

DOI: 10.11779/CJGE202011006

赋存结构面粉砂质泥岩力学性能弱化机制研究

张淑坤^{1, 2}, 王来贵³, 陆璐², 王树达¹, 冯佃芝¹

(1. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 枣庄学院城市与建筑工程学院, 山东 枣庄 277160;

3. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 结构面对岩体物理力学性能具有弱化作用, 直接影响岩石工程的稳定性。以煤矿巷道粉砂质泥岩为研究对象, 通过针对不同倾角结构面岩样试件进行准静态单轴加载试验和单轴循环加卸载试验, 并同步利用散斑系统采集试件受载变形全过程数字图像信息, 分析不同倾角结构面弱化影响下的岩样力学性能变化规律以及应变场演化特征。研究表明: 结构面对于粉砂质泥岩受力及变形弱化影响明显, 越是趋近于 60° 倾角, 这种弱化影响越显著; 赋存 45° 和 60° 倾角试件因结构面充填介质的弱化影响, 会使应力-应变曲线出现了独特的“双峰”现象; 提出了结构面变形局部化长度比和岩样变形局部化长度比参数, 量化确定了结构面及岩样本体变形对试件总变形的贡献程度; 与准静态单轴加载试验相比, 循环加卸载试验提高了试件结构面破坏的主导性, 从而显著降低了试件峰值强度。

关键词: 泥岩; 结构面; 弱化机制; 数字散斑系统

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)11-2015-09

作者简介: 张淑坤(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程方面的科研与教学工作。E-mail: 4254423@163.com。

Weakening effects of occurrence structural plane on mechanical properties of silty mudstone

ZHANG Shu-kun^{1, 2}, WANG Lai-gui³, LU Lu², WANG Shu-da¹, FENG Dian-zhi¹

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of City and Architecture Engineering, Zaozhuang

University, Zaozhuang 277160, China; 3. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The structural plane has a weakening effect on the physical and mechanical properties of rock mass, which directly affects the stability of rock projects. Taking silty mudstone of surrounding rock of coal mine roadway as the research object, the quasi-static uniaxial loading tests and the uniaxial cyclic loading and unloading tests are performed on the rock specimens with different dip angles. The digital images of the overall process of loading and deformation are collected synchronously by the speckle system, and the mechanical properties and strain field evolution characteristics of rock specimens under the influences of weakening of structural plane with different dips are analyzed. The results show that the weakening effects of structural plane on the stress and deformation of silty mudstone are obvious, especially with the tread approaching to 60°. Under the quasi-static uniaxial loading, the stress-strain curves of the occurrence specimens with dip angles of 45° and 60° show double peaks due to the weakening of the filling media on the structural plane. The parameters of deformation localizing length ratios of structural plane and rock specimens are put forward, and quantitative analysis of strain evolution is performed to determine the contribution of deformation of structural plane and rock specimens to their overall deformation. Besides, compared with the quasi-static uniaxial loading tests, the cyclic loading and unloading tests improve the dominance of failure of structural plane, which thus significantly reduces the peak strength of specimens.

Key words: mudstone; structural plane; weakening effect; digital speckle system

0 引言

粉砂质泥岩强度低、稳定性差, 在煤矿巷道围岩中较为常见。赋存结构面的粉砂质泥岩更易变形破坏, 给巷道围岩支护带来很大困难。不同类型的结构面能够把岩体切割成即连续又不连续的裂隙体, 对于岩体物理力学性能具有不同程度的弱化作用^[1]。

岩体结构面的分布状态、物理力学性质具有多样性, 可通过分类简化进行相关研究。文献[2]针对实际工程中的两种特征结构面大理岩开展了蠕变试验, 统

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51704143); 辽宁省自然科学基金项目(2020-MS-302)

收稿日期: 2019-08-05

***通信作者** (E-mail: 1611525041@qq.com)

计分析了赋存结构面大理岩的蠕变损伤特征。文献[3]通过同步扫描加载过程中岩体结构面软弱夹层的变形特征,研究了不同加载情况下赋存结构面岩体裂纹扩展规律。文献[4]通过现场监测的方法研究赋存结构面岩体工程稳定性。文献[5, 6]通过真三轴试验,研究了赋存结构面岩体的力学特性。文献[7]以天然页岩为研究对象,从宏观和微观角度对三轴加载状态下岩体破坏现象进行了分析。文献[8]制备了多组交叉贯通节理岩样,通过三轴试验获得应力-应变、应变-体变曲线。文献[9]用含多组节理的煤柱进行三轴试验,建立了体应变随围压的变化关系。也有一些学者利用相似模型试验或者数值模拟方法,对不同类型结构面岩体进行力学性能研究^[10-11]。岩样试件受载过程中,剪切应变场不断演化,变形局部化带内的塑性剪切应变不断增加,赋存结构面的岩体更加符合这一变形局部化过程^[12]。采用数字散斑技术对岩样应变场进行观测分析,具有成本低、易操作、分析精确等优势^[13]。结合数字散斑技术,测试分析加载过程中赋存结构面岩样试件应变局部化、剪切带分布规律的研究并未大量展开。特别是准静态和循环加卸载情况下,考虑充填介质和倾角结构面倾角影响因素,进行岩样力学性能弱化机制的研究更为少见^[14]。因此,开展赋存结构面岩体受力及变形性能的弱化行为研究,对于岩体损伤破坏机理的正确认识及其理论模型的建立均具有重要意义。

本文以煤矿巷道粉砂质泥岩为研究对象,拟针对不同倾角结构面岩样进行受力及变形特征研究。通过预制结构面及其充填介质制备岩样试件,进行准静态单轴加载试验和单轴循环加卸载试验。同步利用数字散斑技术采集试件受载变形全过程数字图像信息,分析不同倾角结构面弱化影响下的岩样力学性能变化规律以及应变场演化特征。

1 试验

1.1 试件加工

粉砂质泥岩试件取自于山西白羊岭煤矿 101 运输巷道围岩。为了获得更为可靠的试验数据,文中在取样过程中尽量选择同一层位的岩石。参照文献[15]要求严格执行加工标准,试件加工尺寸为直径为 5 cm,高为 10 cm 标准圆柱试件,控制岩石试件两端面不平行度误差不大于 0.05 mm,端面垂直于试件轴线,误差不超过 0.25°。

赋存结构面种类、间宽度及充填介质等因素对岩体性能均会有较大影响。为简化研究,文中仅分析同一种充填介质、不同结构面倾角对岩体力学性能及变

形特征弱化影响。试验统一采用为岩石强度 1/3 倍的调配石膏模拟试件结构面间的充填介质,采用先切割后黏合的办法制备赋存结构面的岩石试件。利用 DQ-1 型自动岩石切片机对原岩样进行切割,制备结构面与水平面(大主应力作用面,后续类同)夹角 β 为 0°, 30°, 45°, 60° 和 90° 的试件。结构面间使用调配好的石膏作为充填介质,同时起到粘合作用。充填介质厚度控制在 2 mm,静置 24 h 后制作人工散斑场,侧表面即为散斑观测表面,具体如图 1 所示。

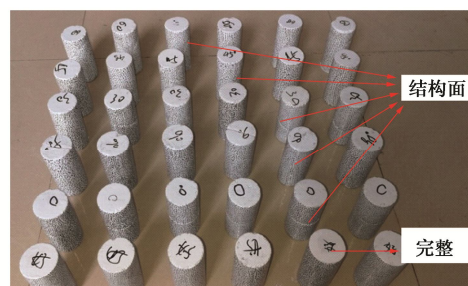


图 1 喷涂散斑漆后试件

Fig. 1 Specimens sprayed with speckle paint

1.2 试验设备

本次试验采用 WDW-300 万能试验机进行准静态单轴加载以及单轴循环加卸载试验,通过计算机内部采集卡分析位移和加载信息,实现应变场、应力-应变曲线同步高速采集,如图 2 所示。WDW-300 万能试验机采用电脑进行控制,其最大试验力为 300 kN,可操控的试验力范围为 1.2~300 kN,测量变形精度为 $\pm 0.5\%$,试验机加载控制速度范围为 0.005~500 mm/min。本次单轴压缩试验的加载速度设定为 0.2 mm/min,在进行试件的压缩之前应将试验机上下接触面擦拭干净并保证试验机与试件充分接触。

利用数字散斑系统采集试件变形破坏数字图像信息。首先通过三脚架上的卡槽及螺栓将高清 CCD 相机固定,调试校准摄像头与待测试件的位置。确保相机摄像头的轴线与试验机上的试件待测面保持垂直,并调节三脚架使相机水平。图 2 中,摄像头的轴线距离地面的高度为 0.8 m,相机与试件的水平距离为 1.2 m。通过导线将数码相机与电脑机箱相连接,打开基于 Matlab 平台的 DSCM 处理系统,启动高清 CCD 相机摄像头,图像采集速率为 10 帧/s。通过同步控制器实现 WDW-300 万能试验机与数字散斑系统的图片采集同时开启,从而实现应变场、荷载-位移曲线同步高速采集。

1.3 试验方案

试验分 2 组,第 1 组进行准静态单轴加载试验,第 2 组进行单轴循环加卸载试验。每组制备的试件包含结构面的倾角为 0°, 30°, 45°, 60° 和 90°,

其中因 15° 和 75° 倾斜角度太小, 加工难度较大, 后续可通过插值法分析角度对应的力学特性。同时, 制备完整试件作为基准比较对象。每一类倾角制作 3 个平行试件, 2 组共计 36 个试件。①第 1 组试验, 采用竖向位移控制方法进行试件加载, 测试分析不同倾角结构面对试件峰值强度以及应力 - 应变全过程弱化规律; ②第 2 组试验, 首先将试件加载到屈服强度, 在该应力水平下进行 500 次循环加卸载后将应力卸载至 0, 然后对试件再加载直至破坏, 可得到循环加卸载曲线, 以此来模拟巷道掘进过程中对赋存结构面岩体的扰动作用。

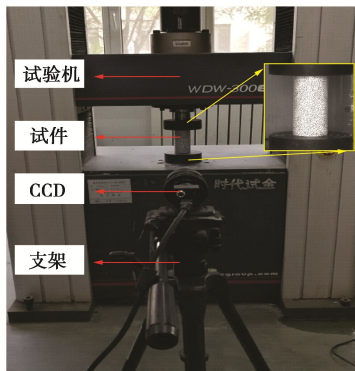


图 2 试件加载

Fig. 2 Loading of specimens

2 试验结果及分析

2.1 单轴加载试验应力 - 应变关系分析

(1) 强度弱化分析

针对不同倾角结构面的粉砂质泥岩进行准静态单轴加载试验, 部分试件破坏如图 3 所示。发现试件贯通的裂隙中一类是发生在预制结构面处, 如 45° , 60° 和 90° 倾角试件。另一类裂隙则始于结构面, 但向其他方向扩展贯通, 如 0° 倾角试件和 30° 倾角试件。就裂隙扩展形态上看, 完整试件则表现为纵向裂隙贯通, 呈现劈裂破坏, 与 0° , 30° 和 90° 倾角试件裂隙扩展形态类似。同时, 0° 倾角试件和 30° 倾角试件并未表现明显的结构面处破坏, 而主要为岩体本身裂隙贯通。

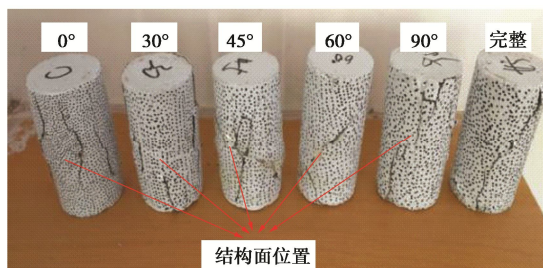


图 3 试件破坏

Fig. 3 Failure of specimens

提取试验机单轴加载应力 - 应变数据, 绘制应力 -

应变关系曲线如图 4 所示。

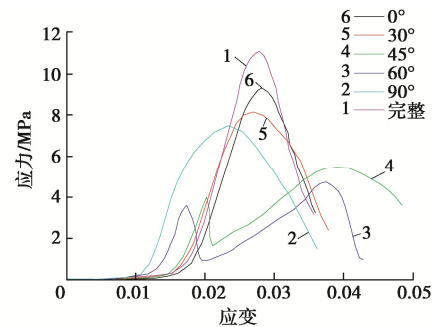


图 4 单轴压缩试验应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of uniaxial compression tests

整体上看, 结构面对岩样峰值强度产生了不同的弱化作用^[16]。岩样基本上经历了线性压密阶段、弹性变形阶段、塑性弱化阶段及脆性破坏阶段。粉砂质泥岩完整试件的峰值强度为 11.101 MPa。与完整试件峰值强度比较, 0° 倾角结构面试件峰值强度受弱化面影响最小, 平均峰值强度为 9.330 MPa, 衰减了 15.9%, 极限应变几乎一致; 30° 和 90° 倾角结构面试件次之, 平均峰值强度分别为 7.514, 8.042 MPa, 分别衰减了 32.4%, 27.9%, 极限应变略有增加, 其中 30° 倾角结构面试件极限应变比完整试件增加了 5%; 45° 和 60° 倾角结构面试件强度受弱化面影响最大, 且应力应变曲线呈现出“双峰”奇特现象, 最大峰值强度分别为 5.489, 4.757 MPa, 相较于完整试件峰值强度分别衰减了 50.5%, 56.8%, 而极限应变增幅却达到了 20%以上。

(2) 应力 - 应变曲线“双峰”现象分析

由应力 - 应变曲线分析可见, 45° 和 60° 倾角结构面试件的应力应变曲线呈现出了明显的“双峰”奇特现象。这种“双峰”或者“多峰”现象在裂隙岩体加载相关研究中也曾多次出现, 但研究者并未针对该现象进行分析^[17]。

如图 5 所示, 0° 与 30° 倾角结构面试件受载过程中, 强度较低的结构面充填介质被压缩、产生变形直至破碎。该过程中充填介质的破碎并非均匀的, 而是以大小不一、具备棱角的碎块形式存在于两块岩样之间。小尺度的碎块强度较大, 不能被进一步压碎压密。同时由于自锁现象的存在, 小倾角结构面试件加载下, 也不能让这些碎块发生滚动摩擦使岩样沿结构面滑动。因此, 强度更大的小碎块则是被挤压刺入岩样本体中, 致使相对高强度的岩样本体在应力集中的作用下产生裂隙, 继续加载下这样的裂隙逐渐扩展与岩样本体裂隙贯通直至破坏。相较于完整试件而言, 这些充填介质碎块增加了岩样裂隙扩展途经, 增加了裂隙通道, 是在充填介质影响下以岩样试件本体破坏

为主导的渐进破坏过程。所以从应力-应变曲线走势上来看仅为整体强度被弱化,未呈现“双峰”现象。

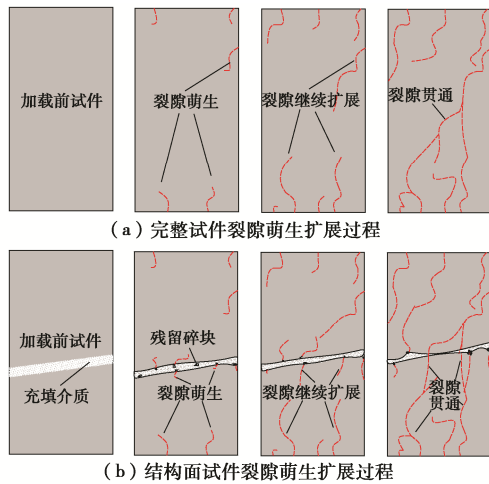


图5 小倾角结构面试件裂隙扩展过程示意

Fig. 5 Illustration of fracture propagation process of structural plane specimens with small dip angles

相对于完整试件及 0° 、 30° 小倾角结构面试件, 45° 和 60° 倾角结构面试件的应力-应变曲线出现了“双峰”现象,抗压强度次峰值约为峰值强度的70%左右。这是由于在试件压缩过程中,岩样在结构面处产生滑动分力大于岩样与充填介质界面间的摩擦力。逐步加载过程中,界面处充填介质同时产生了剪切变形和压缩变形,直至充填介质内出现贯通裂隙,试件应力-应变曲线出现第一个峰值。结构面间开始发生初步剪切错动的同时,充填介质被压碎,试件应力-应变曲线处于第一个峰值下降阶段。试件并未至此失稳,压密的充填介质和半刺入岩样本体中的小碎块使原本属于较小的界面间摩擦力增加,形成一个新的承载体。未产生贯通裂隙的岩样本体在后续加载过程中对整体承载产生贡献,试件应力-应变曲线出现第二个上升阶段,直至峰值点。这种新的承载体稳定性是有限的,被压碎、压密的充填介质或是导致界面处岩样本体裂隙增加,或是因外力作用充填介质碎块发生了转动,致使结构面充填介质仍然为试件的薄弱环节。继续加载,岩样本体在并未充分发挥承载作用、裂隙没有大量扩展情况下,试件便沿着结构面发生了错动失稳。因此, 45° 和 60° 倾角结构面试件由于结构面充填介质压缩、变形、剪切错动,并未充分发挥岩样本体承载性能,导致了试件强度被大幅度弱化。试件破坏过程均是结构面变形、压碎、初步错动、压密稳定、滑动失稳的非连续过程,应力-应变曲线呈现“双峰”现象。自始至终,结构面稳定性均起主导作用,岩样本体亦参与其中,但是贡献不大。

(3) 试件破坏现象的理论分析

岩石结构面之间一般会有充填物,例如淤泥、岩石碎屑和夹层等。在满足一定倾角条件下,足够大的外荷载会打破岩体原有的平衡状态,使岩石结构面发生滑移。采用Mohr-Coulomb强度准则来考虑结构面的剪切破坏,结构面倾角 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 时,认为岩体沿结构面发生剪切破坏^[18],

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{\varphi}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cot \varphi) \sin \varphi}{\sigma_1 - \sigma_3} \right], \\ \beta_2 &= \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cot \varphi) \sin \varphi}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, c 、 φ 为弱面充填介质的黏聚力和内摩擦角。

针对单轴压缩试验,围压 σ_3 为0,可表示出抗压强度与结构面倾角 β 、黏聚力及内摩擦角关系为^[19]

$$\sigma_1 = \frac{2c}{\sin 2\beta - \cos 2\beta \cdot \tan \varphi - \tan \varphi} \quad (2)$$

将文中粉砂质泥岩黏聚力1.5 MPa、内摩擦角 25° 带入计算理论峰值强度,并与实际试验对比。发现 45° 倾角结构面试件的计算强度与试验峰值强度分别为5.68, 5.49 MPa, 60° 倾角结构面试件的计算强度与试验峰值强度分别为4.66, 4.76 MPa。计算数据与试验数据基本吻合,但其他角度相差则很大甚至失真的。

由此可见,当倾角满足 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 关系时,结构面对于试件整体稳定性起主导作用,越是趋近于 60° 倾角,这种主导性越强,计算值与试验值符合程度也就越高。加载过程中结构面间夹杂的充填介质,经历了初始阶段的变形、压碎和剪切滑移过程,继续施加的荷载并未使岩样试件本体产生较发育的裂隙便导致了结构面的最终滑移、试件失稳破坏,这一系列过程使试件经历了结构面充填介质的局部失稳和赋存结构面试件整体失稳两个状态,所以应力-应变曲线也就出现了“双峰”现象;倾角不满足 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 关系时,试件的破坏自始至终均是由结构面和岩样本体共同影响,充填介质经历变形、压碎、密实过程与岩样本体裂隙扩展同步进行,形成混合破坏,相较于完整试件从整体上呈现出强度弱化衰减特征,这也是 0° 、 30° 等小倾角结构面试件应力-应变曲线不出现“双峰”形式的根本原因。

(4) 结构面产状和荷载方向的对应关系

岩石力学工程中,走向、倾向和倾角是结构面产状的三要素。当岩石力学工程确定了研究区域,那么该区域岩石结构面产状、结构面间充填介质状态即可运用工程地质技术测取,进一步明确大主应力作用方向,能够到试验中选用的结构面与大主应力作用面夹角 β 参数,即可运用室内试验方法分析赋存结构面岩

体稳定性。结构面产状与加载方向呈现空间状态, 一般情况下, 岩石力学工程大主应力为竖向, 需探明结构面产状中倾角与水平面的夹角。若由于地质构造应力导致大主应力为其他方向, 测定大主应力作用面与结构面夹角为分析对象。当然, 在外界扰动条件下(地震、人工开挖扰动等)大主应力作用方向是旋转的, 按照现有理论能够预测大主应力作用方向, 进而确定大主应力作用面与结构面的夹角。

2.2 单轴加载试验变形场演化分析

限于测试手段, 试验测取的试件应力-应变曲线关系是基于试件整体应力应变场计算绘出的, 不能完全真实反应赋存充填介质结构面岩样试件的变形演化特征, 因此需结合数字散斑技术, 采集加载过程中试件表面应变场演化过程进行详细分析。

(1) 应变场之间的关系

利用数字散斑技术采集岩样试件表面应变场, 进行应变场以及剪切带相关的研究, 比仅凭肉眼观察及应变片测取更为精确^[20]。剪切应变 γ_{xy} 场能够体现试件表面剪切变形的演化过程, 最大剪切应变 γ_{\max} 场则能更好体现剪切局部化带的演化过程。剪切应变 γ_{xy} 场和最大剪切应变 γ_{\max} 场, 理论上存在如下关系^[13]:

$$\gamma_{\max} = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}, \quad (3)$$

式中, ε_x 为水平线应变场, ε_y 为垂直线应变场。后续提取数字散斑图像中剪切应变 γ_{xy} 场和最大剪切应变 γ_{\max} 场, 根据这 2 种应变场进行赋存结构面试件表面变形特征以及变形局部化研究。

(2) 剪切应变场分析

提取散斑数字图像, 得到目标时刻试件的剪切应变 γ_{xy} 场。以 60° 倾角结构面试件为例, 并对图 4 中 60° 倾角结构面试件对应的应力-应变曲线进行标记, 如图 6 所示。应力-应变曲线起始 oa 段主要为试件及结构面充填介质的孔隙压密过程, a 点对应强度为 0.45 MPa ; ab 段为应力-应变曲线第 1 个上升阶段, 主要为试件及结构面充填介质线弹性变形和塑性变形, 充填介质变形起主导作用, 直至达到次峰值 b 点, 对应强度为 3.68 MPa ; bc 段为应力-应变曲线第 1 个下降阶段, 主要为结构面充填介质剪切破坏再次被压密的过程, c 点对应强度为 0.89 MPa ; cg 阶段为应力-应变曲线第 2 个上升阶段, 主要为试件本身的弹性变形和塑性变形, 直至达到峰值点 g ; 与完整试件相比, 继续加载情况下, 该试件并不能充分发挥自身承载, 在非结构面处的裂隙并未充分发育时便会沿着弱面发生失稳破坏。因此, 60° 倾角结构面试件峰值强度较完整试件降低很大。

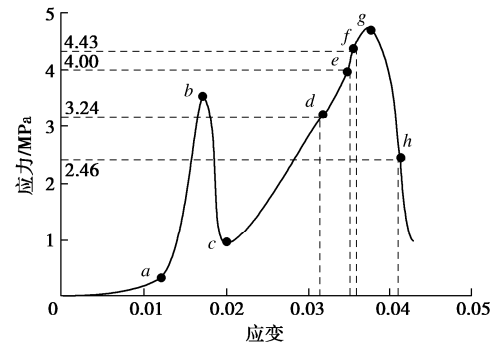


图 6 60° 倾角结构面试件应力-应变标点曲线

Fig. 6 Stress-strain punctation curves of specimens with dip angle of 60°

剪切应变场能够较好体现受载情况下的试件表面变形演化过程。分别提取图 6 应力-应变曲线上 a 点、 b 点、 c 点和 g 点对应的剪切应变散斑图像, 同时提取 cg 第 2 个上升阶段过程中 d 点 (3.24 MPa)、 e 点 (4.0 MPa)、 f 点 (4.43 MPa) 以及第 2 个下降阶段中 h 点 (2.46 MPa) 散斑图像, 提取结果如图 7 所示。 a 点为结构面错动前线弹性阶段的起始点, 对应散斑图为图 7 (a)。图中围绕结构面附近呈现了明显剪集中变形区域, 剪应变值范围为 $0.002 \sim 0.012$, 剪应变最大值为 0.012 , 主要集中在结构面两端, 分布范围很小, 试件其他区域处于平衡状态; b 点对应散斑图 7 (b) 是应力-应变曲线“双峰”的次峰值位置, 结构面附近剪切应变区域的剪应变范围为 $0.012 \sim 0.036$, 且剪应变最大值 0.036 占据的面积达剪切带面积的 50% 左右, 此阶段为结构面填充物压密并准备发生错动的阶段, 试件其他区域处于平衡状态; c 点对应散斑图 7 (c), 此时结构面充填介质发生剪切破坏变形换取了应力降低, 伴随着的是充填介质被再次压密, 试件结构重新组合, 同时点 c 对应为组合后试件线弹性阶段的初始点。试件两端接近结构面位置开始出现一定的剪切变形, 剪应变值为 0.008 左右, 其他区域处于平衡状态。由此可见, ab 到 bc 的 2 个阶段确为充填介质变形破坏为主导。

继续加载, 应力-应变曲线达到第 2 个上升阶段, 点 d 对应线弹性阶段的后期位置, 结构面剪切应变最大值达到 0.05 , 但占比面积没有太大变化。联合图 7 (c), (d) 可以看出此阶段为均匀变形阶段, 也就是试件初步错动后进入加载过程中的再压密阶段。此时, 试件两端接近结构面位置出现的剪切变形区域逐渐扩大, 剪应变在 0.01 左右, 但剪切变形区域并未连城整体。

图 7 (e), (f) 对应为试件加载的塑性变形阶段, 点 e 对应为刚进入塑性区的初始点, 点 f 接近峰值点。由点 e 过渡到点 f , 试件主体剪切应变已经达到 0.02 左右, 且区域连成整体占据总面积的 90% 以上, 尤其

是图 7 (f) 中, 在结构面法向方向也出现了一块新的剪切变形集中区域, 剪切应变值在 0.01 左右。图 7 (g) 为应力 - 应变曲线峰值点 g 对应的散斑图, 新剪切带进一步扩展演化, 范围逐渐扩大, 试件整体剪应变达到 0.023 左右, 此时试件结构面上方表面宏观上产生裂缝。继续加载则为应力 - 应变曲线下阶段, 裂隙贯通试件失稳, 由图 7 (h) 散斑图可见, 试件整体剪切应变最大值超出第 1 条新的剪切破坏带剪应变值。第 1 条新剪切带被湮没, 取而代之的是第 2 条剪应变值更大, 并具有贯通趋势的剪切带。图 7 (g), (h) 对应为试件加载在峰值点后的破坏阶段 gh, 随着加载过程中试件的应变增加, 承载力下降, 剪应变集中局部的变化更加明显。对应最大应变值约为 0.042, 而此时应力大小仅为 1.09 MPa, 变形局部化带伸长、交汇和贯通, 导致试件最终破坏。

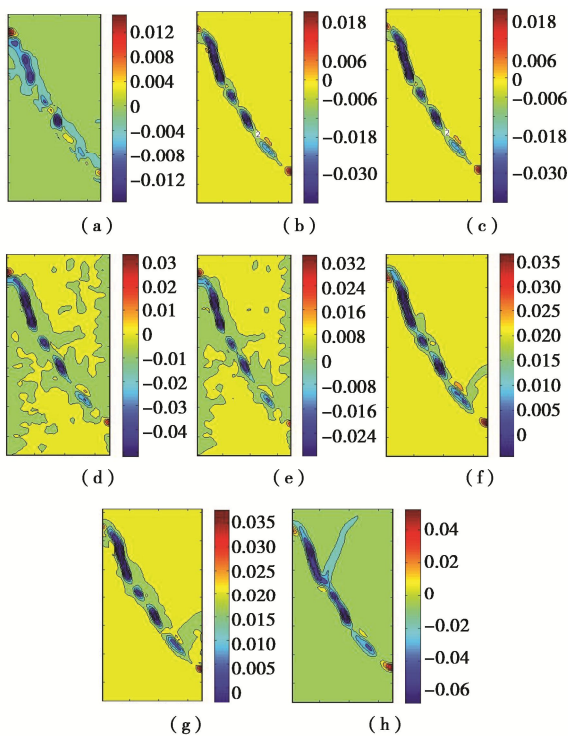


图 7 结构面为 60°试件不同加载阶段剪切应变场

Fig. 7 Shear strain fields of specimens with structural plane of 60° in different loading stages

(3) 最大剪切应变场分析

最大剪应变能够体现加载试件最后试件变形集中形态, 提取各倾角试件最终破坏时最大剪切应变 γ_{\max} 场, 研究变形局部化带分布特征^[21]。其中各个角度试件最终发生破坏的状态通过提取数字散斑图像, 获得的散斑云图如图 8 所示。图 8 (a) 为完整试件, 呈现沿试件端劈裂破坏特征, 图 8 (b) ~ (f) 在结构面处均呈现明显的变形局部化带, 并且结构面变形集中与试件本体变形集中对于试件整体变形均有不同程度的贡献。图 8 (b) 所示, 0° 倾角结构面时, 试

件破坏时主要变形集中在试件左侧结构面处, 最大剪应变值为 0.22。结构面位置变形局部化带长度与实际结构面长度占比不大, 裂隙以此为起始点贯通于试件端, 同时出现了试件右侧本体变形局部化带与结构面变形局部化带贯通现象。图 8 (c) 所示, 30° 倾角结构面时, 试件破坏时主要变形集中在试件左侧结构面处, 裂隙以此为起始点两条变形局部化带贯通于试件端, 最大剪应变值为 0.12。图 8 (d) 所示, 45° 倾角结构面时, 试件破坏时基本为结构面位置处局部化带变形, 裂隙在结构面变形局部化带末端向试件端和侧壁贯通, 最大剪应变值为 0.2。图 8 (e) 所示, 60° 倾角结构面时, 试件破坏时主要为结构面位置处局部化带产生的变形, 长度为实际结构面长度, 最大剪应变值为 0.75。垂直于结构面变形局部化带发展了两条新带, 但弱化程度以及长度均很小, 未来得及继续发育试件便已经失稳, 最大剪应变值小于 0.2。图 8 (f) 所示, 90° 倾角结构面时, 试件破坏时弱面位置变形集中带变形虽占实际弱面长度的 100%, 最大剪应变值为 0.13, 而右半试件趋于完整。因此, 90° 倾角结构面试件承载能力较其他试件要高。

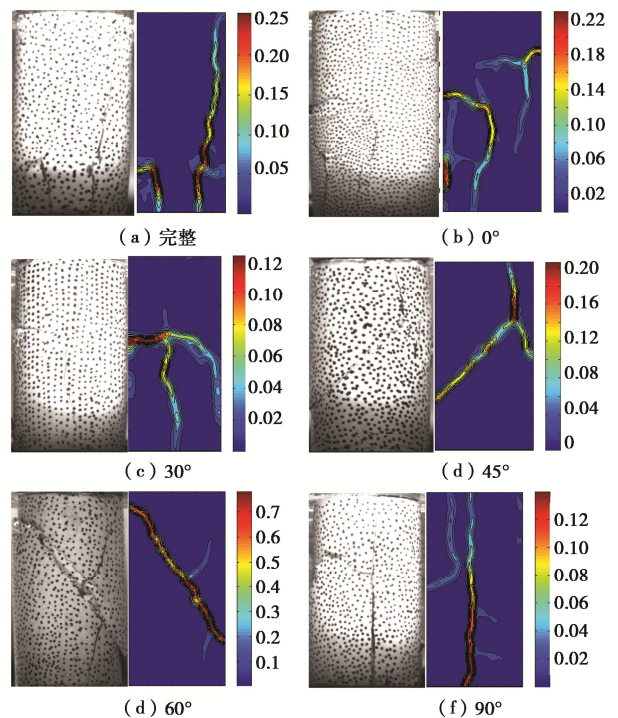


图 8 试件最终破坏散斑图像

Fig. 8 Final failure speckle images of specimens

试件失稳与否, 与变形集中带发育程度、发育方向及贯通程度密切相关。将结构面变形局部化带长度与结构面实际长度比值定义为结构面变形局部化长度比 m , 将试件本体变形局部化带长度占结构面变形局部化带长度比值定义为岩样变形局部化长度比 n , 用这 2 个指标进行统计分析。以大于试件总体平均最大剪应变值为边界, 圈定变形局部化带位置, 沿变形局

部带中心测取对应长度。以 60° 倾角结构面试件最大剪应变图为例, 如图 9 所示。圈定结构面附近的变形局部带, 绘制变形局部带中心线 l , 沿试件本体绘制其他变形局部带中心线 l_1 和 l_2 。由于变形局部化带中心线 l 在结构面位置, 虽然实际线长度大于结构面实际长度, 但实际为结构面全部贯通。因此认为 $m=100\%$, $n=(l_1+l_2)/l=34.5\%$ 。其他试件类同, 见表 1。

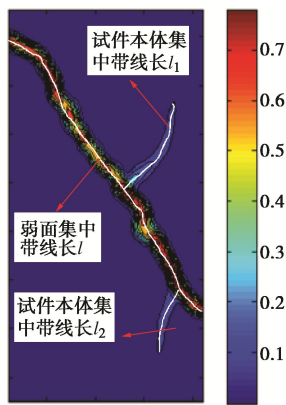


图 9 变形集中带长度测定示意图

Fig. 9 Schematic diagram for measuring length of deformation concentrated zone

表 1 局部化带占比

Table 1 Proportions of localized zones

结构面 倾角/(°)	结构面变形局 部化长度比 m	岩样变形局部 化长度比 n	峰值强度 /MPa
完整	—	—	11.101
0	55	510	9.330
30	75	310	7.514
45	95	105	5.489
60	100	35	4.757
90	100	55	8.042

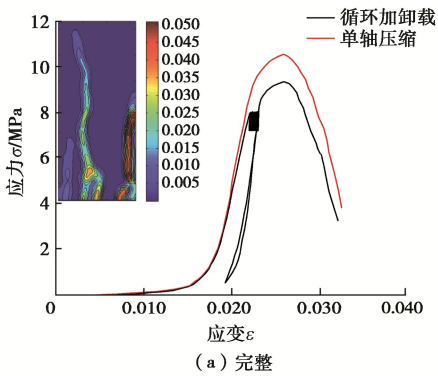
试件本体变形局部化带与结构面局部化带之比例能够反映在试件破坏时, 试件本体参与变形破坏的程度。越趋近于 0° 时, 结构面局部化带与实际结构面长度占比 m 越来越小, 而试件本体与结构面变形局部化带占比 n 越来越大, 量化验证了试件本身变形趋于主导地位, 结构面变形趋于次要地位。越趋近于 60° 时, 结构面变形局部化带与实际结构面长度占比 m 越来越大, 试件本体变形集中参与程度也越来越小, 意味着结构面破坏变形起到主导作用, 但试件本体变形亦参与其中。90° 试件由弱面分成两个独立承载试件, 因此它的强度也较高。

2.3 循环加卸载试验结果分析

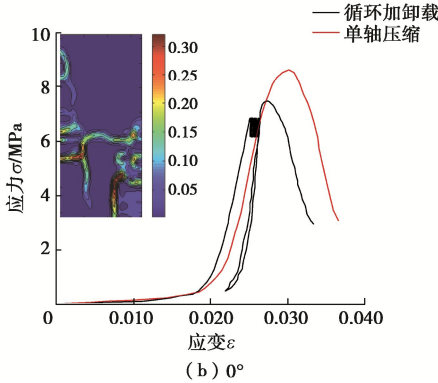
巷道掘进过程中会对赋存结构面岩体产生加卸载以及扰动, 通过加载、扰动、卸载及再加载过程分析试件受载变形特征。将各组试件在峰值强度 75% 处即单轴压缩屈服点的位置作为单轴循环加卸载的下限力, 上限力在此基础上增加 1 kN, 循环加卸载 500 次^[22], 然后再将试件压缩至破坏可得到以下曲线, 如图 10 所示。通过正常情况下与循环加卸载情况下的应力

应变曲线对比可知, 线型走势及其相近, 并且 45° 和 60° 倾角结构面应力 - 应变曲线也出现了“双峰”现象。加卸载影响下各倾角试件的平均峰值强度降低明显, 对比完整试件及 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 倾角结构面试件的平均峰值强度, 加卸载情况下试件分别降低了 13.8%, 13.5%, 21.4%, 22.1%, 23.9%, 20.1%。引起峰值强度降低的主要原因是, 在塑性变形区间, 进行循环加卸载率先对弱面产生了累积损伤, 使结构面更先于准静态加载情况下破坏。值得注意的是 0° 倾角试件与完整试件通过试验机的循环加卸载其峰值强度降低的百分比最小, 这两组试件所受到损伤程度相对较低; 而结构面为 60° 倾角试件峰值强度降低的百分比最大, 为 23.9%。说明通过对各类试件的循环加卸载后, 60° 倾角结构面试件受影响最大, 形成的弱化区更脆弱。

从试件破坏时散斑图提取的最大剪应变场来看, 完整试件最大剪应变值 0.01~0.05 范围内就形成了贯通区域; 图 10 (b) 所示, 0° 倾角结构面试件破坏时, 变形局部化主要集中在结构面处以及始于结构面的试件两侧, 比准静态单轴加载情况下的图 8 (b) 的变形集中带分布要素乱; 图 10 (c), (d), (e), (f) 中, 试件变形集中带基本为结构面位置, 且试件破坏时主要为结构面处变形集中带的贯通, 未见准静态单轴加载情况下图 8 (c), (d), (e), (f) 中的次生变形集中带。即在循环加卸载条件下, 除了完整试件和 0° 倾角结构面试件之外, 其他倾角试件的变形集中带基本为结构面贯通为主, 且次生的变形集中带不明显, 说明加卸载扰动作用下增加了结构面弱化破坏的主导性, 显著降低了试件峰值强度和抗变形破坏能力。



(a) 完整



(b) 0°

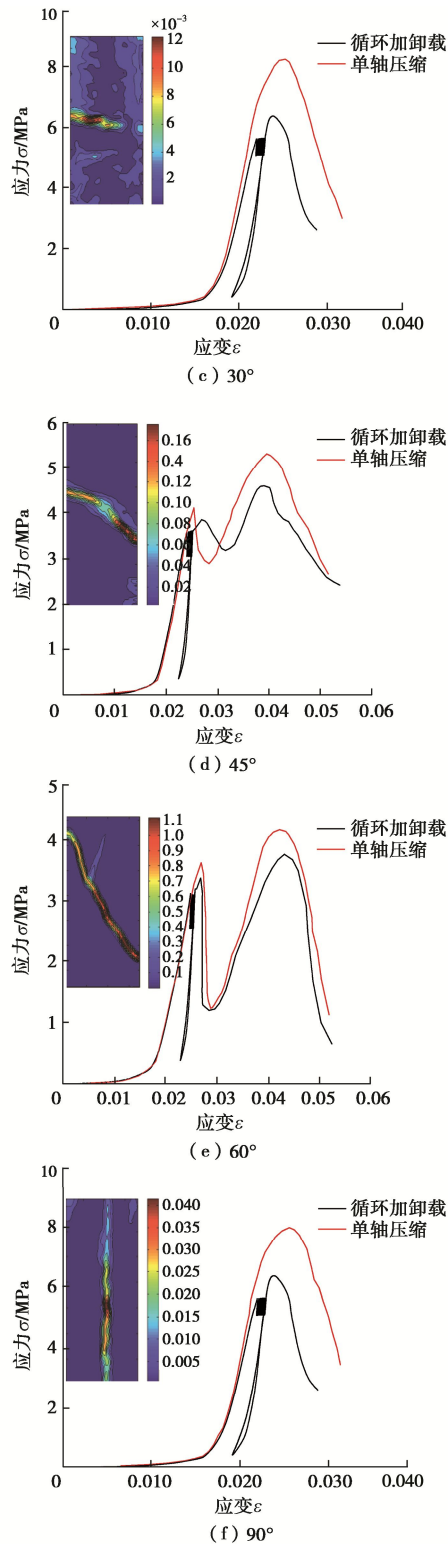


图 10 试件循环加卸载及单轴压缩曲线

Fig. 10 Cyclic loading-unloading and uniaxial compression curves of specimens

3 结 论

(1) 在准静态单轴加载条件下, 60° 倾角结构面试件平均峰值强度最小为 4.757 MPa, 相对于完整试件的平均峰值强度降低了 57.15%, 结构面越趋近于 60° 倾角对岩体力学性能弱化影响越大。

(2) 结构面趋近于 60° 倾角时, 结构面破坏起主导作用, 岩样经历了充填介质的局部破坏失稳、赋存结构面试件整体失稳两个状态, 应力 - 应变曲线具有“双峰”现象, 强度受结构面弱化影响大; 而小倾角结构面试件的破坏自始至终为混合破坏, 其应力 - 应变曲线无“双峰”现象, 强度受结构面弱化影响稍小。

(3) 提出结构面变形局部化长度比和岩样变形局部化长度比参数, 对试件应变演化过程中进行量化分析。分析表明结构面倾角越趋近于 0° 时, 结构面充填介质影响下的岩样本体变形趋于主导地位; 结构面倾角越趋近于 60° 时, 结构面破坏起到主导作用, 但岩样本体变形亦参与其中。

(4) 在单轴循环加卸载试验中, 掘进应力扰动引起峰值强度要比准静态单轴压缩试验的峰值强度降低了 10%~25%。与完整试件相比, 0° 倾角结构面试件峰值强度降低最小, 而 60° 倾角结构面试件降低最大。加卸载扰动作用相对于准静态加载显著增加了结构面的弱化程度, 从而显著降低了试件峰值强度和抗变形破坏能力。

文中仅针对特定倾角结构面试件进行了研究分析, 后续还需采用数值模拟并结合断裂力学相关理论研究其他倾角结构面试件的受力及变形规律, 进一步明确应力 - 应变曲线“双峰”现象的启动条件, 探索多结构面、多种充填介质情况下是否会出现“多峰”现象, 为进一步阐明赋存结构面粉砂质泥岩破坏机制提供依据。

参考文献:

- [1] HOEK E. Underground Excavations in Rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [2] HE Z L, ZHU Z D, NI X H, et al. Shear creep tests and creep constitutive model of marble with structural plane[J]. Eur J Environ Civ Eng, 2010. DOI: 10.1080/19648189.2017.1347066.
- [3] LIU J, CHEN Y, WAN W, et al. The influence of bedding plane orientation on rock breakages in biaxial states[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018, **95**: 186 - 93. DOI: 10.1016/J.tafmec.2018.03.005.
- [4] SONG D, CHEN J, CAI J. Deformation monitoring of rock slope with weak bedding structural plane subject to tunnel excavation[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, **11**(11). DOI: 10.1007/s12517-018-3602-7.
- [5] REIK G. Strength and deformation characteristics of jointed media in true triaxial compression[J]. International Journal of

- Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, **15**(6): 295 – 303.
- [6] 张淑坤, 王树达, 王来贵, 等. 结构面局部弱化影响下巷道围岩稳定性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, **28**(7): 116 – 121. (ZHANG Shu-kun, WANG Shu-da, WANG Lai-gui, et al. Stability study of roadway surrounding rock under influence of local weakening of structural plane[J]. China Safety Science Journal, 2018, **28**(7): 116 – 121. (in Chinese))
- [7] NASSERI M H, RAMAMURTHY T. Failure mechanism in schistose rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1997, **34**(3/4): 460. DOI : 10.1016/S0148-9062(97)00219-2.
- [8] ARZÚA J, ALEJANO L R, WALTON G. Strength and dilation of jointed granite specimens in servo-controlled triaxial tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **69**: 93 – 104.
- [9] MEDHURST T P. A study of the mechanical behaviour of coal for pillar design[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1998, **35**(8): 1087 – 1105.
- [10] SEIDEL J P. The application of energy principles to the determination of the sliding resistance of rock joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1995, **28**(4): 211 – 226.
- [11] KWON T H, HONG E S, CHO G C. Shear behavior of rectangular-shaped asperities in rock joints[J]. KSCE J Civ Eng, 2010, **14**(3): 323 – 332.
- [12] BORST R D, MÜHLHAUS H. Gradient-dependent plasticity: formulation and algorithmic aspects[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1992, **35**(3): 521 – 539.
- [13] 王学滨, 张楠, 董伟, 等. 基于数字图像相关方法的单轴压缩黏土试样剪切带法向应变场观测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, **26**(1): 177 – 189. (WANG Xue-bin, ZHANG Nan, DONG Wei, et al. Experimental studies of normal strain fields of shear bands of clay specimens in uniaxial compression using digital image correlation method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, **26**(1): 177 – 189. (in Chinese))
- [14] MAS P. On the continuum formulation of higher gradient plasticity for single and polycrystals[J]. J Mech Phys Solids, 2000, **48**(8): 1777 – 1796.
- [15] FAIRHURST C E. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression[J]. International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**(3): 279 – 289.
- [16] WALSH J B. A fracture criterion for brittle anisotropic rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1964, **69**(16): 3449 – 3456.
- [17] 罗可, 招国栋, 曾佳君, 等. 加载速率影响的含裂隙类岩石材料破断试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(8): 1833 – 1842. (LUO Ke, ZHAO Guo-dong, ZENG Jia-jun, et al. Fracture experiments and numerical simulation of cracked body in rock-like materials affected by loading rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(8): 1833 – 1842. (in Chinese))
- [18] NICHOLAS B. Review of a new shear strength criterion for rock joints[J]. Eng Geol, 1973, **7**: 287 – 332.
- [19] 刘红岩, 吕淑然, 张力民. 基于组合模型法的贯通节理岩体动态损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1814 – 1821. (LIU Hong-yan, LÜ Shu-ran, ZHANG Li-min. Dynamic damage constitutive model for persistent jointed rock mass based on combination model method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1814 – 1821. (in Chinese))
- [20] KHALID A, ALSHIBLI, STEIN S. Shear band formation in plane strain experiments of sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(6): 495 – 503.
- [21] 宋义敏, 邢同振, 赵泽鑫, 等. 红砂岩变形演化及声发射主频特征实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, **42**(增刊 2): 362 – 368. (SONG Yi-min, XING Tong-zhen, ZHAO Ze-xin, et al. Experimental study on deformation evolution and acoustic emission dominant-frequency characteristics of red sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2017, **42**(S2): 362 – 368. (in Chinese))
- [22] 李西蒙, 刘长友, PENG Syd S, 等. 单轴分级循环加载条件下砂岩疲劳变形特性与损伤模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, **46**(1): 8 – 17. (LI Xi-meng, LIU Chang-you, PENG Syd S, et al. Fatigue deformation characteristics and damage model of sandstone subjected to uniaxial step cyclic loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, **46**(1): 8 – 17. (in Chinese))