

不同椭圆率巷道冲击破坏特征试验研究

许庆峰, 彭守建, 许 江, 杨 燕, 秦朝龙, 农晓莉, 贾 立

(重庆大学 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:为研究椭圆率对巷道冲击破坏特征的影响机制, 利用自主研发的深部煤岩冲击地压多功能物理模拟试验系统, 开展了真三维条件下椭圆形巷道冲击破坏试验, 分析了不同椭圆率巷道冲击破坏演化规律。结果表明: 试样峰值应力及轴向变形量会随椭圆率的增大呈现先增大后减小的趋势, 椭圆率为 1.25 试样的峰值应力及轴向变形量最大; 巷道破坏主要集中在边帮两侧, 声发射三维定位也验证了这种破坏特征; 扰动加载期声发射计数、能量突增, 声发射 b 值突降, 说明试样在扰动应力下产生了大尺度破坏。随着椭圆率的增加, 声发射的最大计数、最大能量、 b 值下降幅度均呈现增加趋势。不同椭圆率试样声发射累计能量与时间均存在非线性关系, 证明了冲击破坏的能量骤增原理。不同椭圆率试样红外云图和平均红外辐射温度在破坏时有明显的上升, 其中椭圆率为 1.25 试样最为显著。试验结果为地下工程巷道断面防冲设计提供了理论支撑。

关键词: 椭圆率; 巷道; 冲击破坏特征; 声发射; 试验研究

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)03-1484-15

Experimental study on impact failure characteristics of roadway with different ellipticity

XU Qingfeng, PENG Shoujian, XU Jiang, YANG Yan, QIN Chaolong, NONG Xiaoli, JIA Li

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the influence mechanism of ellipticity on the impact damage characteristics of roadways, the multifunctional physical simulation test system for deep rockburst developed independently was used to carry out the impact damage test of elliptical roadways under the true three-dimensional conditions, and analyze the evolution law of impact damage of roadways with different ellipticity. The results show that: the peak stress and axial deformation of the sample will increase and then decrease with the increase of ellipticity, and the peak stress and axial deformation of the sample with an ellipticity of 1.25 is the largest; the damage of the roadway is mainly concentrated in the two sides of the side gangs, and the 3D localization of the acoustic emission verifies this kind of damage characteristic; the acoustic emission counts and energies of the perturbation loading period increase suddenly, and the b value of the acoustic emission decreases suddenly, which means that the sample produces the large-scale damage under the disturbing stress. large-scale damage. With the increase of ellipticity, the maximum counts, the maximum energy, and the decrease of b -value of the acoustic emission all show an increasing trend. The nonlinear relationship between the cumulative energy and time of the acoustic emission of the samples with different ellipticity proves the principle of sudden energy increase of impact dam-

收稿日期: 2024-01-29 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0115

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52274174); 重庆市自然科学基金面上资助项目 (CSTB2022NSCQ-MSX0341); 中央高校基本科研业务费资助项目 (2022CDJQY-011)

作者简介: 许庆峰 (1992—), 男, 山东济宁人, 博士研究生。E-mail: xqf_sdust@163.com

通讯作者: 彭守建 (1983—), 男, 江西宜春人, 教授, 博士生导师。E-mail: sjpeng@cqu.edu.cn

引用格式: 许庆峰, 彭守建, 许江, 等. 不同椭圆率巷道冲击破坏特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1484-1498.

XU Qingfeng, PENG Shoujian, XU Jiang, et al. Experimental study on impact failure characteristics of roadway with different ellipticity[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1484-1498.



移动阅读

age. The infrared cloud map and average infrared radiation temperature of different ellipticity samples have obvious increase in damage, among which the ellipticity of 1.25 samples is the most significant. The test results provide theoretical support for the design of underground engineering roadway section to prevent rockburst.

Key words: ellipticity; roadway; impact damage characterization; acoustic emission; experimental study

0 引言

据国家能源局数据显示,2023年全国煤炭产量约46.6亿t,同比增长2.9%。随着浅部资源枯竭,煤炭开采深度正逐年增加,当开采深度逐渐加大后,矿井地应力、岩石强度随之增加,岩石储存弹性能的能力加强。在高应力以及开采扰动下,煤岩体储存的弹性能得到释放,使得煤岩体发生冲击破坏^[1-3]。

地下工程在开挖过程中主要以巷道或者隧道的形式存在。就煤矿而言,巷道具有运输设备、运输煤炭、通行、通风等多种作用,巷道结构的安全稳定性是地下开采的安全保障。常见的巷道形状有圆形、矩形、梯形、直墙拱形(U形)、D形以及椭圆形等。陈陆望等^[4-5]开展了圆形、马蹄形硐室平面应变物理模拟试验,研究2种硐室在高地应力条件下的围岩破坏特征。张向阳等^[6]研究了深部高应力条件下直墙拱形硐室的应力破坏规律,发现硐室的拱部和侧墙部位径向压应变会随着边界荷载的增大而增大,围岩破坏随着最大剪切迹线斜向上发展,并最终在拱底附近与硐壁相交。张晓君等^[7]采用物理模拟试验方法研究了直墙拱形隧道岩爆破坏模式及其能量分析,发现随着垂直载荷的不断增加出现劈裂破坏、劈裂-剪切破坏和剪切破坏3种破坏模式。刘崇岩等^[8]通过含圆孔花岗岩试样进行不同侧向载荷试验,模拟圆形巷道岩爆过程的时空演化规律,结果表明,岩爆过程分为4个阶段:平静期、颗粒弹射期、稳定破坏期、全面崩塌期。CHEON等^[9]开展了圆形隧道真三轴压缩物理模拟试验,研究深部岩石脆性破坏特征,发现最小水平主应力虽然方向垂直于隧道断面,但对破坏起始应力的影响大于最大水平主应力。宫凤强等^[10-15]分别模拟了三维应力条件下圆形、直墙拱形、矩形硐室的破坏过程,对比分析3种形状的破坏模式,发现圆形硐室破坏过程中发生剧烈岩爆,整个破坏过程处于动态破坏模式,并最终形成V型槽结构,直墙拱形、矩形硐室处于静力破坏状态。李地元等^[16]通过对圆形和椭圆形孔洞进行冲击压缩试验,研究在冲击荷载作用下不同尺寸孔洞的破坏特征,发现圆形和椭圆形孔洞在水平加载方向和孔洞周边分别出现初始拉伸裂纹和“X”型初始剪切裂纹。靖洪文等^[17]开展含椭圆形孔洞板状砂岩的单轴压缩试验,研究试样强度和变形破坏特征受孔洞长轴

与轴向荷载夹角的影响规律,结果表明:椭圆形孔洞的峰值强度随夹角的增加呈现先减小后增加最后又降低的变化特征,当夹角为60°时,强度最低。朱泉企等^[18]开展含椭圆形孔洞板状大理岩的单轴压缩试验,研究椭圆长短轴比及倾角对大理岩力学特性的影响。发现椭圆倾角增大时,试样的峰值强度和弹性模量随之增大,而峰值应变则先减小后增大。王炆等^[19-20]开展真三轴条件下含椭圆硐室的冲击岩爆试验,分析岩爆过程中的应力、爆坑、碎屑等特征,发现爆坑呈“V”型,分布在硐室侧壁两端,岩爆时刻的声发射主频明显降低。

综上所述,国内外学者已经在圆形、直墙拱形、矩形巷道冲击破坏研究方面取得了重要的进展,但由于问题的复杂性以及受研究方法、试验手段等限制,对成体系的椭圆率巷道冲击破坏的研究较少。因此开展不同椭圆率巷道冲击破坏特征试验研究,为优化巷道断面形状奠定了试验基础,进一步保障地下工程实施的安全、高效、稳定。

1 试验设计

1.1 试样制备

试验参考了周辉等^[21]关于低强度高脆性岩爆材料的研究,选用石英砂40目(0.380 mm)和重晶石粉600目(0.024 6 mm)为骨料,高强石膏为胶结材料,加工成300 mm×300 mm×600 mm的长方体类岩石材料试样,在试样制作过程中形成水平轴为80 mm,垂直轴分别为40、60、80、100、120 mm的椭圆形巷道。将椭圆巷道垂直轴 a_0 与水平轴 b_0 之比定义为椭圆率(m),即

$$m = \frac{b_0}{a_0} \quad (1)$$

试样制作步骤为:①将融化后的液体石蜡注入椭圆形模具中,经过1 d凝固后脱模,标定位置后放入长方体模具中;②将石英砂:重晶石粉:石膏=2:1:2的比例进行称重;③先将固体材料充分混合均匀后加水搅拌,为防止凝固加入缓凝剂并采用边加水边搅拌的方式,水的比例为固体质量的22%;④将砂浆材料倒入模具中,浇筑完成后静置2~3 d,等待其成型;⑤进行脱模,将试样在自然环境下养护28 d。试样如图1所示。

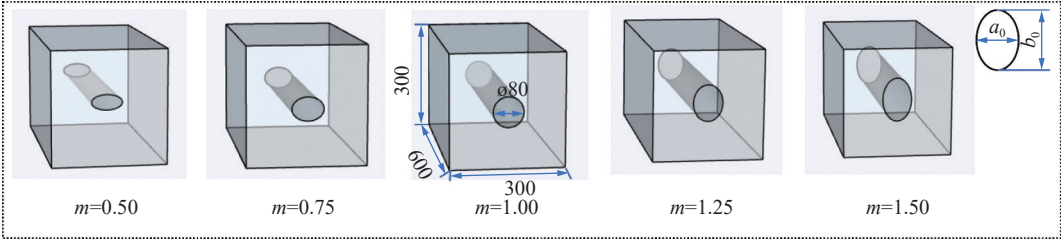


图 1 不同椭圆率试样

Fig.1 Samples with different ellipticity

1.2 试验系统

笔者试验基于自主研发的深部煤岩冲击地压多功能物理模拟试验系统,该试验系统的最大加载应力为 33 MPa,在加载过程中 6 个加载油缸可实现独立控制,具备力控制与位移控制 2 种加载方式,试验系统具有采集精度高、数据通道多等优点。

试验采用声发射仪和红外热像仪采集试样冲击破坏过程中的声-热信号,通过微型摄像机捕捉破坏过程中巷道壁面的变化情况。试验系统及监测设备

布置如图 2 所示,声发射放大器的前置增益为 40 dB,为确保声发射传感器与试样表面紧密贴合,在接触面涂抹耦合剂(凡士林)。红外热像仪与微型摄像机的拍摄方向均沿着椭圆形巷道的轴线方向布置,便于精准的捕捉巷道破坏进程。由于三向加载过程中,试样巷道处于密闭状态,在巷道口增加了光源补充装置。红外热像仪采用德国欧普士生产的 Optris PI450 高分辨率红外热像仪,最大拍摄帧频为 80 Hz,热灵敏度为 0.04 K。



图 2 深部煤岩冲击地压多功能物理模拟试验系统

Fig.2 Multi-functional physical simulation test system for rockburst in deep coal

1.3 试验方案

通过对类岩石材料开展的基本力学试验,测得其基本力学参数见表 1(其中,σ_c 为单轴抗压强度;E 为弹性模量;ρ 为密度;ν 为速度)。依据黄禄渊等^[22]得出的地应力经验公式计算初始地应力。地应力随深度的变化关系式为

$$\sigma_v = \gamma H \tag{2}$$

$$\sigma_H = 0.023\,3H + 4.6 \tag{3}$$

$$\sigma_h = 0.016\,2H + 2.1 \tag{4}$$

式中:σ_v 为轴向应力,MPa;γ 为容重,kN/m³;H 为深度,m;σ_H 为最大水平主应力,MPa;σ_h 为最小水平主应力,MPa。

在物理模拟试验中需遵循相似准则:

几何相似比: $C_L = \frac{L_M}{L_P}$ (5)

容重相似比: $C_\gamma = \frac{\gamma_M}{\gamma_P}$ (6)

应力相似比: $C_\sigma = C_L C_\gamma$ (7)

式中: C_L、C_γ、C_σ 均为相似比常数; M 为模型; P 为原型; L 为线长度; γ 为容重, kN/m³; σ 为应力, MPa。

试验选择 800 m 地层深度应力作为初始地应力,综合考量地质条件以及应力比和容重比,根据相似比理论计算得到应力相似比系数为 6.3,所以加载的初始地应力为 σ_v=3.43 MPa, σ_H=3.69 MPa, σ_h=

表 1 试样基本参数

Table 1 Basic parameters of the sample

σ _c /MPa	E/GPa	ρ/(g·cm ⁻³)	ν/(km·s ⁻¹)	巷道长度/mm
14.79	1.437	1.68	2.70	600

2.39 MPa。

试验模拟扰动应力造成的巷道冲击破坏, 主要考虑由轴向应力扰动荷载引起的巷道破坏。岩石力学中通常以岩石的应变率来划分动态和静态试验, 一般将应变率大于 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 定位为准动态试验^[23]。考虑设备的加载能力, 扰动速率选择为 0.9 mm/s, 其应变率为 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 符合准动态加载试验范围。应力加载方向及路径如图 3、图 4 所示。

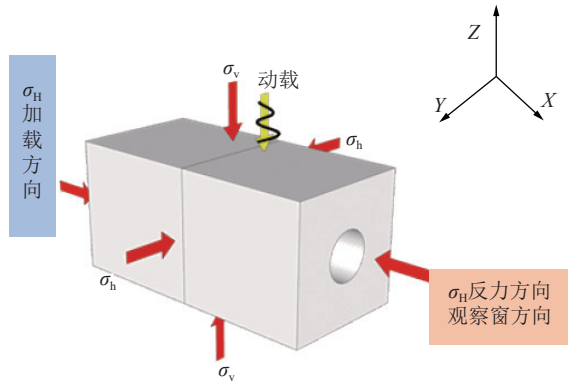


图 3 应力加载方向

Fig.3 Loading direction of stress

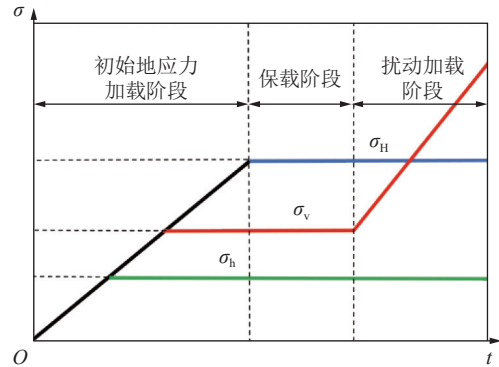


图 4 应力加载路径

Fig.4 Loading path of stress

试验采用力控制的方式加载初始地应力, 在 X 向、Y 向以及 Z 向同时以 0.5 kN/s 的速率加载, 当试样加载至 800 m 的初始地应力水平, 保载 5 min 观察巷道无破坏现象后, 将 Z 向切换成位移加载的模式, 并以 0.9 mm/s 的加载速率进行扰动加载, 记录并观察巷道围岩破坏现象, 当产生明显冲击破坏后, 停止扰动加载, 试验结束。

具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Test scheme

水平轴 a_0/mm	垂直轴 b_0/mm	椭圆率	初始地应力/MPa			加载速率	
			σ_v	σ_H	σ_h	初始加载/($\text{kN} \cdot \text{s}^{-1}$)	扰动加载/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
80	40	0.50	3.43	3.69	2.39	0.5	0.9
	60	0.75					
	80	1.00					
	100	1.25					
	120	1.50					

2 试验结果及分析

2.1 应力-应变演化特征

不同椭圆率试样的应力-应变曲线如图 5 所示。因各试样预制巷道椭圆率不同, 其承载应力存在差异, 因此不同椭圆率试样的应力-应变存在一定区别。

受扰动应力的作用, 椭圆率 $m=1.00$ 试样 σ_v 方向的应力曲线近似一条直线, 其他椭圆率试样的应力曲线在接近破坏时产生弯曲, 表明试样进入屈服阶段。由应力-应变曲线可知, σ_H 和 σ_h 方向的应变曲线类似, 并且应变接近, 验证了不同椭圆率试样的均质性较为统一。

不同椭圆率试样 σ_v 方向的峰值破坏应力不同, 且峰值应变均存在一定差异。当椭圆率 $m \leq 1$ 时, 试样峰值应力及应变会随着椭圆率的增大而减小, 应力均

小于 11 MPa; 当椭圆率 $m \geq 1$ 时, 试样峰值应力及应变会随着椭圆率的增大呈现先增大后减小的趋势, 椭圆率 $m=1.25$ 试样的峰值应力及应变最大, 扰动应力可加载至 11.88 MPa。椭圆率 $m=1.50$ 试样的峰值应力及轴向变形最小, 最大扰动应力为 8.66 MPa。其余椭圆率试样应力及应变比较接近。

2.2 冲击破坏特征

2.2.1 巷道破坏现象分析

根据不同椭圆率试样的冲击破坏现象 (图 6), 将试样的扰动加载期划分为 4 个时期, 平静期 (I)、颗粒弹射期 (II)、块状剥落期 (III)、全面破坏期 (IV)。将进入颗粒弹射期时的应力称为初始破坏应力, 进入全面破坏期时的应力称为全面破坏应力。

在平静期, 除椭圆率为 1.25 的试样未产生裂纹, 其余椭圆率试样受扰动应力的影响巷道壁面沿轴线

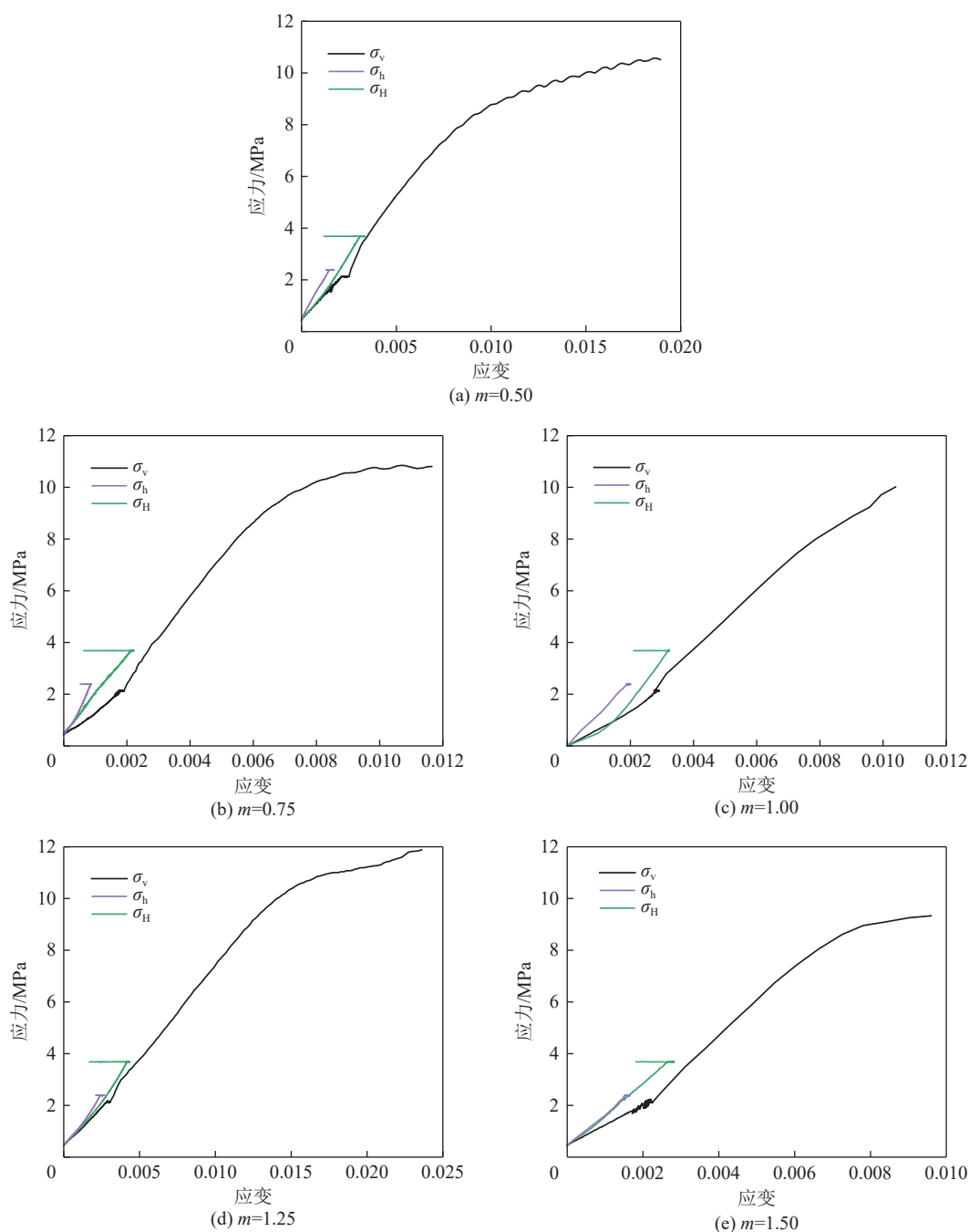


图5 不同椭圆率试样应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of samples with different ellipticity

方向产生了微小裂纹。随着椭圆率的增加,试样产生裂纹时的扰动应力先减小后增大,椭圆率为 1.00 的试样产生裂纹时的扰动应力最小。当椭圆率 $m \leq 1$ 时,试样产生裂纹的扰动应力随椭圆率的增加而减小。

在颗粒弹射期,当椭圆率 $m < 1$ 时,试样巷道两侧弹射出的岩块颗粒体积较小,巷道初始破坏程度较低。当椭圆率 $m \geq 1$ 时,试样弹射出的颗粒体积较大,巷道初始破坏程度更明显。

在块状剥落期,椭圆率为 0.50 的试样巷道尺寸小,巷道两侧未观察到明显的岩块脱落现象,其余椭圆率

试样都呈现相似且较为明显的破坏特征。在扰动应力的作用下,巷道壁面形成大量宏观裂纹,大面积岩块脱离巷道壁面散落到巷道底部。椭圆率为 1.25 试样在整个阶段脱落的岩块体积以及巷道壁面破坏范围最大。

在全面破坏期,椭圆率为 0.75 的试样主要以压缩变形为主,巷道高度明显减小。其他椭圆率试样在此阶段均产生大块岩体冲出现象。在邻近完全破坏时,不同椭圆率试样扰动应力基本接近峰值应力,强扰动应力持续加载导致试样完全破坏,椭圆形巷道的承载

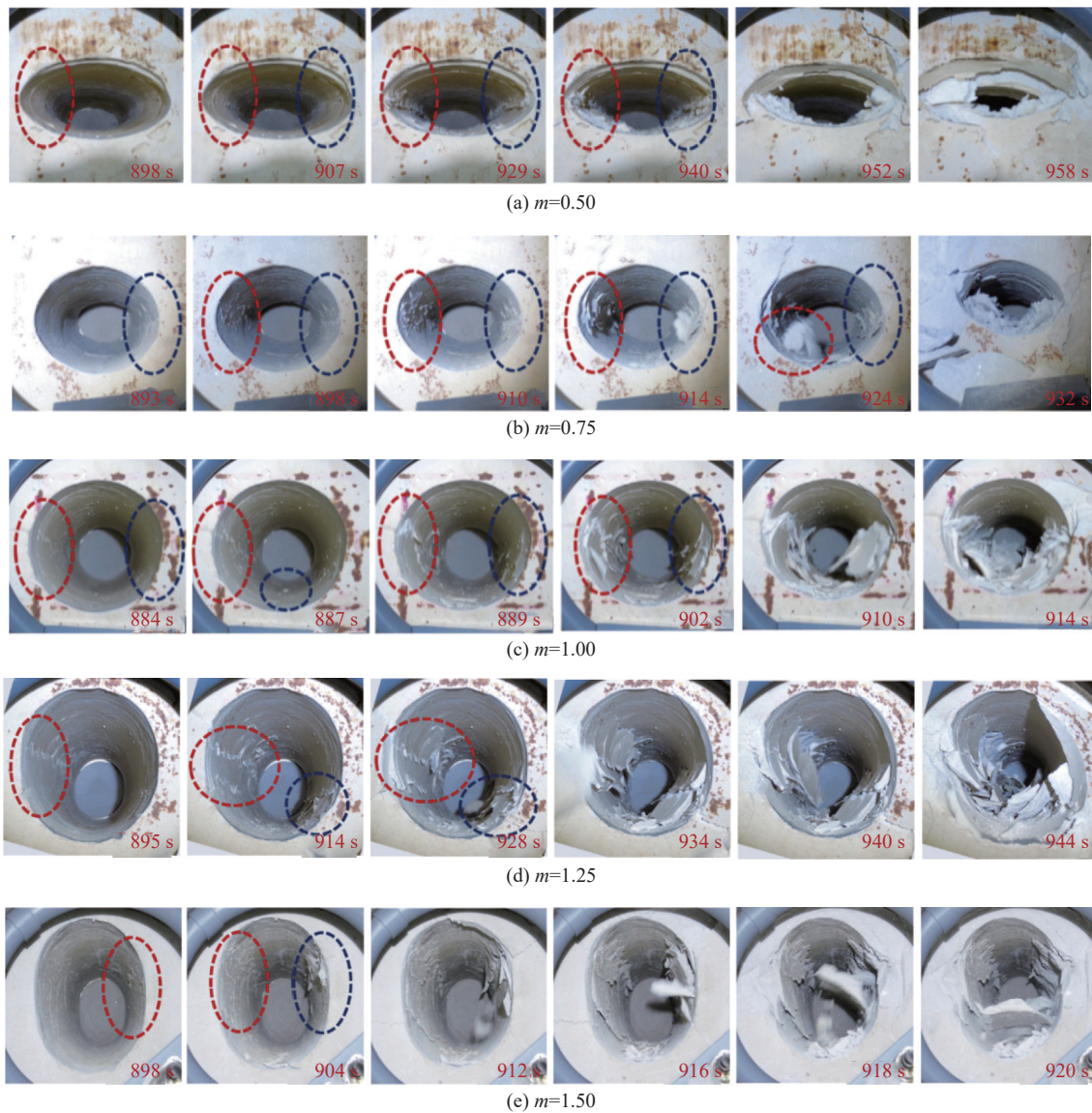


图6 不同椭圆率试样冲击破坏现象

Fig.6 Impact failure phenomena of samples with different ellipticity

能力略强于圆形巷道。

从初始破坏时间到全面破坏时间的差值来看(图7a), 椭圆率为0.50的试样经历时间最长, 为52 s; 1.50的试样最短, 为19 s, 与1.00的试样经历时间接近; 椭圆率为0.75和1.25试样时间差值较为接近。主要原因是椭圆率为1.50的试样承载力是最差的, 所以间隔时间短; 椭圆率为0.50时间最长的原因是破坏现象不明显, 前期以变形为主。

分析不同椭圆率试样的破坏应力(图7b), 椭圆率为1.00试样的初始破坏应力最小, 表示在相同扰动应力条件下其巷道更容易产生初始破坏。然而, 从全面破坏应力分析, 椭圆率为1.50试样的应力最低, 表明椭圆率为1.50试样的巷道能够承受较低的扰动应力, 但由于巷道椭圆率最大, 在强扰动应力下易发生失稳破坏。椭圆率为1.25试样的初始破坏应力和全面破

坏应力都最大, 说明该试样巷道所能承受的扰动应力更大, 巷道结构更为稳定。

2.2.2 巷道围岩破坏特征分析

通过分析不同椭圆率试样的冲击破坏过程, 发现所有试样巷道破坏主要集中在两侧, 对不同椭圆率试样破坏后的巷道进行处理, 分别得到如图8所示的不同椭圆试样巷道破坏及破坏轮廓示意。由图8可知, 不同椭圆率试样破坏后在巷道两侧均形成了“V”字形破坏区域。

就三维加载应力对围岩破坏特征参数开展研究, 因扰动加载阶段仅 σ_v 持续加载, 其余两向应力保持稳定, 所以针对 σ_v 对破坏参数影响规律进行分析。不同椭圆率试样随扰动应力 σ_v 的不断增大, 破坏特征演化进程及规律基本相同, 巷道破坏区域都是从两侧开始显现, 在平静期和颗粒弹射期破坏区域不明显, 破坏

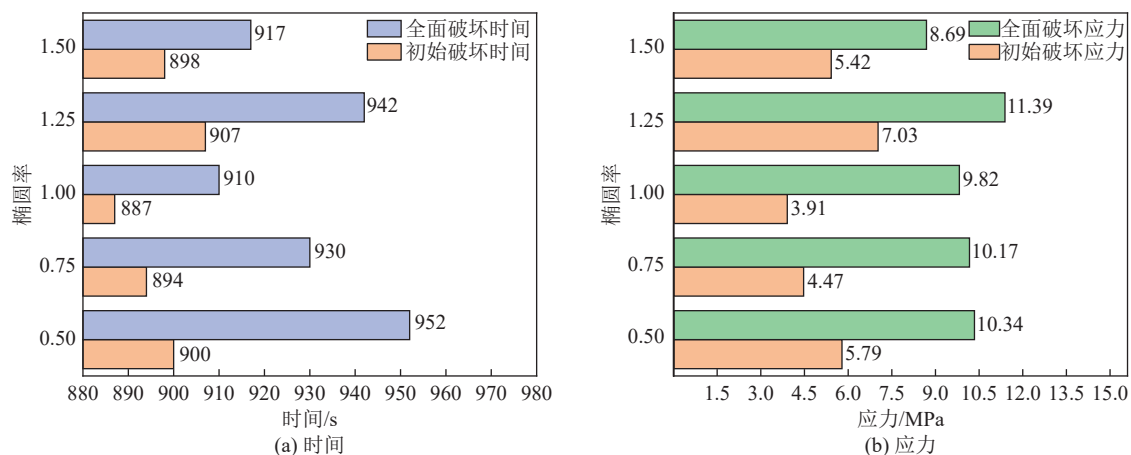


图 7 不同椭圆率试样冲击破坏特征

Fig.7 Impact failure characteristic values of samples with different ellipticities

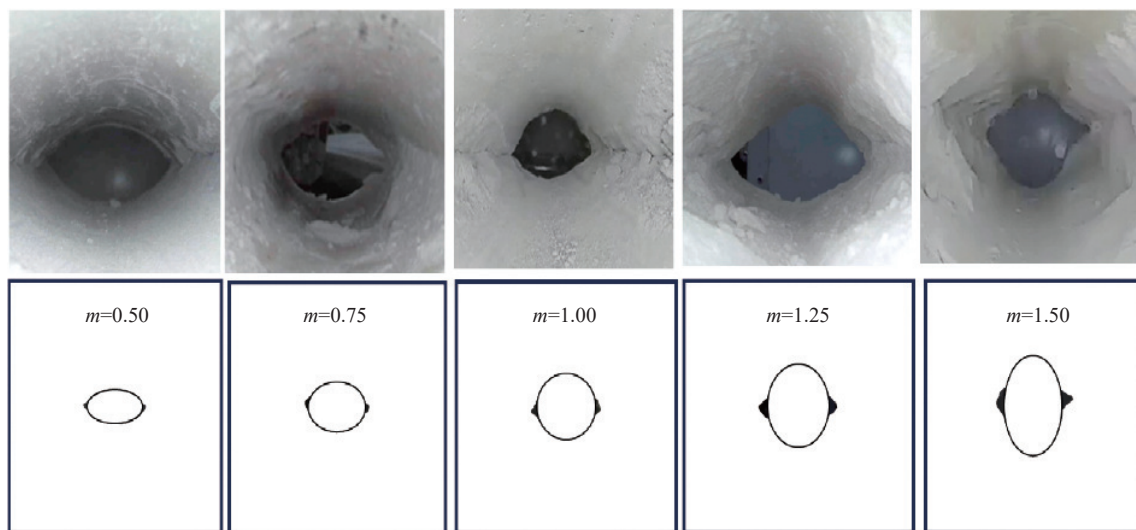


图 8 不同椭圆率巷道试样破坏特征

Fig.8 Damage characteristics of roadway samples with different ellipticity rates

程度不剧烈,巷道断面出现轻微压缩变形。随着 σ_v 持续加载,进入块状剥落期后,巷道两侧出现明显破坏区域,破坏区域角度增大,大块岩石从巷道围岩喷出,堆积在巷道底部,出现剧烈程度较大的巷道围岩破坏现象。最后进入全面破坏期,破坏区域及破坏角度达到最大,巷道断面进一步压缩并被破碎围岩充填,此时破坏剧烈程度达到最大。

椭圆率为 0.50 试样的破坏区域最小,其破坏主要以压缩变形为主,破坏过程没有产生较大岩块的滑落,因此巷道壁面相对完整。其他椭圆率试样在破坏过程中均有大面积岩块从壁面喷出至巷道底部,破坏后形成了明显的破坏区域。

为了量化地描述巷道破坏区域,基于破坏区域轮廓提取了不同椭圆率试样左右两侧的破坏区域深度和角度并计算其面积。为更为科学的分析椭圆率对巷道破坏的影响,求取左右两侧破坏区域参数的平

均值,绘制破坏深度、破坏角度随椭圆率变化关系,如图 9 所示。

椭圆率为 0.50、1.00 和 1.25 试样左右两侧破坏深度分布较为均匀,椭圆率为 0.75 试样左右两侧深度相同,椭圆率为 1.50 试样的深度离散型较大,右侧的深度大于左侧。椭圆率为 0.50、0.75 和 1.25 试样左右两侧破坏角度分布较为均匀,椭圆率为 1.00 和 1.50 试样的破坏角度离散型较大,随着椭圆率的增大破坏区域角度呈现先增大后减小再增大的趋势。根据破坏深度和角度计算了破坏面积,发现破坏面积和深度的变化趋势相同,均随着椭圆率的增大而增大。

2.2.3 基于声发射三维定位破坏特征分析

声发射事件的时空演化反映了试样在应力加载过程中内部裂纹的扩展情况及巷道围岩的破坏状况。不同椭圆率试样在扰动加载期的声发射事件空间定位如图 10 所示。声发射事件点所处的位置表示微裂

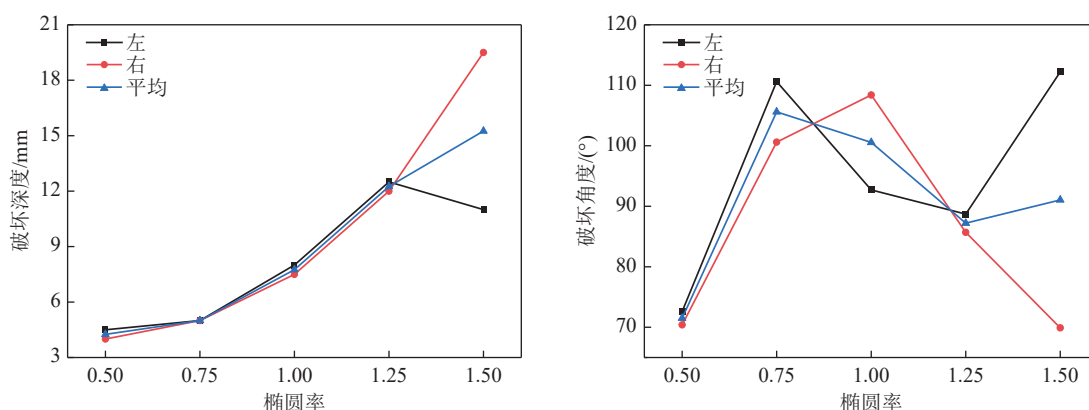


图9 不同椭圆率巷道破坏深度及角度

Fig.9 Depth and angle of damage for different ellipticity lanes

纹开始出现的位置,不同颜色表示声发射事件点源幅值(单位: dB),绿、黄、红依次代表了声发射事件幅值由低到高的程度。

在平静期,不同椭圆率试样声发射事件点离散地分布在巷道附近,事件点数目均较少,并且事件点幅值基本在 30 ~45 dB;颗粒弹射期,声发射事件点数目少量增加,位置分布基本未发生变化,都是在已有事件点的附近增加,但事件点幅值普遍较低,基本无高幅值事件点出现,表明裂纹的扩展比较缓慢。

块状剥落期,椭圆率 $m < 1.00$ 的试样沿着巷道轴线产生高幅值事件点,表明在巷道左侧裂纹不断扩展。椭圆率为 1.00 试样事件点集中区域逐渐扩大,在巷道右侧产生并有沿轴线扩展的趋势。椭圆率为 1.25 试样出现少量沿轴线的高幅值事件点,在巷道对角线方向产生一条高幅值事件线并且与巷道轴线事件点相交,表明试样产生了 2 条明显贯通的宏观裂缝。椭圆率为 1.50 试样沿巷道右侧轴线产生零星高幅值事件点,高幅值事件点逐渐集中在巷道前端,表明新裂缝分布在巷道的前端。

全面破坏期,各试样的声发射事件点数目急剧增加,形成不同的集中区域。不同椭圆率试样均在上一阶段裂缝带附近产生更多高幅值事件点,原有事件点集中区域范围逐渐扩大。椭圆率 $m > 1.00$ 的试样事件点数目明显高于椭圆率 $m < 1.00$ 的试样,前者的裂缝区域主要在巷道两侧呈条带状分布,后者裂缝区域交叉分布,破坏面积更大。

2.3 声发射响应特征及讨论

2.3.1 声发射计数与 b 值

声发射振铃计数是声发射信号超过门槛值的次数,它是声发射撞击活动的数量和频率。通过声发射计数及 b 值分析,可以得到试样的破坏规律。首先,为分析声发射计数、累计计数在扰动加载期的变化情

况,统计扰动加载期声发射计数,如图 11 所示。

不同椭圆率试样声发射计数随着扰动应力的加载呈现较为一致的规律,在初始扰动应力加载的平静期,已有声发射事件产生,在块状剥落期和全面破坏期较为活跃,其中全面破坏期最为剧烈。

在平静期,试样内部逐渐产生微小的裂缝,声发射事件开始初步显现。随着试验开展,扰动应力不断增加,巷道围岩出现小颗粒弹射现象,声发射计数开始逐渐增加。随着应力的进一步增加,在扰动加载后期,声发射信号较初期明显增强,这个时期声发射计数显著增大,开始呈现突增趋势,在邻近全面破坏时声发射计数达到最大值。

从声发射累计计数来说,不同椭圆率试样都呈现逐渐增加的趋势。不同椭圆率试样声发射计数与累计计数的变化规律较为相似,不同之处在于声发射计数存在突增现象,主要原因是其监测的是单个频率高低,而累计计数是阶段求和,弱化了单个声发射计数的影响,所以增加趋势较为平稳。总而言之,两者都是随着扰动应力的增加而增加,同时随着椭圆率的增大,声发射最大计数也是逐渐增大,反馈了试样的破坏更加剧烈。

声发射 b 值是岩石破裂过程中声发射小事件数与大事件数的比值,其变化特征能反映岩石内部微裂纹扩展尺度的变化情况。计算方法如下:

$$\lg N = a - bM \quad (8)$$

$$M = A_{dB}/20 \quad (9)$$

其中, A_{dB} 为幅度, dB; N 为 $M + \Delta M$ 幅度之间的事件数; a 为总事件数和检测范围相关的常数; M 为声发射事件的振幅, dB。在求取 b 值时,选用 $\Delta A_{dB} = 5$ dB 对声发射幅值数据进行统计,并采用最小二乘法计算。

不同椭圆率试样 b 值随时间的变化曲线如图 12

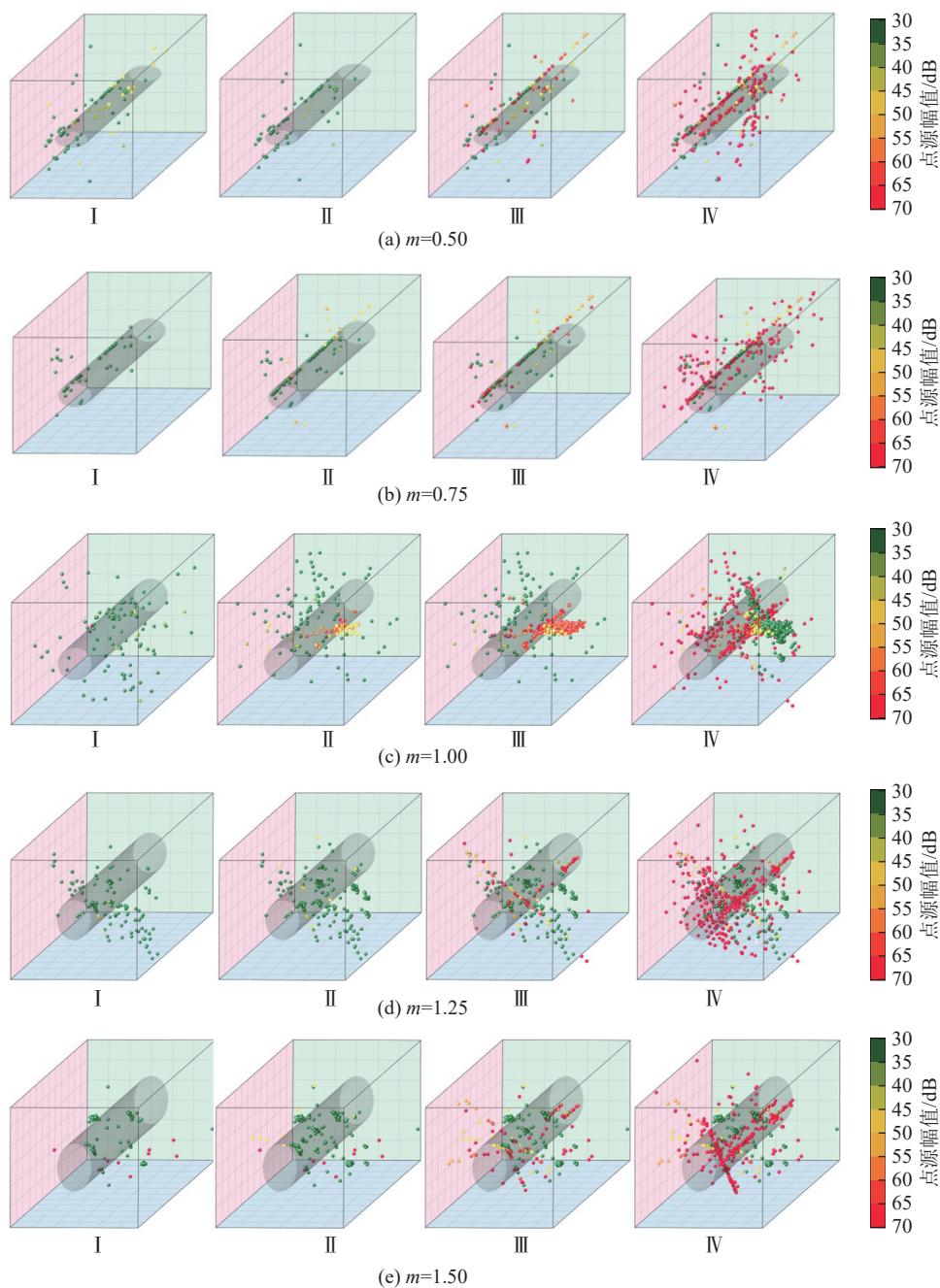


图10 不同椭圆率试样声发射事件三维时空演化

Fig.10 Three-dimensional space-time evolution of AE events of samples with different ellipticity

所示。从整个试验加载过程来讲,前期 b 值没有明显的变化,说明前期破坏程度较低,在扰动加载期出现后明显降低。当椭圆率 $m \leq 1.00$ 时,试样声发射 b 值随试验进行呈现先升后降的趋势;当 $m > 1.00$ 时,声发射 b 值随试验进行呈现下降趋势,在扰动加载期 b 值下降幅度更大。对比扰动加载期不同椭圆率试样 b 值的降幅,发现随着椭圆率的增加, b 值下降幅度逐渐增大,说明了椭圆率越大的试样在产生冲击破坏时尺度更大,破坏现象更剧烈。

2.3.2 声发射能量

声发射能量反映试样内部以弹性波形式释放的

能量。绘制各试样声发射能量、累计能量在扰动加载期演化规律,如图13所示。

不同椭圆率试样在平静期和颗粒弹射期声发射能量基本都为0,试样内部裂缝发育迟缓。在块状剥落期各试样声发射能量均出现快速增加现象,进入全面破坏期后,椭圆率为0.50、0.75和1.25试样累计能量曲线几乎垂直上升。椭圆率为1.25试样产生突发性破坏后累计能量保持水平。椭圆率为1.00和1.50试样累计能量呈现指数型增长,在高能量水平下持续增加。

综上所述,各试样扰动加载过程前2个阶段能量变化较小,后2个阶段产生了较为明显的能量释放现

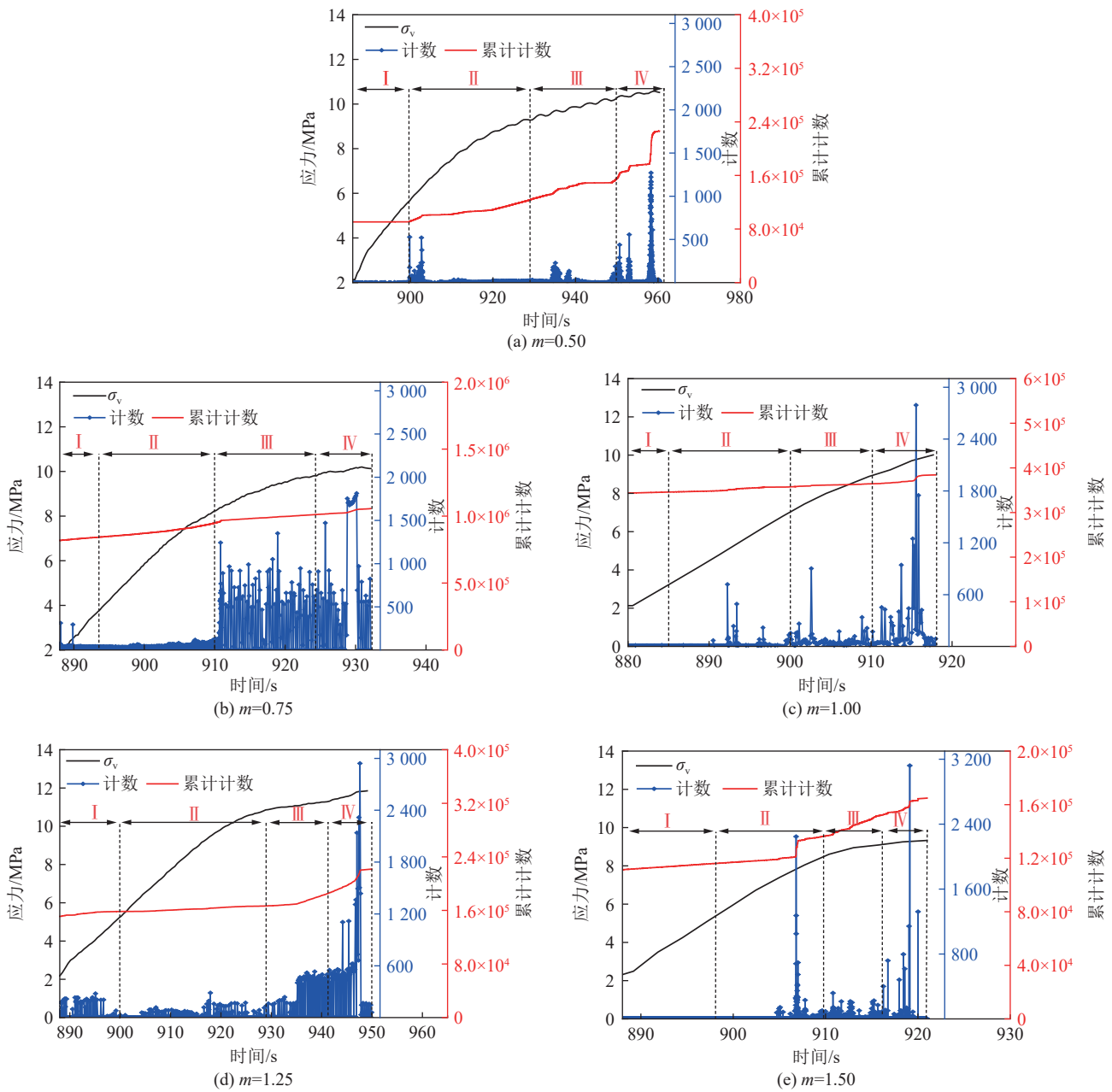
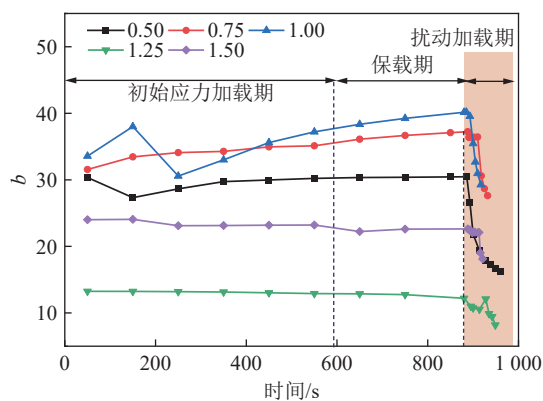


图 11 不同椭圆率试样声发射计数

Fig.11 Acoustic emission count of samples with different ellipticity

图 12 不同椭圆率试样 b 值Fig.12 The b value of samples with different ellipticity

象。对于不同椭圆率试样的声发射能量最大值来说,随着椭圆率的增加声发射能量最大值也增加,并且发生跨越数量级别的变化,其中椭圆率 0.50 试样的能量最小为 6.0×10^7 aJ,最大的为椭圆率 1.50 的试样达到 1.3×10^{10} aJ。

2.3.3 声发射能量演化机制讨论

声发射累计能量是整个巷道围岩破坏过程中能量积聚释放最直观的展现。因此,基于声发射累计能量数据开展分析,针对累计能量的演化规律进行数学拟合,用以研究不同椭圆率巷道能量释放与时间之间的数学关联性。数学拟合关系如图 14 所示。

通过对不同椭圆率的数学拟合曲线及拟合程度

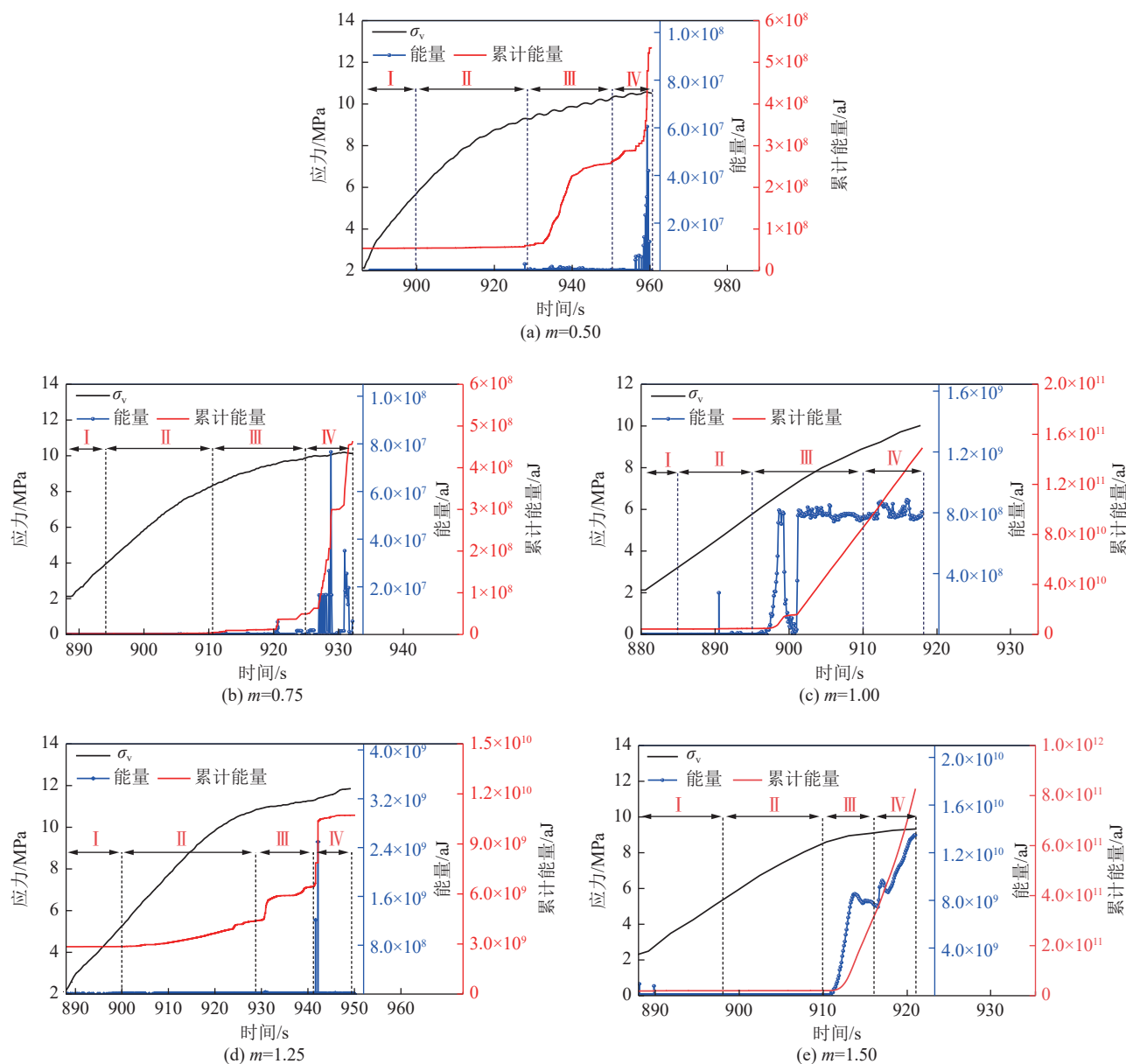


图 13 不同椭圆率试样声发射能量

Fig.13 Acoustic emission energy of samples with different ellipticity

分析, 5 个试样累计能量的增加随着时间进程均呈现非线性增长, 在每一个阶段的交界处都伴随着高能量的声发射事件, 累计能量曲线在阶段交界处突增, 表明在阶段交界处出现微裂纹并快速扩展, 拟合得到的数学关系也能反馈突增现象。

试样进入全面破坏状态时, 破裂会不断地以不可遏制的方式累进性地进行, 整个过程可视为一个由低能值的无序稳定态向高能值的有序非稳定态发展。不同椭圆率的声发射累计能量所表现的非线性关系, 表明能量失稳的突发性。

2.4 红外热像演化特征

2.4.1 红外云图演化分析

首先对不同椭圆率的试样在扰动加载期的红外

云图进行分析 (图 15), 不同椭圆率试样演化进程基本相同, 即在前期温度分布较为均匀, 随着应力加载, 温度不断积聚释放, 根据红外云图反映温度演化呈现出由低到高的发展态势。

平静期试样未产生破坏, 温度场分布均匀。产生颗粒弹射现象后, 开始形成了区域温度集中的现象, 该区域逐渐发展成为高温条带。邻近破坏时, 高温区域进一步集中, 在巷道严重破坏区域形成高温条带。椭圆率为 1.25 的试样在前 3 个时期温度变化基本均匀, 在破坏时表现出高温区域, 侧面印证了该椭圆率试样具有较强的承载能力。

2.4.2 红外辐射温度分析

为减少环境对试样造成的影响, 对试样平均红外

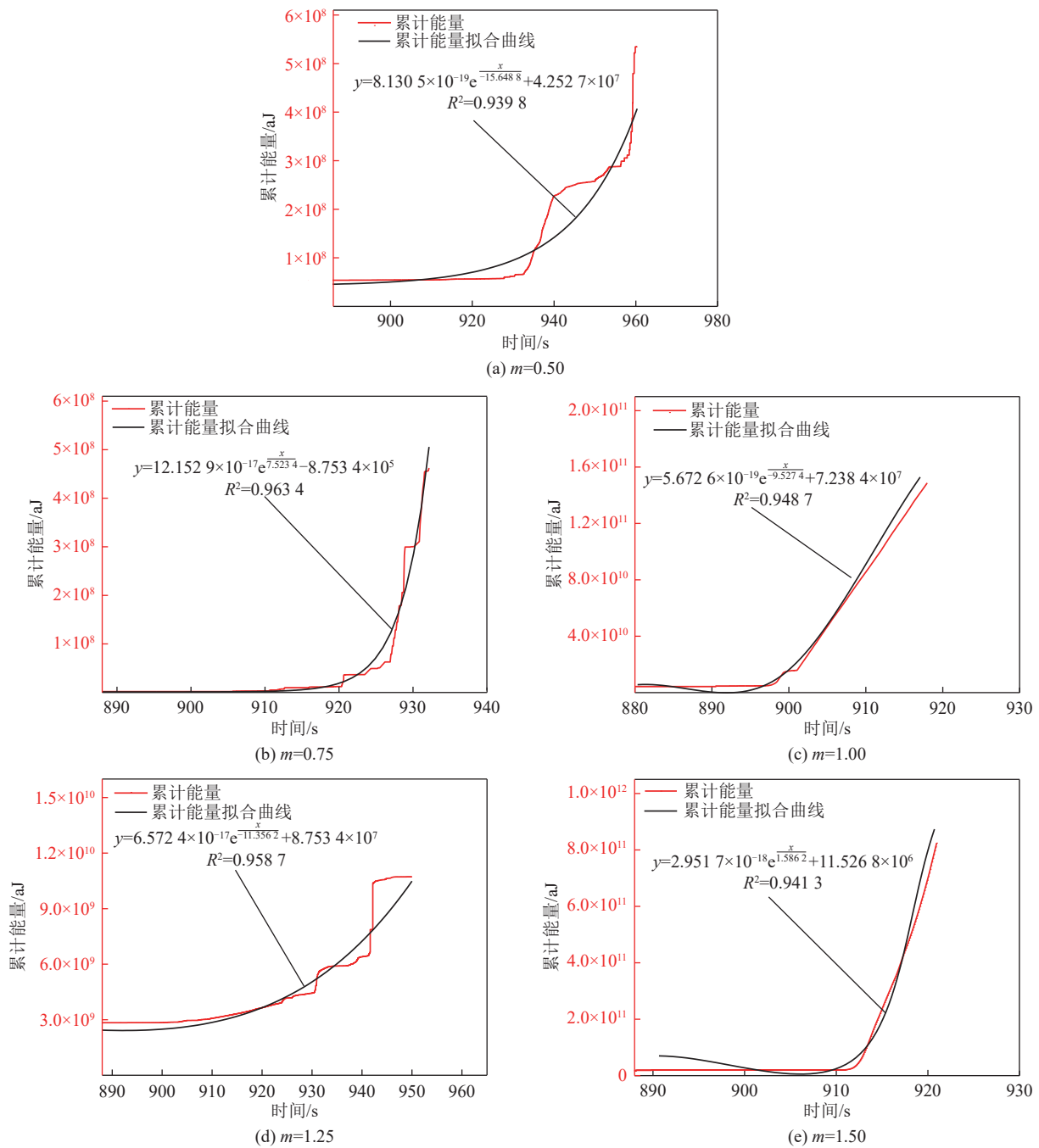


图14 不同椭圆率试样声发射能量拟合曲线

Fig.14 Fitting curves of acoustic emission energy for samples with different ellipticities

辐射温度 ($T_{ir,avg}$) 进行差值处理, 得到每个时刻平均红外辐射温度与初始温度的差值 ($\Delta T_{ir,avg}$)。基于巷道冲击破坏位置及应力状态, 结合围岩应力对称分布, 巷道两侧红外辐射平均温度曲线在应力加载过程中变化趋势基本一致。在巷道一侧取边长为 80 个像素点正方形作为分析区域, 分析区域如图 16 所示。

不同椭圆率试样的平均红外辐射温度变化曲线如图 17 所示。随着椭圆率的增加, 平均红外辐射温度的增幅越大。同时, 不同椭圆率巷道的平均红外辐射温度演化规律呈现相似的阶段演化特征。在初始

应力加载期间, 不同椭圆率试样的 $\Delta T_{ir,avg}$ 均呈现出缓慢上升趋势, 且在此阶段属于波动上升, 主要是随着应力增加试样开始积聚能量, 在热耦合作用下试样表面的 $\Delta T_{ir,avg}$ 增加。不同椭圆率试样在保载期规律较为相似, 因为此时巷道围岩处于三向应力稳定状态, $\Delta T_{ir,avg}$ 出现轻微波动, 但此期间整体温度变化幅度不明显; 在扰动加载期, 随着扰动应力的急剧增加, 所有椭圆率试样的 $\Delta T_{ir,avg}$ 快速上升, 其中椭圆率为 1.25 试样 $\Delta T_{ir,avg}$ 增加最为显著, 温度峰值达到了 0.61 °C, 证明了椭圆率 1.25 试样承载能力最强, 积蓄能量更大。

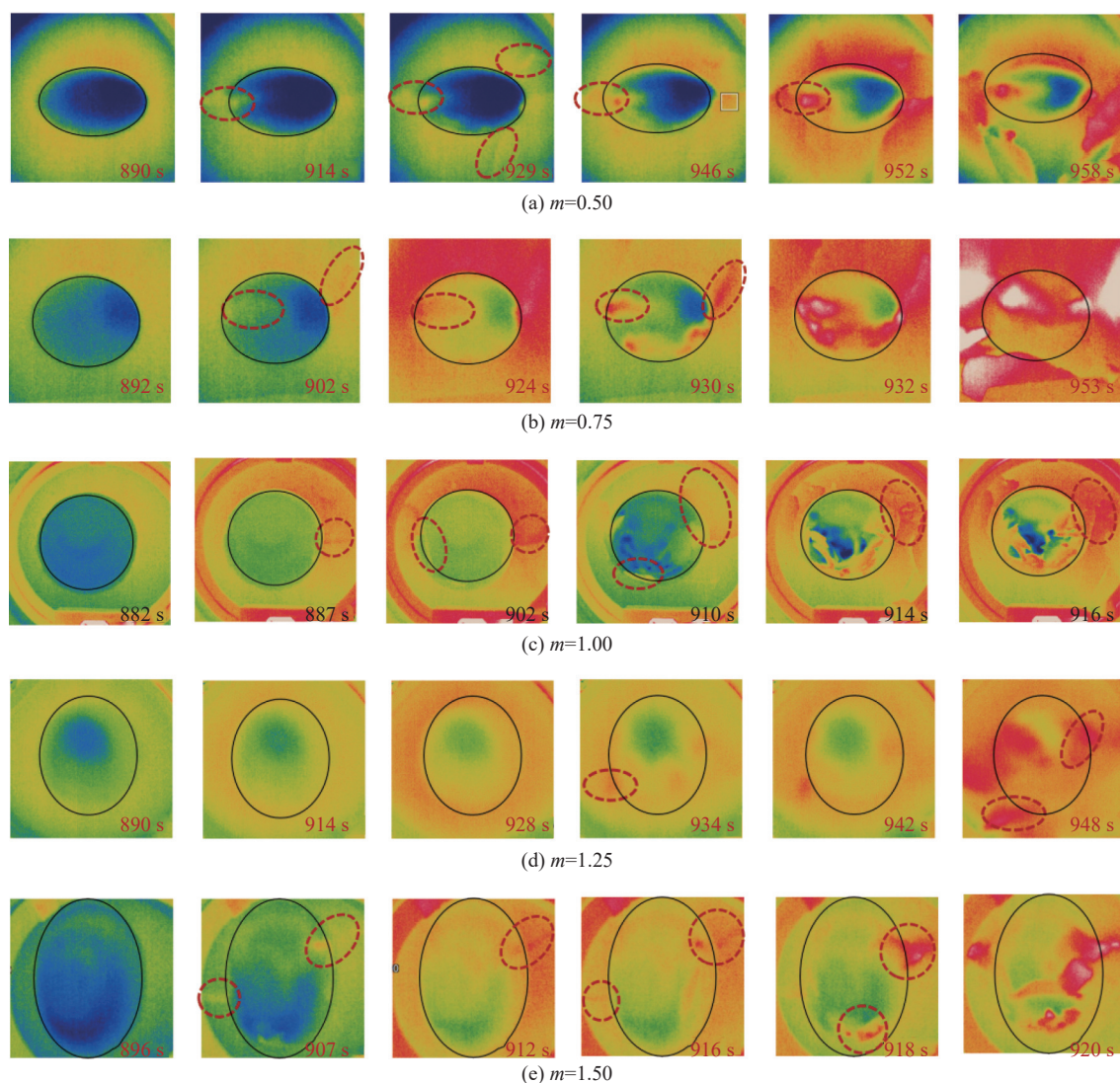


图 15 不同椭圆率试样红外云图演化

Fig.15 Infrared cloud map evolution for samples with different ellipticities

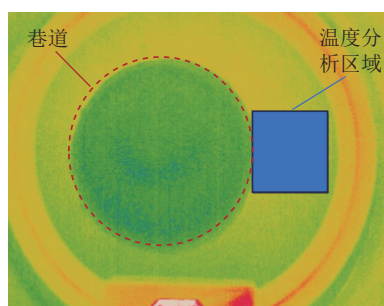


图 16 红外辐射温度分析区域

Fig.16 Infrared radiation temperature analysis area

3 结 论

1) 试样峰值应力及轴向变形量会随着椭圆率的增大呈现先增大后减小的趋势, 椭圆率为 1.25 试样的峰值应力及轴向变形量最大。椭圆率为 1.00 的试样承载能力最弱, 椭圆率 1.25 试样承载能力最强。初始

破坏应力与全面破坏应力随着椭圆率的增大呈先增大后减小的趋势。

2) 巷道破坏主要集中在巷道边帮两侧, 破坏面积和深度的变化趋势相同, 均随着椭圆率的增大而增大。随着椭圆率的增大破坏区域角度呈现先增大后减小再增大的趋势。声发射事件点定位显示裂缝逐渐向巷道周围集中, 并且沿着巷道轴线向左右两侧延伸, 全面破坏时, 巷道周围形成了高幅值事件点区域。

3) 在扰动加载期声发射计数、能量突然增大, 累计计数与累计能量迅速增加, 声发射 b 值突然下降, 说明试样在扰动应力下产生了大尺度破坏。不同椭圆率试样声发射累计能量与时间均存在非线性关系, 侧面验证了冲击破坏的能量骤增原理。

4) 红外热像云图和平均红外辐射温度在破坏时有明显的上升现象, 其中椭圆率为 1.25 试样最为显著。

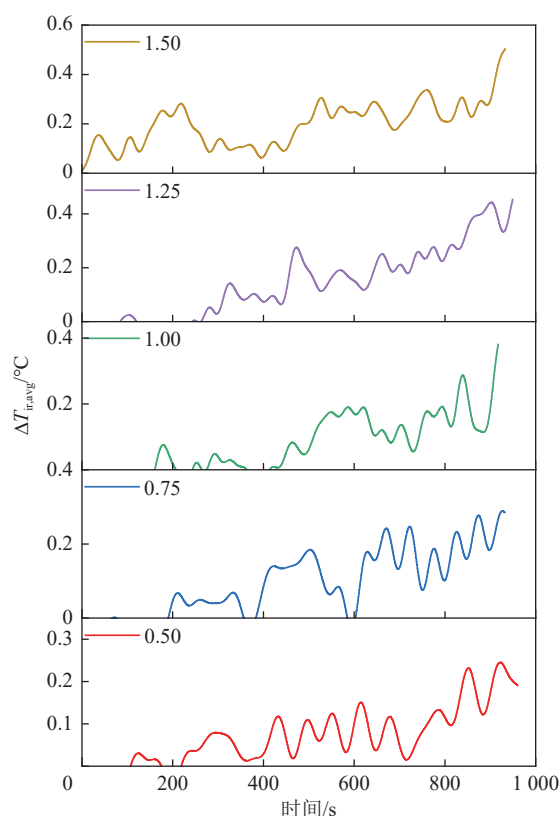


图 17 不同椭圆率试样平均红外辐射温度曲线

Fig.17 The average infrared radiation temperature curves of different elliptical samples

通过对不同椭圆率巷道能量演化规律及破坏特征的分析,揭示了椭圆率对巷道冲击破坏的影响机制,初步确定了椭圆率为 1.25 的巷道具有更强的承载力和防冲效果,其试验结果及理论分析对深部地下巷道工程断面设计具有指导意义。

参考文献(References):

- [1] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1409–1417.
HE Manchao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1409–1417.
- [2] XU L M, LU K X, PAN Y S, et al. Study on rock burst characteristics of coal mine roadway in China[J]. Energy Sources, 2022, 44(2): 3016–3035.
- [3] KENETI A, SAINSBURY B A. Review of published rockburst events and their contributing factors[J]. Engineering Geology, 2018, 246: 361–373.
- [4] 陈陆望, 白世伟. 坚硬脆性岩体中圆形洞室岩爆破破坏的平面应变模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2504–2509.
CHEN Luwang, BAI Shiwei. Research on plane strain model test of rockburst of circular cavern in hard brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2504–2509.
- [5] 陈陆望, 白世伟, 殷晓曦, 等. 坚硬岩体中马蹄形洞室岩爆破破坏平面应变模型试验[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1520–1526.
CHEN Luwang, BAI Shiwei, YIN Xiaoxi, et al. Plane-strain model tests on rock-burst of horseshoe section Caverns in hard and brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1520–1526.
- [6] 张向阳, 顾金才, 徐景茂, 等. 深部高地应力条件下直墙拱形洞室受力破坏规律研究[J]. 防护工程, 2017, 39(3): 6–12.
ZHANG Xiangyang, GU Jincai, XU Jingmao, et al. Bearing condition and failure regularity of deep upright-arch cavern under high ground stress[J]. Protective Engineering, 2017, 39(3): 6–12.
- [7] 张晓君, 林芊君. 直墙拱形巷(隧)道岩爆破破坏模式及能量分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S2): 849–855.
ZHANG Xiaojun, LIN Qianjun. Failure mode and energy analysis of rock burst in straight-wall arched roadway (tunnel)[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S2): 849–855.
- [8] 刘崇岩, 赵光明, 许文松, 等. 高应力巷道岩爆过程及时空演化规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 998–1008.
LIU Chongyan, ZHAO Guangming, XU Wensong, et al. Experimental study on rockburst and its spatio-temporal evolution criterion in high stress roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 998–1008.
- [9] CHEON Dae-sung, JEON Seokwon, PARK Chan. Characterization of brittle failure using physical model experiments under polyaxial stress conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(1): 152–160.
- [10] 司雪峰, 宫凤强, 罗勇, 等. 深部三维圆形洞室岩爆过程的模拟试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 621–634.
SI Xuefeng, GONG Fengqiang, LUO Yong, et al. Experimental simulation on rockburst process of deep three-dimensional circular cavern[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 621–634.
- [11] 宫凤强, 罗勇, 司雪峰, 等. 深部圆形隧洞围岩板裂屈曲岩爆的模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1634–1648.
GONG Fengqiang, LUO Yong, SI Xuefeng, et al. Experimental modelling on rockburst in deep hard rock circular tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1634–1648.
- [12] 宫凤强, 伍武星, 李天斌, 等. 深部硬岩矩形隧洞围岩板裂破坏的试验模拟研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2085–2098.
GONG Fengqiang, WU Wuxing, LI Tianbin, et al. Simulation experimental study of spalling failure of surrounding rock of rectangular tunnel of deep hard rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2085–2098.
- [13] 宫凤强, 罗勇, 刘冬桥. 深部直墙拱形隧洞围岩板裂破坏的模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1091–1100.
GONG Fengqiang, LUO Yong, LIU Dongqiao. Simulation tests on spalling failure in deep straight-wall-top-arch tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1091–1100.
- [14] LUO Y, GONG F Q, LIU D Q, et al. Experimental simulation analysis of the process and failure characteristics of spalling in D-shaped tunnels under true-triaxial loading conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 42–61.
- [15] GONG F Q, WU W X, TIANBIN LI, et al. Experimental simulation and investigation of spalling failure of rectangular tunnel under different three-dimensional stress states[J]. International Journal of

- Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 122: 104081.
- [16] 李地元, 成腾蛟, 周韬, 等. 冲击载荷作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 249–260.
- LI Diyuan, CHENG Tengjiao, ZHOU Tao, et al. Experimental study of the dynamic strength and fracturing characteristics of marble samples with a single hole under impact loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 249–260.
- [17] 杜明瑞, 靖洪文, 苏海健. 椭圆形孔洞对砂岩试样强度及变形特征影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 141–147.
- DU Mingrui, JING Hongwen, SU Haijian. Study on the influence of elliptical hole on strength and deformation characteristics of sandstone sample[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(1): 141–147.
- [18] 朱泉企, 李地元, 李夕兵. 含预制椭圆形孔洞大理岩变形破坏力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 2724–2733.
- ZHU Quanqi, LI Diyuan, LI Xibing. Experimental study on deformation and failure mechanical properties of marble with prefabricated elliptical holes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S1): 2724–2733.
- [19] 王炆, 何满潮, 刘冬桥, 等. 深部椭圆形洞室围岩冲击岩爆实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2214–2228.
- WANG Yang, HE Manchao, LIU Dongqiao, et al. Experimental study on impact rockburst of surrounding rock in deep elliptical Caverns[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(11): 2214–2228.
- [20] 王炆. 含不同长短轴比椭圆形洞室的砂岩冲击岩爆实验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
- WANG Yang. Experimental study on sandstone rockburst with elliptical Caverns with different long-short axis ratios[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2020.
- [21] 周辉, 陈珺, 张传庆, 等. 低强度高脆岩爆模型材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2039–2049.
- ZHOU Hui, CHEN Jun, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental study of the rockburst model material with low-strength and high-brittleness[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2039–2049.
- [22] 黄禄渊, 杨树新, 崔效锋, 等. 华北地区实测应力特征与断层稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 204–213.
- HUANG Luyuan, YANG Shuxin, CUI Xiaofeng, et al. Analysis of measured stress characteristics and fault stability in North China[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(S1): 204–213.
- [23] 梁昌玉, 李晓, 李守定, 等. 岩石静态和准动态加载应变率的界限值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1156–1161.
- LIANG Changyu, LI Xiao, LI Shouding, et al. Study of strain rates threshold value between static loading and quasi-dynamic loading of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1156–1161.