

不同水胶比下黄土-矿渣基胶结充填材料的单轴破裂演化规律*

王斌¹, 顾军², 段东³, 张亚飞², 张鹏姣⁴, 朱江森⁵

1. 国能准能集团哈尔乌素露天煤矿, 内蒙古鄂尔多斯市 010300;
2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏徐州市 221116;
3. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西太原 030024;
4. 国能准能集团有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯市 010300;
5. 武汉船用机械有限责任公司, 湖北武汉 430084

摘要:为探究不同水胶比下黄土-矿渣基胶结充填材料微观结构特征及单轴压缩下的破裂演化规律,对黄土-矿渣基胶结充填材料进行扫描电子显微镜试验和声发射试验,进一步通过 PFC2D 深入探究不同水胶比胶结充填材料在单轴受压过程中的裂纹演化规律和颗粒破坏特征。结果表明:水胶比较小时,胶结充填材料可生成更多的水化产物,试样结构更致密;胶结充填材料的声发射振铃计数曲线可分为压密阶段、线弹性变形阶段、裂纹恒速扩展阶段、裂纹突增阶段、峰后阶段,且振铃计数特征与强度特征具有相关性;随着水胶比的增大,试样受压过程中的裂纹起裂应力、损伤应力均逐渐变小,起裂应力、损伤应力与峰值应力的比值不受水胶比大小的影响;胶结充填材料破坏时以剪切裂纹为主,随着水胶比的减小,裂纹数增加,力链最大值变大,改变水胶比对试样内部裂纹和力链的空间分布影响较小。

关键词:黄土-矿渣基胶结充填材料;水胶比;声发射计数;微观结构特征;破裂演化规律

中图分类号:TD315;TD853.34

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2025)10-0064-07

Uniaxial Damage Evolution Law of Loess-Slag-Based Cemented Filling Materials with Different Water-Cement Ratios

WANG Bin¹, GU Jun², DUAN Dong³, ZHANG Yafei², ZHANG Pengjiao⁴, ZHU Jiangsen⁵

1. Haerwusu Open-pit Coal Mine, CHN Energy Zhunneng Group Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China;
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
3. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
4. CHN Energy Zhunneng Group Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China;
5. Wuhan Marine Machinery Plant Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430084, China)

Abstract: In order to investigate the microscopic structural characteristics and uniaxial damage evolution law of loess-slag-based cemented filling materials with different water-cement ratios, scanning electron microscopy and acoustic emission tests were conducted on the loess-slag-based cemented filling materials. Furthermore, PFC2D was used to investigate the crack evolution and particle damage characteristics of cemented filling materials with different water-cement ratios under uniaxial compression. The results show that when the water-cement ratio is small, the cemented filling material can generate more hydration products and the structure of the specimen is denser. The acoustic emission ringing count curves of cemented filling materials can be divided into compaction stage, linear-elastic deformation stage, crack constant-velocity expansion stage, crack sudden increase stage, and post-peak stage, and the ringing count characteristics are correlated with the strength characteristics. As the water-cement ratio increases, the cracking stress and damage stress during the compression process of the specimen gradually decrease, and the ratio of cracking stress to peak stress and damage stress to peak stress are not affected by the water-cement ratio. When the cemented filling material is damaged, shear cracks are the main type. As the water-cement ratio decreases, the number of cracks increases and the maximum value of the force chain increases. Changing the water-cement ratio has little

* 收稿日期:2024-11-08

基金项目:鄂尔多斯市科技重大“揭榜挂帅”项目(JBGS-2023-003)

作者简介:王斌(1990—),男,内蒙古托克托县人,硕士,高级工程师,主要从事露天煤矿生产技术管理等工作。E-mail:wangbin0471@qq.com

通信作者:顾军(1998—),男,江苏南通人,硕士,主要从事岩石力学方面的研究。E-mail:1756986149@qq.com

effect on the spatial distribution of internal cracks and force chains in the specimens.

Key words: Loess-slag-based cemented filling material, Water-cement ratio, Acoustic emission count, Microscopic structural characteristic, Damage evolution law

0 引言

煤炭在我国能源消费中占据主导地位,露天煤矿因具有生产能力大、开采成本低和安全条件好等诸多优势,在国家能源安全稳定供应中具有“压舱石”的地位^[1-3]。然而,在露天矿端帮煤炭资源的开采过程中,普遍存在端帮滞留煤的问题^[4-7],为实现端帮煤柱安全高效回收,采用端帮充填开采技术是置换煤柱最有效的应对方法之一^[8-10]。黄土-矿渣基胶结充填材料作为一种新型胶结充填材料,不仅具有优异的力学性能,而且可以解决矿山固体废弃物的排放及堆存问题^[11-13]。然而,将充填材料充入采空区后,受空间环境的制约,从材料支撑上覆岩层后的变形破坏情况观察,无法准确评估端帮及整体边坡的稳定情况。因此,设计室内试验对胶结充填材料受压后的变形破坏开展研究具有重要意义。

目前,国内诸多学者对胶结充填材料的力学性能及变形破坏特征进行了相关研究^[14-16]。李强等^[17]通过单轴压缩试验发现胶结充填体的破坏程度与加载速率呈正比;赵康等^[18]研究了灰砂比对尾砂胶结充填材料破坏特征的影响,发现充填材料的破坏模式为贯穿试样的张拉和剪切破坏;冉洪宇等^[19]探究了不同水胶比下矽石胶结充填材料的蠕变破坏特征,发现水胶比越大,胶结充填材料的孔隙较多,破坏程度更为剧烈,整体性较差;李丹等^[20]对全尾砂充填体展开三轴压缩试验,结果表明,增大围压会使充填体的破坏模式由张拉破坏变为剪切破坏且破坏产生的裂纹减少;宋卫东等^[21]对胶结充填材料在三轴加-卸载条件下的能量耗散及损伤特性进行了研究;李龙福等^[22]通过数值模拟发现,充填体的变形破坏是从充填体与围岩接触的底部开始,然后沿接触面向上或充填体倾斜方向发生破坏。

本文结合室内试验和数值模拟,对不同水胶比的黄土-矿渣基胶结充填材料的细观特征、力学特性和变形破坏特征开展研究。通过扫描电子显微镜试验分析了黄土-矿渣基胶结充填材料细观结构特征;通过声发射试验分析了胶结充填材料的破坏机制;借助 PFC2D 数值模拟软件从动态角度分析了胶结充填材料的裂纹及力链变化规律。

1 试样制备与试验方案

本次试验采用黄土、矿渣、砂质骨料、水玻璃、氢氧化钠和水制备黄土-矿渣基胶结充填材料,其中黄土、矿渣及砂质骨料均取自露天矿剥离的废弃物。制备不同水胶比 ω (0.9, 1.0, 1.1, 1.2)的胶结充填试样,拌和温度为 35 ℃,在相同制备条件下养护 7 d 后,通过切割多余部分制成高为 100 mm、直径为 50 mm 的标准试样,切割过程需确保切割面水平光滑。将处理好的试样用于后续试验。

(1) 扫描电子显微镜试验。通过扫描电子显微镜观察胶结充填材料的细观结构特征,试验设备为 TESCAN VEGA3 型 SEM 测试系统。试验分别设置放大倍数为 500 倍和 3 000 倍,通过观察不同水胶比下胶结充填材料的细观结构特征(包括裂纹、凝胶产物、孔隙等),总结胶结充填材料细观特征随水胶比的变化规律。

(2) 单轴压缩下的声发射(AE)试验。本研究对不同水胶比的胶结充填试样进行单轴压缩下的声发射试验,研究其声发射响应规律,揭示水胶比对黄土-矿渣基胶结充填材料破裂特征的影响规律。对试样受力破坏过程中试样内部发出的信号进行采集,AE 传感器的工作频率范围为 50~150 kHz,阈值为 30 dB,增益为 30 dB,模拟滤波器的下限和上限分别为 1 kHz、200 kHz,采样频率为 10 MHz。通过分析这些特征参数,可以揭示试样受力破坏内部裂纹的变化情况。

2 试验结果与分析

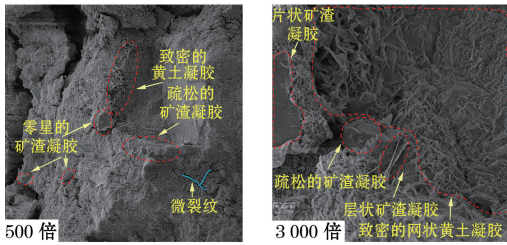
2.1 不同水胶比胶结充填试样细观结构特征

不同水胶比胶结充填试样的细观结构特征如图 1 所示。由图 1 可知,水胶比为 0.9 时,胶结充填试样内部存在致密的黄土凝胶,少量矿渣凝胶被紧密包裹,试样内部存在少量细小的裂纹,整体较为致密;水胶比为 1.0 时,胶结充填试样内部黄土、矿渣凝胶交叉分布,存在少量裂纹,试样内部较为平坦,孔隙较少,结构较为致密;水胶比为 1.1 时,胶结充填试样凝胶物质较少,内部存在较为明显的结构缺

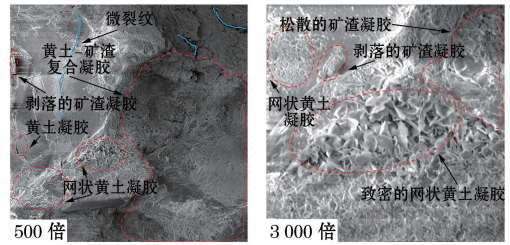
陷,细小裂纹较多且部分裂纹之间呈相互贯通趋势,结构致密性较差;水胶比为 1.2 时,胶结充填试样的凝胶物质初步形成,骨料间的连接作用较小,存在较为明显的结构裂隙,细观结构较差。

由此可知,胶结充填试样在水胶比较小的情况下(水胶比为 0.9, 1.0)生成了更多的凝胶产物,在

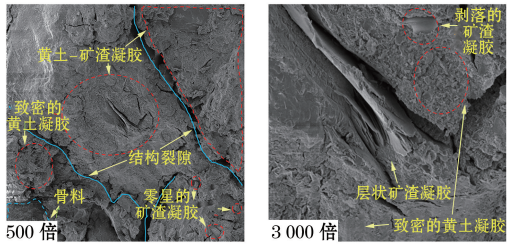
微观图像上可以观察到分布均匀的黄土和矿渣凝胶物质;水胶比较大的情况下(水胶比为 1.1, 1.2),在微观图像上仅见少量或未形成的凝胶产物。其原因为试样内部的水化反应受水含量的影响,较多的水会减缓水化反应的速率,导致相同的养护时间生成的水化产物更少,试样内部结构裂隙较多。



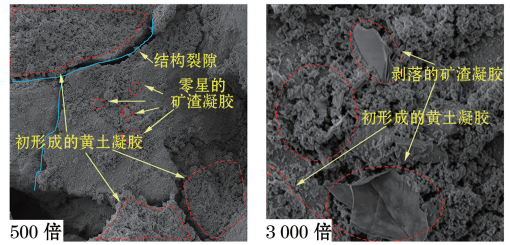
(a) 水胶比为 0.9



(b) 水胶比为 1.0



(c) 水胶比为 1.1



(d) 水胶比为 1.2

图 1 不同水胶比胶结充填试样的细观结构特征

Fig.1 Microscopic structural characteristics of cemented filling specimens with different water-cement ratios

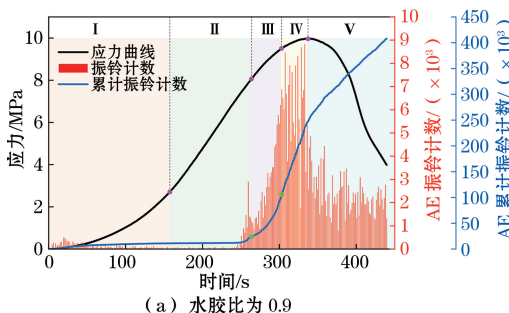
2.2 不同水胶比胶结充填试样的声发射特征

声发射是指试样在受到外力作用时,材料内部的能量会以弹性波的形式释放。试样在加载受力至破坏这一过程中,试样内部初始裂纹的扩展和贯通,以及新生裂纹的发育,产生了大量的声发射信号。通过对声发射信号的特征进行分析,有助于揭示试样内部的结构特征及其在破裂过程中的形态演变。

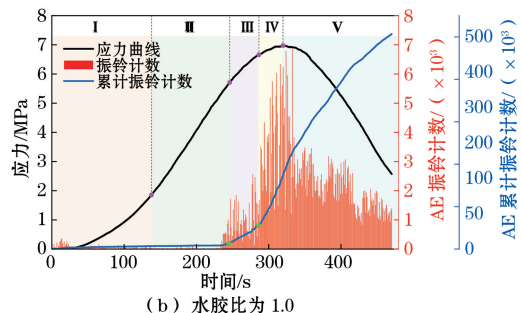
2.2.1 声发射振铃计数

对养护龄期为 7 d 时不同水胶比的胶结充填试样进行单轴压缩试验,得到该条件下的声发射振铃计数曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,黄土-矿渣基胶结充填材料在单轴压缩条件下的裂纹扩展(声

发射特征)可划分为 5 个阶段。(1) 压密阶段(I): 声发射特征曲线初始阶段,试样内部结构趋于致密,孔隙逐渐闭合,出现波动峰后趋于平衡;(2) 线弹性变形阶段(II): 试样发生弹性变形,试样原材料中的骨料之间受力发生相对错动,表现为稀疏的声发射信号;(3) 裂纹恒速扩展阶段(III): 试样内裂纹之间出现交互贯通并产生少量细小新生裂纹,表现为声发射振铃计数曲线以一定斜率稳定增长;(4) 裂纹突增阶段(IV): 试样内部出现大量的新生裂纹且裂纹之间很快发生交互贯通,试样发出微弱的破裂声且表面出现明显的裂纹,振铃数在该阶段达到峰值;(5) 峰后阶段(V): 试样破坏程度加剧,表面裂纹增加但内部几乎不再产生新生裂纹,振铃次数缓慢下降。



(a) 水胶比为 0.9



(b) 水胶比为 1.0

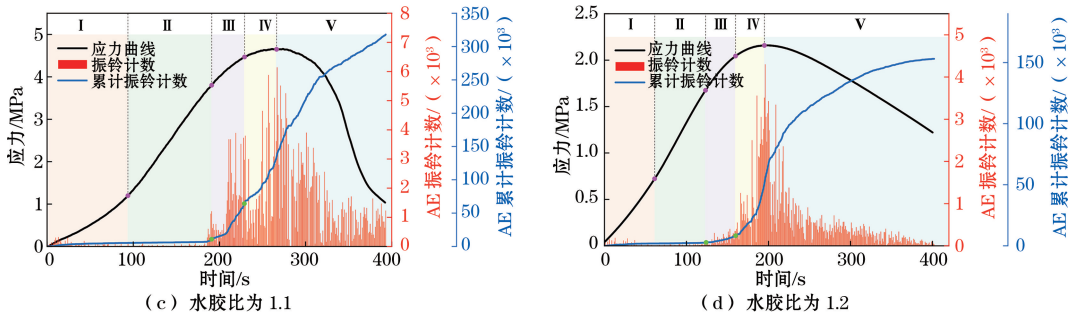


图2 不同水胶比胶结充填试样的声发射振铃计数特征

Fig.2 Characteristics of acoustic emission ringing counts of cemented filling specimens with different water-cement ratios

从图2可以看出,不同水胶比下胶结充填试样的声发射振铃计数呈现出不同的变化趋势。当水胶比分别为0.9, 1.0, 1.1, 1.2时,胶结充填试样的最大声发射振铃计数依次为 8.8×10^3 、 6.8×10^3 、 6.1×10^3 、 4.3×10^3 ,由此可知,胶结充填试样的最大声发射振铃计数随着水胶比的增大而逐渐减小。同时,最大声发射振铃计数与胶结充填试样的应力曲线峰值呈正比例关系,表明水胶比较低时胶结充填试样的强度较大,试样发生破坏所需的应变能更大。在声发射曲线的后段,较低水胶比(0.9, 1.0, 1.1)的胶结充填试样具有较强的脆性,发生破坏后声发射信号收集时间较短,声发射振铃计数表现为持续下降的趋势;水胶比为1.2的胶结充填试样具有一定的塑性,因此试样破坏后峰后持续时间较长,且声发射振铃计数整体较小。

2.2.2 裂纹起裂应力和损伤应力

分析单轴压缩过程中的裂纹起裂应力 σ_{ci} 和损伤应力 σ_{cd} 对于胶结充填材料的研究具有重要意义。从声发射曲线的分析过程中可以得到不同水胶比胶结充填试样的特殊应力及其与峰值应力 σ_c 的比值,如图3、图4所示。

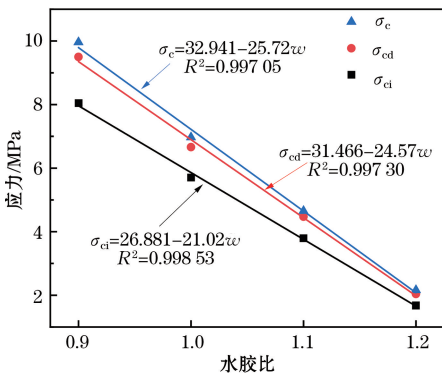


图3 不同水胶比胶结充填试样起裂应力、损伤应力和峰值应力

Fig.3 Cracking stress, damage stress and peak stress of cemented filling specimens with different water-cement ratios

从图3可以看出,随着水胶比的增大,试样受压过程中的裂纹起裂应力、损伤应力逐渐变小。当水胶比从0.9增大到1.2时,起裂应力从8.05 MPa下降到1.68 MPa,下降了79.13%;损伤应力从9.50 MPa下降到2.04 MPa,下降了78.53%。究其原因,随着水胶比的增大,胶结充填材料中的含水量变大,试样内部水化反应结束后,内部还会存在未反应的水分子,导致试样的强度变低。

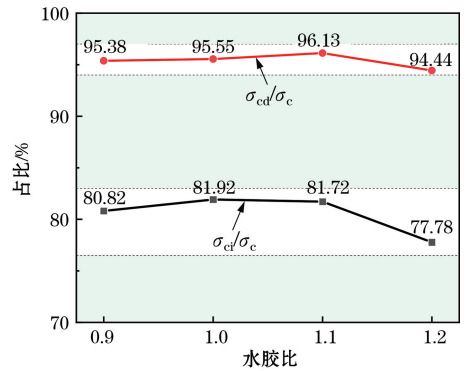


图4 不同水胶比胶结充填试样起裂应力、损伤应力占峰值应力的百分比

Fig.4 Percentage of cracking stress and damage stress to peak stress in cemented filling specimens with different water-cement ratios

由图4可知,不同水胶比胶结充填试样的起裂应力与峰值应力的比值在77%~82%之间波动,损伤应力与峰值应力的比值在94%~97%之间波动,表明胶结充填材料的起裂应力、损伤应力与峰值应力的比值不受水胶比大小的影响。

3 不同水胶比胶结充填试样的破裂演化规律

3.1 模型建立与参数选取

通过 PFC2D 颗粒流数值模拟软件建立宽 50 mm、长 100 mm 的矩形模型,在无侧限的情况下对

上、下墙体以 0.005 mm/min 的加载速度进行单轴压缩数值模拟。数值模型加载示意图见图 5。

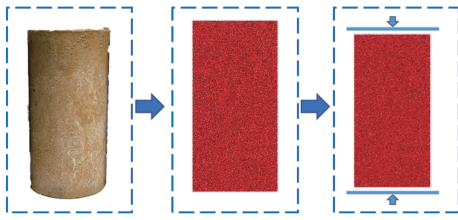


图 5 模型加载示意

Fig.5 Model loading schematic

在室内条件下,对养护龄期为 7 d 时不同水胶比胶结充填试样进行单轴压缩试验,然后以室内试验数据为基础进行试错调整,使得模拟所得应力-应变曲线和室内试验所得的应力-应变曲线变化规律一致,应力-应变曲线对比见图 6。由图 6 可知,试验与模拟的应力-应变曲线最大区别在曲线的压密阶段,其原因为:室内试验中试样与压头刚接触即开始记录数据,包括试样的压密过程;在数值模拟模型建立中,颗粒之间是紧密接触的,在压缩过程中不存在压密阶段。模型参数赋值见表 1。

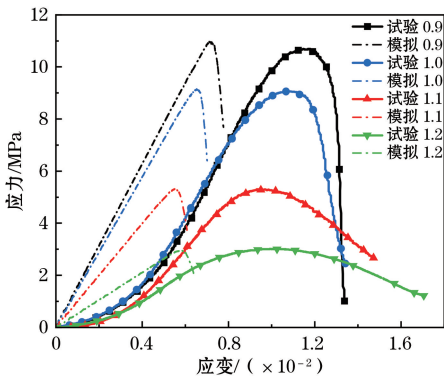


图 6 应力-应变曲线对比

Fig.6 Comparison of stress-strain curves

表 1 数值模型参数赋值

Table 1 Parameters assignment of numerical model

水胶比	颗粒密度/(kg/m ³)	颗粒最小直径/mm	颗粒最大直径/mm	摩擦因数	刚度比	有效模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
0.9	2 500	0.17	0.29	0.65	2	75	3.04	3.95
1.0	2 500	0.17	0.29	0.65	2	70	2.63	3.67
1.1	2 500	0.17	0.29	0.65	2	30	1.43	2.10
1.2	2 500	0.17	0.29	0.65	2	26	0.84	1.05

3.2 裂纹演化规律

图 7 和图 8 分别为不同水胶比胶结充填试样在峰值应力处的裂纹数量及空间分布。由图 7 可知,胶结充填试样的裂纹以剪切裂纹为主。水胶比分别

为 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 时,峰值应力处存在裂纹 4 454 条、3 978 条、2 414 条、1 870 条,表明胶结充填试样裂纹数量随着水胶比的增大逐渐减少,二者呈负相关,与声发射振铃计数特征一致。结合试样的强度特征可知,裂纹数量与试样的强度相关,试样强度越大,峰值应力处的裂纹数越多。

图 8 中绿色线条代表剪切裂纹(颜色标识见电子版),红色线条代表拉伸裂纹。观察试样裂纹分布形态可知,室内单轴试验与 PFC2D 数值模拟得出的结果近似一致,均表现为一条从上至下倾斜一定角度的主裂纹和若干次生裂纹,这表明水胶比的变化对胶结充填试样裂纹的空间分布影响较小。

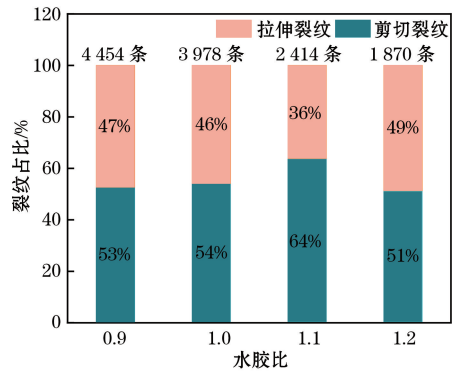


图 7 峰值应力处不同水胶比胶结充填试样的裂纹数

Fig.7 Number of cracks in cemented filling specimens with different water-cement ratios at peak stress

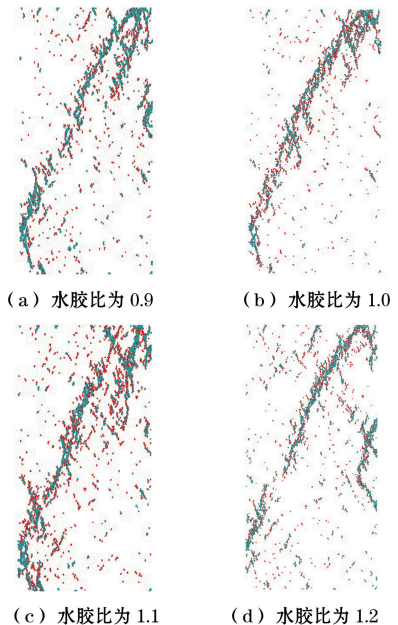


图 8 不同水胶比胶结充填试样峰值应力处的裂纹空间分布

Fig.8 Spatial distribution of cracks at the peak stress of cemented filling specimens with different water-cement ratios

3.3 力链演化规律

图9和图10分别为不同水胶比胶结充填试样在峰值应力处的力链最大值和力链的空间分布。由图9可知,随着水胶比的增大,胶结充填试样的力链最大值逐渐减小,水胶比分别为0.9, 1.0, 1.1, 1.2时,力链最大值为14 154 N、12 658 N、6 084 N、3 791 N。颗粒之间力链最大值的减小使得颗粒间的相互作用力变小,从应力-应变曲线上表现为试样强度的降低,这表明试样的最大力链值与强度具有极强的相关性,呈正比例关系。由图10可知,峰值应力处不同水胶比胶结充填试样内部均出现力链空白区,力链的密集程度不高,在宏观层面表现为裂纹的形态。与裂纹的空间分布相似,水胶比的变化未对力链的空间分布造成较大影响。

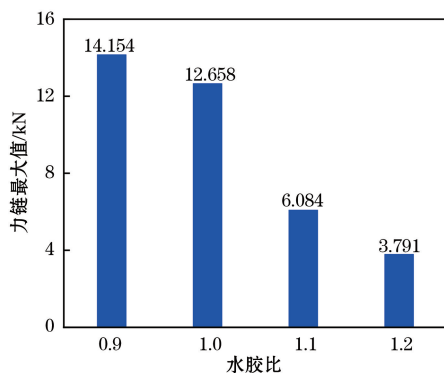


图9 峰值应力处不同水胶比的胶结充填试样的力链最大值

Fig.9 Maximum force chain values in cemented filling specimens with different water-cement ratios at peak stress

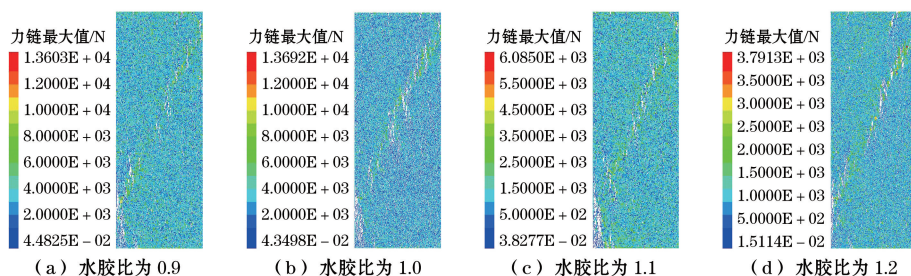


图10 不同水胶比胶结充填试样峰值应力处的力链空间分布

Fig.10 Spatial distribution of force chains at peak stress of cemented filling specimens with different water-cement ratios

4 结论

(1) 改变水胶比对胶结充填试样的微观结构造成显著影响:水胶比较小时(水胶比为0.9, 1.0),试样内水化反应可生成更多的凝胶产物,内部结构更致密;水胶比较大时(水胶比为1.1, 1.2),含水量的增多对水化反应速率产生负作用,内部结构裂隙较多。

(2) 不同水胶比胶结充填试样的声发射振铃计数曲线可分为5个阶段:压密阶段、线弹性变形阶段、裂纹恒速扩展阶段、裂纹突增阶段、峰后阶段。声发射振铃计数特征与强度具有相关性,试样的强度越大,破坏时释放的能量越多,声发射振铃计数也更大。随着水胶比的增大,胶结充填试样的裂纹起裂应力、损伤应力都逐渐变小,而起裂应力、损伤应力与峰值应力的比值不受水胶比大小的影响。

(3) 胶结充填试样的水胶比较小时,试样在峰值应力处的内部裂纹越多,力链最大值越大,强度越高;破坏时裂纹以剪切裂纹为主;改变水胶比对试样内部裂纹和力链的空间分布影响较小。

参考文献(References):

- [1] 才庆祥,陈彦龙.中国露天煤矿70年成就回顾及高质量发展架构体系[J].煤炭学报,2024,49(1):235-260.
CAI Qingxiang, CHEN Yanlong. Review of 70 years' achievements and high-quality development architecture system of surface coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 235-260.
- [2] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇,2021,46(7):2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [3] 谢和平,吴立新,郑德志.2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J].煤炭学报,2019,44(7):1949-1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [4] 尚涛,舒继森,才庆祥,等.露天矿端帮采煤与露天采排工程的时空关系[J].中国矿业大学学报,2001(1):29-31.
SHANG Tao, SHU Jisen, CAI Qingxiang, et al. Space-time relationship between end-slope coal extraction and dumping and mining of open-pits [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001(1): 29-31.

- [5] 杨国宇, 韩流, 尚涛. 坡面拐点位置对边坡稳定性的影响研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(10): 130-135.
YANG Guoyu, HAN Liu, SHANG Tao. Influence of inflection point position on slope stability [J]. Coal Engineering, 2022, 54(10): 130-135.
- [6] CHEN Yanlong, CAI Qingxiang, SHANG Tao, et al. Mining system for remaining coal of final highwall [J]. Journal of Mining Science, 2011, 47(6): 771-777.
- [7] 陈彦龙, 李明, 浦海, 等. 考虑循环载荷初始损伤效应的煤样动态力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2123-2137.
CHEN Yanlong, LI Ming, PU Hai, et al. Experimental study on dynamic mechanical characteristics of coal specimens considering initial damage effect of cyclic loading [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2123-2137.
- [8] 谢和平, 张吉雄, 高峰, 等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 36-46.
XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, et al. Theory and technical conception of carbon-negative and high efficient backfill mining in coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 36-46.
- [9] 陈涛, 舒继森, 韩流, 等. 露天矿端帮开采采顶板变形破坏机理[J]. 煤矿安全, 2023, 54(3): 177-186.
CHEN Tao, SHU Jisen, HAN Liu, et al. Deformation and failure mechanism of roadway in open-pit end slope mining [J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(3): 177-186.
- [10] LYU Haoyan, CHEN Yanlong, XIE Qihang, et al. Performance optimization and characterization of loess-slag-based geopolymers composite: a new sustainable green material for backfill [J]. Construction and Building Materials, 2022, 354: 129103.
- [11] 吴鹏. 矿渣-黄土基胶结充填材料的变形与强度演化机制及其蠕变模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
WU Peng. Study on the deformation and strength evolution mechanism and creep model of slag-loess-based cemented backfill materials [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [12] 尹升华, 侯永强, 杨世兴, 等. 单轴压缩下混合集料胶结充填体变形破坏及能耗特征分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 936-947.
YIN Shenghua, HOU Yongqiang, YANG Shixing, et al. Analysis of deformation failure and energy dissipation of mixed aggregate cemented backfill during uniaxial compression [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 936-947.
- [13] 吕昊岩. 黄土-矿渣基胶结充填材料的力学特性及损伤本构模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
LYU Haoyan. Mechanical properties and damage constitutive model research of loess-slag-based cemented backfill material [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [14] 孙伟, 吴爱祥, 王洪江, 等. 全尾砂-废石混合回填膏体流动特性变化规律[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3464-3470.
SUN Wei, WU Aixiang, WANG Hongjiang, et al. The change laws of flow characteristics of backfill paste mixed by unclassified tailings and waste rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3464-3470.
- [15] 卓毓龙, 陈辰, 曹世荣, 等. 块石对充填体强度特性及损伤演化的影响[J]. 黄金科学技术, 2016, 24(3): 76-80.
ZHUO Yulong, CHEN Chen, CAO Shirong, et al. Effects of ballast on strength characteristics and damage evolution of filling body [J]. Gold Science and Technology, 2016, 24(3): 76-80.
- [16] 程爱平, 戴顺意, 张玉山, 等. 胶结充填体损伤演化尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊1): 3053-3060.
CHENG Aiping, DAI Shunyi, ZHANG Yushan, et al. Study on size effect of damage evolution of cemented backfill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Suppl.1): 3053-3060.
- [17] 李强, 陈彦龙, 徐昆, 等. 不同加载速率下露天端帮胶结充填体的变形破坏试验研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 70-75.
LI Qiang, CHEN Yanlong, XU Kun, et al. Experimental study on deformation and failure of cemented filling body in open-pit end slope under different loading rates [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(11): 70-75.
- [18] 赵康, 黄明, 严雅静, 等. 不同灰砂比尾砂胶结充填材料组合体力学特性及协同变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊1): 2781-2789.
ZHAO Kang, HUANG Ming, YAN Yajing, et al. Mechanical properties and synergistic deformation characteristics of tailings cemented filling assembled material body with different cement-tailings ratios [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Suppl.1): 2781-2789.
- [19] 冉洪宇, 郭霞霞, 冯国瑞, 等. 分级加载下矸石胶结充填材料蠕变特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 42-47.
RAN Hongyu, GUO Yuxia, FENG Guorui, et al. Creep properties of coal gangue cemented backfill material under step loading [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2): 42-47.
- [20] 李丹, 张治强, 历佟, 等. 焦家金矿全尾砂充填体三轴试验研究[J]. 有色金属工程, 2023, 13(12): 141-150.
LI Dan, ZHANG Zhiqiang, LI Tong, et al. Investigation of three-axial testing on full tailings backfill at Jiaojia gold mine [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(12): 141-150.
- [21] 宋卫东, 汪杰, 谭玉叶, 等. 三轴加-卸载下分层充填体能耗及损伤特性[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 1050-1057.
SONG Weidong, WANG Jie, TAN Yuye, et al. Energy consumption and damage characteristics of stratified backfill under triaxial loading and unloading [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 1050-1057.
- [22] 李龙福, 江东平, 雷丁丁. 充填体变形特性分析及材料配比优选[J]. 中国矿业, 2017, 26(6): 107-111.
LI Longfu, JIANG Dongping, LEI Dingding. Analysis of the backfill deformation characteristics and optimization of material ratio [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(6): 107-111.