基于三点弯曲试验的花岗岩力学行为与声发射特征研究*

丁战兵[1],杜坤[2],王萍[1],周健[2],罗鑫尧[2]

(1.中电建路桥集团有限公司, 北京 100048;
2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:为揭示深部开采中花岗岩顶板的张拉破裂与失稳垮塌机制,选取细粒罗田花岗岩、粗粒黄金麻花岗岩与中粒云浮花岗岩三类试样开展了三点弯曲试验,结合声发射监测技术,对其弯曲强度、主频分布、损伤演化及裂纹扩展模式进行了系统研究。研究结果表明,花岗岩弯曲强度呈现显著的粒径效应,细粒罗田花岗岩强度最高,达17.79 MPa,峰后应力骤降,呈脆性断裂;粗粒黄金麻花岗岩强度最低,为5.33 MPa,表现出显著的延性特征;中粒云浮花岗岩强度介于二者之间,为16.04 MPa,峰后表现出脆-延转化行为。声发射主频信号集中出现在邻近峰值载荷附近及峰后阶段,形成0～40 kHz、50～80 kHz与130～180 kHz三条主要频带,罗田花岗岩在峰前高频信号(130～180 kHz)激增,而黄金麻花岗岩与云浮花岗岩主频集中于峰后低频带(0～40 kHz)。花岗岩的损伤演化均经历初始损伤、稳定发展与加速发展3个阶段,且损伤累积高度集中于峰后阶段,其中黄金麻花岗岩峰后阶段的损伤占比最高,罗田花岗岩单位损伤释放应变能最大。*RA-AF* 裂纹模式分析表明,试样破坏以拉伸裂纹为主,拉伸裂纹比例与矿物粒径呈负相关,罗田花岗岩拉伸裂纹占比较云浮与黄金麻花岗岩,分别高3.17,6.15个百分点。基于主频信号的顶板失稳量化预警方法,可为深部开采顶板稳定性评价与动力灾害防控提供理论依据与工程指导。

关键词:花岗岩;三点弯曲试验;声发射特征;粒径效应;破裂机制;*RA-AF* 分析

中图分类号:TD324 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0206-09

Study on Mechanical Behavior and Acoustic Emission Characteristics of Granite Based on Three-Point Bending Test

Ding Zhanbing[1], *Du Kun*[2], *Wang Ping*[1], *Zhou Jian*[2], *Luo Xinyao*[2]

(1.Power China Road Bridge Group Co., Ltd., Beijing, 100048, China;
2.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: To reveal the tensile fracture and instability collapse mechanism of granite roofs in deep mining, three types of samples, namely fine-grained Luotian granite, coarse-grained Golden Ma granite, and medium-grained Yunfu granite, were selected for three-point bending tests. Combined with acoustic emission monitoring technology, the bending strength, dominant frequency distribution, damage evolution, and crack propagation patterns were systematically investigated. The results show that the bending strength of granite exhibits a significant particle size effect. The fine-grained Luotian granite has the highest strength of 17.79 MPa, with a sudden post-peak stress drop indicating brittle fracture. The coarse-grained Golden Ma granite has the lowest strength of 5.33 MPa, showing pronounced ductility characteristics. The strength of medium-grained Yunfu granite lies between the above two rock types, reaching 16.04 MPa, and exhibits brittle-ductile transition behavior after the peak. The dominant frequency signals of acoustic emission mainly appear near the peak load and in the post-peak stage, forming three main frequency bands of 0-40 kHz, 50-80 kHz, and 130-180 kHz. The high-frequency signals (130-180 kHz) of Luotian granite surge before the peak, while the dominant frequencies of Golden Ma granite and Yunfu granite are concentrated in the low-frequency band (0-40 kHz) after the peak. The damage evolution of granite undergoes three stages: initial damage, stable development, and accelerated development. Damage accumulation is highly concentrated in the post-peak stage. Golden Ma granite has the highest damage proportion in the post-peak stage, and Luotian granite releases the largest strain energy per unit damage. *RA-AF* crack mode analysis indicates that the failure of the samples is dominated by tensile cracks, and the

* **收稿日期**:2025-07-21
基金项目:国家自然科学基金项目(52374150)
作者简介:丁战兵(1984—),男,河南商丘人,工程师,主要从事砂石厂开采技术设计与经济管理等方面的研究工作。E-mail:1225101112@qq.com
通信作者:罗鑫尧(1999—),男,湖南株洲人,博士研究生,主要从事岩体深部开采与岩石力学等方面的研究工作。E-mail:245501024@csu.edu.cn

proportion of tensile cracks is negatively correlated with mineral grain size. The proportion of tensile cracks in Luotian granite is 3.17 and 6.15 percentage points higher than that in Yunfu and Golden Ma granite, respectively. The quantitative early warning method for roof instability based on dominant frequency signals can provide a theoretical basis and engineering guidance for roof stability evaluation and dynamic disaster prevention and control in deep mining.

Key words: Granite, Three-point bending test, Acoustic emission characteristic, Particle size effect, Fracture mechanism, *RA-AF* analysis

0 引言

深部矿产资源开采是我国能源与原材料供应的重要保障,然而随着开采深度与强度的持续增加,工程岩体所处的应力环境日趋复杂,由此引发的顶板垮塌、岩爆等动力灾害严重威胁井下作业人员安全、设备完好性与生产持续性[1-3]。花岗岩类坚硬脆性岩层在采动应力作用下,易产生突发性张拉破裂或失稳垮落;而高地应力区的完整硬岩在开挖卸荷瞬间会猛烈释放积聚的应变能,诱发破坏性极强的岩爆灾害[4-7]。这两类灾害的物理本质均与硬岩在复杂应力路径下的破裂萌生、扩展直至贯通失稳过程密切相关。因此,深入探究硬岩的破裂力学行为及其灾变前兆特征,是开展顶板稳定性评价与垮塌风险精准预测的理论基础与关键前提。

声发射(Acoustic Emission, AE)技术作为一种实时、原位、无损的岩石微破裂监测手段,能够灵敏地捕捉岩石内部损伤演化过程中伴随的弹性波释放信号,其丰富的特征参数与岩石内部微裂纹活动、损伤积累及宏观破裂模式存在密切的物理关联,被公认为是揭示岩石破坏机理、识别灾变预警前兆信息的有效工具[8]。赵兴东等[9]通过单轴压缩试验研究了花岗岩破裂全过程的声发射特征,分析了不同加载阶段声发射活动规律与裂纹扩展的空间演化特征。蒋海昆等[10]利用三轴试验系统,研究了不同围压条件下花岗岩变形破坏过程中的声发射时序演化特征。陈亮等[11]对比了北山深部花岗岩在拉伸、单轴压缩及三轴压缩等不同应力状态下的声发射特征,揭示了岩石变形、强度、裂隙扩展与声发射特征的内在联系。张志镇等[12]结合单轴压缩试验与声发射监测,研究了不同温度下花岗岩试件的纵波波速变化规律,以及应力-应变曲线与声发射特征的相关性。储超群等[13]通过单轴压缩岩爆试验,结合声发射技术分析了花岗岩破裂特征,发现花岗岩在单轴加载下的岩爆破坏以张拉破裂为主。

然而,当前针对岩石声发射特征的研究多集中于单轴、三轴压缩等传统加载模式,而三点弯曲加载试验更贴合实际工程中岩梁弯曲、顶板下沉与应力集中区张性破裂特征的实际受力状态。邓朝福等[14]开展了不同含水状态下花岗岩的三点弯曲试验,分析了其断裂力学行为与声发射特征。梁鹏等[15]通过三点弯曲试验探究了花岗岩试样的声发射横波、纵波特征及损伤演化规律。刘玉春等[16]针对完整及预制裂纹花岗岩开展三点弯曲试验,分析了岩石变形破裂过程中的电荷感应信号、微震信号及声发射信号特征。左建平等[17]采用带加载 SEM 的高温试验系统对北山花岗岩进行三点弯曲试验,研究了其热处理后的断裂特性。卢浩等[18]通过开展花岗岩和大理岩的三点弯曲试验,研究了不同预制裂缝方法及长度对岩石Ⅰ型断裂韧度的影响。总体来看,现有研究已初步揭示了花岗岩在三点弯曲下的断裂与声发射特征,但针对不同矿物粒径花岗岩在弯曲荷载下的力学响应差异与断裂机制对比研究仍较为薄弱。

综上所述,针对深部开采中花岗岩类顶板长期受拉产生宏观裂纹的工程实际,本研究采用三点弯曲试验,系统开展了粗粒、中粒和细粒花岗岩的弯曲力学行为和声发射特征研究,分析不同矿物粒径花岗岩在弯曲加载过程中的力学特征、损伤演化规律和裂纹扩展特征。研究成果不仅深化了对不同粒径花岗岩类顶板失稳时序的理解,还揭示了花岗岩粒径效应与声发射主频特征之间的内在关联,为深部工程动力灾害防控提供了理论支撑。

1 试验方法

1.1 试样制备

试验选取中国不同产地的三类花岗岩,分别为细粒罗田花岗岩、粗粒黄金麻花岗岩和中粒云浮花岗岩,所有试样的基本物理力学参数见表 1。每类花岗岩制备 3 个平行试样,试样尺寸为 250 mm×50 mm×50 mm(长×宽×高),如图 1 所示。对试样 4 个侧面与上下端面进行打磨抛光处理,控制表面粗糙度小于 0.02 mm。

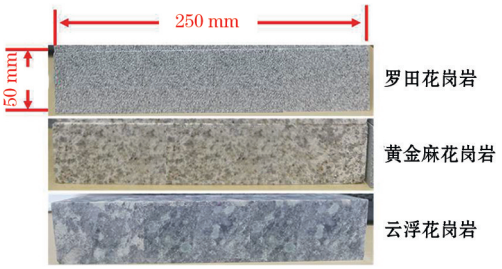


图 1 三类花岗岩试样

Fig.1 Three types of granite samples

表 1 花岗岩试样基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of the granite samples

岩石类别	编号	长/mm	宽/mm	高/mm	密度/(g/cm³)	波速/(m/s)	单轴抗压强度/MPa
罗田(细粒)	1-GWB1	250.96	50.34	50.35			
	1-GWB2	251.10	50.38	50.38	2.47	2 472.58	228.65
	1-GWB3	250.75	50.49	50.40			
黄金麻(粗粒)	2-GWB1	250.74	50.19	50.18			
	2-GWB2	250.69	50.10	50.09	2.43	2 428.17	116.02
	2-GWB3	250.67	50.11	50.19			
云浮(中粒)	3-GWB1	249.65	50.13	50.10			
	3-GWB2	248.68	50.12	49.89	2.49	2 610.74	143.48
	3-GWB3	247.60	49.88	50.15			

1.2 试验系统

三点弯曲试验采用 Instron 1342 电液伺服控制系统,设备负载范围为±250 kN,负载精度为±0.5%,活塞行程为±50 mm。利用声发射传感器和 PCI-2 型声发射数据采集系统,全程监测岩石试件加载过程的声发射信号。声发射前置放大器增益设置为 40 dB,信号采集频率为 5.0 MHz,采样阈值为 40 dB。每块岩样布置 2 个声发射信号传感器,在岩样表面沿前后对称分布,编号为 R1 和 R2。传感器固定在带磁帽的铁环上,以提高声发射监测信号的灵敏度。在试样的下方放置两块垫块,缓冲试样破坏时的冲击,保护加载设备。

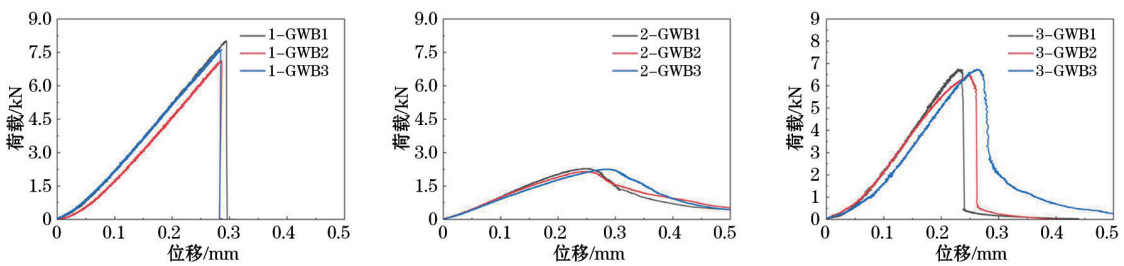
1.3 试验方案

在三点弯曲试验中,每类花岗岩采用 3 组平行试样进行试验,以保证试验结果的合理性与有效性,后续声发射特征分析选取每组试样的代表性数据进行。三点弯曲试验采用位移控制加载方式,试验开始前对试样施加 100 N 预应力,消除接触面间隙摩擦噪声对声发射监测产生的干扰,随后以 0.06 mm/min 的加载速率加载,直至试样完全断裂。试验开始前在每个声发射传感器上均匀涂抹耦合剂,保证传感器与试样紧密贴合。试验后导出各通道声发射信号的时间、幅值、能量、计数、持续时间、峰频等参数。

2 试验结果分析

2.1 花岗岩的力学特征

图 2 为三点弯曲加载下花岗岩试样的荷载-位移曲线,图 3 为花岗岩试样的破坏路径与断口特征图,表 2 统计了各试样在三点弯曲下的峰值荷载、弯曲强度、峰值位移和失稳时刻等力学特征参数。



(a) 罗田花岗岩 (b) 黄金麻花岗岩 (c) 云浮花岗岩

图 2 三点弯曲加载下花岗岩试样的荷载-位移曲线

Fig.2 Load-displacement curves of granite samples under three-point bending loading



(a) 罗田花岗岩 (b) 黄金麻花岗岩 (c) 云浮花岗岩

图 3 花岗岩试样的破坏路径与断口特征

Fig.3 Failure paths and fracture characteristics of granite samples

表 2　花岗岩试样的力学特征参数

Table 2　Mechanical characteristic parameters of granite samples

试样编号	峰值荷载/kN	弯曲强度/MPa	峰值位移/mm	失稳时刻/s
1-GWB1	8 014.9	18.84	0.29	201.80
1-GWB2	7 129.1	16.73	0.28	290.31
1-GWB3	7 615.9	17.81	0.28	341.61
2-GWB1	2 288.9	5.43	0.25	163.40
2-GWB2	2 163.8	5.16	0.24	164.60
2-GWB3	2 268.3	5.39	0.28	190.90
3-GWB1	6 753.7	16.10	0.26	175.80
3-GWB2	6 578.9	15.82	0.25	217.20
3-GWB3	6 888.1	16.21	0.23	264.21

由图 2 和表 2 可知，细粒罗田花岗岩的弯曲强度最高，平均强度为 17.79 MPa，在达到峰值强度后，岩样迅速发生应力跌落而失稳破坏。粗粒黄金麻花岗岩和中粒云浮花岗岩的平均弯曲强度分别为 5.33 MPa 和 16.04 MPa，与罗田花岗岩相比分别降低了 70.04%和 9.84%，在达到峰值强度后应力跌落较为缓慢，表现出一定的延性。结合图 3 中的试样破坏路径与断口特征可知，在三点弯曲加载下，罗田花岗岩的破坏路径近似呈直线，其断口平整光滑；而黄金麻花岗岩和云浮花岗岩的破坏路径呈折线，断口粗糙、起伏较大，表明断裂过程中还伴随着显著的剪切咬合现象。该差异主要源于花岗岩的矿物粒径与成分差异，根据断口观察可知，罗田花岗岩为斑状细粒结构，具有较高弯曲强度，呈现出脆性断裂特征；黄金麻花岗岩和云浮花岗岩的矿物粒径较大且成分组成较差，断口存在大量的矿物粒径凸起和岩屑，导致其抗弯强度较低。

2.2　花岗岩的主频特征

通过快速傅里叶变换将声发射的初始波形从时域转换至频域，可得到能够反映声发射信号频率结构的频谱特征，进而获得声发射信号的主频[19]。图 4 为三点弯曲加载下花岗岩试样的荷载、主频随时间演化的曲线。结果表明，声发射主频信号主要集中在邻近峰值载荷及峰后阶段，整体呈现出 3 条稳定的主频带，分别为 0～40 kHz(低频带)、50～80 kHz(中频带)和 130～180 kHz(高频带)。其中，罗田花岗岩主要激发低频带与高频带信号，且高频带信号密度在邻近峰值载荷时显著增加；黄金麻花岗岩的声发射能量主要集中于低频带，且集中出现在峰后阶段；而云浮花岗岩在三类频带信号均有分布，高频带信号密度在峰值荷载附近达到最大，而后逐渐衰减，低频带与中频带则在加载全过程中持续出现。

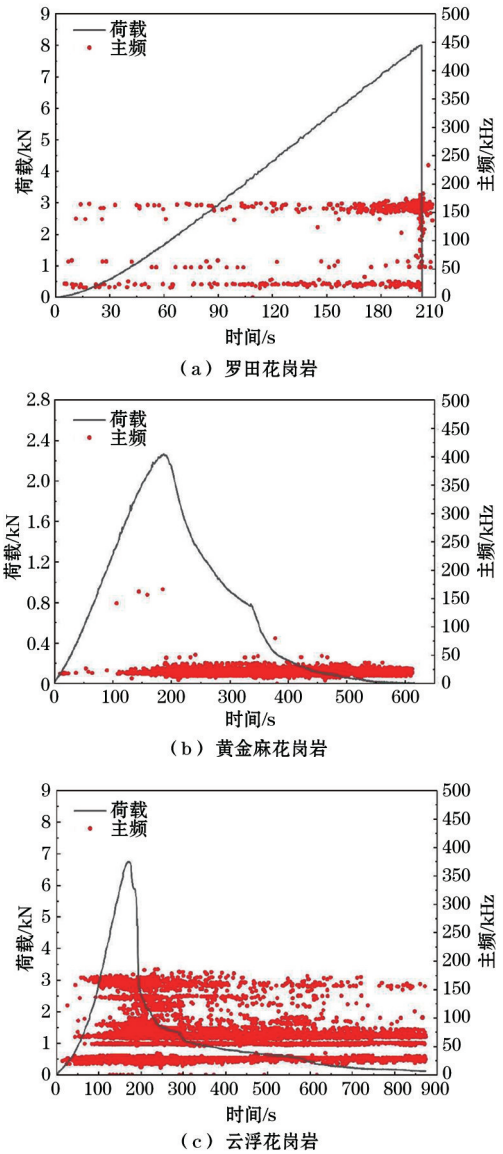


图 4　三点弯曲加载下花岗岩试样的荷载、主频随时间的演化曲线

Fig.4　Evolution curves of load and dominant frequencies over time of granite samples under three-point bending loading

为定量分析主频分布特征，将 0～250 kHz 的声发射主频信号范围以 10 kHz 为单位，划分成 25 个统计区间，对罗田花岗岩、黄金麻花岗岩和云浮花岗岩三类试样的主频分布特征进行分析。图 5 为花岗岩试样在三点弯曲试验过程中的主频分布占比。由图 5 可以看出，罗田花岗岩的主频信号主要分布在 0～40 kHz 和150～175 kHz 频段，占比分别为 20%和

30%。黄金麻花岗岩和云浮花岗岩的主频主要集中在 0～40 kHz 的低频段,占比高达 55%以上,二者在中频段(50～75 kHz)和高频段(150～175 kHz)的分布比例显著偏低。

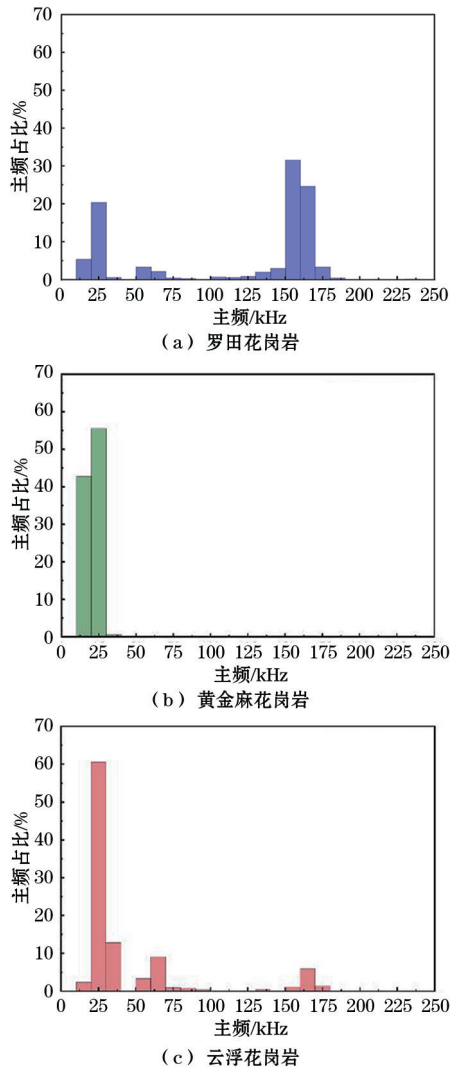


图 5 花岗岩试样的主频分布占比

Fig.5 The proportion of dominant frequencies of granite samples

2.3 花岗岩的损伤演化特征

定义某一时刻的累计声发射计数与总累计声发射计数之比为岩石的损伤程度,由此建立损伤参量 D 和声发射计数 N 之间的关系公式为:

$$D=\frac{N}{N_{\mathrm{m}}} \tag{1}$$

式中:N 为某时刻的累计声发射计数;N_{m} 为总累计声发射计数。

图 6 为花岗岩试样在破坏过程中的荷载、损伤变量及声发射能量随时间的演化曲线。

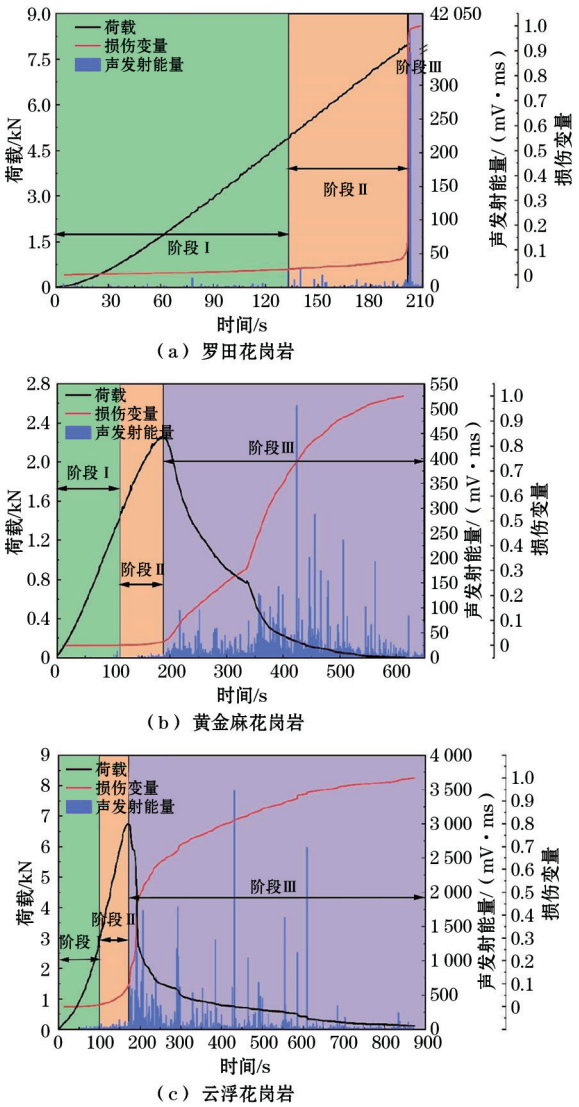


图 6 花岗岩试样的荷载、损伤变量和声发射能量随时间的演化曲线

Fig.6 Evolution curves of load, damage variables and acoustic emission energy over time of granite samples

根据损伤变量曲线和声发射能量的释放特征,可将试样在三点弯曲作用下的破坏过程划分为 3 个阶段:初始损伤阶段(阶段Ⅰ)、损伤稳定发展阶段(阶段Ⅱ)、损伤加速发展阶段(阶段Ⅲ)。在阶段Ⅰ,损伤演化曲线近似水平,声发射能量信号极其稀疏。进入阶段Ⅱ,损伤变量缓慢增长,且增速逐渐加快,同时声发射能量的密度与幅值同步提升。至阶段Ⅲ时,损伤变量由缓慢增长转变为急剧上升,同时伴随产生显著的声发射能量。对比三类花岗岩试样的损伤演化规律可知,罗田花岗岩在阶段Ⅰ和阶段Ⅱ的损伤变量增量极小,声发射能量释放也极少,进入阶段Ⅲ后,其损伤变量呈指数型急剧陡升,同时释放出大量的声发射能

量。黄金麻花岗岩与云浮花岗岩的损伤主要发生在阶段Ⅲ，该阶段占据了整个破坏过程的大部分时间。相较于罗田花岗岩，二者表现出更显著的峰后损伤效应，损伤演化曲线呈对数型缓慢增长。声发射能量增幅偏低，但具有较高的密度。

为进一步量化三类花岗岩试样损伤变量与声发射能量的阶段差异，统计各试样中阶段Ⅰ、阶段Ⅱ和阶段Ⅲ的声发射能量占比及损伤占比，统计结果见表 3。

表 3　花岗岩试样在各阶段的声发射能量和损伤占比

Table 3　Proportions of acoustic emission energy and damage of granite samples at each stage

试样编号	能量占比/%			损伤占比/%		
	阶段Ⅰ	阶段Ⅱ	阶段Ⅲ	阶段Ⅰ	阶段Ⅱ	阶段Ⅲ
1-GWB1	2.16	10.29	87.55	0.24	0.83	98.93
1-GWB2	3.35	10.21	86.44	0.28	1.12	98.60
1-GWB3	2.55	10.82	86.63	0.55	1.21	98.24
平均值	2.69	10.44	86.87	0.36	1.05	98.59
2-GWB1	0.35	1.32	98.33	0.15	0.86	98.99
2-GWB2	0.68	2.15	97.17	0.05	0.63	99.32
2-GWB3	0.14	1.62	98.24	0.07	0.44	99.49
平均值	0.39	1.70	97.91	0.09	0.64	99.27
3-GWB1	0.87	9.43	89.70	0.47	4.95	94.58
3-GWB2	0.92	10.25	88.83	0.53	5.15	94.32
3-GWB3	1.01	9.84	89.15	0.61	6.48	92.91
平均值	0.93	9.84	89.23	0.54	5.53	93.94

由表 3 可知，所有花岗岩试样的损伤均高度集中于阶段Ⅲ（损伤加速发展阶段），其中黄金麻花岗岩在阶段Ⅲ的损伤占比平均值达 99.27%，损伤累积几乎完全发生在峰后阶段。声发射能量同样以阶段Ⅲ为主导，但三类花岗岩试样存在显著差异，黄金麻花岗岩在阶段Ⅲ的声发射能量占比最高，平均值为 97.91%，云浮花岗岩次之，为 89.23%，罗田花岗岩最低，为 86.87%。阶段Ⅰ（初始损伤阶段）的影响较小，三类岩样的损伤占比平均值不超过 0.54%，声发射能量占比不超过 2.69%。

阶段Ⅱ（损伤稳定发展阶段）的特征分化最为显著，云浮花岗岩在此阶段的损伤占比平均值为 5.53%，远高于罗田花岗岩的 1.05%和黄金麻花岗岩的0.64%；云浮花岗岩在此阶段的声发射能量占比为 9.84%，罗田花岗岩为 10.44%，黄金麻花岗岩仅为 1.70%。统计结果表明，云浮花岗岩在稳定发展阶段已累积一定程度的损伤，罗田花岗岩在加速发展阶段损伤累积与能量释放最为剧烈，黄金麻花岗岩则表现出最极端的峰后损伤集中特性。

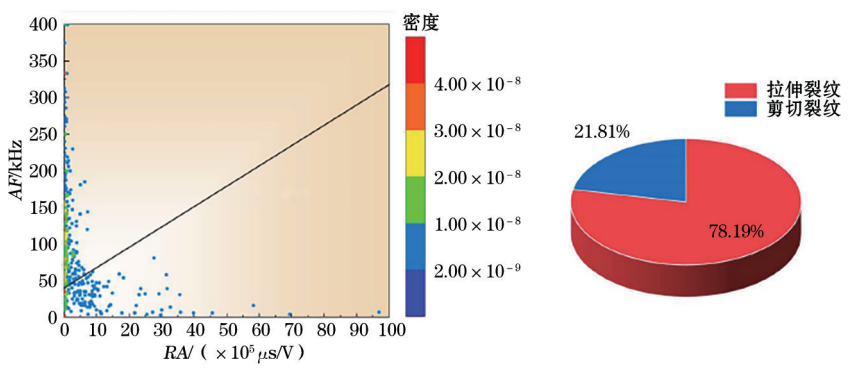
尽管三类岩样的损伤均集中于阶段Ⅲ，但各类岩样的能量-损伤演化模式存在本质差异。细粒罗田花岗岩因脆性断面的弹性储能集中释放，单位损伤对应的能量释放强度显著更高。粗粒黄金麻花岗岩的损伤累积呈对数缓增模式，与低频声发射的持续释放相耦合（见图 4(b)），体现了颗粒间摩擦耗能的渐进特性。中粒云浮花岗岩介于二者之间，且在阶段Ⅱ的损伤占比远高于其他两种花岗岩，表明中粒花岗岩在稳定发展阶段已积累一定程度的微破裂。上述能量-损伤演化的差异可为预测不同粒径花岗岩类顶板的失稳时序提供理论基础。

2.4　花岗岩的 *RA-AF* 分布特征

通过分析三点弯曲条件下花岗岩的 *RA-AF* 分布特征，可有效判别花岗岩试样内部的裂纹类型及破坏模式[20-22]。通常来讲，拉伸裂纹对应高 *AF* 值（平均频率）与低 *RA* 值（上升时间/幅值比）的分布特征，剪切裂纹则对应低 *AF* 值、高 *RA* 值的特性。对于拉-剪裂纹分界线的界定，本文采用 Du 等[23]基于遗传算法处理声发射频域特征参数，提出的花岗岩裂纹分界线方程：

$$AF=2.78\times10^{-5}RA+40 \tag{1}$$

基于该分界线对三类花岗岩试样的 *RA-AF* 数据进行分类统计，得到各自的拉伸与剪切裂纹占比。图 7 为罗田花岗岩、黄金麻花岗岩与云浮花岗岩试样的 *RA-AF* 分布特征及拉-剪裂纹占比。



（a）罗田花岗岩

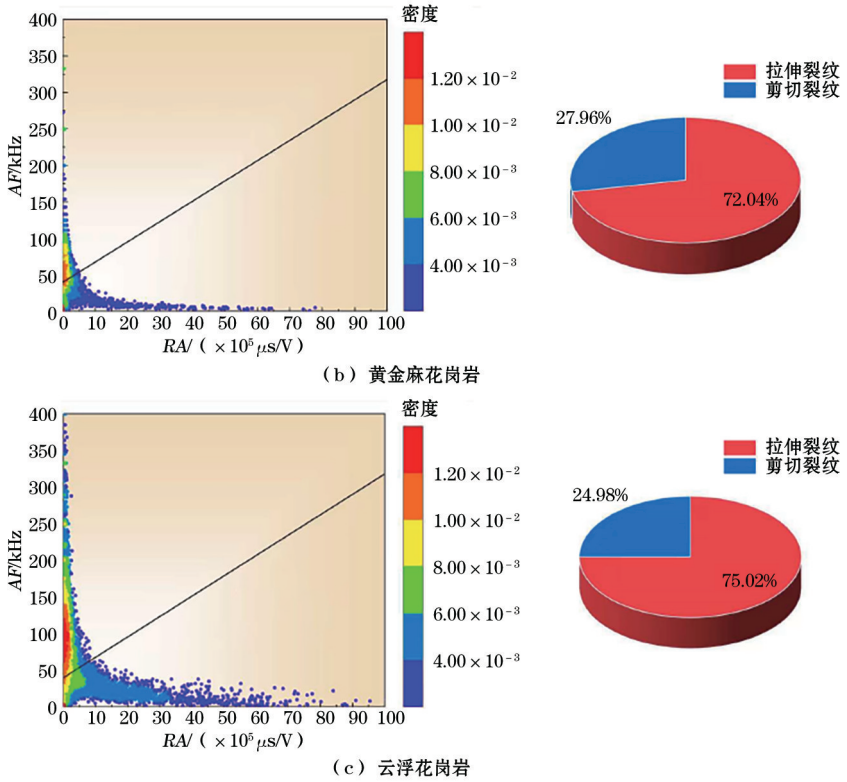


图 7 花岗岩试样的 *RA-AF* 分布特征与裂纹占比

Fig.7 Distribution characteristics of *RA-AF* and the crack proportion of granite samples

分析可知,三类花岗岩试样的 *AF-RA* 数据点均沿 *AF* 轴集中分布,高密度核心区位于拉-剪裂纹分界线上方,表明三点弯曲加载下岩样内部产生的裂纹以拉伸型裂纹为主。其中,罗田花岗岩试样的拉伸裂纹占比最高,较黄金麻花岗岩和云浮花岗岩试样分别高出 6.15,3.17 个百分点。这种差异与岩石的断裂机制密切相关:黄金麻花岗岩与云浮花岗岩试样的峰后变形更为显著,岩样失稳导致裂纹急速扩展,伴随高能量释放的穿晶破坏[24],该过程更易萌生剪切裂纹。整体来看,拉伸裂纹占比与岩石粒径呈显著负相关性,粒径越细,岩样的拉伸裂纹比例越高。

3 讨论

三类花岗岩试样的弯曲破坏行为表现出显著的粒径效应,其内在机制可通过断面结构特征与声发射响应的耦合关联进行揭示。细粒罗田花岗岩的高弯曲强度源于晶界密集分布,密集的晶界引发明显的应力集中效应。如图 3(a)所示,罗田花岗岩试样断口平整光滑,表明裂纹沿晶界快速扩展,形成典型的Ⅰ型张拉断裂。该结构特性不仅导致峰前 130～180 kHz 高频声发射激增(见图 4(a)),也使得损伤能高度集中于峰后瞬间释放。与之相反,粗粒黄金麻花岗岩试样的延性破坏表现为峰后荷载缓降(见图 2(b)),其粗糙的断口表明,裂纹扩展需绕过大尺寸石英和长石晶体,矿物界面的摩擦滑移持续耗散能量,因此以 0～40 kHz 低频声发射信号为主(见图 4(b))。该机制使得 99.27%损伤累积于峰后阶段,且损伤演化曲线的增长速率远低于细粒花岗岩,体现了粗粒花岗岩发生延性破坏的能量耗散本质。

声发射主频带的分布特征进一步印证了粒径对破裂机制的影响(见图 5)。150～175 kHz 的高频带与晶粒内部脆性断裂密切相关,其在细粒花岗岩中占比达 30%,且峰前密度突增,可作为细粒顶板脆断的可靠前兆。相比之下,粗粒花岗岩中高频带信号占比极低,0～40 kHz 的低频带占比超 55%,与断口咬合的宏观特征相互印证,反映了宏观摩擦滑移为主导的声波释放规律。中粒云浮花岗岩表现出明显的过渡特征,全频段信号持续活跃,但高频信号在峰后快速衰减,体现了粒径对频谱特性产生的梯度影响。

上述研究成果可为深部工程灾害防控提供创新

策略。针对细粒花岗岩顶板,当 130～180 kHz 的高频信号突增至日常均值的 2～3 倍时,应及时采取吸能支护措施,如阻尼器配合柔性金属网,以耗散瞬时冲击能。针对粗粒花岗岩顶板,若 0～40 kHz 的低频信号持续活跃超 60 s,则提示存在渐进失稳风险,需采用预应力锚索搭配 W 钢带的支护方案,以抑制剪切滑移。通过建立粒径-声发射特征的关联体系,可将顶板稳定性评价从经验判断提升至量化预警层面,为深部开采动力灾害防控提供理论支撑与技术路径。

4 结论

本文以细粒罗田花岗岩、中粒云浮花岗岩和粗粒黄金麻花岗岩为研究对象,开展三点弯曲试验同步采集声发射信号,对比了不同粒径花岗岩的断裂机制、力学特性和声发射特征,得出以下主要结论。

(1) 不同粒径花岗岩弯曲强度差异显著。细粒罗田花岗岩强度最高,为 17.79 MPa,峰后应力骤降,呈典型脆性断裂特征;中粒云浮花岗岩次之,为 16.04 MPa;粗粒黄金麻花岗岩最低,仅为 5.33 MPa,表现为峰后缓降的延性破坏特征,断口粗糙且伴有明显剪切咬合现象。

(2) 花岗岩试样的声发射主频集中于峰前和峰后阶段,整体形成 0～40 kHz、50～80 kHz、130～180 kHz 三条频带,频谱特性随粒径差异明显。罗田花岗岩以低频和高频为主,峰前高频密度显著激增;黄金麻花岗岩超 55%能量集中于低频带,且主要出现于峰后阶段;云浮花岗岩全频段均较为活跃,高频在峰后迅速衰减。

(3) 试样在三点弯曲作用下的破坏过程划分为三个阶段:初始损伤阶段(阶段Ⅰ)、损伤稳定发展阶段(阶段Ⅱ)、损伤加速发展阶段(阶段Ⅲ)。花岗岩试样损伤累积主要集中于阶段Ⅲ,此阶段黄金麻花岗岩损伤占比达 99.27%,峰后损伤集中效应显著;罗田花岗岩在阶段Ⅲ的损伤占比为 98.59%,但能量占比仅为 86.87%,单位损伤释能更高;云浮花岗岩在阶段Ⅱ的损伤占比达 5.53%,显著高于罗田花岗岩和黄金麻花岗岩,表明中粒结构破坏过程更为平缓。

(4) 三点弯曲作用下,花岗岩破裂以拉伸裂纹为主导。细粒罗田花岗岩拉伸裂纹比例最高,较云浮花岗岩和黄金麻花岗岩分别高出 3.17, 6.15 个百分点。中粒、粗粒花岗岩峰后失稳伴随穿晶破坏,剪切裂纹增加,总体表现为拉伸裂纹比例随粒径增大而减小、剪切裂纹比例随粒径增大而增大的趋势。

参考文献(References):

[1] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
Li Xibing, Zhou Jian, Wang Shaofeng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.

[2] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华,等.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua, et al. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.

[3] 李夕兵,姚金蕊,宫凤强,等.硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2551-2563.
Li Xibing, Yao Jinrui, Gong Fengqiang, et al. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2551-2563.

[4] 杜坤,杨颂歌,苏睿,等.不同应力条件下硬岩强度与破裂特性试验研究[J].黄金科学技术,2021,29(3):372-381.
Du Kun, Yang Songge, Su Rui, et al. Experimental study on strength and fracture characteristics of hard rock under different stress conditions[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(3): 372-381.

[5] 孙闯,陈东旭,程耀辉,等.急倾斜煤层坚硬顶板塌落规律及控制研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(8):1647-1658.
Sun Chuang, Chen Dongxu, Cheng Yaohui, et al. Study on collapse rule and control of hard roofs in steeply inclined coal seams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(8): 1647-1658.

[6] 冯夏庭,肖亚勋,丰光亮,等.岩爆孕育过程研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):649-673.
Feng Xiating, Xiao Yaxun, Feng Guangliang, et al. Study on the development process of rockbursts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 649-673.

[7] 苗金丽,何满潮,李德建,等.花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1593-1603.
Miao Jinli, He Manchao, Li Dejian, et al. Acoustic emission characteristics of granite under strain rockburst test and its micro-fracture mechanism [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1593-1603.

[8] 张平松,刘畅,姚多喜,等.岩石试件受载破裂过程地球物理参数测试研究进展和展望[J].工程地质学报,2025,33(2):426-446.
Zhang Pingsong, Liu Chang, Yao Duoxi, et al. Progress and prospects of testing geophysical parameters during loaded rupture of rock specimens [J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 426-446.

[9] 赵兴东,唐春安,李元辉,等.花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2006(增刊2):3673-3678.
Zhao Xingdong, Tang Chun'an, Li Yuanhui, et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006(Suppl.2):3673-3678.

[10] 蒋海昆,张流,周永胜,等.不同围压条件下花岗岩变形破坏过程中的声发射时序特征[J].地球物理学报,2000(6):812-826.
Jiang Haikun, Zhang Liu, Zhou Yongsheng. Behavior of acoustic emission time sequence of granite in deformation and failure process under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geophysics,2000(6):812-826.

[11] 陈亮,刘建锋,王春萍,等.北山深部花岗岩不同应力状态下声发射特征研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增刊2):3618-3624.
Chen Liang, Liu Jianfeng, Wang Chunping, et al. Study of acoustic emission characteristics of Beishan deep granite under different stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(Suppl.2):3618-3624.

[12] 张志镇,高峰,徐小丽,等.花岗岩单轴压缩的声发射特征及热力耦合模型[J].地下空间与工程学报,2010,6(1):70-74.
Zhang Zhizhen, Gao Feng, Xu Xiaoli, et al. Acoustic emission characteristics and thermodynamic coupling model of granite under uniaxial compression [J]. Journal of Underground Space and Engineering,2010,6(1):70-74.

[13] 储超群,吴顺川,曹振生,等.基于声发射技术的花岗岩破裂特征试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2919-2932.
Chu Chaoqun, Wu Shunchuan, Cao Zhensheng, et al. Experimental research on fracture characteristics of granite with acoustic emission technology [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(8):2919-2932.

[14] 邓朝福,刘建锋,陈亮,等.不同含水状态花岗岩断裂力学行为及声发射特征[J].岩土工程学报,2017,39(8):1538-1544.
Deng Chaofu, Liu Jianfeng, Chen Liang, et al. Mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of fracture ofgranite under different moisture conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(8):1538-1544.

[15] 梁鹏,刘俊岭,李壮,等.三点弯曲试验条件下花岗岩声发射横纵波特征及损伤演化[J].应用声学,2023,42(4):700-709.
Liang Peng, Liu Junling, Li Zhuang, et al. Acoustic emission S-wave and P-wave characteristics and damage evolution of granite under three-point bending test [J]. Journal of Applied Acoustics,2023,42(4):700-709.

[16] 刘玉春,潘一山,赵扬锋,等.三点弯曲正长花岗岩的多参量信号特征试验研究[J].实验力学,2023,38(2):254-266.
Liu Yuchun, Pan Yishan, Zhao Yangfeng, et al. Experimental study on multi-parameter signal characteristics of syenogranite on three-point bending tests[J]. Journal of Experimental Mechanics,2023,38(2):254-266.

[17] 左建平,周宏伟,范雄,等.三点弯曲下热处理北山花岗岩的断裂特性研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2422-2430.
Zuo Jianping, Zhou Hongwei, Fan Xiong, et al. Research on fracture behavior of Beishan granite afterheat treatment under three-point bending [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(12):2422-2430.

[18] 卢浩,冯夏庭,杨成祥,等.不同预制裂缝方法及长度对岩石三点弯曲试验的影响[J].岩土力学,2021,42(4):1115-1125.
Lu Hao, Feng Xiating, Yang Chengxiang, et al. Effect of different notch prefabrication methods and notch lengths on rockthree-point bending test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(4):1115-1125.

[19] Zhang Y B, Huang X H, Tian B Z. Spectrum characteristics of acoustic emission signals for sandstone instability [J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2014,7(4):84-88.

[20] Ou Jianchun, Wang Enyuan, Wang Xinyu, et al. Acoustic emission characteristics and damage evolution of different rocks under uniaxial compression conditions[J]. Scientific Reports,2024,14:4179.

[21] 李江哲,南博文.基于声发射RA-AF值岩石破裂细观裂纹动态演化特征试验研究[J].吉林水利,2023(11):1-6.
Li Jiangzhe, Nan Bowen. Experimental study on dynamic evolution characteristics of meso-cracks in rock fracture based on acoustic emission RA-AF value[J]. Jilin Water Resources,2023(11):1-6.

[22] 王聚贤,梁鹏,张艳博,等.基于声发射RA-AF值与kneedle算法的岩石拉剪破裂分类研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增刊1):3267-3279.
Wang Juxian, Liang Peng, Zhang Yanbo, et al. Research on classification of rock tensile-shear fracture based on acoustic emission RA-AF values and kneedle algorithm [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(Suppl.1): 3267-3279.

[23] Du Kun, Luo Xinyao, Liu Minghui, et al. Understanding the evolution mechanism and classification criteria of tensile-shear cracks in rock failure process from acoustic emission (AE) characteristics[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024,302:110063.

[24] 孟世卓.岩石类材料的断裂韧度尺寸效应研究[D].郑州:华北水利水电大学,2024.
Meng Shizhuo. Study on size effect of fracture toughness of rock-like materials[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power,2024.