

• 土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202300145



顶板砂岩直接拉伸破坏声发射特征及损伤本构模型

孙紫琬^{1,2}, 张泽天^{1,2,3*}, 张茹^{1,2,3}, 任利^{1,3}, 刘小玲^{1,2}, 张安林^{1,2}, 张朝鹏³

(1.四川大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 四川 成都 610065; 2.四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065;
3.四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 深部煤炭资源开采常面临复杂的赋存及采动力学环境, 冒顶等灾害事故风险激增。顶板拉破坏是其中一个重要诱因, 故亟需深入探究顶板岩石拉伸破坏力学特性及损伤演化规律。通过开展顶板砂岩单轴直接拉伸试验和全过程同步声发射测试, 探究了砂岩的直接拉伸力学特性和声发射时空演化特征, 对比分析了顶板砂岩与煤的直接拉伸破坏差异性过程规律, 同时发展并对比验证了煤岩拉伸全应力应变损伤本构模型。结果表明: 1) 顶板砂岩平均直接抗拉强度为5.01 MPa, 约为煤体直接抗拉强度的7.6倍; 顶板砂岩直接拉伸力学参数变异性强, 反映出砂岩易产生破坏局部化而导致顶板拉破坏。2) 砂岩在直接拉伸峰后的弹性能释放速率显著高于煤体, 表现出明显的脆性特征。3) 声发射空间定位演化分析揭示了顶板砂岩不同拉伸加载阶段的微裂纹扩展与空间集聚成核过程机制, 同时发现峰值应力前仅有少量随机分布的微裂纹产生, 主要发生基质的弹性变形; 峰值后应力下降20%时, 微裂纹局部化, 此后宏观裂纹出现并快速扩展, 直至破坏。4) 构建了基于声发射特征参数的煤岩拉伸损伤本构模型, 砂岩和煤的直接拉伸和声发射试验数据的验证显示其具有良好的拟合效果, 可较好地表征岩石在直接拉伸作用下的峰后应变软化特征。研究成果对巷道支护结构设计优化, 以及煤矿灾害防治具有重要指导意义。

关键词: 砂岩; 煤; 直接拉伸; 声发射; 损伤本构模型

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)04-0173-09

煤炭资源是中国当前和未来较长时期内的能源支柱^[1], 在地球浅部资源日渐枯竭的背景下, 未来煤炭等矿产资源的深部开发将成为常态^[2]。随着开采深度的增加, 深部高地应力造成了更高频率和大体量的冒顶事故^[3]。煤巷掘进打破了采场周围的应力平衡状态, 导致原岩应力重分布, 顶板悬空而形成应力集中, 一旦超过岩石抗拉强度极限, 岩石会产生裂隙并逐渐扩展最终导致冒顶破坏^[4]。大同矿区是中国典型的“三硬”煤层条件矿区, 煤层在开采过程中更易产生应力集中, 积聚弹性能, 导致顶板产生拉破坏。因此, 研究顶板岩石拉伸力学特性及损伤演化特征, 探索顶板岩石和煤的拉伸力学特性的异同, 对于巷道支护结构设计优化和煤矿灾害防治等均具有重要指

导意义。

岩石的抗拉强度远小于其抗压强度, 是决定岩石承载能力、变形、损伤破裂等的关键参数。岩石的直接拉伸强度对煤矿开采及稳定性评价等具有重要意义, 但由于试样制备和试验条件控制困难, 研究多采用间接试验方法, 如: 刘德俊^[5]、文晓泽^[6]、刘希灵^[7]等利用巴西劈裂法研究岩石的拉伸力学特性。然而, 研究表明^[8-9]: 劈裂试验中, 岩样虽然发生拉伸破坏, 但还承受了压应力, 导致晶体间出现压缩、错动和相互摩擦, 试样产生的声发射事件总数及能率较直接拉伸试验大得多; 而在直接拉伸试验中, 岩石的损伤破坏全部来自于拉伸应力, 可以直接反映岩石的张拉力学性质。

收稿日期:2023-03-01 修回日期:2023-06-30 网络出版日期:2024-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52174084; 51804204); 四川省自然科学基金项目(2022NSFC0406)

作者简介:孙紫琬(2000—), 女, 硕士生。研究方向: 岩石力学与工程。E-mail: sunziwan@163.com

*通信作者:张泽天, 副教授, E-mail: zhangzetian@scu.edu.cn

作为岩石力学的一项基础性研究课题,岩石的拉伸本构关系长期以来受到了广泛的关注。近年来,许多学者从岩石的非均匀性入手,建立了能够反映宏观非线性变形破坏行为与细观非均匀性的岩石统计损伤本构模型^[10-12]。岩石的峰后力学行为对于能量耗散研究具有重要意义,如:He等^[13]通过增加锚杆改善岩石的峰后响应,以防止岩爆的发生。但目前对于岩石峰后阶段的试验研究仍不够完善,对于单轴拉伸峰后力学特性的研究更为有限。

声发射作为岩石破坏过程中的一种伴生现象,与岩石内部微裂纹活动密切相关,因而不少学者利用声发射技术研究岩石的损伤演化过程,如:基于临界慢化理论^[14-15]、声发射多重分形特征^[16-17]、微破裂时空强演化特征^[18]等,探究岩石失稳破坏前兆特征。利用声发射识别岩石断裂破坏机制也取得了丰富有效的研究成果,主要基于对声发射信号的矩张量^[19-21]和对声发射参数的分析^[22-24]。本文将声发射监测应用于直接拉伸测试,对了解岩石拉破坏过程中声发射信号产生机制与张拉力学性质具有重要意义,有助于认清工程扰动岩层局部拉破坏过程和前兆信息。

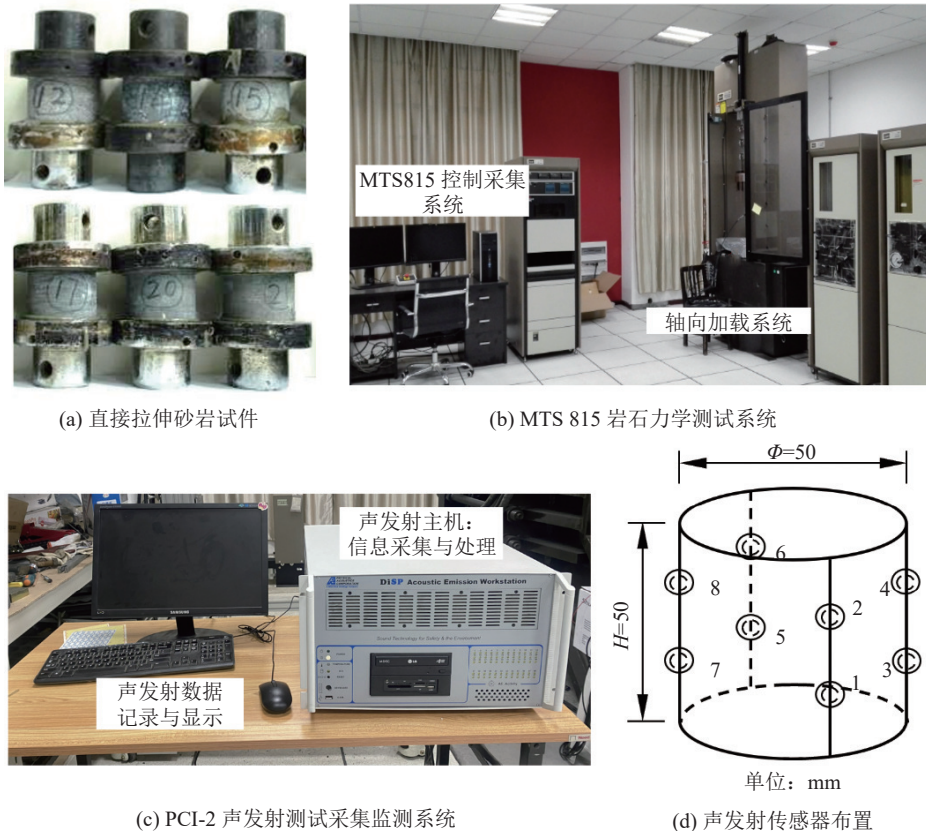
基于直接拉伸试验下岩石变形破裂全过程分析

其变形力学特性及声发射特征,构建基于声发射特征参数的Mazars分段损伤本构模型,并验证模型对两种岩石直接拉伸试验的适用性。同时,探讨了直接拉伸荷载下声发射特性与微观破裂机制的关系。研究成果有助于深化对硐室围岩拉伸破坏力学过程的认知,为防治冒顶及其诱发灾害提供理论支撑,为优化围压拉裂致灾防控技术奠定良好基础。

1 试件制备与试验方案

1.1 试件制备

砂岩试样取自同煤集团塔山煤矿8105工作面顶板,埋深约500 m,通过钻取岩芯的方法获得。制样根据《单轴抗压强度测定及软化系数计算方法》(GB/T 23561.7—2009)进行,共制备6个圆柱体试件(编号S12、S14、S15、S17、S20、S21),直径为50 mm,高径比为1:1,所制试件加工精度符合要求,且两端面光滑,避免产生应力集中现象。采用轴向拉伸法测试砂岩的抗拉强度,试件与加载钢块的黏接按照规范方法施作,选用高强度固凝胶JGN进行粘贴,保证黏接面积上所能提供的竖向荷载大于岩样峰值拉伸应力水平,使岩石沿横向拉坏。黏接后的砂岩试件如图1(a)所示。



(c) PCI-2 声发射测试采集监测系统

(d) 声发射传感器布置

图 1 试验设备及试件

Fig. 1 Test equipment and samples

1.2 试验方案

直接拉伸试验采用MTS 815 岩石力学测试系统,如图1(b)所示,可同时记录应力与变形数据;可提供的最大拉伸荷载为2 300 kN,单轴双桥轴向引伸计量程为-4~+4 mm;应变传感器的测试精度为当前等比标定量程点的0.5%,测试精度满足试验需要及相关规范要求。直接拉伸试验前先对试件施加0.2 kN的预拉伸荷载,试验全程采用轴向引伸计控制,轴向加载速率为0.002 mm/min。

同步进行声发射实时定位测试,采用PCI-2声发射测试采集监测系统,如图1(c)所示,带宽频率范围为150~1 000 kHz,前置放大器增益为40 dB。在试件两端均匀布置8个声发射传感器(编号1~8),如图1(d)所示,试件与传感器之间涂抹适量凡士林,保证接触良好。

2 顶板砂岩直接拉伸力学特性及声发射特征

2.1 顶板砂岩直接拉伸力学特性

砂岩直接拉伸测试结果见表1。表1中,砂岩单轴抗拉强度计算公式如下:

$$\sigma_t = P/S \quad (1)$$

式中: σ_t 为试件单轴抗拉强度,MPa; P 为轴向峰值荷载,N; S 为试件横截面积, mm^2 。

表1 砂岩直接拉伸试验测试结果

Tab. 1 Direct tensile test results of sandstone specimens

试件编号	直径/ mm	高度/ mm	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	单轴抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa
S12	52.53	51.83	2.58	5.55	41.75
S15	52.39	52.05	2.60	9.13	50.91
S20	51.73	52.46	2.55	2.82	24.41
S21	52.40	51.72	2.52	2.51	59.41

注:试件S14和S17在施加预拉伸荷载过程中发生沿试件软弱面的脆性张拉断裂破坏,未测得直接抗拉强度,故未列出。

从表1可以发现:砂岩试件的密度相近,平均密度为 2.56 g/cm^3 。单轴抗拉强度和弹性模量较为离散,平均抗拉强度为5.01 MPa,变异系数为61.33%;平均弹性模量为44.12 GPa,变异系数为33.97%。同单轴压缩试验相比,单轴拉伸试验的结果更能反映岩石材料的不均匀性。

图2为砂岩试件应力-应变曲线,为观察方便,局部放大了曲线的峰前段。在直接拉伸过程中,岩石受力主要经历以下几个阶段:

1)峰前阶段。砂岩变形显示出良好的线弹性行为,应力-应变曲线接近为直线,说明加载过程中外界输入的机械能大部分转化为试件的弹性应变能储存于岩石内部。

2)峰后阶段。根据应力及变形演化特征将试件整体宏观破坏形式分为瞬时失稳破坏和稳定渐进破坏。试件S12、S15和S21为瞬时失稳破坏,其中:试件S12在达到峰值应力后进入一小段平台期即发生破坏;试件S15和S21尽管具有峰后段,但达到峰值应力后很快发生了破坏。在这3个试件中,峰前所积聚的弹性应变能在峰后较短时间内快速释放,大部分转化为产生宏观裂纹所需的表面能。试件S20为稳定渐进破坏,其峰后具有较长的应变软化阶段,弹性能和外界输入能量的耗散速度小于其余3个试件。试件整体宏观破坏形式与变形局部化带的等效刚度和应力降幅有关,试件S20局部化带应力降幅较小,峰后体现出局部小的失稳,整体表现为稳定渐进破坏^[25]。

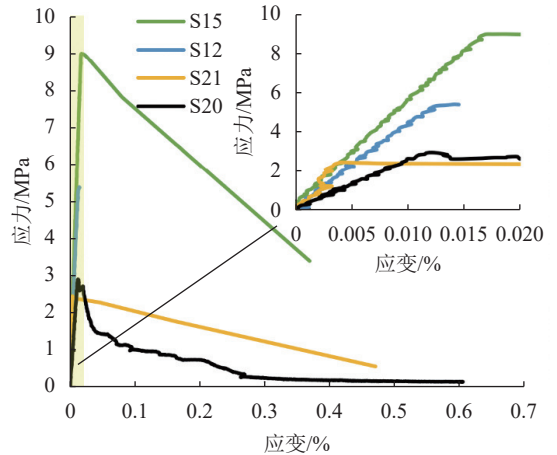


图2 砂岩试件应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of sandstone specimens

图3为砂岩典型试件S20的破坏形态及简化破裂面示意图。由图3可知,砂岩在直接拉伸荷载下形成的破坏面由两部分组成,近端面的水平破坏面和约 30° 倾角的斜面,断面面比较粗糙,起伏不平,具有明显的颗粒感。形成此破坏面的原因可能是:在直接拉伸荷载的作用下,试件表面首先出现微裂纹,其初始扩展方向大致沿最大主应力方向;随着加载进行,裂纹扩展方向逐渐偏离主应力方向,最终裂纹近乎沿试件对角线方向贯通,试件发生宏观破坏^[26]。



图3 砂岩试件S20破坏形态及简化破裂面

Fig. 3 Failure pattern of S20 and simplified fracture plane

2.2 顶板砂岩与煤直接拉伸力学特性对比

为深入探究顶板砂岩和煤层煤体直接拉伸力学行为的差异性特征,基于张泽天等^[27]针对煤的直接拉伸力学行为的研究,对比砂岩与煤体应力-应变曲

线可知,砂岩平均直接抗拉强度为5.01 MPa,约为煤体直接抗拉强度的7.6倍。另外,直接拉伸过程中,煤样均具有完整的峰后曲线,而砂岩试件中只有S20具有完整的峰后曲线,说明砂岩脆性更强,应力接近强度极限时,容易产生应变集中区,破坏局部化。本文研究重点为峰后加载阶段,故绘制砂岩典型试件S20和原煤典型试件M18的应力-应变曲线,见图4。

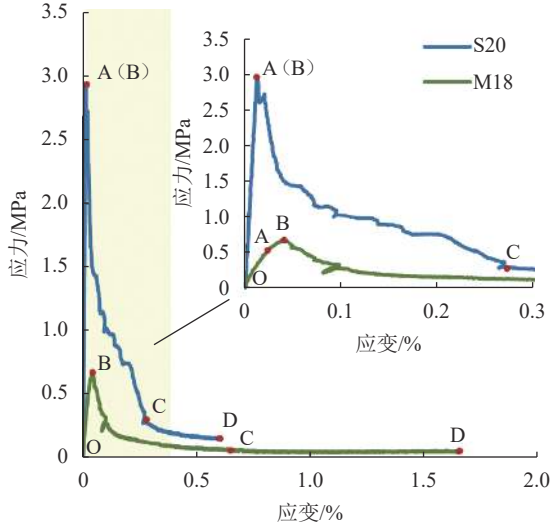


图 4 典型砂岩和煤试件应力-应变曲线对比

Fig. 4 Comparison of stress-strain curves of typical sandstone and coal specimens

由图4可知:典型试件S20的抗拉强度为2.82 MPa,弹模为24.41 GPa,峰值应变为0.012%,最终应变为0.604%,峰值应变率为1.94%;原煤典型试件M18的抗拉强度为0.67 MPa,弹模为1.64 GPa,峰值应变为0.041%,最终应变为1.637%,峰值应变率2.48%。砂岩

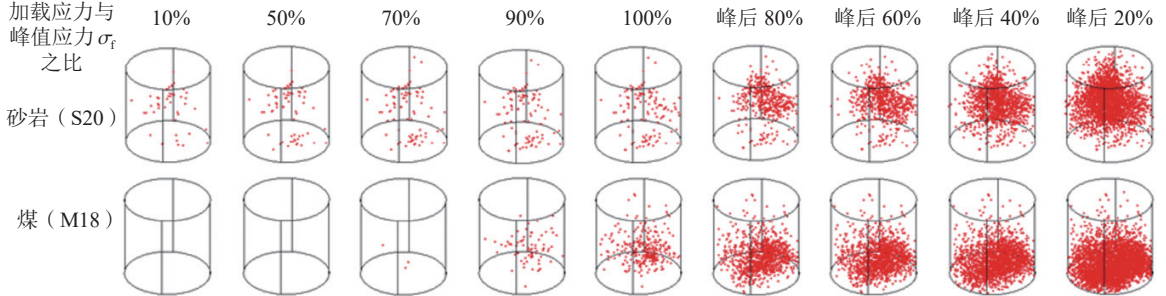


图 5 砂岩、煤典型试件累计声发射空间定位演化

Fig. 5 Spatial location evolution of cumulative AE events of the typical samples of sandstone and coal

从图5可以看出,砂岩和煤在峰前阶段经历了不同的损伤过程:砂岩试件S20在加载初期(0~10% σ_F)有少量随机分布的声发射点出现,且直至峰值应力声发射点的增量都较小,说明砂岩在加载初期产生少量微小孔隙,之后则主要发生砂岩基质的弹性变形,这对应了试件S20峰前应力-应变曲线近似为直线;原煤试件M18在加载至峰值应力的70%时才有少

典型试件的抗拉强度为原煤典型试件的4.2倍,峰值应变和最终应变分别为原煤典型试件的29%和37%,说明砂岩的承载能力更强,脆性特征更明显。两种岩石直接拉伸应力-应变曲线可分为以下几个阶段:

首先是线弹性变形阶段(OA段)和屈服阶段(AB段)。砂岩在峰前加载阶段的应力-应变曲线近似为直线,故可认为砂岩在峰值应力前主要发生线弹性变形,煤在峰前加载阶段以70%峰值应力为界先后经历了线弹性变形和应力屈服阶段。

其次,根据应力跌落速率,将岩石峰后应变软化过程划分为塑性软化段(BC段)和残余塑性段(CD段)。砂岩试件S20的分界应力为峰值应力的9.41%,原煤试件M18的分界应力为峰值应力的9.52%,两种岩石转为残余塑性段的应力水平相当。在塑性软化阶段,砂岩和煤试件的应力跌落速率均可大致分为两段,且前期跌落速率明显高于后期。同时砂岩应力-应变曲线峰后有明显台阶状,这是由于突然的局部破裂造成承载力急剧下降和破裂传播受阻^[28];煤因脆性较不明显,峰后曲线相对平缓光滑。在残余塑性段,随应变增加应力几乎无跌落,岩石还具有一定承载能力,直至主裂纹完全形成,试件完全被拉坏。

2.3 砂岩与煤的声发射特征对比

为进一步探究砂岩和煤直接拉伸特性差异的来源,分别绘制砂岩和煤典型试件的累计声发射空间定位演化图和声发射参数时间演化图,如图5、6所示。声发射空间定位点代表岩石材料内部产生的局部损伤,其增长演化过程对应着试件的拉裂破坏过程,反映了煤岩变形局部化的过程。

许声发射定位点出现,之后声发射定位点大量出现并迅速增长,说明在0~70% σ_F 阶段煤基质只发生了弹性变形,此后裂纹开始生成和扩展,这对应了煤试件的弹性变形阶段和屈服阶段。砂岩和煤试件均在加载至峰后80% σ_F 时,原来随机分布的微裂纹集中在主要条带上发展,形成微裂纹局部化,之后宏观裂纹出现并快速扩展,直至发生破坏。

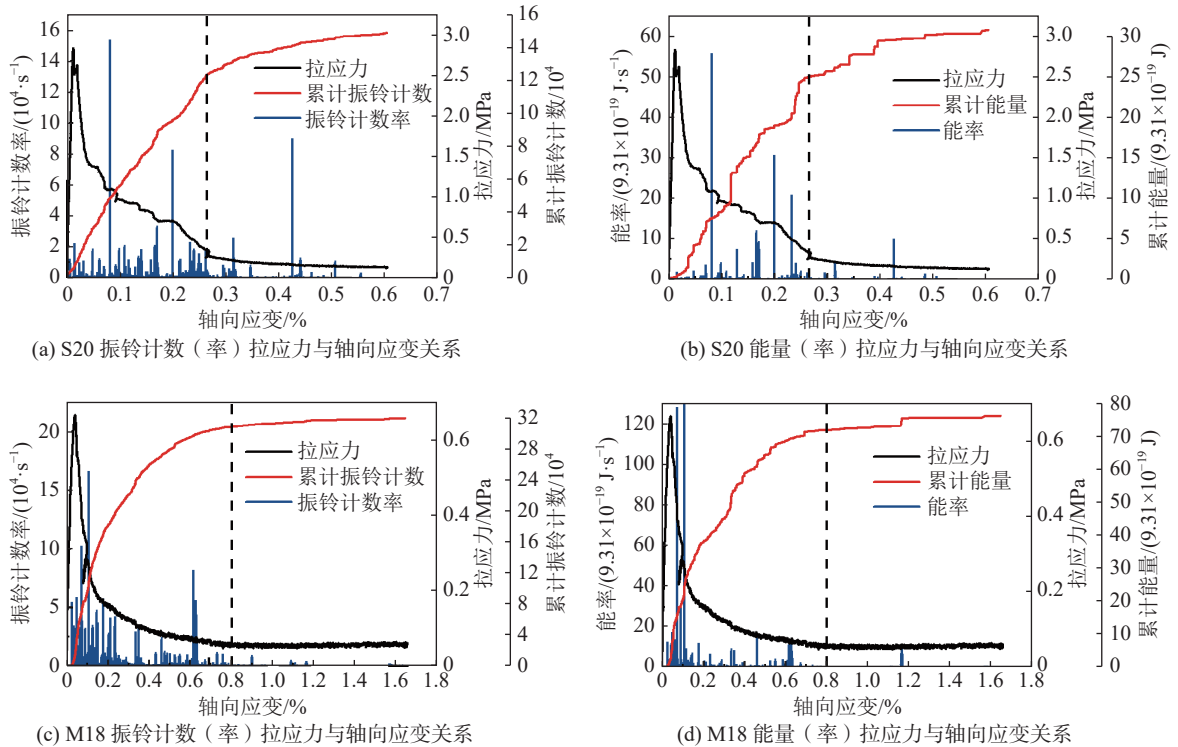


图6 砂岩、煤典型试件直接拉伸全过程AE参数、应力与应变的关系曲线

Fig. 6 Relationship of AE parameters and stress to strain of typical samples of sandstone and coal during direct tensile test

从图6可以发现:两类岩石试件的声发射参数累计量随时间的增长曲线形态相似;应力加载至峰值前时,两类岩石的累计振铃计数和累计能量不足拉伸试验全过程的5%;峰后累计振铃计数和累计能量迅速增长,声发射活动剧烈。以图6中虚线为界,将岩石峰后划分为塑性软化阶段和残余塑性阶段。塑性软化阶段,岩石应力跌落较快,累计振铃计数和累计能量仍保持快速增长,声发射活动剧烈,反映此阶段微裂纹迅速增加,并进一步扩展、贯通,逐渐形成宏观裂纹。当应力跌落速率近乎为0时,岩石进入残余塑性阶段,累计振铃计数和能量增长速率极低,声发射活动微弱,表明此阶段不再有新裂纹形成。

3 基于声发射特征参数的拉伸损伤本构模型

3.1 模型构建

根据Lemaitre应变等效假设^[29],可得单轴拉伸条件下基于连续损伤力学的损伤本构关系:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (2)$$

式中, E 为弹性模量, σ 、 ε 分别为加载过程中材料的应力和应变, D 为损伤变量。

根据煤岩拉伸应力-应变曲线,在达到峰值应力前,岩石主要发生线弹性变形,故可近似认为该阶段岩石内部无损伤,峰值应力之后岩石开始产生损伤。

令 ε_f 为开始损伤时的应变,即峰值应力 σ_f 对应的应变,则当 $\varepsilon \leq \varepsilon_f$ 时,损伤变量 $D = 0$;当 $\varepsilon > \varepsilon_f$,损伤变量 $D > 0$ 。

Mazars^[30]采用材料应变定义损伤变量 D :

$$D = 1 - \frac{\varepsilon_f(1 - A)}{\varepsilon} - \frac{A}{\exp[B(\varepsilon - \varepsilon_f)]} \quad (3)$$

式中, A 、 B 为模型参数。

研究表明,AE活动与岩样变形之间有良好的相关性,即岩石拉伸应变和AE特征参数间存在正相关关系,这种相关性可以通过AE振铃计数衡量,通过归一化处理将AE振铃计数序列标定到 $[0, 1]$ 范围,则基于声发射振铃计数的修正Mazars损伤变量为:

$$D = 1 - \frac{H_f(1 - A)}{H} - \frac{A}{\exp[B(H - H_f)]} \quad (4)$$

式中, H 为归一化的振铃计数, H_f 为峰值应力处对应的振铃计数。

则Mazars拉伸损伤本构模型和基于声发射振铃计数的修正Mazars拉伸损伤本构模型分别为式(5)和(6):

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f; \\ E\varepsilon \left(\frac{\varepsilon_f(1 - A)}{\varepsilon} + \frac{A}{\exp[B(\varepsilon - \varepsilon_f)]} \right), \varepsilon \geq \varepsilon_f \end{cases} \quad (5)$$

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f; \\ E\varepsilon \left(\frac{H_f(1-A)}{H} + \frac{A}{\exp[B(H-H_f)]} \right), \varepsilon \geq \varepsilon_f \end{cases} \quad (6)$$

3.2 模型参数确定

为了确定式(5)和(6)中参数 A 、 B 的取值,根据煤岩拉伸应力-应变曲线的几何条件,确定以下3个边界条件:

- 1) $\varepsilon = \varepsilon_f, \sigma = \sigma_f$;
- 2) $\varepsilon = \varepsilon_f, \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$;
- 3) $\varepsilon = \varepsilon_u, \sigma = \sigma_u$, 其中, σ_u 表示应力-应变曲线中残余塑性段的起始应力, ε_u 为相对应的应变。

对式(5)峰后阶段($\varepsilon \geq \varepsilon_f$)的本构方程求导,则有:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{EA(1-B\varepsilon)}{\exp[B(\varepsilon-\varepsilon_f)]} \quad (7)$$

将边界条件2)代入式(7)得到:

$$B = \frac{1}{\varepsilon_f} \quad (8)$$

将边界条件3)代入式(5)峰后阶段得到:

$$\sigma_u = E\varepsilon_u \left(\frac{\varepsilon_f(1-A)}{\varepsilon_u} + \frac{A}{\exp[B(\varepsilon_u-\varepsilon_f)]} \right) \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)得到:

$$\sigma_u = E\varepsilon_u \left(\frac{\varepsilon_f(1-A)}{\varepsilon_u} + \frac{A}{\exp(\varepsilon_u/\varepsilon_f - 1)} \right) \quad (10)$$

表 2 损伤本构模型参数取值

Tab. 2 Values of parameters of damage constitutive models

试件	模型	E/GPa	σ_f/MPa	$\varepsilon_f/\%$	H_f	$\left. \frac{dH}{d\varepsilon} \right _{\varepsilon=\varepsilon_f}$	σ_u/MPa	$\varepsilon_u/\%$	H_u	A	B	ρ
砂岩S20	修正Mazars模型	24.41	2.819 0	0.012 0	0.037 2	2.852 9	0.263 3	0.268 1	0.833 1	-0.084 4	0.808 8	0.982 9
	Mazars模型									0.910 4	83.040 2	0.747 7
煤M18	修正Mazars模型	1.64	0.665 2	0.040 8	0.041 5	2.965 5	0.052 5	0.807 7	0.964 6	0.997 2	6.027 0	0.967 5
	Mazars模型									0.921 9	24.511 3	0.868 5

表2中, ρ 为Spearman相关系数,用以确定损伤模型与试验曲线之间的关联程度,其计算公式为:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

式中, N 为样本容量, x 和 y 为进行相关性分析参数的两组变量, x_i 和 y_i 为任意一对数据, \bar{x} 和 \bar{y} 为两组变量的均值。

由表2和图7可知:引入声发射振铃计数修正后,

则Mazars损伤模型参数 A 的隐式解为式(10),参数 B 的显式解为式(8)。

对式(6)峰后阶段($\varepsilon \geq \varepsilon_f$)的本构方程求导,则有:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E \left(\frac{H_f(1-A)}{H} + \frac{A}{\exp[B(H-H_f)]} \right) - E\varepsilon \frac{dH}{d\varepsilon} \left(\frac{H_f(1-A)}{H^2} + \frac{AB}{\exp[B(H-H_f)]} \right) \quad (11)$$

式中, $\frac{dH}{d\varepsilon}$ 为归一化声发射振铃计数随应变增长的变化速率。

将边界条件2)代入式(11)得到:

$$\varepsilon \left. \frac{dH}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_f} (1-A + ABH_f) = H_f \quad (12)$$

将边界条件3)代入式(6)峰后阶段得:

$$\sigma_u = E\varepsilon_u \left(\frac{H_f(1-A)}{H_u} + \frac{A}{\exp[B(H_u-H_f)]} \right) \quad (13)$$

联立式(12)和(13)即可求得基于声发射振铃计数的修正Mazars损伤模型参数 A 和 B 。

3.3 模型验证及对比

利用煤^[27]和砂岩典型试件的直接拉伸试验及声发射数据分别验证Mazars损伤模型及基于振铃计数修正的Marzars损伤模型,根据式(8)、(10)、(12)和(13)求得模型参数取值,见表2,两种损伤模型的验证情况如图7所示。

表 2 损伤本构模型参数取值

Tab. 2 Values of parameters of damage constitutive models

试件	模型	E/GPa	σ_f/MPa	$\varepsilon_f/\%$	H_f	$\left. \frac{dH}{d\varepsilon} \right _{\varepsilon=\varepsilon_f}$	σ_u/MPa	$\varepsilon_u/\%$	H_u	A	B	ρ
砂岩S20	修正Mazars模型	24.41	2.819 0	0.012 0	0.037 2	2.852 9	0.263 3	0.268 1	0.833 1	-0.084 4	0.808 8	0.982 9
	Mazars模型									0.910 4	83.040 2	0.747 7
煤M18	修正Mazars模型	1.64	0.665 2	0.040 8	0.041 5	2.965 5	0.052 5	0.807 7	0.964 6	0.997 2	6.027 0	0.967 5
	Mazars模型									0.921 9	24.511 3	0.868 5

损伤模型与试验曲线间的Spearman相关系数有了显著提高;基于声发射振铃计数的修正Mazars损伤本构模型中,砂岩典型试件S20的拟合优度为0.983,煤典型试件M18的拟合优度为0.968,均大于0.95,说明模型拟合数据与试验数据显著相关。

表2中,参数 A 和 B 通过两个控制点的应力、应变及归一化振铃计数求解。砂岩在峰值应力点及残余应力点的强度较煤更高,变形较煤更小,体现出较高的脆性特征;砂岩和煤的归一化振铃计数在峰值应力处相近,但在残余应力处砂岩更高,说明砂岩在残余塑性段的声发射活动较煤岩更剧烈。

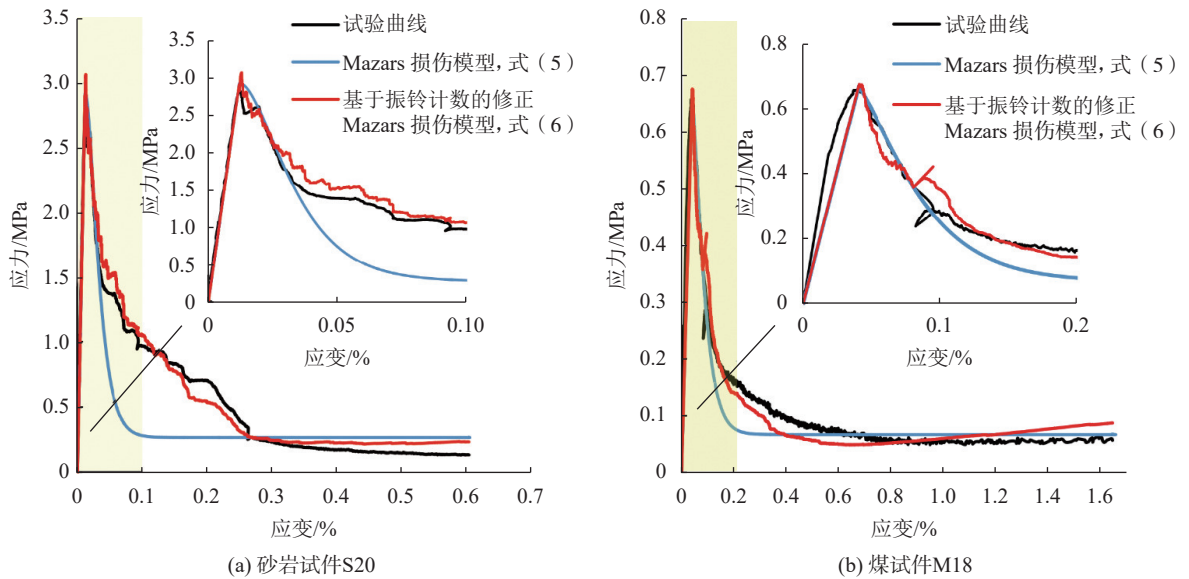


图7 砂岩和原煤试件损伤本构模型验证情况

Fig. 7 Validation of damage constitutive models for sandstone and coal specimens

本文发展的基于声发射特征参数的修正Mazars损伤本构模型具有以下优点:1)对煤岩直接拉伸全过程均有良好的拟合效果,尤其是能够较好地拟合岩石峰后塑性软化段和残余塑性段。2)模型参数 A 、 B 可通过峰值应力点和残余应力点两个控制点求解,声发射振铃计数处理简便,模型应用方便。3)引入振铃计数的修正模型可以描述峰后应力-应变曲线的波动性,更好地反映岩石渐进损伤破坏过程。

4 结论

为探究煤矿顶板砂岩拉伸破裂力学特性及损伤演化特征,服务煤矿安全灾害防治工作,开展了砂岩直接拉伸试验和同步声发射测试,对比分析了顶板砂岩与煤的直接拉伸力学特性和声发射特征,发展并验证了基于声发射特征参数的修正Mazars损伤本构模型,得出如下主要结论:

1)顶板砂岩平均直接抗拉强度为5.01 MPa,约为煤体直接抗拉强度的7.6倍;顶板砂岩直接拉伸力学参数变异性强,能够反映砂岩易产生破坏局部化而导致顶板拉破坏。

2)砂岩直接拉伸试件宏观破坏形式分为瞬时失稳破坏和稳定渐进破坏,后者的峰后弹性能释放速率显著高于煤体,表现出明显的脆性特征。

3)声发射空间定位演化图揭示了不同加载阶段裂纹的扩展与空间形态,显示了砂岩在直接拉伸应力状态下渐进破坏全过程。直接拉伸应力加载初期,仅有少量随机分布的微裂纹出现;当应力加载至峰后80% σ_p 时,微裂纹集中在主要条带上发展,形成微裂纹局部化,之后宏观裂纹出现并快速扩展,直至发

生破坏。

4)在整个加载阶段,煤岩声发射能量和振铃计数在峰值应力前增长缓慢,峰后增长迅速,峰后累计声发射能量和累计振铃计数均占整个加载过程的95%以上,说明在拉伸应力超出峰值拉伸应力后的继续加载过程中,煤岩仍具备一定的拉伸承载能力。另外,声发射能率和振铃计数率表现出阶段性突增的特征。

5)本文发展的基于声发射特征参数的修正Mazars损伤本构模型对煤岩直接拉伸全过程尤其是峰后应变软化特征模拟较好,且能描述峰后应力-应变曲线的波动性,更好地反映煤岩渐进损伤破坏全过程,为深部煤矿灾害防治及支护优化设计提供理论参考。

参考文献:

- [1] Xie Heping, Wu Lixin, Zheng Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 1949–1960. [谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(7): 1949–1960.]
- [2] Xie Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(2): 1–16. [谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(2): 1–16.]
- [3] Xie Heping, Zhang Ru, Zhang Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 3959–3978. [谢和平, 张茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(11): 3959–3978.]
- [4] Wang Xinmin, Zhao Bin, Zhang Qinli. Discussion on the dec-

- lination mechanism and the control technology of stope roof [J]. *China Mining Magazine*, 2007, 16(11): 65–68. [王新民, 赵彬, 张钦礼. 采场顶板冒落机理及控顶技术探讨[J]. *中国矿业*, 2007, 16(11): 65–68.]
- [5] Liu Dejun, Pu Hai, Sha Ziheng, et al. Experimental study on dynamic tensile mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 60–67. [刘德俊, 浦海, 沙子恒, 等. 冻融循环条件下砂岩动态拉伸力学特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 60–67.]
- [6] Wen Xiaoze, Feng Guorui, Guo Jun, et al. Study on dynamic tensile mechanical response characteristics of sandstone under medium and low strain rate disturbance load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(Supp1): 2812–2822. [文晓泽, 冯国瑞, 郭军, 等. 中低应变率扰动荷载作用下砂岩动态拉伸力学响应特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(增刊1): 2812–2822.]
- [7] Liu Xiling, Liu Zhou, Li Xibing, et al. Acoustic emission and micro-rupture characteristics of rocks under Brazilian splitting load[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(11): 1422–1432. [刘希灵, 刘周, 李夕兵, 等. 劈裂荷载下的岩石声发射及微观破裂特性[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(11): 1422–1432.]
- [8] Yu Xianbin, Xie Qiang, Li Xinyi, et al. Acoustic emission of rocks under direct tension, Brazilian and uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1): 137–142. [余贤斌, 谢强, 李心一, 等. 直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(1): 137–142.]
- [9] Li Tianyi, Liu Jianfeng, Chen Liang, et al. Acoustic emission characteristics of granite under tensile loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Supp2): 3215–3221. [李天一, 刘建锋, 陈亮, 等. 拉伸应力状态下花岗岩声发射特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊2): 3215–3221.]
- [10] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1982, 18(7): 551–562.
- [11] Liu Shuxin, Liu Changwu, Han Xiaogang, et al. Weibull distribution parameters of rock strength based on multi-fractal characteristics of rock damage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(11): 1786–1791. [刘树新, 刘长武, 韩小刚, 等. 基于损伤多重分形特征的岩石强度Weibull参数研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(11): 1786–1791.]
- [12] Cao Ruilang, He Shaohui, Wei Jing, et al. Study of modified statistical damage softening constitutive model for rock considering residual strength[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1652–1660. [曹瑞琅, 贺少辉, 韦京, 等. 基于残余强度修正的岩石损伤软化统计本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(6): 1652–1660.]
- [13] He Manchao, Zhao Fei. Laboratory study of unloading rate effects on rockburst[J]. *Disaster Advances*, 2013, 6(9): 11–18.
- [14] Zhu Xing, Tang Yao, Fan Jie, et al. Experimental study on failure precursors of fine sandstone based on critical slowing down theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(1): 53–61. [朱星, 唐垚, 范杰, 等. 基于临界慢化理论的细砂岩破坏前兆试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(1): 53–61.]
- [15] Sun Bing, Tang Wenfu, Zeng Sheng, et al. Statistical analysis of rock acoustic emission energy and waiting time based on self-organized criticality theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(9): 2525–2538. [孙冰, 唐文福, 曾晟, 等. 基于自组织临界理论的岩石声发射能量与时间的统计分析[J]. *岩土力学*, 2022, 43(9): 2525–2538.]
- [16] Xie Yachen, Hou M Z, Li Cunbao. Anisotropic characteristics of acoustic emission and the corresponding multifractal spectrum during progressive failure of shale under cyclic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 165: 105364.
- [17] Lei Ruide, Tan Yunliang, Berto F, et al. Temporal-frequency distribution and multi-fractal characterization of acoustic emission of rock materials containing two parallel pre-existing flaws[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2023, 46(6): 2139–2155.
- [18] Feng Longfei, Wang Hao, Wang Xiaodong, et al. Microfracture evolution characteristics and precursor identification of coal impact failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1440–1452. [冯龙飞, 王皓, 王晓东, 等. 煤冲击破坏的微破裂演化特征及前兆识别[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(7): 1440–1452.]
- [19] Grosse C, Reinhardt H, Dahm T. Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques[J]. *NDT & E International*, 1997, 30(4): 223–230.
- [20] Dahm T, Manthei G, Eisenblätter J. Automated moment tensor inversion to estimate source mechanisms of hydraulically induced micro-seismicity in salt rock[J]. *Tectonophysics*, 1999, 306(1): 1–17.
- [21] Liu Peixun, Chen Shunyun, Guo Yanshuang, et al. Moment tensor inversion of acoustic emission[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(3): 858–866. [刘培洵, 陈顺云, 郭彦双, 等. 声发射矩张量反演[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(3): 858–866.]
- [22] Ohno K, Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(12): 2339–2346.
- [23] Belikov V T, Ryvkin D G. Analysis of rock fracture from time-variant structural parameters[J]. *Physical Mesomechan-*

ics,2022,25(1):97–102.

- [24] Zhang Anlin,Xie Heping,Zhang Ru,et al.Mechanical properties and energy characteristics of coal at different depths under cyclic triaxial loading and unloading[J].*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2023,161: 105271.
- [25] Lv Xiangfeng,Zhu Chenli,Song Yimin,et al.Experimental study on the correlation between coal rock stability and deformation localization evolution[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2021,40(12):2466–2476.[吕祥锋,朱晨利,宋义敏,等.煤岩稳定性与变形局部化演化关联性实验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(12):2466–2476.]
- [26] Wu Xiankai.Experimental and numerical study on propagation mechanism of three-dimension crack of rock specimens[D].Dalian:Dalian University of Technology,2016.[吴宪锴.岩石三维裂纹扩展机制的物理与数值试验研究[D].大连:大连理工大学,2016.]
- [27] Zhang Zetian,Liu Jianfeng,Wang Lu,et al.Mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal under direct tensile loading conditions[J].*Journal of China Coal Society*,2013,38(6):960–965.[张泽天,刘建锋,王璐,等.煤的直接拉伸力学特性及声发射特征试验研究[J].*煤炭学报*,2013,38(6):960–965.]
- [28] Shi Guicai.Research on post failure mechanical characteristics of brittle-plastic rocks[D].Shanghai:Shanghai Jiaotong University,2009.[史贵才.脆塑性岩石破坏后区力学特性研究[D].上海:上海交通大学,2009.]
- [29] Lemaitre J.A course on damage mechanics[M].Berlin: Springer-Verlag,1996.
- [30] Mazars J.A description of micro- and macroscale damage of concrete structures[J].*Engineering Fracture Mechanics*,1986, 25(5/6):729–737.

Acoustic Emission Characteristics and Damage Constitutive Model of Roof Sandstone During Direct Tensile Failure

SUN Ziwan^{1,2}, ZHANG Zetian^{1,2,3*}, ZHANG Ru^{1,2,3}, REN Li^{1,3}, LIU Xiaoling^{1,2}, ZHANG Anlin^{1,2}, ZHANG Zhaopeng³

(1.State Key Lab. of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2.College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

3.Key Lab. of Deep Underground Sci. and Eng. for Ministry of Education, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Due to the complex environmental occurrences and resource exploitation in deep coal mines, the risk of disasters such as roof falls has sharply increased, with most being directly caused by roof tensile failure. Therefore, it is urgent to explore the mechanical characteristics and the laws governing the evolution of damage in roof rock under tensile failure. To study the mechanical properties and spatiotemporal evolution characteristics of acoustic emission (AE) in roof sandstone under direct tensile loading conditions, uniaxial direct tensile tests and synchronous AE tests were carried out. Simultaneously, the differential processes of direct tensile failure between roof sandstone and coal seams were studied, and a stress–strain damage constitutive model for coal and rock under tensile stress was developed and validated. The test results reveal that: 1) The average direct tensile strength of the roof sandstone is 5.01 MPa, which is approximately 7.6 times greater than that of coal. The direct tensile mechanical parameters of the roof sandstone exhibit strong variability, indicating that sandstone is prone to damage localization, leading to roof tensile failure. 2) The post-peak release rate of elastic energy from sandstone is significantly higher than that from coal, exhibiting brittle characteristics. 3) The analysis of AE spatial localization evolution revealed the mechanism of microcrack propagation and agglomeration nucleation process in roof sandstone at different tensile loading stages. Before the peak stress, only a small number of randomly distributed microcracks were generated, mainly resulting in the elastic deformation of the rock matrix. When the stress decreased by 20% after the peak, microcracks became localized, and then macroscopic cracks appeared and rapidly expanded until failure. 4) A constitutive model based on AE characteristic parameters for rock tensile damage was constructed. This model was validated using direct tensile and AE test data from sandstone and coal, demonstrating a good fit. The model effectively characterized the post-peak strain softening characteristics of rock under direct tensile action. These research findings hold considerable implications for optimizing tunnel support structure design and for preventing and controlling coal mine disasters.

Key words: sandstone; coal; direct tensile; acoustic emission; damage constitutive model

(编辑 李轶楠)

引用格式: Sun Ziwan,Zhang Zetian,Zhang Ru,et al.Acoustic emission characteristics and damage constitutive model of roof sandstone during direct tensile failure[J].*Advanced Engineering Sciences*,2024,56(4):173–181.[孙紫璇,张泽天,张茹,等.顶板砂岩直接拉伸破坏声发射特征及损伤本构模型[J].*工程科学与技术*,2024,56(4):173–181.]