

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2023.04.001

不同胶结介质的胶结再生岩体力学特性试验

吴欢¹, 王平^{1,2,3*}, 丁理¹, 江永志¹, 曾梓龙¹, 喻迪¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:再生顶板结构控制是回采工作面支护参数和支护方案设计的关键,再生岩体力学特性的确定是支护方案选择与支护参数设计的基础。采用RMT-150试验机开展胶结再生岩体单轴压缩试验,结合SEM电镜扫描系统研究不同胶结介质条件下再生岩体的强度特性及固结机理。研究表明:水灰比和胶结介质是影响强度的主要因素,在单轴压缩测试试验结果中,超细水泥试样最高强度为12.5 MPa,普通水泥最高强度为10.2 MPa,石膏最高强度为6.7 MPa;水灰比为5:10,6:10,7:10时,胶结质固结体强度随水灰比的增大而减小,胶结再生岩体强度随水灰比的提高呈现逐渐增大,再逐渐减小的趋势;电镜扫描试验分析胶结介质的胶结特征和岩-浆交界面孔隙形态,从微观角度确定岩-浆交界面孔隙特征,胶结特征由包裹式接触到依附式接触是降低强度的主要因素。通过对不同水灰比条件下不同胶结再生岩体强度的影响因素进行分析,为破碎条件下再生顶板支护研究提供参考依据。

关键词:再生岩体;力学特性;胶结介质;水灰比

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)04-0001-09

Experimental Study on Mechanical Properties of Cemented Regenerated Rock Mass with Different Cementitious Media

WU Huan¹, WANG Ping^{1,2,3}, DING Li¹, JIANG Yongzhi¹, ZENG Zilong¹, YU Di¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Control of Coal Mine Gas and Roof Plate in Southern China,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The control of regenerated roof structure is the key to the support parameters and scheme design of the mining face. The determination of the mechanical properties of the regenerated rock mass is the basis for the selection of the support scheme and the design of the support parameters. The uniaxial compression test of cemented regenerated rock mass is carried out with RMT-150 testing machine, and the strength characteristics and consolidation mechanism of the regenerated rock mass under different cementation media are studied with SEM scanning system. Results show that the water cement ratio and the cementation medium are the influencing factors of the strength. In the uniaxial compression test results, the maximum strength of the ultra-fine cement sample is 12.5 MPa, that of the ordinary cement is 10.2 MPa, and that of the gypsum is 6.7 MPa. In the range of water cement ratio 5:10, 6:10, 7:10, the strength of cemented solid decreases with increasing water cement ratio and the strength of cementitious regenerated rock mass gradually increases with the increase of water cement ratio, and then slowly increases. The electron microscope scanning test analyzes the cementation characteristics of

收稿日期:2022-11-27

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52174110);湖南省教育厅重点资助项目(21A0313);煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室一般资助项目(JYBSYS2021203);湖南省自然科学基金青年项目(2020JJ5186)

*通信作者, E-mail:674053967@qq.com

the cementation medium and the pore morphology of the rock slurry interface, and determines the increase of the pore number of the rock slurry interface from the microscopic perspective. The cementation characteristics from the wrapped contact to the attached contact are the main factors to reduce the strength. By analyzing the influencing factors of the strength of different cemented regenerated rock mass under different water cement ratio, it provides references for the research on the support of regenerated roof under broken conditions.

Keywords: cemented regenerated rock mass; mechanical properties; cementitious substance; water cement ratio

在极近距离煤层群或者特厚煤层分层开采过程中,不可避免地存在再生岩体巷道,这些再生岩体巷道变形量大、稳定性差^[1].以再生顶板巷道为例,再生顶板围岩结构松散、破碎情况严重,容易脱层冒落,稳定性极差,如果未及时采取有效的顶板控制措施加以支护,进行工作面回采时,再生顶板巷道围岩则会出现变形失稳破坏^[2-3].再生顶板结构控制是回采工作面支护参数和支护方案设计的关键,再生岩体力学特性的确定是支护方案选择与支护参数设计的基础.

目前,在破碎岩体注浆胶结方面有学者开展了很多的研究.韩立军等^[4]认为注浆主要是从岩体裂隙、结构面和节理面改善岩体的力学性能;Zhang等^[5]认为注浆加固旨在改善破碎岩石的物理和机械性能;孟庆彬等^[6]通过对破碎岩体胶结后的强度特性进行试验研究,发现破碎岩体的粒径和含水量影响胶结体的强度,认为破坏形式也受破碎岩体粒径和含水量的影响;文献[7-9]发现注浆液的黏结强度、水灰比的含量是影响注浆加固体强度的主要因素;李召峰,王志等^[10-11]通过试验研究得出注浆加固后岩体的强度和岩-浆结构面与材料的胶结类型以及胶结材料有关;许宏发,宗义江等^[12-14]基于莫尔库仑强度理论,根据试验数据推导出注浆体单轴抗压强度增长率公式,并阐述了注浆固结体强度恢复系数比较低的原因;Zhao等^[15]根据弱胶结软岩中岩石拉伸破坏情况,提出一种弱胶结软岩区域大变形锚固力累积效应的分段锚固方式.

很多学者通过室内试验研究不同岩性、粒径、级配的破碎岩体压实变形和强度变化规律,研究结果表明破碎岩体整体强度低,具有强碎胀、易崩解的特性,岩体破碎后进行注浆可以提高岩体的整体性和稳定性^[16-18].在采空区对破碎围岩巷道进行注浆、灌浆和喷浆胶结,存在很多没有充分胶结的岩体,这些浆液与破碎围岩胶结后的微观结构等尚不清楚,其力学特性有待进一步研究.因此,开展不同水灰比条件下胶结加固破碎岩体试验研究,制作重组胶结再生岩体,通过室内试验分析胶结介质、水灰比对再生岩体强度的影响;同时开展电镜扫描试验观察破坏后胶结介质的内部胶结特征和岩-浆界面特征,从微观角度揭示胶结介质与岩石间的相互作用机制,为探索胶结再生岩体在胶结作用下内部裂纹的形态规律,揭示细观组构演化规律与宏观力学特性之间的联系.

1 胶结再生岩体试验方案设计

1.1 试验方案设计

为研究不同胶结材料及其水灰比对再生岩体试件力学特性的影响,制备胶结再生岩体的破碎岩体选用煤矿采空区矸石,经过筛分后挑选粒径为5~10 mm的破碎岩样,采用超细水泥(标号K600)、普通硅酸水泥(标号M32.5)和石膏粉作为胶结介质制备再生岩体试件.为获得3种胶结介质的基本力学参数,设置一组不掺破碎岩体的胶结质固结体标准试件(50 mm×100 mm圆柱体).每一种胶结材料分别设置3个水平的水灰比,再生岩体试件材料配比用量如表1所示.

试件制备过程:采用自来水将超细水泥,普通水泥和石膏分别与粒径为5~10 mm的破碎岩体进行充分搅拌后,放入内尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的模具中,静置7 h,待试件胶结成型后取出.采用塑料薄膜包裹并在室温条件下养护28 d.为减小试验误差每组试件均制备4个,部分再生岩体试件如图1所示.

试件加载过程:试验采用RMT-150C型岩石力学试验机对再生岩体试件进行单轴加载,加载速率

为0.5 N/s.

表1 胶结再生岩体试件制备材料用量

破碎岩体/kg	超细水泥/kg	普通水泥/kg	石膏/kg	水/L	水灰比
5.0	1.5	-	-	0.75	5 : 10
5.0	1.5	-	-	0.90	6 : 10
5.0	1.5	-	-	1.05	7 : 10
5.0	-	1.5	-	0.75	5 : 10
5.0	-	1.5	-	0.90	6 : 10
5.0	-	1.5	-	1.05	7 : 10
4.5	-	-	2	1.00	5 : 10
4.5	-	-	2	1.20	6 : 10
4.5	-	-	2	1.40	7 : 10

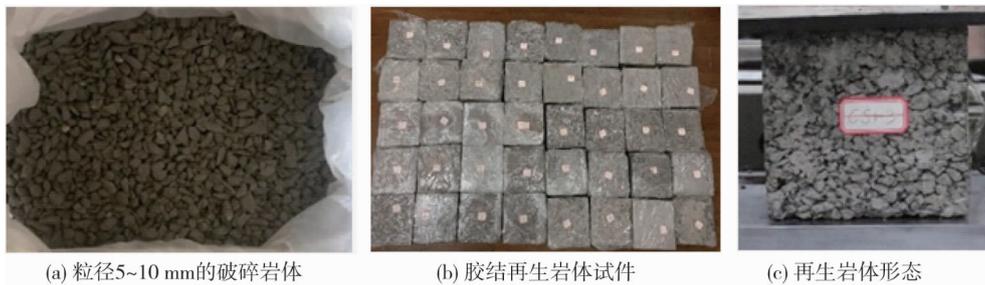


图1 胶结再生岩体试件

1.2 试验结果分析

1.2.1 胶结质固结体破坏模式及强度特征

不同水灰比条件下胶结质固结体在单轴压缩试验中的破坏模式如图2所示,3种胶结介质的标准试件均表现出脆性破坏的特征.试样在到达峰值应力时,瞬间破坏,并伴有蹦出和开裂声.不同胶结质的固结体在破坏时会在周边产生微状裂纹,伴随着掉落现象,整体破坏模式为拉伸破坏.

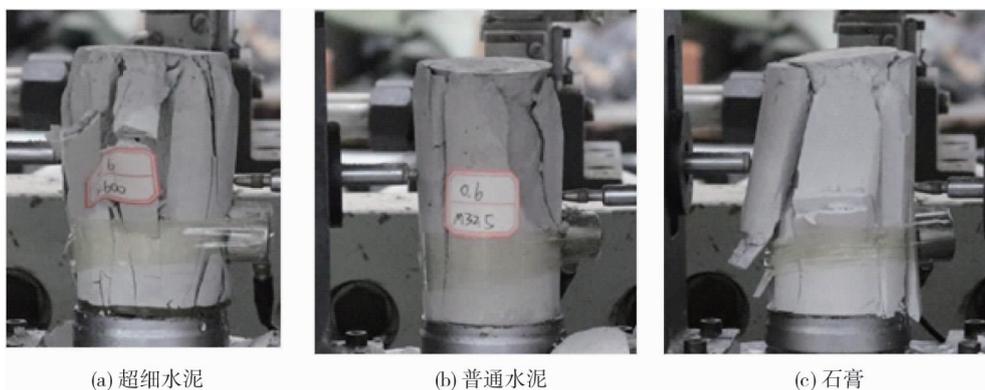


图2 不同胶结质固结体破坏模式对比

胶结质固结体在单轴测试下的轴向应力-应变曲线如图3所示.胶结质固结体到达峰值应力前,应力-应变曲线呈直线上升无波动趋势,说明试样内部裂隙萌生和发展较少.到达峰值应力后,裂纹贯通扩展迅速,应力快速下降,整体呈现脆性特征.在水灰比为5 : 10, 6 : 10, 7 : 10时,超细水泥单轴抗压强度从35.6 MPa降低到19.2 MPa,降幅46%,普通水泥从15.3 MPa降到5.51 MPa,降幅64%,石膏从13.5 MPa到6.0 MPa,降幅55%.

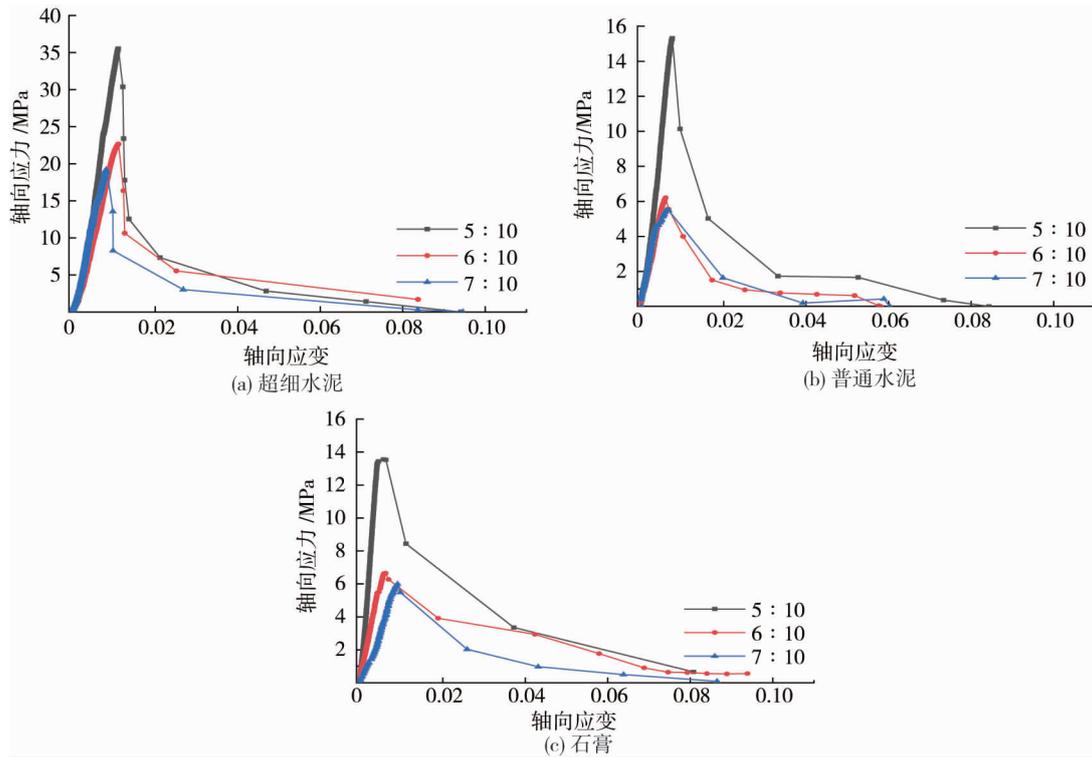


图3 不同水灰比条件下胶结质固体试样轴向应力-应变曲线

1.2.2 胶结再生岩体破坏模式及强度特征

3种胶结介质的再生岩体破坏模式均为拉伸破坏,如图4所示.胶结再生岩体当载荷临近峰值时,先出现纵向贯通裂纹,随后出现宏观破裂面且伴有部分结构破碎掉落.较大的材料骨架由于部分结构脱离,整体结构在碎屑剥离处先变形失稳,最后失去承载能力.含有弱面结构的岩体,其破坏形式为弱结构面破坏.



图4 胶结再生岩体破坏模式

胶结再生岩体到达峰值应力破坏后,力学试验机探头自动上升,撤去试件承载表面上方的承载板,岩体表面碎屑掉落,试件剩下中心支柱的最终破坏形态如图5所示,3种胶结介质的再生岩体破坏模式大多呈现“X”型拉剪破坏.

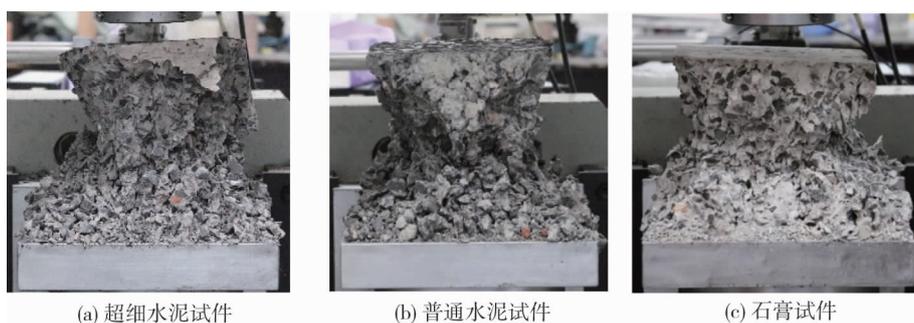


图5 不同胶结再生岩体最终破坏形态

图6为不同水灰比条件下胶结再生岩体的轴向应力-应变曲线.从图6中可以看到,不同水灰比的胶结再生岩体所对应的轴向应力-应变曲线形状相似.在压密阶段,孔隙裂纹不断闭合,轴向应力-应变呈上凹曲线;在弹性阶段,孔隙裂纹稳定发展,所有试样轴向应力-应变曲线近似直线上升,上升趋势相同,强度高的试件曲线斜率大;塑性阶段,试样内部孔隙裂纹不断扩展,轴向应力值、应变值不断增大;破坏后阶段,峰值应力之后,裂纹迅速贯通扩展形成破裂面,破裂面块体滑移引起试件承载能力降低,轴向应力曲线下降,一段时间后岩体进入残余强度阶段.

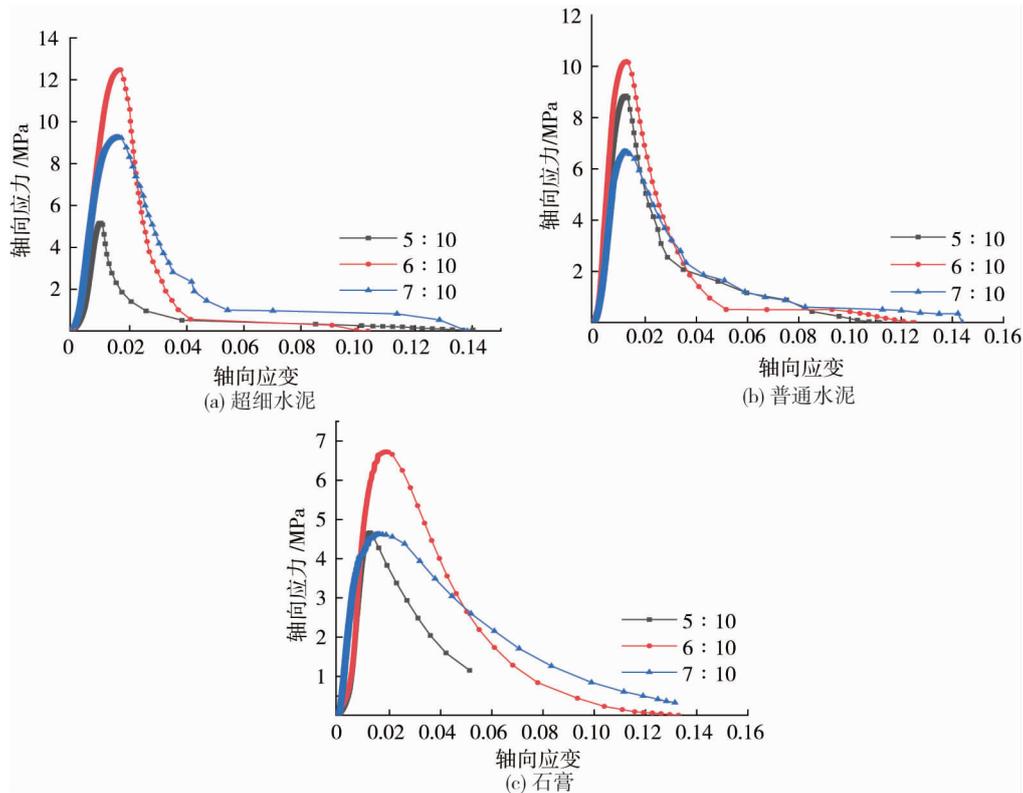


图6 不同水灰比条件下胶结再生岩体轴向应力-应变曲线

胶结再生岩体在水灰比为6:10时,轴向应力达到测试试样组最大值.胶结质固结体的轴向应变大多数在0.01左右到达峰值应力,胶结再生岩体在轴向应变0.02左右达到峰值应力.胶结再生岩体达到峰值应力的应变值大于胶结质固结体,到达破坏后阶段,再生岩体具有一定的承载能力阻止岩体急速破坏,塑性特征明显.

1.2.3 胶结再生岩体强度分析

表2为胶结质固结体和胶结再生岩体进行单轴抗压强度测试结果.

根据表2数据,在水灰比分别为5:10,6:10,7:10时,超细水泥胶结再生岩体强度是胶结质固结体的0.14,0.55,0.47倍,普通水泥胶结再生岩体强度是胶结质固结体的0.82~1.70倍,石膏胶结再生岩体强度是胶结质固结体的0.30~1.01倍.不同胶结介质的再生岩体强度随水灰比的提高呈先增大,后缓慢减小趋势.水灰比从5:10增大到6:10时,超细水泥胶结再生岩体强度增幅150%,普通水泥胶结再生岩体强度增幅15%,石膏胶结再生岩体强度增幅42%;水灰比从6:10增大到7:10时,超细水泥胶结再生岩体强度降幅26.4%,普通水泥胶结再生岩体强度降幅35%,石膏胶结再生岩体强度降幅31%.根据各组试样的单轴抗压强度,水灰比为6:10的试样的强度恢复效果是最好的,而且超细水泥胶结再生岩体的胶结加固效果明显优于普通水泥、石膏的胶结再生岩体.

试样水灰比和峰值强度关系如图7所示.通过图7可以看出胶结质固结体的强度随水灰比的增大,呈先大幅度减小再缓慢减小的趋势.再生岩体的强度与水灰比呈先缓慢增大再逐渐减小的趋势,再次提高水灰比对破碎岩体胶结强度恢复的影响效果不显著.

表2 单轴压缩强度测试结果

胶结介质	水灰比	胶结质固结体单轴抗压强度/MPa	胶结再生岩体单轴抗压强度/MPa
超细水泥	5 : 10	35.6	5.0
	6 : 10	22.7	12.5
	7 : 10	19.2	9.2
普通水泥	5 : 10	15.3	8.9
	6 : 10	6.2	10.2
	7 : 10	5.5	6.6
石膏	5 : 10	13.6	4.7
	6 : 10	6.6	6.7
	7 : 10	6.0	4.6

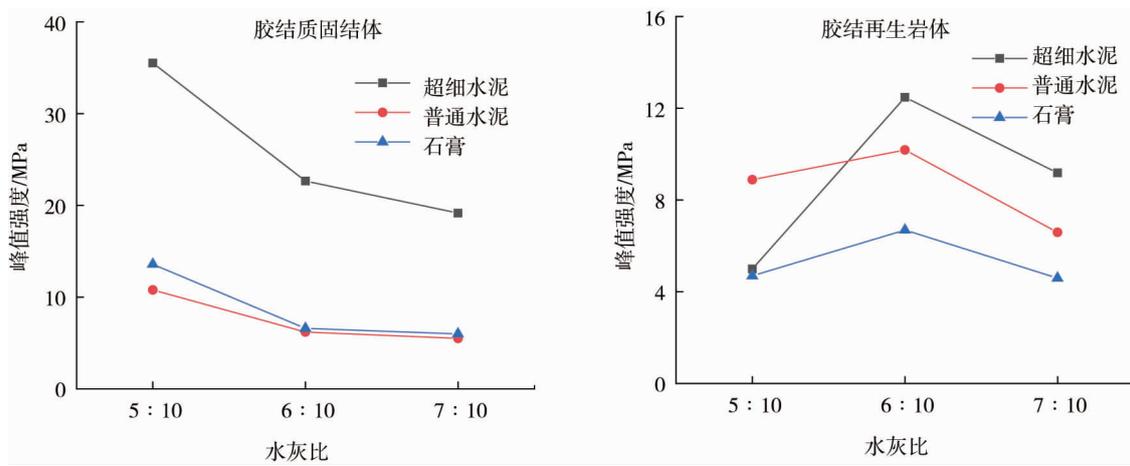


图7 试样峰值强度与水灰比关系

2 单轴压缩试验抗压强度影响因素分析

2.1 胶结再生岩体的胶结特征和岩-浆界面特征分析

采用电镜扫描,观察微观状态下不同胶结介质对破碎岩体的胶结特征和岩-浆界面特征的影响.图8是胶结再生岩体试样在扫描电镜下分别放大500倍和2000倍的微观形貌图.由图像分析可得,胶结再生岩体中破碎岩体和胶结介质起骨架作用,支撑起整个结构体系,骨架结构多孔隙,颗粒间松散且连接处皆有孔隙裂纹.

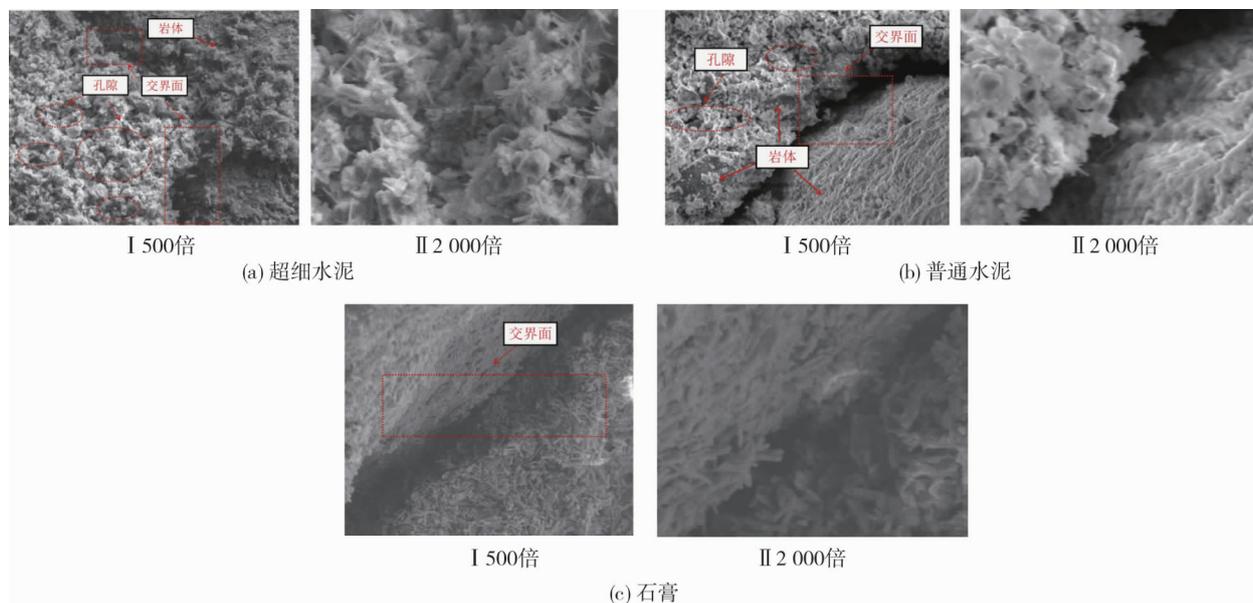


图8 胶结再生岩体破坏后岩-浆结构面电镜扫描结果

超细水泥胶结再生岩体胶结骨架结构多孔隙,胶结介质颗粒间呈蜂窝状紧紧包裹破碎岩体,且边界形状似丝状充填在晶体孔隙之间.超细水泥胶结介质的胶结面充填密实度高,在岩体加载时不易产生岩-浆交界面滑落.普通水泥胶结再生岩体颗粒间呈絮状堆积在岩体表面,边界形状呈鳞片附着在岩体表面.普通水泥胶结材料胶结介质晶体的致密度较高,但是岩-浆交界面裂纹孔隙等微缺陷较多,在单向受力时容易在交界面处应力集中,从而导致力学性能低.石膏胶结再生岩体颗粒间明显呈针状,颗粒间联结非常不紧密,孔洞发育程度极高,故而力学性能差.

胶结再生岩体骨架含有大量孔隙结构,孔隙结构具有不均匀分布颗粒、开放型颗粒以及颗粒间孔隙特征,颗粒间胶结方式由包裹式胶结到接触式胶结,颗粒之间的面接触为凹凸接触,结构松散.在受力加载过程中,在胶结介质强度较低处,岩体发生破坏导致颗粒间胶结程度降低,随着加载载荷的增大,颗粒间不能充分接触,且会发生明显滑移错落失稳,从而导致颗粒间自由度增大,承载力降低直接造成岩体峰值强度变低.此外,随着水灰比的增大,高孔隙率使水分易进入破碎岩体内部,造成胶结物质水化及颗粒物质吸水膨胀,致使细观结构遇水后松胀.通过对比超细水泥,普通水泥和石膏胶结再生岩体破坏后的孔隙特征发现:①超细水泥胶结面连接紧密,结构面节理清晰,存在小裂隙;②普通水泥胶结面处有明显大的裂隙;③石膏颗粒间存在裂隙数量多,交界面处孔隙大.破碎岩体与胶结介质界面结合程度低,岩-浆交界面孔隙特征明显,使得试样强度降低.3种胶结介质的胶结特征及其岩-浆交界面裂隙的大小是影响力学性质的主要因素,强度高的试样胶结面致密度高,岩-浆交界面孔隙裂纹小.

2.2 数值模拟分析

单轴压缩试验中测得的不同胶结质固结体的细观参数作为数值模拟参数赋值,选用 BPM 模型,尺寸为 150 mmx150 mmx150 mm,大颗粒半径为 0.005~0.007 mm,小颗粒半径为 0.002~0.004 mm,采用 clump 五边形模拟破碎岩体.超细水泥与石膏胶结材料主要用小颗粒,普通水泥主要用大颗粒,并且超细水泥大、小颗粒体积占比分别为 65%,35%,普通水泥大、小颗粒体积占比分别为 60%,40%、石膏大、小颗粒体积占比分别为 55%,45%.生成的颗粒均服从均匀分布,孔隙率为 0.12,超细水泥、普通水泥、石膏共生成 25 318, 10 016, 10 016 个颗粒.颗粒的细观参数如表 3 所示,胶结参数值分别取自表 3 中数据的 0.4 倍.

表 3 颗粒细观参数表

固结材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒间接接触 模量 E/GPa	颗粒法向与 切向刚度比	颗粒间摩擦 系数	颗粒间法向与 切向黏结刚度比	颗粒间平行 抗拉强度/ GPa	颗粒间平行黏 结内聚力/ GPa
超细水泥	2 300	0.72	1.5	0.50	1.0e9	1.0e5	1.0e3
普通水泥	2 300	0.58	1.5	0.45	1.0e9	1.0e5	1.0e3
石膏	2 300	0.65	1.3	0.40	1.0e9	1.0e5	1.0e3

图 9 是 PFC 数值模拟得到的不同胶结再生岩体破坏模式,试件裂纹从边界萌生和发育,多数出现在岩-浆界面区域.可分析得到边界裂隙产生原因:胶结介质对破碎岩体的胶结性差,易在岩浆界面出现极弱结构,从而试件整体承载能力低,在加载载荷条件下岩体在弱结构面出现拉剪破坏.试件先是出现拉伸裂纹,再是边界破裂面碎屑掉落,最终呈现“X”型拉剪破坏.

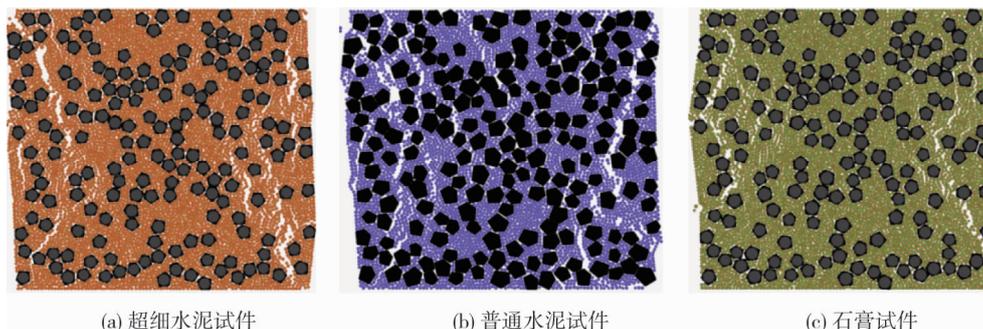


图 9 模拟不同胶结再生岩体破坏

试件破坏的整个过程都伴随着拉剪裂纹的发展,这种现象不仅存在于室内试验,在 PFC 数值模拟中也有直观的体现.拉剪裂纹的存在对岩体的破坏模式造成影响,也对峰值强度造成很大影响,拉剪裂纹数目越多,试件裂纹发展所需要克服的能量越大,在宏观上表现为强度增大.不同胶结再生岩体的轴向应力-应变曲线如图 10 所示,峰值应力和峰值应变与室内试验测试结果基本符合.超细水泥呈现的抗压强度最大,再依次是普通水泥、石膏.因此,固结材料的选取应依次是超细水泥、普通水泥、石膏,且最优水灰比为 6 : 10.

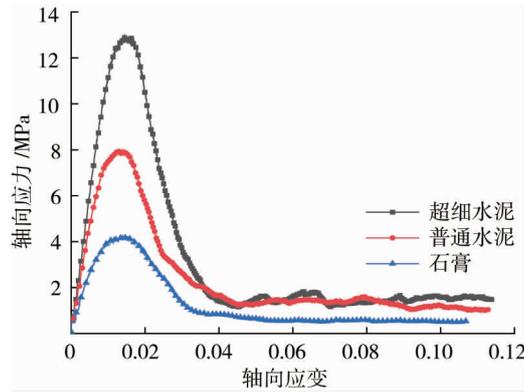


图 10 不同胶结再生岩体破坏应力-应变曲线

2.3 再生岩体的破坏失稳模式

根据胶结再生岩体破坏模式(图 11),破碎岩体胶结后在承载过程中,内部将产生 3 种破坏失稳模式:(a)胶结介质区域失稳;(b)岩-浆界面区域失稳;(c)破碎岩体区域失稳.

当破碎岩体区域强度小于胶结介质区域强度与岩-浆界面结合区域强度时,试件破坏产生在破碎岩体区域;水灰比大小主要影响胶结介质区域的强度,水灰比越大,胶结介质区域强度越小,当胶结介质区域强度小于破碎岩体区域强度和岩-浆界面结合区域强度时,试件主要产生胶结介质区域破坏失稳;当岩-浆界面结合区域强度小于胶结介质区域强度和破碎岩体区域强度时,破坏失稳产生在岩-浆界面结合区域.本文采用粒径相同的破碎岩体,粒径间隙有利于胶结加固,使破碎岩体区域强度、胶结介质区域强度大于岩-浆界面结合区域强度,试件进行单轴压缩试验时出现岩-浆弱结构面裂纹上下贯穿失稳,主导失稳模式为拉伸破坏.

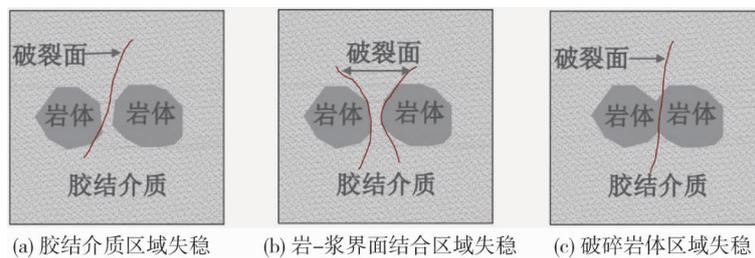


图 11 胶结再生岩体失稳破坏

3 结论

1) 胶结加固明显提高了破碎岩体的强度.在水灰比为 5 : 10, 6 : 10, 7 : 10 时,超细水泥胶结再生岩体峰值强度为 5.0, 12.5, 9.2 MPa,普通水泥的再生岩体峰值强度为 8.9, 10.2, 6.6 MPa,石膏的再生岩体峰值强度为 4.7, 6.7, 4.6 MPa,分析得出超细水泥对岩体的峰值强度恢复效果最好,普通水泥次之,石膏最差.根据试验结果,再生岩体水灰比为 6 : 10 的胶结加固强度恢复效果最理想.

2) 胶结再生岩体的整体强度介于破碎岩体强度和胶结介质强度之间。

3) 水灰比提高是影响试样强度高低的因素。胶结质固结体的强度随水灰比的增大而逐渐减小,胶结再生岩体的强度随水灰比提高,呈先增大后减小的趋势。

4) 胶结介质、岩-浆交界面是影响岩体强度的主要因素,而岩-浆交界面孔隙的大小和数量与胶结介质、水灰比有关。

参考文献:

- [1] 孙广京,王平,冯涛,等.软弱破碎顶板巷道围岩变形机理及控制技术[J].煤炭科学技术,2020,48(5):209-215.
- [2] 黄钟,冯涛,王平,等.再生顶板破碎岩石胶结体力学特性实验[J].湖南文理学院学报(自然科学版),2019,31(2):64-70.
- [3] 王平,余伟健,冯涛,等.软弱破碎围岩压实-固结二次成岩机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8):1884-1895.
- [4] 韩立军,宗义江,韩贵雷,等.岩石结构面注浆加固抗剪特性试验研究[J].岩土力学,2011,32(9):2570-2576.
- [5] ZHANG J P, LIU L M, LI Y. Mechanism and experiment of self-stress grouting reinforcement for fractured rock mass of underground engineering[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131: 104826.
- [6] 孟庆彬,钱唯,韩立军,等.极弱胶结岩体再生结构的形成机制与力学特性试验研究[J].岩土力学,2020,41(3):799-812.
- [7] 王汉鹏,高延法,李术才.岩石峰后注浆加固前后力学特性单轴试验研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(1):27-31.
- [8] 周斌,许兴亮.浆液对破碎岩体强度恢复影响试验研究[J].煤炭技术,2016,35(3):92-94.
- [9] 董红娟,张金山,姚贺瑜,等.不同参数大尺度注浆体试件力学特性与失稳机制[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):79-89.
- [10] 李召峰,李术才,刘人太,等.富水破碎岩体注浆加固实验与机制研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(1):198-207.
- [11] 王志,秦文静,张丽娟.含裂隙岩石注浆加固后静动态力学性能试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):2451-2459.
- [12] 许宏发,耿汉生,李朝甫,等.破碎岩体注浆加固体强度估计[J].岩土工程学报,2013,35(11):2018-2022.
- [13] 许宏发,耿汉生,刘伟东,等.基于BQ的破碎岩体注浆加固强度增长理论[J].岩土工程学报,2014,36(6):1147-1151.
- [14] 宗义江,韩立军,韩贵雷.破裂岩体承压注浆加固力学特性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4):483-488.
- [15] ZHAO Z H, WANG W M, WANG L H. Theoretical analysis of a new segmented anchoring style in weakly cemented soft surrounding rock[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(3):401-407.
- [16] 孙利辉,纪洪广,蒋华,等.弱胶结地层条件下垮落带岩层破碎冒落特征与压实变形规律试验研究[J].煤炭学报,2017,42(10):2565-2572.
- [17] FAN L, LIU S M. A conceptual model to characterize and model compaction behavior and permeability evolution of broken rock mass in coal mine gobs[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 172:60-70.
- [18] 曹树刚,张适,李国栋,等.散体矸石的承载性能试验研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(5):1164-1171.