基于离散元的岩体结构面剪切行为分析*

辛文彬[1]，吴鹏[2]，崔松[3]，李乐[4]

（1.应急管理部矿山救援中心， 北京 100013；
2.紫金（厦门）工程设计有限公司长沙分公司， 湖南 长沙 410017；
3.北京建龙重工集团有限公司， 北京 100071；
4.中国平安财产保险股份有限公司北京分公司， 北京 100032）

摘要：岩体结构面在地质工程中起着关键作用，其剪切行为对岩体稳定性和工程安全有着重要影响。为深入了解岩体结构面的剪切行为特征，运用PFC2D对不同粗糙度的规则结构面、不对称结构面、不规则结构面在不同法向应力条件下的力学行为进行分析。结果表明：试件受剪破坏模式可分为结构面沿锯齿表面滑动、结构面沿锯齿表面滑动且锯齿尖端剪断、破坏面由锯齿坡底贯穿至锯齿另一边、结构面锯齿底部完全剪断破坏4种类型；随着法向应力和起伏角的增加，破坏模式从结构面沿锯齿受力侧的边缘滑动，逐渐转变为沿整个锯齿表面滑动，最终演化为锯齿底部完全剪断；结构面剪切强度随着法向应力及起伏角的增加均呈近似线性增长；不规则结构面在初始阶段的剪切应力随剪切位移的增加呈近似直线增大，法向应力与节理粗糙度几乎无相关性。

关键词：岩体结构面；剪切应力；法向应力；破坏模式；起伏角

中图分类号：TD313^{+}.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)08-0147-08

Shear Behavior Analysis of Rock Mass Structural Plane Based on Discrete Element Method

XIN Wenbin[1], *WU Peng*[2], *CUI Song*[3], *LI Le*[4]

(1.Mine Rescue Center of Ministry of Emergency Management of P. R. C., Beijing 100013, China;
2.Changsha Branch, Zijin (Xiamen) Engineering Design Co., Ltd., Changsha, Hunan 410017, China;
3.Beijing Jianlong Heavy Industry Group Co., Ltd., Beijing 100071, China;
4.Beijing Branch, China Ping An Property Insurance Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: The structural plane of rock mass plays a key role in geological engineering, and its shear behavior has an important influence on the stability of rock mass and engineering safety. In order to deeply understand the shear behavior characteristics of rock mass structural plane, PFC2D was used to analyze the mechanical behavior of regular structural plane, asymmetric structural plane and irregular structural plane with different roughness under different normal stress conditions. The results show that the shear failure modes of the specimens can be divided into four types: the structural plane sliding along the sawtooth surface, the structural plane slides along the sawtooth surface and the sawtooth tip is cut off, the failure surface penetrates from the sawtooth bottom to the other side of the sawtooth, and the sawtooth bottom is completely cut off. With the increase of normal stress and undulating angle, the failure mode gradually changes from the structural plane sliding along the edge of the sawtooth force side to the sliding along the whole serrated surface, and finally evolves into the complete shear of the sawtooth bottom. The shear strength of the structural plane increases approximately linearly with the increase of normal stress and undulating angle. In the initial stage, the shear stress of the irregular structural plane increases approximately linearly with the increase of the shear displacement, and the normal stress has almost no correlation with the joint roughness.

Key words: Structural plane of rock mass, Shear stress, Normal stress, Failure mode, Undulating angle

0 引言

岩体结构面作为地质工程中的一个关键因素，其剪切行为对岩体的稳定性和工程安全具有显著影响[1-2]。岩体结构面的力学特性和剪切强度对于工程设计和施工至关重要。在实际工程中，岩体结构面通常表现出不同的几何特征，如粗糙度、对称性及不规则性，这些特征会显著影响其剪切行为[3-5]。

* **收稿日期**：2024-09-13

作者简介：辛文彬（1983—），男，云南玉溪人，工程师，主要从事矿山安全生产和应急管理工作。E-mail：307030557@qq.com

以往研究主要集中于规则和对称的结构面,李海波等[6]、彭勃等[7]采用规则尺寸(长×宽×高=150 mm×150 mm×150 mm)混凝土试件对3种起伏角锯齿结构面进行试验(直剪),得出剪切峰值强度增大的原因是起伏角、法向应力和岩壁强度耦合作用(成正比)。沈明荣等[8]利用规则混凝土试件(长×宽×高=100 mm×100 mm×100 mm)对4种起伏角的规则锯齿结构面进行试验(直剪),揭示了规则结构面受剪后的一系列力学特性,同时建立了相应的经验公式。SEIDEL等[9]基于规则锯齿结构面进行试验,并通过理论分析全面揭示了试验过程中结构面的变形特性(法向及切向),得出剪胀角与有效法向应力成负相关。杨忠平等[10]结合扫描电镜技术,对灰岩结构面进行直剪试验,得出相应的剪切力学特性。陈昊祥等[11]系统阐述了规则结构面破坏模式与剪切特性的联系,为后续研究该内容提供了一定的参考。同时,实验室试验结果还需与实地测量比较,需考虑尺寸效应。由于结构面对较小尺寸试件产生的影响较小,剪切强度随着试件尺寸的减小而增加[12-13],实验室试验得到的剪切强度结果高于实际现场测得的值。此外,实地取材困难,且受到直剪试验设备的限制,难以观察到剪切过程中结构面破坏与裂纹形成、扩展及延伸等微观行为[14-15],且不规则结构面在自然界中广泛存在,其剪切行为更为复杂,因此,研究其力学行为具有重要意义[16]。

本文从理论上探讨了结构面的剪切行为特性,对试件(尺寸大小为80 mm×50 mm)进行了不同类型结构面在不同法向应力条件下的离散元颗粒流模拟。通过对不同粗糙度的规则结构面、不对称结构面和不规则结构面的力学行为进行模拟,得到结构面在不同法向应力下的破坏模式和力学特性。研究结果可为岩体结构面在不同剪切条件下的稳定性评估提供理论依据,对相关工程的设计与施工提供指导。

1 数值模型建立

从力学角度分析,锯齿状岩体结构面的抗剪强度主要由岩石基本摩擦角和起伏摩擦角引起的阻力所构成[17]。在低法向应力条件下,试件会沿锯齿结构面剪动,同时伴随着膨胀现象,此时抗剪强度受到二者的双重影响。其剪切应力的计算公式[18]可表示为:

$$\tau=\sigma_n\tan(\varphi_r+i) \tag{1}$$

式中:τ 为剪切应力,MPa;σ_n 为法向应力,MPa;φ_r 为结构面基本摩擦角,(°);i 为结构面起伏角,(°)。

在高法向应力条件下,试件的膨胀受到抑制,抗剪强度受到的结构面粗糙度影响下降,此时影响抗剪强度的主要来源为试件的摩擦力和黏聚力。其剪切应力的计算公式可表示为:

$$\tau=\sigma_n\tan\varphi_b+C_b \tag{2}$$

式中:C_b 为完整岩石的黏聚力,MPa;φ_b 为完整岩石的摩擦角,(°)。

在实际试验过程中,锯齿状结构面间的错动及滑动、剪断行为会同时发生,需同时考虑两者的共同影响[19]。由式(1)、式(2)可知,在法向应力及结构面不同起伏角的条件下,剪切应力的大小及试件受剪变形破坏的情况也有所不同。结合以上分析,利用PFC软件进行模拟。将试件单位厚度设定为1 m,材料以圆形颗粒作为基本单元,直剪盒以直线墙元素作为边界。确定墙面边界的形状与尺寸后,颗粒材料在边界内以随机排列的方式生成,随后将材料颗粒粒径放大,直到达到设定孔隙率。借助PFC2D中FISH程式对模型进行调校。建立岩石结构面试件后,移除直剪盒顶部墙面,并建立球串颗粒作为法向应力。将下直剪盒墙元件速率设定为0.01 mm/s,由左向右剪动。记录剪切应力、剪切位移、轴向应变数据,剪切试验模拟示意图如图1所示。长方形试件长度为8 cm、高度为5 cm。模型锯齿长度均设定为2 cm,锯齿起伏角 α 分别设定为15°、30°、45°,法向应力设定为4 MPa,剪切速率为0.01 mm/s。建立直剪试验模型所需参数见表1。

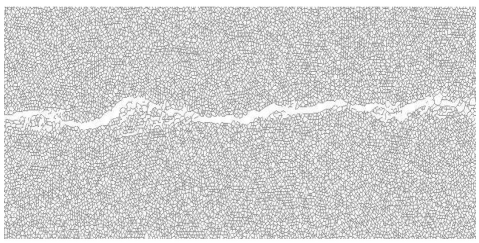


图1 剪切试验模拟示意

Fig.1 Schematic diagram of shear test simulation

表1 直剪试验模型参数

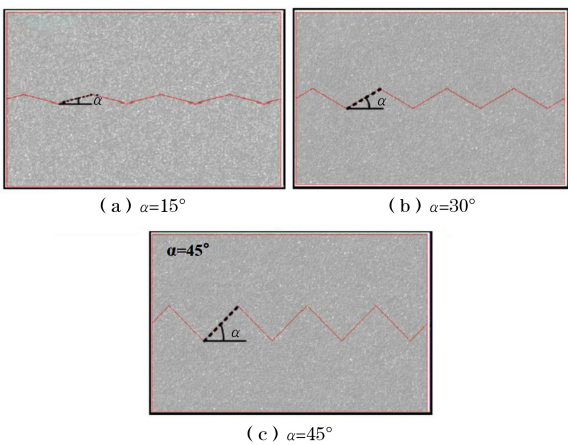
Table 1 Parameters of direct shear test model

颗粒密度 ρ/(kg/m³)	颗粒平均粒径 R_{avg}/mm	粒径比 R_{max}/R_{min}	颗粒杨氏模量 E_c/GPa	颗粒刚度比 k^n/k^s	颗粒摩擦因数 μ	平行黏结法向强度/kPa	平行黏结切向强度/kPa
2 600	0.27	1.1	25	0.6	0.7	10	10

2 规则对称锯齿结构面

2.1 结构面剪切行为

该模型以平均尺寸为 0.27 mm 的球形颗粒作为材料元件,上、下盒试件以墙元件阻隔,试验开始前移除,试件可视为紧密结合。图 2 为起伏角分别为 15°、30°、45°时的规则对称锯齿结构面的模型示意图。图 3 为不同起伏角下的规则对称锯齿结构面剪切应力-剪切位移曲线。由图 3 可知,剪切应力超过峰值强度后,其随着剪切位移的增加呈上下起伏且逐渐减少的趋势。在等值法向应力作用下,剪切强度受起伏角变化影响明显。随着起伏角的增加,剪切强度随之增大。剪切应力较低时(小于 2 MPa),不同起伏角的锯齿结构面的剪切应力-剪切位移曲线近似重合,随着剪切应力的增加(大于 2 MPa),不同起伏角锯齿结构面的剪切应力-剪切位移曲线开始发生分离,且起伏角越大,产生相同应变所需要的剪切应力越大。



(a) α=15° (b) α=30°

(c) α=45°

图 2 规则结构面模型示意

Fig.2 Schematic diagram of rule structural plane model

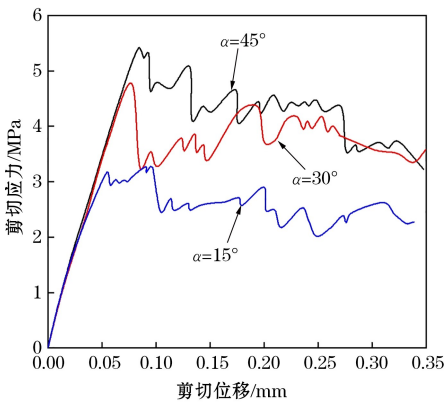


图 3 不同起伏角结构面的剪切应力-剪切位移曲线

Fig.3 Shear stress-shear displacement curves of structural plane with different relief angles

2.2 剪切强度和法向应力的关系

因试件由颗粒材料随机排列生成,考虑到试验结果存在误差,建立 3 组试件进行模拟,并取平均值,得出不同起伏角结构面剪切强度与法向应力的关系曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,不同起伏角试件剪切强度与法向应力均成正相关关系。在较低法向应力条件下,剪切强度上升速度较快,近似直线。随着法向应力逐渐增加,结构面剪切强度增长率逐渐降低。主要是由于初期法向应力的增加使得结构面之间的接触更加紧密,增加了剪切强度。随着法向应力的进一步增加,剪切强度主要受摩擦力影响,而摩擦力的增加呈线性,故剪切强度逐渐趋于平稳。同一法向应力下,剪切强度随着起伏角的增加而增大,主要是起伏角的增大导致剪切应力沿着结构面的作用方向增大,提高了剪切强度。更大的起伏角意味着结构面上的摩擦力和接触力更大,从而增强了整体的剪切强度。

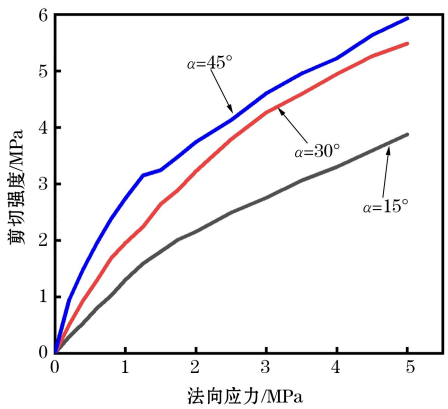


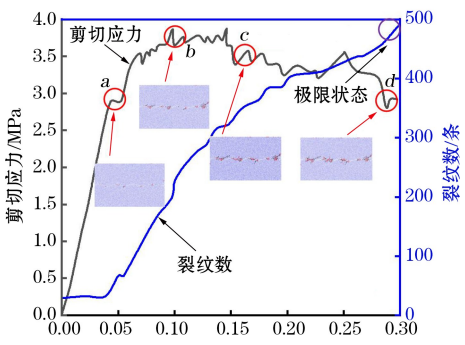
图 4 不同起伏角结构面剪切强度与法向应力关系曲线

Fig.4 Relationship curves between shear strength and normal stress of structural plane with different fluctuation angles

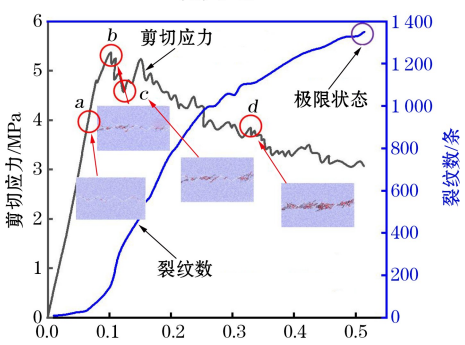
2.3 裂纹形态

对结构面间裂纹发育程度进行观测,不同起伏角下的破坏过程如图 5 所示。由图 5 可知,不同起伏角下结构面剪切位移、剪切应力、裂纹数变化趋势大致相同。起伏角为 15°时,结构面的剪切应力和裂纹数低于 30°和 45°,主要是由于起伏角较小时,剪切应力的传递效果不如较大起伏角。在较小起伏角下,结构面上的摩擦力和剪切力的作用较弱,剪切应力较低,同时,较小起伏角下的结构面更容易形成微裂纹,这些微裂纹在剪切过程中更容易扩展和增

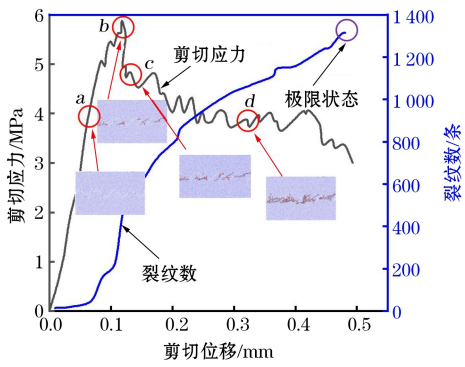
加,导致裂纹数量较少。为探讨直接剪切试验过程中力与位移关系下的裂纹发展与裂纹数量,定义极限状态裂纹数为试验终止时所生成的裂纹数量,以起伏角 45°、法向应力 5 MPa 的试件为例进行分析(见图 5(c)),图中的黑线为张力裂纹、红线为剪力裂纹(颜色标识见电子版)。破坏过程如下:规则结构面试件初始阶段未产生裂隙,随着剪切应力逐渐增大(达到 60%~70%峰值强度时),微裂隙随机生成在结构面受力点附近(*a* 位置处),生成的裂纹数量仅为极限状态裂纹数量的 3.5%;随着剪切应力增加,微裂隙有少量增加,待达到 70%峰值强度后,微裂隙的数量明显增加;当剪切应力达峰值强度时,结构面已有明显张力裂纹(*b* 位置处),但锯齿还未剪断,此时生成的裂纹数量约为极限状态裂纹数量的 22%;经过峰值强度后,试件微裂纹数量急剧增加,张裂纹延伸至锯齿内部,造成部分锯齿有剪断行为发生(*c* 位置处),生成的裂纹数量约为极限状态裂纹数量的 40%。关于破坏面的判定:刚达到峰值强度时,裂纹仍在持续发展,不易判断破坏面;经过峰值强度后,生成的破坏面较为明显,便于测量试件破坏面与水平面的夹角,因此破坏模式的分类以此阶段的破坏示意作为判定。



(a) α=15°



(b) α=30°



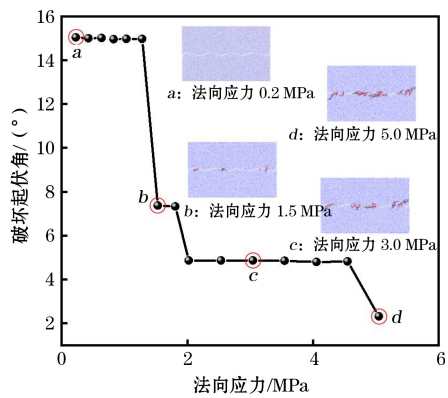
(c) α=45°

图 5 规则结构面直剪试验破坏过程

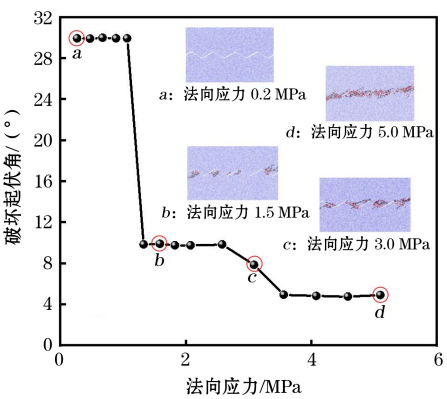
Fig.5 Failure process of regular structural plane in direct shear test

2.4 破坏起伏角

规则结构面试件达到剪切强度峰值时,结构面会出现表面摩擦滑动、滑动破坏、剪断破坏等行为。新生破坏面与水平面的夹角随着法向应力的不同而有所差异[20],进而定义结构面过剪切峰值强度后,产生的破断面方向与水平方向的夹角为破坏起伏角。使用 PFC2D 软件观测黏结断裂形成的裂纹,裂纹在结构面的延伸即为破坏面,破坏时的起伏角使用 VISIO 软件辅助测量。得到不同起伏角下破坏起伏角与法向应力的关系曲线,如图 6 所示。



(a) α=15°



(b) α=30°

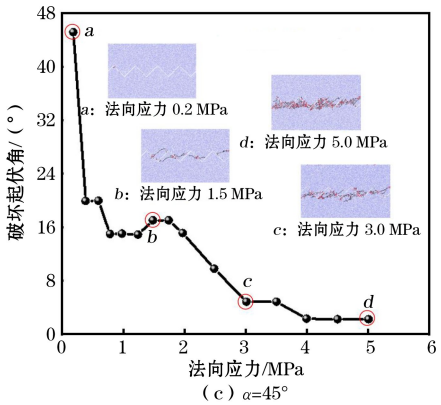


图 6 不同起伏角下破坏起伏角与法向应力关系曲线

Fig.6 Relationship curves between failure fluctuation angle and normal stress under different fluctuation angles

由图 6(a)可知,在低法向应力条件下(σ_n= 0.2～1.25 MPa),结构面没有观察到裂隙生成,测量到破坏起伏角为 15°,此阶段锯齿并未剪断,锯齿间仅沿其表面发生摩擦滑动;法向应力为 1.5 MPa、1.75 MPa 时,结构面受剪产生滑动破坏,锯齿表面有裂纹产生,测量到的破坏起伏角为 7.5°;在较高法向应力条件下(σ_n=2～5 MPa),结构面受到法向应力影响,锯齿同时受剪面的滑动破坏与锯齿尖端的剪断破坏,随着法向应力增加,结构面锯齿底部发生剪切破坏且破坏起伏角从 5°降至 2.5°。由图 6(b)可知,在低法向应力条件下(σ_n=0.2～1 MPa),结构面没有观察到裂隙生成,与起伏角 15°的结构面相比,当法向应力大于 1 MPa 时,不再发生结构面的摩擦滑动;当法向应力为 1.25～3 MPa 时,结构面同时受剪面的滑动破坏与锯齿尖端的剪断破坏,测量的破坏起伏角约为 10°;当法向应力大于 3 MPa 时,锯齿根部近乎剪断,测量到破坏起伏角为 5°。由图 6(c)可知,剪力行为受到高起伏角影响,结构面间的表面摩擦滑动仅发生在法向应力 0.2 MPa 时,与起伏角为 15°、30°的结构面相比,在法向应力为 0.4 MPa 时,便发生受剪结构面的滑动破坏与锯齿尖端的剪断破坏,测量到的破坏起伏角约为 15°;法向应力大于 3 MPa 时,锯齿根部近乎剪断,测量到破坏起伏角为 5°。由此看出,破坏起伏角与剪切强度有一定的相关性。在较低的起伏角下,剪切破坏会沿着较为平坦的区域发生,而在较高的起伏角下,破坏会表现为沿锯齿状的断裂面或沿粗糙的表面滑动。

3 不对称锯齿状结构面剪切行为

由规则对称锯齿结构面模型的模拟结果可知,对称锯齿坡脚角度较大,加上受到法向应力的约束,在受剪过程中,法向应力较小时,锯齿随着锯齿面爬升,发生锯齿尖端剪断现象。法向应力较大时,锯齿无法随着锯齿面爬升,发生锯齿底部剪断现象。由此推测可能存在同时发生锯齿剪断及试件膨胀现象,剪切面为由锯齿坡底贯穿至锯齿另一边。故建立两种规则不对称锯齿模型进行对比,分别为 θ_1=45°、θ_2=8°的模型和 θ_1=45°、θ_2=18°的模型,探讨锯齿结构面坡脚较缓时,试件是否由锯齿坡底贯穿至锯齿另一边,模型及模拟结果如图 7 所示。由图 7 可知,坡脚 θ_1=45°、θ_2=8°的锯齿模型在法向应力为 3 MPa、4 MPa 时,受剪面有裂纹产生,形成一较缓的破坏面,剪切破坏面通过锯齿坡底贯穿至锯齿另一边;坡脚 θ_1=45°、θ_2=18°的锯齿模型在法向应力为 3 MPa 时同样可以观察到剪切破坏面通过锯齿坡底贯穿至锯齿另一边,当法向应力为 4 MPa 时,受法向应力的约束影响,试件锯齿尖端出现剪断现象。

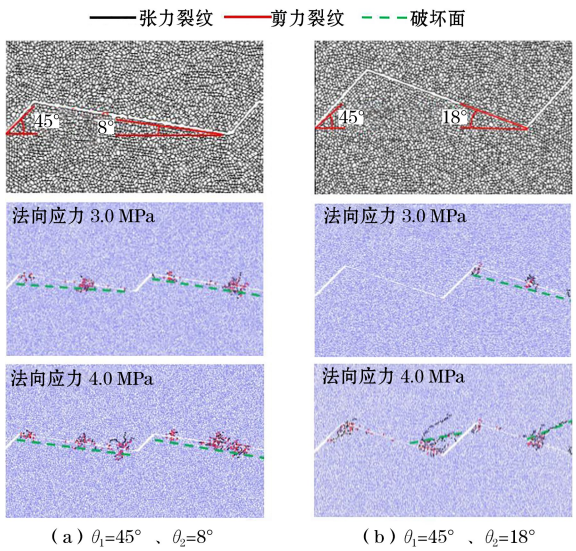


图 7 不对称锯齿状结构面破坏示意

Fig.7 Failure diagrams of asymmetric jagged structural plane

4 不规则结构面剪切行为

4.1 剪切应力-剪切位移

不规则结构面模型如图 8 所示。通过查阅文献[21],设置节理粗糙度系数(Joint Roughness Coffcient, JRC)范围分别为 4～6、10～12、14～16、18～20 四种标准剖面进行模拟,以探究不同粗糙度系数的结构面剪切位移和剪切应力的关系。法向应力为 4 MPa 时,不同节理粗糙度系数结构面的剪切应力-剪切位移曲线如图 9 所示。由图 9 可知,初始阶段,剪切应力随着剪切位移的增加呈近似直线增加,达到峰值剪切强度后,剪切应力随剪切位移的增加呈

上下起伏且逐渐下降的趋势。峰值剪切强度随着JRC值的增加而增大,主要是由于节理面的粗糙度使得接触面之间的摩擦力逐渐增加,阻碍剪切滑动的发生。初始的线性增长反映了节理面粗糙度和初始接触条件对剪切应力的影响,随着剪切位移的增加,在剪切力的作用下,节理面的表面粗糙度和接触力达到了最大抵抗力,节理面开始发生剪切破坏。达到峰值剪切强度后,节理面出现局部滑移或破坏,导致剪切应力在不同剪切位移下发生波动,这种波动也可能与节理面内部的局部剪切变形、微裂纹发展或粗糙度变化有关。随着破坏的发展,节理面逐渐失去抵抗剪切力的能力,使得剪切应力减小。JRC值越高,节理面的粗糙度越大,导致节理面对剪切力的抵抗能力增加。因此,峰值剪切强度会随着JRC值的增加而增大,较高的JRC值提供了更大的摩擦阻力,使得节理面在剪切时能承受更高的应力。在残余应力值上,4种模型的剪切应力相差不大,主要是由于结构面在高法向应力下受剪后产生破坏,粗糙起伏面无法提供阻抗,改由试件颗粒间的摩擦行为提供。因此,初始阶段的线性增长、峰值剪切强度的出现以及应力的波动和减少,都与节理面粗糙度、接触条件和破坏机制密切相关。

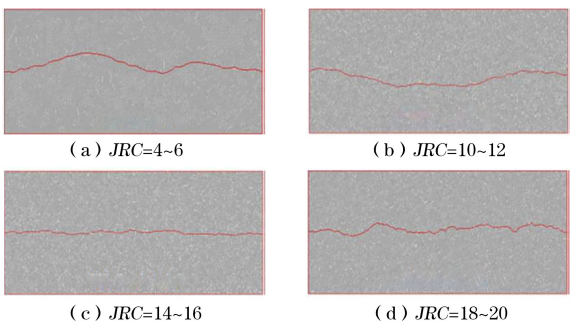


图8 不规则结构面模型

Fig.8 Model of irregular structural plane

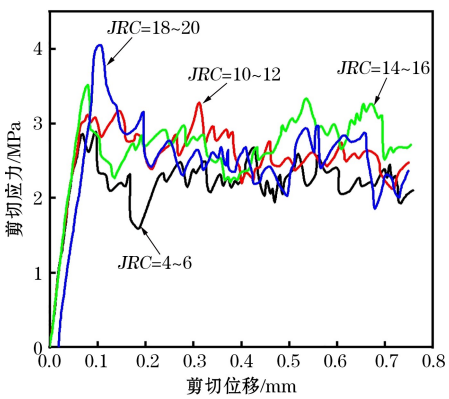


图9 不同JRC值结构面的剪切应力-剪切位移曲线

Fig.9 Shear stress-shear displacement curves of structural plane with different JRC values

4.2 剪切强度-法向应力分析

图10为不同JRC值结构面的剪切强度与法向应力关系曲线。由图10可知,JRC值为4~6时,不规则结构面的剪切强度呈线性增长,摩擦角为35°,剪切行为与基本摩擦试验结果相似。JRC值为10~12时,不规则结构面的剪切强度开始偏离线性增长,根据不同法向应力下的剪切强度计算出的摩擦角略有差异。在低法向应力条件下(σ_n<1 MPa),摩擦角约为55°;在法向应力大于1 MPa后,摩擦角为35°,与材料的基本摩擦角相同。随着法向应力的提高,剪切强度斜率逐渐降低。JRC值为14~16时,不规则结构面的剪切强度则呈抛物线状增长,在低法向应力条件下(σ_n<1 MPa)摩擦角为60°。法向应力提高至1.5 MPa时,结构面上的粗糙起伏面未发挥作用,摩擦角与材料基本摩擦角相同,随着法向应力的提高,剪切强度斜率逐渐降低。JRC值为18~20时,不规则结构面的剪切强度同样呈抛物线状增长,在低法向应力条件下(σ_n<1 MPa),摩擦角为65°,随着法向应力的增加,摩擦角逐渐降低,法向应力为1.75 MPa时,摩擦角与材料基本摩擦角相同。随着法向应力的提高,剪切强度斜率逐渐降低。由此可知,在低法向应力时,结构面的粗糙起伏角对峰值剪切强度的影响较大。但在高法向应力时,结构面发生剪断,剪切行为接近结构面的基本摩擦行为。

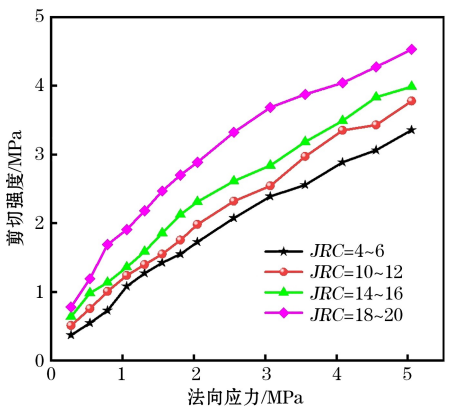


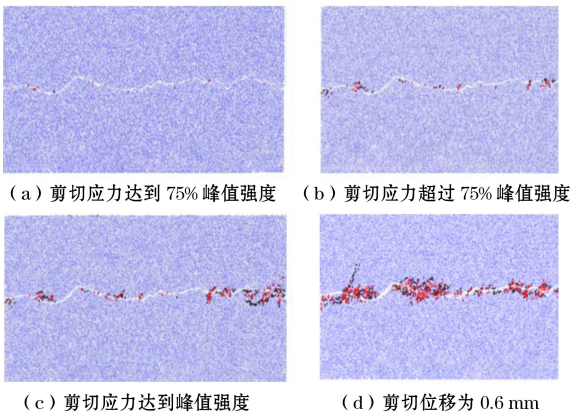
图10 不同JRC值结构面的剪切强度与法向应力的关系曲线

Fig.10 Relationship curves between shear strength and normal stress of structural plane with different JRC values

4.3 不规则结构面破坏过程

JRC值为18~20表示中等不规则性的结构面,这种情况在实际工程中较为常见,可以更好地模拟和分析实际土壤或岩石结构中的常见情况,此时,中等不规则结构面既不会过于光滑,也不会过于粗糙,可以很好地展示其剪切强度和破坏行为的细节,更

清晰地观察到结构面上由于不规则性引发的破坏模式和应力分布。故模拟 JRC 值为 18～20、法向应力为 5 MPa 时不规则结构面的直剪试验,以此为例分析不规则结构面的破坏过程,如图 11 所示。



(a) 剪切应力达到 75% 峰值强度　(b) 剪切应力超过 75% 峰值强度

(c) 剪切应力达到峰值强度　(d) 剪切位移为 0.6 mm

图 11　不规则结构面破坏过程

Fig.11　Failure process of irregular structural plane

图 11 中黑线为张力裂纹,红线为剪力裂纹(颜色标识见电子版)。破坏过程如下:在剪切应力达到 75%峰值强度时,微裂隙随机生成在结构面粗糙起伏处,但裂隙数量不多;随着剪切应力的增加,微裂隙逐渐增加,当剪切应力超过 75%峰值强度后,微裂隙的数量有明显增加趋势;当剪切应力达到峰值强度时,结构面已有明显裂纹生成,裂纹发生在水平方向上 1.5 cm 及 8～10 cm 位置处,超过峰值强度后,裂纹发展速度急剧增加。剪切位移为 0.6 mm 时,结构面的粗糙起伏已彻底破坏,不再发挥阻抗作用,剪切行为接近摩擦行为。

5　结论

(1) 结构面的剪切强度与法向应力及起伏角呈近线性递增关系。试件受剪后破坏模式可分为结构面沿锯齿表面滑动、结构面沿锯齿表面滑动且锯齿尖端被剪断、破坏面由锯齿坡底贯穿至锯齿另一边、结构面锯齿底部剪断 4 种类型。

(2) 随着法向应力和起伏角的增加,岩体的破坏模式由结构面沿锯齿受力侧的边缘滑动,逐渐演化为结构面沿锯齿的整个表面滑动,同时锯齿由底部到另一边被剪断,锯齿底部完全剪断。

(3) 不同节理粗糙度系数的结构面剪切应力在初始阶段随着剪切位移的增加呈近似直线增大。达到峰值剪切强度后,其剪切应力随着剪切位移的增加呈上下起伏且逐渐下降的趋势。峰值剪切强度随着 JRC 值的增加而增大。

(4) 在低法向应力条件下,不规则结构面的粗糙起伏角对峰值剪切强度的影响较大。在高法向应力条件下,不规则结构面发生剪断,此时剪切行为接近结构面的基本摩擦行为。

参考文献(References):

[1] 刘广建,王志成,罗战友,等.加锚岩体结构面抗剪强度尺寸效应试验及机理研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(4):91-101.
LIU Guangjian, WANG Zhicheng, LUO Zhanyou, et al. Experimental and mechanism study on the size effect of shear strength of anchored rock joints[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019,6(4):91-101.

[2] 吴少康,张俊文,徐佑林,等.煤层群采动下围岩应力演化规律及协同控制技术研究[J].煤炭科学技术,2024,52(3):24-37.
WU Shaokang, ZHANG Junwen, XU Youlin, et al. Study on the stress evolution law of surrounding rock and cooperative control technology in coal seam group mining [J]. Coal Science and Technology,2024,52(3):24-37.

[3] 刘亚男,罗艺辉,孙勃,等.异性结构面抗剪特性试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):87-93.
LIU Ya'nan, LUO Yihui, SUN Bo, et al. Experimental study on shear characteristics of heterosexual structural plane[J]. Mining Research and Development,2024,44(1):87-93.

[4] 顾岩,雍睿,沈伟,等.基于轮廓曲线的岩体结构面三维粗糙度获取方法[J].岩土力学,2023,44(增刊 1):485-494.
GU Yan, YONG Rui, SHEN Wei, et al. 3D roughness obtaining method of rock joint based on profile measurement [J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(Suppl.1):485-494.

[5] 史春宇,张志鸿,周杰,等.不同角度结构面岩体的爆破振动传播特性研究[J].矿业研究与开发,2023,43(5):184-189.
SHI Chunyu, ZHANG Zhihong, ZHOU Jie, et al. Research on blasting vibration transmission characteristics of rock mass of structural plane with different angles[J]. Mining Research and Development,2023,43(5):184-189.

[6] 李海波,冯海鹏,刘博.不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2435-2440.
LI Haibo, FENG Haipeng, LIU Bo. Study on strength behaviors of rock joints under different shearing deformation velocities [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(12):2435-2440.

[7] 彭勃,刘亚群,李海波,等.基于三维形貌的节理抗剪强度弱化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(增刊 2):3191-3200.
PENG Bo, LIU Yaqun, LI Haibo, et al. Study on shear strength weakening law of joints based on 3D topograph[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(Suppl.2):3191-3200.

[8] 沈明荣,张清照.规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):713-719.

SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(4):713-719.

[9] SEIDEL J P,HABERFIELD C M. The application of energy principles to the determination of the sliding resistance of rock joints[J]. Rock Mechannics and Rock Engineering, 1995,28(4):211-226.

[10] 杨忠平,向宫固,赵茜,等.水动力-溶蚀作用下灰岩结构面剪切力学特性[J].岩土工程学报,2023,45(8):1555-1563.
YANG Zhongping, XIANG Gonggu, ZHAO Qian, et al. Shear mechanical properties of limestone structural plane under hydrodynamic force-dissolution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(8):1555-1563.

[11] 陈昊祥,王明洋,靳天伟,等.岩石结构面破坏模式与剪切强度关系初探[J/OL].长江科学院院报:1-8[2024-09-11].https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20240829.1337.004.
CHEN Haoxiang, WANG Mingyang, JIN Tianwei, et al. Investigation on relationship between failure patterns and shear strength of rock joints[J/OL]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute:1-8[2024-09-11].https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20240829.1337.004.

[12] 姜政,陈世江,杜广盛,等.相对法向力下结构面峰值剪切力学性质研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):195-202.
JIANG Zheng, CHEN Shijiang, DU Guangsheng, et al. Study on peak shear mechanical properties of structural plane under relative normal force[J]. Mining Research and Development,2024,44(4):195-202.

[13] 陈世江,高臻炜,谷运峰,等.类岩体结构面峰值剪切强度尺寸效应分析[J].矿业研究与开发,2021,41(4):88-95.
CHEN Shijiang, GAO Zhenwei, GU Yunfeng, et al. Size effect analysis of peak shear strength of rock-like structure interface[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(4):88-95.

[14] 杨泽进,张昌锁,王晨龙.岩体结构面直剪力学行为的颗粒流分析[J].太原理工大学学报,2021,52(4):542-546.
YANG Zejin, ZHANG Changsuo, WANG Chenlong. Numerical simulation of the shear mechanical behavior of rock discontinuity during direct shear test with particle flow code[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021,52(4):542-546.

[15] 许江,何美鑫,彭守建,等.不同起伏角锯齿状结构面剪切力学性质及其弱化行为试验研究[J].矿业研究与开发,2023,43(12):124-130.
XU Jiang, HE Meixin, PENG Shoujian, et al. Experimental study on shear mechanical properties and weakening behaviors of sawtooth structural plane with different fluctuation angles[J]. Mining Research and Development, 2023,43(12):124-130.

[16] 李婷.高温及化学腐蚀作用下岩体结构面力学特性研究[D].大连:大连海事大学,2023.
LI Ting. Study on mechanical properties of rock mass structural plane under high temperature and chemical corrosion[D]. Dalian:Dalian Maritime University,2023.

[17] 安宏磊.结构面粗糙度定量表征及其剪切力学特性的颗粒流模拟[D].西安:长安大学,2023.
AN Honglei. Quantitative characterization of structural surface roughness and particle flow simulation of shear mechanical properties[D]. Xi'an:Chang'an University,2023.

[18] 黄达,黄润秋,雷鹏.贯通型锯齿状岩体结构面剪切变形及强度特征[J].煤炭学报,2014,39(7):1229-1237.
HUANG Da, HUANG Runqiu, LEI Peng. Shear deformation and strength of through-going saw-tooth rock discontinuity[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7):1229-1237.

[19] 陈庆贺.岩石力学参数随钻预测实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
CHEN Qinghe. Experimental research on prediction of rock mechanicl parameters while drilling[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2022.

[20] 张志飞,黄曼,唐志成.基于摩擦角修正的异性岩石结构面抗剪强度准则[J].地球科学,2024,49(8):2826-2838.
ZHANG Zhifei, HUANG Man, TANG Zhicheng. Peak shear strength criterion for discontinuities with different rock types based on revisiting frictional angle[J]. Earth Science, 2024,49(8):2826-2838.

[21] 王卫明,高旭,陈诺,等.基于结构面粗糙度随机场表征的抗剪强度变异性[J].科学技术与工程,2024,24(7):2657-2664.
WANG Weiming, GAO Xu, CHEN Nuo, et al. Shear strength variability based on random field representation of rock discontinuities roughness[J]. Science Technology and Engineering, 2024,24(7):2657-2664.