



不同高径比煤样巴西劈裂声发射特征及能量演化机制研究

雷瑞德 粟罗 贺培 胡超 李俊 周林森

引用本文：

雷瑞德, 粟罗, 贺培, 等. 不同高径比煤样巴西劈裂声发射特征及能量演化机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 63–77.

LEI Ruide, SU Luo, HE Pei. Study on acoustic emission characteristics and energy evolution of Brazilian splitting tests of coal samples with different height–diameter ratio[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 63–77.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1288>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究

Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 38–46 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b137ebb9-3dda-4059-b421-ee1fc0746db3>

单向卸载条件下组合煤岩力学特性及声发射演化规律

Mechanical properties and acoustic emission evolution of coal–rock combination under unidirectional unloading condition

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 71–83 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2040>

不同尺寸冲击倾向性煤样声发射 b 值特征研究

Study on acoustic emission b–value characteristics of bump–prone coal sample with different sizes

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6f2bd3ba-8c10-4be9-a7f2-4c3e03a9c24f>

不同围压下页岩三轴压缩声发射能量分布特性研究

Study on distribution characteristics of shale triaxial compression acoustic emission energy under different confining pressures

煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/37772064-ed6c-4d82-bc0c-424e5af3d7a0>

基于煤样破坏声发射特征的冲击地压评价预警研究

Early–warning evaluation and warning of rock burst using acoustic emission characteristics of coal sample failure

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 116–129 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1720>

不同加载速率下煤岩声发射与红外辐射特征研究

Study on coal and rock acoustic emission and infrared radiation characteristics under different loading rates

煤炭科学技术. 2021, 49(7): 79–84 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ea7aa91e-b245-4bb9-b864-e9d98b13f723>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

雷瑞德, 栗 罗, 贺 培, 等. 不同高径比煤样巴西劈裂声发射特征及能量演化机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 63–77.

LEI Ruide, SU Luo, HE Pei, *et al.* Study on acoustic emission characteristics and energy evolution of Brazilian splitting tests of coal samples with different height-diameter ratio[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 63–77.

不同高径比煤样巴西劈裂声发射特征及 能量演化机制研究

雷瑞德^{1,2,3,4}, 栗 罗³, 贺 培^{1,2}, 胡 超³, 李 俊³, 周林森³

(1. 重庆地质矿产研究院 页岩气勘探开发国家地方联合工程研究中心, 重庆 401120; 2. 重庆地质矿产研究院 自然资源部页岩气资源勘查重点实验室, 重庆 401120; 3. 四川轻化工大学 土木工程学院, 四川 自贡 643002; 4. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为探究不同高径比对圆盘煤样抗拉强度及能量演化机制的影响, 对 5 组直径相同、高度不同的煤样进行巴西劈裂试验, 并同步声发射监测系统及三维形貌扫描技术探究不同高径比煤样的抗拉特性、声发射特征、破断模式及断面形貌特征。结果表明: 随着煤样高径比的增加, 煤样抗拉强度呈现逐渐减小的趋势, 当高径比在 0.4 : 1 至 1 : 1 范围内时, 高径比为 0.4 : 1 的煤样抗拉强度最大。圆盘煤样宏观破坏模式逐渐由拉-剪混合裂纹主导的多裂纹复杂破断模式转变为单一断面拉伸裂纹破坏。累积声发射能量逐渐增大, 且累积能量曲线的聚丛现象较为显著, 呈阶梯式上升趋势。较低应力水平阶段的耗散能占比逐渐增大; 当荷载增至弹性极限时, 耗散能及其占比逐渐减小; 当煤样趋近破裂阶段时, 弹性应变能与耗散能占比趋于平稳; 当煤样进入峰后破裂阶段时, 积聚在煤样内的弹性应变能迅速释放, 耗散能占比急剧增加, 煤样内部宏观裂纹迅速扩展并贯通。多重分形谱宽度($\Delta\alpha$)逐渐增大, 频谱测度子集(Δf)小于零, 表明煤样拉伸破裂过程中小破裂尺度信号占主导优势。另外, 不同高径比工况下煤样破断面高程的相对频率呈现出拟合度较高的高斯型函数分布, 分形维数呈逐渐增大趋势, 表明高径比越小, 其破裂后断面的复杂程度越低, 反之高径比越大的煤样破裂后断面粗糙程度越复杂。

关键词: 巴西劈裂; 力学特性; 声发射; 微观裂纹; 多重分形

中图分类号: TU45; TD313

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)10-0063-15

Study on acoustic emission characteristics and energy evolution of Brazilian splitting tests of coal samples with different height-diameter ratio

LEI Ruide^{1,2,3,4}, SU Luo³, HE Pei^{1,2}, HU Chao³, LI Jun³, ZHOU Linsen³

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Shale Gas Exploration and Development, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 4001120, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Natural Resources, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China; 3. School of Civil Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643002, China; 4. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to explore the influence of different ratios of height-diameter on the tensile strength and energy evolution of disc coal samples, Brazilian splitting tests were carried out on five groups of coal samples with the same diameter and different heights. The tensile behavior, acoustic emission (AE) characteristics, fracture modes and section morphology characteristics of coal samples with different height-diameter ratio are investigated using a synchronous AE monitoring system and three-dimensional morphology scanning technology.

收稿日期: 2023-09-18

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-1288

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004047); 重庆市博士后研究项目特别资助项目(2022CQBSHTB3109); 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放课题资助项目(JYBSYS202306)

作者简介: 雷瑞德(1988—), 男, 河南新乡人, 讲师, 博士。E-mail: rldlei@suse.edu.cn

通讯作者: 贺 培(1987—), 男, 四川内江人, 正高级工程师, 博士。E-mail: hepei131180@163.com

The results show that the tensile strength of coal gradually decreases with the increase of the ratio of height to diameter, and the peak strength of coal reaches the maximum when the height-diameter ratio is 0.4 : 1. The failure mode of coal samples gradually changed from the complex fracture mode of multiple cracks dominated by tensile-shear mixed cracks to the tension cracks of single section. The cumulative AE energy increases gradually, and the clustering phenomenon is more significant, showing a stepwise upward trend. The proportion of dissipated energy increases gradually at the lower stress level. When the load increases to the elastic limit, the dissipated energy and its proportion decrease gradually. The ratios of elastic strain energy and dissipated energy tend to be stable when the coal sample approaches the failure stage. When the coal sample enters the post-peak stage, the accumulated elastic strain energy releases rapidly, the proportion of dissipated energy increases sharply, and the macroscopic cracks in the coal sample rapidly expand and coalesce. The width ($\Delta\alpha$) of the multifractal spectrum gradually increases, and the spectral measure subset (Δf) is less than zero with the increase in height-diameter ratio, which indicates that the small fracture scale signal dominates in the splitting tests. In addition, the relative frequency of broken section elevation of coal samples under different height-diameter ratios presents a good Gaussian function distribution, and the fractal dimension shows a gradually increasing trend. The smaller the height-diameter ratio, the less complex the fractured section will be, whereas the larger the height-diameter ratio, the more complex the roughness of the broken section will be.

Key words: Brazil splitting; mechanical properties; acoustic emission; micro cracking; multifractal

0 引言

随着开采深度和强度的增加,我国煤矿逐步向深部开采,采掘过程中需预留大量煤柱,煤柱服务期间的稳定性成为确保煤矿安全生产的重中之重,且煤柱的力学性能与高径比有密切的关系。大量工程实测和室内试验研究表明,冲击地压、煤与瓦斯突出、顶底板透水等事故的发生往往是由于煤岩体局部拉伸破断致使微裂纹非稳定扩展并大尺度破裂最终诱发矿山灾害事故,再加上煤岩失稳破断的发生具有时间效应,进而增加了对破坏预测、预报及防治的难度^[1-5]。因此,开展不同高径比煤岩抗拉特性及变形破裂能量驱动演化对于认识煤岩体灾变破裂具有重要的意义。

众多学者针对不同高径比煤岩力学特性开展了大量的室内试验和理论模型研究^[6-13]。POULSEN等^[8]和MOHAMMAD等^[9]分别从试验和模拟角度来考虑尺寸效应对煤岩强度的影响,结果表明高径比对试样破坏特征和裂纹扩展机制等均有显著影响,主要表现在强度随尺寸的增加而降低,表面位移集中区较分散试样的破坏模式由单一拉伸破断演变为复杂的拉-剪混合破断。赵光明等^[10]以花岗岩为研究对象,对不同高径比岩样在动态冲击荷载作用下的力学特性开展了深入研究,结果发现,3种冲击速率下岩样的峰值应变与单位长度破碎吸收能均随着高径比的增加而逐渐减小。LI等^[11]以不同高径比板岩为研究对象,对直径在25~100 mm的6种不同尺寸板岩进行了一系列巴西劈裂试验,结果表明,横观各向同性平面上的杨氏模量逐渐增大,而垂直于横观各向同性平面上的杨氏模量和剪切模量随着试样尺寸的增大而减小。MA等^[12]对直径相同高度不同

的花岗岩圆盘试样进行了一系列三点弯试验,通过声发射参数反演微裂纹演变规律,结果表明高径比对花岗岩试样的破坏模式起到了重要的作用,对于高径比小于0.4的工况主要以弯曲折断模式为主,当高径比大于0.4时,弯曲折断模式逐渐演变为劈裂模式。另外,众多学者^[14-20]对不同尺寸影响下岩石的破裂模式及声发射特征也开展了大量研究,得出随着高径比的增加,岩样的破裂模式由复杂劈裂破坏逐渐演变为单一的剪切破坏,且试样中部应力区接近平面应力状态,反之随着高径比的减小,试样极限变形较小且破坏模式较复杂。肖晓春等^[15]以组合煤岩为研究对象,利用自主研发的试验机配套声发射系统探究了卸荷条件下煤岩的力学特性,对煤岩裂纹扩展、裂纹类型占比及加卸载过程的损伤劣化程度进行了量化表征。YIN等^[16]以组合煤岩为研究对象,通过分析不同岩性对其力学性能与能量演化特征的影响,得出煤岩的破坏主要以复杂劈裂破坏为主。王磊等^[17]以高径比在0.3~1.0之间的煤样为研究对象,探究长径比对煤样破碎分形特征和耗能密度的影响,结果表明,随着高径比增加,煤样破碎程度逐渐降低,得到煤样应力平衡临界高径比为0.6,当试样尺寸大于临界高径比时,煤样动态压缩破碎耗能及占比呈台阶式下降,且破碎块分形维数呈线性降低。

综上所述,以往研究者针对不同高径比煤岩的力学特性开展了大量研究,并取得了大量对揭示煤岩破断失效的重要结论。然而,不同高径比煤样巴西劈裂抗拉特性、声发射参量多重分形特征及变形破裂过程中的能量驱动演化机制仍需进一步研究。基于此,本文通过开展不同高径比圆盘煤样巴西劈裂试验配套声发射监测和三维形貌扫描技术探究煤样抗拉强度、声发射特征、劈裂破坏模式、能量演化

机制及断面形貌特征, 研究结果对煤矿井下预留煤柱、顶板主承结构的加固设计具有指导意义。

1 试 验

1.1 试样制备

试验样品取自内蒙古自治区某煤矿。首先, 从工作面挑选出完整性较好的煤块运至实验室, 随后, 严格按照国际岩石力学学会(ISRM)测试标准进行钻取、切割及磨平等一系列过程, 最终加工成直径为 50 mm, 高度分别为 20 mm、25 mm、30 mm、40 mm 和 50 mm 的圆盘煤样。为了确保试验数据的可靠性, 每种工况至少挑选出 5 个均质性较好且表面没有明显裂纹的试样开展不同高径比巴西劈裂试验, 制备成的不同高径比圆盘煤样, 如图 1 所示。

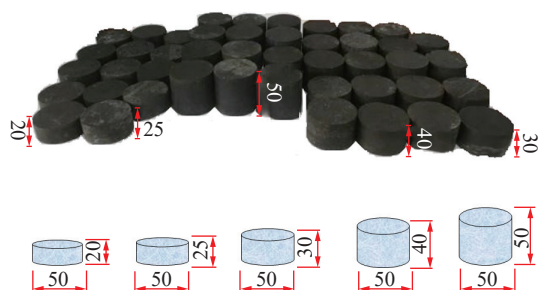


图 1 不同高径比圆盘煤样

Fig.1 Disk coal samples with different height-diameter ratio

1.2 试验设备

试验装置为 ISTRON 万能材料试验机, 该系统主要由控制面板、加载单元和数据采集单元组成, 最大轴向荷载为 250 kN。加载系统采用位移控制, 加载速率设置为 0.05 mm/min。为探究煤样在加载变形过程中的微裂纹演变机制, 试验过程中配套 PCI-II 声发射系统。声发射探头采用 Nano 30, 其共振频率和采样率分别为 140 kHz 和 1 MHz。为减少机器环境的噪声, 声发射系统的阈值值和前置放大器分别设置为 45 dB 和 40 dB。另外, 为了尽可能降低采集信号的丢失, 在声发射探头表面涂抹凡士林作为耦合剂。试验装置如图 2 所示。

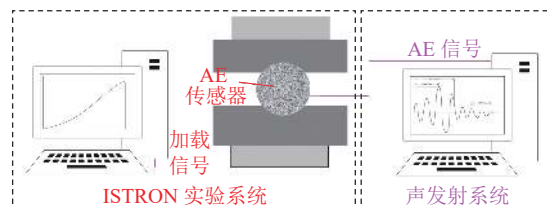
2 力学特性分析

2.1 力学强度

从五组不同高径比试验结果中剔除离散性较大的数据后, 选取三个具有代表性的峰值强度结果绘制成散点图, 如图 3 所示。此外, 为了获得整个加载过程中煤样的变形破裂特征, 从五组不同高径比结果中选取一组典型试样的应力-时间演化特征, 如图 4 所示。从图中可以看出在加载初期阶段应力-



(a) 试验设备



(b) 试验系统示意

图 2 试验设备及试验系统示意

Fig.2 Experimental equipment and schematic diagram

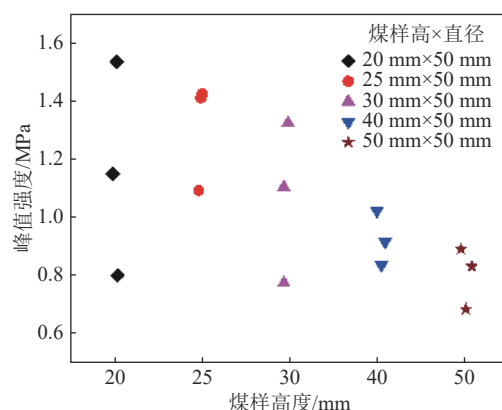


图 3 不同高径比圆盘煤样应力峰值

Fig.3 Peak stress of disk coal samples with different height-diameter ratio

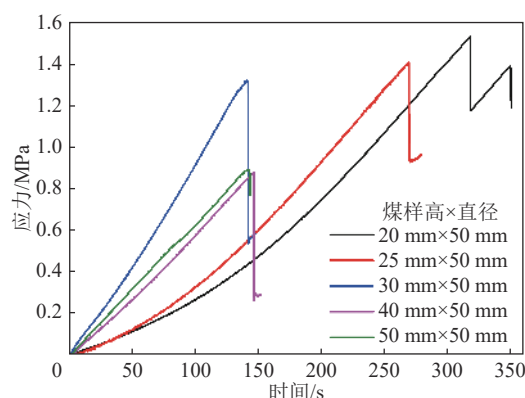


图 4 不同高径比圆盘煤样应力-时间曲线

Fig.4 Stress-time curves of disk coal samples with different height-diameter ratio

时间曲线出现明显的下凹现象。随着高径比的增加, 应力峰值呈现出逐渐降低的趋势, 其中高为 20 mm 的煤样抗拉强度较其他工况大, 主要原因为大高径

比试样相对小高径比试样来说,其内部发育的缺陷和裂缝等复杂程度较高,在劈裂加载过程中竖向线荷载使其内部裂纹逐渐被压实,煤样的抗拉承载能力逐渐减小,最终发生劈裂破坏。

此外,从图中可知,随着高径比的增加,试样破裂时间较短,例如高度为 30 mm、40 mm 和 50 mm 的试样均在 150 s 内发生劈裂破坏,而 20 mm 与 25 mm 的试样在 250 s 之后发生失效破坏,该现象的主要原因可能是由于当煤样尺寸较小时,其内部裂缝、缺陷数量相对大尺寸煤样来说较少,煤样内基质颗粒之间的密实性和完整性较好,则其抗拉承载能

力会更好。

2.2 圆盘破裂模式

通过对 5 组不同高径比煤样的最终破断模式进行归纳,得到不同高径比典型煤样破断模式,如图 5 所示。从图中可知,随着高径比增加,煤样的破裂模式由复杂拉-剪混合破坏逐渐演变为单一断面的张拉劈裂破坏,并且试样表面的宏观裂纹数量逐渐减少,主要原因是尺寸效应造成煤样破坏机制不同。另外,结合应力-时间曲线特征,得知高径比小的工况经历变形破坏时间相对较长,最终导致破断的裂纹类型较复杂。

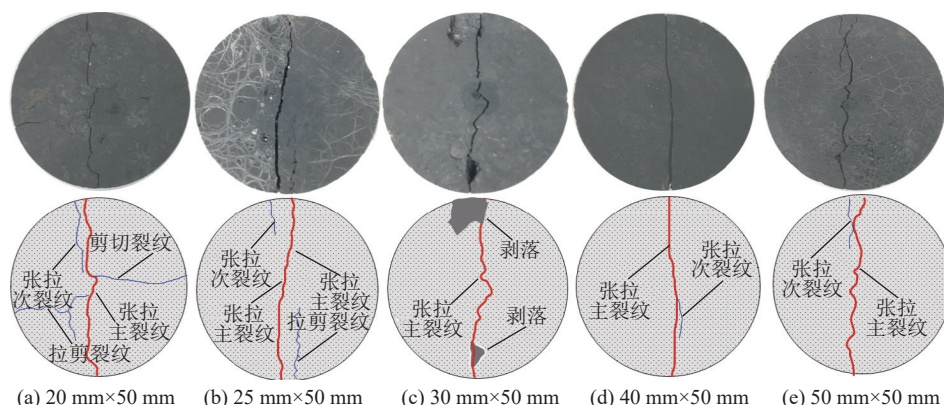


图 5 不同高径比典型煤样最终破裂模式

Fig.5 Fracture modes of typical disk coal samples with different height-diameter ratio

3 声发射特征及能量演化机制

3.1 声发射特征

煤岩在变形破坏过程中会以弹性波形式向外界释放能量信号,该信号即为声发射。声发射信号能较好地识别微裂纹的成核、萌生、扩展及贯通等一系列过程。不同高径比煤样声发射能量-应力随时间演化曲线,如图 6 所示。根据煤样变形破断过程中声发射演化特征,可将整个加载过程分为 4 个阶段,分别为微裂纹拉实阶段、微裂纹萌生扩展阶段、宏观裂纹发展阶段和峰后破裂阶段。

首先,对于微裂纹拉实阶段来说,对于高径比不同的 5 组试样在该阶段均未监测到声发射事件,即使捕捉到个别声发射信号,主要是由于煤样内微孔裂隙压密产生,且随着高径比的增加,该阶段的结束时间逐渐提前,该阶段在整个加载过程的占比逐渐减小,占用的时间从 100 s (图 6a) 缩短至 20 s 结束 (图 6b、6c、6d)。应力-时间曲线基本表现为平稳上升或轻微下凹,很可能的原因为煤样内的微裂缝、孔洞等缺陷在滑移错动过程中产生离散的声发射事件。

其次,为微裂纹萌生扩展阶段,此阶段产生的声发射信号逐渐增多,历时最长,煤样内部微裂纹被压实后,开始有高幅值能量信号被捕捉,且累计能量也开始缓慢上升,其原因是前期煤样承受载荷处于受拉状态,煤岩内的基质颗粒和裂隙逐渐被压实。

接下来是宏观裂纹发展阶段,此阶段的特征为试样内的声发射信号密度逐渐增多,由声发射能量演化特征可知,在裂纹稳定发展过程中捕捉到较大幅值的能量信号,累计能量曲线由较平稳的线性增长向斜率突增逐渐演化。随后试样内裂纹发展为不稳定阶段,历时较短,该过程捕捉到大量声发射信号,对应能量曲线出现聚丛现象,累计能量曲线也出现第一次增幅较大现象,预示着煤样内部微裂纹扩展贯通。随着高径比的增加,累积声发射能量逐渐增大,且累积能量曲线的聚丛现象越发明显,呈阶梯式上升趋势。

最后为宏观裂纹贯通阶段,此阶段几乎是在试样产生破裂的同时或趋近破裂前,声发射信号密度急剧增加,历时最短,也证实煤样材料为典型的准脆性材料,同时声发射能量曲线与累计能量曲线急剧上升,对应应力-时间曲线则出现骤降现象。对于不

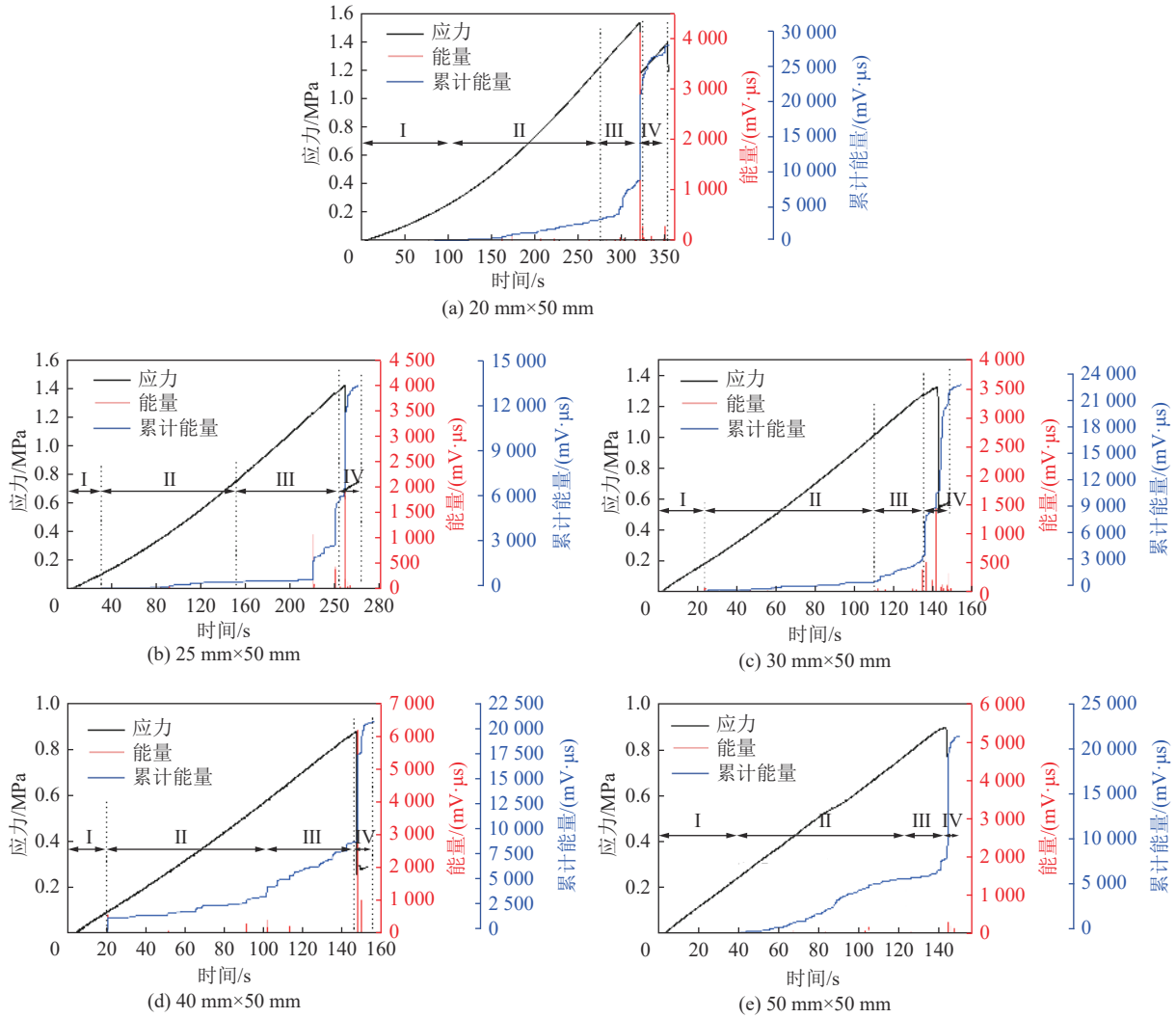


图6 不同高径比煤样应力及声发射能量随时间演化曲线

Fig.6 Evolution of tensile strength and AE energy of disk coal samples with different height-diameter ratio

同高径比试样来说,破裂前煤样内均出现较大的能量释放。随着高径比的增加,该阶段耗时占比在整个劈裂过程逐渐增加,裂纹贯通现象愈发明显,从累计声发射能量演化曲线可看出,随着高径比的增加,整个劈裂过程产生的声发射累计能量逐渐减少。

3.2 能量演化机制

由热力学定律可知,煤岩的损伤破坏本质上是由于能量在输入、积聚、耗散和释放过程中发生了相互转换^[21-22]。假定煤样与试验机是一个封闭系统,且不与外界发生热交换,整个加载过程保持能量动态平衡。图7为煤岩变形破裂过程中总应变能、弹性应变能和耗散能之间的关系。

$$U = U_e + U_d \quad (1)$$

式中: U 为总应变能, kJ/m^3 ; U_e 为弹性应变能, kJ/m^3 ; U_d 为耗散能, kJ/m^3 。

在三维空间应力状态下,能量表达式为:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_1^i + \sigma_1^{i+1}) (\epsilon_1^{i+1} - \epsilon_1^i) \quad (2)$$

经过简化之后,单轴作用下试样内各部分能量表达式如式(3)和式(4)所示。

$$U_e = \frac{1}{2E_0} \sigma_1^2 \quad (3)$$

$$U_d = U - U_e \quad (4)$$

式中, E_0 由弹性模量近似取代; σ_1 为轴向应力; ϵ_1 为轴向应变。

为研究不同高径比圆盘煤样巴西劈裂加载过程中能量驱动变形机制,利用式(1)一式(4)得到煤样变形破坏过程中的总能量 U 、弹性应变能 U_e 和耗散能 U_d ,不同高径比煤样巴西劈裂能量演化曲线,如图8所示。

由图8可知,煤样的总能量、弹性应变能与耗散能三者演变规律不同,总能量在劈裂破坏过程中呈非线性增大趋势。另外,在加载前期呈非线性增大

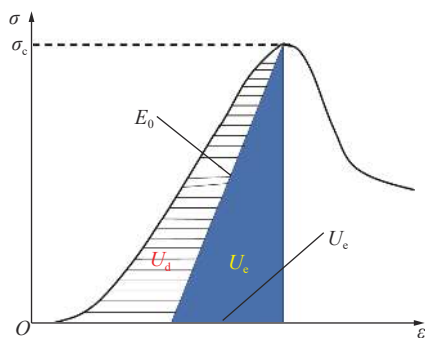


图7 煤岩耗散能与弹性应变能关系

Fig.7 Relationship between dissipated energy and elastic strain energy of coal rock

且略微向下凹的演化趋势。随着高径比的增加,其总能量峰值逐渐降低,由 0.651 kJ/m^3 (图 8a) 逐渐减小至 0.216 kJ/m^3 (图 8e)。弹性应变能在峰前阶段的演化规律与总能量较一致,但在峰后阶段储能极限发生突变现象。耗散能与弹性应变能演变规律不同,随着高径比的增加,对应的耗散能峰值逐渐减小,由 0.068 kJ/m^3 (图 8a) 减小至 0.031 kJ/m^3 (图 8e),直到煤样完成失去承载能力耗散能才出现突增。

为进一步分析不同高径比煤样变形破裂过程中能量驱动变形机制,需对加载过程中弹性应变能与耗散能的占比关系进行量化分析。不同高径比煤样

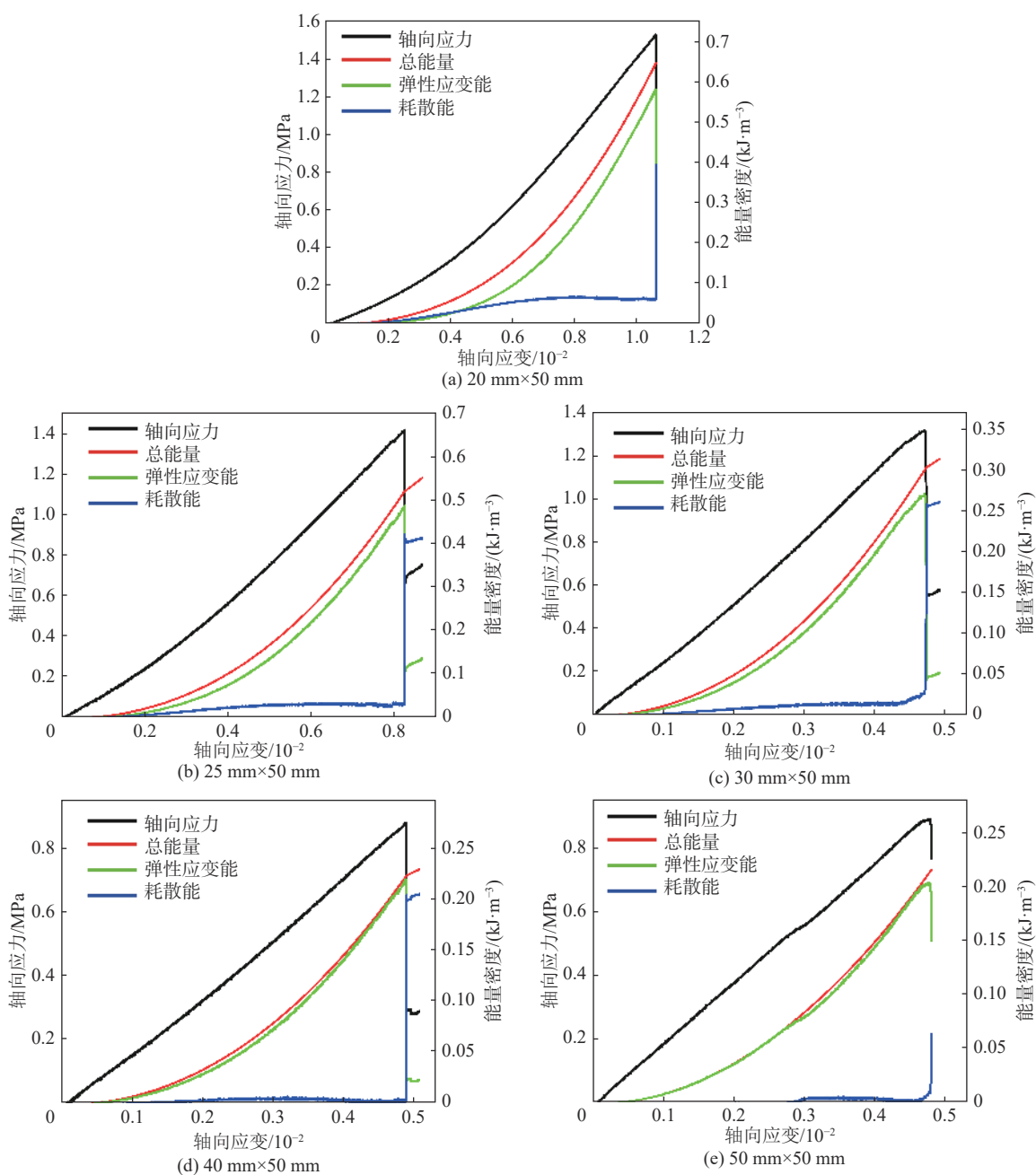


图8 不同高径比煤样能量演化曲线

Fig.8 Evolution of energy for coal samples under different height-diameter ratio

变形破坏过程中弹性应变能与耗散能占比曲线,如图 9 所示。

由图 9 可知,在加载初期阶段耗散能占比大于弹性应变能,主要是由于煤样内部微孔隙闭合所致。随着高径比的增加,在较低应力水平阶段时,耗散能占比逐渐增大,表明试样内微裂纹数量逐渐增多。当荷载增至弹性极限时,微裂纹逐渐发育扩展且此阶段系统输入的总能量几乎以弹性应变能的方式储存在试样内,耗散能较少。当煤样趋近破裂阶段时,弹性应变能与耗散能占比曲线逐渐趋于平稳,主要原因为该阶段输入的总能量大部分以弹性应变能的形式储存,但几乎接近储存极限。直至煤样趋于破坏时,耗散能占比急剧增加,相反,弹性应变能占比急剧下降,主要原因为煤样内储存弹性应变能达到极限,系统持续输入的总能量超过煤样的承载能力,积聚在煤样内的弹性应变能迅速以耗散能的形式释放,从而导致耗散能出现急剧增大现象,即煤样内部微裂纹迅速扩展并贯通形成宏观裂纹。

3.3 微裂纹演化规律

众所周知,宏观裂纹的形成是由大量微观裂纹渐进累积演变的结果,因此,微裂纹演变过程的研究对于揭示煤岩宏观破裂显得非常重要。为了表征圆盘试样变形破坏过程中的微裂纹演化规律,通过对声发射计数、持续时间、上升时间和振幅等参数的关系计算得到间接声发射参数,比如平均频率 AF 和最大上升时间/最大幅值 RA:

$$AF = \frac{C}{D_T} \quad (5)$$

式中, C 为声发射计数; D_T 为持续时间。

$$RA = \frac{R_T}{A} \quad (6)$$

式中, R_T 为上升时间; A 为振幅。

基于先前研究结果可知,间接声发射参量可定性表征微裂纹演变类型,具体为,若 RA 值较低且平均频率 AF 值较高,则破坏类型为拉伸裂纹;相反,若 RA 值较高且平均频率 AF 值较低,则破坏类型为剪切裂纹,RA 与 AF 值均较低则裂纹破坏类型为拉-剪混合破坏^[23-25]。大量学者通过研究认为对角线可作为拉伸裂纹与剪切裂纹的分界,分界线上端为拉伸破坏,分界线下端则为剪切破坏,而分界线的斜率 AF/RA 则被称为阈值,关于 RA 与 AF 二者之间占比的定义标准尚不明确,据先前学者对脆性岩石类材料研究发现二者比例近似为 1 : 70^[25]。本文采用该阈值表征劈裂试验过程中的微观裂纹演化规律。

为揭示微裂纹演化特征,基于统计计算的方法

得到裂纹分类 RA 与 AF 之间的关系,并借助 MATLAB 内置概率密度函数进行编程得到 RA-AF 的概率密度云图。不同高径比煤样微观裂纹演化 RA-AF 频谱图,如图 10 所示。从图中可知,不同高径比巴西劈裂圆盘试样的微裂纹演变机制不同,高度为 20 mm 的煤样与其他工况的煤样相比,在低 RA 值、低 AF 值区域和低 RA 值、较高 AF 值区域以及高 RA 值与低 AF 值区域较集中,则其破坏机制为拉-剪混合破坏、拉伸破坏和剪切破坏三者并存。高度为 25 mm 的煤样概率密度云图主要分布低 RA 值、低 AF 值区域和较高 RA 值、低 AF 值区域,则裂纹破裂机制主要为拉-剪混合破坏和剪切破坏,少量分布在低 RA 值、高 AF 值区域,则拉伸裂纹破坏占比较少。高度从 30 mm 逐渐增加至 50 mm 时的三组煤样概率密度云图主要分布低 RA 值、低 AF 值区域和高 RA 值、低 AF 值区域,则其破坏机制主要为拉-剪混合破坏和剪切破坏,在低 RA 值、高 AF 值区域的参数分布呈逐渐增加趋势,则说明其拉伸裂纹在逐渐增多。随着高径比的增加,拉伸裂纹在整个劈裂试验过程中所占比重较大,对应的拉伸破坏模式占主导优势。

4 多重分形与三维形貌特征分析

4.1 多重分形理论

分形理论是根据物体本身的自相似性和标度不变性等特点,从分形维度的角度来描述和研究客观事物,即利用分形分维等数学工具来评价客观事物的自身特点。煤岩体裂纹破裂演化过程具有典型的非线性和自相似性,对应的受压变形破裂过程中释放的声发射信号呈现出明显的多重分形特征^[26-29]。为了与前述声发射特征对应,本节采用盒覆盖法对声发射能量信号的概率分布特征进行计算。

首先,按照时间序列对声发射能量进行定义 $\{x(t), t = 1, 2, \dots, N\}$, 并将其分成连续且相等的 N 份,每一份序列长度为 M , 每个区间的归一化概率定义为:

$$P_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^N S_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中, P_i 为归一化概率密度; S_i 为第 t 区间声发射能量累积和。

配分函数 $\chi(q, M)$ 定义为:

$$\chi(q, M) = \sum_{i=1}^N P_i^q \quad (8)$$

式中, M 为标度长度; q 为统计矩顺序。

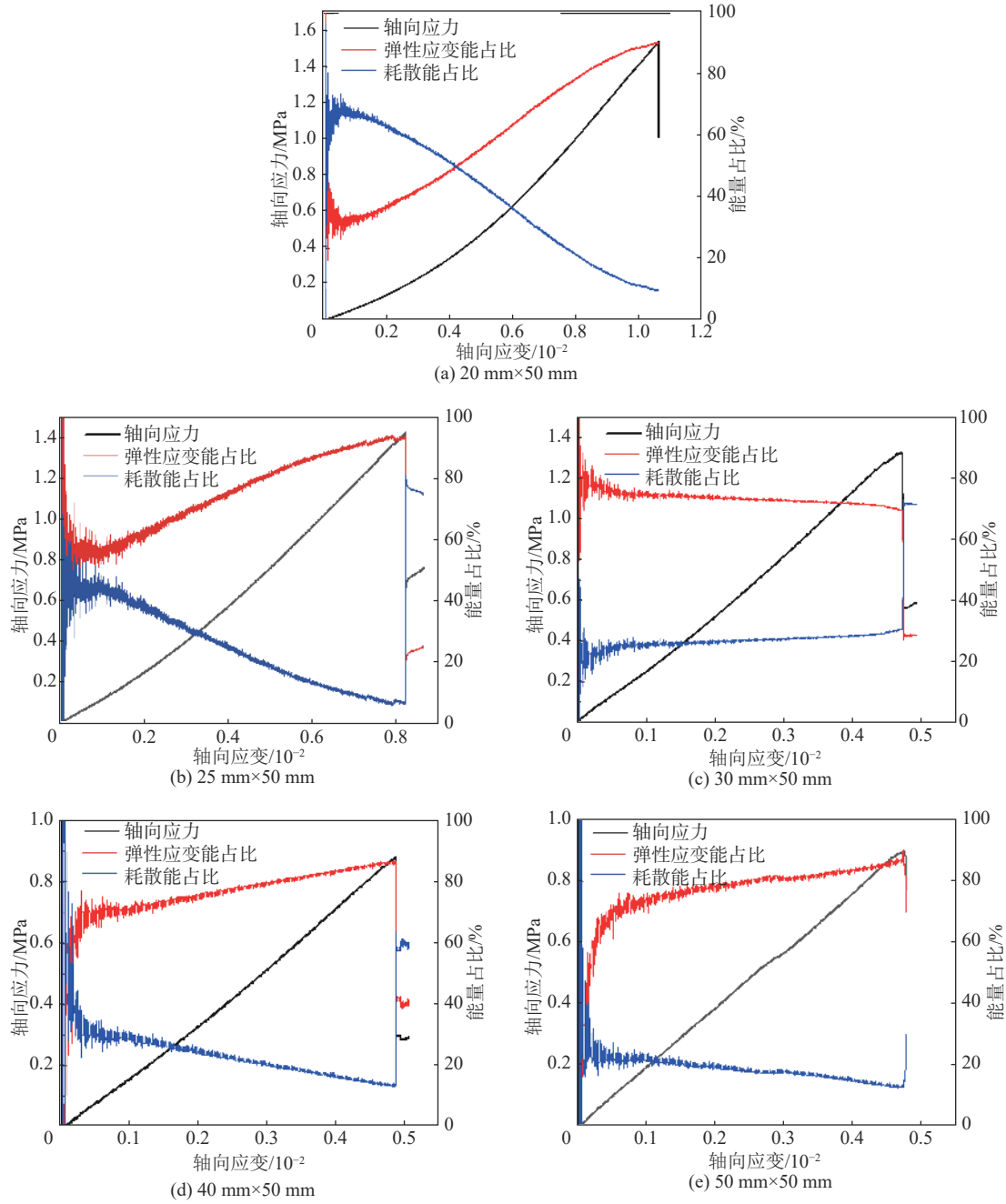


图9 不同高径比煤样弹性应变能与耗散能占比曲线

Fig.9 Curves of elastic strain energy and dissipated energy of coal samples under different height-diameter ratio

对于不同 q 值, 配分函数 $\chi(q, M)$ 与标度长度 M 之间的关系为:

$$\chi(q, M) \propto M^{\delta(q)} \quad (9)$$

通过不断地改变标度长度 M , 并对上述过程重复计算, 再从 $\ln(X(q, L))$ 和 $\ln M$ 拟合曲线上取双对数函数斜率可得到 Hurst 指数 $\delta(q)$ 。

归一化测度 $\mu_i(q, M)$ 的单参数簇定义为:

$$\mu_i(q, M) = \frac{[P_i(L)]^q}{\sum_{j=1}^N [P_i(L)]^q} \quad (10)$$

式中, $P_i(L)$ 为声发射能量信号的概率分布函数。

通过对幂指数加权处理, 多重分形维数可按不同程度划分为多个区域, 并经过 Legendre 变换, 分形谱函数 $f(q)$ 和平均奇异强度 $\alpha(q)$ 的计算过程为:

$$f(q) = -\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N \mu_i(q, M) \ln [\mu_i(q, L)] \quad (11)$$

$$\alpha(q) = -\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N \mu_i(q, M) \ln [P_i(L)] \quad (12)$$

另外, 多重分形谱 $f(q) - \alpha$ 具有三个典型特征: 频谱宽度 ($\Delta\alpha$)、最大与最小信号频率测度子集 Δf 和频谱形貌 $\Delta\alpha_0$ 。

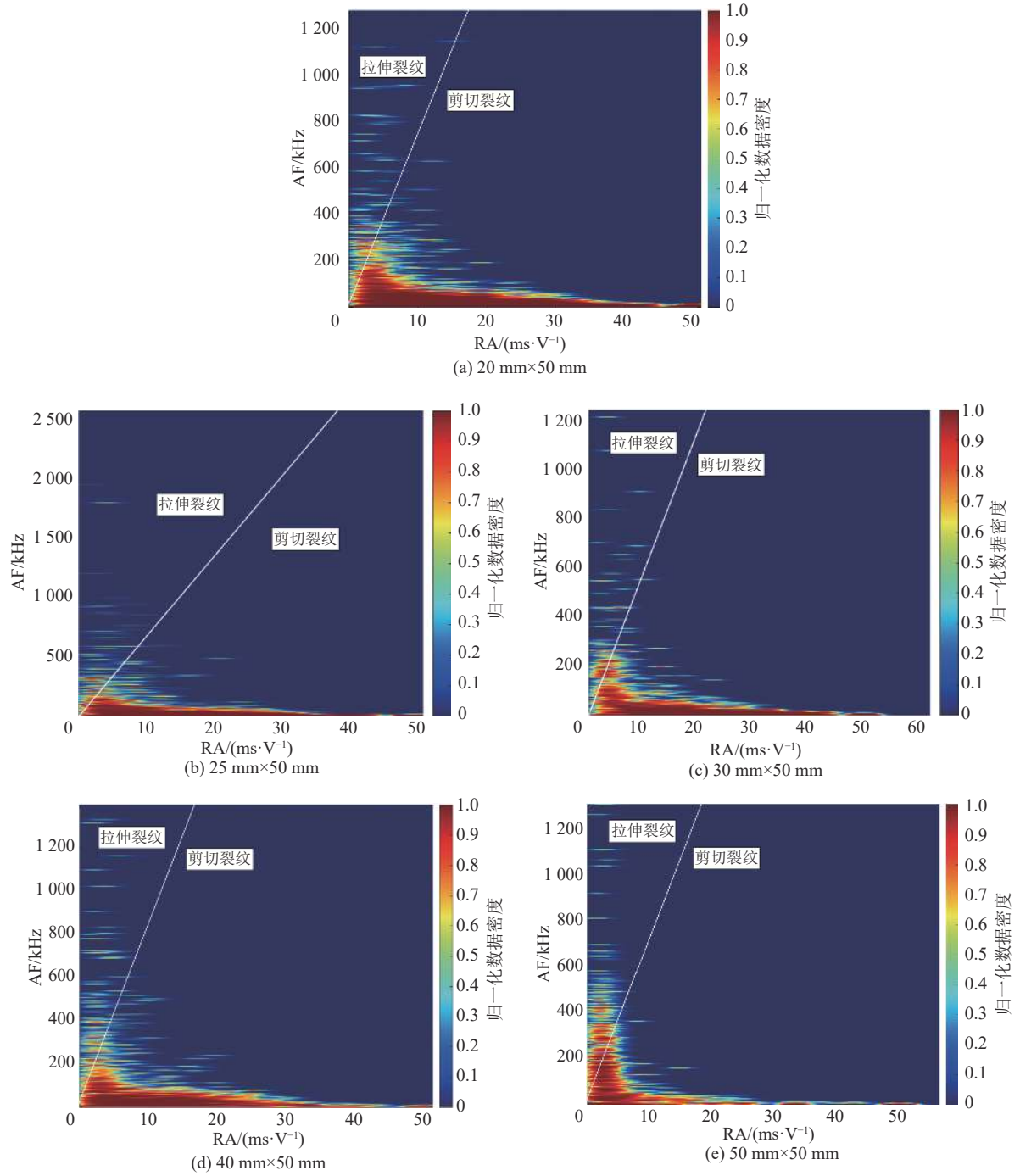


图 10 不同高径比煤样微裂纹分布特征

Fig.10 Distribution of microcrack in coal samples with different height-diameter ratio

频谱宽度 $\Delta\alpha$ 可反映信号的不均匀分布特征,其值越大信号分布波动越大,对应多重分形特征越明显,计算式为:

$$\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} \quad (13)$$

式中: α_{\max} 为奇异性指数最大值; α_{\min} 为奇异性指数最小值。

频谱测度子集 Δf 计算式为:

$$\Delta f = f[q(\alpha_{\max})] - f[q(\alpha_{\min})] \quad (14)$$

式中: $q(\alpha_{\max})$ 是指当 $\alpha=\alpha_{\max}$ 时的 q 值,同理, $q(\alpha_{\min})$ 是指当 $\alpha=\alpha_{\min}$ 时的 q 值。另外, Δf 反映大、小测度子集出现的概率, Δf 越大表明大破裂尺度事件占优, Δf 越小表明小破裂尺度信号占优^[26]。

4.2 声发射参量多重分形特征

为探究圆盘煤样变形破断过程中的裂纹特征,基于多重分析理论给出了不同高径比煤样声发射能量参数的多重分形频谱特征,如图 11 所示。

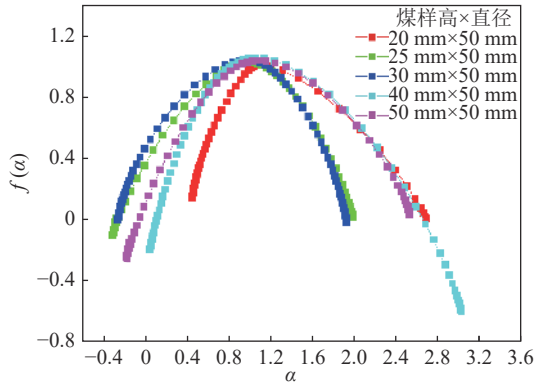


图11 不同高径比圆盘煤样全应力段多重频谱特征曲线
Fig.11 Multifractional spectrum curves of coal samples with different height-diameter ratio

由图11可知,不同高径比煤样频谱呈现出明显的多重分形特征,也即煤样受载变形过程中声发射信号具有显著的非线性特征。另外,较小幅值信号相比较大幅值信号出现的概率更大,进一步表明煤样在劈裂过程中发生了较为复杂的损伤破裂过程。在外荷载作用下,煤样经历了微裂纹萌生、发育及扩展等过程,在一定程度上可通过声发射信号进一步量化裂纹破裂尺度,即幅值较高的声发射信号预示煤样内部经历较大尺度变形和破裂,相反,幅值较小的声发射信号预示着经历较小尺度破裂。

此外,基于多重分形谱形貌特征,还可以清楚地区分声发射信号的结构差异特征。从图中还可得知,随着高径比的增加,多重分形谱宽度逐渐增大,说明煤样内部矿物颗粒之间产生了较大的位错滑移,比如,当高径比为0.4:1时,煤样多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 为2.233,当高径比增至1:1时,多重分形谱宽度为2.704。另外,频谱测度子集 Δf 随着高径比不同产生的变化不明显,且整体呈增大趋势,其 Δf 由-0.149增至0.277,表明整个加载变形过程中小破裂尺度信号占主导优势。

4.3 三维形貌特征分析

为进一步探究不同高径比煤样破断失效机制,借助非接触式三维形貌扫描仪Cronos来量化煤样破裂后的表面形貌特征,其精度在高度方向可达 ± 0.02 mm,在水平方向可达 ± 0.1 mm。由于煤样自身的非均质性较强,受劈裂作用后煤样的宏观破裂与其内部微观结构及裂纹发展密切相关,结合三维形貌扫描结果能够更好地从形貌特征上解释不同高径比工况下煤样变形破裂机制。图12为不同高径比煤样破裂断面的三维化形态结果,从图中可知,不同工况下煤样破断面中间部位的高程明显高于边界部

位。随着高径比的增加,粗糙度高程为正的的范围逐渐增大,即受拉范围区域逐渐扩大。另外,对比分析声发射参量频谱特征可知,破断面越粗糙,对应的声发射参量多重分形特征参数(Δf 和 $\Delta\alpha$)值越大。

为了进一步分析破断面粗糙度高程的演化特征,通过对破断面粗糙度高程的相对频率进行高斯拟合,如图13所示。从图13可知,除了个别工况试样的破断面粗糙度高程未出现明显正态分布外,大多工况煤样破断面粗糙度高程均呈现出拟合度较高的高斯函数特征。随着高径比增加,煤样破断面高程起伏逐渐变大,说明试样断面粗糙度逐渐变大。经统计粗糙度高程在 ± 1 mm之外的相对频率占比发现,随着高径比增加,其相对频率占比呈上升趋势,具体为由0.237逐渐增至0.499。该现象与声发射参量多重分形特征(Δf 和 $\Delta\alpha$)表现出一致的演化规律。另外,该结论与先前学者基于三维形貌数字图像处理技术与分形理论对不同岩石开展的破裂结构面特征研究结论较一致^[30-32]。

为了进一步量化不同高径比煤样巴西劈裂破断面粗糙度高程分布特征,除了获得定性的断面形貌特征及粗糙度高程分布规律外,还需对破断面粗糙度高程的非线性特征开展深入分析。由于煤岩变形破断过程的复杂性与非线性特征,故分析破断面的复杂性特征更有助于理解煤岩破断失效机制,因此,采用分形理论量化表征不同高径比煤样变形破断过程中的破裂特征。

根据分形理论,煤样破断面粗糙度高程序列首先被定义为 $\{h(t), t=1, 2, \dots, N\}$,然后将高程序列划分为 N 个连续的等间距,每个间隔长度为 k ,对应子区间 $\langle H \rangle_k$ 的平均值如下式:

$$\langle H \rangle_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k h(t) \quad (15)$$

累积偏差定义为:

$$H(n, k) = \sum_{i=1}^n h(i) - \langle H \rangle_k, 1 \leq n \leq k \quad (16)$$

子序列取值范围为:

$$R(k) = \max_{1 \leq n \leq k} H(n, k) - \min_{1 \leq n \leq k} H(n, k) \quad (17)$$

标准偏差的计算方法为:

$$S(k) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [h(t) - \langle H \rangle_k]^2} \quad (18)$$

最终, $R(k)/S(k)$ 统计规律为:

$$\frac{R(k)}{S(k)} \sim (k)^H \quad (19)$$

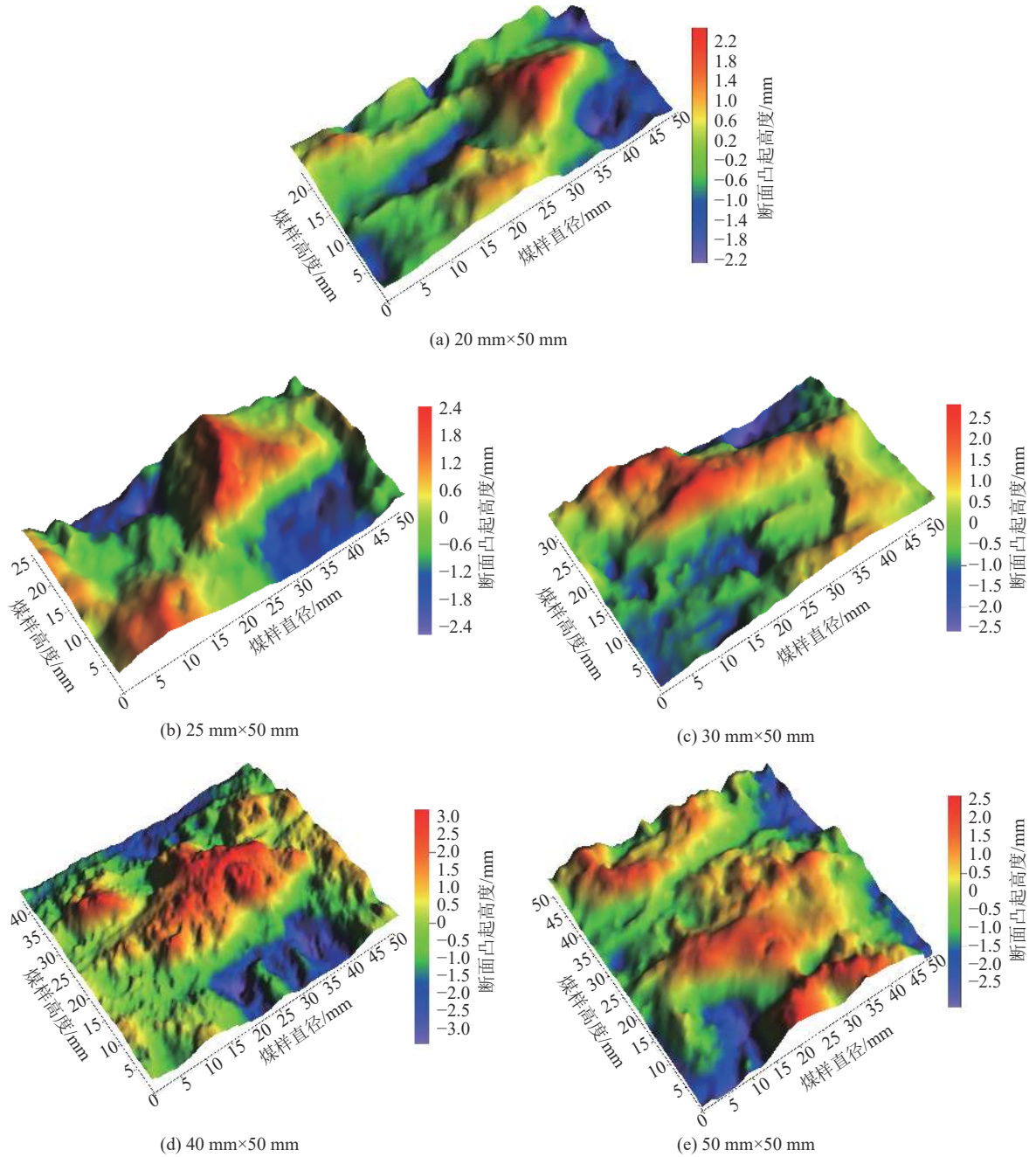


图 12 不同高径比煤样破断面形貌特征

Fig.12 Fracture surface morphology of coal samples with different height-diameter ratio

对式(19)取对数并转换得到 Hurst 指数 H :

$$H = \frac{d \lg[R(k)/S(k)]}{d \lg k} \quad (20)$$

另外, Hurst 指数 H 与分形维数 D 之间存在一定关系:

$$D = 3 - H \quad (21)$$

通过对破断面粗糙度高程采用 Hurst 指数方法拟合后得到不同高径比煤样粗糙度高程分形特征, 如图 14 所示。由图 14 可知, 不同高径比煤样破断面粗糙度高程分形维数在 1.410 ~ 1.813 之间变化。

随着高径比的增加, 分形维数呈增大趋势, 说明煤样在 0.4 : 1 至 1 : 1 范围内高径比越小, 煤样破裂后更具复杂性与非线性特征。反之, 高径比越大的煤样其破裂后断面的结构特征越简单。

5 结 论

1) 随着高径比的增加, 试样抗拉强度呈逐渐减小的趋势, 对应的宏观破坏逐渐由拉-剪混合多裂纹主导的复杂破坏模式演变为单一断面主导的拉伸破坏模式。

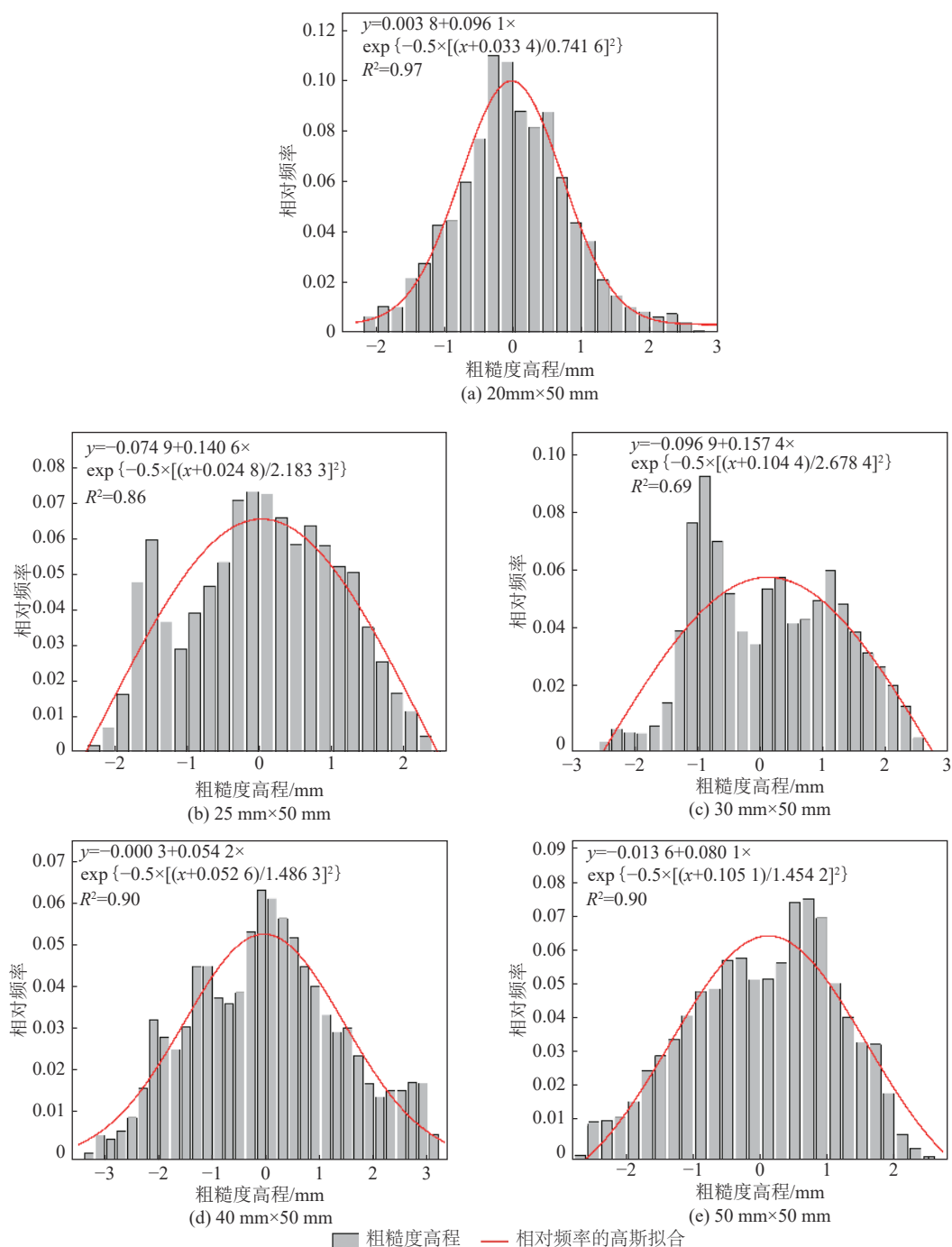


图13 不同高径比煤样破断面粗糙度高程分布拟合

Fig.13 Fitting of elevation distribution on fracture surface of coal sample with different height-diameter ratio

2) 随着高径比的增加, 累积声发射能量逐渐增大, 且累积能量曲线的聚丛现象较为显著, 呈阶梯式上升趋势, 另外, 在概率密度云中低 RA 值、高 AF 值区域的参数分布呈逐渐增加趋势, 拉伸裂纹在整个劈裂试验过程中所占比重较大, 拉伸破断模式占主导优势。

3) 随着高径比的增加, 较低应力水平阶段的耗散能占比逐渐增大; 当荷载增至弹性极限时, 耗散能释放量变小; 当煤样趋近破裂阶段时, 弹性应变能与

耗散能占比趋于平稳, 直至煤样趋于破坏, 积聚在煤样内的弹性应变能迅速以耗散能的形式释放, 耗散能占比急剧增加, 煤样内部微裂纹迅速扩展并贯通。

4) 随着高径比的增加, 多重分形谱宽度逐渐增大, 预示着煤样内部结构产生较大的变化, 当高径比为 0.4 : 1 时, $\Delta\alpha$ 达到最小值 2.233, 当高径比增至 1 : 1 时, 多重分形谱宽度为 2.704, Δf 逐渐由 -0.149 增至 0.277, 预示着加载变形破裂过程中小破裂尺度信号占优。另外, 煤样破断面粗糙度高程分形维数

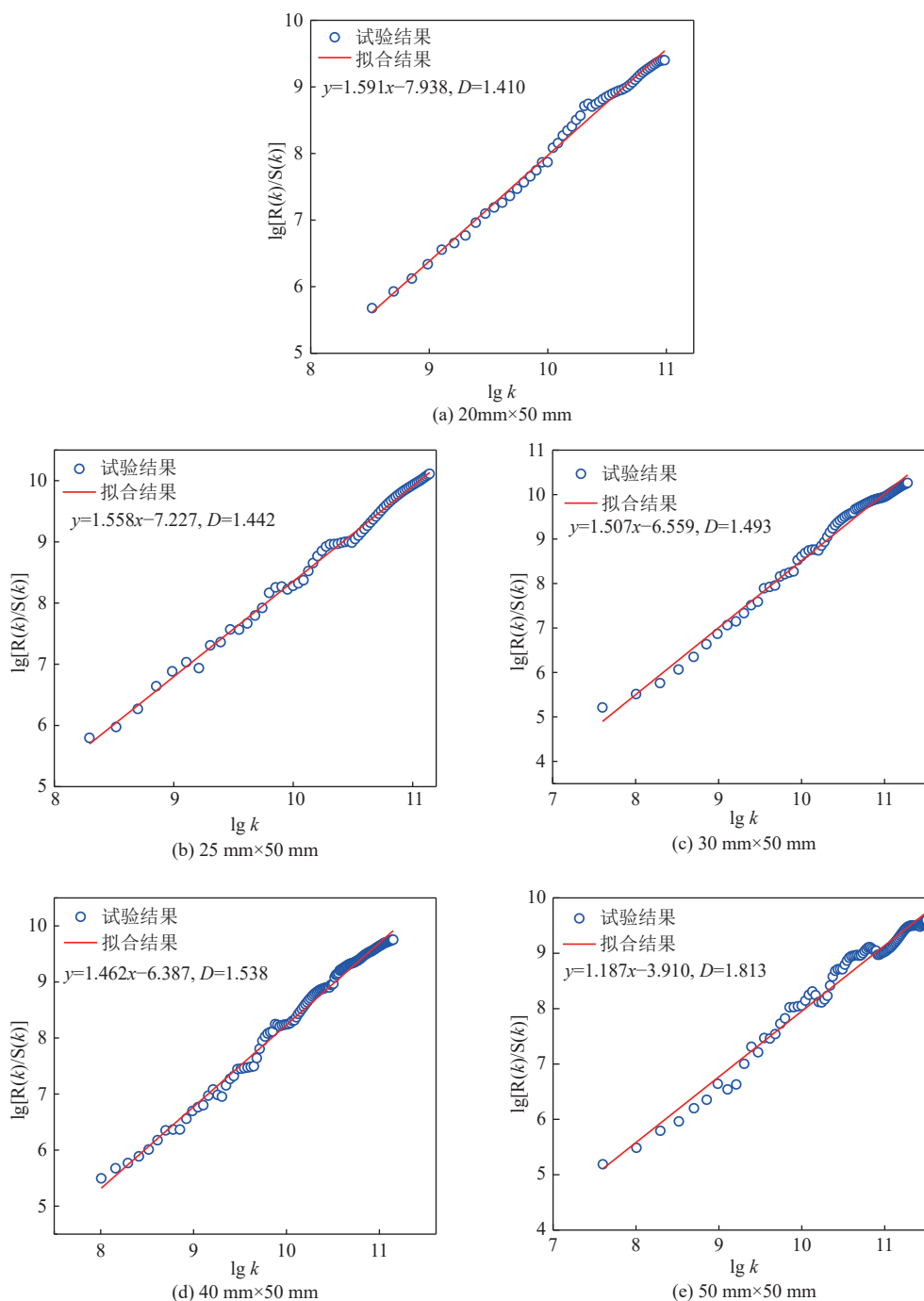


图 14 不同高径比煤样破裂面粗糙度分形特征

Fig.14 Fractal characteristics of fracture surface roughness of coal sample with different height-diameter ratio

由 1.410 增至 1.813, 进一步揭示较小高径比煤样裂纹破断机制较复杂。

参考文献(References):

- [1] HU Shanchao, TAN Yunliang, ZHOU Hui, *et al.* Impact of bedding planes on mechanical properties of sandstone[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(8): 2243–2251.
- [2] 何明明, 陈蕴生, 李宁, 等. 单轴循环荷载作用下砂岩变形特性与能量特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8): 1805–1812.
HE Mingming, CHEN Yunsheng, LI Ning, *et al.* Deformation

characteristics and energy characteristics of sandstone under uniaxial cyclic loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1805–1812.

- [3] 刘保县, 黄敬林, 王泽云, 等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(S1): 3234–3238.
LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, *et al.* Research on damage evolution and acoustic emission characteristics of coal and rock under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S1): 3234–3238.
- [4] 刘斌, 赵毅鑫, 张汉, 等. 单轴压缩及劈裂试验下煤的声发射特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 613–621.

- LIU Bin, ZHAO Yixin, ZHANG Han, *et al.* Study on acoustic emission characteristics of coal under uniaxial compression and splitting tests[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 613–621.
- [5] 张庆贺, 袁亮, 杨科, 等. 深井煤岩动力灾害的连续卸压开采防治机理[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(1): 80–86.
- ZHANG Qinghe, YUAN Liang, YANG Ke, *et al.* Mechanism analysis on continuous stress-relief mining for preventing coal and rock dynamic disasters in deep coal mines[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(1): 80–86.
- [6] 付军辉, 黄炳香, 刘长友, 等. 煤试样巴西劈裂的声发射特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(4): 25–28.
- FU Junhui, HUANG Bingxiang, LIU Changyou, *et al.* Study on acoustic emission characteristics of Brazilian splitting of coal samples[J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(4): 25–28.
- [7] 余伟健, 潘豹, 李可, 等. 岩-煤-岩组合体力学特性及裂隙演化规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(03): 1155–1167.
- YU Weijian, PAN Bao, LI Ke, *et al.* Mechanical properties and fracture evolution law of rock coal rock combination[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(03): 1155–1167.
- [8] POULSEN B A, ADHIKARY D P. A numerical study of the scale effect in coal strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 63: 62–71.
- [9] MOHAMMAD H, BAHMAN B, Alireza N, *et al.* Size effect in strength assessment by indentation testing on rock fragments[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 65(1): 141–148.
- [10] 赵光明, 周俊, 孟祥瑞, 等. 高径比差异条件下花岗岩岩石动态冲击压缩特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(7): 1392–1401.
- ZHAO Guangming, ZHOU Jun, MENG Xiangrui, *et al.* Dynamic impact compression characteristics of granite rocks with different length-diameter ratios[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(7): 1392–1401.
- [11] LI Kaihui, CHENG Yungming, YIN Zhenyu, *et al.* Size effects in a transversely isotropic rock under Brazilian tests: laboratory testing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(6): 2623–2642.
- [12] MA Dan, WANG Jiajun, CAI Xin, *et al.* Effects of height/diameter ratio on failure and damage properties of granite under coupled bending and splitting deformation[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 220: 106640.
- [13] 陈瑜, 黄永恒, 曹平, 等. 不同高径比时软岩强度与变形尺寸效应试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(3): 1073–1078.
- CHEN Yu, HUANG Yongheng, CAO Ping, *et al.* Experimental study on the strength and deformation size effect of soft rock under different aspect ratios[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(3): 1073–1078.
- [14] 朱其志, 闵中泽, 王岩岩, 等. 粉砂岩三轴压缩试验中的试样尺寸效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S2): 3296–3303.
- ZHU Qizhi, MIN Zhongze, WANG Yanyan, *et al.* Study on sample size effect in siltstone triaxial compression test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S2): 3296–3303.
- [15] 肖晓春, 刘海燕, 丁鑫, 等. 单向卸载条件下组合煤岩力学特性及声发射演化规律[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(11): 71–83.
- XIAO Xiaochun, LIU Haiyan, DING Xin, *et al.* Mechanical properties and acoustic emission evolution law of combined coal and rock under unidirectional unloading conditions [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(11): 71–83.
- [16] YIN Dawei, CHEN Shaojie, GE Yao, *et al.* Mechanical properties of rock-coal bi-material samples with different lithologies under uniaxial loading[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 10: 322–338.
- [17] 王磊, 袁秋鹏, 谢广祥, 等. 冲击载荷下煤样能量耗散与破碎分形的长径比效应[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(4): 1534–1546.
- WANG Lei, YUAN Qiupeng, XIE Guangxiang, *et al.* The aspect ratio effect of energy dissipation and fractal fragmentation of coal samples under impact load[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1534–1546.
- [18] KONG Xiaoxuan, LIU Quansheng, LU Haifeng, *et al.* Effects of rock specimen size on mechanical properties in laboratory testing[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(5): 66–74.
- [19] 刘刚, 肖福坤, 秦涛. 小尺寸效应下岩石力学特性及声发射规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S2): 3905–3917.
- LIU Gang, XIAO Fukun, QIN Tao. Rock mechanics characteristics and acoustic emission law under small size effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S2): 3905–3917.
- [20] LEI Ruide, TAN Yunlinag, BERTO Filippo, *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.
- [21] 赵光明, 刘之喜, 孟祥瑞, 等. 高径比对砂岩能量积聚与耗散试验及分析方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1110–1121.
- ZHAO Guangming, LIU Zhixi, MENG Xiangrui, *et al.* Test and analysis method of energy accumulation and dissipation in sandstone by height-diameter ratio[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1110–1121.
- [22] 张亮, 王桂林, 雷瑞德, 等. 单轴压缩下不同长度单裂隙岩体能量损伤演化机制[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 24–34.
- ZHANG Liang, WANG Guilin, LEI Ruide, *et al.* Evolution mechanism of energy damage of different length single fracture rock mass under uniaxial compression[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(1): 24–34.
- [23] AGGELIS D. G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters[J]. *Mechanics Research Communications*, 2011, 38(3): 153–157.
- [24] ALDAHDOOH M., MUHAMAMD B. N. Crack classification in reinforced concrete beams with varying thicknesses by mean of acoustic emission signal features[J]. *Geotechnical Test Journal*, 2016, 39(4): 673–687.

- [25] LIAN Shuailong, ZHENG Kun, ZHAO Yu, *et al.* Investigation the effect of freeze–thaw cycle on fracture mode classification in concrete based on acoustic emission parameter analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 362: 129789.
- [26] HU Shaobin, WANG Enyuan, LI Zhonghui, *et al.* Time-varying multifractal characteristics and formation mechanism of loaded coal electromagnetic radiation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(5): 1821–1838.
- [27] TAN Jingqiang, HU Cheng, LYU Qiao, *et al.* Multi-fractal analysis for the AE energy dissipation of CO₂ and CO₂+ brine/water treated low-clay shales under uniaxial compressive tests[J]. *Fuel*, 2019, 246: 330–339.
- [28] HOU Xiaowei, ZHU Yanming, CHEN Shangbin, *et al.* Investigation on pore structure and multifractal of tight sandstone reservoirs in coal bearing strata using LF-NMR measurements[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 187: 106757.
- [29] LIU Jie, LI Qiuping, WANG Xiaoran, *et al.* Dynamic multifractal characteristics of acoustic emission about composite coal-rock samples with different strength rock[J]. *Chaos, Solitons and Fractals; the interdisciplinary journal of Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena*, 2022, 164: 112725.
- [30] 陈世江, 朱万成, 于庆磊, 等. 基于多重分形特征的岩体结构面剪切强度研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 703-710.
- CHEN Shijiang, ZHU Wancheng, YU Qinglei, *et al.* Research on shear strength of rock mass discontinuity based on multifractal characteristics [J] *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(3): 703-710.
- [31] ZHANG Xin, LI Zhonghui, WANG Xiaoran, *et al.* Thermal effect on the fracture behavior of granite using acoustic emission and digital image correlation: An experimental investigation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 121: 103540.
- [32] YANG Pengjin, MIAO Shengjun, MA Yuting, *et al.* Multi-dimensional non-uniform deformation and failure of siltstone determined using acoustic, 3D-digital image correlation, and computed tomography[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 125: 103800.