顶板砂岩裂纹扩展规律及断裂行为的加载速率效应*

赵振华[1,2]，孙虹洁[1,2]，韩琳[1,2]，罗振江[1,2]，赵振龙[3]，王海龙[1,2,3,4]

（1.山东省地矿工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队)， 山东 济南 250014；
2.山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心， 山东 济南 250014；
3.临沂大学 土木工程与建筑学院， 山东 临沂市 276000；
4.中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室， 北京 100083）

摘要：为揭示顶板断裂行为的加载速率效应，以典型矿井顶板砂岩为研究对象，在0.001～10 kN/s的加戴速率范围内开展了5个加载速率等级的巴西劈裂试验，分析了抗拉强度、破碎特征、起裂应力、声发射特性、断口微观形貌等力学行为，并基于声发射震源分布，探讨了不同加载速率下试样内部损伤裂纹的演化规律。结果表明，加载速率每增大10倍，抗拉强度增加0.64 MPa，但起裂应力与抗拉强度的比值减小，随加载速率增大，该比值依次为40.13%、36.59%、32.53%、26.17%、15.81%；加载速率每增大10倍，碎块平均尺寸减小0.229 mm，破碎程度增大，碎块尺寸分布向均匀化发展；低加载速率下的声发射震源主要沿宏观断裂面出现，而高加载速率下由于裂纹从多个分散的应力集中区萌生和扩展，声发射震源的分布较分散；随加载速率的增大，断口处的穿晶现象越来越显著，从低加载速率下的单裂隙、平直形式，向高加载速率下的多裂隙、复杂形式转变。

关键词：抗拉强度；加载速率；声发射；起裂应力；断口形貌

中图分类号：TD315；TU458 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)04-0138-11

Crack Propagation Law of Roof Sandstone and Loading Rate Effect of Fracture Behavior

ZHAO Zhenhua[1,2], *SUN Hongjie*[1,2], *HAN Lin*[1,2], *LUO Zhenjiang*[1,2], *ZHAO Zhenlong*[3], *WANG Hailong*[1,2,3,4]

(1.Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute (801 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources), Jinan, Shandong 250014, China;
2.Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China;
3.School of Civil Engineering and Architecture, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China;
4.State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To reveal the loading rate effect of roof fracture behavior, typical mine roof sandstone was taken as the research object. Brazilian splitting tests of five loading rate levels were carried out in the loading rate range of 0.001-10 kN/s. The mechanical behaviors such as tensile strength, fracture characteristics, initiation stress, acoustic emission characteristics and fracture microstructure were analyzed. Based on the distribution of acoustic emission sources, the evolution law of internal damage cracks in the samples under different loading rates was explored. The results show that the tensile strength increases by 0.64 MPa when the loading rate increases by one order of magnitude, but the ratio of crack initiation stress to tensile strength decreases. With the increase of loading rate, this ratio is 40.13%, 36.59%, 32.53%, 26.17% and 15.81% in sequence. When the loading rate increases by one order of magnitude, the average size of the fragments decreases by 0.229 mm, the degree of fragmentation increases, and the size distribution of the fragments develops towards homogenization. The acoustic emission source at low loading rate mainly appears along the macroscopic fracture surface, while at high loading rate, the distribution of acoustic emission source is more dispersed due to the initiation and propagation of cracks from multiple dispersed stress

* **收稿日期**：2025-04-25
基金项目：山东省自然科学基金面上项目(ZR2025MS978)；山东省自然科学基金青年项目(ZR2025QC552)；中国博士后科学基金项目(2022M711969)；山东省高等学校青年创新团队资助项目(2022KJ112)
作者简介：赵振华(1982—)，男，山东潍坊人，硕士，正高级工程师，主要从事水文地质和环境地质研究工作。E-mail:16607713@qq.com
通信作者：王海龙(1987—)，男，山东威海人，博士(后)，教授，主要从事矿山岩石力学与采煤塌陷地治理方面的研究。E-mail:whlmlp@163.com

concentration areas. With the increase of loading rate, the transgranular phenomenon at the fracture surface becomes more and more significant, transitioning from a single crack and straight form at low loading rates to multiple cracks and complex forms at high loading rates.

Key words: Tensile strength, Loading rate, Acoustic emission, Initiation stress, fracture morphology

0 引言

在地下矿山开采过程中，回采工作面推进速度过快，会导致单位时间内顶板岩层加载活动剧烈，易诱发冲击地压等动力灾害[1-2]，而推进速度过慢，集中应力来不及转移，致使同一位置围岩长时间承受较大荷载作用，增加其发生破坏失稳的可能性[3]。在顶板受力分析中，工作面推进速度对顶板岩层所处应力环境的影响可以等效为作用于顶板岩层的应力加载速率[4]，研究表明，加载速率对岩石的强度、变形、破坏等力学特性有显著影响[5-6]。由此可见，在开采过程中，考虑加载速率对围岩体力学响应特性的影响关系到采场及掘进工作面围岩的支护参数设计和稳定性控制。此外，由于岩石的抗拉强度远低于其抗压强度，张拉破坏是一种常见的岩石破坏形式[7]，如采场上覆岩层破断、巷道顶板垮塌等现象均与岩石的抗拉特性密切相关。因此，考虑到回采工作面顶板围岩的稳定性控制问题，开展不同加载速率对岩石抗拉特性影响的研究，有助于掌握采场上覆岩层破断行为和矿压显现规律，对保证矿山安全生产具有重要实践意义。

在加载速率对岩石抗拉特性影响方面，国内外学者从理论分析、现场实践、力学试验和数值模拟等方面开展了广泛研究。赵同彬等[4]在工程现场实测的基础上，理论分析了加载速率影响下的顶板能量积聚与释放机制。李小龙等[5]研究了 0.01～1 mm/min 范围内不同加载速率对弱胶结砂岩抗拉强度、声发射信息响应特征、全场应变演化规律的影响。杨胜利等[8]开展了高强度开采工作面采场围岩灾变的推进速度效应及围岩应变能分布特征研究。杨敬虎等[9]基于弹性动力学方法和分子尺度的功能原理，探讨了外力加载速率和位移加载速率影响抗拉强度的作用机理。彭守建等[10]分析了三种岩石巴西劈裂破坏过程及应力-应变曲线峰前、峰后特征对加载速率的依存性。张茂础等[11]通过劈裂节理面粗糙度指标的计算，分析了花岗岩、玄武岩和灰岩试样在不同加载速率下劈裂节理面形貌的加载速率效应。金爱兵等[12]借助于数字图像处理技术，结合铁矿石和围岩在不同加载速率下的巴西劈裂试验，从抗拉强度、能量演化和水平应变分布等方面分析了铁矿石及围岩的劈裂破坏特性。PADMANABHA Vivek 等[13]采用液压加载系统和霍普金森杆依次开展了 10^{-5}～27 s^{-1}的准静态和动态巴西圆盘劈裂试验，重点分析了应变速率对玄武岩、花岗岩、砂岩、大理石 4 种岩石破碎特征的影响。谷金泽等[14]借助颗粒离散元程序模拟了静态和动态加载速率下的花岗岩劈裂试验，并从强度、变形、裂纹演化和破坏特征等方面对比分析了静态、动态作用下的花岗岩抗拉特性。SAKSALA Timo[15]采用嵌入式扩展有限元(E-FEM)开展了动荷载作用下粗粒岩石抗拉行为的应变速率敏感性数值分析。马泗洲等[16]基于 LS-DYNA 显式动力学软件建立不同岩性组合体数值模型，从应力波传播规律、变形特性及破坏特征等方面分析了不同冲击荷载、冲击方向、加载角度等对组合体动态劈裂过程的影响。赵环帅等[17]通过采用颗粒流的平行黏结模型模拟不同加载速率下青砂岩的巴西劈裂过程，研究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。

在上述研究的基础上，考虑到我国东部矿区地质条件复杂，加之高强度采掘活动的持续扰动，致使采场围岩长期处于复杂的受力环境中，故以该地区某典型矿井回采工作面的顶板砂岩为研究对象，在实验室制备直径为 50 mm、厚度为 25 mm 的巴西圆盘试样，依次开展 0.001 kN/s、0.01 kN/s、0.1 kN/s、1.0 kN/s 和 10 kN/s 5 个应力加载速率等级的巴西劈裂试验，从抗拉强度、破坏特征、起裂应力、微观断口形貌等宏细观方面分析不同加载速率对砂岩断裂行为的影响，并在试验过程中，借助声发射监测系统实时采集试样内部声发射震源的三维分布，探讨不同加载速率下巴西圆盘劈裂过程中内部损伤裂纹的演化规律。研究结果对揭示顶板砂岩断裂行为的加载速率效应，预测矿山工程现场顶板非预期断裂的发生，具有理论指导与工程实践价值。

1 试验方法

1.1 试样制备

试验所用试样取自采场的顶板岩层，为提高试验结果的可靠性，在顶板岩层的同一区域选取若干无明显缺陷的大尺寸砂岩岩块，在实验室内经取芯、切

割、打磨等工序加工成直径为 50 mm、厚度为 25 mm 的圆盘试样。经测定,该砂岩试样的密度为 2.37 g/cm^3,纵波波速为 3.61 km/s,且其矿物成分以石英(43.62%～47.56%)、云母(12.02%～15.39%)、高岭石(26.39%～28.63%)、钠长石(10.76%～11.01%)为主,石英含量超过 40%,见表 1。

表 1 砂岩试样的矿物组成

Table 1 Main mineral composition of the sandstone sample

主要矿物成分	占比/%	
	最小值	最大值
石英	43.62	45.56
云母	12.02	14.39
高岭石	26.39	28.63
钠长石	10.76	11.01

1.2 试验过程

综合考虑液压伺服刚性试验机的加载范围和精度,采用应力控制模式完成不同应力加载速率的巴西劈裂试验,劈裂荷载的加载速率分别设定为 0.001 kN/s、0.01 kN/s、0.1 kN/s、1.0 kN/s 和 10 kN/s 共 5 个梯度,符合有关试验规程中规定巴西劈裂试验应控制加载速率在 0.1～0.3 MPa/s 范围内的试验要求。

在应力加载过程中,借助声发射监测系统实时采集声发射数据,为确保采集效率,设置前置放大器增益值为 40 dB,阈值为 45 dB,采样频率为 1 MHz。声发射传感器的布置如图 1 所示,在巴西圆盘前后平面的径向两端各布置 2 个探头,基于时差定位原理,通过不在同一平面上的 4 个探头实现声发射震源的三维定位。

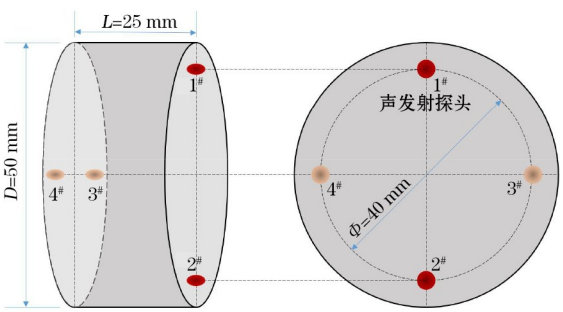


图 1 声发射传感器布置示意

Fig.1 Layout of acoustic emission sensors

2 试验结果分析

2.1 力学特性

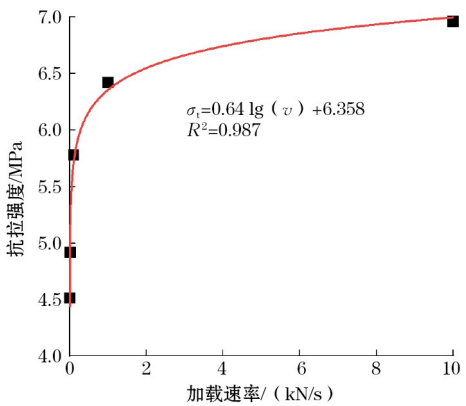
抗拉强度作为岩石类脆性材料的一个重要力学参数,直接关系到岩体工程结构的强度设计和稳定预测。为了分析加载速率导致试样抗拉强度呈现出的差异性,试验结束后,通过巴西圆盘劈裂试验的荷载-位移曲线间接获得不同应力加载速率下砂岩试样的抗拉强度。

图 2(a)给出了试样抗拉强度随加载速率的变化关系。由图 2(a)可知,随加载速率增大,砂岩试样的抗拉强度呈持续增大的特点,且两者的拟合关系式为:

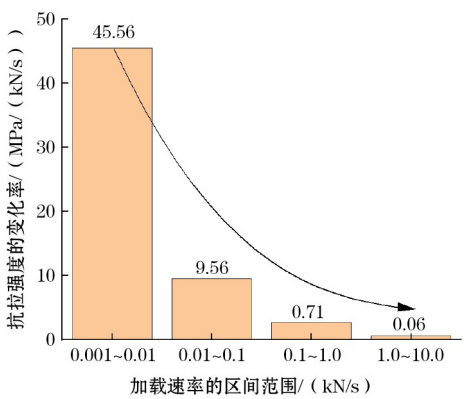
$$\sigma_t = 0.64\lg(\nu) + 6.358 \tag{1}$$

式中:σ_t 为试样的抗拉强度,MPa;ν 为加载速率,kN/s。

不同加载速率区间内试验抗拉强度的变化率如图 2(b)所示。由图 2(b)可知,在 0.001～0.01 kN/s、0.01～0.1 kN/s、0.1～1.0 kN/s、1.0～10 kN/s 的各个加载速率变化区间内,抗拉强度的平均增长率依次为 45.56 MPa/(kN/s)、9.56 MPa/(kN/s)、0.71 MPa/(kN/s)、0.06 MPa/(kN/s)。由此可知,加载速率每增大 10 倍,抗拉强度增加 0.64 MPa,但是随着加载速率的增大,抗拉强度的增长率呈现减小的特点,说明应力加载速率对抗拉强度的影响不断减弱。



(a) 抗拉强度与加载速率的拟合



(b) 不同加载速率区间内抗拉强度的增长率

图 2 抗拉强度随加载速率的变化

Fig.2 Change of tensile strength with loading rate

表 2 给出了巴西圆盘试样劈裂瞬间对应的时间和位移。由表 2 可知，相比于抗拉强度随加载速率增大的关系，劈裂瞬间的位移和时间均随加载速率的增大而减小，并且按应力加载模式推算荷载达到峰值的理论时间与实际加载时间基本相同。综合分析可知，峰值位移量随加载速率增大而减小，主要是由于低加载速率下，试样内部弹性应变能的集聚相对缓慢，有足够多的时间供试样内部原生空隙、裂隙的闭合以及新生裂纹的萌生和扩展。而在高加载速率下，由于能量的输入在短时间内完成，通过试样损伤来完成的能量释放过程以加剧断裂面的破碎程度来体现，这一现象在图 3 所示的破坏模式中有所体现。

表 2　巴西圆盘试样劈裂瞬间的位移和时间

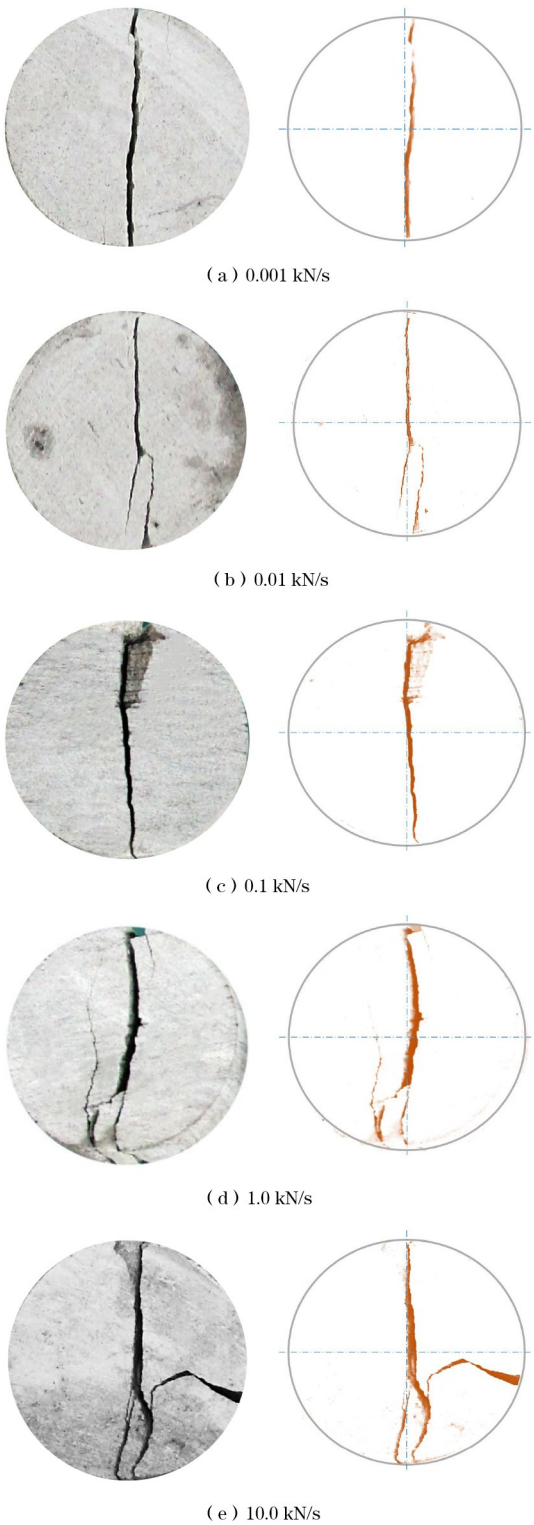
Table 2　Displacement and time at the moment of splitting

加载速率/(kN/s)	位移/mm	时间/s
0.001	0.61	8 859.3
0.010	0.53	1 107.6
0.100	0.47	136.7
1.000	0.41	15.9
10.000	0.35	1.7

2.2　破坏模式

不同加载速率影响下的试样破坏模式如图 3 所示。当加载速率为 0.001 kN/s 时，砂岩试样沿着加载方向产生单一断裂面，试样的破坏模式比较单一；当加载速率为 0.01 kN/s 时，在主断裂面的基础上，靠近加载端的位置出现 2 条宏观裂纹，并相交于主断裂面；当加载速率为 0.1 kN/s 时，在宏观断裂面的上加载端出现碎块剥离；当加载速率为 1.0 kN/s 时，次生裂纹的数量显著增多，出现平行于主断裂面的次生贯通裂纹，并且在试样的上下加载端附近均出现破碎现象，尤其下加载端出现由多裂隙交叉而形成的破碎区；当加载速率为 10 kN/s 时，出现垂直于加载方向的断裂面，其原因是在主断裂面快速延伸的过程中能量来不及释放，致使断裂面在试样的承载薄弱区优先扩展而进一步释放能量。

总的来说，在巴西劈裂试验条件下，该砂岩试样的破坏主要表现为沿加载方向形成贯穿的宏观断裂面。值得注意的是，随加载速率增大，宏观断裂面周边衍生出大量次生裂纹，出现局部破碎现象，且破碎程度加剧，破坏模式呈现出从单一贯通断裂向复杂多裂纹汇聚转变的趋势。



(a) 0.001 kN/s

(b) 0.01 kN/s

(c) 0.1 kN/s

(d) 1.0 kN/s

(e) 10.0 kN/s

图 3　不同加载速率下的试样破坏特征

Fig.3　Failure characteristics of specimens under different loading rates

2.3　破碎特征

外力作用下岩石破坏后的碎块尺寸与其内部裂纹发育、能量耗散密切相关。因此，可通过统计碎块

尺寸分布以量化破碎特征,进一步分析加载速率对顶板砂岩断裂行为的影响。首先取巴西圆盘试样直径的 0.01 倍、0.1 倍、0.5 倍作为碎块尺寸区间的界限,并考虑到标准石子筛的筛孔尺寸,最终确定按照微尺寸(小于 0.425 mm)、小尺寸(0.425～4.75 mm)、中尺寸(4.75～26.5 mm)、大尺寸(大于 26.5 mm)4 个尺寸区间对碎块进行分类,各个尺寸区间的碎块质量占比如图 4 所示。

由图 4 可知,碎块尺寸越大,质量占比越大,从微尺寸到大尺寸的 4 个尺寸等级,其质量占比的范围分别是 1.7%～3.7%、5.6%～16.3%、15.3%～28.3%、54.8%～76.2%,尤其大尺寸质量占比的平均值接近 60%,在 0.001 kN/s 的加载速率下甚至达到了 76.2%。此外,就同一碎块尺寸区间而言,随加载速率的增大,微尺寸、小尺寸和中尺寸碎块的质量占比呈增大的特点,而大尺寸的质量占比降低。总的来说,随加载速率从 0.001 kN/s 逐渐拉大到 10.0 kN/s,尽管碎块分布仍以大尺寸碎块为主,但是尺寸小于 26.5 mm 的碎块累计占比依次为 23.8%、25.7%、41.7%、45.2%、53.9%,呈不断增大的特点,与大尺寸碎块占比的差距越来越小,表明碎块的尺寸向均匀化分布发展。

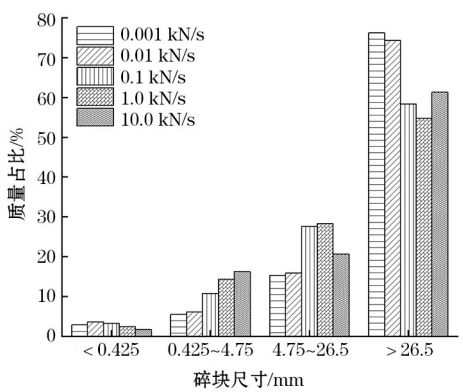


图 4 不同加载速率下的碎块尺寸区间的质量占比

Fig.4 Mass proportion of fragments in different size interval under different loading rates

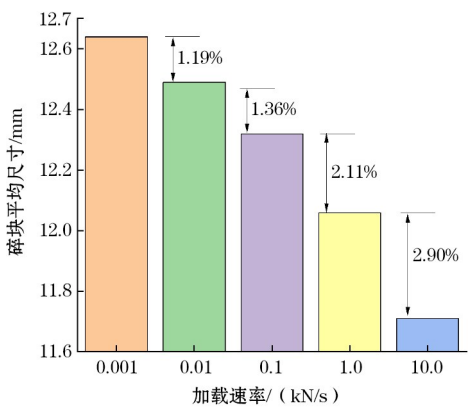
进一步考虑各尺寸等级的比例关系,根据式(2)计算碎块的平均尺寸。

$$d_{\mathrm{m}}=\sum_{i=1}^{n}\left(d_i\frac{M_i}{M_t}\right) \tag{2}$$

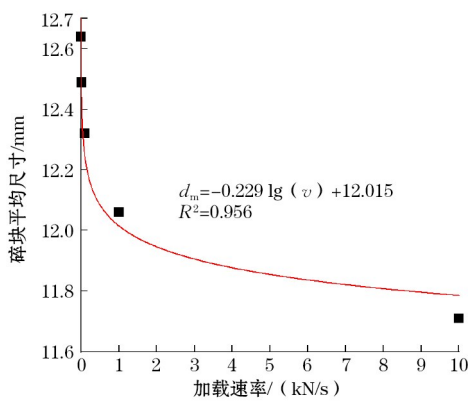
式中:d_{m} 为所有碎块的平均尺寸,mm;n 为按尺寸划分碎块等级数,$n=4$;i 为尺寸等级,i 从 1 到 4 依次取值,分别代表微尺寸、小尺寸、中尺寸和大尺寸共 4 个尺寸等级;d_i 为第 i 尺寸等级的平均尺寸,用尺寸区间的平均值代替,mm;M_i 为第 i 尺寸等级的碎块质量,g;M_t 为所有碎块的总质量,g。

依据式(2)计算得到不同加载速率下的碎块平均尺寸,如图 5(a)所示,依次为 12.64 mm、12.49 mm、12.32 mm、12.06 mm、11.71 mm。由此可知,随加载速率的增大,碎块平均尺寸呈减小的特点,说明破碎程度随加载速率的增大而越来越严重。当应力加载速率由 0.001 kN/s 增大到 0.01 kN/s 时,平均尺寸减小 1.19%;当应力加载速率由 0.01 kN/s 增大到 0.1 kN/s 时,平均尺寸减小 1.36%;当应力加载速率由 0.1 kN/s 增大到 1.0 kN/s 时,平均尺寸减小 2.11%;当应力加载速率由 1.0 kN/s 增大到 10.0 kN/s 时,平均尺寸减小 2.90%。

平均尺寸随加载速率的变化规律如图 5(b)所示。由图 5(b)可知,加载速率每增大 10 倍,碎块平均尺寸减小 0.229 mm,尽管随加载速率增大,碎块平均尺寸的减小率增大,但是减小过程趋向于平缓,表明碎块平均尺寸的减小速率小于加载速率的增大速率,说明试样的破碎程度受应力加载速率增大的影响逐渐减弱,这与力学特性分析中加载速率对抗拉强度影响程度不断减弱的规律类似。



(a) 碎块平均尺寸



(b) 碎块平均尺寸与加载速率的拟合

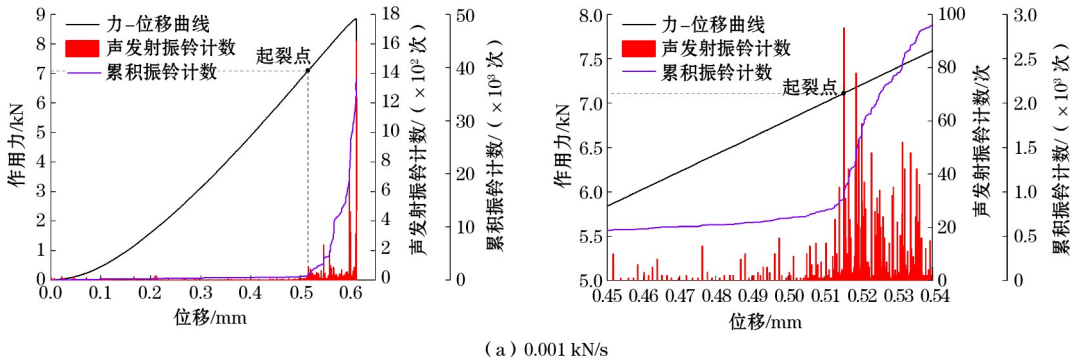
图 5 不同加载速率下碎块的平均尺寸

Fig.5 Average size of fragments under different loading rates

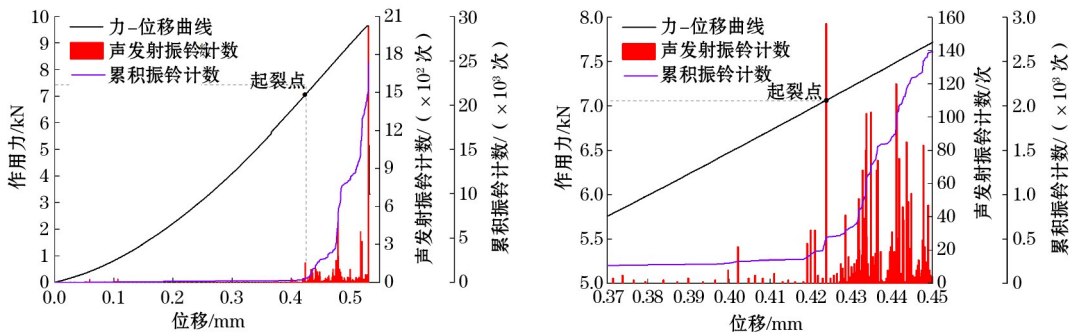
3　损伤特性

3.1　声发射特性

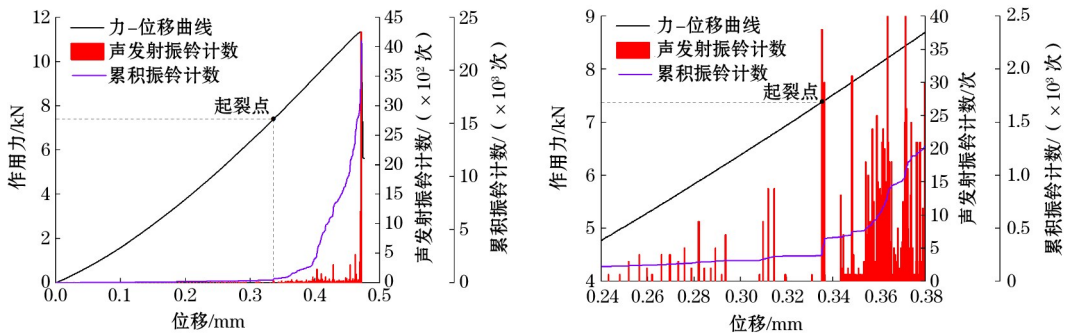
研究表明，声发射振铃计数与岩石内部的裂纹萌生、扩展过程密切相关[18-19]，故选取声发射振铃计数的变化来说明砂岩试样在劈裂过程中的损伤演化规律。如图 6 所示，在加载初期，声发射振铃计数率较低，声发射活动较弱；随加载过程推进，作用力达到起裂阈值时，声发射活动开始活跃，此时累计振铃计数曲线呈现明显的增长现象；在作用力达到峰值时，声发射振铃计数率处于较高水平，声发射活动剧烈，预示着试样断裂面的形成。然而，随加载速率的增大，出现声发射振铃计数突增时的位移越来越小，表明试样更早进入裂纹扩展阶段，并且最大振铃计数率呈增大的趋势，反映了声发射活动受加载速率增大表现出越来越活跃的特点。



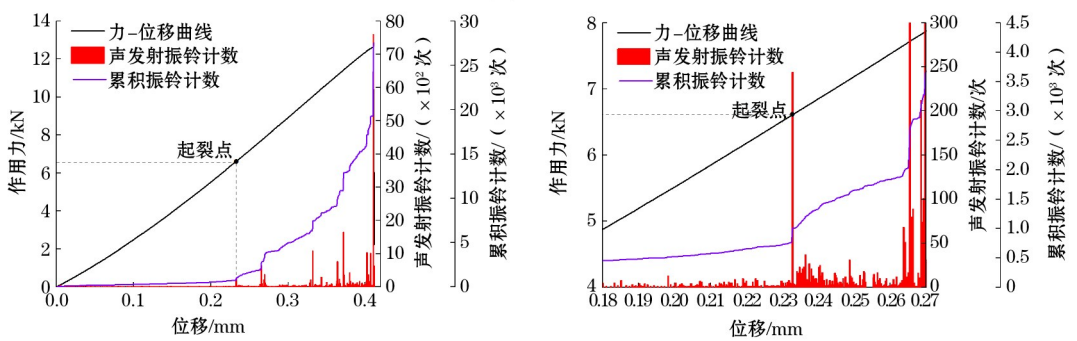
(a) 0.001 kN/s



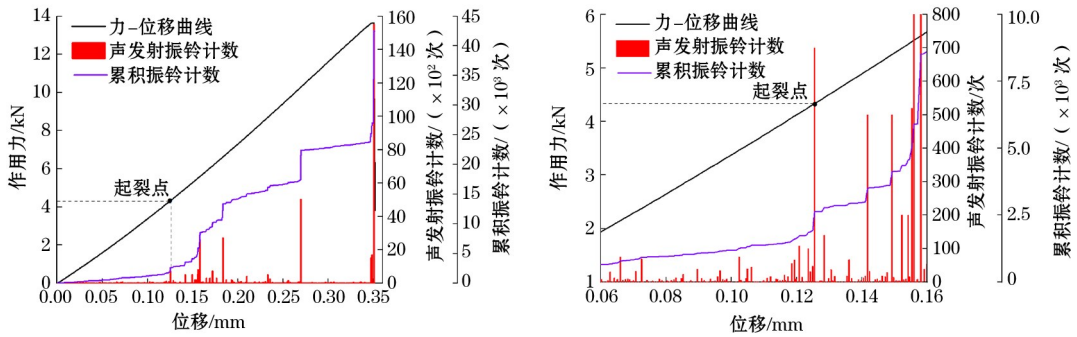
(b) 0.01 kN/s



(c) 0.1 kN/s



(d) 1.0 kN/s

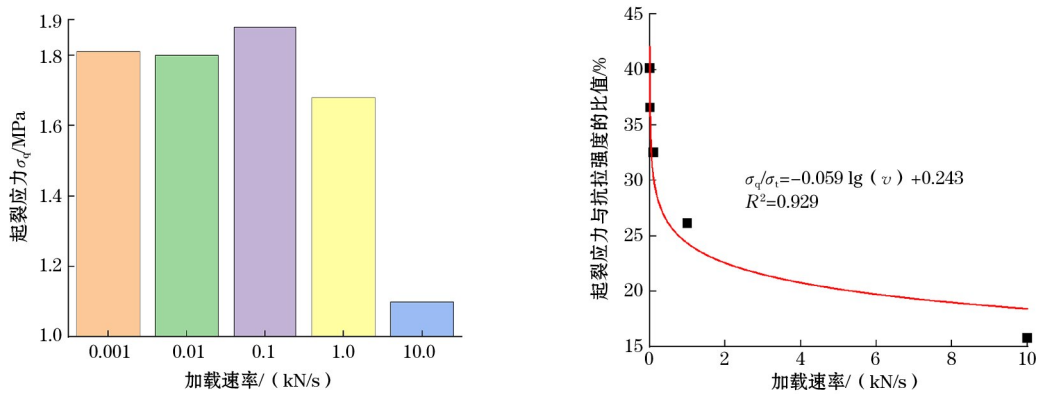


(e) 10.0 kN/s

图 6 不同加载速率下声发射振铃计数随加载过程的变化

Fig.6 The variation of acoustic emission ringing count with loading process under different loading rates

依据图 6 中声发射振铃计数出现突增现象可确定圆盘试样劈裂过程中的起裂应力。如图 7(a)所示,对应于 0.001 kN/s、0.01 kN/s、0.1 kN/s、1.0 kN/s、10.0 kN/s 的应力加载速率,起裂应力分别为 1.81 MPa、1.80 MPa、1.88 MPa、1.68 MPa、1.10 MPa,与抗拉强度的比值分别为 40.13%、36.59%、32.53%、26.17%、15.81%。由此可知,在 0.001～0.1 kN/s 的应力加载速率范围内,起裂应力的变化不明显,但是当加载速率大于 1.0 kN/s 后,起裂应力开始呈现减小的特点。随加载速率增大,起裂应力与抗拉强度的比值也不断减小,如图 7(b)所示,加载速率每增大 10 倍,比值持续减小,说明随加载速率增大,虽然抗拉强度增大,但由于低加载速率下的应力传递过程缓慢,加载前期试样一直处于弹性应变能的持续集聚和缓慢释放阶段,而高加载速率下的应力快速增加,应变能在短时间内集聚,且在集聚过程中来不及释放,致使试样在较低应力状态下就发生起裂现象。



(a) 起裂应力　　(b) 起裂应力与峰值应力的比值

图 7 不同加载速率影响下的试样起裂应力

Fig.7 Crack initiation stress at different loading rates

3.2 损伤演化规律

众所周知,声发射震源的空间分布便于形象地分析损伤演化过程。因此,基于时差定位原理获得不同加载速率下砂岩试样声发射震源的空间位置,并给出了 30%、50%、70%、90%、100%共 5 个应力水平的声发射震源空间分布,如图 8 所示。由图 8 可知,当加载速率为 0.001 kN/s 和 0.01 kN/s 时,加载初期声发射震源主要集中在两加载端,并随加载过程的推进向试样中部扩展,直至完全贯通;当加载速率为 0.1 kN/s 时,声发射震源从试样的上端部向下端部扩展,说明该加载过程中试样的上端部更容易出现应力集中;当加载速率为 1.0 kN/s 和 10 kN/s 时,声发射震源从其中一端开始并沿加载方向扩展,在加载的中后期另一端也开始出现声发射震源,最终在试样的中部汇聚、贯通形成宏观断裂面。

总的来说,声发射震源主要沿加载方向形成和贯通,并集中分布于宏观断裂面附近,但是由于加载速率的影响,声发射震源分布及演化特征呈现出差异性。在加载的初始阶段,低加载速率下的声发射震源主要在加载端部开始出现,而在高加载速率下,

声发射震源在试样加载端部的集中程度减弱。随加载过程的推进，声发射震源沿加载方向的数量开始增加，在加载后期，声发射事件数量迅速增加，主要集中在宏观断口附近。整体上，低加载速率下连续产生的声发射震源主要集中在沿加载方向的宏观断裂面，而高加载速率下的声发射震源分布更为分散。

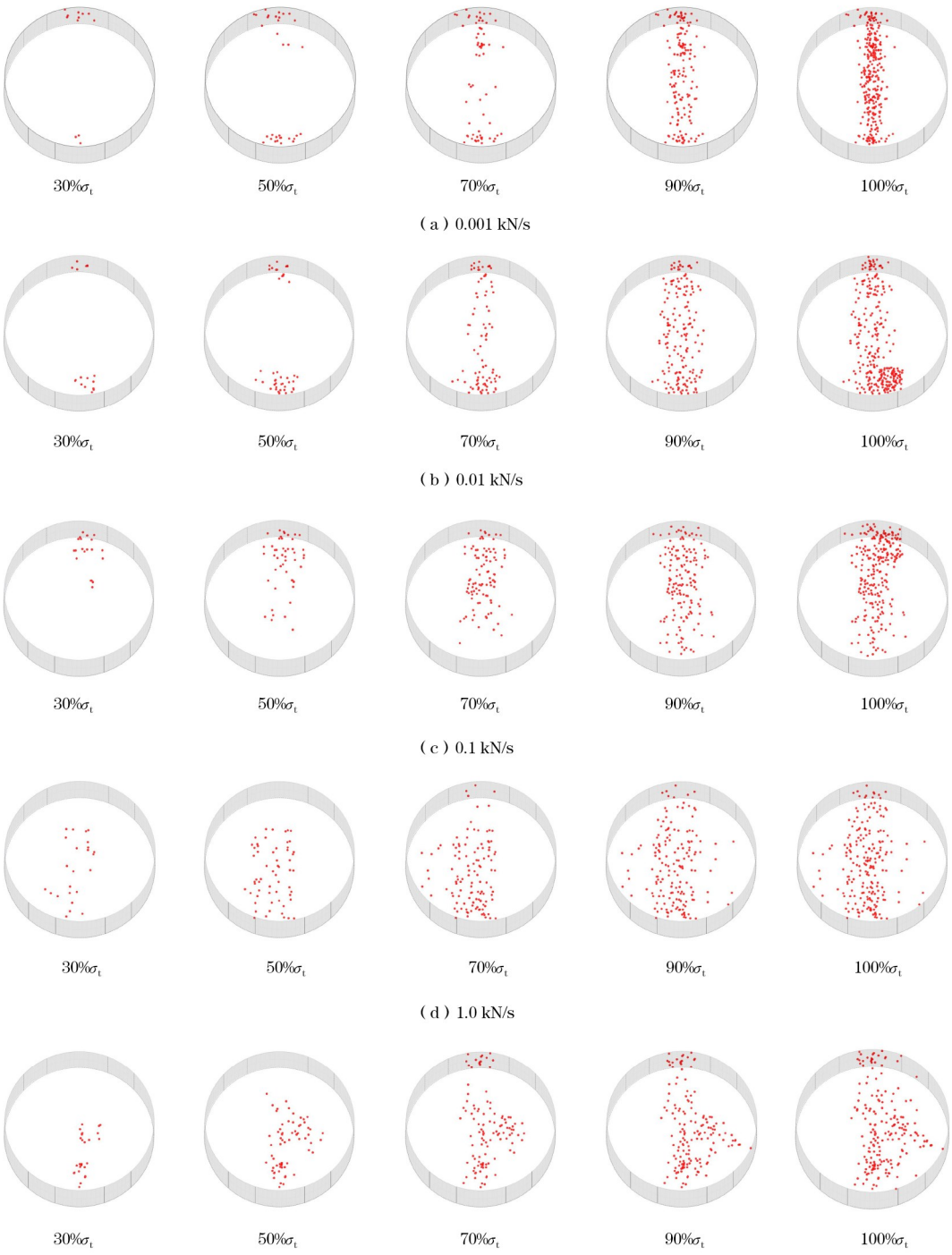


图 8　不同应力水平下声发射事件的空间分布

Fig.8　Spatial distribution of acoustic emission events under different stress levels

3.3　断口微观形貌

为进一步确定不同加载速率下砂岩的断裂机理，借助扫描电子显微镜观察断口的微观形貌，如图 9 所示。当加载速率为 0.001 kN/s 时，尽管有穿晶裂纹的出现，但是穿晶现象不明显，基本上呈闭合状态，且裂纹的扩展路径较平直，主要以沿晶裂纹扩展形式为

主,且沿晶裂纹开度较小。当加载速率为0.01 kN/s时,随穿晶裂纹的扩展,出现贯穿整个晶粒的现象,且在扩展路径的末端伴生有次生裂纹,此外,穿晶裂纹呈现出有效的开度,表现出一定的张拉特性;当加载速率为 0.1 kN/s 时,裂纹密度明显增大,穿晶裂纹大量出现,较大的矿物晶体被多条穿晶裂纹割裂成小块;当加载速率为 1.0 kN/s 时,穿晶裂纹的开度明显增大,且出现多条穿晶裂纹相交,导致矿物晶体呈现较大的破碎特征;当加载速率为 10 kN/s 时,断口附近的破碎状态明显,出现穿晶裂纹导致矿物晶体剥离的现象,且断口呈锯齿状、针状等不规则形态。

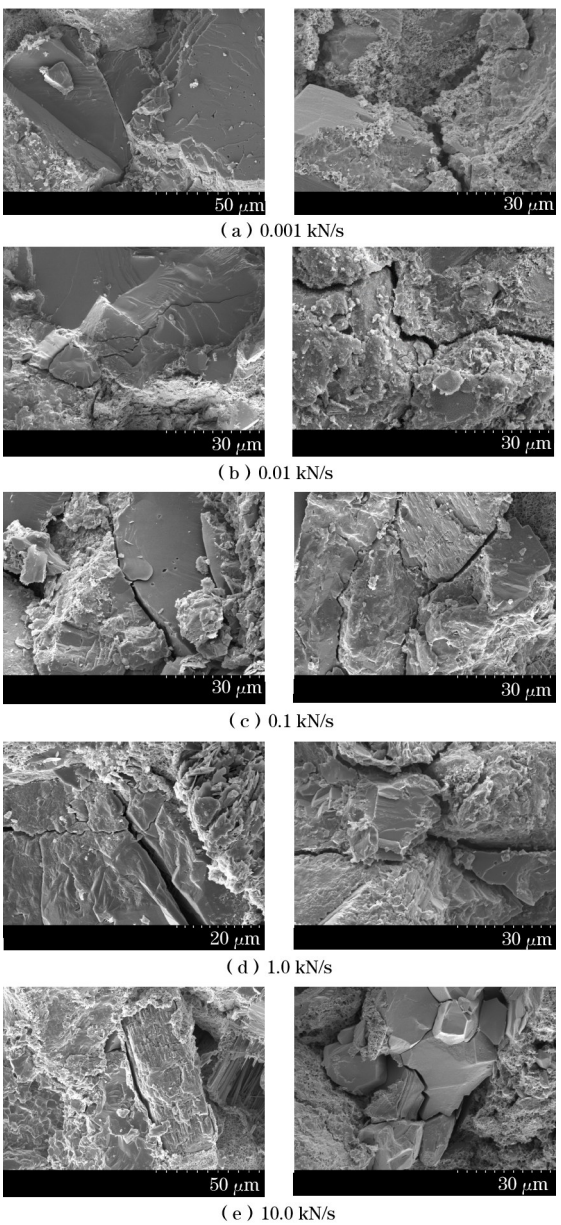


图 9 不同加载速率下的断口微观形貌

Fig.9 Microscopic morphology of fracture under different loading rates

总的来说,随着加载速率的增大,在沿晶裂纹开度增大的同时,穿晶现象越来越显著,裂纹密度也增大,试样破碎特征表现为从单裂隙穿晶逐渐转变为多裂隙穿晶、穿晶裂纹导致晶体剥离等越来越严重的破碎,且穿晶裂纹从低加载速率下的平直向高加载速率下的复杂形态转变。由此,从微观裂纹的扩展形式可推断,不同加载速率下砂岩试样呈现出的抗拉强度和破坏特征等宏观力学响应特性的变化规律,本质上是由于低加载速率下裂纹的数量及扩展所需的能量都较少。从能量输入与输出守恒的角度来看,低加载速度下裂纹数量少,外力作用下只需要输入较少的能量即可完成裂纹的萌生和发育;而高加载速率下裂纹的数量较多,且穿晶裂纹消耗更多的能量,因此需要更多的输入能来完成裂纹的萌生和扩展。

4 结论

(1) 加载速率每增大 10 倍,抗拉强度增加 0.64 MPa,但起裂应力与抗拉强度的比值减小,在 0.001 kN/s、0.01 kN/s、0.1 kN/s、1.0 kN/s、10 kN/s 的应力加载速率下,该比值分别为 40.13%、36.59%、32.53%、26.17%、15.81%。表明低加载速率下,应力传递过程缓慢,加载前期试样一直处于弹性应变能持续集聚和缓慢释放的阶段;而高加载速率下的应力快速增加,应变能在短时间内集聚,且在集聚过程中来不及释放,致使试样在较低应力状态下就发生起裂现象。

(2) 随着加载速率的增大,尺寸小于 26.5 mm 的碎块累计质量占比增大,对应 0.001 kN/s、0.01 kN/s、0.1 kN/s、1.0 kN/s、10 kN/s 的应力加载速率,该占比值依次为 23.8%、25.7%、41.7%、45.2%、53.9%,与大于 26.5 mm 的大尺寸碎块质量占比的差距越来越小。整体上,应力加载速率每增大 10 倍,碎块平均尺寸减小 0.229 mm,表明随加载速率增大,碎块平均尺寸减小,破碎程度越来越严重,碎块尺寸分布向均匀化发展。

(3) 声发射活动的活跃性随加载速率的增大而增强,且损伤裂纹的萌生和扩展规律呈现差异。整体上,在低加载速率下,声发射震源主要沿加载方向的宏观断裂面出现;而在高加载速率下,震源分布较分散。由于低加载速率下,有足够的时间供裂纹沿着径向加载方向萌生和扩展,而高加载速率下,由于加载过程在短时间内完成,试样内部的裂纹萌生和

扩展从多个分散的应力集中区域开展，致使破碎程度增大。

(4) 随着加载速率的增大，沿晶裂纹开度逐渐增大，同时穿晶现象越来越显著，且裂纹密度增大，导致晶体剥离越来越严重，且穿晶裂纹从低加载速率下的单裂隙穿晶、平直形式，向高加载速率下的多裂隙穿晶、复杂形式转变。本质上是由于低加载速率下，缓慢的加载过程致使裂纹主要沿着晶粒间的胶结部分萌生和扩展，而在高加载速率下，由于裂纹萌生和扩展的时间被缩短，沿晶裂纹和穿晶裂纹交替出现，进而形成贯通裂纹。

参考文献(References)：

[1] 秦涛，段燕伟.急倾斜薄煤层工作面推进速度对顶板岩层活动的影响[J].中国矿业，2020，29(3)：130-134.
QIN Tao, DUAN Yanwei. The influence of advancing speed on the activity of roof strata in thin coal seam with steeply inclined[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(3): 130-134.

[2] 崔峰，冯港归，贾冲，等.冲击地压矿井近距离特厚煤层综放工作面合理推进速度研究[J].煤炭科学技术，2023，51(7)：287-297.
CUI Feng, FENG Ganggui, JIA Chong, et al. Study on reasonable advancing speed of fully-mechanized top-coal caving face in mining contugous extra-thick coal seams in rockburst mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 287-297.

[3] 李杨，杨天鸿，郝耐，等.基于应力释放率与微震监测的高强度开采工作面推进速度效应分析[J].采矿与安全工程学报，2021，38(2)：295-303.
LI Yang, YANG Tianhong, HAO Nai, et al. Mining rate effect of high-intensity working face based on stress release rate and microseismic monitoring[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(2): 295-303.

[4] 赵同彬，郭伟耀，韩飞，等.工作面回采速度影响下煤层顶板能量积聚释放分析[J].煤炭科学技术，2018，46(10)：37-44.
ZHAO Tongbin, GUO Weiyao, HAN Fei, et al. Analysis on energy accumulation and release of roof under influence of mining speed[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 37-44.

[5] 李小龙，李进，黄辉，等.加载速率对弱胶结砂岩劈裂特性的影响研究[J].中国矿业，2023，32(2)：165-172.
LI Xiaolong, LI Jin, HUANG Hui, et al. Effect of loading rate on splitting characteristics of weakly cemented sandstone[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(2): 165-172.

[6] 党亚倩，王团结，汪洪菊，等.加载速率对岩石材料力学性质与能量演化特征的影响[J].金属矿山，2022(12)：45-51.
DANG Yaqian, WANG Tuanjie, WANG Hongju, et al. Effect of loading rate on mechanical behavior and energy evolution characteristics of rock materials[J]. Metal Mine, 2022(12): 45-51.

[7] 贺永年，韩立军，张后全，等.岩石劈裂与岩石破坏性质的不稳定性[J].岩石力学与工程学报，2016，35(1)：16-22.
HE Yongnian, HAN Lijun, ZHANG Houquan, et al. Splitting and instability behavior of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 16-22.

[8] 杨胜利，王兆会，蒋威，等.高强度开采工作面煤岩灾变的推进速度效应分析[J].煤炭学报，2016，41(3)：586-594.
YANG Shengli, WANG Zhaohui, JIANG Wei, et al. Advancing rate effect on rock and coal failure format in high intensity mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 586-594.

[9] 杨敬虎，于翔.加载速率影响抗拉强度的机理及其数值验证[J].煤炭学报，2017，42(增刊1)：51-59.
YANG Jinghu, YU Xiang. Mechanical explanation of loading rate impact on tensile strength and its numerical simulation analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(Supp.1): 51-59.

[10] 彭守建，陈灿灿，许江，等.基于巴西劈裂试验的岩石应力-应变曲线荷载速率依存性研究[J].岩石力学与工程学报，2018，37(增刊1)：3247-3252.
PENG Shoujian, CHEN Cancan, XU Jiang, et al. Loading rate dependency of rock stress-strain curve based on Brazil splitting test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Suppl.1): 3247-3252.

[11] 张茂础，盛谦，崔臻，等.岩石材料抗拉强度与劈裂节理面形貌的加载速率效应研究[J].岩土力学，2020，41(4)：1169-1178+1188.
ZHANG Maochu, SHENG Qian, CUI Zhen, et al. Effect of loading rate on tensile strength of rock materials and morphology of fracture joint surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1169-1178+1188.

[12] 金爱兵，朱东风，孙浩，等.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)，2023，54(1)：269-279.
JIN Aibing, ZHU Dongfeng, SUN Hao, et al. Experimental study of ore-rock splitting failure characteristics at different loading rates[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(1): 269-279.

[13] PADMANABHA V, SCHÄFER F, RAE A S P, et al. Dynamic split tensile strength of basalt, granite, marble and sandstone: strain rate dependency and fragmentation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(1): 109-128.

[14] 谷金泽，任富强.应变率对花岗岩抗拉特性影响的数值模拟[J].辽宁科技大学学报，2022，45(6)：449-453+465.
GU Jinze, REN Fuqiang. Numerical simulation on influence of strain rate on tensile properties of granite[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2022, 45(6): 449-453+465.

[15] TIMO Saksala. On the strain rate sensitivity of coarse-grained rock: a mesoscopic numerical study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(9): 3229-3240.

[16] 马泗洲,刘科伟,郭腾飞,等.煤岩组合体巴西劈裂动态力学特征数值分析[J].高压物理学报,2022,36(5):128-140.
MA Sizhou, LIU Kewei, GUO Tengfei, et al. Numerical analysis of dynamic mechanical characteristics of brazilian splitting of coal-rock combination bodies[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2022,36(5):128-140.

[17] 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.

[18] 李炜强,李冬伟,成功.单轴压缩下砂岩破裂失稳时空演化特征研究[J].中国矿业,2021,30(9):166-172.
LI Weiqiang, LI Dongwei, CHENG Gong. Study on the characteristics of spatial and temporal evolution of sandstone fracture under uniaxial compression [J]. China Mining Magazine,2021,30(9):166-172.

[19] 刘冬桥,郭允朋,李杰宇,等.基于声发射的脆性岩石单轴压缩损伤演化与本构模型[J].中国矿业大学学报,2023,52(4):687-700.
LIU Dongqiao, GUO Yunpeng, LI Jieyu, et al. Damage evolution and constitutive model of brittle rock under uniaxial compression based on acoustic emission[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2023,52(4):687-700.