

岩煤接触面力学性质对组合煤岩力学行为影响机制

樊玉峰^{1,2}, 肖晓春^{1,2}, 丁 鑫^{1,2}, 徐 军^{1,2}, 王爱文³, 雷 云^{4,5}

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 辽宁省矿山环境与灾害力学重点实验室, 辽宁 阜新 123000; 3. 辽宁大学 灾害岩体力学研究所, 辽宁 沈阳 110000; 4. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122; 5. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 为明确组合煤岩力学行为及其冲击倾向性与岩煤间接触面力学性质关系, 开展了组合煤岩单轴压缩试验, 分析了岩煤间4种不同力学性质的接触面对组合煤岩强度、弹性模量、应变软化现象、声发射特征信号、能量累积耗散特征和冲击倾向性的影响规律, 研究了接触面黏结属性和破坏情况所引起的端面效应对煤岩局部变形特征及强度的影响机制。研究结果表明: 接触面力学性质对组合煤岩的力学性质有一定影响, 完整的接触面增强了组合煤岩的强度和弹性模量, 提高了弹性能累积能力, 抑制了峰前阶段的煤岩破裂, 削弱了峰后的应变软化阶段; 接触面的破坏降低了端面效应的影响作用, 提高了组合煤岩的破坏程度, 延长了峰后的应变软化过程; 无黏结型组合煤岩试样的各项力学指标均低于其余3种接触面; 建立了组合煤岩本构关系并提出了考虑接触面破坏的组合煤岩强度估算方法和接触面断裂的判定方法; 理论计算结果与实验结果较为一致; 随着岩煤间接触面力学性质的提高, 组合煤岩弹性能占比提高, 塑性能占比降低; 剖清了岩煤间接触面力学性质对组合煤岩冲击倾向性的影响规律, 认为接触面和煤岩相对力学性质是引起组合煤岩冲击倾向性各项指标冲突的重要影响因素。

关键词: 力学行为; 组合煤岩; 岩煤接触面; 冲击倾向性; 端面效应

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2023)04-1487-15

Influence mechanism of contact surface mechanical properties on mechanical behavior of coal rock combination

FAN Yufeng^{1,2}, XIAO Xiaochun^{1,2}, DING Xin^{1,2}, XU Jun^{1,2}, WANG Aiwen³, LEI Yun^{4,5}

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Mining Environment and Disaster Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Institute of Disaster Rock Mechanics, Liaoning University, Shenyang 110000, China; 4. Shenyang Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp., Fushun 113122, China; 5. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: The uniaxial compression test of coal and rock combination was carried out in order to clarify the influence mechanism of the contact surface mechanical properties on the rock-burst tendency of the coal rock combination, and the contact surfaces with four different mechanical properties were considered. The variation laws of strength, elastic modulus, strain softening phenomenon, acoustic emission characteristic signal, energy accumulation and dissipation character-

收稿日期: 2022-04-19 修回日期: 2022-09-14 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0540

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974186, 51974147); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-17)

作者简介: 樊玉峰(1995—), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生。E-mail: fyf925@163.com

通讯作者: 肖晓春(1979—), 男, 内蒙古化德人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: xxc7902@163.com

引用格式: 樊玉峰, 肖晓春, 丁鑫, 等. 岩煤接触面力学性质对组合煤岩力学行为影响机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4):

1487-1501.

FAN Yufeng, XIAO Xiaochun, DING Xin, et al. Influence mechanism of contact surface mechanical properties on mechanical behavior of coal rock combination[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1487-1501.



移动阅读

istics, and impact tendency of coal rock combination were analyzed. The influence mechanism of end face effect caused by the bonding properties and failure of contact surface on local deformation characteristics and strength of coal and rock was studied. The results show that the mechanical properties of the contact surface have a certain influence on the mechanical properties of the coal rock combination. The complete contact surface enhances the strength and elastic modulus of the coal rock combination, improves the elastic energy accumulation ability, inhibits the sample fracture in the pre-peak stage, and weakens the strain softening stage after the peak. The failure of the contact surface reduces the influence of the end-face effect, improves the failure degree of the coal rock combination, prolongs the post-peak strain softening process, and the strain energy density in the pre-peak stage is mainly plastic dissipation. The mechanical indexes of unbonded coal rock combination samples are lower than that of others. The constitutive relationship of coal rock combination is established, and the strength estimation method considering the contact surface failure, and the determination method of contact surface fracture are proposed. The theoretical calculation results are consistent with the experimental results. With the improvement of mechanical properties of rock coal interface, the proportion of elastic energy of combined coal increases, and the proportion of plastic property decreases. The influence law of the mechanical properties of rock coal contact surface on the rock burst tendency of coal rock combination is clarified. It is considered that the relative mechanical properties between the contact surface and coal is an important factor which causes the conflict of various indexes of coal rock combination rock burst tendency.

Key words: mechanical behavior; coal rock combination; contact surface of coal rock; rock burst tendency; end-face effect

随着我国经济不断发展,能源需求日益增大,现阶段煤炭资源仍是我国经济发展的主要基础能源,浅部煤炭资源的枯竭,导致开采深度逐年增加,深部矿井不断有冲击地压现象显现,以冲击地压为代表的深部矿山动力灾害成为制约我国煤炭资源开采的主要因素。区别于露天矿井和浅埋煤层,深部矿井由于其复杂的地质构造特征,在矿山灾害的预防治理方面面临更高的挑战,如何科学准确的评价目标矿井的冲击倾向性对合理施加支护防冲措施、提高生产安全性具有重要工程意义。深部矿井具有更高的地应力,这使得岩层煤层内部聚积了大量的能量,以岩石和煤组成的岩煤组合体成为了评价深部矿井冲击倾向性的又一重要研究对象,而组合煤岩的力学性质如弹性模量、强度、能量累积能力,能量释放效率,能量释放速度,破坏启动应力等指标对其冲击倾向性评价结果有重要影响,因此厘清组合煤岩力学性质演化机制将进一步提高冲击倾向性判定结果的准确性。

现有研究认为,组合煤岩的力学性质与其组合方式相关,肖晓春^[1]、陆菜平^[2]、左建平^[3]、张晨阳^[4]等认为组合煤岩的强度高于纯煤试样,低于岩石试样,而杨磊^[5]、白金正^[6]、陈绍杰^[7]等则认为岩石的加入对组合煤岩的强度增幅有限,甚至略低于纯煤试样,组合方式方面,较多的研究^[4,5,7-9]认为岩石的厚度会增大组合煤岩的强度,但并没有理论上的解释,一般的认为组合煤岩岩石厚度增大会使得组合试件中煤样的占比减少,降低了煤样内部存在明显缺陷的概率,

或提高了组合试样中的岩石含量,从而提高了组合煤岩的均质度,进而使其强度提高。组合煤岩冲击倾向性评价方法方面,肖晓春等^[10-11]研究了岩石弹性能累积特性对组合煤岩冲击倾向性的影响,并基于能量累积释放角度提出了冲击倾向性评价方法。付玉凯^[12]提出了组合煤岩体剩余能量释放率指标的冲击倾向性评价方法。赵宏林等^[13]探究了倾角对煤岩组合体力学性质及冲击倾向性的影响,认为倾角的增加导致组合煤岩冲击能量指数逐渐减小。左建平等^[14-16]对不同组合方式的组合煤岩开展单轴压缩实验,探讨了组合方式对冲击倾向性的影响及煤岩的相互作用,探究了其破坏行为并建立了差能失稳模型和非线性模型。陈光波等^[17]开展了不同岩煤比例和组合方式的组合体力学特征研究,从理论上揭示了组合体的弹性模量随岩石占比的增加而增加的规律,分析了组合体的失稳破坏机制。秦忠诚等^[18]认为组合煤岩中煤岩是能量积聚的主要载体,组合体组分之间硬度差别越大,冲击能量指数越大,冲击倾向性越强。杜学领^[19]综述了现有实验结果,针对组合煤岩试件冲击倾向性的国家标准进行了讨论,认为基于剩余能量指数法评价组合煤岩冲击倾向性不具备大量实验数据的支撑,试样采集、组合方式等方面还有待深入研究。究其原因,组合煤岩力学性质演化机制尚不明确,力学性质变化规律尚不统一。李单林等^[20]认为试件端面的摩擦效应对试件的变形破坏特征有较大影响,CHEN S等^[21]开展了组合煤岩单轴压缩试验,认为岩煤力学性

质的差异影响接触面附近的应力状态, 导致煤体强度的提高和岩体强度的降低。ZHAO Z 等^[22]基于应变能等效原理建立了煤岩组合体的等效均质模型及其应力状态表达式, 推导出考虑煤与软岩界面黏结强度等效模型的一般压剪破坏准则, 并通过实验室实验来进行验证。SONG H 等^[23]探究了考虑界面效应的岩-煤组合试样的强度破坏特性及其渐进破坏机制, 着重考虑了界面附近岩石与煤岩变形差异, 解释了组合煤岩力学性质强度差异的原因。YIN D 等^[24]探究了单轴条件下组合煤岩的力学性质, 研究了岩性对其强度、宏观破坏、能量演化和破坏特征的影响。可见端面效应对组合煤岩力学性质的影响已逐渐被国内外学者认可, 上述研究表明组合煤岩的力学指标与岩煤间接接触面力学性质有重要关系。

准确的组合煤岩冲击倾向性评价是保障煤矿安全生产的重要前提, 剖清组合煤岩力学性质和能量耗散运移特征对冲击倾向性评价指标的影响具有重要意义, 前人对组合煤岩力学性质及冲击倾向影响因素的深入探索为后续研究提供了基础和方向。由于组合煤岩制备方法区别于标准岩心钻取过程, 岩煤之间一般需要通过粘结剂粘结, 组合煤岩中各亚层尺寸均小于标准试件, 端面效应对煤岩局部变形及组合试件整体力学性质具有显著影响, 因此应着重考虑岩煤间接接触面力学性质来建立力学本构关系, 更为准确地描述组合煤岩的力学特性及演化规律, 从而保证冲击倾向性评价结果的准确性。笔者以岩石力学为基础, 考虑岩煤间接接触面力学性质引起的端面效应和岩、煤试件变形相互影响的特点, 建立了考虑接触面及煤岩力学性质关系的组合煤岩本构模型, 并提出了组合煤岩强度估算方法, 讨论了岩煤间接接触面变形-破坏过程对组合煤岩冲击倾向性的影响情况, 以期为明确冲击倾向性的准确评价方法提供理论基础。

1 试验系统与试验方案

首先, 采用试验研究的方法, 将岩石试块分别通过环氧树脂、白乳胶和沥青黏结在一起, 分别开展压剪和劈裂实验, 获得粘结剂的抗拉强度和剪切强度, 测定不同粘结剂的基本力学性质, 粘结剂力学性质见表 1; 其次, 采用 3 种粘结剂制备成 3 种组合煤岩试样, 与无粘结剂的组合试样共同开展单轴压缩试验, 通过应变片测定组合试样中煤样各位置的横向变形, 探究粘结剂力学性质对组合煤岩中煤样各位置变形特征的影响, 通过声发射监测系统监测组合煤岩加载过程中的声发射关键参量; 最后, 采用理论分析方法, 考虑

端面效应建立组合煤岩力学性质本构模型, 分析岩煤间接接触面力学性质对组合试样冲击倾向性的影响机制。

表 1 黏结剂力学参数标定

Table 1 Mechanical parameters calibration of binders

黏结剂	环氧树脂	白乳胶	沥青
抗拉强度/MPa	1.33	1.14	0.39
内摩擦角/(°)	9.15	15.91	17.13
黏聚力/MPa	11.38	4.45	2.15

压剪和劈裂实验部分试样如图 1 所示, 沥青试样压剪后表面具有较大的摩擦力, 如图 1(a) 所示; 环氧树脂试件压剪和劈裂实验均伴随着碎块脱落, 如图 1(b)、(c) 所示; 白乳胶试样压剪后试样保持原状, 仅为接触面破坏, 如图 1(d) 所示。因此定义沥青为黏滑型接触面, 白乳胶为脆断型接触面, 环氧树脂为强黏结接触面。



图 1 接触面力学属性测定试验

Fig.1 Measurement test of mechanical properties of contact surface

1.1 试验系统

试验采用 MTS 岩石力学测试系统对组合煤岩试样进行一次位移加载, 压力机最大荷载 2 000 kN, 精度 0.5%, 加载速率 0.01 mm/s, 采样频率 10 Hz, 应变监测系统采样频率 1 000 Hz, 记录组合煤岩中岩石和煤的轴向应变、横向应变, 同时监测受载过程的声发射信号, 声发射采样频率为 1 000 kHz, 阈值 40 dB, 采样点为 1 024 个, 试验系统如图 2 所示。



图 2 试验系统

Fig.2 Experiment system

1.2 试样制备

组合煤岩试样由岩石和煤样两部分组成,其中煤样采自鄂尔多斯新纳源矿,岩样取砂岩制备,为获得试样表面的横向应变,岩石与煤样均加工成边长 50 mm 的方形试样,保证上下端表面平整度小于 0.02 mm,确保试样加载方向垂直于煤样的层理方向,采用环氧树脂、白乳胶、沥青以及润滑脂将岩石和煤样组合制备成组合试样,每类试样不少于 3 块,试样编号见表 2,试样实物如图 3(a) 所示,在试样表面布置应变片监测试样横向应变,应变片分别布置在接触面两侧,即岩石底端、煤样顶端、煤样中部、煤样底端,应变片布置如图 3(b) 所示。为消除试样与压力机间摩擦力,在试样和压力机接触部分放置润滑脂,试样布置示意如图 4 所示。

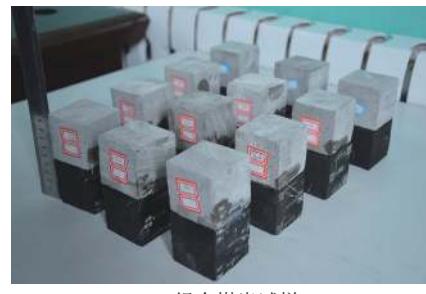
表 2 试验方案

Table 2 Experimental program

试样编号	黏结方式	岩煤高度比	加载速率/(mm·s ⁻¹)
f1~f3	环氧树脂		
f4~f6	白乳胶		
f7~f9	沥青	1:1	0.01
f10~f12	无黏结		

1.3 试验步骤

① 测量煤样的尺寸和质量,与岩石黏合后制成组合试样,对岩样部分和煤样部分分别粘贴横向应变片,将润滑脂涂抹到试验台上,试样放置于润滑脂上,在试样顶部涂抹润滑脂,在试验台上布置声发射探头,准备实验;② 调整声发射设备,设定声发射参数,调整动态应变仪,开始施加荷载,同时打开声发射监测系统和动态应变仪,采集加载过程中的荷载、位移、声发射信号以及组合煤岩局部的横向应变,在试样破坏后停止加载并保存数据;③ 对试验数据进行处理并分析。



(a) 组合煤岩试样



(b) 应变片布置位置

图 3 试样实物

Fig.3 Sample physical

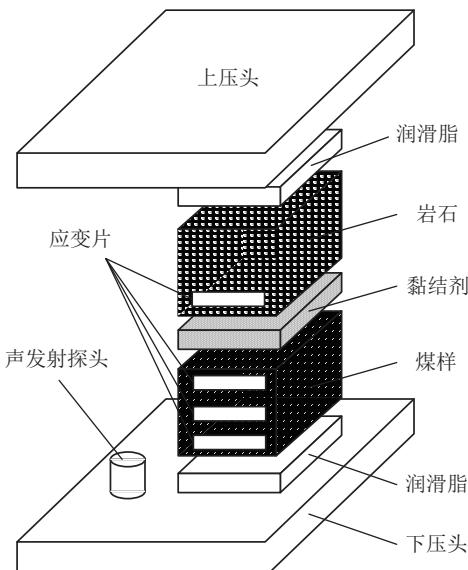


图 4 试样布置方法

Fig.4 Sample arrangement method

2 接触面力学性质影响的组合煤岩力学性质演化规律

2.1 组合煤岩力学性质演化规律

通过单轴压缩试验,获得组合煤岩全程应力应变曲线,取 4 类组合煤岩典型应力应变曲线如图 5 所示,分析接触面力学性质影响的组合煤岩力学性质异同性。

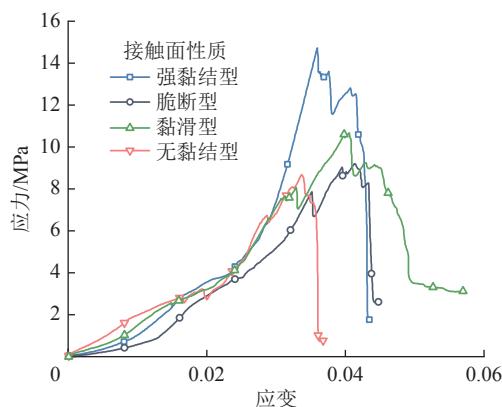


图 5 组合煤岩应力应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of coal rock combination

如图 5 所示, 分别为强黏结型、脆断型、黏滑型和无黏结型 4 类组合试样的应力应变曲线, 可以看出 4 类试样的力学性质存在一定的差异。具体表现为强

黏结型组合试样具有更高的弹性模量, 且其强度明显高于其余 3 类试样, 在峰前阶段没有明显的应力降低, 但在峰后阶段出现了 2 次应力调整, 随后应力突降, 破坏最为猛烈; 脆断型和黏滑型组合试样的应力应变曲线较为接近, 在峰前阶段均有一定的应力调整, 黏滑型组合试样较前者强度略低, 且峰后阶段呈现出明显的应变软化现象, 其破坏剧烈程度最低; 无黏结型组合煤岩的峰值应变最小, 强度最低, 峰后无明显的应力调整。

强度和弹性模量反映了试件的承载能力和蓄能特征, 决定了试件累积能量的上限, 弹性能指数和冲击能指数分别反映试件弹性能累积和释放特征, 声发射能量反映试件破坏的剧烈程度以及损伤发育情况, 因此选择以上 5 个指标进行量化, 分析量化结果见表 3。

表 3 组合煤岩试样力学指标量化

Table 3 Quantification of mechanical index of coal rock combination

试样	黏结方式	强度/MPa	弹性模量/MPa	弹性能指数	冲击能指数	声发射能量/(mV·μs)
f1	强黏结型	14.73	1 150.87	2.07	1.58	14.52
f2	强黏结型	13.81	808.45	5.18	1.17	22.63
f3	强黏结型	11.54	970.47	1.27	1.36	25.05
f4	脆断型	10.01	578.57	1.62	6.06	7.97
f5	脆断型	9.20	606.52	0.96	1.73	25.47
f6	脆断型	8.23	441.73	2.30	2.85	6.89
f7	黏滑型	10.67	496.67	9.22	0.75	24.34
f8	黏滑型	9.88	143.26	—	—	—
f9	黏滑型	6.67	581.72	0.29	1.74	35.41
f10	无黏结	8.67	562.16	1.46	6.34	8.71
f11	无黏结	8.21	614.21	1.09	1.70	28.94
f12	无黏结	6.76	232.67	—	—	—

由表 3 可知, 接触面的力学属性对组合煤岩的力学指标均有不同程度的影响。具体表现为: 强黏结型组合试样具有最高强度和弹性模量, 强黏结接触面对煤样端面的约束作用最强, 对组合煤岩的弹性模量和强度均有明显的强化作用; 黏滑型组合试样具有最大的弹性能指数和声发射能量累积量, 由于黏滑型接触面具有较大的摩擦力, 因此组合煤岩在受载过程中接触面反复断裂, 端面效应持续存在, 从而导致峰后阶段表现出明显的应变软化现象, 煤岩破坏最为彻底, 因此黏滑型组合试样的声发射能量累积量最大, 冲击能量指数最小; 无黏结组合试样的冲击能量指数最高, 表明组合煤岩所累积的弹性能在破坏时释放率最高, 破坏后试样完全丧失承载能力。

2.2 组合煤岩试样变形特征与破坏特征

岩石试件在单轴压缩过程中会发生轴向压缩和径向张拉的现象, 区别于标准岩石试样或煤岩试样, 组合煤岩受限于制备方法, 岩样部分和煤样部分在变形属性上往往存在较大的差异, 使得其在受载过程中两部分的变形情况是不同的, 在接触面黏结作用下岩样和煤样接触面的变形应是相同的, 而远离接触面位置的变形则会表现出较大的差异, 接触面黏结是否完整对组合煤岩的变形和破坏特征具有重要影响, 图 6 为 4 类组合煤岩中煤样顶端、中间和底端 3 个位置的横向应变, 与之对应的组合煤岩破坏特征如图 7 所示。

从图 6 可知, 接触面力学属性对组合煤岩的变形

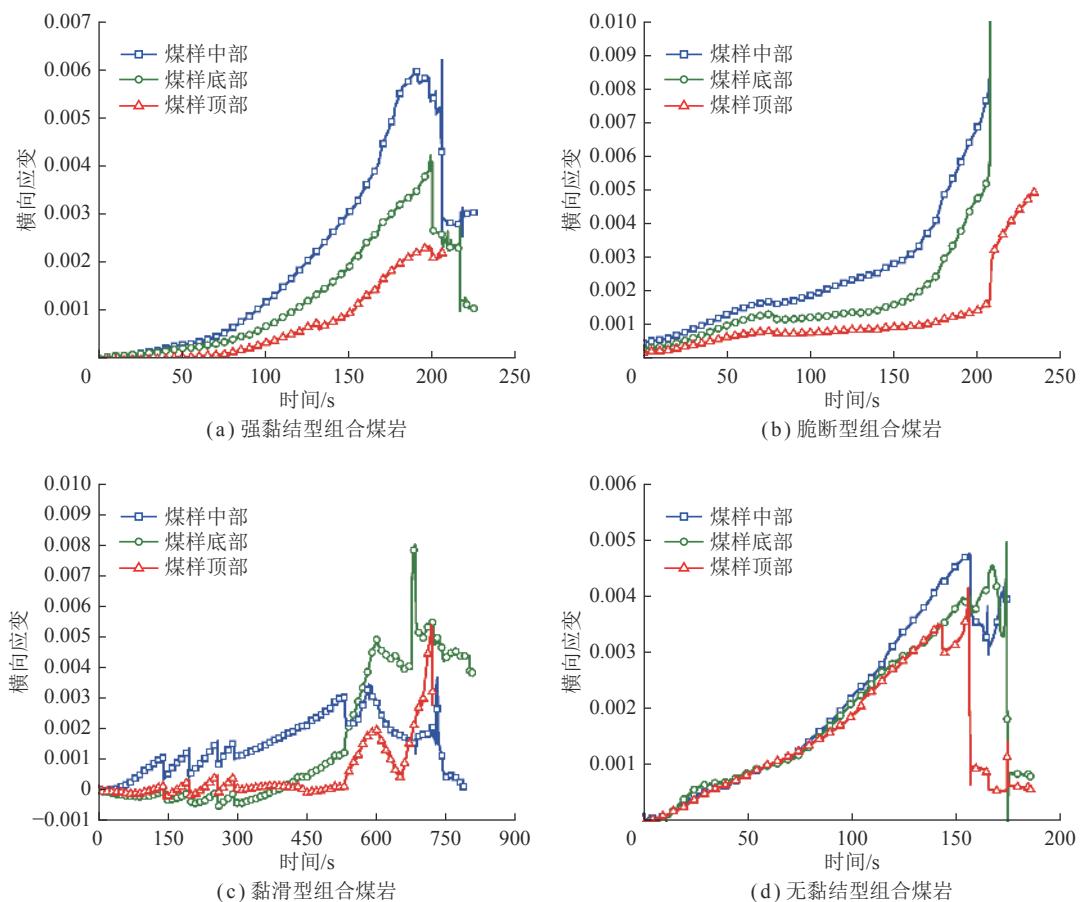


图 6 组合煤岩横向应变

Fig.6 Horizontal strain of coal rock combination



图 7 组合煤岩试样破坏

Fig.7 Failure characteristics of coal rock combination

特征有重要影响。主要表现为: 煤样受强黏结接触面约束作用, 煤样顶端与岩样变形相同, 其应变始终小于中部和底端的应变; 脆断型接触面力学性质弱于强黏结型, 因此在组合煤岩完全破坏前其变形特征与强黏结型组合煤岩类似, 区别在于在加载初期煤样中3个位置的应变同时出现了一次突降, 这可能是由于接触面出现微剪断引起的; 黏滑型接触面具有初始黏结

强度低, 破坏后摩擦力高的特性, 因此在整个加载过程中出现应变反复增大再减小的现象; 无黏结型组合试样中岩石与煤样间采用了润滑脂消除岩煤之间的摩擦力, 因此煤样各位置的横向变形较为接近, 端面对煤样的变形无影响作用。

图 7 为4类组合煤岩的破坏特征, 其中强黏结型组合煤岩的破坏程度最小, 破坏后呈现出锥形破坏区,

受强黏结接触面作用,岩石出现了明显的张拉型裂纹,这是煤样横向变形对岩石力学性质的劣化作用引起的;脆断型和黏滑型组合煤岩的破坏形式均为张拉破坏,黏滑型组合煤岩的破坏程度更高,由于接触面断裂后较为粗糙,在峰后阶段仍引起较大的端面效应,使得煤样进一步破坏;无黏结组合试样则表现出明显的张拉破坏特征,破坏程度较低,也未表现出剪切破

坏或共轭剪切破坏现象。结果表明接触面引起的端面效应对组合煤岩的破坏形式具有显著影响,消除了煤样两端的摩擦力后端面效应的作用不再显现。

2.3 组合煤岩试样破坏过程声发射能量演化特征

进一步探究接触面力学性质对组合煤岩破坏过程的声发射能量特征影响情况,4类组合试样的应力时间曲线和声发射能量曲线如图8所示。

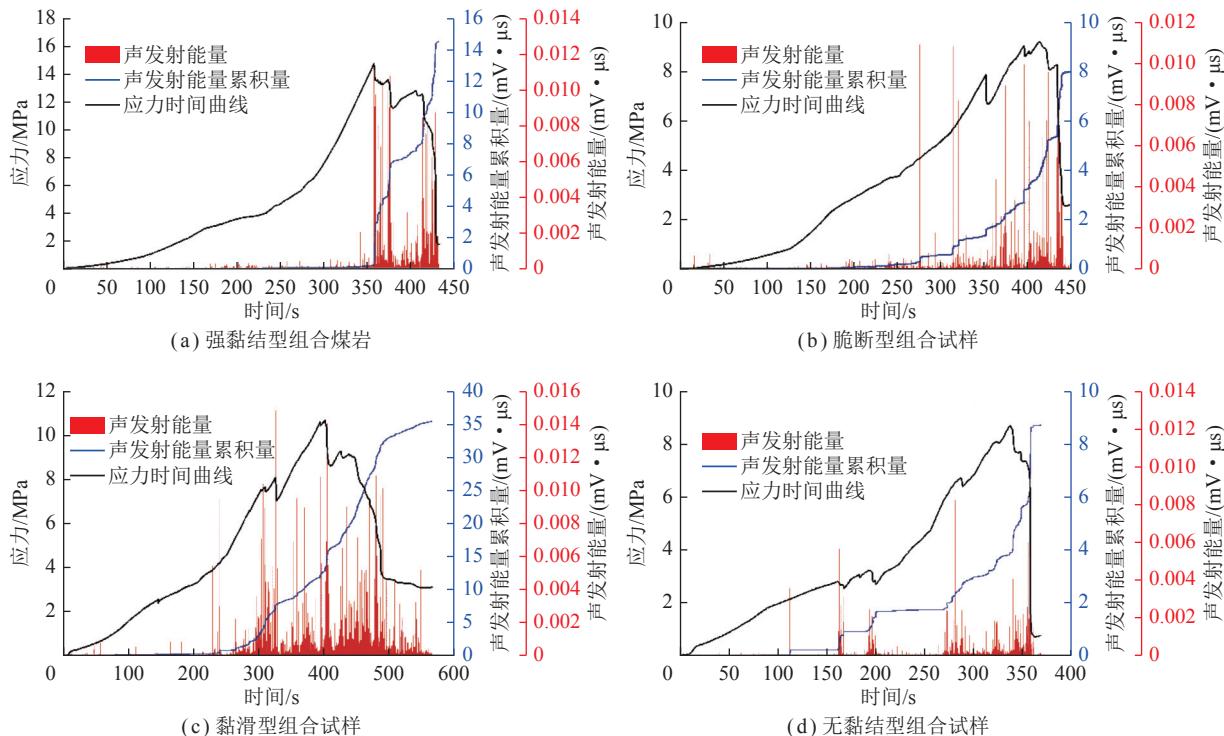


图8 组合煤岩破坏过程声发射能量与应力关系

Fig.8 Acoustic emission energy of coal rock combination failure process

声发射能量特征反映了试样内部裂纹的产生与扩展,可以从峰前和峰后2个阶段讨论组合试样的损伤演化特征。从图8(a)中可以发现,强黏结型组合煤岩峰前几乎没有声发射信号出现,表明组合试样在峰前阶段损伤发育极慢,在应力峰值处出现声发射信号峰值,声发射能量累积量在应力峰值处迅速上升,组合煤岩迅速破坏;脆断型组合煤岩在峰前阶段出现了几次应力突降,伴随着明显声发射信号产生,从声发射能量累积量来看,峰前阶段的损伤发育主要集中在应力突降处;黏滑型组合煤岩同样在峰前阶段出现了几次应力突降,区别于脆断型组合煤岩,黏滑型组合煤岩的声发射能量累积量增长速度快于前者,并且在峰后阶段有明显的应力调整现象,煤样进一步发生破坏;无黏结型组合煤岩均在应力突降处产生声发射信号,其声发射特征与常规煤岩试验并无区别,声发射能量累积量小于前3类组合试样,表明其损伤程度最

小,消除了接触面摩擦力后端面效应,不再对组合煤岩破坏起作用。

声发射能量累积量的变化反映了损伤发育情况,从声发射能量累积量增长特征来看,强黏结型组合煤岩在峰前阶段几乎没有损伤,直到应力峰值时损伤才开始快速发育,黏滑型和脆断型组合煤岩在加载至200 s时损伤开始发育,而无黏结型组合煤样在加载100~150 s时损伤即开始发育,表明了接触面的黏结作用约束了组合煤岩的损伤演化,导致试件从有明显前兆信息的破坏转变为突然迅速破坏,使组合煤岩的破坏愈加难以预测。

3 考虑端面效应的组合煤岩本构模型

组合煤岩的变形由岩样和煤样两部分变形组成,岩煤接触面的黏结作用引起的端面效应导致煤样内部应力重分布,主要影响的是组合煤岩的强度指标,

因此本节从一维组合煤岩的本构关系为切入点,讨论端面效应对组合煤岩的强度特征影响,并通过分析接触面断裂和黏滑特性解释峰前阶段的应力突降现象。

3.1 一维组合煤岩本构关系

文献[11]表明,组合煤岩在加载至破坏过程中岩石一般不会发生破坏,由于组合煤岩中煤样的强度远低于岩样的强度,在组合煤岩发生破坏时岩石往往仍处于弹性阶段或刚刚进入弹性阶段,在应力峰值处岩石会出现变形回弹现象,如图9(a)所示。煤岩一般为软岩,具有软岩的基本特征如屈服阶段,此阶段是煤岩损伤发育开始的阶段,如图9(b)所示(其中, $\varepsilon_{c,1}$ 为煤岩进入屈服阶段的应变; $\varepsilon_{c,2}$ 为峰值应变; $\varepsilon_{c,3}$ 为残余应变),由此可将煤岩划分为3个阶段,分别为弹性阶段、屈服阶段和峰后残余阶段。

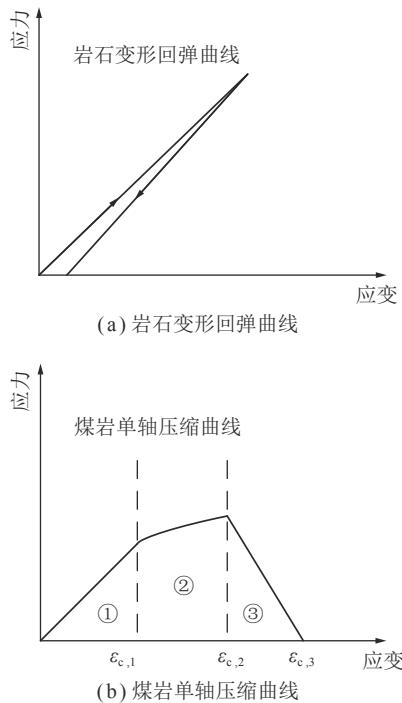


图9 组合煤岩变形过程各亚层应力应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of each sublayer in the deformation process of coal rock combination

可以将组合煤岩简化成由岩石和煤岩组成的弹簧系统如图10所示,煤和岩石的刚度分别表示为 K_c 和 K_r ,组合煤岩的刚度表示为 K_{eq} ,在轴向压缩时,变形与弹簧刚度的关系为

$$F = K_{eq}\Delta x \quad (1)$$

其中, F 为轴向荷载; Δx 为弹簧的变形量,轴向荷载和变形间存在的关系为

$$A\sigma = E_{eq}\varepsilon_{eq}A = \frac{E_{eq}A\Delta x}{H} \quad (2)$$

其中, H 为弹簧的原始长度; A 为截面面积; E_{eq} 为组合

煤岩弹性模量; ε_{eq} 为组合煤岩的应变,弹簧刚度与弹性模量的关系为

$$K_{eq} = \frac{E_{eq}A}{H} \quad (3)$$

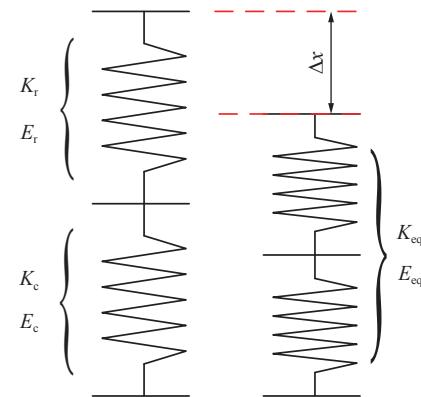


图10 组合煤岩弹簧系统

Fig.10 Combined coal rock spring system

此外,串联弹簧的等效刚度可以表示为

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_r} \quad (4)$$

组合煤岩的弹性模量可以通过式(3)和式(4)得到:

$$\frac{h_{eq}}{E_{eq}A} = \frac{h_c}{E_cA} + \frac{h_r}{E_rA} \quad (5)$$

式中, h_{eq} 为组合煤岩试件的总高度; h_c 为组合煤岩中煤样的高度; h_r 为组合煤岩中岩样的高度。

组合煤岩弹性模量 K_1 为

$$K_1 = E_{eq} = \frac{E_r E_c}{P(E_r + E_c)} \quad (6)$$

式中, E_r 和 E_c 分别为岩石和煤岩的弹性模量; P 为煤高度占比,并且有组合煤岩的总应变与岩石和煤岩应变关系为

$$\varepsilon_{eq} = P\varepsilon_c + (1 - P)\varepsilon_r \quad (7)$$

式中, ε_r 和 ε_c 分别为岩石和煤岩部分的应变,进一步得到组合煤岩①阶段的本构关系为

$$\sigma_{eq} = E_{eq}\varepsilon_{eq} = K_1 [P\varepsilon_c + (1 - P)\varepsilon_r] \quad (0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c,1}) \quad (8)$$

其中, σ_{eq} 为应力,当煤岩进入②阶段时,存在损伤因子 D ,煤岩的弹性模量 $E_{c,2}$ 可表示为

$$E_{c,2} = E_c (1 - D) \quad (9)$$

得到②阶段的组合煤岩本构关系:

$$\sigma_{eq,2} = K_2 \left[(\varepsilon_c - \varepsilon_{c,1}) + \frac{1 - P}{P} (\varepsilon_r - \varepsilon_{r,1}) \right] + K_1 \left(\varepsilon_{c,1} + \frac{1 - P}{P} \varepsilon_{r,1} \right) \quad (\varepsilon_{c,1} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c,2}) \quad (10)$$

其中, K_2 可表示为

$$K_2 = \frac{(1-D)E_r E_c}{E_r + (1-D)E_c} \quad (11)$$

$$\sigma_{eq,2} = K_3 \left[(\varepsilon_c - \varepsilon_{c,2}) + \frac{1-P}{P} (\varepsilon_r - \varepsilon_{r,2}) \right] + K_2 \left[(\varepsilon_{c,2} - \varepsilon_{c,1}) + \frac{1-P}{P} (\varepsilon_{r,2} - \varepsilon_{r,1}) \right] + K_1 \left(\varepsilon_{c,1} + \frac{1-P}{P} \varepsilon_{r,1} \right) \quad (\varepsilon_{c,2} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c,3}) \quad (12)$$

其中, $\sigma_{eq,2}$ 为组合煤岩屈服阶段的轴向应力; $\varepsilon_{r,1}$ 为组合煤岩中煤样进入屈服阶段时岩样对应的应变, $\varepsilon_{r,2}$ 为组合煤岩中煤样达到峰值应变时岩样对应的应变。 K_3 可表示为

$$K_3 = \frac{E_r E_{c,3}}{P(E_r + E_{c,3})} \quad (13)$$

不难发现一维组合煤岩本构关系包含煤岩的屈服阶段, 在②阶段的总应力应变曲线中仍表现出弹性模量劣化的特征, 这与实验结果有一定差异, 需要进一步考虑端面效应对组合煤岩内应力分布的影响。

3.2 考虑端面效应的二维组合煤岩本构关系

端面效应是由接触面摩擦力或黏结作用引起的, 首先考虑端面被完全约束及无约束时的变形情况, 如图 11 所示, 其中, u 和 v 分别为初始端面 x 和 y 方向的边长, 其微分形式反映的是 2 个方向的变形。

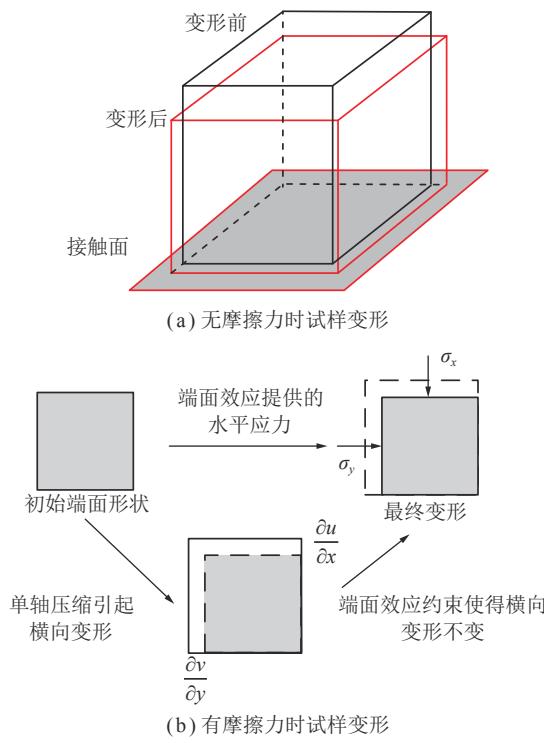


图 11 端部摩擦力影响的试样变形差异

Fig.11 Specimen deformation difference affected by end friction

当试样为弹性且端面无约束时, 试样在轴向载荷作用下将发生轴向和侧向变形。当端面被完全约束时, 端面的变形被完全约束, 如图 11(b) 所示, 水平方向的应力可以通过水平方向的变形来计算。水平变形和单轴变形的关系可以表示为

在组合煤岩残余阶段即③阶段, 煤样的弹性模量为负值, 表示为 $E_{c,3}$, 则③阶段的本构关系可表示为

$$\varepsilon_x = -v\varepsilon_z = -v\dot{\varepsilon}_z t \quad (14)$$

其中, ε_x 为水平方向的应变; ε_z 为轴向应变; v 为试样的泊松比; t 为加载时间; $\dot{\varepsilon}_z$ 为加载速率。 Y 方向的水平应变与 X 方向相同。当试样的两端受到完全约束时, 试样各处的横向变形与该位置和端面距离有关。由于试样中部距离端面较远, 其横向变形不会受到明显的影响。因此, 试样的横向变形可以表示为距离端面位置的函数, 即

$$f(x)_{\frac{\sqrt{3}}{2}D} = -\frac{4\varepsilon_x}{3D^2}x^2 + \frac{4\sqrt{3}\varepsilon_x}{3D}x \quad (15)$$

其中, x 为端面上任意一点距端面的距离; D 为试样的直径, 端面效应影响的最大距离为 $\sqrt{3}D/2$, 则不受端面效应影响的范围横向应变为

$$f(x)_{\frac{\sqrt{3}}{2}D} = \varepsilon_x \quad (16)$$

结合式 (14) 和式 (15) 求得水平应力 σ_x , 可表示为

$$\sigma_x = E \left[\varepsilon_x - 2 \left(-\frac{2\varepsilon_x}{3D^2}x^2 + \frac{2\sqrt{3}\varepsilon_x}{3D}x \right) \right] \quad (17)$$

其中, E 为试样的弹性模量, 并且 X 方向和 Y 方向的应力 σ_x 、 σ_y 即为试样内部的剪应力 τ_{xz} , 有

$$\sigma_x = \sigma_y = 2\tau_{xz} \quad (18)$$

试样中的轴向应力 σ_z 是连续的, 可表示为

$$\sigma_z = E\dot{\varepsilon}_z t \quad (19)$$

组合煤岩中煤样内部各位置应力状态如图 12 所示。单轴条件下原岩试样的横向变形可表示为

$$\varepsilon_{x,r} = -v_r \dot{\varepsilon}_z t = \frac{-v_r \dot{\sigma}_z t}{E_r} \quad (20)$$

其中, E_r 为岩石的弹性模量; v_r 为岩石的泊松比; $\dot{\sigma}_z$ 为轴向应力增加速率; $\varepsilon_{x,r}$ 为岩石的横向应变; $\varepsilon_{z,r}$ 为岩石的轴向应变, 组合煤岩中煤样上端面附近的水平应力可以表示为

$$\sigma_{x,c-top} = E_c \left[\varepsilon_{x,c} - 2 \left(-\frac{2\varepsilon_{x,c}}{3D^2}x^2 + \frac{2\sqrt{3}\varepsilon_{x,c}}{3D}x \right) - \varepsilon_{x,r} \right] \quad (21)$$

其中, $\sigma_{x,c-top}$ 为上端面引起的水平应力; E_c 为煤样的弹性模量; $\varepsilon_{x,c}$ 为端面无约束时煤样的横向变形, 可表示为

$$\varepsilon_{x,c} = -v_c \varepsilon_{z,c} = \frac{-v_c \dot{\sigma}_z t}{E_c} \quad (22)$$

其中, v_c 为煤样的泊松比, 同样的, 由于组合煤岩下表面与压力机之间存在摩擦, 煤样下表面的变形与压力机之间的关系可表示为

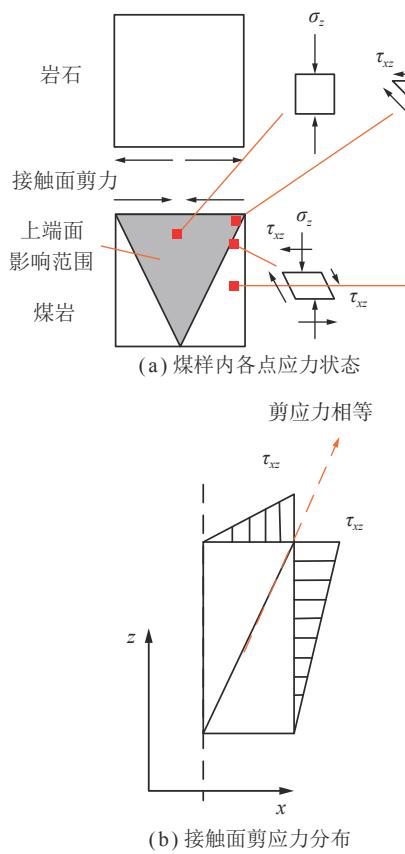


图 12 组合煤岩内各点应力状态

Fig.12 Stress state of each point in coal rock combination

$$\varepsilon_{x,p} = \frac{\sigma_{x,p}}{E_c} = \frac{\tau_{xz}}{E_c} = \frac{\mu \dot{\sigma}_z t}{E_c} \quad (23)$$

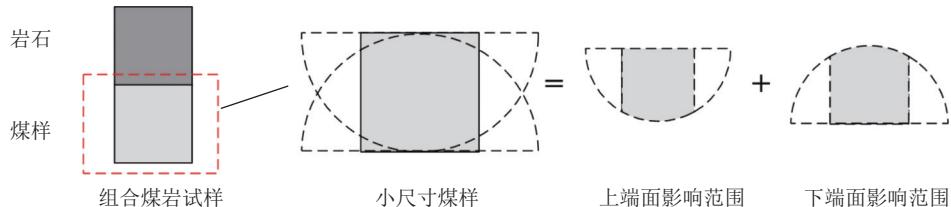


图 13 端面效应影响范围叠加

Fig.13 Superposition of the impact range of the end effect

3.3 考虑端面脆断与黏滑特性的组合煤岩强度判定

根据以上分析可以得到接触面始终完整情况下的组合煤岩强度, 进一步考虑接触面破坏对组合煤岩强度的判据的影响, 将岩煤始终黏结修正为可断裂情况。

$$v_r \frac{\sigma_n}{E_r} = \varepsilon_r v_r = \varepsilon_{r-hor} \quad (29)$$

$$v_c \frac{\sigma_n}{E_c} = \varepsilon_c v_c = \varepsilon_{c-hor} \quad (30)$$

式(29)和式(30)分别为无黏结时的岩石和煤样水平应变, 其中, v_c 为煤的泊松比; σ_n 为轴向应力; ε_{r-hor} 和 ε_{c-hor} 分别为岩石和煤的水平应变, 接触面两侧岩煤

式中, $\varepsilon_{x,p}$ 为与压力机接触的端面无摩擦力时的煤样横向变形; $\sigma_{x,p}$ 为与压力机接触的端面引起的水平应力; μ 为试样与压力机间的摩擦因数, 煤样下表面附近的水平应力 $\sigma_{x,c-bottom}$ 可表示为

$$\sigma_{x,c-bottom} = E_c \left\{ \varepsilon_{x,c} - 2 \left[-\frac{2\varepsilon_{x,c}}{3D^2} (h_c - x)^2 + \frac{2\sqrt{3}\varepsilon_{x,c}}{3D} (h_c - x) \right] - \varepsilon_{x,p} \right\} \quad (24)$$

其中, h_c 为组合煤岩中煤样的高度, 根据式(21)和式(24)可求得上下2个端面引起的煤样内部应力变化, 如图13所示。

然后计算出试样内距离端面任意一点的主应力为

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sqrt{\sigma_z^2 - 4 \times 2\tau_{xz}^2}}{2} \quad (25)$$

$$\sigma_2 = 0 \quad (26)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z - \sqrt{\sigma_z^2 - 4 \times 2\tau_{xz}^2}}{2} \quad (27)$$

根据Griffith破坏准则, 单轴抗压强度 $[\sigma_c]$ 与主应力的关系为

$$[\sigma_c] \geq \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (28)$$

综合以上分析可以求得接触面完整条件下考虑岩石力学性质、岩石变形特征、岩煤高度比、煤岩力学性质、煤岩变形特征的组合煤岩强度特征。

试件的水平应变应该相同, 且由于岩石的弹性模量和泊松比明显高于煤样, 认为岩石应变不变, 煤样应变与岩石相同, 当存在粘结剂且岩石应变与煤样应变差值满足式(31)时, 接触断裂, 即

$$\sigma_n > \frac{C}{E_c \left(\frac{v_c}{E_c} - \frac{v_r}{E_r} \right) - \tan \varphi} \quad (31)$$

式中, C 为接触面的黏聚力; φ 为接触面的内摩擦角, 并给出了接触面保持完整的岩煤变形参数条件如式(32)所示:

$$C + \sigma_n \tan \varphi > \sigma_n E_c \left(\frac{v_c}{E_c} - \frac{v_r}{E_r} \right) \quad (32)$$

式(32)中左侧项为接触面强度函数,右侧项为岩煤材料判定函数,两者关系如图14所示。由图14可以看出,接触面的力学性质由黏聚力和内摩擦角决定,而判定函数由岩石和煤岩的变形参数决定,当判定函数小于接触面强度函数时,接触面保持完整,反之接触面则发生断裂。此外,由于判定函数为关于轴向应力 σ_n 的一次函数,其斜率由岩石和煤岩的相对变形性质决定,当岩石与煤岩的弹性模量相差较大时,判定函数呈现出较大的斜率,接触面断裂应力较小,当两者弹性模量相差较小时,接触面断裂应力则相应提高,泊松比参数也表现出相同规律,这也说明了组合煤岩中岩石和煤岩的性质差异越大,接触面越难保持完整,需要更高强度的黏结剂黏结试件。

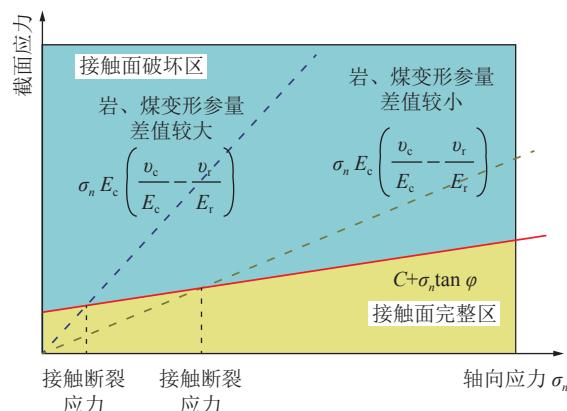


图14 接触面断裂判据

Fig.14 Fracture criterion of contact surface

当岩煤接触断裂后,由岩煤间摩擦力作用导致了较弱的端面效应,结合3.2节的强度估算方法对前文的实验结果进行验证,获得组合煤岩的单轴抗压强度试验结果与理论结果关系如图15所示。

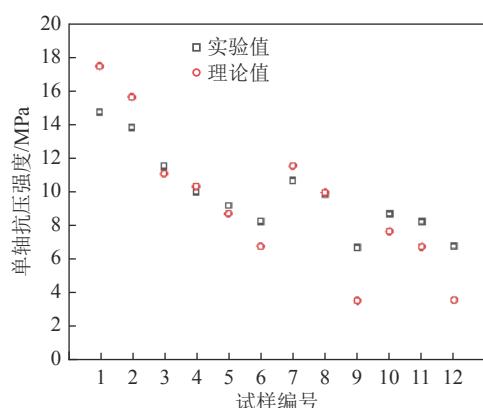


图15 理论值与实验值

Fig.15 Theoretical values and experimental values

从图15可以发现,通过理论计算得到的结果与实验所得结果比较接近,表明岩煤间接触的力学性质对组合煤岩试样的强度特征有重要影响,组合煤岩强度理论可以较准确的估算组合煤岩的强度。

4 接触面力学属性对组合煤岩冲击倾向性的影响机制

冲击倾向性是指煤岩体能否发生冲击地压的自然属性,也是评价煤矿冲击地压发生危险的重要依据。冲击倾向性的评价方法依据试件能量累积能力(弹性能指数)、释放效率(冲击能指数,剩余能指数)、释放速度(动态破坏时间)和释放条件(强度)等指标确定,因此探究组合煤岩的冲击倾向性除需明确接触面力学性质对其强度的影响,也需要对接触面性质影响的破坏过程和能量运移特征进行探究,本节着重讨论接触面力学性质引起的组合煤岩破坏特征和能量累积-耗散规律差异,并对相关指标讨论组合煤岩的冲击倾向性。

4.1 组合煤岩破坏过程与接触面性质关系

综合第2、3节可知,组合煤岩的力学性质与岩煤间接触是否断裂、断裂形式有重要关系,不同接触面对组合煤岩破坏特征的影响如图16所示。

如图16所示,岩煤间4种接触类型的断裂及对组合煤岩破坏特征的影响机制如下:

(1)强黏结型,组合试样在单轴压缩过程中,岩石与煤均发生横向变形,岩石底部与煤样顶部通过黏结剂黏接,黏结剂提供水平方向的剪应力以保持接触两侧试样横向变形相等,接触面附近受端面效应影响,煤样内单向应力状态转化为三向应力状态,组合试样的强度因此明显提高,直至试样破坏岩煤试样仍紧密相连。由于强黏结的作用,组合试样在应力峰值前内部损伤发育不彻底,并无明显的声发射信号出现,当煤样内部应力达到其强度峰值时瞬间发生破坏,由于强黏结的作用,岩石也随之破坏,同时释放大量能量,煤样发生剧烈破坏。

(2)脆断型,在试样受载初期至中期时能保持岩煤试样接触面横向变形相同,随着加载进行,粘结剂强度不足以保持接触完整,此时接触断裂,煤样顶部水平应变和轴向应变迅速增大,应力应变曲线上表现出应力降低而无声发射信号的现象。由于在峰值应力前岩煤间接触即发生断裂,煤样顶端所受端面效应较小,因此组合煤岩试样强度并未明显提高,组合试样破坏程度不高。

(3)黏滑型,接触面具有一定的强度和较大的内摩擦角,随着荷载增加,煤岩间接触断裂,试样内应力降

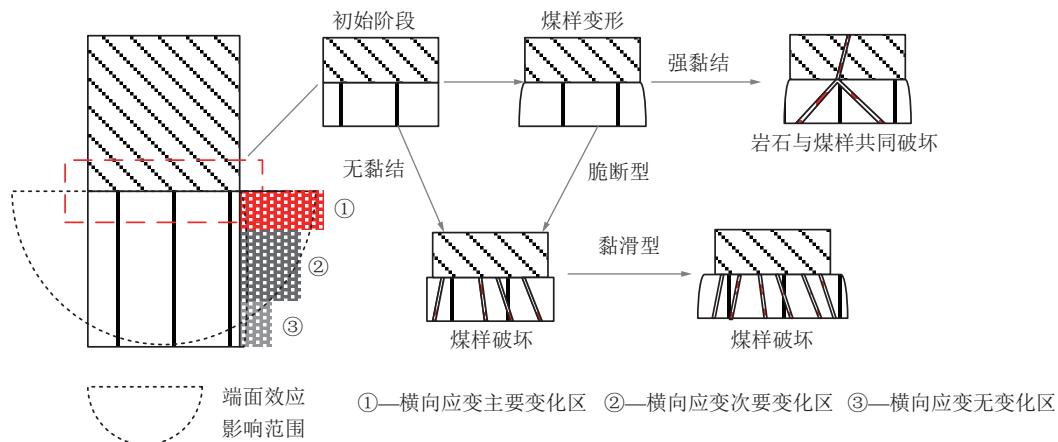


图 16 4 种破坏形式示意

Fig.16 Schematic diagram of four failure modes

低,但由于接触面具有较大的内摩擦角,当荷载再次增大时,接触面能提供较大的摩擦力以约束煤样横向变形,当接触面所提供的最大剪应力不足以约束煤岩变形时接触再次断裂,组合试样应力应变曲线中多次出现应力降低而无声发射信号的现象。由于岩煤接触在峰前发生破坏,同时黏滑型接触面可以提供较大的摩擦力,所以组合煤岩的强度和脆断型组合煤岩的强度较为接近且略高于后者。峰后阶段随着煤样的破坏,应力突然降低,此时接触面再次提供摩擦力,使得组合煤岩在峰后出现明显的应变软化现象,煤样破坏程度更高。

(4) 无黏结型,岩煤间并无粘结剂作用,煤样各部分横向应变相同,端面效应影响极小,因此无黏结组合试样的各项指标均较低。

4.2 接触面性质影响的组合煤岩能量累积耗散特征

图 17 为岩煤间接触面力学性质和破坏形式影响的组合煤岩力学行为的示意。在组合煤岩加载过程中,岩煤接触面的黏结强度和破坏后接触面的粗糙程度对组合煤岩的力学行为产生较大影响,具体表现在接触面断裂前后 2 个方面:当岩、煤试样变形属性较为接近时,接触面无需提供较高的黏结强度,此时接触面引起较大的端面效应,显著的提高了煤样和组合煤岩力学性质,其累积弹性能的能力也随之提高,反之在加载过程中接触面及发生断裂,当接触面呈现出脆断型时,组合煤岩退化为无黏结型,其强度近似于原煤试件^[10],若接触面表现为黏滑型,则端面效应始终影响煤岩的破坏,峰后阶段出现应变软化现象,耗散能随之增加。

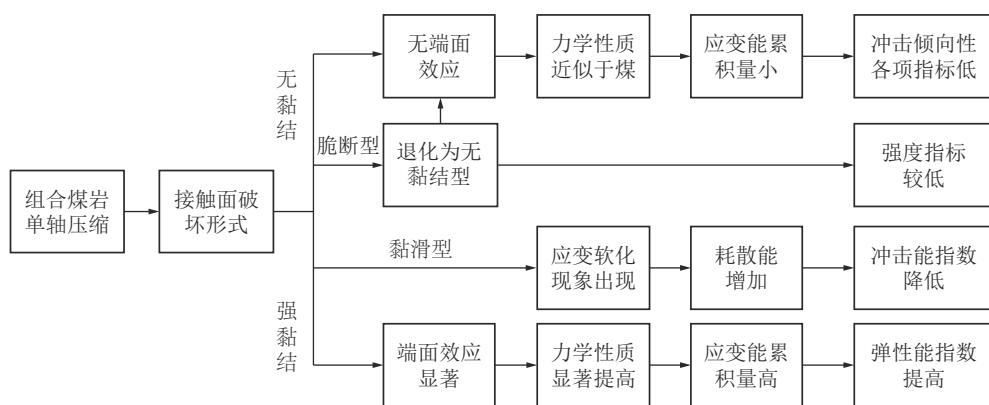


图 17 接触面力学性质对组合煤岩破坏特征的影响

Fig.17 Influence of mechanical properties of contact surface on failure characteristics of coal rock combination

将 4 类组合试样的能量累积-释放情况量化,结果见表 4,应变能分布特征如图 18 所示。

如表 4 和图 18 所示,4 类组合煤岩的应变能密度分布特征存在一定差异,黏滑型组合煤岩累积和耗散

能量的能力最强,表现为整体应变能密度最大;从弹性能和塑性能累积角度来看,无黏结型,脆断型和强黏结型组合煤岩的弹性能密度占比最大,又以强黏结型在量值上最高,表明接触面越完整,组合煤岩累积

表 4 4类组合煤岩试件能量累积量与释放量统计

Table 4 Statistics of energy accumulation and release of four types of coal rock combination specimens

试样	黏结方式	应变能密度/ (MJ·m ⁻³)	峰前应变能密度/ (MJ·m ⁻³)	峰后应变能密度/ (MJ·m ⁻³)	弹性能密度/ (MJ·m ⁻³)	塑性能密度/ (MJ·m ⁻³)	峰后应变能 密度占比/%
f1	强黏结型	0.23	0.14	0.09	0.09	0.05	39
f2	强黏结型	0.26	0.14	0.12	0.12	0.02	46
f2	强黏结型	0.21	0.12	0.09	0.07	0.05	42
f4	脆断型	0.16	0.14	0.02	0.09	0.05	13
f5	脆断型	0.22	0.14	0.08	0.07	0.07	36
f6	脆断型	0.15	0.11	0.04	0.08	0.03	27
f7	黏滑型	0.29	0.13	0.16	0.06	0.07	55
f8	黏滑型	0.21	0.13	0.08	0.06	0.07	38
f9	黏滑型	0.26	0.17	0.09	0.04	0.13	35
f10	无黏结	0.13	0.11	0.02	0.07	0.04	15
f11	无黏结	0.18	0.11	0.07	0.05	0.06	39
f12	无黏结	0.10	0.09	0.01	0.05	0.05	10

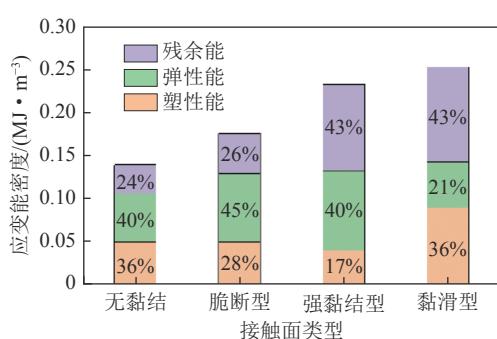


图 18 组合煤岩应变能分布

Fig.18 Strain energy distribution of combined coal and rock

能量的能力越强,强黏结型组合煤岩在塑性能密度占比和数值上均最小,表明接触面的强黏结作用约束了峰前阶段的损伤发育,黏滑型组合煤岩则表现出完全相反的特性;从峰后阶段的残余能密度来看,黏滑型组合煤岩由于岩煤间接触面的黏滑特性,其残余能密度占比达到了43%,而无黏结和脆断型则仅为24%。以上分析表明岩煤间接触面力学性质和断裂特性的差异对组合煤岩能量分布特征具有重要的影响。

4.3 接触面力学属性与组合煤岩冲击倾向性关系讨论

如前言所述,接触面力学性质的差异会引起组合煤岩力学性质、破坏特征和能量运移规律的差异,参考国标GB/T 25217.3—2019第3部分煤岩组合试件冲击倾向性分类及指数的测定方法中给出的剩余能指数^[25],煤的冲击倾向性分类及指数测定方法给出的强度、弹性能指数和冲击能指数^[26],以及反映煤岩碎裂程度的声发射能量累积量对组合煤岩的冲击倾向性综合表征,对判定结果进行无量纲化如图19所示。

图19反映了不同接触面类型的组合煤岩冲击倾向性指标的相对大小,可以发现仅接触面力学性质有所差异就导致了冲击倾向性指标的矛盾,主要体现为:强黏结型组合煤岩的弹性能指数和强度最高,但其冲击能指数和剩余能指数均表现出较低水平,而强度较低且蓄能能力较弱的脆断型和无黏结型组合煤岩在冲击能指数和剩余能指数上却表现出较高数值,综合前文所述可知,接触面力学性质决定了组合煤岩的强度和能量累积能力,而其破坏形式又对组合煤岩的塑性能和残余能有所影响,其根本原因在于煤岩破坏强度与接触面力学性质间的差距。

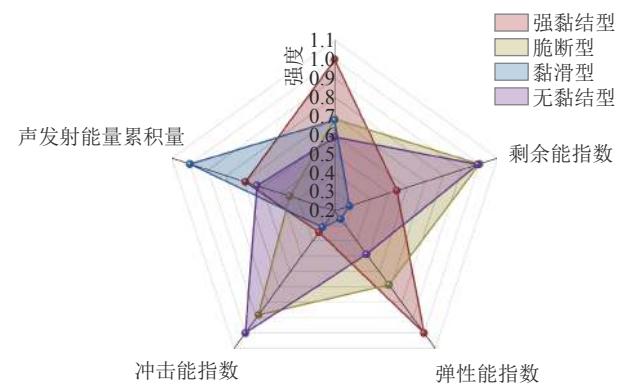


图 19 岩煤间接触面力学性质对组合煤岩冲击倾向性的影响

Fig.19 Influence of mechanical properties of rock coal interface on rock burst tendency of coal rock combination

当岩石和煤样间存在强黏结时,直至加载破坏岩石与煤样接触面仍紧密黏结,煤样受到端面效应的显著影响,煤样顶端变形受岩石的弹性模量和泊松比影响,此时岩石也受由于煤样变形引起的拉应力,导致

其强度弱化,如果选用泥岩,或者砂质泥岩等性质较差的岩石作为顶板,那么往往岩石也会一起发生破坏,组合煤岩的强度略微提升,如果选用强度较高的岩石如细砂岩等作为顶板,组合煤岩的强度将受端面效应影响而显著提高。当岩石和煤样间存在弱黏结时,在应力峰值前由于岩石和煤样横向变形而提前破坏,那么煤样部分顶端所受到的约束从岩石主导转变成摩擦力主导,端面效应大大减弱,当接触面破坏后较为光滑,例如环氧树脂、白乳胶等粘结剂,端面所提供的摩擦力十分有限,组合煤岩的强度则与纯煤试样接近,反之则略高于纯煤试样,亟待进一步探究组合煤岩接触面力学性质对组合煤岩力学性质和破坏特征的影响机制。

综合以上分析可以发现,相同岩性的岩石和煤样按照相同的组合方式组合后,其冲击倾向性仍表现出明显的差异,若目标矿井的煤样强度和弹性模量较高,那么文中所用强黏结剂则可能变为脆断型接触,反之沥青粘结剂也可能转变为强黏结接触,以此条件得到组合煤岩试样冲击倾向性的判定结果则可能出现低估或高估等误判情况,而在实际矿井中岩煤结构体往往处于三向应力状态,岩煤间的弱层并不会出现实验室尺度试样所显现的端面效应,因此,在组合煤岩试件制备方面,建议选择高强度的黏结剂以避免实验过程接触面断裂的现象出现,以达到组合煤岩冲击倾向性准确判定的目的。

5 结 论

(1)着重考虑了岩煤接触面力学性质及破坏特征对组合煤岩力学性质和冲击倾向性的影响机制,强黏结接触面组合煤岩的强度和弹性模量均高于无黏结组合试件,削弱了峰后的应变软化阶段,脆断型和黏滑型接触面组合煤岩的强度和弹性模量较为接近,且后者在峰后阶段表现出显著的应变软化现象,破坏程度更高,无黏结接触面组合煤岩的力学指标最低。

(2)利用声发射信号表征组合煤岩受载过程的破坏情况,强黏结接触面明显抑制了组合煤岩峰前阶段的微破裂,弹性能密度是峰前应变能的主要部分,黏滑型和脆断型接触面组合煤岩对峰前阶段的裂纹扩展有一定的抑制作用,峰前阶段应变能密度以塑性能耗散为主,无黏结接触面未引起端面效应,组合煤岩的破坏不受接触面影响,其各项能量累积-耗散指标均低于前3种组合试件。

(3)基于端面效应的影响机制建立了组合煤岩本构关系并提出了强度估算方法,给出了接触面断裂判定条件,从理论上解释了组合煤岩力学性质与岩、煤

力学性质和组合方式关系,强度理论结果与实验结果具有较好的一致性,岩煤接触面的力学性质对组合煤岩力学性质和冲击倾向性有显著影响。

(4)接触面力学属性对组合煤岩的各项冲击倾向性指标均有影响,接触面的完整性及破坏特征差异引起各项冲击倾向性指标的矛盾,接触面和煤岩相对力学性质是导致组合煤岩冲击倾向性评价结果误判的重要影响因素,应进一步采用高强度粘结剂制备组合煤岩试件以其冲击倾向性的准确判定。

参考文献(References):

- [1] 肖晓春,樊玉峰,吴迪,等.组合煤岩力学性质与声-电荷信号关系研究[J].*中国安全生产科学技术*,2018,14(2):126-132.
XIAO Xiaochun, FAN Yufeng, WU Di, et al. Study on relationship between mechanical properties and acoustic emission-charge signals of combined coal-rock[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(2): 126-132.
- [2] 陆菜平.组合煤岩的强度弱化减冲原理及其应用[D].徐州:中国矿业大学,2008.
LU Caiping. Intensity weakening theory for rockburst of compound coal-rock and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008
- [3] 左建平,谢和平,孟冰冰,等.煤岩组合体分级加卸载特性的试验研究[J].岩土力学,2011,32(5):1287-1296.
ZUO Jianping, XIE Heping, MENG Bingbing, et al. Experimental research on loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels[J] *Rock and Soil Mechanics*, 2011 32(5): 1287-1296
- [4] 张晨阳.底煤厚度对巷道底板冲击启动的影响规律研究[D].北京:煤炭科学研究院,2018.
ZHANG Chenyang. Research of the influence laws of bottom coal thickness on roadway floor burst start-up[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018
- [5] 杨磊,高富强,王晓卿,等.煤岩组合体的能量演化规律与破坏机制[J].*煤炭学报*,2019,44(12):3894-3902.
YANG Lei, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqing, et al. Study on energy evolution law and failure mechanism of coal-rock combined specimens[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3894-3902.
- [6] 白金正.顶-煤-底“三硬”组合结构下承载煤柱冲击机理及其应用[D].徐州:中国矿业大学,2019.
BAI Jinzheng. Rock burst mechanism in bearing coal pillar under hard roof-coal-floor structure and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019
- [7] 陈绍杰,尹大伟,张保良,等.顶板-煤柱结构体力学特性及其渐进破坏机制研究[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(7):1588-1598.
CHEN Shaojie, YIN Dawei, ZHANG Baoliang, et al. Mechanical characteristics and progressive failure mechanism of roof-coal pillar structure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(7): 1588-1598.
- [8] 赵扬锋,李兵,张超,等.不同组合比例煤岩的电荷感应与微震规律试验研究[J].*中国安全生产科学技术*,2019,15(1):107-112.

- ZHAO Yangfeng, LI Bing, ZHANG Chao, et al. Experimental study on charge induction and microseismic laws of coal and rock with different combination ratios[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(1): 107–112.
- [9] 常锐, 张雅萍, 栗继祖, 等. 煤岩组合体力学特性与瓦斯渗流规律试验研究[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(6): 28–31.
- CHANG Yue, ZHANG Yaping, LI Jizu, et al. Experimental study on mechanical properties and permeability evolution law of coal-rock combination[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(6): 28–31.
- [10] 樊玉峰, 肖晓春, 徐军, 等. 煤高度对组合岩煤力学性质及冲击倾向性的影响[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 649–659.
- FAN Yufeng, XIAO Xiaochun, XU Jun, et al. Mechanical properties of coal rock combinations and evaluation of impact tendency considering effects of the height portion of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 649–659.
- [11] 肖晓春, 樊玉峰, 吴迪, 等. 组合煤岩破坏过程能量耗散特征及冲击危险评价[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4203–4212, 4219.
- XIAO Xiaochun, FAN Yufeng, WU Di, et al. Energy dissipation feature and rock burst risk assessment in coal-rock combinations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4203–4212, 4219.
- [12] 付玉凯. 基于剩余能量释放率指标的组合煤岩体冲击倾向性研究[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(9): 63–67.
- FU Yukai. Study on impact tendency of combined coal and rock mass based on residual energy release rate index[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(9): 63–67.
- [13] 赵宏林, 赵越. 倾角对煤岩组合体力学及冲击倾向性影响的颗粒流分析[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(3): 198–201.
- ZHAO Honglin, ZHAO Yue. Influence of dip angle of coal and rock combination on outburst tendency based on particle flow code[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(3): 198–201.
- [14] 左建平, 陈岩, 崔凡. 不同煤岩组合体力学特性差异及冲击倾向性分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 81–87.
- ZUO Jianping, CHEN Yan, CUI Fan. Investigation on mechanical properties and rock burst tendency of different coal-rock combined bodies[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 81–87.
- [15] 左建平, 宋洪强. 煤岩组合体的能量演化规律及差能失稳模型[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(8): 3037–3051.
- ZUO Jianping, SONG Hongqiang. Study on energy evolution law and differential energy instability model of coal-rock combined body[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 3037–3051.
- [16] 左建平, 陈岩, 宋洪强. 深部煤岩组合体破坏行为与非线性模型研究进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2510–2521.
- ZUO Jianping, CHEN Yan, SONG Hongqiang. Study progress of failure behaviors and nonlinear model of deep coal-rock combined body[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2510–2521.
- [17] 陈光波, 李潭, 杨磊, 等. 不同煤岩比例及组合方式的组合体力学特性及破坏机制[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2021, 3(2): 84–94.
- CHEN Guangbo, LI Tan, YANG Lei, et al. Mechanical properties and failure mechanism of combined bodies with different coal-rock ratios and combinations[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2021, 3(2): 84–94.
- [18] 秦忠诚, 陈光波, 秦琼杰. 组合方式对煤岩组合体力学特性和冲击倾向性影响实验研究[J]. *西安科技大学学报*, 2017, 37(5): 655–661.
- QIN Zhongcheng, CHEN Guangbo, QIN Qiongjie. Effects of combination mode on mechanical properties and rock burst tendency of the coal-rock combinations[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017, 37(5): 655–661.
- [19] 杜学领. 关于组合煤岩试件冲击倾向性国家标准的讨论[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(10): 229–235, 242.
- DU Xueling. Discussion on national standard for burst tendency of combined coal and rock[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(10): 229–235, 242.
- [20] 李单林, 刘广建, 贾瑞锋, 等. 单轴压缩试验端面摩擦效应及损伤演化规律研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2021, 3(3): 99–108.
- LI Shanlin, LIU Guangjian, JIA Ruifeng, et al. Study on friction effect and damage evolution of end face in uniaxial compression test[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2021, 3(3): 99–108.
- [21] CHEN S, YIN D, JIANG N, et al. Mechanical properties of oil shale-coal composite samples[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123(1–4): 104120.
- [22] ZHAO Z, WANG W, WANG L, et al. Compression-shear strength criterion of coal-rock combination model considering interface effect[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 47: 193–199.
- [23] SONG H, ZUO J, LIU H, et al. The strength characteristics and progressive failure mechanism of soft rock-coal combination samples with consideration given to interface effects[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 138: 104593.
- [24] YIN D, CHEN S, GE Y, et al. Mechanical properties of rock-coal bimaterial samples with different lithologies under uniaxial loading[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020.
- [25] 中国煤炭工业协会. 冲击地压测定、监测与防治方法 第3部分: 煤岩组合试件冲击倾向性分类及指数的测定方法: GB/T 25217.3—2019 [S]. 2019.
- [26] 中国煤炭工业协会. 冲击地压测定、监测与防治方法 第2部分: 煤的冲击倾向性分类及指数的测定方法: GB/T 25217.2—2010[S]. 2010.