

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1289

不同成因结构面各向异性特征及其剪切力学特性

彭守建^{1,2}, 岳雨晴^{1,2}, 刘义鑫^{1,2}, 许 江^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044)

摘 要: 岩体结构面具有明显的各向异性, 其直接影响岩体的变形特性、力学特性与渗流特性, 因此对结构面的各向异性特征开展量化分析尤为重要。针对不同成因(劈裂、剪切)结构面, 利用结构面量化参数(节理粗糙度系数 JRC、节理平均倾角 θ 、分形维数 D_B)对其各向异性特征进行了分析, 研究了各向异性特征对其剪切力学特性的影响。研究结果表明: (1) 在劈裂断裂结构面中, 平行劈裂方向的 JRC 与 θ 值普遍大于垂直方向, 且随角度变化波动较小, D_B 在对角线方向变化较大, 其值与所取剖面线长度有关; 而在剪切断裂结构面中, 平行剪切方向的 JRC 和 θ 值与垂直方向无明显差别, 但 D_B 同样在对角线方向变化较大; (2) 在评价结构面各向异性时, 采用 θ 、 D_B 等参数评价时, 劈裂断裂结构面与剪切断裂结构面各向异性系数无明显差别, 采用 JRC 作为评价参数时, 其各向异性系数差异较大, 能较好反映不同结构面之间的差异特征; (3) 剪切断裂结构面的峰值剪切荷载和法向位移均高于劈裂断裂结构面, 两种结构面的剪胀角达到峰值时的剪切位移相近, 剪切断裂结构面的开度分布较为集中且普遍较大, 劈裂断裂结构面开度分布则较为分散。

关 键 词: 结构面; 劈裂; 剪切; 各向异性; 力学特性

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 09-3291-09

Anisotropic characteristics and shear mechanical properties of different genetic structural planes

PENG Shou-jian^{1,2}, YUE Yu-qing^{1,2}, LIU Yi-xin^{1,2}, XU Jiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The structural plane of rock mass shows obvious anisotropy, which directly influences the deformation characteristics, mechanical properties and seepage characteristics of rock mass. It is significant to conduct the anisotropic quantitative analysis of the structure surface. In this paper, the anisotropy characteristics of different genetic structure planes are analyzed by the common structural surface quantization parameters (joint roughness coefficient JRC, the average joint angle θ , and fractal dimension D_B), and their influences on the shear mechanical properties are also studied. The results show that in the tensile structure plane, the values of JRC and θ along the direction of splitting are larger than the values of these parameters perpendicular to the splitting direction and fluctuated slightly with the change of the angle. D_B fluctuated largely in the diagonal direction, and its value is related to profile length. In shear structure plane, the values of JRC and θ parallel to the splitting direction have no significant differences from those perpendicular to the splitting direction. However, D_B changes greatly in the diagonal direction. When θ and D_B are used to evaluate the anisotropy of the structure plane, there is no obvious difference in anisotropy coefficients of splitting fracture plane and shear fracture plane. While, when JRC is used as evaluation parameter, the anisotropy coefficient is quite different, which could better reflect the different characteristics of different structural planes. The peak shear load and normal displacement of shear fracture plane are higher than those of splitting structure plane. The shear displacements of the two structural planes are similar when the dilation angle reached the peak value, and the aperture distribution of shear fracture structural plane is relatively concentrated and generally larger. The aperture distribution splitting fracture plane is more dispersed.

Keywords: structure plane; splitting; shear; anisotropy; mechanical characteristics

收稿日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51474040); 重庆市基础与前沿研究计划项目 (No.cstc2018jcyjA3145); 中央高校基本科研业务费 (No.106112017CDJQJ248825)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51474040), the Basic and Frontier Research Projects of Chongqing (cstc2018jcyjA3145) and the Fundamental Research Funds for Central Universities (106112017CDJQJ248825).

第一作者简介: 彭守建, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事矿山岩石力学、煤与瓦斯突出灾害动力学与控制等方面的研究工作。E-mail: sjpeng@cqu.edu.cn

1 引言

工程岩体作为复杂地质体,其内部含有大量的片理、层面、节理和断层等各种类型的结构面^[1]。岩体的稳定性、强度、变形和渗流特征等力学性质与其内部存在的结构面密切相关^[2-3]。这些结构面的形貌存在明显的各质异性、各向异性、尺寸效应等特征,结构面粗糙度是影响结构面剪切力学特性和破坏特征的关键因素之一^[4-6]。因此,开展结构面各向异性特征及其剪切力学特性研究具有十分重要的理论意义与工程应用价值。

目前国内外学者针对结构面粗糙度参数方面研究已取得了较多成果,其中 Barton^[4]提出的节理粗糙性系数 JRC 最具代表性并被广泛应用于工程实践;Beer 等^[7]基于互联网调查系统探讨 JRC 估计值的视觉比较法精度,以便消除可能产生的抽样偏差;Tatone 等^[8]对比分析了二维与三维结构面粗糙度参数,并提出了一种新的三维分析参数;Bizjak^[9]分析了三维结构面粗糙度参数 R_s 并发现其与 JRC 具有较好的相关性;吴月秀等^[10]利用数值方法模拟粗糙节理的角度,运用截断正态分布随机抽样法得出节理凸起高度,研究不同取样长度下各统计参数与 JRC 的回归关系;唐玮等^[11]采用分形和空间灰度共生矩阵结合的方法,得出分形维数与断口的粗糙度和复杂度相关,且利用灰度共生矩阵的每一个二阶统计参数均可精确地描述断口形貌的某一特征;周枝华等^[12]利用非接触式激光扫描仪获得节理面数据并进行分析,发现节理粗糙高度近似于正态分布;孙辅庭等^[13]基于节理轮廓线提出一个剪切粗糙度指标 SRI 描述节理平均起伏度、起伏的方向性、起伏分布特点以及粗糙的分形特性,并建立新指标与 JRC 之间的拟合关系;曹平等^[14]选取 2 种不同岩石试样,通过水岩作用前后形貌分形参数和数理统计参数定量对比,研究水岩作用中温度对岩石节理表面形貌变化影响机制;葛云峰等^[15]采用三维激光扫描技术,获取岩体露头点云数据,利用改进的区域生长法与解析几何理论,实现了岩体结构面智能识别与信息提取。

在结构面各向异性研究方面,Xie^[16]、Feng^[17]、Babanouri^[18]等采用分形维数描述了结构面的各向异性特征;Kulatilake 等^[19]基于分形维数分析了结构面的各向异性,并进一步发现分形参数能够更好地体现结构面各向异性特征;游志诚等^[20]根据 Barton 标准轮廓曲线建立粗糙度系数 JRC 与分形维数 D 之间的函数关系式,并基于 Barton 方程开展

了结构面抗剪强度参数的各向异性研究;陈世江等^[21]基于地质统计学原理,提出变异函数参数与结构面粗糙度 JRC_v 的关系,并采用量纲分析法,给出 JRC_v 表达式以定量表征结构面粗糙度及其各向异性特征;张海鹏等^[22]基于简明直边法计算结构面粗糙度系数,绘出极坐标图,结合各向异性系数评价指标,综合分析表明:起伏幅度和粗糙度系数存在各向异性,两者各向异性规律相似,发育优势方向基本吻合。

岩体在压剪荷载作用下,其裂纹扩展方式主要为张拉裂纹与剪切裂纹,不同的裂纹扩展方式产生的断裂结构面不同。目前研究成果局限于单一结构面粗糙度参数,针对不同成因结构面各向异性特征研究鲜少涉及。此外,含结构面岩体在外荷载作用下发生二次滑移破坏时,其力学性质有所差异。基于此,本文选取应用频率较高的二维结构面粗糙度系数 JRC、节理平均倾角 θ 和分形维数 D_B 对剪切断裂结构面与劈裂断裂结构面的各向异性特征进行对比分析,以期获得最佳表征参数,并开展剪切滑移力学特性研究,为岩土工程稳定性分析提供参考依据。

2 结构面制备及其形貌特征

2.1 试验装置

试验所用装置为自主研发的煤岩剪切-渗流耦合试验装置^[23],如图 1 所示。其中剪切试验系统可自动采集法向力、剪切力、法向位移、剪切位移、法向变形和剪切变形。法向变形和剪切变形由固定于试验机架上的 4 个垂直向 LVDT 位移计和 2 个水平向 LVDT 位移计同时进行监测,文中取变形传感器平均值为位移值进行分析,变形测量分辨率为 0.01 mm。

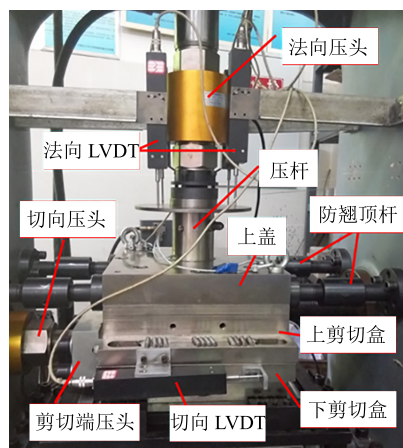


图 1 煤岩剪切-渗流耦合试验装置
Fig.1 Coal rock shear-flow coupling test device

2.2 结构面制备

试验用砂岩取自重庆地区三叠系上统的须家河组,属陆源细粒碎屑沉积岩,粒径为0.1~0.5 mm,主要成分有石英、长石、白云母和燧石等,其密度为2.32 g/cm³,单轴抗压强度为81.04 MPa,黏聚力为11.52 MPa,内摩擦角为67.18°,弹性模量为6.79 GPa,泊松比为0.26。将所选取的岩样加工成100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件。为初步探索不同成因结构面各向异性分布特征,本文选取具有典型代表的劈裂试验获得的劈裂断裂结构面原型和直剪试验获得的剪切断裂结构面作为研究对象,如图2所示。

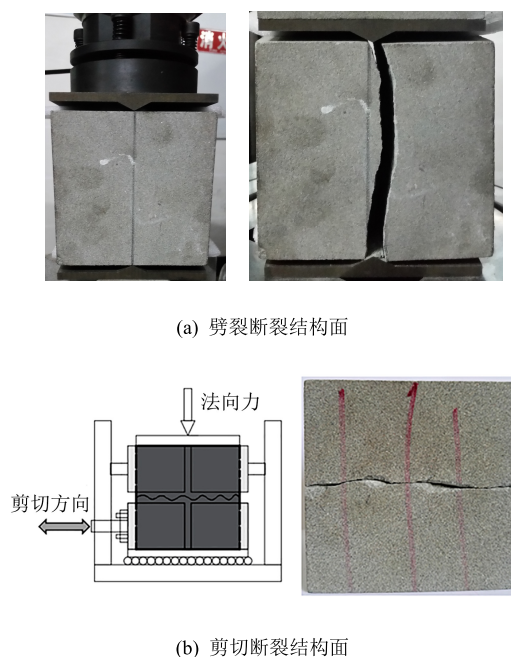


图2 不同成因结构面

Fig.2 Different genetic structural planes

为保证影响因素的一致性,在进行不同试验条件下的含结构面岩样压剪试验时,其结构面应保持一致,而天然结构面无法保持一致并进行重复试验。因此,本文选取相似材料对同一结构面(结构面原型)进行复制并进行不同条件下的剪切试验。基于本文中试验所用岩样为砂岩,故采用与砂岩力学参数相近的水泥砂浆作为相似材料,其配比为:水泥:砂:水(质量比)=3:2:1。采用相似材料制备出来的试样密度为2.05 g/cm³,单轴抗压强度为77.57 MPa,黏聚力为14.37 MPa,内摩擦角为62.39°,弹性模量为5.95 GPa,泊松比为0.18。

用水泥砂浆浇筑含结构面试件时,首先将砂岩上半部结构面原型朝上放入模具盒中浇筑相似材料试件下半部,模具盒与砂岩结构面涂抹一层矿物

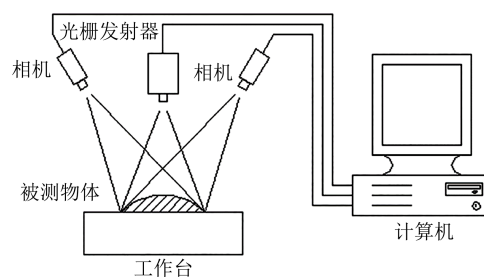
油,便于浇筑相似材料硬化后脱模。待相似材料硬化24 h后脱模,并用浇筑硬化的下半部再次放入模具盒中通过相同的步骤浇筑上半部,待脱模之后放入标准混凝土养护箱养护28 d后进行剪切力学特性试验。浇筑完成的试件如图3所示。



图3 相似材料结构面浇筑试件
Fig.3 Cement mortar replica specimens

2.3 结构面形貌特征

采用OKIO-B型非接触光学三维扫描仪(如图4所示)与三维扫描软件3D Scan对结构面进行三维(3D)扫描,该装置包括一个光栅发射器和两个摄像头,其工作原理为光栅发射器将一系列结构化的黑白光栅条纹投射到岩样表面,由于表面的起伏不一而变形,由两个CCD摄像机自动捕捉,并通



(a) 原理图

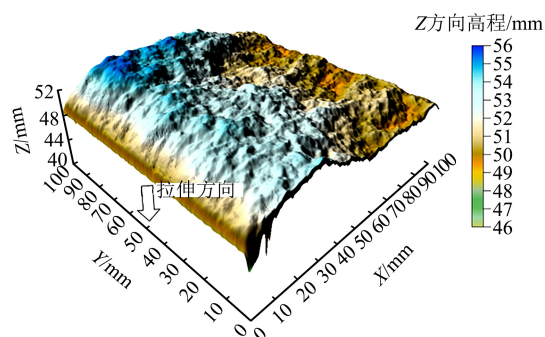


(b) 实物图

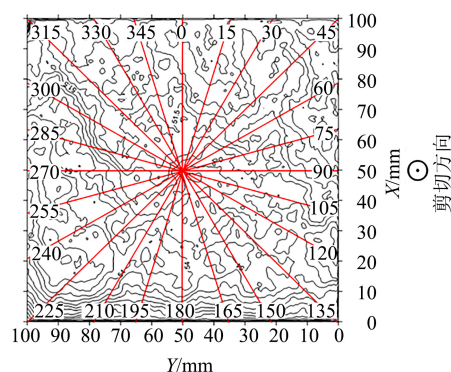
图4 煤岩结构面三维扫描装置
Fig.4 3D scanning device for rock structural surface

过软件计算其三维坐标。其测量精度为 0.02~0.01 mm, 平均扫描点距为 0.15~0.07 mm。获得扫描点数据后利用相关软件对断面形貌图进行后处

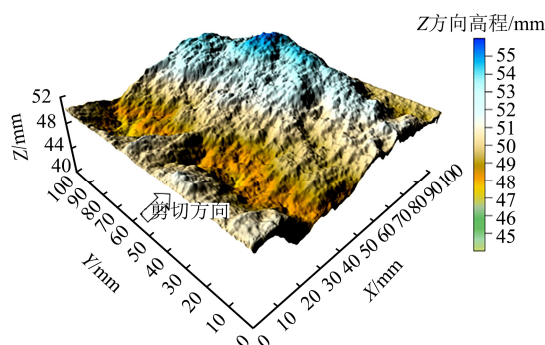
理并提取各方向剖面线, 其中剖面线穿过试件中心呈对称分布, 以 15° 为间隔条件下各方向剖面线及等高线参数值如图 5 所示。



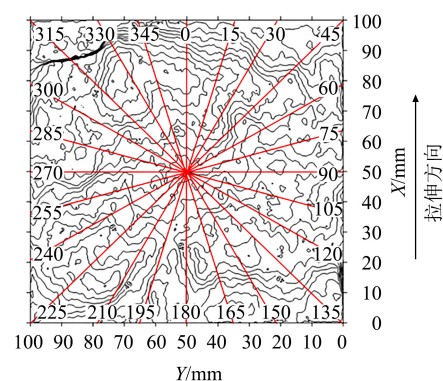
(a) 劈裂断裂结构面三维形貌



(b) 劈裂结构面等高线图及剖面线位置



(c) 剪切断裂结构面三维形貌



(d) 剪切结构面等高线图及剖面线位置

图 5 断裂结构面

Fig.5 Fracture surface

3 结构面形貌特征量化参数

3.1 节理粗糙度系数

Barton^[4]于 1973 年首次提出节理粗糙度系数 JRC, Barton 等^[24]给出了 10 种典型剖面, JRC 根据结构面的粗糙性在 0~20 之间变化, 但该方法存在较大的主观性, 影响测量精确性。本文采用 Tse 等^[25]于 1979 年提出的根据 Z_2 (剖面线一阶导数均方根) 计算 JRC 值, 公式如下:

$$JRC = 32.2 + 32.47 \lg_{10} Z_2 \quad (1)$$

其中:

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dz(x)}{dx} \right)^2} = \left[\frac{1}{m(\Delta x)^2} \sum_{i=1}^m (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: L 为结构面剖面线长度; Δx 为取样点间距; $\Delta y = y_{i+1} - y_i$ 为两相邻两点高度差; m 为采样间隔

数。

3.2 节理平均倾角

Homand 等^[26]于 2001 年提出节理平均倾角参数, 以便计算该参数与结构面抗剪强度之间的关系, 本文采用该参数对结构面各向异性进行分析, 公式如下:

$$\theta = \arctan \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right| \right) \quad (3)$$

3.3 分形维数

Feder^[27]使用盒维数 D_B 作为参数反映岩体中裂隙场的各向异性情况。本文采用该方法计算结构面各向异性参数:

$$D_B = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\lg N(\varepsilon) / \lg \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \right] \quad (4)$$

式中: ε 为小立方体一边的长度; $N(\varepsilon)$ 为用此小立方体覆盖被测形体所得的数目, 维数公式意味着通过用边长为 ε 的小立方体覆盖被测形体来确定形体

的维数。

4 不同成因结构面形貌特征各向异性分析

4.1 节理粗糙度系数的各向异性

JRC 是最为广泛应用的结构面参数之一, 不同成因结构面 JRC 值各向异性如图 6 所示。从图中可知, 劈裂断裂结构面 JRC 值沿劈裂方向大于垂直方向, 剪切断裂结构面中各方向 JRC 值分布较为一致, 沿 135° 方向 JRC 值最大, 变化较为显著。

4.2 节理平均倾角的各向异性

图 7 为不同成因结构面 θ 值各向异性雷达图。

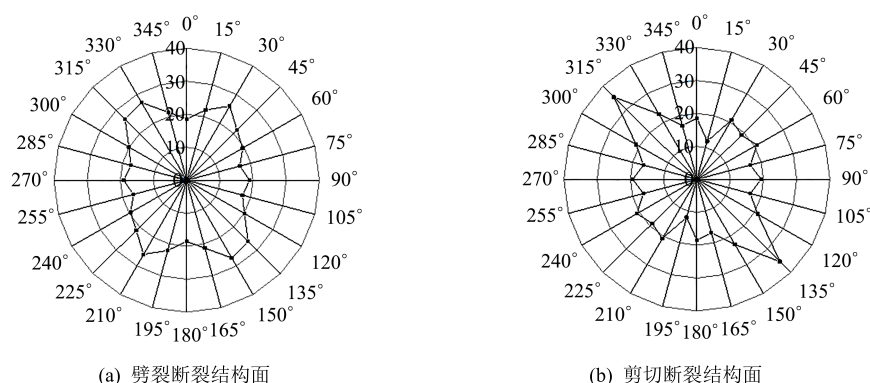


图 6 不同成因结构面 JRC 值各向异性雷达图

Fig.6 Anisotropic radar maps of JRC value of different genetic structural planes

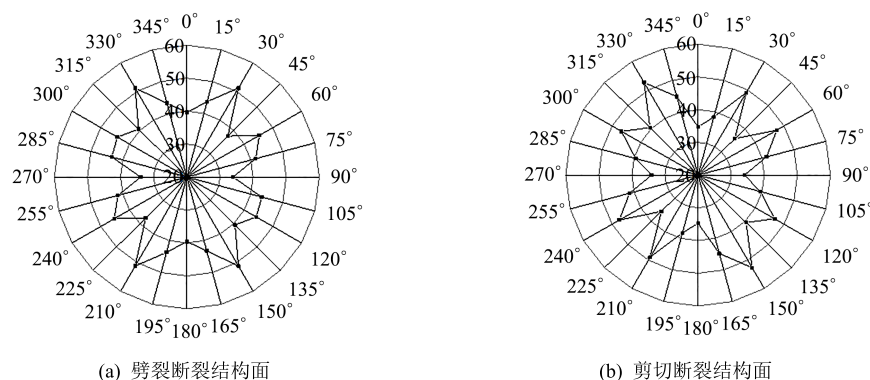


图 7 不同成因结构面 θ 值各向异性雷达图

Fig.7 Anisotropic radar maps of θ value of different genetic structural planes

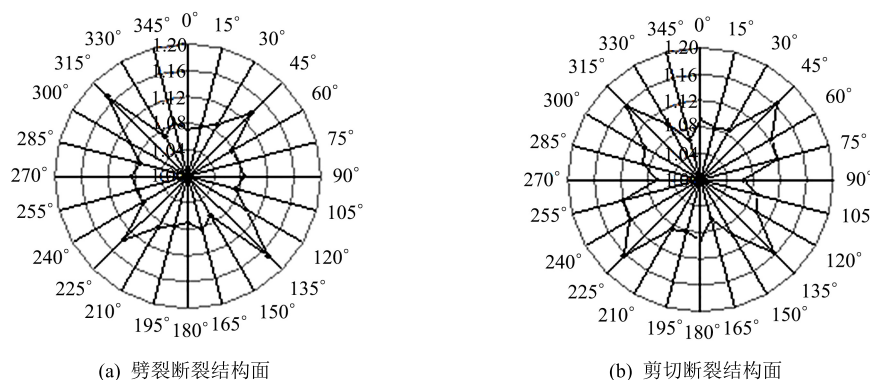


图 8 不同成因结构面 D_B 值各向异性雷达图

Fig.8 Anisotropic radar map of D_B value of different genetic structural planes

由图可以看出, 结构面各方向 θ 值变化波动较大, 其中, 张拉断裂结构面沿劈裂方向 θ 值较高, 说明沿劈裂方向结构面与微凸台起伏角大于垂直方向; 在剪切断裂结构面中, 沿剪切方向 θ 值略高于垂直方向, 在图 7(b) 中, 135° 方向 θ 值并未明显增大, 说明该参数可以减弱由于局部缺陷带来的影响。

4.3 节理分形维数的各向异性

通过盒维数法计算结构面各方向分形维数值 D_B (如图 8 所示), 发现 D_B 值相对其他参数呈现明显的离散性。通过分析发现, D_B 值主要在 45° 与 135° 方向变化较大, 呈明显增大趋势, 针对方形试件, 剖面线长度在 45° 与 135° 方向长度最大, 说明

剖面线长度是影响 D_B 变化的主要因素。

4.4 结构面形貌特征各向异性的量化表征

岩石的各向异性可用最弱方向的物理力学参数与最强方向的参数比来表征, 称各向异性系数

γ ^[27]。本文利用 Matlab 数值软件对结构面各参数进行椭圆拟合(如图 9 所示), 并求得拟合椭圆长轴与短轴长度之比, 得到各参数条件下不同结构面各向异性系数 γ 值, 如表 1 所示。

表 1 不同成因结构面各向异性系数 γ 值

Table 1 Anisotropy coefficient of different genetic structural planes

不同成因结构面	JRC		γ_{JRC}	$\theta(^{\circ})$		γ_{θ}	D_B		γ_{D_B}
	长轴	短轴		长轴	短轴		长轴	短轴	
劈裂断裂结构面	25.778 1	18.892 6	0.732 9	46.372 3	41.307 7	0.890 8	1.113 9	1.097 0	0.984 8
剪切断裂结构面	28.904 9	16.612 0	0.574 7	45.602 8	41.218 0	0.903 8	1.118 7	1.095 8	0.979 5

图 10 为不同结构面各向异性系数对比曲线。由图可知, 选取参数的不同, 结构面各向异性差异较大, 当选 D_B 参数对结构面进行评价时, 其各向异性系数接近 1, 各向异性很弱, 且剪断结构面各向异性系数略高于劈裂结构面; 选用 θ 作为参数对结构面各向异性进行评价时, 其各向异性系数接近 0.9, 且剪断结构面各向异性系数略低于劈裂结构面; 选用 JRC 作为参数对结构面各向异性进行评价时, 各向异性系数明显增强, 且剪断结构面与劈裂结构面差异较大。

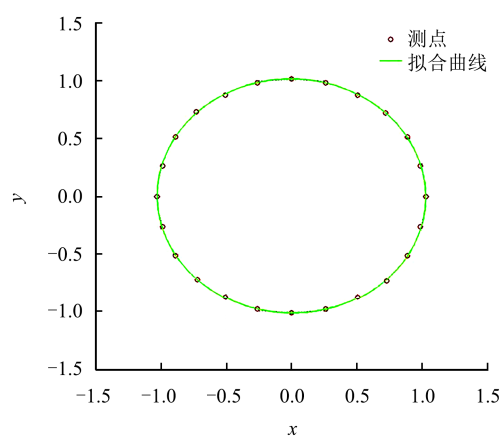


图 9 参数 R_L 各向异性点拟合曲线
Fig.9 R_L anisotropic point fitting curve

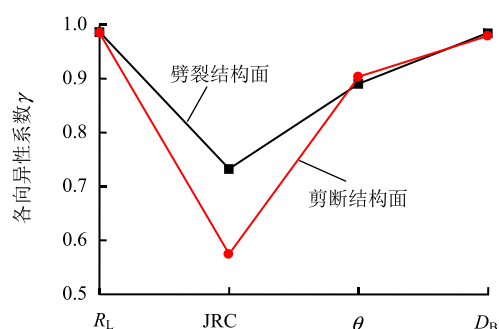


图 10 不同结构面各向异性系数对比曲线
Fig.10 Anisotropy coefficient contrast curves of different genetic structural planes

5 不同成因结构面剪切力学特性

5.1 剪切力学曲线对比分析

图 11 为在不同法向荷载条件下不同成因结构面剪切力学曲线对比。从图中可以看到, 剪切断裂结构面的峰值剪切荷载明显高于劈裂断裂结构面(图 11(a)), 这是由于剪切断裂结构面的起伏度较大, 滑动摩擦角大于劈裂结构面(图 11(b)); 剪切断裂结构面在峰值剪切荷载之后相对劈裂结构面具有明显的降低趋势, 这是由于剪切断裂结构面随剪切位移增大, 具有明显的越过起伏体现象, 而劈裂结构面起伏较小, 剪切荷载达到峰值之后呈缓慢降低趋势。

由图 11(c)可知, 剪切断裂结构面的法向位移明显大于劈裂断裂结构面, 这仍与剪切断裂结构面的较大起伏度有关。从图 11(d)中可以看到, 剪胀角随剪切位移变化趋势仍呈大致 4 个阶段, 在 I 阶段, 剪切断裂结构面的剪胀角低于劈裂结构面, 说明初始状态的剪切断裂结构面吻合度较低; 在 II、III、VI 阶段, 剪切断裂结构面的剪胀角相对大于劈裂结构面, 这是由于随剪切位移增加, 剪切断裂结构面的起伏度更大, 使得剪胀角更大。

值得注意的是, 无论是剪切断裂结构面还是劈裂断裂结构面, 剪胀角峰值(即 II 阶段与 III 阶段的界线)处, 均分布在剪切位移为 1.0~1.5 mm 之间, 这是由于剪切膨胀过程中, 既有粗糙体的影响, 也有起伏体的影响, 在粗糙体与起伏体的复合作用下剪胀角最大。当剪切位移错动越过粗糙体最高值时, 剪胀角保持稳定或有所下降, 也说明了不同断裂方式形成的结构面粗糙体宽度均在 1.0~1.5 mm 之间, 这是由于剪切断裂结构面中的粗糙体也是在断裂过程中由张拉应力产生的。

5.2 开度分布演化规律对比分析

图 12 为在不同法向荷载条件下不同成因结构

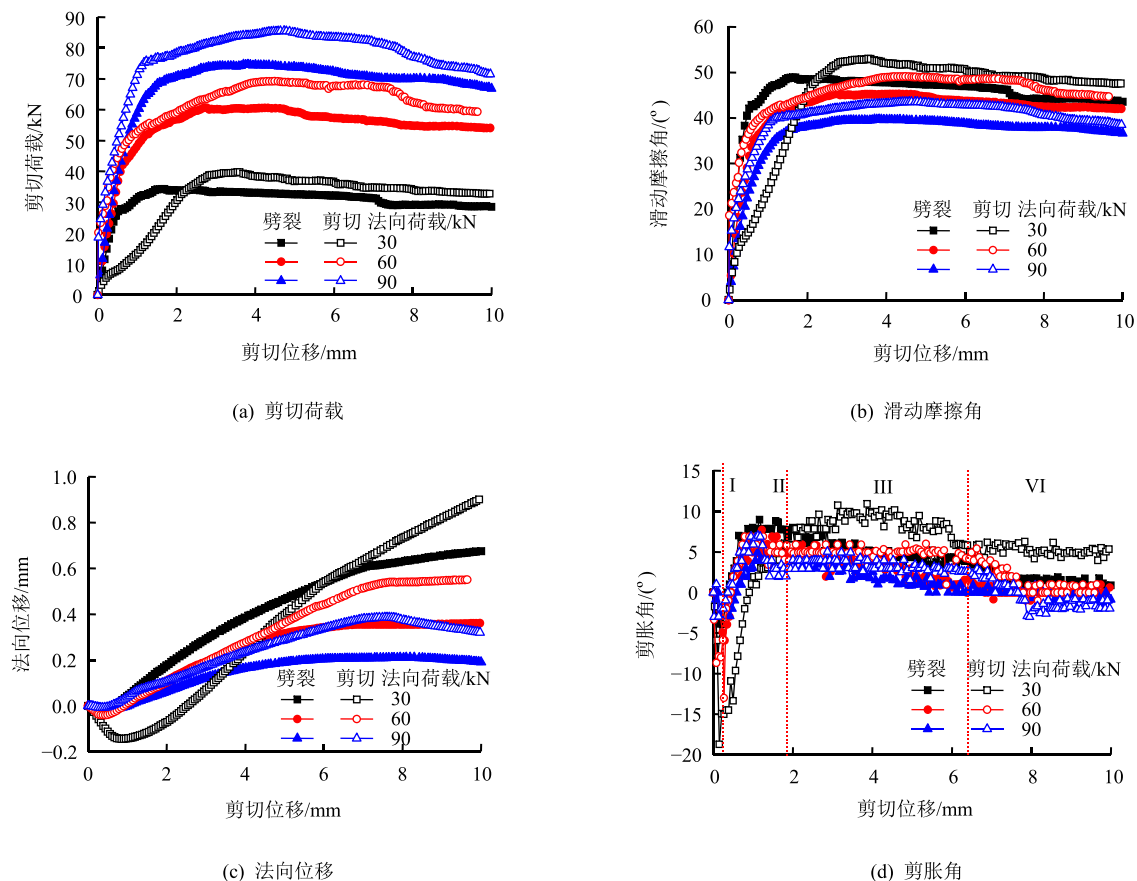


图 11 不同成因结构面剪切力学曲线对比

Fig.11 Comparison of mechanical curves under different genetic structural planes

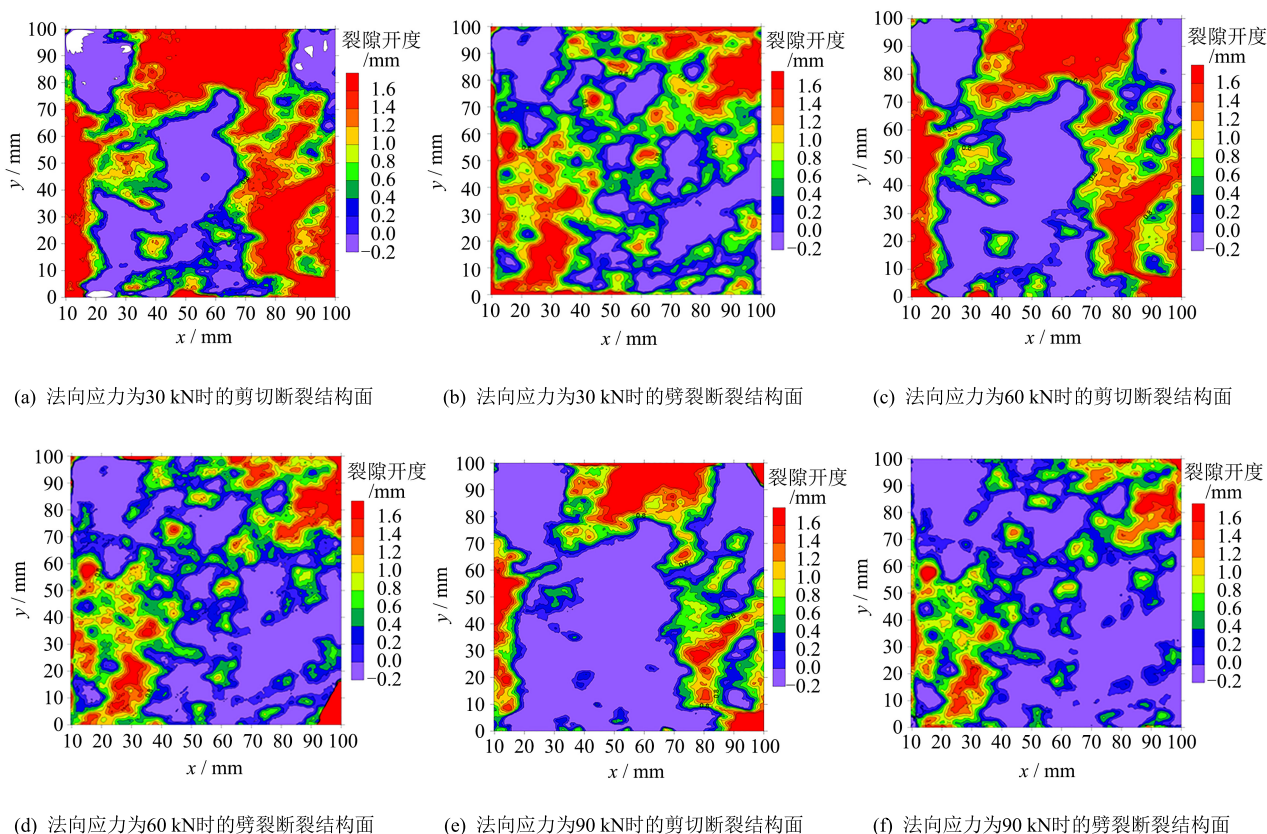


图 12 不同成因结构面裂隙开度分布对比图

Fig.12 Comparative diagram of aperture distribution under different genetic structural planes

面剪切试验结束后裂隙开度分布对比图。从图中可以看到, 剪切断裂结构面的开度分布较为集中, 且开度普遍较大, 大部分在 1.4 mm 以上, 而劈裂断裂结构面开度分布区域较为分散, 且开度处于 0.4~1.2 mm 的所占区域较大。

当剪切断裂结构面发生二次滑移时, 易形成较大渗流通道, 其渗流通道相对集中, 流量较大; 当劈裂断裂结构面发生二次滑移时, 裂隙开度较小, 且连通性较差, 但其更为分散。

6 结 论

(1) 在劈裂断裂结构面中, 平行劈裂方向的 JRC 与 θ 值普遍大于垂直方向, 且随角度变化波动较小, D_B 在对角线方向变化较大, 其值与所取剖面线长度有关; 而在剪切断裂结构面中, 平行剪切方向的 JRC 与 θ 值与垂直方向无明显差别, 但 D_B 同样在对角线方向变化较大。

(2) 在评价结构面各向异性时, 采用 θ 、 D_B 等参数评价时, 劈裂断裂结构面与剪切断裂结构面各向异性系数无明显差别, 采用 JRC 作为评价参数时, 其各向异性系数差异较大, 能较好地反映不同结构面之间的差异特征。

(3) 剪切断裂结构面的峰值剪切荷载和法向位移均高于劈裂断裂结构面, 两种结构面的剪胀角达到峰值时的剪切位移相近, 剪切断裂结构面的开度分布较为集中且普遍较大, 劈裂断裂结构面开度分布则较为分散。

参 考 文 献

- [1] 夏才初, 孙宗欣. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
XIA Cai-chu, SUN Zong-qi. Joint mechanics of engineering rock mass[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.
- [2] 周辉, 程广坦, 朱勇, 等. 基于三维扫描和三维雕刻技术的岩石结构面原状重构方法及其力学特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 417—425.
ZHOU Hui, CHENG Guang-tan, ZHU Yong, et al. A new method to originally reproduce rock structural plane by integrating 3D scanning and 3D carving techniques and mechanical characteristics of reproduced structural planes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 417—425.
- [3] 许江, 瞿佳美, 刘义鑫, 等. 循环剪切荷载作用下充填物对结构面剪切特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1—11.
XU Jiang, QU Jia-mei, LIU Yi-xin, et al. Influence of filling material on the behavior of joints under cyclic shear loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(5): 1—11.
- [4] BARTON N R. Review of a new shear strength criterion for rock joints[J]. **Engineering Geology**, 1973, 7(4): 287—332.
- [5] 张林洪. 结构面抗剪强度的一种确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 114—117.
ZHANG Lin-hong. A determination method of joint shear strength[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(1): 114—117.
- [6] LIU Y, XU J, ZHOU G. Relation between crack propagation and internal damage in sandstone during shear failure[J]. **Journal of Geophysics and Engineering**, 2018, 15(5): 2104—2109.
- [7] BEER A J, STEAD D, COGGAN J S. Estimation of the joint roughness coefficient (JRC) by visual comparison[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2002, 35(1): 65—74.
- [8] TATONE B S A, GRASSELLI G. A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials[J]. **Review of Scientific Instruments**, 2009, 80(12): 125110.
- [9] BIZJAK K F. Determining the surface roughness coefficient by 3D scanner[J]. **Geologija**, 2010, 53(2): 147—152.
- [10] 吴月秀, 刘泉声, 刘小燕. 岩体节理粗糙度系数与统计参数的相关关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2593—2598.
WU Yue-xiu, LIU Quan-sheng, LIU Xiao-yan. Study of relationship between joint roughness coefficient and statistical parameters[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Suppl.1): 2593—2598.
- [11] 唐玮, 朱华, 王勇. 分形和空间灰度共生矩阵联合评价断口形貌研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 530—534.
TANG Wei, ZHU Hua, WANG Yong. Research on morphology of fracture with combined method of fractal and spatial gray level co-occurrence matrix[J]. **Journal of**

- China University of Mining & Technology**, 2006, 35(4): 530—534.
- [12] 周枝华, 杜守继. 岩石节理表面几何特性的三维统计分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1227—1232.
ZHOU Zhi-hua, DU Shou-ji. 3D statistic analysis of geometrical properties of a rock joint[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1227—1232.
- [13] 孙辅庭, 余成学, 万利台. 新的岩石节理粗糙度指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2513—2519.
SUN Fu-ting, SHE Cheng-xue, WAN Li-tai. Research on a new roughness index of rock joint[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(12): 2513—2519.
- [14] 曹平, 宁果果, 范祥, 等. 不同温度的水岩作用对岩石节理表面形貌特征的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 20(4): 1510—1516.
CAO Ping, NING Guo-guo, FAN Xiang, et al. Influence of water-rock interaction on morphological characteristic of rock joint surface at different temperatures[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2013, 20(4): 1510—1516.
- [15] 葛云峰, 夏丁, 唐辉明, 等. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别与信息提取[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3050—3061.
GE Yun-feng, XIA Ding, TANG Hui-ming, et al. Intelligent identification and extraction of geometric properties of rock discontinuities based on terrestrial laser scanning[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(12): 3050—3061.
- [16] XIE H P, WANG J A. Direct fractal measurement of fracture surfaces[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1999, 36(20): 3073—3084.
- [17] FENG Q, FARDIN N, JING L, et al. A new method for in-situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2003, 36(1): 3—25.
- [18] BABANOURI N, NASAB S K, SARAFRAZI S. A hybrid particle swarm optimization and multi-layer perceptron algorithm for bivariate fractal analysis of rock fractures roughness[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 60: 66—74.
- [19] KULATILAKE P H S W, BALASINGAM P, PARK J, et al. Natural rock joint roughness quantification through fractal techniques[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2006, 24(5): 1181—1202.
- [20] 游志诚, 王亮清, 杨艳霞, 等. 基于三维激光扫描技术的结构面抗剪强度参数各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 3003—3008.
YOU Zhi-cheng, WANG Liang-qing, YANG Yan-xia, et al. Anisotropic research on shear strength parameters of discontinuity based on three-dimensional laser scanning technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Suppl.1): 3003—3008.
- [21] 陈世江, 朱万成, 刘树新, 等. 岩体结构面粗糙度各向异性特征及尺寸效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 57—66.
CHEN Shi-jiang, ZHU Wan-cheng, LIU Shu-xin, et al. Anisotropy and size effects of surface roughness of rock joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(1): 57—66.
- [22] 张海鹏, 杜时贵, 雍睿. 基于概率统计的结构面粗糙度各向异性和尺寸效应分析[J]. 科技通报, 2018, 34(1): 65—71.
ZHANG Hai-peng, DU Shi-gui, YONG Rui. Anisotropy and size effects of surface roughness of rock joints based on mathematics statistics[J]. **Bulletin of Science and Technology**, 2018, 34(1): 65—71.
- [23] 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(增刊 1): 2987—2995.
XU Jiang, LIU Yi-xin, YIN Guang-zhi, et al. Development of shear-flow coupling test device for coal rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Suppl.1): 2987—2995.
- [24] BARTON N R, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1977, 10: 1—54.
- [25] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1979, 16(5): 303—307.
- [26] HOMAND F, BELEM T, SOULEY M. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2001, 25(10): 973—999.
- [27] FEDER J. *Fractals*[M]. New York: Springer, 1988: 90.