

常法向刚度条件下人工结构面剪切力学特性及 损伤演化规律试验研究

焦 峰, 许 江, 彭守建, 何美鑫, 张心睿, 程 亮

(重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:为研究起伏角和法向刚度对结构面剪切力学特性的影响,利用自主研发的煤岩剪切-渗流耦合试验系统,开展了常法向刚度(CNS)条件下人工结构面的直剪试验。结果表明:当起伏角为 15° 和 30° 时,剪切应力呈现周期性震荡衰减趋势,在剪切结束时,随着法向刚度的增加,峰值剪切应力的降低量分别是1.78、1.42、1.36和1.27 MPa,逐渐减小。当起伏角为 45° 时,在剪切应力达到峰值后逐渐趋于残余强度;法向位移演化和剪切应力具有一一对应关系。随着起伏角的增加,剪切刚度逐渐增加。随着法向刚度的增加,起伏角 15° 和 45° 结构面的峰值剪切应力基本上线性增加;当起伏角为 30° 时,峰值剪切应力呈现出分段函数的特征,但是峰值剪胀角却逐渐降低。通过分析剪切前后结构面的质量损失、碎屑粒径占比和三维形貌参数演化得到结构面的破坏模式,当起伏角为 15° 和 45° 时,破坏模式较为单一,分别为磨损破坏和切齿破坏;当起伏角为 30° 时,其破坏模式对试验条件的依赖性较强较为复杂,主要为齿尖剪断破坏和全切齿破坏。通过将结构面三维空间点云数据和对应剪切位移处的法向位移值相结合的方法,得到特定剪切位移处的结构面隙宽演化云图,从而分析结构面在剪切过程中的动态演化过程,得到其破坏机理。

关键词:结构面;起伏角;法向刚度;峰值剪切应力;破坏模式;剪切动态演化

中图分类号:TD315 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2023)11-4065-13

Experimental study on shear mechanical properties and damage evolution of artificial structural plane under constant normal stiffness

JIAO Feng, XU Jiang, PENG Shoujian, HE Meixin, ZHANG Xinrui, CHENG Liang

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To study the influence of asperity angle and normal stiffness on the shear mechanical properties of the structural plane, a direct shear test of the artificial structural plane with constant normal stiffness (CNS) was carried out using the self-developed coal rock shear seepage coupling test system. The results show that the shear stress presents a periodic oscillation attenuation trend when the asperity angles are 15° and 30° . At the end of shearing, the reduction in peak shear stress with the increase of normal stiffness is 1.78, 1.42, 1.36 and 1.27 MPa, respectively, which is gradually decreasing. While the asperity angle is 45° , the shear stress gradually tends to residual strength after reaching the peak shear stress, and there is a one-to-one correspondence between normal displacement evolution and shear stress. With the increase of the as-

收稿日期:2022-12-11 修回日期:2023-03-06 责任编辑:王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1819

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51874055, 52074047, 52274147)

作者简介:焦 峰(1991—),男,河南平顶山人,博士研究生。E-mail: jfeng26@163.com

通讯作者:许 江(1960—),男,湖南永兴人,教授,博士生导师。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

引用格式:焦峰,许江,彭守建,等.常法向刚度条件下人工结构面剪切力学特性及损伤演化规律试验研究[J].煤炭学报,2023,48(11):4065-4077.

JIAO Feng, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Experimental study on shear mechanical properties and damage evolution of artificial structural plane under constant normal stiffness[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4065-4077.



移动阅读

perity angles, the shear stiffness increases gradually. With the increase of normal stiffness, the peak shear stress of structural planes with 15° and 45° asperity angles increases linearly, and when the asperity angle is 30° , it presents the characteristic of piecewise function, but the peak shear dilatancy angle gradually decreases. The failure mode of the structural plane is obtained by analyzing the mass loss before and after shearing, the proportion of debris particle size, and the evolution of three-dimensional morphology parameters. When the fluctuation angles are 15° and 45° , the failure modes are relatively single, namely wear failure and tooth cutting failure. When the fluctuation angle is 30° , the failure mode has a strong and complex dependence on the experimental conditions, mainly including tooth tip shear failure and full tooth cutting failure. By combining the three-dimensional spatial point cloud data of the structural plane with the normal displacement values at the corresponding shear displacement, a simulated cloud map of the structural plane gap width at a specific shear displacement is obtained, which analyzes the dynamic evolution process of the structural plane during the shear process and obtains its failure mechanism.

Key words: structural plane; asperity angles; normal stiffness; peak shear stress; failure modes; shear dynamic evolution

针对于浅部和深部工程,岩体中都存在大量的弱面,如结构面等,同时结构面容易受到压剪破坏。随着浅部资源的不断开发,逐渐呈现出枯竭的趋势,因此陆续向深部能源开采进发^[1-3]。由于深部工程灾害频发且不同于浅部灾害^[4],因此解决深地工程面临的问题具有迫切性。浅部岩体不考虑剪胀效应,对法向荷载的影响属于常法向应力边界条件(CNL),而深部岩体由于围岩的限制而不能自由剪胀,因此作用在岩体上的法向荷载会持续增加,属于常法向刚度(CNS)边界条件。CNL条件容易实现,且取得了丰硕的成果,张丹等^[5]开展了不同法向应力条件下具有二级凸起体结构面的直剪试验,分析了结构面的剪切破坏模式,验证了二级凸起体破坏的方式。卢海峰等^[6]通过开展不同法向应力下注浆结构面的直剪试验,分析了注浆条件对结构面形貌特征的影响。祝艳波等^[7]利用结构面直剪试验,探究粗糙度对剪切力学性质的影响。贾云中等^[8]通过变滑移速率下页岩结构面剪切试验,基于摩擦因数和渗透率变化分析了渗透性响应特征及演化规律。MORAD D等^[9]通过粗糙石灰岩结构面的剪切试验,研究了剪切速度对结构面剪切力学性质的影响。江权等^[10]鉴于3D打印技术可以便捷地制作含复杂结构的三维实体,将3DP技术引入到岩体/岩石力学试验研究中。芦谭等^[11]通过三维扫描和3D打印技术,利用光敏树脂材料制作结构面模型,通过直剪试验验证了技术的可行性,为之后的研究方法提供了参考。随着光学技术的进步,使得结构面的形貌数据更加精确,因此对结构面强度模型的研究同样取得了大量的研究成果^[12-16]。但是CNS条件更加符合工程背景,近年来,随着试验设备性能的不不断提高^[17-20],CNS条件的研究成果有所增加。赵衡等^[21]通过做CNS条件下的岩石-混凝土结构面的直剪试验,给出

了结构面粗糙度的度量方法,推广了Patton模型。尹乾等^[22]通过做CNL和CNS条件下的直剪试验,揭示了初始法向应力对砂岩剪切力学参数的影响。蒋宇静等^[23]通过开展CNS条件下锚固和非锚固类岩石节理的剪切试验,研究了边界条件对节理力学性质的影响。刘日成等^[24]通过开展CNS条件下具有三维粗糙度结构面的直剪试验,揭示了法向刚度和循环剪切次数对剪切力学性质的影响。HAN等^[25]通过做CNS条件下不同类型结构面的直剪试验,探究了结构面的剪切力学性质。GUTIERREZ-Ch等^[26]进行不同边界条件下岩石-混凝土界面的直剪试验研究,并通过数值模拟结果对他人的研究成果进行验证。

但是以上研究没有将法向刚度的作用机理与结构面的破坏模式联系起来。因此,笔者在充分考虑剪切位移的基础上,系统探究了起伏角和法向刚度对结构面剪切力学特性的影响,得到CNS条件下结构面的剪切力学特性及破坏模式,同时分析剪切过程中结构面的动态破坏过程。

1 试 验

1.1 试样制备

由于剪切试验会使结构面产生不可逆的破坏,同时天然结构面不具有重复性,因此笔者使用自主设计的规则锯齿状结构面浇筑模具进行结构面制作,如图1所示。此模具的主要优点是可以一次分别成型10个具有起伏角 $\alpha=15^\circ$ 、 30° 和 45° 起伏角的结构面,大大降低了结构面之间的差异性,使得试验结果更具有可靠性。模具主要由凸模底座、长隔板、短隔板、固定器和夹紧螺钉组成,具有可拆卸性。结构面为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的立方体试件,结构面上均匀分布10个等腰三角形锯齿,底边边长为5 mm。结构

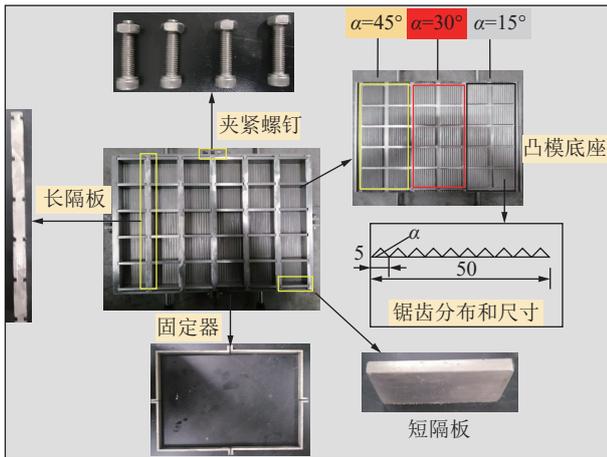


图 1 结构面制作模具

Fig.1 Mold making of structural plane

面浇筑过程如图 2 所示。步骤为: ① 将砂粒在烘箱中以 105 ℃ 烘干 24 h; ② 将砂粒和水泥进行筛分, 保证颗粒均匀; ③ 将水泥 : 砂粒 : 水=3 : 2 : 1.5 的质量比进行称重选取; ④ 先将水泥和砂进行混合, 在搅拌均匀之后加入水充分搅拌; ⑤ 将水泥砂浆材料倒入到模具中, 采用分层捣实的方法进行浇筑; ⑥ 浇筑完成后, 使用振动台进一步将结构面试件内部的气泡排出, 静置成型 2~3 d; ⑦ 脱模, 将试样放到养护箱中养护 28 d, 则结构面一次制作完成。结构面的基本力学参数, 见表 1。

1.2 试验装置

本文试验在自主研发的煤岩剪切-渗流耦合试验系统上完成^[27], 该试验系统主要由伺服加载控制系统、

剪切盒及其密封系统、数据采集系统和结构面三维形貌扫描系统组成, 如图 3 所示。该系统可以实现恒法向力 (应力)、恒定变形 (应变)、恒定位移、保载时间、应力路径多级加载等多种控制方式; 其中三维扫描系统精度最高可以达到 0.01 mm。使用试验机自带的复合控制方式可以实现 CNS 条件的剪切试验^[28], 具体步骤如下: ① 轴向压头首先设置到 99.8 mm, 当压头到达指定位置时, 转到步骤②; ② 设置轴向压头以 0.5 mm/min(接近速度) 接近剪切盒上压头, 当轴向压头力在接触后大于 0.1 kN 时转到步骤③; ③ 轴向转为力控制, 以 0.1 kN/s 的速度 (预加载速度), 达到 a kN (初始法向力), 此时法向位移清零, 转到步骤④; ④ 轴向变为复合控制 $F=a+bx$, 其中, F 为轴向力; a 为初始轴向力; b 为法向刚度系数; x 为法向位移增量, 直至试验结束。说明: 常法向刚度的实现是通过数据采集系统实时监测反馈的结构面法向位移信息, 根据设定的表征法向刚度的系数 b , 实时自动计算并调整法向应力。计算公式^[29-30]为

$$\Delta\sigma_n = k_n \Delta\delta_n \tag{1}$$

$$\sigma_n(t + \Delta t) = \sigma_n(t) + \Delta\sigma_n \tag{2}$$

式中, $\Delta\sigma_n$ 为法向应力变化量, MPa; k_n 为法向刚度, GPa/m; $\Delta\delta_n$ 为法向位移变化量, mm; t 为时间, s; Δt 为时间变化量, s。

1.3 试验方案

笔者主要研究起伏角和法向刚度对结构面剪切力学特性的影响, 因此设置初始法向应力为 1.5 MPa,

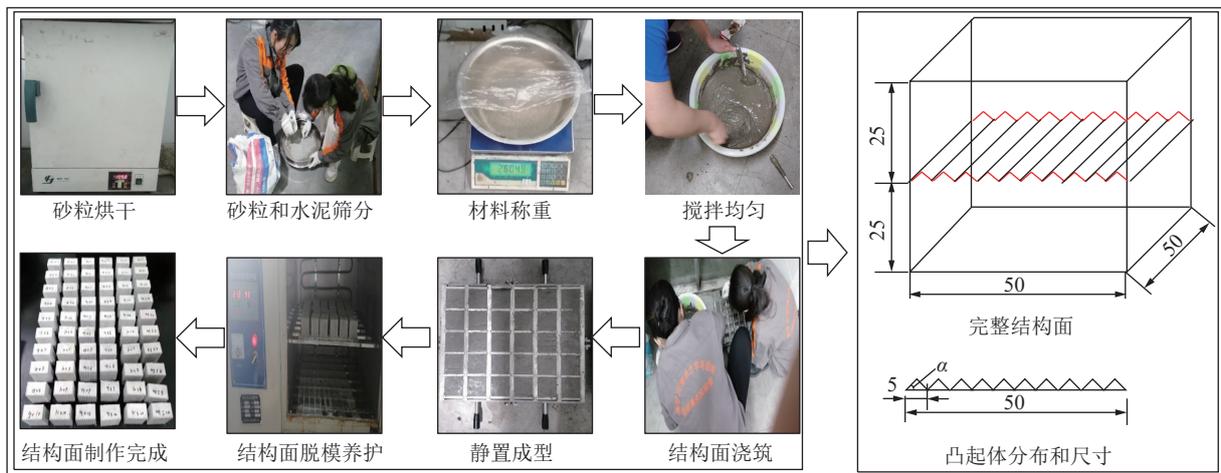


图 2 结构面制作步骤

Fig.2 Making steps of structural plane

表 1 基本力学参数

Table 1 Mechanical parameters

单轴抗压强度/MPa	泊松比	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
15	0.27	3.39	2.84	28

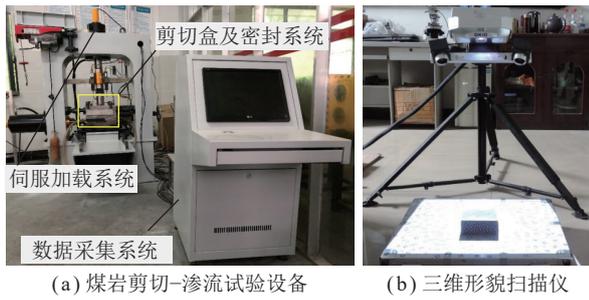


图3 试验系统

Fig.3 Test system

法向刚度 k_n 分别为 0、1、2 和 4 GPa/m^[31-32], 其中 $k_n=0$ 为对照组; 设置起伏角为 15°、30°和 45°, 每个条件进行 2 次重复试验, 共需结构面 36 个。试验步骤为: ① 轴向以 0.1 kN/s 速度增加到初始法向应力; ② 使用复合控制条件设置法向刚度值; ③ 切向以 1 mm/min 的速度施加剪切位移至 25 mm, 试验结束。考虑到剪切位移影响是不可忽略的^[33], 所以设计剪切位移占剪切方向结构面长度的 50%, 充分考虑了剪切位移对结构面力学性质的影响。

2 试验结果

2.1 剪应力演化

结构面剪切应力-剪切位移曲线, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 不同起伏角结构面的剪切应力-剪切位移曲线在峰前阶段演化基本相同, 都没有明显的压缩阶段, 表现为从剪切开始以弹性阶段增加到峰值强度, 具体区别体现在峰后阶段。当结构面起伏角为 15°时, 剪切应力-剪切位移曲线在峰后呈现出周期型震荡衰减, 即剪应力达到峰值后迅速降低至本周期最低值, 然后随着剪切位移的增加, 剪切应力再次达到峰值, 在此之后随着剪切位移的增加, 剪切应力同样以这样的规律进行演化, 主要不同为每个周期内的峰值应力逐渐减小。到剪切结束时, 随着法向刚度的增加, 峰值剪切应力的降低量分别是 1.78、1.42、1.36 和 1.27 MPa, 呈逐渐降低的变化趋势。特别是当 $k_n=0$ 时, 因为结构面在法向没有约束, 所以峰值剪切应力的降低值最大。

当结构面起伏角为 30°时, 剪切应力达到峰值后, 迅速降低至最小值, 之后同样呈现出周期型震荡衰减的变化趋势。相较于起伏角 15°结构面, 主要区别在于剪切应力在峰后阶段的变化幅度较小, 并随着剪切位移的增加逐渐达到残余强度。

当结构面起伏角为 45°时, 剪切应力达到峰值后迅速降低, 在低法向刚度条件下, 剪切应力在峰后逐渐减小; 当 $k_n=4$ GPa/m 时, 到剪切结束时, 剪切应力基本不再发生变化。表明随着法向刚度的增加, 结构面

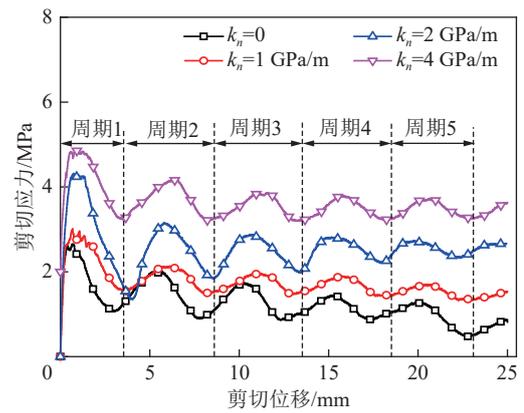
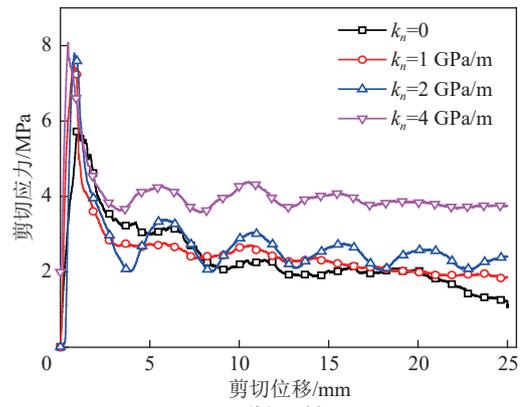
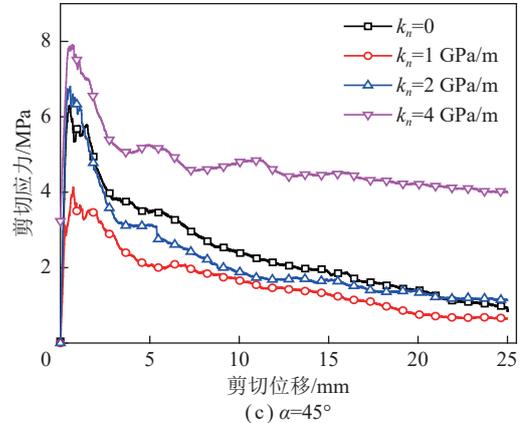
(a) $\alpha=15^\circ$ (b) $\alpha=30^\circ$ (c) $\alpha=45^\circ$

图4 剪切应力-剪切位移曲线

Fig.4 Shear stress vs shear displacement curves

的破坏程度逐渐增加, 在较小法向刚度条件下, 结构面在剪切过程中的破坏相对较小, 随着剪切位移的增加, 结构面上仍有承担抵抗剪切的明显凸起体, 因此随着破坏程度的增加, 剪切应力逐渐降低。当法向刚度增加到 4 GPa/m 时, 发生切齿破坏, 结构面上的凸起体几乎被剪断, 达到残余强度。

不同起伏角结构面的峰值剪切应力随法向刚度的演化, 如图 5(a) 所示。由图 5(a) 可以看出, 随着法向刚度的增加, 起伏角 15°和 45°结构面的峰值剪切应力呈现出线性增加的变化趋势, 拟合优度 R^2 分别为 0.86 和 0.98。起伏角 30°结构面的峰值剪切应力与法

向刚度没有明显的线性关系, 呈现出分段函数的特征。当法向刚度从 0 增加到 1 GPa/m 时, 峰值剪切应力迅速增加, 之后几乎稳定不变。

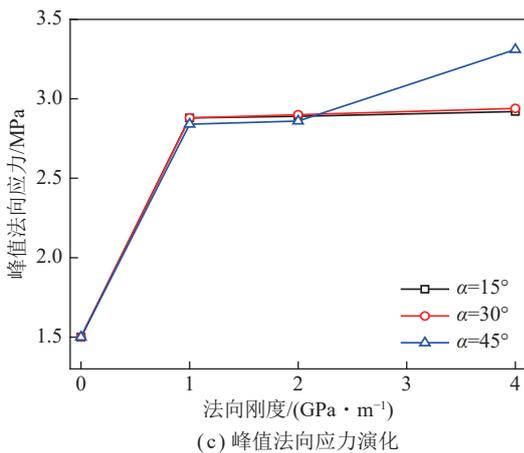
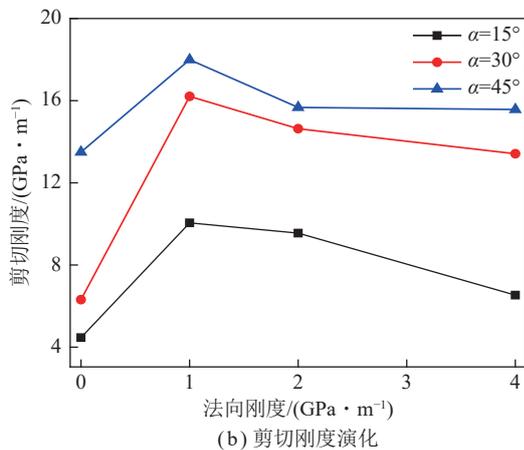
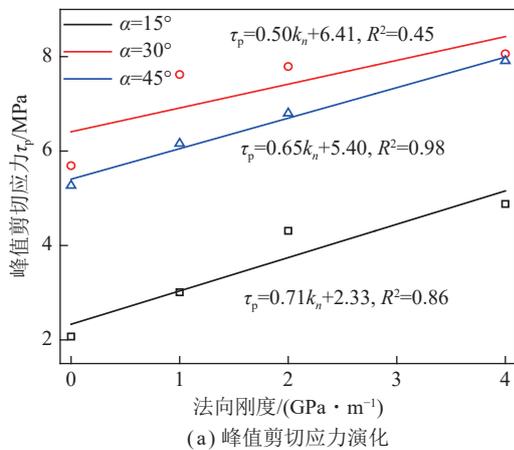


图 5 力学参数演化

Fig.5 Evolution of mechanical parameters

详细原因是, 当起伏角为 15°和 45°时, 结构面主要发生磨损破坏和切齿破坏, 破坏模式单一, 并且随着法向刚度的增加, 破坏模式不会发生变化, 只是破坏程度逐渐增加, 因此对应法向位移的变化量增加。结合式 (1) 和 (2) 可知, 法向应力也会相应增加, 对应 CNL 条件下法向应力的作用机制, 因此峰值法向应力

线性增加。当起伏角为 30°时, 结构面的破坏模式较为复杂, 即当法向刚度为 0 时, 由于凸起体高度较大, 结构面发生爬坡破坏; 当法向刚度为 1 GPa/m 时, 因为法向刚度增加, 所以对应的法向应力增加, 结构面发生全切齿破坏, 因此峰值剪切应力增加, 并且增加量要大于起伏角 15°和 45°结构面。接下来随着法向刚度的增加, 结构面同样发生全切齿破坏, 由式 (1) 和 (2) 可知, 因为法向位移不再发生变化, 所以对应的法向应力也不变, 因此峰值剪切应力几乎没有变化, 呈现出分段函数的演化特征。因此法向刚度是通过控制结构面的破坏模式来影响峰值剪切应力的。

使用剪切刚度来区分结构面在峰前演化的差异性。将剪切刚度定义为剪切应力-剪切位移曲线弹性阶段的应力梯度, 表达式为

$$k_g = \frac{\partial \tau}{\partial u_n} \quad (3)$$

式中, k_g 为剪切刚度, GPa/m; τ 为剪切应力, MPa; u_n 为剪切位移, mm。

不同起伏角结构面的剪切刚度随法向刚度的演化, 如图 5(b) 所示。

由图 5(b) 可以看出, 随着起伏角的增加, 剪切刚度逐渐增加, 并且起伏角 15°到 30°结构面的剪切刚度增加量要大于起伏角 30°到 45°。表明当起伏角为 15°时, 因为结构面上凸起体高度较小, 所以上下结构面之间的互锁效应较小^[34], 抵抗剪切的能力较小, 因此对应剪切刚度较低。当结构面起伏角为 45°时, 由于凸起体高度较大, 上下结构面之间的互锁效应较大, 抵抗剪切的能力较大, 因此对应的剪切刚度较大。当结构面起伏角为 30°时, 结合峰值剪切应力演化规律可知, 其对试验条件的依赖性较强, 结构面发生的破坏模式较为复杂, 因此剪切刚度值处于中间, 更偏向于切齿破坏, 所以在数值上接近于起伏角 45°结构面的剪切刚度。

2.2 峰值法向应力演化

通过式 (2) 可知, CNS 条件下结构面在剪切过程中的法向应力不是一个定值。不同起伏角结构面的峰值法向应力演化, 如图 5(c) 所示。

由图 5(c) 可以看出, 当起伏角为 15°和 45°时, 随着法向刚度的增加, 峰值法向应力的演化呈现出 3 个阶段: 第 1 阶段, 当法向刚度从 0 增加到 1 GPa/m 时, 峰值法向应力急剧增加; 第 2 阶段, 当法向刚度从 1 GPa/m 增加到 2 GPa/m 时, 峰值法向应力基本没有变化; 第 3 阶段, 当法向刚度从 2 GPa/m 增加到 4 GPa/m 时, 法向刚度小幅度增加。同时起伏角从 15°增加到 45°时, 对应的峰值法向应力增加值分别为 0.01、0.18

和 0.41 MPa, 呈现出逐渐增加的趋势。当起伏角为 30°时, 随着法向刚度的增加, 峰值法向应力的演化呈现出 2 个阶段: 第 1 阶段, 当法向刚度从 0 增加到 1 GPa/m 时, 峰值法向应力急剧增加; 第 2 阶段, 随着法向刚度的增加, 峰值法向应力几乎没有变化, 这与图 5(a) 得到的结论一致。当起伏角为 15°时, 鉴于结构面上凸起体高度较小, 对法向应力的敏感性较强, 因此在图 5 中对应的峰值剪切应力变化较大。

2.3 法向位移演化

不同起伏角结构面法向位移-剪切位移曲线, 如图 6 所示。

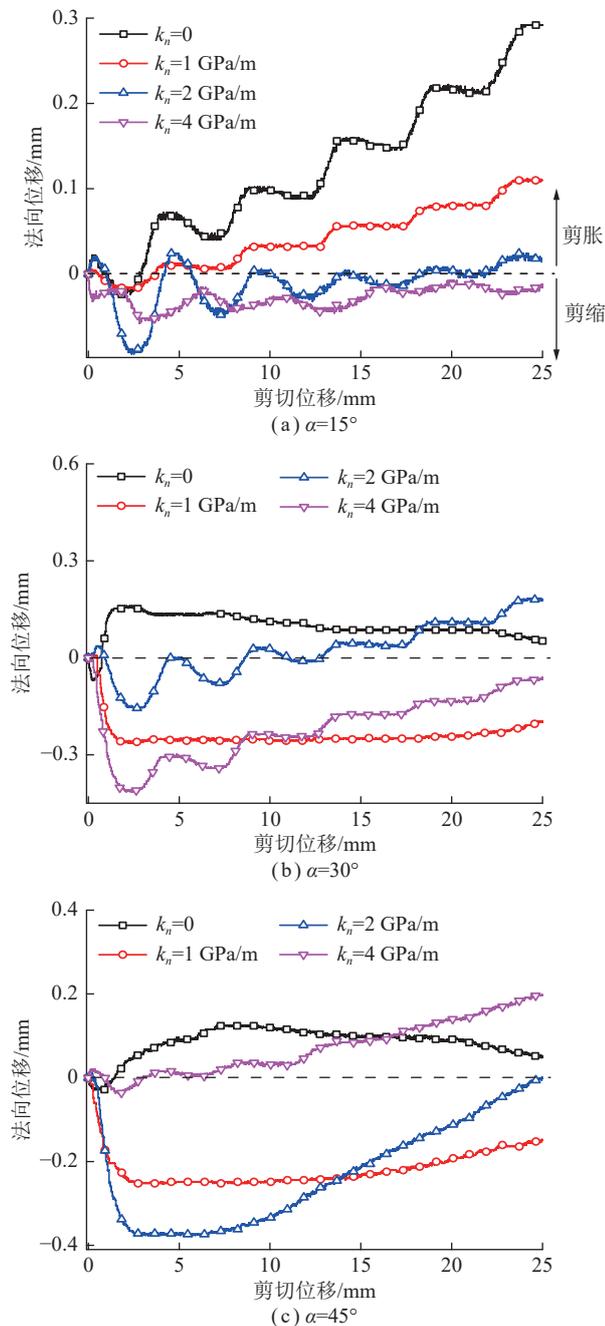


图 6 法向位移-剪切位移曲线

Fig.6 Normal displacement vs shear displacement curves

由图 6 可以看出, 法向位移和剪切应力的演化具有一一对应的关系。其中法向位移大于 0 为剪胀, 相反为剪缩。当起伏角为 15°时, 法向位移呈现出周期型震荡变化趋势, 并且随着法向刚度的增加, 结构面在剪切过程中剪胀量逐渐减小, 呈现压缩趋势; 当结构面起伏角为 30°时, 法向位移同样呈现出周期型震荡的变化趋势, 在剪切结束时, 法向位移基本上趋于稳定, 几乎不发生变化; 当结构面起伏角为 45°时, 法向位移不具有周期性, 到剪切结束时, 基本不发生变化。用峰值剪胀角演化来表征结构面在剪切过程中的法向位移变化, 其计算方法为

$$\theta_{\max} = \max(\theta) = \arctan\left(\frac{\delta_n}{u_n}\right) \quad (4)$$

式中, θ_{\max} 为峰值剪胀角, (°); θ 为剪胀角, (°)。

不同起伏角结构面峰值剪胀角演化, 如图 7 所示。由图 7 可知, 随着法向刚度的增加, 峰值剪胀角逐渐降低。当 $k_n=4$ GPa/m 时, 3 种结构面起伏角的峰值剪胀角基本上相等, 表明其对起伏角大小的依赖性较小。这是因为当剪切刚度较大, 结构面发生全切齿破坏, 在剪切过程中伴随着锯齿的完全剪断。随着起伏角的增加, 结构面的峰值剪胀角逐渐增加, 原因是: 首先, 由于结构面的起伏角不同, 对应凸起体的高度不同; 其次, 由于起伏角不同, 致使结构面在剪切过程中的破坏模式不同, 使得峰值剪胀角的大小不同。

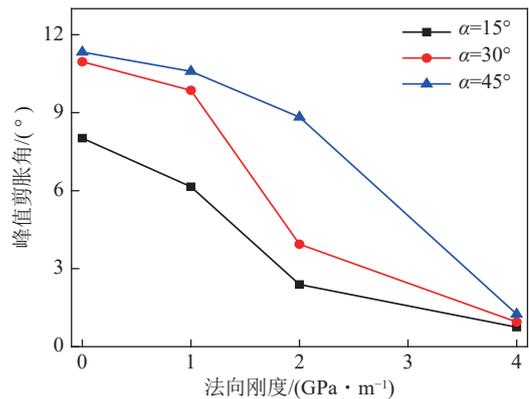


图 7 峰值剪胀角演化

Fig.7 Evolution of peak dilatancy angle

3 结构面破坏特征及形貌演化规律

通过以上分析得出, 在不同起伏角和法向刚度条件下, 结构面的剪切力学特性与破坏模式紧密相关。因此, 分析不同条件下结构面的破坏模式显得至关重要。剪切前后结构面的三维形貌扫描, 如图 8 所示。由图可以看出, 当结构面起伏角为 15°时, 由于结构面

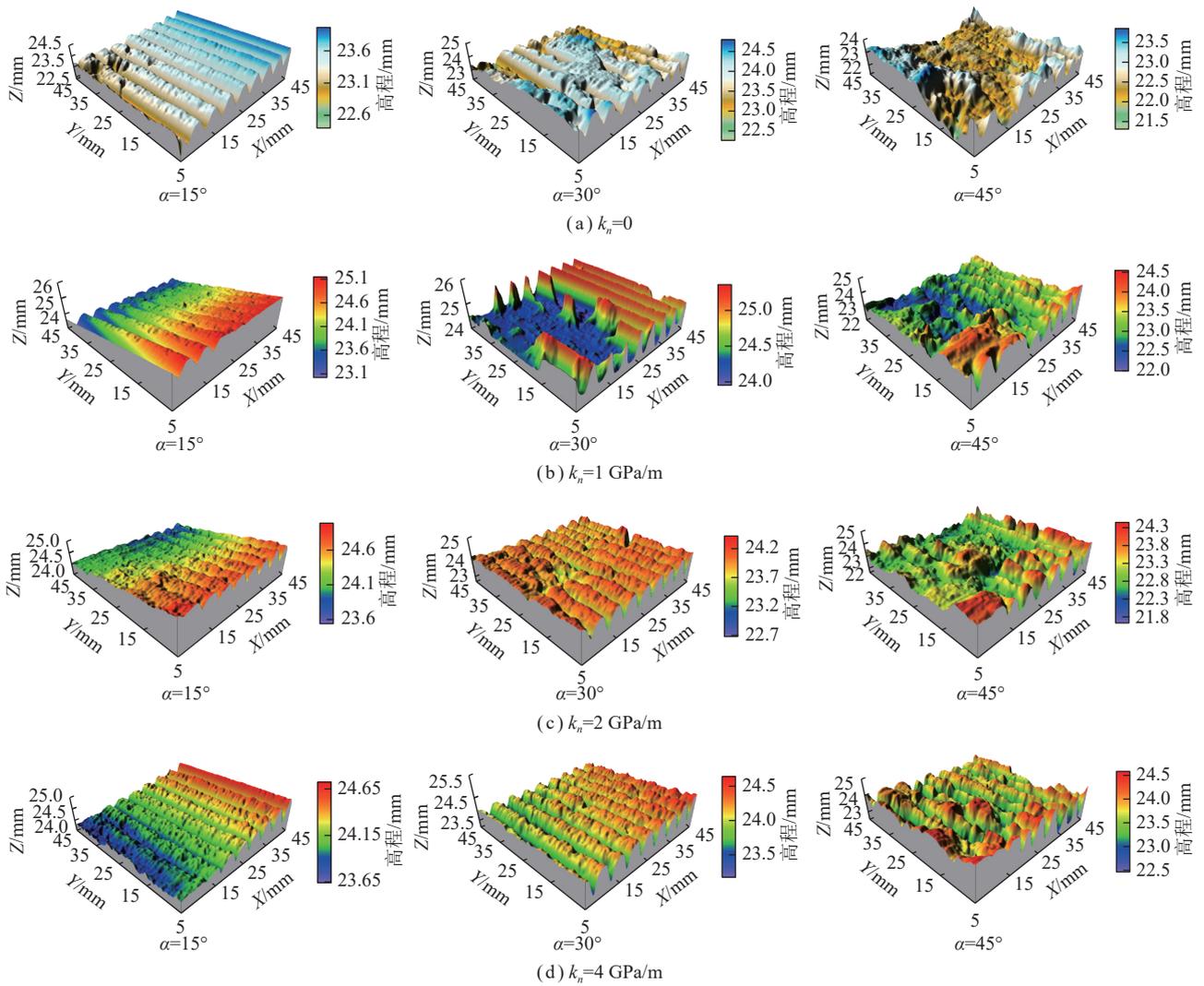


图 8 结构面三维形貌扫描

Fig.8 3D morphology scanning of structural plane

上凸起体高度较小, 剪切过程中主要发生齿尖磨损破坏, 具体表现为结构面上的部分凸起体有被磨损破坏的痕迹。随着法向刚度的增加, 结构面的磨损程度逐渐增加。当起伏角为 45°时, 因为结构面上凸起体高度较大, 发生爬坡破坏的可能性较低, 所以一般表现为切齿破坏。当法向刚度较小时, 因为凸起体之间的凹陷部分依然存在, 所以结构面会发生齿尖剪断破坏, 随着法向刚度的增加, 结构面高度的最小值增加, 也说明发生完全切齿破坏, 并且由于法向应力的作用, 使得剪断的凸起体被压碎并充填在结构面之间, 使得结构面高度增加。当起伏角为 30°, 法向刚度从 1 GPa/m 增加到 2 GPa/m 时, 结构面发生齿尖剪断破坏到部分凸起体被剪断破坏, 之后随着法向刚度的增加, 结构面上凸起体基本上全被剪断, 并且没有发生较大的变化。通过结构面三维扫描, 可以直观看出结构面的破坏方式, 并且可以与剪切力学性质相对应。

因为剪切后结构面发生破坏, 所以对应剪切前后结构面的质量会发生变化。因此, 可以用剪切前后结构面的质量变化来说明结构面的破坏, 如图 9 所示。

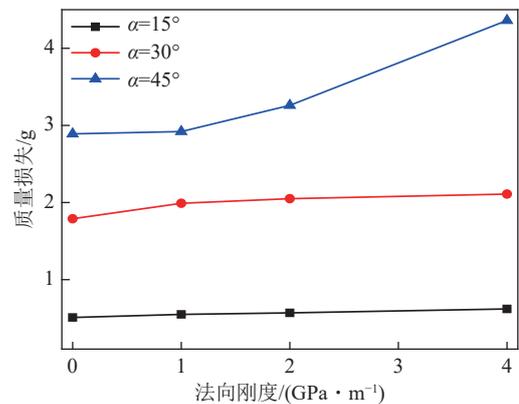


图 9 结构面质量损失

Fig.9 Mass loss of structural plane

由图 9 可以看出,随着法向刚度和起伏角的增加,结构面的质量损失均逐渐增加,具体表现为:当起伏角为 15° 时,结构面的质量损失增加量较低。当法向刚度从 0 增加到 4 GPa/m 时,质量损失只增加了 0.11 g ,表明结构面破坏程度较低,因此只发生磨损破坏。当起伏角为 45° ,法向刚度从 0 增加到 4 GPa/m 时,质量损失增加了 1.47 g ,变化量较大,因此发生切齿破坏,同时破坏并没有达到稳定。当起伏角为 30° ,法向刚度从 0 增加到 4 GPa/m 时,质量损失增加了 0.47 g ,介于 2 个起伏角之间,其主要变化发生在法向刚度 $0 \sim 1 \text{ GPa/m}$,之后随着法向刚度的增加,质量损失不再发生变化,表明结构面的破坏已经达到稳定。综合以上分析看出结构面质量损失演化与峰值法向应力演化具有一一对应关系,因此可以用质量演化说明破坏模式。

通过分析剪切后结构面产生碎屑粒径的占比^[35-37],也可以得到结构面的破坏模式。试验后将取出的碎屑倒入到筛网中,筛网摆放位置从上到下分别为 10 目 (2 mm)、30 目 (0.6 mm) 和底盘,经过充分筛分后,将不同目数碎屑分别进行称重,可得到不同粒径碎屑的质量。将大于 10 目 (大于 2 mm)、 $10 \sim 30$ 目 ($0.6 \sim 2 \text{ mm}$) 以及小于 30 目 (小于 0.6 mm) 碎屑粒径分别定义为第 I 类、第 II 类和第 III 类碎屑。因为起伏角 15° 结构面产生的碎屑粒径都较小并且较为统一,对其进行筛分的意义不大,所以只针对起伏角 45° 结构面碎屑粒径质量分布进行分析,如图 10 所示。由图 10 可以看出,随着法向刚度的增加,第 I 类碎屑的占比都是最低的,当法向刚度小于 4 GPa/m 时,第 III 类碎屑占比都达到 50% 以上;当法向刚度为 4 GPa/m 时,第 II 类碎屑占比达到 50% 以上。随着法向刚度的增加,碎屑粒径占比的波动幅度不大,因此结构面发生的破坏模式较为统一,为切齿破坏。碎屑粒径占比具有波动的原因是:法向刚度与法向应力相对应,在剪切过程中产生的碎屑可能被压碎,因此造成了占比的轻微变化。

针对三维扫描得到结构面的空间点云数据,通过 MATLAB 编程计算,可以得到结构面的三维形貌参数。鉴于篇幅及形貌参数演化规律^[38],笔者主要分析的三维形貌参数如下:

- (1) 平均高度 z_3 。结构面上各点高度的平均值。
- (2) 表面最大高差 S_h 。结构面最高点到最低点的垂直距离。
- (3) 表面最大峰高 S_p 。结构面最高点到基准面的距离。
- (4) 轮廓面积比 S_A 。结构面的表面展开面积与垂

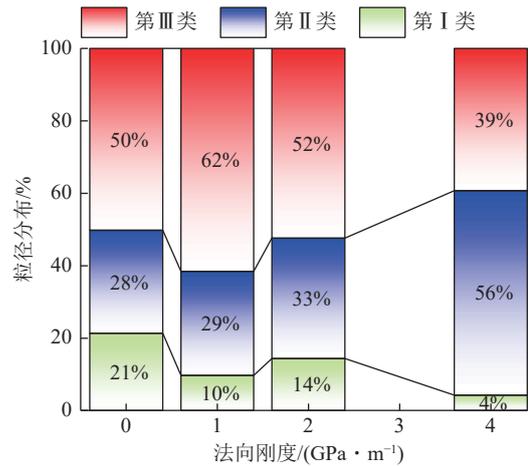


图 10 碎屑粒径占比

Fig.10 Percentage of clastic particle size

直投影面积的比值,计算公式为

$$S_A = \frac{S_t}{S_n} \quad (5)$$

式中, S_t 为表面展开面积; S_n 为表面沿法向方向垂直投影到底面的面积。

(5) 体积 V 。结构面与底部平面所围成空间的体积。

(6) 表面积 S_t 。结构面的表面展开面积。

以起伏角 15° 为例,分析结构面三维形貌参数演化,如图 11 所示,可以看出,随着法向刚度的增加,三维形貌参数都呈现出减速度降低的变化趋势。表明随着法向刚度的增加,结构面破坏程度增加,对应结构面磨损程度增加。根据式 (1)、(2) 可知,力学参数 z_3 与结构面力学性质有较大的联系,因此现主要分析 z_3 的变化趋势。可以看出当剪切刚度从 0 增加到 2 GPa/m 时, z_3 持续降低,当剪切刚度从 2 增加到 4 GPa/m 时, z_3 几乎没有发生变化,对应图 5(a) 和图 5(c),同样看出峰值剪切应力和峰值法向应力几乎没有变化。根据 S_A 的定义,可以看出随着法向刚度的增加,结构面逐渐趋于平缓,对应结构面的破坏加剧。因此结构面的破坏与形貌参数演化具有一一对应关系。

4 结构面动态破坏过程

通过结构面的空间点云数据,可以得到上下结构面各点在同一空间坐标系中的坐标。通过结构面点云数据和法向位移的变化,使用 MATLAB 编程分别计算上下两结构面上每个标识点在不同剪切位移时的空间位置,进而可以分析结构面在剪切过程中的隙宽分布和演化规律。在结构面发生剪切错动时,上下结构面各点处的间距相应变化,且由于结构面的剪胀

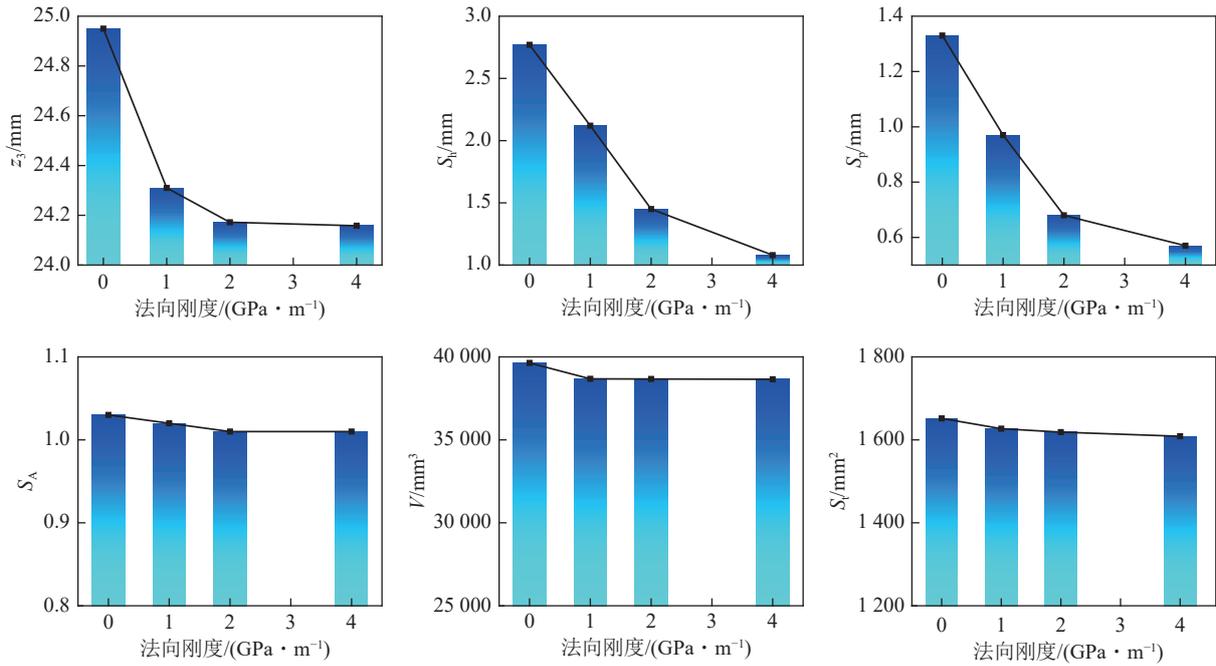


图 11 三维形貌参数演化

Fig.11 Evolution of 3D morphology parameters

效应, 裂隙间距也会受到一定影响。隙宽是指上下结构面间距随空间的分布情况, 其在数值上等于上下结构面处各点 $i_{(x,y)}$ 的 Z 轴坐标之差, 即

$$\Delta_i = z_{iu} - z_{id} \quad (6)$$

式中, Δ_i 为点 $i_{(x,y)}$ 处的隙宽; z_{iu} 为上结构面在点 $i_{(x,y)}$ 处的高度; z_{id} 为下结构面在点 $i_{(x,y)}$ 处的高度。

当剪切位移 $u_n=0$ 时, 上下结构面的空间坐标点分别为 $i_{ou}(x,y,z)$ 和 $i_{od}(x,y,z)$ 。对于剪切位移 $u_n=0$ 时的隙宽分布情况, z_{iou} 和 z_{iod} 就是 z_{iu} 和 z_{id} , 因此可以将 z_{iou} 和 z_{iod} 代入式 (6) 直接进行计算。对于剪切位移 $u_n \neq 0$ 时的隙宽分布情况, 其坐标沿剪切方向发生平移, 因此需要通过坐标变换来计算任意剪切位移 u_n 时上下结构面的坐标。剪切位移为 u_n 时结构面上各点的隙宽可推导为

$$\begin{cases} \Delta_i = z_{iou} - z_{iod}, u_n = 0 \\ \Delta_i = z_{(i+u)ou} - z_{iod} + \delta_n, u_n \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, z_{iou} 为初始状态时上结构面在点 i 处的高度; z_{iod} 为初始状态时下结构面在点 i 处的高度; $z_{(i+u)ou}$ 为初始状态时上结构面在点 $(i+u)$ 处的高度; δ_n 为剪切位移为 u_n 时的法向位移。

结构面隙宽演化破坏判别机理, 如图 12 所示。当剪切位移为 0 时, 如图 12(a) 所示, 因为只有法向应力作用, 所以结构面紧密闭合, 对应隙宽较小且分布较为均匀。当剪切位移为 2.5 mm 时, 如图 12(b) 所示, 结构面隙宽分布分为 2 种情况: 第 1 种为上结

构面齿底和下结构面齿尖接触, 此时隙宽为两边高正中心处最低, 并且由两边向中心逐渐减小。如果此时结构面发生破坏, 则在中心处隙宽值会小幅度增加; 第 2 种为上结构面齿尖和下结构面齿底相对应, 此时隙宽演化为两边低正中心处最高, 并且由两边向中心逐渐增加。若发生切齿破坏, 切断的凸起体充填在结构面之间, 会使得齿底高度增加, 则隙宽值有所降低。当剪切位移为 5 mm 时, 如图 12(c) 所示, 上下结构面吻合, 与剪切位移为 0 相比较, 若此时结构面发生齿尖磨损或切齿破坏, 在齿尖附近的隙宽值较大, 且由两边向中心处逐渐增加; 如果结构面没有发生较大程度的破坏, 则结构面隙宽分布较为均匀。在此之后随着剪切位移的增加, 结构面的隙宽演化分析与以上分析相同, 因此可以通过结构面的隙宽演化与破坏模式相对应。

综上所述, 假若在特定剪切位置处对应的结构面隙宽演化发生改变, 则表明结构面发生了破坏, 同时可根据隙宽分布情况判别结构面发生的破坏模式。

与图 12 中的分析相对应, 本文中结构面在 X 和 Y 正方向的采样范围均为 5~45 mm, 采样间隔均为 0.125 mm。不同起伏角结构面在法向刚度 4 GPa/m 时的动态剪切破坏过程, 如图 13 所示。此处只对剪切位移 $u_n=0, 2.5, 5.0, 7.5, 10$ mm 处进行分析。由图 13 可以看出, 当起伏角为 15° 时, 结构面在剪切过程中, 隙宽较大值出现在凸起体上, 对应剪切位移不同, 结构面的隙宽大小具有不均匀性, 与图 8 中结构

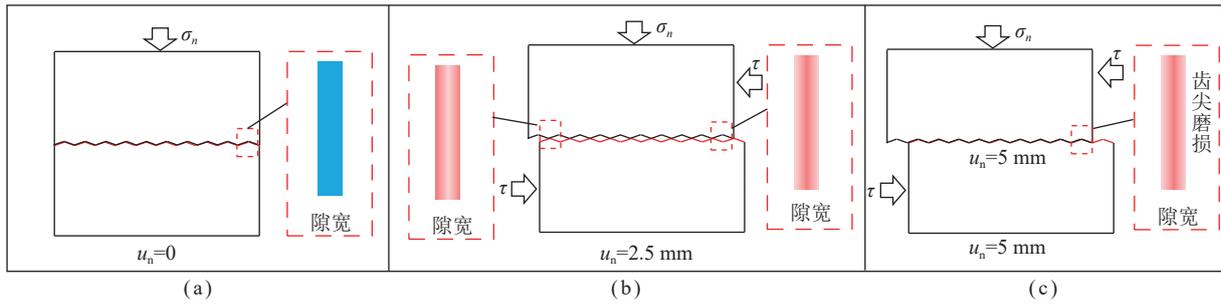


图 12 结构面破坏判别机理

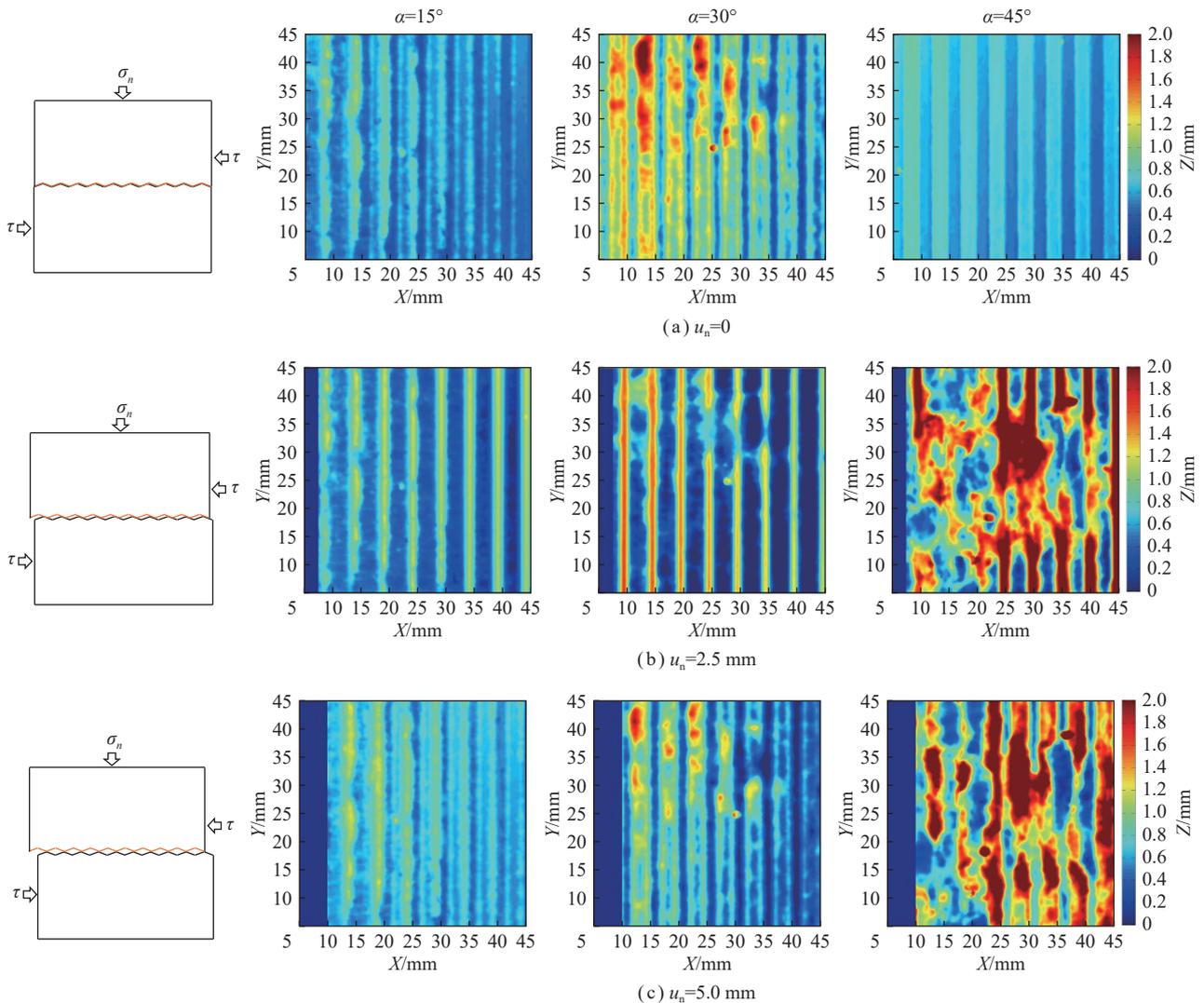
Fig.12 Mechanism of structural plane failure discrimination

面的破坏相对应。可以看出结构面的破坏是沿着剪切位移正方向由前向后进行传递的。在施加剪切位移时,前端的凸起体先承担剪切应力发生破坏,随着剪切位移的增加,结构面上的凸起体的破坏由前向后进行传递,但是大隙宽值和面积的占比不大,表明凸起体的磨损不大,这也是造成剪切应力具有周期性震荡演化的重要原因。

当起伏角为 45°时,可以看出随着剪切位移增加,

隙宽较大值的位置几乎不变,表明当剪切位移为 2.5 mm 时,结构面上的凸起体已经被完全剪断,破坏已经达到稳定,即隙宽较大区域在较小的剪切位移下已经达到稳定,不会随着剪切位移的增加有所改变,同样验证了结构面发生切齿破坏。

当结构面起伏角为 30°时,可以看出结构面隙宽变化介于起伏角为 15°~45°。当剪切位移从 0 增加到 5.0 mm 时,隙宽明显降低;对比剪切位移 5.0 mm



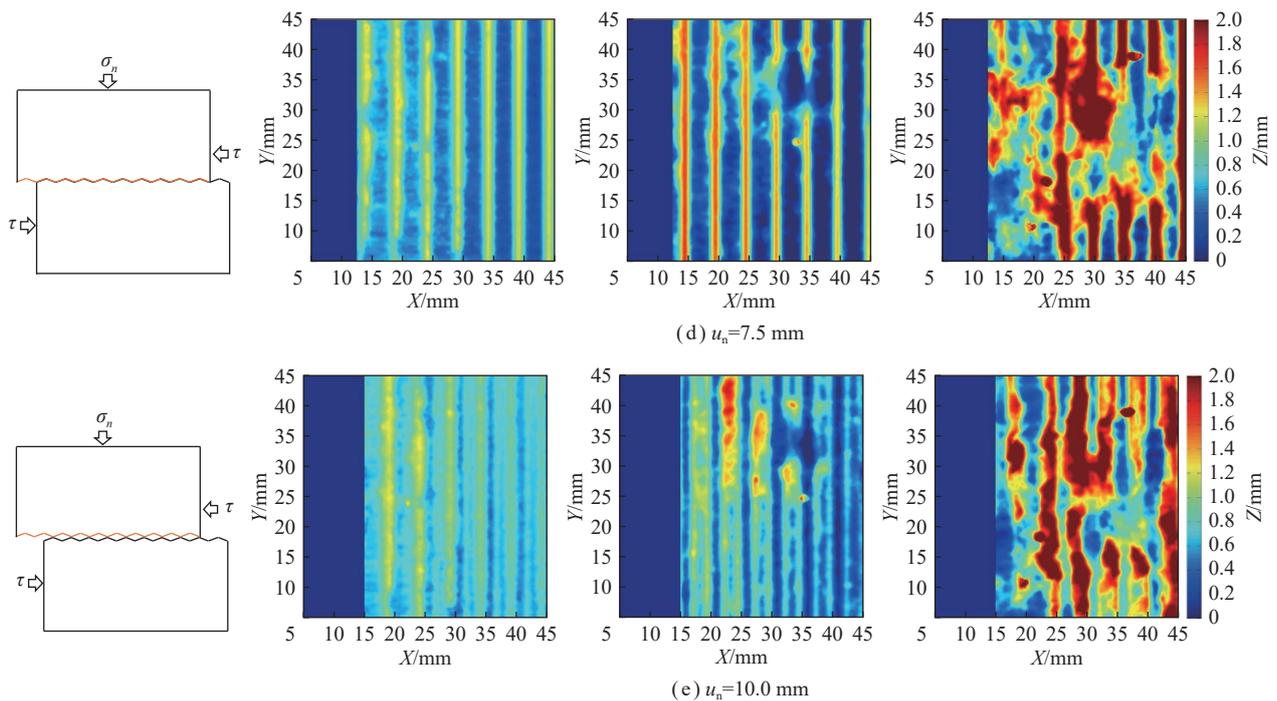


图 13 结构面动态破坏过程

Fig.13 Dynamic failure process of structural plane

和 10 mm 处的隙宽, 两者并没有变化, 说明结构面的破坏已经达到稳定; 同时对比剪切位移 2.5 mm 和 7.5 mm 处结构面的隙宽可以再次得到相同的结论。表明在剪切位移为 5.0 mm 之前, 结构面上的凸起体已经被完全剪断, 之后随着剪切位移的增加, 结构面不会发生较大程度的破坏。通过以上对结构面隙宽演化规律分析得出的结论与其剪切力学性质完全呼应, 从而验证了结构面的损伤演化特性。

5 结 论

(1) 当起伏角为 15° 和 30° 时, 曲线呈现周期性震荡衰减; 起伏角为 45° 时, 剪切应力在达到峰值后迅速降低, 法向位移和剪切应力的演化具有一一对应关系。起伏角 15° 和 45° 结构面的峰值剪切应力呈现出线性增加的变化趋势; 当起伏角为 30° 时, 峰值剪切应力与法向刚度之间没有明显的线性关系, 呈现出分段函数的特征。随着起伏角的增加, 剪切刚度逐渐增加。随着法向刚度的增加, 结构面峰值剪胀角逐渐降低, 峰值法向应力呈现出两阶段的增加方式。

(2) 当起伏角为 15° 时, 结构面在剪切过程中主要发生磨损破坏。当起伏角为 45° 时, 结构面表现为切齿破坏。当结构面起伏角为 30° , 法向刚度较低时, 结构面发生磨损及切齿的复合破坏模式, 之后随着法向刚度的增加, 结构面发生切齿破坏。随着法向刚度的增加, 质量损失逐渐增加, 而三维形貌参数呈减速度

降低, 对应结构面的破坏程度逐渐增加。

(3) 通过特定剪切位移处结构面的隙宽演化提出结构面的破坏判别机理, 得出结构面的破坏是沿着剪切方向由前向后进行传递, 前面的凸起体首先承受剪切应力发生破坏。随着剪切位移的增加, 结构面上的凸起体的破坏同样由前向后进行传递, 这也使得剪切应力演化具有周期性震荡衰减, 从而验证了结构面的剪切损伤演化规律。

参考文献(References):

- [1] GAO M, XIE J, GAO Y, et al. Mechanical behavior of coal under different mining rates: A case study from laboratory experiments to field[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(5): 825–841.
- [2] 高明忠, 陈领, 凡东, 等. 深部煤矿原位保压保瓦斯取芯原理与技术探索[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 885–897.
GAO Mingzhong, CHEN Ling, FAN Dong, et al. Principle and technology of coring with in-situ pressure and gas maintaining in deep coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 885–897.
- [3] 高明忠, 刘军军, 林文明, 等. 特厚煤层超前采动原位应力演化规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(2): 28–35.
GAO Mingzhong, LIU Junjun, LIN Wenming, et al. The law of in-situ stress evolution in advance mining of extra thick coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(2): 28–35.
- [4] 谢和平, 高明忠, 付成行, 等. 深部不同深度岩石脆延转化力学行为研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 701–715.
XIE Heping, GAO Mingzhong, FU Chengxing, et al. Mechanical behavior of brittle-ductile transition in rocks at different depths[J].

- Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 701–715.
- [5] 刘丹, 张博文, 洪陈杰, 等. 岩石结构面两级形貌剪切特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(8): 1434–1442.
LIU Dan, ZHANG Bowen, HONG Chenjie, et al. Shear properties of two-order morphology of rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8): 1434–1442.
- [6] 卢海峰, 朱晨东, 刘泉声. 不同注浆材料作用下结构面剪切力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1803–1811.
LU Haifeng, ZHU Chendong, LIU Quansheng. Study on shear mechanical properties of structural planes grouted with different materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1803–1811.
- [7] 祝艳波, 张宇轩, 李文杰, 等. 粗糙度对硅质板岩-泥岩界面强度与变形特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(7): 1358–1372.
ZHU Yanbo, ZHANG Yuxuan, LI Wenjie, et al. Experimental study on effect of roughness on strength and deformation characteristics of interface between siliceous slate and mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(7): 1358–1372.
- [8] 贾云中, 陆朝晖, 汤积仁, 等. 变速率剪切滑移过程中页岩裂缝稳定性-渗透率演化规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2923–2932.
JIA Yunzhong, LU Zhaohui, TANG Jiren, et al. Friction stability and permeability response of shale fractures during shear slip[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2923–2932.
- [9] MORAD D, HATZOR Y H, SAGY A. Rate effects on shear deformation of rough limestone discontinuities[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 1613–1622.
- [10] 江权, 宋磊博. 3D 打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 23–37.
JIANG Quan, SONG Leibo. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 23–37.
- [11] 芦覃, 黄曼, 洪陈杰, 等. 岩石模型结构面剪切全过程可视化试验技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3369–3379.
LU Tan, HUANG Man, HONG Chenjie, et al. Experimental study on visualization test method of whole process shearing of model rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3369–3379.
- [12] 程坦, 郭保华, 孙杰豪, 等. 非规则砂岩节理剪切变形本构关系试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 51–64.
CHENG Tan, GUO Baohua, SUN Jiehao, et al. Establishment of constitutive relation of shear deformation for irregular joints in sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 51–64.
- [13] 程坦, 郭保华, 孙杰豪, 等. 非规则岩石节理峰值剪切试验与强度经验公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 93–105.
CHENG Tan, GUO Baohua, SUN Jiehao, et al. A strength empirical formula of irregular rock joints based on peak shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 93–105.
- [14] 何刘, 赵志明, 潘越, 等. 连续充填型结构面峰前循环破坏特征及再载强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2027–2037.
HE Liu, ZHAO Zhiming, PAN Yue, et al. Experimental study on the damage properties and reloading strength characteristics of continuous infilled rock joints under pre-peak cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 2027–2037.
- [15] 班力壬, 戚承志, 薛耀东, 等. 基于 3D 打印技术复制砂浆节理的剪切试验及峰值抗剪强度模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 643–650.
BAN Liren, QI Chengzhi, XUE Yaodong, et al. A model for estimating the peak shear strength of rock joints based on 3D quantified surface description[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 643–650.
- [16] 焦峰, 郭保华, 翟明磊. 砂土充填大理岩节理的剪切强度经验公式[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4102–4108.
JIAO Feng, GUO Baohua, ZHAI Minglei. Empirical formula for shear strength of marble joints infilled with sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4102–4108.
- [17] 江权, 李力夫, 冯夏庭, 等. 大型多功能高压岩石结构面剪切伺服试验系统及功能测试分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3159–3169.
JIANG Quan, LI Lifu, FENG Xiating, et al. High pressure shearing servo test system for rock joint with multi modes and corresponding function test analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(9): 3159–3169.
- [18] 夏才初, 喻强锋, 钱鑫, 等. 常法向刚度条件下岩石节理剪切-渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 57–66.
XIA Caichu, YU Qiangfeng, QIAN Xin, et al. Experimental study of shear-seepage behaviour of rock joints under constant normal stiffness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 57–66.
- [19] 周辉, 陈珺, 卢景景, 等. 岩石多功能剪切试验测试系统研制[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1115–1122.
ZHOU Hui, CHEN Jun, LU Jingjing, et al. Development of a multi-functional shear test system for rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1115–1122.
- [20] 夏才初, 钱鑫, 桂洋, 等. 多功能岩石节理全剪切-渗流耦合试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2219–2231.
XIA Caichu, QIAN Xin, GUI Yang, et al. A novel multi-functional shear-flow coupled test system for rock joints and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10): 2219–2231.
- [21] 赵衡, 侯继超, 赵明华. 岩石-混凝土结构面的广义 Patton 剪切模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 41(11): 2106–2114.
ZHAO Heng, HOU Jichao, ZHAO Minghua. Generalized Patton shear model of rock-concrete joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 41(11): 2106–2114.
- [22] 尹乾, 靖洪文, 孟波, 等. CNL 和 CNS 边界条件下砂岩宏观剪切力学特性[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 615–624.
YIN Qian, JING Hongwen, MENG Bo, et al. Macroscopic and microscopic shear mechanical properties of sandstone under CNL and CNS boundary conditions[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(3): 615–624.
- [23] 蒋宇静, 张孙豪, 栾恒杰, 等. 恒定法向刚度边界条件下锚固节理岩体剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 663–675.
JIANG Yujing, ZHANG Sunhao, LUAN Hengjie, et al. Experiment-

- al study on shear characteristics of bolted rock joints under constant normal stiffness boundary conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(4): 663–675.
- [24] 刘日成, 尹乾, 杨瀚清, 等. 恒定法向刚度边界条件下三维粗糙节理面循环剪切力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(6): 1092–1109.
LIU Richeng, YIN Qian, YANG Hanqing, et al. Cyclic shear mechanical properties of 3D rough joint surfaces under constant normal stiffness(CNS) boundary conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(6): 1092–1109.
- [25] HAN G, XIONG F, ZHOU Y, et al. Research progress on the shear characteristics of rock joints under constant normal stiffness boundary conditions[J]. *Shock and Vibration*, 2021, 9670151: 1–6.
- [26] GUTIÉRREZ-CH J G, SENENT S, MELENTIJEVIC S, et al. Distinct element method simulations of rock-concrete interfaces under different boundary conditions[J]. *Engineering Geology*, 2018, 240(5): 123–139.
- [27] 许江, 刘义鑫, 尹光志, 等. 煤岩剪切-渗流耦合试验装置研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 2987–2995.
XU Jiang, LIU Yixin, YIN Guangzhi, et al. Development of shear-flow coupling test device for coal rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 2987–2995.
- [28] 崔国建, 张传庆, 韩华超, 等. CNL 及 CNS 条件下结构面剪切特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S2): 3384–3392.
CUI Guojian, ZHANG Chuanqing, HAN Huachao, et al. Experiment study on shear behavior of artificial joint under CNL and CNS boundary conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S2): 3384–3392.
- [29] 王水林, 郭明伟, 孙冠华, 等. 节理面强度弱化与强化行为的模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(12): 2742–2750.
WANG Shuilin, GUO Mingwei, SUN Guanhua, et al. Modeling of softening and hardening behaviors of the shear strength of rock joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(12): 2742–2750.
- [30] LIU R, LOU S, LI X, et al. Anisotropic surface roughness and shear behaviors of rough-walled plaster joints under constant normal load and constant normal stiffness conditions[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 12(2): 338–352.
- [31] INDRARATNA B, THIRUKUMARAN S, BROWNE T, et al. Modelling the shear behaviour of rock joints with asperity damage under constant normal stiffness[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(1): 179–195.
- [32] LEE Y, PARK J, SONG J. Model for the shear behavior of rock joints under CNL and CNS conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70: 252–263.
- [33] 刘新荣, 邓志云, 刘永权, 等. 峰前循环剪切作用下岩石节理损伤特征与剪切特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(12): 2664–2675.
LIU Xinrong, DENG Zhiyun, LIU Yongquan, et al. An experimental study on the cumulative damage and shear properties of rock joints under pre-peak cyclic shear loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(12): 2664–2675.
- [34] 吴永, 裴向军, 何思明, 等. 贯通滑面咬合凸体的解锁机理及强度分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(8): 251–257.
WU Yong, PEI Xiangjun, HE Siming, et al. Unlocking mechanism and shear strength of interlocked stone asperity on transfixion sliding surface[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 251–257.
- [35] 夏元友, 吝曼卿, 廖露露, 等. 大尺寸试件岩爆试验碎屑分形特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1358–1365.
XIA Yuanyou, LIN Manqing, LIAO Lulu, et al. Fractal characteristic analysis of fragments from rockburst tests of large-diameter specimens[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1358–1365.
- [36] 王来贵, 赵国超, 刘向峰, 等. 滑动过程中砂岩节理摩擦因数演化规律[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 2874–2881.
WANG Laigui, ZHAO Guochao, LIU Xiangfeng, et al. Analysis the evolution of friction coefficient of sandstone joint during sliding process[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2874–2881.
- [37] 赵毅鑫, 龚爽, 黄亚琼. 冲击载荷下煤样动态拉伸劈裂能量耗散特征实验[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(10): 2320–2326.
ZHAO Yixin, GONG Shuang, HUANG Yaqiong. Experimental study on energy dissipation characteristics of coal samples under impact loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(10): 2320–2326.
- [38] 雷娇. 结构面剪切-渗流耦合特性及其充填物作用影响的试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 47–59.
LEI Jiao. Experimental study on shear-seepage coupling characteristics of structural planes with different filling degrees under osmotic water pressure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019: 47–59.