



沿空留巷巷旁复合充填体分层材料优选研究

刘贞智 刘萍 罗畅 高方玲 黄鑫康 陈镇

引用本文:

刘贞智, 刘萍, 罗畅, 等. 沿空留巷巷旁复合充填体分层材料优选研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 21–32.

LIU Zhenzhi, LIU Ping, LUO Chang. Optimization analysis of layered materials of composite filling body beside gob-side entry retaining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 21–32.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0892>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沿空留巷巷旁充填体稳定性控制技术研究

Research on stability control technology of filling body ingob-side entry retaining

煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/14f30442-280a-455e-bdd3-f5646ad94cba>

高水材料充填沿空留巷应力控制与围岩强化机理及应用

Stress control and surrounding rock strengthening mechanism of gob-side entry retaining with high-water content material filling and its application

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 16–28 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b9409a9e-32ce-4948-b6df-661111d622d2>

考虑采空区矸石非均匀充填影响的倾斜煤层沿空留巷稳定性分析

Stability analysis of inclined coal seam roadway along goaf considering non-uniform filling of gob gangue

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 30–41 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1348>

再论我国沿空留巷技术发展现状及改进建议

Current situation of gob-side entry retaining and suggestions for its improvement in China

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 128–145 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2082>

厚煤层沿空留巷围岩综合控制技术

Comprehensive control technology of surrounding rock for gob-side entry retaining in thick coal seam

煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fb808854-bfa7-4ef6-a6a1-52030ecc96c9>

深井矸石充填工作面沿空留巷围岩控制原理与技术

Principle and technology of surrounding rock control for gob-side entry retaining in deep mine gangue backfilling face

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 68–76 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9c1176a8-1efc-48f9-b23f-71843601b9bb>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘贞智, 刘 萍, 罗 畅, 等. 沿空留巷巷旁复合充填体分层材料优选研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 21–32.

LIU Zhenzhi, LIU Ping, LUO Chang, *et al.* Optimization analysis of layered materials of composite filling body beside gob-side entry retaining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 21–32.

沿空留巷巷旁复合充填体分层材料优选研究

刘贞智, 刘 萍, 罗 畅, 高方玲, 黄鑫康, 陈 镇

(贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:沿空留巷巷旁充填体分为让压层和抗压层, 让压层材料应具有大变形的特性, 减缓基本顶岩梁的剧烈活动; 抗压层材料应具有强度高、刚性大等特点, 柔性让压之后实现对上覆岩梁的有效控制。因此对让压层和抗压层材料的不同配比进行力学特性分析, 并通过电镜扫描(SEM)对让压层和抗压层的对照组和优化组进行微观结构分析, 最后对让压层和抗压层的最优配比进行组合试验。研究表明: 让压层材料的最优配比为水灰质量比 1.5 : 1, 发泡剂掺量 0.06%, 纤维掺量 0.2%; 优化组 28 d 时抗压强度达到了 8.84 MPa; 不同期龄下的应变力, 优化组为对照组的 1.8~2.6 倍。抗压层材料配比中细矸率为 40%, 料浆质量分数 78%, 水泥掺量为 20% 时为最优, 其平均抗压强度为 13.21 MPa, 抗拉强度为 0.97 MPa, 弹性模量为 0.75 GPa, 内摩擦角为 26°, 黏聚力为 2.85 MPa; 该配比下的充填体随着水泥掺量的增加后期强度逐渐增大。组合试件中让压层占比 10%~20% 时, 具有较好的让压能力, 也具有一定的关键承载能力。研究结果为沿空留巷巷旁充填体材料配比提供了参考。

关键词:沿空留巷; 巷旁充填; 充填材料; 复合充填体; 抗压强度

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)10-0021-12

Optimization analysis of layered materials of composite filling body beside gob-side entry retaining

LIU Zhenzhi, LIU Ping, LUO Chang, GAO Fangling, HUANG Xinkang, CHEN Zhen

(School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Along the hollow stay lane roadside filling body is divided into letting pressure layer and compression layer, letting pressure layer material should have the characteristics of large deformation, slow down the violent activities of the basic roof rock beam. The compressive layer material should be characterised by high strength and rigidity, and effective control of the overlying rock beams should be achieved after flexible letting pressure. Therefore, this paper analyzes the mechanical properties of different ratios of yield layer and compressive layer materials, and analyzes the microstructure of the control group and optimization group of yield layer and compressive layer by scanning electron microscope (SEM). Finally, the optimal ratio of yield layer and compressive layer is tested. The results of the study showed that the optimum ratio of the material for letting the compaction layer was 1.5:1 for the water-cement ratio, 0.06% for the blowing agent dosage and 0.2% for the fibre dosage. The compressive strength of the optimised group reached 8.84 MPa at 28 d. Strain at different ages was 1.8 to 2.6 times higher in the optimised group than in the control group. The compressive layer material ratio of 40% fine gangue rate, slurry mass concentration of 78%, cement dosage of 20% is optimal, the average compressive strength of 13.21 MPa, tensile strength of 0.97 MPa, modulus of elasticity of 0.75 GPa, the angle of internal friction of 26°, cohesion of 2.85 MPa. The filler at this ratio showed a gradual increase in strength with the increase in cement dosage in the later stages. When the yield layer accounts for 10%–20% of the composite specimen, it has good yield capacity and certain key bearing capacity. The research results provide a reference for the material ratio of roadside filling body in gob-side entry retaining.

收稿日期: 2023-10-25

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2023-0892

基金项目: 贵州省科技计划基础研究重点资助项目(黔科合基础[2020]1Z047)

作者简介: 刘贞智(1998—), 男, 贵州毕节人, 硕士研究生。E-mail: 2211310377@qq.com

通讯作者: 刘 萍(1973—), 女, 贵州贵阳人, 副教授, 硕士。E-mail: 373388719@qq.com

Key words: gob-side entry retaining; filling beside gob; filling material; composite filling body; compressive strength

0 引言

沿空留巷是无煤柱护巷技术的关键手段,具有重要的社会经济和安全效益^[1-3]。沿空留巷下基本顶的运动分为“给定变形”和“限定变形”2个阶段,“给定变形”阶段巷旁充填体需具有一定的柔性让压空间,减缓基本顶的下沉速率,保证顶板处于稳定状态,在“限定变形”阶段,巷旁充填体则需要有足够的支撑力,有效控制顶板岩梁^[4-7]。因此,改变巷旁充填体的单一结构,形成“柔性+刚性”2种材料组成的一种充填结构,在留巷初期具有一定的初撑力同时提供让压空间,保证接顶效果,在留巷后期强层材料能够起到关键支撑作用,保证留巷的整体稳定^[8-12]。因此对沿空留巷巷旁充填体力学特性及参数进行研究具有一定的理论指导意义及工程应用价值。

目前国内外学者对沿空留巷巷旁支护材料及力学特性进行了许多研究并开展了现场试验^[13-16]。柏建彪团队^[17-18]提出了“基本顶二次破断特征”,揭示了留巷巷道的主要外力来源是基本顶的旋转下沉,运用高水材料以及膏体材料构筑巷旁充填墙体进行沿空留巷;李西凡等^[19]对巷旁充填体接顶层和承载层不同需求下的高水材料进行了改性试验,增加发泡剂、聚丙烯纤维,得到了让压性较好的接顶层;李舒霞等^[20-21]根据基本顶活动规律及矿压理论,提出了不同材料分段分级施工的主副墙体沿空留巷技术;孙恒虎等、王平等^[22-23]忽略留巷顶板层间结合力,采用极限力学理论分析,提出在顶板运动初期要及时支护、提高初撑力;在运动后期要以“让”为主,具有可靠的让压空间,去协同顶板的旋转下沉。谭云亮等、宁建国等^[24-25]建立了坚硬顶板条件下沿空留巷巷旁充填体力学模型,对基本顶不同活动阶段下充填体的应力及变形进行了数值模拟分析,提出了不等强充填体巷旁支护方式。综上可知,大量学者对沿空留巷巷旁充填材料力学变形特性进行了研究,但充填材料让压层及抗压层的最优配比研究较少涉及。

基于沿空留巷下围岩变形规律及充填体强度要求,将充填体分为让压层和抗压层。复合充填体上部接顶层为“让压层”,应具有良好的接顶性能,在留巷初期能够及时、高效地密闭采空区并隔绝采空区有毒有害气体流入巷道,同时材料的弹性模量远小于顶板煤岩层与高强承载层,具有大变形的特性,留巷初期可实现与顶板岩层的协调变形并适度让压,

避免顶煤的破断,同时提供一定的初始支撑力,减缓基本顶“给定变形”阶段岩梁的剧烈活动。复合充填体下部承载层为“抗压层”,抗压层材料应具有强度高、刚性大等特点,在基本顶“限定变形”阶段为巷旁支护提供关键承载能力,尤其在复合充填体柔性让压之后实现对上覆岩梁的有效控制,防止充填体的持续变形造成留巷空间大面积收缩及巷内支护的失效,进而威胁工作面的安全生产,如何根据工程要求选择合适的分层材料以及合理的让压空间成为本文研究的重中之重,为沿空留巷巷旁充填材料在工程中的应用提供理论依据^[26]。

1 让压层力学特性

让压层(图1)接顶处材料的选用和配比是影响沿空留巷充填技术成功的关键因素,且不同配比下让压层充填体的变形和破坏特性与单一充填体相比存在较大差异,因此,让压层结构需具备良好的可压缩特性,有一定的让压空间协同顶板的运动特征;开展让压层材料力学特性研究,进行力学参数优化,并对优化前后的试件进行多尺度分析,给出让压层材料的优化配比。

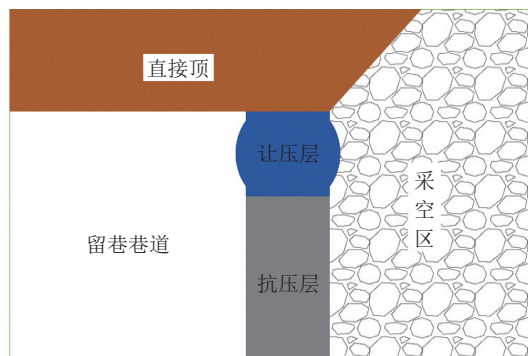


图1 复合充填体让压结构示意图

Fig.1 Composite filling body pressure structure diagram

1.1 让压层试验原料及方法

对照组试验使用高水 AB 双液材料,其中 A 料为硫铝酸盐水泥熟料;B 料为石膏及石灰,A、B 料等质量。优化组在高水材料中添加发泡剂、聚丙烯纤维等。试件模具规格为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm (长×宽×高)。1 h 后脱模,采用数控水泥砼标准养护箱养护,养护箱湿度为 95%,温度为 20 ℃;达到养护时间后用全自动恒应力机进行单轴压缩试验。

利用 SPSS 软件设计三因子三水平的正交试验,共 9 组试验。以水灰比、发泡剂掺量以及聚丙烯纤

维掺量作为 3 个自变量,通过正交试验来确定各个影响因素的影响比重,分别用 X_1 、 X_2 、 X_3 标记。以充填体 28 d 的后期强度和膨胀率作为评价指标,用 Y_1 、 Y_2 标记,以这 2 个指标去确定让压层的最优配比。

1.2 试验结果及分析

正交试验能够在减少试验次数的同时得到预期的结果。正交试验结果见[表 1](#)。

用极差分析法来判定影响因素的主次,简称 R 法, R 为极差。 R 反映了试验指标的变动幅度, R 越大,说明该因素对试验指标的影响越大,就越重要。

分析步骤如下:①计算每个因素对应不同水平的试验指标之和 $K_j(j$ 为水平数序号,取 1, 2, 3, \cdots , m , m 为水平数数量);②根据式 (1) 求出各因素中 K_j 对应均值 \bar{K}_j ;③根据式 (2) 计算每个因素列中 \bar{K}_j 的极差 R ;④根据各因素极差 R 的大小确定影响因素的主次关系。

$$\bar{K}_j = \frac{K_j}{m}$$

(1)

$$R = \max(\bar{K}_1, \bar{K}_2, \cdots, \bar{K}_m) - \min(\bar{K}_1, \bar{K}_2, \cdots, \bar{K}_m)$$

(2)

表 1 让压层正交试验结果
Table 1 Orthogonal test results

序号	水灰质量比 X_1	发泡剂掺量 $X_2/\%$	聚丙烯纤维掺量 $X_3/\%$	抗压强度 Y_1/MPa	膨胀率 $Y_2/\%$
1	1.00	0.03	0.20	14.18	5.54
2	1.00	0.06	0.60	13.75	7.91
3	1.00	0.09	0.40	13.63	8.34
4	1.25	0.03	0.60	12.92	5.99
5	1.25	0.06	0.40	12.38	9.71
6	1.25	0.09	0.20	10.41	9.80
7	1.50	0.03	0.40	9.08	9.10
8	1.50	0.06	0.20	8.97	10.31
9	1.50	0.09	0.60	7.64	11.71

采用极差分析法对 28 d 期龄下的后期强度和膨胀率的各主控因素进行分析,由极差定义计算,对单轴抗压强度以及膨胀率的各主控因素结果分别见[表 2](#)、[表 3](#)。

表 2 单轴抗压强度各主控因素极差分析
Table 2 Uniaxial compressive strength of main control factors range analysis

项目	X_1	X_2	X_3
K_1	40.64	38.28	34.13
K_2	35.31	35.09	37.34
K_3	28.79	31.37	33.27
\bar{K}_1	13.55	12.76	11.38
\bar{K}_2	11.77	11.70	12.45
\bar{K}_3	9.60	10.46	11.09
R	3.95	2.30	1.36

从[表 2](#)可以看出, R 值: $X_1 > X_2 > X_3$, 即对 28 d 期龄下的后期强度影响程度为: 水灰质量比>发泡剂掺量>聚丙烯纤维掺量。

因每个试件 V (体积)一样,所以通过掺入与不掺

入的试件质量差值与不掺入试件质量比率为膨胀率。具体计算方法如下:

$$P = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

(3)

式中: P 为膨胀率, %; m_1 为未掺入发泡剂的充填体质量, kg; m_2 为掺入不同掺量发泡剂的充填体质量, kg。

表 3 膨胀率各主控因素极差分析
Table 3 Range analysis of main controlling factors of expansion rate

项目	X_1	X_2	X_3
K_1	21.79	20.63	27.65
K_2	25.5	29.93	27.15
K_3	33.12	29.85	25.61
\bar{K}_1	7.26	6.88	9.22
\bar{K}_2	8.50	9.98	9.05
\bar{K}_3	11.04	9.95	8.54
R	3.78	3.10	0.68

从[表 3](#)可以看出, R 值: $X_1 > X_2 > X_3$, 即各因素对膨胀率影响的大小顺序为: 水灰比 > 发泡剂掺量 >

聚丙烯纤维掺量。其中,聚丙烯纤维掺量的 R 值较低,说明纤维作为外加剂的进入,对膨胀率影响很小。

让压层对接顶效果以及早期强度需求较高,而对最终强度要求不高。综合抗压强度以及膨胀率两项指标进行分析,最终优化配比为第8组,即水灰质量比为1.5:1,发泡剂掺量为0.06%,纤维掺量为0.2%。

1.3 力学特性测试与分析

经过以上正交试验综合分析,得到了让压层高

水材料的优化配比,对优化配比后的高水材料进行不同期龄下的单轴抗压强度测试,同时,增加1组不添加外加剂的作为对比试验(图2)。从图2可以看出,优化后的充填体试件和普通高水材料在峰前的应力-应变曲线大致相同,同样存在压密、弹性以及塑性阶段,由于发泡剂的加入,优化充填体内部存在较多的气泡,在受到荷载作用下,内部气泡被压缩密闭,所以在不同期龄下的压密阶段都表现比较明显。以抗压强度来讲,不同期龄下的优化组整体都比对

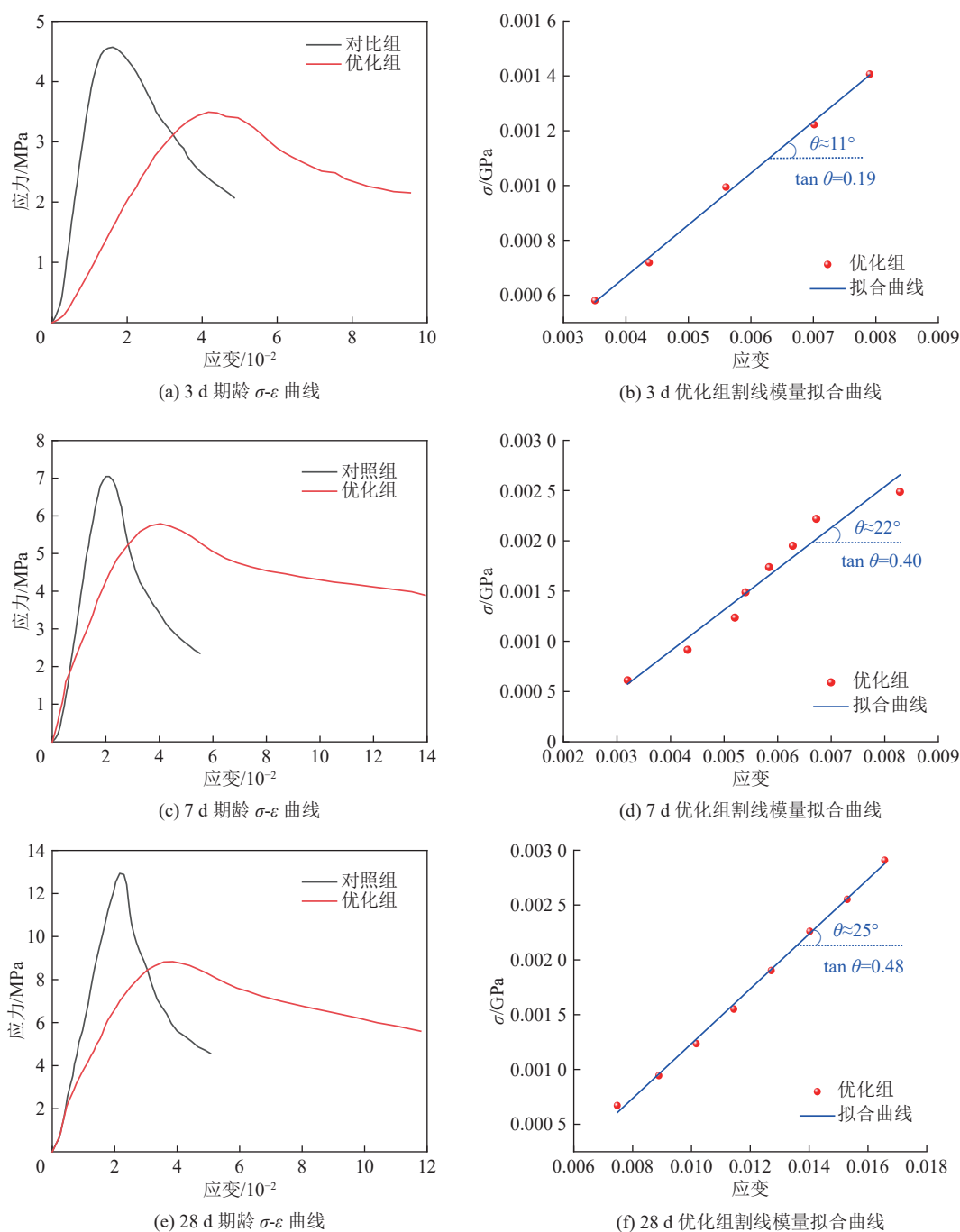


图2 不同期龄下单轴压缩应力-应变曲线及割线模量拟合曲线

Fig.2 Uniaxial compressive stress-strain curve and secant modulus fitting curve at different ages

照组低,这是因为其内部存在的气泡降低了材料整体的强度。

在峰后阶段,2 组试件都进入了应变软化阶段,对照组试件下降速度远远大于优化组,其应力随着应变的增大而迅速下降,“软化现象”十分明显。优化后的试件在峰后阶段其应力-应变曲线斜率远小于对照组,甚至斜率有趋于零的趋势,即应力随着应变的增大,应力缓慢减小,并趋于平缓。这可能是因为,在压密阶段内部气泡还尚未全部压密,在应力的持续作用下,剩余气泡被逐步压缩并闭合;同时,充填体试件在荷载作用下,其横向发生了较大的位移。

2 组试件的力学测试结果见表 4,可以看出,优化组试件在龄期为 28 d 时,其抗压强度达到了 8.84 MPa,这与正交试验的结果相差不大。在峰值强度方面,3 d

龄期下优化组的峰值应变达到了 0.041 7,是对照组峰值应变的 2.6 倍;7 d 龄期下优化组的峰值应变为 0.040 3,是对照组峰值应变的 2.0 倍;28 d 龄期下优化组的峰值应变为 0.038 6,是对照组峰值应变的 1.8 倍。这同样是因为发泡剂的加入,充填体内部气泡大量增加,同时,由于纤维的加入,使充填体的整体性和柔韧性得到了增大,这两个因素致使试件在荷载作用下峰值应变增加。相同养护时间下,优化组的弹性模量都有所降低,表明其抗变形能力下降。从力学测试结果可知,通过改性后,尤其是在 3 d 龄期下优化组的峰值应变达到了 0.041 7,为对照组的 2.6 倍。因此,该配比下的高水材料能够发挥出让压层的作用,同时能够保证复合充填体的整体性。

表 4 对照组与优化组力学测试结果

Table 4 Mechanical test results of control group and optimization group

期龄/d	组别	峰值强度/MPa	峰值应变/ 10^{-2}	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
3	对照组	4.57	1.60	0.62	—	—	—
	优化组	3.49	4.17	0.19	—	—	—
7	对照组	6.44	2.05	0.65	—	—	—
	优化组	5.79	4.03	0.40	—	—	—
28	对照组	12.94	2.16	0.77	1.50	17	1.3
	优化组	8.84	3.86	0.48	1.05	15	1.6

1.4 优化前后试件多尺度分析

1) 压缩破坏后的宏观分析。图 3 为同期龄下对照组与优化组高水材料试件在抗压强度测试破坏后的形态,从图 3 可直观的看出,没有进行改性优化的对照组试件在受到轴向荷载施压至破坏时,破坏形态为块体的滑移、剥落,破坏程度较为严重,而改性后的高水试件只是整体出现了裂隙,没有出现块体的滑移和剥落,从局部放大图中可以看出,这主要是因为纤维的加入,使充填体试件内部结构被大量细

小的纤维“牵扯”,起到了类似“加筋”的效果,从而使得试件的整体性以及韧性得到了增强。

2) EDS 面扫描的试件微观结构分析。为了进一步研究改性前后试件的元素组成及其分布,采用 EDS 对 2 组试件进行了面扫分析。图 4 及图 5 分别为对照组、优化组试件的能谱面扫和元素分布形态。

由图 4 可知,对照组在面扫中,出峰元素为 O、Ca、S、Mg、C、Br、Na、K,其中扫描区域主要为 Ca、O 元素,这 2 种元素的分布区域基本一致;由图 5 可看出,优化组在面扫中的出峰元素为 C、O、Ca、S、Na、Br、K,其中扫描区域主元素为 C、O,这与对照组扫描区域的主要元素有所差异;同时可以看出,纤维中的主要元素为 C,使得该扫描区域 C 元素超过了 Ca、O 元素,从而与对照组扫描区域主元素产生差异的原因。从 2 组试件的 EDS 分析可以得出,改性前后对原有材料的元素基本不产生影响和改变,同时,从 2 组试件扫描区域的主元素可知,改性前后试件的水化产物元素基本没改变,主要都为钙矾石。

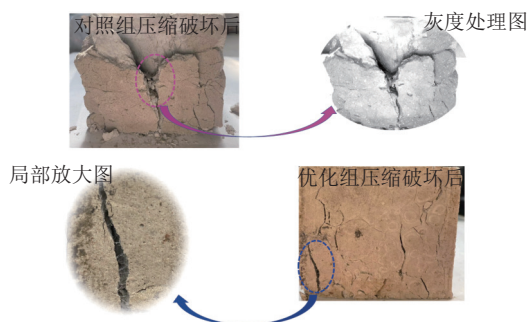
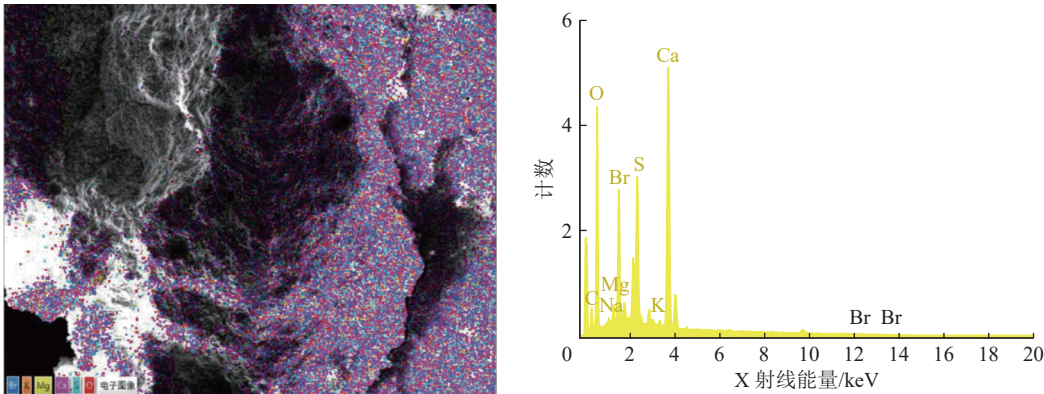
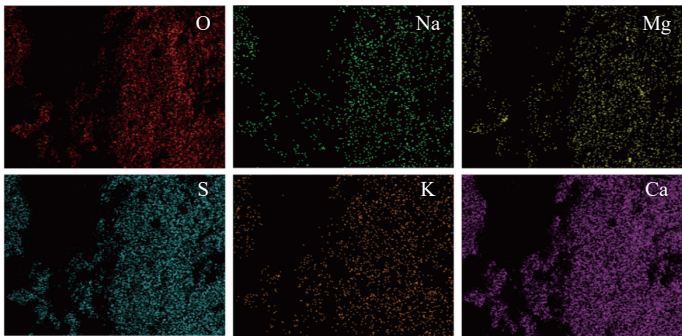


图 3 对照组与优化组试件压缩破坏后对比

Fig.3 Comparison between control group and optimized group after compression failure



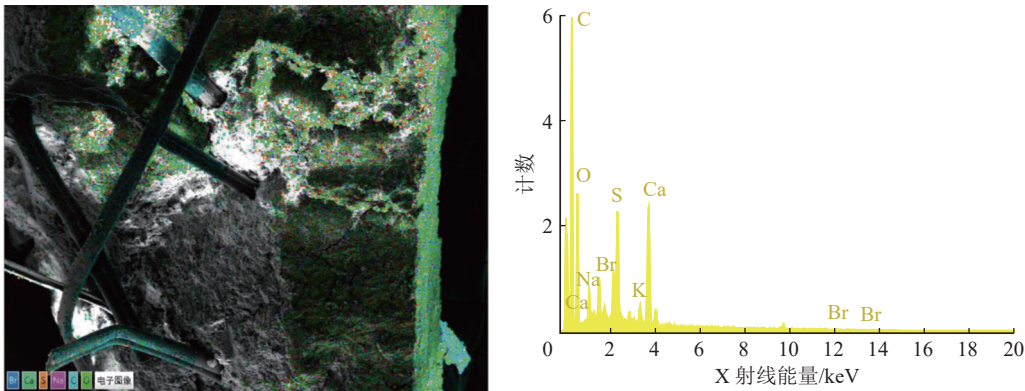
(a) 元素分布



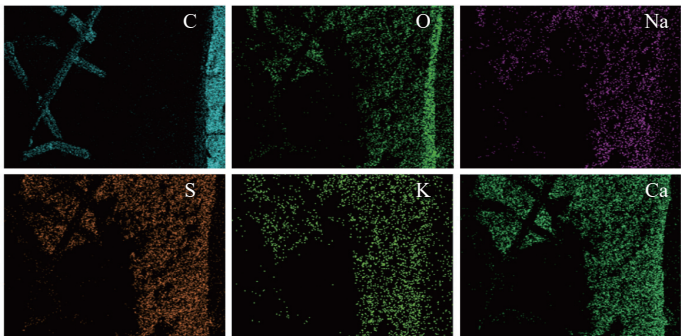
(b) 元素制图结果

图 4 对照组试件能谱面扫和元素分布形态

Fig.4 Energy spectrum surface scan and element distribution pattern of control group specimens



(a) 元素分布



(b) 元素制图结果

图 5 优化组试件能谱面扫和元素分布形态

Fig.5 Specimen energy spectrum surface scan and element distribution pattern of optimization group

3)试件微观分析。为了研究聚丙烯纤维以及发泡剂的掺入对高水材料水化产物是否产生影响,利用SEM扫描电镜分别对“优化组”以及“对照组”试件内部结构进行了微观分析。两组试件在不同放大倍数下的形态如图6、图7所示。

通过2张图对比可看出,在没有外加剂进行改性前,图6中试件微观形态表现出较均匀、致密,整体也比较平整;在加入纤维以及发泡剂改性后,从图7中可以看到试件中出现了较多散乱分布的小气孔,同时,纤维也穿插在试件中,在放大到一

定倍数时,2组试件都出现了大量的簇状以及针状的钙矾石。通过分析可知,在加入纤维、发泡剂后,试件内部产生了许多小气孔,这些小气孔在一定程度上提升了材料内部的可压缩空间,从而起到“让压”的效果;同时,纤维在试件内部的穿插连接,使得改性优化后的材料在凝结后增加了一定的韧性及整体性。最后,在对照组和优化组试件的微观形态中都看到有大量的钙矾石生成,表明纤维及发泡剂的加入对材料最终水化产生的钙矾石的量影响较小。

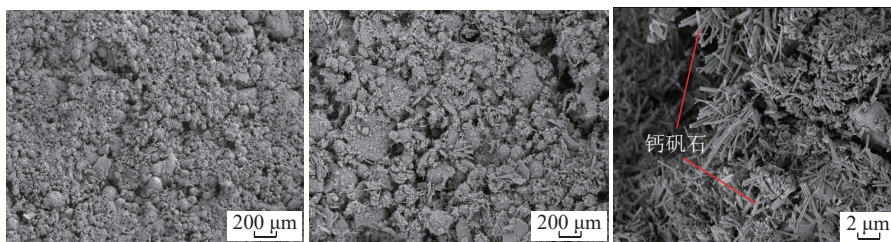


图6 对照组试件微观形态

Fig.6 Microscopic morphology of control group specimens

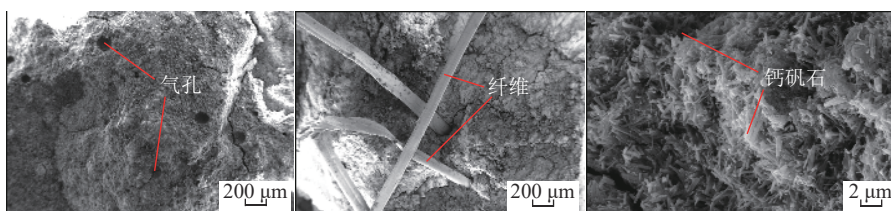


图7 优化组试件微观形态

Fig.7 Microscopic morphology of control group specimens

2 抗压层力学特性及参数优化研究

沿空留巷充填技术中抗压层的材料选择及其配比是关键,抗压层要有足够的支护阻力去减缓基本顶运动后期的下沉,与巷内主动支护、超强支护协同控制巷道围岩的稳定,所以抗压层需具备较高的强度。因此,结合抗压层的结构特点,开展抗压层材料力学特性研究,并对各因素的交互作用进行探究,对探究结果进行参数优化,给出抗压层材料的优化配比。

2.1 抗压层试验原料

本次试验采用的水泥为P.O42.5普通硅酸盐水泥;煤矸石来自重源煤矿回采时的夹矸和部分掘进矸石;粉煤灰取自贵州火电厂。

2.2 充填体配比探究试验

对于煤矸石胶结充填体的强度影响因素众多。首先,不同地质条件下的煤矸石作为试验原材料对其试验结果有所差别;其次,料浆质量分数、煤矸石粗细骨料掺量占比、水泥占比以及外添加剂等都对

其充填体强度有所影响。因此,为了后期对复合充填体中抗压层的构建更加合理,在研究抗压层配比试验前,对本次试验的材料在不同原料占比下的抗压强度进行了探索,以期获得影响充填体强度的主控因素及其影响规律。

1)单因素探索试验。抗压层主要在基本顶运动后期起主要作用,其后期强度必须达到要求;同时,对于现场构建抗压层时,其输送性能也是必须考虑的因素。因此,对各单因素:料浆质量分数、细骨料的掺量以及水泥掺量,在不同掺量下进行强度测试。此次试验把料浆质量分数区间设定为74%~82%,细骨料的掺量(即细矸率)区间设定为35%~55%,考虑到充填体的经济成本,水泥掺量区间为4%~12%。

不同期龄下各单因素试验结果如图8所示。由图8a可知,当料浆质量分数小于80%时,不同期龄下充填体强度随料浆质量分数的增加而增加,这是因为质量分数增加导致浆体的黏度增加,从而减小

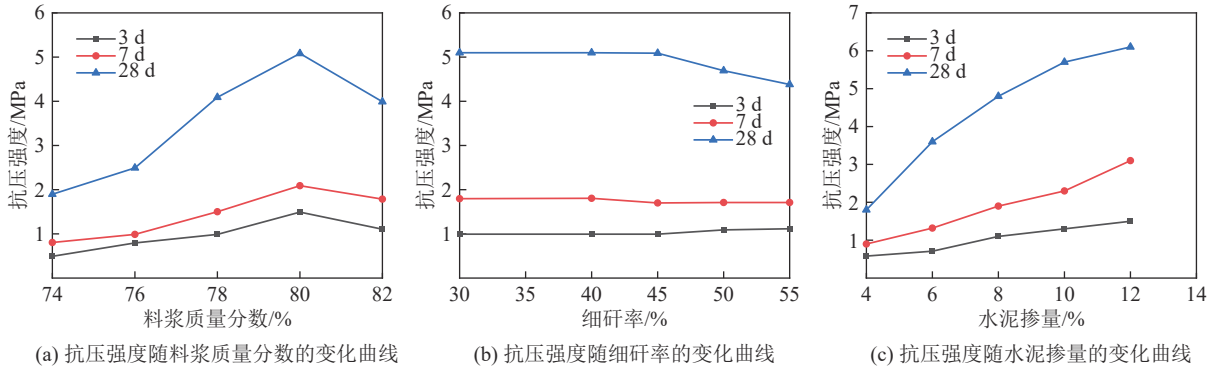


图8 不同因素对不同期龄下充填体强度的影响

Fig.8 Influence of different factors on strength of filling body under different ages

了粗骨料的沉降率,所以强度会增大,但是当质量分数超过 80% 时,浆体中游离水减少,从而抑制水化反应的进行,造成强度降低。由图 8b 可知,当期龄在 3 d 和 7 d 时,细骨料的掺量对充填体强度影响不明显,但当养护期龄达到 28 d 后,抗压强度随着细砂率的掺量变化波动明显,即细砂率对充填体的后期强度影响较大,当细骨料的掺量小于 45% 时,强度有小幅度的增加,超过 45% 后,强度明显降低,这可能是因为细骨料增加,导致大量的细骨料吸附于充填体中的游离水,造成水化速率降低,同时,粗骨料相对较少,使充填体的支撑作用弱化,故而强度降低。由图 8c 可知,各期龄下的充填体强度随着水泥掺量的增加而明显提升,这是因为水泥的水化反应能激发煤矸石、粉煤灰中的活性物质,生成钙矾石充填于固结体内部,从而提高了充填体整体强度。

矸石基胶结充填体的配比中,料浆质量分数区间宜为 76%~80%,如果料浆质量分数过小,则会造成在浆体输送时较大骨料沉底;细骨料的掺量区间宜为 35%~45%;水泥掺量对充填体强度影响较大,且强度与掺量呈现正相关,所以配比时水泥掺量应根据现场所需强度进行调整。

2) 各因素交互作用对充填体强度的影响。图 9a 为料浆质量分数 78% 时,细骨料掺量与水泥掺量交互作用对充填体 28 d 抗压强度的影响。由图 9a 可知,当水泥掺量一定时,抗压强度与细砂率的增加呈现出“先增后减”的趋势,细砂率在 40% 左右时抗压强度达到最大,这是由于细骨料的增加超过一定程度后,导致骨料空间减小,使得材料早期水化反应不充分,从而在后期很难形成完善的支撑系统,强度有所下降。因此,细砂掺量在 40% 时最佳。

由图 9b 中可以看出,水泥掺量与料浆质量分数的交互作用对充填体 28 d 抗压强度最显著。当水泥为 4% 时,料浆质量分数从 76% 到 80%,抗压强度提升了 26%;当水泥掺量增加时,强度总体都呈现增长趋势。但是当水泥掺量一定时,在料浆质量分数为 78% 处出现了强度极值,随后减小,即抗压强度随料浆质量分数的增加同样呈现出“先增后减”的趋势。这是因为当料浆质量分数过大时,充填体中含量相对减少,没有充分的游离水与水泥产生水化反应,抑制强度增长,这时料浆流动性下降,同时管道输送也更加困难,因此,料浆质量分数在 78% 时较为适宜。

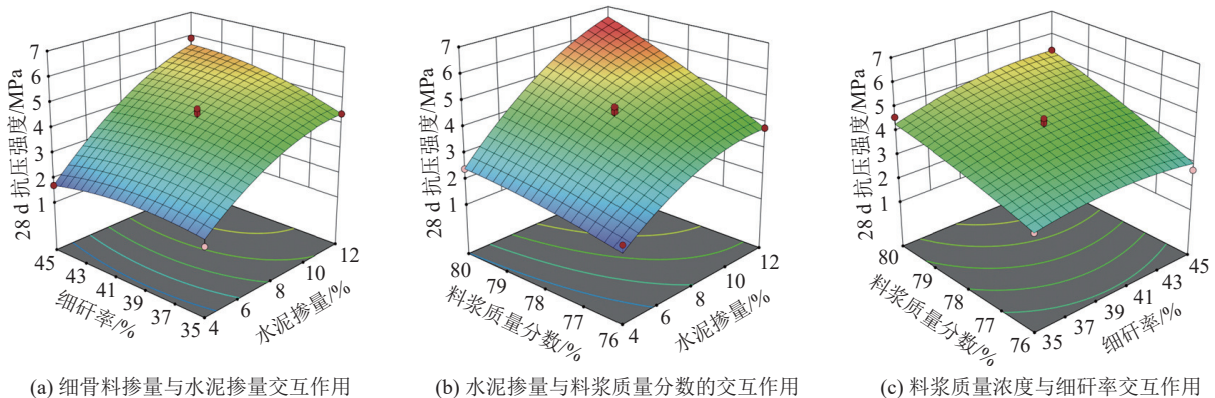


图9 充填体抗压强度的响应面

Fig.9 Response surface of compressive strength of filling body

从图 9c 可看出,随着料浆质量分数和细骨料掺量的增加,强度都是呈现出“先增后减”的趋势,但料浆质量分数与细砂率交互作用对充填体强度的影响不明显。中心点出现在细砂率 40%,料浆质量分数 78% 处。同时综合上述分析,在细砂率为 40%,料浆质量分数 78% 时,该配比下的充填体随着水泥掺量的增加后期强度增长越明显。

3) 充填体微观分析。图 10 为不同龄期下煤矸石胶结充填体试件 SEM 及 EDS 图片。由图中 10a 看出,当试样养护期龄为 3 d 时,试件中出现了大量的针状物质,根据 EDS 能谱分析为钙矾石,还有少量的球状物质分布在其中,根据 EDS 能谱分析为粉煤

灰,同时还出现了少量的薄片状物质,根据 EDS 能谱分析为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaO ; 由图 10b 可以看出,试样养护期龄到 7 d 时,针状钙矾石与试样水化 3 d 相比变得更加的细短,球状粉煤灰被包裹得更加严密,薄片状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 显著增加,同时,出现了丝状 C-S-H 凝胶与针状钙矾石相互交织在一起; 当试样养护期龄 28 d, 由图 10c 可以看出,试件整体表现出较密实,已形成一个整体的胶凝体。通过对不同期龄下煤矸石充填体试件的微观分析可知,随着期龄的增长,充填体内部的水化产物数量以及类型将会发生改变,并且到后期水化产物会交织在一起,整体形成致密结构,从而提高了充填体的强度。

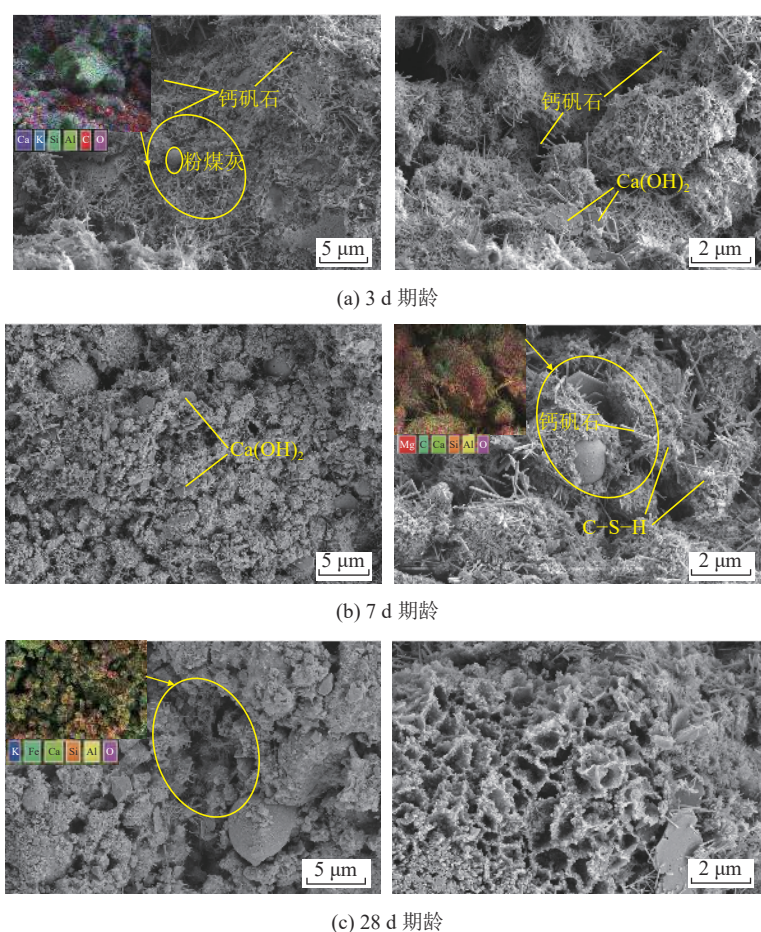


图 10 煤矸石胶结充填体不同期龄下 SEM 及 EDS 图片

Fig.10 SEM and EDS images of coal gangue cemented backfill at different ages

2.3 抗压层力学参数优化

根据对煤矸石胶结充填体的配比探索,确定了此次构建抗压层充填体的料浆质量分数为 78%,细骨料掺量为 40%。因此,通过调节水泥的掺量,测试 28 d 的试件。本次试验设计 5 组方案,得出在符合理论计算强度基础上,综合性最优的一组配比。

第 1 组至第 5 组的终凝平均强度分别为: 4.70、

4.10、8.40、12.83、15.02 MPa; 第 4 组和第 5 组的后期强度满足要求,在经济成本方面,第 5 组的水泥掺量比第 4 组增加了 5%,为了降低巷旁充填体的成本,最终选择第 4 组水泥掺量 20% 作为抗压层的最优配比。最后,将优选的第 4 组剩余试件取心加工后进行测试,优选组的基本力学参数: 抗压强度 13.21 MPa,弹性模量 0.75 GPa,内摩擦角 26° ,黏聚力 2.85 MPa,

抗拉强度 0.97 MPa。

3 复合充填体的力学特性分析

根据前面的研究成果,复合充填体让压层选用改性后的高水材料,其水灰比为 1.5 : 1,发泡剂掺量为 0.06%,纤维掺量为 0.2%。抗压层材料选择矸石基胶结充填体配比为:水(22%)、水泥(20%)、粉煤灰(18%)、煤矸石(40%),其中煤矸石细骨料($\leq 5\text{ mm}$)占比 40%,5 ~ 10 mm 以及 10 ~ 16 mm 占比各 30%。为准确分析复合充填体受力情况,探究复合充填体最佳分层高度比,将复合充填体试件分为 5 类,每类 3 组试件,让压层与抗压层的高度比分别为:1 : 9、2 : 8、3 : 7、4 : 6、5 : 5,脱模后的试件如图 11 所示。

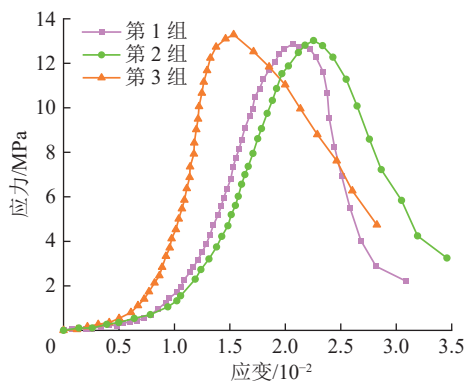
不同分层占比下复合充填体试件期龄为 28 d 试件的应力-应变曲线如图 12 所示,由图 12 可知,当让压层(高水材料)占比不同时,各试件应力应变曲线均有所不同。其中让压层占比为 10% ~ 20% 与占比 30% ~ 50% 的差异十分显著。当让压层占比为 30% ~ 50% 时,其应力应变曲线呈现出岩石变形的典型应力-应变曲线特征,大致可分为 4 个阶段:压密阶段、弹性或近弹性阶段、塑性变形阶段及破裂后阶段,同时,这 3 种占比下都表现出在破坏后的阶段(峰后阶段),曲线没有急速下降而呈现出缓慢下降的趋势,占比为 30% 时这种现象尤为明显,说明在



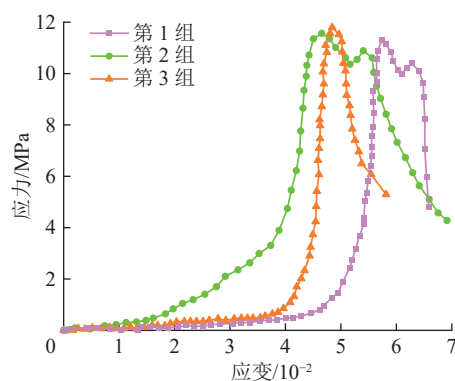
图 11 复合充填体试件

Fig.11 Composite backfill specimen

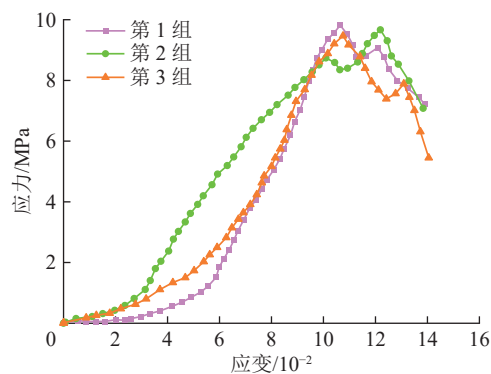
这 3 种占比下,复合充填体在破坏后仍然具有一定的支撑强度;当让压层占比为 10% ~ 20% 时,其应力-应变曲线与典型的应力-应变特征曲线表现出明显差异,在此 2 种占比下,大致经历了 2 次典型岩石在峰前阶段的循环:初次压密阶段、初次弹性/近弹性阶段、初次塑性阶段、二次压密阶段、二次弹性/近弹性阶段、二次塑性阶段,最后直至试件破坏。总之,在让压层的不同占比下,其破坏前的应力-应变曲线差异明显,这表明不同让压层占比对复合充填体的力学行为影响显著。



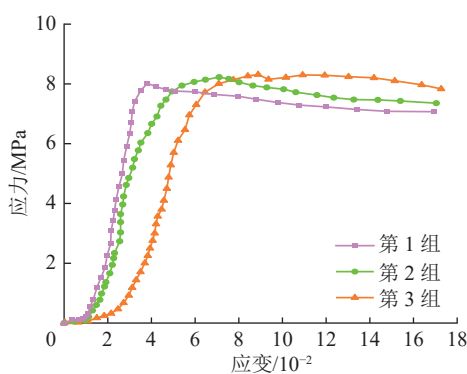
(a) 让压层占比 0



(b) 让压层占比 10%



(c) 让压层占比 20%



(d) 让压层占比 30%

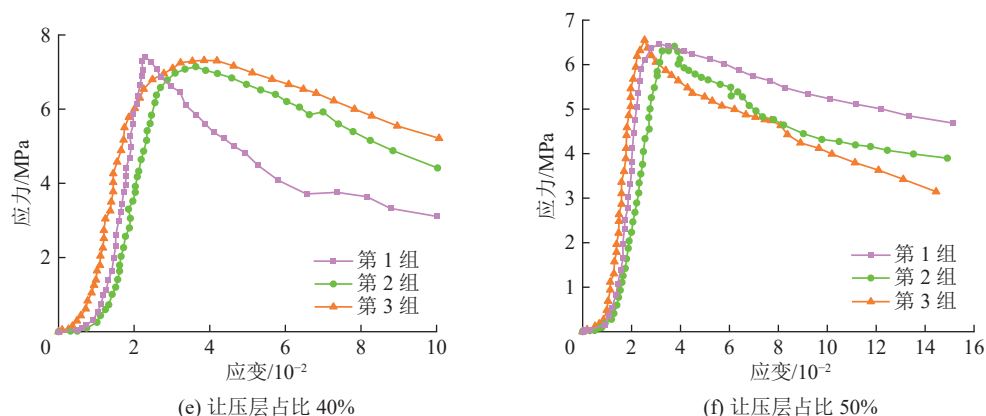


图 12 不同分层占比下复合充填体试件的应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of composite backfill specimens under different layered proportions

分析可知,从试件的变形适应性角度考虑,让压层占比在 10%、20% 及 30% 时,复合充填体均具备较好的柔性让压性能;从试件的载荷适应性来看,让压层占比 10% 与 20% 时具有较好的承载能力。根据沿空留巷围岩活动规律,留巷期间,巷旁复合充填体前期既需具备适应顶板下沉,协同让压的性能,后期又需拥有一定的承载能力。因此,让压层占比 10%~20% 时,既拥有较好的让压能力,且具有一定的关键承载能力。

4 结 论

1) 让压层最优配比为水灰质量比为 1.5 : 1,发泡剂掺量为 0.06%,纤维掺量为 0.2%。改性材料强度与膨胀率的影响程度为:水灰质量比>发泡剂掺量>聚丙烯纤维掺量。

2) 让压层优化组 28 d 时抗压强度达到了 8.84 MPa;在峰值应变方面不同期龄下为对照组的 1.8~2.6 倍,能够发挥出让压层的作用,同时保证复合充填体的整体性。

3) 抗压层配比中细砂率为 40%,料浆质量分数 78% 时为最优,该配比下的充填体随着水泥掺量的增加后期强度增长越明显。

4) 确定了抗压层最佳的料浆浓度及细砂率,通过调整水泥掺量为 20% 时,抗压层平均抗压强度为 13.21 MPa,抗拉强度为 0.97 MPa,弹性模量为 0.75 GPa,内摩擦角为 26° ,黏聚力为 2.85 MPa。

5) 综合试件的变形适应性与载荷适应性进行优选,让压层占比 10%~20% 时,具有较好的让压能力,也具有一定的关键承载能力。

参考文献(References):

[1] 冯友良. 考虑采空区压实效应的沿空掘巷煤柱设计方法研究

[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11): 53-59.

FENG Youliang. Study on coal pillar design method of gob-side entry driving considering gob compaction effect[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(11): 53-59.

[2] 何满潮,高玉兵,盖秋凯,等. 无煤柱自成巷力学原理及其工法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 19-30.

HE Manchao, GAO Yubing, GAI Qiukai, *et al.* Mechanical principle and mining methods of automagical entry formation without coal Pillars[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 19-30.

[3] ZHANG J, HE Y F, YANG T, *et al.* Coevolution mechanism and branch of pillar-overburden fissures in shallow coal seam mining[J]. Energy Science & Engineering, 2023, 11(5): 1630-1642.

[4] 李胜,李军文,范超军,等. 综放沿空留巷顶板下沉规律与控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 1989-1994.

LI Sheng, LI Junwen, FAN Chaojun, *et al.* Roof subsidence laws and control technology for gob-side entry retaining in fully-mechanized top-coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 1989-1994.

[5] 郑贵贵,安铁梁,郭玉,等. 原位煤柱沿空留巷围岩控制机理及工程应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1091-1098.

ZHENG Xigui, AN Tieliang, GUO Yu, *et al.* Surrounding rock control mechanism and engineering application of *in situ* coal pillar in gob-side entry retaining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1091-1098.

[6] 李鹏,朱永建,王平,等. 大倾角厚层坚固顶板巷旁支护体合理宽度及让压尺度研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(11): 4494-4503.

LI Peng, ZHU Yongjian, WANG Ping, *et al.* Study on reasonable width and yield scale of roadway side support with strong roof and thick seam with large dip angle[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(11): 4494-4503.

[7] PANG D D, NIU X G, HE K, *et al.* Study on the deformation mechanism of the bottom plate along the empty lane of deep mining and the control technology of the bottom drum[J]. Geofluids, 2022, 2022(1): 1-16.

[8] 冯国瑞,任玉琦,王鹏飞,等. 厚煤层综放沿空留巷巷旁充填体应

- 力分布及变形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1109–1119.
- FENG Guorui, REN Yuqi, WANG Pengfei, *et al.* Stress distribution and deformation characteristics of roadside backfill body for gob-side entry of fully-mechanized caving in thick coal seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(6): 1109–1119.
- [9] 华心祝, 李琛, 刘啸, 等. 再论我国沿空留巷技术发展现状及改进建议[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 128–145.
- HUA Xinzhu, LI Chen, LIU Xiao, *et al.* Current situation of gob-side entry retaining and suggestions for its improvement in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 128–145.
- [10] 王凯, 杨宝贵, 王鹏宇, 等. 软弱厚煤层沿空留巷变形破坏特征及控制研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1913–1924, 1960.
- WANG Kai, YANG Baogui, WANG Pengyu, *et al.* Deformation and failure characteristics of gob-side entry retaining in soft and thick coal seam and the control technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(7): 1913–1924, 1960.
- [11] 华心祝, 李志华, 李迎富, 等. 深井大断面沿空留巷分阶段底鼓特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 26–30.
- HUA Xinzhu, LI Zhihua, LI Yingfu, *et al.* Analysis on floor heave features of large cross section gob-side entry retaining in deep mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(9): 26–30.
- [12] BIAN W H, YANG J, HE M C, *et al.* Research and application of mechanical models for the whole process of 110 mining method roof structural movement[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(9): 3106–3124.
- [13] 王家臣. 我国综放开采40年及展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 83–99.
- WANG Jiachen. 40 years development and prospect of longwall top coal caving in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 83–99.
- [14] 康红普, 张晓, 王东攀, 等. 无煤柱开采围岩控制技术及应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 16–44.
- KANG Hongpu, ZHANG Xiao, WANG Dongpan, *et al.* Strata control technology and applications of non-pillar coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 16–44.
- [15] 朱珍, 张科学, 袁红平. 切顶卸压沿空留巷碎石巷帮控制技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(3): 25–32.
- ZHU Zhen, ZHANG Kexue, YUAN Hongping. Control technology and its application of roadway side wall formed by gangue in gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure releasing[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(3): 25–32.
- [16] LIU Yufei, WU Xinhua, ZHU Tao, *et al.* Influence of mechanical properties of filling paste on overlying strata movement and surface settlement[J]. *Shock and Vibration*, 2022, 2022(1): 4687200.
- [17] 柏建彪, 张自政, 王襄禹, 等. 高水材料充填沿空留巷应力控制与围岩强化机理及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 16–28.
- BAI Jianbiao, ZHANG Zizheng, WANG Xiangyu, *et al.* Stress control and surrounding rock strengthening mechanism of gob-side entry retaining with high-water content material filling and its application[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 16–28.
- [18] 候朝炯, 易安伟, 柏建彪, 等. 高水灰渣速凝材料巷旁充填沿空留巷的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 1995, 23(2): 2–5, 34, 63.
- HOU Chaojiong, YI Anwei, BAI Jianbiao, *et al.* Experimental study on gob-side entry retaining with roadside filling of high water-cement slag quick-setting material[J]. *Coal Science and Technology*, 1995, 23(2): 2–5, 34, 63.
- [19] 李西凡, 熊祖强, 张耀辉, 等. 沿空留巷高水充填材料改性试验及工程应用[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(4): 94–106.
- LI Xifan, XIONG Zuqiang, ZHANG Yaohui, *et al.* Modification test and engineering application of high-water filling material in gob-side entry retaining[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(4): 94–106.
- [20] 李舒霞, 姜福兴, 朱权洁. 复合墙体支护技术在沿空留巷中的应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(12): 32–36.
- LI Shuxia, JIANG Fuxing, ZHU Quanjie. Study on composite wall support technology applied to gob-side entry retaining[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(12): 32–36.
- [21] 叶根喜, 朱权洁, 李舒霞, 等. 千米深井沿空留巷复合充填体制制与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(5): 787–794.
- YE Genxi, ZHU Quanjie, LI Shuxia, *et al.* Development and application of composite filling body in gob-side entry retaining with 1000m-plus deep coal mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(5): 787–794.
- [22] 孙恒彪, 赵炳利. 沿空留巷的理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [23] 王平, 曾梓龙, 孙广京, 等. 深井矸石充填工作面沿空留巷围岩控制原理与技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 68–76.
- WANG Ping, ZENG Zilong, SUN Guangjing, *et al.* Principle and technology of surrounding rock control for gob-side entry retaining in deep mine gangue backfilling face[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 68–76.
- [24] 谭云亮, 于凤海, 宁建国, 等. 沿空巷旁支护适应性原理与支护方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 376–382.
- TAN Yunliang, YU Fenghai, NING Jianguo, *et al.* Adaptability theory of roadside support in gob-side entry retaining and its supporting design[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 376–382.
- [25] 宁建国, 马鹏飞, 刘学生, 等. 坚硬顶板沿空留巷巷旁“让-抗”支护机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 369–374.
- NING Jianguo, MA Pengfei, LIU Xuesheng, *et al.* Supporting mechanism of “yielding-supporting” beside roadway maintained along the goaf under hard rocks[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 369–374.
- [26] 曹悦. 综放工作面沿空留巷组合充填体失稳机理及围岩控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- CAO Yue. Study on instability mechanism and surrounding rock control technology of gob-side entry retaining combined backfill in fully mechanized caving face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.