

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2022.04.010

# 煤矸石集料混凝土材料配比优化

魏明星<sup>1</sup>, 朱永建<sup>1,2\*</sup>, 任恒<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 张玉群<sup>3</sup>, 廖洪波<sup>4</sup>, 赵俊<sup>4</sup>, 吴寻云<sup>4</sup>

(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. 福建省安全生产科学研究院, 福建 福州 350003; 4. 四川川煤华荣能源有限责任公司 小河嘴煤矿, 四川 达州 635000)

**摘要:**为解决煤炭开采过程中的固体废弃物处理问题和天然骨料供给不足的问题. 本文采用正交试验法设计试验, 通过控制水灰比、钢纤维含量和煤矸石粒径 3 个因素制作预制混凝土砌块, 对制作的砌块进行单轴抗压试验然后对所得的抗压强度数据进行分析, 以此研究水灰比、钢纤维含量和煤矸石粒径 3 个因素对预制混凝土砌块强度的影响, 确定最佳预制混凝土砌块配合比, 为煤矸石集料混凝土的实际应用提供一定的思路. 结果表明: 预制混凝土砌块其抗压强度会随水灰比增加而快速减小, 随着钢纤维含量的增加会先增大然后减小, 随着煤矸石粒径的增大缓慢减小. 预制混凝土砌块的最优配合: 水灰比 45%, 钢纤维含量 1%, 煤矸石粒径 5~8 mm, 质量配比为 220 : 489 : 1 015 : 676 : 24 ( $m_{\text{水}} : m_{\text{水泥}} : m_{\text{煤矸石}} : m_{\text{砂子}} : m_{\text{钢纤维}}$ ).

**关键词:**煤矸石; 配合比; 正交试验法; 改性混凝土; 集料

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2022)04-0065-07

## The Optimization of the Material Ratio of Coal Gangue Aggregate Concrete

WEI Mingxing<sup>1</sup>, ZHU Yongjian<sup>1,2</sup>, REN Heng<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>,  
ZHANG Yuqun<sup>3</sup>, LIAO Hongbo<sup>4</sup>, ZHAO Jun<sup>4</sup>, WU Xunyun<sup>4</sup>

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

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Fujian Provincial Academy of Safety Science and Technology, Fuzhou 350003, China;

4. Xiaohezu Coal Mine, Sichuan Chuanmei Huarong Energy Co., Ltd., Dazhou 635000, China)

**Abstract:** To address the issues of solid waste disposal in the coal mining process and a scarcity of natural aggregates, the orthogonal experimental approach is utilized in this research to construct trials to create precast concrete blocks while regulating three factors, namely water-cement ratio, steel fiber percentage, and gangue particle size. The fabricated blocks are subjected to a uniaxial compressive test, and the compressive strength data obtained are analyzed to investigate the effect of three factors, water-cement ratio, steel fiber content, and gangue particle size, on the strength of precast concrete blocks, to determine the best precast concrete block ratio, and to provide some ideas for the practical application of coal gangue aggregate concrete. Results reveal that the compressive strength of precast concrete blocks drops rapidly as the water-cement ratio increases, increases initially and subsequently decreases as the steel fiber content increases, and reduces slowly as the gangue particle size grows. Precast concrete blocks with an appropriate water-cement ratio of 45 %, a steel fiber content of 1 %, and gangue particle size 5 to 8 mm with the quality ratio of water to cement to gangue to sand to

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51774130; 52174110); 湖南省自然科学基金面上资助项目(2021JJ30273)

\* 通信作者, E-mail: yjzhu@hnust.edu.cn

steel fiber equal 220 to 489 to 1 015 to 676 to 24.

**Keywords:** coal gangue; mix ratio; orthogonal experimental method; modified concrete; aggregate

中国作为一个能源消耗大国,比较依赖煤炭的使用,目前中国原煤年开采量已达到 39 亿 t,而在煤炭开采的过程中会产生大量的固体废弃物——煤矸石<sup>[1-3]</sup>.煤矸石的简单堆放不仅占用了大量的土地资源,而且长期的暴露还会造成煤矸石自燃产生有毒气体进而引起环境污染问题<sup>[4-6]</sup>.同时我国基础设施建设领域由于近年来快速发展对骨料资源有很大需求<sup>[7-8]</sup>.如果能够将煤矸石作为混凝土骨料来使用不仅可以促进煤矸石的废物利用,还能缓解天然骨料的需求压力.

众多学者对煤矸石集料混凝土进行了深入研究.一方面出于原位利用的考虑,谭云亮等<sup>[9]</sup>提出的沿空留巷巷旁支护适应性原理,支护结构下部采用抗压强度足够高的煤矸石集料混凝土来抵抗顶板的回转下沉<sup>[10]</sup>,留巷能否起到目标效果主要取决于混凝土支护体强度能否满足上覆岩层的支承要求<sup>[11-12]</sup>;陈久权等<sup>[13]</sup>研究了煤矸石替换率以及水灰比等对集料混凝土抗压强度的影响;黄正栋等<sup>[14]</sup>通过添加钢纤维和聚合物对集料混凝土进行改性试验,研究不同配比条件下混凝土的单轴抗压强度;王玉林,贾牛骏等<sup>[15-16]</sup>将煤矸石集料混凝土实际运用到巷旁支护体,观测到巷道变形基本稳定,起到了较好的留巷效果.另一方面出于骨料资源的考虑,陈炜林<sup>[17]</sup>对比研究了煤矸石集料混凝土和天然集料混凝土,发现煤矸石并不会降低混凝土的抗压强度,但会明显降低混凝土的抗冻性能;Zhu 等<sup>[18]</sup>发现高温煅烧可显著改善煤矸石混凝土的抗压强度;Li<sup>[19]</sup>对比研究了普通混凝土梁和煤矸石混凝土梁的力学性能,并结合 ANSYS 模拟煤矸石混凝土梁的应力分布,发现在合理的设计和使用范围内,在钢筋混凝土结构中使用煤矸石骨料是可行的.

众学者从强度能否满足要求出发进行了深入的研究并获得了一系列成果,但是对于强度受具体材料配比影响方面的研究较少.因此,本文基于前人的强度研究基础上开展预制混凝土砌块的配合比试验,通过研究各因素对抗压强度的影响,确定最符合实际工程要求的预制混凝土砌块配合比,为煤矸石集料混凝土的应用推广提供一定的思路.

## 1 试验原材料

本次试验采用的水泥为 P·S·A32.5 矿渣硅酸盐水泥.粗骨料取自柏林煤矿现场产生的煤矸石,粒径分别为 5~8 mm, 8~12 mm, 12~15 mm, 具体如图 1 所示.细骨料为 2.5 细度模数标准中砂.水是符合标准的本地自来水.添加的钢纤维为剪切波纹型钢纤维,如图 2 所示,基本指标详见表 1.



图 1 不同粒径煤矸石



图 2 剪切波纹型钢纤维

表 1 钢纤维基本技术指标

名称	长度/mm	长径比	等效直径/mm	抗拉强度/MPa
剪切波纹型钢纤维	30	46	0.65	600

## 2 试验方案设计与实施

### 2.1 试验方案设计

在预制混凝土砌块初始配合比的选择上,选用类似矿井工作面所使用的配合比作为本试验的初始配

合比.基于初始配合比,1 m<sup>3</sup>混凝土质量大约为2 400 kg,其中水的重量为220 kg,控制砂率为40%;用煤矸石代替石子,煤矸石粒径为5~8 mm,不添加钢纤维,设计45%,50%,55%这3种不同水灰比作为对照组,每种方案3个试件.通过计算得到相应配合比方案,具体见表2.

表2 无钢纤维预制混凝土砌块配合比方案

水灰比/%	水/kg	水泥/kg	煤矸石/kg	砂子/kg
45	220	489	1 015	676
50	220	440	1 044	696
55	220	400	1 068	712

在预制混凝土砌块中掺加钢纤维,通过控制水灰比、钢纤维含量和煤矸石粒径3个变量,研究水灰比、钢纤维含量和煤矸石粒径对预制混凝土砌块强度的影响.为了试验的高效、快速和经济,通过较少数量的预制混凝土砌块全面反映预制混凝土配合比中水灰比、钢纤维含量和煤矸石粒径对预制混凝土砌块强度的影响,采用正交试验法设计试验方案.以预制混凝土砌块单轴抗压强度作为考察标准,以水灰比(A<sub>1</sub>为45%、A<sub>2</sub>为50%、A<sub>3</sub>为55%)、钢纤维含量(B<sub>1</sub>为0.5%、B<sub>2</sub>为1%、B<sub>3</sub>为1.5%)和煤矸石粒径(C<sub>1</sub>为5~8 mm、C<sub>2</sub>为8~12 mm、C<sub>3</sub>为12~15 mm)作为试验因素,得到正交设计表,具体见表3.

表3 正交设计表

方案	A	B	C	空列	试验方案
1	1	1	1	1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>
2	1	2	2	2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
3	1	3	3	3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>
4	2	1	2	3	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>
5	2	2	3	1	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>
6	2	3	1	2	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>
7	3	1	3	2	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
8	3	2	1	3	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>
9	3	3	2	1	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>

根据正交设计表3,计算得到相应的钢纤维预制混凝土砌块配合比方案,具体见表4.

表4 钢纤维预制混凝土砌块配合比方案

方案	水/kg	水泥/kg	煤矸石/kg	砂子/kg	钢纤维/kg
1	220	489	1 015(5~8 mm)	676	12
2	220	489	1 015(8~12 mm)	676	24
3	220	489	1 015(12~15 mm)	676	36
4	220	440	1 044(8~12 mm)	696	12
5	220	440	1 044(12~15 mm)	696	24
6	220	440	1 044(5~8 mm)	696	36
7	220	400	1 068(12~15 mm)	712	12
8	220	400	1 068(5~8 mm)	712	24
9	220	400	1 068(8~12 mm)	712	36

## 2.2 试验方案实施

准备好预制混凝土砌块制作工具(如图3所示),根据设计好的预制混凝土砌块配合比筛选称量相应的试验材料.由于煤矸石具有吸水性,在拌合前需先浸泡15 min,让其充分饱水<sup>[20]</sup>.然后将所有试验材料混合均匀后装模.本次试验采用的预制混凝土砌块模具规格为150 mm×150 mm×150 mm.每种方案3个混凝土试件.装模后振捣密实,待预制混凝土砌块凝固后拆模,在试验室条件下洒水养护28 d.为了避免混淆不同配比试件,对试件外表进行标记以示区分,如图4所示.



图3 预制混凝土砌块制作工具



图4 预制混凝土砌块试件

### 3 试验结果分析

预制混凝土砌块 28 d 养护完成后,采用岩石力学加载系统进行单轴压缩试验,分析不同的水灰比、钢纤维含量和煤矸石粒径对其抗压强度的影响.该岩石力学加载系统最大加载荷载完全能满足试验需求,具体如图 5.

将养护完成后的预制混凝土砌块放置于加载系统上,压载时预制混凝土砌块上下添加方形垫板,保持加载过程中受力均匀.采用控制行程的方法,位移速率为 0.02 mm/s,加载直至预制混凝土砌块破坏.预制混凝土砌块加载过程如图 6 所示.



图5 岩石力学加载系统



图6 预制混凝土砌块加载过程

图 7 为预制混凝土砌块的破坏形态,从图 7 可以看出,预制混凝土砌块呈 X 状共轭斜面剪切破坏.这是最为常见的一种压剪破坏形式.其破坏过程:随着加载压力逐渐增大,使得预制混凝土内部微孔隙逐渐发育为微小斜裂隙;然后主控应力逐渐逼近混凝土的极限抗拉强度,在斜裂隙所在的截面上,拉区混凝土达到抗拉极限进而出现局部破坏,混凝土试件出现明显斜裂缝;随着加载压力的继续增大,斜裂缝相互贯通为主控裂缝<sup>[21]</sup>,混凝土试件中部混凝土块沿着主控裂缝破坏脱落.

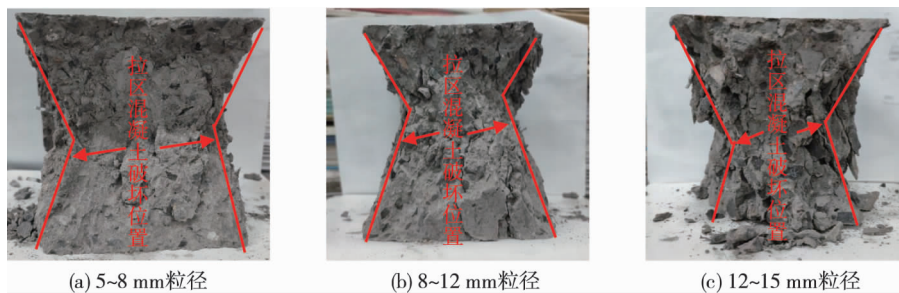


图7 预制混凝土砌块的破坏形态

图 7 中预制混凝土砌块采用的煤矸石粒径不同,其最终破坏形态也呈现一定的差异,煤矸石粒径越小,其破坏程度相对较低,反之其破坏程度则相对较高.破坏部位一般发生在水泥与煤矸石骨料的黏结面位置,它们的黏结处往往存在着一些极微小孔隙,这些孔隙的数量影响着预制混凝土的破坏形态.煤矸石骨料粒径越小与水泥黏结程度就越好,它们黏结处的孔隙数量相对较少,主控裂缝发育程度相对较低,混

凝土试件破坏程度也相应较低;反之,主控裂缝发育程度相对较高,混凝土试件破坏程度也会相应较高。

图 8 为预制混凝土砌块应力应变曲线.从图 8 可以得到,预制混凝土砌块其抗压强度会随水灰比增加而快速减小,水灰比增大导致水泥用量的减少,而水泥在混凝土结构中充当胶凝材料,其含量对混凝土的稳固性有着重要作用.预制混凝土砌块的峰后强度呈缓慢下降趋势,说明预制混凝土砌块在破坏后仍具有较大的承载能力.同时,对比图 8a 和图 8b 可以看出,掺加钢纤维预制混凝土砌块峰后强度的下降曲线更为平缓,这说明钢纤维对增加预制混凝土砌块的韧性具有一定作用。

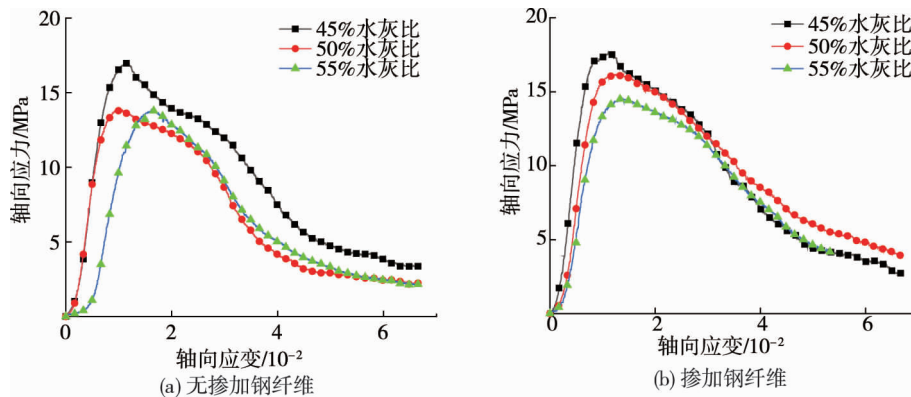


图 8 预制混凝土砌块应力应变曲线

预制混凝土砌块抗压强度可按式(1)计算。

$$f_c = \frac{P}{A} \tag{1}$$

式中: $f_c$  为预制混凝土砌块抗压强度,MPa; $P$  为预制混凝土砌块破坏时最大峰值强度,kN; $A$  为预制混凝土砌块受压面积, $m^2$ 。

所有预制混凝土砌块加载完成后,通过式(1)计算得到各预制混凝土砌块的抗压强度,见表 5 和表 6。

表 5 28 d 无钢纤维预制混凝土砌块抗压强度 单位:MPa

试件编号	水灰比		
	45%	50%	55%
试件 1	17.04	15.20	13.47
试件 2	16.44	13.88	13.86
试件 3	16.75	14.65	13.90
均值	16.74	14.58	13.74

表 6 28 d 钢纤维预制混凝土砌块抗压强度 单位:MPa

试件编号	方案								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
试件 1	17.63	14.38	16.40	13.48	16.21	16.64	11.93	14.99	14.57
试件 2	18.50	20.01	19.03	14.69	17.32	14.45	10.79	13.68	14.38
试件 3	17.47	17.21	17.73	15.87	16.78	15.55	11.38	14.35	14.46
均值	17.87	17.20	17.72	14.68	16.77	15.54	11.37	14.34	14.47

对比没有掺加钢纤维和掺加钢纤维的预制混凝土砌块,其抗压强度的关系如图 9 所示.从图 9 可以直观看出,掺加钢纤维添加物的预制混凝土砌块其抗压强度要更高一些.当水灰比为 45%,钢纤维含量为 0.5%时,预制混凝土砌块其抗压强度同比增幅为 6.75%;当水灰比为 50%,钢纤维含量为 1%时,预制混凝土砌块其抗压强度同比增幅为 15.02%;当水灰比为 55%,钢纤维含量为 1.5%时,预制混凝土砌块其抗压强度同比增幅为 5.31%.随着钢纤维含量的增大,预制混凝土砌块抗压强度的增幅呈现先增后减的趋势.因此,可以说明在预制混凝土砌块中掺加一定量的钢纤维有助于增加预制混凝土砌块的抗压强度。

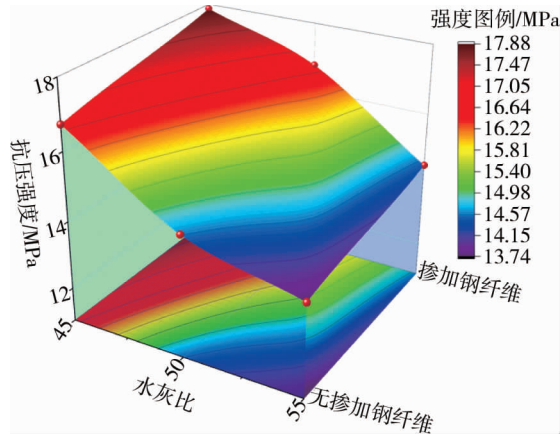


图 9 有无掺加钢纤维预制混凝土砌块抗压强度的对比

对试验结果进行正交处理,得到试验结果分析表 7.表格中  $K$  值为某因素某水平时试验数据求和, $k$  值为对应  $K$  值的平均值, $R$  指因素的极差值.

表 7 正交试验结果分析

方案	A	B	C	空列	抗压强度/MPa
1	1	1	1	1	17.87
2	1	2	2	2	17.20
3	1	3	3	3	17.72
4	2	1	2	3	14.68
5	2	2	3	1	16.77
6	2	3	1	2	15.54
7	3	1	3	2	11.37
8	3	2	1	3	14.34
9	3	3	2	1	14.47
$K_1$	52.79	43.92	47.75	49.11	
$K_2$	46.99	48.31	46.35	44.11	
$K_3$	40.18	47.73	45.86	46.74	
$k_1$	17.597	14.640	15.917	16.370	
$k_2$	15.663	16.103	15.450	14.703	
$k_3$	13.393	15.910	15.287	15.580	
$R$	12.61	4.39	1.89	5.00	

从表 7 中可以看出, $R_A > R_B > R_C$ ,所以影响本次试验结果的主要因素为水灰比,其次为钢纤维含量,最后为煤矸石粒径.而  $R_{空} > R_B > R_C$ ,说明存在对试验结果有着较为重要的其他影响因素.

对比  $K_1, K_2, K_3$  确定最优方案.A 因素列中  $K_1 > K_2 > K_3$ ,B 因素列中  $K_2 > K_3 > K_1$ ,C 因素列中  $K_1 > K_2 > K_3$ .所以,最优方案为  $A_1B_2C_1$ ,即水灰比 45%,钢纤维含量 1%,煤矸石粒径 5~8 mm 配制而成的预制混凝土砌块,质量配比为 220 : 489 : 1 015 : 676 : 24( $m_{水} : m_{水泥} : m_{煤矸石} : m_{砂子} : m_{钢纤维}$ ).

通过趋势图对最优方案进行验证.描绘出因素与指标的趋势图,如图 10 所示.

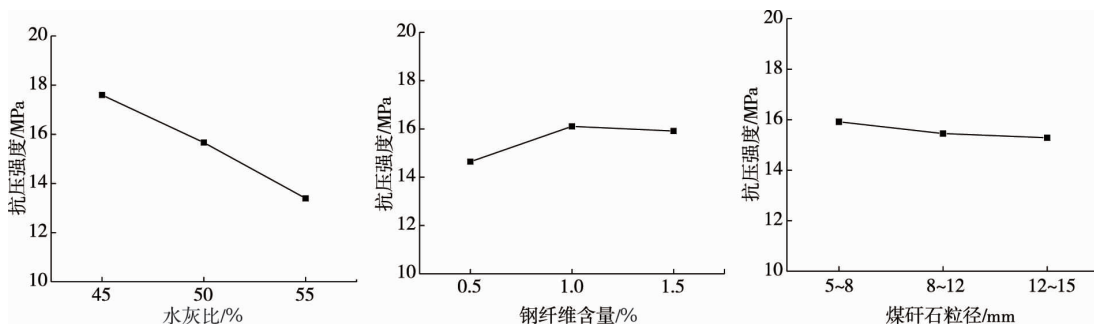


图 10 因素-指标趋势

## 4 结论

1) 预制混凝土砌块其抗压强度随水灰比增加而快速减小.水泥在煤矸石集料混凝土中充当胶凝材料,其含量对混凝土的稳固性有着重要作用.

2) 预制混凝土砌块其抗压强度随着钢纤维含量的增加会先增大后减小.钢纤维对增加预制混凝土砌块的韧性具有一定作用.掺加一定量的钢纤维可以增加预制混凝土砌块的抗压强度.

3) 预制混凝土砌块其抗压强度随着煤矸石粒径的增大随之缓慢减小.煤矸石骨料粒径越小与水泥黏结程度就越好,与水泥的界面黏结力就越大,主控裂缝发育程度也相对较低,预制混凝土砌块的抗压强度也就相应较高.

4) 预制混凝土砌块的最优配合为水灰比 45%,钢纤维含量 1%,煤矸石粒径 5~8 mm 配合,质量配比为  $220 : 489 : 1\ 015 : 676 : 24(m_{\text{水}} : m_{\text{水泥}} : m_{\text{煤矸石}} : m_{\text{砂子}} : m_{\text{钢纤维}})$ .

### 参考文献:

- [1] 李永靖,邢洋,张旭,等.煤矸石骨料混凝土的耐久性试验研究[J].煤炭学报,2013,38(7):1215-1219.
- [2] LI Y, LIU S, GUAN X. Multitechnique investigation of concrete with coal gangue[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124114.
- [3] 王爱国,朱愿愿,徐海燕,等.混凝土用煤矸石骨料的研究进展[J].硅酸盐通报,2019,38(7):2076-2086.
- [4] 罗作球,姚源,孟刚,等.煤矸石用作混凝土集料的建材资源化研究进展[J].材料导报,2015,29(s2):460-462.
- [5] WANG Q, LI Z, ZHANG Y, et al. Influence of coarse coal gangue aggregates on elastic modulus and drying shrinkage behaviour of concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101748.
- [6] DONG Z, XIA J, FAN C, et al. Activity of calcined coal gangue fine aggregate and its effect on the mechanical behavior of cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2015, 100: 63-69.
- [7] GAO S, ZHAO G, GUO L, et al. Utilization of coal gangue as coarse aggregates in structural concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121212.
- [8] 田怡然,张晓然,刘俊峰,等.煤矸石作为环境材料资源化再利用研究进展[J].科技导报,2020,38(22):104-113.
- [9] 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.
- [10] 黄万朋,高延法,文志杰,等.钢管混凝土支柱巷旁支护沿空留巷技术研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(4):604-611.
- [11] 李鹏,朱永建,王平,等.高水平应力下巷道围岩破坏机理及其控制技术[J].矿业工程研究,2020,35(1):33-40.
- [12] 王平,冯涛,朱永建,等.深部软岩巷道围岩塑性区演化规律及其控制[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(2):1-10.
- [13] 陈久权,刘磊,杜秉旋.煤矸石粗集料混凝土配合比设计及性能研究[J].煤炭技术,2017,36(10):300-302.
- [14] 黄正栋,张东峰,张小强.沿空留巷巷旁充填材料性能优化研究[J].煤矿安全,2021,52(8):59-65.
- [15] 王玉林,马强,王高尚.梁北矿大采高软煤工作面回采巷道沿空留巷技术应用研究[J].煤炭技术,2021,40(9):19-22.
- [16] 贾牛骏,闫俊杰,仇永芳,等.柔模混凝土沿空留巷过陷落柱支护技术研究[J].煤炭工程,2019,51(7):40-43.
- [17] 陈炜林.煤矸石作为水泥混凝土骨料可行性的基础研究[D].北京:北京工业大学,2010.
- [18] ZHU Y, ZHU Y, WANG A, et al. Valorization of calcined coal gangue as coarse aggregate in concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 121: 104057.
- [19] LI G, WANG B, ZHOU M. Study on flexural properties of reinforced spontaneous combustion gangue concrete beams[J]. Periodica Polytechnica-Civil Engineering, 2018, 62(1): 206.
- [20] 周梅,浦倍超,徐秒,等.附加水及预湿时间对自燃煤矸石砂轻混凝土性能影响[J].硅酸盐通报,2013,32(12):2421-2426.
- [21] 朱永建,任恒,王平,等.损伤石灰岩单轴再加载力学特性及破坏机理[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(11):119-126.