



移动扫码阅读

王 葵,熊祖强,苏承东.改性高水材料充填支柱尺寸效应及破坏特征分析[J].煤炭科学技术,2021,49(12): 82-88. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.12.010

WANG Yan,XIONG Zuqiang,SU Chengdong.Analysis on size effect and failure characteristics of filling pillars with modified high-water material[J].Coal Science and Technology,2021,49(12):82-88. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.12.010

改性高水材料充填支柱尺寸效应及破坏特征分析

王 葵¹,熊祖强^{1,2},苏承东^{1,2}

(1.河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454003;2.煤炭安全生产河南省协同创新中心,河南 焦作 454003)

摘 要:为研究改性高水材料充填支柱尺寸对承载性能的影响,在高水材料充填支柱试样中添加 0.2% 聚丙烯纤维进行改性,通过对比改性试样及未改性试样的单轴压缩试验结果、破坏过程及形貌,分析其尺寸效应和破坏特征,最后通过扫描电镜(SEM)对试验结果进行进一步讨论。结果表明:改性后高水材料充填支柱尺寸效应特征不变,随高径比增大,峰值强度及峰值应变逐渐降低,弹性模量逐渐增大;改性后试样的承载性能提高,峰值强度提高 10.78%,峰值应变增大 28.62%;试样破坏类型不受高径比和纤维的影响,均为“X”—劈裂型剪切组合破坏;由于纤维的阻裂效果,改性后材料试样的整体受压稳定性显著提高;SEM 微观形态对比可知,纤维阻止原有裂隙发育的同时延缓新裂隙的产生,使材料具有更稳定钙矾石骨架结构,间接增大了材料强度并表现出较高的残余强度。

关键词:改性高水材料;充填支柱;尺寸效应;充填支护

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)12-0082-07

Analysis on size effect and failure characteristics of filling pillars with modified high-water material

WANG Yan¹,XIONG Zuqiang^{1,2},SU Chengdong^{1,2}

(1.School of Energy Science and Engineering,Henan Polytechnic University,Jiaozuo 454003,China;

2.Henan Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety,Jiaozuo 454003,China)

Abstract:In order to study the influence of size effect of filling pillars with modified high-water material on the load-bearing capacity 0.2% polypropylene fiber was added to the samples of high-water filling pillar material for modification. By comparing the uniaxial compression test results,failure process and morphology of the modified and unmodified samples,the size effect and failure characteristics were analyzed. Finally,the test results were further discussed by scanning electron microscopy(SEM). The results show that the size effect characteristics of the high-water-filled pillars remain unchanged. With the increase of height-diameter ratio,peak strength and peak strain gradually decrease and the elastic modulus gradually increases. The modified samples' load-bearing capacity increases,and the peak strength increases by 10.78%,the peak strain increases by 28.62%; the failure types of samples are not affected by height-diameter ratio and the fibers,all of which belong to “X” shear failure of splitting type. Due to the fiber's crack resistance effect,the integral compressive stability of the modified samples is significantly improved. SEM microscopic morphology comparison shows that the fibers prevent the development of original cracks while delaying the generation of new cracks,so that the material has a more stable ettringite skeleton structure, which indirectly increases the strength and performance of the material and show a higher residual strength.

Key words:modified high-water material;filling pillars;size effect;filling support

0 引 言

充填支柱作为一种新型的支护方式,工艺简单、

支护强度高、易于采煤机直接切割,能有效控制巷道顶板稳定,可代替木垛、单体支柱等用于井下临时或永久支护,是综采工作面过空巷、回采煤柱经济可行

收稿日期:2021-04-21;责任编辑:朱恩光

基金项目:河南省高校科技创新团队和创新人才支持计划资助项目(17HASTIT032);河南省创新科技团队支持计划资助项目(CXTD2017088)

作者简介:王 葵(1995—),男,河南焦作人,硕士研究生。E-mail:244933792@qq.com

的支护技术^[1]。充填支柱一般可分为混凝土充填支柱和高水材料充填支柱。迄今为止,高水材料充填支柱使用最广泛^[2-3]。国内外学者从材料和承载性能等方面对高水材料充填支柱进行了大量研究。张印等^[4]研究了不同水灰比对高水材料力学特性的影响;文献[5-6]通过聚丙烯纤维改性高水材料力学性能的试验研究发现,纤维改性的高水材料具有较好的承载连续性;文献[7-8]通过高水材料充填支柱单轴压缩试验,从峰值载荷、支柱刚度和残余载荷等方面分析了充填支柱承载性能,上述研究完善了高水材料充填支柱的基础力学特性体系。然而在实际工程应用中,高水材料充填支柱需要根据不同巷道断面的支护需求设计不同高径比,但目前鲜有对于高水材料充填支柱尺寸效应研究的力学试验,缺乏对不同高径比充填支柱承载性能的分析以及关于纤维改性后相关力学特性的对比研究。

鉴于此,通过对比不同高径比改性高水材料充填支柱试样及未改性材料试样的单轴压缩对照试验结果,分析其尺寸效应;通过对比 2 组试样的破坏过程和破坏后的形貌,分析其破坏特征,最后通过扫描电镜(SEM)对 2 组试样微观结构的分析,进一步讨论试验结果,以期能为实际工程应用提供一定的理论依据。

1 试验材料及方案

高水材料由 A 和 B 两种无机粉体组分构成,主要表现为快凝、早强、高渗透性、结石率高、凝结时间和强度可调等特性。聚丙烯纤维具有良好的阻裂效果,常作为水泥等材料的阻裂添加剂。试验中高水材料充填支柱中添加长度为 10 mm,掺量为质量分数 0.2%聚丙烯纤维的试样,称为试验组;未添加聚丙烯纤维的支柱试样,称为对照组。

两组高水材料充填支柱试样的水灰比(质量比)均为 1.2 : 1。浇筑试样时,首先将 A 和 B 两种无机粉体按配比称量,然后分别加水搅拌,最后混合搅拌均匀后浇筑入 300 mm×300 mm×300 mm 的试模中,1 h 后脱模并将其置于温度为 20 ℃、相对湿度大于 95%的标准养护箱内养护 7 d。采用密集钻孔取芯,按照直径 50 mm,高径比为 1 : 1~5 : 1 钻取圆柱试样,两端平行度±0.02 mm,垂直度±0.25°,满足规程^[9]要求,每种尺寸 3 个试样,部分试样如图 1 所示。

2 组试样制备完成后,选用 RMT150-B 电液伺

服加载试验系统开展单轴压缩试验。试验采用位移控制的方式,轴向加载速率为 0.005 mm/s,垂直方向选用量程 100 kN 的力传感器;垂直方向用量程 5 mm位移传感器测量试样的轴向变形,水平方向用 2 个量程 2.5 mm 位移传感器测量试样的横向变形。

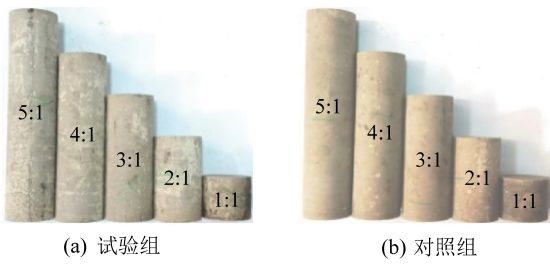


图 1 部分试样
Fig.1 Part of samples

2 试验结果分析

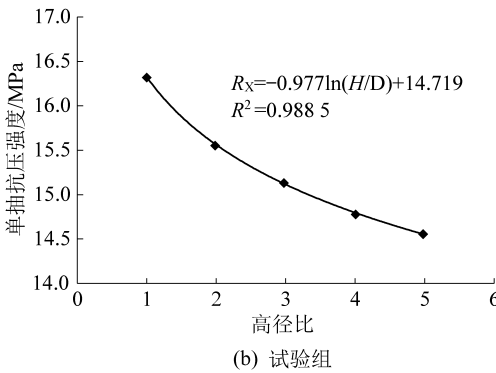
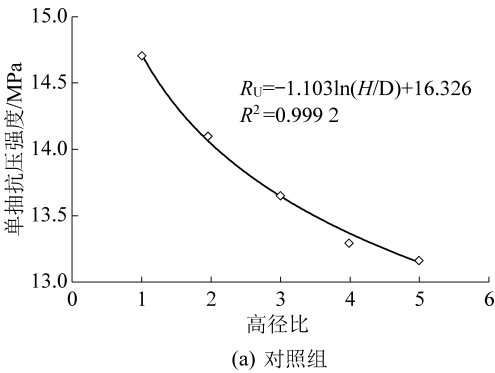
2.1 试验结果

表 1 为 2 组不同高径比试样的单轴抗压强度及变形参数测定结果, H/D 为高径比; R_c 为单轴抗压强度;MPa; ε_c 为轴向应变峰值,%; E_c 为弹性模量, GPa; μ 为泊松比。

表 1 单轴压缩试验结果
Table 1 Uniaxial test results

组别	H/D	编号	R_c/MPa	$\varepsilon_c/\%$	E_c/GPa	μ
	1.0	U-1-1	15.19	0.565	2.69	0.17
		U-1-2	14.68	0.695	2.11	0.14
		U-1-3	14.20	0.614	2.31	0.12
		平均值	14.69	0.625	2.37	0.14
	2.0	U-2-1	14.50	0.507	2.86	0.16
		U-2-2	12.95	0.492	2.63	0.14
		U-2-3	14.86	0.504	2.95	0.17
		平均值	14.10	0.501	2.81	0.16
对照组	3.0	U-3-1	14.29	0.466	3.06	0.10
		U-3-2	12.21	0.464	2.63	0.15
		U-3-3	14.52	0.492	2.95	0.13
		平均值	13.67	0.474	2.88	0.13
	4.0	U-4-1	13.28	0.442	3.01	0.17
		U-4-2	13.60	0.469	2.90	0.18
		U-4-3	12.90	0.441	2.92	0.13
		平均值	13.26	0.451	2.94	0.16
	5.0	U-5-1	12.46	0.433	2.88	0.17
		U-5-2	13.47	0.406	3.32	0.19
		U-5-3	13.66	0.405	3.37	0.18
		平均值	13.20	0.414	3.19	0.18

续表						
组别	H/D	编号	R_c/MPa	$\varepsilon_c/\%$	E_c/GPa	μ
试验组	1.0	X-1-1	16.23	0.788	2.06	μ
		X-1-2	16.44	0.616	2.67	0.10
		X-1-3	16.30	0.773	2.11	0.16
		平均值	16.32	0.726	2.28	0.20
	2.0	X-2-1	14.46	0.606	2.39	0.15
		X-2-2	16.17	0.743	2.12	0.18
		X-2-3	16.07	0.664	2.42	0.13
		平均值	15.57	0.671	2.31	0.20
	3.0	X-3-1	15.34	0.561	2.74	0.17
		X-3-2	14.90	0.591	2.52	0.20
		X-3-3	15.18	0.659	2.30	0.14
		平均值	15.14	0.604	2.52	0.26
	4.0	X-4-1	14.62	0.610	2.40	0.20
		X-4-2	14.76	0.565	2.61	0.25
		X-4-3	14.91	0.564	2.64	0.21
		平均值	14.77	0.580	2.55	0.20
	5.0	X-5-1	12.83	0.424	3.02	0.22
		X-5-2	16.46	0.693	2.37	0.28
		X-5-3	14.39	0.593	2.41	0.02
		平均值	14.56	0.570	2.60	0.33



R_X 、 R_U —试验组、对照组试样单轴抗压强度; R^2 —决定系数

图 2 不同高径比试样抗压强度特征曲线

Fig.2 Compressive strength characteristic curves of pillar specimens with different height-diameter ratio

2 组试样的函数拟合度较高,均符合对数函数特征。随着高径比增大,单轴抗压强度的降低趋势渐平缓,2 组试样高径比在大于 4 : 1 后,高径比-强度特征曲线变缓较为明显。

2.3 变形特征

高水材料充填支柱试样的变形特征也随着高径比增大呈现规律性的变化。试样的轴向应变峰值随高径比增大变化特征曲线如图 3 所示。

由图 3 可得,高水材料充填支柱轴向应变峰值随着高径比增大逐渐降低,两者之间采用对数函数

由表 1 可知,随着试样高径比增大,支柱试样的单轴抗压强度及轴向峰值应变逐渐降低,弹性模量逐渐增大。由于试样的泊松比与高径比的关系不明确,因此不用来表征高水材料充填支柱的力学特性。

将上述试验结果整理,对每组高径比试样相同参数结果取平均值,从单轴抗压强度,轴向应变及弹性模量 3 方面分析改性高水材料充填支柱的尺寸效应和承载性能。

2.2 强度特征

高水材料充填支柱 2 组试样的单轴抗压强度随高径比增大的变化特征如图 2 所示。

由图 2 可得,两组高水材料充填支柱试样单轴抗压强度随着高径比增大逐渐降低,两者之间可以材料对数函数来表征。高水材料充填支柱试样的内部缺陷结构会随着高水材料充填支柱试样高径比增大相对增多,从而导致支柱的峰值强度降低。随着高径比从 1 : 1~5 : 1, R_U 从 14.69 MPa 降低至 13.20 MPa, R_X 从 16.32 MPa 降低至 14.56 MPa,2 组试样高径比-强度特征曲线呈现相同的变化趋势。改性后高水材料充填支柱强度均大于未改性材料,但相同高径比试样的强度差异不大,即同高径比改性试样的峰值强度 R_X 高于 R_U 约 10.78%。

来表征。高水材料充填支柱轴向峰值应变随着高径比增大而逐渐降低,改性后高水材料充填支柱应变特征呈现相同的变化趋势。随着高径比增大, ε_U 从 0.625%降低至 0.414%, ε_X 从 0.726%降低至 0.57%。改性试样轴向峰值应变 ε_X 均大于 ε_U ,相同高径比 ε_X 均高于 ε_U ,约 28.62%。2 组试样高径比大于 4 : 1 后,高径比-应变特征曲线变缓较为明显。

由于单轴抗压强度和轴向峰值应变均随着高径比增大而减小,因此弹性模量也会呈现规律性变化。弹性模量的变化特征曲线如图 4 所示。

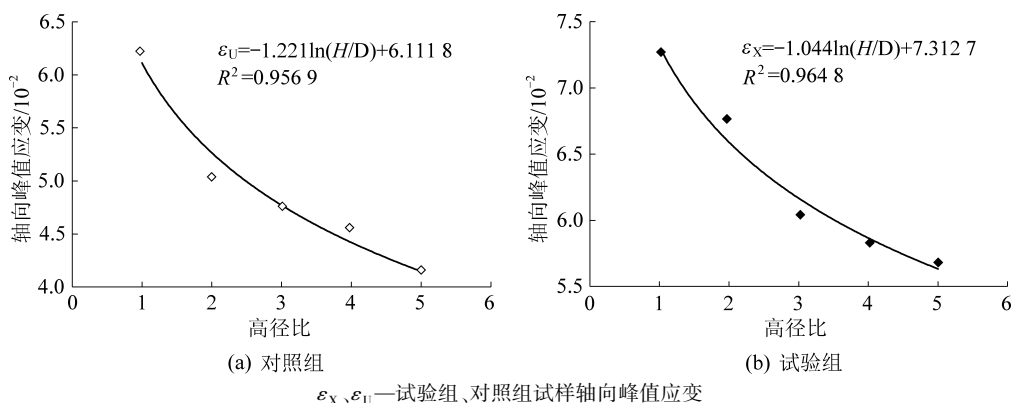


图 3 不同高径比支柱试样轴向峰值应变特征曲线

Fig.3 Axial peak strain characteristic curves of pillars with different height-diameter ratio

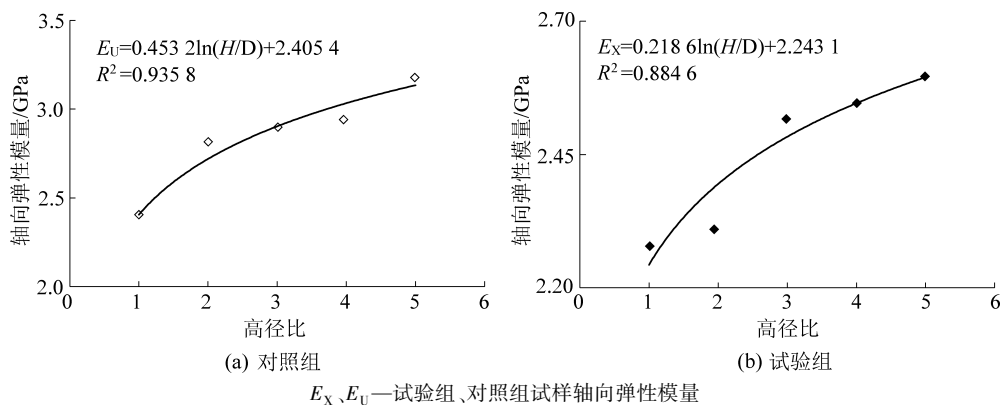


图 4 不同高径比支柱试样弹性模量特征曲线

Fig.4 Characteristic curves of elastic modulus of pillars with different height-diameter ratio

如图 4 所示,高水材料充填支柱弹性模量随着高径比增大逐渐降低,两者之间采用对数函数表征为。 E_X 与 E_U 具有相同的尺寸效应特征,随着高径比增大, E_U 从 2.37 GPa 增大至 3.19 GPa, E_X 从 2.28 GPa 增大至 2.60 GPa,2 组试样均呈现相同的变化趋势。同高径比的 E_X 均小于 E_U ,降低约为 13.20%,当高径比大于 4:1 后弹性模量增长趋势变平缓。

综上可知,改性高水材料充填支柱具有尺寸效应,单轴抗压强度及轴向峰值应变均随着高径比的增大而减小,弹性模量随着高径比增大而增大,变化特征均符合对数函数变化特征。高径比大于 4:1 后,各项力学参数变化趋势减缓;同时改性后高水材料试样的单轴抗压强度提高约 10.78%,轴向应变峰值提高约 28.62%,具有更好的承载性能。

2.4 破坏特征

2.4.1 应力-应变特征曲线

试样单轴压缩全应力-应变曲线能够反映试样整体从受压直至破坏过程中的力学特性^[10-16]。选取同一种高径比的 2 组试样,对比分析试样的破坏特征。图 5 为高径比是 4:1 两组试样的全应力-应变曲线。

由图 5a 可知,对照组试样为典型的脆性材料,弹性阶段不明显,应变较小,到达峰值强度后立即破坏,完全失去承载能力;由图 5b 可知,改性后高水材料充填支柱试样在塑性变形阶段、峰后破坏阶段有较为明显的区别,试验组试样有更为明显的塑性变形阶段,塑性变形区明显,并且在峰值破坏后表现出良好的残余强度。

高径比过小时,端部剪切效应会相互叠加,试样均会呈现残余强度,使对比效果不明显。因此选取高径比从 3:1~5:1 部分试样的全应力-应变曲线,对比分析不同高径比两组试样力学性质,如图 6 所示。

由图 6a 可知,对照组试样具有明显的尺寸效应, R_U 与 ε_X 均随着高径比增大而减小;试样达到峰值强度后立即失去承载能力,试样不表现残余强度特征。由图 6b 可知,改性后的试样,也具有明显的尺寸效应, R_X 和 ε_X 均随着高径比增大而减小,且由于试验组试样中的纤维能够阻止高水材料原有微裂隙的扩展,使试样得以保持较好的完整性和连续性,从而表现出较高的残余强度,且高径比越小残余强度越高。

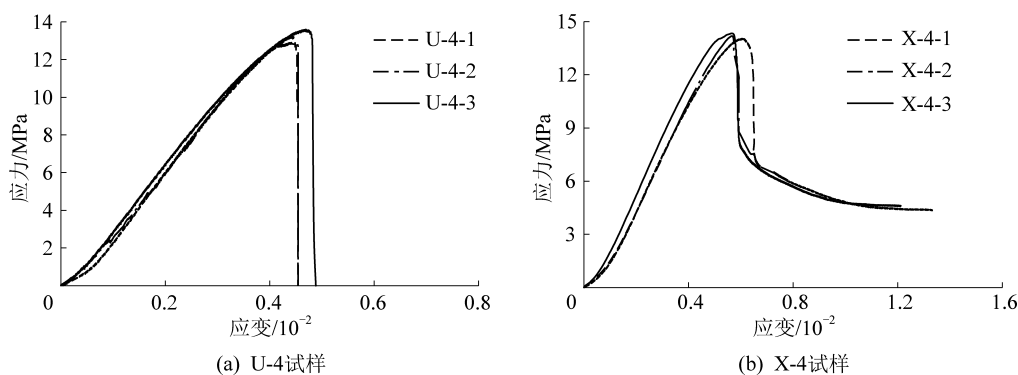


图 5 高径比 4 : 1 试样应力-应变特征曲线

Fig.5 Stress-strain characteristic curve of height to diameter ratio 4 : 1 samples

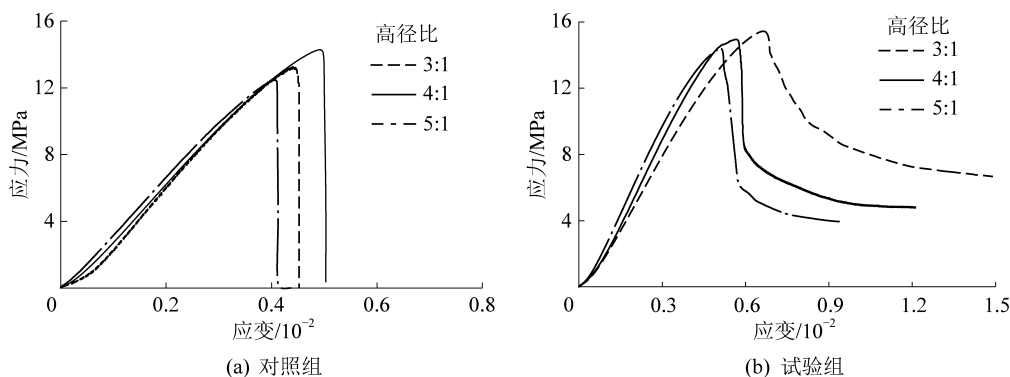


图 6 不同高径比试样应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of different kinds of high aspect ratio specimens

2.4.2 破坏形貌特征

由支柱试样的全应力-应变曲线分析可知,试验组表现出较对照组更好的塑性特征,峰值应变增

大的同时,有良好的残余强度,因此从其破坏形态进一步分析改性后高水材料充填支柱力学性质变化的原因。不同高径比的试样破坏形态如图 7 所示。

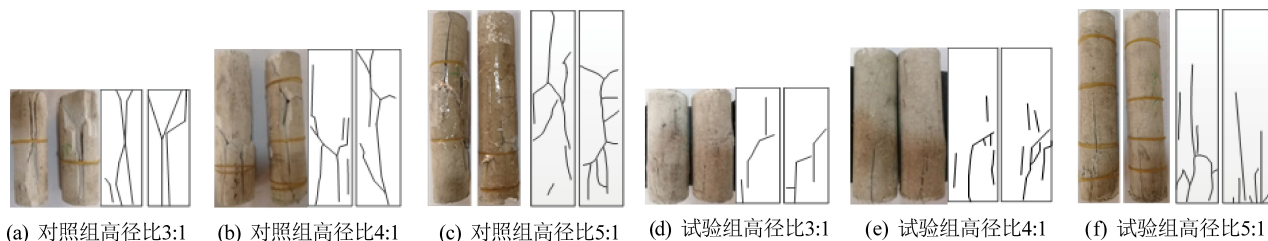


图 7 高水材料充填支柱单轴压缩破坏形态

Fig.7 Failure patterns of high water material pillars under uniaxial compression

图 7a 为对照组试样,以“X”一劈裂型剪切组合为主要破坏特征,端部先发生“X”形剪切破坏^[17-20],随着载荷进一步加载,裂隙沿滑裂面发育,最后贯穿整个试样,使端部呈倒圆锥体状;中部块体由于拉伸出现竖向裂隙,形成劈裂破坏,并且随着高径比增大,劈裂特征越明显,裂隙更加发育。

图 7d-图 7e 为试验组试样,支柱试样没有出现贯通性的裂隙,端部仍表现为“X”形的剪切破坏。根据分析可知,由于纤维的联结作用,改性后试样的整体韧性增强,试样在受力过程中裂而不断,从而保持了较高的峰后残余强度,这和应力-应变曲线所

反映的结果是一致的。

由上述分析可知,两组试样的破坏类型相同,不受高径比和纤维的影响。纤维的阻裂作用明显,改性试样整体性和连续性增强,试样破坏后块体不会立即彻底分离,改性后高水材料充填支柱的受压稳定性与峰后承载能力显著提高。

3 SEM 微观分析

高水材料的微细观结构能侧面反映改性后高水材料充填支柱的力学性能发生变化的原因。对 2 组试块取样,用导电胶将其固定,同时通过镀金处理增

强导电性。制作完成后,采用 QuantaFEC-250 型场进行扫描电镜(SEM)观测,得出 2 组试块不同放大

倍数下的微观形貌特征。图 8 为 2 组试样各放大 50 倍和 1 000 倍微观形貌。

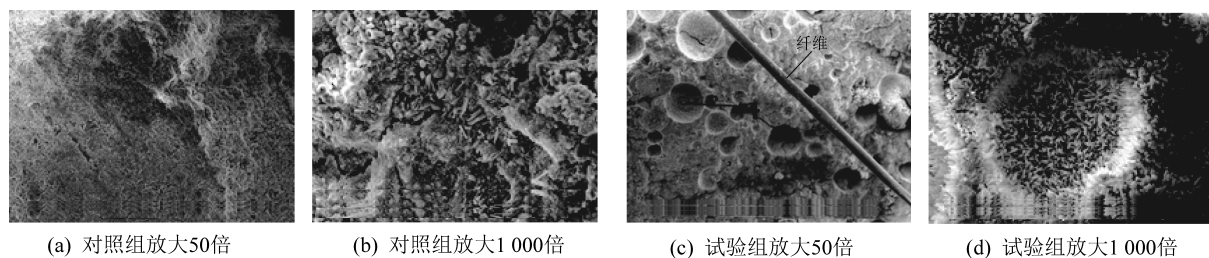


图 8 对照试验试样材料微观形貌

Fig.8 Microscopic morphology of pillar samples of blank high water material

由图 8 可知,高水材料内部会有细小的微观裂隙和极少的气孔和缺陷,是由于搅拌过程中少数气体进入导致。针状的钙矾石在空间中呈放射状,晶粒相互搭接形成网状结构形成了高水材料主要的强度骨架,晶体间充斥着大量的胶状物质。改性后,即掺入纤维后的高水材料微观裂隙减少,只有少量气孔生成,钙矾石生成更加致密。改性后高水材料具有更稳定钙矾石骨架结构,纤维与钙矾石结构体之间的黏聚力,能阻止原有裂隙发育,同时纤维在结石体变形破坏所受牵连拉力,会延缓新裂隙的产生,从而间接地提高了试样强度,使试验组试样具有更高的强度和较大的应变,表现更好的承载性能。

4 结 论

1) 改性高水材料充填支柱试样与未改性试样尺寸效应特征一致:随着高径比增大,支柱试样的峰值强度单轴抗压强度、轴向应变峰值逐渐降低,弹性模量逐渐增大。

2) 改性高水材料充填支柱试样中的聚丙烯纤维改善了高水材料中钙矾石骨架结构,使试样的承载性能得到提高,单轴抗压强度提高 10.78%,轴向应变峰值增大 28.62%。两组试样的破坏特征不受高径比和改性纤维的影响,均呈现“X”一劈裂型剪切组合特征。

3) 改性后高水材料充填支柱的钙矾石骨架结构更稳定。由于纤维的阻裂效应,延缓了试样原有裂隙及新生裂隙的发育,是间接促进材料强度及应变增长的主要因素,使改性高水材料充填支柱具有较高的受压稳定性和残余强度。

参考文献(References):

[1] 黄玉诚,段晓博,王瑜敏,等. 煤矸石胶结充填管路输送不满管流及其防治方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 117-122.
HUANG Yucheng, DUAN Xiaobo, WANG Yumin, et al. Research

on non-full pipeline flow transportation and prevention method of coal gangue cemented backfill[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 117-122.

- [2] BARCZAK T M, CHEN J, BOWER J. Pumpable roof supports: developing design criteria by measurement of the ground reaction curve[C]//Proceedings, 22nd international conference on ground control in mining. West Virginia University, 2003: 283-293.
- [3] BARCZAK T M, TADOLINI S C. Standing support alternatives in western United States longwalls[J]. Mining Engineering, 2006, 58(2): 49-55.
- [4] 张 印, 刘长武, 谢 辉, 等. 水灰比对高水材料力学特性影响的试验研究[J]. 工程科学, 2017, 49(S2): 115-120, 127.
ZHANG Yin, LIU Changwu, XIE Hui, et al. Experimental research on influence of water cement ratio on mechanical characteristics of the high-water-content material[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(S2): 115-120, 127.
- [5] 孙 位, 刘长武, 吴 帆, 等. 聚丙烯纤维高水材料力学性能的试验研究[J]. 金属矿山, 2018(1): 53-57.
SUN Wei, LIU Changwu, WU Fan, et al. Experimental study on mechanical properties of polypropylene fiber high-water material[J]. Metal Mine, 2018(1): 53-57.
- [6] 李东华, 熊祖强, 王雨利, 等. 引气剂和聚丙烯纤维对高水材料性质的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(3): 54-59.
LI Donghua, XIONG Zuqiang, WANG Yuli, et al. Research on influence of air entraining agent and polypropylene fiber on properties of high-water-content material[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(3): 54-59.
- [7] BARCZAK T M, TADOLINI S C. Pumpable roof supports: an evolution in longwall roof support technology[C]. Society for Mining, Metallurgy and Exploration - SME Annual Meeting and Exhibit 2008: "New Horizons-New Challenges", 2008: 208-220.
- [8] TADOLINI S C, BARCZAK T M. Rock Mass Behavior and Support Response in a Longwall Panel Pre-Driven Recovery Room[C]//The 6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction, 2008: 167-182.
- [9] 中华人民共和国煤炭工业部. 煤与岩石物理力学性质测定方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 32-33.
- [10] 贺桂成, 李玉兰, 丁德馨. 不同高径比石膏试样强度与尺寸效应的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1464-1470.

- HE Guicheng, LI Yulan, DING Dexin. Experimental investigation on strength and size effect of the gypsum sample in different height to diameter ratio [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(6): 1464–1470.
- [11] 张明, 卢裕杰, 杨强. 准脆性材料的破坏概率与强度尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1782–1789.
- ZHANG Ming, LU Yujie, YANG Qiang. Failure probability and strength size effect of quasi-brittle materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1782–1789.
- [12] 廉玉广, 马志超, 李江华, 等. 岩石单轴加载破坏全过程波速变化特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 64–69.
- LIAN Yuguang, MA Zhichao, LI Jianghua, *et al.* Study on variation characteristics of wave velocity in whole process of rock uniaxial loading failure [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 64–69.
- [13] 吕龙龙, 宋丽, 廖红建, 等. 基于灰色关联理论的红层软岩尺寸效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(6): 1571–1576, 1602.
- LYU Longlong, SONG Li, LIAO Hongjian, *et al.* Size effect study of red soft rock based on grey relating analysis theory [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(6): 1571–1576, 1602.
- [14] 王亚林, 潘一山, 马箫, 等. 单轴压缩煤岩破裂电荷尺寸效应试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(4): 128–132.
- WANG Yalin, PAN Yishan, MA Xiao, *et al.* Experimental study on fracture charge scale effect of coal specimen under uniaxial compression [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(4): 128–132.
- [15] 金浏, 苏晓, 徐海滨, 等. 基于细观模型的含腹筋混凝土梁受剪承载力尺寸效应[J]. 土木与环境工程学报, 2019, 41(1): 80–88.
- JIN Liu, SU Xiao, XU Haibin, *et al.* Meso-scale simulation of size effect in shear capacity of reinforced concrete beams with web reinforcement [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 80–88.
- [16] 左建平, 陈岩, 张俊文, 等. 不同围压作用下煤-岩组合体破坏行为及强度特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2706–2713.
- ZUO Jianping, CHEN Yan, ZHANG Junwen, *et al.* Failure behavior and strength characteristics of coal-rock combined body under different confining pressures [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2706–2713.
- [17] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 应变速率和尺寸效应对岩石能量积聚与耗散影响的试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2386–2398.
- MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, *et al.* Experiments on the effect of strain rate and size effect on energy accumulation and dissipation of rocks [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2386–2398.
- [18] 高富强, 杨军, 刘永茜, 等. 岩石准静态和动态冲击试验及尺寸效应研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(4): 19–22.
- GAO Fuqiang, YANG Jun, LIU Yongqian, *et al.* Quasistatic and dynamic impact tests and size effects of rocks [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(4): 19–22.
- [19] 梁昌玉, 李 晓, 张 辉, 等. 中低应变率范围内花岗岩单轴压缩特性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 528–536.
- LIANG Changyu, LI Xiao, ZHANG Hui, *et al.* Size effect of uniaxial compressive properties of granites in the middle-low strain rate range [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 528–536.
- [20] 王青元, 朱万成, 刘洪磊, 等. 单轴压缩下绿砂岩长期强度的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 981–990.
- WANG Qingyuan, ZHU Wancheng, LIU Honglei, *et al.* Size effect of long-term strength of green sandstone under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 981–990.