



基于熵权多属性决策的镁渣胶结料开发及料浆配比优化

韦寒波^{1,2,3}, 巴 蕾^{1,2}, 温震江^{1,2}, 肖柏林^{1,2}, 高 谦^{1,2}, 李晨卓^{1,2}

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育国家重点实验室, 北京 100083;

2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

3. 北京市建筑节能与建筑材料管理办公室, 北京 101160)

摘 要: 针对全尾砂充填采用水泥作胶结剂导致的成本较高的问题, 本文利用当地固废资源开发低成本胶凝材料, 并基于矿山要求优化料浆配比。首先, 基于试验材料进行物化分析, 采用正交试验、极差分析和BP神经网络等方法确定镁渣胶凝材料配比为镁渣30%、脱硫石膏12%、矿渣微粉58%; 然后, 采用XRD和SEM等手段分析其水化机理; 最后, 基于熵权多属性决策法进行料浆配比优化试验, 以7 d强度、28 d强度、坍落度、泌水率和充填成本为指标优化料浆配比。结果表明: 采用镁渣胶凝材料时, 料浆优化配比为胶砂比1:4, 料浆质量浓度为72%, 并进行试验验证, 得到相应的7 d强度、28 d强度、坍落度和泌水率分别为2.72 MPa、8.49 MPa、20.0 cm和6.5%, 均满足矿山要求, 且充填成本为111 CNY/m³, 较原来使用水泥时的充填成本192 CNY/m³, 降低了42.2%。

关键词: 充填采矿法; 镁渣; 胶凝材料; 神经网络; 熵权多属性决策; 配比优化

文章编号: 1004-0609(2022)-07-2126-12

中图分类号: TD853; X751

文献标志码: A

引文格式: 韦寒波, 巴 蕾, 温震江, 等. 基于熵权多属性决策的镁渣胶结料开发及料浆配比优化[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(7): 2126–2137. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-41057

WEI Han-bo, BA Lei, WEN Zhen-jiang, et al. Development of magnesium slag binder and optimization of slurry ratio based on entropy weight multi-attribute decision[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(7): 2126–2137. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-41057

近年来, 随着浅部矿产资源逐渐减少, 采矿活动也逐渐转向深部。随着开采深度的增加, 采空区和采场地压也逐渐增大^[1-2]。胶结充填采矿以其安全、环保的特点逐渐被矿山采用^[3-4]。但是, 胶结充填采矿法不仅工艺复杂, 而且采矿成本较高, 尤其是胶凝材料成本较高, 其占充填成本的75%左右^[5-6]。因此, 开发低成本新型胶凝材料替代水泥和优化料浆配比是降低充填成本、实现矿山安全高

效开采的必由之路^[7]。对于新型胶凝材料的开发和料浆配比的优化, 国内外专家和学者进行了大量研究, 其中利用高炉水淬渣^[8-9]、粉煤灰^[10]、磷石膏^[11]等固废资源开发新型胶凝材料的研究已经日趋成熟, 并且已经在矿山得以应用。在此基础上, 张钦礼等^[12]和周科平等^[13]分别采用遗传算法及BP神经网络对充填料浆配比进行优化; 付自国等^[14]和高谦等^[15]分别采用响应面法对混合骨料充填料浆配比

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0602903)

收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-09-06

通信作者: 肖柏林, 讲师, 博士; 电话: 13269500905; E-mail: bxiao@ustb.edu.cn

进行优化; 吴浩等^[16]和温震江等^[17]采用满意度函数对充填料浆配比进行优化, 在满足充填要求的前提下, 进一步降低充填成本。金属镁生产过程中产生的大量镁渣一般堆存在废料场, 不仅会占用土地, 而且会污染环境。镁渣作为改性剂主要应用于煅烧熟料^[18-20], 不仅可以改善生料的易烧性, 降低熟料的热耗, 提高机立窑的产质量, 而且还能大幅度提高熟料各龄期的强度、降低熟料烧成热耗和降低水泥的生产成本; 镁渣作为活性混合材料可以提高水泥产量, 降低水泥生产电耗^[21-22]。除此之外, 利用镁渣与其他工业活性废渣按照适当比例复合, 再辅以合适激发剂可以开发胶凝材料^[23-24], 不仅可以减少镁渣堆存量, 而且可以降低胶凝材料成本。本文在前期研究的基础上, 结合大量探索性试验, 采用镁渣及矿山周边固废开发新型胶凝材料替代水泥, 并采用神经网络对胶凝材料配比进行优化, 然后利用开发的胶凝材料开展充填料浆配比试验, 并基于多属性决策对充填料浆配比进行优化, 得到满足矿山充填体强度、充填料浆流变特性, 并且充填成本最低的配比方案。

1 实验

1.1 试验材料

试验以镁渣(MS)、高炉粒化水淬矿渣(GGBFS)、脱硫石膏(DSG)和尾砂为主要原料, 其中镁渣取自新疆腾翔镁制品厂, 矿渣和脱硫石膏取自新疆大安特钢有限公司, 其细度(45 μm 筛余)分

别为 10.64%、6.94% 和 15.24%。试验以全尾砂为骨料, 取自新疆某铜锌矿, 其粒径级配如图 1 所示, 并采用插值法计算得到特征粒径, 结果如表 1 所示。结合图 1 可以看出, 尾砂样品中-75 μm 细颗粒部分仅占 21.74%, 表明该尾砂的颗粒较粗; 不均匀系数 $C_u=5.94>5$, 说明该尾砂样品的粒径分布较为密集; 曲率系数 $C_c=0.70<1$, 说明该尾砂粒径级配中细颗粒较少。采用 X 射线荧光光谱 (XRF) 分析试验材料的化学成分, 结果如表 2 所示; 采用 XRD 谱分析试验材料的矿物物相, 结果如图 2 所示。综合表 2 和图 2 可以看出: 镁渣主要矿物为 γ - C_2S 、 β - C_2S 、 MgO 、 CaF_2 , 同时含有少量的 C_3S 和 FeO ; 矿渣含有大量玻璃体及少量 C_2S 和七铝十二钙; 脱硫石膏主要矿物成分为二水石膏。本文所用镁渣碱性系数 $M_0=2.02>1$, 质量系数 $K=2.10>1.6$, 属于碱性渣粉、质量中等偏上, 可以作为碱性激发剂用于激发矿渣活性。

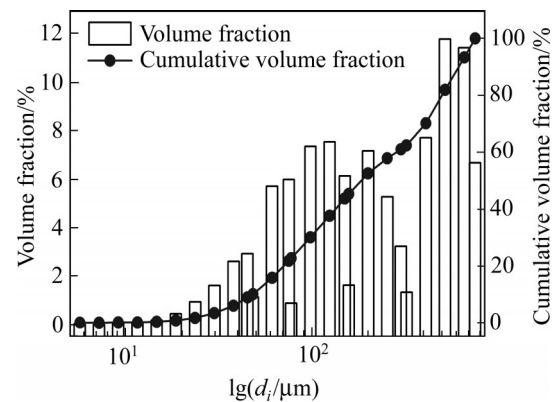


图 1 全尾砂粒径级配分析

Fig.1 Analysis of particle size distribution of tailings

表 1 全尾砂粒径特征参数

Tab.1 Particle size characteristic parameters of tailings

$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{30}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{60}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	C_c	C_u
48.04	98.11	185.28	285.35	615.75	0.70	5.94

表 2 试验材料化学成分分析

Tab.2 Analysis of chemical components of test materials

Material	Mass fraction/%										
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	LOI	Other
GGBFS	40.99	32.02	10.19	9.33	2.82	1.82	1.31	0.24	0.01	1.18	0.29
DSG	31.60	2.70	0.72	1.06	0.10	42.45	0.51	0.02	0.05	19.25	1.54
MS	56.85	30.26	0.82	6.08	0.07	0.04	5.25	0.05	0.07	0.35	0.16
Tailings	0.95	40.91	10.39	2.62	0.55	19.20	21.09	0.21	0.07	-	4.01

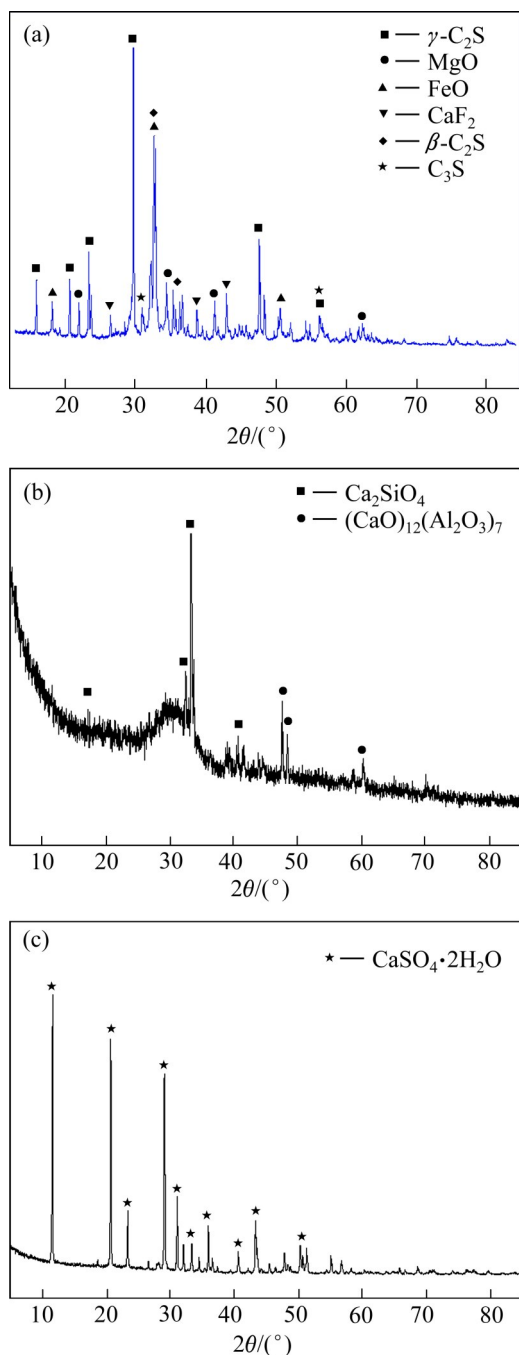


图2 试验材料的XRD谱

Fig. 2 XRD patterns of test material: (a) MS; (b) GGBFS; (c) DSG

1.2 研究方法

1.2.1 BP神经网络

BP(Back propagation)神经网络是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络,是应用最广泛的神经网络,其具有任意复杂的模式分类能力和优良的多维函数映射能力,从结构上讲,BP网

络具有输入层、隐藏层和输出层^[25]。本文选取镁渣掺量及脱硫石膏掺量作为输入因子,充填体7 d及28 d抗压强度作为输出因子,隐含层神经元个数选择为8个,该BP神经网络结构为2-8-2型^[25]。神经网络模型通过训练试验中所得的数据得到不同的参数,然后使用这些参数来进行模拟和预测。BP网络中所采用的传递函数^[25]均是可微的单调递增函数。隐含层的激励函数选择默认的非线性tansig函数,输出层的激励函数选择默认的线性logsig函数,训练算法采用基于数值最优化理论的Levenberg-Marquardt方法,使用mapminmax函数对样本行进行归一化。

1.2.2 熵权多属性决策模型

多属性决策是多准则决策的重要组成部分,着重研究关于离散的、有限个方案的决策问题。对于多属性决策模型,其通过 b 个指标对 a 个待选方案进行综合评判,进而形成 $a \times b$ 的决策矩阵 $\mathbf{Y}^{[26-27]}$ 。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1b} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{a1} & y_{a2} & \cdots & y_{ab} \end{bmatrix} = (y_{ij})_{a \times b}$$

式中: y_{ij} ($i=1, 2, \dots, a$; $j=1, 2, \dots, b$)表示第 i 个方案第 j 个指标的值。

为了消除评价指标不同量纲的影响,根据式(1)对决策矩阵 $\mathbf{Y}$ 进行标准化处理,得到标准化决策矩阵 $\mathbf{S}^{[26-27]}$:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1b} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{a1} & s_{a2} & \cdots & s_{ab} \end{bmatrix} = (s_{ij})_{a \times b}$$

$$s_{ij} = \begin{cases} \frac{y_{ij}}{\max(y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj})}, & \text{效益型指标} \\ \frac{\min(y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj})}{y_{ij}}, & \text{成本型指标} \end{cases} \quad (1)$$

熵权法是根据信息熵的定义反映各评判指标的差异,差异越大,熵值越小,表明该指标的相对重要度越大,权重也就越大,反之权重就越小。熵值 E 为:

$$E_j = - \sum_{i=1}^a \frac{y_{ij}}{y_j} \ln \frac{y_{ij}}{y_j} \quad (2)$$

式中: $y_j = \sum_{i=1}^a y_{ij}$, 并由此计算指标权重 θ_j 为:

$$\theta_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^b 1 - E_j} \quad (3)$$

将标准决策矩阵 S 与各指标权重 θ_j 相乘得到加权决策矩阵 $W=[w_{ij}]_{a \times b}=[\theta_j s_{ij}]_{a \times b}$ 。并据此确定正负理想解向量 W^+ 和 W^- :

$$\begin{aligned} w_j^+ &= \max_{i \in A} \{w_{ij}\}, w_j^- = \min_{i \in A} \{w_{ij}\}, j \in J_1 \\ w_j^+ &= \min_{i \in A} \{w_{ij}\}, w_j^- = \max_{i \in A} \{w_{ij}\}, j \in J_2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$W^+ = (w_1^+, w_2^+, \dots, w_j^+), W^- = (w_1^-, w_2^-, \dots, w_j^-)$$

式中: J_1 、 J_2 分别表示效益型指标和成本型指标的下标集合。

并采用 TOPSIS 法利用欧氏公式计算各方案与正理想解和负理想解的距离 K^+ 和 K^- :

$$K_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^a \theta_j (w_j^+ - w_{ij})^2}, i=1, 2, \dots, a, j=1, 2, \dots, b \quad (5)$$

$$K_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^a \theta_j (w_j^- - w_{ij})^2}, i=1, 2, \dots, a, j=1, 2, \dots, b$$

在得到 K^+ 和 K^- 基础上, 根据式(6)计算各方案的相对贴近度 H_i , 其值越大, 说明方案越理想。

$$H_i = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (6)$$

2 镁渣胶凝材料配比试验

2.1 试验方案

根据探索性研究确定的镁渣、脱硫石膏掺量, 设计 A、B 两组正交试验。其中 A 组镁渣掺量为 10%、15%、20%, 脱硫石膏掺量为 10%、15%、20%; B 组镁渣掺量为 35%、40%、45%, 脱硫石膏掺量为 35%、40%、45%; 并且在此基础上进行 C 组补充试验, 其中镁渣掺量为 25%、30% 和 50%, 脱硫石膏掺量为 10%、15% 和 20%。在胶砂比为 1:4、料浆质量浓度为 72% 的条件下浇筑成 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 的标准试块, 并标准养护至相应龄期后测试其强度。

2.2 结果与分析

具体试验方案和试验结果如表 3 所示, 然后对其进行极差分析, 结果如图 3 所示。

根据胶凝材料配比试验和极差分析结果可以看出: 对于 7 d 强度, 最优配比为镁渣 15%、脱硫石

表 3 镁渣胶凝材料配比试验强度结果

Table 3 Strength results of proportioning test of magnesium slag cementitious material

Test No.	Content/%			7 d	28 d
	MS	DSG	GGBFS	strength/MPa	strength/MPa
A1	10	10	80	2.30	7.36
A2	10	15	75	2.21	7.31
A3	10	20	70	1.64	5.98
A4	15	10	75	2.67	6.63
A5	15	15	70	2.44	5.86
A6	15	20	65	1.84	5.68
A7	20	10	70	1.98	5.12
A8	20	15	65	2.13	5.91
A9	20	20	60	1.58	4.72
B1	35	35	30	1.10	2.11
B2	35	40	25	1.19	2.46
B3	35	45	20	0.81	1.62
B4	40	35	25	1.00	2.10
B5	40	40	20	0.50	1.60
B6	40	45	15	1.04	2.03
B7	45	35	20	0.63	1.80
B8	45	40	15	0.40	1.23
B9	45	45	10	0.44	1.52
C1	25	10	65	2.01	7.20
C2	25	15	60	1.60	6.54
C3	25	20	55	1.34	5.23
C4	30	10	60	1.99	6.17
C5	30	15	55	1.35	5.93
C6	30	20	50	0.79	4.28
C7	50	10	40	0.98	4.60
C8	50	15	35	0.60	3.57
C9	50	20	30	0.37	2.75

膏 10%, 且脱硫石膏权重较大; 对 28 d 强度而言, 最优配比为镁渣 10%、脱硫石膏 10%, 但是镁渣权重较大; 随着镁渣含量的增加, 7 d 强度先增大后减小, 而 28 d 强度逐渐降低; 而随着脱硫石膏含量的增加, 7 d 强度和 28 d 强度整体上均逐渐减小。

2.3 基于 BP 神经网络预测镁渣胶凝材料优化配比

为进一步确定镁渣胶凝材料最优配比, 以表 3 中镁渣基胶凝材料配比试验数据为基础, 利用 BP 神经网络仿真方法, 对镁渣胶凝材料配比试验强度数据进行训练及模拟, 建立镁渣胶凝材料充填体强

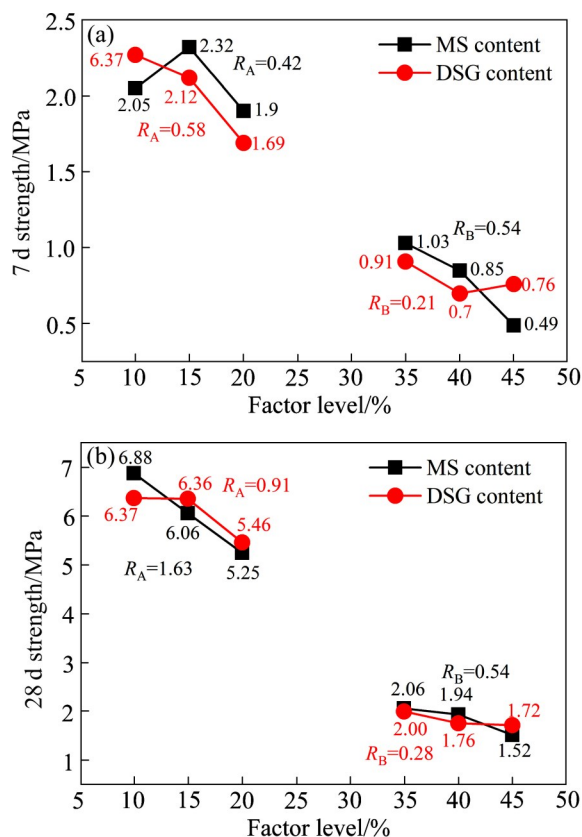


图3 镁渣胶凝材料配比正交试验极差分析结果

Fig. 3 Range analysis results of orthogonal test of magnesium slag cementitious material: (a) 7 d strength; (b) 28 d strength

度BP神经网络模型，并以此对不同配比胶凝材料强度进行预测。

2.3.1 BP神经网络模型建构

将表3中27组试验数据打乱后重新编号，选取其中24组数据为训练样本，剩余3组为预测样本。具体训练状态如图4所示，可以看出：神经网络模型经过50步后收敛，收敛误差为 9.772×10^{-6} ，神经网络对数据的拟合度 $R=0.99995$ ，表示此神经网络的训练状态良好且预测值与实测值高度吻合^[28]。

7 d强度和28 d强度预测与实测数据对比如图5所示，可以看出：7 d强度和28 d强度训练样本和预测样本预测和实测值相对误差均小于5%，达到设定的 $\pm 10\%$ 的精度要求，由此获得了符合精度要求的人工神经网络模型。

2.3.2 高镁渣掺量下胶凝材料最优配比预测

为了进一步降低成本，需提高镁渣掺量，采用BP神经网络对镁渣掺量25%、30%，脱硫石膏掺

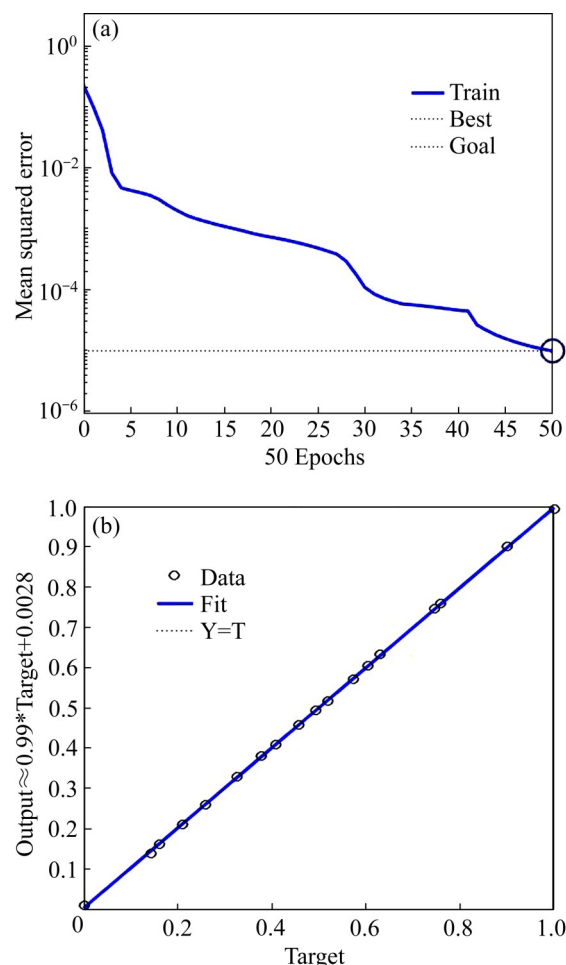


图4 神经网络收敛曲线及拟合结果

Fig. 4 Neural network convergence curves and fitting results: (a) Best training performance of 9.772×10^{-6} at epoch 50; (b) Training, $R=0.99995$

量4%~18%的胶凝材料配比进行预测，并且以同等条件胶砂比1:4，料浆质量浓度72%进行试验验证，结果如图6所示。由图6可以看出：镁渣掺量25%时，7 d强度和28 d强度均随脱硫石膏掺量先增大后减小，并于脱硫石膏掺量为12%时达到最优；同理，镁渣掺量30%时，脱硫石膏掺量也是12%时，7 d强度和28 d强度最优。并且以镁渣8 CNY/t、脱硫石膏34.5 CNY/t、矿渣微粉156 CNY/t分别计算材料成本，其中镁渣掺量25%、脱硫石膏掺量12%、矿渣微粉掺量63%时，胶凝材料成本为104 CNY/t；同理，镁渣掺量30%、脱硫石膏掺量12%、矿渣微粉掺量58%时，胶凝材料成本为97 CNY/t。因此，确定最优配比为：镁渣掺量30%、脱硫石膏掺量12%、矿渣微粉掺量58%。

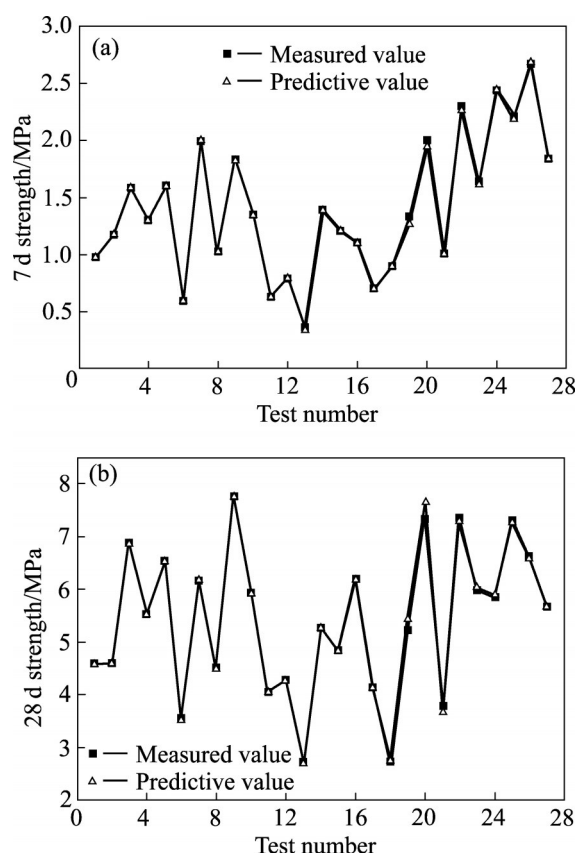


图5 强度预测和实测数据对比

Fig. 5 Comparison of strength prediction and measured data: (a) 7 d strength; (b) 28 d strength

2.4 镁渣胶凝材料水化机理分析

为了探究胶凝材料水化机理,按照 GB/T 346—2001 制备试样,然后利用 XRD 和扫描电镜对胶凝材料的水化产物和微观结构进行分析^[29]。图 7 和 8 所示分别为水化产物的 XRD 谱和 SEM 像,综合分析后可知:胶凝材料水化反应主要是生成钙矾石和 C-S-H 凝胶,还有部分未反应的二水石膏和 C₃S 和 C₂S;在石膏和镁渣的共同激发作用下,矿渣不断水化,胶凝体系中的 Ca²⁺和 Mg²⁺等离子率先溶解进入溶液,在游离的石膏参与下生成钙矾石;钙矾石和 C-S-H 凝胶相互交错,钙矾石主要以松针状或长条状存在,穿插在 C-S-H 凝胶中,形成致密的网状结构,提升胶凝体系的强度。在水化反应早期,胶凝材料中生成少量细针状尺寸较小的钙矾石和 C-S-H 凝胶;并且随着养护龄期的推移,钙矾石和 C-S-H 凝胶大量增长,相互交错,充填于孔隙中,无法很明显地分辨出边界,形成致密网状结

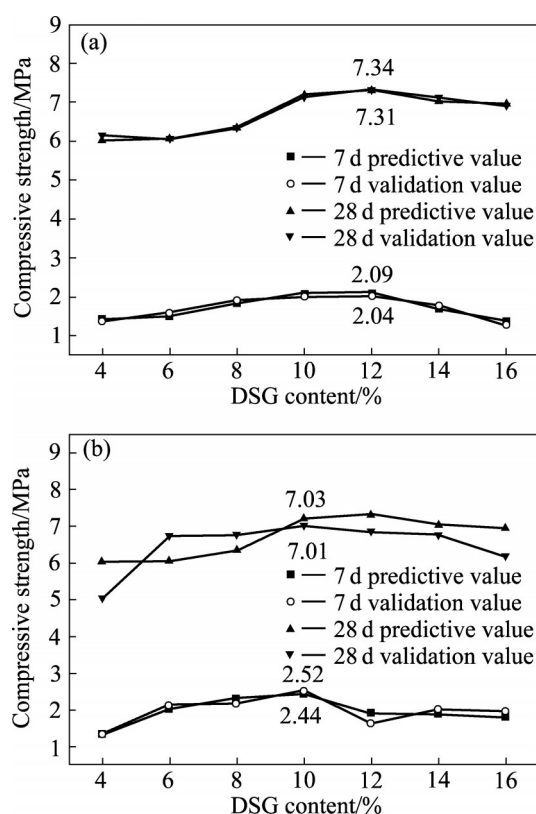


图6 高镁渣掺量胶凝材料强度预测和验证

Fig. 6 Strength predictions and verifications of cementitious material with high magnesium slag content: (a) 25%; (b) 30%

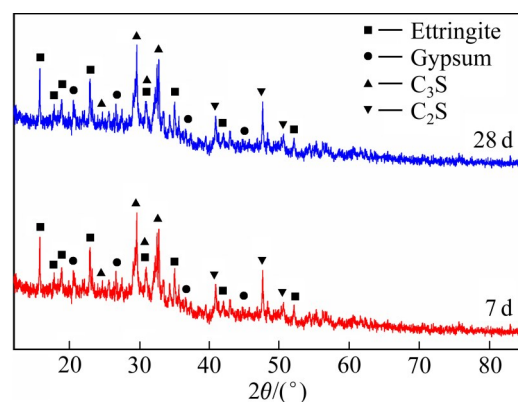


图7 镁渣胶凝材料水化产物XRD谱

Fig. 7 XRD patterns of hydration products of magnesium slag cementitious material

构,其中部分钙矾石被凝胶所包裹。胶凝体系密实度由此得到加强,力学性能得到提高。

3 镁渣胶凝材料充填料浆配比优化

为了进一步降低镁渣胶凝材料的充填成本

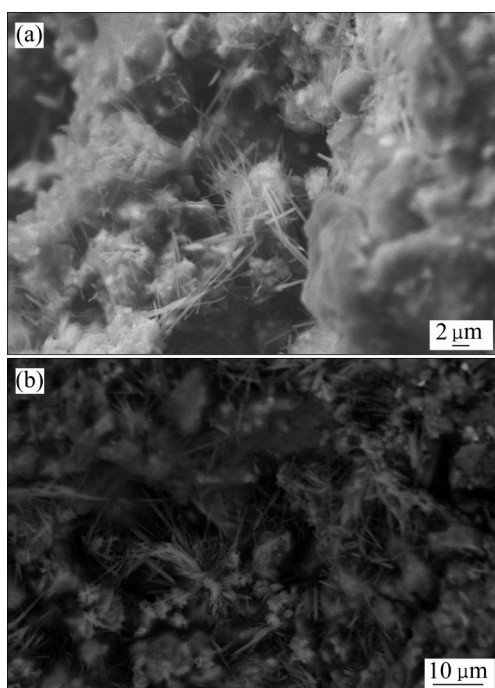


图8 镁渣胶凝材料水化产物的SEM像

Fig. 8 SEM images of hydration products of magnesium slag cementitious material: (a) 7 d; (b) 28 d

(FC), 针对开发的胶凝材料和矿山充填系统, 进行充填料浆配比优化, 在满足充填要求的前提下, 追求最大的经济效益。

3.1 充填料浆配比试验方案

根据矿山充填系统和物料情况, 进行充填料浆配比试验。试验采用镁渣胶凝材料(镁渣 30%、脱硫石膏 12%、矿渣微粉 58%)、胶砂比(C/T ratio)为 1:4~1:8, 质量浓度(MC)为 68%~72%。

表4 混合骨料充填料浆配比试验结果

Tab.4 Test results of mixing aggregate filling slurry

Test No.	C/T ratio	MC/%	Compressive strength /MPa		Slump/cm	BR/%	FC/ ($\text{CNY} \cdot \text{m}^{-3}$)
			7 d	28 d			
B1	1:4	68	1.94	6.88	21.2	11.8	106
B2		70	2.47	8.19	20.8	9.3	109
B3		72	2.70	8.51	20.3	6.9	111
B4	1:6	68	1.38	4.55	23.2	12.3	79
B5		70	1.59	5.19	23	9.7	81
B6		72	1.78	7.05	22.5	7.2	84
B7	1:8	68	0.94	3.43	25.3	15.9	65
B8		70	1.13	4.57	24.9	14.7	67
B9		72	1.21	5.21	24.6	9.3	68

3.2 试验结果与分析

3.2.1 试验结果

根据上述试验方案分别测定各组的 7 d 强度和 28 d 强度、坍落度和泌水率(BR), 具体试验方案及结果如表 4 所示:

3.2.2 试验结果分析

根据试验结果可知, 料浆质量浓度、胶砂比对充填强度和充填料浆流动性均有显著影响, 结果如图 9 所示, 其中 7 d 强度、28 d 强度均随料浆质量浓度和胶砂比的提高而增大。保持胶砂比 1:4 不变, 料浆质量浓度从 68% 提高到 72% 时, 7 d 强度和 28 d 强度分别增大了 39.2% 和 23.7%。同样, 保持料浆质量浓度 70% 不变, 胶砂比从 1:8 提高到 1:4 时, 7 d 强度和 28 d 强度分别增大了 119% 和 79.2%。坍落度、泌水率均随着料浆质量浓度和胶砂比的提高而减小。保持胶砂比 1:4 不变, 料浆浓度从 68% 提高到 72% 时, 坍落度和泌水率分别减少了 4.25% 和 41.5%; 保持料浆质量浓度 70% 不变, 胶砂比从 1:8 提高到 1:4 时, 坍落度和泌水率分别减少了 16.5% 和 36.7%。

3.3 熵权多属性决策优化充填料浆配比

在满足矿山充填要求的前提下, 尽可能降低充填成本, 是实现最大经济效益的重要途径。充填料浆配比优化是一个多目标决策问题。基于熵权多属性决策法对充填料浆进行配比优化, 以期获得最优的料浆配比方案。

矿山要求 7 d 强度和 28 d 强度分别不低于 1.5 MPa 和 4.0 MPa, 而坍落度合理范围为 15~30 cm,

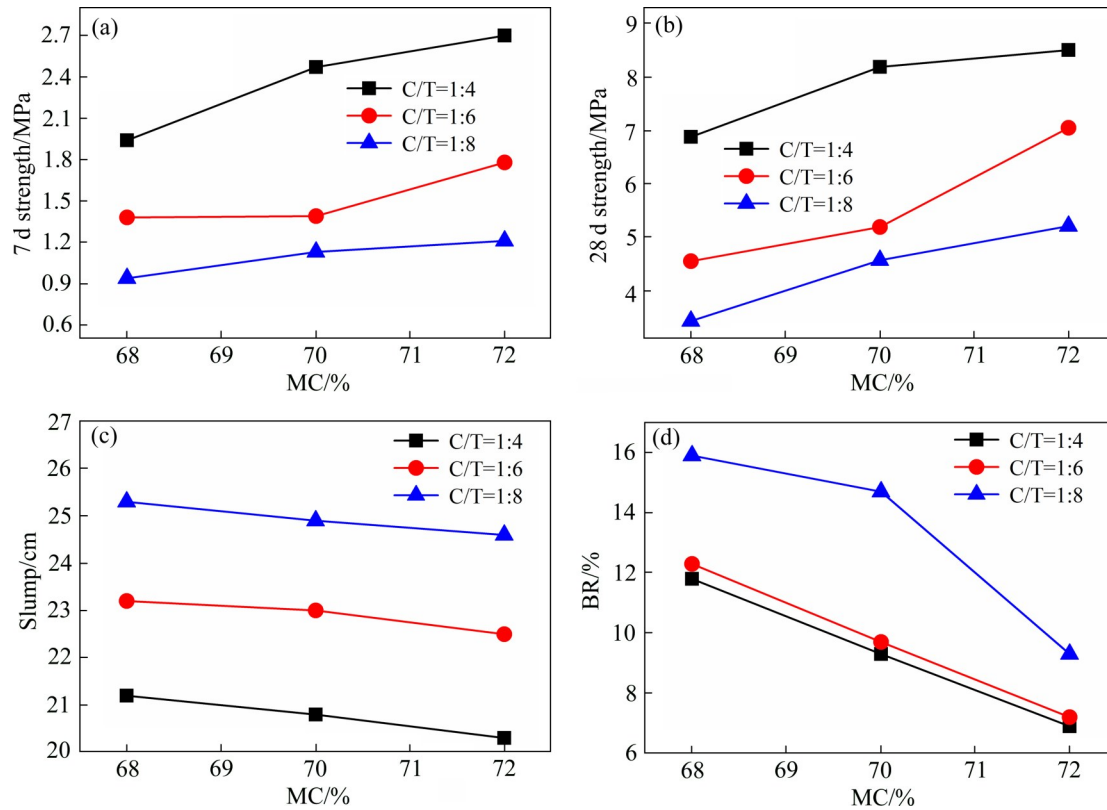


图9 充填指标与质量浓度的关系

Fig. 9 Relationship between filling index and slurry mass concentration: (a) 7 d strength; (b) 28 d strength; (c) Slump; (d) BR

并且将理想值定为 18 cm, 泌水率合理范围定为 5%~20%, 理想值定为 5%^[30-32]。根据试验结果, 可以将 7 d 强度、28 d 强度看作效益型指标, 而坍落度、泌水率和充填成本看作成本型指标。根据表 4 试验结果, 仅 B1~B3、B5 和 B6 满足矿山强度要求, 因此, 将这 5 组方案作为待选方案, 并将 7 d 强度、28 d 强度、坍落度、泌水率及充填成本作为评判指标, 形成决策矩阵 $Y_{5 \times 5}$, 并按照式(1)对其进行标准化处理, 得到标准化决策矩阵 $S_{5 \times 5}$ 。

$$Y_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 1.94 & 6.88 & 21.2 & 11.8 & 106 \\ 2.47 & 8.19 & 20.8 & 9.30 & 109 \\ 2.70 & 8.51 & 20.3 & 6.90 & 111 \\ 1.59 & 5.19 & 23.0 & 9.70 & 81 \\ 1.78 & 7.05 & 22.5 & 7.20 & 84 \end{bmatrix}$$

$$S_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.72 & 0.81 & 0.96 & 0.58 & 0.76 \\ 0.91 & 0.96 & 0.98 & 0.74 & 0.74 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.73 \\ 0.59 & 0.61 & 0.88 & 0.71 & 1.00 \\ 0.66 & 0.83 & 0.90 & 0.96 & 0.96 \end{bmatrix}$$

根据熵权法计算各评价指标的权重 θ_j , 可以得到各评判指标权重均为 0.2, 并将标准化决策矩阵

$S_{5 \times 5}$ 与各指标权重 θ_j 相乘得到加权决策矩阵 $W_{5 \times 5}$:

$$W_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.144 & 0.162 & 0.192 & 0.116 & 0.152 \\ 0.182 & 0.192 & 0.196 & 0.148 & 0.148 \\ 0.200 & 0.200 & 0.200 & 0.200 & 0.146 \\ 0.118 & 0.122 & 0.176 & 0.142 & 0.200 \\ 0.132 & 0.166 & 0.180 & 0.192 & 0.192 \end{bmatrix}$$

然后由加权决策矩阵结合式(4)得到正负理想解向量 W^+ 和 W^- :

$$W^+ = (0.200 \quad 0.200 \quad 0.176 \quad 0.142 \quad 0.146)$$

$$W^- = (0.118 \quad 0.122 \quad 0.200 \quad 0.200 \quad 0.200)$$

最后根据式(5)~(6)分别计算各方案的贴近度, 结果为: $H_i = [0.593 \quad 0.663 \quad 0.671 \quad 0.359 \quad 0.392]^T$ 。由此可以看出各方案评价顺序为: B3 > B2 > B1 > B6 > B5, 即采用开发的镁渣胶凝材料, 充填料浆最优配比为胶砂比 1:4、料浆质量浓度 72%。对此配比进行试验验证, 结果如图 10 所示。限于篇幅, 不再赘述试验过程, 试验数据如表 5 所示。由表 5 可以看出: 7 d 强度、28 d 强度、坍落度和泌水率分别为 2.72 MPa、8.49 MPa、20.0 cm 和 6.5%; 各指标均满足矿山要求, 并且单位充填成本为 111

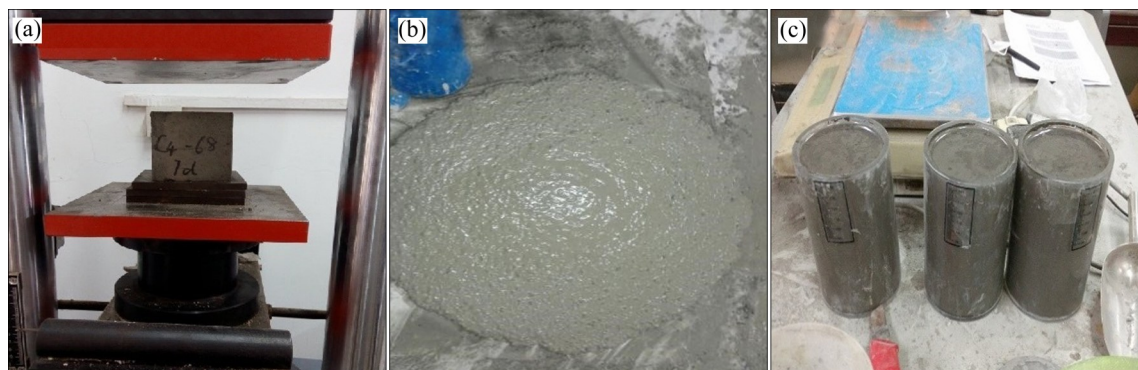


图 10 优化配比验证测试

Fig. 10 Verification test of optimized ratio: (a) Strength test; (b) Slump; (c) Bleeding rate

表 5 优化配比验证结果

Table 5 Verification results of optimized ratio

Data type	7 d strength/MPa	28 d strength/MPa	Slump/cm	BR/%	FC/(CNY·m ³)
Verification result	2.72	8.49	20.0	6.5	111
Mine requirement	≥1.5	≥2.5	15–30	<10	192(Originally)

CNY/m³, 与原来使用水泥的充填成本 192 CNY/m³ 相比, 降低了 42.2%。

4 结论

1) 通过正交试验及极差分析, 结合 BP 神经网络预测结果, 确定镁渣充填胶凝材料优化配比为镁渣 30%、脱硫石膏 12%、矿渣微粉 58%。

2) 胶凝材料水化产物主要为钙矾石和 C-S-H 凝胶, 以及部分未反应的二水石膏和 C₃S 和 C₂S; 钙矾石和 C-S-H 凝胶相互交错, 钙矾石主要以松针状或长条状存在, 穿插在 C-S-H 凝胶中, 形成致密的网状结构, 提升胶凝体系的强度。

(3) 采用熵权多属性决策优化充填料浆配比, 得出优化配比为胶砂比 1:4, 料浆质量浓度为 72%; 验证试验结果表明, 各指标均满足矿山要求, 并且单位充填成本为 111 CNY/m³, 与原来使用水泥的充填成本 192 CNY/m³ 相比, 单位充填成本降低了 42.2%。

REFERENCES

[1] 于世波, 杨小聪, 董凯程, 等. 空场嗣后充填法充填体对围岩移动控制作用时空规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 430–434.

YU Shi-bo, YANG Xiao-cong, DONG Kai-cheng, et al. Space-time rule of the control action of filling body for the movement of surrounding rock in method of the delayed filling open stoping[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(3): 430–434.

[2] BEN-AWUAH E, RICHTER O, ELKINGTON T, et al. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(6): 1065–1071.

[3] 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 Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236–1262.

[4] 王新民, 赵建文, 张钦礼, 等. 露天转地下最佳开采模式[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1434–1439.

WANG Xin-min, ZHAO Jian-wen, ZHANG Qin-li, et al. Optimal mining model of transition from open-pit to underground mining[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4): 1434–1439.

[5] 肖柏林. 钢渣矿渣制备胶结剂及其在全尾砂胶结充填的应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.

XIAO Bo-lin. Steel slag binder and its application in cemented tailings backfill[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.

[6] 杨晓炳. 低品质多固废协同制备充填料浆及其管输阻力研

- 究[D]. 北京:北京科技大学, 2020.
- YANG Xiao-bing. Study on the collaborative preparation of filling materials with low quality and multi-solid wastes and their pressure drop in pipeline transportation[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [7] 李夕兵, 刘冰, 姚金蕊, 等. 全磷废料绿色充填理论与实践[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1845-1865.
- LI Xi-bing, LIU Bing, YAO Jin-xin, et al. Theory and practice of green mine backfill with whole phosphate waste[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9): 1845-1865.
- [8] 魏微, 杨志强, 高谦. 全尾砂新型胶凝材料的胶结作用[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 881-887.
- WEI Wei, YANG Zhi-qiang, GAO Qian. Cementing action of neotype whole-tailing cementitious material[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5): 881-887.
- [9] 温震江, 高谦, 王永定, 等. 基于模糊综合评判的复合胶凝材料开发及料浆配比优化[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(3): 698-707.
- WEN Zhen-jiang, GAO Qian, WANG Yong-ding, et al. Development of composite cementitious material and optimization of slurry proportion based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(3): 698-707.
- [10] 李茂辉, 杨志强, 王有团, 等. 粉煤灰复合胶凝材料充填体强度与水化机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 650-655.
- LI Mao-hui, YANG Zhi-qiang, WANG You-tuan, et al. Experiment study of compressive strength and mechanical property of filling body for fly ash composite cementitious materials[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 650-655.
- [11] 肖柏林, 杨志强, 高谦. 金川矿山磷石膏基新型充填胶凝材料的研制[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(1): 21-24.
- XIAO Bo-lin, YANG Zhi-qiang, GAO Qian. Development of new filling cementitious material of phosphogypsum in Jinchuan mine[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(1): 21-24.
- [12] 张钦礼, 李谢平, 杨伟. 基于BP网络的某矿山充填料浆配比优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2867-2874.
- ZHANG Qin-li, LI Xie-ping, YANG Wei. Optimization of filling slurry ratio in a mine based on back-propagation neural network[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7): 2867-2874.
- [13] 周科平, 古德生. 安庆铜矿尾砂胶结充填灰砂配比的遗传优化设计[J]. 金属矿山, 2001(7): 11-13.
- ZHOU Ke-ping, GU De-sheng. Genetic optimization design of the cement-sand ratio of tailings consolidated filling in Anqing copper mine[J]. Metal Mine, 2001(7): 11-13.
- [14] 付自国, 乔登攀, 郭忠林, 等. 基于RSM-BBD的废石-风砂胶结体配合比与强度试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 694-703.
- FU Zi-guo, QIAO Deng-pan, GUO Zhong-lin, et al. Experimental research on mixture proportion and strength of cemented hydraulic fill with waste rock and eolian sand based on RSM-BBD[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 694-703.
- [15] 高谦, 杨晓炳, 温震江, 等. 基于RSM-BBD的混合骨料充填料浆配比优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(6): 47-55.
- GAO Qian, YANG Xiao-bing, WEN Zhen-jiang, et al. Optimization of the proportioning of mixed aggregate filling slurry based on BBD response surface method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(6): 47-55.
- [16] 吴浩, 赵国彦, 陈英. 多目标条件下矿山充填材料配比优化实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(11): 101-108.
- WU Hao, ZHAO Guo-yan, CHEN Ying. Multi-objective optimization for mix proportioning of mine filling materials[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(11): 101-108.
- [17] 温震江, 高谦, 王忠红, 等. 基于RSM-DF的矿渣胶凝材料复合激发剂配比优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 3103-3113.
- WEN Zhen-jiang, GAO Qian, WANG Zhong-hong, et al. Optimization of compound activator ratio of the ground granulated blast furnace slag powder cementitious material based on RSM-DF[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 3103-3113.
- [18] 赵海晋, 李辉. 镁渣代替部分石灰石生产熟料及水泥的实践[J]. 新世纪水泥导报, 2007, 13(6): 9-12.
- ZHAO Hai-jin, LI Hui. Practice of producing clinker and cement with magnesium slag instead of part of limestone[J]. Cement Guide for New Epoch, 2007, 13(6): 9-12.
- [19] 笕和平, 赵海晋, 高建荣, 等. 镁渣配料煅烧熟料形成过程的试验研究[J]. 水泥, 2007(7): 26-28.
- ZAN He-ping, ZHAO Hai-jin, GAO Jian-rong, et al. Research on formation process of cement clinker calcined with magnesium slag as one of raw materials[J]. Cement, 2007(7): 26-28.
- [20] 王保宝. 镁渣在新型干法水泥生产中的应用[J]. 新世纪水泥导报, 2009, 15(6): 33-34.
- WANG Bao-bao. Application of magnesium slag in new dry process cement production [J]. Cement Guide for New

- Epoch, 2009, 15(6): 33–34.
- [21] 邓军平, 陈新年, 郭一萍. 镁渣和矿渣对复合水泥性能的影响[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(4): 735–739.
- DENG Jun-ping, CHEN Xin-nian, GUO Yi-ping. Effect of magnesium slag and slag on properties of composite cement[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(4): 735–739.
- [22] 郭春军. 用金属镁渣替代部分矿渣生产水泥[J]. 水泥, 2005(6): 24–25.
- GUO Chun-jun. Replacing part of slag with magnesium slag to produce cement [J]. Cement, 2005(6): 24–25.
- [23] 肖力光, 王思宇, 雒 锋. 镁渣等工业废渣应用现状的研究及前景分析[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2008, 25(1): 1–7.
- XIAO Li-guang, WANG Si-yu, LUO Feng. Status research and applications of magnesium slag[J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2008, 25(1): 1–7.
- [24] 王 燕, 张战刚. 碱激发镁渣胶凝材料的研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(10): 64.
- WANG Yan, ZHANG Zhan-gang. Study on alkali activated magnesium slag cementitious material[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2011, 31(10): 64.
- [25] 刘志祥, 龚永超, 李夕兵. 基于分形理论和BP神经网络的充填料性能研究[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(2): 38–44.
- LIU Zhi-xiang, GONG Yong-chao, LI Xi-bing. Study on the backfilling material properties based on fractal theory and BP neural network[J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(2): 38–44.
- [26] 张钦礼, 赵宇飞, 荣 帅, 等. 基于变权重理论和TOPSIS的缓倾斜薄矿脉采矿方法优选[J]. 黄金科学技术, 2019, 27(6): 844–850.
- ZHANG Qin-li, ZHAO Yu-fei, RONG Shuai, et al. Optimization of gently inclined thin vein mining method based on variable weight theory and TOPSIS[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(6): 844–850.
- [27] 张钦礼, 曹瑞锋, 王 石, 等. 基于熵权和模糊数学的充填管道堵塞风险评价[J]. 科技导报, 2013, 31(S2): 30–34.
- ZHANG Qin-li, CAO Rui-feng, WANG Shi, et al. Risk assessment on blocking of filling pipeline based on the entropy and fuzzy mathematic[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(S2): 30–34.
- [28] 王 颖. 基于神经网络的数据挖掘方法的研究和应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- WANG Ying. Research and application of data mining method based on neural network[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [29] 徐文彬, 潘卫东, 丁明龙. 胶结充填体内部微观结构演化及其长期强度模型试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2333–2341.
- XU Wen-bin, PANG Wei-dong, DING Ming-long. Experiment on evolution of microstructures and long-term strength model of cemented backfill mass [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6): 2333–2341.
- [30] 赵国彦, 马 举, 彭 康, 等. 基于响应面法的高寒矿山充填配比优化[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(5): 559–565.
- ZHAO Guo-yan, MA Ju, PENG Kang, et al. Mix ratio optimization of alpine mine backfill based on the response surface method[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(5): 559–565.
- [31] FALL M, BENZAAZOUA M, SAA E G. Mix proportioning of underground cemented tailings backfill[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(1): 80–90.
- [32] 徐文彬, 杨宝贵, 杨胜利, 等. 研石充填料浆流变特性与颗粒级配相关性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 1282–1289.
- XU Wen-bin, YANG Bao-gui, YANG Shen-li, et al. Experimental study on correlativity between rheological parameters and grain grading of coal gauge backfill slurry[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(4): 1282–1289.

Development of magnesium slag binder and optimization of slurry ratio based on entropy weight multi-attribute decision

WEI Han-bo^{1,2,3}, BA Lei^{1,2}, WEN Zhen-jiang^{1,2}, XIAO Bo-lin^{1,2}, GAO Qian^{1,2}, LI Chen-zhuo^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine, Ministry of Education,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing,
Beijing 100083, China;

3. Beijing Building Energy Conservation and Building Materials Management Office, Beijing 101160, China.)

Abstract: In view of the high cost of cement for full tailings filling, the low-cost cementitious materials were developed by using local solid waste resources, and the slurry ratio was optimized based on mine requirements. Firstly, the proportion of magnesium slag cementitious material was determined by the orthogonal test, the range analysis and BP neural network based on the physicochemical analysis of the test materials. The mass fraction of magnesium slag (MS) was 30%, that of desulfurization gypsum (DSG) was 12% and that of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) was 58%. Then, the hydration mechanism was analyzed by XRD and SEM. Finally, the slurry ratio optimization test was carried out based on entropy weight multi-attribute decision with 7 d strength, 28 d strength, slump, bleeding rate and filling cost as indexes. The results show that, when using magnesium slag cementitious material, the proportioning optimization of filling slurry is cement/tailings ratio (C/T) of 1:4, and mass concentration (MC) of 72%. The verification tests are carried out, and the corresponding 7 d strength, 28 d strength, slump and bleeding rate (BR) are obtained, which are 2.72 MPa, 8.49 MPa, 20.0 cm and 6.5%, respectively. These indexes meet the requirements of the mine, and the filling cost (FC) is 111 CNY/m³, which is 42.2% lower than the original FC of 192 CNY/m³ when using cement.

Key words: filling mining method; magnesium slag; cementitious material; neural network; entropy weight multi-attribute decision; proportioning optimization

Foundation item: Project(2017YFC0602903) supported by the National Key Research and Development Program of China

Received date: 2021-05-12; **Accepted date:** 2021-09-06

Corresponding author: XIAO Bo-lin; Tel: +86-13269500905; E-mail: bxiao@ustb.edu.cn

(编辑 何学锋)