罗盈,刘晓辉,王悠,等. 裂隙砂岩渐进破坏特征及损伤本构模型.吉林大学学报(地球科学版),2026,56(4):1315-1326. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240205.

Luo Ying,Liu Xiaohui,Wang You,et al. Progressive Failure Characteristics and Damage Constitutive Model of Fractured Sandstone. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2026,56(4):1315-1326. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240205.

裂隙砂岩渐进破坏特征及损伤本构模型

罗 盈[1,2],刘晓辉[1,2],王 悠[1,2],张 旭[1,2]

1.西华大学能源与动力工程学院,成都 610039

2.流体及动力机械教育部重点实验室(西华大学),成都 610039

摘要:为全面探讨裂隙特征对岩体强度及变形破坏的影响,本文利用离散元软件PFC^{3D}对裂隙砂岩展开不同围压、不同预裂隙倾角的变形破坏试验。结合变形破坏全过程的宏观力学特性,基于细观裂纹数目演化规律,分析裂隙砂岩的渐进破坏特征;进而根据细观裂纹数目定义损伤变量D,构建能够反映裂隙岩体渐近破坏的损伤本构关系。结果表明:裂隙砂岩具有明显的围压效应,围压越大,抗压强度越大;相同围压下,裂隙砂岩抗压强度随预裂隙倾角增大呈现先减小后增大的趋势。裂隙砂岩变形破坏过程对应细观裂纹数目演化曲线具有阶段性,依据裂纹数曲线进行了平滑段、线性增长段、上凹增长段及最后趋于平缓段的阶段划分,确定了相应的特征应力点。渐进破坏过程中,0°、90°裂隙岩样细观裂纹几乎遍布在整个试样中,30°、45°及60°裂隙岩样细观裂纹趋于沿预裂隙与上下加载面贯通面产生。各特征应力点处,总裂纹数随围压增大而增大,且围压越大剪切裂纹比例越大,总裂纹数随预裂隙倾角增大先减小后增大。根据细观裂纹数构建的本构关系具有合理性,能够较好地反映裂隙砂岩的基本力学特征。

关键词:裂隙砂岩;裂纹数目;渐进破坏;损伤本构模型;PFC^{3D};围压;预裂隙倾角

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240205 **中图分类号**:TD313 **文献标志码**:A

Progressive Failure Characteristics and Damage Constitutive Model of Fractured Sandstone

Luo Ying[1,2],Liu Xiaohui[1,2],Wang You[1,2],Zhang Xu[1,2]

1. *School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu* 610039, *China*

2. *Key Laboratory of Fluid and Power Machinery (Xihua University), Ministry of Education, Chengdu* 610039, *China*

Abstract: To comprehensively investigate the influence of fracture characteristics on rock mass strength and deformation failure, this study employs the discrete element method software PFC^{3D} to conduct deformation and failure tests on fractured sandstone under varying confining pressures and

收稿日期:2024-09-05

作者简介:罗盈(1999—),女,硕士研究生,主要从事岩石力学及工程方面的研究,E-mail:luoying2@stu.xhu.edu.cn

通信作者:刘晓辉(1977—),女,教授,博士,主要从事岩石力学及工程方面的研究,E-mail:liuxh@mail.xhu.edu.cn

基金项目:四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0279,2022NSFSC1009)

Supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (2022NSFSC0279,2022NSFSC1009)

fracture inclinations. By integrating the macroscopic mechanical properties throughout the entire deformation and failure process and analyzing the progressive failure characteristics based on the evolution of the number of microcracks, a damage variable D is defined according to the number of microcracks, and a damage constitutive relationship is established that can reflect the asymptotic failure of fractured rock masses. The results indicate that: The fractured sandstone has obvious confining pressure effect, the larger the confining pressure, the larger the compressive strength; Under the same confining pressure, the compressive strength of fractured sandstone shows the trend of decreasing and then increasing with the increase of fracture inclination angle. The deformation and damage process of fractured sandstone corresponds to the evolution curve of the number of microscopic cracks with a stage, based on the curve of the number of cracks, a smooth section, a linear growth section, an upward concave growth section and the last tends to be flat section of the stage division, to determine the corresponding characteristics of the stress point. During the progressive damage process, the microcracks of 0° and 90° fractured rock samples were almost spread throughout the whole sample, and themicrocracks of 30°, 45° and 60° fractured rock samples tended to be generated along the pre-fractured and the upper and lower loading surfaces. At each characteristic stress point, the total number of cracks increases with the increase of confining pressure, and the larger the confining pressure, the larger the proportion of shear cracks, and the total number of cracks decreases and then increases with the increase of the inclination angle of the pre-fracture. The constitutive relationship established based on the number of microcracks is reasonable and can well reflect the basic mechanical characteristics of fractured sandstone.

Key words: fractured sandstone; crack number; progressive failure; damage constitutive model; PFC^{3D}; confining pressures; fracture inclinations

0 引言

长期的地质运动和外部作用导致天然岩体中普遍存在大量裂隙、节理和不连续面等缺陷,使得裂隙岩体较完整岩体强度明显降低[1-3]。此外,裂纹的起裂和扩展通常发生于既有裂隙的尖端附近,原生裂隙对岩体最终破坏形态具有重大影响[4-6]。因此,开展裂隙岩体强度及破坏特征研究对水利工程与岩土工程安全具有重要意义。

裂隙岩体失稳破坏是其内部微裂纹萌生、扩展、聚合,甚至贯通的渐进破坏过程[7]。细观裂纹的演化阶段对应不同的特征应力水平,特征应力可作为评价开挖扰动所致岩体损伤程度的重要指标,因此特征应力的确定方法受到学者的广泛关注。目前,确定特征应力的方法主要包括体积应变法、横向应变法、声发射法和能量法等。其中:体积应变法[8]和横向应变法[9]基于应力-应变曲线确定特征应力;声发射法通过声发射特征参数的变化确定特征应力点[10-11];能量法则考虑岩石破坏的能量驱动本质,基于能量理论确定特征应力[12]。此外,利用离散元软件 PFC 从细观裂纹扩展确定特征应力,可将岩体破裂过程和岩体强度及细观裂纹特征联系起来。例如:Jin 等[13]基于细观裂纹数目定义特征应力,研究了单裂纹类岩材料的破坏过程和能量机制;黄丹等[14]依据细观裂纹形态和数量变化特征确定起裂和损伤强度,探讨了锦屏大理岩的特征强度及破坏过程中的损伤演化规律;申海萌等[15]将声发射试验与 PFC 数值试验相结合确定特征应力,研究了不同应力条件下页岩的脆性破坏特征。然而,上述研究多针对完整岩体,关于裂隙岩体渐进破坏特征的研究仍较薄弱。

关于岩石损伤本构关系,已有大量研究成果。目前主要存在两类研究方法。第一类方法先假定岩石微元强度服从某种统计分布(如 Weibull 分布[16-18]、正态分布[19]或幂函数分布[20]等),再结合岩石所服从的强度准则构建其损伤本构模型,如:郑钰等[16]假设煤岩微元强度服从 Weibull 统计分布,微元体破坏符合 Drucker-Prager 破坏准则,建立了考虑应变率效应的煤岩强度型统计损伤本构模型;蒋浩鹏等[17]引入 Weibull 分布函数和热损伤变量,

在 Mohr-Coulomb 准则下，构建了能够合理准确地反映高温岩石应力应变过程的统计损伤本构模型；朱振南等[19]认为高温处理后岩石的微元体强度服从正态分布，结合 Mohr-Coulomb 强度准则，建立了高温作用下岩石统计热损伤本构模型。第二类方法则通过定义损伤变量，并结合应变等效假说构建损伤本构模型[21-22]。定义损伤的基准量可分为宏观基准量与细观基准量。目前，基于弹性模量、屈服应力、密度、延伸率和声发射特征等宏观基准量的损伤演化规律及本构模型已被学者普遍研究，例如：彭成等[22]以弹性模量定义砂岩的损伤变量，经拟合发现损伤演化曲线符合指数函数变化趋势，基于此建立了砂岩的损伤演化方程；余洋林等[23]将峰值应力前的塑性应变与峰值应变的比值定义为花岗岩的损伤变量，提出临界损伤变量建立岩石损伤与裂隙演化的关系；向高等[24]基于声发射振铃计数建立损伤本构模型，发现在盐岩破坏的应力加载初期，损伤变量较小，在应力后期损伤变量快速增加。然而，基于裂隙数目、长度、面积等细观基准量定义损伤变量的岩体破坏特征还少有研究。

本文首先依托数值软件 PFC^{3D}，开展不同围压（0、10、20、30 MPa）和不同预裂隙倾角（0°、30°、45°、60°、90°）条件下裂隙砂岩变形破坏试验。然后根据裂纹数量变化规律对岩体破坏过程进行阶段性划分，系统分析裂隙砂岩的强度特征及其渐进破坏过程中的损伤演化规律。最后，基于细观裂隙数定义损伤变量，构建裂隙砂岩的损伤本构模型，并验证了其可行性。

1　数值试验

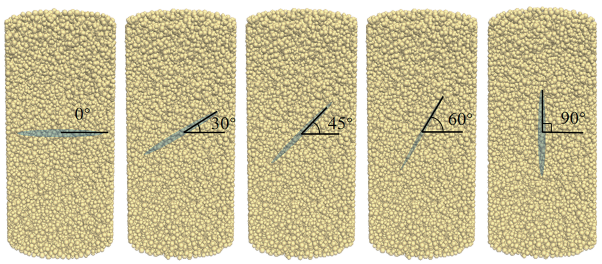
1.1　数值模型

数值模型试样为直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱体。颗粒最小半径为 0.825 mm，最大半径与最小半径之比为 1.6，孔隙率为 0.25，随机生成颗粒总数为 26 580。

考虑到裂隙岩体实际裂隙方向各异，在完整岩石模型中分别生成 0°、30°、45°、60°和 90°的圆盘状裂隙，形成不同裂隙岩体，考虑裂隙岩体的尺寸效应[25]，生成裂隙直径为 40 mm。数值模型如图 1 所示。

1.2　细观接触模型及其参数

在 PFC 程序中，颗粒集合体的整体物理力学特性在很大程度上取决于颗粒与颗粒之间的接触属性，接触模型是体现接触属性的根本因素。在 PFC 程序中，黏结模型包括接触黏结模型与平行黏结模型。因为平行黏结模型具有接触区域为圆形或方形截面的几何特性，以及可以同时传递力和力矩的受力特性，结合相关研究[26-27]，本文选择平行黏结模型构建基本岩块。而后在完整岩块中嵌入光滑节理模型生成裂隙岩体试件。



图中为预裂隙倾角。

图 1　裂隙岩样模型图

Fig.1　Model diagram of fractured rock samples

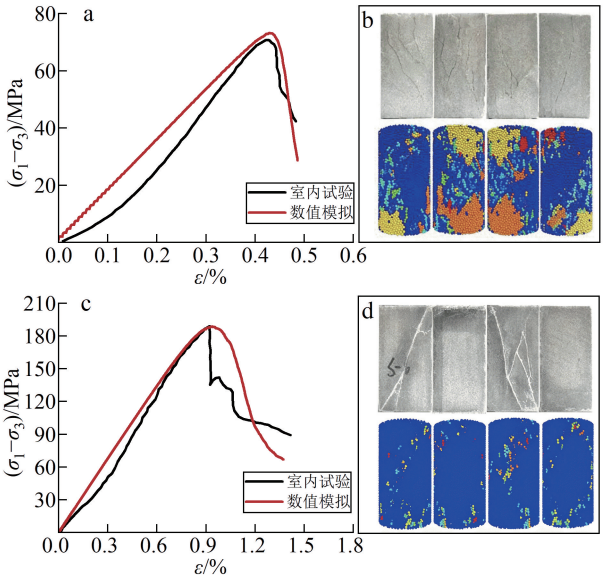
基于前期参数敏感性分析[28]，确定了影响试验结果的主要细观参数，包括平行黏结抗拉强度、平行黏结内聚力、平行黏结摩擦角及接触模量。其中，平行黏结抗拉强度、平行黏结内聚力与平行黏结摩擦角的增大均会提高试样的峰值强度，而接触模量的增大则会导致弹性模量增加。结合相关试验数据[29]，采用试错法进行标定，最终确定的裂隙砂岩细观参数见表 1。

表 1　模型细观参数

Table 1　Model mesoscopic parameters

细观参数	取值
颗粒最小半径/mm	0.825
颗粒粒径比	1.6
颗粒密度/(kg/m^3)	2 500
颗粒阻尼系数	0.7
颗粒及平行黏结接触模量/ GPa	16
颗粒及平行黏结刚度比	1.6
平行黏结抗拉强度/ MPa	36
平行黏结内聚力/ MPa	40
平行黏结摩擦角/(°)	45
平行黏结摩擦系数	0.6
光滑节理法向刚度/ GPa	4 800
光滑节理切向刚度/ GPa	4 800
光滑节理摩擦系数	1.5

通过与完整岩样在0和20 MPa围压下的室内试验结果[25]进行对比,验证了细观参数的合理性。完整岩样的室内试验与数值模拟最终破坏模式和应力-应变曲线对比如图2所示。结果表明,数值模拟与室内试验的应力-应变曲线基本吻合,峰值应力及峰值应变相差较小;在0 MPa围压下,岩样以张拉破坏为主,而在20 MPa围压下,岩样主要发生剪切破坏。综上,采用表1所列细观参数生成的数值模型能够较好地表征砂岩试样的力学特性及破坏形态,表明该组参数具有一定的合理性和准确性。



a. 0 MPa应力-应变曲线;b. 0 MPa破坏模式;c. 20 MPa应力-应变曲线;d. 20 MPa破坏模式。ε. 应变;σ_1. 最大主应力(轴向应力);σ_3. 最小主应力(围压);$\sigma_1-\sigma_3$. 偏应力。b、d图中数值破坏图片由PFC中的碎片来表征,相同颜色碎片代表受力状态相似,不同颜色交界的线代表破坏形成的裂隙。

图2 室内试验与数值模拟对比

Fig. 2 Comparison between indoor tests and numerical simulation

1.3 试验方案

利用PFC^{3D}中的平行黏结模型与光滑节理模型,生成含0°、30°、45°、60°、90°裂隙的砂岩模型,并对其进行紧密固结处理,该步骤与室内试验前的预压过程具有相似作用。为探究裂隙砂岩在不同地应力条件下的力学特性与破坏特征,通过PFC中的伺服控制机制,对模型分别施加0、10、20、30 MPa围压。围压稳定后,保持围压不变,以恒定加载率施加轴向加载直至试样破坏。最终获取试验所得应力-应变曲线、总裂纹数、张拉裂纹数、剪切裂纹数随应变的演化曲线,以及试样破坏过程图。

1.4 试验结果

含0°、30°、45°、60°、90°倾角裂隙砂岩在0、10、20、30 MPa四种围压下的应力-应变曲线如图3所示。由于PFC中颗粒单元之间无间隙,预制裂隙以外不存在原始裂缝,故变形破坏过程中不呈现压密阶段。弹性变形阶段,应力-应变曲线呈线性增长,裂隙砂岩表现出弹性变形特征;塑性变形阶段,应力-应变曲线斜率随应变增加逐渐降低,直至峰值应力点;峰后断裂变形阶段,应力-应变曲线快速跌落。

由应力-应变曲线(图3)可知:随围压增大,裂隙砂岩抗压强度逐渐增大,呈现明显的围压增强效应;随预裂隙倾角增大,抗压强度呈先减小后增大的变化趋势,该结论与文献[30-31]一致;在相同围压条件下,预裂隙倾角为90°时抗压强度最大,0°时次之,60°时最小。总体而言,围压对抗压强度的影响程度大于预裂隙倾角。

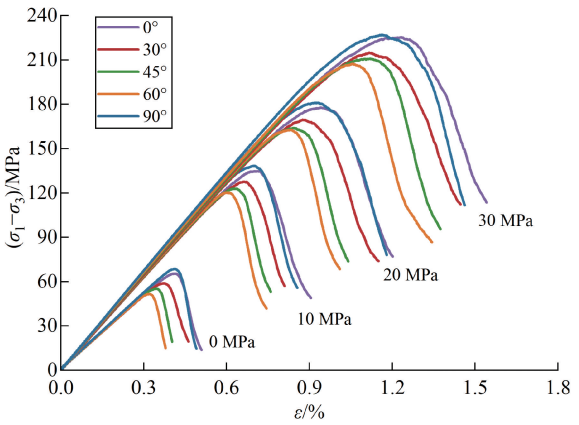
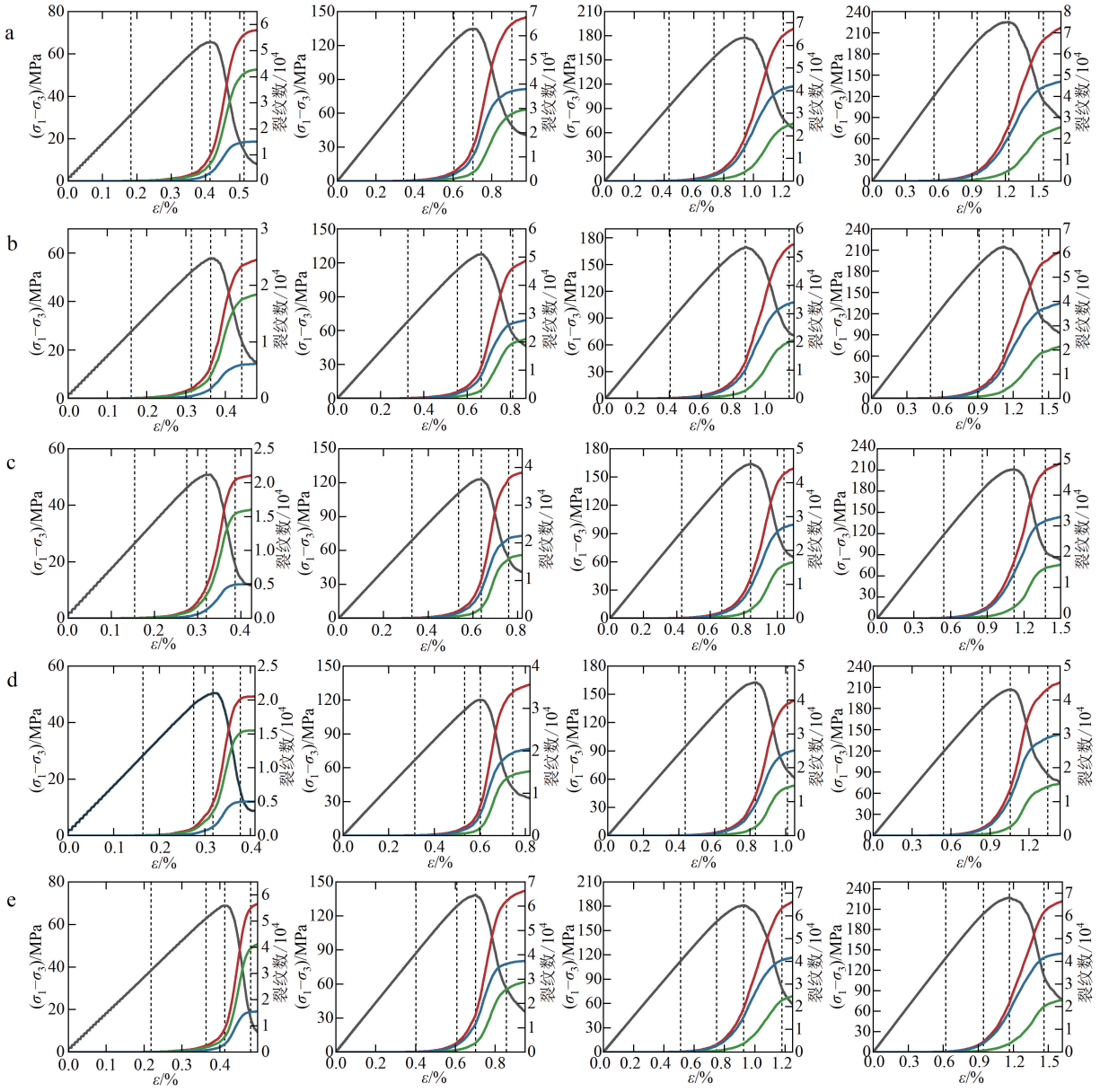


图3 不同预裂隙倾角与围压下裂隙砂岩应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of fractured sandstones under different confining pressures and fracture inclinations

为更好地反映裂隙砂岩的破坏规律,将不同围压、不同倾角裂隙砂岩损伤破坏过程中总裂纹数、张拉裂纹数、剪切裂纹数演化曲线绘制于图4。

由图4可知,总裂纹数、剪切裂纹数、张拉裂纹数演化曲线均呈现明显的阶段性特征。整个加载过程可划分为四个阶段:加载初期,几乎无裂纹萌生,裂纹数曲线保持平缓;随加载的进行,少量裂纹开始产生,且随应变增加裂纹数呈线性增大趋势;进入峰前阶段后,裂纹数呈上凹式快速增加,直至峰值应力点;峰后阶段,裂纹快速增加,直至岩样完全破坏后裂纹数目趋于稳定。据此,可将裂隙砂岩损伤破坏



各组试样对应的预裂隙倾角分别为：a.0°；b.30°；c.45°；d.60°；e.90°。1—4 列分别代表围压 0、10、20、30 MPa。

图 4　不同预裂隙倾角不同围压下裂隙砂岩细观裂纹数演化曲线

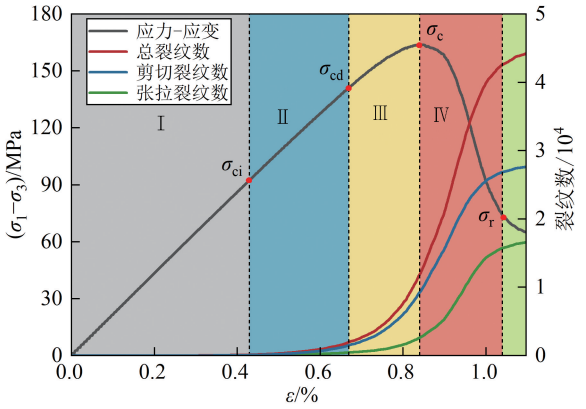
Fig.4　Evolution curves of microscopic cracks number in fractured sandstones under different confining pressures and fracture inclinations

过程划分为弹性压缩阶段（Ⅰ）、裂纹稳定扩展阶段（Ⅱ）、裂纹加速扩展阶段（Ⅲ）和峰后残余阶段（Ⅳ）共四个阶段。

2　裂隙砂岩渐进破坏特征

2.1　特征应力

为更深入研究裂隙砂岩在不同围压下裂纹的产生、发展、贯通及最终破坏情况，本文选取应力-应变关系及总裂纹数、剪切裂纹数与张拉裂纹数演化规律，以确定各特征应力。如图 5 所示，试样加载过程中的特征应力包括起裂应力 σ_{ci}、损伤应力 σ_{cd}、峰值应力 σ_c和残余应力 σ_r。结合前文裂纹演化规律并结合文献[13]，将 σ_{ci}定义为轴向加载过程中，总裂纹数达到峰值应力时裂纹总数 1% 所对应的应力点，用以表征裂纹开始萌生；将 σ_{cd}定义为总裂纹数由线性增加转变为上凹式加速增长的阈值点，用以



预裂隙倾角为45°,围压为20 MPa。

图5 特征应力与破坏阶段图

Fig.5 Characteristic stress and failure stage diagram

表征裂纹开始进入快速发展并逐渐形成贯通的阶段;将σ_r定义为总裂纹数由快速增加逐渐趋于平缓的阈值点,用以表征岩体近乎完全破坏,后续加载几乎不再产生细观裂纹。

各试验对应特征应力值见表2。由表2可知:所有试验中,σ_{ci}/σ_c在49.89%~63.21%之间,均值约为55.50%;σ_{cd}/σ_c在85.20%~90.03%之间,均值约为87.89 %;σ_r随围压增加而增加,围压0、10、20和30 MPa下,各预裂隙倾角下残余应力与峰值应力比值的平均值分别为27.82%、39.21%、43.43%与46.24%。以上数据验证了基于细观裂纹数划分渐进破坏阶段的可行性及可靠性。

表2 不同围压下裂隙砂岩特征应力值

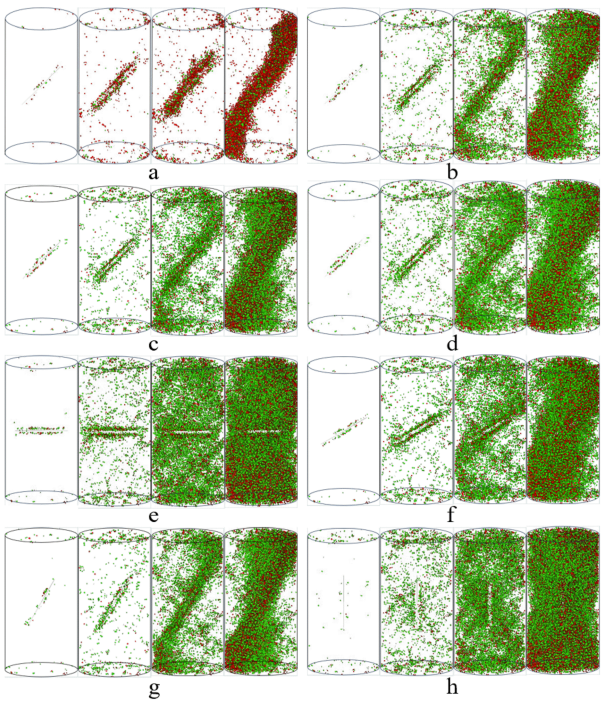
Table 2 Characteristic stress values of fractured sandstone under different confining pressures

围压/MPa	预裂隙倾角/(°)	σ_{ci}/MPa	(σ_{ci}/σ_c)/%	σ_{cd}/MPa	(σ_{cd}/σ_c)/%	σ_c/MPa	σ_r/MPa	(σ_r/σ_c)/%	$(\overline{\sigma_r/\sigma_c})$/%
0	0	33.79	51.60	58.53	89.38	65.49	13.87	21.18	27.82
	30	29.42	49.89	50.25	85.20	58.98	19.43	32.95	
	45	28.67	51.85	48.70	88.08	55.30	19.25	34.81	
	60	29.72	57.53	45.71	88.50	51.65	14.94	28.93	
	90	39.80	57.91	61.00	88.76	68.72	14.57	21.21	
10	0	72.43	53.75	119.57	88.73	134.75	48.96	36.34	39.21
	30	68.69	53.78	113.88	89.17	127.71	57.01	44.64	
	45	69.16	56.24	108.81	88.48	122.97	52.94	43.05	
	60	67.29	55.90	105.41	87.55	120.39	41.83	34.75	
	90	87.52	63.21	124.66	90.03	138.47	51.60	37.27	
20	0	92.78	52.17	153.58	86.36	177.84	77.10	43.35	43.43
	30	86.38	50.93	147.87	87.18	169.61	73.94	43.59	
	45	92.34	56.31	140.93	85.93	164.00	73.81	45.00	
	60	94.74	58.20	144.52	88.78	162.79	68.54	42.11	
	90	112.87	62.31	161.38	89.08	181.16	78.06	43.09	
30	0	120.73	53.57	198.49	88.07	225.37	113.55	50.38	46.24
	30	108.22	50.35	189.70	88.25	214.95	112.36	52.27	
	45	118.28	56.08	181.92	86.26	210.90	95.59	45.32	
	60	119.25	57.50	179.97	86.77	207.41	81.40	39.25	
	90	138.12	60.83	198.24	87.31	227.04	99.83	43.97	

注:$\overline{\sigma_r/\sigma_c}$. 残余应力与峰值应力比值的平均值。

2.2　细观裂纹扩展规律

通过 PFC 获取各特征应力点处细观裂纹生成情况，以更好地探究不同倾角裂隙砂岩在不同围压下的细观裂纹扩展规律。限于篇幅，本文仅在图 6 展示各围压下预裂隙倾角为 45°的岩样，与各预裂隙倾角下围压为 20 MPa 的岩样的细观裂纹扩展图。当试验加载至 σ_{ci} 时，裂纹开始沿预裂隙周围及上下加载面萌生；加载至 σ_{cd} 时，预裂隙周围及加载面上生成的裂纹显著增多，且试样整体都分布有细观裂纹；加载至 σ_c 时，细观裂纹沿预裂隙与上下表面基本贯通；加载至 σ_r 时，大量裂纹几乎遍布整个岩样，试样发生宏观破坏。



各组试样对应的围压及预裂隙倾角分别为：a. 0 MPa，45°；b. 10 MPa，45°；c. 20 MPa，45°；d. 30 MPa，45°；e. 20 MPa，0°；f. 20 MPa，30°；g. 20 MPa，60°；h. 20 MPa，90°。各小图中从左到右分别对应 σ_{ci}、σ_{cd}、σ_c、σ_r 处细观裂纹扩展情况，其中，绿色圆片为剪切裂纹，红色圆片为张拉裂纹。

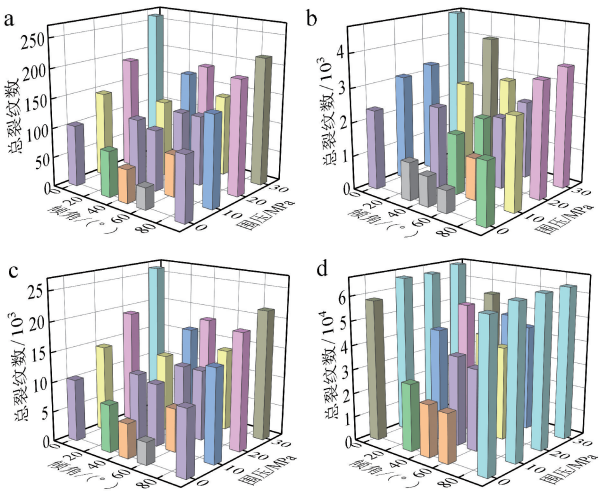
图 6　裂隙砂岩渐进破坏过程

Fig.6　Progressive damage process of fractured sandstone

围压对裂纹扩展的影响不大，0、10、20 及 30 MPa围压下，细观裂纹几乎均沿着预裂隙与上下表面贯通线上产生（图 6a—d）。而预裂隙倾角对裂纹扩展有一定影响，预裂隙为 0°和 90°时，细观裂纹除预裂隙面上偏多，其余几乎均匀地遍布试样中（图 6e、h）；预裂隙为 30°、45°与 60°时，细观裂纹几乎均沿预裂隙与上下表面贯通面产生，但 30°预裂隙倾角时这种趋势较不明显（图 6f），45°与 60°更加明显（图 6c、g）。预裂隙倾角对裂纹扩展的影响可由断裂力学中裂隙尖端的应力强度因子来解释，不同倾角的预裂隙对应的应力强度因子是倾角的函数，因此在超过临界失稳条件发生裂纹扩展时，预裂隙倾角对裂纹扩展有一定影响。

2.3　细观裂纹特征规律

由图 6 可知，各特征应力点处裂隙砂岩细观裂纹数也有所差异，将各特征应力点处总裂纹数绘制于图 7。由图 7 可知：各特征应力点处总裂纹数呈现随围压增大而增大的趋势，说明围压对岩样破坏有一定的抑制作用，围压越高，需要产生更多的细观裂纹达到各特征应力水平；随预裂隙倾角从 0°增加至 90°，各特征应力点处总裂纹数呈现出先减小后增大的趋势。由此发现，总裂纹数随围压及预裂隙倾角的变化趋势与抗压强度一致，表明裂隙砂岩强度越大，破坏所需产生细观裂纹数越多。



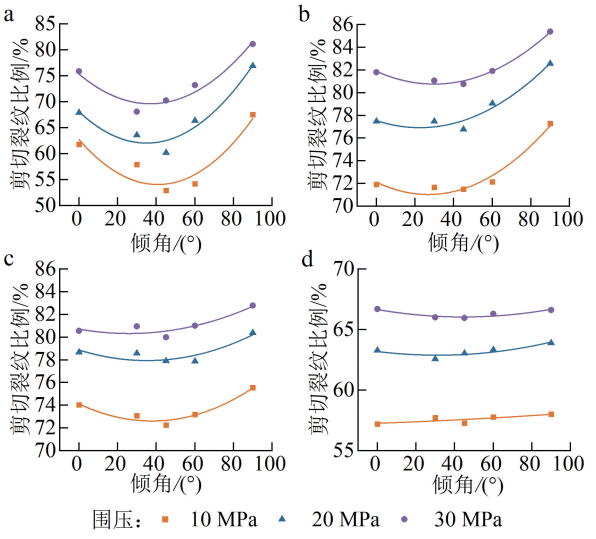
a. 起裂应力点；b. 损伤应力点；c. 峰值应力点；d. 残余应力点。

图 7　不同特征应力点处总裂纹数目

Fig.7　Total number of cracks at characteristic stress points

由图 6 还可以发现，不同围压不同预裂隙倾角下相同特征应力点处所产生的细观裂纹性质也有所不同，其中 0 MPa 围压下以张拉裂纹为主，10、20、30 MPa围压下以剪切裂纹为主。为进一步探究各特征应力点处所产生的细观裂纹性质，将各特征应力点处各裂隙岩样在 10 、20 、30 MPa 围压加载下剪切裂纹比例绘制于图 8。由图 8 可见，同一特征应力点处，围压越大，剪切裂纹占比越大，即张拉裂纹占比越小。随着预裂隙倾角从 0°增大至 90°，各特

征应力点处剪切裂纹占比呈先减小后增大趋势,即张拉裂纹占比先增大后减小;并且由起裂应力点经损伤应力点、峰值应力点至残余应力点,预裂隙倾角对产生裂纹性质的影响逐渐减弱。这表明,预裂隙倾角对细观裂纹性质的影响主要发生在起裂阶段,随着岩样进一步破坏,其影响程度逐渐降低。



a. 起裂应力点;b. 损伤应力点;c. 峰值应力点;d. 残余应力点。

图8 不同围压下不同特征应力点处剪切裂纹比例变化

Fig.8 Variation of shear cracks proportion at characteristic stress points under different confining pressures

3 裂隙砂岩损伤本构模型

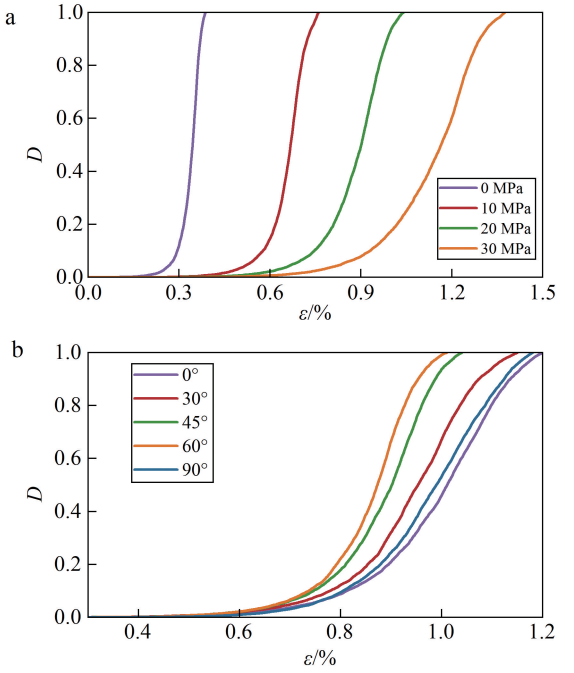
3.1 损伤变量定义

在岩石损伤力学中,损伤变量(D)常用于描述受损岩石的力学行为及其劣化程度。岩石力学性能劣化直至破坏断裂,是其内部裂纹萌生、扩展的损伤逐渐累积的结果。为此,本文从细观裂纹数目的角度定义损伤变量,将其定义为某一状态下总裂纹数与最终破坏时总裂纹数(即残余应力点处总裂纹数)的比值:

$$D=n_1/n_r。\tag{1}$$

式中:n_1为加载过程中任一点处总裂纹数;n_r为残余应力点处总裂纹数。材料初始无损伤时,$D=0$,而完全损伤破坏时 $D=1$。利用式(1)计算可得到不同围压、不同预裂隙倾角下裂隙砂岩的损伤演化曲线,如图9所示。

由损伤演化曲线(图9)可知,由于PFC数值模拟原始颗粒间除预制一条裂隙外,无其他裂隙,因此初始损伤接近于0。随着轴向应变增加,裂纹起裂、扩展、贯通使得损伤逐渐增大直至岩体完全破裂。损伤演化曲线斜率总体上呈先增大、后近乎不变、再逐渐减小的趋势。损伤演化曲线的变化也印证了裂隙砂岩渐进破坏的阶段性。



a. 45°预裂隙倾角、不同围压;b. 20 MPa围压、不同预裂隙倾角。

图9 不同围压与裂隙倾角下裂隙砂岩损伤演化曲线

Fig.9 Damage evolution curve of fractured sandstone under different confining pressures and fracture inclinations

在0 MPa围压条件下,进入裂纹快速扩展阶段后,损伤水平近乎垂直上升;在10、20、30 MPa围压条件下,随着围压增大,损伤速率逐渐减小(图9a),表明裂隙砂岩的脆性程度逐渐减弱。由图9b可知,预裂隙倾角对砂岩损伤的影响较小,随着预裂隙倾角增大,损伤速率先增大后减小,60°裂隙砂岩脆性最强,而0°裂隙砂岩脆性最弱。

由损伤演化曲线还可得出,不同围压、不同预裂隙倾角下砂岩的损伤演化曲线基本符合Logistic函数的特征,采用Logistic函数能较好地描述岩体的损伤演化规律,该函数的表达方式为

$$y=\frac{1}{1+\exp(Ax+B)}。\tag{2}$$

式中:A为x的系数;B为常数。

由此可得不同围压、不同预裂隙倾角下砂岩的损伤演化方程:

$$D=\frac{1}{1+\exp(A\varepsilon+B)}。\tag{3}$$

3.2　本构关系建立

基于上述岩体的损伤演化规律，为更好地反映岩体损伤部分与未损伤部分的综合承载能力，本文采用曹文贵等[32]提出的岩体损伤力学模型，即

$$\sigma_1=\sigma'_1(1-D)+\sigma''_1D。\tag{4}$$

式中：σ_1 为轴向名义应力；σ'_1 为未损伤部分岩石材料轴向有效应力；σ''_1 为受损部分岩石材料的轴向应力。

为建立合理的本构，并对其简化，作如下假设：

1）由于未损伤岩石材料处于弹性状态，在外部荷载作用下其应力-应变关系服从广义胡克定律，即

$$\sigma'_1=E\varepsilon'_1+2\mu\sigma'_3。\tag{5}$$

式中：ε'_1 为未损伤部分岩石材料轴向有效应变；σ'_3 为未损伤部分岩石材料环向有效应力；E 为未损伤部分岩石材料的弹性模量；μ 为未损伤部分岩石材料的泊松比。

2）假设岩石材料损伤仅出现在轴向，而不出现在环向，因此岩石的环向名义应力与未损伤部分岩石材料环向有效应力相等，即

$$\sigma_3=\sigma'_3。\tag{6}$$

3）岩石材料受损后，轴向应力逐渐跌落至残余强度，即受损材料承受的轴向应力等于残余强度：

$$\sigma''_1=\sigma_r。\tag{7}$$

4）根据变形协调原理可知，岩石损伤后损伤和未损伤部分充分混合，因而轴向名义应变 ε_1、未损伤部分轴向有效应变 ε'_1 与受损部分轴向应变 ε''_1 视为相等，即

$$\varepsilon_1=\varepsilon'_1=\varepsilon''_1。\tag{8}$$

基于以上假设，将式(5)代入式(4)，整理得岩石的损伤本构关系为

$$\sigma_1=(E\varepsilon_1+2\mu\sigma_3)(1-D)+\sigma_rD。\tag{9}$$

将式(3)代入式(9)，整理可得基于细观裂纹数量的砂岩损伤本构关系：

$$\sigma_1=\frac{(E\varepsilon+2\mu\sigma_3)\exp(A\varepsilon+B)+\sigma_r}{1+\exp(A\varepsilon+B)}。\tag{10}$$

3.3　本构关系验证

基于不同围压及不同预裂隙倾角下的砂岩试验数据，采用式(10)对裂隙砂岩的应力-应变曲线进行拟合，拟合参数见表 3，拟合结果如图 10 所示。

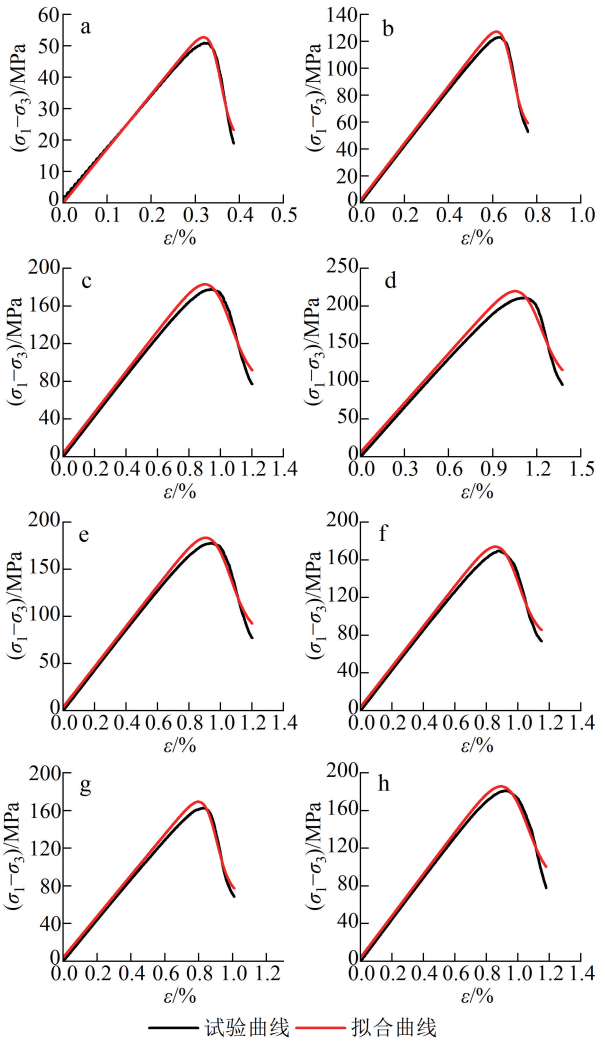
由表 3 和图 10 可知，不同围压和不同预裂隙倾角下裂隙砂岩的损伤本构拟合曲线与应力-应变曲线变化规律基本吻合，R^2 均在98%以上，表明本文

表 3　本构关系拟合参数表

Table 3　Table of parameters for fitting the constitutive relationship

围压/MPa	倾角/(°)	A	B	R^2/%
0	45	−7 252	25.76	99.48
10	45	−3 758	25.77	99.34
20	0	−1 487	15.48	98.88
20	30	−1 582	15.56	98.79
20	45	−1 402	14.59	98.69
20	60	−2 477	22.22	98.77
20	90	−1 356	13.99	98.91
30	45	−1 337	16.11	98.12

注：R^2.判定系数。



各组试样对应的围压及预裂隙倾角分别为：a. 0 MPa，45°；b. 10 MPa，45°；c. 20 MPa，45°；d. 30 MPa，45°；e. 20 MPa，0°；f. 20 MPa，30°；g. 20 MPa，60°；h. 20 MPa，90°。

图 10　试验数据与本构关系拟合曲线

Fig.10　Fitting curves of experimental data and constitutive relationship

所建立的损伤本构模型具有较好的合理性与可靠性,能够较好地描述裂隙砂岩的基本力学行为。

4 结论

1)裂隙砂岩抗压强度随围压增大显著增强,表现出明显的围压效应;随预裂隙倾角从0°增大至90°,抗压强度呈先减小后增大的趋势,其中60°倾角时抗压强度最小。

2)根据总裂纹数、张拉裂纹数及剪切裂纹数的演化曲线,将其划分为平滑段、线性增长段、上凹增长段和趋于平缓段,据此将裂隙砂岩的损伤破坏过程划分为弹性压缩、裂纹稳定扩展、裂纹加速扩展和峰后残余四个阶段,并确定了各阶段对应的特征应力点。

3)在渐进破坏过程中,0°和90°裂隙岩样的细观裂纹几乎遍布在整个试样中,而30°、45°及60°裂隙岩样的细观裂纹主要沿预裂隙与上下加载面的贯通面发育。各特征应力点处的总裂纹数随围压增大而增加,随预裂隙倾角增大呈先减小后增大的变化趋势;同时,围压越大,剪切裂纹所占比例越大。

4)基于细观裂纹数定义了损伤变量,损伤速率呈先增大、后近乎不变、再逐渐减小的趋势。基于损伤变量构建了裂隙砂岩的损伤本构模型,并通过与试验数据比较,验证了该模型的可靠性。

参考文献(References):

[1] 张凯,张东晓,赵勇强,等. 损伤岩石声发射演化特征及响应机制试验研究[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(3):96-106.
Zhang Kai, Zhang Dongxiao, Zhao Yongqiang, et al. Experimental Study on Acoustic Emission Evolution Characteristics and Response Mechanism of Damaged Rocks[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(3): 96-106.

[2] 王梓麟,时婧玥,杨英,等. 深层煤岩孔隙结构表征及压裂缝导流能力影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2025,55(4):1061-1076.
Wang Zilin, Shi Jingyue, Yang Ying, et al. Pore Structure Characterization and Influencing Factors of Fracture Conductivity in Deep Coal Rock[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(4): 1061-1076.

[3] 袁益龙,唐佳伟,李鹏,等. 热-力耦合作用下花岗岩粗糙裂隙渗透率演化规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):179-187.
Yuan Yilong, Tang Jiawei, Li Peng, et al. Permeability Evolution of Granite with Rough Fracture Under Thermal-Mechanical Coupling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 179-187.

[4] Li B X, Yu S, Zhu W S, et al. The Microscopic Mechanism of Crack Evolution in Brittle Material Containing 3-D Embedded Flaw[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(11): 5239-5255.

[5] Yan Z L, Dai F, Zhu J B, et al. Dynamic Cracking Behaviors and Energy Evolution of Multi-Flawed Rocks Under Static Pre-Compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(9): 5117-5139.

[6] Zhang J Z, Zhou X P, Du Y H. Cracking Behaviors and Acoustic Emission Characteristics in Brittle Failure of Flawed Sandstone: A True Triaxial Experiment Investigation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(1): 167-182.

[7] Huang Y H, Yang S Q, Tian W L. Crack Coalescence Behavior of Sandstone Specimen Containing Two Pre-Existing Flaws Under Different Confining Pressures [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 99: 118-130.

[8] 周辉,孟凡震,卢景景,等. 硬岩裂纹起裂强度和损伤强度取值方法探讨[J]. 岩土力学,2014,35(4):913-918,925.
Zhou Hui, Meng Fanzhen, Lu Jingjing, et al. Discussion on Methods for Calculating Crack Initiation Strength and Crack Damage Strength for Hard Rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 913-918, 925.

[9] 刘晓辉,郝齐钧,胡安奎,等. 准静态应变率下单轴煤岩特征应力确定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(10):2038-2046.
Liu Xiaohui, Hao Qijun, Hu Ankui, et al. Study on Determination of Uniaxial Characteristic Stress of Coal Rock Under Quasi-Static Strain Rate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2038-2046.

[10] Kim J S, Lee K S, Cho W J, et al. A Comparative Evaluation of Stress-Strain and Acoustic Emission Methods for Quantitative Damage Assessments of Brittle Rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(2): 495-508.

[11] 余洁,刘晓辉,郝齐钧,等. 不同围压下煤岩声发射基本特性及损伤演化[J]. 煤田地质与勘探,2020,48

(3)：128－136.
Yu Jie，Liu Xiaohui，Hao Qijun，et al. Acoustic Emission Characteristics and Damage Evolution of Coal-Rock Under Different Confining Pressures[J]. Coal Geology & Exploration，2020，48(3)：128－136.

[12] Ning J G，Wang J，Jiang J Q，et al. Estimation of Crack Initiation and Propagation Thresholds of Confined Brittle Coal Specimens Based on Energy Dissipation Theory[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2018，51(1)：119－134.

[13] Jin J，Cao P，Chen Y，et al. Influence of Single Flaw on the Failure Process and Energy Mechanics of Rock-Like Material[J]. Computers and Geotechnics，2017，86：150－162.

[14] 黄丹，李小青. 基于微裂纹发育特性的大理岩特征强度数值模拟研究[J]. 岩土力学，2017，38(1)：253－262.
Huang Dan，Li Xiaoqing. Numerical Simulation Research on Characteristic Strength of Marble Based on Development of Microcrack[J]. Rock and Soil Mechanics，2017，38(1)：253－262.

[15] 申海萌，李琦，李霞颖，等. 川南龙马溪组页岩不同应力条件下脆性破坏特征室内实验与数值模拟研究[J]. 岩土力学，2018，39(增刊 2)：254－262.
Shen Haimeng，Li Qi，Li Xiaying，et al. Laboratory Experiment and Numerical Simulation on Brittle Failure Characteristics of Longmaxi Formation Shale in Southern Sichuan Under Different Stress Conditions[J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(Sup.2)：254－262.

[16] 郑钰，施浩然，刘晓辉，等. 不同应变率下煤岩破坏特征及其本构模型[J]. 爆炸与冲击，2021，41(5)：053103.
Zheng Yu，Shi Haoran，Liu Xiaohui，et al. Failure Characteristics and Constitutive Model of Coal Rock at Different Strain Rates[J]. Explosion and Shock Waves，2021，41(5)：053103.

[17] 蒋浩鹏，姜谙男，杨秀荣. 基于 Weibull 分布的高温岩石统计损伤本构模型及其验证[J]. 岩土力学，2021，42(7)：1894－1902.
Jiang Haopeng，Jiang Annan，Yang Xiurong. Statistical Damage Constitutive Model of High Temperature Rock Based on Weibull Distribution and Its Verification[J]. Rock and Soil Mechanics，2021，42(7)：1894－1902.

[18] Chen Z，Song S，Zhang W，et al. Investigation of Thermal-Hydraulic-Mechanical Coupling Model for In-Situ Transformation of Oil Shale Considering Pore Structure and Anisotropy[J]. Engineering Geology，2025，344：107859.

[19] 朱振南，蒋国盛，田红，等. 基于 Normal 分布的岩石统计热损伤本构模型研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2019，50(6)：1411－1418.
Zhu Zhennan，Jiang Guosheng，Tian Hong，et al. Study on Statistical Thermal Damage Constitutive Model of Rock Based on Normal Distribution[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2019，50(6)：1411－1418.

[20] 魏超，赵程，赵春风，等. 考虑温度作用的岩石统计损伤本构模型及验证[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2024，55(3)：1056－1067.
Wei Chao，Zhao Cheng，Zhao Chunfeng，et al. Statistical Damage Constitutive Model for Rocks Considering Temperature Effects and Its Validation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2024，55(3)：1056－1067.

[21] 孟祥振，张慧梅，李玉根，等. 基于动态损伤速率的岩石损伤本构模型[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(10)：119－128.
Meng Xiangzhen，Zhang Huimei，Li Yugen，et al. A Dynamic Damage Rate-Based Constitutive Model for Rock Damage[J]. Coal Geology & Exploration，2024，52(10)：119－128.

[22] 彭成，李安然，刘顺，等. 酸性冻融循环条件下砂岩力学特性及损伤研究[J]. 金属矿山，2023，52(3)：94－99.
Peng Cheng，Li Anran，Liu Shun，et al. Study on Mechanical Properties and Damage of Sandstone Under Acidic Freeze-Thaw Cycle Conditions[J]. Metal Mine，2023，52(3)：94－99.

[23] 余洋林，许江波，费东阳，等. 花岗岩单轴压缩力学特性试验及数值模拟[J]. 桂林理工大学学报，2022，42(1)：85－92.
Yu Yanglin，Xu Jiangbo，Fei Dongyang，et al. Test and Numerical Simulation of Mechanical Properties of Granite Under Uniaxial Compression[J]. Journal of Guilin University of Technology，2022，42(1)：85－92.

[24] 向高，刘建锋，李天一，等. 基于声发射的盐岩变形破坏过程的分形与损伤特征研究[J]. 岩土力学，2018，39(8)：2905－2912.
Xiang Gao，Liu Jianfeng，Li Tianyi，et al. Study of Fractal and Damage Characteristic in the Deformation

and Failure Process of Salt Rock Based on Acoustic Emission[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2905-2912.

[25] 宋盛渊，黄迪，隋佳轩，等. 基于三维裂隙网络的岩体剪切特性尺寸效应分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2024，56(3)：9-18.
Song Shengyuan, Huang Di, Sui Jiaxuan, et al. Analysis of Size Effect for Shear Characteristics of Rock Mass Based on 3D Fracture Network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(3): 9-18.

[26] Potyondy D O, Cundall P A. A Bonded-Particle Model for Rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.

[27] 阿比尔的，郑颖人，冯夏庭，等. 平行黏结模型宏细观力学参数相关性研究[J]. 岩土力学，2018，39(4)：1289-1301.
Abi Erdi, Zheng Yingren, Feng Xiating, et al. Relationship Between Particle Micro and Macro Mechanical Parameters of Parallel-Bond Model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1289-1301.

[28] 王悠，刘晓辉，胡安奎，等. 深埋大理岩三轴压缩渐进破坏裂纹扩展特征[J]. 工程科学与技术，2024，56(3)：21-31.
Wang You, Liu Xiaohui, Hu Ankui, et al. Crack Propagation Characteristics of Deep Marble Under Triaxial Compression[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(3): 21-31.

[29] 陶焱. 含单节理砂岩力学特性试验及PFC^{3D}数值模拟[D].徐州：中国矿业大学，2020.
Tao Yan. Mechanical Properties Test and PFC^{3D} Numerical Simulation of Sandstone with Single Joint[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[30] 章德超，肖桃李，张大飞，等. 单裂隙分布对复合岩样力学性质和扩展破坏的影响[J]. 水电能源科学，2023，41(4)：176-180.
Zhang Dechao, Xiao Taoli, Zhang Dafei, et al. Effect of Single Fissure Distribution on Mechanical Properties and Propagation Failure of Composite Rock Samples[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(4): 176-180.

[31] 曾佳君，张志军，蒲成志. 张开度影响的裂隙类岩试件破断试验与数值模拟[J]. 地下空间与工程学报，2022，18(6)：1863-1872.
Zeng Jiajun, Zhang Zhijun, Pu Chengzhi. Fracture Experiment and Numerical Simulation of Fractured Rock-Like Samples Influenced by Opening[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(6): 1863-1872.

[32] 曹文贵，赵衡，李翔，等. 基于残余强度变形阶段特征的岩石变形全过程统计损伤模拟方法[J]. 土木工程学报，2012，45(6)：139-145.
Cao Wengui, Zhao Heng, Li Xiang, et al. A Statistical Damage Simulation Method for Rock Full Deformation Process with Consideration of the Deformation Characteristics of Residual Strength Phase[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 139-145.