

不同角度充填节理花岗岩剪切裂纹扩展规律及断裂机制研究

韩学贤¹,张士川¹,沈宝堂¹,柴顺杰²,张有成¹,张伟强¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590;

2. 山东海科新材料科技股份有限公司,山东 东营 257081)

摘要:增强型地热系统储层中岩体节理通常含有充填物,充填节理的剪切力学行为直接影响储层渗透性及连通性。基于不同角度充填节理花岗岩直剪试验,研究了充填节理花岗岩剪切破坏的力学特性、损伤变量演化及裂纹扩展规律。结果表明:充填物及节理角度影响花岗岩抗剪强度,表现为充填物改变裂纹扩展介质,节理角度影响花岗岩剪切时节理面的受力状态;充填节理花岗岩损伤破坏过程分为裂纹闭合、裂纹萌生发育、裂纹扩展破坏3个阶段,损伤变量随着损伤过程进行呈不断增大趋势;节理花岗岩剪切裂纹扩展方向可分为水平方向及平行节理方向,0°与90°节理试件剪切裂纹沿水平方向扩展直至贯通试件,30°、45°与60°节理试件剪切裂纹扩展方向与自身节理角度一致。

关键词:岩石力学;充填节理;节理倾角;断裂机制;损伤演化

中图分类号:TD325

文献标志码:A

Shear crack propagation laws and fracture mechanism of filled joint granite with different angles

HAN Xuexian¹, ZHANG Shichuan¹, SHEN Baotang¹,

CHAI Shunjie², ZHANG Youcheng¹, ZHANG Weiqiang¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao 266590, China;

2. Shandong Haike Xinyuan Material Technology Co. Ltd, Dongying 257081, China)

Abstract: In enhanced geothermal systems (EGS) reservoirs, rock fractures in the form of filled joints often contain fillings, and the shear mechanical behavior of filled joints directly affects the permeability and connectivity of the reservoir. Based on direct shear tests on filled joint granite with different angles, this study investigates the mechanical characteristics of shear failure, evolution of damage variables, and crack propagation laws of granite with filled joints. The results indicate that the filling material and joint angle affect the shear strength of granite. The filling material alters the medium for crack propagation while the joint angle affects the stress state of the joint surface during shear. The process of damage and failure in granite with filled joints can be divided into three stages: crack closure, crack initiation and development, and crack propagation and failure. The damage variable increases continuously as the stages progress. The direction of shear crack propagation in jointed granite can be classified into

收稿日期:2023-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52004147,51974173);煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室2020年开放基金项目(GJNY-20-113-19);山东省自然科学基金项目(ZR2020QE129)

作者简介:韩学贤(1998—),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事矿山岩体力学方面的研究工作. E-mail:2275223446@qq.com
张士川(1989—),男,山东济宁人,副教授,博士,主要从事矿井水害防治与岩体力学等方面的教学和科研工作,本文通信作者. E-mail:zsc373260186@sdust.edu.cn

horizontal direction and parallel-to-the joint direction. For specimens with joints at 0° and 90° , the shear crack extends horizontally until it penetrates the specimen. For specimens with joints at 30° , 45° , and 60° , the direction of shear crack propagation aligns with the joint angle.

Key words: rock mechanics; filled joint; joint angle; fracture mechanism; damage evolution

地热资源具有清洁度高、分布广、可再生性强等特点,其开发利用成为我国实现“双碳”目标的重要抓手^[1-2]。增强型地热系统(enhanced geothermal system, EGS)开发过程中需对干热岩储层进行改造,位于深部的干热岩岩体通常发育有节理,且往往会被热液、岩浆等物质充填形成天然的充填节理,其剪切力学行为直接影响储层改造。研究不同角度充填节理花岗岩剪切裂纹扩展规律及断裂机制,对地热开发中提高储层改造稳定性与换热效率具有参考价值。

国内外学者针对包含预制节理、预制充填节理等缺陷类岩体的剪切力学特性及破坏特征开展了大量研究。节理倾角方面,金爱兵等^[3]通过对复杂节理网络中不同角度无充填节理进行甄别分析后得出 45° 和 90° 倾角对剪切强度影响最为显著、 15° 倾角影响最小的结论;刘婷婷等^[4]通过对节理倾角 $15^\circ \sim 75^\circ$ 花岗岩进行试验,发现剪切强度与节理倾角呈正相关;马芹永等^[5]探讨了含不同倾角的充填型软弱贯通节理砂岩在冲击荷载作用下的力学特性及破坏规律,得出随节理倾角增加试件破坏顺序从节理先破坏转变为岩石基体先破坏的结论;Chen 等^[6]进行了节理岩体的剪切试验,得出在一定范围内岩体的抗剪强度与节理倾角呈负相关。充填节理方面,陈占峰等^[7]研究了不同充填度与不同法向应力下的节理岩体,明确了不同充填度节理岩体剪切破坏机理;焦峰等^[8]对砂土充填下节理岩体进行了研究,得出用充填砂土摩擦系数表达的充填节理峰值剪切强度公式;钟志彬等^[9]考虑了含裂隙充填节理岩体对岩体压剪断裂机制的影响。在岩石剪切裂纹扩展规律与损伤特征研究方面,李杨杨等^[10]制作缺陷类岩石试件进行试验,分析了不同预制裂纹倾角对岩石整体裂纹扩展的影响;黄冬梅等^[11]研究了含孔洞-裂隙缺陷岩石损伤的宏细观特征,明确了 4 种开度砂岩裂隙均参与主裂纹的形成。可以发现,同时考虑节理倾角与充填强度的缺陷类岩石剪切试验研究较少,不同角度充填节理岩石剪切力学行为仍待进一步研究。

为进一步研究充填节理岩体对深部高应力环境下 EGS 储层改造的影响,预制具有不同节理倾角及不同充填物强度的花岗岩试件,开展了高应力下充填节理花岗岩的直剪试验,研究成果可为研究 EGS 储层中天然裂隙扩展机制提供参考。

1 试验方案

1.1 充填材料配比

自然界岩体节理充填层强度、弹性模量等物理力学特性一般要弱于节理两侧的岩石。试验依照相似材料选择标准,选用水泥、石膏、河砂、水作为原料制备充填材料试件^[12-13]。分别以石膏为主和以水泥为主的试件配比如表 1 所示。按照国际岩石力学试验规程要求,将配比完成的石膏及水泥充填材料分别加工成尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 和 $\Phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的圆柱体试件,其断面平行度控制在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内,每个配比各制备 3 块试件。采用岛津 AG-X250 电子万能试验机完成充填材料试件的单轴压缩试验及巴西劈裂试验,力学参数采集精度 0.01 MPa 。各选取 3 块试件力学参数平均值作为该组配比的基本力学参数,结果见表 1。

所用花岗岩取自山东威海,同样采用岛津 AG-X250 电子万能试验机对花岗岩试件进行力学测试,测得花岗岩平均抗压强度为 132.10 MPa ,抗拉强度为 9.99 MPa 。比较不同配比的充填材料试件与花岗岩试件力学性质,确定用于模拟花岗岩不同强度的充填材料包含以下 4 种配比: $m(\text{水}):m(\text{石膏})=0.7:1$ (花岗岩强度的 5%); $m(\text{水}):m(\text{石膏})=0.35:1$ (花岗岩强度的 10%); $m(\text{水}):m(\text{水泥}):m(\text{河砂})=0.5:1:1$ (花岗岩强度的 15%); $m(\text{水}):m(\text{水泥}):m(\text{河砂})=0.4:1:1$ (花岗岩强度的 20%)。

表 1 充填材料基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of filling materials

试件类型	配比	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	峰值应变/%	抗拉强度/MPa
石膏试件	$m(\text{水}) : m(\text{石膏}) = 0.35 : 1$	17.19	2.93	1.47	5.39
	$m(\text{水}) : m(\text{石膏}) = 0.5 : 1$	10.89	1.40	1.98	4.52
	$m(\text{水}) : m(\text{石膏}) = 0.7 : 1$	7.04	1.30	1.59	3.13
	$m(\text{水}) : m(\text{石膏}) = 0.9 : 1$	4.59	0.50	1.44	2.15
水泥试件	$m(\text{水}) : m(\text{水泥}) : m(\text{河砂}) = 0.3 : 1 : 1$	6.69	1.34	1.04	3.72
	$m(\text{水}) : m(\text{水泥}) : m(\text{河砂}) = 0.4 : 1 : 1$	26.30	4.00	1.41	3.72
	$m(\text{水}) : m(\text{水泥}) : m(\text{河砂}) = 0.5 : 1 : 1$	21.30	3.99	1.11	2.86
	$m(\text{水}) : m(\text{水泥}) : m(\text{河砂}) = 0.6 : 1 : 1$	17.48	3.35	0.99	2.68

1.2 充填节理试件制备

依次采用水刀和线性切割技术对花岗岩进行切割加工,试件表面中心点为原点,通过原点的水平直线为基准线,以逆时针旋转为正方向,在试件表面切割倾角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 等长且贯通的节理。节理长度为 25 mm,宽度为 5 mm,贯通试件深度为 50 mm,依规制作的节理花岗岩试件尺寸为 50 mm × 50 mm × 50 mm,如图 1(a)所示。

根据上述充填材料配比方案进行充填物的配制,配制浆液强度分别为花岗岩强度的 0(无充填)、5%、10%、15%、20%,充填步骤为:

- 1) 将防水胶带固定在花岗岩试件一侧的裂隙处,防止注入浆液时从裂隙处流出;用注射器从另一侧裂隙缓慢均匀注入浆液,注入完成后轻微晃动试件,确保浆液充实;
- 2) 静置试件,直至浆液凝固后将胶带取下并标号;
- 3) 对试件进行打磨,保证充填处平整,完成充填试件制备。

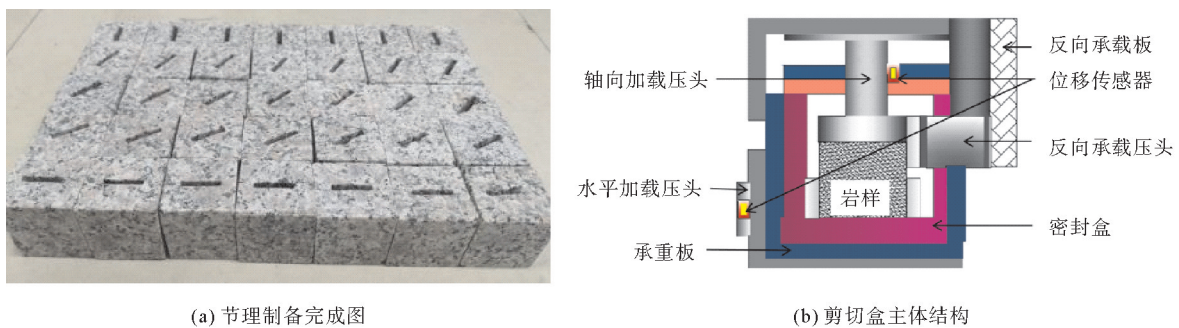


图 1 节理试件制备及剪切盒结构图

Fig. 1 Preparation of joint specimen and shear box structure diagram

1.3 试验设备及步骤

直剪试验由 MTS816.01 岩石力学剪切试验仪和 MISTRAS 系列 PCI-2 声发射监测系统分别完成试件剪切及能量监测。试验分为 5 组共计 25 块试件,试验步骤:

- 1) 将试件放入剪切盒(图 1(b))中进行装配,用胶带将涂有耦合剂的声发射探头固定在剪切盒表面;
- 2) 以 0.2 MPa/s 加载法向应力至 30 MPa,并保持恒定;
- 3) 以 0.5 mm/min 的速率进行剪切位移加载,直至试件发生明显破坏。

2 剪切力学特性分析

2.1 剪切应力-剪切位移曲线

节理无充填、充填强度 5%、充填强度 10%、充填强度 15% 的剪切应力-剪切位移曲线如图 2 所示。同一充填强度不同节理角度剪切应力-剪切位移曲线均可划分为压密阶段(OA)、线性阶段(AB)、屈服阶段(BC)、破坏阶段(CD)、残余阶段(DE),各曲线随剪切位移的增加具有一致的发展趋势。同一充填强度下的不同节理角度试件原生孔隙闭合持续时间短,没有明显的压密阶段,曲线依次经过近似直线变化的线性阶段,到达剪切应力增长速率缓慢的屈服阶段,达到峰值剪切应力后进入破坏阶段,最终到达残余阶段。不同充填强度下,倾角为 90° 节理试件的剪切应力-剪切位移曲线屈服阶段占比明显提高,其原因是 90° 倾角节理试件剪切方向上的花岗岩占比高于其他倾角节理试件,导致试件整体的塑性能力提升。同一充填强度不同节理角度下节理试件剪切开始后,裂纹从节理花岗岩边缘处开始萌生发育,随着剪切的进行裂纹向节理花岗岩内部扩展至节理处,当节理含有充填物时,充填物在剪切应力作用下发生剥落与破坏,充填物在法向应力与剪切应力作用下增大了上下节理面之间的摩擦阻力,改变了裂纹扩展的介质,进而导致充填试件的峰值剪切位移与残余强度均大于无充填试件。

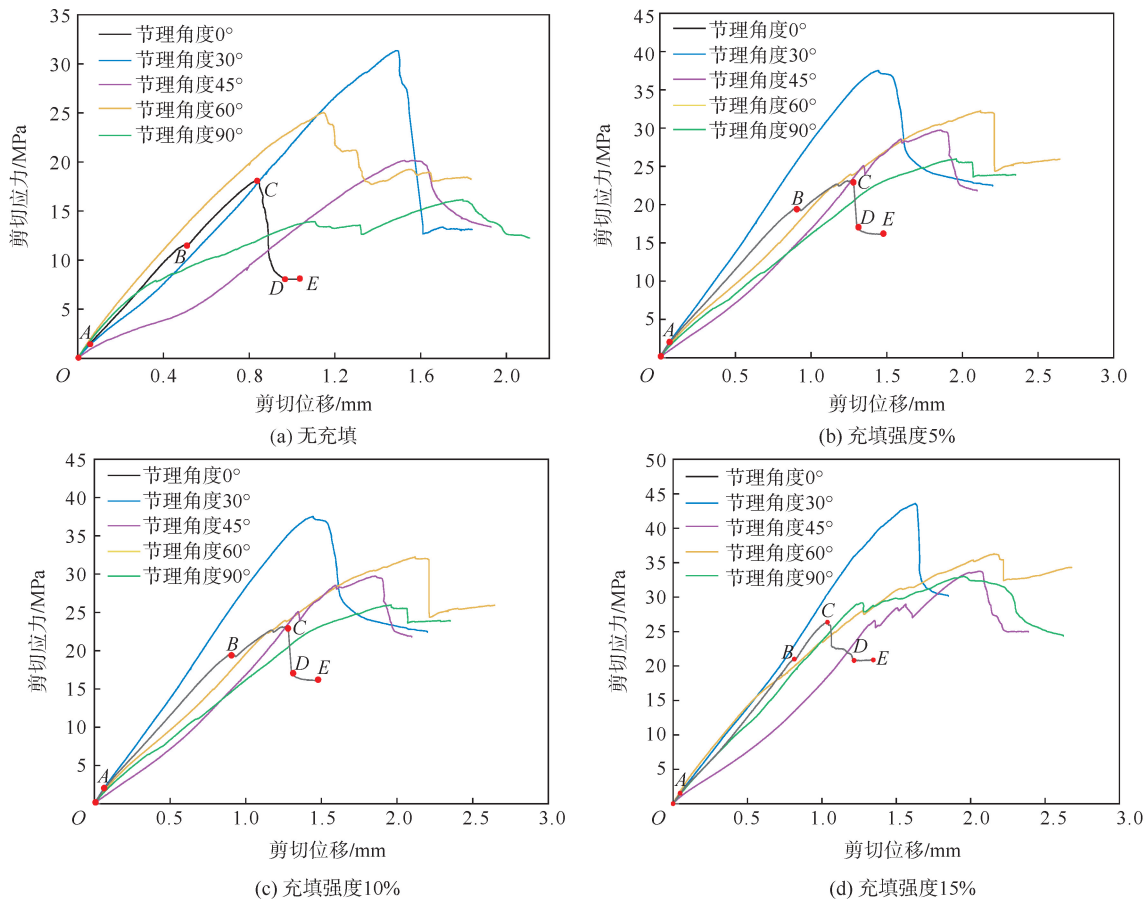


图 2 不同节理角度剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 2 Shear stress-shear displacement curves of different joint angles

2.2 剪切强度演化特征

图 3 展示了不同充填强度下节理花岗岩峰值剪切强度的演变规律。不同充填强度下节理花岗岩峰值剪切强度均随节理角度增大依次呈现上升、下降、上升、下降的“M”型变化趋势。

对不同充填强度下节理花岗岩峰值剪切强度变化规律进行分析。当节理角度为 0° 时,4 组节理花岗岩的

抗剪强度随充填物强度由 0 增至 20% 分别增加了 28%、29%、30%、31%；当节理角度为 30° 时，节理花岗岩抗剪强度增加了 27%、33%、39%、50%；节理角度为 45° 时，节理花岗岩抗剪强度增加了 60%、65%、70% 和 83%；节理角度为 60° 时，节理花岗岩抗剪强度增加了 42%、44%、45%、64%；节理角度为 90° 时，节理花岗岩抗剪强度增加了 74%、81%、105% 和 162%。可以发现，同一节理角度下花岗岩抗剪强度均与充填强度呈正相关，充填物依靠改变裂纹扩展的介质，影响充填试件抗剪强度，充填物强度较低时，裂纹可能会穿过充填物，试件抗剪强度在充填物影响下具有小幅提升；充填物强度较高时，充填物有效阻碍了裂纹传播，致使节理试件抗剪强度增加。此外，节理角度对抗剪强度增幅具有一定影响：当节理角度为 90° 时，抗剪强度随充填物强度由 0 增至 20% 的增加幅度最大，当节理角度为 0° 时，20% 充填强度下抗剪强度仅增强了 31%，可见节理角度为影响花岗岩峰值剪切强度的重要因素。节理角度通过改变剪切应力与节理面的受力状态影响试件的抗剪强度，0° 节理面与剪切应力方向平行，导致剪切应力直接作用在节理面而更容易破坏；45° 节理面与剪切应力方向夹角呈 45°，作用在节理面上的剪力较大，容易使试件在节理处发生破裂；90° 节理面与剪切应力方向垂直，导致节理部分受到挤压从而使试件更容易发生破坏。

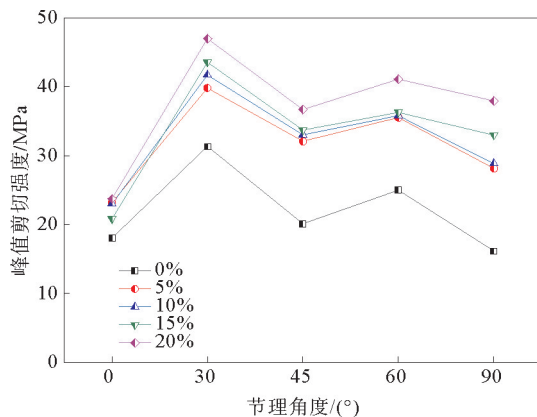


图 3 不同充填强度花岗岩峰值剪切强度变化曲线

Fig. 3 Variation curve of peak shear strength of granite with different filling strength

3 剪切损伤演化特征分析

损伤变量和声发射能量是描述节理岩体损伤演化特征的重要参数，可以反映岩石内部破裂试件的活跃度及岩石的累计损伤程度。以修正后的损伤变量和声发射累计能量作为特征参量^[14-15]，可实现不同角度充填节理花岗岩损伤演化的定量表征：

$$D = \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p}\right) \frac{\sigma_d}{\sigma_0} \quad (1)$$

式中： D 为损伤变量， σ_c 为残余强度， σ_p 为峰值强度， σ_d 为试件压缩破坏过程中各阶段的累计声发射事件能量计数， σ_0 为试件压缩破坏全过程的累计声发射能量计数。

图 4 展示了不同充填强度节理花岗岩试件损伤演化规律，除损伤率有所不同外，节理花岗岩试件损伤演化规律大致相同，故选取充填强度 10%、节理角度 30°、45°、60° 和 90° 的试件进行分析。节理花岗岩试件的损伤演化过程与剪切应力-剪切位移曲线有良好的对应关系，整个损伤演化过程均可分为 3 个阶段：

1) 裂纹闭合阶段。试件内部原生裂隙随轴向应力增加逐渐压密，该阶段收集到极少的能量，损伤缓慢增长，声发射能量与损伤变化处于平静期。

2) 裂纹萌生发育阶段。随着剪切进行，原生裂纹逐渐被再次激活，试件内部裂纹开始不断发育、扩展，新裂纹不断产生，声发射能量开始变得密集并逐渐升高，试件损伤率增长速度相较裂纹闭合阶段加快。

3) 裂纹扩展破坏阶段。早期试件形成的大量裂纹在剪切应力作用下迅速扩展并与节理连通贯穿试件，积累的弹性能突然释放，声发射能量与损伤急剧增加，试件发生整体失稳破坏。

综上所述，在裂纹闭合阶段与裂纹萌生及发育阶段，损伤率增长缓慢；直至进入裂纹扩展与破坏阶段，损伤率骤增，试件破坏后到达最大值。节理角度 0°、45° 和 90° 试件损伤率均大于 30° 和 60° 节理试件，0°、45° 和 90° 3 个节理角度试件在进入裂纹扩展与破坏阶段后，裂纹与节理的相互作用程度增大，加剧试件破坏、损伤增大，也导致剪切强度的降低。

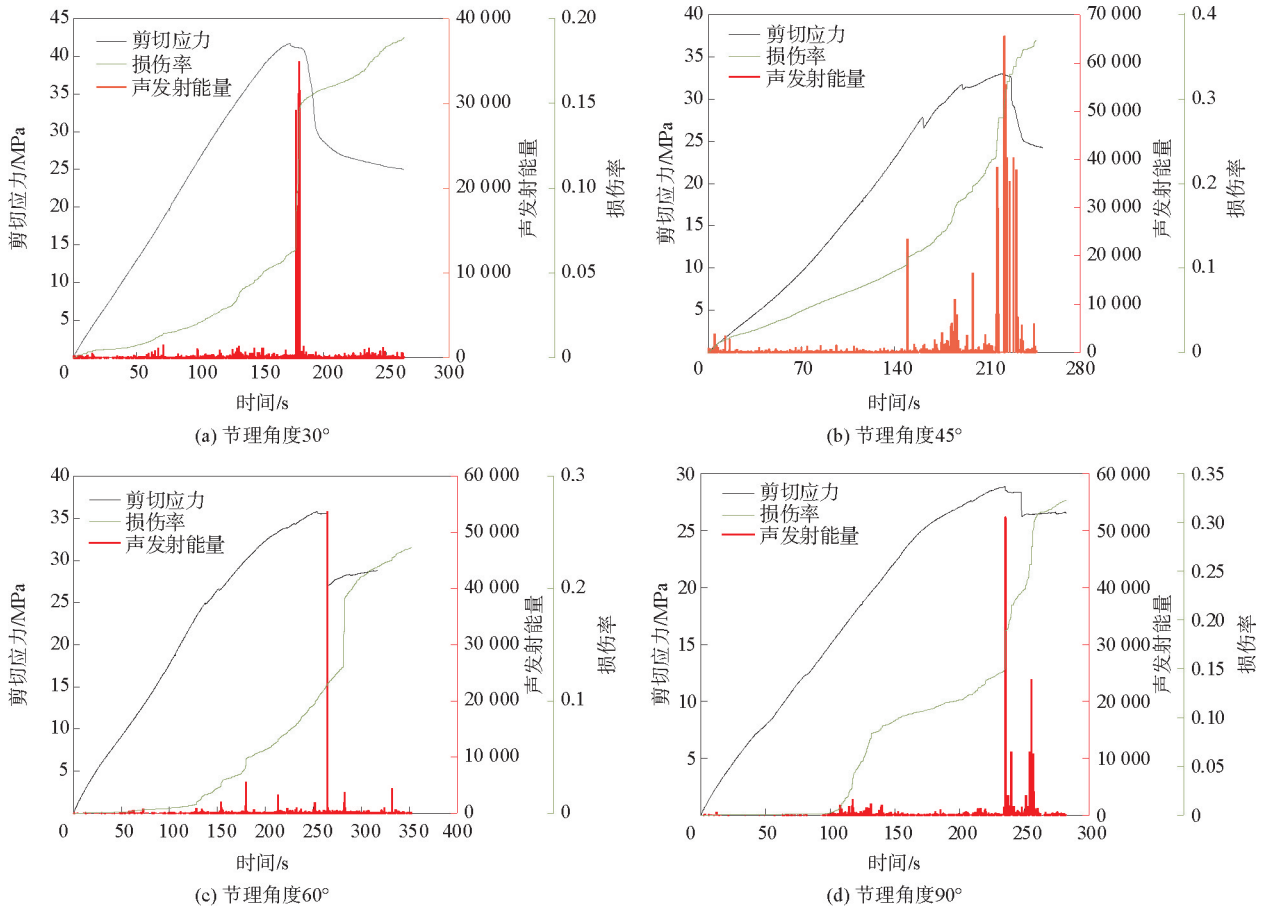


图4 节理充填强度为10%时花岗岩应力-损伤演化关系曲线

Fig. 4 Stress-damage evolution curve of granite with joint filling strength of 10%

4 节理花岗岩宏观破坏特征及裂纹扩展规律分析

裂纹扩展模式可分为水平方向扩展与平行节理方向扩展;节理角度为0°和90°时,试件裂纹沿水平方向扩展;节理角度为30°、45°和60°时,节理试件裂纹沿平行节理的方向扩展。节理角度为30°、45°和60°时节理试件裂纹扩展规律相似,因此选取节理角度为0°、30°和90°的试件进行破坏特征与裂纹扩展形式的对比分析。

4.1 节理角度为0°时花岗岩破坏特征及裂纹扩展规律

图5展示了节理角度为0°时不同充填强度试件的破坏特征。试件剪切裂纹均从试件左侧边缘开始扩展穿过节理后贯穿整个试件。充填试件的充填物与花岗岩胶结强度较弱,导致剪切裂纹沿充填节理上边缘向试件右侧扩展,之后剪切裂纹在节理右侧边缘沿水平方向扩展直至贯通整个试件。观察剪切断裂面发现,3种充填强度试件断面上均有轻微的滑移摩擦痕迹,表面无碎石产生。

4.2 节理角度为30°时花岗岩破坏特征及裂纹扩展规律

图6展示了节理角度为30°时花岗岩试件破坏特征。无充填试件剪切裂纹的扩展方向与节理角度平行,沿30°方向扩展贯穿预制节理后贯通试件,试件在法向应力和剪切应力的作用下,预制节理上侧产生1条张拉裂纹,节理两侧断面有明显摩擦痕迹且破坏严重,有碎石产生。当充填强度为5%时试件的剪切裂纹扩展方向与无充填试件相似,在充填物影响下发育有剪切裂纹,充填节理上下两侧无明显破坏,试件断面破坏较为严重,摩擦痕迹明显且伴有碎石产生。当充填强度为10%时试件的剪切裂纹主要沿水平方向扩展,但剪切裂纹两端方向与预制节理平行,直到贯通试件右端,并在试件下半部产生两条与预制节理平行的张拉裂纹,节理两侧断面磨损严重,并在摩擦破坏下产生碎石。

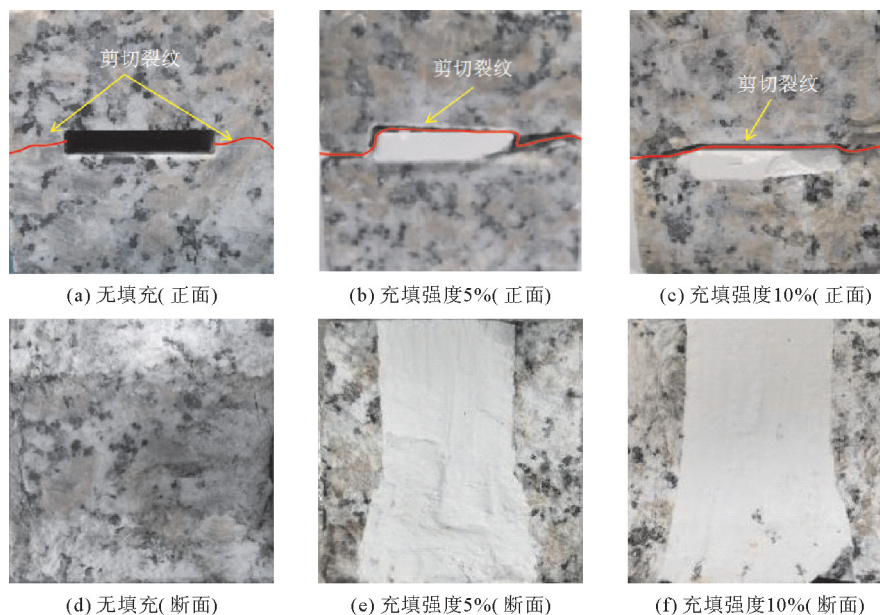


图 5 节理角度为 0°时花岗岩剪切破坏特征

Fig. 5 Shear failure characteristics of granite with joint angle of 0°

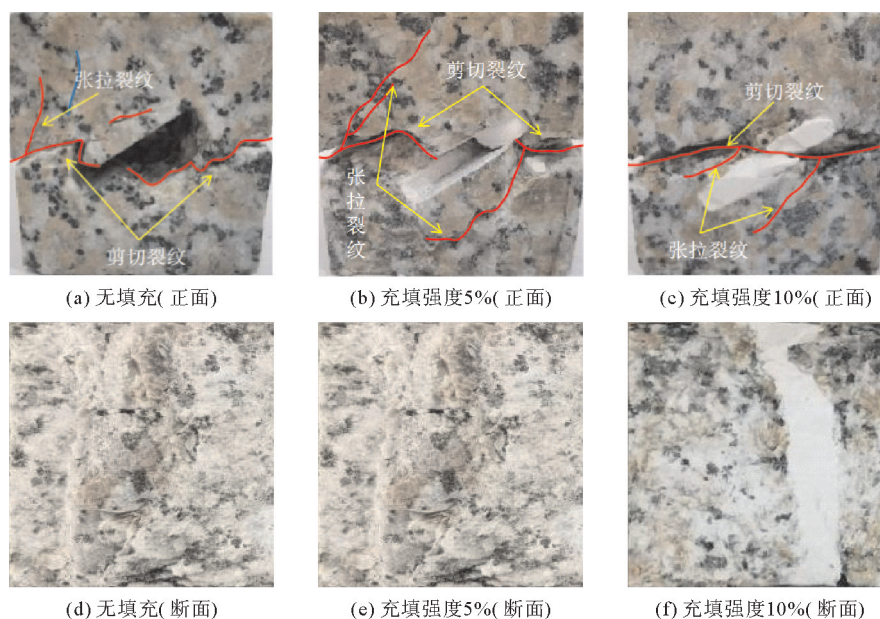


图 6 节理角度为 30°时花岗岩剪切破坏特征

Fig. 6 Shear failure characteristics of granite with joint angle of 30°

4.3 节理角度为 90°时花岗岩破坏特征及裂纹扩展规律

图 7 展示了节理角度为 90°时试件破坏特征。无充填试件剪切裂纹主要沿水平方向扩展,裂纹贯通预制节理,中间节理部分由于无充填物的存在,在剪切应力的作用下产生切向位移导致裂隙闭合,预制节理两侧断面在法向应力作用下破损严重。当充填强度为 5%时,试件两条剪切裂纹近似沿水平方向扩展,节理右侧斜向下产生 3 条张拉裂纹,导致充填节理下半部破损严重,且断面有轻微摩擦痕迹。当充填强度为 10%时,试件剪切裂纹主要沿水平方向扩展,将试件分为上下两部分,并在法向应力的作用下,试件沿着轴向发生破坏。试件产生轴向破坏后上部断裂为两块,使得上下两个断面之间的受力分散,断面只有轻微磨损。

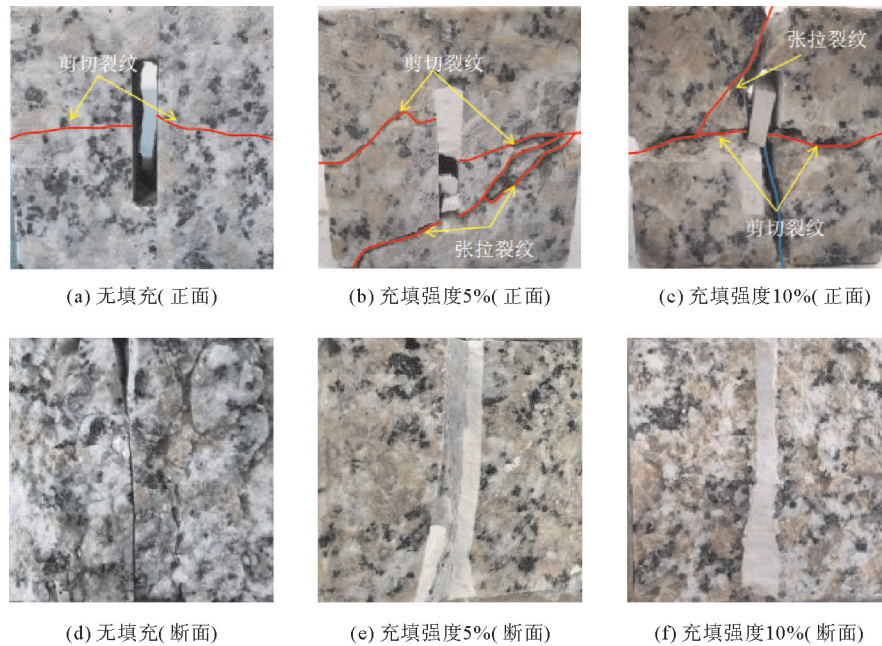


图 7 节理角度为 90°时花岗岩剪切破坏特征

Fig. 7 Shear failure characteristics of granite with joint angle of 90°

5 结论

通过分析节理花岗岩剪切应力-剪切位移曲线与剪切声发射损伤演化特征,对不同角度充填节理花岗岩的剪切试验进行了系统研究,得到以下结论。

1) 充填物通过影响裂纹在岩体中的发育、改变裂纹扩展的介质进而影响花岗岩的抗剪强度;相比充填物,充填节理角度对花岗岩抗剪强度影响更为重要,节理面与剪切应力的夹角通过影响花岗岩剪切时节理面的受力状态,相同充填强度下节理花岗岩抗剪强度均随节理角度增大呈“M”型变化趋势。

2) 利用修正后的损伤变量对节理花岗岩损伤演化特征进行定量表征,不同角度充填节理花岗岩损伤演化过程可分为裂纹闭合、裂纹萌生发育、裂纹扩展破坏 3 个阶段。充填节理花岗岩损伤变量在每个阶段的增长速度不同,随着损伤演化的进行不断增大,到达裂纹扩展破坏阶段后损伤变量骤增,并在节理试件破坏时达到最大值。

3) 节理角度影响花岗岩试件裂纹扩展与断面破坏特征,0°和 90°节理试件在不同充填强度下主要剪切裂纹均水平扩展且贯穿节理,不同充填强度下的其他节理角度试件主要剪切裂纹扩展方向与节理角度方向一致,并存在未贯通试件的斜向裂纹;0°和 90°试件断面平整,有轻微摩擦痕迹,无碎石产生;30°、45°和 60°断面摩擦痕迹明显,且有碎石产生。

参考文献:

[1] 汪集暘,孔彦龙,段忠丰,等.“双碳”目标下煤田区地热资源开发利用与储能技术[J].煤田地质与勘探,2023,51(2):1-11.
WANG Jiyang,KONG Yanlong,DUAN Zhongfeng,et al. Geothermal energy exploitation and storage in coal field under the dual carbon goal[J]. Coal Geology & Exploration,2023,51(2):1-11.

[2] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘,2020,27(1):1-9.
WANG Guiling,LIU Yanguang,ZHU Xi,et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers,2020,27(1):1-9.

[3] 金爱兵,陆通,王本鑫,等.基于改进力学等效的岩体关键节理倾角特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):76-87.
JIN Aibing,LU Tong,WANG Benxin,et al. Experimental study on the dip characteristics of key joints in rock mass based

- on improved mechanical equivalence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 76-87.
- [4] 刘婷婷, 阳润超, 丁鹿阳, 等. 含非贯通节理花岗岩的力学特性与细观起裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1070-1082.
- LIU Tingting, YANG Runchao, DING Luyang, et al. Study on mechanical properties and meso-initiation mechanism of granite with non-persistent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1070-1082.
- [5] 马芹永, 苏晴晴, 马冬冬, 等. 含不同节理倾角深部巷道砂岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1104-1116.
- MA Qinyong, SU Qingqing, MA Dongdong, et al. SHPB experimental study on dynamic characteristics and failure behaviors of sandstone containing weakly filled joints with various angles in deep roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1104-1116.
- [6] CHEN Q Z, LIU Y M, WANG W, et al. Effects of normal stress and joint inclination angle on rock failure characteristics under compression-shear conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1104-1116.
- [7] 陈占锋, 向娟, 范文臣, 等. 不同充填度对节理剪切破坏机理的影响[J]. 中国科技论文, 2019, 14(6): 614-619.
- CHEN Zhanfeng, XIANG Juan, FAN Wenchen, et al. Influence of different filling degrees on failure mechanism of rock joint [J]. China Sciencepaper, 2019, 14(6): 614-619.
- [8] 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.
- [9] 钟志彬, HU Xiaozhi, 邓荣贵, 等. 含裂隙充填节理岩体的压剪断裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增1): 3320-3331.
- ZHONG Zhibin, HU Xiaozhi, DENG Ronggui, et al. Study on the compression-shear fracture mechanism of infilled jointed rock mass with pre-crack[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3320-3331.
- [10] 李杨杨, 颜浩东, 张士川, 等. 复合缺陷类岩石裂纹扩展规律及力学特性试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 42-50.
- LI Yangyang, YAN Haodong, ZHANG Shichuan, et al. Experimental study on the expansion law and mechanical characteristics of crack propagation in rock with composite defect[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(2): 42-50.
- [11] 黄冬梅, 朱盈盈, 乔书昱, 等. 含孔洞-双裂隙红砂岩宏观细观损伤特征数值试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 32-42.
- HUANG Dongmei, ZHU Yingying, QIAO Shuyu, et al. Numerical experiments on macro-and micro-damage characteristics of red sandstone with pore-double fractures[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 42(4): 32-42.
- [12] 郭运宏, 马芹永. 充填节理砂岩波速及强度影响试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2020, 40(3): 71-76.
- GUO Yunhong, MA Qinyong. Experimental study on the influence of wave velocity and strength of filled joint sandstone [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 40(3): 71-76.
- [13] 柴少波, 王昊, 井彦林, 等. 充填节理岩石累积损伤动力压缩特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2025-2037.
- CHAI Shaobo, WANG Hao, JING Yanlin, et al. Experimental study on dynamic compression characteristics of rock with filled joints after cumulative damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2025-2037.
- [14] 张士川. 采动底板构造活化灾变前兆信息辨识及突水机理试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- ZHANG Shichuan. Experimental Study on catastrophe information identification of structural activation and water inrush mechanism in mining floor[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [15] 杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 98-104.
- YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 98-104.