

## 基于 RSM-BBD 的混合骨料充填料浆配比优化

高谦<sup>1,2</sup>, 杨晓炳<sup>1,2†</sup>, 温震江<sup>1,2</sup>, 陈得信<sup>3</sup>, 何建元<sup>3</sup>

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

2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 3. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100)

**摘要:**针对混合骨料充填矿山,为了确定充填料浆优化配比,首先进行充填材料物化特性分析,在此基础上,根据泰波级配理论和最大堆积密实度理论,确定棒磨砂-废石配比;然后采用 BBD 响应面法设计 13 组试验,研究料浆质量分数、胶砂比(胶凝材料与骨料的比值)、混合骨料配比对充填体强度影响规律.最后以各龄期强度为响应值构建响应面模型,揭示各响应参数与目标响应量相关关系及多目标条件下充填料浆优化配比.研究表明,充填体强度不仅受单因素影响,而且各因素间交互作用对充填体也有很大影响.其中料浆质量分数与骨料配比的交互作用对充填体早期强度起决定性作用,胶砂比与骨料配比的交互作用对充填体中期强度影响显著,充填体后期强度受料浆质量分数和胶砂比交互作用影响较大.以充填成本作为目标建立优化模型进行优化,由此获得充填料浆的优化配比为:料浆质量分数 80%,胶砂比为 1:6,棒磨砂-废石配比为 3:7.通过试验验证满足金川矿山充填体强度要求.

**关键词:**采矿方法;BBD 响应面法;料浆配比;骨料;抗压强度;交互作用;多目标优化;成本

中图分类号:TD853;X751

文献标志码:A

## Optimization of Proportioning of Mixed Aggregate Filling Slurry Based on BBD Response Surface Method

GAO Qian<sup>1,2</sup>, YANG Xiaobing<sup>1,2†</sup>, WEN Zhenjiang<sup>1,2</sup>, CHEN Dexin<sup>3</sup>, HE Jianyuan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine of 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. Jinchuan Group Co Ltd, Jinchang 737100, China)

**Abstract:** In view of the mixed aggregate filling mine, in order to determine the optimum proportion of filling slurry, firstly, the physicochemical properties of filling materials were analyzed. Based on the theory of Talbol grading and the theory of maximum bulk density, the ratio of rod grinding sand and waste rock was determined. 13 groups of tests were designed with BBD response surface method (RSM-BBD) to analyze the effects of slurry mass fraction, cement-aggregate ratio and mixture aggregate ratio on the strength of filling body. Finally, the response surface model was constructed with the intensity of each age as the response value to study the correlation between

\* 收稿日期:2018-12-26

基金项目:国家重点研发计划重点专项资助项目(2017YFC0602903), National Key Research and Development Program of China(2017YFC0602903)

作者简介:高谦(1956—),男,江苏徐州人,北京科技大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: daningyb@163.com

each response parameter and the target response as well as the optimal ratio of the filling slurry under multi-objective conditions. The results show that the strength of the filling body is affected by single factors, and the interaction between the various factors has a great influence on the filling body. The interaction between the mass fraction and aggregate ratio plays a decisive role in the early strength of the filling body. The interaction between the cement-aggregate ratio and aggregate ratio has a significant effect on the medium strength of the filling body. The late strength of the backfill is greatly affected by the interaction of the mass fraction and cement-aggregate ratio. The optimization is based on the lowest unit filling cost, and the optimal ratio is as follow: slurry mass fraction is 80%, cement-aggregate is 1 : 6, the ratio of rod grinding sand and waste rock is 3 : 7, and the test is verified to meet Jinchuan Mine strength requirements.

**Key words:** mining engineering; BBD response surface method (RSM -BBD); slurry ratio; aggregates; compressive strength; interactions affection; multi-objective constrained optimization; costs

随着社会经济高速发展,人们对矿产资源的需求量逐年上升.近年来,由于对环境保护以及安全生产要求的提高,充填采矿法不仅可以减少矿石的损失和贫化、提高废石利用率、减少占地和污染,而且充填体可以支持采空区避免塌陷,有利于控制采场地压等优点,逐渐被广泛应用<sup>[1-3]</sup>.充填材料的选择和对比对充填体强度和充填成本起决定作用.

国内外学者对充填材料的选择、配比以及充填体强度的影响因素等进行了大量的研究.其中 Djurdjevac、Ghirian 等<sup>[4-5]</sup>基于试验法研究了充填工艺及物料对比对充填体强度的影响; Fall 等<sup>[6]</sup>基于满意度函数对充填料进行配比优化; Bowromi 公式<sup>[7]</sup>表明强度是灰水比的一次函数; Kesimal 等<sup>[8]</sup>通过试验研究了骨料以及胶凝材料性能对充填体强度及稳定性的影响; Bharatkumar 等<sup>[9]</sup>建立了单轴抗压强度与水灰比的关系、黏聚力和单轴抗压强度的关系; Aldhafeeri 等<sup>[10]</sup>研究了温度对充填体强度发展的影响; 张钦礼<sup>[11]</sup>、刘志祥等<sup>[12]</sup>采用 BP 神经网络来优化充填料配比; 周科平<sup>[13]</sup>将灰色理论应用于充填料的配比优化; 韩斌、杨啸等<sup>[14-15]</sup>基于正交试验对矿山充填材料配比进行研究; 刘志祥、池漪等<sup>[16-17]</sup>基于分形理论研究骨料级配对充填体强度的影响; 温震江等<sup>[18]</sup>研究了胶凝材料对充填体强度的影响; 李雅阁、曹帅等<sup>[19-20]</sup>研究了充填体在不同条件下的力学特性.上述研究在矿山充填方面均取得了一定成效,但是大多只考虑了单一因素的影响,却忽视各个因素之间的相互作用对充填体强度的影响.

响应面法(Response Surface Methodology, RSM)是一种综合试验设计和数学建模的优化方法,通过

对具有代表性的局部各点进行试验,回归拟合全局范围内因素与结果间的函数关系,并且取得各因素最优水平值<sup>[21]</sup>.与常用的正交试验相比其具有试验量少、精度高、预测性好等优点,而且充分考虑各因素交互作用<sup>[22]</sup>.目前被广泛应用于诸多领域,其中康博文、赵敏捷等<sup>[23-24]</sup>利用响应面法对矿石浮选进行优化; 赵国彦等<sup>[25]</sup>、吴浩等<sup>[26]</sup>分别采用 CCD 响应面法和 BBD 响应面法对矿山充填配比进行优化.本文在现有研究的基础上采用 BBD 响应面法通过试验研究棒磨砂-废石配比、料浆质量分数、胶砂比等因素分别对充填体 3 d、7 d 和 28 d 龄期强度的影响规律及各因素间交互作用对充填体强度的影响,并且建立 3 个龄期充填体强度响应面回归模型,为现场充填料浆配比及优化提供依据.

## 1 充填材料物化特性与级配分析

### 1.1 充填骨料物化特性分析

金川矿山充填主要采用棒磨砂和废石的混合骨料,其中棒磨砂取材于戈壁卵砂石,经“两段一闭路”的破碎工艺和棒磨工艺加工成最大粒径为 5 mm 的骨料,用于充填;废石骨料主要来源于矿山井巷开拓和采矿过程中产生的废石混合料,经过颚式破碎机破碎成最大粒径为 12 mm 的骨料,作为粗骨料构建充填骨架.两种充填骨料的物理参数和化学成分分别如表 1 和表 2 所示.由表 2 可以看出棒磨砂和废石化学成分有着明显的差别,废石的化学成分更加复杂,但主要由 SiO<sub>2</sub> 组成,属于惰性材料,比较稳定,适合作为充填骨料.

表 1 充填骨物理参数

**Tab.1 Physical parameters of filling aggregate**

骨料	密度 $\rho / (\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	堆积密度 $\rho' / (\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	含泥量 /%	空隙率 /%	堆积密实度 /%
棒磨砂	2.67	1.58	10.98	42.64	57.36
废石	2.87	1.59	15.05	39.11	60.89

表 2 充填骨料化学成分(质量分数)

**Tab.2 Chemical composition of filling aggregate( mass fraction) %**

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其他
棒磨砂	63.6	—	3.68	3.44	1.39	—	0.132	27.58
废石	36.31	3.39	28.15	—	3.86	9.51	—	18.11

1.2 胶凝材料特性

充填胶凝材料选用金昌熙金节能建材公司生产的固结粉新型胶凝材料,其主要成分为矿渣微粉,按比例掺加一定量的熟料、脱硫石膏用于替代水泥进行充填,其密度为 2.8 t/m<sup>3</sup>,细度(以 45 μm 筛余表示)≤5%,28 d 抗压强度 40.5 MPa.

1.3 充填骨料级配分析

骨料级配是影响充填体强度的重要因素之一,而对于混合骨料而言配比对级配有重要的影响.泰波级配理论将粒径不大于  $d$  的骨料占总量的百分比表述成式(1)的形式<sup>[25]</sup>:

$$P = 100 \times \left( \frac{d}{D} \right)^n \quad (1)$$

式中: $P$ 为骨料的粒径  $d$  的通过百分率,%; $D$ 为骨料中最大粒径,mm; $n$ 为级配指数.

根据式(1),采用 origin 分别对棒磨砂和废石两种骨料粒径分别进行拟合,结果如图 1 所示.

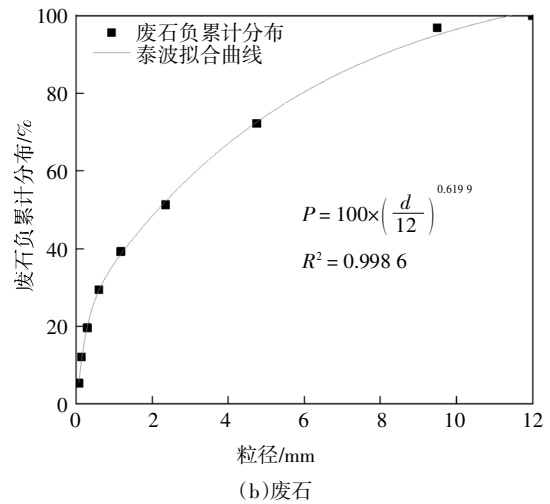
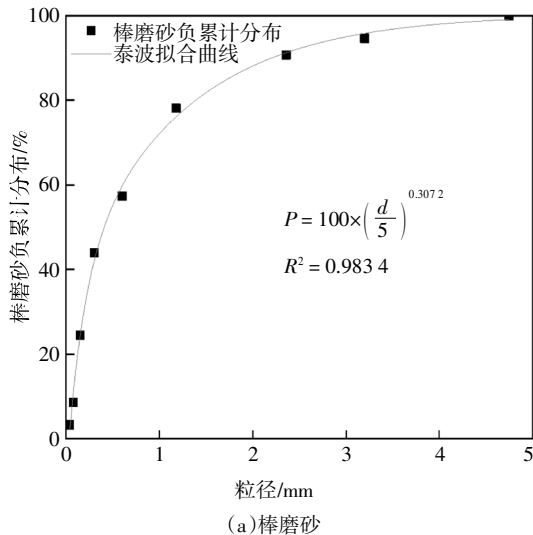


图 1 棒磨砂和废石粒径负累计分布特征曲线  
Fig. Characteristics curve negative cumulative distribution of rod mill sand and waste rock particles

根据图 1 拟合结果可以看出,棒磨砂级配指数  $n=0.3072$ ,相对于理想状态的 Fuller 级配指数  $n=0.5$  偏小,说明棒磨砂骨料细颗粒偏多,若不掺加一定量的粗骨料很难形成充填骨架,进而影响充填体强度;而废石骨料级配指数  $n=0.6199$ ,大于 0.5,则说明废石骨料中粗颗粒含量偏高,如果不掺加一定量的细颗粒改善级配,在高浓度充填时容易发生沉降离析.

1.4 混合骨料配比确定

根据骨料级配研究结果可以看出,棒磨砂和废石两种骨料单独使用很难满足矿山对充填体强度和料浆流动性的要求,因此需要将两种骨料按照一定的配比混合以改善充填级配,增大骨料堆积密实度,在保证强度的前提下,尽可能降低胶凝材料用量,进而降低充填成本.在进行充填强度试验之前要根据两种骨料的堆积密实度试验确定两种骨料的配合比,试验设计了 11 种配比,分别测定不同配比的混合骨料的密度  $\rho$  和松散密度  $\gamma$ ,再根据式(2)得出混合骨料的堆积密实度  $\Phi$ .

$$\Phi = \gamma / \rho \quad (2)$$

然后根据两种骨料的堆积密实度模型函数<sup>[27-28]</sup>(如式(3)所示),分别计算不同配比情况下混合骨料的理论堆积密实度.结果如图 2 所示.

$$\Phi = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \rho_1 \left( \frac{x}{\rho_1} + \frac{1-x}{\rho_2 \Phi_2} \right)^{-1}, & x \leq \frac{\rho_1 \Phi_1}{\rho} \\ \frac{1}{\rho} \left[ \frac{x}{\rho_1 \left( \Phi_1 + 1 - x \frac{\rho}{\rho_1} \right)} + \frac{1-x}{\rho_2 \Phi_2} \right]^{-1}, & x > \frac{\rho_1 \Phi_1}{\rho} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\rho_1$  为废石粗骨料密度， $t/m^3$ ； $\rho_2$  为棒磨砂细骨料密度， $t/m^3$ ；混合骨料密度  $\rho = [x/\rho_1 + (1-x)/\rho_2]^{-1}$ ， $0 \leq x \leq 1$ ； $\Phi_1$  为废石粗骨料堆积密实度； $\Phi_2$  为棒磨砂细骨料堆积密实度； $x$  为废石粗骨料质量分数，%。

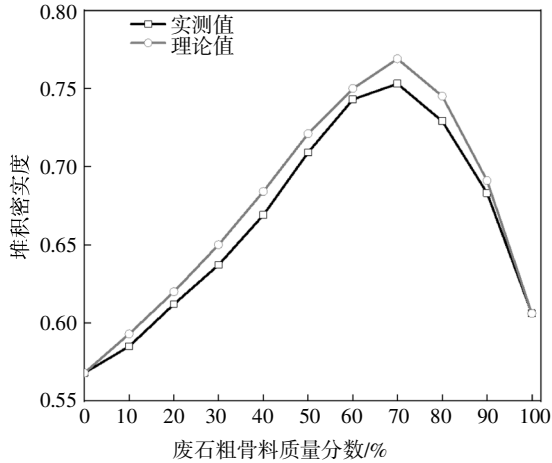


图2 棒磨砂-废石混合骨料堆积密实度曲线图

Fig.2 Compactness curve of mixed aggregate for rod mill sand and waste rock

由图2可知，当废石粗骨料质量分数  $x < 70\%$  时，混合骨料堆积密实度随粗骨料质量分数的增加而增大，此时，废石粗骨料构成“骨架”结构，而细骨料棒磨砂主要起填充空隙的作用；当  $x = 70\%$  时，混合骨料堆积密实度的理论值和实测值均达到最大，这是因为此时的配比满足棒磨砂细骨料恰好把废石粗骨料形成的“骨架”空隙填满，使得混合骨料最密实；当  $x > 70\%$  时，混合骨料堆积密实度随废石粗骨料质量分数的增加而减小，这是由于随着废石粗骨料质量分数的增加，棒磨砂质量分数减少不足以填充废石形成的“骨架”结构，加之粗骨料之间的“边壁效应”进一步阻碍细骨料的填隙，故而使得混合骨料堆积密实度越来越小。

综合分析，骨料堆积密实度越大，骨料中空隙越小，堆积骨料就越密实。同等条件下充填体的强度越高，根据堆积密实度试验，选择棒磨砂-废石配比(质量比)分别为 4:6、3:7 和 2:8，即选择废石粗骨料质量分数为 60%~80% 骨料配比进行充填体强度试验。

## 2 充填料浆配比强度试验

### 2.1 充填料浆配比试验设计

充填体强度主要取决于充填料浆配比，当充填料浆中骨料、胶凝材料、水三者之间的配比达到最优时，在保证充填体强度的前提下，可以降低充填

成本。试验探究料浆质量分数  $X_1$ 、胶砂比  $X_2$ 、棒磨砂-废石混合骨料中废石质量分数  $X_3$  3 个因素分别对充填体 3 d、7 d 和 28 d 3 个龄期抗压强度的影响规律，分别用  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$  表示。前期单因素试验结果表明：棒磨砂-废石混合骨料高浓度充填料浆质量分数为 78%~82%，胶砂比为 1:6~1:4 时既满足强度要求又满足管输要求，并且充填成本较低。再结合前面堆积密实度试验确定的棒磨砂-废石混合骨料中废石质量分数 60%~80%，因此确定各因素中的水平分别为：料浆质量分数分别为 78%、80% 和 82%，胶砂比分别为 1:6、1:5 和 1:4，混合骨料中废石质量分数分别为 60%、70% 和 80%。采用 Box-Behnken 设计了 3 因素 3 水平的试验来探究各因素及其交互作用对充填体强度的影响。影响因素及水平编码如表 3 所示。

表 3 响应量影响因素及水平

Tab.3 Factors and levels of response variables

影响因素	编码值	编码水平		
		-1	0	1
料浆质量分数/%	$X_1$	78	80	82
胶砂比	$X_2$	1:6	1:5	1:4
废石质量分数/%	$X_3$	60	70	80

### 2.2 试验结果

具体试验方案和结果如表 4 所示。采用 Desing-Export 软件对试验结果进行多元回归拟合，得出响应面函数如式(4)~式(6)所示。

表 4 响应面试验设计与结果

Tab.4 Design and results of response surface analysis

编号	编码值			试验强度/MPa			预测强度/MPa		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1^*$	$Y_2^*$	$Y_3^*$
1	0	1	1	1.64	3.17	5.90	1.54	3.28	5.88
2	0	0	0	1.76	3.43	5.69	1.76	3.43	5.71
3	-1	1	0	1.62	3.80	5.21	1.68	3.83	5.26
4	0	-1	1	1.06	2.27	4.16	1.07	2.14	3.85
5	1	1	0	2.09	5.21	8.39	2.06	4.94	8.10
6	0	1	-1	1.83	3.70	6.03	1.81	3.82	6.28
7	-1	-1	0	0.83	1.98	3.75	0.89	2.03	4.01
8	1	0	-1	1.79	3.61	5.63	1.87	3.80	5.67
9	1	-1	0	1.73	3.40	4.69	1.71	3.28	4.54
10	-1	0	-1	1.63	3.01	4.96	1.56	2.88	4.87
11	0	-1	-1	0.75	1.91	3.52	0.78	1.81	3.61
12	-1	0	1	1.51	2.96	4.32	1.43	2.78	4.27
13	1	0	1	1.75	3.58	5.56	1.82	3.78	5.93

$$Y_1 = 86.24 - 291.01X_1 + 192.71X_2 + 21.26X_3 + 196.87X_1^2 - 208.0X_2^2 - 16.88X_3^2 - 97.55X_1X_2 + 10X_1X_3 - 27.81X_2X_3 \quad (R^2=0.961) \quad (4)$$

$$Y_2 = 504.32 - 1375.77X_1 + 106.01X_2 + 76.77X_3 + 868.75X_1^2 - 207.16X_2^2 - 48.75X_3^2 + 45.69X_1X_2 + 2.5X_1X_3 - 53.06X_2X_3 \quad (R^2=0.953) \quad (5)$$

$$Y_3 = 111.65 - 230.80X_1 - 416.30X_2 + 33.12X_3 + 43.75X_1^2 - 265.71X_2^2 - 59X_3^2 + 727.61X_1X_2 + 71.25X_1X_3 - 38.06X_2X_3 \quad (R^2=0.963) \quad (6)$$

2.3 响应面回归模型可靠性分析

为了验证基于响应面建立的函数模型是否可靠,需要对其进行方差分析,结果如表 5 所示。可以看出各模型  $F$  值均大于  $F_{0.95}(3,9)=3.86$ , 并且各模

型  $P < 0.005$ , 则表明各模型回归效果显著;相关系数  $R^2$  分别为 0.961、0.953、0.963,均接近 1,分别以 3 d、7 d、28 d 强度试验值和预测值之间的相对误差绘制  $(x,y,z)$  散点图,如图 3 中的小球所示,图中圆点为误差散点在各平面上的投影,以相对误差  $\pm 8\%$  为界限得到误差允许范围,如图中阴影面所示,可见各平面上的点均落在误差允许范围内,并且各龄期强度试验值和预测值的绝对平均误差分别为 3.36%、3.92%、3.06%,表明各模型拟合效果好,可靠性较高。

表 5 响应面回归模型方差分析

Tab.5 Analysis of variance with the regression model of different response surfaces

变异来源	平方和			均方			F 值			P 值		
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
模型	1.95	8.84	18.89	0.22	0.97	2.09	9.5	60.77	77.28	0.003	7E-4	7E-4
$X_1$	0.39	2.35	4.94	0.48	2.35	2.35	48.09	234.6	493.71	0.004	7E-4	6E-4
$X_2$	0.62	0.31	0.53	0.62	0.31	0.53	62.31	31.23	53.46	3E-4	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
$X_3$	0.42	2.01	4.32	0.42	2.01	4.32	42.16	200.7	432.14	0.192	0.178	0.189
$X_1^2$	3.8E-5	0.05	0.09	3.8E-5	0.05	0.09	0.004	4.92	8.73	0.672	0.563	0.613
$X_2^2$	0.08	0.38	0.82	0.08	0.38	0.82	8.13	38.42	81.95	0.025	0.032	0.037
$X_3^2$	0.075	0.36	0.77	0.075	0.36	0.77	7.52	35.73	77.04	0.042	0.036	0.041
$X_1X_2$	0.023	1.03	6.58	0.023	1.03	6.58	2.34	103.3	657.6	0.362	0.013	0.385
$X_1X_3$	0.09	0.04	0.02	0.09	0.04	0.02	9.17	4.59	2.11	0.019	0.026	0.030
$X_2X_3$	1.5E-3	2.21	0.16	1.5E-3	0.21	0.16	0.15	220.6	15.82	0.432	0.003	0.392
残差	0.18	0.43	0.71	0.03	0.06	0.10						
净误差	0.02	0.08	0.12	0.005	0.02	0.03						

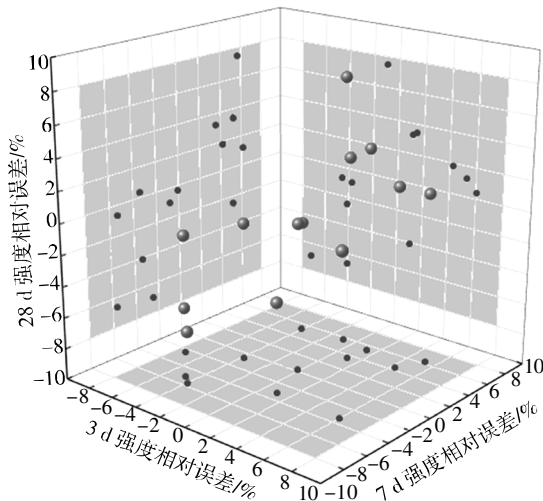


图 3 响应面模型三维误差图

Fig.3 Three dimensional error diagram of response surface model

3 试验结果分析

3.1 响应面参数单因素对充填体强度的影响

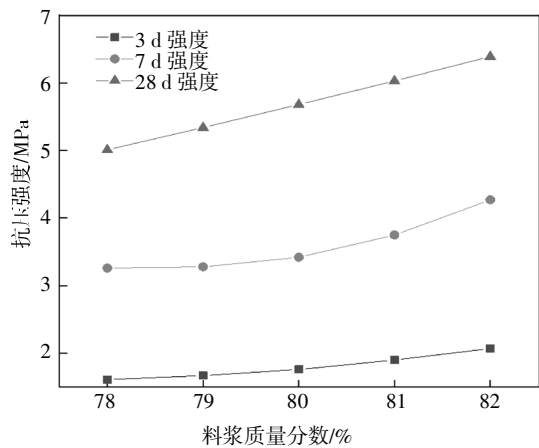
3.1.1 料浆质量分数对充填体强度的影响

料浆质量分数是影响充填体强度的重要因素

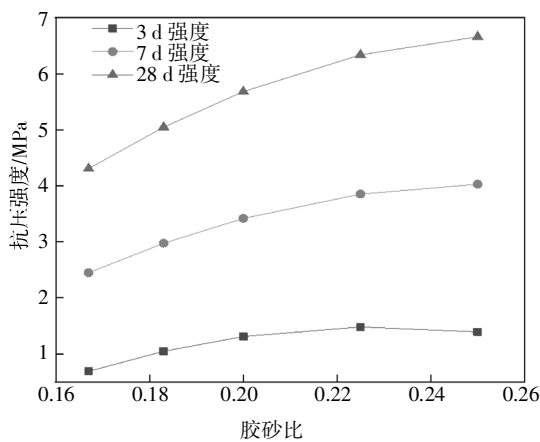
之一,在满足料浆流动性和充填体强度要求的前提下,适当提高料浆质量分数,可以减少胶凝材料掺量,降低充填成本<sup>[26]</sup>。图 4(a)为胶砂比 1:5,废石质量分数 70%时的料浆质量分数与各龄期充填体强度的关系,可以看出当胶砂比和混合料配比一定时,各个龄期充填体强度随着料浆质量分数的增加而增大,并且 7 d 和 28 d 强度增大的幅度较大,结合表 5 可以看出,7 d 和 28 d 强度回归模型中料浆质量分数  $X_1$  的  $F$  值较大,表明料浆质量分数对充填体后期强度影响较为显著。这是因为在其他条件一定的情况下,料浆质量分数的大小决定了料浆中含水的多少,而水是后期胶凝材料水化反应必需的物质,保证水化反应持续进行,生成更多的钙矾石晶体(Aft)填充于骨料空隙之间,使得强度提高,并且料浆质量分数越高,充填体中骨料质量分数就越大,越容易在强度发展后期形成完善的骨架支撑体系,强度就越高。

3.1.2 胶砂比对充填体强度的影响

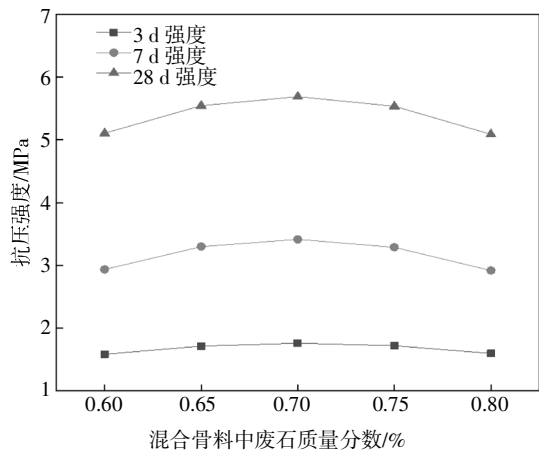
矿山充填中胶砂比是料浆中胶凝材料和骨料的质量比值,在其他条件一定的情况下,胶砂比越



(a)料浆质量分数对抗压强度的影响



(b)胶砂比对抗压强度的影响



(c)混合骨料中废石质量分数对抗压强度的影响

图4 响应面单因素对充填体强度的影响

Fig.4 Effect of single factor of response surface on strength of backfill

大料浆中胶凝材料质量分数就越高,相应的强度就越高.图4(b)为料浆质量分数80%、骨料中废石质量分数为70%时的胶砂比与各龄期充填体强度的关系,可以看出在其他条件相同的情况下,各龄期强度随着胶砂比的增大而增大,并且计算出3d、7d

和28d龄期的强度增长幅度分别为102%、65%和55%,结合表5中3d龄期的强度回归模型中胶砂比 $X_2$ 的 $F$ 值最大,说明胶砂比对充填体早期强度有显著影响.这是因为早期胶凝材料与水发生反应生成钙矾石等水化产物,将松散的骨料黏结在一起,硬化后具有早期强度<sup>[27]</sup>.在其他条件相同的情况下,胶砂比越大,胶凝材料掺量就越多,早期生成的水化产物也就越多,黏结力就越大,早期强度也就越高.

### 3.1.3 骨料比对充填体强度的影响

骨料比对充填体强度的影响主要体现为混合骨料堆积密度对充填体强度的影响<sup>[26]</sup>,图4(c)为料浆质量分数80%、胶砂比1:5时的混合骨料中废石质量分数与各龄期充填体强度的关系.可以看出废石质量分数为60%~80%时的骨料比对充填体强度的影响较小,方差分析中混合骨料中废石质量分数 $X_3$ 的 $F$ 较小也表明在试验范围内骨料比对强度的影响要比因素 $X_1$ 和 $X_2$ 小.在其他条件相同的情况下,混合骨料中废石质量分数为70%时,即棒磨砂-废石配比为3:7时混合骨料堆积密度最大,故各个龄期充填体强度最大.

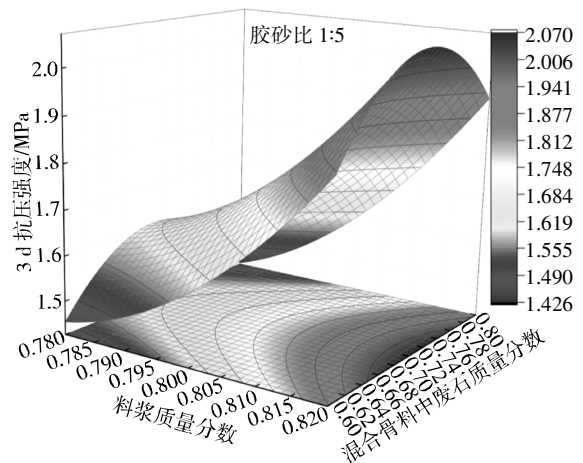
### 3.2 响应面参数交互作用对充填体强度的影响

由表5可知,充填体强度不仅受料浆质量分数、胶砂比以及混合骨料配比的单一因素影响,而且还受3个因素的交互作用影响.由前面分析可以得出料浆质量分数对充填体后期强度影响显著,而胶砂比对充填体早期强度有较大影响,然后就表5方差分析结果可以看出料浆质量分数 $X_1$ 与混合骨料中废石质量分数(骨料配比) $X_3$ 的交互作用对3d龄期的强度影响显著.图5(a)为胶砂比1:5时,料浆质量分数与骨料配比的交互作用对充填体3d龄期的强度的影响,可以看出当混合骨料中废石质量分数较低时,随着料浆质量分数的提高,充填体3d龄期的强度呈逐渐增大的趋势,料浆质量分数在81%后增大速率有所降低,当混合骨料中废石质量分数增大到80%时,充填体强度仍随着料浆质量分数的提高而增大.当料浆质量分数较低时,充填体3d龄期的强度随着骨料中废石所占百分比的增加先增大后降低,在废石质量分数为70%时最大,相比于废石质量分数60%时充填体强度提高了约11%,这是因为在此时混合骨料堆积密度达到了最大.综上所述可知,在一定范围内增大骨料中废石质量分数的同时提高料浆质量分数,有利于早期强度大幅提高.这是因为在充填早期胶凝材料水化不完全,此时强

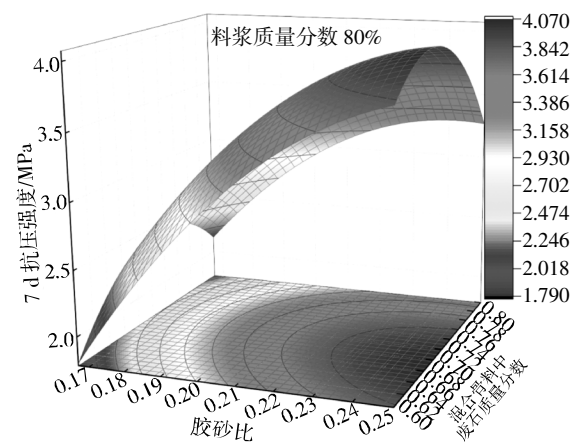
度主要由骨架的支撑作用提供,而随着料浆质量分数的提高,单位料浆中骨料增多,骨料中废石质量分数适当提高,不仅可提高骨料堆积密实度,而且充填体中粗骨料形成的“大结构”增多<sup>[29-30]</sup>,其支撑作用决定了充填体早期强度<sup>[31]</sup>.

充填体7d龄期的强度同样受到3个因素之间交互作用的影响,根据方差分析结果可知各因素对7d强度的影响顺序为:料浆质量分数>骨料配比>胶砂比与骨料配比的交互作用>料浆质量分数与胶砂比的作用>胶砂比>料浆质量分数与骨料配比的交互作用.图5(b)是料浆质量分数为80%时胶砂比与骨料配比的交互作用对7d龄期充填体强度的影响,可以看出骨料中废石质量分数较低时,随着胶砂比的增大充填体7d强度逐渐增大,当胶砂比大于0.2(即1:5)时强度增长速度逐渐变缓,当骨料中废石质量分数增加到70%时,胶砂比由1:6增到1:4时,充填体强度提高了约66%;当胶砂比较低时,充填体强度随着骨料中废石质量分数的增加先增大后减小,在骨料中废石质量分数为70%时达到最大,这是因为此时混合骨料堆积密实度最大.在充填中期,当胶砂比一定时,单位料浆胶凝材料用量一定,水化反应相对充分,合理的骨料配比可以增大骨料堆积密实度形成较为稳固的充填骨架,适当提高胶砂比,可以将使密实的骨架胶结成一个整体,强度增大.所以胶砂比与骨料配比的交互作用对充填体7d龄期的强度影响较为显著.

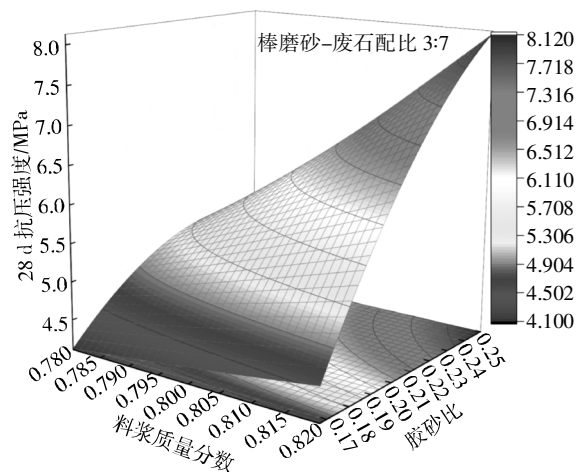
料浆质量分数与胶砂比的交互作用对充填体后期强度影响较为显著,图5(c)为棒磨砂-废石配比3:7时的料浆质量分数与胶砂比的交互作用对28d龄期充填体强度的影响,可以看出当胶砂比较小时,随着料浆质量分数的提高,充填体28d强度近似呈直线增大,当胶砂比为1:5时,料浆质量分数由78%提高到82%,充填体强度提高了约35%.当料浆质量分数较低时充填体28d强度随着胶砂比的增大逐渐提高,胶砂比大于1:5后提高速度变缓,当料浆质量分数为80%,胶砂比从1:6增到1:5时,充填体强度提高了33%.料浆质量分数与胶砂比对充填体后期强度影响非常显著,随着料浆质量分数的提高充填体强度呈直线增长,料浆质量分数一定的情况下,胶砂比越大,单位料浆胶凝材料就越多,在充填体后期生成的水化产物越多,“结晶成核”对强度影响越显著<sup>[27]</sup>.



(a)料浆质量分数与骨料配比对3d龄期强度的影响



(b)胶砂比与骨料配比对7d龄期强度的影响



(c)料浆质量分数与胶砂比对28d龄期强度的影响

图5 响应面因素间交互作用对充填体强度的影响

Fig.5 Effect of interaction between response surface factors on strength of backfill

#### 4 充填料浆配比多目标优化

充填成本是影响矿山经济效益的重要因素,在保证充填体强度的前提下,降低充填成本是金川矿山提高经济效益的重要途径.金川矿山采用下向充

填技术,对充填体强度要求为3 d龄期的强度不低于1.5 MPa,7 d龄期的强度不低于2.5 MPa,28 d龄期的强度不低于5 MPa。因此,以单位体积充填成本最低作为优化目标,即 $\min f$ ,以充填体强度为约束条件,即 $Y_1 \geq 1.5, Y_2 \geq 2.5, Y_3 \geq 5$ 进行优化,建立优化模型如式(7)所示,各充填材料成本见表6。

表6 充填材料成本

Tab.6 The cost of filling material

充填材料	固结粉	废石	棒磨砂	工业用水
成本/(元·t <sup>-1</sup> )	220	20	47	3.2

$$\begin{aligned} \min f &= 220M_j + 20M_f + 47M_b + 3.2M_w \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} Y_1 \geq 1.5 \\ Y_2 \geq 2.5 \\ Y_3 \geq 5 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $f$ 为单位体积充填成本,元/m<sup>3</sup>;  $M_j$ 、 $M_f$ 、 $M_b$ 、 $M_w$ 分别为1 m<sup>3</sup>中胶凝材料质量、废石骨料质量、棒磨砂骨料质量、水的质量,t。上述质量均可根据 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 由式(8)求得。

$$\begin{cases} \frac{M_f + M_b}{2.75} + M_w + \frac{M_j}{2.8} = 1 \\ \frac{M_f + M_b + M_j}{M_f + M_b + M_j + M_w} = X_1 \\ \frac{M_j}{M_f + M_b} = X_2 \\ \frac{M_f}{M_f + M_b} = X_3 \end{cases} \quad (8)$$

结合式(4)~式(8)采用MATLAB非线性规划求解,并经过验算,得出充填材料最优配比为:料浆质量分数80%,胶砂比1:6,棒磨砂-废石配比3:7。并且进行验证试验,限于篇幅,不再赘述过程,结果表明:3 d、7 d和28 d龄期充填体的强度分别为1.68 MPa、2.79 MPa和5.03 MPa,满足金川矿山充填强度要求。

## 5 结论

1)采用泰波级配理论分别对棒磨砂和废石进行级配分析,并基于最大堆积密实度理论对棒磨砂和废石两种骨料的配比进行研究,得出棒磨砂-废石混合骨料堆积密实度随着废石质量分数的增加先增大后减小,当废石质量分数为70%时即棒磨砂-废石配比为3:7时,混合骨料堆积密实度最大,级配最好。

2)基于BBD响应面法对充填材料配比强度试验进行设计和分析,对料浆质量分数、胶砂比、骨料配比3个响应参数及其之间的交互作用对充填体强度的影响进行了研究。结果表明:胶砂比、料浆质量分数分别对充填体早、后期强度影响显著;料浆

质量分数与骨料配比的交互作用对充填体早期强度起决定性作用;胶砂比与骨料配比的交互作用对充填体中期强度有显著影响;充填体后期强度受废石和胶砂比交互作用的影响较大。

3)根据13组强度试验结果分别对各个龄期强度进行多项式回归,相关系数分别为0.961、0.953和0.963。并根据回归方程预测各组强度与试验强度进行对比,得出各龄期强度试验值和预测值的绝对平均误差分别为3.36%、3.92%、3.06%,表明各模型拟合效果好;并对回归模型进行显著性检验, $F$ 值和 $P$ 值表明各模型回归效果均显著。

4)采用多目标规划,以单位体积充填体成本为目标,以各龄期强度要求为约束条件进行优化,得出充填材料最优配比为:料浆质量分数为80%,胶砂比为1:6,棒磨砂-废石配比为3:7,并对其进行试验验证,结果得到3 d、7 d和28 d龄期充填体强度分别为1.68 MPa、2.79 MPa和5.03 MPa,均满足金川矿山充填强度要求。

## 参考文献

- [1] 程海勇,吴爱祥,韩斌,等.露天-地下联合开采保安矿柱稳定性[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3183-3192. CHENG H Y, WU A X, HAN B, et al. Stability of safety pillars in open-cast-underground combined mining [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(9):3183-3192. (In Chinese)
- [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 X B, ZHOU J, WANG S F, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6):1236-1262. (In Chinese)
- [4] DJURDJEVIC L, IGNJATOVIC D, LJUBOJEV M, et al. Change the uniaxial compressive strength of paste backfill depending on change the parameters [J]. Mining & Metallurgy Engineering Bor, 2016(1):17-24.
- [5] GHIRIAN A, FALL M. Strength evolution and deformation behaviour of cemented paste backfill at early ages: effect of curing stress, filling strategy and drainage [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(5):809-817.
- [6] FALL M, BENZAAZOUA M, SAA E G. Mix proportioning of underground cemented tailings backfill [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2008, 23(1):80-90.
- [7] 史才军,王德辉,安晓鹏,等.基于多种性能要求的混凝土组成设计方法[J].硅酸盐学报,2018,46(2):230-238. SHI C J, WANG D H, AN X P, et al. Method for mixture design of concrete with multiple performance requirements [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(2):230-238. (In Chinese)
- [8] KESIMAL A, YILMAZ B, ERCKDI B, et al. Effect of properties of tailings and binder on the short- and long-term strength and stability of cemented paste back fill [J]. Materials Letters, 2005, 59(28):



- 3703—3709.
- [9] BHARATKUMAR B H, NARAYANAN R, RAGHUPRASAD B K, *et al.* Mix proportioning of high performance concrete [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2001, 23(1):71—80.
- [10] ALDHAFERI Z, FALL M, POKHAREL M, *et al.* Temperature dependence of the reactivity of cemented paste backfill [J]. *Applied Geochemistry*, 2016, 72(9):10—19.
- [11] 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 Q L, LI X P, YANG W. 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. (In Chinese)
- [12] 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 Z X, GONG Y C, LI X B. Study on the backfilling material properties based on fractal theory and BP neural network [J]. *Gold Science and Technology*, 2017, 25(2):38—44. (In Chinese)
- [13] 周科平. 充填体粒径分布对其强度影响的灰色关联分析[J]. *矿业研究与开发*, 1995, 15(4):32—35.  
ZHOU K P. A gray correlativity analysis of influence of particle size distribution of filling body strength [J]. *Mining Research and Development*, 1995, 15(4):32—35. (In Chinese)
- [14] 韩斌, 刘超, 孙伟, 等. 废石破碎胶结充填配比优选及在寒冷气候条件下的应用 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(11):4195—4203.  
HAN B, LIU C, SUN W, *et al.* Optimized mix ratio of crushed waste rocks in cementing backfill and its application in extreme cold [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(11):4195—4203. (In Chinese)
- [15] 杨啸, 杨志强, 高谦, 等. 混合充填骨料胶结充填强度试验与最优配比决策研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S2):635—641.  
YANG X, YANG Z Q, GAO Q, *et al.* Cemented filling strength test and optimal proportion decision of mixed filling aggregate [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2):635—641. (In Chinese)
- [16] 刘志祥, 李夕兵. 尾砂分形级配与胶结强度的知识库研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005(10):1789—1793.  
LIU Z X, LI X B. Study on fractal gradation of tailings and knowledge bank of its cementing strength [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005(10):1789—1793. (In Chinese)
- [17] 池漪, 尹健. 再生粗骨料级配的分形特征 [J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(2):177—180.  
CHI Y, YIN J. Fractal characteristics of size-distribution of recycled coarse aggregate [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(2):177—180. (In Chinese)
- [18] 温震江, 杨志强, 高谦, 等. 金川矿山早强充填胶凝材料配比试验与优化[J]. *矿冶工程*, 2018, 38(6):29—32.  
WEN Z J, YANG Z Q, GAO Q, *et al.* Proportioning and optimization test for backfill cementing material with faster strengthening property in Jinchuan Mine [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2018, 38(6):29—32. (In Chinese)
- [19] 李雅阁, 金龙哲, 谭昊, 等. 胶结充填体力学特性的加载速率效应试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(9):49—53.  
LI Y G, JIN L Z, TAN H, *et al.* Experiment of loading rate effect on mechanical characteristics of cemented filling body [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(9):49—53. (In Chinese)
- [20] 曹帅, 宋卫东, 薛改利, 等. 考虑分层特性的尾砂胶结充填体强度折减试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(10):2869—2876.  
CAO S, SONG W D, XUE G L, *et al.* Tests of strength reduction of cemented tailings filling considering layering character [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10):2869—2876. (In Chinese)
- [21] MASON R L, GUNST R F, HESS J L. Statistical design and analysis of experiments II designs and analyses for fitting response surfaces [J]. *Quality & Reliability Engineering International*, 2010, 6(4):308—309.
- [22] 李典, 冯国瑞, 郭玉霞, 等. 基于响应面法的充填体强度增长规律分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(2):392—398.  
LI D, FENG G R, GUO Y X, *et al.* Analysis on the strength increase law of filling material based on response surface method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2):392—398. (In Chinese)
- [23] 康博文, 谢贤, 范培强, 等. 响应曲面法优化某低品位细粒锡石浮选[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(1):31—38.  
KANG B W, XIE X, FAN P Q, *et al.* Optimization of cassiterite flotation based on response surface methodology [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 44(1):31—38. (In Chinese)
- [24] 赵敏捷, 方建军, 张铁民, 等. 响应曲面法优化某氧化铜矿硫化浮选[J]. *过程工程学报*, 2017, 17(3):532—538.  
ZHAO M J, FANG J J, ZHANG T M, *et al.* Optimization of copper oxide by sulphidizing flotation based on response surface methodology [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2017, 17(3):532—538. (In Chinese)
- [25] 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 G Y, MA J, PENG K, *et al.* Mix ratio optimization of alpine mine backfill based on response surface method [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(5):559—565. (In Chinese)
- [26] 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 H, ZHAO G Y, CHEN Y. Multi-objective optimization for mix proportioning of mine filling materials [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(11):101—108. (In Chinese)
- [27] 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 Z G, QIAO D P, GUO Z L, *et al.* Experimental research on mix proportioning 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. (In Chinese)
- [28] 姚维信. 矿山粗骨料高浓度充填理论研究与应用[D]. 昆明: 昆明理工大学国土资源工程学院, 2011.  
YAO W X. Theoretical study and application of high concentration filling of coarse aggregate in mine [D]. Kunming: School of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, 2011. (In Chinese)
- [29] 黄政宇, 李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3):47—54.  
HUANG Z Y, LI S G. Study on mechanical properties of ultra high performance concrete with coarse aggregate [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(3):47—54. (In Chinese)
- [30] 李文贵, 罗智予, 龙初, 等. 纳米再生骨料混凝土的动态力学性能试验研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(9):92—99.  
LI W G, LUO Z Y, LONG C, *et al.* Experimental study on the dynamical mechanical performance of nanomodified recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(9):92—99. (In Chinese)
- [31] 王林杰. 破碎卵石混凝土的架构理论研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2015.  
WANG L J. Study on the frame theory of broken pebble concrete [D]. Dalian: School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 2015. (In Chinese)