含相交裂隙砂岩剪切力学特性及断裂机理研究①

马二辉[1,2], 于振[1,2], 叶洪涛[1,2], 张荣洲[3], 庄贤鹏[3]
(1.中冶沈勘秦皇岛工程设计研究总院有限公司, 河北 秦皇岛 066000; 2.河北省绿色智能矿山工程设计技术创新中心, 河北 秦皇岛 066000; 3.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 通过室内剪切试验与数值模拟相结合的方法,从强度参数、起裂位置、贯通模式和应力场演化角度系统研究了含 V 形预制裂隙红砂岩的剪切力学行为。结果表明,当裂隙张开角 $\alpha=110°$、方位角 $\beta=0°$时,试样的内摩擦角和黏聚力劣化最显著。所有裂隙试样的最终贯通面均平行于剪切方向,但其初始起裂位置却显著受控于方位角 β。应力场分布呈现显著的分区特征,即低压域呈倾斜 S 状,而高压与剪应力域则集中于裂隙尖端与端部边界。由细观层面可知,主应力驱动了翼形裂隙的发育,而压剪耦合作用则是诱发二次裂隙的根本原因。

关键词: 岩石力学; 砂岩; 裂隙; 相交裂隙; 剪切力学; 破坏模式; 应力场; 断裂机理
中图分类号: TD313 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.010
文章编号: 0253-6099(2026)04-0074-007

Shear Mechanical Properties and Fracture Mechanism of Sandstone Containing Intersecting Fractures

MA Erhui[1,2], YU Zhen[1,2], YE Hongtao[1,2], ZHANG Rongzhou[3], ZHUANG Xianpeng[3]
(1.*Shen Kan Qinhuangdao General Engineering Design & Research Institute Corporation, MCC, Qinhuangdao* 066000, *Hebei, China*; 2.*Hebei Green Smart Mine Design Technology Innovation Center, Qinhuangdao* 066000, *Hebei, China*; 3.*School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang* 110819, *Liaoning, China*)

Abstract: The shear mechanical behavior of red sandstone specimens with prefabricated V-shaped fractures was systematically investigated via laboratory shear tests and numerical simulations, from the perspectives of strength parameters, crack-initiation locations, coalescence modes and stress-field evolution. The results show that the deterioration of internal friction angle and cohesion of specimens is the most significant when the crack opening angle $\alpha = 110°$ and azimuth angle $\beta = 0°$. The finally formed fracture surfaces with coalescence in specimens are parallel to the shear direction, whereas the crack-initiation locations are strongly controlled by the azimuth angle β. The stress-field distribution shows clear zoning behavior: the low-stress zone presents an inclined S shape, while high-stress and shear-stress zones concentrate at fracture tips and end boundaries. From the mesoscopic perspective, principal stresses dominate the development of wing fractures, and the coupled compression-shear effect is the fundamental cause for the generation of secondary fractures.

Key words: rock mechanics; sandstone; fracture; intersecting fracture; shear mechanics; failure mode; stress field; fracture mechanism

大量研究表明,岩体结构面的存在会显著降低岩体强度,使岩体稳定性和承载能力明显低于完整岩体[1-3]。因此,深入研究含结构面岩体的剪切力学行为及其破坏机制,对优化岩土工程设计、提高工程安全性具有重要的理论和实践意义。

传统直剪试验系统探讨了节理面粗糙度[4]、初始开度[5]、法向应力[6]和剪切速率[7]等参数对岩体剪切行为的影响机制。然而,结构面以节理、裂隙、层面和断层的形式广泛存在于各种岩石工程中[8],通常大多数是非连续或间歇的[9]。由于岩桥与节理之间的相

① **收稿日期**: 2026-02-26
基金项目: 辽宁省中韩智能地下工程建设与灾害韧性防控国际联合实验室重点研发计划(2024JH2/10210006)
作者简介: 马二辉(1987—),男,安徽宿州人,高级工程师,主要从事矿山灾害预防工作。E-mail:892587490@qq.com
通信作者: 张荣洲(2001—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事边坡稳定性研究。E-mail:2337128068@qq.com

互作用,与连续性节理相比,含断续节理的岩石力学行为更加复杂[10]。因此,学者们系统开展了含有不同数量平行或非平行裂隙[11-14]岩体的剪切试验,重点关注了裂隙数量、裂隙长度、裂隙倾角、裂隙间距和岩桥角度对岩体试样抗剪强度、变形和破坏模式的影响规律。上述研究中岩体多是平行裂隙或非平行但不相交的裂隙,而在实际的工程岩体中,岩体内部已有裂隙,在外荷载的作用下,易形成应力集中,在裂隙尖端处形成新的裂隙,新裂隙与原裂隙形成尖端相交的裂隙[15]。虽然已有学者针对 X 形和 V 形等相交裂隙岩体进行了一系列的轴压试验[16-17],分析了其压缩力学特性及破裂演化规律,但是在实际岩石工程中,目标岩体往往处于压剪复合状态,该条件下含相交裂隙岩体的剪切损伤力学特性和破坏模式鲜有报道。

针对含尖端相交裂隙砂岩在剪切条件下的破坏特性与断裂机理研究尚不充分的现状,本文从宏观尺度出发,系统分析了含 V 形相交裂隙岩体在剪切作用下的起裂位置及贯通模式。在此基础上,借助 PFC^{2D} 离散元软件,采用测量圆方法追踪了剪切过程中最大主应力场与最大剪应力场的时空演化规律,进而从细观尺度揭示了该类裂隙岩体的内在破坏机制。

1　试验方案

1.1　试样制备

试验所用红砂岩试样取自山东省济宁市。所有试样均采自同一结构均匀、无可见裂隙与风化面的完整岩块,以保证其均质性与代表性。岩样呈红褐色,主要矿物组分为石英和长石,化学成分以 SiO_2、CaO、Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主。经测定,该岩石的天然平均密度为 2 690 kg/m^3,单轴抗压强度为 35 MPa。

首先,采用大型岩石切割机和岩石打磨机将取样岩石加工成 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体试样。然后,筛选完整试样。在此基础上,采用高压水刀切割技术制备两条尖端相交的贯通裂隙。2 条预制裂隙长度均为 12 mm,宽度均为 2 mm。定义 2 条预制裂隙的夹角为张开角 α,α 的角平分线与水平方向的夹角为方位角 β。试验共设 7 组试样,其中 6 组为裂隙试样,裂隙张开角 α 分别为 56°(传统的径向剪应力准则[18])和 110°(传统的最大周向应力准则[19]),每个 α 取值下的方位角 β 分别为 0°、45°和 90°;另设置一组完整岩样作为对照组,每组包含 4 个相同试样,分别在 4 种不同工况条件下进行直剪试验。试样分组与加载工况如表 1 所示。试样尺寸及 V 形裂隙几何参数如图 1 所示,部分实际裂隙试样如图 2 所示。

表 1　试样分组与加载工况

Table 1　Specimen groups and experimental conditions

组别	α/(°)	β/(°)	法向应力/MPa			
			工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
A	—	—	1.6	3.2	4.8	6.4
B	56	0	1.2	2.4	2.8	4.0
C	56	45	1.3	1.6	1.8	2.8
D	56	90	1.4	1.7	2.6	3.2
E	110	0	1.3	1.6	1.8	2.1
F	110	45	0.3	0.6	0.8	1.4
G	110	90	0.8	1.6	2.2	3.0

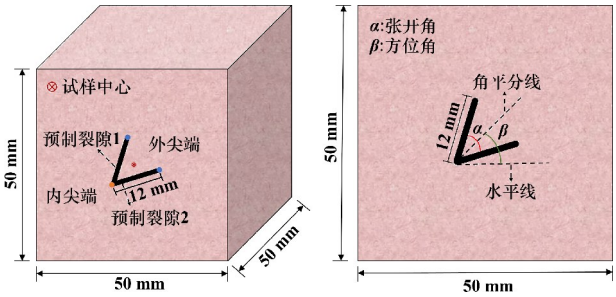
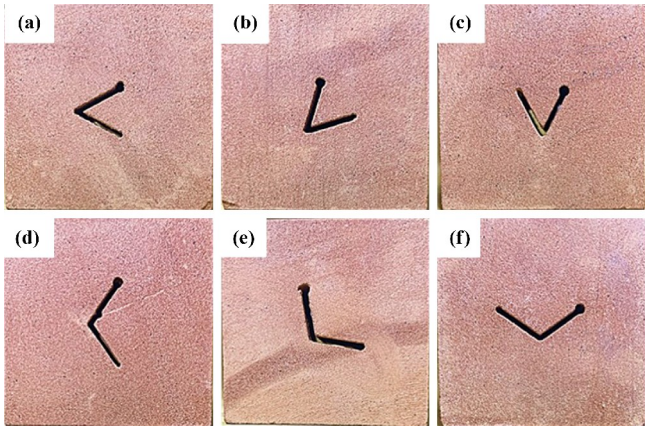


图 1　试样尺寸及 V 形裂隙几何参数

Fig. 1　Specimen dimensions and geometry parameters of V-shaped fractures



(a) B 组;(b) C 组;(c) D 组;(d) E 组;(e) F 组;(f) G 组

图 2　部分实际裂隙试样

Fig. 2　Selected test fracture specimens

1.2　试验设备及加载方式

采用 JAL-1000 型微机控制剪切流变试验机进行直剪试验,该设备由多通道智能数据采集系统、液压伺服加载装置和专用剪切盒组成。其中,液压伺服加载装置采用活塞式伺服油缸、负荷式测力传感器和球面调心压板组件的集成设计,可实现活塞式油缸的单向或双向加载,其技术参数为:最大垂直试验力 500 kN(变形量程 30 mm),最大水平试验力 1 000 kN(变形量程 50 mm)。为降低试验过程中的摩擦效应,在剪切盒的上、下部均设置了滚排式减摩垫;同时,通过优化设

计的传力钢板和刚性垫板系统,确保试样表面法向应力的均匀分布。

试验采用分级加载控制模式,具体分为两个阶段。第一阶段为法向应力加载,以 0.5 MPa/min 的速率施加至预定应力值;第二阶段转为切向位移控制,以 0.2 mm/min的恒定速率施加剪切荷载。下剪切盒在恒定水平速度下从左向右移动,将剪切荷载传递到试件下部,而上剪切盒保持固定。试验过程中,通过多通道智能数据采集系统实时监测,并记录剪应力和切向位移的变化数据。试验终止条件设定为残余应力达到稳定状态。试验装置的整体构造及加载示意图如图 3 所示。

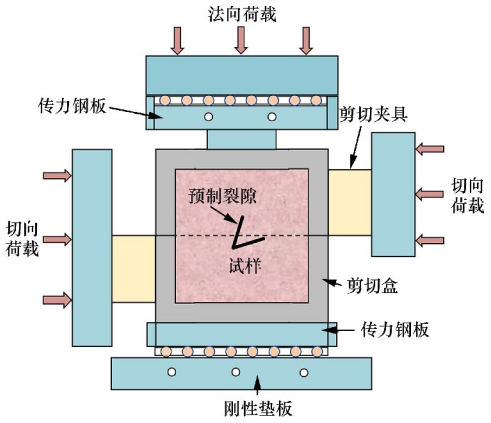


图 3 试验装置的整体构造及加载示意图

Fig. 3 Schematic of overall structure and loading of test apparatus

2 试验结果与分析

2.1 内摩擦角与黏聚力

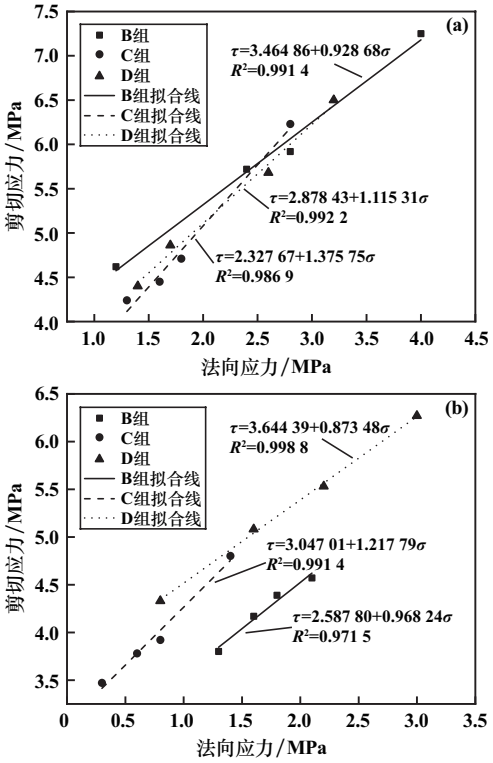
为系统揭示相交裂隙几何参数对岩石强度特性的影响规律,本文基于不同法向应力下的峰值剪切强度,通过线性拟合获得了各组试样的黏聚力(c)与内摩擦角(φ)值,拟合结果如图 4 所示。分析结果表明,预制裂隙的存在导致岩石强度参数出现不同程度劣化。

为量化不同裂隙几何条件下试样力学参数的劣化程度,对比了裂隙试样与完整试样的 c、φ 值,结果如图 5 所示,其中 max、min、avg 分别表示最大值、最小值和平均值。并依据式(1)计算了相应的劣化指数 η_c 和 η_φ,再根据式(2)计算整体劣化指数 η。

$$\begin{cases}\eta_c = \dfrac{c_{完整} - c_{裂隙}}{c_{完整}} \\ \eta_\varphi = \dfrac{\varphi_{完整} - \varphi_{裂隙}}{\varphi_{完整}}\end{cases} \tag{1}$$

$$\eta = \frac{1}{2}\eta_c + \frac{1}{2}\eta_\varphi \tag{2}$$

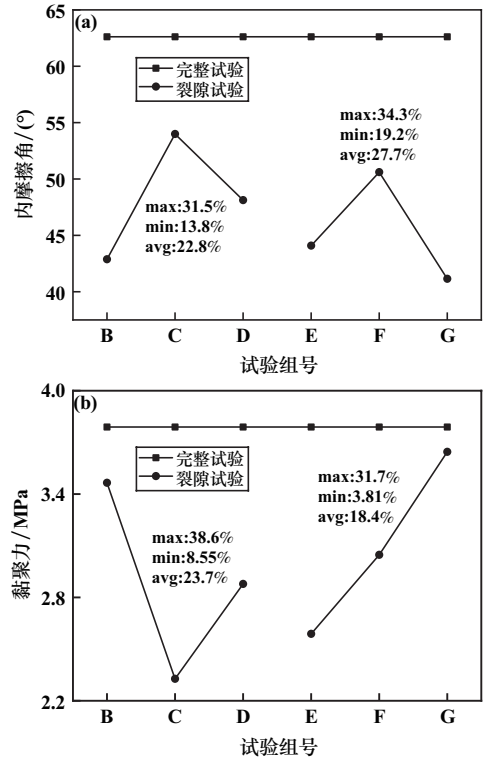
式中:$c_{完整}$、$\varphi_{完整}$ 分别为完整试样的黏聚力、内摩擦角;$c_{裂隙}$、$\varphi_{裂隙}$ 分别为裂隙试样的黏聚力、内摩擦角。



(a) α=56°试样;(b) α=110°试样

图 4 法向应力与峰值剪切应力关系曲线

Fig. 4 Curves of normal stress versus peak shear stress



(a) 内摩擦角 φ;(b) 黏聚力 c

图 5 试样 c、φ 值演化

Fig. 5 Evolution of c and φ values for specimens

由图 5(a)可见,α 为 56°或 110°时,试样 φ 值均随着 β 值增大呈先增后减的趋势;α = 110°、β = 90°(G 组)时,η_φ 值达到最大值 34.3%。图 5(b)显示,α=56°时,c 值随 β 值增大呈先降后升趋势;α = 110°时,c 值随 β 值增大呈单调递增趋势;其中 α=56°、β=45°(C 组)时 η_c 值最大,为 38.6%。

整体劣化指数计算结果见表 2。结果表明,当 α=110°、β=0°(E 组)时,裂隙对岩石剪切力学参数的总体劣化效应最显著。该结论提示,在工程实践中遇类似裂隙组合时应予以重点关注,并采取必要的加固防护措施。

表 2　整体劣化指数计算结果

Table 2　Calculation results of overall deterioration index

组别	η/%
B	20.03
C	26.17
D	23.59
E	30.65
F	19.37
G	19.05

2.2　宏观裂隙起裂位置和贯通模式

岩石作为典型的非均质性材料,在外部荷载作用下易产生局部应力集中现象。当集中应力超过材料局部强度阈值时,将会触发裂隙萌生与扩展[17]。预制裂隙的存在显著弱化了试样的整体强度,其几何参数通过调控应力传递路径,主导剪切过程中裂隙网络的扩展行为与贯通模式。因此,揭示不同裂隙几何参数对岩石断裂机理的影响规律具有重要理论价值。

图 6 展示了直剪试验后裂隙试样的最终破坏形态,宏观贯通裂隙特征参数如表 3 所示,图 7 为试样宏观裂隙起裂位置。图 6 中外尖端起裂裂隙用虚线圈出,内尖端起裂裂隙用实线圈出,表面脱落用点划线圈出。总体而言,所有试样均呈现 2 条近似平行于剪切面的宏观贯通裂隙,这与含平行或非平行但不相交预制裂隙岩石的经典破坏模式相符[7]。值得注意的是,不同几何参数组别试样呈现显著的起裂位置差异:B、C、E 和 F 组试样表现出一类破坏特征,均由 2 条预制裂隙外尖端起裂向试样两端中部贯通破坏,而 D 和 G 组试样则呈现另一类特征(见图 7)。然而,在不同法向应力条件下,同组试样的宏观裂隙贯通位置表现出良好的一致性。

这一现象表明裂隙几何参数(β)是控制起裂位置的主导因素。β=90°时,不同法向应力条件下各试样

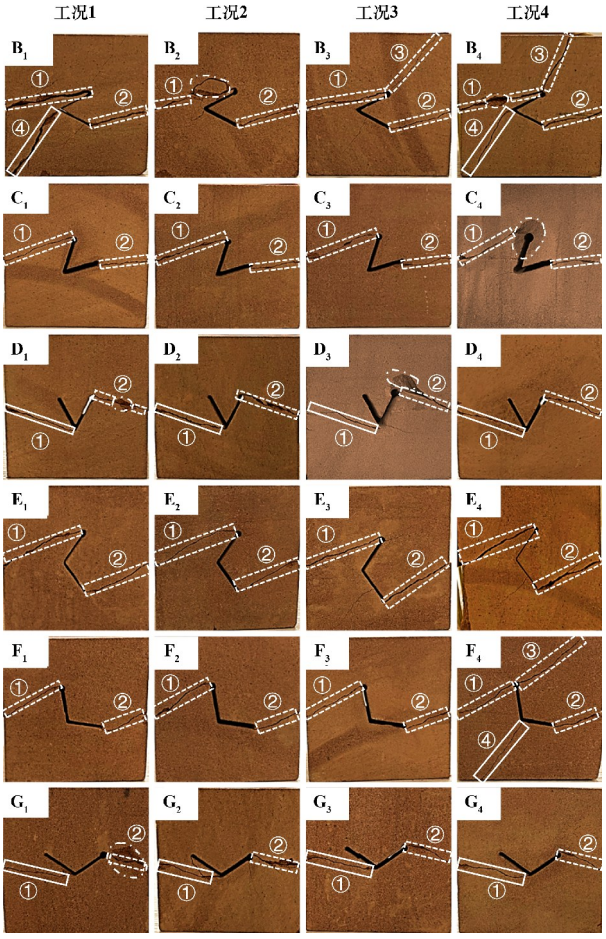


图 6　试样最终破坏形态

Fig. 6　Final failure modes of specimens

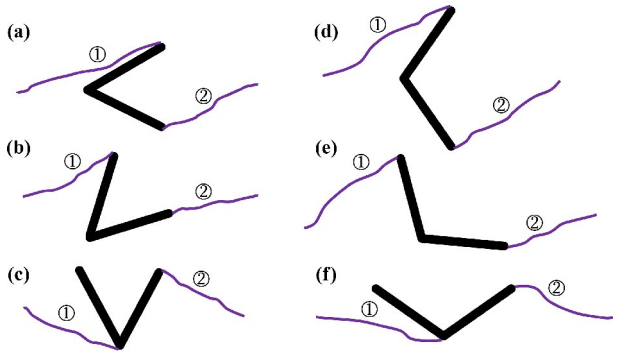
表 3　宏观贯通裂隙特征参数

Table 3　Characteristic parameters of macroscopic coalesced fractures

组别	倾角/(°)		贯通长度/mm		起裂位移/mm
	裂隙①	裂隙②	裂隙①	裂隙②	裂隙①或裂隙②
B	14.3	15.3	3.12	2.23	1.47
C	32.6	0.80	2.83	1.98	1.32
D	−36.6	−35.4	2.98	2.26	1.75
E	39.5	41.8	3.53	3.02	1.14
F	42.3	38.6	2.64	2.03	1.40
G	−17.4	−18.7	2.61	1.95	1.63

宏观裂隙贯通模式展现出高度的一致性:宏观裂隙①从预制裂隙内尖端起裂并向试样左端中部扩展,同时宏观裂隙②起源于预制裂隙 2 的外尖端并向右端中部扩展,这 2 条扩展裂隙与预制裂隙 2 共同形成具有镜像对称特征的倾斜拉伸 Z 形破坏模式。然而,β 为 0°和 45°时,预制裂隙倾角的变化引起应力状态显著改变,导致外尖端应力集中效应明显强于内尖端。在此条件下,试样破坏模式发生转变:宏观裂隙①改由预制裂隙 1 外尖端起裂并向左端中部扩展,宏观裂隙②同

样起源于预制裂隙 2 外尖端并向右端中部扩展,最终与预制裂隙外尖端连线构成新的 Z 形破坏模式。值得注意的是,个别试样表现出异常的贯通特征,出现了多条宏观裂隙。例如,试样 B_3 预制裂隙 1 外尖端产生了 1 条向岩石右上角扩展的裂隙③,而试样 B_1 内尖端则出现了一条向岩石左下角扩展的裂隙④。更为特殊的是,试样 B_4 和 F_4 同时出现了上述两种异常扩展模式。这种异常现象可能与岩石内部非均质性、预制缺陷尖端曲率差异以及加载条件波动等因素密切相关,这些因素导致预制裂隙部位的应力重新分布,从而改变了裂隙的起裂位置和扩展路径。特别地,在剪切过程中,部分试样在宏观裂隙扩展阶段出现了岩石脱落现象。从能量学的角度分析,这一现象可解释为:裂隙局部区域应力集中达到岩石强度极限时,试样累积的弹性能密度超越耗散能密度,多余能量通过新生表面形成和碎屑运动等机制实现耗散。



(a) B 组; (b) C 组; (c) D 组; (d) E 组; (e) F 组; (f) G 组

图 7 试样宏观裂隙起裂位置

Fig. 7 Macro crack-initiation locations in specimens

3 微观断裂机理研究

3.1 数值模型建立与参数校正

首先,利用 CAD 软件调节相交裂隙岩石的几何参数,构建与室内试验岩石试样几何尺寸一致的二维离散元数值模型(50 mm × 50 mm)。按照以下步骤对 PFC^{2D}微观参数进行校准:① 确保模型的弹性模量与试验结果一致;② 使模型与试验的泊松比和宏观破坏模式相匹配;③ 保证模型与试验的峰值强度包络线相吻合。在确保边界条件、加载方式及停止条件与物理试验一致的基础上,采用试错法重复步骤①至③,逐步调整颗粒流模型的微观力学参数,最终数值模型微观参数校正结果如表 4 所示。

为验证模型微观参数选取的合理性,将室内试验与数值模拟所得的岩石破裂模式及剪切应力-应变曲线进行对比,结果如图 8 所示。在外部荷载作用下,两者曲线峰值及斜率较为接近。需指出的是,数值模拟从加载初期即表现为弹性变形,而未出现室内试验中观察到的孔裂隙压密阶段。这主要是因为数值模拟的试样在初始静水压力作用下孔隙与颗粒骨架分布均匀,且在施加切向荷载前颗粒系统已处于应力平衡状态。另外,数值模拟中峰后脆性跌落更显著,主要归因于数值模型缺陷分布均匀,主裂隙贯通后岩体整体稳定性迅速丧失,而天然岩石的非均质性使破坏呈渐进、缓和过程。二者共同导致模拟峰后曲线陡降,室内试验则相对平缓。从力学参数与破坏模式的对比来看,室内试验测得的岩石实际抗剪强度为 4.62 MPa,数值模拟结果为 4.68 MPa;试验弹性模量为 11.86 GPa,模拟值为 11.69 GPa,两者差异均小于 2.0%。该结果表明所选微观力学参数具有合理性与可靠性。

表 4 数值模型微观参数校正结果

Table 4 Calibration results of mesoscopic parameters for numerical model

参数	单位	量值
密度 ρ	kg · m^{-3}	2 690
平行黏结摩擦因数 μ	—	1.17
平行黏结模量 E_p	GPa	5.05
接触模量 E_c	GPa	3.79
法向与切向刚度比 k_n/k_s	—	2.29
平行黏结半径因子	—	1.1
最小粒径 R_{min}	mm	0.2
最大粒径 R_{max}	mm	0.3
拉伸强度 σ_c	MPa	24.73
内聚力 c	MPa	24.73
内摩擦角 φ	(°)	45
颗粒间摩擦因数 μ	—	0.7

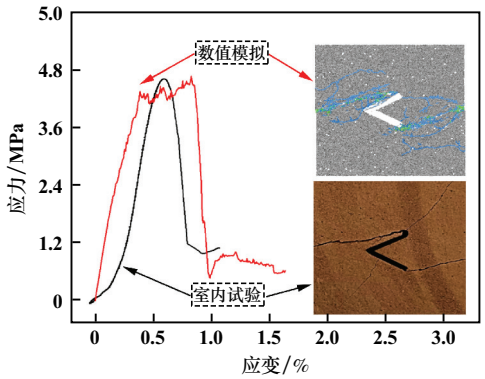


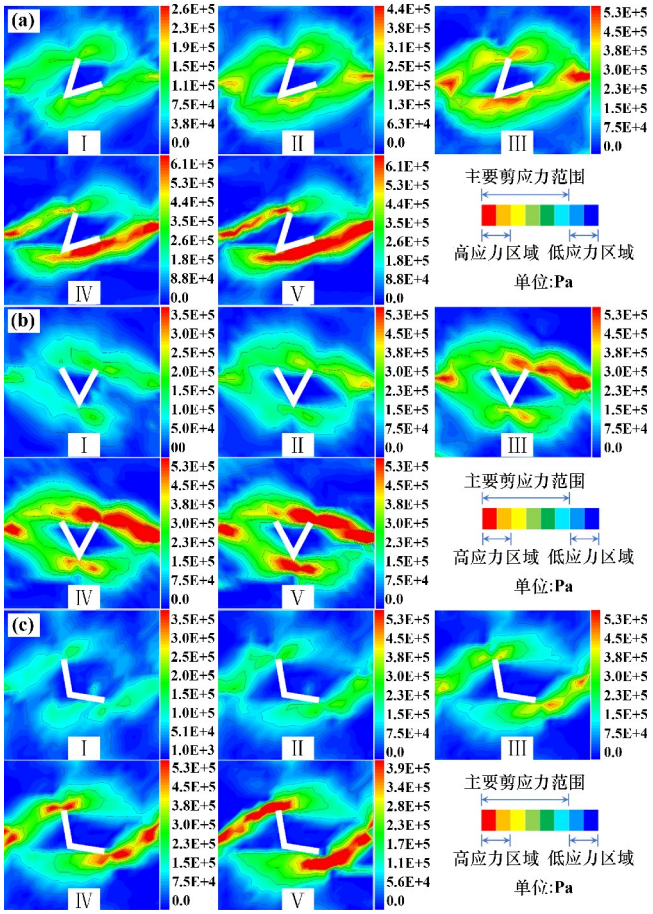
图 8 室内试验与数值模拟的比较

Fig. 8 Comparison between laboratory tests and numerical simulations

3.2 应力场演化

从微观力学角度揭示裂隙岩石的断裂机理,需获取试样剪切过程中应力场分布及其变化规律。以 C、D

和 F 组试样为例,基于满布测量圆方法获取应力场数据,每个测量圆的直径均为 2.5 mm,绘制了各试样 5 个阶段的最大剪应力云图,如图 9 所示。在初始加载阶段,两组平行主剪应力场分布于预制裂隙尖端与试样侧端中部之间。随着荷载增加,主剪应力场逐渐从双倾斜带状演化为环绕预制裂隙的环状分布,高应力区集中于预制裂隙尖端及试样两端中部。同时,主剪应力场分布与图 6 中宏观裂隙空间位置的一致性进一步验证了数值模型的可靠性。



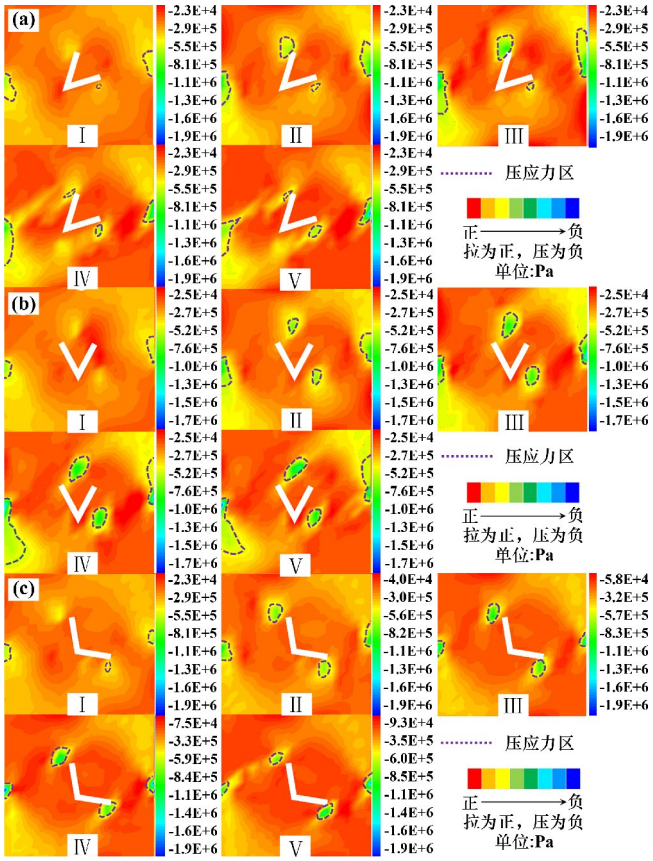
(a) 试样 C_1;(b) 试样 D_1;(c) 试样 F_1

图 9　试样最大剪应力演化过程

Fig. 9　Evolution of maximum shear stress in specimens

基于相同方法绘制了最大主应力云图,如图 10 所示。规定拉应力为正,压应力为负,并用虚线圈出压应力集中区域。

在初始加载阶段(Ⅰ点),应力场分布呈现出显著的非对称特征:预制裂隙 2 的外尖端率先形成较高的压应力集中区,而预制裂隙 1 的外尖端因直接承受剪切荷载,其应力集中程度相对较低。值得注意的是,试样两端的中部区域同样出现了压应力集中。随着荷载继续增加(Ⅱ点和Ⅲ点),预制裂隙两侧的主应力不断累积,翼形裂隙沿最大主应力方向持续向试样两端中部的压应力集中区扩展,说明翼形裂隙的扩展主要受主应力控制。进入峰后阶段(Ⅳ点),试样承载能力逐渐丧失,剪应力场急剧增大,并与主应力共同作用,诱发大量二次裂隙。总体而言,翼形裂隙的起裂与扩展受主应力主导,而二次裂隙的起裂机制则属于压剪混合型。最终,各试样的低应力场呈 S 形分布于预制裂隙周围,高应力场与剪应力场的空间分布一致,均集中在预制裂隙尖端及试样两端中部区域。值得注意的是,D 组试样的高应力场向右发生空间偏移,导致两侧破坏模式不对称。这一差异揭示了裂隙倾角 β 对局部应力场分布及破坏路径的调控机制,为裂隙岩体多尺度力学建模提供了关键约束参数。



(a) 试样 C_1;(b) 试样 D_1;(c) 试样 F_1

图 10　试样最大主应力演化过程

Fig. 10　Evolution of maximum principal stress in specimens

4　结论

1) 含 V 形预制裂隙对红砂岩的强度参数具有显著劣化效应,其中内摩擦角和黏聚力均随裂隙几何形态变化而发生不同程度降低。当张开角 $\alpha = 110°$、方位角 $\beta = 0°$时,红砂岩力学参数的综合劣化程度最显著。

2) 宏观裂隙的起裂位置主要取决于方位角 β,而

张开角 α 及法向应力水平对其无明显影响。贯通裂隙总体沿剪切方向发育,个别试样中出现非典型贯通路径及局部岩块脱落现象。

3) 应力场演化分析结果表明,翼形裂隙的起裂与扩展受主应力主导,而二次裂隙的起裂机制则属于压剪混合型。此外,裂隙倾角 β 对局部应力场分布及试样最终破坏路径具有显著的调控作用。

参考文献(References):

[1] 刘红岩,黄妤诗,李楷兵,等. 预制节理岩体试件强度及破坏模式的试验研究[J]. 岩土力学, 2013,34(5):1235-1241.
Liu Hongyan, Huang Yushi, Li Kaibing, et al. Test study of strength and failure mode of pre-existing jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(5):1235-1241.

[2] Wang W C, Sun S R, Le H L, et al. Experimental and numerical study on failure modes and shear strength parameters of rock-like specimens containing two infilled flaws[J]. International Journal of Civil Engineering, 2019,17(12):1895-1908.

[3] Liu R C, Huang N, Jiang Y J, et al. A numerical study of shear-induced evolutions of geometric and hydraulic properties of self-affine rough-walled rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020,127:104211.

[4] Asadizadeh M, Moosavi M, Hossaini M F, et al. Shear strength and cracking process of non-persistent jointed rocks: an extensive experimental investigation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018,51(2):415-428.

[5] Li Y, Oh J, Mitra R, et al. Experimental studies on the mechanical behaviour of rock joints with various openings[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(3):837-853.

[6] 刘新荣,刘馨琳,许彬,等. 含Z形相交裂隙岩体剪切力学行为研究[J]. 工程地质学报, 2023,31(6):1872-1880.
Liu Xinrong, Liu Xinlin, Xu Bin, et al. Shear mechanical behavior of rock mass containing Z-type intersecting fractures with laboratory test[J]. Journal of Engineering Geology, 2023,31(6):1872-1880.

[7] 陈欣,周小涵,许彬,等. 裂隙岩体宏细观剪切损伤力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022,41(12):2509-2521.
Chen Xin, Zhou Xiaohan, Xu Bin, et al. Investigation on the macro-meso shear damage mechanical behaviors of fractured rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022,41(12):2509-2521.

[8] Huang D, Cen D F, Ma G W, et al. Step-path failure of rock slopes with intermittent joints[J]. Landslides, 2015,12(5):911-926.

[9] Zhang Y C, Jiang Y J, Asahina D, et al. Shear behavior and acoustic emission characteristics of en-echelon joints under constant normal stiffness conditions[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020,109:102772.

[10] Zhang X P, Liu Q S, Wu S C, et al. Crack coalescence between two non-parallel flaws in rock-like material under uniaxial compression[J]. Engineering Geology, 2015,199:74-90.

[11] Huang D, Guo Y Q, Cen D F, et al. Experimental investigation on shear mechanical behavior of sandstone containing a pre-existing flaw under unloading normal stress with constant shear stress[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53(8):3779-3792.

[12] Zhang H Q, Zhao Z Y, Tang C A, et al. Numerical study of shear behavior of intermittent rock joints with different geometrical parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006,43(5):802-816.

[13] Zhang K, Chen Y L, Fan W C, et al. Influence of intermittent artificial crack density on shear fracturing and fractal behavior of rock bridges: experimental and numerical studies[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53(2):553-568.

[14] Gehle C, Kutter H K. Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003,40(5):687-700.

[15] 郝瑞卿,曹平,王华,等. 干燥与饱水状态下含尖端相交裂隙砂岩的力学特性及破裂演化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024,43(7):1696-1706.
Hao Ruiqing, Cao Ping, Wang Hua, et al. Mechanical properties and fracture behaviors of sandstone in dry and saturated states with tip intersecting cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(7):1696-1706.

[16] 刘海明,倪晨阳,王希辉,等. 单轴压缩条件下交叉双节理岩石裂纹扩展特征颗粒流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024,43(增刊2):3710-3721.
Liu Haiming, Ni Chenyang, Wang Xihui, et al. Particle flow analysis of crack propagation characteristics of cross jointed rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(S2):3710-3721.

[17] 刘新荣,尹志明,王艳磊. 含V形相交裂隙岩体的力学特性及破坏模式试验[J]. 煤炭学报, 2020,45(2):651-659.
Liu Xinrong, Yin Zhiming, Wang Yanlei. Mechanical properties and failure mode of rock mass containing V-type intersecting fissures[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(2):651-659.

[18] 吴祖松,刘琦,李金燕. 径向剪应力准则下的围岩安全厚度与风险评估[J]. 地下空间与工程学报, 2018,14(增刊1):480-485.
Wu Zusong, Liu Qi, Li Jinyan. Safety thickness and risk assessment of surrounding rock based on radial shear stress rule in the rich water area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018,14(S1):480-485.

[19] Erdogan F, Sih G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J]. Journal of Basic Engineering, 1963,85(4):519-525.

引用本文:马二辉,于振,叶洪涛,等. 含相交裂隙砂岩剪切力学特性及断裂机理研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):74-80.

Ma Erhui, Yu Zhen, Ye Hongtao, et al. Shear mechanical properties and fracture mechanism of sandstone containing intersecting fractures[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):74-80.