

# 粉煤灰膏体充填材料工作性能影响因素研究\*

李明<sup>1,2</sup>, 李起行<sup>2</sup>, 吴相儒<sup>2</sup>, 邬志雄<sup>3</sup>

(1. 河南能源集团永煤公司陈四楼煤矿, 河南永城市 476617;

2. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏徐州市 221116;

3. 内蒙古准格尔旗力量煤业有限公司, 内蒙古鄂尔多斯市 010323)

**摘要:**为促进充填开采的推广应用,采用正交试验的方法,通过泌水率、坍落度和单轴抗压强度试验,研究了料浆质量浓度、矸石粒径、矸灰比和粉煤灰替代率对粉煤灰基膏体充填材料输送和力学性能指标的影响规律,给出了当前试验阶段充填材料的最佳配比。结果表明:料浆质量浓度是输送性能的主控因素,粉煤灰替代率和矸灰比次之,矸石粒径的影响较小;料浆质量浓度也是力学性能的主控因素,矸灰比次之,粉煤灰替代率和矸石粒径的影响较小;现阶段粉煤灰基膏体充填材料的较优配比为80%料浆质量浓度、0~5 mm 矸石粒径、1.0 矸灰比以及30%粉煤灰替代率。研究成果对于降低充填成本具有重要意义。

**关键词:**粉煤灰;膏体充填;正交试验;输送性能;力学性能

**中图分类号:**TD853.34 **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2024)06-0065-07

## 0 引言

煤炭资源开采过程中常伴随着地表沉陷、水土流失等生态环境破坏<sup>[1-4]</sup>,随着我国煤炭资源发展重心向西部转移,合理开采西部干旱半干旱脆弱矿区煤炭资源已成为煤炭开采的重点和难点<sup>[5-8]</sup>。充填采煤技术作为实现煤炭资源绿色开采的重要途径之一,能够同时兼顾煤矿开采过程中的经济效益与生态环境保护<sup>[9-10]</sup>,得到了推广应用。但当前膏体充填开采成本较高,使得常规的充填采煤技术难以推广应用<sup>[11-13]</sup>,且胶凝材料成本占充填成本的70%以上,因此,降低胶凝材料的用量以降低充填成本,对提高矿区经济效益具有重要意义。

近年来,国内外研究者针对工业固废替代水泥制备膏体充填材料开展了大量的研究。冯岫等<sup>[14]</sup>研究了矿物掺合料与建筑垃圾协同制备的充填材料的力学性能,并对其水化机理进行了深入研究。

张海波等<sup>[15]</sup>探讨了煤气化炉渣对煤矸石膏体充填材料性能的影响规律。王栋<sup>[16]</sup>探讨了煤矸石基充填料浆输送管道的流致力学响应特性,分析了煤矸石基充填料浆输送性能影响因素的主次关系。李新旺等<sup>[17]</sup>对矸石粉替代粉煤灰膏体充填材料的输送性能和力学性能开展了试验研究。海龙等<sup>[18]</sup>通过实验室试验,研究了粉煤灰改良铁尾矿膏体充填材料的力学性能,确定了材料的力学强度演化规律。张鹏等<sup>[19]</sup>通过研究粉煤灰掺量对膏体泵送性能的优化效果,明确了粉煤灰对膏体抗离析性能的作用机理。赵兵朝等<sup>[20]</sup>测试了黄土-粉煤灰基新型充填材料的力学性能,确定了不同类型粉煤灰、不同黄土含量条件下膏体充填材料的屈服应力和抗压强度等参数。

综上分析可知,利用工业固废制备矿山充填材料已得到广泛研究与应用,但粉煤灰替代水泥并给出合适替代率的研究相对较少。本文利用 $L_9(3^4)$ 正交试验,系统地测试了粉煤灰基膏体充填材料的工程性能,并给出了其输送性能和力学性能的影响因素次序,得到了当前试验粉煤灰基膏体充填材料的优势配比。研究成果对于扩大粉煤灰使用率,降低水泥用量和充填成本,促进煤炭资源绿色开采具有重要意义。

## 1 试验材料组成及其特性

试验研究的膏体胶结充填原材料主要由煤矸石、粉煤灰、水泥和水组成,其中煤矸石取自某矿附近的洗选矸石,粉煤灰取自某矿附近的燃煤电厂原灰,水泥采用标号为42.5的普通硅酸盐水泥,购买自某矿附近水泥厂,充填料浆搅拌用水为普通自来水。煤矸石经破碎筛分为0~5 mm、5~10 mm和10~15 mm三种粒径。材料粒径分布和XRD结果

\* 收稿日期:2023-11-21

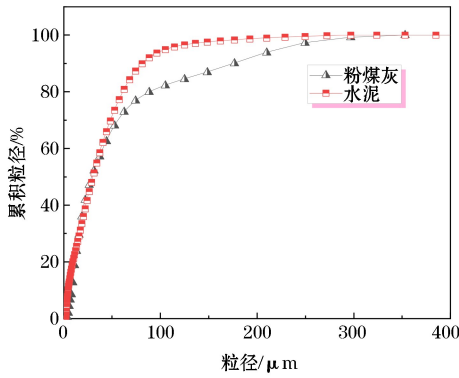
基金项目:国家自然科学基金项目(52104103,52022107)。

作者简介:李明(1984—),男,吉林松原人,硕士,高级工程师,主要从事煤矿技术管理工作,E-mail:1421741096@qq.com。

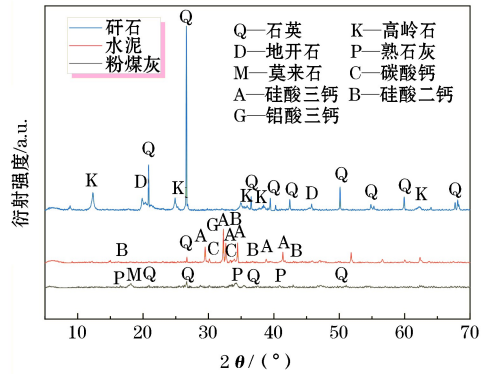
通信作者:李起行(2000—),男,河南许昌人,硕士,主要从事煤基固废处置研究,E-mail:1534291907@qq.com。

如图 1 所示。XRD 结果(见图 1(b))显示,煤矸石中的主要矿物为石英以及少量的高岭石、地开石等;粉煤灰中含有较多的熟石灰、莫来石以及少量的石英等。粉煤灰粒径测试分析结果(见图 1(a))表明,

其粒径范围为 3~350 μm,主要粒径为 20~50 μm;水泥中含有较多的硅酸三钙、硅酸二钙以及铝酸三钙等,且硅酸三钙的含量最高。水泥粒径范围为 2~270 μm,主要粒径为 10~70 μm。



(a) 试验材料粒径分布



(b) 试验材料 X 射线衍射图谱

图 1 试验材料物理化学特性测试结果

Fig.1 Test results of physical and chemical properties of experimental materials

## 2 正交试验

### 2.1 正交试验方案

充填料浆由多种材料混合搅拌配置而成,属于混料配比,因此,在进行充填材料配比方案优选的过程中,不仅需要考虑单一因素影响,而且需要考虑多种因素之间的交互作用<sup>[21-23]</sup>。本文采用正交试验对粉煤灰基膏体充填材料各影响因素间的交互作用进行全面分析,参照现已成熟使用的矸石、粉煤灰胶结充填材料配比<sup>[10]</sup>,选用料浆质量浓度、矸石粒径、矸灰比和粉煤灰替代率作为试验影响因素,各因素分别设置 3 个正交水平,正交试验影响因素水平见表 1。

### 2.2 正交试验结果

根据正交试验因素与水平的数量关系,选用  $L_9(3^4)$  正交试验表设计 9 组配比并进行测试,得到

相应的输送性能和力学性能指标测试结果(见表 2)。根据表 2 粉煤灰基膏体充填材料正交试验测试结果可知,充填材料的泌水率为 4.28%~7.75%,坍落度为 165~203 mm,这说明粉煤灰基膏体充填材料的流动性能较好,且均满足泌水率(5%)和坍落度(160 mm)指标要求。充填材料的早期强度为 0.18~0.45 MPa,后期强度为 0.98~2.03 MPa,由此可知,虽然粉煤灰基膏体充填材料力学强度普遍较小,但绝大多数配比能够满足强度指标要求。

表 1 正交试验影响因素及其水平

Table 1 Influencing factors and their levels in orthogonal test

正交水平	料浆质量浓度 (A)/%	矸石粒径 (B)/mm	矸灰比 (C)	粉煤灰替代率 (D)/%
1	76	0~5	1.0	10
2	78	5~10	1.2	30
3	80	10~15	1.4	50

表 2  $L_9(3^4)$  正交试验方案及测试结果

Table 2  $L_9(3^4)$  orthogonal test scheme and test results

试验序号	正交试验矩阵水平值				输送性能指标		力学性能指标	
	料浆质量浓度 (A)	矸石粒径 (B)	矸灰比 (C)	粉煤灰替代率 (D)	泌水率/%	坍落度/mm	早期强度/MPa	后期强度/MPa
S1	1	1	1	1	7.55	203	0.31	1.86
S2	1	2	2	2	7.75	196	0.28	1.52
S3	1	3	3	3	7.08	185	0.18	0.98
S4	2	1	2	3	5.75	175	0.33	1.64
S5	2	2	3	1	6.8	183	0.29	1.73
S6	2	3	1	2	6.68	185	0.34	1.95
S7	3	1	3	2	4.86	168	0.41	2.03
S8	3	2	1	3	4.28	165	0.43	1.97
S9	3	3	2	1	5.15	172	0.45	1.88

## 2.3 正交试验结果分析

为进一步确定混合正交试验配比中各影响因素对试验指标的影响程度,采用直观分析法和方差分析法对试验结果进行评估,其中方差分析能够有效消除误差的影响,验证直观分析的准确性,并给出各因素对指标的显著性影响程度<sup>[17]</sup>。直观分析将得出极差( $R$ )用于判断各因素对指标影响的主次顺序。方差分析将得出偏差平方和( $S$ )以及均方( $F$ ),其中  $S$  用于验证直观分析正确性, $F$  用于判断各因

素对指标的显著性。极差分析结果见表 3,方差分析结果见表 4。

表 3 正交试验结果极差分析

影响因素	泌水率	坍落度	早期强度	后期强度
料浆质量浓度(A)	3.66	26.334	0.17	0.51
矽石粒径(B)	0.25	1.333	0.03	0.24
矽灰比(C)	0.35	5.666	0.07	0.35
粉煤灰替代率(D)	1.07	11	0.04	0.30

表 4 正交试验结果方差分析

Table 4 Analysis of variance of orthogonal test results

指标	波动来源	S	自由度 $D_f$	F	临界检验值 $F_\alpha$	显著水平
泌水率	料浆质量浓度(A)	20.469	2	211.021	19	非常显著
	矽石粒径(B)	0.097	2	1	19	一般显著
	矽灰比(C)	0.187	2	1.928	19	一般显著
	粉煤灰替代率(D)	1.757	2	18.113	19	一般显著
	误差	0.1	2			
坍落度	料浆质量浓度(A)	1040.667	2	390.201	19	非常显著
	矽石粒径(B)	2.667	2	1	19	一般显著
	矽灰比(C)	48.667	2	18.248	19	一般显著
	粉煤灰替代率(D)	194	2	72.741	19	非常显著
	误差	2.67	2			
早期强度	料浆质量浓度(A)	0.046	2	46	19	非常显著
	矽石粒径(B)	0.001	2	1	19	一般显著
	矽灰比(C)	0.008	2	8	19	一般显著
	粉煤灰替代率(D)	0.002	2	2	19	一般显著
	误差	0	2			
后期强度	料浆质量浓度(A)	0.394	2	4.529	19	一般显著
	矽石粒径(B)	0.087	2	1	19	一般显著
	矽灰比(C)	0.191	2	2.195	19	一般显著
	粉煤灰替代率(D)	0.178	2	2.046	19	一般显著
	误差	0.09	2			

### 2.3.1 输送性能测试结果分析

根据正交试验结果计算出各水平坍落度和泌水率的平均响应值,并绘制输送性能指标敏感性分析曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,泌水率和坍落度均对料浆质量浓度和粉煤灰替代率的变化较敏感,且随着料浆质量浓度和粉煤灰替代率的增大而逐渐减小;但料浆质量浓度对泌水率和坍落度的影响更显著。当料浆质量浓度由 76% 增大至 80% 时,泌水率由 8.59% 降低至 4.93%,坍落度则由 194.67 mm 降低至 168.33 mm;而粉煤灰替代率由 10% 增大至 50% 时,其泌水率由 7.21% 降低至 6.14%,坍落度则由 186 mm 降低至 175 mm。一方面,由于充填料浆中的自由水具有润滑作用,在保证固相材料含量与组成不变的条件下,增大料浆质量浓度则直接降低了水分用量,自由水分的减小将增大充填料浆的黏聚力和颗粒

下沉的摩擦阻力,抑制料浆的离析,进而表现为随着各因素水平的增大,坍落度和泌水率均逐渐减小;另一方面,由于粉煤灰颗粒较小、比表面积较大,在与水混合搅拌时,其表面湿润时会消耗较多的自由水,从而减少料浆中的自由水分,进而降低泌水率和坍落度。矽石粒径和矽灰比对泌水率和坍落度的影响规律一致,整体表现为矽石粒径和矽灰比越大,充填料浆的泌水率越大,坍落度越小。这主要是因为矽石以骨料的形式存在于充填料浆中,其颗粒越大,沉降速度越快,充填料浆的离析程度越大,和易性也越差,泌水越严重,流动度则越低;而矽灰比对输送性能的影响则是因为矽灰比越大,料浆体系中的矽石用量越高,而胶凝材料(水泥和粉煤灰)的用量则越低,粉末状胶凝材料对充填料浆和易性的改善能力越差,因此泌水严重,流动度也相应降低。

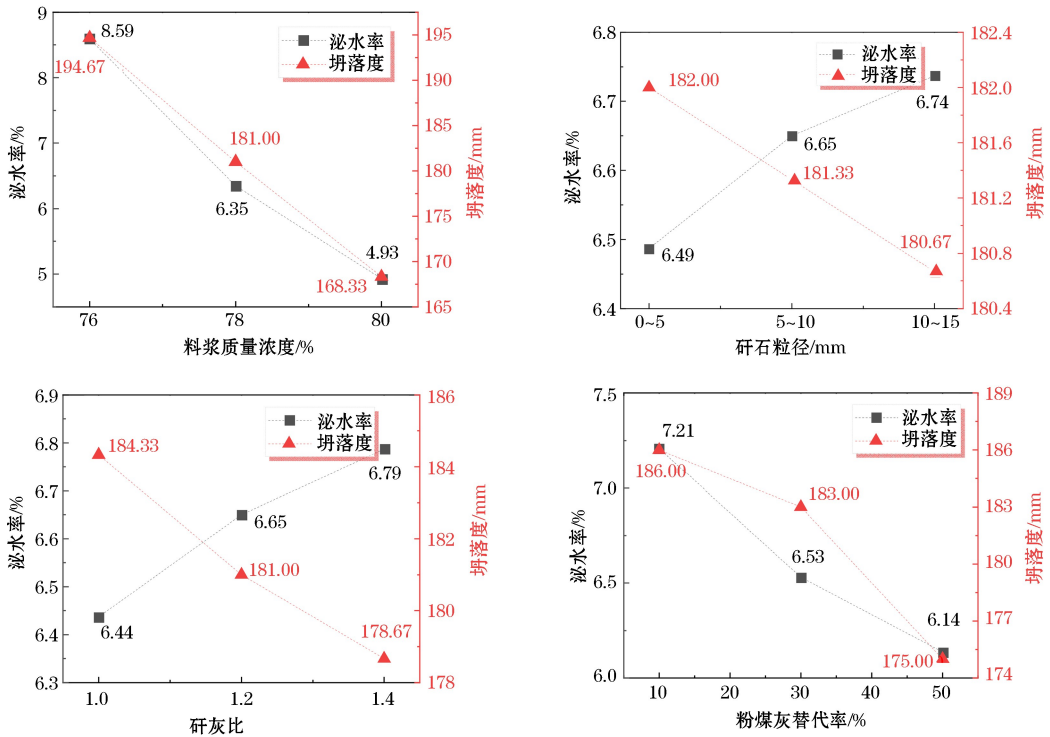


图2 输送性能指标敏感性分析曲线

Fig.2 Sensitivity analysis curves of transport performance index

根据表3可知,对于粉煤灰基膏体充填材料的输送性能而言,泌水率和坍落度指标的各影响因素对应极差的关系均为 $R_A > R_D > R_C > R_B$ 。根据表4方差分析结果可知,泌水率和坍落度的各影响因素对应的偏差平方和的大小关系也均为 $S_A > S_D > S_C > S_B$ ,这与直观分析所得出的结论一致,即料浆质量浓度是输送性能的主要影响因素,其次是粉煤灰替代率,而矽灰比和矽石粒径的影响最小。根据方差分析结果中 $F$ 值的大小可知,料浆质量浓度对坍落度的影响非常显著,对泌水率也具有一般显著性影响,粉煤灰替代率对坍落度和泌水率均具有非常显著性影响,而矽石粒径和矽灰比对输送性能指标存在一般显著性影响。

### 2.3.2 力学性能测试结果分析

根据正交试验结果计算出各水平早期强度和后期强度的平均响应值,并绘制力学性能指标敏感性分析曲线,如图3所示。由图3可知,当料浆质量浓度由76%增大至80%时,其早期强度由0.26 MPa增大至0.43 MPa,后期强度则由1.45 MPa增大至1.96 MPa,即早期强度和后期强度均随着料浆质量浓度的增大而逐渐增大。这主要是因为充填料浆固结过程中,其内部所含的自由水分因挥发或胶凝水化反

应被消耗,而自由水所占的空间则逐渐变成空隙,因此充填料浆质量浓度越高,其所含的自由水分越少,料浆密实度越大,充填体强度也越高。矽石粒径和矽灰比对早期强度和后期强度的影响规律具有相似性,整体表现为矽石粒径越大或矽灰比越大,充填体的力学强度越小。这主要是因为矽石粒径越大,料浆的离析程度越高,充填料浆的均一性越差,进而降低了充填体力学强度;矽灰比对力学强度的影响,则是因为矽灰比的增大,提高了充填材料中的矽石用量,且降低了胶凝材料的用量,进而降低了充填材料的胶结能力。根据粉煤灰替代率对力学强度的影响规律可知,早期强度随着粉煤灰替代率的增大而减小,这主要是因为粉煤灰的早期水化能力远小于水泥,其替代率越高,水泥的用量则越低,因此早期强度越小;对于后期强度而言,当粉煤灰替代率越高,充填体后期强度先轻微增大后减小,当粉煤灰替代率为30%时,其后期强度取得最大值1.83 MPa,较替代率为10%的后期强度增大了0.01 MPa;当粉煤灰替代率增大至50%时,其后期强度迅速减小至1.53 MPa。这主要是因为粉煤灰颗粒具有填料作用,能够增大充填体的密实度,且养护后期粉煤灰发生了火山灰反应,在一定程度上弥补了水泥用量减少而引起的胶结能力不足。

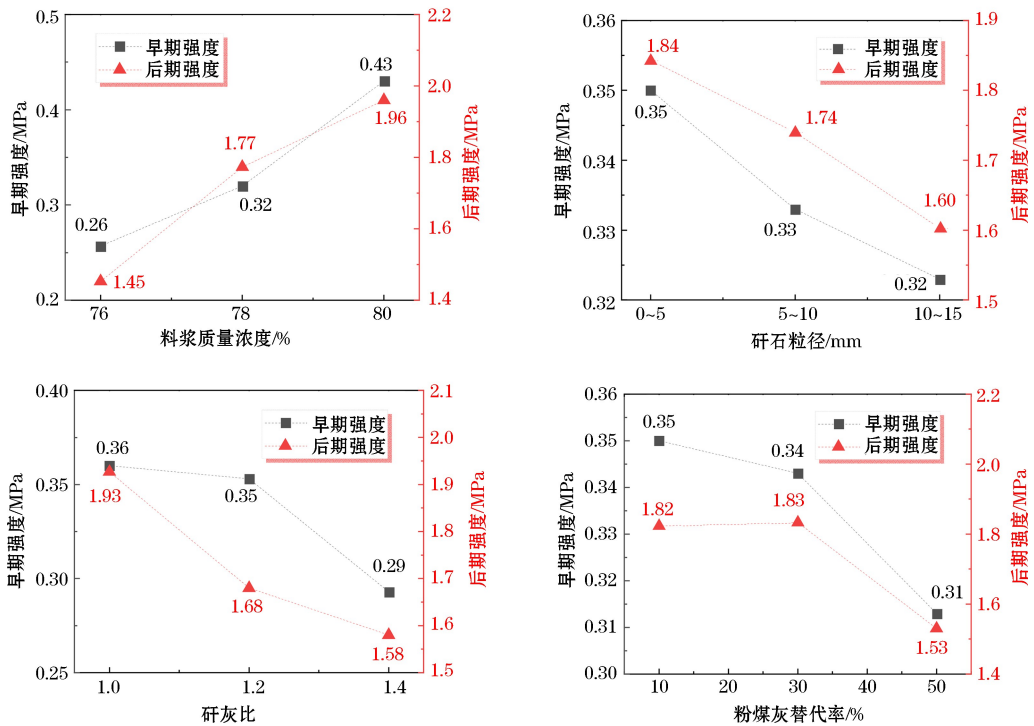


图3 力学强度指标敏感性曲线

Fig.3 Sensitivity curves of mechanical strength index

根据表3和表4可知,对于膏体胶结充填材料的早期强度和后期强度而言,各因素对应的极差和偏差平方和的大小关系一致,分别为 $R_A > R_C > R_D > R_B$ 和 $S_A > S_C > S_D > S_B$ ,即料浆质量浓度是力学强度的主要影响因素,矸灰比和粉煤灰替代率次之,而碎石粒径的影响最小。此外,根据方差分析结果的 $F$ 值大小关系可知,料浆质量浓度和粉煤灰替代率对早期强度的影响均非常显著,且料浆质量浓度对早期强度的影响显著性要远高于粉煤灰替代率,而碎石粒径和矸灰比对早期强度和后期强度存在一般显著性影响。

#### 2.4 粉煤灰基膏体充填材料较优配比确定

结合直观分析和方差分析结果可知,对于泌水率、坍塌度、早期强度和后期强度而言,此次试验的优势组合分别为 $A_3B_1C_1D_3$ 、 $A_1B_3C_3D_1$ 、 $A_3B_1C_1D_1$ 和 $A_3B_1C_1D_2$ 。由于料浆质量浓度对输送性能和力学性能指标均存在非常显著性影响,且粉煤灰基膏体充填料浆的坍塌度均大于160 mm,即均满足要求,因此,选择最优的料浆质量浓度为 $A_3$ (80%),碎石粒径为 $B_1$ (0~5 mm),矸灰比为 $C_1$ (1.0),粉煤灰替代率为 $D_1$ (10%)或 $D_2$ (30%);另外,由于粉煤灰替代率为30%的后期强度略高,且粉煤灰替代率增大有助于降低充填材料

成本,因此,最佳粉煤替代率为 $D_2$ (30%)。综上所述可知,当前试验条件下,粉煤灰基膏体充填材料的最优配比为:80%料浆质量浓度、0~5 mm碎石粒径、1.0矸灰比以及30%粉煤灰替代率。

### 3 结论

本文通过正交试验探讨了粉煤灰替代水泥对粉煤灰基膏体充填材料输送性能和力学性能的影响规律,并对输送和力学性能指标显著性影响因素进行了分析,得出以下结论。

(1) 粉煤灰基膏体充填材料的泌水率范围为4.28%~7.75%,坍塌度范围为165~203 mm;充填材料的早期强度范围为0.18~0.45 MPa,后期强度范围为0.98~2.03 MPa。

(2) 粉煤灰基膏体充填材料输送性能影响因素的主次顺序为:料浆质量浓度、粉煤灰替代率、矸灰比和碎石粒径。力学性能影响因素的主次顺序为:料浆质量浓度、矸灰比、粉煤灰替代率和碎石粒径。料浆质量浓度对粉煤灰基膏体充填材料输送性能和力学性能的影响均非常显著;粉煤灰替代率仅对输送性能有显著性影响,而碎石粒径和矸灰比的输送性能和力学性能的影响较小。

(3) 试验得出当前粉煤灰基膏体充填材料的最

优组合配比为:80%料浆质量浓度、0~5 mm 矽石粒径、1.0 矽灰比以及 30%粉煤灰替代率。

#### 参考文献(References):

- [1] 张吉雄,鞠杨,张强,等.矿山生态环境低损害开采体系与方法[J].采矿与岩层控制工程学报,2019(2):56-68.  
ZHANG Jixiong, JU Yang, ZHANG Qiang, et al. Low ecological environment damage technology and method in coal mines [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2019(2):56-68.
- [2] 任帅,罗勇,肖殿才,等.采动影响下瓦斯综治巷围岩稳定性控制技术[J].采矿技术,2023,23(2):38-42.  
REN Shuai, LUO Yong, XIAO Diancai, et al. Control technology of surrounding rock stability of gas comprehensive control roadway under the influence of mining[J].Mining Technology,2023,23(2):38-42.
- [3] DENG Xuejie, LI Yu, WANG Fei, et al. Experimental study on the mechanical properties and consolidation mechanism of microbial grouted backfill[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32: 271-282.
- [4] 邓雪杰,刘浩,张吉雄,等.煤矿微生物诱导碳酸钙沉积胶结充填开采技术研究[J].矿业科学学报,2023,8(4):439-451.  
DENG Xuejie, LIU Hao, ZHANG Jixiong, et al. Study on microbial cemented backfill mining technology[J]. Journal of Mining Science and Technology,2023,8(4):439-451.
- [5] 黄艳利,王文峰,卞正富.新疆煤基固体废物处置与资源化利用研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1):319-330.  
HUANG Yanli, WANG Wenfeng, BIAN Zhengfu. Prospects of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang[J]. Coal Science and Technology, 2021,49(1):319-330.
- [6] 宗庭成,张强,时培涛,等.固体充填液压力架机构干涉临界表征与自主解调方法[J].煤炭科学技术,2023,51(8):260-270.  
ZONG Tingcheng, ZHANG Qiang, SHI Peitao, et al. Mechanism interference critical characterization and autonomous demodulation method of solid filling hydraulic support[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 260-270.
- [7] 沈玲玲,丁鹿玮,张羽者,等.面向残煤复采的煤泥基注浆充填材料机械活化机理研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(6):1243-1252.  
SHEN Lingling, DING Luwei, ZHANG Yuzhe, et al. Research on the mechanical activation mechanism of coal slime based grouting filling materials for residual coal remining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2023, 40(6):1243-1252.
- [8] 张吉雄,周楠,高峰,等.煤矿开采嗣后空间矽石注浆充填方法[J].煤炭学报,2023,48(1):150-162.  
ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, GAO Feng, et al. Method of gangue grouting filling in subsequent space of coal mining [J]. Journal of China Coal Society,2023,48(1):150-162.
- [9] 谢和平,张吉雄,高峰,等.煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J].煤炭学报,2024,49(1):36-46.  
XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, et al. Theory and technical conception of carbon-negative and high-efficient backfill mining in coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(1):36-46.
- [10] LI Binglei, LAN Jiquan, SI Guangyao, et al. NMR-based damage characterisation of backfill material in host rock under dynamic loading[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2020,30(3):329-335.
- [11] 刘渝强,耿立锋,郑伯坤,等.细粒级尾砂胶结充填工艺方案的优选与应用[J].采矿技术,2023,23(5):200-206.  
LIU Yuqiang, GENG Lifeng, ZHENG Bokun, et al. Optimization and application of fine-grained tailings cemented filling process scheme [J]. Mining Technology, 2023,23(5):200-206.
- [12] OUYANG Shenyang, HUANG Yanli, ZHOU Nan, et al. Experiment on acoustic emission response and damage evolution characteristics of polymer-modified cemented paste backfill under uniaxial compression[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(8): 1502-1514.
- [13] 孟福杰,张金来,汪兆松.金川二矿区贫矿开采对深部巷道稳定性影响研究[J].矿业研究与开发,2023,43(10):74-80.  
MENG Fujie, ZHANG Jinlai, WANG Zhaosong. Study on the influence of lean ore mining on the stability of deep roadway in Jinchuan No.2 mining area[J]. Mining Research and Development,2023,43(10):74-80.
- [14] 冯岫,靳静,王晓宾,等.矿物掺合料协同建筑垃圾充填材料性能研究与水化机理[J].矿业研究与开发,2023,43(6):77-82.  
FENG Shen, JIN Jing, WANG Xiaobin, et al. Study on the performance and hydration mechanism of mineral admixture cooperate with construction waste filling materials [J]. Mining Research and Development,2023,43(6):77-82.
- [15] 张海波,郭朝阳,郭晋辉,等.煤气化炉渣对煤矽石膏体充填材料性能影响[J].河南理工大学学报(自然科学版),2024,43(1):165-171.  
ZHANG Haibo, GUO Zhaoyang, GUO Jinhui, et al. Effect of coal gasification slag on the properties of gangue gypsum filling materials[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2024,43(1):165-171.
- [16] 王栋.煤矽石基充填料浆管道输送流致力学响应特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.  
WANG Dong. Study on pipe flow characteristics of coal gangue-based filling slurry and its flow-induced mechanical response characteristics of conveying pipeline [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2023.

- [17] 李新旺,温学君,程立朝,等.研石粉替代粉煤灰膏体充填材料性能研究[J].煤炭工程,2023,55(1):136-142.  
LI Xinwang, WEN Xuejun, CHENG Lichao, et al. Performance of paste filling material with gangue powder replacing fly ash[J]. Coal Engineering,2023,55(1):136-142.
- [18] 海龙,程同俊,徐博,等.粉煤灰改良铁尾矿膏体充填材料试验研究[J].黄金科学技术,2022,30(5):724-732.  
HAI Long, CHENG Tongjun, XU Bo, et al. Experimental study on the paste filling material of iron tailings improved by fly ash[J]. Gold Science and Technology,2022,30(5):724-732.
- [19] 张鹏,高谦,王有团,等.粉煤灰掺量对泵送膏体充填料浆的抗离析性能影响规律[J].中国有色金属学报,2022,32(1):302-312.  
ZHANG Peng, GAO Qian, WANG Youtuan, et al. Influence of fly ash content on segregation resistance of pumped paste filling slurry [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2022,32(1):302-312.
- [20] 赵兵朝,王海龙,翟迪,等.黄土-粉煤灰基新型充填材料性能研究[J].硅酸盐通报,2022,41(1):199-208.  
ZHAO Bingchao, WANG Hailong, ZHAI Di, et al. Performance of a new type of backfilling material based on loess-fly ash [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2022,41(1):199-208.
- [21] 尹博,康天合,康健婷,等.粉煤灰膏体充填材料水化动力过程与水化机制[J].岩石力学与工程学报,2018,37(增刊2):4384-4394.  
YIN Bo, KANG Tianhe, KANG Jianting, et al. The research of the hydration kinetics process and hydration mechanism of fly ash paste filling materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(S2):4384-4394.
- [22] 姚直书,李欣慰,程桦,等.西部含水弱胶结围岩-充填层-钻井井壁流固耦合作用机理分析[J].采矿与安全工程学报,2023,40(6):1177-1190.  
YAO Zhishu, LI Xinwei, CHENG Hua, et al. Analysis of fluid-solid coupling mechanism of water-bearing weakly cemented surrounding rock-filling layer-drilling shaft lining in the west of China [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2023,40(6):1177-1190.
- [23] 马明辉.残矿回采围岩-充填体协同承载机制与稳定性分析[D].北京:北京科技大学,2023.  
MA Minghui. Collaborative bearing mechanism of surrounding rock-backfill and stability analysis in residual ore recovery [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2023.

### Study on Influencing Factors of Working Performance of Fly Ash Paste Filling Materials

LI Ming<sup>1,2</sup>, LI Qihang<sup>2</sup>, WU Xiangru<sup>2</sup>, WU Zhixiong<sup>3</sup>

(1.Chensilou Coal Mine, Yongcheng Coal Co., Ltd., Henan Energy Group Co., Ltd., Yongcheng, Henan 476617, China;

2.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3.Inner Mongolia Zhungeer Banner Power Coal Industry Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010323, China)

**Abstract:** In order to promote the popularization and application of filling mining, the orthogonal test method was adopted to study the effects of slurry mass concentration, gangue particle size, gangue-ash ratio and fly ash replacement rate on the transportation and mechanical properties of fly ash paste filling materials through tests of water loss rate, slump and uniaxial compression. The optimal ratio of filling materials in the current experimental stage was given. The results show that the slurry mass concentration is the main factor of transportation performance, followed by fly ash replacement rate and gangue-ash ratio, and the influence of gangue particle size is small. Slurry mass concentration is also the main factor of mechanical properties, followed by gangue-ash ratio, and the effects of fly ash replacement rate and gangue particle size are relatively small. At present, the optimal ratio of fly ash paste filling materials is slurry mass concentration of 80%, gangue particle size of 0-5 mm, gangue ash ratio of 1.0 and fly ash replacement rate of 30%. The research results are of great significance for reducing the filling cost.

**Key words:** Fly ash, Paste filling, Orthogonal test, Transport performance, Mechanical property