing results

岩石类型	试件编号	单轴抗拉强度/MPa
含泥质风化白云岩	E1-L1	3.45
	E1-L2	3.23
	E1-L3	2.79
	E1-L4	2.24
	E1-L5	1.85
	E1-L6	2.26
	平均值	2.64
不含泥质风化白云岩	F1-L1	2.67
	F1-L2	3.13
	F1-L3	3.82
	F1-L4	2.28
	F1-L5	3.60
	平均值	3.10

不含泥质风化白云岩的平均抗拉强度明显高于含泥质风化白云岩,这表明泥质的存在对岩石的拉伸性能具有削弱作用。泥质材料的存在通常会在岩石中形成不连续面和弱化区,致使局部应力集中,从而降低岩石的整体抗拉强度。在含泥质风化白云岩中,试样 E1-L5 表现出最低的抗拉强度(1.85 MPa),可能是因为该试样中泥质分布不均匀或局部含泥量过高,进而导致早期强度失效。相比之下,不含泥质风化白云岩由于其均匀的矿物组成和紧密的内部结构,在拉伸应力下展现出更高的承载能力和稳定性。在 F1 系列岩样中,F1-L3 的抗拉强度达到 3.82 MPa,表现出卓越的抗拉伸性能。可见泥质成分对风化白云岩的劈裂抗拉强度存在显著的负影响,含泥质风化白云岩在拉伸应力下表现出较低且波动较大的抗拉强度,而不含泥质风化白云岩则表现出更高且更稳定的抗拉性能。

图 5 为 2 种风化白云岩在劈裂试验中的破坏情况。在劈裂拉伸条件下,2 种白云岩试件均呈现出典型的纵向劈裂拉伸破坏模式。主裂纹沿着施加载荷的方向贯穿试件,这表明裂纹的产生和扩展主要受拉应力的控制。此特征说明,无论是否有泥质,2 种岩石在受拉破坏时的机制基本相同。此外,试件破坏后均产生单一主裂纹,表明劈裂试验中均匀分布的拉应力对裂纹扩展路径具有控制作用。



(a) 完整测试试件;(b) 加载破坏试件

图 5　2 种风化白云岩在劈裂试验中的破坏情况

Fig. 5　Failure characteristics of two types of weathered dolomite in splitting tests

泥质成分对风化白云岩的劈裂拉伸破坏特征具有显著影响,含泥质风化白云岩因泥质材料的弱化作用表现出更多的次生裂纹和严重的碎裂现象,而不含泥质风化白云岩由均质的矿物组成,表现出更为集中的裂纹扩展路径和更好的整体稳定性。

2.3　三轴压缩试验

表 4 为 2 种风化白云岩在不同围压条件下的三轴压缩试验结果。随着围压($\sigma_2=\sigma_3$)增加,2 种风化白云岩的最大主应力(σ_1)均显著提高,表明白云岩强度随着围压增加而增强,符合岩石在三轴压缩试验中的常见规律(如图 6 所示)。这一规律体现出 2 种风化白云岩在三轴压缩条件下的共同变形机制,即:岩石的抗压强度在一定程度上依赖于外部施加的围压。在较低围压(5 MPa 和 10 MPa)条件下,E1 和 F1 系列岩石的 σ_1 值均呈现近似线性的增长趋势,初始围压对岩石强度的提升效果显著。

在每一组围压下,不含泥质风化白云岩的平均最大主应力(σ_1 平均值)均高于含泥质风化白云岩。这表明泥质的存在降低了风化白云岩的抗压强度。泥质材料可能在微观结构上形成弱面,导致岩石整体承载能力下降。围压从 5 MPa 增至 20 MPa 时,F1 岩样的 σ_1 平均值增幅约 95%,而 E1 岩样的 σ_1 平均值增幅约 87%;

当围压从 5 MPa 增至 25 MPa 时,F1 岩样的 σ_1 平均值增幅约 120%,而 E1 岩样的 σ_1 平均值增幅约 121%,二者接近。从强度增量斜率看,不含泥质风化白云岩 $k=6.14$,高于含泥质风化白云岩($k=5.67$),说明单位围压对不含泥质风化白云岩的强度提升影响更大。这表明在中低围压状态下,泥质会一定程度限制围压增强效应,高围压状态下这种限制减弱。不含泥质风化白云岩在较高围压条件下(如 15、20 MPa)表现出更为一致的力学行为,σ_1 的波动性较小,而含泥质风化白云岩在相同条件下 σ_1 值波动较大。这可能是泥质分布不均匀导致的局部应力集中和破坏行为的不稳定性。

表 4 三轴压缩试验结果

Table 4 Triaxial compression testing results

试件编号	三向应力/MPa			试件编号	三向应力/MPa		
	$\sigma_2(=\sigma_3)$	σ_1	σ_1 平均值		$\sigma_2(=\sigma_3)$	σ_1	σ_1 平均值
E1-S1	5	88.99		F1-S1	5	91.23	
E1-S2	5	86.57	91.24	F1-S2	5	96.58	97.57
E1-S3	5	98.16		F1-S3	5	104.90	
E1-S4	10	116.07		F1-S4	10	128.46	
E1-S5	10	106.36	111.09	F1-S5	10	113.06	125.26
E1-S6	10	110.84		F1-S6	10	134.26	
E1-S7	15	131.11		F1-S7	15	155.28	
E1-S8	15	153.99	147.46	F1-S8	15	157.32	162.09
E1-S9	15	157.27		F1-S9	15	173.68	
E1-S10	20	169.09		F1-S10	20	182.45	
E1-S11	20	172.50	170.37	F1-S11	20	198.27	190.19
E1-S12	20	169.51		F1-S12	20	189.85	
E1-S13	25	184.17		F1-S13	25	214.01	
E1-S14	25	218.21	201.31	F1-S14	25	197.29	214.47
E1-S15	25	201.56		F1-S15	25	232.12	

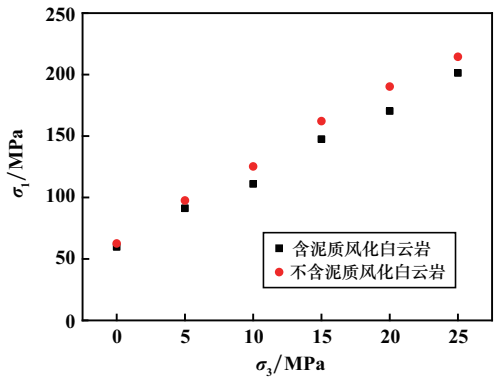


图 6 不同围压下轴向最大抗压强度

Fig. 6 Maximum axial compressive strength under different confining pressures

因此,泥质对风化白云岩的三轴压缩力学性能有显著影响,泥质的存在会导致风化白云岩的抗压强度下降,并影响围压对岩石强度的增强效应。不含泥质风化白云岩在承受较高围压时表现出更高的强度和稳定性,适用于更高承载要求的工程项目。

图 7 为三轴压缩载荷下的岩石破坏情况,图 7(b)中,第 1 排 10 个和第 2 排左侧 5 个试件是不含泥质风化白云岩,第 2 排右侧 5 个和第 3 排 10 个试件为含泥质风化白云岩,从左到右围压依次增大,每 3 个试件一组。在三轴压缩试验中,含泥质风化白云岩与不含泥质风化白云岩在不同围压环境下所展现的破坏特征存在显著差别。



(a) 完整测试试件;(b) 加载破坏试件

图 7 三轴压缩荷载下的岩石破坏情况

Fig. 7 Rock failure characteristics under triaxial compression loading

在三轴压缩条件下,不含泥质风化白云岩的破坏模式主要受围压制约。在低围压状况下,不含泥质风化白云岩主要展现出显著的剪切破坏特征,其破裂面相对光滑,整体性良好,破坏后产生的碎块数量较少。随着围压递增,破坏模式逐渐由单一的剪切破坏向剪切与劈裂复合破坏转变。在高围压条件下,不含泥质风化白云岩试件呈现出更多的轴向劈裂破坏,裂纹密集且细碎,但试件依旧保持了一定程度的形状完整性,体现出较强的结构稳定性。相比之下,含泥质风化白云岩在三轴压缩试验中随着围压增大逐渐表现出塑性变形特征,破裂面粗糙,体积膨胀明显,塑性特征显著增强。在高围压环境中,含泥质风化白云岩表现出严重的多裂面破坏,裂纹呈网状分布,强度大幅降低。

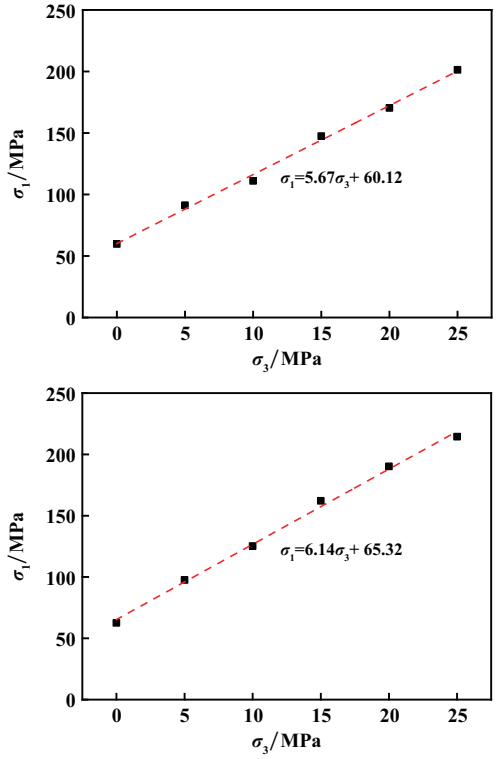
2 种白云岩在低围压下均表现出剪切破坏的态势,并随着围压增加而倾向于混合破坏模式。然而,泥质的存在显著降低了岩石的抗压强度和结构完整性。

由于泥质的弱化作用,含泥质风化白云岩整体呈现出较低的强度和较强的脆性,在高围压条件下极易发生剧烈破坏,碎块数量增多,完整性大幅下降。

2.4　岩石强度准则

岩石的强度准则用于描述岩石材料在不同应力状态下的破坏条件,主要通过建立岩石强度与应力之间的关系模型来预测其破坏。常用的岩石强度准则包括莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)准则、德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)准则和霍克-布朗准则(Hoek-Brown)等[23-24]。其中,莫尔-库仑准则基于岩石的内摩擦角和黏聚力,适用于描述岩石在剪切应力作用下的破坏行为;德鲁克-普拉格准则和霍克-布朗准则通常适用于更复杂的岩石力学分析,德鲁克-普拉格准则本质上是莫尔-库仑准则在三维应力空间中的光滑化表达,在常规三轴试验中,其拟合效果与莫尔-库仑准则接近,而霍克-布朗准则通常适用于更复杂的岩石力学分析,如含复杂节理的岩体。因此本文选择莫尔-库仑准则讨论 2 种岩石的强度特性。

根据三轴压缩试验结果,计算岩石的抗剪强度参数(内聚力 c 和内摩擦角 φ)。以 σ_1 为纵坐标、σ_3 为横坐标绘制 σ_1-σ_3 最佳关系曲线,如图 8 所示。



(a) 含泥质风化白云岩;(b) 不含泥质风化白云岩

图 8　σ_1-σ_3 最佳关系曲线

Fig. 8　Optimal relationship curve between σ_1 and σ_3

根据莫尔-库仑准则可知:

$$\tau = c + \sigma\tan\varphi \tag{1}$$

其中:

$$c = \frac{\sigma_c(1 - \sin\varphi)}{2\cos\varphi}$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{k - 1}{k + 1}\right)$$

式中:c 为岩石内聚力,MPa;φ 为岩石内摩擦角,(°);σ_c 为最佳关系曲线纵坐标的应力截距,MPa;k 为最佳关系曲线的斜率,代表每增加 1 MPa 围压对应的 σ_1 增量。

不含泥质风化白云岩的 k 值为 6.14,表示围压每增加 1 MPa,其峰值强度 σ_1 平均增加 6.14 MPa;含泥质风化白云岩 k 值为 5.67,表示围压每增加 1 MPa,其峰值强度 σ_1 平均增加 5.67 MPa。这表明不含泥质风化白云岩对围压敏感性更高。

表 5 为 2 种白云岩的莫尔-库仑强度准则参数。含泥质风化白云岩的内聚力为 12.629 MPa,显示出一定的颗粒黏结力,这可能与泥质物质的胶结特性有关;含泥质风化白云岩内摩擦角为 44.275°,表明在剪切破坏过程中,岩石内部摩擦阻力较大,具有一定的抗剪切能力。不含泥质风化白云岩的内聚力为 13.118 MPa,显示其颗粒间结合更为紧密,可能因为颗粒间直接接触,增强了颗粒间的黏结力,而其内摩擦角为46.095°,略高于含泥质风化白云岩,这表明不含泥质风化白云岩在受到剪切力时表现出更高的抗剪切能力。

表 5　2 种白云岩的莫尔-库仑强度准则参数

Table 5　Mohr-Coulomb strength criterion parameters of two kinds of dolomite

岩石类型	单轴抗压强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
含泥质风化白云岩	59.81	12.629	44.275
不含泥质风化白云岩	62.61	13.118	46.095

不含泥质风化白云岩在力学性能上普遍优于含泥质风化白云岩,主要体现在较高的抗压强度、内聚力以及内摩擦角上。这些差异主要由风化白云岩中的泥质材料的胶结特性和颗粒接触方式所决定。因此,在工程应用中需考虑泥质含量对岩石稳定性和承载能力的影响,以便在边坡设计和施工中采取适当的加固措施。

3　结论

1) 泥质含量对风化白云岩力学性质具有显著控制作用,随着泥质含量增加,岩石抗压强度与抗拉强度明显降低,而变形能力增强,表明泥质含量是影响风化白云岩强度与变形特性的关键因素。

2）含水状态显著影响风化白云岩的强度特性，饱水条件下岩石抗压强度明显降低，且含泥质风化白云岩的劣化程度更为显著，其主要原因在于孔隙水压力增加及颗粒间内聚力减弱。

3）不同应力路径对风化白云岩力学行为影响显著，在三轴压缩条件下，围压升高，岩石强度显著提高，表明工程分析与设计中需充分考虑应力路径及围压效应。

4）不同应力条件和岩石中泥质成分引发了不同的破坏模式，含泥质岩石更易呈现塑性变形和剪切破坏，不含泥质风化白云岩在高围压下可能出现脆性破坏。通过研究这些破坏模式，能够预测岩石在实际工程中的表现以及设计适合的加固措施。

参考文献(References)：

[1] BILEN C, TUĞRUL A, ÜNDÜL Ö. Engineering geological evaluation of weathered limestones and dolomites quarries in Gebze (Türkiye)[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025,84(5):227.

[2] 李杰林,洪流,周科平,等. 不同加卸载方式下饱和岩石力学特征的试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(2):15-19.
LI Jielin, HONG Liu, ZHOU Keping, et al. Experimental study on mechanical characteristics of saturated rock under different cyclic loading modes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(2):15-19.

[3] WANG J Q, DENG J X, XU Z H, et al. Rock physics properties and influencing factors of subsalt carbonate reservoir of Ordovician Majiagou Formation in central Ordos Basin[J]. Petroleum Science, 2024,21(6):3965-3980.

[4] 赵国彦,戴兵,董陇军,等. 不同应力路径下岩石三轴卸荷力学特性与强度准则研究[J]. 岩土力学, 2015,36(11):3121-3127.
ZHAO Guoyan, DAI Bing, DONG Longjun, et al. Experimental research on mechanical characteristics and strength criterion of rock of triaxial unloading tests under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(11):3121-3127.

[5] 程昀,张金团,韩晶晶,等. 不同应力路径岩石能量耗散研究现状及分析[J]. 中国矿业, 2018,27(1):148-153.
CHENG Yun, ZHANG Jintuan, HAN Jingjing, et al. Research status of energy dissipation of rock under different stress paths and analysis[J]. China Mining Magazine, 2018,27(1):148-153.

[6] 张安斌,刘祥鑫,张艳博,等. 不同含水率泥质粉砂岩破裂声发射特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017,13(3):591-597.
ZHANG Anbin, LIU Xiangxin, ZHANG Yanbo, et al. Experimental research on acoustic emission characteristics of argillaceous siltstone failure under different moisture contents[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017,13(3):591-597.

[7] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022,96(1):155-171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica 2022,96(1):155-171.

[8] 韩应伟,王国伟,马宏发. 泥质含量对砂岩力学性质及其破坏特征的影响规律研究[J]. 煤矿安全, 2019,50(4):46-49.
HAN Yingwei, WANG Guowei, MA Hongfa. Influence of argillaceous content on mechanical properties and failure characteristics of sandstone[J]. Safety in Coal Mines, 2019,50(4):46-49.

[9] 庞义辉,王国法,李冰冰. 深部采场覆岩应力路径效应与失稳过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020,39(4):682-694.
PANG Yihui, WANG Guofa, LI Bingbing. Stress path effect and instability process analysis of overlying strata in deep stopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(4):682-694.

[10] BRYSON L S, MAHMOODABADI M, GOMEZ-GUTIERREZ I C. Mechanical behavior of weathered compacted shales[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2024,42(3):1993-2009.

[11] XIE H P, LU J, LI C B, et al. Experimental study on the mechanical and failure behaviors of deep rock subjected to true triaxial stress: A review[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022,32(5):915-950.

[12] 李啸,汪仁建,李秋涛,等. 深部环境下岩石声发射地应力测试及其应用[J]. 矿冶工程, 2019,39(2):19-23.
LI Xiao, WANG Renjian, LI Qiutao, et al. Measurement of in-situ stress in deep underground by acoustic emission technique and its application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(2):19-23.

[13] 夏才初,徐晨,杜时贵. 考虑应力路径的深埋隧道黏弹-塑性围岩与支护相互作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(9):1789-1802.
XIA Caichu, XU Chen, DU Shigui. Interaction between viscoelastic-plastic surrounding rock and support structure in deep tunnels considering stress path[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(9):1789-1802.

[14] 赵军,郭广涛,徐鼎平,等. 三轴及循环加卸载应力路径下深埋硬岩变形破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2020,41(5):1521-1530.
ZHAO Jun, GUO Guangtao, XU Dingping, et al. Experimental study of deformation and failure characteristics of deeply-buried hard rock under triaxial and cyclic loading and unloading stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020,41(5):1521-1530.

[15] LIU K, ZHAO J. Progressive damage behaviours of triaxially confined rocks under multiple dynamic loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021,54(6):3327-3358.

[16] SINGH D, NILANKAR K, RAM B K, et al. Influence of specimen geometry on the point load strength anisotropy of phyllite[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2025,43(8):464.

[17] 张季如,罗明星,彭伟珂,等. 不同应力路径下钙质砂力学特性的排水三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021,43(4):593-602.
ZHANG Jiru, LUO Mingxing, PENG Weike, et al. Drained triaxial tests on mechanical properties of calcareous sand under various stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021,43(4):593-602.

(下转第82页)

long-narrow cemented paste backfill body and its effect on target strength[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(3):648-654.

[5] 蔡嗣经. 矿山充填力学基础[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社, 2009.
CAI Sijing. Fundamentals of mine filling mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

[6] 熊朝辉,谭玉叶,楚立申,等. 高阶段嗣后分层胶结充填体强度及结构优化研究[J]. 金属矿山, 2022(3):35-42.
XIONG Zhaohui, TAN Yuye, CHU Lishen, et al. Study on strength and structure optimization of high-stage subsequent layered cemented backfill[J]. Metal Mine, 2022(3):35-42.

[7] 魏晓明,郭利杰,李长洪,等. 高阶段胶结充填体强度空间变化规律研究[J]. 岩土力学, 2018,39(增刊2):45-52.
WEI Xiaoming, GUO Lijie, LI Changhong, et al. Study of space variation law of strength of high stage cemented backfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(S2):45-52.

[8] BEN D, BRAD B, MURRAY M. Constrained thermal expansion as a causal mechanism for in-situ pressure in cemented paste and hydraulic backfilled stopes[C]//11# International Symposium on Mining with Backfill. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014:365-378.

[9] 于永纯,罗正良,孙长坤,等. 窄长采场胶结充填体强度要求及结构设计[J]. 有色金属(矿山部分), 2021,73(2):21-26.
YU Yongchun, LUO Zhengliang, SUN Changkun, et al. Strength requirement and structure design of cemented backfill in narrow-long stope[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021,73(2):21-26.

[10] 张雄天,马炳德,张春阳,等. 多中段开采复杂采空区群稳定性数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):26-33.
ZHANG Xiongtian, MA Bingde, ZHANG Chunyang, et al. Numerical simulation for stability of complex mined-out areas in multi-level mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):26-33.

[11] LIU G S, LI L, YANG X C, et al. Numerical analysis of stress distribution in backfilled stopes considering interfaces between the backfill and rock walls[J]. International Journal of Geomechanics, 2017,17(2):06016014.

[12] 卢西洲,王文杰,贾稳宏,等. 大体积充填体下胶结充填法回采进路参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):20-25.
LU Xizhou, WANG Wenjie, JIA Wenhong, et al. Parameter optimization for stoping by cemented backfilling below massive filling body[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(5):20-25.

[13] 向伟华,路燕泽,刘志义,等. 阶段空场嗣后充填法凿岩硐室矿柱对顶板稳定性的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):69-76.
XIANG Weihua, LU Yanze, LIU Zhiyi, et al. Influence of pillars in drifting chamber on roof stability during sublevel open stoping with backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):69-76.

[14] 曹帅,杜翠凤,谭玉叶,等. 金属矿山阶段嗣后充填胶结充填体矿柱力学模型分析[J]. 岩土力学, 2015,36(8):2370-2376.
CAO Shuai, DU Cuifeng, TAN Yuye, et al. Mechanical model analysis of consolidated filling pillar using stage-delayed backfill in metal mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(8):2370-2376.

[15] 董亚宁,王忠强,肖松丽. 罗河铁矿高阶段采场充填体应力解析与强度设计[J]. 现代矿业, 2020,36(12):96-97.
DONG Yaning, WANG Zhongqiang, XIAO Songli. Stress analysis and strength design of backfill in high stage stope of Luohe iron mine[J]. Modern Mining, 2020,36(12):96-97.

[16] 刘光生,杨小聪,郭利杰. 阶段空场嗣后充填体三维拱应力及强度需求模型[J]. 煤炭学报, 2019,44(5):1391-1403.
LIU Guangsheng, YANG Xiaocong, GUO Lijie. Models of three-dimensional arching stress and strength requirement for the backfill in open stoping with subsequent backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(5):1391-1403.

引用本文:路燕泽,甘德清,刘志义,等. 高阶段采场充填体应力解析与强度设计模型[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):73-82.
LU Yanze, GAN Deqing, LIU Zhiyi, et al. Stress analysis and strength design model of backfill in high-level stopes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):73-82.

(上接第72页)

[18] 刘基程,马林建,张宁,等. 岩石变形破坏过程的能量演化研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2021,17(3):975-986.
LIU Jicheng, MA Linjian, ZHANG Ning, et al. Research progress on energy evolution in the process of rock deformation and failure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3):975-986.

[19] 王平,胡彦,程爱平,等. 基于三轴试验与数值模拟的大理岩破坏特征研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):1-6.
WANG Ping, HU Yan, CHENG Aiping, et al. Failure characteristics of marble based on triaxial test and numerical simulation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(6):1-6.

[20] 尤东华,韩俊,胡文瑄,等. 塔里木盆地顺南501井鹰山组白云岩储层特征与成因[J]. 沉积学报, 2018,36(6):1206-1217.
YOU Donghua, HAN Jun, HU Wenxuan, et al. Characteristics and genesis of dolomite reservoirs in the Yingshan forma-tion of well SN501 in the Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(6):1206-1217.

[21] WANG M Q, WU Y H, SONG B H, et al. Point load strength test power index of irregular sandy dolomite blocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024,57(7):5279-5290.

[22] HERNANDEZ-URIBE L A, AMAN M, ESPINOZA D N. Assessment of mudrock brittleness with micro-scratch testing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017,50(11):2849-2860.

[23] 丁发兴,吴霞,张学民,等. 材料强度理论研究进展述评[J]. 铁道科学与工程学报, 2024,21(11):4555-4587.
DING Faxing, WU Xia, ZHANG Xuemin, et al. Reviews on research progress of strength theories for materials[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024,21(11):4555-4587.

[24] LI C G, LI C H, ZHAO R, et al. A strength criterion for rocks[J]. Mechanics of Materials, 2021,154:103721.

引用本文:魏威,陈冲,沈晓杰,等. 不同应力路径下含泥质风化白云岩的力学特性和破坏特征[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):66-72.
WEI Wei, CHEN Chong, SHEN Xiaojie, et al. Mechanical properties and failure characteristics of argillaceous weathered dolomite under different stress paths[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):66-72.