



移动扫码阅读

赵兵朝, 王京滨, 张 晴, 等. 充填体-散体胶结组合体力学特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 298-309.

ZHAO Bingchao, WANG Jingbin, ZHANG Qing, *et al.* Experimental study on mechanical properties of filling-bulk ce-menting combination body[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 298-309.

充填体-散体胶结组合体力学特性试验研究

赵兵朝^{1,2}, 王京滨¹, 张 晴¹, 马云祥¹, 翟 迪¹, 陈 攀¹, 韦启蒙¹, 郭亚欣¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: 为研究充填开采过程中采空区内冒落矸石对充填体的影响, 对不同散体高度、散体岩性及充填体强度的充填体-散体胶结组合体进行单轴压缩试验, 借助声发射三维定位技术对组合体试样的单轴压缩破坏过程进行实时监测, 通过 AE 事件的时间参数与应力应变曲线 4 个阶段的起始时间点相结合, 对加载过程中 AE 事件对应的变形破坏过程进行表征, 并基于此建立了组合体结构面破坏模型。研究表明: 散体高度与组合体强度呈负相关关系, 充填体与散体胶结组合体高度比为 1:4 的组合体单轴抗压强度仅为单一充填体的 55.0%; 散体岩性和充填体强度与组合体强度呈正相关关系, 虽然高强度的充填体可以提高组合体的单轴抗压强度, 但是组合体中的充填体强度越高, 组合体的强度折减越严重。当胶结散体中的颗粒岩性为强度较低的粉砂岩时, 组合体单轴抗压强度仅为单一充填体的 42.9%; 抗压强度较小的粉砂岩在破坏过程中会出现因剪切破坏形成的破裂面, 而抗压强度较大的灰岩可以利用散体颗粒自身的抗剪强度承受剪切荷载; 当胶结散体内的胶结基质失效或散体颗粒破碎时, 充填体和胶结散体的结构面发生非均匀压缩变形, 致使充填体在散体破坏的结构面上产生应力集中现象, 导致上部的充填体局部发生剪切破坏, 充填体的破坏是轴向应力和结构面非均匀变形的共同作用结果。

关键词: 充填开采; 冒落岩体; 充填体-散体胶结组合体; 声发射事件

中图分类号: TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)07-0298-12

Experimental study on mechanical properties of filling-bulk ce-menting combination body

ZHAO Bingchao^{1,2}, WANG Jingbin¹, ZHANG Qing¹, MA Yunxiang¹, ZHAI Di¹,
CHEN Pan¹, WEI Qimeng¹, GUO Yaxin¹

(1. College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploration and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the influence of caved rocks in the goaf on the backfilling body in the backfilling mining, uniaxial compression test are carried out on the backfilling body-cemented granular body combination with different granular heights, discrete element lithology and backfilling body strength. The uniaxial compression failure of the combination body specimen is monitored in real time by using the three-dimensional acoustic emission positioning technology. The deformation and failure corresponding to the AE events in the loading process is characterized by combining the time parameters of AE events with the starting time points of the four stages of the stress-strain curve. Based on this, the failure model for the interface of the combination body is established. The results show that the height of granular is negatively correlated with the strength of the combination body, and the uniaxial compressive strength of the combination body with the backfilling height ratio of 1:4 is only 55.0 % of that of the single backfilling body. The discrete element lithology and the strength of backfilling body are positively correlated with the strength of the combination body. Although high-strength backfilling body can improve the uniaxial compressive strength of the combination body, the higher the strength of filling body in the combination body, the more

收稿日期: 2022-06-16 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0911

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074208, 51874230)

作者简介: 赵兵朝(1978—), 男, 山西晋城人, 教授, 博士。E-mail: zhaobc913@163.com

通讯作者: 王京滨(1994—), 男, 山东乐陵人, 博士研究生。E-mail: 20103077008@stu.xust.edu.cn

serious the strength reduction of the combination body. When the particle lithology in cemented bulk is siltstone with low strength, the uniaxial compressive strength of the combination body is only 42.9% of that of single combination body. The siltstone with smaller compressive strength will have a fracture plane due to shear failure during the failure, and the limestone with larger compressive strength can withstand shear load by using the shear strength of the granular particles. When the cementing matrix in the cemented granular fails or the particles in the cemented granular are broken, the interface of the backfilling body and the cemented granular undergoes non-uniform compression deformation, resulting in the stress concentration on the backfilling body on the interface damaged by the cemented granular, resulting in the shear failure of the upper backfilling body locally, and the failure of backfilling body is the contribution of both axial stress and non-uniform deformation of the interface.

Key words: backfilling mining; caved rock mass; backfilling body - cemented granular body; acoustic emission events

0 引言

充填开采是解决“三下”压煤和遗煤复采的有效方法,目前遗煤复采以条带开采遗留的采空区为主^[1-2],现阶段针对遗煤复采的技术方法是把原来遗留的采空区进行一次全部充填,待充填体自身达到一定强度后回采各遗留煤柱,并根据遗留煤柱两侧充填体的稳定性有选择地对遗留煤柱采出后的采空区实施二次充填,以此支撑上覆岩层的关键层^[3]。因此,采空区遗煤复采的关键问题转化为对充填体力学特性的研究,如果其力学参数能够控制遗留煤柱回采后的覆岩运移,不仅可以实现遗煤的绿色开采,也对我国煤炭工业的可持续发展和国家能源供应有重大的意义。

传统的条带采煤法将煤炭资源采出后,采空区直接顶岩层在覆岩压力作用下发生垮落后形成冒落区,直接顶垮落后的破碎岩体堆积在采空区底板形成散体结构^[4],专家学者们无论是在嗣后充填开采还是注浆充填减沉方面,都提到了采空区底板存在冒落矸石这一显著特征,邓念东等^[5]和孙希奎^[6]在条带采空区充填时发现冒落矸石均为直接顶岩体,且冒落矸石不接顶;孙闯等^[7]通过现场观测发现采空区底板上的垮落堆积岩体是与直接顶岩性分布相关的组合岩性,且垮落岩体的粒径自下而上依次增大;王建学等^[8-10]通过对采空区的冒落矸石空隙进行注浆充填,发现冒落矸石内部的浆液凝固后有胶结性能且有一定的强度;朱磊等^[11]研究了不同浓度矸石浆体在垮落矸石内的流动扩散规律,认为矸石浆体沿流动方向质量浓度呈现逐渐下降的趋势。与此同时,冯光明等^[12]利用超高水充填材料对采空区进行自流动性充填,发现凝固后的充填体与顶板垮落矸石形成一个完整的结构体;许家林等^[3]利用浆体膨胀复合材料对短壁工作面冒落区进行嗣后充填,形成了冒落矸石与浆体充填材料的组合充填体。

尽管以上专家学者在对采空区充填时均发现了

底板上存在垮落岩体的现象,充入采空区内的充填材料也必然会与散体结构形成组合体,但均未对其力学特性及其破坏规律进行相关研究;目前在进行充填体强度设计时,通常将充填体考虑为通体均质、连续、结构完整且各向同性的弹塑性材料,并且是以完整充填体强度值作为参考依据^[13],而针对直接顶垮落岩体影响充填体力学特性的研究却鲜有报道。

为此,以短壁冒落区嗣后充填开采常见的膏体充填材料为例,基于组合体力学模型的研究思路,提出了充填体-散体胶结组合体的结构模型,利用压力试验机对组合体试样进行单轴压缩试验,借助声发射的 AE 事件对组合体加载过程中的变形破坏过程进行表征,并以此建立了充填体-散体胶结组合体的两阶段破坏模型,研究组合体在不同散体岩性、高度及充填体强度条件下的力学特性及其破坏规律。

1 充填体-散体胶结组合体模型建立

1.1 模型试验背景

根据短壁冒落区嗣后充填的技术原理^[3],短壁工作面回采结束后,采空区上方一定范围的岩层断裂、破碎并垮落,顶板垮落的矸石杂乱堆积在采空区垮落带内形成散体结构,如图 1a 所示;利用充填材料对短壁冒落区的空隙进行充填,形成冒落矸石与充填材料的组合充填体,以支撑上覆关键层,如图 1b 所示;待充填体自身达到一定强度后,回采遗留的条带煤柱,并根据充填体的稳定性有选择的对煤柱采出后的采空区实施充填(或不充填),最终形成多个间隔的散体胶结与充填体的组合体共同支撑上覆关键层,从而有效控制覆岩运移和地表沉陷,如图 1c 所示。膏体充填工艺如图 2 所示。

1.2 模型简化

通过大海则煤矿在地面构建的矸石山模拟垮落带矸石浆体充填的试验可以看出^[11],质量浓度为 75% 的矸石粉煤灰浆体可以沿动流坡度以湍流的方式在岩块间扩散,但是浆体中的矸石颗粒(粒径在

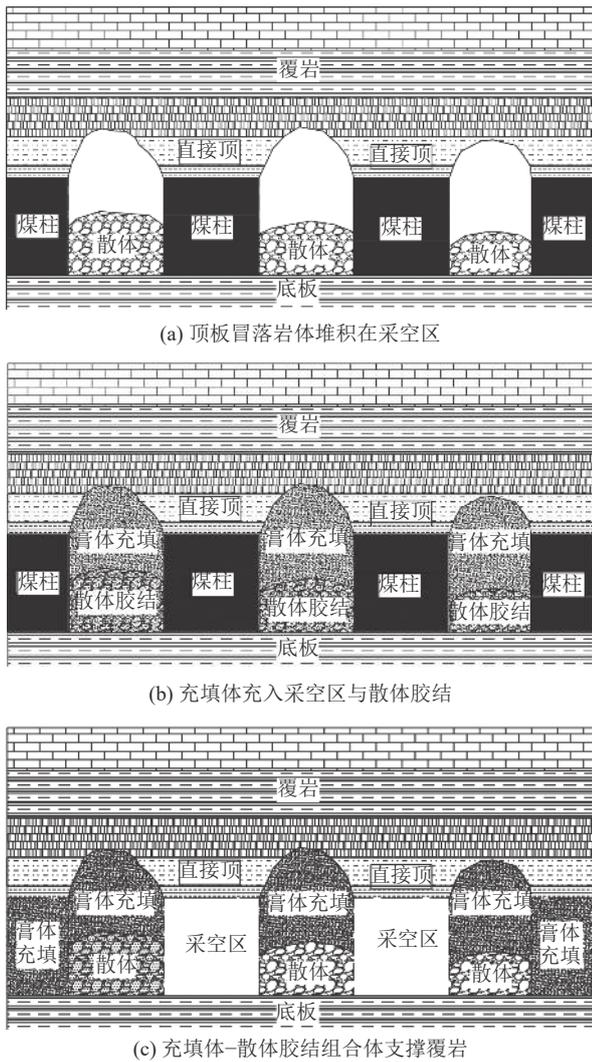


图1 充填体-散体胶结组合体工程结构

Fig.1 Engineering structure of filling - bulk cementing combination

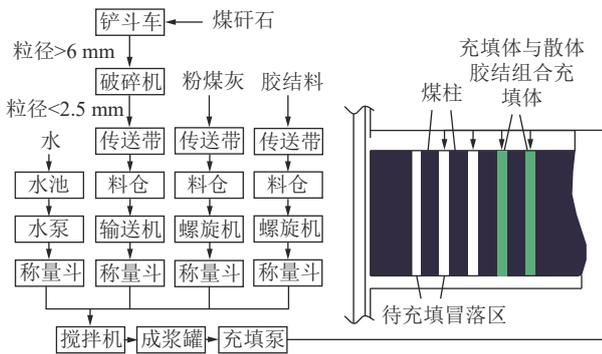


图2 冒落区嗣后膏体充填工艺流程

Fig.2 Process flow of subsequent paste filling in caving zone

0.075 ~ 4.75 mm 占 80%) 在浆液扩散过程中不易流动到矸石堆的底部, 而水泥和粉煤灰组成的细颗粒浆体由于离析作用可以沿岩块颗粒间的空隙进行流动扩散。膏体充填材料中的矸石粒径、质量浓度及

垮落矸石特性与上述试验类似, 粗颗粒矸石也不易流动到散体的底部, 因此, 对充填体-散体胶结组合体的工程结构模型作以下假设和简化: ①顶板岩层具有良好的破碎特性和规则的垮落性; ②散体堆积体顶面为平面; ③散体结构中仅有细颗粒浆体沿颗粒间的空隙扩散至内部; ④充填体和胶结散体的浆体质量浓度一致, 忽略充填料浆中的水泥粉煤灰浆体的流失量。

基于上述分析, 借鉴当前垮落带注浆充填和煤岩组合体的试验方法^[14-16], 将充填体-散体胶结充填体实际工程模型转化为如图3所示的室内试验模型。

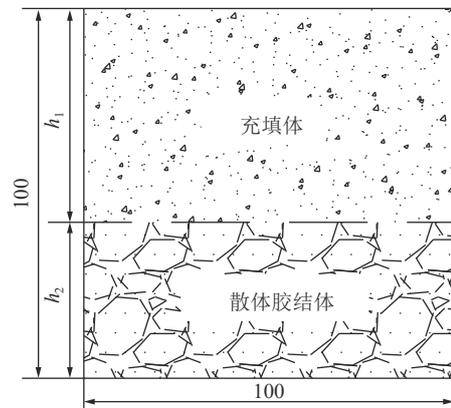


图3 组合体室内试验模型

Fig.3 Combination indoor test model

2 充填体-散体胶结组合体试验

2.1 组合体试验材料选取

实际工程中顶板破碎岩体的散体结构粒径通常较大, 试验一方面要求有大型的试验设备, 另一方面受限于采空区破碎岩体全尺度样本索取困难, 因此通常对原堆石体的尺寸进行一定的缩小, 使之适应试验的要求^[17]。相似级配法是将原堆石体的级配曲线按照最大粒径相对于试样允许的最大粒径进行倍数缩小, 若现场冒落矸石堆积体与试验散体满足以下条件: 堆积体的母岩相同; 两组堆积体的颗粒形状相似; 级配曲线相似(2组级配曲线通过平移可近似重合); 孔隙率相同; 则2组堆积体的应变参数和变形参数具有一致性或相似性^[17-18], 即可以利用相似级配得到的散体来模拟现场冒落矸石堆积体的力学特性。

2.1.1 试验散体岩性

目前我国的遗煤开采矿井主要集中于东部省份, 通过对我国东部省份遗煤赋存地区直接顶板岩性进行统计, 其直接顶岩性以砂岩居多^[7], 结合矿井地质条件以及岩石选取的方便性和快捷性, 将粉砂岩、粗

砂岩及灰岩作为冒落区散体岩性进行研究,选取的破碎岩体均来自同一区域的顶板岩体,并采用颚式破碎机对顶板岩体进行破碎,确保母岩相同且颗粒形状相似。试验所需的灰岩、粉砂岩和粗砂岩均取自山东省某煤矿,在自然含水状态下,粉砂岩的单轴抗压强度 13.7 MPa,粗砂岩的单轴抗压强度为 31.2 MPa,灰岩的单轴抗压强度为 47.1 MPa。

2.1.2 试验散体高度及粒径级配

由于条带开采冒落区的隐蔽性和不可接近性,关于采空区内冒落岩体高度和形态的观测数据较少,考虑遗煤复采与初次开采的时间间隔较长、遗留煤柱不规则、直接顶岩层的垮落不均匀等原因,在研究散体高度对组合体的影响时,以最不利的工况作为试验研究的边界,将散体的最大高度设置为 80 mm (试样总高为 100 mm)。在冒落岩体的块度级配方面,仅有少数资料对其进行研究,文献 [19] 认为顶板岩体垮落后的块度级配近似满足正态分布,文献 [20] 通过对采空区拍摄的照片进行块度统计分析,发现直接顶垮落岩体中占比最大的粒径为 0.4~0.6 m, 粒径总体满足正态分布(图 4),进一步验证了文献 [19] 的结论。

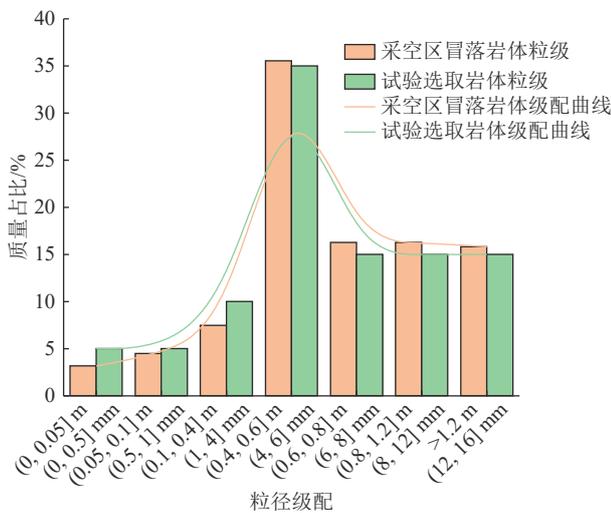


图 4 采空区冒落岩体相似级配曲线

Fig.4 Similar gradation curve of caving rock mass in goaf

根据冒落破碎岩块分形自相似性和堆石体的颗粒级配相似性原理,试验中的散体是将完整岩体人工破碎后,按照粒径大小分成 [0, 0.5]、(0.5, 1]、(1, 4]、(4, 6]、(6, 8]、(8, 12]、(12, 16] mm 共 7 种级别,将上述 7 种粒径的散体按照质量分数 5%、5%、10%、35%、15%、15%、15% 进行组合,组合后的散体堆积试样粒径级配满足正态分布(图 4)。考虑到散体颗粒粒径尺寸效应的影响,根据国内外学者的研究^[21-23],要求试样直径与岩石最大粒径的比值 $D/d_{\max} \geq 5$, 试

验模具内径为 100 mm,为将散体的尺寸效应对试验结果的影响降到最低,试验将岩体的最大粒径控制在 16 mm。

2.1.3 试验散体材料孔隙率

将灰岩、粗砂岩及粉砂岩按照图 4 所示的粒径级配组合体积 $V_0=500 \text{ cm}^3$ 的散体,将 3 组散体分别放入量筒中,然后向量筒中倒水至散体的顶面,倒入量筒中水的体积即为散体的孔隙体积,灰岩、粗砂岩及粉砂岩的孔隙率见表 1,根据文献 [20] 可知采空区冒落岩体的孔隙率为 25% 左右,试验散体孔隙率与采空区冒落岩体孔隙率误差小于 5%,满足相似级配法中对于孔隙度的要求。

表 1 散体孔隙率
Table 1 Porosity of bulk

散体岩性	灰岩	粗砂岩	粉砂岩
孔隙率/%	27.1	29.5	27.7

2.2 试验方案及试样制作

为研究散体高度、岩性及充填体强度对充填体-散体胶结组合体力学特征的影响规律,共设计 3 组对比试验:①设置散体岩性为灰岩、粉砂岩及粗砂岩 3 种不同散体岩性的组合体;②设置不同充填体和胶结散体的高度比(以下简称充散高度比)为 8:2(4:1)、7:3、6:4(3:2)、5:5(1:1)、4:6(2:3)、3:7、2:8(1:4)的组合体;③设置充填体中水泥质量分数分别为 5%、10% 和 15% 的组合体;共 11 组单一变量试样;为了与单一变量试验形成对比分析,设置单一粉砂岩、粗砂岩和灰岩胶结体试样,以及水泥质量分数为 5%、10% 和 15% 的单一充填体试样,共 6 组强度对照试样,试验分组见表 2。

配制水泥质量分数分别为 5%、10%、15%,质量浓度为 78% 的充填体,胶结散体的水泥粉煤灰浆体配比参照其上部充填体中的水灰比进行配制,煤矸石经过破碎处理并筛选,试验所需的煤矸石粒度介于 0.1~2.5 mm,充填体各材料配比见表 3。

充填体-散体胶结组合体试样制作过程:①散体充填:首先根据散体的不同高度和岩性将其按照设计粒径级配均匀混合,然后将混合好的散体颗粒均匀倒入 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体模具中;②散体胶结充填:将配置好的水泥粉煤灰浆体充填至散体顶面,以浆体顶面漏出矸石为宜;③充填体充填:在浆体充入散体静置 30 min 后,将充填材料充填至 100 mm 高度;④脱模养护:将充填完成的试样放入养护箱,温度为 $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(95 \pm 5) \%$,

表2 充填体-散体胶结组合体试样单轴压缩试验结果

Table 2 Uniaxial compression test results of filling - bulk cemented combination body

类别	编号	岩性	散体高度/mm	水泥质量分数/%	抗压强度/MPa		抗压强度平均值/MPa	弹性模量/GPa
					试样a	试样b		
散体高度组	C-80-10	粗砂岩	80	10	3.60	3.47	3.54	0.24
	C-70-10	粗砂岩	70	10	3.97	3.85	3.91	0.25
	C-60-10	粗砂岩	60	10	4.11	4.20	4.16	0.25
	C-50-10	粗砂岩	50	10	4.21	4.33	4.27	0.27
	C-40-10	粗砂岩	40	10	4.30	4.76	4.53	0.32
	C-30-10	粗砂岩	30	10	4.94	4.94	4.94	0.34
	C-20-10	粗砂岩	20	10	6.06	6.20	6.13	0.54
散体岩性组	S-50-10	灰岩	50	10	4.98	5.10	5.04	0.34
	C-50-10	粗砂岩	50	10	4.21	4.33	4.27	0.27
	F-50-10	粉砂岩	50	10	2.84	2.67	2.76	0.23
充填体强度组	C-50-05	粗砂岩	50	5	2.87	2.51	2.69	0.22
	C-50-10	粗砂岩	50	10	4.21	4.33	4.27	0.27
	C-50-15	粗砂岩	50	15	4.99	5.23	5.11	0.33
强度对照组	S-100-10	灰岩	100	10	5.95	6.47	6.21	0.31
	C-100-10	粗砂岩	100	10	4.81	5.31	5.06	0.24
	F-100-10	粉砂岩	100	10	2.57	3.05	2.81	0.21
	A-100-05	—	—	5	3.08	3.14	3.11	0.13
	A-100-10	—	—	10	6.15	6.73	6.44	0.90
	A-100-15	—	—	15	7.47	8.19	7.83	0.79

注：试样的编号由字母和数字构成，散体高度组、散体岩性组和充填体强度组中的第一个字母S、C、F分别代表灰岩、粗砂岩和粉砂岩；第一个数字20~80分别代表散体高度为20~80 mm；第二个数字05、10、15分别代表充填体中的水泥质量分数为5%、10%和15%；最后一个字母a表示试样仅做单轴压缩试验获得其力学参数，b试样在单轴压缩试验的同时利用声发射装置进行实时监测。强度对照组中的第一个字母A代表充填体试样，第一个数字100代表充填体高度为100 mm，第二个数字05、10、15分别代表充填体中的水泥质量分数为5%、10%和15%。

表3 充填体质量配比

Table 3 Mass ratio of paste

组别	充填材料质量/g				水泥质量分数/%	固体质量分数/%
	水泥	粉煤灰	矽石	水		
1	20	120	300	125	5	78
2	45	95	300	125	10	78
3	65	75	300	125	15	78

养护3 d后拿出脱模继续养护至28 d备用。

2.3 试验设备及检测方法

试验主要控制与检测系统如图5所示，包括加载系统和声发射系统，试验时，加载系统和声发射系统同步进行，保证二者具有相同的时间参数，以便数据处理与试验分析。

采用DS5系列全信息声发射检测系统对组合体试样单轴压缩破坏过程进行实时监测，试验设置声发射测试分析系统的阈值为40 dB，采样频率为3 MHz，在传感器与试样之间涂抹凡士林进行耦合，减少接触面声阻抗差与能量在此界面的反射损失，保证声发射信号能够被传感器更好地接收，传感器探

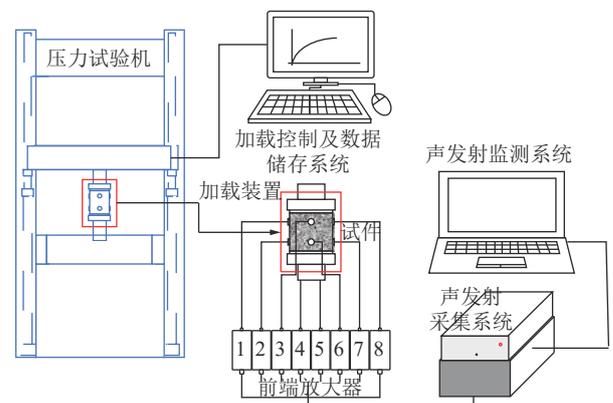


图5 试验控制与检测系统

Fig.5 Test control and detection system

头采用弹力布进行固定，试验开始前对各试样进行声速测试，确保声发射系统声速的正确标定。

3 充填体-散体胶结组合体强度特性

3.1 充填体-散体胶结组合体强度试验结果

为探究充填体-散体胶结组合体的力学强度与其定量关系，对组合体各组试样进行单轴抗压试验，各组合体试样的单轴抗压强度和弹性模量见表2，每

组试样中选取 a 试样的单轴压缩数据得到如图 6 所示的应力-应变曲线。

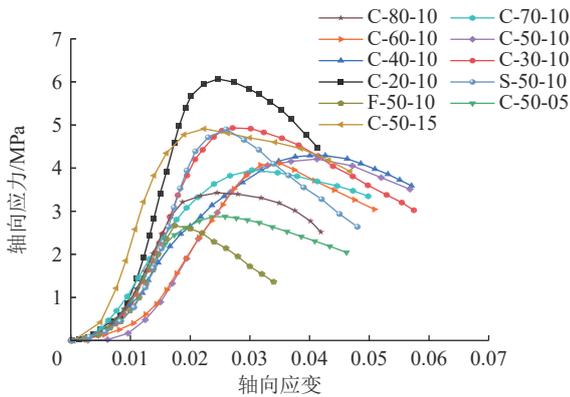


图 6 组合体试样应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of combination body specimen

3.2 充填体-散体胶结组合体强度特征探讨

目前关于充填体强度方面的研究,无论是矽石(胶结)充填减沉还是膏体(高水)充填嗣后开采,通常是以完整充填体强度值作为设计参考依据,而分析表 2 数据却发现,散体高度与组合体强度呈负相关关系,散体颗粒岩性和充填体强度与组合体强度呈正相关关系。由于试样尺寸并非标准试样尺寸,所测得的单轴抗压强度无法直接参考和应用,因此,考虑利用强度折减的概念对组合体强度进行定量分析,将强度折减系数^[13]定义为

$$k_i = \frac{\sigma'_{ci}}{\sigma_{ci}} \quad (1)$$

式中: k_i 为不同影响因素下的组合体强度折减系数; σ'_{ci} 为不同影响因素下的组合体抗压强度, MPa; σ_{ci} 为完整充填体抗压强度, MPa。

以本试验平均抗压强度进行强度折减系数计算,计算结果见表 4。

3.2.1 充散高度比对组合体强度的影响

由表 4 和图 7 可以看出,当散体强度和充填体强度一定时,组合体单轴抗压强度和强度折减系数与胶结散体高度呈负相关关系,当充散高度比为 8:2 时,组合体强度为单一充填体强度的 95.2%,当充散高度比为 2:8 时,组合体的强度仅为单一充填体强度的 55.0%,说明散体高度越高,组合体抗压强度弱化效应越明显。

3.2.2 充填体强度对组合体强度的影响

由表 4 和图 8 可以看出,当散体岩性和高度一定时,充填体的单轴抗压强度从 3.11 MPa 增加至 7.39 MPa 时,组合体的单轴抗压强度平均值由 2.69 MPa 增加至 5.11 MPa,而强度折减系数由 0.865

表 4 充填体强度折减系数计算结果

Table 4 Calculation results of strength reduction factor of filling body

编号	组合体平均抗压强度/MPa	参考强度/MPa	折减系数
C-80-10	3.54	6.44	0.550
C-70-10	3.91	6.44	0.607
C-60-10	4.16	6.44	0.646
C-50-10	4.27	6.44	0.663
C-40-10	4.53	6.44	0.703
C-30-10	4.94	6.44	0.767
C-20-10	6.13	6.44	0.952
C-50-10	2.69	3.11	0.865
C-50-10	4.27	6.44	0.663
C-50-10	5.11	7.39	0.653
S-50-10	5.04	6.44	0.783
C-50-10	4.27	6.44	0.663
F-50-10	2.76	6.44	0.429

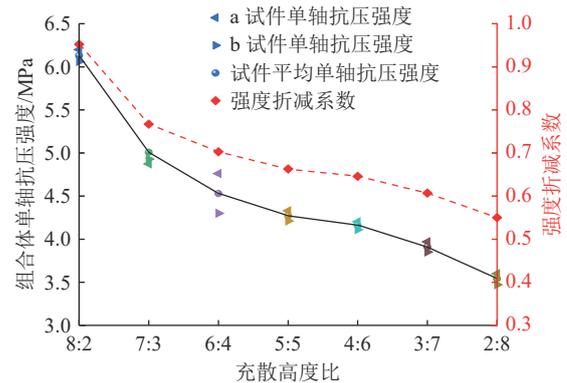


图 7 充散高度比对组合体强度的影响

Fig.7 Effect of ratio of filling and dispersing height on strength of combination body

减小至 0.653,说明增加充填体强度可以有效提高组合体的强度,但是组合体中的充填体强度越高,组合体的强度折减越严重。

3.2.3 散体岩性对组合体强度的影响

由表 4 和图 9 可以看出,当散体高度和充填体强度一定时,组合体单轴抗压强度和强度折减系数与散体岩性呈正相关关系,散体岩性由低强度的粉砂岩变为高强度的灰岩时,组合体强度从 2.76 MPa 增加至 5.04 MPa,强度折减系数由 0.429 增加至 0.783,当散体岩性为强度最弱的粉砂岩时,组合体的强度仅为单一充填体强度的 42.9%。

4 基于声发射的组合体破坏特征分析

声发射是研究岩石内部变形与破坏机制的重要

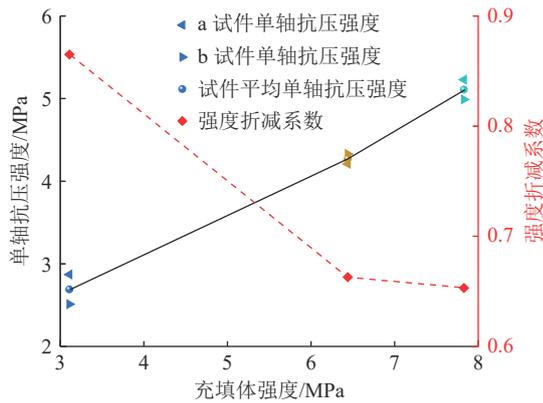


图8 充填体强度对组合体强度的影响

Fig.8 Effect of the strength of filling body on strength of combination body

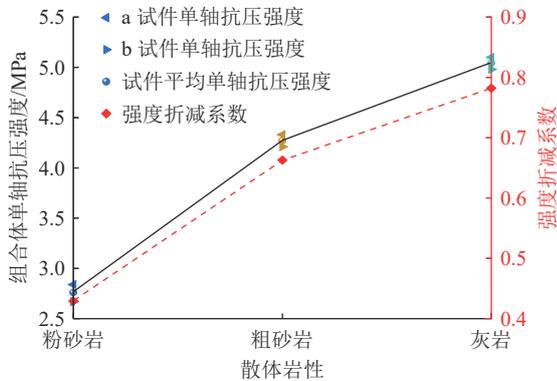


图9 散体岩性对组合体强度的影响

Fig.9 Effect of discrete element lithology on strength of combination body

手段之一,利用声发射事件空间定位图可以清楚地观察到组合体试样加载过程中 AE 事件的数量、密度及能量大小,因此,可以通过 AE 事件来表征组合体在单轴压缩试验过程中内部裂纹的萌生、扩展和聚集^[24-25]。试验中压力试验机的加载速率为 1 mm/min,将压力试验机导出的应力应变曲线划分为孔隙压密阶段、弹性变形阶段、裂纹扩展阶段和破坏发展阶段^[26],通过应力应变曲线 4 个阶段的起始时间点与声发射 AE 事件的时间参数相对应,即可得到不同受力阶段的 AE 事件三维定位图,应力应变曲线与 AE 事件 4 个阶段的颜色对应关系如图 10 所示。

需要说明的是:①声发射事件的产生主要是由裂纹扩展引起的,由于试样为上下不同材料的组合体,上部的充填体为均质材料,其 AE 事件的产生主要是由裂纹扩展引起的,而下部的胶结散体是颗粒岩体形成骨架结构后,再利用胶结基质对散体结构内部的空隙进行填充的非均质体,胶结散体内部的

AE 事件主要来自于散体颗粒的剪切破坏和胶结基质的失效,因此,通过将试样最终破坏形态图和胶结散体内的 AE 事件分布图进行对比分析,即可看出胶结散体在承载过程中的破坏特征。②利用带有弹性的尼龙布将声发射探头环箍在试样表面,弹性布可以有效防止因试样局部脱落而导致的 AE 事件采集失效的情况,声发射探头可以采集到试样内部裂纹的非稳定扩展及贯通,因此,可以将 AE 事件的发生时间和应力应变曲线 4 个阶段的起始时间点相对应,得到组合体在不同阶段 AE 事件的分布特征,并以此分析各组合体试样的变形破坏特征^[27]。③由于各试样的加载时长不同,各试样的 AE 事件所对应的变形阶段仅与本试样作对照。

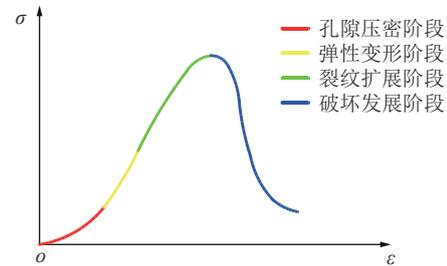


图10 应力应变曲线与 AE 事件 4 个阶段颜色对应关系

Fig.10 Colour correspondence between stress-strain curve and four stages of AE events

4.1 不同散体高度的组合体破坏特征分析

通过对胶结散体高度为 20~80 mm 的 AE 事件分布图与试样的最终破坏形态进行对比,分析不同散体高度的组合体破坏特征。限于篇幅,文中仅给出散体高度 30、50、70 mm 的 AE 事件分布与试样的最终破坏形态。

通过对比不同胶结散体高度的组合体声发射事件及最终破坏形态图(图 11)可以看出,散体高度较低的组合体(散体高度为 20~50 mm)在裂纹扩展阶段和破坏发展阶段的 AE 事件较多,且主要集中在上部的充填体中,胶结散体内的 AE 事件主要分布在孔隙压密阶段和弹性变形阶段,说明高度较低的胶结散体在组合体试样承载的前 2 个阶段开始破坏,但是由于高度较低的散体骨料与胶结基质可以形成较为稳定的骨架结构,该结构在组合体的破坏发展阶段仍然可以利用骨料间的咬合承担组合体的压缩荷载,以保证充填体在组合体的裂纹扩展和破坏发展阶段保持承载能力。通过观察散体高度较低的组合体最终破坏形态图可以发现,组合体内的裂缝主要集中在结构面附近,胶结散体上剥离下来的结石体上并未出现粗砂岩颗粒破坏后形成的破裂面。

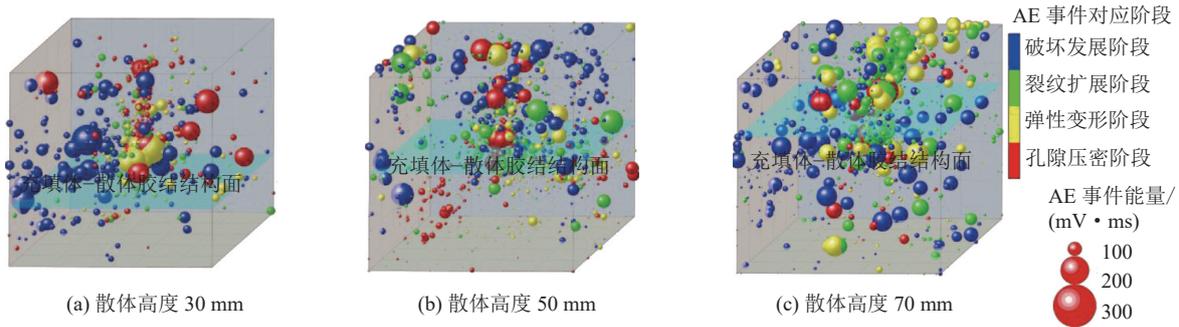


图 11 组合体声发射 AE 事件三维分布
Fig.11 Three-dimensional distribution of AE events

与散体高度较低的组合体相比，散体高度较高（散体高度为 50 ~ 80 mm）的组合体在裂纹扩展阶段的 AE 事件主要集中在充填体内，而破坏发展阶段的 AE 事件则主要集中在下部胶结散体内，说明高度较大的胶结散体在组合体承载的中后期逐渐破坏，通过对应的试样破坏及裂缝分布图也可以看出，组合体最终破坏时下部胶结散体的裂缝较为发育，且散体破坏后的颗粒剥离情况也更为严重。这主要是因为组合体在轴向应力作用下，胶结散体的轴向应变大于充填体，较大的轴向变形使胶结散体表现为内部的岩石颗粒滑移、颗粒间胶结基质失效，也伴有岩石棱角的破碎，这一现象随着胶结散体高度的增加愈发明显，但是从胶结散体破坏后剥离下来的结石体和内部破裂面来看，剥离的结石体中并未发现粗砂岩颗粒破坏后形成的破裂面，组合体内部的裂缝主要以上下贯通的裂纹为主。

需要注意的是，试样 C-60-10、C-70-10 及 C-80-10 的最终破坏形态整体出现向一侧歪斜的现象，通过观察下部的胶结散体发现，试样歪斜一侧的胶结散体颗粒间的胶结作用基本失效，且最下侧失去胶结作用的岩石颗粒已经发生剥离，此时歪斜一侧的胶结散体已经失去对充填体的支撑作用，究其原因，主要是因为较高的散体结构（60 ~ 80 mm）容易出现

颗粒级配整体分布不均匀的现象，随着轴向应力的持续增加，颗粒级配分布不均匀的位置极易因应力集中而发生破坏，导致组合体破坏时出现整体歪斜，这也是散体高度越高，组合体强度越小的原因之一。

4.2 不同散体岩性的组合体破坏特征分析

图 12、图 13 及图 14 分别给出了散体岩性为粗砂岩（ $\sigma_c=31.2$ MPa）、粉砂岩（ $\sigma_c=13.7$ MPa）及灰岩（ $\sigma_c=47.1$ MPa）的组合体试样的最终破坏形态，对比分析不同散体岩性的组合体破坏特征。

组合体试样 F-50-10 中的胶结散体在达到峰值强度之前就已破坏，但由于下部胶结散体破坏导致裂缝向上发展与充填体贯穿，充填体下侧受力不均匀导致充填体内产生裂缝并逐步扩展，直至组合体破坏。由图 13 可以看出，组合体 F-50-10 试样存在上下贯通的裂缝，下部胶结散体破坏较为严重，堆积在试样周边的剥离体中并未发现破碎程度较高的粉砂岩碎屑，仅在破坏后的胶结散体和体积较大结石体上可见粉砂岩发生剪切破坏后的破裂面，说明胶结散体不仅要利用颗粒骨料间的咬合及胶结基质形成的骨架结构承载和传递应力，还要利用散体颗粒自身的抗剪强度承受剪切荷载。

组合体试样 S-50-10 的破坏主要发生在上部的充填体中，由灰岩构成的胶结散体可以在组合体的

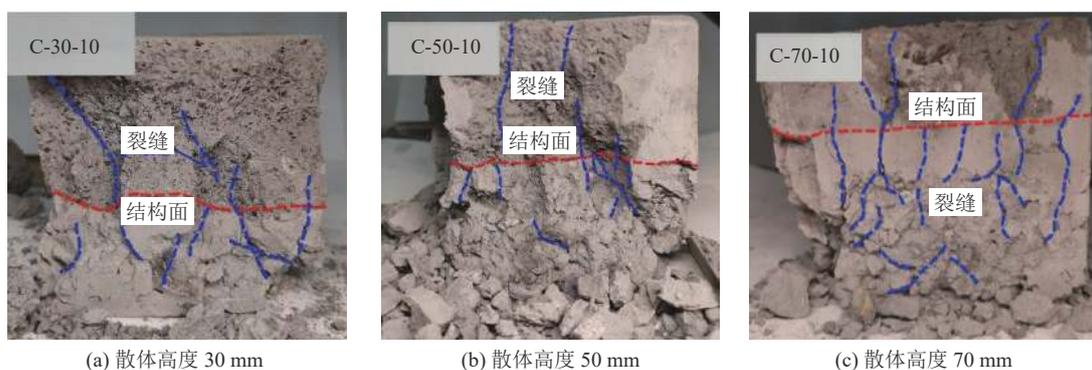
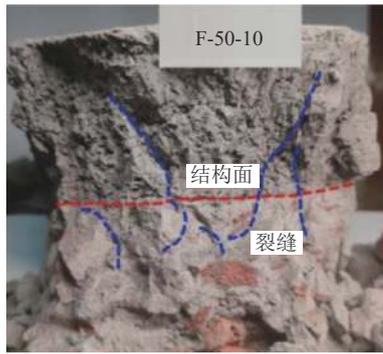


图 12 组合体试样破坏形态
Fig.12 Failure pattern of combination body specimens



(a) F-50-10 试样破坏形态及裂缝分布



(b) F-50-10 试样散体颗粒破裂面

图 13 F-50-10 试样破坏形态及散体颗粒破裂面

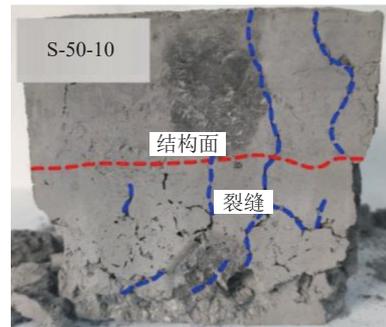
Fig.13 Failure pattern of sample F-50-10 and fracture surface of granular particles

孔隙压密阶段和弹性变形阶段进行稳定承载,直至组合体进入裂纹扩展阶段和破坏发展阶段时,胶结散体才逐渐开始破坏,胶结散体依靠较高的岩体强度和良好的级配,可以与上部的充填体共同承载直至组合体整体发生破坏。由图 14b 可以看出,当胶结散体岩性为强度较高的灰岩时,下部的胶结散体仅可见一处因发生剪切破坏后露出的灰岩破裂面,试样周围存在少量的剥落结石体,胶结散体的破坏主要表现为水泥粉煤灰胶结基质的失效。

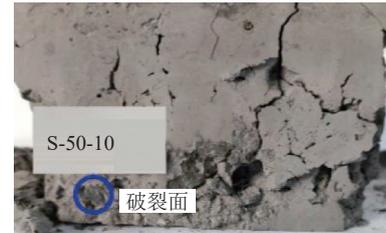
由此可知,散体骨料颗粒在胶结散体中的作用主要体现在以下 2 个方面:①级配骨料颗粒间相互咬合形成骨架结构,骨架结构内的空隙利用水泥粉煤灰浆体进行填充,当胶结散体承受轴向荷载时,散体颗粒间相互咬合的骨架结构首先承载,同时利用骨架结构内的胶结基质对散体颗粒间的应力进行分散和传递;②当胶结散体内的骨架结构因骨料颗粒间脆性接触的棱角发生破坏而逐渐失稳时,胶结散体内的裂纹逐渐开始发育和扩展,部分散体颗粒将承受因颗粒滑移而产生剪应力,当散体岩性较差时,散体颗粒沿裂缝的发展方向发生剪切破坏并形成可见的破裂面。

4.3 不同充填体强度的组合体破坏特征分析

图 15、图 12 及图 16 分别给出了充填体中水泥



(a) S-50-10 试样破坏形态及裂缝分布



(b) S-50-10 试样散体颗粒破裂面

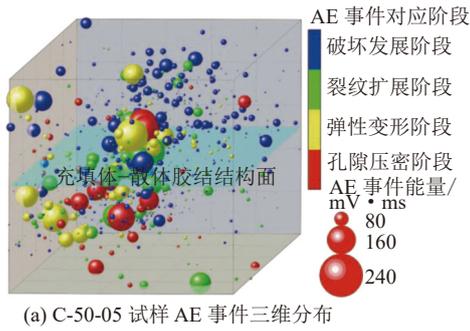
图 14 S-50-10 试样破坏形态及散体颗粒破裂面

Fig.14 Failure pattern of sample S-50-10 and fracture surface of granular particles

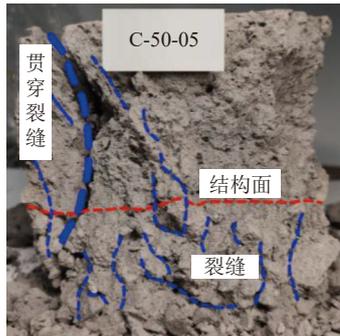
质量分数为 5%、10% 及 15% 的组合体 AE 事件三维分布图与试样的最终破坏形态,对比分析不同充填体强度的组合体试样声发射事件规律及其破坏特征。

当组合体中充填体强度为 3.11 MPa 时,组合体在破坏发展阶段的 AE 事件主要集中在上部的充填体内,下部胶结散体内的 AE 事件主要集中在组合体的弹性变形和裂纹扩展阶段,说明胶结散体要先于充填体发生变形破坏,胶结散体的破坏前期主要表现为结构面的非均匀变形,而之后胶结散体仍然可以利用本身骨料间的咬合承担组合体的压缩荷载,由于其上部的充填体强度较低,非均匀变形的结构面导致低强度充填体承受剪切荷载产生较大的贯穿裂缝,进而导致组合体整体失稳破坏。

试样 C-50-10(充填体强度为 6.44 MPa)和 C-50-15(充填体强度为 7.83 MPa)在不同阶段的 AE 事件的分布特征与试样 C-50-05(充填体强度为 3.11 MPa)基本类似,不同的是,试样 C-50-15(充填体强度为 7.83 MPa)在结构面附近破坏发展阶段的 AE 事件分布较多且能量较大,说明组合体在破坏发展阶段的破坏主要集中在结构面上,究其原因,主要是因为上部充填体强度大于下部胶结散体的强度,当下部的胶结散体破坏形成非均匀变形的结构面时,上部的充填体还处于弹性变形阶段,其 AE 事件的来源,主要来自于非均匀变形的结构面上的凸出的散体颗粒尖角对充填体的摩擦和裂隙扩张。



(a) C-50-05 试样 AE 事件三维分布



(b) C-50-05 试样破坏形态及裂缝分布

图 15 C-50-05 试样声发射事件及破坏形态

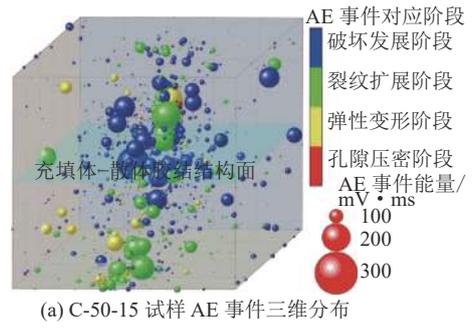
Fig.15 C-50-05 specimen acoustic emission events and failure mode

需要注意的是，不同强度的充填体对应散体胶结的浆体质量浓度也不相同，散体内胶结基质的强度存在一定差异，通过对比图 15b、图 12b 和图 16b 可以看出，随着散体胶结中浆体质量浓度的增加，胶结散体的最终破坏形态中裂缝数量、长度和宽度均有所减小，剥离下来的结石体(由散体颗粒胶结形成，其尺寸大于散体骨料粒径)的体积也明显减小。

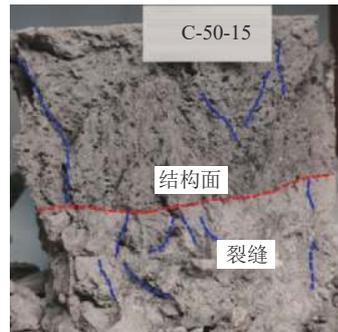
5 组合体结构面作用机理

组合体试样的破坏不仅与散体岩性、高度和充填体强度相关，也受到充填体和胶结散体之间结构面的影响^[28-29]，根据各组合体试样的最终破坏形态可以看出，组合体结构面呈现出非均匀沉降的现象，表现为结构面下部骨料颗粒的尖角压入充填体内，充填体与骨料颗粒尖角的接触位置呈现出明显的裂缝，基于此，建立组合体试样压缩破坏力学模型，分析充填体-散体胶结组合体的结构面相互作用机理。

充填体-散体胶结组合体的变形破坏过程可分为 2 个阶段：①胶结散体破坏过程：在加载初期，充填体、胶结散体及其结构面均被压密；随着轴向应力的增大，充填体和胶结散体均发生轴向压缩变形，由于胶结散体的轴向变形要大于充填体，胶结散体内部的微裂纹开始发育扩展；随着轴向应力的进一步增大，较大的轴向变形导致胶结散体内部的裂纹聚



(a) C-50-15 试样 AE 事件三维分布



(b) C-50-15 试样破坏形态及裂缝分布

图 16 C-50-15 试样声发射事件及破坏形态

Fig.16 C-50-15 specimen acoustic emission events and failure mode

集，骨架颗粒间的胶结基质失效形成贯穿裂缝，胶结散体先于充填体发生破坏失稳，如图 17a 所示。②结构面非均匀变形，充填体破坏过程：随着轴向应力的

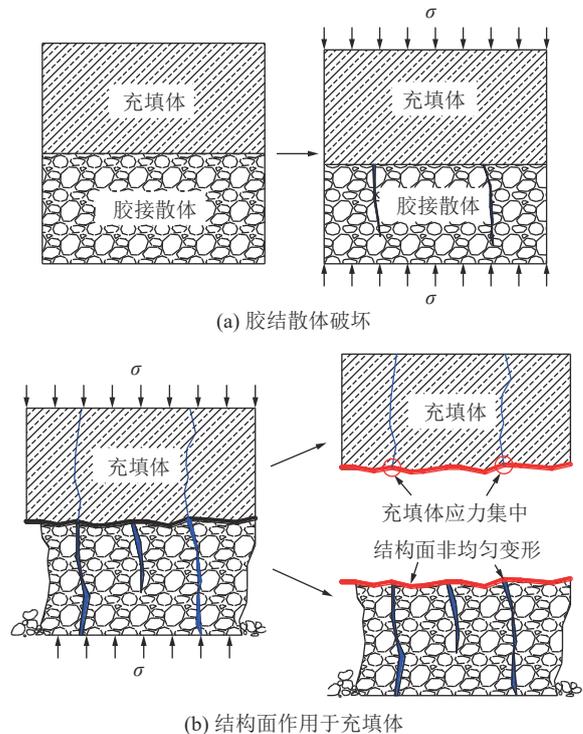


图 17 组合体试样压缩破坏力学模型

Fig.17 Mechanical model of compression failure of combination body specimen

进一步增大,整体性较差的胶结散体达到破坏所需强度后发生破坏失稳,破坏形式表现为边缘局部散体的颗粒剥离和内部散体胶结基质失效引起的颗粒滑动,导致充填体和胶结散体的接触结构面发生非均匀压缩变形,致使充填体在散体破坏的结构面上产生剪切应力,引起充填体在结构面上产生应力集中现象,结构面的剪切应力最终导致充填体局部发生剪切破坏,如图17b所示,这也是充填体强度高于胶结散体,但在组合体最终破坏时,充填体仍然有较大裂缝的原因。

因此,在充填体和胶结散体的相互作用下,组合体试样中充填体的破坏是轴向应力和结构面非均匀变形共同作用的结果。

6 结 论

1)组合体的单轴抗压强度与散体颗粒岩性和充填体强度呈正相关关系,与散体高度呈负相关关系;组合体强度折减系数与散体高度和充填体强度呈负相关关系,与散体岩性呈正相关关系;组合体中的充填体强度越高,组合体的强度折减越严重。

2)高度较低(20~50 mm)的胶结散体在组合体试样承载的前2个阶段已经破坏,破坏后的散体骨料与胶结基质可以形成较为稳定的骨架结构直至组合体整体失稳;随着胶结散体高度的增加,高度较高(60~80 mm)的胶结散体在组合体承载的中后期逐渐破坏,而且较高的散体结构容易出现颗粒级配分布不均匀,导致组合体最终失稳时整体向一侧歪斜。

3)胶结散体不仅要利用颗粒骨料间的咬合及胶结基质形成的骨架结构承载和传递应力,还要利用散体颗粒自身的抗剪强度承受剪切荷载,当散体的岩性较差时,散体颗粒沿裂缝的发展方向发生剪切破坏并形成可见的结构面。

4)充填体和胶结散体的结构面在轴向应力下发生非均匀压缩变形,致使充填体在散体破坏的结构面上产生应力集中,导致上部的充填体局部发生剪切破坏,组合体中充填体的破坏是轴向应力和结构面非均匀变形共同作用的结果。

参考文献(References):

- [1] 胡炳南,刘鹏亮,崔峰,等.我国充填采煤技术回顾及发展现状[J].煤炭科学技术,2020,48(9):39-47.
HU Bingnan, LIU Pengliang, CUI Feng, *et al.* Review and development status of backfill coal mining technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 39-47.
- [2] 冯国瑞,张玉江,戚庭野,等.中国遗煤开采现状及研究进展[J].煤炭学报,2020,45(1):151-159.
FENG Guorui, ZHANG Yujiang, QI Tingye, *et al.* Status and research progress for residual coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 151-159.
- [3] 许家林,轩大洋,朱卫兵,等.部分充填采煤技术的研究与实践[J].煤炭学报,2015,40(6):1303-1312.
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, *et al.* Study and application of coal mining with partial backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1303-1312.
- [4] 徐树媛,张永波,时红,等.采空区垮落带内破碎岩体的渗流特征与渗透性试验研究[J].安全与环境工程,2022,29(1):128-134.
XU Shuyuan, ZHANG Yongbo, SHI Hong, *et al.* Flow characteristics and experimental study on the permeability of mining-induced fractured rock mass in caving zones[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(1): 128-134.
- [5] 邓念东,代育朝.条带采空区膏体充填回收煤柱方法研究[J].内蒙古煤炭经济,2020,297(4):9-10.
DENG Niandong, DAI Yuchao. Study on coal pillar recovery method by paste filling in strip goaf[J]. Inner Mongolia Coal Economy 2020, 297(4): 9-10.
- [6] 孙希奎.置换条带开采中充填体强度分析[J].煤炭科学技术,2011,39(5):33-36.
SUN Xikui. Analysis on backfill material strength of replacement for belt coal pillar mining[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(5): 33-36.
- [7] 孙闯,闫少宏,徐乃忠,等.大采高综采工作面采空区垮落矸石刚度实验[J].煤炭学报,2020,45(S1):38-48.
SUN Chuang, YAN Shaohong, XU Naizhong, *et al.* Experimental study on the stiffness of waste rock of gob of fully mechanized mining with large mining height[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 38-48.
- [8] 王建学.开采沉陷塑性损伤结构理论与冒研空隙注浆充填技术的研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2001.
WANG Jianxue. Damage-plasticity coupled model for jointed rock mass to subsidence control and the technology of goaf stowing with cement materials[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2001.
- [9] 王建学,刘天泉.冒落研石空隙注浆胶结充填减沉技术的可行性研究[J].煤矿开采,2001,6(1):4,44-45.
WANG Jianxue, LIU Tianquan. Feasibility study on the technology of filling the vacant space of the caving rock with cement materials[J]. Coal Mining Technology, 2001, 6(1): 4,44-45.
- [10] 王建学,李华东,杨本生.采空区冒研空隙充填减小地面下沉开采技术的研究[J].煤炭工程,2005,37(4):16-18.
WANG Jianxue, LI Huadong, YANG Bensheng. Study on the mining technology of reducing ground subsidence by filling gangue void in goaf[J]. Coal Engineering, 2005, 37(4): 16-18.
- [11] 朱磊,潘浩,古文哲,等.垮落带矸石充填浆体流动扩散规律试验研究[J/OL].煤炭学报:1-10 [2022-05-20]. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.0247.
ZHU Lei, PAN Hao, GU Wenzhe, *et al.* Experimental study on flow and diffusion law of gangue filling slurry in caving zone[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-10 [2022-05-20]. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.0247.

- [12] 冯光明, 孙春东, 王成真, 等. 超高水材料采空区充填方法研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1963-1968.
FENG Guangming, SUN Chundong, WANG Chengzhen, *et al.* Research on goaf filling methods with super high-water material[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1963-1968.
- [13] 曹 帅, 宋卫东, 薛改利, 等. 考虑分层特性的尾砂胶结充填体强度折减试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2869-2876.
CAO Shuai, SONG Weidong, XUE Gaili, *et al.* Tests of strength reduction of cemented tailings filling considering layering character[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2869-2876.
- [14] ZHAO Zenghui, WANG Weiming, DAI Chunquan, *et al.* Failure characteristics of three-body model composed of rock and coal with different strength and stiffness[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(5): 1538-1546.
- [15] 尹大伟. 顶板-煤柱结构体稳定性实验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
YIN Dawei. Experimental study on stabilities of roof-coal pillar structural body[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [16] 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.
- [17] 冯文生, 郑 治. 大粒径填料工程特性的试验和研究[J]. 公路交通技术, 2004(1): 1-4, 9.
FENG Wensheng, ZHENG Zhi. Tests and researches on engineering properties of large particlesize fillers[J]. Technology of Highway and Transport, 2004(1): 1-4, 9.
- [18] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1983.
- [19] 张俊文, 王海龙, 陈绍杰, 等. 大粒径破碎岩石承压变形特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1000-1007.
ZHANG Junwen, WANG Hailong, CHEN Shaojie, *et al.* Bearing deformation characteristics of large-size broken rock[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1000-1007.
- [20] 李兴尚. 建筑物下条带开采冒落区注浆充填减沉技术的理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
LI Xingshang. Study on mechanism of the grouting backfill in caving area with strip mining under buildings[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2008.
- [21] 张 超, 展旭财, 杨春和. 粗粒料强度及变形特性的细观模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2077-2083.
ZHANG Chao, ZHAN Xucai, YANG Chunhe. Mesoscopic simulation of strength and deformation characteristics of coarse grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2077-2083.
- [22] HENKEL-D-J Bishop w a. The measurement of soils properties in triaxial test[R]. London: Edward Arnold Ltd, 1962.
- [23] 胡炳南, 郭爱国. 研石充填材料压缩仿真实验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1076-1080.
HU Bingnan, GUO Aiguo. Testing study on coal waste back filling material compression simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1076-1080.
- [24] 程爱平, 舒鹏飞, 张玉山, 等. 充填体-围岩组合体声发射特征与损伤本构研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1238-1245.
CHENG Aiping, SHU Pengfei, ZHANG Yushan, *et al.* Acoustic emission characteristics and damage constitution of backfill-surrounding rock combination[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6): 1238-1245.
- [25] 王小琼, 葛洪魁, 宋丽莉, 等. 两类岩石声发射事件与Kaiser效应点识别方法的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 580-588.
WANG Xiaoqiong, GE Hongkui, SONG Lili, *et al.* Experimental study of two types of rock sample acoustic emission events and kaiser effect point recognition approach[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 580-588.
- [26] 吴顺川. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [27] 张志博, 李树杰, 王恩元, 等. 基于声发射事件时-空维度聚类分析的煤体损伤演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3338-3347.
ZHANG Zhibo, LI Shujie, WANG Enyuan, *et al.* Research on the damage evolution characteristics of coal based on cluster analysis of temporal-spatial dimension of acoustic emission events[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3338-3347.
- [28] 向 鹏, 纪洪广, 孔灵锐, 等. 基于两体系统动态加卸载效应的冲击地压机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2698-2705.
XIANG Peng, JI Hongguang, KONG Lingrui, *et al.* Rockburst mechanism analysis based on dynamic loading and unloading effect of two-body systems[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2698-2705.
- [29] 刘建新, 唐春安, 朱万成, 等. 煤岩串联组合模型及冲击地压机理的研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 276-280.
LIU Jianxin, TANG Chun'an, ZHU Wancheng, *et al.* Rock - coal model for studying the rockburst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 276-280.