三维非贯通节理岩体剪切力学特性与损伤本构模型①

赵华[1,2], 钱兆明[1,2], 郑斌[1,2], 张来鑫[1,2], 曹日红[3], 姚汝冰[3], 史秀志[3], 邱贤阳[3]
(1.中国有色矿业集团有限公司, 北京 100029; 2.刚波夫矿业股份有限公司, 刚果金 上加丹加 利卡西 999059; 3.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 利用3D打印技术实现了包含随机岩桥的三维非贯通节理制作,针对5种不同贯通度和3种不同法向应力作用下的试样开展了三维非贯通节理直剪试验,基于测试结果分析了三维非贯通节理抗剪强度参数随节理贯通度的变化规律。结果表明,节理峰值抗剪强度随节理贯通度的增加呈现明显的减小趋势,黏聚力和内摩擦角与节理贯通度增长之间的关系存在明显差异,黏聚力呈现非线性快速下降趋势,而内摩擦角相对稳定。此外,基于室内直剪试验结果,引入流变元件表征试样的剪切力学行为,构建非贯通节理岩体剪切损伤演化本构模型,且模型计算结果与试验测试结果吻合良好。

关键词: 剪切力学; 非贯通节理; 直剪; 抗剪强度; 贯通度; 损伤模型; 岩桥; 3D打印
中图分类号: TD313 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.001
文章编号: 0253-6099(2026)02-0001-07

Shear Mechanical Properties and Damage Constitutive Model of Three-dimensional Non-persistent Jointed Rock Mass

ZHAO Hua[1,2], QIAN Zhaoming[1,2], ZHENG Bin[1,2], ZHANG Laixin[1,2], CAO Rihong[3], YAO Rubing[3], SHI Xiuzhi[3], QIU Xianyang[3]
(1.*China Nonferrous Mining Corporation Limited*, *Beijing* 100029, *China*; 2.*Kambove Mining SAS*, *Likasi* 999059, *Haut-Katanga*, *DRC*; 3.*School of Resources and Safety Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: Three-dimensional non-persistent joints containing random rock bridges were fabricated by adopting 3D printing technology. Direct shear tests were conducted on specimens with joint persistence of five different percentages under three levels of normal stress. On the basis of test data, the laws of variation of shear strength parameters of three-dimensional non-persistent joints with joint persistence were systematically analyzed. The results show that the peak shear strength of joints decreases obviously with the increase of joint persistence. There is a significant difference in the variation of cohesion and internal friction angle with the increase of joint persistence. Cohesion decreases rapidly in a nonlinear manner, while the internal friction angle remains relatively stable. Furthermore, based on the laboratory direct shear test results, rheological elements were introduced to characterize the shear mechanical behavior of specimens, and a shear damage evolution constitutive model was established for non-persistent jointed rock mass. It is found that the calculated results of the model are in good agreement with the experimental data.

Key words: shear mechanics; non-persistent joint; direct shear; shear strength; joint persistence; damage model; rock bridge; 3D printing

岩体力学响应具有突出的空间变异性与方向依赖性[1-2]。岩体力学特性本质是岩块材料属性与不连续结构面系统协同作用的表现形式[3-4]。早期节理面研究主要集中在直线型[3]、锯齿型[4-5]、天然粗糙型[6]等贯通性节理,基于试验或数值模拟,获得了相应的破坏准则[7]、剪切破坏机制与类型[8-9]。随着对节理认知的深入,人们逐渐认识到自然界中的岩体节理多为非贯通型[10]。因而学者们开展了众多非贯通节理剪切力学特性的研究工作,分析了不同贯通度节理面的峰值剪切力演变规律、破坏模式及强度准则[11-14]。

① **收稿日期**: 2025-10-28
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52474118)
作者简介: 赵华(1985—),男,黑龙江黑河人,硕士,高级工程师,主要从事矿山巷道支护和矿压控制研究。E-mail:zhaohua3@163.com

然而对于节理抗剪特性的研究,前人大多数局限于二维情况,鲜有学者针对三维非贯通节理岩体的剪切力学特性与破坏机制开展研究。在各类岩体工程中,均需处理受三维非连续、非贯通节理面切割的碎裂岩体结构。基于此,本文采用 3D 打印技术制作三维非贯通节理试样并开展直剪试验,分析抗剪强度参数随节理贯通度的变化趋势,结合损伤力学并引入流变元件表征试件的剪切力学行为,构建非贯通节理岩体剪切损伤演化本构模型。

1 试验测试

1.1 试样制作

试样采用水泥浇筑而成,试件长宽高为 100 mm×100 mm×100 mm,水泥∶河砂∶水体积比为2∶2∶1。浇筑前需要在节理所在位置放置镂空节理片,镂空节理片采用 3D 打印制成,横截面尺寸与试样截面尺寸一致,为 100 mm×100 mm,厚度 1 mm,非贯通节理面制作流程如图 1 所示。

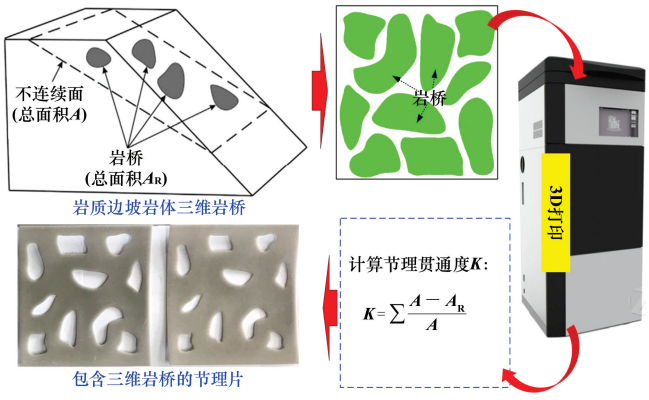


图 1 非贯通节理面制作流程

Fig. 1 Production process of non-persistent joint plane

考虑不同节理贯通度,镂空节理片内部的孔洞随着贯通度的变化而变化。同时,为了消除节理面上岩桥的几何形状对试验结果的影响,在镂空节理片的设计中,针对不同贯通度下的节理片采用同种岩桥外轮廓形状,只缩放各个岩桥的形心大小,从而实现不同节理贯通度的节理片制作。本文共设计了 5 种节理贯通度,分别为 0.388,0.609,0.781,0.851 和 0.897,制作完成的镂空非贯通节理片如图 2 所示。由图 2 可知,3D 打印制作出的节理片,其厚度相对于试件尺寸比较小。

为了获得节理片与相似材料接触面之间的强度参数、相似材料强度参数,开展了基础力学测试,获得的基础力学参数如表 1 所示。相似材料与节理片接触面的抗剪强度参数通过直剪试验获得,即对 3D 打印完整的节理片开展不同法向荷载下的直剪试验,然后基于不同法向荷载下的峰值剪切力拟合得到黏聚力和内摩擦角。

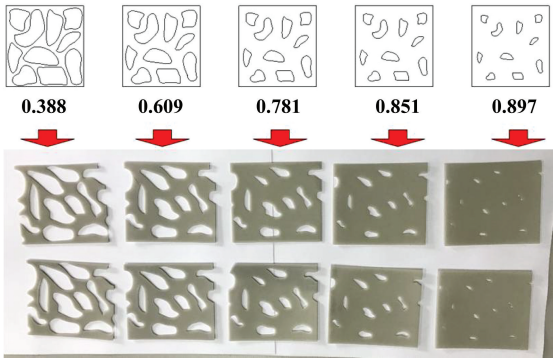


图 2 制作完成的镂空非贯通节理片

Fig. 2 Designed and fabricated non-persistent jointed specimens

表 1 基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters

材料类型	参数类型	数值
相似材料	单轴抗压强度/MPa	19.20
	弹性模量/GPa	5.17
	泊松比	0.26
	抗拉强度/MPa	2.53
	黏聚力/MPa	3.85
	内摩擦角/(°)	42.44
相似材料与节理片接触面	黏聚力/MPa	0.31
	内摩擦角/(°)	31.79

1.2 剪切测试

试样制作完成并养护 30 d 后在RYL-600岩石剪切流变仪上开展直剪试验。试验过程中,对每种贯通度的节理试件分别施加 1、2、3 MPa 的法向应力,结合试样的横截面尺寸进行换算,竖向荷载分别为 10、20、30 kN。水平加载板的剪切速度为 0.5 mm/min,试验过程中持续监测法向加载板和水平加载板应力值,直至试件破坏。图 3 为不同贯通度节理试样的剪切破坏情况。

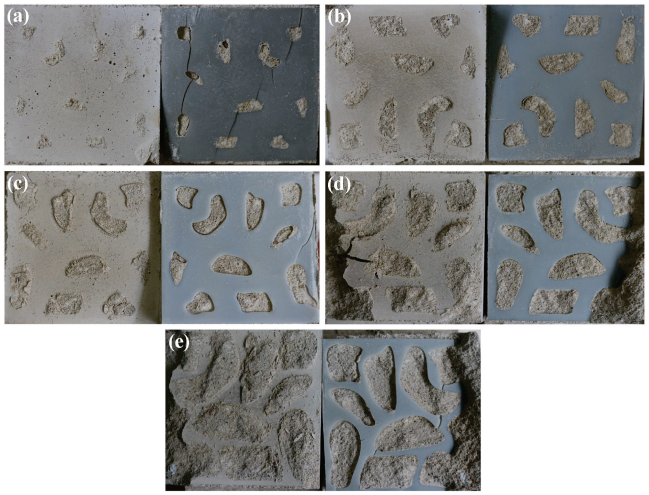
2 不同贯通度节理剪切力学参数特征

2.1 非贯通节理岩体剪切破坏判据

莫尔-库仑准则认为岩石材料在压力作用下发生剪切破坏的本质是截面所受剪应力达到或超过其本身抗剪强度,即岩石黏聚力和作用在该面上的法向力引起的摩擦力共同作用的结果,其表达式如下:

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

式中:τ 为破坏面上的剪切应力;C 为岩石黏聚力;φ 为岩石内摩擦角;σ 为作用在破坏面上的法向应力。



(a) 0.388; (b) 0.609; (c) 0.781; (d) 0.851; (e) 0.897

图 3　不同贯通度节理试样剪切破坏情况

Fig.3　Shear failure modes of specimens with joint persistence of different percentages

对三维非贯通节理面而言,当试样沿节理面发生剪切破坏时,节理面的剪切强度[15]可表示为:

$$R = \frac{A_I}{A}R_I + \frac{A_R}{A}R_R = (\sigma_a \tan\varphi_j + C_j)A \tag{2}$$

式中:R 为节理面抗剪强度和岩桥抗剪强度的加权平均值;A_I 为剪切破坏面上的节理总面积;A_R 为岩桥总面积;R_I 为节理面承担的剪切强度;R_R 为岩桥部分承担的剪切强度;σ_a 为剪切破坏面上的平均正应力;C_j 为节理面上的等效黏聚力;φ_j 为节理面上的等效摩擦角;A 为剪切破坏面上节理和岩桥的总面积。

$$C_j = KC_I + (1-K)C_R \tag{3}$$

$$\tan\varphi_j = K\tan\varphi_I + (1-K)\tan\varphi_R \tag{4}$$

式中:K 为节理贯通度;C_I 为类岩材料与镂空节理接触面的黏聚力;C_R 为类岩材料的黏聚力;φ_I 为类岩材料与镂空节理接触面的内摩擦角;φ_R 为类岩材料的内摩擦角。

2.2　不同节理贯通度试样的抗剪强度

图 4 为不同节理贯通度试样在不同法向应力下的抗剪强度。其中,虚线为试验测试结果(每组测试 2 个结果),实线为理论计算结果。法向应力相同时,理论结果均大于试验结果。且随着法向应力增加,所有节理面抗剪强度均增加;而随着节理贯通度增加,节理抗剪强度呈现明显的减小趋势。主要原因是,节理贯通度增加时,节理面上岩桥面积缩小,从而对剪切强度的贡献度也逐渐减小。

2.3　不同节理贯通度试样的黏聚力和内摩擦角

图5为不同节理贯通度试样的黏聚力和内摩擦角。试样节理贯通度从 0.388 增至 0.897 时,试样黏聚力对节理贯通度的变化更敏感,当节理贯通度增加时,黏聚力试验值呈现非线性快速下降趋势,而内摩擦角的劣化幅度相对较小,变化较为平缓,其中试验结果主要在 32°左右波动。这种差异主要源于岩体破坏机制的转变。随着节理贯通度增加,剪切破坏逐渐从岩桥断裂主导转变为节理滑移主导,导致黏聚力贡献度显著降低,而内摩擦角的力学贡献度相对保持稳定。

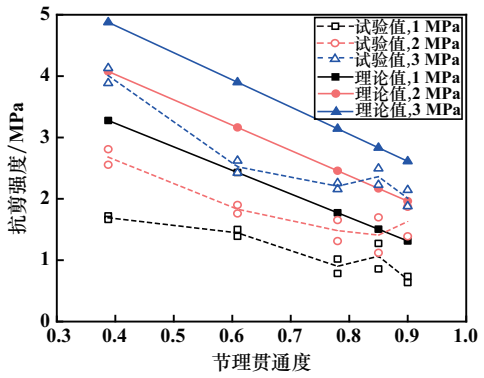


图 4　不同节理贯通度试样在不同法向应力下的抗剪强度

Fig.4　Peak shear stress of specimens with joint persistence of different percentages under different normal loads

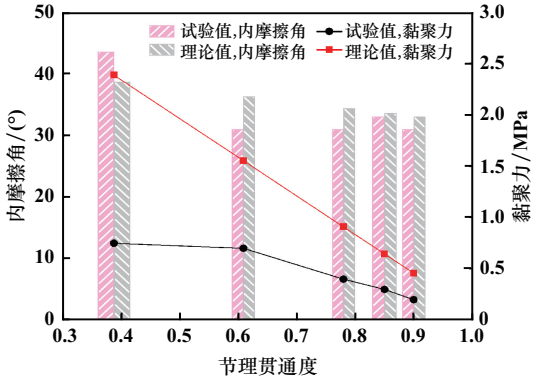


图 5　不同节理贯通度试样的黏聚力和内摩擦角

Fig.5　Cohesion and internal friction angle of specimens with joint persistence of different percentages

3　非贯通节理岩体剪切损伤本构模型

3.1　剪切损伤本构模型构建

众多学者从理论和试验的角度对岩体抗剪强度进行了研究和探索,提出了经典的剪切应力-剪切位移曲线[16],如图 6 所示。

经典剪切应力-剪切位移曲线可以细分为 4 个阶段,即弹性阶段、屈服阶段、应变软化阶段和残余强度阶段。弹性阶段(OA),剪切应力随剪切位移增加呈现近似线性增长,该阶段可以将岩体视为弹性状态,因而

并不会出现损伤。屈服阶段(*AB*),当剪切位移达到屈服位移 u_s 时,岩体进入屈服阶段,此时岩体内部已出现损伤,虽然剪切应力仍然随剪切位移增长而增长,但是其增长速率逐渐减小,曲线斜率不断减小,当剪切位移达到 u_f 时,曲线斜率为 0,此时岩体抗剪强度为 τ_f。岩体达到剪切应力峰值后立马进入应变软化阶段(*BC*),此阶段与前两个阶段不同的是,随着剪切位移增加,剪切应力逐渐减小,曲线斜率随剪切位移增加先变小后变大。最后一个阶段为残余强度阶段(*CD*),从 *C* 点开始,岩体被视为完全剪坏,此时的剪切应力 τ_r 即为残余强度,该阶段的抗剪切贡献均由剪切破裂面上的摩擦效应提供,因而剪切应力不会随剪切位移增长而发生明显变化。

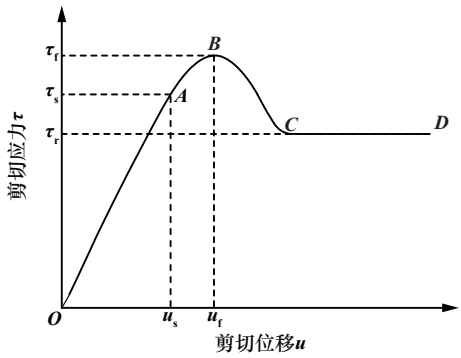


图 6 经典的剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Typical shear stress - shear displacement curve

为了准确表征非贯通节理面直剪作用下的剪切力学响应过程[17-19],基于室内试验结果,结合经典剪切应力-剪切位移曲线,构建非贯通节理岩体剪切损伤演化本构模型,并提出以下 4 点假设:① 鉴于岩石上、下节理面间距微小,将其视为一个薄层,且该薄层内部允许存在具有强度的黏结状态和仅具有摩擦效应的非黏结状态,对应未破坏部分和破坏部分;② 节理面的破坏是连续的微观单元破坏过程;③ 在弹性阶段,所有单元都遵循弹性变形,忽略剪切开始阶段试件的压密过程;④ 假定剪切应力-剪切位移曲线从屈服点 *B* 开始,岩桥单元和节理单元同时开始出现破坏单元。

将整个节理剪切面划分为 *N* 个单元面,分为 N_R 个岩桥单元面和 N_I 个节理单元面,节理面总面积为岩桥单元面和节理单元面之和:

$$N = N_R + N_I \tag{5}$$

节理面贯通度 *K* 可表示为:

$$K = \frac{N_I}{N} \tag{6}$$

剪切过程中,总剪切应力 τ 由岩桥受剪切应力 τ_R 和节理面受剪切应力 τ_I 共同承担:

$$\tau = \tau_R + \tau_I \tag{7}$$

对岩桥单元或者节理单元同种材料的剪切特征,一些学者引入流变元件(见图 7)来表征材料的剪切应力学行为。每个单元由 2 个平行连接的本构元件组成,分别为刚度 k_{1i} 的弹簧元件——代表材料未破坏单元的弹性性质,刚度 k_{2i} 和正应力 P_{ni} 作用的滑移元件模拟材料破坏单元的摩擦行为。材料总剪切应力为:

$$\tau = \sum_{i=1}^{N-N_f} (k_{1i} + k_{2i})u + \sum_{i=1}^{N_f} P_{ni}\tan\varphi_i \tag{8}$$

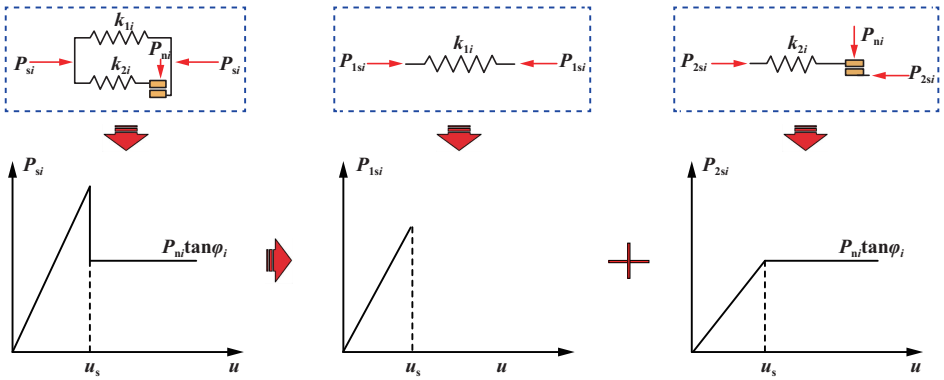


图 7 流变元件模型

Fig. 7 Rheological element model

当岩桥没有产生破坏单元,处于弹性阶段时,即剪切位移 *u* 小于屈服位移 u_s,岩桥单元的剪切应力 $P_{si} = k_{1i}u + k_{2i}u$,此时 $k_{1i} + k_{2i} = k_s$,破坏单元 $k_{2i}u = P_{ni}\tan\varphi_i$。

式(8)可简化为:

$$\tau = (N - N_f)k_s + N_f k_{2i} \tag{9}$$

引入损伤系数 *D* 衡量材料的损伤程度:

$$D = \frac{N_f}{N} \tag{10}$$

式中N_f为破坏单元数。因此，材料的剪切应力可表示为：

$$\tau = (1 - D)\, k_s u + D\tau_r \tag{11}$$

岩桥剪切应力为：

$$\tau_R = k_{Rs} u (1 - D_R) + \tau_{Rr} D_R \tag{12}$$

节理面剪切应力为：

$$\tau_I = k_{Is} u (1 - D_I) + \tau_{Ir} D_I \tag{13}$$

式中：k_{Rs}为岩桥剪切刚度；τ_{Rr}为岩桥残余强度；D_R为岩桥损伤系数；k_{Is}为节理面剪切刚度；τ_{Ir}为节理面残余强度；D_I为节理面损伤系数。

研究发现，微观单元的破坏常常是随机产生的，但其破坏规律服从威布尔分布：

$$P(F_a) = \begin{cases} 0 & F_a < 0 \\ \dfrac{m}{F_0}\left(\dfrac{F_a}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\dfrac{F_a}{F_0}\right)^m\right] & F_a \geqslant 0 \end{cases} \tag{14}$$

式中 F_a 为材料剪切面剪切强度参数，基于莫尔-库仑强度准则可表示为 $F_a = k_s u - \tau_s$，F_0 和 m 是与材料相关的分布参数。

令 $F_0 = k_s u_0$，则材料破坏单元数为：

$$N_f = \int_{u_s}^{u} NP(u)\,\mathrm{d}u = N\left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{F_a}{F_0}\right)^m\right]\right\} \tag{15}$$

损伤变量为：

$$D = \begin{cases} 0 & u < u_s \\ 1 - \exp\left[-\left(\dfrac{u - u_s}{u_0}\right)^m\right] & u \geqslant u_s \end{cases} \tag{16}$$

$$D_R = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u - u_R}{u_0}\right)^{m_R}\right] \tag{17}$$

$$D_I = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u - u_I}{u_0}\right)^{m_I}\right] \tag{18}$$

式中：u_R 和 m_R 均为岩桥单元分布参数；u_I 和 m_I 均为节理单元分布参数。

本文模型剪切破坏面的损伤总变量可表示为：

$$D = D_R(1 - K) + D_I K \tag{19}$$

综上所述，可得到节理面总剪切应力为：

$$\tau = \begin{cases} k_{Rs}(1 - K)u + k_{Is} K u & u < u_s \\ k_{Rs}(1 - D_R)(1 - K)u + k_{Is}(1 - D_I) K u + \tau_{Rr} D_R (1 - K) + \tau_{Ir} D_I K & u \geqslant u_s \end{cases} \tag{20}$$

法向应力 1 MPa 时，不同节理贯通度试件的剪切应力-剪切位移曲线如图 8 所示。从图 8 可清晰识别出典型的 4 阶段剪切力学行为。初始弹性变形区呈现独特的非线性上凹特征，这源于类岩材料内部微孔隙在法向应力-剪切应力复合作用下的渐进压密效应。后续发展阶段包括：应变强化区（剪切应力持续增长）、峰值强度区（最大抗剪能力）及残余强度区（结构面完全贯通后的稳定摩擦）的演化规律与经典理论一致。特别地，当节理贯通度为 0.388 时试件表现出最优抗剪性能，峰值强度达最大值；随着节理贯通度增大，峰值强度衰减，这直接印证了岩桥承载面积缩减与节理面主导作用增强的竞争机制。

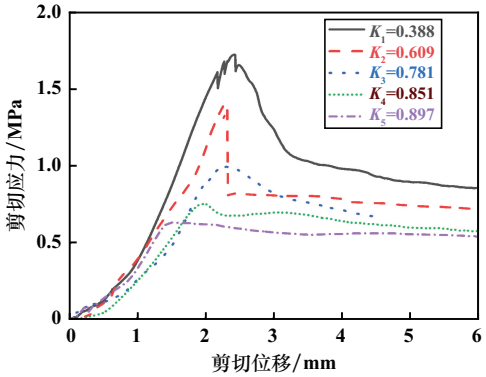


图 8　不同节理贯通度下试件剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 8　Shear stress - shear displacement curves of specimens with joint persistence of different percentages

图 9 为节理贯通度 0.388 试件在法向应力 1、2 和 3 MPa 作用下的剪切应力-剪切位移曲线，可以明显看到 3 组曲线均有明显的弹性阶段、屈服阶段、应变软化阶段和残余强度阶段。在弹性阶段剪切应力随剪切位移增加的变化基本一致。

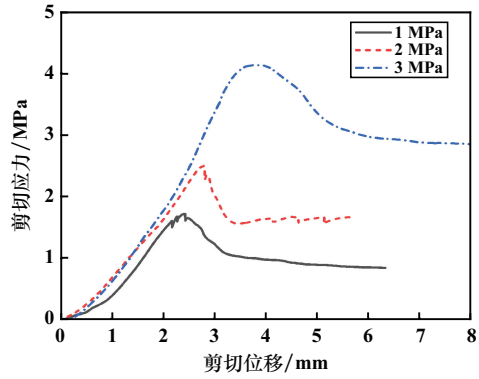


图 9　不同法向应力下试件剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 9　Shear stress - shear displacement curves of specimens under different normal stresses

3.2　模型验证

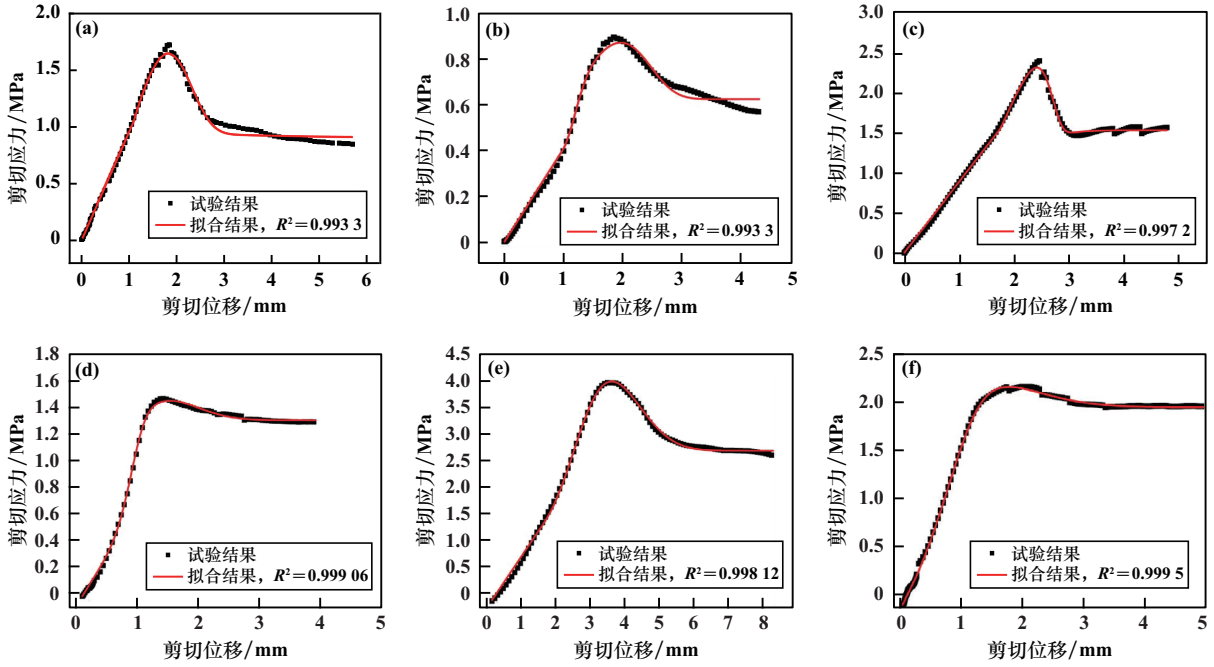
根据公式（20），选取节理贯通度 0.388、0.781 的试件，分别对法向应力 1、2、3 MPa 下的剪切应力-剪切位移曲线进行拟合，剪切损伤模型拟合参数见表 2，表中 S 代表试件，数字 1～3 代表法向应力，K1 和 K3 分别表示贯通度 0.388 和 0.781，模型拟合结果与试验结果对比如图 10 所示。模型拟合结果与试验结果具有

很高的拟合度,同一法向应力作用下,节理贯通度0.388的试样剪切位移大于节理贯通度0.781 试样的剪切位移,说明随着节理贯通度增大,剪切面出现损伤的位移减小,节理对剪切面的抗剪能力存在削弱作用。岩石残余强度与节理接触面的残余强度具有很强的线性关系,与试验结果的残余强度的拟合度较高。

表 2 剪切损伤模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters for shear damage model

试件编号	k_{Rs}/(MPa·mm^{-1})	k_{Is}/(MPa·mm^{-1})	u_s/mm	u_I/mm	u_R/mm	m_I	m_R	τ_{Rr}/MPa	τ_{Ir}/MPa	贯通度	法向应力/MPa
S-1-K1	0.53	1.62	1.10	1.20	0.80	3.20	1.00	1.20	0.45	0.388	1
S-2-K1	0.48	1.51	1.75	0.97	0.70	6.00	1.25	1.94	0.90	0.388	2
S-3-K1	0.10	2.28	1.50	2.60	1.46	2.86	2.42	3.52	1.69	0.388	3
S-1-K3	0.40	0.45	0.89	1.30	0.30	3.70	2.10	1.39	0.40	0.781	1
S-2-K3	0.30	0.86	0.19	1.36	0.74	2.37	4.10	3.44	0.80	0.781	2
S-3-K3	0.30	1.47	0.90	1.32	0.90	1.80	3.89	3.37	1.53	0.781	3



(a) S-1-K1; (b) S-1-K3; (c) S-2-K1; (d) S-2-K3; (e) S-3-K1; (f) S-3-K3

图 10 模型拟合结果与试验结果对比

Fig. 10 Comparison between model fitting results and test results

4 结论

1) 随着法向应力增加,三维非贯通节理抗剪强度增加,同时,节理贯通度的增加会导致节理面上岩桥面积减小,从而导致峰值抗剪强度不断减小。

2) 节理黏聚力对节理贯通度的影响较内摩擦角更为明显,随着节理贯通度增加,剪切破坏逐渐从岩桥断裂主导转变为节理滑移主导,导致黏聚力呈现非线性快速下降趋势,而内摩擦角的力学贡献度相对稳定。

3) 基于室内试验结果,结合经典剪切应力-剪切位移曲线,引入流变元件表征材料的剪切力学行为,构建非贯通节理岩体剪切损伤演化本构模型,模型结果与试验测试结果吻合良好。

参考文献(References):

[1] 张钦礼,李晓孟. 基于 Mamdani FIS 模型及 RMR 法的岩体质量分级研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):1-4.
ZHANG Qinli, LI Xiaomeng. Rock mass quality classification based on Mamdani FIS model and RMR method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(5):1-4.

[2] 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.

[3] 陈结,孟历德仁,崔义,等. 基于声光联合试验的预制双裂隙砂岩损伤演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025,44(1):30-42.
CHEN Jie, MENGLI Deren, CUI Yi, et al. Study on the Damage evolution characteristics of prefabricated double-fracture sandstone based on acoustic-optical combined tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025,44(1):30-42.

[4] MA H, LIU Q. Prediction of the peak shear strength of sandstone and mudstone joints infilled with high water-cement ratio grouts[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017,50(8):2021-2037.

[5] LU H F, LIU Q S, ZHANG Q Z. Mechanical behavior of grouted rock joints[J]. ACI Materials Journal, 2022,119(3):137-148.

[6] 陈世江. 基于数字图像处理的岩体结构面粗糙度三维表征方法及其应用[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
CHEN Shijiang. Characterization of 3D rock discontinuities roughness based on digital image processing technique and its application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.

[7] TATONE C, GRASSELLI G. An investigation of discontinuity roughness scale dependency using high resolution surface measurements[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012,46(4):657-681.

[8] SINGH H, BASU A. Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities[J]. Engineering Geology, 2018,232:171-181.

[9] TANG Z C, WONG L N Y. Influences of normal loading rate and shear velocity on the shear behavior of artificial rock joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(6):2165-2172.

[10] LIU Xinrong, LIU Yongquan, HE Chunmei , et al. Dynamic stability analysis of the bedding rock slope considering the vibration deterioration effect of the structural plane[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018,77(1):87-103.

[11] 陈庆芝,张玉石,刘远明,等. 节理起伏角对非贯通节理岩体力学特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2020,16(2):351-358.
CHEN Qingzhi, ZHANG Yushi, LIU Yuanming, et al. Influence of joint undulation angle on mechanical properties of non-penetrated joint rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020,16(2):351-358.

[12] GEROLYMATOU E, TRIANTAFYLLIDIS T. Shearing of materials with intermittent joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(7):2689-2700.

[13] 蒲成志,贺桂成,朱忠华. 含软弱夹层板岩抗剪强度试验及表征方法[J]. 工程地质学报, 2019,27(3):525-531.
PU Chengzhi, HE Guicheng, ZHU Zhonghua. Test and characterization method for shear strength of slate containing weak intercalated layer[J]. Journal of Engineering Geology, 2019,27(3):525-531.

[14] ALI FATHI, ZABIHALLAH MORADIAN, PATRICE RIVARD, et al. Shear mechanism of rock joints under pre-peak cyclic loading condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016,83:197-210.

[15] EINSTEIN H H, VENEZIANO D, BAECHER G B, et al. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983,20(5):227-236.

[16] XIE S J, LIN H, WANG Y X, et al. A statistical damage constitutive model considering whole joint shear deformation[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2020,29(6):988-1008.

[17] XIE S J, HAN Z Y, HU H H, et al. Application of a novel constitutive model to evaluate the shear deformation of discontinuity[J]. Engineering Geology, 2022,304:106693.

[18] XIE S J, LIN H, DUAN H Y, et al. Modeling description of interface shear deformation: A theoretical study on damage statistical distributions[J]. Construction and Building Materials, 2023,394:132052.

[19] 王康,刘佑荣,胡政,等. 基于影响因子修正的岩石损伤力学模型探讨[J]. 岩土力学, 2015(增刊2):171-177.
WANG Kang, LIU Yourong, HU Zheng, et al. Discussion on rock damage mechanical model based on impact factor modification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(S2):171-177.

引用本文:赵华,钱兆明,郑斌,等. 三维非贯通节理岩体剪切力学特性与损伤本构模型[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):1-7.

ZHAO Hua, QIAN Zhaoming, ZHENG Bin, et al. Shear mechanical properties and damage constitutive model of three-dimensional non-persistent jointed rock mass[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):1-7.

版权声明

本刊已许可国内外文献检索系统或数据库在其官网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。同时矿冶工程杂志官网已实行论文全文免费开放获取。本刊按矿冶工程杂志相关规定向作者一次性支付稿酬及著作权使用费后,本刊及相关合作单位不再向作者支付其他费用。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。

矿冶工程杂志编辑部
2026 年 4 月