

掺粉煤灰的混合充填骨料配比优化实验

卓庆奉¹, 巴蕾¹, 王奇峰²

(1. 鄂尔多斯职业学院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 2. 国家能源集团神东煤炭集团信息中心, 陕西 榆林 719000)

摘要: 针对某矿山采用混合粗骨料存在充填料浆分层离析的问题, 通过添加粉煤灰细骨料来优化骨料级配。首先对充填材料进行物化分析, 并在此基础上开展不同粉煤灰掺量的混合骨料粒径级配分析, 然后进行掺粉煤灰混合骨料充填体强度实验, 实验结果表明: 充填体强度随着料浆浓度与粉煤灰掺量的增加而提高, 强度改善明显; 掺入适量粉煤灰细骨料, 能有效改善粒径级配, 提高充填体强度。最后以单位充填成本为优化目标, 以各龄期强度为约束条件建立优化模型对混合骨料充填配比进行优化, 得出满足充填强度要求的最低成本方案, 即粉煤灰掺量26%、胶凝材料添加量为286 kg/m³, 料浆浓度为81.36%时充填材料成本最低, 并以此进行验证实验, 得到3 d强度为1.56 MPa, 7 d强度为2.86 MPa, 28 d强度为6.9 MPa, 塌落度25.6 cm, 分层度3.1 cm, 泌水率为5.7%, 均满足矿山要求, 此时充填成本为124元/m³, 较原来的145元/m³降低了14%。

关键词: 采矿充填; 离析; 粉煤灰; 混合骨料; 强度; 配比; 优化

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.03.030

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2021)03-0187-07

近年来, 随着国家对安全和环保要求的提高, 充填采矿法在世界范围内得到越来越广泛的应用^[1-3]。一方面是由于地下开采深度加大后维护矿山和采场稳定的需要, 另一方面是提高自然资源回收率和环境保护的需要^[4-5]。充填采矿技术在采矿活动中的应用不仅可以最大化地回收矿石资源, 降低矿石贫化, 而且还能够有效地控制采场地压, 减少地表下沉, 具有回采作业安全、资源回采率高、保护矿山环境以及废弃物资源化^[6-7]。实现安全采矿, 降低采矿成本和提高采矿经济效益, 是充填法采矿一直追求的目标。在充填采矿法中, 高浓度管输胶结充填采矿法是目前常用的方法, 其不仅具有安全高效等特点, 而且能够对采矿和选矿活动中产生的废石和尾砂等固体废弃物进行综合利用, 有效减少环境污染^[8], 但是在充填过程中容易产生充填料浆的分层离析, 不但影响充填体强度, 严重地可能造成堵管和爆管影响充填效率,

甚至危及采矿安全^[9]。造成料浆离析的因素很多, 其中骨料的配比及级配是其中重要因素之一^[10-11]。国内外专家学者对此进行了大量研究, 其中, 董培鑫^[10,12-13]等研究了充填骨料粒径级配对料浆流变特性的影响; 杨小聪^[14]等研究了充填体不均匀性对充填的影响; Wang X等^[15-16]研究结果表明, 骨料级配是影响充填料浆分层离析的重要因素。针对甘肃某矿山采用废石和棒磨砂混合粗骨料存在充填料浆分层离析的问题, 本文在前期大量实验研究的基础上, 选择添加粉煤灰作为细骨料, 以期优化混合骨料的级配, 在保证充填体强度的前提下, 改善料浆离析程度, 实现高浓度高流态高效充填采矿。

1 实验材料物化特性分析

1.1 充填骨料

1.1.1 充填骨料物化特性分析

收稿日期: 2020-01-15, 改回日期: 2020-02-24

作者简介: 卓庆奉(1981-), 女, 副教授, 主要从事矿山工程的教学和研究工作。

实验采用混合骨料进行，废石、棒磨砂作为粗骨料，其中废石由矿山井下开拓或采矿活动产生的废石混合料，破碎机破碎后达到矿山填充骨料粒度设计要求，棒磨砂取材于戈壁卵砂石，卵砂石经“两段-闭路”的破碎工艺和棒磨工艺后加工而成，用以充填；粉煤灰作为细骨料，其是从燃煤热电厂排放的粉状物，在高浓度或膏体填充料浆中，添加适量的粉煤灰可显著提高料浆浓度，降低管道输送阻力，改善膏体的泵送性能，对填充骨料进行物理特性以及化学成分测定，结果见表 1、2。

表 1 填充骨料物理参数

Table 1 Physical parameters of filling aggregate

名称	密度 / $(t \cdot m^{-3})$	堆积密度 / $(t \cdot m^{-3})$	含泥量 /%	空隙率 /%	堆积密实度 /%
废石	2.87	1.59	15.05	40.11	59.89
棒磨砂	2.67	1.58	10.98	39.64	60.36
粉煤灰	2.05	0.72	-	-	-

表 2 填充骨料化学成分组成

Table 2 Chemical composition of filling aggregate

名称	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	Cr ₂ O ₃	其他
废石	36.31	28.15	3.39	3.86	-	9.51	-	18.11
棒磨砂	63.60	3.68	-	1.39	3.44	-	0.132	27.58
粉煤灰	32.76	2.91	12.22	1.65	0.44	-	-	48.61

1.1.2 填充骨料粒径分析

采用筛分法对骨料进行粒度分析，结果见图 1。

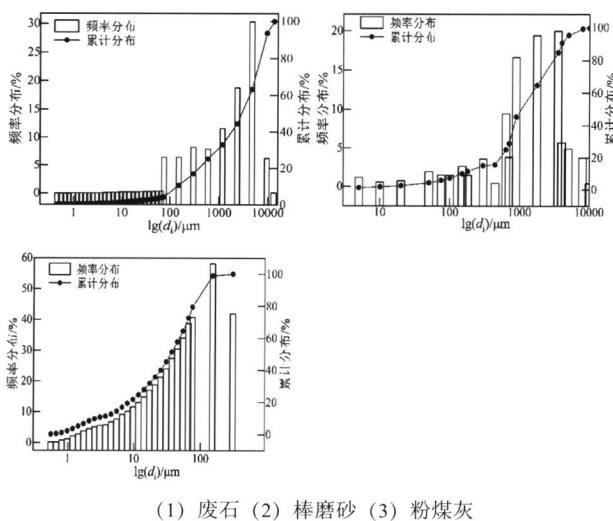


图 1 填充骨料粒径分布特征

Fig.1 Characteristics of particle size distribution of filling aggregate

采用插值法求骨料的特征粒径，见表 3。

表 3 填充骨料特征粒径

Table 3 Characteristic particle size of filling aggregate

名称	d10 / μm	d30 / μm	d60 / μm	d90 / μm	dav / μm	不均匀系数 Cu	曲率系数 Cc	级配指数 n
废石	144.5	912.0	2284.0	8912.5	2711.2	28.84	1.38	0.563
棒磨砂	101.50	366.47	2716.07	1254.67	1254.67	8.32	1.32	0.549
粉煤灰	2.7	15.8	47.5	109.2	46.2	17.6	1.9	0.401

看出废石和棒磨砂的自然级配良好，级配指数分别为 0.563 和 0.549，0.3 mm 以上粒径占 83.09% 和 84.21%，粗颗粒含量较多，在实验中作为粗骨料，根据前期废石-棒磨砂堆积密实度实验，确定废石-棒磨砂较优配比为 3:7，但是若单独使用混合粗骨料仍会造成填充料浆离析，必须掺加一定的细骨料，而粉煤灰不均匀系数为 17.6，0.3 mm 以下粒径占 95% 以上，细颗粒较多，充填中作为细骨料。

1.2 填充胶凝材料

胶凝材料选用由甘肃省永昌县熙金公司生产的新型胶凝材料—“固结粉”，其主要成分为矿渣微粉、脱硫石膏以及熟料，其密度为 2.95 t/m³。

不同粉煤掺量的混合骨料粒径分析

粉煤灰掺量对混合骨料粒径级配有很大影响，根据前期混合骨料堆积密实度实验确定在废石-棒磨砂配比为 3:7 时，粉煤灰掺量在 15%~35% 范围内较优，故以此范围进行混合骨料粒径分析，结果见图 2，相应的特征粒径见表 4。

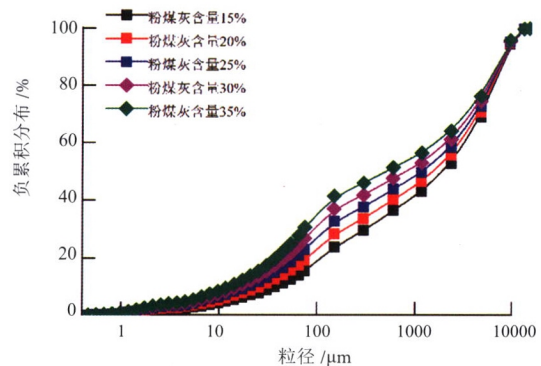


图 2 不同粉煤灰掺量的混合骨料粒径分布特征曲线

Fig. 2 Characteristic curves of particle size distribution of mixed aggregate with different fly ash contents

表4 不同粉煤灰掺量的混合骨料粒径分布特征值

Table 4 Particle size distribution characteristic value of mixed aggregate with different fly ash contents

粉煤灰掺量	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{30}/\mu\text{m}$	$d_{60}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	$d_{av}/\mu\text{m}$	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	级配指数 n
15%	37	320.1	3357.4	8608	2310	90.7	0.8	0.43
20%	26.4	192	2994.1	8486.5	2176.4	113.4	0.5	0.38
25%	19.5	109.7	2598.5	8351.5	2042.7	133.3	0.2	0.35
30%	15.5	82.2	2167	8195.8	1909	139.8	0.2	0.33
35%	12.8	73.6	1699.9	8016.7	1775.3	142.8	0.2	0.31

3 混合骨料充填体强度实验

3.1 实验方案及结果

在混合粗骨料中掺加粉煤灰不仅弥补细颗粒的不足,优化骨料级配,而且有利于形成高浓度料浆,提高其管输性能和充填体强度。为此开展不同比例粉煤灰掺量的混合骨料胶结充填体强度实验,实验方案为:(1)充填骨料采用3:7的废石-棒磨砂粗骨料与不同含量粉煤灰混合骨料,具体掺量为15%、20%、25%、30%、35%;(2)料浆质量浓度为77%、79%、81%;(3)胶凝材料采用“固结粉”新型充填胶凝材料,添加量为270 kg/m³、290 kg/m³、310 kg/m³。具体实验方案及结果见表5,其中前9组为正交实验,后8组为补充实验。

表5 不同粉煤灰掺量的混合骨料充填体强度实验结果
Table 5 Strength test results of mixed aggregate fillers with different fly ash contents

编号	粉煤灰掺量 /%	胶凝材料 / (kg·m ⁻³)	质量浓度 /%	抗压强度 /MPa		
				3d	7d	28d
A1	15	270	77	0.75	1.50	3.00
A2	15	290	79	0.93	1.71	4.40
A3	15	310	81	1.55	2.48	6.66
A4	25	270	79	1.20	1.83	4.59
A5	25	290	81	1.52	2.25	7.04
A6	25	310	77	1.26	1.97	6.27
A7	35	270	81	1.64	2.97	5.33
A8	35	290	77	1.26	2.22	6.14
A9	35	310	79	1.59	2.76	5.78
B1	20	290	79	1.14	2.13	5.18
B2	20	290	81	1.38	2.60	6.21
B3	20	310	79	1.29	2.16	5.87
B4	20	310	81	1.71	2.58	7.23
B5	30	290	79	1.20	2.39	6.41
B6	30	290	81	1.62	3.05	7.64
B7	30	310	79	1.50	2.61	6.99
B8	30	310	81	2.00	3.05	8.58

3.2 实验结果分析

各因素对充填体强度的影响见图3。

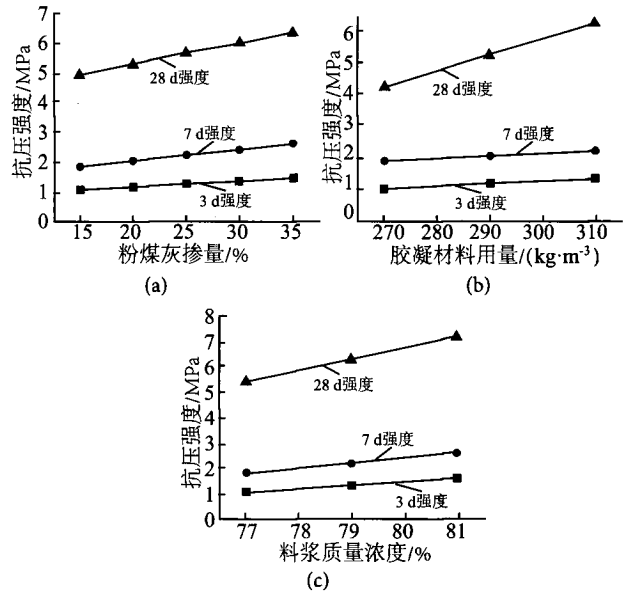


图3 各因素对充填体强度的影响

Fig. 3 The influence of various factors on the strength of filling body

其中图3(a)为胶凝材料添加量290 kg/m³,料浆浓度为79%时粉煤灰掺量对充填体强度的影响,可以看出3 d、7 d和28 d强度均随粉煤灰掺量增加而增大,粉煤灰掺量从15%增加至35%时,各龄期强度分别增大了38.6%、41.4%和29.3%;图3(b)为以粉煤灰掺量20%、料浆浓度为79%时胶凝材料用量对充填体强度的影响,可以看出各龄期强度随着胶凝材料用量增加而逐渐增大,胶凝材料用量从270 kg/m³增加到310 kg/m³时,3 d、7 d和28 d强度分别增大了32.3%、16.5%和48.0%;图3(c)为以粉煤灰掺量20%、胶凝材料添加量290 kg/m³时料浆浓度对充填体各龄期强度的影响,可以看出充填体强度随着料浆浓度的增大而增大,浓度从77%增大到81%,3 d、7 d和28 d强度分别提高了50.1%、44.8%和32.2%

3.3 回归分析

为了揭示粉煤灰掺量、胶凝材料用量和料浆浓度与充填体各龄期强度之间的定量关系，以粉煤灰掺加量 (%)、胶凝材料用量 (kg/m³) 和料浆浓度 (%) 为自变量，并分别以 x₁、x₂ 和 x₃ 来表示，以 3 d、7 d、28 d 的抗压强度 (MPa) 作为因变量，分别以用 R_{3d}、R_{7d} 和 R_{28d} 表示，通过 DPS 数据处理软件建立 R_{3d}、R_{7d} 和 R_{28d} 与 x₁、x₂ 和 x₃ 的回归公式，如式 (1)~(3)：

$$R_{3d} = -12.24 + 0.0208x_1 + 0.0082x_2 + 0.1345x_3 \quad (1)$$

$$R_{7d} = -16.91 + 0.0384x_1 + 0.0078x_2 + 0.2016x_3 \quad (2)$$

$$R_{28d} = -45.34 + 0.072x_1 + 0.0509x_2 + 0.4355x_3 \quad (3)$$

4 掺粉煤灰的混合骨料充填料浆工作特性实验

4.1 实验方案及实验结果分析

矿山充填不仅要满足充填体强度要求，而且要满足充填料浆的管输要求，因此需要对掺粉煤灰的混合骨料充填料浆管输工作特性进行研究。因此，分别测定在不同粉煤灰掺量 (15%、20%、25%、30% 和 35%)、不同胶凝材料添加量 (270、290、310 和 310 kg/m³)、不同浓度 (77%、79% 和 81%) 条件下料浆的塌落度、分层度和泌水率等参数。粉煤灰掺量对充填料浆工作特性的影响见图 4。

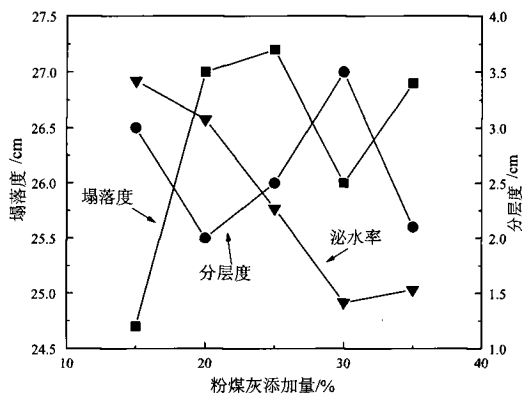


图 4 粉煤灰掺量对充填料浆工作特性的影响

Fig. 4 Effect of fly ash content on working characteristics of filling slurry

图 4 (a) 为粉煤灰掺量对料浆塌落度的影响，可以看出粉煤灰添加量与塌落度的关系并不显著。当塌落度大于 25 cm 时，用塌落度表征料浆可输送性能意义不大，只能定性得到都具有良好的可输送性。塌落度随粉煤灰掺加量的增加先增大后减少，粉煤灰的较佳掺加量为 25%，其他具体的定量的规律需从其他参数得到；从图 4 (b) 可以看出，分层度随粉煤灰添加量的增加呈波动状态，并无明显规律，但是分层度在粉煤灰掺量 35% 时最小；图 4 (c) 为粉煤灰掺量对料浆泌水率的影响，可以看出，整体上，泌水率随粉煤灰掺加量的增加逐渐降低，直到粉煤灰添加量超过 30% 时，泌水率基本平缓不变，这是因为浆体已经达到高浓度浆体“不分层不离析”的极限状态，因此添加粉煤灰可以使浆体的保水性增强，提高浆体的稳定性。

4.2 回归分析

根据料浆工作特性实验结果，对塌落度、分层度和泌水率进行回归分析，从而建立充填料浆工作特性参数与各充填物料之间的函数关系，结果如式 (4)~(6) 所示。

$$T = -1717.57 + 6.05x_1 + 1.22x_2 + 38.32x_3 - 0.014x_1x_1 - 0.206x_3x_3 - 0.0668x_1x_3 - 0.0157x_2x_3 \quad (4)$$

$$F = -147.63 - 2.64x_1 - 1.41x_2 + 9.39x_3 + 0.0014x_2x_2 - 0.076x_3x_3 + 0.0335x_1x_3 + 0.00745x_2x_3 \quad (5)$$

$$M = -1708.91 - 4.26x_1 + 2.58x_2 + 37.24x_3 - 0.00454x_2x_2 - 0.2527x_3x_3 + 0.04787x_1x_3 \quad (6)$$

式中：T、F 和 M 分别为胶结充填体塌落度、分层度和泌水率，MPa；x₁ 为粉煤灰掺加量，%；x₂ 胶凝材料添加量，kg/m³；x₃ 料浆质量浓度，%。

5 混合骨料充填配比优化

在满足矿山充填体强度要求的前提下，尽可能降低充填成本以期获得最大的经济效益，因此，以单位体积的充填成本最低为优化目标，以强度

要求为约束条件建立优化模型进行求解，即充填单位体积所消耗的固结粉、废石、棒磨砂和铜渣尾砂的成本（各物料单位成本见表6）和构成总成本，以矿山对于充填体各龄期强度的要求（即 $R_{3d} \geq 1.5 \text{ MPa}$, $R_{7d} \geq 2.5 \text{ MPa}$, $R_{28d} \geq 5 \text{ MPa}$, $M \leq 10$ ）为约束条件，具体构造如下优化模型：

$$\begin{aligned} \min(Z) &= 0.22x_2 + 0.047x_4 + 0.19x_5 + 0.06x_6 \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 1.5 - 77.27 + 0.04x_1 + 1.9x_2 - 0.01x_2^2 \leq 0 \\ 2.5 - 154.3 - 0.003x_1 + 4.03x_2 - 0.03x_2^2 \leq 0 \\ 5 - 342.7 - 0.012x_1 + 8.72x_2 - 0.06x_2^2 \leq 0 \\ M \leq 10 \\ 7x_5 - 3x_4 = 0 \\ \frac{x_6}{x_4 + x_5 + x_6} = x_1 \\ \frac{x_7}{x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7} = 1 - \frac{x_3}{100} \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中：Z 为单位体积充填料浆成本，元； x_1 为粉煤灰掺加量，%； x_2 胶凝材料添加量， kg/m^3 ； x_3 料浆质量浓度，%； x_4 为单位体积充填料浆中棒磨砂用量， kg ； x_5 为单位体积充填料浆中废石用量， kg ； x_6 为单位体积充填料浆中粉煤灰用量， kg ； x_7 为单位体积充填料浆中水的用量， kg 。

表6 充填材料单位成本
Table 6 Unit cost of filling materials

材料	粉煤灰	废石	棒磨砂	胶凝材料
价格/(元·t ⁻¹)	60	19	47	220

利用 MATLAB 线性优化模型对实验数据按上述建模并分析，在满足充填强度要求的前提下，成本最低的方案为：粉煤灰添加量 $354.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、胶凝材料添加量 $286 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、废石添加量 $305.25 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、棒磨砂用量 $712.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、水用量 $380 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，即：粉煤灰掺量 26%、胶凝材料添加量为 $286 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，料浆浓度为 81.36% 时充填材料成本最低，并以此进行验证实验，得到 3 d 强度为 1.56 MPa，7 d 强度为 2.86 MPa，28 d 强度为 6.9 MPa，塌落度 25.6 cm，分层度 3.1 cm，泌水率为 5.7%，充填成本为 124 元/ m^3 较原来的 145 元/ m^3 降低了 14%。

6 结论

(1) 由实验材料物化分析及粒径级配分析结果得出，废石和棒磨砂是较好的充填骨料，但因其粗颗粒含量较多，单独使用会造成充填料浆沉降离析，需要加入细颗粒以改善骨料级配。

(2) 充填骨料粒径分析结果表明，单独使用粗粒骨料废石和棒磨砂时，混合骨料不均匀系数较小，而掺加粉煤灰可使混合骨料不均匀系数逐渐增大，表明粉煤灰的添加可改善骨料级配。

(3) 混合骨料充填料浆工作特性实验结果表明，3 d、7 d 和 28 d 充填体强度均随粉煤灰掺量增加而增大；各龄期充填体强度随着胶凝材料用量增加而逐渐增大；充填体强度随着料浆浓度的增大而增大。

(4) 混合骨料充填配比优化研究结果表明，粉煤灰掺量 26%、胶凝材料添加量为 $286 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，料浆浓度为 81.36% 时充填材料成本最低，得到 3、7 和 28 d 的充填体强度分别为 1.56、2.86 和 6.9 MPa，塌落度 25.6 cm，分层度 3.1 cm，泌水率为 5.7%，充填成本为 124 元/ m^3 较原来的 145 元/ m^3 降低了 14%。

参考文献：

- [1] 黄祖绍. 创建绿色环保矿山、实现资源综合利用的探索与实践 [J]. 中国矿业, 2015, 24(s2):76-80.
HUANG Z S. Exploration and practice of establishing green mine and realizing comprehensive utilization of resources [J]. China Mining, 2015, 24(S2):76-80.
- [2] 李夕兵, 周健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索 [J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(6):1236-1262.
LI X B, ZHOU J, WANG S F, et al. Review and exploration of deep solid resource mining [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6):1236-1262.
- [3] 王新民, 赵建文, 张钦礼, 等. 露天转地下较佳开采模式 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4):1434-1439.
WANG X M, ZHAO J W, ZHANG Q L, et al. Optimum mining mode from open-pit to underground [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4):1434-

1439.

[4] 贺兵红. 近十年来充填技术在铁矿山的应用进展 [J]. 工程建设, 2011, 43(4): 28-32+41.

HE B H. Application progress of filling technology in iron mine in recent 10 years [J]. Engineering Construction, 2011, 43(04): 28-32+41.

[5] 李立涛, 杨志强, 高谦. 石人沟铁矿全尾砂充填胶凝材料配比优化实验 [J]. 金属矿山, 2016(4): 177-180.

LI L T, YANG Z Q, GAO Q. Experimental study on ratio optimization of full tailings filling cementing material in Shirengou Iron Mine [J]. Metal Mine, 2016(4): 177-180.

[6] 张海波, 宋卫东, 许英霞. 充填采矿技术应用发展及存在问题研究 [J]. 黄金, 2010(1): 23-25.

ZHANG H B, SONG W D, XU Y X. Research on application development and existing problems of backfill mining technology [J]. Gold, 2010(1): 23-25.

[7] 周勃, 吴爱祥. 地下矿山无(低)废采矿技术发展与应用 [J]. 矿业快报, 2002(5): 1-3.

ZHOU B, WU A X. Development and application of non-(low) waste mining technology in underground mines [J]. Mining Bulletin, 2002(5): 1-3.

[8] 夏长念, 孙学森. 充填采矿法及充填技术的应用现状及发展趋势 [J]. 中国矿业工程, 2014, 1(43): 61-64.

XIA C N, SUN X S. Application status and development trend of filling mining method and filling technology [J]. China Mining Engineering, 2014, 1(43): 61-64.

[9] 包秀宁, 张肖宁, 吴旷怀, 等. 级配对矿质颗粒体离析的影响研究及应用 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(6): 48-53.

BAO X N, ZHANG X N, WU K H, et al. Study on the effect of grade on the segregation of ore particles and its application [J]. Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition), 2009, 48(6): 48-53.

[10] 董培鑫, 杨志强, 高谦, 等. 混合充填集料粒径与级配对料浆流动性影响 [J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(3): 53-59.

DONG P X, YANG Z Q, GAO Q, et al. Influence of particle

size and grade of mixed filling aggregate on slurry fluidity [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(3):

[11] 王建栋, 吴爱祥, 王贻明, 等. 粗骨料膏体抗离析性能评价模型与实验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 866-872.

WANG J D, WU A X, WANG Y M, et al. Evaluation model and experimental study of anti-segregation performance of coarse aggregate paste [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5): 866-872.

[12] 杨志强, 高谦, 王永前, 等. 金川全尾砂-棒磨砂混合充填料胶砂强度与料浆流变特性研究 [J]. 岩石力学与工程报, 2014, 33(S2): 3985-3991.

YANG Z Q, GAO Q, WANG Y Q, et al. Study on strength and rheological properties of slurry of Jinchuan tailings and rod-frosted mixture filling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3985-3991.

[13] 杨志强, 高谦, 王永前, 等. 废石尾砂混合料浆流变特性及充填采场流动性实验 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(2): 294-299.

YANG Z Q, GAO Q, WANG Y Q, et al. Experimental study on rheological characteristics of waste tailings mixture slurry and filling stope flow [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2017, 56(2): 294-299.

[14] 许文远, 杨小聪, 郭利杰. 充填体不均匀性相似模拟实验研究 [J]. 金属矿山, 2011(5): 18-22+69.

XU W Y, YANG X C, GUO L J. Experimental study on similarity simulation of non-uniformity of backfill [J]. Metal Mine, 2011(05): 18-22+69.

[15] WANG X, WANG K, Taylor P, et al. Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method [J]. Construction & Building Materials, 2014, 70: 439-452.

[16] SCHLANGEN E, MIER J G M V. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures [J]. Materials & Structures, 1992, 25(9): 534-542.

(下转至 199 页)

Research on Mechanical Properties of Cement-improved Iron Tailings Sand Roadbed Filler

Li Junwei¹, Liu Changming², Shan Xuefeng³

(1. East University of Heilongjiang, Harbin, Heilongjiang, China; 2. Audit Department, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China; 3. Heilongjiang Highway Engineering Supervision of Consulting Company, Harbin, Heilongjiang, China)

Abstract: Taking the iron tailings sand in Anshan city, Liaoning province as the research object, it was improved by cement curing agent. The mechanical properties of the modified tailings sand, the properties of the samples after freezing-thawing cycles and the water stability were studied. The results showed that under the premise of the same amount of cement curing agent, the unconfined compressive strength of the modified iron tailings increases nonlinearly with increasing curing cycle. However, the strength of the material increases greatly during the initial stage of curing, and the rate of growth increases with the increase of curing time. Under the premise of the same cement curing agent dosage, with increasing curing cycle, the change law of water stability coefficient of the modified iron tailings sand appeared to decrease initially and then increase. As the degree of compaction increases, the mass loss rate of the modified iron tailings sand decreases gradually.

Keywords: Cement curing agent; Iron tailings sand; Freezing-thawing cycle; Water stability; Improvement

////////////////////////////////////
(上接192页)

Optimum Experiment of Aggregate Proportion for Mixed Filling with Fly Ash

Zhuo Qingfeng¹, Ba Lei¹, Wang Qifeng²

(1. Ordos Vocational College, Ordos, Inner Mongolia, China; 2. National Energy Group Shendong Coal Group Information Management Center, Yulin, Shaanxi, China)

Abstract: In view of the problem of stratification and segregation of filling slurry in a mine using mixed coarse aggregate, the aggregate gradation is optimized by adding fly ash fine aggregate. Firstly, the physical and chemical analysis of filling materials was carried out, and on this basis, the particle size gradation analysis of mixed aggregate with different fly ash content was carried out. Then, the strength test of fly ash mixed aggregate filling body was measured. The test results show that the strength of filling body increases with the increase of slurry concentration and fly ash content, and the strength improves obviously. Adding appropriate fly ash fine aggregate can effectively improve the particle size. Diameter gradation can improve the strength of filling body. Finally, with the unit filling cost as the optimization objective and the strength of each age as the constraint condition, an optimization model was established to optimize the filling ratio of mixed aggregate. The lowest cost scheme to meet the filling strength requirement was obtained, that is, 26% fly ash, 286 kg/m³ cementitious material and 81.36% slurry concentration. 7 d strength is 1.56 MPa, 7 d strength is 2.86 MPa and 28 d strength is 6.9 MPa, the slump is 25.6 cm, the stratification is 3.1 cm, and the bleeding rate is 5.7%, which all meet the requirements of the mine. At this time, filling cost is 124 yuan/m³, which is 14% lower than the original 145 yuan/m³.

Keywords: Mining filling ; Segregation; Fly ash; Mixed aggregate; Strength; Proportion; Optimization