

加载速率对青砂岩抗拉特性及断裂能耗的影响*

赵环帅, 潘永泰, 乔鑫, 王星宇, 毕研琨, 余超, 曹行健

中国矿业大学化学与环境工程学院 / 矿山与城市固废资源化工程研究中心, 北京 100083

摘要: 结合室内试验与细观参数标定, 建立了青砂岩宏-细观力学关系, 分析了青砂岩在不同加载速率下的力学特性、裂纹演化规律与能量利用效率。结果表明: (1)加载速率小于0.1 m/s时, 青砂岩应力-应变曲线形态基本一致, 无明显的差异性; 且加载速率越小, 脆性破坏越显著。拉力链是导致裂纹扩展与延伸的主导原因, 而最终断裂是压力和拉力链相互作用的结果。(2)青砂岩破裂形态可分主裂纹为主、次生裂纹出现、次生裂纹贯穿的破坏形式。随着加载速率的增加, 青砂岩裂纹数量与破裂微元数量基本上呈现出相似趋势。(3)加载速率为0.000 5~0.1 m/s, 输入能-断裂能曲线呈现上下波动现象, 但波动范围较小; 在加载速率为0.5~1 m/s时, 输入能呈直线增加趋势, 断裂能呈先快速增加后变缓的趋势, 能量利用效率主要集中于10.262%~11.511%。

关键词: 青砂岩; 加载速率; 巴西劈裂; 抗拉特性; 断裂能

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)02-0120-09

The influence of loading rate on the tensile properties and fracture energy consumption of Green sandstone

ZHAO Huanshuai, PAN Yongtai, QIAO Xin, WANG Xingyu, BI Yankun, YU Chao, CAO Xingjian

School of Chemistry and Environmental Engineering / Engineering Research Center for Mining and Urban Solid Waste Recycling, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: The macro-micro mechanical relationship of Green sandstone was established by indoor experiments and microscopic parameter calibration. The mechanical properties, crack evolution law, and energy utilization efficiency under different loading rates were analysed. The results showed that: (1) When the loading rate is less than 0.1 m/s, the stress-strain curve shape of the Green sandstone is basically consistent, and the smaller the loading rate, the more significant the Brittle failure. The tension chain is the main cause of crack propagation and extension, and the ultimate fracture is the result of the interaction between pressure and tension chains. (2) The fracture morphology of green sandstone can be divided into the failure way dominated by the main crack, the failure way where secondary cracks appear, and the failure way where secondary cracks penetrate. With the increase of loading rate, the number of cracks and the number of fracture elements in Green sandstone show a similar trend. (3) The loading rate is 0.000 5~0.1 m/s, and the input energy fracture energy curve shows up and down fluctuations, but the fluctuation range is small; When the loading rate is 0.5~1 m/s, the input energy shows a nearly linear increase trend, the fracture energy shows a rapid increase, and then a slow trend. The energy utilization efficiency is mainly concentrated in 10.262%~11.511%.

Key words: Green sandstone; loading rate; Brazil splitting; tensile properties; fracture energy

* 收稿日期: 2024-09-06 录用日期: 2024-10-01 网络首发日期: 2024-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(52074308)

作者简介: 赵环帅(1980年生), 男, 研究方向: 岩石的高效破碎; E-mail: zhaohuanshuai@163.com

通信作者: 潘永泰(1972年生), 男, 研究方向: 矿物与固废解离; E-mail: panyongtai@cumtb.edu.cn

全文阅读



ZR20240276

随着矿产开采深度不断增大和地下工程技术要求的不断提高, 岩石破碎日益增多。但岩石破碎过程能量消耗巨大, 且能量利用效率较低 (Yahyaei et al., 2016; Zhang et al., 2021)。近些年, 国家大力实施能耗“双控”管理, 提出持续提高能源利用效率, 不断提高绿色发展水平的发展目标。因此, 开展岩石高效破碎研究, 提高岩石破碎过程中的能量利用效率, 具有重要的意义。

在实践中通常将抗拉强度作为评价岩石稳定的重要参数。测试岩石抗拉强度的主要试验方法为巴西劈裂与直接拉伸。因直接拉伸存在试件制备不易、试验操作复杂、试验成功率较低等缺点, 巴西劈裂试验成为了岩石破碎工程研究的一个热点。学者们对不同加载速率下岩石的巴西劈裂特征开展了大量研究。如: 金爱兵等(2023)从抗拉强度、能量演化和水平应变分布等方面研究了铁矿石在不同加载速率下的巴西劈裂破坏特性。戴罡(2015)通过不同加载速率条件下的巴西劈裂试验, 研究了峰值压、压力降、峰后广义刚度系数等岩石的破坏特性。邓华锋等(2018)通过多种加载速率的劈裂试验, 研究了加载速率对砂岩抗拉强度的影响机制。王成等(2021)通过石灰岩圆盘试样的巴西劈裂试验, 研究了劈裂破坏过程中的变形、强度、能量和破坏特征与加载速率的关系。

结合宏观试验, 利用数值模拟方法研究岩石细观宏观破裂力学行为是目前研究的热点。如: 杨敬虎等(2017)通过ANSYS对不同加载速率下的巴西劈裂实验进行瞬态动力学分析, 研究了加载速率对抗拉强度的作用效果; 司凯(2017)采用RFPA研究了巴西劈裂岩石破坏的裂纹扩展过程和声发射参数结果以及声发射定位; 胡涛涛等(2023)采用ABAQUS对含有不同倾角的炭质板岩进行巴西劈裂试验, 研究了倾角对抗拉强度、荷载-位移曲线以及破坏形态的影响; 张学朋等(2016)采用颗粒程序PFC, 通过不同加载速率下的巴西劈裂试验, 研究了加载速率对花岗岩应力-应变、破裂特征及声发射的影响。

上述研究在岩石的破坏特性、变形特征、裂纹扩展、能量耗散等方面取得了富有成效的进展。但研究工作主要以宏观试验为主, 且大多基于宏

观介质理论。对不同加载速率下岩石巴西劈裂的细观演化和破裂模式研究仍不够深入。而岩石的破坏失稳过程本质上是其在受力过程中由细观结构逐步损伤发展到宏观破坏的过程, 细观力学性质直接或间接决定了岩石材料的宏观力学性质及破坏模式。除此之外, 岩石破坏过程为内部能量储存与释放的过程, 而在岩石破裂过程中产生的各种能量中, 断裂能是用于裂纹生成最有效的能量, 断裂能利用效率对于节能降耗具有非常重要的作用。目前, 对于岩石断裂能的研究主要采用间接计算方法 (Guo et al., 2021; 张磊, 2021)。由于不能准确计算破碎过程中颗粒的动能、摩擦能、热能等各种耗散能量, 计算结果误差较大。

目前, 利用PFC颗粒程序在细观层面分析各种岩石的力学行为已经在岩石力学领域得到了广泛的认同 (Potyondy et al., 2004; 黄达等, 2013)。鉴于此, 本文采用颗粒流的平行黏结模型, 并以典型准脆性材料青砂岩为研究对象, 研究不同加载速率下青砂岩在巴西劈裂过程中的力学特性、破裂特征、裂纹特点及能量利用效率, 以期为岩石破碎过程提供理论依据。

1 试验材料及参数标定

1.1 试样材料

室内试验所用青砂岩岩样取自四川自贡市。该岩石属于陆相沉积岩, 主要含硅、钙、黏土和氧化铁, 是一种典型的脆性材料。为了降低岩样非均质性带来的离散性误差, 选择同一块岩石制作试件。根据《煤与岩石物理力学性质测定方法》(GB/T223561.6—2009), 沿垂直层理密集布孔钻取岩芯, 用水冷却, 进行钻取、切割及磨平等一系列过程加工成标准圆柱体试样, 然后从试件中选择岩体表面无明显节理、裂隙的青砂岩试件, 使其平行度、平直度和垂直度均符合规范要求。巴西钢丝劈裂试验装置为中科院武汉岩土力学研究所研发的RMT-150岩石力学系统。采用假三轴压缩试验得到青砂岩在不同围压下的应力-应变曲线, 根据莫尔-库仑强度准则计算青砂岩内摩擦角与黏聚力。青砂岩试件的力学参数见表1 (赵环帅等, 2024)。

表1 青砂岩试件主要参数测试结果

Table 1 Test results of mail parameters of Green sandstone specimen

抗拉强度/MPa	平均密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	摩擦系数
2.355	2 294.216	19.084	37.700	0.772

1.2 细观参数标定

在颗粒流程序中，为了表征宏观材料的本构关系，需要赋予细观颗粒间相应的接触模型。黏结颗粒的接触方式通常采用接触黏结或平行黏结。接触黏结方式中颗粒接触方式为点接触，仅能传递力矢量。而平行黏结方式中颗粒间的接触方式为面接触，可同时传递力和力矩矢量（程爱平等，2022）。相比而言，平行黏结方式更适合模拟岩石等脆性介质。本文青砂岩的本构模型采用了平行黏结模型（徐小敏等，2010），其提供了两个界面的行为：无穷小的线性弹性（无张力）和承载一个力的摩擦界面；有限大小的线性弹性和承载一个力和力矩的黏结界面。

细观参数的合理选取是颗粒流离散元模拟的关键。根据青砂岩试样的单轴抗拉强度，建立青砂岩细观参数与宏观力学响应关系。采用“试错法”（佟安等，2020），经多次计算，找出宏观-细观参数间规律。通过对青砂岩试样的平行黏结模型进行标定，得到青砂岩试件的细观参数如表2所示。然后，模拟得到青砂岩抗拉强度为2.362 MPa（图1）。对比发现，室内试验与颗粒流模型并未展

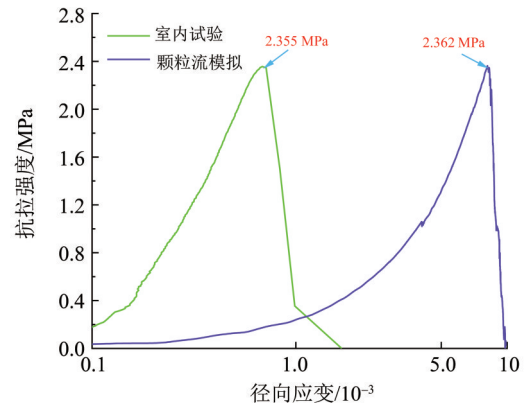


图1 青砂岩应力—应变曲线对比（试验与颗粒流模型）

Fig. 1 Stress-strain curve of Green sandstone (experiment and particle flow model)

现出非常明显的重合阶段，主要原因是颗粒流模型使用压实的颗粒集体，在数值模型中没有预先存在的微裂纹。这意味着在较小应变下，室内试验就开始出现破裂现象，同时参数标定与室内试验所得的抗拉强度相对差为0.297%（模拟值与试验值之差的绝对值与两者平均值的百分比），且破坏特征相似（图2）。因此，青砂岩试样细观参数按照表2设置具有一定的合理性。

表2 青砂岩PFC模拟的细观参数

Table 2 Mesoscopic parameters of Green sandstone using PFC simulations

有效模量/GPa	刚度比	黏结有效模量/GPa	黏结刚度比	法向黏结强度/MPa	切向黏结强度/MPa	摩擦角/(°)	摩擦系数
1.000	1.000	1.000	1.000	5.114	19.084	37.700	0.300

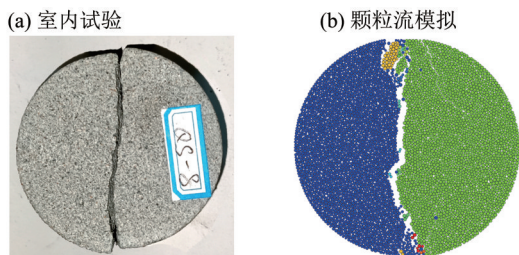


图2 青砂岩破坏特征对比

Fig. 2 Comparison of failure characteristics for Green sandstone under different loading rates

2 试验方案

工业生产中，各种岩石常采用机械力破碎，最常见的加载方式之一为压碎方式。通过将岩石输入到破碎机的两个破碎面之间，在破碎面上施加不同加载速率的外部载荷后，岩石受压达到或超过岩石抗压强度极限后，岩石就发生破碎（图3）。在岩石破碎的初始阶段，破碎面与岩石之间

主要以点接触为主，因此大多数岩石破碎方式可简化为巴西劈裂方式。

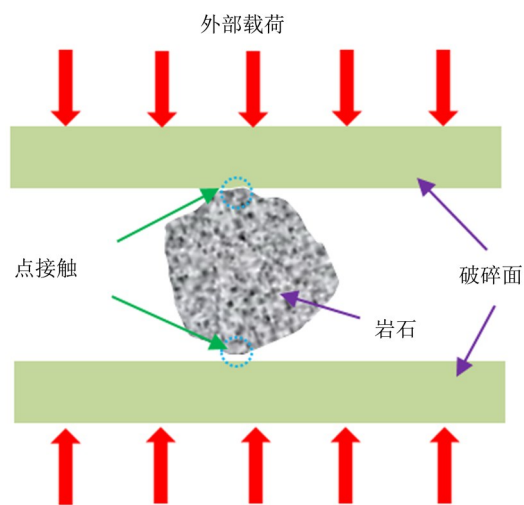


图3 岩石压碎方式

Fig. 3 Rock crushing method

由于破碎岩石存在大小的差异性及形状的不规则性, 不利于颗粒流分析。鉴于此, 本文选取青砂岩为规则形状, 建立与室内巴西劈裂试验试样尺寸相同的二维颗粒流计算模型, 模型尺寸设置为 $\Phi 50\text{ mm}$, 黏结颗粒半径设置为 $0.250\sim 0.415\text{ mm}$ 。在模型建立后, 保留底部和顶部边界墙体, 通过内嵌的 FISH 语言编程, 实现对青砂岩模型载荷区域的上端、下端墙体施加大小相同、方向相反的加载速率, 模型边界条件及载荷施加区域如图4所示。同时, 加载速率采用位移加载方式, 选取 $0.0005, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1\text{ m/s}$ 共8种恒定速率加载, 测试运行到压力下降到青砂岩峰值应力的 0.001% 以下。

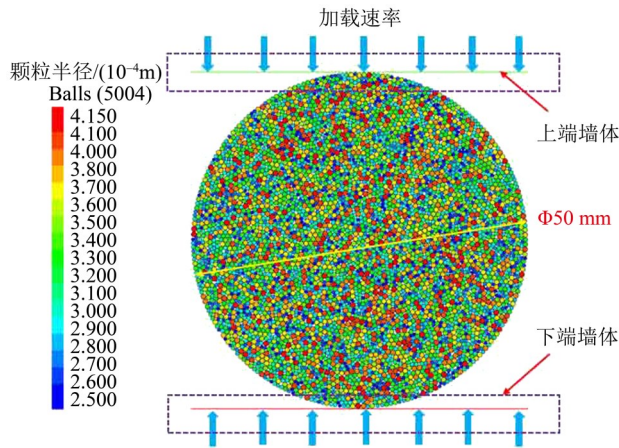


图4 青砂岩巴西劈裂试验PFC模型

Fig. 4 PFC model for Brazilian splitting test of Green sandstone

3 结果与分析

3.1 力学特性

3.1.1 应力-应变曲线特点 不同加载速率下的应力-应变曲线和径向最大应力如图5~6所示。主要结论如下:

(1)青砂岩在不同加载速率下的应力-应变曲线总体上呈现为峰前线弹性、峰前塑性变形和峰后逐渐失稳3个阶段。在加载速率小于 0.1 m/s 时, 青砂岩应力-应变曲线基本一致, 无明显的差异性, 表现出突然的脆断破坏现象, 且加载速度越小; 青砂岩在达到峰值强度峰后应力跌落趋势越显著, 说明加载速率越小, 青砂岩的脆性破坏越显著; 加载速率大于 0.1 m/s 时, 应力-应变曲线基本呈现出相似的特征, 峰后的失稳状态的波动现象比较剧烈, 且出现跌落后的多次上下波动现象, 这主要是由于加载速率的增大使青砂岩试样内部产生的应力松弛所致。

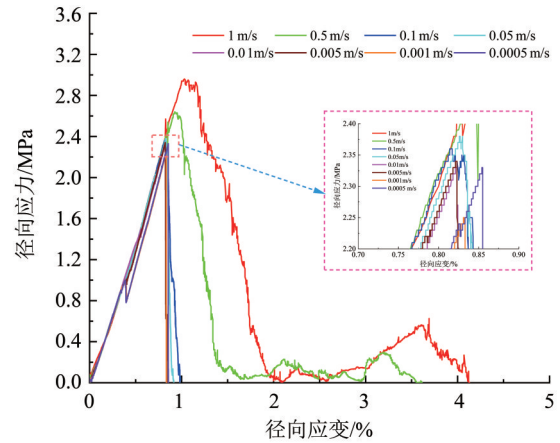


图5 青砂岩的应力-应变曲线

Fig. 5 The stress-strain curves of Green sandstone

(2)从径向最大应力的趋势上看, 加载速率小于 0.1 m/s 时, 青砂岩径向最大应力呈现出上下波动现象, 但波动较小, 其范围为 $2.251\sim 2.377\text{ MPa}$; 在加载速率大于 0.1 m/s 时, 随着加载速率的增大, 青砂岩径向最大应力增大, 且变化较大, 其范围为 $2.636\sim 2.959\text{ MPa}$, 与杨敬虎(2017)的研究结论一致。这主要是由于在加载速率较小时, 青砂岩在破裂过程中的颗粒间应力不断地转移与调整, 导致青砂岩内部产生的初始微裂纹扩展与损伤比较充分; 而当加载速率增大时, 青砂岩试样在破裂过程中内部颗粒间应力还未及时转移与调整就发生破裂现象, 此时青砂岩在破裂前损伤不充分, 承载力较为完全, 导致青砂岩强度增加。因此, 加载速率增大时青砂岩的峰值强度增大, 呈现“伪增强”的效果, 即岩石速率效应(也称岩石的荷载速率依存性)。

3.1.2 力链分布特征 青砂岩在外部加载速率下, 内部颗粒之间受到挤压产生接触力, 而岩石

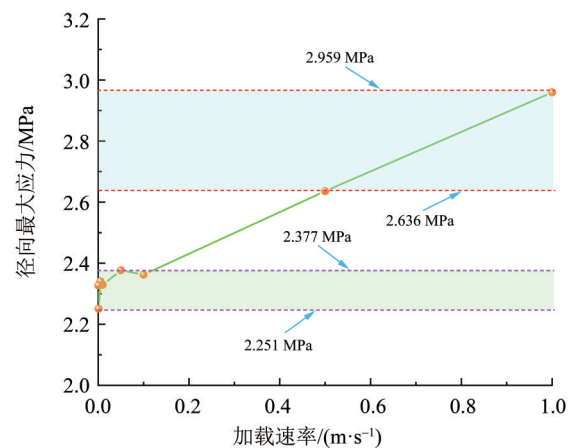


图6 青砂岩的径向最大应力

Fig. 6 Maximum radial stress of Green sandstone

颗粒接触力链作为宏观与微观的桥梁,能够反映颗粒接触区域的力学结构演化规律。不同加载速率下青砂岩破裂力链的分布特征如图 7 所示,图中红色部分代表压应力、紫色部分代表拉应力,力链粗细表示相应区域接触力的大小。

由图 7 可知,青砂岩破裂过程中,碎块内部以拉力链为主,而断裂口边缘附近以压力链为主。同时,在未发生破裂的碎块内部,压力链由外部向

内部延伸,数值逐渐变小;而拉力链由内部向外延伸,数值逐渐变大;在破坏的边缘附近,压力与拉力链相互交叉成网状结构。由于微裂隙损伤扩展是由张应变引起的,并沿主压应力方向开裂扩展,因此青砂岩破裂过程中拉力链在裂纹扩展与延伸中起主要作用,而最终断裂是压力和拉力链相互作用的结果。

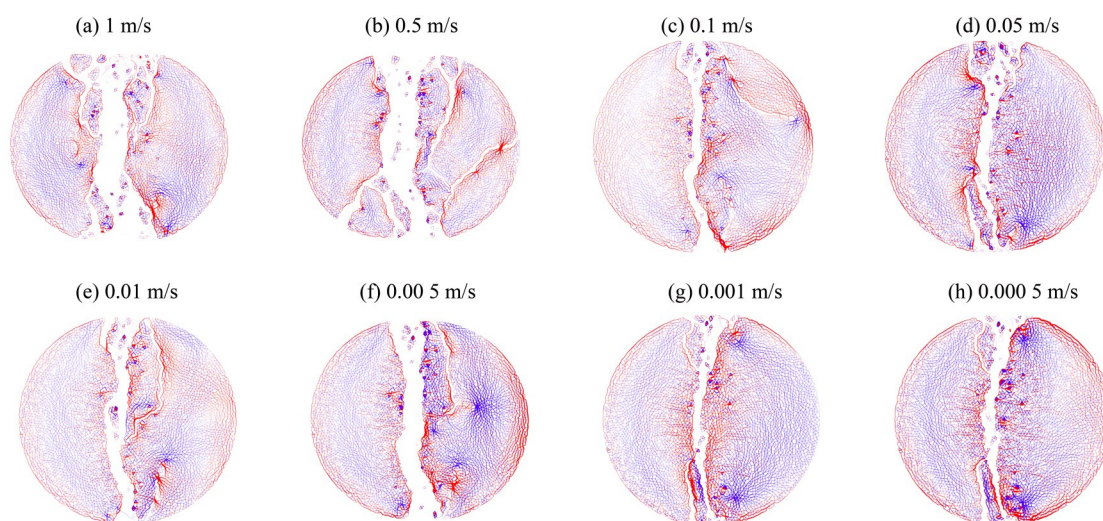


图 7 不同加载速率下青砂岩力链分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of force chains in Green sandstone under different loading rates

3.2 裂纹演化规律

在岩石破裂过程中,岩石受力后的宏观破裂模式往往与其内部细观裂纹扩展紧密相关,裂纹与破裂块体数量是衡量岩石破裂效果的重要指标。不同加载速率下,青砂岩的破裂形态如图 8 所示,图中不同颜色代表青砂岩破裂后微元体的位置分布;青砂岩裂纹分布特征(拉伸裂纹)如图 9 所示。由图 8~9 可知,在不同加载速率下,青砂岩破裂形态可分为 3 个形式:

(1) 主裂纹为主(0.001 m/s 与 0.0005 m/s): 在加载速度较小时,青砂岩主要为沿主裂纹的破坏,在主裂纹附近出现较多的碎块,且碎块的特征以小块为主。

(2) 次生裂纹出现(0.005~0.01 m/s): 青砂岩主裂纹附近破坏加剧,碎块仍然以小块为主,同时,在主裂纹附近开始出现多个次生裂纹,但次生裂纹未出现贯穿。

(3) 次生裂纹贯穿(0.05 m/s 与 1 m/s): 青砂岩主裂纹附近破坏加剧,次生裂纹出现贯穿现象,

出现更多的碎块,尤其大块数量明显增多。

综上所述,加载速度是决定青砂岩破裂过程中能量总量及其分布的关键因素,能量的变化直接关系到青砂岩破裂时的形态特征。从宏观角度来看,加载速度导致青砂岩的抗拉强度呈现出较大的差异(邓华峰等,2018)。当青砂岩加载速率比较小时,劈裂面上由于存在张拉作用,在青砂岩破裂过程中产生的微裂纹能够有充足的时间不断进行扩展,这有利于宏观主劈裂面的形成;随着加载速率的增大,青砂岩在破裂过程中形成宏观劈裂面的时间相对较少,微裂纹扩展时间相对降低,不利于形成宏观主劈裂面。因此,随着加载速率较大,青砂岩在破裂过程中弹性应变能的占比相对较大,耗散能的占比相对较小,对应峰值应力时青砂岩的破裂突发性增强,且宏观主劈裂面在快速形成的过程中,往往产生次生裂纹,同时局部破裂现象更加明显,从而青砂岩在破裂过程中呈现出较大抗拉强度。

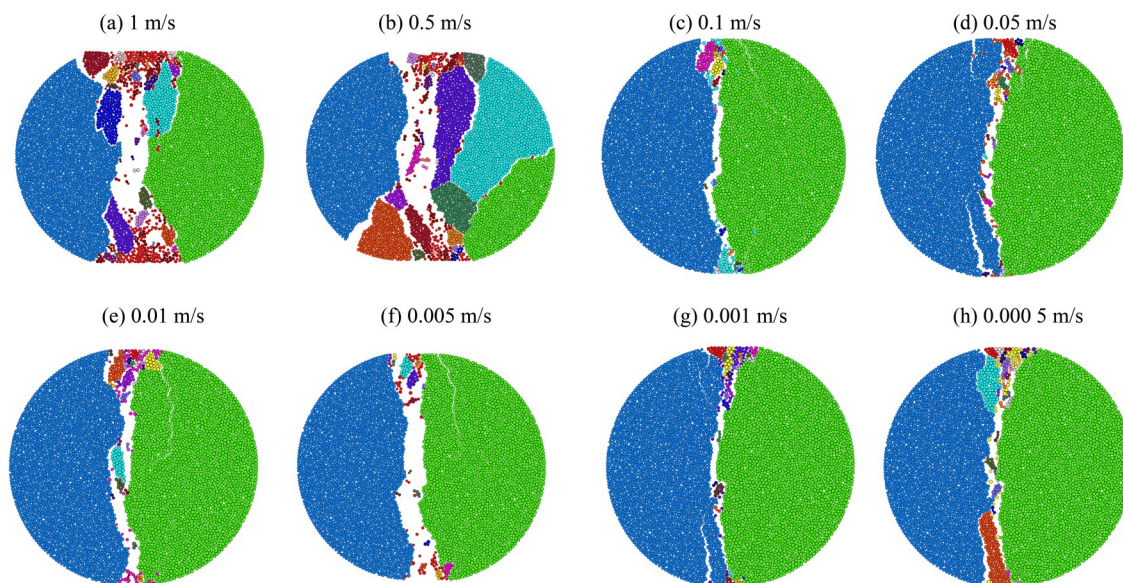


图 8 不同加载速率下青砂岩的破坏形态

Fig. 8 Failure characteristics of Green sandstone under different loading rates

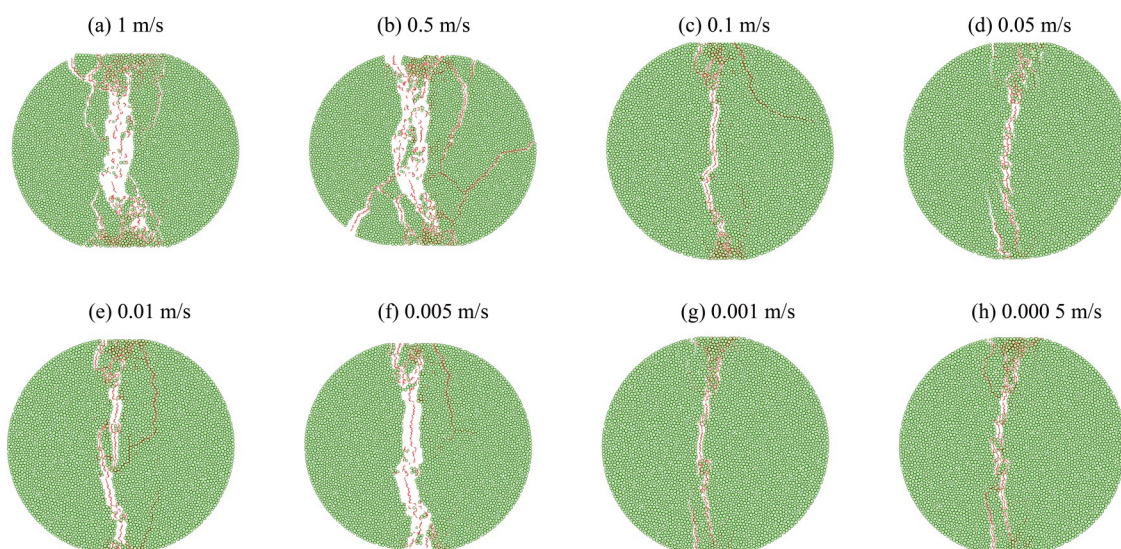


图 9 不同加载速率下青砂岩的裂纹分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics in crack of Green sandstone at different loading rates

青砂岩破裂微元数量和裂纹数量与加载时间的关系,如图 10~11 所示。可以发现,在不同的加载速率下,青砂岩裂纹经过萌生、扩展与快速增加阶段。在加载速率较小时,裂纹的萌生、扩展时间相对较长,但在快速增加阶段几乎相似,呈接近直线型的增加。而微元体的变化与裂纹的变化趋势相似,只是在裂纹的扩展阶段,块体呈直线型趋势。由此说明,在青砂岩破裂过程中,微观层面微裂隙是不断发育的累积过程。加载过程的本质是青砂岩不断受力损伤的过程,且随着青

砂岩所受应力的不断增大,微观微裂隙不断扩展,直至累积形成各种宏观贯通裂隙,导致试样破裂并丧失承载能力,从而出现较多的微元体(刘天为, 2020)。

砂岩裂纹、破裂微元数量与加载速率的关系如图 12 所示。随着加载速率的增加,青砂岩裂纹与破裂微元数量基本上保持相似的趋势,即在加载速率为 0.000 5~0.1 m/s 时,呈现出上下波动现象,但波动范围较小;在加载速率为 0.5~1 m/s 时,呈现出增大的趋势,但增加的幅度逐渐变缓,这

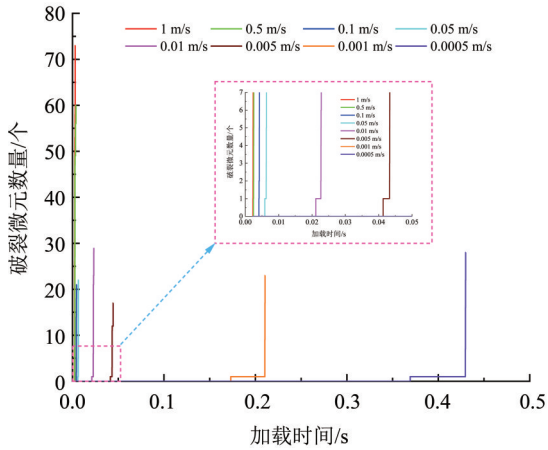


图 10 破裂微元数量与加载时间的关系

Fig. 10 Relationship between the number of fractured micro elements and loading time

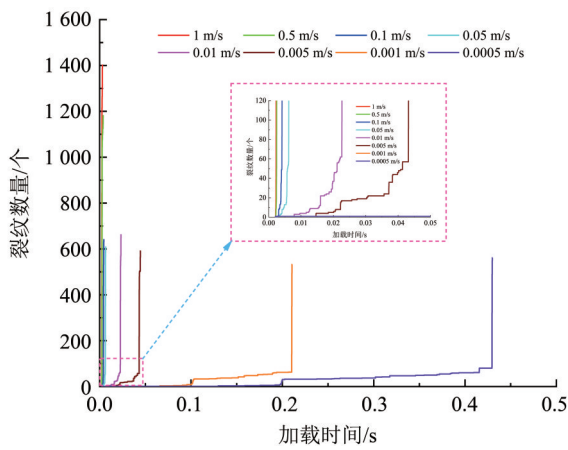


图 11 裂纹数量与加载时间的关系

Fig. 11 Relationship between the number of crack and loading time

主要是由于加载速率较大时破坏后的块微元体主要以大块形态为主。

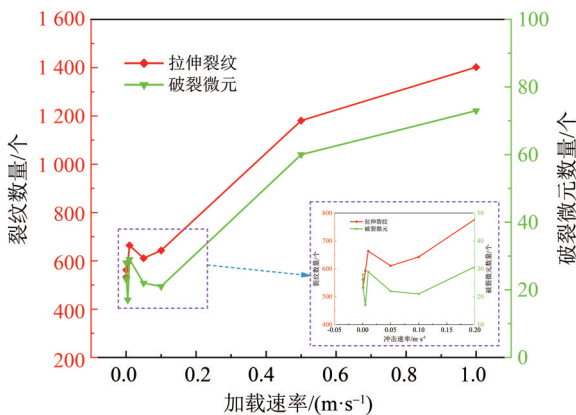


图 12 裂纹数量、破裂微元数量与加载速率的关系

Fig. 12 Relationship between the number of cracks and fracture microelements and loading rate

3.3 能量利用效率

在岩石破裂过程中，由于断裂时间较短(一般为微秒级)，能量变化对环境反应较为敏感，在真实试验条件下难以实现相同的研究环境，且目前在能量观测手段上存在诸多限制，而颗粒流模拟可以弥补室内试验中难以获取裂纹动态扩展过程中断裂能的缺陷(姜耀东等, 2014)，可有效模拟岩石介质的开裂、分离等非连续现象，反映其机理、过程及结果。

巴西劈裂加载的过程，主要是和外界产生的能量交换，其交换过程是一个能量耗散过程，主要输入能量来自外部载荷的做功，而颗粒之间的黏结键断裂所消耗的能量为断裂能。输入能量 E 可由应力-应变曲线与横坐标围成的面积得出(杨梦泽, 2022)。在颗粒流模拟过程中，青砂岩颗粒间的平行黏结键在颗粒接触区域的黏结范围之内传递力及力矩，且可以阻止相对切向和法向运动，限制总法向力、总切向力使青砂岩颗粒在黏结强度范围内发生接触。当最大法向力、切向力超过了青砂岩法向最大黏结强度 δ_{\max} 与切向黏结强度 τ_{\max} 时，颗粒之间的平行黏结键则会被破坏(丁桐桐等, 2021)，即

$$\delta_{\max} < \frac{\bar{F}_n}{\bar{A}} + \beta \frac{\|\bar{M}_b\| \bar{R}}{\bar{I}}, \quad \tau_{\max} < \frac{\|\bar{F}_s\|}{\bar{A}} + \beta \frac{\|\bar{M}_t\| \bar{R}}{\bar{J}}$$

式中 \bar{F}_n 和 \bar{F}_s 分别为法向和切向平行黏结力， \bar{R} 为平行黏结半径， \bar{I} 和 \bar{J} 分别为平行黏结键横截面的惯性矩和极性惯性矩， \bar{M}_b 和 \bar{M}_t 分别为平行黏结键扭矩和力矩， β 为力矩贡献因子， \bar{A} 为平行黏结键的横截面积。

此时，平行黏结键断裂所消耗的能量即为断裂能(石崇等, 2018)，其计算公式为

$$E_d = \frac{1}{2} \left[\frac{\bar{F}_n^2}{k_n \bar{A}} + \frac{\|\bar{F}_s\|^2}{k_s \bar{A}} + \frac{\bar{M}_t^2}{k_t \bar{J}} + \frac{\|\bar{M}_b\|^2}{k_n \bar{I}} \right]$$

在破裂过程中，能量利用效率 $\eta = \frac{E_d}{E}$ 。因此，可得出不同加载速率下输入能、断裂能与加载时间的关系，如图 13~14 所示。可以发现：不同加载速率下，青砂岩的输入能呈现向上凹型增加的趋势；青砂岩断裂能的增加趋势主要分为缓慢增加

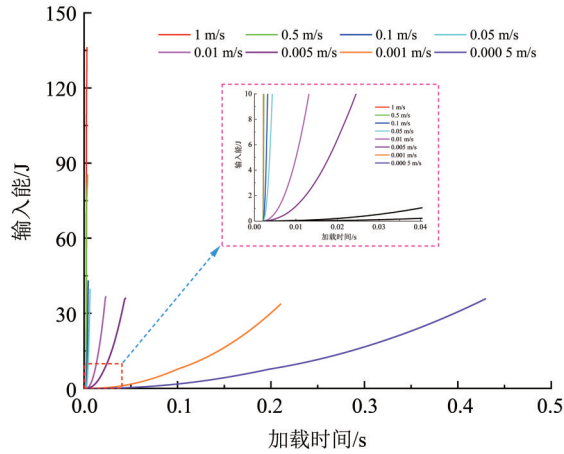


图 13 输入能与加载时间的关系

Fig. 13 Relationship between input energy and loading time

与快速增加阶段, 且在快速增加阶段基本均呈直线型增加趋势。

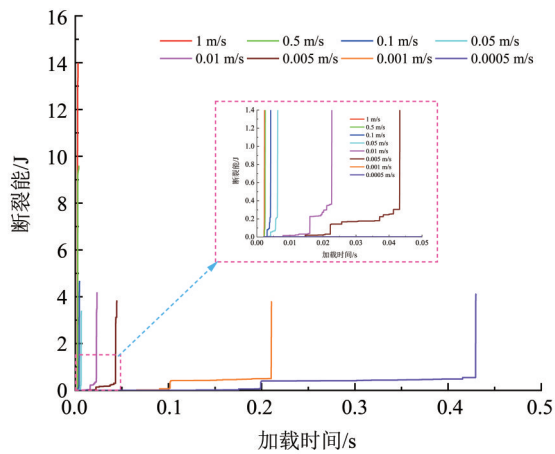


图 14 断裂能与加载时间的关系

Fig. 14 Relationship between fracture energy and loading time

同时, 不同加载速率下, 青砂岩输入能-断裂能与加载速率的关系如图 15 所示。在加载速率为 0.000 5~0.1 m/s, 输入能-断裂能呈现出上下波动现象, 但波动范围较小; 而在加载速率为 0.5~1 m/s 时, 输入能呈现接近直线增加, 断裂能呈现先快速增加而后变缓的趋势。

不同加载速率下的能量利用效率如图 16 所示。青砂岩在加载速率为 0.000 5~0.1 m/s 时, 能量利用效率呈现出上下波动趋势; 加载速率为 0.1~1 m/s 时, 能量利用效率呈现出先缓慢增加再下降的趋势。但总体上看, 能量利用效率主要集中于 10.262%~11.511%。在加载速率为 0.05 m/s 时, 最

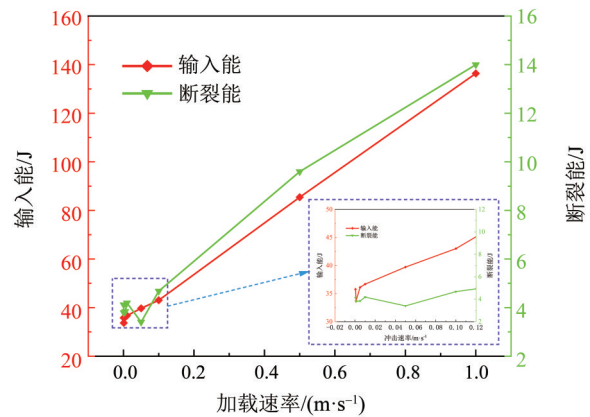


图 15 输入能-断裂能与加载速率的关系

Fig. 15 Relation between input-fracture energy and impact rates

大能量利用效率为 11.511%。这主要因为: 较高的加载速率可能导致岩石在破碎过程中更快地释放能量, 从而增加能量耗散。而岩石在破碎过程中没有足够的时间来充分吸收和利用能量, 导致部分能量被耗散, 就会使得能量利用率降低。

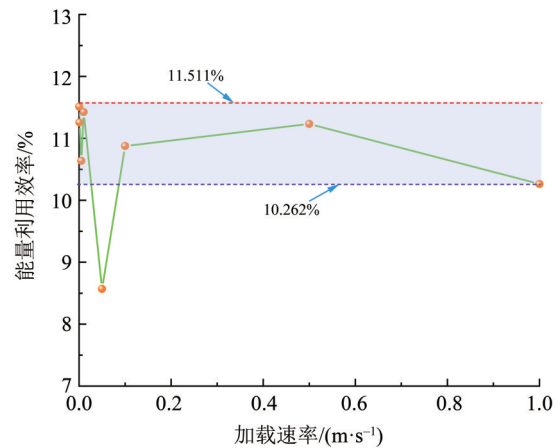


图 16 不同加载速率的能量利用效率

Fig. 16 Energy utilization efficiency under different loading rates

4 结 论

利用颗粒流程序, 通过青砂岩室内试验与微观参数标定, 本文建立了青砂岩宏-细观力学响应关系。并对青砂岩在不同加载速率下的力学特性、裂纹演化规律与能量利用效率进行了分析。研究结果揭示了青砂岩破裂过程中的抗拉强度、破裂形态以及输入能、断裂能、能量利用效率等参数的变化规律, 为研究青砂岩破碎工艺参数选择等提供了参考数据。

参考文献:

- 程爱平,舒鹏飞,邓代强,等,2022.单轴压缩下尾砂胶结充填体细观能量耗散与损伤表征研究[J].采矿与安全工程学报,39(6):1227-1234.
- 戴罡,2015.加载速率影响下岩石试件破坏特性研究[D].阜新:辽宁工程技术大学.
- 邓华锋,王晨玺杰,李建林,等,2018.加载速率对砂岩抗拉强度的影响机制[J].岩土力学,39(S1):79-88.
- 丁桐桐,徐建华,李远安,等,2021.基于离散单元法的立轴冲击破碎机成砂率数值计算[J].应用力学学报,38(5):2018-2024.
- 胡涛涛,王栋,康志斌,等,2023.不同软弱夹层倾角炭质板岩的巴西劈裂试验及数值模拟研究[J/OL].应用力学学报:1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20231115.1350.011.html>.
- 黄达,岑夺丰,2013.单轴静-动相继压缩下单裂隙岩样力学响应及能量耗散机制颗粒流模拟[J].岩石力学与工程学报,32(9):1926-1936.
- 姜耀东,李海涛,赵毅鑫,等,2014.加载速率对能量积聚与耗散的影响[J].中国矿业大学学报,43(3):369-373.
- 金爱兵,朱东风,孙浩,等,2023.不同加载速率下的矿岩劈裂破坏特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),54(1):269-279.
- 刘天为,2020.砂岩巴西劈裂试验离散元分析及破裂机理研究[J].水电能源科学,38(11):133-136.
- 石崇,张强,王盛年,2018.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社.
- 司凯,2017.岩石的巴西劈裂破坏及声发射特征试验研究[D].焦作:河南理工大学.
- 佟安,张军徽,武娜,2020.红砂岩单轴压缩宏细观参数映射关系研究[J].力学与实践,42(2):202-208.
- 王成,王春,苏承东,等,2021.不同加载速率对石灰岩巴西劈裂特性的影响[J].采矿与安全工程学报,38(5):1036-1044.
- 徐小敏,凌道盛,陈云敏,等,2010.基于线性接触模型的颗粒材料细-宏观弹性常数相关关系研究[J].岩土工程学报,32(7):991-998.
- 杨敬虎,于翔,2017.加载速率影响抗拉强度的机理及其数值验证[J].煤炭学报,42(S1):51-59.
- 杨梦泽,2022.受压砂岩变形过程中能量演化及断裂机理研究[D].阜新:辽宁工程技术大学.
- 张磊,2021.超声振动激励下坚硬岩石高效破碎基础研究[D].徐州:中国矿业大学.
- 张学朋,蒋宇静,王刚,等,2016.基于颗粒离散元模型的不同加载速率下花岗岩数值试验研究[J].岩土力学,37(9):2679-2686.
- 赵环帅,潘永泰,余超,等,2024.振动载荷对青砂岩冲击裂纹扩展及能量利用效率的影响[J].清华大学学报(自然科学版),64(12):2155-2165.
- GUO Q, PAN Y, ZHOU Q, et al, 2021. Kinetic energy calculation in granite particles comminution considering movement characteristics and spatial distribution [J]. Minerals, 11(2):217.
- POTYONDY D O, CUNDALL P A, 2004. A bonded-particle model for rock[J]. Pergamon, 8:1329-1364.
- YAHYAEI M, HILDEN M, SHI F, et al, 2016. Comminution [M]. Berlin: Springer.
- ZHANG Z X, OUCHTERLONY F, 2022. Energy requirement for rock breakage in laboratory experiments and engineering operations: A review [J]. Rock Mech Rock Eng, 55:629-667.

(责任编辑 王海蓉)