

# 矿用煤矸石胶结充填体配比的影响因素分析

聂博超, 夏文涛

安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2023年5月31日; 录用日期: 2023年6月30日; 发布日期: 2023年7月7日

## 摘要

煤矸石胶结充填可有效控制煤矿开采造成的地表沉陷, 减少环境破坏。为研究固体质量浓度、水泥掺量、粉煤灰掺量对充填体物理性质的影响规律, 优化充填材料配比, 设计9组配比试验, 为工程上获得合理充填材料配比提供科学方法, 研究表明固体质量浓度低于80时, 与充填体强度为正相关; 增加水泥掺量可以提高充填体的流动性指标与抗压强度, 增加粉煤灰掺量可以优化充填体流动性但也会影响强度。

## 关键词

煤矸石, 胶结料, 充填体, 固体质量浓度, 水泥, 粉煤灰

# Analysis of Influencing Factors of Coal Gangue Cementation Filling Ratio for Mining

Bochao Nie, Wentao Xia

School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 31<sup>st</sup>, 2023; accepted: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 7<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Coal gangue cementation filling can effectively control the surface subsidence caused by coal mining and reduce environmental damage. In order to study the influence of solid mass concentration, cement content and fly ash content on the physical properties of the filling body, optimize the ratio of filling materials, and design 9 groups of ratio tests to provide scientific methods for obtaining a reasonable ratio of filling materials in engineering, the results show that when the solid mass concentration is lower than 80, it is positively correlated with the strength of the filling body. Increasing

the cement content can improve the fluidity index and compressive strength of the filling body, and increasing the fly ash content can optimize the fluidity of the filling body, but it will also affect the strength.

## Keywords

Gangue, Cement, Filling Body, Solid Mass Concentration, Cement, Fly Ash

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国煤矸石累计堆存已超过 70 亿 t, 占地面积约 70 km<sup>2</sup>, 并以每年 3.0~3.5 亿 t 的速度增长, 占工业废弃物总量的 40% 以上[1]。随着矸石排放量逐年递增, 大量堆积造成对土地资源的破坏与占用, 矸石山中的细小浆料颗粒会随风形成沙尘, 污染环境[2]。煤炭开采中对生态、地表造成严重破坏, 采空区地面沉陷严重, 地面建筑物受损, 这些问题严重制约煤炭资源高效开采与生态环境保护可持续发展[3]。矸石充填开采技术是一种环境友好型绿色开采技术, 既能够解决地面煤矸石、粉煤灰等大量堆积、污染环境等问题, 还能够减少上覆岩层的移动、有效控制地表沉陷, 为煤矿企业从煤矿开采中带来经济效益和环境效益, 在“三下”压煤开采中得到广泛推广, 具有良好的应用前景[4] [5]。近几年来, 山东科技大学的宋振骥院士[6]对无煤柱开采进行了深入的研究。采用煤矸石充填采空区的技术, 既能降低煤矸石的排放量又能达到杜绝因采空带来地表下沉量的问题。胶凝材料选取、充填材料配比参数优化对采空区充填力学性能稳定性有很大影响, 对有效控制地表沉陷至关重要。粉煤灰是燃煤火力发电过程中产生的浆料废渣, 含有大量活性物质, 广泛应用于建材、混凝土、水泥、农业、采空区充填等方面[7]。

## 2. 试验材料选取

试验所用煤矸石、矿井水均来自淮南某煤矿, 煤矸石产生于为采煤掘进过程中, 呈灰色, 由于煤矸石粒度直接影响到充填体质量, 因此, 煤矸石必须破碎至合适的粒度。粉煤灰为矿区火电厂的工业废料, 水泥为市售普通硅酸盐水泥。用 XRF 能谱分析煤矸石、粉煤灰化学成分和含量, 结果列于表 1、表 2 中, 根据 XRF 分析可知, 该煤矸石中主要化学成分为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 化学性质稳定, 有利于用作充填材料。用筛分法对煤矸石破碎前、后进行颗粒分级, 煤矸石破碎前、后的粒度分析, 结果列于表 3 中。

Table 1. Chemical composition of gangue/Wt%

表 1. 煤矸石化学组成/Wt%

名称	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其他
占比/%	3.33	1.52	54.49	17.54	7.80	15.32

Table 2. Fly ash chemical composition/Wt%

表 2. 粉煤灰化学组成/Wt%

名称	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	其他
占比/%	5.40	44.38	30.51	8.79	1.19	9.73

**Table 3.** Gangue particle size distribution  
**表 3.** 煤矸石粒径分布

破碎前 粒径(mm)	80	50~80	25~50	10~25	0~10
占比	5.00%	7.23%	39.24%	37.96%	10.57%
破碎后 粒径(mm)	10~15	8~10	5~8	2~5	0.08~2
占比	15.49%	20.89%	31.10%	15.20%	15.07%

### 3. 试验方案

为研究不同固体质量浓度、煤矸石含量、粉煤灰含量对矸石充填体物理性质的影响, 设计了九组矸石充填体试样按照一定的配比将材料混合均匀后(浆料配比如表 3 所示), 分出一部分料浆进行流动性、沁水率测试(测试结果如表 4 所示), 剩余的料浆装入正方体模具中, 制备成长 × 宽 × 高为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的标准正方体试块, 用于进行单轴抗压强度测试。料浆被装入模具后, 将开口磨具放置于干燥室内条件下进行养护, 24 h 后, 试块实现初凝, 将试块脱模后继续放置于干燥室内条件下养护, 试验方案设计的养护龄期分别为: 16 h, 4 d, 27 d。

分别针对试验方案中不同配比、不同养护龄期的矸石充填体试块进行单轴抗压强度测试, 测试方法依照中国国家标准 GB/T 23561 进行。采用 YAW-50 微机控制电液伺服岩石直剪仪进行单轴压缩变形试验, 按照力值控制加载, 加载速度为 0.2 KN/S。每组测试重复 3 次, 取其平均值作为测试结果。

### 4. 试验结果与分析

通过上述试验获得 9 组煤矸石充填体流动性、强度、沁水率如表 4 所示:

**Table 4.** Test block test results  
**表 4.** 试块试验结果

组号	固体质量浓度 /%	矸石水泥粉煤灰比例	流动性指标			强度			沁水率
			塌落度/mm	扩展度/mm	24 + 16 h	1 + 4 d	1 + 27 d		
1	78	80/16/5	31.9	25.5	0.83	2.804	4.38	3.13%	
2	78	85/10.5/3.5	36.2	25.7	0.92	2.08	3.86	2.94%	
3	76	85/11.25/3.75	24.3	36.6	0.25	1.76	2.64	6.76%	
4	80	85/9.75/5.25	29.2	30.8	0.33	1.75	2.52	2.67%	
5	76	80/13/7	36.1	26.2	0.41	0.73	2.76	2.76%	
6	78	90/6.5/3.5	29.3	39.8	0.07	2.04	1.15	6.24%	
7	80	80/14/6	51.5	21.4	0.72	0.629	4.6	2.42%	
8	80	90/7.5/2.5	33.5	34.4	0.17	1.13	1.25	3.31%	
9	76	90/7/3	45.1	33.3	0.18	0.494	0.73	7.58%	

#### 4.1. 固体质量浓度的影响

固体质量浓度较低时, 充填体强度随固体质量浓度增大逐渐增大, 基体黏度增大, 粗骨料矸石的沉降率降低, 后期强度增加, 但是当浓度超过 80%时基体游离水的减少会抑制水化反应的进行, 强度降低 [8]。所以选取 76、78、80 三种浓度进行试验。当浆料成分一定时, 料浆质量浓度是影响浆体输送性能以及后期充填体强度增长的主要因素 [9]。

试验证明当矽石比例不变, 水泥粉、煤灰比例基本不变时, 固体质量浓度和试块单轴抗压强度成正比。例如试块 6、8、9, 矽石的质量比为 90%, 水泥粉煤灰质量比波动在 1% 以内, 如图 1, 试块 6 比试块 9 在 4 d 和 27 d 的抗压强度分别提高了 313%、57.3%, 试块 8 比试块 9 在 4 d 和 27 d 的抗压强度提高了 129%、71%。试验结果显示, 当矽石含量不变、胶结料结构基本不变时, 提高固体质量浓度可以在很大程度上提高煤矽石充填体的抗压强度。

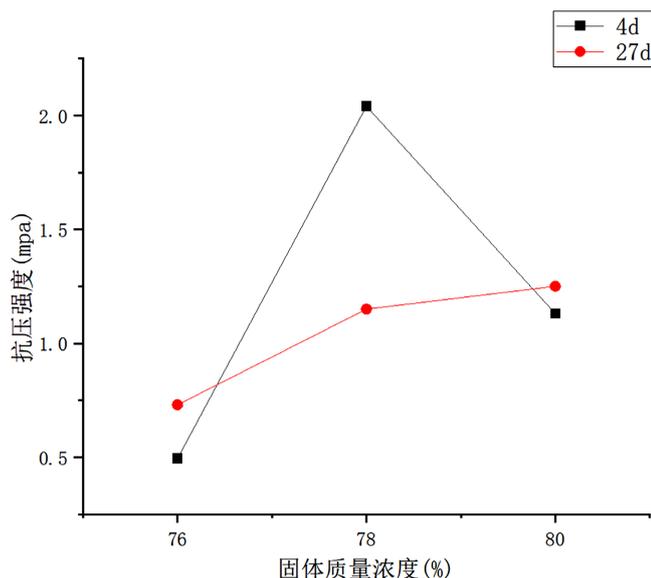


Figure 1. Comparison of the strength of test blocks 8, 6 and 9  
图 1. 试块 8、6、9 强度对比

其原因大致包括两个方面: 一方面固体质量浓度大时, 试块内部有更大的粘度, 可以在很大程度上防止粗大颗粒的沉降。同时由于砂浆中水量减少, 而使沉降速度降低, 缩短了大小颗粒沉降的差距, 提高颗粒分布均匀度, 确保了试块的强度。另一方面: 质量浓度越高的试块沁水率越低, 试块 8 对比试块 6、9 在沁水率有极大的降低, 由于沁水率低, 试块可以在同样的时间内快速硬化, 提高试块的密实性从而提升试块强度。

#### 4.2. 煤矽石水泥比例的影响

试验结果表明, 当固体质量浓度不变、粉煤灰占比基本不变时, 提高试块的水泥占比能很大程度上提高煤矽石充填体的流动性指标抗压强度。例如试块 4 和 7; 2 和 6; 3 和 9, 试块 7、2、3 在 27 d 时强度相比试块 4、6、9 提高了 82.5%、236%、262%。这是因为水泥的作用主要是四点:

- 1) 包裹骨料, 减少骨料颗粒之间的摩擦阻力, 增加拌合物的流动性。
- 2) 水泥浆还能减小充填骨料间的空隙, 使试块密实, 耐久性好。
- 3) 保证硬化后试块的强度。
- 4) 作为胶凝材料主要起到胶结作用, 在凝结硬化过程中, 将骨料胶结成具有一定形状的整体。

根据图 2, 当矽石水泥比为 80:14 时(试块 7), 27 d 单轴抗压强度最大, 为 4.6 MPA, 该试块流动性指标、沁水率同样达到最佳, 当矽石水泥比例为 85:10.5 时(试块 2), 4 d 单轴抗压强度最大, 为 2.08。由于试块 6 相比试块 2 掺入更多水泥, 试块 6 在流动性、沁水率指标表现更好, 同时由于水泥掺量高, 在更长的养护临期中, 试块 6 的内部流动性更强、空隙更小、试块密实度更好。

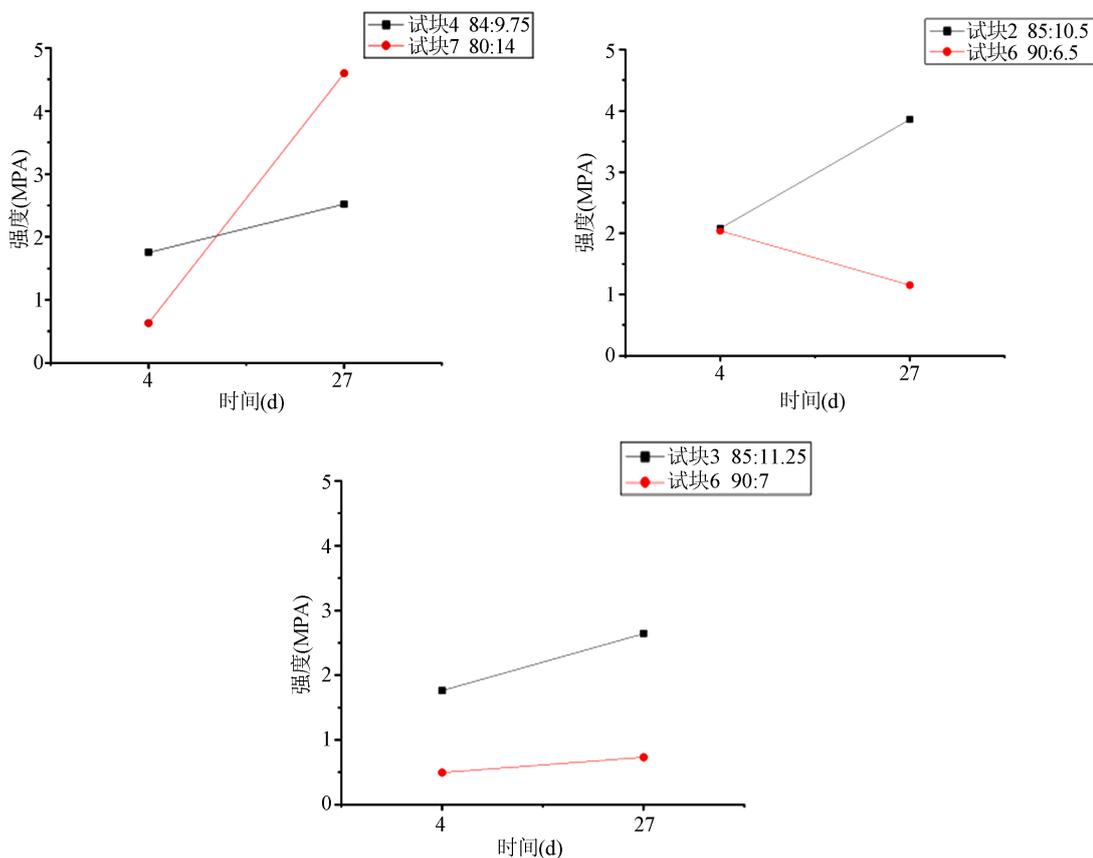


Figure 2. Comparison of test block strength  
图 2. 试块强度对比

### 4.3. 胶结料成分影响

试验结果表明, 当固体质量浓度基本不变, 煤矸石占比不变时提高胶结料中粉煤灰比例可以提高煤矸石充填体流动性、沁水率指标, 但会影响单轴抗压强度。由于当煤矸石骨料占比为 90 时, 充填体各项性能都会受到严重影响, 故分析胶结料成分时, 只分析煤矸石占比为 80 和 85 的试块。

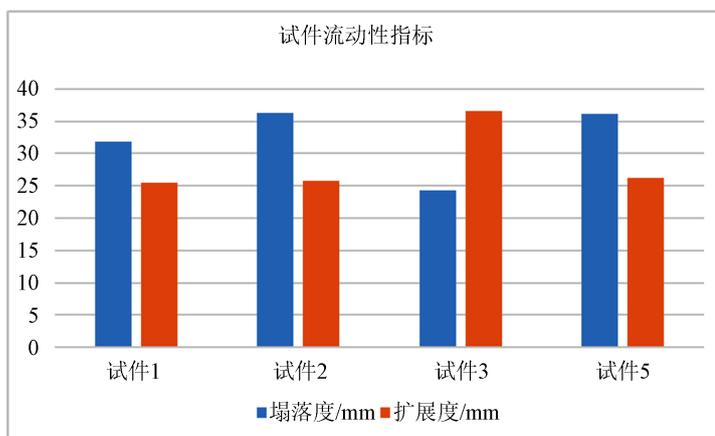


Figure 3. Test block fluidity comparison  
图 3. 试块流动性对比

图3表明试块2相比试块1, 试块5相比试块3都有着更好的流动性, 试块2、5胶结料的粉煤灰比例都达到了25%以上, 试块1、3粉煤灰比例低于24%。煤灰对胶结充填体的影响有利有弊, 适量的粉煤灰可以使流动性和减少泌水率达到最佳效果, 粉煤灰过多则容易导致强度下降, 如图4在提高胶结料粉煤灰占比后, 试块2在4d、27d的单轴抗压强度比试块1降低0.724、0.52MPa, 试块5在4d的单轴抗压强度比试块3降低1.03MPa。

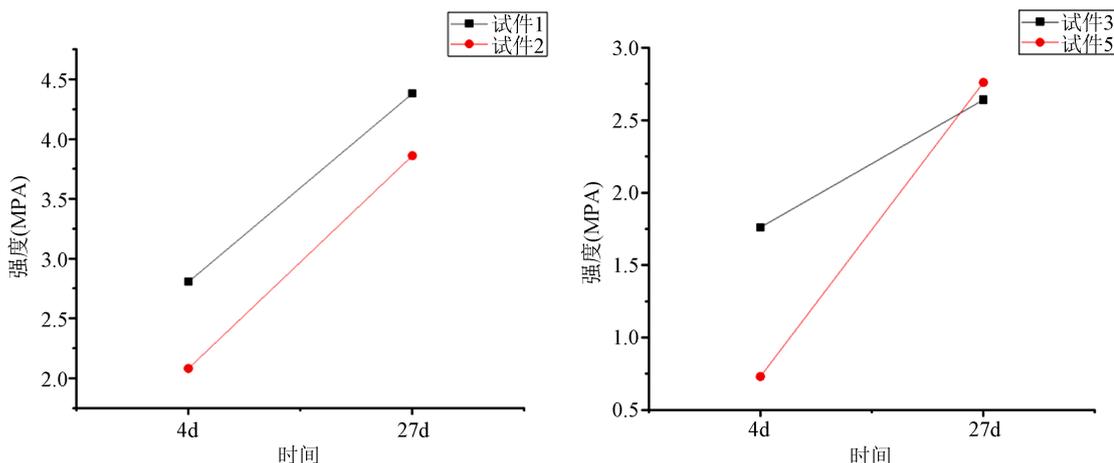


Figure 4. Comparison of test block strength

图4. 试块强度对比

## 5. 结论

1) 固体质量浓度对于煤矸石充填体抗压强度有非常大的影响, 在骨料、胶结料一定的情况下, 固体质量浓度越接近80%, 充填体强度越高, 并且固体质量浓度的提高也可以带来更低的沁水率。

2) 在固体质量浓度一定的情况下, 提高煤矸石水泥比例中的水泥占比能很大程度上提高煤矸石充填体的流动性指标、抗压强度, 随着养护临期的增加, 掺入更多水泥的充填体内部流动性更强、空隙更小、试块密实度更好。

3) 添加粉煤灰可以利用其特性替代部分水泥, 改变充填体的粒级组成, 但粉煤灰对充填体的影响有利有弊, 它可以提高煤矸石充填体流动性、沁水率指标, 也会在一定程度上影响充填体的强度。

4) 在试验的9种配比方案中, 当固体质量浓度为80, 煤矸石水泥粉煤灰比例为80:14:6时, 浆料流动性、沁水率指标以及充填体27d强度达到最佳, 对煤矸石充填体在真实工况下的实际应用有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] 顾晓薇, 张延年, 张伟峰, 赵昫奇, 李晓慧, 王宏宇. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望[J]. 金属矿山, 2022(1): 2-13. <https://doi.org/10.19614/j.cnki.jsks.202201001>
- [2] Bell, F.G., Stacey, T.R. and Genske, D.D. (2000) Mining Subsidence and Its Effect on the Environment: Some Differing Examples. *Environmental Geology*, **40**, 135-152. <https://doi.org/10.1007/s002540000140>
- [3] 张博, 彭苏萍, 王佟, 宋梅. 构建煤炭资源强国的战略路径与对策研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 88-96.
- [4] 吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 陈顺满, 韩悦. 中国膏体技术发展现状与趋势[J]. 工程科学学报, 2018, 40(5): 517-525. <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.05.001>
- [5] Xu, J., Xuan, D. and He, C. (2014) Innovative Backfilling Longwall Panel Layout for Better Subsidence Control Effect-Separating Adjacent Subcritical Panels with Pillars. *International Journal of Coal Science & Technology*, **1**, 297-305.

<https://doi.org/10.1007/s40789-014-0018-1>

- [6] 宋振骐, 崔增娣, 夏洪春, 汤建泉, 文志杰. 无煤柱矸石充填绿色安全高效开采模式及其工程理论基础研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 705-710. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2010.05.017>
- [7] 金会心, 吴复忠, 朱明燕, 刘倩. 贵州六盘水煤矸石的矿物特性[J]. 过程工程学报, 2014, 14(1): 151-156.
- [8] 王新民, 卢央泽, 张钦礼, 等. 影响煤矸石胶结充填体特性的因素分析[C]//中国金属学会. 金属矿采矿科学技术前沿论坛论文集: 2006年卷. 2006: 73-77.
- [9] 周翔, 齐红军, 张笃学, 高文, 张延旭, 简勇. 煤矸石充填材料配比试验研究[J]. 采矿技术, 2020, 20(1): 33-35+39. <https://doi.org/10.13828/j.cnki.ckjs.2020.01.009>