

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.029



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



分级循环荷载下裂隙岩石疲劳破坏特性与 能量演化机制

王军祥¹, 赵会敏¹, 郭连军¹, 李林², 徐晨晖¹, 孙港¹

(1. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院, 沈阳 110870; 2. 中铁十九局集团第五工程有限公司, 辽宁大连 116100)

摘要: 分级循环荷载下裂隙岩石裂隙扩展模式、疲劳变形特性以及能量演化规律对地下工程安全施工和运营有着重要意义。考虑裂隙角度、裂隙数量和裂隙分布开展常规劈裂试验、分级循环荷载试验和非接触变形测量试验, 对破坏特征、动弹性模量进行分析, 研究轴向不可逆变形与疲劳寿命之间的关系。从能量角度出发, 计算破坏过程中的总吸收能量、可释放应变能及耗散能, 分析能量演化与裂隙扩展模式响应关系。研究结果表明: 1) 岩石疲劳变形可分为初始变形阶段、稳定阶段和加速破坏阶段, 滞回环曲线呈现出“疏—密—疏”的特性, 对每 200 个循环的动弹性模量进行分析, 加载第 2 阶段动弹性模量有强化特征, 进入第 3 阶段后动弹性模量减小; 2) 总吸收能、耗散能和弹性能都呈上升趋势, 总吸收能增长缓慢, 增长速度随着循环次数增加逐渐变缓, 耗散能在进入破坏阶段后迅速上升, 弹性应变能变化趋势不明显, 中等倾角的耗散能较多; 3) 在破坏过程中均会产生翼裂纹和倾斜次生裂纹, 裂纹相互作用和合并, 产生连续塑性应变累积, 形成压碎的小颗粒碎屑, 这与静荷载作用下脆性破坏机制不同。

关键词: 裂隙岩石; 裂隙扩展; 疲劳变形; 分级循环荷载; 动弹性模量; 能量演化

中图分类号: TU458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)03-0103-12

Fatigue failure characteristics and energy evolution mechanism of fractured rock under graded cyclic loading

WANG Junxiang¹, ZHAO Huimin¹, GUO Lianjun¹, LI Lin², XU Chenhui¹, SUN Gang¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, P. R. China;

2. Fifth Engineering Co., Ltd., China Railway 19th Bureau Group, Dalian 116100, Liaoning, P. R. China)

Abstract: The crack propagation mode, fatigue deformation characteristics and energy evolution pattern of cracked rock under graded cyclic loading are of great significance to the safe construction and operation of underground engineering. Conventional splitting test, graded cyclic load test and non-contact deformation

收稿日期: 2021-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51974187、51774066); 辽宁省自然科学基金(2019-MS-242); 辽宁省教育厅重点攻关项目(LZGD2020004); 中国博士后科学基金(2018M630293); 沈阳工业大学重点科研基金项目(ZDZRGD2020005)。

作者简介: 王军祥(1985-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程研究, E-mail: w.j.xgood@163.com。

Received: 2021-12-04

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51974187, 51774066); Liaoning Natural Science Foundation (No. 2019-MS-242); Liaoning Provincial Education on Department Focuses on Tackling Key Problems (No. LZGD2020004); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M630293); Key Scientific Research Foundation Project of Shenyang University of Technology (No. ZDZRGD2020005).

Author brief: WANG Junxiang (1985-), associate professor, doctoral supervisor, main research interests: rock mechanics and engineering, E-mail: w.j.xgood@163.com.

measurement test were carried out considering the crack angle, crack number and distribution. The failure characteristics and dynamic elastic modulus were analyzed, and the relationship between axial irreversible deformation and fatigue life was studied. From the perspective of energy, the total absorbed energy, released strain energy and dissipated energy in the failure process were calculated, and the relationship between energy evolution and the response of crack propagation mode was analyzed. The results show that : (1) The fatigue deformation of rock can be divided into the initial deformation stage, stable stage and the accelerated failure stage, and the hysteretic loop curve presents the characteristics of “thin-dense-thinness”. The dynamic elastic modulus of every 200 cycles is analyzed and that of the second loading stage is strengthened. In addition, the dynamic elastic modulus decreases after the third loading stage. (2) The total absorbed energy, dissipated energy and elastic energy all showed an upward trend. The total absorbed energy increased slowly, and the growth rate gradually slowed down with the increase of cycles. The dissipated energy increases rapidly after entering the failure stage, but the elastic strain energy does not change obviously, and the dissipated energy is more in the middle dip angle. (3) During failure process, wing cracks and inclined secondary cracks are generated, and the interaction and merger of the cracks result in continuous plastic strain accumulation and small particle debris, which is different from the brittle failure mechanism under static load.

Keywords: fractured rock; crack propagation; fatigue deformation; graded cyclic load; dynamic modulus of elasticity; energy evolution

近年来岩体工程规模不断扩大,岩体是天然产物,内部含有裂隙和孔洞等,这些缺陷导致岩体强度和刚度降低,在循环荷载作用下更容易发生变形和破坏。研究循环荷载下裂隙岩体疲劳破坏及能量演化对地下工程施工和运营至关重要。

学者们关于循环荷载作用下岩石的变形及疲劳破坏特性开展了大量的研究工作^[1-5],在循环荷载作用下岩石变形的弹性部分在卸荷的过程中将会得到恢复,但是不可逆变形(又称塑性变形或残余变形)会残留下来,轴向不可逆变形可划分为:初始变形、等速变形和加速变形3个阶段,并有学者指出从不可逆变形的角度研究疲劳破坏过程更为科学和关键。通过不同方式对岩石制备裂隙,研究循环荷载作用下裂隙试件的疲劳破坏规律和断裂强度^[6-9],动态加载频率影响岩石的强度和疲劳寿命,损伤变量随着应力上限增加而增加。随着能量理论的发展,为岩石力学特性的研究提供了新思路,弥补了传统经典力学的不足,更好地反映岩石破坏的本质属性。许多学者从能量角度开展相关研究,金丰年等^[10]基于耗散能,定义出材料的损伤变量,得出材料损伤的扩展规律;Wang等^[11]通过建立不同角度的岩样,得出随着节理角度的增大,试样破坏所需的边界能和耗散能先减小后增大;李子运等^[12]通过三轴循环加卸载试验,揭示出岩石受载过程能量演化规律;谢和平等^[13]从宏观上描述了损伤能量释放率的变化规律,细观上揭示了岩石能量耗散的内在机制;张志镇等^[14]研究了岩石单轴压缩下的能量演化规律,将能量转化的过程分为能量输入、能量

积聚、能量耗散、能量释放4个阶段。

笔者开展常规劈裂试验、分级循环荷载试验和非接触变形测量试验,考虑裂隙数量、裂隙角度及裂隙分布,揭示能量演化规律与破坏特性。基于最小能量耗散原理,寻求能量演化和裂隙扩展模式响应关系。

1 试件制备与试验方法

1.1 试件制备

所用石灰岩取自大连市金州区,为确保岩样一致性,均从同一岩块取得,按照《工程岩体分级标准》(GB 50218—2014)将岩块制备成直径50 mm、高度100 mm的标准圆柱试件,然后切割成高25 mm、直径50 mm的巴西圆盘,满足试件端面不平度误差小于0.05 mm、不平整度小于0.02 mm的要求。按照国际岩石力学学会(ISRM)标准,用水刀切割法制备人字形裂隙,切割精度为 ± 0.01 mm,满足试验要求。预制裂隙长30 mm,宽0.9 mm;平行双裂隙距离为20 mm。将巴西圆盘预制成单裂隙、平行双裂隙和不规则双裂隙试件,部分试件如图1所示。

1.2 试验设备

采用MTS Landmark试验机和英国IMETRUM

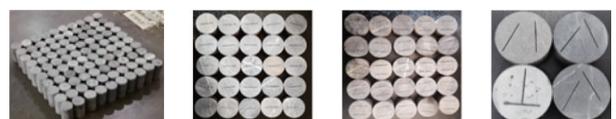


图1 岩石试件

Fig. 1 Rock sample

公司生产的非接触式视频测量仪,如图2所示。MTS Landmark是立式框架结构高精度动态电液伺服试验系统,最大受力为250 kN;载荷精度为静态力小于±0.5%、动态力小于±2.0%;试验频率为0~100 Hz;应变精度小于±0.5%,并采用150 mm动态行程。试验加载波形采用正弦波,加载频率为1 Hz。

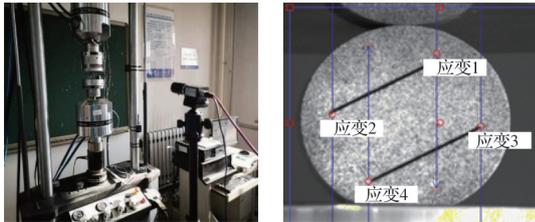


图2 MTS试验系统非接触变形测量标记点
Fig. 2 MTS test system non contact deformation measurement mark point

1.3 试验方案

单裂隙试件和平行双裂隙试件加载角度分别为0°、15°、30°、45°、60°,不规则双裂隙试件加载角度分别为30°、45°、90°。

1)开展常规巴西劈裂试验,以0.02 kN/s速度加载,测得岩石抗拉强度。

2)进行分级循环加载试验,分为两个阶段,第1阶段为直线加载阶段,加载至循环荷载平均值。第2阶段为分级循环加载阶段,其分为3级循环,第1级从循环荷载平均值开始加载至抗拉强度的50%作为上限应力,下限应力为抗拉强度的30%;第2级加载至70%,下限应力为50%;第3级加载至90%,下限应力为70%,每一级循环800次,直至破坏。加载模式如图3所示。

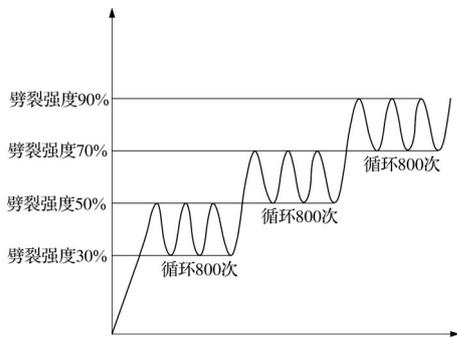


图3 加载模式
Fig. 3 Loading mode

3)数字图像处理方法又称数字散斑方法,是一种利用物体表面随机分布的斑点来给出变形场的非接触变形测量方法。通过测量圆盘裂隙断裂扩展特征,经计算机处理,最终得到试件表面应变场。

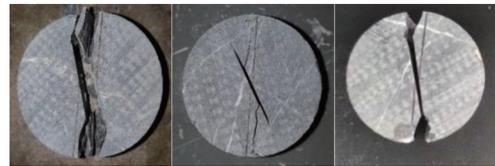
2 破坏模式分析

2.1 静载破坏模式

单裂隙试件破坏模式如图4所示,加载角度为0°时,形成上下贯通的裂隙,同时会伴随碎屑掉落,圆盘边缘的损坏最为严重;加载角度为15°时,形成“Z”形破坏裂隙,预制裂隙对试件的破坏起到主导作用;当加载角度为30°、45°和60°时,试件破坏模式与15°大致相同。平行双裂隙试件破坏模式如图5所示,加载0°与加载15°平行双裂隙试件破坏模式与标准圆盘相似,加载30°与加载45°时较上两种有明显差距,加载初期在一条裂隙的一侧萌生了翼裂隙,翼裂隙在预制裂隙上下两端扩展,逐渐沿着一条裂隙贯通;平行双裂隙试件加载60°破坏模式更为明显,并有大块碎块掉落。不规则双裂隙试件破坏模式如图6所示,裂隙偏转30°时,加载初期圆盘端部出现裂纹,随着荷载的增加裂纹沿着加载曲线延



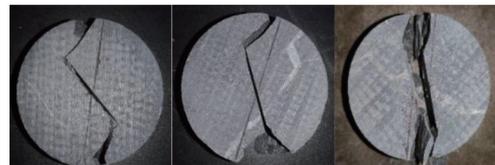
(a) 单裂隙试件0°加载



(b) 单裂隙试件15°加载



(c) 单裂隙试件30°加载



(d) 单裂隙试件45°加载

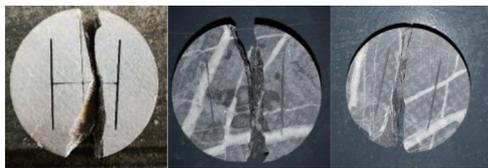


(e) 单裂隙试件60°加载

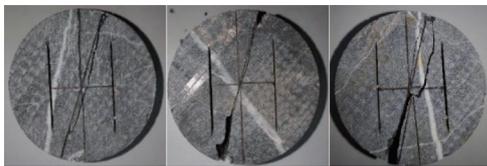
图4 单裂隙试件破坏模式

Fig. 4 Failure mode of single crack specimen

伸到底部,造成贯通破坏;当裂隙偏转60°时,与偏转30°不同,随着载荷的增加裂纹延伸到中间时,偏转的裂纹尖端会出现细小的次生裂纹,破坏时有碎屑掉落;裂隙偏转90°时,破坏有明显变化,端部裂纹扩展到中心裂隙时,出现偏移,偏移到靠近中心裂纹尖端再开始向底部扩展,当载荷达到峰值,试件发生带有滑移裂纹的贯通破坏。



(a) 平行双裂隙试件0°加载



(b) 平行双裂隙试件15°加载



(c) 平行双裂隙试件30°加载



(d) 平行双裂隙试件45°加载



(e) 平行双裂隙试件60°加载

图5 平行双裂隙试件破坏模式

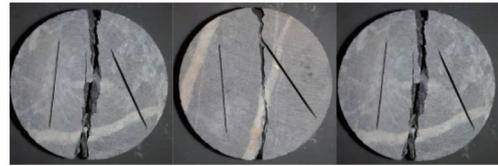
Fig. 5 Failure mode of parallel double crack specimen

2.2 分级循环荷载下裂隙破坏模式分析

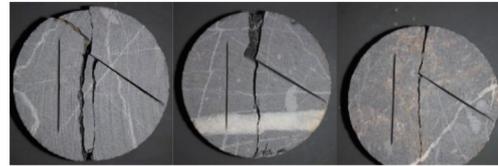
采集点时间分布在0~800 s、800~1 600 s和1 600 s至破坏阶段。

1)不同加载角度下单裂隙试件破坏模式:加载角为0°和15°时,以张拉破坏为主;在加载角为30°和45°时,发生拉伸-滑移破坏,属于复合型破坏;角度为60°时,以滑移破坏为主。

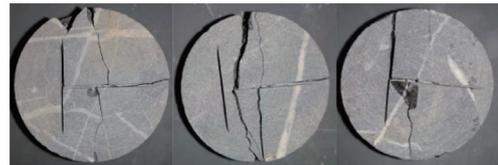
2)不同加载角度下平行双裂隙试件破坏模式:加载角为0°和15°时,以张拉破坏为主,双裂隙没有



(a) 不规则双裂隙试件偏转30°加载



(b) 不规则双裂隙试件偏转60°加载



(c) 不规则双裂隙试件偏转90°加载

图6 不规则双裂隙试件破坏模式

Fig. 6 Failure mode of irregular double crack specimen

参与破坏;加载角为30°和45°时,主要为拉伸-滑移破坏,一条裂隙参与破坏;加载角为60°时,主要为滑移破坏,两条裂隙都参与破坏。

3)不规则双裂隙试件破坏模式,加载角为30°时,破坏模式为中心破坏的张拉贯通破坏,仅一条裂隙参与破坏;加载角为60°时,破坏模式为拉伸-滑移破坏,偏转裂隙开始参与破坏;加载角为90°时,破坏模式为张拉破坏,两条裂隙均参与破坏。破坏模式如图7~图9所示。

图7~图9是岩石应变场图,单裂隙岩石加载角度相同时,不管是在静荷载作用下,还是疲劳荷载作用下,破坏特征类似;平行裂隙岩石和不规则裂隙岩石,有同样的特点,由此可以推测,当裂隙数目增加时(大于3条),裂隙岩石,在静载或疲劳荷载作用下的破坏特点也是类似的。又由于平行裂隙岩石的抗拉强度大于单裂隙岩石的抗拉强度,随着裂隙数目的增加,岩石峰值强度也会增加,直至峰值强度增加到一定范围就会停止,导致岩石破坏时更突然。从应变场图中可以清楚地看出岩石破坏的规律,更利于分析裂隙岩石破坏机理。

3 试验结果分析

3.1 不同裂隙和加载角度的岩石抗拉强度分析

根据ISRM推荐,采用巴西劈裂试验确定岩石抗拉强度,加载直径上的应力为

$$\sigma_t = 2P/\pi DL \quad (1)$$

式中: P 为载荷; D 、 L 分别为试件直径和厚度; σ_t 为

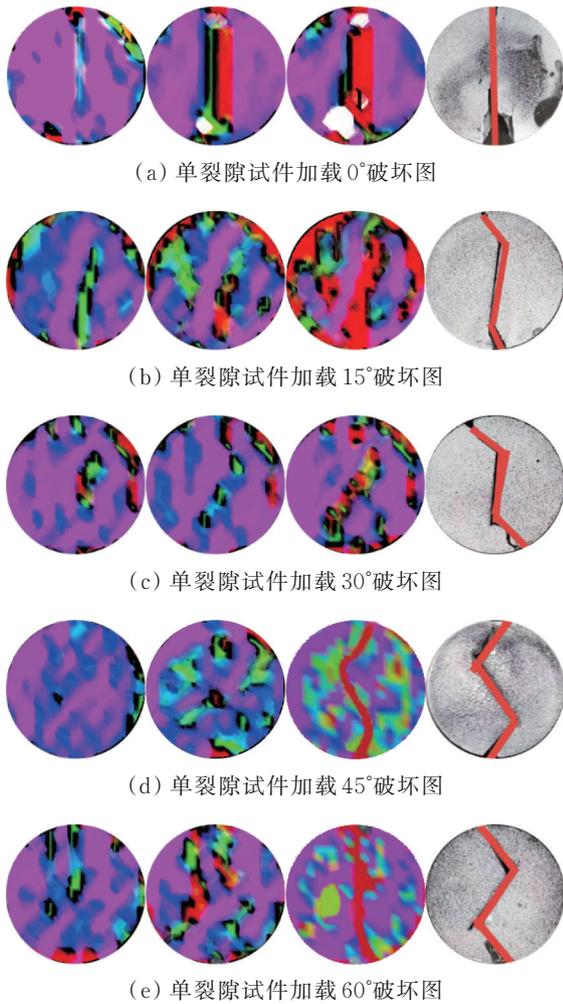


图 7 不同加载角度下单裂隙试件破坏图

Fig. 7 Failure diagram of single crack specimen with different loading angles

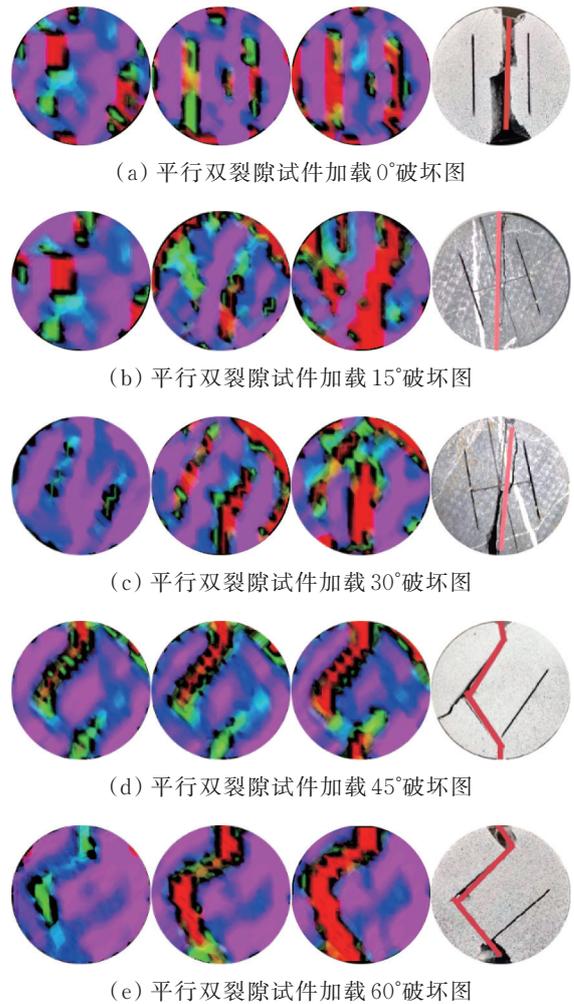


图 8 不同加载角度下平行双裂隙试件破坏图

Fig. 8 Failure diagram of parallel double crack specimen under different loading angles

岩石抗拉强度值。

不同裂隙岩石抗拉强度如图 10 所示,随裂隙偏转角度增加,裂隙沿加载端扩展至预制裂隙时间变长,所承受峰值荷载也变大,裂隙偏转角度越大,岩石抗拉强度越高。

不同裂隙数目、裂隙角度与岩石抗拉强度之间的关系曲线如图 11(a)、(b)所示。

在 0°时平行双裂隙强度最高,随着偏转角度增加,强度下降 30%,随着角度的偏转,裂隙参与破坏。角度为 45°和 60°时,两条裂隙均参与破坏,上端预制裂隙与顶部裂隙相连,下端预制裂隙与底部裂隙相连,裂纹扩展的前后关系,造成了强度上的差异。不规则裂隙岩石抗拉强度也体现了这一特征,峰值强度变化不大。

由图 11(b)可知:平行双裂隙圆盘的抗拉强度高于单裂隙圆盘的抗拉强度,因为双裂隙圆盘的预制裂隙,都分布在中心点两侧,加载时预制裂隙并未参与破坏,对圆盘强度影响较小,峰值强度较高,

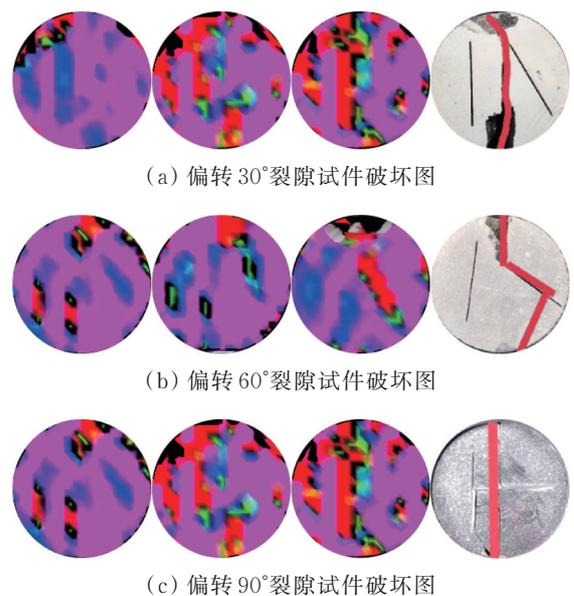


图 9 不同加载角度下不规则双裂隙试件破坏图

Fig. 9 Failure diagram of irregular double crack specimen under different loading angles

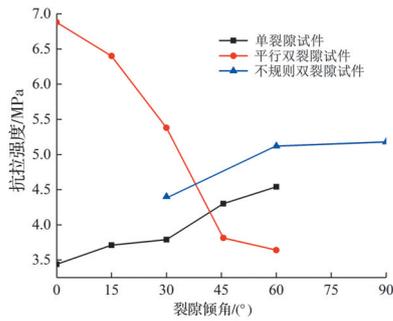
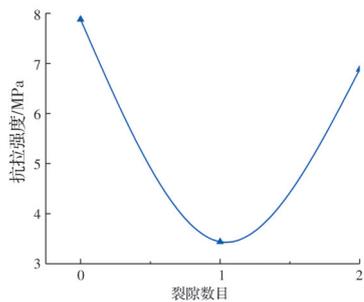
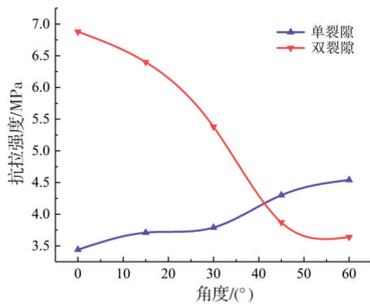


图10 不同裂隙岩石抗拉强度

Fig. 10 Tensile strength of different fractured rocks



(a) 裂隙数目与抗拉强度关系



(b) 裂隙角度与抗拉强度关系

图11 裂隙数目、角度与抗拉强度的关系

Fig. 11 Relationship between fracture number, fracture angle and tensile strength

使得平行双裂隙圆盘的抗拉强度较高。

3.2 分级循环荷载下试件应力-应变曲线分析

在不同角度下对单裂隙试件、平行双裂隙试件和不规则双裂隙试件进行分级循环加载如图12~图14所示。

由图12~图14可知,单裂隙试件、平行双裂隙试件和不规则双裂隙试件均表现出“疏—密—疏”的特点,第1阶段均是等速加载阶段,当加载至循环荷载平均值时,进入循环加载阶段,每级设置800次循环;第2阶段为初始循环荷载阶段,该阶段前期几个循环较后面的循环较为稀疏,滞回环面积也要大于后面的循环。从能量角度来看,每次循环所消耗的能量小于前一次;第3阶段是稳定循环荷载阶段,该阶段产生的滞回环面积较小,岩石变形增长缓慢,应力上限达到抗拉强度的70%,并没有达到岩

石疲劳破坏门槛值;第4阶段为加速疲劳破坏阶段,滞回环面积变得稀疏,随着循环次数的增加,弹性能逐渐减小,耗散能逐渐增加,应力达到岩石极限值时,发生脆性破坏。平行双裂隙试件与单裂隙试件不同的是平行双裂隙试件斜率都较高,动弹性模量普遍都大于单裂隙试样,在第3阶段的循环次数也多于单裂隙试件,滞回环面积也比较平均,很少出现变形突然增大不成环状的曲线。

从应力-应变曲线中可以看出,岩样破坏时应力达到上限,由此定义破坏点即为应力上限,其对应应变为破坏应变(极限应变)。岩样破坏时,均表现出突然的应力跌落和应变突增。

3.3 动弹性模量分析

动弹性模量公式为

$$E_d = \Delta\sigma_1 / \Delta\epsilon_1 \quad (2)$$

式中: E_d 为动弹性模量,与循环次数、加载角度有关; $\Delta\sigma_1$ 为应力幅值; $\Delta\epsilon_1$ 为应变差值。

分析循环荷载下的动弹性模量,拟合动弹性模量、角度和循环次数的拟合曲面,如图15所示。在分级循环的第1阶段,动弹性模量开始下降,随着循环次数的增加,裂纹被压实,动弹性模量开始上升。在第2阶段上升更明显,此阶段原生孔隙和微裂隙已经闭合,出现硬化现象。进入第3阶段后,应力上限达到疲劳门槛值,裂纹开始萌生、扩展和贯通,试件破坏,动弹性模量突然下降。若将加载角度作为变量,每一个循环阶段,随着角度的增大,弹性模量有增大趋势,在45°时达到顶峰,这与应力水平有一定关联,应力水平越高,动弹性模量越大。

3.4 轴向不可逆应变变化规律

不同角度的单裂隙试件轴向不可逆应变曲线如图16所示。由图16可以看出,整个过程的破坏曲线和分级加载3个阶段对应。由于循环加载之前有一段直线加载阶段,在第1个循环开始已经产生了变形。在第1阶段随着循环次数增加,内部薄弱部分裂隙逐渐形成,造成前几百个循环不可逆变形是增速较快的,而之后循环进入平缓阶段,无论循环增加多少次,只要上限应力没有改变,则不会产生较大变形。进入第2个循环阶段后,裂隙增长缓慢,此时岩石内部裂隙已经全部被压实,没有萌生新裂隙,裂隙会与矿物颗粒摩擦,有阻止裂隙扩展的能力,所以变形增速减缓,变化很小。进入第3阶段后,裂隙扩展到临界长度或宽度,开始不稳定扩展,随后迅速贯通,试件发生脆性破坏,该阶段变形快速增大,曲线呈上升趋势。裂隙萌生、稳定扩展和失稳破坏3阶段对应曲线图的3个阶段。

对上述曲线进行拟合,其公式为

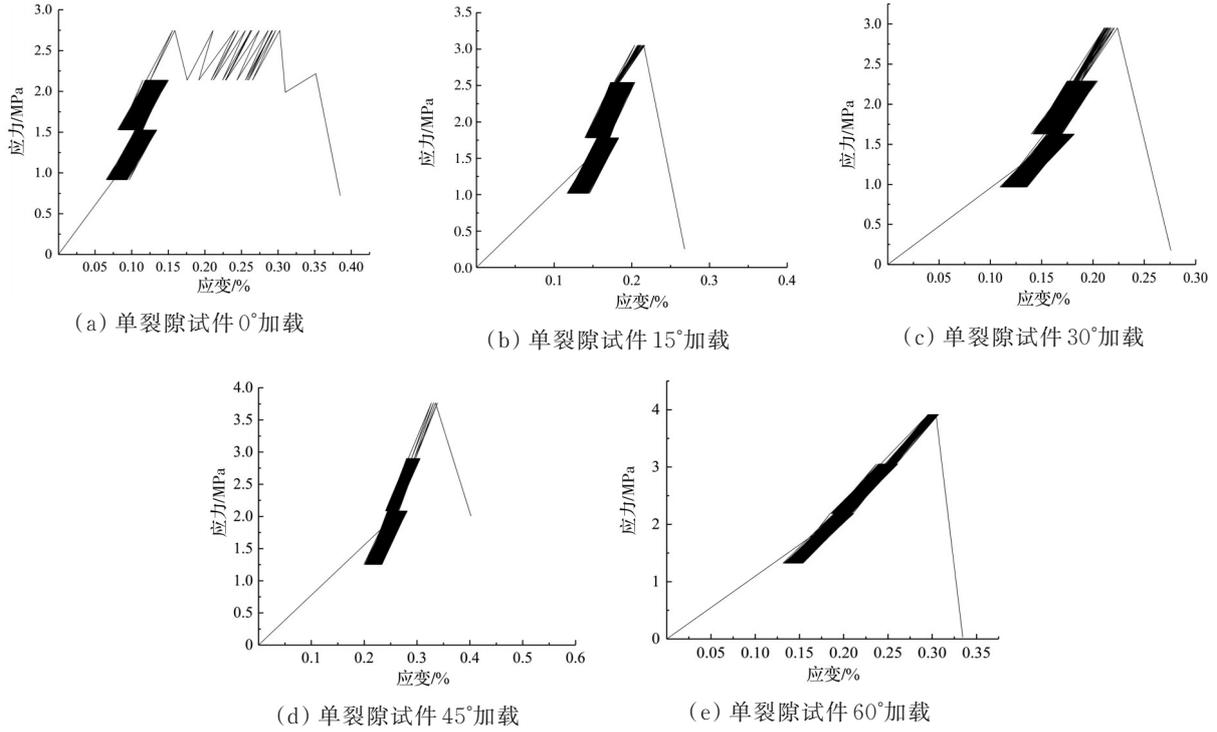


图 12 单裂隙试件应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curve of single crack specimen with

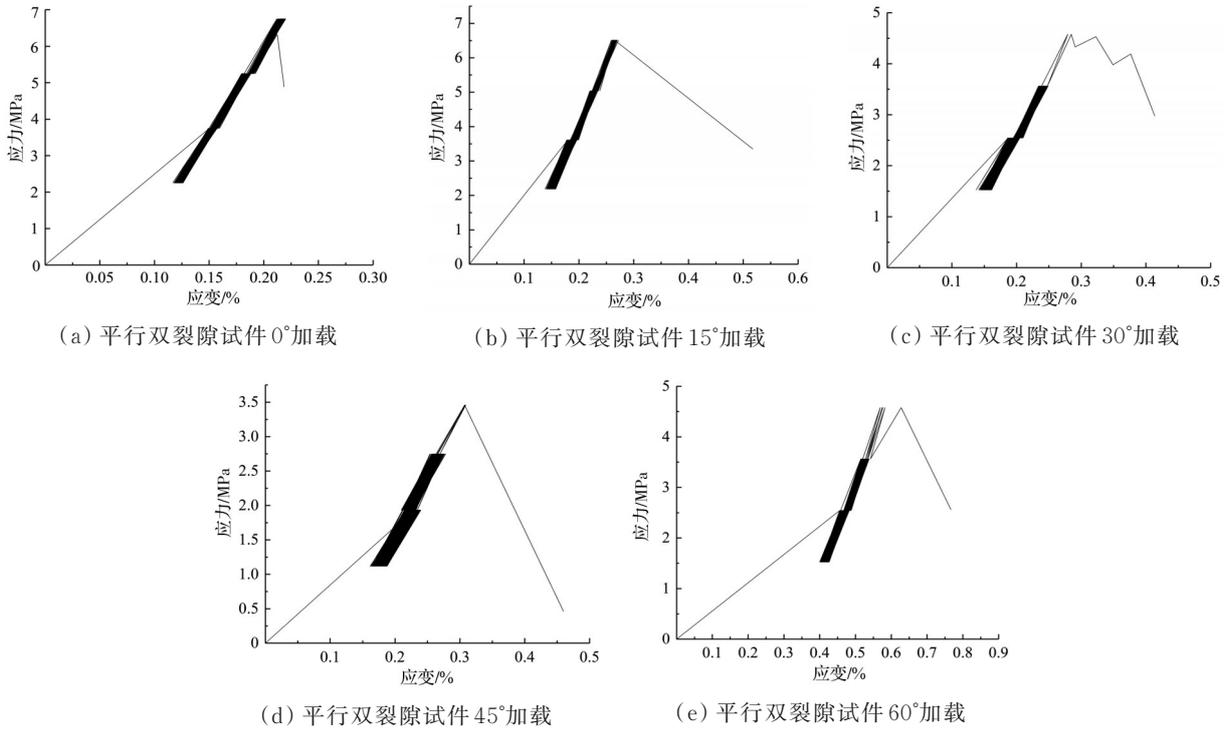


图 13 平行双裂隙试件应力-应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curve of parallel double crack specimen

$$\epsilon = a + b \ln(N + c) \quad (3)$$

式中： ϵ 为轴向不可逆应变； a 、 b 、 c 为拟合参数； N 为循环次数。

不同角度的拟合系数如表 1, 获得了轴向不可逆应变与循环次数之间的关系, 可进行岩石疲劳寿

命预测。

对各个角度和对应循环次数的轴向不可逆应变关系进行三维拟合如图 17 所示, 单裂隙三维曲面里 45° 时的应变在各个循环阶段里都大于其他角度, 各个角度的应变变化趋势几乎相同, 在前期的应变

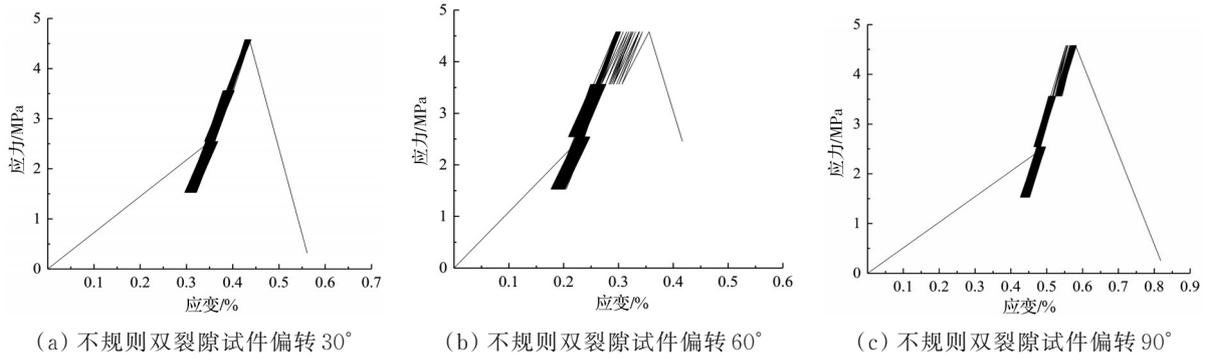


图 14 不规则双裂隙试件应力-应变曲线

Fig. 14 Stress-strain curve of irregular crack specimen

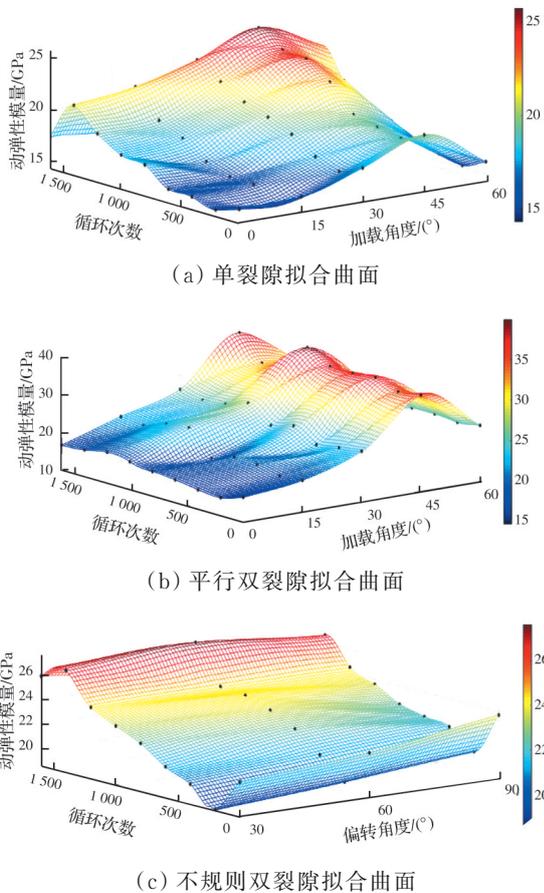


图 15 不同裂隙动弹性模量与循环次数、角度拟合曲面
Fig. 15 Fitting curves of dynamic elastic modulus and cycle times and angles of different fractures

都大于中期的应变,无论循环几百次应变均不增加,应变值的突增是在 1 600 个循环之后。

选用表征内部不可逆机制的宏观残余塑性变形构造的损伤变量来描述损伤演化行为,这是疲劳问题分析中常用的一种损伤变量定义形式,疲劳损伤变量为

$$D = \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_t - \epsilon_0} \quad (4)$$

式中: ϵ_0 为循环开始时的轴向不可逆应变; ϵ_t 为循环破坏时的轴向不可逆应变。疲劳损伤变量为

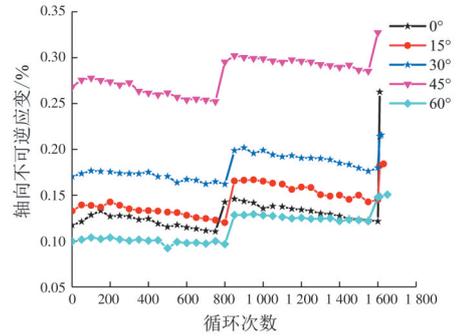


图 16 不可逆应变与循环次数关系

Fig. 16 Relationship between irreversible strain and cycles

表 1 拟合系数

Table 1 Fitting coefficient

角度/(°)	a	b	c	R ²
0	0.059	0.014	778	0.944
15	0.016	0.026	632	0.991
30	0.064	0.032	737	0.949
45	0.042	0.035	711	0.987
60	0.039	0.066	664	0.944

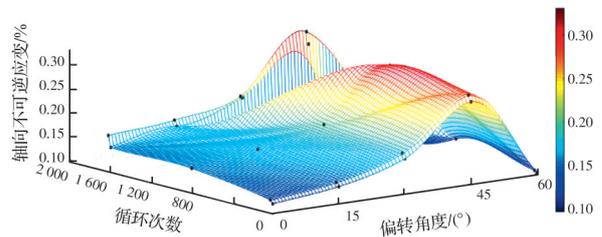


图 17 轴向不可逆应变拟合曲线

Fig. 17 Fitting curve of axial irreversible deformation

$$\begin{cases} \epsilon = a + b \ln(N + c) \\ \epsilon_0 = a + b \ln c \\ \epsilon_t = a + b \ln(N_t + c) \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得损伤变量为

$$D = \frac{\ln(N + c) - \ln c}{\ln(N_e + c) - \ln c} = \frac{\log_e(N + c) - 1}{\log_e(N_e + c) - 1} \quad (6)$$

当循环开始时, $N=0, D=0$ 未发生损伤; 循环结束时, $N=N_e, D=1$, 此时疲劳损伤达到最大破坏

值,岩石失稳破坏(其中 N_e 为试件破坏时的循环次数)。

3.5 能量演化规律

3.5.1 能量计算方法

岩石受载能量演化可分为能量输入、能量积聚、能量耗散和能量释放 4 个过程。在外力作用下产生变形,外力对岩石所产生的总输入能一部分存储到试件内部,另一部分被耗散掉。耗散能主要耗散在裂纹间断附近材料的塑性流动中。利用岩石加卸载所对应的应力-应变曲线可对耗散能和弹性能进行计算,认为卸载面积下的曲线是卸载后岩石所释放的能量,此能量值对应为积聚弹性能,总能量可认为是加载曲线以下的面积,耗散能为滞回环面积或总吸收能量与弹性能的差值,具体计算方法如图 18 所示。

$$u_i^d = \int_{\epsilon_i'}^{\epsilon_i''} \sigma_{i\text{加}} d\epsilon_i - \int_{\epsilon_i'}^{\epsilon_i''} \sigma_{i\text{卸}} d\epsilon_i \quad (7)$$

$$u_i^e = \int_{\epsilon_i'}^{\epsilon_i''} \sigma_{i\text{卸}} d\epsilon_i \quad (8)$$

式中: u_i^e 为卸载曲线下弹性能面积; u_i^d 为减去后的耗

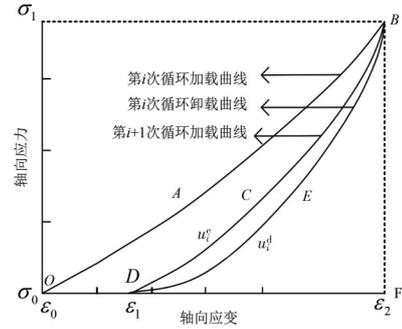


图 18 第 i 次循环加卸载应力-应变曲线

Fig. 18 Loading and unloading stress-strain curve of the i -th cycle

散能面积。

通过式(8)可以计算出每次循环各个曲线所围面积的大小,进而可得到试件在循环加载过程中各个阶段的能量变化情况。

3.5.2 疲劳破坏能量演化规律及特征

在不同裂隙和不同加载角度下,各部分能量计算结果如图 19~图 21 所示,获得每一阶段循环加载过程中岩样吸收总能量、弹性应变能、耗散能的演化情况。

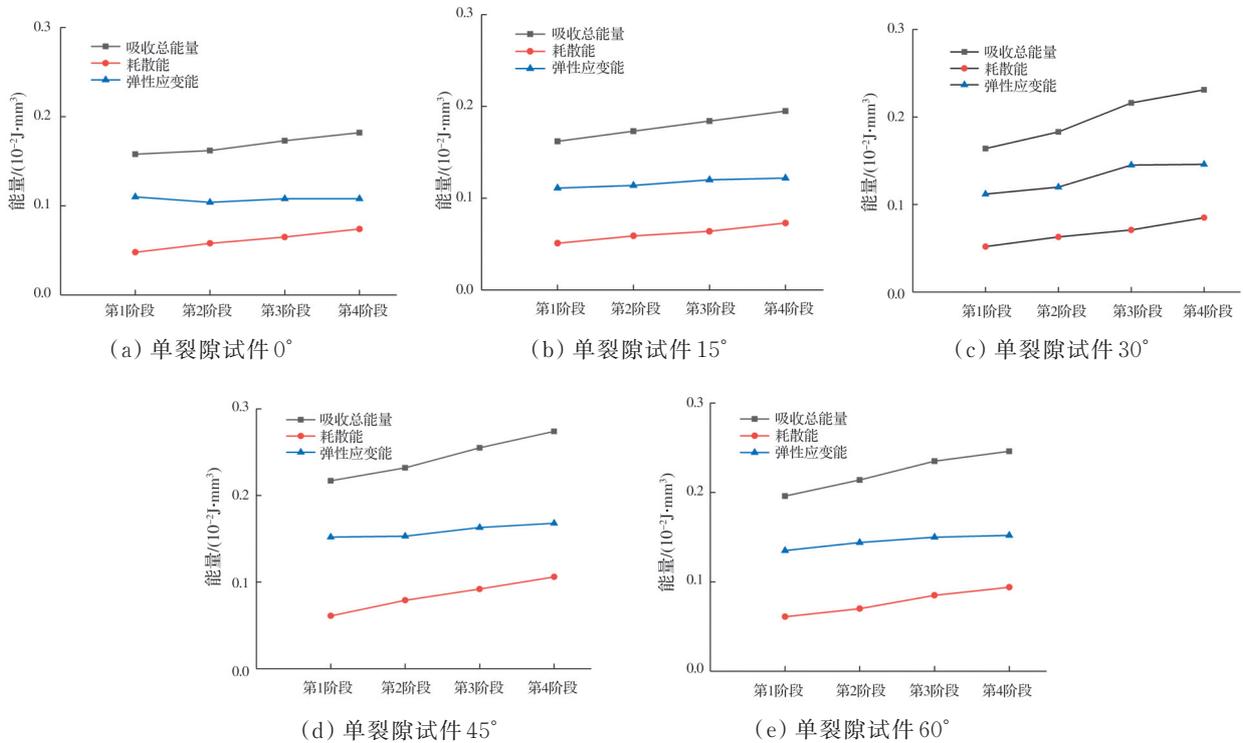


图 19 单裂隙试件能量曲线

Fig. 19 Energy curve of single crack specimen

由图 19~图 21 可知,尽管裂隙类型和加载角度不同,但是每次循环加卸载岩样均从外荷载吸收能量,随着循环次数增加,总能量增加的斜率并不大,说明岩石在压密和裂纹扩展阶段需要的能量较多。

在循环加载前期整体出现减小趋势,该阶段岩石被压密,能量耗散在岩体内部微裂纹的闭合上,压密之后岩体耗散能减少;在加载中期,耗散能稳定增加,岩石处于较稳定状态;临近破坏阶段耗散能逐

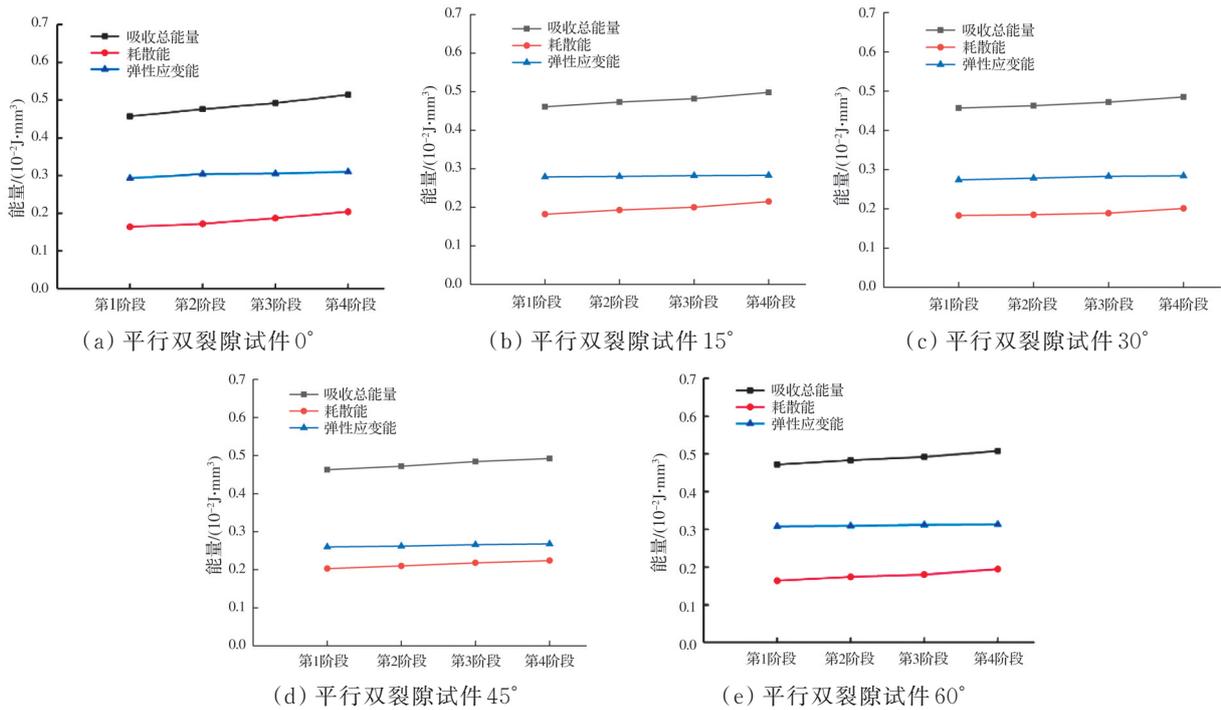


图 20 平行双裂隙试件能量曲线

Fig. 20 Energy curve of parallel double crack specimen

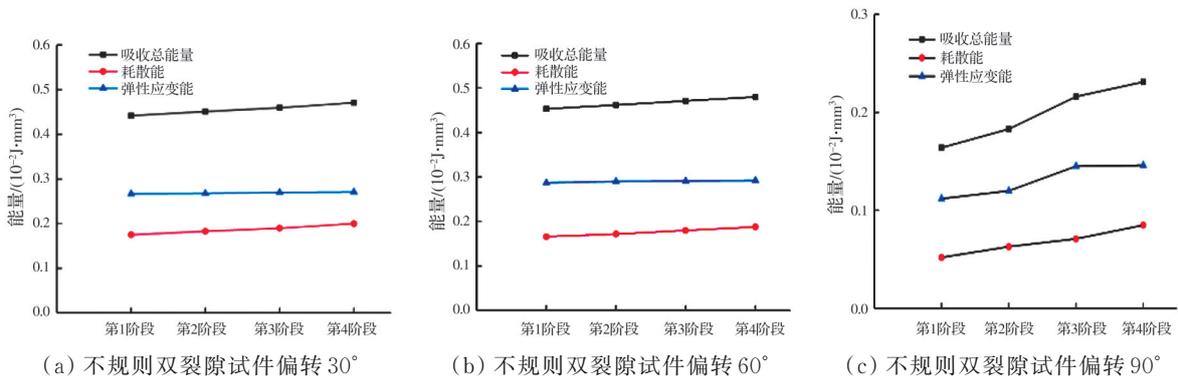


图 21 不规则双裂隙试件能量曲线

Fig. 21 Energy curve of irregular double crack specimen

渐增加,裂纹贯通,耗散能随之增加,轴向不可逆变形增长。总体来看,加载前期总吸收能变化不大,因为弹性应变能增长快,耗散能增长缓慢;当岩样中的裂隙闭合后,主要以弹性应变能增加为主,耗散能增加较小;在岩样破坏阶段,弹性能基本不再增加,能量以耗散能的形式用于裂隙的扩展、贯通直至岩样破坏。

3.5.3 总能量对比分析

能量主要作为耗散能用于裂隙萌生、扩展和贯通。从图 22 可以看出,单裂隙试件、双裂隙试件和不规则裂隙试件从 30°到 60°总吸收能较大,也反映出 30°到 60°岩样破坏需要更多能量,45°加载对应的总吸收能最大,从弹性模量角度分析,45°加载对应的弹性模量是最大的。

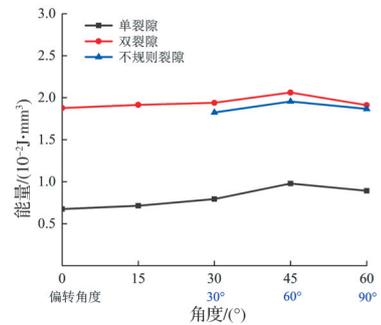


图 22 总吸收能量对比

Fig. 22 Energy Comparison of Irregular Fissures

3.5.4 弹性能对比分析

弹性能大小表现了试件极限储存能力,从图 23 可知弹性能明显随裂隙倾角增大而增大,弹性能与抗拉强度有一定的相关性,不规则双裂隙试件偏转

30°与平行双裂隙试件30°加载的抗拉强度相近,表现出两者弹性能大小接近,也反映出强度越高试件存储能力越强,弹性能储存到极限时试件会开始破坏。

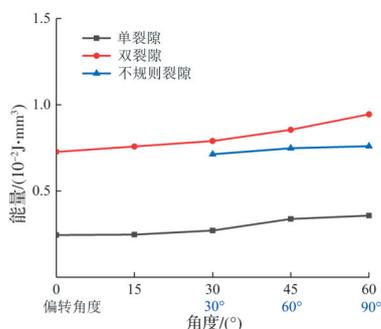


图23 弹性能对比

Fig. 23 Energy Comparison of Double Fissures

3.5.5 耗散能对比分析

单裂隙试件随着角度的增大,耗散能逐渐增加(如图24)。在45°加载方向上达到峰值,再随着角度的增加,耗散能呈下降趋势。主要因为岩石受到轴向载荷作用时,裂隙端部会出现应力集中现象,随着角度变化,岩石承受拉、压和剪应力组合作用。随着循环次数增加,当拉应力达到抗拉强度临界值时,端部裂纹萌生并开始扩展,裂隙扩展路径较长,且裂纹交错面发生相对移动时需要消耗耗散能,在45°加载角附近的最不利剪切面上,能量用于滑移面次生裂纹的产生,能量消耗较多,45°加载角耗散能大于其他加载角度耗散能。

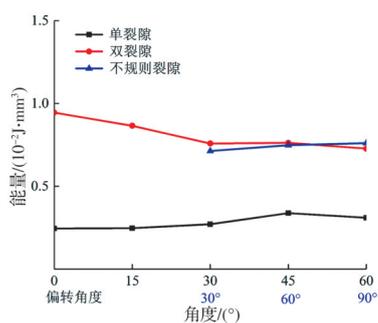


图24 耗散能对比

Fig. 24 Single fracture energy comparison

平行双裂隙试件随着角度增大,耗散能呈下降趋势(图24),从30°开始缓慢上升,60°时耗散能最小,这是因为倾角为0°时,两条双裂隙并没有参与破坏,破坏时需要能量多,在60°时,两条裂隙都参与破坏,则岩石破坏需要的能量较少。不规则双裂隙试件在不同角度破坏时,耗散能基本在一条直线上,储存在岩石内部弹性能都用来贯通预制裂隙,耗散能与加载角度没有较强的相关性。

4 结论

以预制裂隙的石灰岩为研究对象,分析其裂隙扩展模式、应力-应变曲线、能量演化规律和断裂特性,从能量角度分析岩石破坏的本质属性,为地下工程在循环荷载作用下的稳定性提供理论依据。主要结论如下:

1)单裂隙试件较完整试件抗拉强度下降约65%,平行双裂隙试件下降约30%;随着加载角度增大,单裂隙试件抗拉强度呈增大趋势,双裂隙试件抗拉强度逐渐降低;单裂隙与双裂隙的扩展都会产生翼裂隙和共面次生裂隙,试件出现了“Z”形破坏裂隙,其破坏模式都可分为张拉破坏模式,剪切破坏模式和张剪复合破坏模式。

2)分级循环荷载下试件应力-应变曲线可以分为初始变形阶段、稳定阶段和加速破坏阶段,滞回曲线呈现“疏一密一疏”的特性,其破坏模式与静态加载基本相同,主要是张拉破坏和张剪复合型破坏。疲劳裂隙可以相互作用和合并,产生连续塑性应变累积,形成压碎或小颗粒,这与静载荷下脆性破坏机制不同。由于设置加载最高应力上限都为抗拉强度的90%,所以3种裂隙试样都在第3阶段破坏。尽管初始阶段和破坏阶段的时间比重小,但不可逆变形量占到极限变形量的80%。不可逆变形的增长是岩石疲劳破坏的根本原因,推导轴向不可逆应变和循环次数破坏公式,其拟合函数可以对疲劳寿命进行预测。

3)总吸收能量在第一阶段增速最快,进入循环阶段后趋于稳定,弹性能稳定增长。前期试件吸收的能量用于储存,到了破坏阶段,能量用于裂隙延伸。耗散能在初始阶段,多用于裂隙压密;在稳定阶段趋于平缓;在破坏阶段快速增长,用于裂隙快速贯通。不同角度裂隙岩石能量耗散也有差异,中等倾角的裂隙岩石能量耗散最大,45°倾角达到顶峰,主要原因45°倾角的裂隙在受拉应力作用时,路径扩展较大,岩体破坏所需要的耗散能大于其他角度。

参考文献

- [1] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1581-1585.
- GE X R, JIANG Y, LU Y D, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1581-1585. (in Chinese)
- [2] 赵凯, 乔春生, 罗富荣, 等. 不同频率循环荷载下石灰

- 岩疲劳特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(Sup2): 3466-3475.
- ZHAO K, QIAO C S, LUO F R, et al. Experimental study of fatigue characteristics of limestone samples subjected to uniaxial cyclic loading with different frequencies [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup2): 3466-3475. (in Chinese)
- [3] 王者超, 赵建纲, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1888-1900.
- WANG Z C, ZHAO J G, LI S C, et al. Fatigue mechanical behavior of granite subjected to cyclic load and its constitutive model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1888-1900. (in Chinese)
- [4] 苏承东, 张盛, 唐旭. 砂岩巴西劈裂疲劳破坏过程中变形与强度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 41-48.
- SU C D, ZHANG S, TANG X. Experimental research on deformation and strength characteristics in process of Brazilian split fatigue failure of sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 41-48. (in Chinese)
- [5] 吴再海, 宋朝阳, 谭杰, 等. 不同分级循环加卸载模式下岩石能量演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 836-844, 851.
- WU Z H, SONG Z Y, TAN J, et al. The evolution law of rock energy under different graded cyclic loading and unloading modes [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 836-844, 851. (in Chinese)
- [6] ERARSLAN N, WILLIAMS D J. Mixed-mode fracturing of rocks under static and cyclic loading [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(5): 1035-1052.
- [7] 王宇, 高少华, 孟华君, 等. 不同频率增幅疲劳荷载下双裂隙花岗岩破裂演化声发射特性与裂纹形态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1976-1989.
- WANG Y, GAO S H, MENG H J, et al. Investigation on acoustic emission characteristics and fracture network patterns of pre-flawed granite subjected to increasing-amplitude fatigue loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1976-1989. (in Chinese)
- [8] 何明明, 李宁, 陈蕴生, 等. 分级循环荷载下岩石动力学行为试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2907-2913.
- HE M M, LI N, CHEN Y S, et al. An experimental study of dynamic behaviors of rock under stepwise cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2907-2913. (in Chinese)
- [9] 卢高明, 周建军, 张兵, 等. 循环荷载下微波照射玄武岩的损伤变形与能量特征[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(11): 1578-1585.
- LU G M, ZHOU J J, ZHANG B, et al. Damage, deformation and energy characteristics of basalt after microwave irradiation subjected to cyclic loading [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(11): 1578-1585. (in Chinese)
- [10] 金丰年, 蒋美蓉, 高小玲. 基于能量耗散定义损伤变量的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 1976-1980.
- JIN F N, JIANG M R, GAO X L. Defining damage variable based on energy dissipation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 1976-1980. (in Chinese)
- [11] WANG Y, LIU D Q, HAN J Q, et al. Effect of fatigue loading-confining stress unloading rate on marble mechanical behaviors: an insight into fracture evolution analyses [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(6): 1249-1262.
- [12] 李子运, 吴光, 黄天柱, 等. 三轴循环荷载作用下页岩能量演化规律及强度失效判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 662-670.
- LI Z Y, WU G, HUANG T Z, et al. Variation of energy and criteria for strength failure of shale under triaxial cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 662-670. (in Chinese)
- [13] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565-3570.
- XIE H P, PENG R D, JU Y. Energy dissipation of rock deformation and fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3565-3570. (in Chinese)
- [14] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1198-1207.
- ZHANG Z Z, GAO F. Research on nonlinear characteristics of rock energy evolution under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1198-1207. (in Chinese)

(编辑 胡玲)