

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0806

FU Ziguo, QIAO Dengpan, GUO Zhonglin, 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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0806

## 基于RSM-BBD的废石-风砂胶结体配合比与强度试验研究

付自国,乔登攀,郭忠林,谢锦程,黄飞,王佳信

(昆明理工大学 国土资源工程学院,云南 昆明 650093)

**摘要:** 充填料浆配合比的选择直接决定了充填体的强度及运行成本。根据两种骨料混合堆积密实度试验,得到废石风砂最优配比。利用Design-Expert软件中的Box-Behnken中心组合试验设计及响应面法(RSM)研究了料浆质量分数、水泥用量和骨料配比对充填体不同龄期内无侧限抗压强度的影响规律,建立了以粗骨料胶结体3,7,28 d强度为响应值的三元二次回归模型,并对该模型的适用性进行了验证。试验结果表明,充填体强度不仅受单一因素影响,而且两因素之间的交互作用对强度影响显著。由模型的响应曲面可知,质量分数与骨料配比的交互作用对充填体早期强度影响显著,水泥用量与骨料配比的交互作用对充填体中期强度影响显著,质量分数与水泥用量的交互作用对充填体后期强度显著。通过回归模型及建立的充填材料成本函数,优选出一组料浆配合比,经现场试验满足生产要求。

**关键词:** SM-BB设计; 充填骨料; 堆积密实度; 料浆配合比; 强度试验; 预测模型

中图分类号: TD853.34

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2018)03-0694-10

## Experimental research on mixture proportion and strength of cemented hydraulic fill with waste rock and eolian sand based on RSM-BBD

FU Ziguo, QIAO Dengpan, GUO Zhonglin, XIE Jincheng, HUANG Fei, WANG Jiixin

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The selection of cement-tailings ratio directly determines both the strength of the filling body and the running cost of a mine. The optimum ratio of waste rock and aeolian sand is obtained according to the packing density test of two kinds of mixed aggregates. Using Box-Behnken design and response surface methods (RSM) in Design-Expert software, the influence laws of the slurry concentration, dosage of cement and aggregate ratio on the strength properties of cemented hydraulic fill (CHF) at different ages are studied. Two order polynomial regression model with three factors is established, in which the strengths of 3 days, 7 days and 28 days are used as response values. And the suitability of the regression model has been verified. The research shows that the strength of the filling body is not only affected by single factor, and the interaction between the two factors is also significant. According to the response surface, the initial, medium and post strength of backfill body are remarkably affected by the interaction of the slurry mass concentration and aggregate ratio, cement content and aggregate ratio and the slurry mass concentration and cement content

收稿日期: 2017-06-13 修回日期: 2017-08-22 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51164016); 甘肃省科技重大专项计划资助项目(1203GKDC003)

作者简介: 付自国(1992—), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生。E-mail: 714760305@qq.com

通讯作者: 乔登攀(1969—), 男, 甘肃白银人, 教授, 博士生导师。E-mail: 1215550723@qq.com

respectively. By the regression model and the cost function of backfill materials, a set of optimum slurry mixture ratio is obtained, and the field test has proven that it can meet the requirement of production.

**Key words:** RSM-BB design; filling aggregate; packing density; slurry ratio; strength test; prediction model

近年来,建设绿色矿山、发展绿色矿业成为中国矿业界共同的行为纲领和发展目标<sup>[1-3]</sup>。充填采矿法具有控制深部地压、提高“三率”指标及保护环境等方面的优势,逐渐成为矿山地下开采的首选方案。而充填材料的选择及充填料浆配合比的确定直接决定了充填体的强度和运行成本。

目前,国内外学者对充填材料及充填料浆配合比强度展开了大量研究。SOBOLEV K<sup>[4]</sup>通过试验数据建立了骨料体积分数与水灰比关于塌落度的函数,为高性能混凝土的配制提供一种新方法。FALL M 等<sup>[5]</sup>通过建立各指标满意度函数为 CTB 配合比的确定提供一种理论的方法。ROTHWELL V<sup>[6]</sup>对 AAC 的配合比进行了研究,得出水含量是影响 AAC 凝结时间及强度发展的主要因素。ZHENG J 等<sup>[7]</sup>研究了细颗粒含量对充填体强度及料浆流动性的影响。张钦礼等<sup>[8]</sup>采用 BP 神经网络对分级尾砂充填料浆配合比进行优化。杨志强等<sup>[9]</sup>开展了金川全尾砂-棒磨砂混合充填料的强度试验。韩斌等<sup>[10]</sup>采用正交试验设计对粗骨料超细全尾砂充填料浆的配合比进行优化。刘志祥和李夕兵<sup>[11]</sup>采用混沌优化方法研究了尾砂的分形级配与强度的关系。罗涛等<sup>[12]</sup>应用 Fuzzy 理论及层次分析法对料浆配比进行决策。刘永等<sup>[13]</sup>首次研究了黄土-废石胶结充填体抗压强度及变形规律,得出了满足矿山生产的黄土-废石最优配合比。杨啸等<sup>[14]</sup>对 3 种骨料的充填料浆配合比进行了 9 组正交试验,极差分析表明混合骨料的平均粒径和均匀系数对胶结体早期强度和后期强度影响不同。以上研究<sup>[15-19]</sup>都取得了一定的成果,但仍然存在缺陷,例如正交试验只考虑了单一因素的影响,没有考虑因素之间的交互作用对充填体强度的影响,且预测模型是离散的、不连续的。

响应面(Response Surface Methodology, RSM)是根据试验点建立以目标为响应值的多元二次非线性回归方程,能够形象、直观地优化配比混料问题<sup>[20]</sup>,还能对目标进行预测。RSM 和正交试验设计相比有诸多优点,它考虑了系统误差、考虑了因素交互作用对结果的影响且预测模型是连续的。RSM 已经广泛应用于不同的领域,如参数优化<sup>[21]</sup>和可靠性分析<sup>[22]</sup>。文献[23-24]都采用 RSM-CCD 试验方案,且取得了一定的研究成果,但试验次数多于本文 RSM-BBD 方案,因素变异性较强,导致个别模型回归方程

是不标准的二次多项式,模型失拟值大,难以研究因素之间的交互作用。再者,文献[23]不适合金属矿充填料浆配合比的设计优化,文献[24]中没有考虑骨料对比对充填体强度的影响,且选择灰砂比作为自变量有待商榷,因为在现场充填过程中灰砂比难以精确控制。

鉴于此,本文采用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken(RSM-BB)试验方案进行了 17 组试验。采用 RSM 研究废石-风砂级配、水泥添加量、质量分数等在不同养护龄期内(3,7 和 28 d)对胶结充填体强度的影响规律,以及各因素的交互作用对充填体强度的影响,建立不同养护龄期的废石-风砂胶结充填体强度响应面回归模型,为现场充填料浆配合比设计提供一定的参考。

## 1 充填材料物化特性与级配分析

### 1.1 废石破碎集料

破碎废石集料来自于金川集团二矿区,主要来源于井下开拓和生产产生的废石。废石采用鄂式破碎机进行破碎,经研究发现,废石破碎到最大粒径为 12 mm(最大粒径不得超过管道直径的 1/5)时能满足管输要求,且其级配能构成良好骨架结构,可以作为料浆粗骨料充填。其物理参数见表 1。

表 1 充填骨料物理参数

Table 1 Physical parameters of filling aggregate

骨料	密度/ ( $t \cdot m^{-3}$ )	松散密度/ ( $t \cdot m^{-3}$ )	含水 率/%	孔隙 率/%	堆积密 实度/%
废石	2.72	1.56	0.313	37.9	62.1
风砂	2.57	1.32	0.219	48.6	51.4

Talbol 级配理论认为,样本中粒径小于或等于  $x$  的含量占总含量的百分率满足以下方程,

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

式中, $P$  为希望计算的某集料粒径  $x$  的通过百分率,%; $D$  为集料的最大粒径,mm; $n$  为 Talbol 级配指数。

采用 Origin 自定义函数对废石集料粒级分布进行拟合,如图 1 所示,拟合出来的 Talbol 级配指数  $n = 0.651$ ,大于 Fuller 理想级配指数( $n = 0.5$ ),说明废石骨料粗粒径含量更高。若不添加细料改善颗粒级配,

在高水灰比 ( $W/C$  在 1.7 ~ 2.0, 质量分数为 78% 左右) 条件下料浆易发生离析<sup>[25]</sup>。

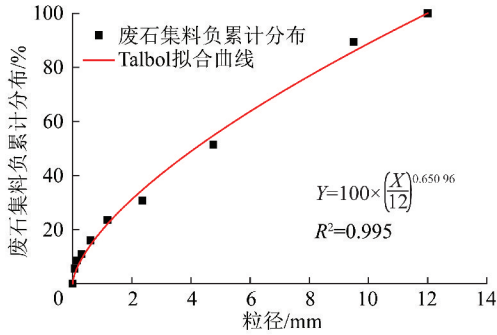


图 1 废石粒径负累计分布特性曲线

Fig. 1 Characteristic curve of negative cumulative distribution of waste rock particles

## 1.2 风 砂

风砂是自然采集到的天然集料,如在沙漠地

区,它是一种理想的充填材料,其颗粒呈圆球状,成分 90% 为石英砂,其物理参数见表 1,其化学成分见表 2。

由表 2 可知,风砂以  $\text{SiO}_2$  为主,属于良性的惰性材料。采用 Origin 自定义函数对风砂粒径分布进行拟合,如图 2 所示,得到 Talbol 级配指数  $n=0.51701$ ,非常接近 Fuller 理想级配。研究表明级配指数在 0.38 ~ 0.42,料浆管道输送阻力大幅度减低<sup>[26]</sup>。而风砂级配不在此范围内。风砂属于较细的骨料,且颗粒形状较规则,颗粒表面光滑,难以形成大骨架结构,充填体表现出脆性,容易开裂,充填质量难以保证。同时风砂中细粉料含量多,其比表面积大,若要使风砂集料胶结成整体,胶结水泥用量大是必然的。故在实际应用中,应加入适当的粗骨料以形成嵌锁型的骨架结构。

表 2 风砂的化学成分组成

Table 2 Chemical composition of aeolian sand

$\text{SiO}_2$	MgO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	其他	%
91.90	1.10	2.43	—	2.13	2.44	—	—	—	—	—	—

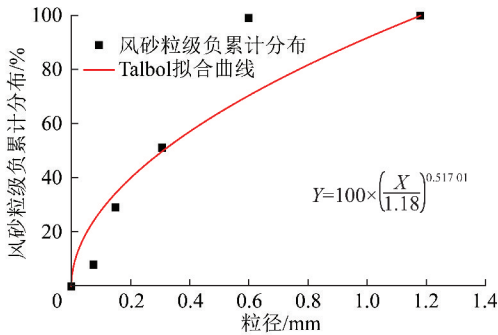


图 2 风砂粒径负累计分布特性曲线

Fig. 2 Characteristic curve of negative cumulative distribution of aeolian sand particles

## 1.3 水 泥

试验所用水泥取自金川公司充填专用水泥,标号为 325 级增强复合水泥,水泥比重 3.1  $\text{t}/\text{m}^3$ ,密度 1.1  $\text{t}/\text{m}^3$ ,其细度(用比表面积表示)为 3 100 ~ 3 300  $\text{cm}^2/\text{g}$ ,初凝时间 >45 min,终凝时间 <10 h,28 d 抗压强度 38.5 MPa。

## 2 两种骨料混合配比的确定

由上分析可知,废石和风砂都不能作为单一骨料进行充填,必须混合搭配以改善级配,增大堆积密度,同等强度下以减少水泥用量。在进行充填料浆配合比强度试验前,必须先确定两种骨料混合的配比,

故必须进行两种骨料的堆积密实度试验。

### 2.1 废石-风砂堆积密实度试验

为了探究废石风砂以何种比例混合,使得在同等水泥用量和质量分数条件下胶结充填体强度最大。试验设计了 9 种不同配比,将两种骨料按不同配比混合,分别测出混合后物料的密度  $\rho$  和物料松散密度  $\gamma$ ,由下式即可计算混合料堆积密实度

$$\Phi = \frac{\gamma}{\rho} \quad (2)$$

其中,  $\Phi$  为混合料堆积密实度。再根据两种骨料堆积密实度模型函数<sup>[27]</sup>,如下式:

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

式中,  $\rho_1$  为粗骨料密度,  $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $\rho_2$  为细骨料密度,  $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $\rho = [x/\rho_1 + (1-x)/\rho_2]^{-1}$ ,  $0 \leq x \leq 1$ ;  $\Phi_1$  为粗骨料堆积密实度;  $\Phi_2$  为细骨料堆积密实度;  $x$  为粗骨料在混合料中的占比。分别计算出不同配比下废石风砂的理论堆积密实度,实测值与理论值如图 3 所示。

由图 3 可以看出,当  $x < 0.5$  时,废石风砂堆积密实度随  $x$  的增大而增大,呈直线关系,即随着混合料中粗骨料废石的增多而增大,且实测值与理论值几乎

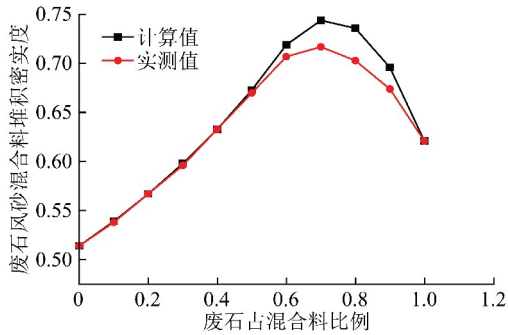


图3 废石风砂混合料堆积密实度计算值与实测值  
Fig.3 Calculated and measured values of compactness waste rock aeolian sand

重合,此时,废石形成“骨架”结构,细料风砂主要起到“填隙”作用;当  $x > 0.5$  时,堆积密实度表现为先增大后降低的趋势,呈抛物线型,且计算值与实测值趋势相同;当  $x = 0.7$  时,混合料堆积密实度计算值与实测值都达到最大,即随着废石的增多而完全形成“骨架”结构,且细料风砂刚好有效的填补所有空隙,使得混料堆积密实度达到最大;当  $x > 0.7$  时,混料堆积密实度开始出现下降趋势,且计算值与实测值相比较偏差明显变大,这是因为随着粗骨料的进一步增多,颗粒开始发生干涉现象,一方面是废石风砂散体系中,细料含量偏少不能填补所有空隙所致,另一方面是试验中粗颗粒发生边壁效应,细料不能“按部就班”的进行理想填隙所致。

结合分析可知,  $x = 0.5 \sim 0.7$  时,散体系堆积密实度处于“成长”型阶段,  $x = 0.7 \sim 0.9$  时,散体系堆积密实度处于“衰退”型阶段。由此选择废石风砂 5 : 5, 6 : 4, 7 : 3, 8 : 2 进行充填料浆配合比强度试验。

### 2.2 Talbol 幂指数与骨料配比的关系

为了改善单一骨料的级配,减小其孔隙率,增大堆积密实度。将连续级配的废石风砂按照堆积密实度试验推荐的配比 5 : 5, 6 : 4, 7 : 3, 8 : 2 混合,得出不同配比下的混合料粒径分布,然后用 Origin 软件自定义函数回归得出不同配比下的 Talbol 幂指数,以研究不同配比混合料的堆积密实度与 Talbol 幂指数的关系。

由图 4 可知,废石风砂按 5 : 5, 6 : 4, 7 : 3, 8 : 2 混合后粒径负累计分布拟合曲线的 Talbol 幂指数分别为 0.289, 0.332, 0.385, 0.451, 且拟合复相关系数都大于 94%。同时可以看出随着混合料中废石比例的提高, Talbol 级配指数也逐渐升高,即混合料中粗骨料含量越高 Talbol 幂指数越大。还可以看出,混合料堆积密实度随 Talbol 幂指数  $n$  呈先增大、后减小的趋势,且当  $n = 0.385$  时,废石风砂混合料

堆积密实度最大。

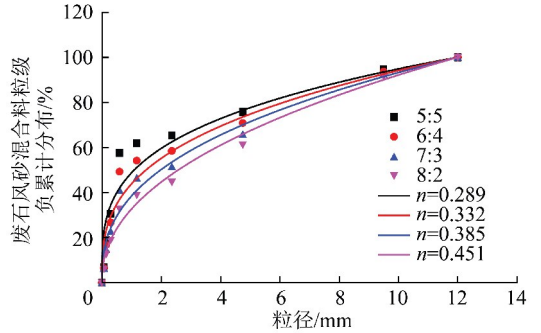


图4 废石风砂混合料粒径负累计分布拟合曲线  
Fig.4 Fitting curves of negative distribution of particle size of waste rock aeolian sand mixture

## 3 充填料浆配合比强度试验

### 3.1 RSM-BBD 试验设计

料浆中骨料、水泥、水三者之间存在最优配合比使得胶结充填体达到一定抗压强度,且使得充填成本最低。试验选择质量分数、水泥添加量、废石-风砂骨料的配比为自变量,分别用  $X_1, X_2, X_3$  表示,胶结充填体 3, 7, 28 d 强度为响应值,分别用  $Y_1, Y_2, Y_3$  表示。根据单因素结果显示:粗骨料高浓度料浆质量分数在 78% ~ 84%,水泥添加量在 240 ~ 310  $\text{kg}/\text{m}^3$  时,充填料浆能满足管道输送要求,充填体能达到采矿方法所需的抗压强度,且成本较经济。又根据前面两种骨料堆积密实度试验与级配分析可知,废石风砂配比在 1 ~ 2.33 时,具备较大的堆积密实度。据此确定试验中各变量范围,质量分数取 79%, 81%, 84%,水泥添加量取 240, 260, 280  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,骨料配比取 1, 1.67, 2.33。采用 RSM-BB 设计试验,分析研究各自变量及其交互作用对不同龄期胶结体抗压强的影响。各因素平编码见表 3。

表3 设计因素编码与水平

Table 3 Codes and levels of design factors

自变量	水平编码		
	-1	0	1
质量分数 ( $X_1$ )	79	81	84
水泥用量 ( $X_2$ )	240	260	280
骨料配比 ( $X_3$ )	1.00	1.67	2.33

### 3.2 试验结果

试验方案和结果见表 4,采用 Design-Expert 软件对 17 组数据进行多元非线性回归拟合,所建立的回归模型为

$$\hat{y} = a + \sum_{j=1}^m b_j x_j + \sum_{k < j} b_{kj} x_k x_j + \sum_{j=1}^m b_{jj} x_j^2$$

$$k = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (4)$$

得到废石风砂胶结体 3, 7, 28 d 龄期内抗压强度的响应面函数。

3 d 抗压强度:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_1 = & 1.90 + 0.34X_1 + 0.39X_2 + 0.32X_3 + \\ & 0.11X_1X_2 + 0.027X_1X_3 + 0.20X_2X_3 + \\ & 4.25 \times 10^{-3}X_1^2 + 0.17X_2^2 + 0.059X_3^2 \\ & (R^2 = 0.980) \end{aligned} \quad (5)$$

7 d 抗压强度:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_2 = & 3.24 + 0.67X_1 + 0.66X_2 + 0.52X_3 + \\ & 0.085X_1X_2 - 0.018X_1X_3 + 0.21X_2X_3 + \\ & 9.25 \times 10^{-3}X_1^2 + 0.22X_2^2 + 9.25 \times 10^{-3}X_3^2 \\ & (R^2 = 0.986) \end{aligned} \quad (6)$$

28 d 抗压强度:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_3 = & 5.71 + 1.27X_1 + 0.80X_2 + 0.71X_3 + \\ & 0.11X_1X_2 + 0.092X_1X_3 + 0.097X_2X_3 - \\ & 0.19X_1^2 - 0.083X_2^2 - 0.29X_3^2 \\ & (R^2 = 0.945) \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $X_1$  为料浆质量分数, %;  $X_2$  为水泥用量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $X_3$  为废石风砂配比。

### 3.3 模型验证

为了讨论基于 RSM 建立的模型是否逼近真实的函数, 需对模型进行显著性检验。构造如下检验显著性的  $F$  统计量<sup>[28]</sup>:

$$F(p, n - p - 1) = \frac{S_{\text{SR}}/p}{S_{\text{SE}}/(n - p - 1)} \quad (8)$$

式中,

$$\begin{cases} S_{\text{SR}} = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \\ S_{\text{SE}} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \end{cases} \quad (9)$$

$S_{\text{SR}}$  为回归平方和;  $S_{\text{SE}}$  为残差平方和,  $Y, \hat{Y}_i, \bar{Y}$  分别为第  $i$  点响应的试验值、预测值和试验均值;  $n$  为样本容量;  $p$  为自变量个数。

限于篇幅, 本文只列出充填体 3 d 强度回归模型方差分析, 见表 5, 模型  $F = 37.28 > F_{0.95}(3, 13) = 3.42$ , 说明模型高度显著。各模型  $P$  值均小于 0.001, 说明回归效果显著, 失拟项  $P$  值大于 0.05, 说明模型是合适的; 模型的正交决定系数  $R_a^2$  和相关系数  $R^2$  都比较接近 1, 说明模型的拟合程度良好, 预测值与真实值之间有较好的相关性, 实验误差小, 可以用该模型来分析和预测废石风砂胶结充填体不同龄期的抗压强度值。

为了说明模型的准确性, 根据表 4 的结果, 计算出模型预测值与实际值的相对误差, 限于篇幅, 以 7 d 强度模型为例, 如图 5 所示。由图 5 可以看出, 除了一个点的相对误差较大 (8.3%), 其余都在 -5% ~ 5% 范围内, 说明模型计算值与试验值吻合较好。

表 4 响应面试验设计与结果

Table 4 Design and results of response surface analysis

试验 编号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	实际值/MPa			预测值/MPa		
				$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y'_1$	$Y'_2$	$Y'_3$
1	1	1	0	3.05	5.05	8.00	2.92	4.88	7.51
2	0	0	0	1.91	3.27	5.81	1.90	3.24	5.44
3	0	0	0	1.88	3.14	5.30	1.90	3.24	5.44
4	1	0	-1	1.87	3.32	5.68	1.96	3.43	6.00
5	1	0	1	2.61	4.39	7.27	2.66	4.43	7.42
6	-1	-1	0	1.32	2.06	3.09	1.45	2.23	3.37
7	-1	1	0	2.00	3.40	5.21	2.02	3.38	4.97
8	-1	0	1	2.01	3.24	4.58	1.92	3.13	4.89
9	-1	0	-1	1.38	2.10	3.36	1.33	2.06	3.46
10	0	0	0	1.91	3.27	5.81	1.90	3.24	5.44
11	0	1	-1	1.97	3.35	4.94	2.01	3.41	5.53
12	0	-1	1	1.90	3.17	5.53	1.87	3.11	5.35
13	0	0	0	1.91	3.27	5.81	1.90	3.24	5.44
14	1	-1	0	1.94	3.37	5.43	1.92	3.39	5.91
15	0	0	0	1.91	3.27	5.81	1.90	3.24	5.44
16	0	-1	-1	1.69	2.63	4.28	1.62	2.50	3.93
17	0	1	1	2.97	4.73	6.58	3.05	4.86	6.95

表5 强度特性回归模型方差分析

Table 5 Analysis of variance with the regression model of the uniaxial compressive strength

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	影响程度
模型	3.36	9	0.37	37.28	<0.000 1	极显著
$X_1$	0.95	1	0.95	94.99	<0.000 1	极显著
$X_2$	1.23	1	1.23	122.95	<0.000 1	极显著
$X_3$	0.83	1	0.83	83	<0.000 1	极显著
$X_1X_2$	0.046	1	0.046	4.61	0.068 9	极显著
$X_2X_3$	$3.03 \times 10^{-3}$	1	$3.03 \times 10^{-3}$	0.3	0.599 9	不显著
$X_1X_3$	0.16	1	0.16	15.56	0.005 6	显著
$X_1^2$	$7.61 \times 10^{-5}$	1	$7.61 \times 10^{-5}$	$7.59 \times 10^{-3}$	0.933	不显著
$X_2^2$	0.12	1	0.12	12.03	0.010 4	显著
$X_3^2$	0.015	1	0.015	1.47	0.264	不显著
残差	0.07	7	0.01			
失拟项	0.069	3	0.023	128.61	0.113	不显著
净误差	$7.20 \times 10^{-4}$	4	$1.80 \times 10^{-4}$			

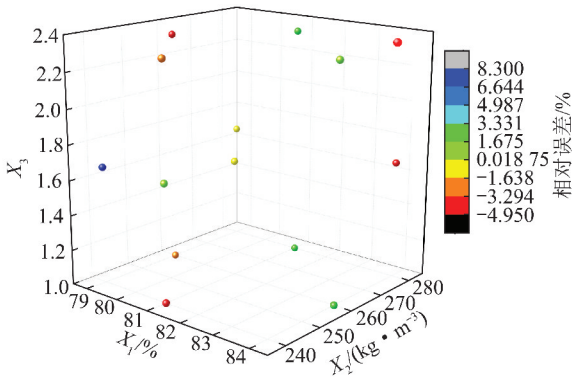


图5 响应面模型计算值与实际值的相对误差

Fig. 5 Error between the calculated values of RSM model and the experimental ones

由于响应面模型是连续函数,能够预测目标值随着自变量在某一区间连续变化时的响应值,因此该方法能够节省因不断改变设计变量优化模型的试验成本。为了进一步验证该模型的适用性,选取课题组废石风砂胶结体其他配比的试验数据(105组)代入到模型,比较预测值与实际值的差异。

由图6可以看出,除个别点外,3,7 d 强度模型计算值与试验值的相对误差基本在-8%~+8%范围内,28 d 模型相对误差在-9%~+9%范围内,说明由 Box-Behnken 中心组合试验设计的回归模型不仅适用于本次17组数据,对其他配合比的废石风砂胶结体强度也适用,从而验证了响应面模型的适用性,对矿山的充填设计具有指导意义。

### 3.4 试验结果分析

由表5可以看出,一次项质量分数( $X_1$ )、水泥用

量( $X_2$ )、骨料配比( $X_3$ )极显著( $P < 0.01$ )。其中,3 d 强度模型的水泥用量( $X_2$ )F 值最大,表明水泥用量对胶结充填体早期强度的影响最明显;7 d 和 28 d 强度模型的质量分数( $X_1$ )F 值较大,说明料浆的质量分数对后期强度影响最明显;废石风砂的配比( $X_3$ )F 值较小,说明在实验范围对结果的影响较小。交叉项中质量分数( $X_1$ )和骨料配比( $X_3$ )的交互作用对胶结体早期强度影响较大,质量分数( $X_1$ )和水泥用量( $X_2$ )的交互作用对后期强度影响较大。

单因素作用和交互作用之间的结论差异原因在于微观结构形成的状态及三相体系共同作用的结果。在胶结充填体强度形成的早期,水泥与水发生水化反应形成大量钙矾石(AFT),填补在集料空隙中,使得松散的充填骨料黏结在一起,胶结体脱水硬化后具有初步强度,早期水化产物越多,黏结力越大,故水泥添加量对充填体早期强度影响最明显,这与方差分析结果一致。在强度发展的后期,质量分数小的充填体内水分没有完全脱出,持续地与水泥发生水化反应,形成更多的钙矾石晶体,填充与空隙中,使得强度不断提高,因此其他条件相同的条件下,质量分数小的胶结体其后期强度往往会大于质量分数大的胶结体,这也是充填体在后期养护时需要洒水的原因。另一方面,质量分数越高,充填体中骨料含量越大,在强度形成的后期越容易形成完善的支撑网络体系。因此,质量分数对充填体后期强度影响较为显著,与方差分析结果吻合。质量分数与骨料配比的交互作用对充填体早期强度影响较大的原因在于更容易形成致密的骨架结构,骨料的级配影响着结构的致密,质量分数

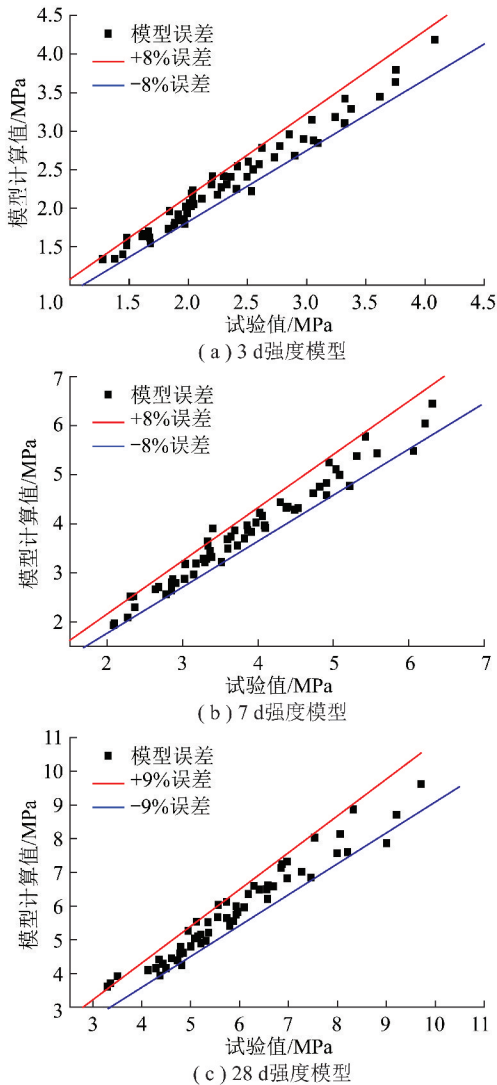


图6 响应面模型计算值与试验值的比较

Fig. 6 Comparison of calculated and experimental values of response surface model

影响着结构的形成,结构的状况影响着与水泥石的结合情况,进而对强度影响较大。在胶结体强度发展的后期,质量分数与水泥用量的交互作用直接决定了体系中三相物质的相对含量,在水化反应早期,骨料与胶凝材料没有完全黏结成整体,强度还没有完全发挥出来,而到了后期,水化反应还在进行,水化产物的进一步扩散渗透到整个骨架空间,形成完备的宏观支撑网络体系,因此质量分数与水泥用量的交互作用对后期强度影响最明显。

### 3.5 响应面参数的交互作用对充填体的影响

回归模型的响应曲面及等高线图如图7所示,可以直观的看出各因素对响应值的影响。由表5可知,充填体的抗压强度不仅受料浆质量分数、水泥用量、骨料配比的单一因素有关,而且还受三因素间的交互作用影响。水泥用量对充填体的早期强度的提高影响显著,而质量分数决定了胶结充填的后期强度。

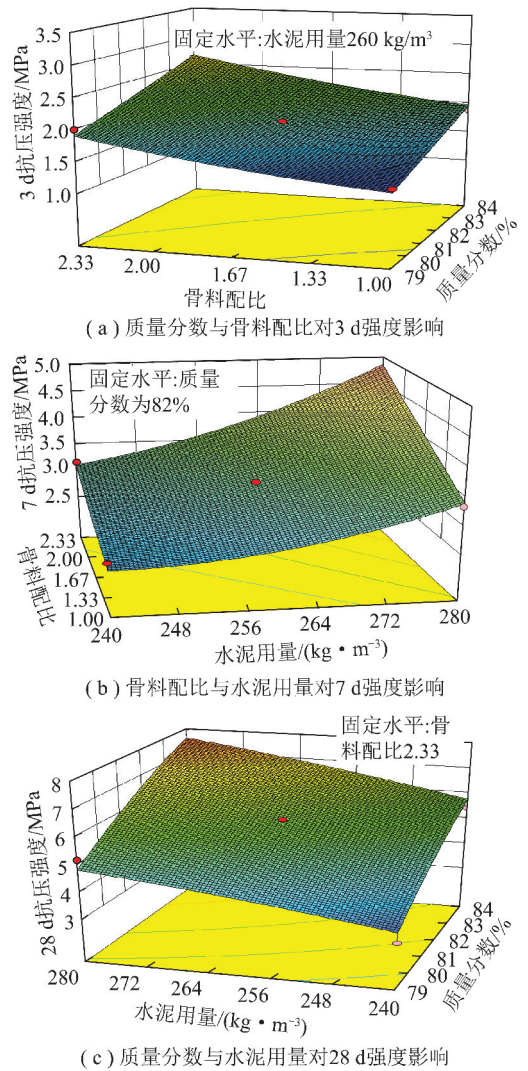


图7 胶结充填体强度的响应面

Fig. 7 Response surface of strength of cemented backfill

图7(a)为水泥量为 $260 \text{ kg/m}^3$ 时,质量分数与骨料配比的交互作用对胶结体3 d强度的影响。由图7(a)可以看出,当骨料配比比较低时,随着料浆质量分数的提高,充填体3 d强度呈现逐渐升高的趋势,质量分数在83%后上升速度变缓。当骨料配比增加到2.33时,充填体强度随着质量分数的增大而增大。当质量分数较低时,骨料配比由1提高到2.33时,胶结体3 d强度提高约50%,这是由于骨料配比在2.33时达到最大堆积密实度所致。在同一骨料配比下,随着料浆质量分数的提高,强度增大。两者趋势相同,表明在一定范围内提高骨料配比的同时提高料浆质量分数有利于充填体早期强度的急剧提高。在充填体早期,随着质量分数的提高,单位体积中骨料含量增多,骨料配比增大意味着充填体中粗骨料大结构<sup>[29]</sup>增多,而此时水化反应不完全,充填体强度几乎由骨架结构显现。所以质量分数与骨料配比的交互作用决定了充填体的早期强度。

图 7(b) 表明,固定料浆质量分数为 82%,骨料配比在较低水平时,随着水泥量的增加,充填体 7 d 强度逐渐提高,水泥量在  $250 \text{ kg/m}^3$  之前强度增长较缓, $250 \text{ kg/m}^3$  之后,强度提高迅速,曲面较陡。骨料配比为 2.33 时,水泥量由  $240 \text{ kg/m}^3$  提高到  $280 \text{ kg/m}^3$  时,7 d 强度提高了 67%。当水泥量在较低水平时,胶结体 7 d 强度随着骨料配比的提高而提高,同一水泥用量下,骨料中废石含量越多,强度越大,上升缓慢。当水泥用量在  $270 \sim 280 \text{ kg/m}^3$ ,废石风砂配比在  $6:4 \sim 7:3$  时,充填体能达到较高强度。在充填体中期,一定水泥量的条件下,水化反应相对充分,增大骨料配比使得有序的骨架结构凸显,再增加水泥用量,使得更多的结构紧密胶结成一体,充填体强度增大。由此说明,骨料配比与水泥用量的交互作用对废石风砂胶结体中期强度影响显著。

由图 7(c) 可以看出,固定骨料配比为 2.33 时,当水泥量含量较小时,充填体 28 d 强度随着质量分数的提高而增大,几乎为直线上升。在水泥量为  $240 \text{ kg/m}^3$  时,质量分数由 79% 提高到 84%,充填体 28 d 强度提高了 46%。当质量分数处于较低水平时,充填体 28 d 强度随着水泥量的增多而增大,也几乎呈直线增长。当质量分数为 79% 时,水泥量提高  $40 \text{ kg/m}^3$ ,充填体 28 d 强度提高 40%。等高线图呈椭圆形,说明质量分数与水泥用量交互作用强<sup>[30]</sup>,骨料配比不再是影响强度的主要因素。表明质量分数与水泥用量的交互作用对充填体后期强度影响剧烈,随着质量分数的提高,充填体强度增长迅速,同一质量分数下,水泥用量的提高,强度进一步提高,曲面较陡。在充填体后期,水化反应产物结晶成核影响显著。

#### 4 充填料浆配合比多目标优化

金川集团某矿采用进路式下向水平分层充填采矿法,根据矿压资料及充填作业工作面对充填体强度设计的要求,井下充填体 3 d 达到 1.5 MPa,7 d 达到 3 MPa,28 d 达到 5 MPa。据此,对废石风砂充填料浆配合比进行优化设计。建立如下规划求解方程:

$$\hat{Y}_1 \geq 1.5, \hat{Y}_2 \geq 3, \hat{Y}_3 \geq 5 \quad (10)$$

在优化求解过程中,应对成本影响较大的因素加以考虑。现根据料浆质量分数( $X_1$ )、水泥用量( $X_2$ )、骨料配比( $X_3$ )分别计算出  $1 \text{ m}^3$  充填料浆中骨料的质量  $M_a$ 、水的质量  $M_w$ ,计算表达式如下:

$$\begin{cases} \frac{M_a}{2.72} + M_w + \frac{X_2}{3.1} = 1 \\ \frac{M_a + X_2}{M_a + X_2 + M_w} = \frac{X_1}{100} \\ M_f + M_s = M_a \\ [M_f/M_s = X_3 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $M_f$  废石质量,kg; $M_s$  为风砂质量,kg。

按照现有价格,水泥 330 元/t,废石 22 元/t,风砂 12 元/t,工业用水 3.2 元/t,若不考虑料浆搅拌费用,建立如下经济函数:

$$f = 330X_2 + 22M_f + 12M_s + 3.2M_w \quad (12)$$

其中, $f$  为每立方米充填料浆的成本,元/ $\text{m}^3$ 。将式(9)输入到 Design-Expert 软件中进行优化求解,得到 34 组满足方程的解,再将所有解代入式(12),使得成本  $f$  值最小,经验算,得出一组最优配比:废石:风砂 = 2.33,料浆质量分数 79%,水泥用量  $240 \text{ kg/m}^3$ 。经现场工程实践后,充填体 3 d 后达到 1.54 MPa,满足充填体强度设计要求。

#### 5 结 论

(1) 采用两种骨料的堆积密实度模型与 Talbol 级配理论,对废石风砂混合料级配进行优化。得出废石风砂 7:3 时堆积密实度最大。采用 Origin 自定义函数对不同配比骨料级配幂指数进行拟合,得出混合料中粗颗粒越多,级配指数越大。堆积密实度随着级配指数  $n$  的增大呈先增大、后减小的趋势,且在  $n = 0.385$  时,骨料堆积密实度最大。

(2) 采用 RSM-BBD 试验对金属矿粗骨料充填料浆配合比进行优化分析。利用模型的响应面及等高线对料浆质量分数、水泥添加量、骨料配比 3 个自变量的交互作用进行了探讨。研究表明:质量分数与骨料配比的交互作用对充填体早期强度影响显著,水泥用量与骨料配比的交互作用对充填体中期强度影响显著,质量分数与水泥用量的交互作用对充填体后期强度显著。

(3) 分别建立胶结充填体 3,7,28 d 抗压强度三元二次回归方程,采用多目标优化,建立充填料浆经济函数,得到使得成本最低且强度满足工程实践的最优料浆配合比:废石:风砂 = 2.33,料浆质量分数 79%,水泥用量  $240 \text{ kg/m}^3$ 。因此,利用 RSM 分析法对料浆配合比进行优化设计,能够得到最优的参数,以降低成本,为充填采矿法料浆的现场配制提供依据。

#### 参考文献 (References):

[1] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.论科学采矿[J].采矿与安全工程



- 学报,2008,25(1):1-10.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. On scientized mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1):1-10.
- [2] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1):1-7.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. Green mining of coal resources harmonizing with environment [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1):1-7.
- [3] 李东印, 李化敏, 周英. 基于可拓论的科学采矿评价方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1):57-62.
- LI Dongyin, LI Huamin, ZHOU Ying. Study on the evaluation method of scientized mining by extension theory [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1):57-62.
- [4] SOBOLEV K. The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures[J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26(7):901-907.
- [5] FALL M, BENZAAZOUA M, SAA E G. Mix proportioning of underground cemented tailings backfill [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2008, 23(1):80-90.
- [6] ROTHWELL V. The role of water content and paste proportion on physico-mechanical properties of alkali activated fly ash-ggbs concrete[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2016, 2(1):51-61.
- [7] ZHENG J, ZHU Y, ZHAO Z. Utilization of limestone powder and water-reducing admixture in cemented paste backfill of coarse copper mine tailings[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124:31-36.
- [8] 张钦礼, 李谢平, 杨伟. 基于 BP 网络的某矿山充填料配比优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7):2867-2874.
- ZHANG Qinli, LI Xieping, 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.
- [9] 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]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2):3985-3991.
- YANG Zhiqiang, GAO Qian, WANG Yongqian, et al. Research on filling body strength and rheological properties of mixed filling mortar with unclassified tailings and rod milling sand in Jinchuan Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2):3985-3991.
- [10] 韩斌, 吴爱祥, 王晗明, 等. 低强度粗骨料超细全尾砂自流胶结充填配合比优化及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6):2357-2362.
- HAN Bin, WU Aixiang, WANG Yiming, et al. Optimization and application of cemented hydraulic fill (CHF) with low strength aggregate and extra fine grain full tailings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(6):2357-2362.
- [11] 刘志祥, 李夕兵. 尾砂级配的混沌优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(4):683-688.
- LIU Zhixiang, LI Xibing. Chaotic optimization of tailings gradation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2005, 36(4):683-688.
- [12] 罗涛, 何文, 石文芳, 等. 基于模糊数学-层次分析法的水泥胶结充填料浆配比优化研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(7):2241-2246.
- LUO Tao, HE Wen, SHI Wenfang, et al. Optimization of the slurry ratio in the cemented filling with the cement based on fuzzy mathematics and analysis hierarchy process [J]. Bulletin of Chinese Ceramic Society, 2016, 35(7):2241-2246.
- [13] 刘永, 贺桂成, 袁梅芳, 等. 黄土-废石胶结充填体抗压强度试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1):113-118.
- LIU Yong, HE Guicheng, YUAN Meifang, et al. Experimental study on the compressive strength of the backfills from cemented waste rock with cement and loess [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1):113-118.
- [14] 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 Xiao, YANG Zhiqiang, GAO Qian, et al. Cemented filling strength test and optimal proportion decision of mixed filling aggregate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2):635-641.
- [15] 李一帆, 张建明, 邓飞, 等. 深部采空区尾砂胶结充填体强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6):865-868.
- LI Yifan, ZHANG Jianming, DENG Fei, et al. Experimental study on strength characteristics of tailings cement backfilling at deep-seated mined-out area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6):865-868.
- [16] 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 Shuai, SONG Weidong, XUE Gaili, et al. Tests of strength reduction of cemented tailings filling considering layering character [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10):2869-2876.
- [17] 徐文彬, 宋卫东, 王东旭, 等. 胶结充填体三轴压缩变形破坏及能量耗散特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(12):3421-3429.
- XU Wenbin, SONG Weidong, WANG Dongxu, et al. Characteristic analysis of deformation failure and energy dissipation of cemented backfill body under triaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12):3421-3429.
- [18] 吴疆宇, 冯梅梅, 郁邦永, 等. 连续级配废石胶结充填体强度及变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1):101-108.
- WU Jiangyu, FENG Meimei, YU Bangyong, et al. Experimental study of strength and deformation characteristics of cemented waste rock backfills with continuous gradation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1):101-108.
- [19] LIU Z, DANG W, LIU Q, et al. Optimization of clay material mixture ratio and filling process in gypsum mine goaf [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(3):337-342.
- [20] 李云雁, 胡传杏. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [21] 彭康, 李夕兵, 彭述权, 等. 基于响应面法的海下框架式采场结构优化选择[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8):2417-2422.
- PENG Kang, LI Xibing, PENG Shuquan, et al. Optimization of frame stope structure parameters based on response surface method in under-sea mining [J]. Journal of Central South University (Sci-

- ence and Technology), 2011, 42(8): 2417-2422.
- [22] 傅方煜, 郑小瑶, 吕庆, 等. 基于响应面法的边坡稳定二阶可靠度分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3460-3466.  
FU Fangyu, ZHENG Xiaoyao, LÜ Qing, et al. Second order reliability analysis of slope stability using response surface method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3460-3466.
- [23] 李典, 冯国瑞, 郭育霞, 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 Dian, FENG Guorui, GUO Yuxia, 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.
- [24] 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]. 工程科学学报, 2013, 35(5): 559-565.  
ZHAO Guoyan, MA Ju, PENG Kang, et al. Mix ratio optimization of alpine mine backfill based on response surface method[J]. Chinese Journal of Engineering, 2013, 35(5): 559-565.
- [25] 吴爱祥, 王建栋, 彭乃兵. 颗粒级配对粗骨料充填料浆离析的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3201-3207.  
WU Aixiang, WANG Jiandong, PENG Naibing. Effect of grain composition on coarse aggregate filling slurry segregation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(9): 3201-3207.
- [26] 张修香, 乔登攀. 粗骨料高浓度充填料浆的管道输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 258-266.  
ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan. Simulation and experiment of pipeline transportation of high density filling slurry with coarse aggregates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 258-266.
- [27] 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, 2011.  
YAO Weixin. Theoretical study and application of high concentration filling of coarse aggregate in mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [28] 杨虎, 刘琼荪, 钟波, 等. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [29] 王林杰. 破碎卵石混凝土的架构理论研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2015.  
WANG Linjie. Study on the frame theory of broken pebble concrete[D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2015.
- [30] 侯东伟, 张君, 陈浩宇, 等. 干燥与潮湿环境下混凝土抗压强度和弹性模量发展分析[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 198-208.  
HOU Dongwei, ZHANG Jun, CHEN Haoyu, et al. Development of strength and elastic modulus of concrete under moisture and drying curing conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 42(2): 198-208.