DOI：10.16285/j.rsm.2022.0725

含砂岩石力学特性及其致灾机制研究

岳 豪，杨胜利，翟瑞昊，张 燊，崔 轩

（中国矿业大学（北京）能源与矿业学院，北京 100083）

摘 要：含砂岩石是发生突水溃砂灾害前在高位关键层形成的特殊岩石，其强度与力学性质均与普通岩石不同，决定着高位关键层的稳定性。研究发现：不同裂隙角的裂隙岩石与含砂岩石具有不同的特征应力，且随着裂隙角的增加，裂隙岩石与含砂岩石的起裂应力、损伤应力和峰值应力均增加，双峰应力先增加后减小。相同裂隙角下的含砂岩石各特征应力均小于裂隙岩石，说明砂体对岩石特征应力具有弱化效应。从破坏形态来看，裂隙岩石易呈现翼形拉伸裂隙，含砂岩石在低裂隙角（30º）条件下形成拉伸裂隙，高裂隙角（60º）条件下易形成剪切裂隙，表明砂体进入岩石裂隙后对岩石具有剪切效应。同时建立了充砂力学模型，指出了含砂岩石强度小于裂隙岩石的原因是砂体降低了岩石的摩擦系数。根据声发射累计振铃计数定义了岩石损伤量并分析了含砂岩石致灾机制，现场溃砂灾害可分为 4 个阶段：弹性变形阶段、裂隙扩展阶段、蓄砂储能阶段、溃砂释能阶段。最后利用 PFC^{2D} 验证了裂隙岩石与含砂岩石的差异性，分析了不同类型岩石的能量演化规律。研究结果可作为煤矿顶板突水溃砂现象的前兆信息识别，有助于指导突水溃砂工作面的安全生产。

关 键 词：声发射；裂隙岩石；特征应力；应力强度因子

中图分类号：TU452 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2023) 04－1230－15

Study of the mechanical properties of sand-bearing rocks and their disaster-causing mechanisms

YUE Hao, YANG Sheng-li, ZHAI Rui-hao, ZHANG Shen, CUI Xuan

(School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Sand-bearing rock is a special rock formed in the high-level key layer before water inrush and sand burst disaster. Its strength and mechanical properties are different from ordinary rock, which determines the stability of the high-level key layer. It is found that the fractured rock and sandy rock with different fracture angles have different characteristic stresses, and with the increase of fracture angle, the initiation stress, damage stress and peak stress of fractured rock and sandy rock increase, and the bimodal stress first increases and then decreases. The characteristic stresses of sandy rock under the same fracture angle are less than those of fractured rock, indicating that the sand body has a weakening effect on the characteristic stress of rock. From the perspective of failure form, the fractured rock is easy to show wing tensile fracture, the sandy rock is easy to form tensile fracture under the condition of low fracture angle (30º) and shear fracture under the condition of high fracture angle (60º), indicating that the sand body has shear effect on the rock after entering the rock fracture. At the same time, the mechanical model of sand filling is established, and it is pointed out that the reason why the strength of sandy rock is less than that of fractured rock is that the sand body reduces the friction coefficient of rock. Based on the cumulative acoustic emission ringing counts, the amount of rock damage is defined and the mechanism of sand-bearing rocks causing the disaster is analysed. The on-site sand-bursting disaster can be divided into four phases: 1) elastic deformation phase; 2) fracture expansion phase; 3) sand and energy storage phase; 4) sand-bursting energy release phase. Finally, PFC2D is used to verify the differences between fractured rocks and sandy rocks, and the energy evolution laws of different types of rocks are analyzed. The research results can be used as precursory information identification of water inrush and sand burst phenomenon in coal mine roof, and help to guide the safe production of water inrush and sand burst face.

Keywords: acoustic emission; crack rock mass; characteristics stress; stress intensity factor

收稿日期：2022-05-17 录用日期：2022-10-08

基金项目：国家自然科学基金（No.51974320，No.51934008，No.52121003）；河北省自然科学基金（No.E2020402041）。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51974320, 51934008, 52121003) and the Natural Science Foundation of Heibei Province (E2020402041).

第一作者简介：岳豪，男，1995 年生，博士研究生，主要从事矿山压力与岩石力学方面的相关研究。E-mail: yuehaocumtb@163.com

通讯作者：杨胜利，男，1983 年生，博士，教授，主要从事矿山压力与岩石力学方面的相关研究。E-mail: yslcumtb@163.com

1　引　言

我国中东部煤炭资源逐渐枯竭，煤炭开采正逐步向西部发展，神东矿区是目前煤炭的主要产地之一，是典型的浅埋、薄基岩、厚松散层、高强度开采矿区。自 90 年代以来，松散砂层突水和溃砂被认为是神东矿区最主要的水害威胁[1]。随着煤炭的开采，高位关键层应力集中，当应力超过极限承载能力时顶板发生破断，若顶板以上存在承压水或松散层，极容易形成突水溃砂通道，最终诱发突水溃砂灾害[2-5]。顶板中微裂隙的发展是顶板破断的根本原因[6-8]，在发生突水溃砂现象之前，大量的砂体进入关键层的裂隙中，从而形成含砂岩石，这是加速裂隙发展的直接原因，图 1 是含砂裂隙岩石的形成过程。从宏观上来看，裂隙在砂子的介入下，导致顶板强度降低，形成溃砂通道，带来地表开裂、植被破坏等问题。其内在本质是砂子流体进入岩石裂隙后，引发流固耦合作用，导致其关键层强度降低。

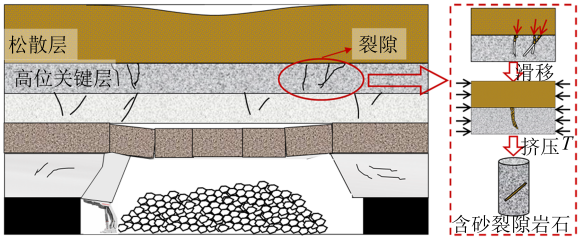


图 1　含砂裂隙岩石形成过程

Fig.1　Sand-bearing fracture rock mass formation process

对于突水溃砂机制与防治的研究一直是研究的热点，王家臣等[9]分析了水沙降低岩块间摩擦因数的作用机制；刘亚群等[10]利用 PFC 对浅埋煤层开采过程中发生突水溃砂地质灾害问题的规律进行数值模拟；许延春等[11]补充完善了我国防砂安全煤岩柱的留设方法；赵启峰等[12]自主研发了突水溃砂气液联动相似模拟试验装置；彭涛等[13]揭示了较厚上覆基岩煤层开采顶板突水溃砂灾害的形成机制；程桦等[14]采用 Mohr-Coulomb 准则建立井筒底部含水层巨量水砂快速流失引发上覆土层沉降力学模型；张士川等[15]研究了浅埋松软岩层采动裂隙突水溃砂机制；李锋等[16]揭示了薄基岩、厚松散岩层在高强度开采条件下突水溃砂和顶板切落并发灾害机制。

从上述研究来看，大多数研究集中在宏观的角度来分析突水溃砂形成的原因及顶板破断后对工作面造成的动载冲击现象，但实际顶板破断前细小的颗粒砂体进入微裂隙中形成含砂裂隙岩石，是加速顶板破断的根本原因。对于裂隙岩体的研究目前已经相对成熟，国内外学者都做出了巨大的贡献。Asadizadeh 等[17-18]研究了裂隙倾角、裂隙长度和裂隙孔径 3 个参数对试件单轴强度的影响，并在单轴压缩条件下对一些具有非持久性粗糙裂隙的人工裂隙岩石进行了测试。Bidgoli 等[19]基于费尔德映射的真实裂隙系统的几何和力学数据，在二维离散裂隙网格模型上进行了一系列数值试验。国内学者对裂隙岩体的研究首先在非贯通裂隙进行探索，讨论非贯通裂隙岩体的破坏方式[20-21]。进而对裂隙的不同特征进行了针对性研究，如裂隙倾角[22]、多组贯穿裂隙[23]、饱水裂隙[24]、加载方式[25]等。由于地质条件十分复杂，对于不同应力环境下的裂隙岩体变形破坏特征的研究逐渐发展起来。张金才等[26]应用孔隙弹性力学理论，研究了裂隙岩体与多孔介质岩体的应力变化引起的渗透性变化。任建喜[27]分析了冻结裂隙岩石加卸载损伤全过程的 CT 图像和 CT 数的演化规律。黄达等[28]对卸荷条件下裂隙岩体的变形破坏及裂纹扩展演化规律进行了物理模型试验。张嘉凡等[29]研究了冻融循环作用下注浆裂隙岩体的微观孔隙演化规律及其剪切力学响应。杨超等[30]研究了不同特征应力区间下单裂隙砂岩的蠕变特性。岑夺丰等[31]对拉剪应力作用下单裂隙砂岩裂纹扩展规律进行了试验研究。

可以发现，目前的研究大多集中在突水溃砂现象及裂隙岩石中，对于突水溃砂基础性试验研究较少。含砂岩石是突水溃砂发生前产生的特殊裂隙岩体，其强度与稳定性决定着是否会发生突水溃砂灾害，这类岩体与完整岩体和裂隙岩体的力学性质不同，研究含砂岩石的力学性质对于防治顶板灾害、突水溃砂具有重要意义。本文以神东矿区布尔台煤矿顶板中粒砂岩为研究对象，同时利用高强度石膏制作类岩石材料试件，通过理论推导、数值模拟和声发射等手段分析含砂岩石的破坏特征及其致灾机制，并构建充砂力学模型和数值模型，为突水溃砂灾害的防治提供了理论基础。

2　试验方案

2.1　试样制备

本次试验岩石选用布尔台煤矿 12301 工作面顶板中粒砂岩，用试错法配置与现场性质相近的类岩石材料。由于中粒砂岩具有拉压比大、脆性高的特点，故选择高强度石膏进行模拟，通过不断尝试最终确定石膏∶水∶缓凝剂=1∶0.3∶0.005[32-34]。配置出来的类岩石材料与现场中粒砂岩的单轴抗压强度分

别为 30.44、29.62 MPa，弹性模量分别为 11.32、13.16 GPa，密度分别为 2.51、2.93 g/cm^3，参数见表 1，应力−应变曲线如图 2 所示，可以发现两者强度、弹性模量和密度均较为接近，故认为该配比下的类岩石材料能够较好地模拟现场的中粒砂岩。

表 1 原岩与类岩石材料参数

Table 1 Parameters of proto-rock and rock-like materials

材料类型	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/(g·cm^{-3})
原岩	29.62	13.16	2.93
类岩石材料	30.44	11.32	2.51
误差/%	2.60	13.98	14.33

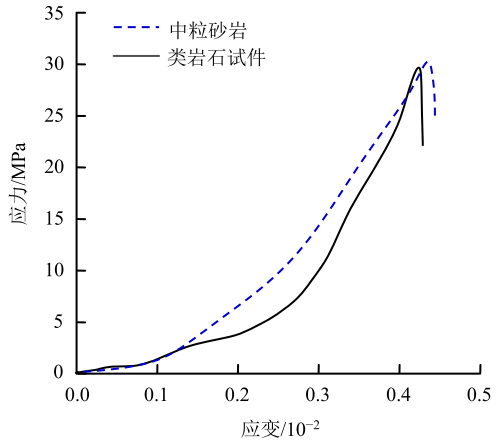


图 2 中粒砂岩和类岩石试件应力−应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of specimens of medium-grain sandstone and rock-like

按照上述配比利用预制裂隙模具制作裂隙岩石和含砂岩石，模具尺寸为 50 mm×100 mm，通过预埋钢片的方法来制作预制裂隙，钢片尺寸为 60 mm×14 mm×2 mm[35-36]。具体制作方法是将混合液充分搅拌后导入模具中，将钢片上下刷油插入模具的空隙中，30 min 后取出钢片，1 d 后脱模。图 3 是模具和脱模后裂隙岩石。



(a) 模具 (b) 脱模后的裂隙岩石

图 3 模具和裂隙岩石

Fig.3 Molds and fissure rocks

裂隙岩石脱模 1 d 以后制作含砂岩石，考虑到砂体充填裂隙需要满足一定的孔隙率，筛选出直径在 0.5～1.2 mm 的河砂[37-38]，如图 4 所示。将砂子注入岩石的裂隙中，并用相同配比的石膏将裂隙两端封闭，放在阴凉处养护 7 d，得到含砂岩石。



图 4 筛选河砂

Fig.4 Screening river sand

2.2 试验方法

本试验采用 MTS815 岩石力学试验机对试件进行单轴压缩，并通过声发射系统对试件损伤破坏程度进行分析。声发射设备为北京软岛时代公司 DS5 声发射系统，监测系统为 16 通道，前置放大器为 40 dB，门槛值为 40 dB，谐振频率为 150～750 kHz，为了保证声发射传感器和试件的耦合效果，在传感器端部涂抹凡士林并将传感器固定至指定位置，图 5、6 为测试系统示意图和实物图。

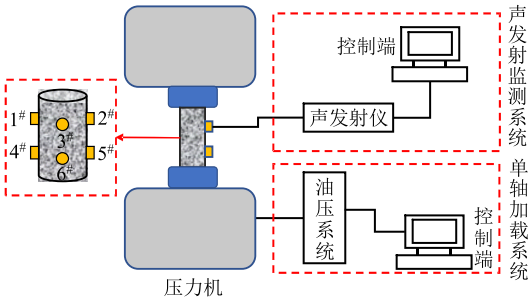


图 5 测试系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of the test system

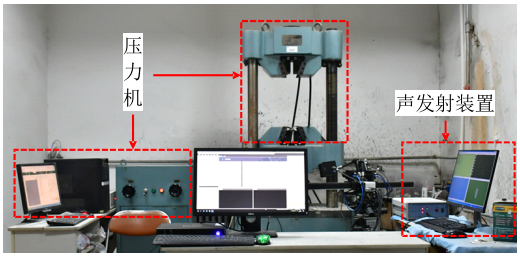


图 6 测试系统实物图

Fig.6 Physical drawing of the test system

本次试验变量为裂隙倾角和裂隙含砂量，共设有 30°、45° 和 60° 3 种裂隙角度，及裂隙含砂和裂隙无砂两种裂隙含砂量，同时每种裂隙角度岩石对应一种含砂岩石，分别测试不同角度裂隙岩石和含

砂岩石的单轴抗压强度以及声发射信号，将裂隙岩石记为 L-α，含砂岩石记为 S-α，其中α 可取 30、45 和 60，分别对应 3 种裂隙倾角。压缩试验如图 7 所示，不同类型岩石具体参数及编号见表 2。

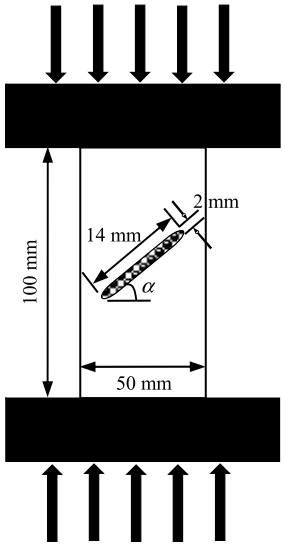


图 7　压缩试验示意图

Fig.7　Schematic diagram of the compression test

表 2　岩石参数及编号

Table 2　Rock parameters and number

岩石类型	编号	长度/mm	直径/mm	质量/g	密度/(g • cm^{-3})
完整	W-1	99.82	49.84	488.80	2.51
30° 裂隙	L-30	98.86	49.97	463.37	2.39
30° 含砂	S-30	97.97	49.99	465.33	2.42
45° 裂隙	L-45	100.41	49.65	460.74	2.37
45° 含砂	S-45	98.43	49.16	459.57	2.46
60° 裂隙	L-60	99.32	48.96	448.77	2.40
60° 含砂	S-60	99.24	49.77	476.88	2.47

3　试验结果及分析

3.1　应力–应变关系

图 8 为不同类型岩石强度曲线，强度从高到低分别为 L-60、L-45、S-60、L-30、S-45、S-30，其强度分别为 23.28、20.43、20.11、19.15、18.75、18.23 MPa，说明裂隙岩石和含砂岩石均会影响岩石的强度，并且随着裂隙角度的变化其强度也会明显变化。

图 9 和图 10 为不同类型岩石峰值强度与强度弱化情况，根据岩体强度的差异定义了裂隙和砂体弱化系数：

$$\eta_{1-\alpha}=\frac{\sigma_{\mathrm{W-1}}-\sigma_{\mathrm{L}-\alpha}}{\sigma_{\mathrm{W-1}}} \tag{1}$$

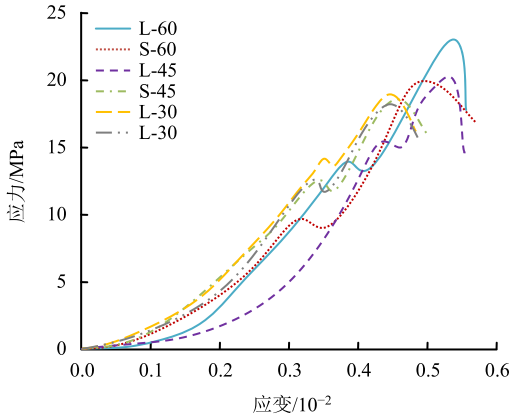


图 8　不同类型岩石强度曲线

Fig.8　Strength curves for different types of rocks

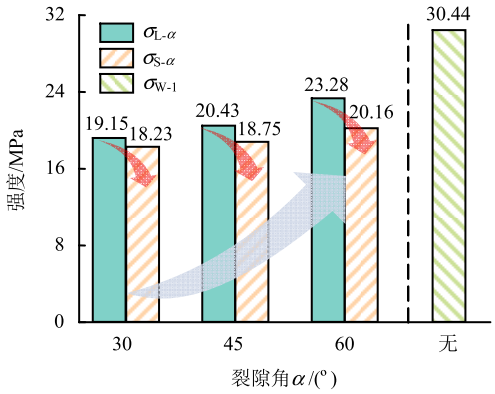


图 9　不同类型岩石峰值强度

Fig.9　Peak strength of different rock types

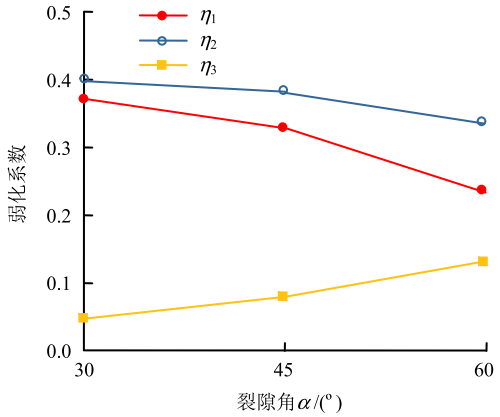


图 10　不同类型岩石强度弱化系数

Fig.10　Strength weakening coefficient of different rocks

$$\eta_{2-\alpha}=\frac{\sigma_{\mathrm{W-1}}-\sigma_{\mathrm{S}-\alpha}}{\sigma_{\mathrm{W-1}}} \tag{2}$$

$$\eta_{3-\alpha}=\frac{\sigma_{\mathrm{L}-\alpha}-\sigma_{\mathrm{S}-\alpha}}{\sigma_{\mathrm{L}-\alpha}} \tag{3}$$

式中：$\eta_{1-\alpha}$ 为裂隙弱化系数，表示裂隙岩石相对于

完整岩石的强度降低程度；$\eta_{2-\alpha}$ 为含砂裂隙弱化系数，表示含砂岩石相对于完整岩石的强度降低程度；$\eta_{3-\alpha}$ 为砂体弱化系数，表示相同裂隙角下含砂岩石相对于完整岩石强度降低程度，可以认为是砂体介入后对岩体的弱化能力；σ_{W-1} 为完整岩体单轴抗压强度；$\sigma_{L-\alpha}$ 为裂隙角 α 的裂隙岩石单轴抗压强度；$\sigma_{S-\alpha}$ 为裂隙角 α 的含砂岩石单轴抗压强度。

由图 9 可知，不同类型的岩石随着裂隙角的增加，其强度均在增加。相同裂隙角条件下的含砂岩石强度小于裂隙岩石，说明砂子进入裂隙后会降低岩体强度。在工程上当顶板中产生裂隙后，砂体逐渐进入顶板的裂隙中，导致顶板的强度明显降低，此时在理论计算方面如果仍然按照普通岩石的单轴抗压强度计算，会导致液压支架选型设计偏小，来压步距理论值偏大，对于工作面的安全生产极为不利。在这种条件下，应当对岩体的单轴抗压强度乘以砂体弱化系数 $\eta_{3-\alpha}$，根据图 10 可知，砂体弱化系数与裂隙角呈正相关关系，即工程中的顶板破断角影响砂体弱化效应，顶板破断角越大，砂体进入顶板后对于顶板强度的弱化能力越强。

3.2 声发射信号

岩石在破坏前会产生许多微裂隙，随着微裂隙的不断扩展最终贯通整个岩石，产生宏观破坏，在这过程中会释放许多声发射信号，可以根据声发射信号来监测岩石破坏的形式及特征应力。不同的岩石在加载过程都可以大致分为以下几个阶段：①裂纹闭合压密阶段；②线弹性变形阶段；③裂纹稳定扩展阶段；④裂纹非稳定扩展阶段；⑤峰后阶段。各阶段之间分别由闭合应力、起裂应力、损伤应力和峰值应力作为临界点，将应力−应变曲线划分为了 5 个阶段。不同类型岩石对应的应力阈值有明显的区别，同种岩石在不同条件（如裂隙、含砂等）下的应力阈值也不尽相同，本节分别研究完整岩石、裂隙岩石以及含砂岩石的不同应力阶段特征参数。

对于不同特征应力的判断目前主要有裂纹体积应变法、声发射法[39-40]等。闭合应力 σ_{cc} 可以选取应力−应变曲线中线性段的起点，起裂应力 σ_{ci} 是第 1 次出现明显声发射信号对应的轴向应力，损伤应力 σ_{cd} 是声发射信号第 2 次明显增加时对应的轴向应力。定义起裂应力水平为起裂应力与峰值应力的比值，记作 K_{ci}。定义损伤应力水平为损伤应力与峰值应力的比值，记作 K_{cd}。裂隙岩体在单轴压缩过程中会由于预制裂隙首先闭合而达到第 1 次峰值强度，随着加载的继续其强度会继续增加，出现双峰现象。将出现双峰现象时第 1 次峰值强度对应的轴向载荷作为双峰应力 σ_{cw}，定义双峰应力水平为双峰应力 σ_{cw} 与最终峰值应力 σ_{cp} 的比值，记作 K_{cw}。图 11 为裂隙岩石应力阶段划分示意图。

图 12 为 W-1 岩石声发射特征信号图，可以看出完整岩石破坏整体上分为 5 个阶段，与上述的分析一致。从图中可以看出，W-1 的闭合应力为 4.31 MPa，闭合应力水平为 14.15%；起裂应力为 11.34 MPa，起裂应力水平为 37.25%；损伤应力为 26.12 MPa，损伤应力水平为 85.81%。岩石在达到峰值强度后应力迅速下降，具有明显的脆性特征，在破坏后仍然具有一定的残余强度。

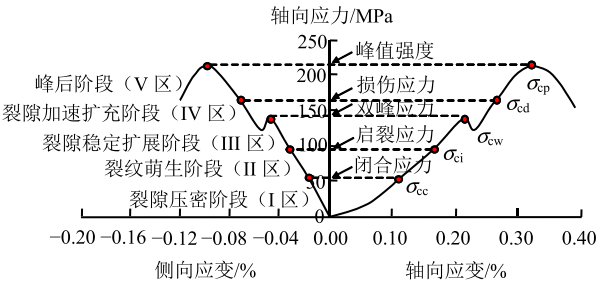
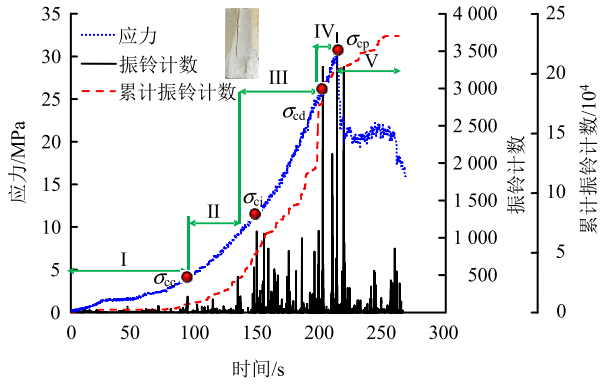


图 11 裂隙岩石应力阶段划分示意图

Fig.11 Schematic diagram of stress stage division of fracture rocks



注：I-裂纹闭合压密阶段；II-线弹性变形阶段；III-裂纹稳定扩展阶段；IV-裂纹非稳定扩展阶段；V 峰后阶段。

图 12 完整岩石声发射特征

Fig.12 Complete rock acoustic emission characteristics

不同类型岩石的声发射信号见图 13，由图可知，不同岩石特征应力均不同，含砂岩石所有特征应力均小于裂隙岩石。同时含砂岩石在达到峰值强度前后的振铃计数频率高于裂隙岩石，振幅小于裂隙岩石。可以认为砂体介入岩体内部后对岩体声发射信号的频率和幅值改变较大，即含砂岩石的声发射信号呈现“高频低幅”的特点，这是由于砂体在岩石内部裂隙中具有流动性，与岩石间的接触事件更多，砂体随着岩石轴向应变的不断增加，与岩石碰

撞挤压次数也逐渐增加，这在一定程度上增加了声发射信号的频率。随着加载的继续，砂体同时发生小程度破碎，这也增加了声发射信号发生的次数，但砂体的存在使得岩体裂隙扩展得更快，积聚的应变能较小，故各特征应力处的声发射信号幅值较小。当现场的微震信号中出现了“高频低幅”的特征时，就要考虑是砂体涌入了顶板的裂隙中，此时要采取防治措施，如含砂层底部注浆、加快工作面推进速度、增大支架阻力、带压移架、工作面调直等。

从图 13 中我们还可以看出，裂隙岩石和含砂岩石应力曲线都出现双峰现象。在倾角相同的条件下，两种岩石的双峰值出现的时间不同。当倾角为 60° 时，裂隙岩石第 1 次峰值和第 2 次峰值出现的时间分别约为 200、290 s，含砂岩石第 1、2 次峰值出现的时间分别约为 170、265 s，分别提前了约 30 s 和 25 s。当倾角为 45° 时，裂隙岩石第 1、2 次峰值出现的时间分别约为 235、290 s，含砂岩石第 1、2 次峰值出现的时间分别约为 190、250 s，分别提前了约 45 s 和 40 s。当倾角为 30° 时，裂隙岩石第 1、2 次峰值出现的时间分别约为 190、240 s，含砂岩石第 1、2 次峰值出现的时间分别约为 175、240 s，分别提前了约 15 s 和 0 s。由此可见，砂体对应力峰值的出现时间有影响，倾角为 45° 时影响最大，倾角为 30° 时影响最小。

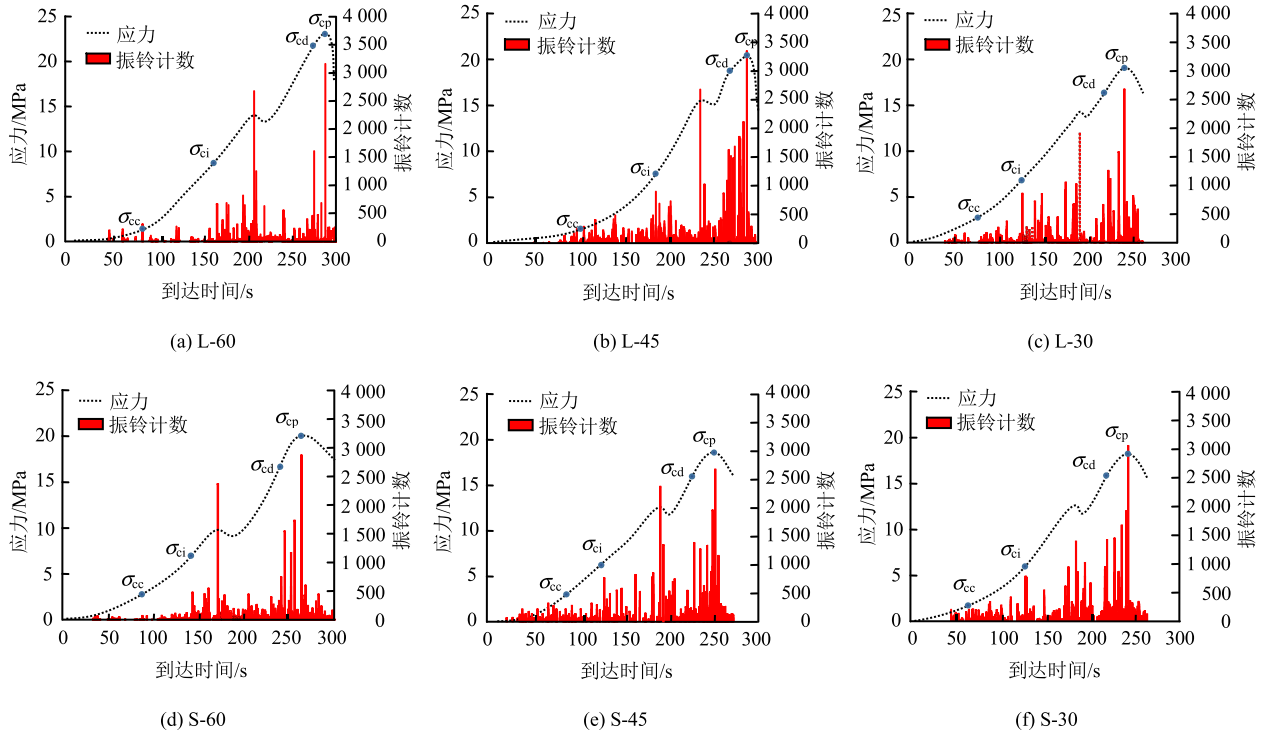


图 13　不同类型岩石声发射信号图

Fig.13　Acoustic emission signal map of different types of rocks

根据上文及图 11 所述方法，对不同类型岩石的特征应力进行分析，并对不同特征应力进行归一化处理，得到不同特征应力水平，从表 3 和图 14 可以看出，随着裂隙角的增加，起裂应力和损伤应力基本都在增加。在岩石内部裂隙角度一定时，含砂岩石的起裂应力水平、损伤应力水平均小于裂隙岩石，说明砂体对于岩石的起裂和损伤具有促进作用。同时含砂岩石的起裂应力水平增加幅度随裂隙角的增加变化不大，说明裂隙角增加对于含砂岩石起裂能力影响较小。含砂岩石损伤应力水平增加幅度随裂隙角增加逐渐升高，说明裂隙角升高会加速含砂岩石的损伤，即在现场中顶板破断角越大，越容易发生溃砂现象。两种岩石的双峰应力水平差异随着角度增加逐渐减小，在 60° 时含砂岩石的双峰应力水平甚至有反超的倾向。说明砂体对岩石双峰应力有影响，但是影响情况与裂隙角度有一定关系。

3.3　破坏形态

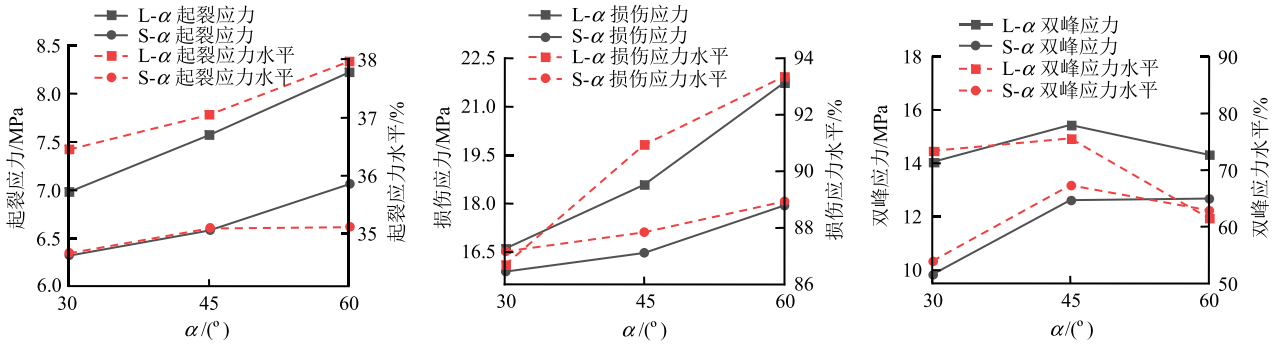
图 15 为不同类型岩石的破坏形态，可以发现，裂隙岩石产生的裂纹以拉伸裂纹主导的翼型裂纹为主，含砂岩石产生的裂纹与裂隙角度有关。30° 裂隙岩石与含砂岩石产生的均为拉伸裂纹；45° 裂隙岩石产生了 2 条拉伸裂纹，45° 含砂岩石产生了 2 条拉伸裂纹和 1 条剪切裂纹；60° 裂隙岩石产生了 2 条拉伸裂纹，60° 含砂岩石产生了 2 条剪切裂纹和 1 条拉伸

裂纹。说明砂体进入岩石裂纹以后会促进岩石形成剪切裂纹，这是由于砂体具有流动的特性，在岩石与裂纹交界面处形成了滚动层，受压后裂纹会挤压砂子，形成砂子与裂纹间的摩擦力，当砂子与裂纹间的摩擦力小于裂纹尖端附近的拉力时，裂纹就会开始扩展。

表 3 不同类型岩石特征应力

Table 3 Characteristic stresses of different types of rocks

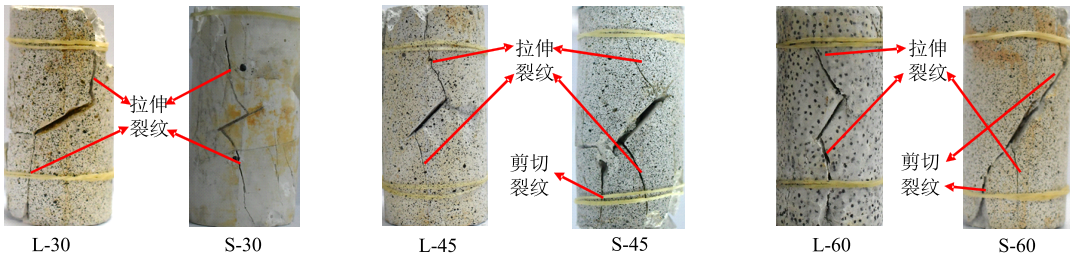
编号	起裂应力/MPa	起裂应力水平/%	损伤应力/MPa	损伤应力水平/%	双峰应力/MPa	双峰应力水平/%	峰值应力/MPa
L-30	6.98	36.45	16.60	86.68	14.05	73.37	19.15
S-30	6.32	34.66	15.89	87.16	9.83	53.92	18.23
L-45	7.57	37.05	18.58	90.94	15.44	75.58	20.43
S-45	6.58	35.09	16.47	87.84	12.62	67.31	18.75
L-60	8.22	37.97	21.73	93.34	14.33	61.55	23.28
S-60	7.06	35.11	17.93	88.93	12.68	62.90	20.11



(a) 起裂应力和起裂应力水平 (b) 损伤应力和损伤应力水平 (c) 双峰应力和双峰应力水平

图 14 不同类型岩石特征应力和水平

Fig.14 Characteristic stresses and levels of different types of rocks



(a) 30° (b) 45° (c) 60°

图 15 不同类型岩石破坏形态图

Fig.15 Morphological diagrams of different types of rock destruction

岩石拉压比一般在 1:8 之间，岩石裂隙的形成多是由于裂隙尖端附近的拉应力超过了极限强度，导致其形成了拉伸裂纹。而加入砂子以后，降低了岩石间的拉应力，增大了岩石内部的剪切应力，使得岩石更容易发生剪切破坏。图 16 是砂体进入岩石裂隙后，随着裂隙角度增加，岩石破坏形态变化示意图，表明砂体进入岩石裂隙后，对岩石有剪切效应，促进岩石形成剪切裂纹，倾角增大会增强砂体的剪切效应。当含砂岩石的裂隙角为 60° 时，含砂岩石的破坏形式已经基本由拉伸破坏转变为剪切破坏。而现场工程中岩体的破断角度往往大于 60°[41]，这就说明在工程中，当砂体进入顶板的裂隙以后，顶板易形成剪切破坏，导致煤矿现场发生顶板切落灾害，造成工作面动压现象，这也与文献[16]中所提到的溃砂现象往往伴随着顶板切落灾害相吻合，这从细观方面解释了砂体介入后易形成顶板切落灾害，故在此类工作面进行支架选型设计时要考虑顶板切落时造成的动载冲击。

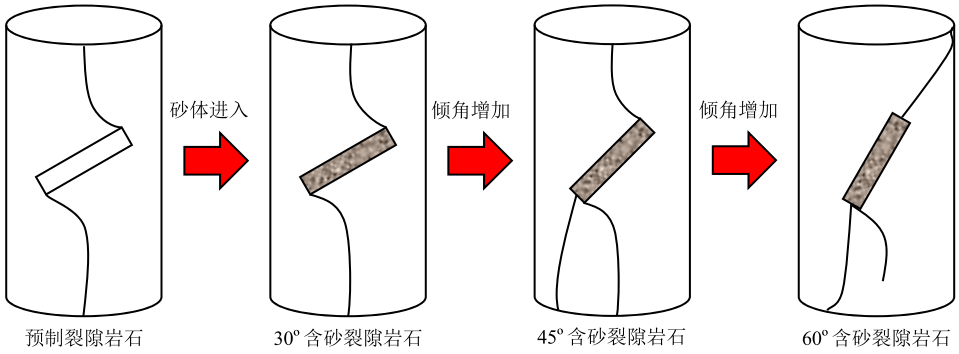


图 16　裂隙角度对含砂岩石破坏形态示意图

Fig.16　Schematic diagram of fracture angle failure morphology on sandy rocks

4　力学模型与致灾机制

4.1　充砂力学模型

裂隙岩石在受到载荷作用后，其内部裂隙周围会形成应力集中，应力超过一定范围后，裂隙就会开始扩展，最终大量微裂隙贯通并导致岩石的宏观破坏现象。建立与前文试验相符合的力学模型，如图 17 所示，裂隙与含砂岩石均受到均布单轴压力 σ，裂纹方向与水平方向夹角为 α。为了讨论方便，我们将坐标轴进行转换，x 轴平行于裂纹方向，y 轴垂直于裂纹方向，根据应力的坐标转化关系，我们可以得出：

$$\sigma_x = \sigma \sin^2 \alpha \tag{4}$$

$$\sigma_y = \sigma \cos^2 \alpha \tag{5}$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sin \alpha \cos \alpha \tag{6}$$

式中：σ_x、σ_y、τ_{xy} 分别为经过坐标变换后的应力分量。

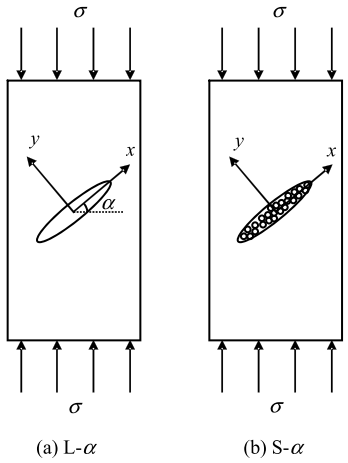


图 17　裂隙与含砂岩石受力示意图

Fig.17　Schematic diagram of the stress on fractures and sandstones

由于岩石受单轴压缩作用，其内部裂隙必然会闭合，又由于裂纹面的不可重叠性，I 型裂隙显然在这里不适用，即 $K_{\mathrm{I}} = 0$，所以裂隙扩展应为 II 型裂隙，此时 $K_{\mathrm{II}} = \tau\sqrt{\pi a}$，其中 a 为裂隙长轴半径。由于裂纹面闭合后存在摩擦系数 f，故等效剪应力 $\tau = \tau_{xy} - f\sigma_y$。

于是可得裂隙尖端应力强度因子：

$$K_{\mathrm{II}} = \left[\frac{\sigma \sin 2\alpha}{2} - f(\sigma \cos^2 \alpha)\right]\sqrt{\pi a} \tag{7}$$

能量释放率 G 是指裂隙扩展单位面积系统所提供的能量，也称裂隙驱动力。可知在其他条件一定时，能量释放率越大，表示裂隙达到 G 判据的概率更高，可理解为裂隙易扩展，即岩石的起裂应力较低，所以利用能量释放率来研究不同裂隙岩石的强度具有一定的意义。根据断裂力学中贝克纳尔公式可以得到能量释放率 G 与应力强度因子 K_{II} 之间的关系：

$$G = \frac{K_{\mathrm{II}}^2}{E} \tag{8}$$

将式（7）代入式（8）中，可以得到：

$$G = \frac{1}{E}\left[\left(\frac{\sigma}{2}\sin 2\alpha - f\sigma \cos^2 \alpha\right)\sqrt{\pi a}\right]^2 \tag{9}$$

从式（9）中可以看出，能量释放率与岩石所受载荷、弹性模量、裂隙角、裂隙面摩擦系数及裂隙长度有关。在工程中发生突水溃砂现象的实质是砂体进入了岩石裂隙中，文献[9]指出砂体会降低岩石间的摩擦系数，故假设变化量只有摩擦系数，考虑 G 为摩擦系数的函数，取 E = 10 GPa，σ = 30 MPa，α = 45°，a = 0.014 m，根据式（9）绘制出 G-f 曲线图，如图 18 所示。随着 f 的增加，能量释放率逐渐减小，并且降低的速率也在逐渐减小，表明当 f

较小时，其数值的改变对岩石裂隙扩展的敏感性更高，当 f 较高时，增加 f 对于岩石能量释放率的降低不明显。可以理解为岩石内部的摩擦系数越高，岩石内部裂隙越不容易扩展，而含砂岩石的摩擦系数小于裂隙岩石，这也从理论上证明了含砂岩石的各特征应力水平均小于裂隙岩石，同时也与图 19（不同类型岩石强度）相吻合，不同裂隙角下含砂岩石的强度都更小。在工程上，对顶板岩石破坏往往使用第一强度理论[42]，而砂体进入顶板的裂隙后会降低岩体间的摩擦系数，进而降低顶板的抗剪强度，这就可能导致顶板岩体遵循第三强度理论，这还需要进一步考虑顶板厚度的影响。文献[43]指出中厚板条件下顶板的剪应力会明显增加，而砂体的介入又会导致岩体抗剪强度的降低，在中厚板效应和砂体介入的叠加作用下顶板极易发生切落灾害，故顶板的厚度与砂体的耦合效应也是下一步需要重点研究的内容。

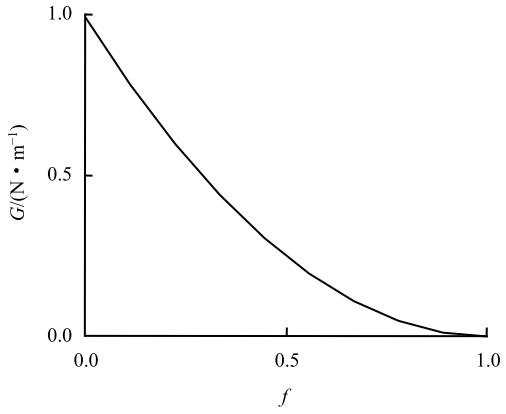


图 18 能量释放率与摩擦系数关系

Fig.18 Relationship of energy release rate and the coefficient of friction

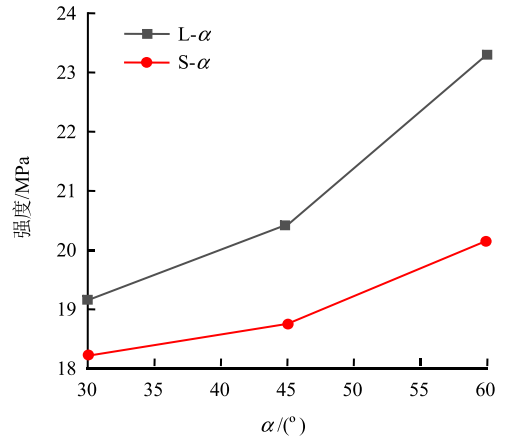


图 19 不同类型岩石强度

Fig.19 Different types of rock strength

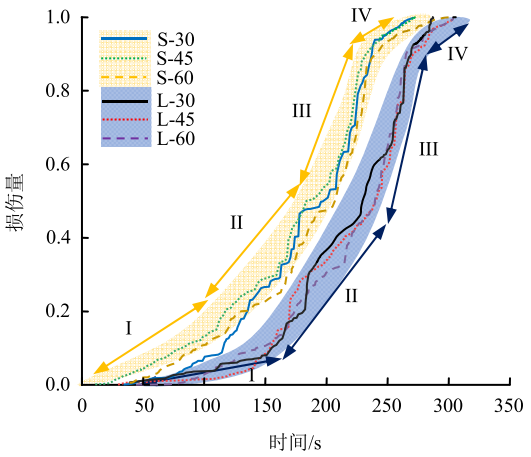
4.2 致灾机制

为了进一步分析突水溃砂致灾机制，进而指导现场中的溃砂灾害，利用累计声发射振铃计数定义了损伤量[44-45]：

$$D=\frac{N_t}{N_a} \tag{10}$$

式中：N_t 为 t 时刻累计声发射振铃计数；N_a 为岩石试件破坏时累计声发射振铃计数。

根据损伤量绘制出不同类型岩石的损伤曲线（见图 20），裂隙岩体与含砂岩体的损伤曲线均可以分为 4 个阶段，分别为缓慢损伤阶段、匀速损伤阶段、加速损伤阶段、峰后损伤阶段。根据损伤量曲线发现，在裂隙角相同的条件下，含砂岩石的 4 个阶段的值和斜率均大于裂隙岩石，含砂岩石各阶段的持续时间小于裂隙岩石，说明砂体进入顶板的裂隙后会加速顶板的损伤和破坏，当现场顶板中有砂体进入后，顶板的破断时间会更短。同时可以发现含砂岩体的匀速损伤阶段持续时间明显远小于裂隙岩体的匀速损伤阶段，这说明含砂岩体的裂隙扩展极不稳定，当裂隙开始扩展后会迅速进入加速损伤阶段，导致岩体发生破坏。



注：I 为缓慢损伤阶段；II 为匀速损伤阶段；III 为加速损伤阶段；IV 为峰后损伤阶段。

图 20 裂隙与含砂岩石损伤曲线

Fig.20 Fracture and sandstone damage curves

与细观试验相对应的，在工程上的溃砂现象发生是渐进破坏的过程，也可以分为 4 个阶段（见图 21）：弹性变形阶段、裂隙扩展阶段、蓄砂储能阶段、溃砂释能阶段。当工作面刚开始推进时，顶板处于弹性变形阶段，上覆岩层及含砂层以载荷的形式作用在顶板上。随着工作面的推进，顶板暴露的空间

逐渐增大，应力集中程度逐渐升高，顶板进入裂隙扩展阶段，其内部逐渐开始形成微裂隙，当微裂隙扩展到一定程度后形成宏观裂隙。当宏观裂隙宽度大于砂体直径时，砂体在自重作用下逐渐进入顶板裂隙中，随着裂隙的不断扩展，进入顶板裂隙中的砂体越来越多，并且在上覆载荷和岩块间水平挤压力的作用下积聚大量的应变能，此时处于蓄砂储能阶段。当裂隙逐渐贯通至工作面和含砂层后，形成了溃砂通道，砂体在自重及自身储存的应变能释放作用下通过溃砂通道瞬间涌入工作面，形成溃砂灾害。

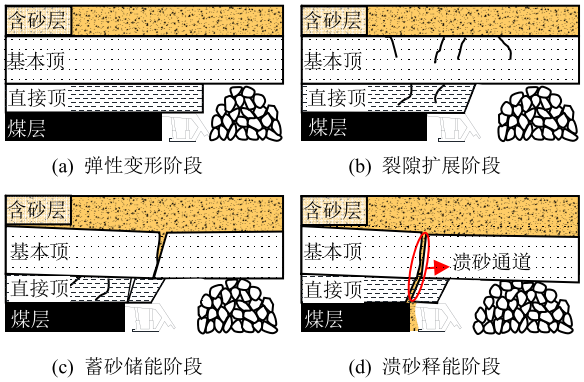


图 21　溃砂致灾机制

Fig.21　Disaster mechanism of sand collapse

5　数值模拟

为了进一步验证上述试验结果的可靠性，采用颗粒流模拟软件 PFC^{2D} 进行建模，分析不同裂隙角下裂隙岩石与含砂岩石的特征应力差异及破坏形态。采用 PFC 软件进行数值模拟前需要先采用试错法进行参数标定，不断调试模型参数使其达到与实际宏观力学参数基本一致，得出软件中细观与宏观参数对应关系。建立 ϕ50 mm×100 mm 圆柱形岩石数值模型，颗粒半径范围为 0.5～0.75 mm，通过对上下墙体施加恒定速度进行模拟单轴压缩，本次试验原岩与模拟应力−应变曲线如图 22 所示，数值模型细观参数见表 4，可以发现模拟结果与实测结果较符，表明利用 PFC^{2D} 进行研究裂隙岩石与含砂岩石的力学特性是可行的。

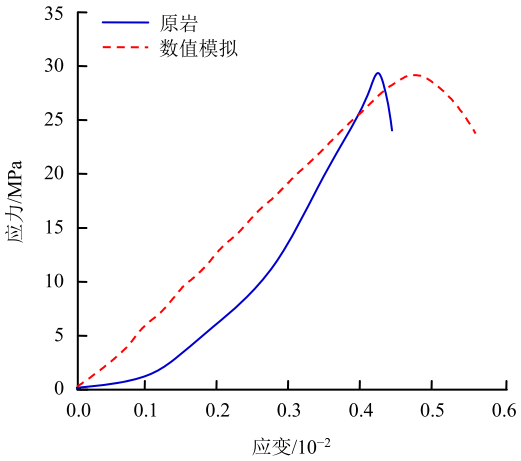


图 22　PFC^{2D} 数值模型强度

Fig.22　PFC^{2D} numerical model strength

表 4　数值模型细观参数

Table 4　Numerical model detailed parameters

细观颗粒参数					模拟结果		
颗粒半径/mm	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	摩擦系数	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
0.5～0.75	4	8.5	40.0	0.577	29.39	5.87	0.24

根据上述标定结果建立裂隙岩石与含砂岩石模型，裂隙岩石是通过在原有的模型中间删除颗粒实现的，通过裂隙中加入岩石粒径 1/10 的颗粒来模拟含砂岩石，砂体之间采用 linear 模型，砂体以外部分采用 Linear Parallel Bond 模型。

图 23 为 L-30 与 S-30 数值模型，分别对裂隙岩石与含砂岩石进行单轴压缩试验，并监测其中应力、能量与声发射信号，由于实际测试声发射的原理是岩石内部产生裂隙后会发出特定的声频，利用声发射探头监测并定位这个声频作为声发射信号，故在 PFC^{2D} 模拟中将裂隙每一次生成作为一个声发射事件，利用 fish 语言监测不同时段生成裂隙的情况作为声发射信号模拟。

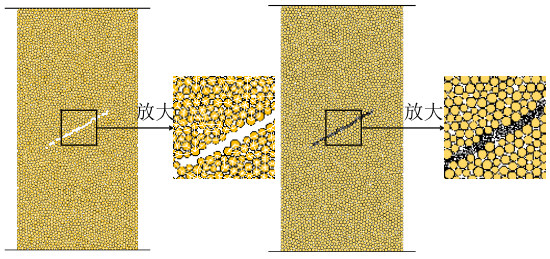


图 23　裂隙岩石与含砂岩石数值模型

Fig.23　Numerical model of fissure rocks and sandy rocks

图 24 为不同类型岩石能量演化与应力−应变曲线，从图中可以看出，不同类型岩石的能量规律类

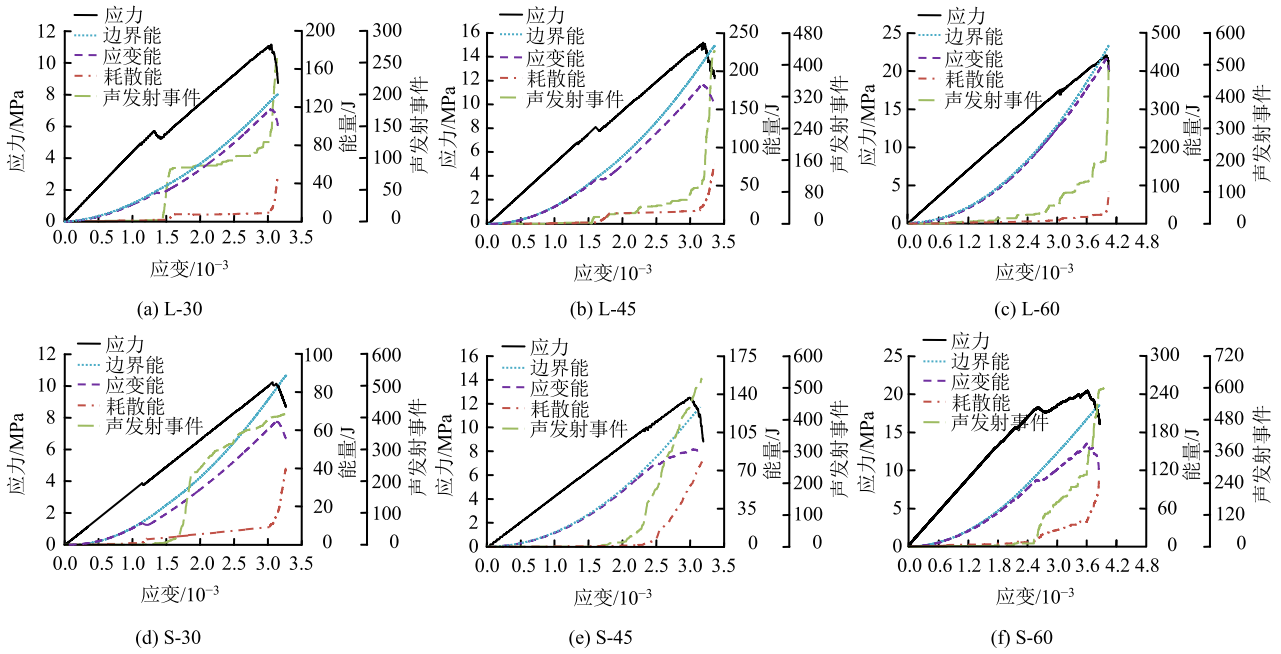


图 24 不同类型岩石能量演化与应力关系

Fig.24 Energy evolution and stress relationships of different types of rocks

似，在加载前期，边界能主要用于应变能的增加，随着载荷不断增加，岩石开始出现声发射信号，即产生了裂隙，裂隙的产生要消耗一部分能量，所以耗散能逐渐增加。相同裂隙角下的含砂岩石达到峰值强度时所需的能量普遍小于裂隙岩石，且耗散能更大，也反映了含砂岩石在破坏时形成的裂隙更多，需要消耗更多的能量。并且可以看出在相同裂隙角条件下含砂岩石产生的声发射信号更多，峰值应力更低，说明砂体进入岩石裂隙后对岩石强度具有弱化效应，这也与前文试验相吻合。

图 25 为实验室和数值模拟条件下不同类型岩石的最终破坏形态，可以发现模拟结果与实验室结果比较接近，不同裂隙岩石破坏产生的裂隙主要为拉伸裂隙，随着砂体进入岩石裂隙后，岩石破坏形态逐渐向剪切破坏转变，可以证明砂体对岩石具有一定的剪切效应。

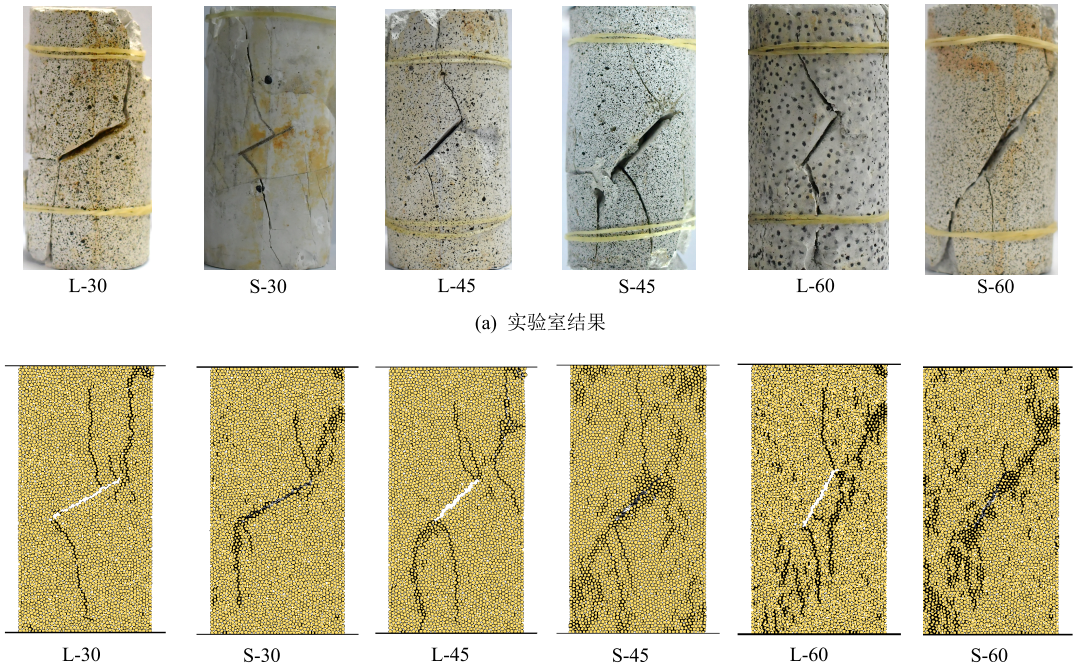


图 25 不同类型岩石破坏形态

Fig.25 Different types of rocks break form

6　结　论

本文从突水溃砂现象的基础性试验研究出发，制作了不同裂隙角的裂隙岩石与含砂岩石，并利用声发射法和数值模拟法探究了含砂岩石在单轴压缩下的影响特征及其致灾机制，主要有以下结论：

（1）砂体介入顶板裂隙后会形成含砂岩石，其力学特性和声发射信号与裂隙岩石存在明显的区别。含砂岩石的声发射信号呈现“高频低幅”的特点，砂体对于岩石强度具有弱化效应，导致含砂岩石各特征应力均小于裂隙岩石，砂体弱化系数与裂隙角呈正相关关系。

（2）砂体对于岩石具有剪切效应，随着砂体介入，岩石的破坏形态趋向于剪切裂隙，砂体介入后降低了岩体的抗剪强度，导致含砂岩石更容易发生剪切破坏。

（3）裂隙岩石与含砂岩石损伤曲线可以分为 4 个阶段：缓慢损伤阶段、匀速损伤阶段、加速损伤阶段、峰后损伤阶段。含砂岩石的 4 个阶段的值和斜率均大于裂隙岩石，含砂岩石各阶段的持续时间小于裂隙岩石。与细观试验相对应，现场的溃砂灾害也可以分为 4 个阶段：弹性变形阶段、裂隙扩展阶段、蓄砂储能阶段、溃砂释能阶段。

（4）使用 PFC^{2D} 分析了含砂岩石和裂隙岩石的强度和破坏形态的差异，验证了砂体介入后对岩石具有弱化效应和剪切效应，并分析了不同类型岩石的能量演化规律，数值模拟结果表明，砂体对于岩石的影响是由于其加载过程中产生了更多的耗散能。

参 考 文 献

[1] 杨鑫, 徐曾和, 杨天鸿, 等. 西部典型矿区风积沙含水层突水溃沙的起动条件与运移特征[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 21-28, 35.
YANG Xin, XU Zeng-he, YANG Tian-hong, et al. Starting conditions and migration characteristics of water inrush and sand breakdown in aeolian sand aquifer in typical mining area in west China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 21-28, 35.

[2] 刘成禹, 张翔, 程凯, 等. 地下工程涌水涌砂诱发的沉降试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 843-851.
LIU Cheng-yu, ZHANG Xiang, CHENG Kai, et al. Experimental study on subsidence induced by water and sand gushing in underground engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 843-851.

[3] 梁艳坤, 隋旺华, 朱涛, 等. 哈拉沟煤矿垮落带破碎岩体溃砂的离散元数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 470-476.
LIANG Yan-kun, SUI Wang-hua, ZHU Tao, et al. Numerical simulation of quicksand through the broken rocks in caving zone due to coal mining based on DEM[J]. **Journal of China Coal Society**, 2017, 42(2): 470-476.

[4] 刘延欣, 武宇亮, 闫增会, 等. 厚松散层下开采突水溃砂室内试验探究[J]. 煤炭科技, 2021, 42(4): 49-52.
LIU Yan-xin, WU Yu-liang, YAN Zeng-hui, et al. Laboratory experiment research on water and sand burst for mining coal seam near thick loose layers[J]. **Coal Science & Technology Magazine**, 2021, 42(4): 49-52.

[5] 吕玉广, 赵仁乐, 彭涛, 等. 侏罗纪巨厚基岩下采煤突水溃砂典型案例分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3903-3912.
LÜ Yu-guang, ZHAO Ren-le, PENG Tao, et al. A typical case analysis of water-sand inrush in mining under thick overburden rock in jurassic coalfield[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(11): 3903-3912.

[6] 胡少银, 刘泉声, 李世辉, 等. 裂隙岩体注浆理论研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 112-126.
HU Shao-yin, LIU Quan-sheng, LI Shi-hui, et al. Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass[J]. **Coal Science and Technology**, 2022, 50(1): 112-126.

[7] 张杰, 郭奇峰, 蔡美峰, 等. 循环扰动荷载作用下花岗岩中裂隙萌生扩展过程的颗粒流模拟[J]. 工程科学学报, 2021, 43(5): 636-646.
ZHANG Jie, GUO Qi-feng, CAI Mei-feng, et al. Particle flow simulation of the crack propagation characteristics of granite under cyclic load[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2021, 43(5): 636-646.

[8] 陈卫忠, 李术才, 邱祥波, 等. 岩石裂纹扩展的实验与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 18-23.
CHEN Wei-zhong, LI Shu-cai, QIU Xiang-bo, et al. Experimental and numerical research on crack propagation in rock under compression[J]. **Chinese Journal of Rock**

Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 18-23.

[9] 王家臣, 杨敬虎. 水沙涌入工作面顶板结构稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 254-260.
WANG Jia-chen, YANG Jing-hu. Roof stability of the mining face under the condition of water and sand inrush[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(2): 254-260.

[10] 刘亚群, 周宏伟, 李翼虎, 等. 浅埋煤层开采突水溃砂的颗粒流模拟研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(5): 534-540.
LIU Ya-qun, ZHOU Hong-wei, LI Yi-hu, et al. Water-sand inrush simulation under shallow coal mining based on the particle flow code[J]. **Journal of Xi'an University of Science and Technology**, 2015, 35(5): 534-540.

[11] 许延春, 杜明泽, 李江华, 等. 水压作用下防砂安全煤岩柱失稳机理及留设方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 328-334.
XU Yan-chun, DU Ming-ze, LI Jiang-hua, et al. Instability mechanism and design method of coal and rock pillar under water pressure[J]. **Journal of China Coal Society**, 2017, 42(2): 328-334.

[12] 赵启峰, 张农, 韩昌良, 等. 浅埋薄基岩含水层下煤层开采突水溃砂相似模拟实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 444-451.
ZHAO Qi-feng, ZHANG Nong, HAN Chang-liang, et al. Simulation experiment of water-sand inrush during the mining of the shallow coal seam under roof aquifer with thin bedrock[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2017, 34(3): 444-451.

[13] 彭涛, 冯西会, 龙良良, 等. 厚覆基岩下煤层开采突水溃砂机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 260-264.
PENG Tao, FENG Xi-hui, LONG Liang-liang, et al. Study on mechanism of water inrush and sand inrush in mining of coal seam with thick overlying bedrock[J]. **Coal Science and Technology**, 2019, 47(7): 260-264.

[14] 程桦, 张亮亮, 姚直书, 等. 厚表土薄基岩钻井井筒突水溃砂次生竖向受压破坏机理研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(1): 1-7.
CHENG Hua, ZHANG Liang-liang, YAO Zhi-shu, et al. Study on the mechanism of secondary vertical compression failure caused by water and sand inrush during shaft boring through thick alluvium and thin bedrock[J]. **Coal Engineering**, 2020, 52(1): 1-7.

[15] 张士川, 李杨杨, 李金平, 等. 采动裂隙突水溃砂过程物理参量变化特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3548-3555.
ZHANG Shi-chuan, LI Yang-yang, LI Jin-ping, et al. Experimental studies on variation characteristics of physical parameters during water and sand burst through mining fractures[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(10): 3548-3555.

[16] 李锋, 杨胜利, 李政岱, 等. 薄基岩顶板工作面突水溃砂及切顶灾害试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 125-133.
LI Feng, YANG Sheng-li, LI Zheng-dai, et al. Experimental study on disaster of water-sand inrush and roof cutting in working face with thin bedrock roof[J]. **Coal Science and Technology**, 2021, 49(11): 125-133.

[17] ASADIZADEH M, KARIMI J, HOSSAINI M F, et al. The effect of central flaw on the unconfined strength of rock-like specimens: an intelligent approach[J]. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, 2022, 46: 3679-3694.

[18] ASADIZADEH M, HOSSAINI M F, MOOSAVI M, et al. Mechanical characterisation of jointed rock-like material with non-persistent rough joints subjected to uniaxial compression[J]. **Engineering Geology**, 2019, 260: 105224.

[19] BIDGOLI M N, ZHAO Z, JING L. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2013, 6(5): 419-430.

[20] 李宁, 陈文玲, 张平. 动荷作用下裂隙岩体介质的变形性质[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 74-78.
LI Ning, CHEN Wen-ling, ZHANG Ping. Deformation properties of jointed rock mass under dynamic cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(1): 74-78.

[21] 陈蕴生, 刘晟锋, 李宁, 等. 裂隙对非贯通裂隙介质强度与变形特性影响的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 207-212.
CHEN Yun-sheng, LIU Sheng-feng, LI Ning, et al. Crack's influence on mechanical properties of the intermittent crack media[J]. **Journal of Northwest A & F University**

(Natural Science Edition), 2007, 35(7): 207-212.

[22] 张科, 张凯. 裂隙砂岩变形破裂过程中应变场灰度及纹理特征分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(4): 1253-1262.
ZHANG Ke, ZHANG Kai. Gray and texture features of strain field for fractured sandstone during failure process[J]. **Journal of China Coal Society**, 2021, 46(4): 1253-1262.

[23] 仝兴华, 韩建新, 李术才, 等. 基于裂隙岩样的多组贯穿裂隙岩体峰后应力−应变曲线研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1861-1866.
TONG Xing-hua, HAN Jian-xin, LI Shu-cai, et al. Study of post-peak stress-strain curve of rock mass with multiple penetrative crack sets based on fractured rock samples[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 1861-1866.

[24] 乔趁, 王宇, 宋正阳, 等. 饱水裂隙花岗岩周期冻胀力演化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2141-2150.
QIAO Chen, WANG Yu, SONG Zheng-yang, et al. Experimental study on the evolution characteristics of cyclic frost heaving pressure of saturated fractured granite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(8): 2141-2150.

[25] 李地元, 万千荣, 朱泉企, 等. 不同加载方式下含预制裂隙岩石力学特性及破坏规律试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 1025-1035.
LI Di-yuan, WAN Qian-rong, ZHU Quan-qi, et al. Experimental study on mechanical properties and failure behaviour of fractured rocks under different loading methods[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2021, 38(5): 1025-1035.

[26] 张金才, 王建学. 岩体应力与渗流的耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1981-1989.
ZHANG Jin-cai, WANG Jian-xue. Coupled behavior of stress and permeability and its engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(10): 1981-1989.

[27] 任建喜. 冻结裂隙岩石加卸载破坏机理CT实时试验[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 641-644.
REN Jian-xi. Real-time CT test of damage failure mechanism of frozen cracked rock in loading and unloading condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(5): 641-644.

[28] 黄达, 黄润秋. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 502-512.
HUANG Da, HUANG Run-qiu. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolvement of fissured rocks under unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 502-512.

[29] 张嘉凡, 徐荣平, 刘洋, 等. 冻融循环作用下注浆裂隙岩体微观孔隙演化规律及剪切力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 676-690.
ZHANG Jia-fan, XU Rong-ping, LIU Yang, et al. Study on micro-pore evolution law and shear mechanical behavior of grouting fractured rock mass under freeze-thaw cycle[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(4): 676-690.

[30] 杨超, 许轩, 王乐华, 等. 不同特征应力区间单裂隙砂岩与完整岩石蠕变特性的相关关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(7): 1347-1357.
YANG Chao, XU Xuan, WANG Le-hua, et al. Relationship between creep characteristics of intact rock and single-flawed sandstones under different critical stress intervals[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(7): 1347-1357.

[31] 岑夺丰, 刘超, 黄达. 拉剪应力作用下单裂隙砂岩裂纹扩展规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增刊 2): 731-739.
CEN Duo-feng, LIU Chao, HUANG Da. Experimental investigation on crack propagation law of sandstone containing a single fissure under tensile-shear stress[J]. **Journal of China Coal Society**, 2021, 46(Suppl.2): 731-739.

[32] 赵程, 幸金权, 牛佳伦, 等. 水−力共同作用下预制裂隙类岩石试样裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 2823-2830.
ZHAO Cheng, XING Jin-quan, NIU Jia-lun, et al. Experimental study on crack propagation of precrack rock-like specimens under hydro-mechanical coupling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl.1): 2823-2830.

[33] 武东阳, 蔚立元, 苏海健, 等. 单轴压缩下加锚裂隙类岩石试块裂纹扩展试验及 PFC^{3D} 模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1681-1692.
WU Dong-yang, YU Li-yuan, SU Hai-jian, et al.

Experimental study and PFC3D simulation on crack propagation of fractured rock-like specimens with bolts under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(6): 1681-1692.

[34] GHAZVINIAN A, NEJATI H R, VAHAB SARFARAZI. Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2013, 6(11): 4435-4444.

[35] 李明田, 邵东亮. 裂隙制作方式及充填情况对表面裂隙扩展规律的影响[J]. 山东交通学院学报, 2012, 20(1): 67-70, 86.
LI Ming-tian, SHAO Dong-liang. The influence of crack making modes and fillings on crack propagation[J]. **Journal of Shandong Jiaotong University**, 2012, 20(1): 67-70, 86.

[36] HUANG Y H, YANG S Q, TIAN W L, et al. An experimental study on fracture mechanical behavior of rock-like materials containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2016, 32(3): 442-455.

[37] 马丹. 破碎岩体的水−岩−沙混合流理论及时空演化规律[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
MA Dan. Water-rock-sand mixture flow theory of crushed rocks and temporal-spatial evolution[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[38] ZHUANG X, ZHOU S. An experimental and numerical study on the influence of filling materials on double-crack propagation[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53: 5571-5591.

[39] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 944-950.
ZHAO Xing-dong, LI Yuan-hui, YUAN Rui-fu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 944-950.

[40] 杨瑞峰, 马铁华. 声发射技术研究及应用进展[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 456-461.
YANG Rui-feng, MA Tie-hua. A study on the applications of acoustic emission technique[J]. **Journal of North University of China (Natural Science Edition)**, 2006, 27(5): 456-461.

[41] 贺雁鹏, 黄庆享, 王碧清, 等. 浅埋煤层大采高工作面顶板破断角实测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4): 746-752.
HE Yan-peng, HUANG Qing-xiang, WANG Bi-qing, et al. Field-measurement study on roof breaking angle of working face with large mining height in shallow coal seam[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2019, 36(4): 746-752.

[42] 邓雪杰, 张吉雄, 黄鹏, 等. 特厚煤层上向分层充填开采顶板移动特征分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 994-1000.
DENG Xue-jie, ZHANG Ji-xiong, HUANG Peng, et al. Roof movement characteristics in extra thick coal seam mining with the upward slicing filling technology[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(5): 994-1000.

[43] 杨胜利, 王家臣, 李良晖. 基于中厚板理论的关键岩层变形及破断特征研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2718-2727.
YANG Sheng-li, WANG Jia-chen, LI Liang-hui. Analysis of deformation and fracture characteristics of key strata based on the medium thick plate theory[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(8): 2718-2727.

[44] SONG Z, ZHANG J. The effect of confining pressure on mechanical properties in coal and rock: review and new insights[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2021, 14(23): 1-22.

[45] CHI X, YANG K, WEI Z. Investigation of energy and damage evolutions in rock specimens with large-scale inclined prefabricated cracks by uniaxial compression test and ae monitoring[J]. **Advances in Civil Engineering**, 2020, 2020(11): 1-12.