

DOI:10.11784/tdxbz202409014

冲击速率对青砂岩抗拉特性及能量利用效率影响

赵环帅^{1,2}, 潘永泰^{1,2}, 王星宇^{1,2}, 乔鑫^{1,2}, 张永强^{1,2}, 李少卓^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)矿山与城市固废资源化工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 岩石作为一种常见的工程材料, 其动态拉伸力学性能的准确核定及断裂机理至关重要, 而巴西劈裂试验是目前测定岩石抗拉强度最广泛的试验方法. 为探究不同冲击速率下青砂岩抗拉特性及能量利用效率, 结合室内试验与细观参数标定, 建立了青砂岩宏-细观力学响应关系, 分析了青砂岩在不同冲击速率下的力学特性、断裂规律与能量利用效率. 结果表明: ①青砂岩破裂过程中, 碎块内部以拉力链为主, 破裂口边缘附近以压力链为主, 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; ②随着冲击速率增加, 青砂岩破裂形态可分为主裂纹为主、次生裂纹出现、次生裂纹贯穿的破坏形式, 而破裂微元体、拉伸与剪切裂纹均呈现增加的趋势. 在相同的冲击速率下, 破裂微元体呈现出缓慢增加、快速增加与稳定增加阶段, 而拉伸与剪切裂纹均呈现快速增加与稳定增加阶段, 且在破裂过程中主要为拉伸裂纹; ③在冲击速率为 2~12 m/s 时, 能量利用效率呈现快速增加的趋势, 12~28 m/s 时, 能量利用效率呈现出上下波动趋势, 28~30 m/s 时呈现出下降趋势, 在冲击速率为 22 m/s 时, 最大能量利用效率为 8.153%. 研究结果可为岩石破碎过程中工艺参数的合理选择提供指导.

关键词: 青砂岩; 冲击速率; 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: 0493-2137(2025)06-0591-10

Influence of Impact Rates on the Tensile Properties and Energy Utilization Efficiency of Green Sandstone

Zhao Huanshuai^{1,2}, Pan Yongtai^{1,2}, Wang Xingyu^{1,2}, Qiao Xin^{1,2},
Zhang Yongqiang^{1,2}, Li Shaozhuo^{1,2}

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and
Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. Engineering Research Center for Mining and Urban Solid Waste Recycling,
China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: As a common engineering material, accurately determining the dynamic tensile mechanical properties and fracture mechanisms of rocks is crucial. The Brazilian splitting test is currently the most widely used test method for determining the tensile strength of rocks. This study investigates the tensile properties and energy utilization efficiency of green sandstone under different impact rates by establishing a macro/micro mechanical response relationship through indoor experiments and microscopic parameter calibration. The analysis of green sandstone's mechanical properties, fracture laws, and energy utilization efficiency under different impact rates reveal the following: ① During the fracture process, the internal structure of the green sandstone fragments is mainly composed of tension chains, while the fracture edges consist mainly of pressure chains. Tension chains play a major role in crack propagation and extension, with the final fracture resulting from the interaction between pressure and tension chains. ② As the impact rate increases, the fracture morphology of green sandstone can be divided into three types: primary

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-10-12.

作者简介: 赵环帅(1980—), 男, 博士研究生, 副研究员, zhaohuanshuai@163.com.

通信作者: 潘永泰, panyongtai@cumtb.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074308).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52074308).

cracks, secondary cracks, and secondary cracks penetrating. The fracture microelements, along with the tensile and shear cracks, showed an increasing trend. At the same impact rate, fractured microelements exhibit slow, rapid, and stable growth stages, while both tensile and shear cracks display rapid and stable growth stages, with tensile cracks being the main ones during the fracture process. ③ Energy utilization efficiency trends vary with impact rates: it rapidly increases from 2 m/s to 12 m/s, fluctuates from 12 m/s to 28 m/s, and decreases from 28 m/s to 30 m/s. The maximum energy utilization efficiency, 8.153%, occurs at an impact rate of 22 m/s. The results of this study provide guidance for the rational selection of process parameters in rock-crushing processes.

Keywords: green sandstone; impact rate; Brazil splitting; tensile property; fracture energy

近年来,随着国内外工业经济的快速发展,岩石破碎工作量日益增多,但岩石破碎过程能量消耗较大,且能量利用效率较低,在矿石破碎中约为 3% ~ 5%^[1-2]. 因此,开展岩石高效破碎理论与技术研究,提高岩石破碎过程中的能量利用效率,具有重要的实际意义. 此外,岩石作为一种典型的准脆性材料,抗拉强度远小于其抗压强度,在实际工程中通常将抗拉强度作为岩石工程稳定的重要评价参数. 目前,测量岩石抗拉强度的方法主要有直接拉伸试验与巴西劈裂试验. 研究者们普遍认为,直接拉伸试验的结果更接近岩石的真实抗拉强度. 然而,直接拉伸试验的试件制备不易、试验操作复杂、试验成功率较低,在试验中应用较少;巴西劈裂试验制样和试验流程比较简便,是目前测定岩石抗拉强度最广泛的试验方法. 因此,岩石材料的巴西劈裂试验是岩石破碎工程中研究的一个热点.

在工程设计和施工中,岩石力学性质除与岩石种类、矿物成分及应力状态等诸多天然赋存条件有关外,外部冲击速率对力学性质以及变形破坏方式也具有重要的影响. 众多学者针对不同冲击速率下岩石巴西劈裂特征开展了大量研究,常见的试验设备为 Hopkinson 压杆,如: Cui 等^[3]通过巴西劈裂试验,研究了花岗岩、玄武岩和石灰岩材料抗拉强度和由此产生的分裂断裂面形态的影响;郭占峰等^[4]通过花岗岩试样进行了不同冲击速度下的动态劈裂拉伸试验,研究了其动态强度与变形的应变率效应;李金洋^[5]通过砂岩的动态巴西劈裂圆盘试验,探究了冲击载荷作用下砂岩动态拉伸力学响应特性. 也有研究结合了相关测试技术,如:刘运思等^[6]通过分离式 Hopkinson 压杆和高速摄像机,开展了巴西劈裂试验,探究了层状板岩动态破坏机理及能耗规律.

近些年,随着计算机技术的发展,许多数值模拟软件也被引入到冲击速率效应的研究中,如: Wang 等^[7]结合 Neper 和 3DEC 软件,通过设置不同角度的加载和层理方向进行页岩巴西劈裂试验,研究层理结构引起的各向异性和不同颗粒引起的非均质性对页

岩力学性质的影响;司凯^[8]采用有限元软件 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及声发射定位;胡涛涛等^[9]采用有限元软件 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.

上述研究主要集中在冲击荷载下岩石的力学特性、破坏特征、裂纹扩展、能耗规律等方面,但是由于岩石破裂时间一般较短(微秒级)^[10],且受限于目前现有的试验设备和测试手段,对于不同冲击速率下岩石抗拉特性的研究主要以宏观方面的试验分析为主,且大多研究基于宏观介质理论. 由于岩石的破坏失稳过程本质上是其在受力过程中由微观结构逐步损伤发展到宏观破坏的过程,微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,从能量角度研究岩石失稳一直是近些年学者们的关注重点^[11],岩石破坏过程即为内部能量储存与释放的过程,而在岩石破裂过程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. 破碎过程中断裂能计算及演化规律的深度探究与揭示,是提高破碎能量利用效率、优化破碎效果的核心问题. 而目前对于岩石断裂能的研究主要采用间接计算方法^[12-13],由于不能准确计算破碎过程中颗粒的动能、摩擦能、热能、声能等各种耗散能量,计算结果误差较大. 因此,从微观角度研究岩石在不同冲击速率下的抗拉特征及能量利用效率,能够深入了解岩石的破裂特性和损伤规律,具有重要的理论研究意义及实际应用价值.

目前,利用 PFC 颗粒流程序在微观层面上分析各种岩石的力学行为已经在岩石力学领域得到了非常广泛的应用^[14-15]. 鉴于此,本文采用颗粒流的平行黏结模型,以岩石破碎过程中典型的准脆性材料青砂岩为研究对象,分析不同冲击速率下青砂岩巴西劈裂过程中的力学特性、破裂规律,并通过颗粒流程序的编程方法直接计算出破裂过程中的断裂能及能量利用效率,以期为岩石破碎过程中工艺参数的合理选择

提供指导。

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省自贡市,该岩石由各种砂粒胶接而成,是一种典型的脆性材料。为降低岩样非均质性在室内试验带来的离散性误差,选择同一块岩样,根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)的要求,加工成标准圆柱体试样(图 1)。采用中科院武汉岩土力学研究所开发的RMT-150 岩石力学系统进行巴西钢丝劈裂试验(图 2)。同时,采用三轴压缩试验得到青砂岩在不同围压下的应力-应变曲线,并根据 Mohr-Coulomb 准则,计算得到青砂岩内摩擦角与黏聚力,青砂岩试件力学参数测试结果^[16]见表 1。

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,反映材料真实的宏观力学特性,需要赋予细观颗粒间相应的接触模型,因此,选择合适的接触模型是

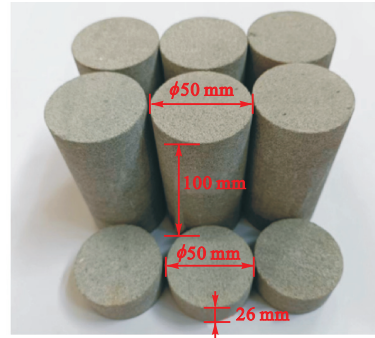


图 1 青砂岩试样

Fig.1 Green sandstone specimens

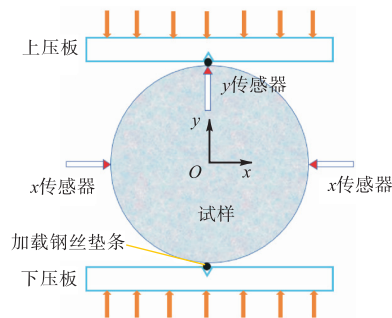


图 2 青砂岩巴西劈裂试验

Fig.2 Brazilian splitting test of green sandstone

表 1 青砂岩试件主要参数测试结果

Tab.1 Test results of the main parameters of the 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

至关重要的。黏结颗粒的接触方式通常采用接触黏结或平行黏结(图 3)^[17]。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。相比而言,平行黏结方式更适合模拟岩石等脆性介质^[17]。基于此,本文青砂岩的本构模型采用了平行黏结模型(图 4)^[18]。图 4 中, k_n 为法向刚度, k_s 为切向刚度, \bar{k}_n 为平行黏结法向刚度, \bar{k}_s 为平行黏结切向刚度, μ 为颗粒摩擦系数, $\bar{\sigma}$ 为平行黏结切向强度, $\bar{\phi}$

为平行黏结摩擦角, g_s 为颗粒接触黏结间隙, $\bar{\sigma}_c$ 为平行黏结法向强度。

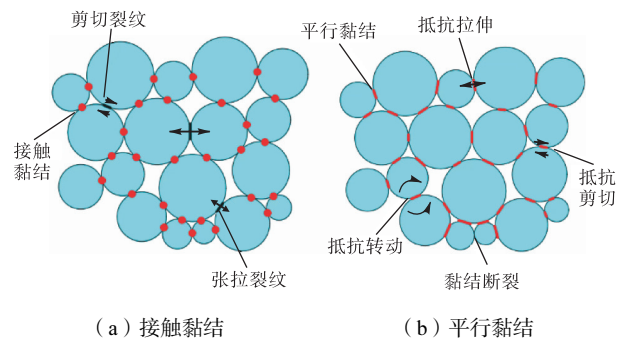


图 3 颗粒黏结方式^[17]

Fig.3 Particle bonding methods^[17]

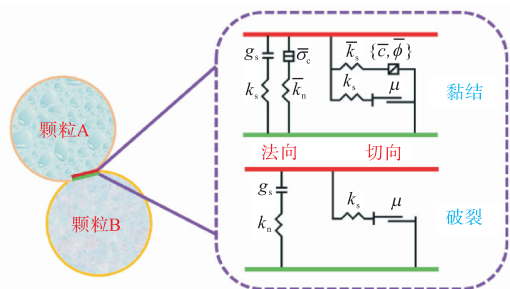


图 4 青砂岩两颗粒间平行黏结模型^[18]

Fig.4 Parallel bonding model between two particles of green sandstone^[18]

颗粒流程序采用细观力学参数表征颗粒及黏结的力学性质,由于细观参数直接决定颗粒材料的宏观力学性质,因而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,采用“试凑法”^[19],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(表 2),然后模拟得到青砂岩抗拉强度 2.362 MPa,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 5)^[20],因此,青砂岩在颗粒流模拟过程中,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

Tab.2 Microparameters 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	平行黏结摩擦角/(°)	摩擦系数
1.000	1.000	1.000	1.000	5.114	19.084	37.700	0.300



(a) 室内试验 (b) 颗粒流模拟

图 5 青砂岩破坏特征对比^[20]

Fig.5 Comparison of failure characteristics for green sandstone^[20]

2 试验方案

目前,在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冲击方式(图 6),图中 v 为冲击试块下落时的冲击速率,当岩石受到足够大的瞬时冲击力时,则发生破裂现象.如常见的冲击式破碎机、锤式破碎机、反击式破碎机等,该加载方式具有破碎效率高、破碎比大、能量消耗少等诸多优点,主要用于脆性物料的各种破碎作业.

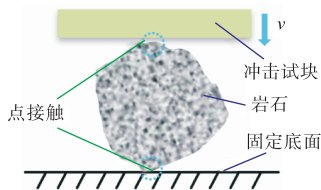


图 6 岩石压碎方式

Fig.6 Rock crushing method

在实际工业生产破碎过程中,由于岩石往往存在大小的差异性 & 形状的不规则性,不利于颗粒流模型的建立.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 $\phi 50$ mm,黏结颗粒的半径设置为 0.250 ~ 0.415 mm,根据实际加载方式,在模型建立后,固定下端墙体,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墙体施加不同速率的冲击载荷,模型边界条件及载荷施加区域如图

7 所示.同时,在颗粒流模拟过程中,冲击速率分别选取 2、6、10、14、18、22、26、30 m/s,加载时间设置为 0.3 μ s.

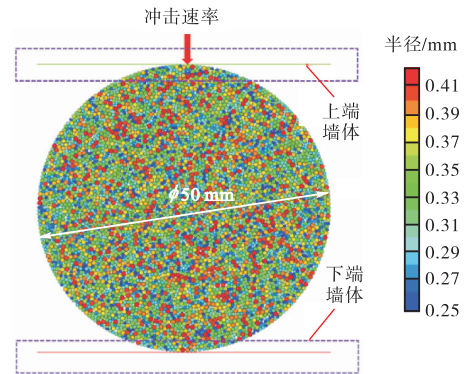


图 7 青砂岩巴西劈裂试验 PFC 模型

Fig.7 PFC model for Brazilian splitting test of green sandstone

3 结果与分析

3.1 力学特性

岩石的受力状态是判定外部载荷作用下岩石破裂行为的重要依据.青砂岩在外部冲击速率下,内部颗粒之间受到挤压产生接触力,而岩石颗粒接触力链作为联系宏观与微观的桥梁,能够反映颗粒接触区域的力学结构演化规律.不同冲击速率下青砂岩破裂时力链的分布特征如图 8 所示,图中绿色部分代表压力链,粉红色部分代表拉力链.由图 8 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,而拉力链由内部向外部延伸.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.

3.2 破裂规律

在外部载荷下,裂纹的产生和扩展是脆性材料发生破坏的主要原因之一,同时岩石的破裂过程是损伤逐渐累积的过程,而损伤可诱发岩石内部微裂纹萌

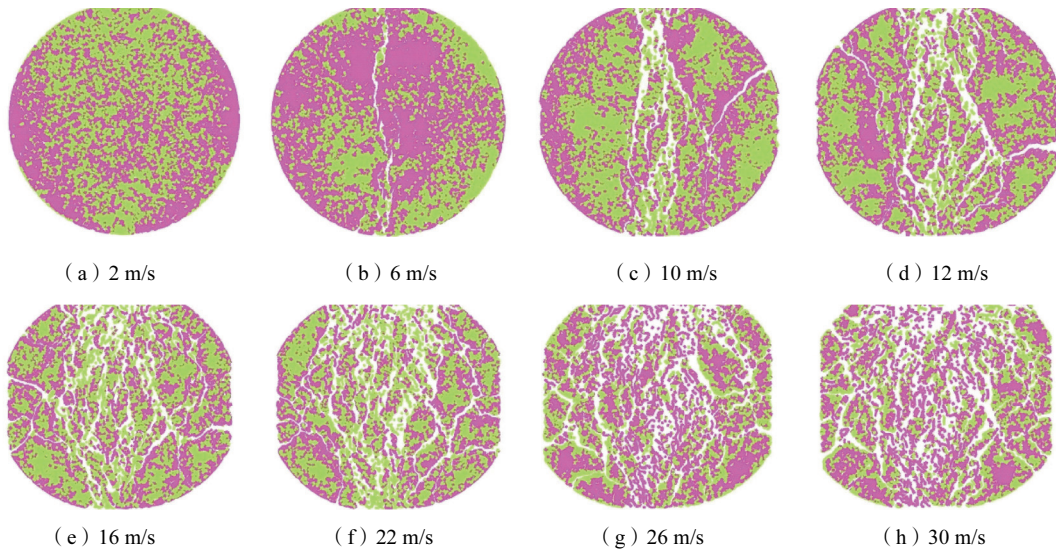


图 8 不同冲击速率下青砂岩力链分布特征

Fig.8 Distribution characteristics of force chains in green sandstone under different impact rates

生、扩展及贯通,进而改变其力学特性及破裂特征.因此,青砂岩内部细观裂纹的发展将导致其宏观力学特性的变化,当青砂岩的应力达到或超过破坏强度时,则会发生破裂现象.而随着冲击速率增加,青砂岩破裂形态和模式各异.

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.不同冲击速率下,青砂岩破裂形态如图 9 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如图 10 所示,图中绿色代表拉伸裂纹,红色代表剪切裂纹.

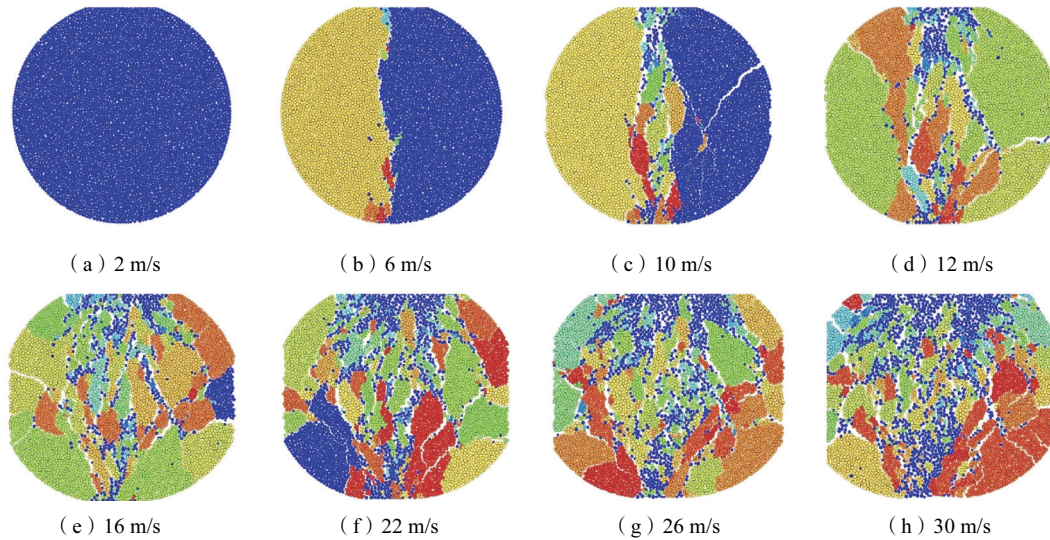


图 9 不同冲击速率下青砂岩破坏特征

Fig.9 Failure characteristics of green sandstone under different impact rates

由图 9 与 10 可知,在不同冲击速率下,青砂岩破裂形态可分为 3 个形式.

(1) 主裂纹为主的破坏形式(2 m/s 与 6 m/s): 在冲击速度较小时,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) 次生裂纹出现的破坏形式(10 ~ 16 m/s): 青

砂岩主裂纹附近破坏加剧,碎块仍然以小块为主,同时主裂纹附近开始出现多个次生裂纹,但次生裂纹部分出现贯穿.

(3) 次生裂纹贯穿的破坏形式(22 ~ 30 m/s): 青砂岩主裂纹附近破坏加剧,次生裂纹出现贯穿较多,出现更多的碎块,尤其小块数量明显增多.

综合上述不同冲击速率下青砂岩破坏及裂纹分

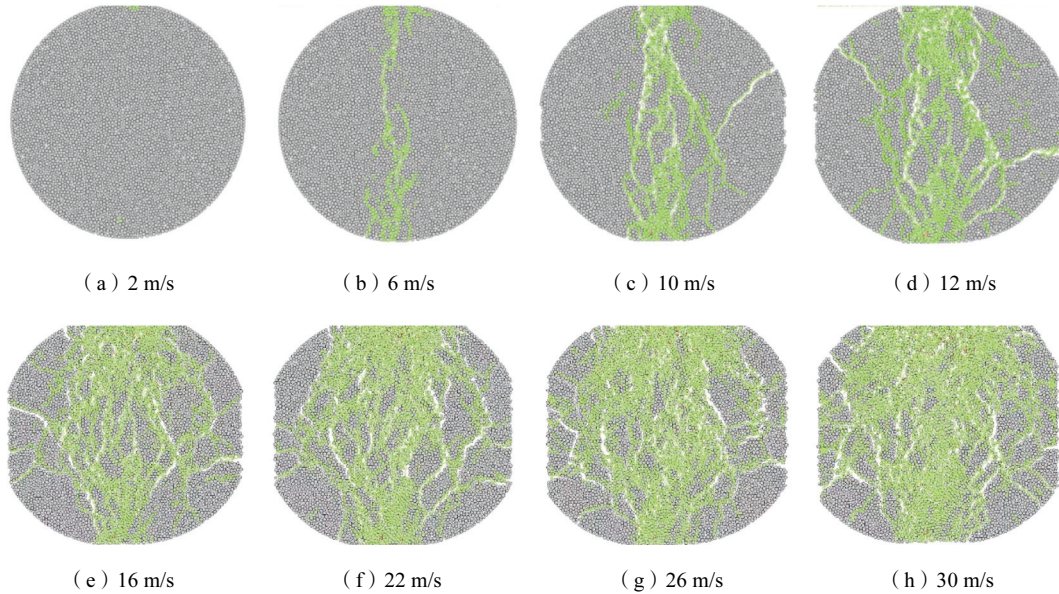


图 10 不同冲击速率下青砂岩裂纹分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of cracks in green sandstone under different impact rates

布特征可得,冲击速率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,导致了青砂岩的抗拉强度呈现出较大的差异^[21],分析如下。

(1) 在冲击速率较小时,劈裂面上张拉作用导致的微裂纹发展、汇集有足够的时间,有助于诱导宏观主劈裂面的形成,因此耗散能所占比例较大,弹性应变能比例较小,岩样破坏突发性较弱,劈裂面的形态比较规则。

(2) 在冲击速率较大时,加载至破裂时裂纹扩展形成宏观劈裂面的时间减小,劈裂面上的微裂纹没有足够的扩展时间,对宏观主劈裂面形成的诱导作用明显减弱,因此耗散能所占比例较小,弹性应变能所占比例较大,岩样破坏的突发性增强,宏观主劈裂面在短时间形成过程中,伴生了较多次生裂纹的扩展,从而导致劈裂面形貌特征比较复杂,局部破碎现象明显。

对破裂后的微元体与裂纹数量进行汇总,得出青砂岩破裂微元数量与加载时间的关系如图 11 所示。由图 11 可知,随着冲击速率的增加,破裂微元体均呈增加的趋势,但对于每个冲击速率下,破裂微元体均呈现出缓慢增加阶段(I)、快速增加阶段(II)、稳定增加阶段(III),由此说明冲击速率的增加会明显提高破碎效果,但随着冲击时间的增加,破裂微元体基本趋于稳定。

青砂岩在不同冲击速率下,拉伸、剪切裂纹与加载时间的关系分别如图 12、13 所示,裂纹数量破裂微元数量与冲击速率的关系如图 14 所示。由图 12 ~ 图 14 可知以下结论。

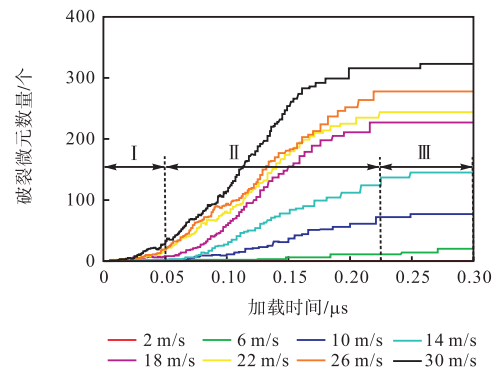


图 11 青砂岩破裂微元数量与加载时间的关系

Fig.11 Relationship between the number of fractured microelements in green sandstone and loading time

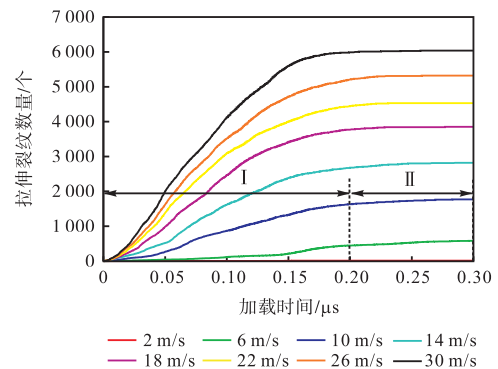


图 12 青砂岩拉伸裂纹数量与加载时间的关系

Fig.12 Relationship between the number of tensile cracks in green sandstone and loading time

(1) 在青砂岩破裂过程中,主要以拉伸裂纹为主,剪切裂纹相对较少,说明在冲击载荷下,青砂岩破裂在破裂过程中主要为拉伸裂纹,抗拉特性起主要作用。

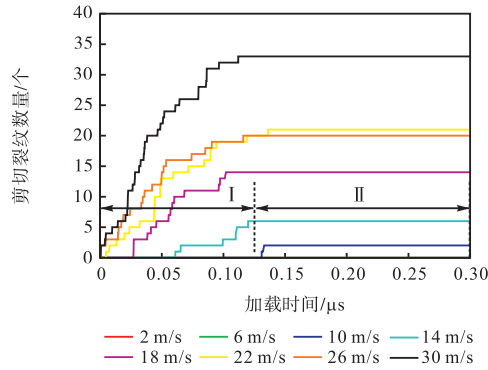


图 13 青砂岩剪切裂纹数量与加载时间的关系

Fig.13 Relationship between the number of shear cracks in green sandstone and loading time

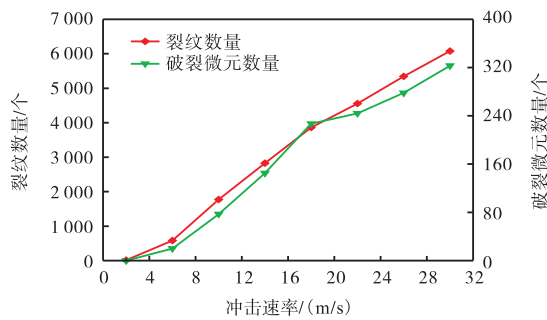


图 14 青砂岩裂纹数量、破裂微元数量与冲击速率的关系

Fig.14 Relationship between the number of cracks and fractured microelements in green sandstone and impact rate

(2) 随着冲击速率的增加, 裂纹数量均呈现出增加的趋势, 在相同的冲击速率下, 拉伸与剪切裂纹均呈现出快速增加阶段(I)、稳定增加阶段(II)。

综上可得, 在青砂岩破裂过程中, 细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, 细观微裂隙不断扩展, 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, 从而在破裂过程中出现较多的微元体^[22]。

3.3 能量利用效率

在岩石冲击破裂过程中, 由于断裂时间较短, 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^[23], 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。

青砂岩试样在冲击过程中, 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冲击做功, 而颗粒之间的黏结键断裂所消耗的能量为断裂能, 其具体计算过程如下。

冲击输入能量主要依靠调节冲击试块的高度, 使其做自由落体运动冲击青砂岩试块, 输入能量(冲击能量)为

$$E = \frac{1}{2}mv_i^2 \quad (1)$$

式中: m 为冲击试块的质量; v_i 为冲击瞬时速率。

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 σ_{\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^[24], 即

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < \frac{\bar{F}_n}{\bar{A}} + \bar{\beta} \frac{\|\bar{M}_b\| \bar{R}}{\bar{I}} \\ \tau_{\max} < \frac{\|\bar{F}_s\|}{\bar{A}} + \bar{\beta} \frac{|\bar{M}_t| \bar{R}}{\bar{J}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \bar{F}_n 为法向平行黏结力; \bar{F}_s 为切向平行黏结力; \bar{R} 为平行黏结半径; \bar{I} 为平行黏结键横截面的惯性矩; \bar{J} 为平行黏结键截面的极性惯性矩; \bar{M}_b 为平行黏结键扭矩; \bar{M}_t 为平行黏结键力矩; $\bar{\beta}$ 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青砂岩在外部加载作用下破裂时的黏结破坏能, 也称为断裂能, 在 PFC^{2D} 颗粒流模拟过程中, 其计算式为

$$E_d = \frac{1}{2} \left[\frac{\bar{F}_n^2}{k_n \bar{A}} + \frac{\|\bar{F}_s\|^2}{k_s \bar{A}} + \frac{\|\bar{M}_b\|^2}{k_n \bar{I}} \right] \quad (3)$$

由式(1)和式(3)得到青砂岩在破裂过程中的能量利用效率为

$$\eta = \frac{E_d}{E} = \frac{\frac{\bar{F}_n^2}{k_n \bar{A}} + \frac{\|\bar{F}_s\|^2}{k_s \bar{A}} + \frac{\|\bar{M}_b\|^2}{k_n \bar{I}}}{mv_i^2} \quad (4)$$

由式(1)和式(3), 并结合颗粒流分析, 得出不同冲击速率下, 青砂岩断裂能与加载时间的关系如图 15 所示. 由图 15 可知: 随着冲击速率的增加, 青砂岩断裂能均呈现出增加的趋势, 在相同的冲击速率下, 呈现出缓慢增加阶段 I、快速增加阶段 II、稳定增加阶段 III。

对不同冲击速率下, 青砂岩输入能-断裂能进行汇总, 得到输入能-断裂能与冲击速率的关系如图 16 所示. 由图 16 可知, 青砂岩的输入能、断裂能呈现向上凹型增加的趋势, 且随着冲击速率的增加, 增加得越快. 通过对不同冲击速率下青砂岩断裂能进行多项式拟合, 得到青砂岩断裂能与冲击速率的拟合曲线如图 17 所示。

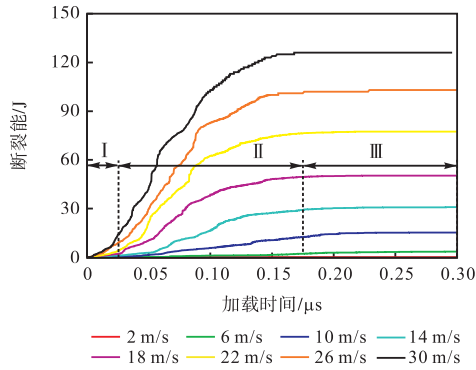


图 15 青砂岩断裂能与加载时间的关系

Fig.15 Relationship between fracture energy and loading time of green sandstone

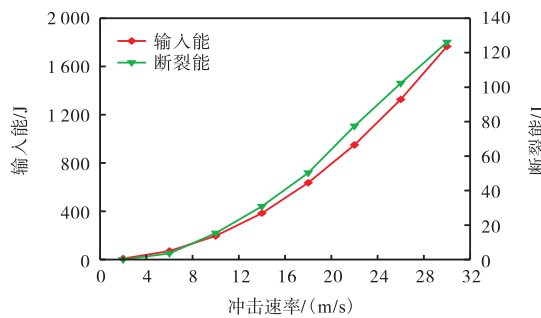


图 16 青砂岩输入能-断裂能与冲击速率的关系

Fig.16 Relationship between input-fracture energy and impact rates in green sandstone

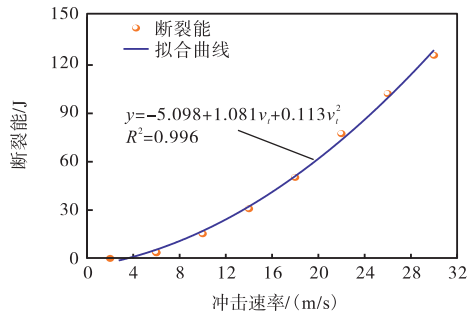


图 17 断裂能与冲击速率的拟合曲线

Fig.17 Fitting curve between fracture energy and impact rates

能量利用效率是衡量岩石破碎效果的重要因素,也是岩石破碎作业中的重要参考指标.由式(4)并结合颗粒流模拟分析,得出青砂岩在不同冲击速率下的能量利用效率如图 18 所示.

由图 18 可知,青砂岩在冲击速率为 2~12 m/s 时,能量利用效率呈现快速增加的趋势,冲击速率为 12~28 m/s 时,能量利用效率呈现出上下波动趋势,主要集中于 7.708%~8.153%.在冲击速率为 22 m/s 时,最大能量利用效率为 8.153%.在 28~30 m/s 呈现出下降趋势,分析认为主要原因为:在较低的速率情况下,冲击输入能量主要转化为颗粒之间的应变

能、阻尼能,随着冲击能量的增大,颗粒黏结键被破坏,冲击输入能量主要以裂纹和损伤形式耗散,青砂岩内部损伤劣化加速,微裂纹产生与贯通加快,断裂能所占比例快速增加,较高的冲击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.这可能导致更多的能量被转化为热能、声能、动能、摩擦能等其他形式耗散能量,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,从而导致部分能量被耗散,造成能量利用率降低.因此,在实际工程破碎过程中,控制一定的冲击速率有利于提高岩石破裂过程中的能量利用效率.

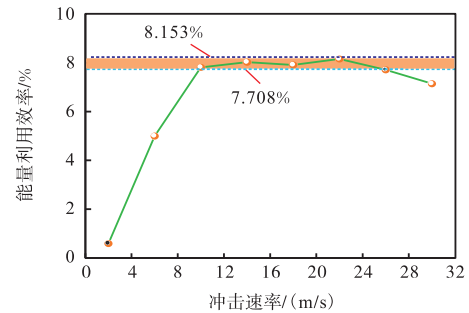


图 18 不同冲击速率下青砂岩能量利用效率

Fig.18 Energy utilization efficiency of green sandstones under different impact rates

4 结论

利用颗粒流程序,通过青砂岩室内试验与细观参数标定,建立青砂岩宏-细观力学响应关系,对青砂岩在不同冲击速率下的力学特性、破裂规律及能量利用效率进行了分析,得出以下主要结论:

(1) 青砂岩破裂过程中,碎块内部以拉力链为主,破裂口边缘附近以压力链为主,在未发生破裂的碎块内部,压力链由外部向内部延伸,而拉力链由内部向外部延伸,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.

(2) 随着冲击速率增加,青砂岩破裂形态可分为主裂纹为主、次生裂纹出现、次生裂纹贯穿的破坏形式,而破裂微元体、拉伸与剪切裂纹均呈现增加的趋势.在相同的冲击速率下,破裂微元体呈现出缓慢增加、快速增加与稳定增加阶段,而拉伸与剪切裂纹均呈现快速增加与稳定增加阶段,且在破裂过程中主要为拉伸裂纹.

(3) 在冲击速率为 2~12 m/s 时,能量利用效率呈现快速增加的趋势;12~28 m/s 时,能量利用效率呈现出上下波动趋势;28~30 m/s 时,呈现出下降趋势;在冲击速率为 22 m/s 时,最大能量利用效率为

8.153%。此外,还建立了断裂能与冲击速率的拟合曲线。

在实际工程应用中,虽然颗粒流模拟可通过非连续数值方法解决岩石在各种复杂加载方式下的损伤劣化等实际问题,但仍然存在参数标定困难、复杂模型建立困难、力学机理复杂、缺少工程实际应用验证等诸多问题,未来建议改进参数标定方法、简化模型复杂性与研究力学机理,并结合室内试验、数值模拟与各种测试技术,建立岩石的微-细-宏观跨尺度模型,探索不同尺度间的相互关系,深入研究不同冲击速率下岩石的力学特性及能耗规律,为岩石破碎工艺参数的合理选择提供参考。

参考文献:

- [1] Yahyaei M, Hilden M, Shi F, et al. Comminution [M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [2] Zhang Z X, Ouchterlony F. Energy requirement for rock breakage in laboratory experiments and engineering operations: A review[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55: 629-667.
- [3] Cui Z, Qian S, Zhang G M, et al. An Experimental investigation of the influence of loading rate on rock tensile strength and split fracture surface morphology[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(4): 1969-1983.
- [4] 郭占峰, 满 轲. 花岗岩动态劈裂拉伸实验及动力作用机制[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(6): 2177-2184.
Guo Zhanfeng, Man Ke. Experimental and mechanism of granite on its dynamic splitting tensile property[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(6): 2177-2184 (in Chinese).
- [5] 李金洋. 冲击载荷下砂岩动态拉伸力学及能量耗散特征[J]. *中国矿山工程*, 2023, 52(5): 47-52.
Li Jinyang. Dynamic tensile mechanics and energy dissipation characteristics of sandstone under impact load[J]. *China Mine Engineering*, 2023, 52(5): 47-52 (in Chinese).
- [6] 刘运思, 何楚韶, 王世鸣, 等. 冲击荷载下层状板岩拉伸破坏及能耗规律研究[J]. *应用力学学报*, 2021, 38(4): 1373-1382.
Liu Yunsi, He Chushao, Wang Shiming, et al. Study on tensile failure and energy consumption law of layered slate under impact loading[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(4): 1373-1382 (in Chinese).
- [7] Wang J, Wang Y, Gong W L, et al. Shale Brazilian split test and numerical simulation of the discrete element method[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 570(2): 022047.
- [8] 司 凯. 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, 2017.
Si Kai. Experimental Study on Brazilian Splitting Failure and Acoustic Emission Characteristics of Rocks[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017 (in Chinese).
- [9] 胡涛涛, 王 栋, 康志斌, 等. 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]. *应用力学学报*, 2025, 42(2): 347-357.
Hu Taotao, Wang Dong, Kang Zhibin, et al. Brazilian splitting test and numerical simulation study of carbonaceous slate with different soft interbedded dips[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2025, 42(2): 347-357 (in Chinese).
- [10] 乔 鑫, 潘永泰, 赵环帅, 等. 青砂岩破碎过程中冲击高度与时间关系的数值模拟分析[J]. *绿色矿冶*, 2024, 40(4): 8-12.
Qiao Xin, Pan Yongtai, Zhao Huanshuai, et al. Numerical simulation of impact time of green sandstone crushing process[J]. *Sustainable Mining and Metallurgy*, 2024, 40(4): 8-12 (in Chinese).
- [11] 李嘉博, 王培龙, 龚道振, 等. 云南某铜矿 SABC 碎磨流程能耗分布规律及能量基准评价研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2023(2): 41-47.
Li Jiabo, Wang Peilong, Gong Daozhen, et al. Study on energy distribution and energy benchmarking evaluation of SABC comminution circuit in a copper mine in Yunnan[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2023(2): 41-47 (in Chinese).
- [12] Guo Q, Pan Y T, Zhou Q, et al. Kinetic energy calculation in granite particles comminution considering movement characteristics and spatial distribution[J]. *Minerals*, 2021, 11(2): 217.
- [13] 张 磊. 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, 2021.
Zhang Lei. Basic Research on Efficient Fragmentation of Hard Rocks Under Ultrasonic Vibration Excitation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021 (in Chinese).
- [14] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model

- for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [15] 黄 达, 岑夺丰. 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*, 2013, 32(9): 1926-1936.
- Huang Da, Cen Duofeng. Mechanical response and energy dissipation mechanism of rock specimen with a single fissure under static and dynamic uniaxial compression using particle[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(9): 1926-1936(in Chinese).
- [16] 赵环帅, 潘永泰, 余 超, 等. 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)*, 2024, 64(12): 2155-2165.
- Zhao Huanshuai, Pan Yongtai, Yu Chao, et al. Influence of vibration loading on impact crack propagation and energy utilization efficiency in green sandstone[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2024, 64(12): 2155-2165(in Chinese).
- [17] 程爱平, 舒鹏飞, 邓代强, 等. 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*, 2022, 39(6): 1227-1234.
- Cheng Aiping, Shu Pengfei, Deng Daiqiang, et al. Study on mesoscale energy dissipation and damage characterization of cemented tailings backfill under uniaxial compression[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(6): 1227-1234(in Chinese).
- [18] 徐小敏, 凌道盛, 陈云敏, 等. 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*, 2010, 32(7): 991-998.
- Xu Xiaomin, Ling Daosheng, Chen Yunmin, et al. Correlation of microscopic and macroscopic elastic constants of granular materials based on linear contact model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(7): 991-998(in Chinese).
- [19] 佟 安, 张军徽, 武 娜. 红砂岩单轴压缩宏细观参数映射关系研究[J]. *力学与实践*, 2020, 42(2): 202-208.
- Tong An, Zhang Junhui, Wu Na. Macro and microscopic parameter mapping relationship of red sandstone[J]. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(2): 202-208(in Chinese).
- [20] 赵环帅, 潘永泰, 乔 鑫, 等. 加载速率对青砂岩抗拉特性及断裂能耗的影响[J]. *中山大学学报(自然科学版中英文)*, 2025, 64(2): 120-128.
- Zhao Huanshuai, Pan Yongtai, Qiao Xin, et al. The influence of loading rate on the tensile properties and fracture energy consumption of green sandstone[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2025, 64(2): 120-128(in Chinese).
- [21] 邓华锋, 王晨玺杰, 李建林, 等. 加载速率对砂岩抗拉强度的影响机制[J]. *岩土力学*, 2018, 39(增 1): 79-88.
- Deng Huafeng, Wang Chenxijie, Li Jianlin, et al. The influence mechanism of loading rate on the tensile strength of sandstone[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2018, 39(Suppl 1): 79-88(in Chinese).
- [22] 刘天为. 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*, 2020, 38(11): 133-136.
- Liu Tianwei. Discrete element and failure mechanism analysis of sandstone under Brazilian split test[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(11): 133-136(in Chinese).
- [23] 姜耀东, 李海涛, 赵毅鑫, 等. 加载速率对能量积聚与耗散的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(3): 369-373.
- Jiang Yaodong, Li Haitao, Zhao Yixin, et al. Effect of loading rate on energy accumulation and dissipation in rocks[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2014, 43(3): 369-373(in Chinese).
- [24] 丁桐桐, 徐建华, 李远安, 等. 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*, 2021, 38(5): 2018-2024.
- Ding Tongtong, Xu Jianhua, Li Yuanan, et al. Numerical calculation of sand formation rate of vertical shaft impact crusher based on discrete element method[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(5): 2018-2024(in Chinese).

(责任编辑: 田 军)