

充填物性质影响结构面剪切特性试验研究

许 江^{1,2}, 雷 娇^{1,2}, 刘义鑫^{1,2}, 邬君宇^{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: 通过自主研发的煤岩剪切-渗流耦合试验装置, 开展了无充填结构面和充填石膏、岩屑、黄泥结构面的剪切试验。利用三维光学扫描技术, 研究了结构面的三维形貌特征和裂隙开度演化。结果表明: 充填结构面的峰值剪应力和法向位移由充填石膏、岩屑到黄泥依次递减, 受充填物强度影响较大; 无充填结构面由于直接接触, 剪切后表面发生明显磨损, 结构面粗糙度系数(JRC)整体减小且变化最为显著, 充填石膏和岩屑结构面的 JRC 变化次之, 充填黄泥结构面几乎没有变化; 充填物破坏和结构面磨损主要受裂隙开度演化和局部应力集中的影响。随着剪切位移的增大, 在裂隙开度较小的区域, 应力分布较大, 充填物易沿此处破碎, 无充填结构面沿此处严重磨损。

关 键 词: 充填结构面; 充填物; 剪切破坏; 裂隙开度演化

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2019) 11—4129—09

Experimental study on shear behavior of joints filled with different materials

XU Jiang^{1,2}, LEI Jiao^{1,2}, LIU Yi-xin^{1,2}, WU Jun-yu^{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: Based on the self-developed shear-seepage coupling test device for coal rock, a series of direct shear tests was performed on the unfilled joints and joints filled with gypsum, debris, and clay. The 3D optical scanning technology was also employed to examine the morphology and aperture evolution of joints during shearing. The results show that peak shear stress and normal displacement of joints exhibit same regularity, which decreases as filling material varies from gypsum, debris to clay, showing that the nature of filling materials contributes significantly to the shear properties of joints. Unfilled joint is evidently worn after shearing and its JRC decreases most significantly due to direct contacting between the upper and lower surfaces. The JRC of joints filled with gypsum and debris changes relatively little, while it remains nearly the same for joints filled with clay. The materials failure and surface abrasion are mainly controlled by the aperture evolution and local stress concentration. With shear displacement increasing, stress concentrates in the region aperture decreases, where materials failure and abrasion of unfilled joints occurred.

Keywords: infilled joint; filling material; shear failure; aperture evolution

1 引 言

天然岩体中广泛分布着大量结构面, 它们发育演化、交错贯通, 共同构成了岩体的弱面, 削弱了完整岩石的强度。20 世纪以来, 许多工程岩体的失稳破坏, 如滑坡、隧道坍塌、溃堤、岩爆等, 都与不连续面的剪切滑移和破坏有关。由于岩体所受的

地质作用差异, 结构面间的软弱夹层在构造运动和地下水作用下极易软化、泥化。这些不同程度的风化和软化物质以及无充填和充填结构面等, 都为工程岩体的稳定性评估带来了挑战。

目前, 国内外学者对无充填结构面的研究已经取得了一定的试验和理论成果。早期, 以 Bandis 等^[1]为代表的学者通过无充填结构面的压剪试验, 归纳

收稿日期: 2018-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51474040, No. 51434003); 国家科技重大专项 (No. 2016ZX05044-02)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51474040, 51434003) and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2016ZX05044-02).

第一作者简介: 许江, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

总结出了结构面变形与应力间的双曲线关系,给出了较为简单地计算法向刚度和剪切刚度的方法。其中 Barton 等^[2]提出的 JRC-JCS 经验模型由于其简洁性和适用性强,被广泛地应用于岩体的理论研究和工程实践中。随着岩体破坏机制和分析手段的深入发展,肖卫国等^[3]基于结构面剪切破坏时的软化和强化机制,提出了一种新的剪切应力-剪切位移本构模型。唐志成等^[4]通过不同法向应力条件下的剪切变形试验,提出了全程结构面剪切应力与剪切位移的本构方程。此外,关于结构面剪切破坏与结构面表面形态^[5-6]、结构面摩擦角和剪胀角^[7]、结构面剪切方向^[8]、剪切速率^[9]、含水状态^[10]等方面的研究,也完善了无充填结构面研究的理论体系。

充填结构面的力学特性受到结构面壁、充填材料和充填材料-结构面壁交界面等多方面的耦合作用。Pereira 等^[11]研究发现充填材料会削弱结构面强度。Oliveira^[12]、Indraratna^[13-16]、Papaliangas^[17]等通过一系列充填黏土结构面剪切试验,指出充填物越厚,结构面岩石的剪切强度越小,且当结构面岩石的充填度到达某一临界值后,其剪切强度将完全依赖于充填物的性质,而与结构面壁无关。Lu 等^[18]对充填水泥灌浆类结构面进行了剪切试验,发现充填高强度材料的结构面有两个充填度临界值 $(t/a)_{c1}$ 和 $(t/a)_{c2}$, 其中 t 为充填厚度, a 为结构面隙宽。当充填度 $t/a < (t/a)_{c1}$ 时,结构面强度随 t/a 的增加而增加;当 $(t/a)_{c1} < t/a < (t/a)_{c2}$ 时,结构面强度随 t/a 的增加而减小;当充填度 $t/a > (t/a)_{c2}$ 时,强度趋于一定值。

目前已有许多学者对充填结构面进行了相关研究,并指出充填结构面的力学性质与充填度、充填物粒径、颗粒形状和结构面粗糙度等因素有关,但已有的试验研究主要集中于对充填度或某一特定充填物上,关于充填不同物质结构面的研究较少。本文主要研究不同充填物对结构面的剪切破坏作用。通过与无充填结构面的对照试验,对充填不同物质的结构面进行常法向荷载作用下的剪切试验,同时借助三维光学扫描技术,实现结构面表面的磨损分析及其破坏模式的研究。

2 试验方法

2.1 试验方案

Ladanyi 等^[19]为便于研究,将结构面分为 4 类:无充填结构面、愈合结构面、充填黏土类结构面和充填砂砾类结构面。基于此,试验分别选取石膏、岩屑和黄泥作为充填物,利用相似材料制备结构面,

然后将充填物分别充填到相似材料结构面中进行压制成型,得到相应的充填结构面。期间,压制过程中控制压制位移,使所有充填结构面的充填厚度都保持一致。试验过程中以无充填结构面为参照组,以充填石膏结构面、充填岩屑结构面和充填黄泥结构面为研究对象,对这 4 种结构面进行恒定法向载荷下的剪切试验和研究。

2.2 充填结构面的制备

在结构面剪切试验研究中,人工制造的三角形锯齿被广泛地用来模拟结构面凸起。为更加贴合天然结构面形态,试验采用砂岩的劈裂结构面为模板,通过倒模法来制取相似材料结构面,如图 1 所示。先分别以砂岩上下结构面为模板在尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的模具盒内浇筑水泥砂浆(水泥:砂:水 = 3:2:1)并振荡均匀,于室温中静置 1 d 后进行脱模处理,然后放于养护箱中养护 28 d。浇筑出来的相似材料结构面最大起伏高度差 $a = 7.7\text{ mm}$,且与砂岩的力学参数接近,其基础力学参数如表 1 所示。

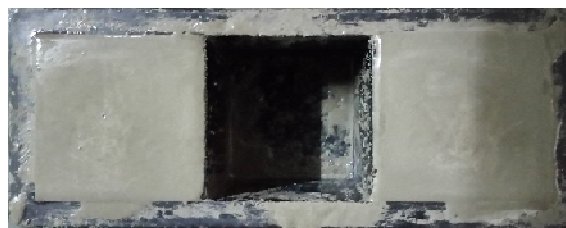


图 1 制备相似材料结构面试件
Fig.1 Preparation of similar materials joints

表 1 基础力学参数
Table 1 Parameters of mechanical properties

试验材料	密度 ρ /(g/cm ³)	单轴抗压强度 σ_c /MPa	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 ϕ_b /(°)	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν
砂岩	2.32	81.04	11.52	67.18	6.79	0.26
相似材料	2.05	77.57	14.37	62.39	6.35	0.24

试验所用充填物为经过破碎、研磨、筛分处理后的石膏、岩屑和黄泥。分别选取经筛分为 0.125~0.150 mm 的石膏、岩屑和黄泥,以物质:水 = 3:1 的比例混合制取充填物,并充填结构面间隙,控制压制位移使充填厚度 $t = 3\text{ mm}$ 。压制成型后的充填结构面如图 2 所示。为减小个别试件对试验结果的影响,每组充填结构面各准备 3~4 个试件。

2.3 试验系统与试验步骤

试验所用剪切试验装置如图 3 所示。由于结构面的剪切性质受到法向荷载的影响,为保持试验条

件的统一, 达到控制变量的目的, 试验采用恒定法向应力加压, 对低法向应力作用下的结构面进行剪切试验, 且该应力条件下不同结构面差异较为明显, 易于试验对比分析。试验时将结构面试件小心放置于剪切盒中, 控制法向应力 $\sigma = 3.0 \text{ MPa}$, 剪切速率 $v = 0.5 \text{ mm/min}$ 。剪切过程中, 控制与数据采集系统会自动读取 6 个位移传感器 (LVDT) 的读数, 并传送至计算机软件进行实时监测。位移传感器采集频率为 0.1 s/次 。在剪切位移达到 10 mm 后停止剪切, 卸载法向应力和剪应力。

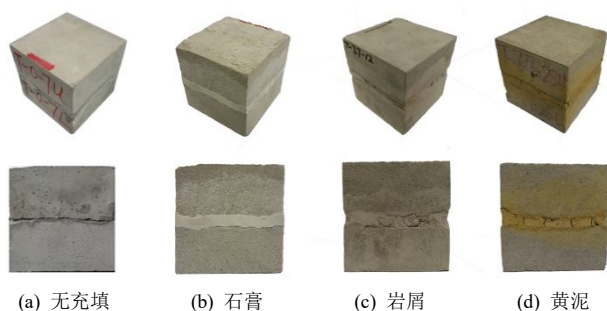


图 2 充填结构面试件
Fig.2 Specimen of infilled joints



图 3 剪切试验装置
Fig.3 Shear test device

为量化分析剪切前后结构面的表面形貌特征, 试验采用北京天远三维科技有限公司生产的非接触光学三维扫描仪对结构面进行扫描, 如图 4 所示。光学扫描具有非接触采集的优点, 平均扫描点距为 $0.07 \sim 0.15 \text{ mm}$, 扫描精度高达 $0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$ 。

3 试验结果及分析

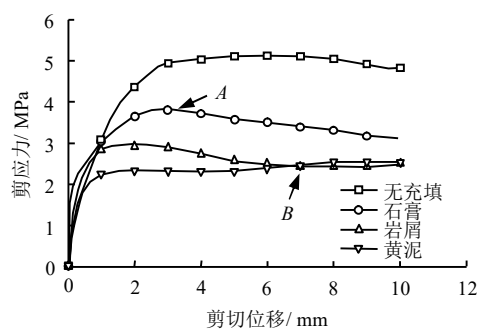
3.1 结构面剪切特性

无充填和充填石膏、岩屑、黄泥结构面的剪切试验曲线如图 5 所示。无充填结构面的峰值剪应力

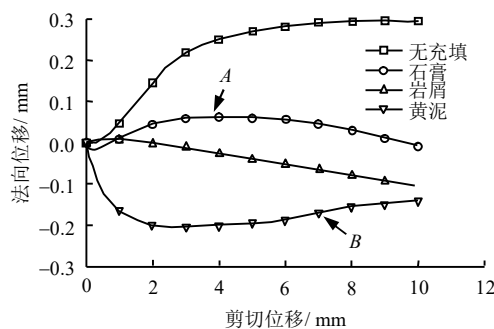
值最大, 且具有明显的爬坡效应和剪胀现象。其剪切特性主要受上下结构面的摩擦影响。



图 4 三维光学扫描仪
Fig.4 3D scanning device



(a) 剪应力-剪切位移曲线



(b) 法向位移-剪切位移曲线

图 5 充填不同物质结构面的剪切力学曲线
Fig.5 Shear mechanical cuves of joints filled with different materials

图 5(a)中, 充填石膏、岩屑、黄泥结构面的峰值剪应力逐次递减。在剪切初始阶段, 剪应力随剪切位移急剧增长, 在达到峰值后逐渐减小。相较于岩屑和黄泥, 充填石膏结构面在达到峰值剪应力前有一段较长的塑性变形区, 与无充填结构面相似。这是由于石膏的强度和硬度较大, 在与结构面作用时不易被挤压变形, 易引起结构面上的微凸体磨损, 期间剪切初始阶段产生的微裂纹进一步扩展发育。

充填岩屑结构面在峰值后,剪应力逐渐降低直至达到残余剪应力。充填黄泥结构面在峰值后即进入滑移阶段,而在点 *B* 后剪应力具有增长的趋势。这是由于黄泥性质较软,压缩性大,在剪切加载初期,法向位移迅速降低。随着剪切位移的增大,在上下结构面错动和剪缩的共同作用下,结构面部分区域裂隙开度较小,该处黄泥被挤压密实,强度增大,使得 *B* 点后的剪应力出现了增大的趋势。

图 5(b)中,充填石膏、岩屑、黄泥结构面的法向位移逐次递减。充填石膏结构面的法向位移以点 *A* 分为 2 个阶段。点 *A* 前,结构面爬坡表现为剪胀;在峰值剪胀点 *A* 后,石膏破碎,剪应力逐渐减小,法向位移也随之减小。

3.2 结构面形貌特征演化

三维光学扫描技术可以精确地识别结构面的表面形貌。为进一步研究充填物对结构面表面的影响,对不同方向上的结构面粗糙度系数 *JRC* 进行研究。*JRC* 的计算有基于结构面表面统计参数的非线性确定方法^[20],目前大多学者采用 Tse 和 Crunden^[21]提出的以坡度均方根来估算 *JRC* 的方法:

$$JRC = 32.2 + 32.47 \lg Z_2 \quad (1)$$

式中: $Z_2 = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{Z_{i+1} - Z_i}{\Delta} \right)^2}$, Z_2 为结构面剖面

线上的坡度均方根; m 为剖面线上的采集点个数; Z_{i+1} 和 Z_i 为相邻两点的高度; Δ 为相邻两点的横向距离。

以往计算二维 *JRC* 时会选取该方向上的 n 条结构面剖面线进行计算,将其平均值作为此方向上的 *JRC*^[22]。这种方法能够方便地计算出 *JRC*,但是在非 0° 和 90° 方向上时,其截取的 n 条剖面线间距各不相同,最大间距为最小间距的 $\sqrt{2}$ 倍,容易造成采样误差。本文通过一种新的优化算法,利用 Lorentz 变换和插值的思想,计算了间隔 15° 共 12 个方向上的 *JRC* (见图 6),实现了所有方向上等间距取样的目的。计算过程所使用的 Lorentz 变换和插值思想,主要利用了 MATLAB 中的 `makehgtform` 函数和插值函数,将原本所有方向上都使用的 n 条采样剖面线变成了可以根据方向自由调节采样剖面线条数的算法,从而保证了所有采样剖面线的间距相等,如在 45° 方向上的剖面线在算法优化后由 n 条变成了 $\sqrt{2}n$ 条,即实现了采样剖面线由相同采样条数到相同采样间距的优化。无充填和充填石膏、

岩屑、黄泥结构面在不同方向上的 *JRC* 分布及其三维形貌特征如图 7 所示。

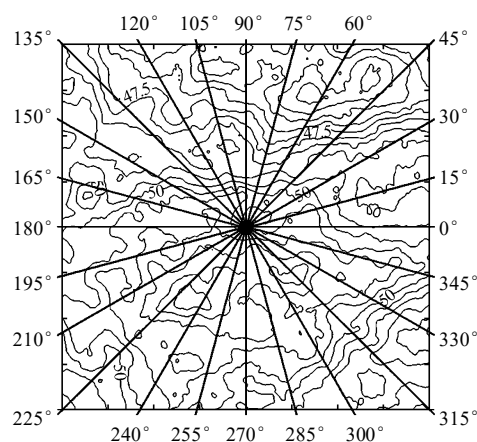


图 6 结构面剖面线方向分布图
Fig.6 Distribution map for joint profile directions

图 7 中,不同方向上结构面的 *JRC* 互不相等,并呈现为纺锤形状,表明结构面具有明显的各向异性。无充填结构面在剪切后的 *JRC* 总体减小,说明结构面在剪切过程中会发生了明显的摩擦,引起表面凸起不同程度上的磨损,反映在三维形貌图中虚线标示出的凸起磨损区域。而充填结构面的 *JRC* 受结构面和充填物性质的综合影响:

(1) 充填石膏结构面在剪切后三维形貌没有明显的起伏变化,其 *JRC* 较于无充填结构面也变化较小,只在剪切方向上有些微减小。由于石膏在较小厚度下,不足以影响结构面的整体起伏状况,但对于结构面上的微小粗糙体有磨损作用,因而引起了结构面起伏度无明显变化而 *JRC* 略有减小的现象。

(2) 充填岩屑结构面在剪切后也表现出 *JRC* 减小现象。这是由于与结构面壁接触的岩屑颗粒容易附着于结构面壁表面上,并随之碾压迁移,充填于结构面壁的凹槽中,使结构面在剪切方向上的 *JRC* 减小,同时形成一层密实稳定的岩屑-结构面壁膜,如图 8 所示。屈服破坏后的岩屑颗粒与岩屑-结构面壁膜易发生相对错动和滚动摩擦,有利于结构面的整体滑移。图 5 中充填岩屑结构面在峰值剪应力后的应变软化现象,即与这种具有低摩擦系数的岩屑-结构面壁膜有关。

(3) 充填黄泥结构面在剪切后 *JRC* 和表面形貌都没有明显变化。这是由于黄泥强度和硬度较低,与结构面作用时被压密和挤出,难以对结构面的起伏状况和粗糙凸体造成直接的影响。

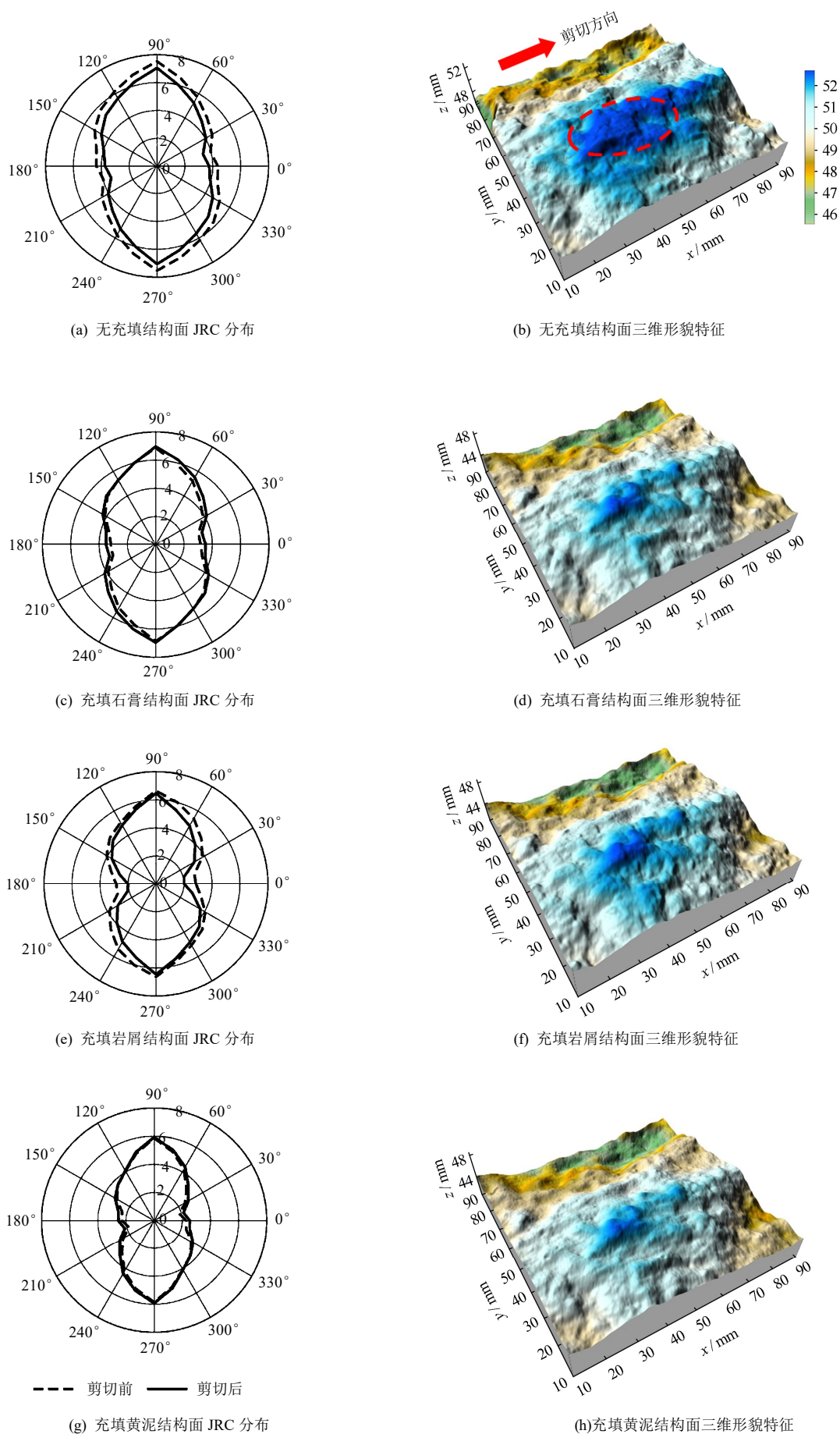


图 7 充填不同物质结构面在不同方向上的 JRC 分布及其三维形貌特征
 Fig.7 JRC in different directions and morphology of joints filled with different materials

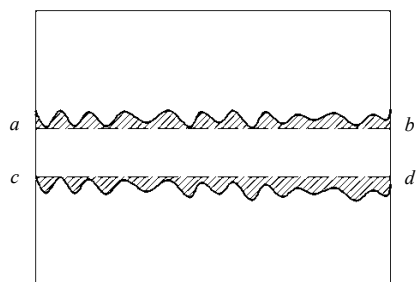


图8 岩屑-结构面壁膜
Fig.8 Membrane of debris-joint walls

4 结构面剪切破坏过程

图9为下结构面剪切后的表面形貌图。图中无充填结构面在虚线所示区域内有明显的磨损擦痕，充填石膏结构面在虚线区域内也发生了充填物的大贯通破坏。两虚线所示区域接近，说明在此区域内，结构面具有较大的应力集中现象。

为研究充填结构面在剪切作用下的破坏过程，基于结构面的点云数据和剪切时法向位移的变化，通过编程分别计算上、下结构面上每个标识点在不同剪切位移时的空间位置，进而分析结构面在剪切过程中的裂隙开度分布情况和演化规律。无充填结构面和充填石膏、岩屑、黄泥结构面分别剪切 1、3、6、10 mm 后的裂隙开度分布如图 10 所示，其右侧图例为上下结构面间裂隙开度的数值大小，单位为 mm。图中所有结构面在剪切 $u = 6$ mm 时的隙宽形态已基本成型，且表现出明显的区域性。在图中虚线所示位置，裂隙开度普遍随剪切的进行而逐渐减小，实际剪切时结构面的表面磨损位置也大多集中在这些区域内。剪切全过程中，无充填结构面的裂隙开度普遍增大，表现为剪胀现象。充填结构面的裂隙开度则出现了不同程度的减小，表明结构面发生了剪缩，且剪缩程度因充填物性质而各异。其中黄泥的剪缩程度最为严重。特别地，对于充填

石膏结构面，剪切 3 mm 后，其裂隙宽度增长区域略多于减小区域，与图 5 所示剪胀现象一致，随后裂隙开度减小区域越来越多。

将结构面裂隙开度分布与剪切后的表面形貌（见图 9）对比，可以发现一致的剪切特征。对于无充填结构面，由于剪切方向上的起伏变化，只有图 9(a)中虚线所示区域附近出现了明显的磨损。这是由于结构面起伏差异，导致了剪切过程中实际受力发生磨损的区域并不是整个结构面，而是集中在某些特定区域内。充填石膏结构面更能体现出这种局部应力集中引起区域性破坏的特征。以石膏为例，在图 9(b)中虚线所示区域处，石膏发生了大的贯通破坏，并以此为界分为两部分随结构面运动。随上结构面运动的石膏较好地黏结在结构面上，随下结构面运动的石膏在剪切时再次出现裂纹，并向周围扩展发育，使得石膏更为破碎。

为进一步分析充填结构面在剪切过程中的破坏历程，以下结构面为基准，迭代运算剪切 10 mm 范围内结构面的理论受力分布情况，如图 11 所示。图中应力集中区域主要分布于结构面左上角到右下角的弧形虚线附近。联系图 9 中的无充填结构面表面擦痕及充填物破坏形态和图 10 中的结构面裂隙开度分布情况，该应力集中区域与裂隙开度减小、磨损擦痕、充填物裂隙大贯通的区域一致。因此结构面的局部应力集中和裂隙开度减小正是导致充填物屈服破坏的主要因素。

充填结构面的破坏过程可简化为图 12 所示，其中实线和虚线代表起伏度，红色凸起为微凸体。结构面对剪切破坏的影响体现在起伏度和粗糙度上，因此无充填结构面滑移破坏时，同时磨损起伏度和微凸体，反映为试验过程中图 7(a)、7(b)所示结构面壁明显的损伤和 JRC 减小现象。对于充填结构面，剪切时强度和硬度较大的充填物，如石膏等能够使

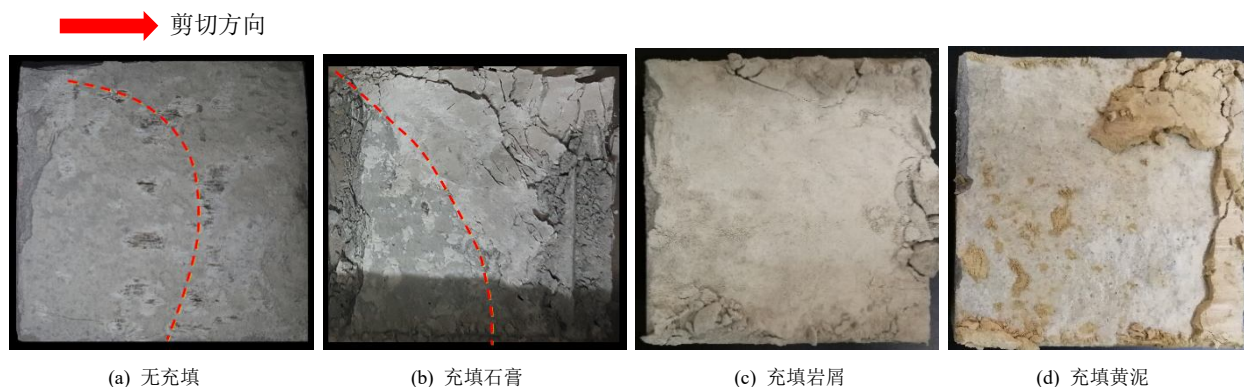


图9 结构面剪切后的表面形貌图
Fig.9 Surface morphology of joints after shearing

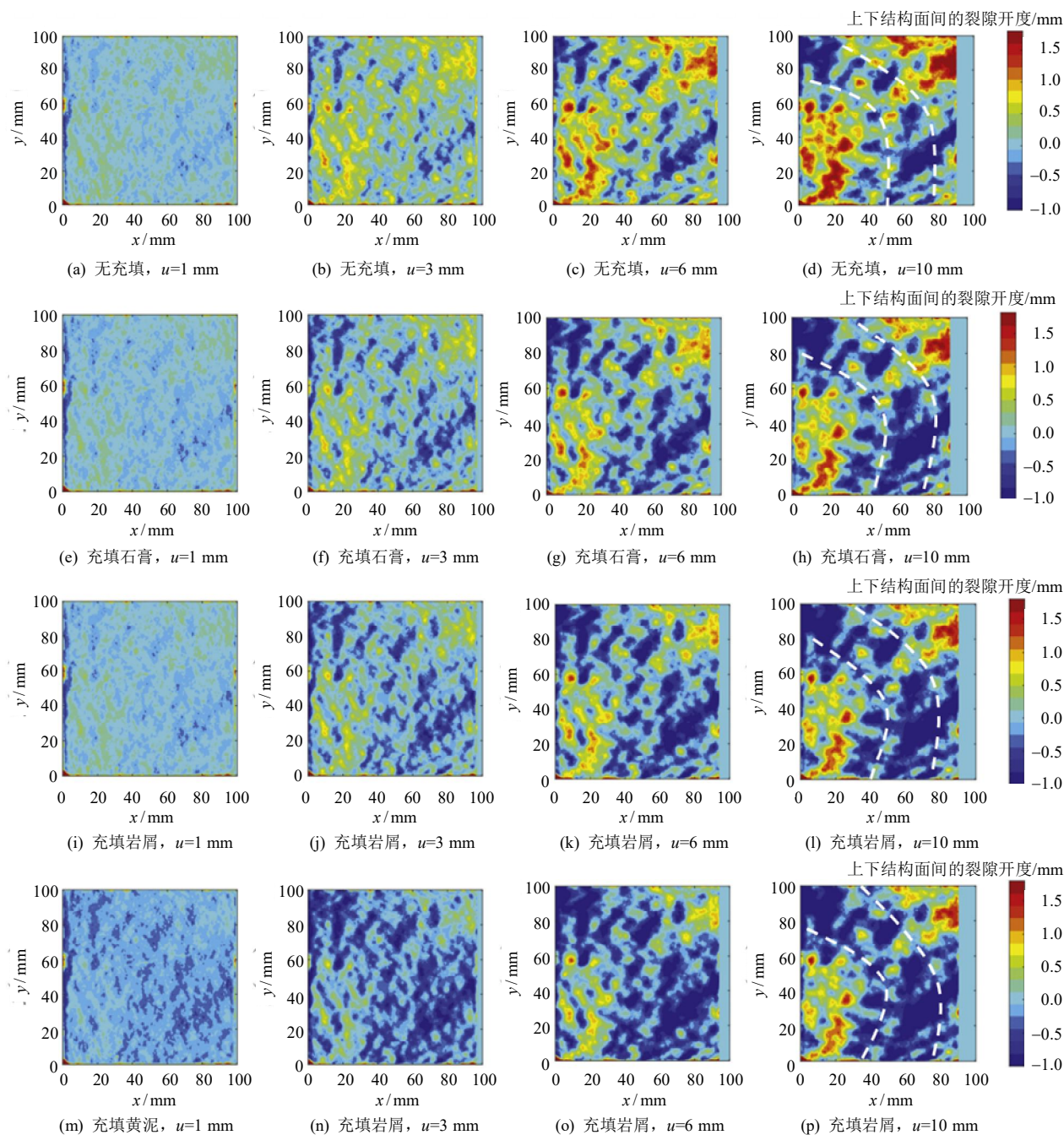


图 10 结构面的裂隙开度随剪切位移变化的演化图

Fig.10 Evolution diagrams of aperture within joints during different shear displacements

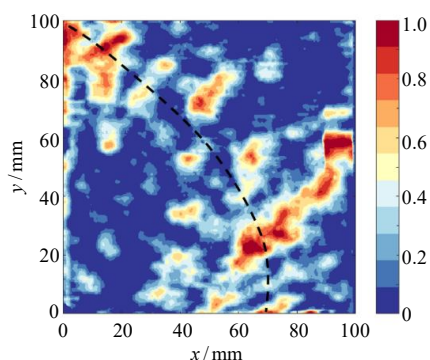
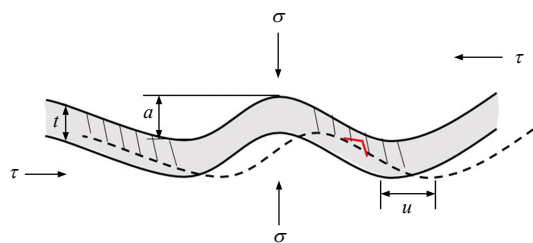


图 11 结构面的理论受力分布图

Fig.11 Theoretical force distribution of the lower joint

微凸体剪断, 使结构面 JRC 降低, 但难以影响结构面的宏观起伏程度, 如图 7(c)、7(d)所示; 而强度和硬度较小的充填物, 如岩屑和黄泥等对结构面不易产生磨损, 或磨损不明显, 因此图 7(e)、7(f)和图 7(g)、7(h)中结构面的形貌变化较小。在图 12 中, 剪切位移为 u 时, 阴影区域结构面的裂隙开度减小, 局部应力增大。此处结构面壁上的微凸体若与强度较大的充填物作用, 则容易被剪断, 此处的充填物受局部应力易发生破断, 具体表现为图 9(b)中充填石膏在剪切后沿应力集中区破断为两部分, 其破断

分界处即为图 12 中阴影区域所示的应力集中区。若充填物的黏结性和塑性较大,如黄泥,则阴影区域的充填物密实度较之于其他区域将有更大的提升,增大黄泥强度,如图 5 所示充填黄泥结构面在 B 点后的剪应力和法向位移都出现了增大现象。



注: σ 为法向应力; τ 为剪应力; t 为充填厚度; a 为结构面隙宽。

图 12 充填结构面剪切过程示意图

Fig.12 Schematic of shear process of infilled joints

5 结 论

(1) 充填结构面的峰值剪应力随充填物性质变化,由石膏、岩屑到黄泥依次递减,法向位移也逐次递减,且只有充填石膏结构面具有剪胀现象。

(2) 无充填结构面在剪切后会发​​生表面磨损,结构面 JRC 减小;充填石膏结构面只对粗糙体有局部磨损, JRC 略有减小;充填岩屑时由于岩屑-结构面壁膜的作用,结构面的 JRC 减小较多;对于剪切前后 JRC 的变化情况,整体上有无充填结构面变化最为明显,充填岩屑结构面次之,充填黄泥结构面变化最小。

(3) 充填物因性质不同表现出不同的破碎现象;结构面的磨损和充填物的破坏区域受局部应力集中区的影响,分布于裂隙开度减小的结构面壁上,其剪切破坏过程受结构面起伏度和粗糙体,充填物的性质共同影响。在剪切进行时,不仅需要考虑结构面起伏度与粗糙度的影响,也应考虑到由充填物压紧、挤出和裂隙开度变化,促使结构面进一步磨损的情况。

参 考 文 献

[1] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1983, 20(6): 249—268.

[2] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. **Rock Mechanics**, 1977, 10(1—2): 1—54.

[3] 肖卫国, 兑关锁, 陈铁林, 等. 剪胀和破坏耦合的节理岩体本构模型的研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(12): 2535—2543.

XIAO Wei-guo, DUI Guan-suo, CHEN Tie-lin, et al. A study of constitutive model coupling dilatancy and degradation for jointed rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2535—2543.

[4] 唐志成, 夏才初, 肖素光. 节理剪切应力-位移本构模型及剪胀现象分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(5): 917—925.

TANG Zhi-cheng, XIA Cai-chu, XIAO Su-guang. Constitutive model for joint shear stress-displacement and analysis of dilation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(5): 917—925.

[5] 曹平, 范祥, 蒲成志, 等. 节理剪切试验及其表面形貌特征变化分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(3): 480—485.

CAO Ping, FAN Xiang, PU Cheng-zhi, et al. Shear test of joint and analysis of morphology characteristic evolution of joint surface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 480—485.

[6] 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.

[7] 尹显俊, 王光纶, 张楚汉. 岩体结构面切向循环加载本构关系研究[J]. **工程力学**, 2005, 22(6): 97—103.

YIN Xian-jun, WANG Guang-lun, ZHANG Chu-han. Study of constitutive model for rock interfaces and joints under cyclic shear loading[J]. **Engineering Mechanics**, 2005, 22(6): 97—103.

[8] 范文臣, 曹平, 张科. 不同压剪应力比作用下节理类岩石材料破坏模式的试验研究[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2015, 46(3): 926—932.

FAN Wen-chen, CAO Ping, ZHANG Ke. Experiment study on failure style of jointed rock-like material under different compressive-shear stress ratios[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2015, 46(3): 926—932.

[9] 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 Hai-bo, FENG Hai-peng, 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.
- [10] 唐佳, 彭振斌, 吴启红, 等. 水对节理岩体剪切特性影响的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1232—1236.
- TANG Jia, PENG Zhen-bin, WU Qi-hong, et al. Test study of effect of water on shear characteristic of rock joint[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2014, 45(4): 1232—1236.
- [11] PEREIRA J P. Rolling friction and shear behaviour of rock discontinuities filled with sand[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(3—4): 241—244.
- [12] OLIVEIRA D A F, INDRARATNA B, NEMCIK J. Critical review on shear strength models for soil-infilled joints[J]. **Geomechanics and Geoengineering**, 2009, 4(3): 237—244.
- [13] INDRARATNA B, JAYANATHAN M, BROWN E T. Shear strength model for overconsolidated clay-infilled idealized rock joints[J]. **Géotechnique**, 2008, 58(1): 55—65.
- [14] INDRARATNA B, WELIDENIYA H S, BROWN E T. A shear strength model for idealized infilled joints under constant normal stiffness[J]. **Géotechnique**, 2005, 55(3): 215—226.
- [15] INDRARATNA B, HAQUE A, AZIZ N. Shear behaviour of idealized infilled joints under constant normal stiffness[J]. **Géotechnique**, 1999, 49(3): 331—355.
- [16] INDRARATNA B, OLIVEIRA D, BROWN E T, et al. Effect of soil-infilled joints on the stability of rock wedges formed in a tunnel roof[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(5): 739—751.
- [17] PAPALIANGAS T, HENCHER S R, LUMSDEN A C, et al. The effect of frictional fill thickness on the shear strength of rock discontinuities[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1993, 30(2): 81—91.
- [18] LU Y L, WANG L, LI Z, et al. Experimental study on the shear behavior of regular sandstone joints filled with cement grout[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 50(5): 1321—1336.
- [19] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Shear strength and deformability of filled indented joints[C]//Proceedings of the 1st International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Formations. [S. l.]: [s. n.], 1977: 317—326.
- [20] 王昌硕, 王亮清, 葛云峰, 等. 基于统计参数的二维节理粗糙度系数非线性确定方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 565—573.
- WANG Chang-shuo, WANG Liang-qing, GE Yun-feng, et al. A nonlinear method for determining two-dimensional joint roughness coefficient based on statistical parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 565—573.
- [21] 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.
- [22] 游志诚, 王亮清, 葛云峰, 等. 结构面粗糙度系数的三维分形表征[J]. 人民长江, 2014, 45(19): 63—67.
- YOU Zhi-cheng, WANG Liang-qing, GE Yun-feng, et al. Three-dimensional fractal representation of joint roughness coefficient[J]. **Yangtze River**, 2014, 45(19): 63—67.