

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2021.10.016

# 基于正交试验充填体力学性能及配比优化研究

张友锋<sup>1,2,3</sup>, 付玉华<sup>2,3</sup>

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 赣南科技学院, 江西 赣州 341000; 3. 江西省矿业工程重点实验室, 江西 赣州 341000)

**摘 要:**针对矿山充填开采成本较高、尾砂和废石等固废处置困难等问题,以废石、尾砂为试验材料,通过正交试验法确定质量浓度、灰砂比及废石掺量对粗骨料胶结充填体流动性及力学性能的影响规律,并确定合理的配比参数。结果表明:质量浓度、废石掺量及灰砂比均为充填料浆坍落度的显著性影响因素,其中质量浓度的影响最为关键;方差分析结果表明,质量浓度、灰砂比能够对充填体 3 d 及 28 d 抗压强度有显著性影响,而当废石掺量为 5%~20% 时,废石掺量对粗骨料充填体抗压强度无显著性影响;多元线性回归模型能够准确地反映出粗骨料胶结充填体抗压强度及坍落的变化规律,且构建三维可视化模型能够直观反映出质量浓度、灰砂比及废石掺量的复合作用对充填体性能的影响;基于建立的充填体配比参数寻优模型可得出一组合理的配比参数为:灰砂比为 1:9.5、质量浓度为 80%、废石掺量为 20%。

**关键词:**粗骨料;单轴抗压强度;坍落度;离析率;多元线性回归

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2021)10-0114-09

## Study on Mechanical Properties and Ratio Optimization of Backfill Based on Orthogonal Test

ZHANG Youfeng<sup>1,2,3</sup>, FU Yuhua<sup>2,3</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing,  
Beijing 100083, China;

2. Gannan University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

3. Key Laboratory of Mining Engineering in Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high mining cost and difficulty in disposal of solid wastes such as waste rocks and tailings, waste rock and tailings are used as experimental materials to determine influence laws of the mass concentration, cement sand ratio and waste rock content on the fluidity and mechanical properties of the coarse aggregate cemented backfill by orthogonal test. In addition, the reasonable ratio parameters are determined. The results show that: Mass concentration, waste rock content and cement sand ratio are all significant factors affecting filling slurry slump, and the influence of mass concentration is the most critical. The results of variance analysis show that the mass concentration and cement sand ratio can significantly affect the 3 d and 28 d compressive strength of the backfill, while the content of waste rock has no significant effect on the compressive strength of coarse aggregate filling when the content of waste rock is 5%—20%. The multiple linear regression model can accurately reflect the variation law of compressive strength and slump of coarse aggregate cemented backfill, and the

收稿日期:2021-01-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51464015)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51464015)

作者简介:张友锋(1979—),男,博士研究生,讲师,主要从事矿山岩石力学与岩层控制研究。

引用格式:张友锋,付玉华. 基于正交试验充填体力学性能及配比优化研究[J]. 有色金属工程,2021,11(10):114-122.

ZHANG Youfeng, FU Yuhua. Study on Mechanical Properties and Ratio Optimization of Backfill Based on Orthogonal Test[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(10): 114-122.

construction of three-dimensional visualization model can directly reflect the combined effect of mass concentration, cement sand ratio and waste rock content on the performance of backfill. Based on the established optimization model of backfill proportioning parameters, a set of reasonable proportioning parameters can be obtained; The cement sand ratio is 1 : 9.5, the mass concentration is 80%, and the content of waste rock is 20%.

**Key words:** coarse aggregate; uniaxial compressive strength; slump; segregation rate; multiple linear regression

目前,对于国内诸多矿山而言,尾矿库的尾砂和井下巷道掘进产生的废石是主要的废弃物,尾砂的处置方式主要将低浓度的尾砂输送至尾矿库进行堆存处理,而废石主要堆存在废石场,这两种废弃物的处理方式容易对生态环境造成危害<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着矿山已经逐渐转入深井开采,膏体充填越来越受到诸多矿山的青睐和重视,主要在于膏体充填不仅能够提高矿山的回采率,还可以起到保护环境的作用<sup>[4]</sup>。然而,在深井开采中,由于输送距离较长且井下应力环境复杂,充填体的力学性能及流动性能是决定膏体充填能否顺利实施的关键因素。为了提高充填体的力学性能,改善流动性,近年来,国内外诸多学者针对不同物料充填体的力学性能及配比参数进行了大量的研究。温震江等<sup>[5-6]</sup>开展了复合胶凝材料开发、粗骨料充填料浆流变特性等方面的研究工作,并优化了相应的配比参数;吴立波等<sup>[7]</sup>采用正交试验研究了水泥掺量、质量浓度及矿物掺合料对充填体力学性能及坍落度的影响规律,并优化了相应的配比参数;吴凡等<sup>[8]</sup>研究了高浓度粗骨料充填料浆的离析特性,并基于决定系数,构建抗离析特性数学模型。徐文彬等<sup>[9]</sup>研究了纤维加筋充填体的力学性能及流变特性,定性研究了纤维掺量对充填体力学性能及流变特性的影响规律;周科平等<sup>[10]</sup>选用新型胶凝材料,建立了全尾砂胶结充填体非线性强度模型;曹帅等<sup>[11-12]</sup>、徐文彬等<sup>[13]</sup>研究了不同应力环境、结构特性下充填体力学性能的变化规律。由于水泥类型及掺量、膏体质量分数、外加剂掺量(泵送剂、絮凝剂等)等多种因素的影响,再加上矿山类型不同必然导致尾砂及废石的理化性质存在一定的差异,从而导致充填膏体的性能容易发生改变<sup>[14]</sup>。因此,针对不同类型的矿山有必要开展相应的配比试验,从而得出充填膏体性能的变化规律。本文以白音诺尔铅锌矿为工程研究背景,目前该矿山尾砂产率约 90%,每年产生尾砂近

100 万 t,均排放至地表尾矿库进行堆存处置,但是按照目前的尾砂产生量,尾矿库库容已不足 6 年且因环保征地问题新建尾矿库几乎无可能。同时,产生大量的废石,但是目前已无空间堆存新的废石。因此,为安全高效处置尾砂与废石,促进绿色矿山建设,选择采用膏体充填作为处置尾砂与废石的方式。为保证充填体强度能够满足该矿山的需求,主要参考指标为 3 d 及 28 d 的抗压强度<sup>[15]</sup>,同时为确保充填料浆的输送,对其工作性能进行分析。本文以该矿山尾砂、废石为充填骨料,选择膏体质量浓度、灰砂比、废石掺量为主要影响因素,采用正交试验法设计水泥掺量、膏体质量浓度、废石掺量三因素四水平全尾砂-粗骨料胶结充填配合比,以充填体 3 d、28 d 抗压强度、坍落度、离析率为评价指标,通过极差与方差分析,得出影响充填体性能的显著性影响因素,再运用多元非线性回归建立抗压强度、坍落度的预测模型,最后以充填体抗压强度、坍落度、离析率为评价指标,确定最佳的配比,为矿山膏体充填提供参考。

## 1 试验原材料与方法

### 1.1 试验主要材料

尾砂取自于该矿山选厂浓密后泵池,废石取自于该矿山废石场,水泥为 PC32.5 硅酸盐水泥。从表 1 中可以看出,尾砂的主要成分是  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,尾砂的  $\text{CaO}$  含量较高,可能对后期强度有所影响,废石的主要成分为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{CaO}$ 。全尾砂中—5、—10、—20  $\mu\text{m}$  的极细颗粒含量分别为 9.41%、16.51%和 27.14%,—74  $\mu\text{m}$  为 57.68%,尾砂粒度较一般铜尾砂略粗,但—20  $\mu\text{m}$  细粒含量满足制备膏体要求。采用人工标准筛对废石的粒级进行分析,10 mm 以上的含量达到 45.261%,充填前需要进行筛分,利用 10 mm 以下的碎石作为骨料进行充填。

表 1 试验材料化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental materials

| Components  | SiO <sub>2</sub> | CaO   | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO  | Others |
|-------------|------------------|-------|------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------|--------|
| Tailings    | 38.37            | 35.15 | 3.42 | 6.85                           | 10.02                          | 0.19            | 1.25             | 0.31             | 2.37 | 0.01   |
| Waste rocks | 23.70            | 59.48 | 2.43 | 5.61                           | 7.17                           | 0.35            | 1.21             | 0.33             | 0.51 | 0.02   |
| Cement      | 28.83            | 50.36 | 2.12 | 8.97                           | 3.26                           | 3.44            | 1.26             | 0.61             | 0.16 | 0.01   |

## 1.2 尾砂、废石配比初选

细骨料(尾砂)可以充填到粗骨料(废石)的孔隙中,可增加密实度,改善充填体的性能。因此,如何确定粗、细骨料的配比非常关键。充填料的堆积密实度能够有效体现出两种骨料混合后的密实度,当堆积密实度达到最大值,说明骨料间不会产生“松动效应”,粗骨料的“强度效应”能够发挥充分。根据参考文献[16]列出的针对粗细骨料堆积密实度的计算方法,采用废石掺量分别为 5%、10%、20%、30%和 40%时,进行充填骨料堆积密实度计算(图 1)。当废石掺量小于 20%时,堆积密实度大于 80%;在废

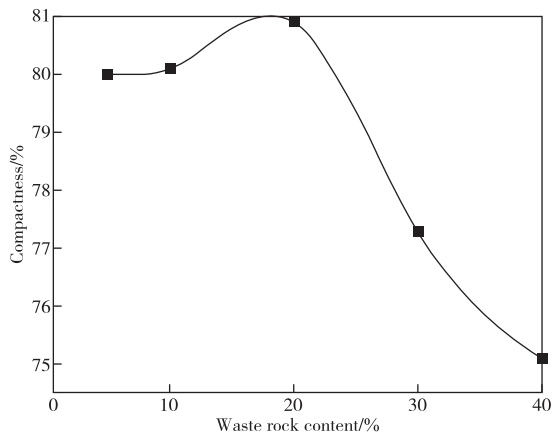


图 1 废石掺量与密实度关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between waste rock content and compactness

石掺量等于 20%时,堆积密实度达 81%。因此设置四个水平掺量 5%、10%、15%、20%。

## 1.3 试验方案及过程

针对不同膏体质量浓度、灰砂比及废石掺量下的膏体性能进行测试,由于所含的影响因素较多,试验设计为正交试验。根据前期探索试验,膏体浓度选择 77%、78%、80%、81%,废石掺量选择 5%、10%、15%、20%,灰砂比选择 1:4、1:6、1:8、1:10,配比试验采用三因素四水平设计方案(表 2)。采用稳定性跳桌试验测定料浆的离析率,同时在测定完料浆的坍落度后,将充填料浆浇灌入长宽高均为 70.7 mm 的方形模具中,并将脱模后的试块放置于养护箱内进行养护,当养护时间达到 3、28 d 后测定充填体的早期和后期强度。

表 2 试验设计因素及水平

Table 2 Experimental design factors and levels

| Level | A    | B/% | C/% |
|-------|------|-----|-----|
| 1     | 1:4  | 77  | 5   |
| 2     | 1:6  | 78  | 10  |
| 3     | 1:8  | 80  | 15  |
| 4     | 1:10 | 81  | 20  |

## 2 试验结果及分析

根据试验设计,得出粗骨料胶结充填体性能测试结果(表 3)。为揭示灰砂比(A)、膏体质量浓度(B)

表 3 粗骨料胶结充填体性能测试结果

Table 3 Performance test results of coarse aggregate cemented backfill

| Number | A    | B/% | C/% | Slump/cm | Segregation rate/% | R <sub>3d</sub> /MPa | R <sub>28d</sub> /MPa |
|--------|------|-----|-----|----------|--------------------|----------------------|-----------------------|
| 1      | 1:10 | 77  | 5   | 27.5     | 11.45              | 0.5                  | 1.9                   |
| 2      | 1:8  | 77  | 10  | 28.2     | 18.55              | 0.6                  | 2.6                   |
| 3      | 1:6  | 77  | 15  | 28.3     | 18.68              | 1.1                  | 4.5                   |
| 4      | 1:4  | 77  | 20  | 27.3     | 14.35              | 2.6                  | 8.1                   |
| 5      | 1:8  | 78  | 5   | 27.0     | 15.22              | 0.9                  | 3.8                   |
| 6      | 1:10 | 78  | 10  | 27.8     | 13.28              | 0.6                  | 1.9                   |
| 7      | 1:4  | 78  | 15  | 27.5     | 15.12              | 1.5                  | 5.6                   |
| 8      | 1:6  | 78  | 20  | 27.9     | 11.82              | 1.2                  | 3.8                   |
| 9      | 1:6  | 80  | 5   | 25.9     | 11.48              | 1.4                  | 5.9                   |
| 10     | 1:4  | 80  | 10  | 26.1     | 11.45              | 2.1                  | 8.1                   |
| 11     | 1:10 | 80  | 15  | 27.2     | 12.43              | 0.6                  | 2.4                   |
| 12     | 1:8  | 80  | 20  | 27.0     | 12.55              | 0.8                  | 3.3                   |
| 13     | 1:4  | 81  | 5   | 24.0     | 4.85               | 2.9                  | 9.2                   |
| 14     | 1:6  | 81  | 10  | 24.5     | 7.52               | 1.7                  | 7.4                   |
| 15     | 1:8  | 81  | 15  | 25.6     | 9.56               | 1.1                  | 4.9                   |
| 16     | 1:10 | 81  | 20  | 26.1     | 11.56              | 0.6                  | 2.8                   |

及废石掺量( $C$ )对粗骨料胶结充填体坍落度、离析率、早期及后期强度的影响程度及找出显著性影响因素,采用统计软件 SPSS 进行分析,极差分析结果(表 4),方差分析结果(表 5)。极差法具有形象直

观、简单易懂等优点,通过计算极差  $R$  并比较其大小可以得到试验中的主次因素及最优组合。极差  $R_j$  则反映了第  $j$  列因素水平波动时试验指标的变动幅度, $R_j$  越大,说明该因素对试验指标的影响越大。

表 4 试验结果极差分析检验

Table 4 Experimental results range analysis test

| Number | A                   |           |                |                 | B                   |           |                |                 | C                   |           |                |                 |
|--------|---------------------|-----------|----------------|-----------------|---------------------|-----------|----------------|-----------------|---------------------|-----------|----------------|-----------------|
|        | Segregation Rate/ % | Slump/ cm | $R_{3d}$ / MPa | $R_{28d}$ / MPa | Segregation Rate/ % | Slump/ cm | $R_{3d}$ / MPa | $R_{28d}$ / MPa | Segregation Rate/ % | Slump/ cm | $R_{3d}$ / MPa | $R_{28d}$ / MPa |
| $K_1$  | 11.443              | 26.225    | 2.275          | 7.750           | 15.758              | 27.825    | 1.200          | 4.275           | 10.750              | 26.100    | 1.425          | 5.200           |
| $K_2$  | 12.375              | 26.650    | 1.350          | 5.400           | 13.860              | 27.800    | 1.050          | 3.375           | 12.700              | 26.650    | 1.250          | 5.000           |
| $K_3$  | 13.970              | 26.950    | 0.850          | 3.650           | 11.978              | 26.550    | 1.225          | 4.925           | 13.948              | 27.150    | 1.075          | 4.350           |
| $K_4$  | 12.180              | 27.150    | 0.575          | 2.250           | 8.373               | 25.050    | 1.575          | 6.075           | 12.570              | 27.175    | 1.300          | 4.500           |
| $R$    | 2.527               | 0.925     | 1.700          | 5.500           | 7.385               | 2.775     | 0.525          | 2.700           | 3.198               | 1.050     | 0.350          | 0.850           |

Note:  $K_i$  is the average value of each factor in class I test results,  $R$  represents the range value.

表 5 试验结果方差分析检验

Table 5 ANOVA test of experimental results

| Examination index   | Sources of variation | Sum of squares | Freedom | Mean square | $F$ value | Significance level $p$ |
|---------------------|----------------------|----------------|---------|-------------|-----------|------------------------|
| Slump/cm            | A                    | 1.942          | 3       | 0.647       | 6.889     | 0.023                  |
|                     | B                    | 18.902         | 3       | 6.301       | 67.058    | 0.000                  |
|                     | C                    | 2.792          | 3       | 0.931       | 9.905     | 0.010                  |
| Segregation rate/ % | A                    | 13.588         | 3       | 4.529       | 0.751     | 0.560                  |
|                     | B                    | 119.080        | 3       | 39.693      | 6.583     | 0.025                  |
|                     | C                    | 20.810         | 3       | 6.937       | 1.150     | 0.402                  |
| $R_{3d}$ /MPa       | A                    | 6.702          | 3       | 2.234       | 21.278    | 0.001                  |
|                     | B                    | 0.593          | 3       | 0.198       | 1.881     | 0.234                  |
|                     | C                    | 0.252          | 3       | 0.084       | 0.802     | 0.537                  |
| $R_{28d}$ /MPa      | A                    | 67.527         | 3       | 22.509      | 32.349    | 0.000                  |
|                     | B                    | 11.848         | 3       | 3.949       | 5.675     | 0.035                  |
|                     | C                    | 1.947          | 3       | 0.649       | 0.933     | 0.481                  |

## 2.1 粗骨料胶结充填体坍落度的相关分析

由表 4 可知,质量浓度( $B$ )对坍落度的作用最大,极差为 2.775;废石掺量( $C$ )对料浆坍落度的影响程度次之,极差为 1.050;灰砂比( $A$ )对坍落度作用最小,极差为 0.925。结合表 5 可知,膏体质量浓度( $B$ )、灰砂比( $A$ )及废石掺量( $C$ )的显著性水平  $p$  值均低于 0.05,表明此三个因素对料浆坍落度有显著影响。此外,质量浓度( $B$ )的水平  $p$  值为 0.000,表明质量浓度( $B$ )为料浆坍落度的极显著性影响因素,质量浓度影响充填料浆的关键在于影响膏体中自由水的含量,当自由水的含量适中时,裹住胶凝材料及骨料外部,润滑四周,优化料浆流动性。

## 2.2 粗骨料胶结充填体离析率相关分析

由表 4 可知,质量浓度( $B$ )对粗骨料离析率的作用最大,极差为 7.385;废石掺量( $C$ )的作用次之,极差为 3.198;灰砂比( $A$ )对粗骨料充填料浆离析率的作用最小,极差为 2.527。结合表 5,膏体质量浓度( $B$ )的显著性水平低于 0.05,说明质量浓度( $B$ )

是粗骨料充填料浆离析率的显著性影响因素,而灰砂比( $A$ )及废石掺量( $C$ )的显著性水平  $p$  值远高于 0.05,说明灰砂比( $A$ )及废石掺量( $C$ )对离析率无明显作用。自由水部分被骨料吸收,当膏体自由水含量大于上述自由水含量总和时,膏体便会产生泌水的现象<sup>[17]</sup>,因此质量浓度( $B$ )是粗骨料离析率的显著性影响因素。

## 2.3 粗骨料胶结充填体抗压强度相关分析

表 4 极差分析说明,灰砂比( $A$ )对充填体 3、28 d 抗压强度作用最大,极差分别为 1.700、5.500;膏体质量浓度( $B$ )的影响程度次之,极差分别为 0.525、2.700;废石掺量( $C$ )作用最小,极差对应为 0.350、0.850。结合表 5 可知,在养护早期(3 d)时,灰砂比( $A$ )的显著性水平  $p$  值低于 0.05,说明灰砂比为粗骨料胶结充填体早期抗压强度的显著性影响因素,而质量浓度( $B$ )及废石掺量( $C$ )的显著性水平  $p$  值均高于 0.05,说明  $B$ 、 $C$  对充填体早期强度无明显作用;在养护后期(28 d)时,灰砂比( $A$ )与质量浓

度( $B$ )的  $p$  值低于 0.05,说明灰砂比( $A$ )与质量浓度( $B$ )为粗骨料胶结充填体后期强度的显著性影响因素,其中灰砂比( $A$ )为极显著性影响因素,而  $C$  对后期强度无显著性作用。从上述分析可以看出, $A$ 、 $B$  对粗骨料胶结充填体 3、28 d 的强度具有显著性作用。在养护早期(3 d)时,水泥水化反应生成一定量的钙矾石填充在集料的间隙中,使得充填骨料粘结在一起形成早期强度,因此在养护早期灰砂比( $A$ )为充填体强度的显著性影响因素,而在养护后期(28 d)时,水泥的水化反应逐渐趋于完全,浓度越高,越容易形成稳定网络支撑体,因此质量浓度( $B$ )

对 28 d 期强度具有明显作用。

## 2.4 粗骨料胶结充填体性能回归模型

结合以上正交试验结果可知, $A$ 、 $B$  及  $C$  对粗骨料料浆坍落度、早期及后期强度具有显著作用,为更好地指导矿山现场的膏体配比设计,根据灰砂比( $A$ )、质量浓度( $B$ )及废石掺量( $C$ )3 个因素与坍落度、抗压强度间的关系,用 SPSS 对抗压强度、坍落度进行回归分析,采用后退分析法。根据逐步法进行模型的构建,在建模中自动纳入或删除影响因素,最终优选出最佳的回归模型。表 6、7、8 分别为坍落度、3 及 28 d 抗压强度等各系数的模拟结果。

表 6 坍落度模型回归参数

Table 6 Regression parameters of slump model

| Number | Model                                    | Model item | Standard error | Standardized coefficients | $t$ value | Significance level $p$ |
|--------|------------------------------------------|------------|----------------|---------------------------|-----------|------------------------|
| 1      | $Y = -0.655x + 78.489$                   | 78.489     | 8.858          |                           | 8.860     | 0.000                  |
|        |                                          | -0.655     | 0.112          | -0.842                    | -5.843    | 0.000                  |
|        |                                          | 77.633     | 7.513          |                           | 10.333    | 0.000                  |
| 2      | $Y = -0.655x + 0.069y + 77.633$          | -0.655     | 0.095          | -0.842                    | -6.895    | 0.000                  |
|        |                                          | 0.069      | 0.027          | 0.311                     | 2.550     | 0.024                  |
|        |                                          | 76.556     | 6.054          |                           | 12.646    | 0.000                  |
| 3      | $Y = -0.655x + 0.069y + 0.154z + 76.556$ | -0.655     | 0.076          | -0.842                    | -8.571    | 0.000                  |
|        |                                          | 0.069      | 0.022          | 0.311                     | 3.170     | 0.008                  |
|        |                                          | 0.154      | 0.054          | 0.280                     | 2.846     | 0.015                  |

Note:  $x$  is mass concentration  $B$ , %;  $y$  is waste rock content  $C$ , %;  $z$  is lime sand ratio  $A$ .

表 7 3 d 抗压强度模型回归参数

Table 7 Regression parameters of 3 d compressive strength model

| Number | Model                 | Model item | Standard error | Standardized coefficients | $t$ value | Significance level $p$ |
|--------|-----------------------|------------|----------------|---------------------------|-----------|------------------------|
| 4      | $Y = -0.280z + 3.223$ | 3.223      | 0.303          |                           | 10.632    | 0.000                  |
|        |                       | -0.280     | 0.041          | -0.876                    | -6.788    | 0.000                  |

Note:  $z$  is lime sand ratio  $A$ .

表 8 28 d 抗压强度模型回归参数

Table 8 Regression parameters of 28 d compressive strength model

| Number | Model                          | Model item | Standard error | Standardized coefficients | $t$ value | Significance level $p$ |
|--------|--------------------------------|------------|----------------|---------------------------|-----------|------------------------|
| 5      | $Y = -0.913z + 11.150$         | 11.150     | 0.954          |                           | 11.685    | 0.000                  |
|        |                                | -0.913     | 0.130          | -0.883                    | -7.027    | 0.000                  |
|        |                                | -26.375    | 10.902         |                           | -2.419    | 0.031                  |
| 6      | $Y = 0.475x - 0.913z - 26.375$ | -0.913     | 0.097          | -0.883                    | -9.372    | 0.000                  |
|        |                                | 0.475      | 0.138          | 0.325                     | 3.450     | 0.004                  |

Note:  $x$  is mass concentration  $B$ , %;  $z$  is lime sand ratio  $A$ .

由表 6 可知,所建立的 3 个坍落度回归模型均没有移除质量浓度( $B$ )这一影响因素,且 3 个回归模型中的质量浓度( $B$ )临界显著性水平均为 0.000,说明质量浓度( $B$ )能够对充填体坍落度造成极为显著的影响,而这与方差的分析结果一致。模型 1、2、3 的复相关系数  $R$  分别为 0.842、0.898 和 0.940,因此采用模型 3 作为充填体坍落度的线性回归模型。由表 7、8 的模型回归参数可知,在养护早期

(3 d)时,充填体的回归模型移除质量浓度( $B$ )及废石掺量( $C$ ),说明这两个因素不会对充填体早期抗压强度产生显著性影响;在养护后期(28 d)时,回归模型移除了废石掺量( $C$ ),说明废石掺量( $C$ )对充填体后期强度无显著性影响,模型 5、6 的复相关系数  $R$  值分别为 0.883 与 0.941,因此将模型 2 作为充填体 28 d 抗压强度的线性回归模型。上述建立的充填体坍落度、3 d 抗压强度、28 d 抗压强度的线性

回归模型见式(1)、(2)、(3)。

$$SLP = 0.154z - 0.655x + 0.069y + 76.556 \quad (1)$$

式中, $SLP$  为粗骨料胶结充填体坍落度,  $\text{cm}$ ;  $z$  为灰砂比;  $x$  为质量浓度, %;  $y$  为废石掺量, %。

$$R_{3d} = 3.233 - 0.280z \quad (2)$$

式中, $R_{3d}$  为充填体 3 d 抗压强度,  $\text{MPa}$ ;  $z$  为灰砂比。

$$R_{28d} = 0.475x - 0.913z - 26.375 \quad (3)$$

式中, $R_{28d}$  为充填体 28 d 抗压强度,  $\text{MPa}$ ;  $z$  为灰砂比;  $x$  为质量浓度, %。

将正交试验测试所得的充填体坍落度 3、28 d 抗压强度数据分别用上述所建立的回归模型进行计算,得到实测值与预测值如图 2 所示。同时,结合所建立的坍落度、28 d 强度回归模型,灰砂比(A)为 1:4,充填体坍落度随质量浓度(B)及废石掺量(C)变化三维曲面可视化模型如图 3(a)所示;废石 20%时,28 d 强度随灰砂比(A)及质量浓度

(B)变化三维曲面可视化模型如图 3(b)所示。由图 2 可以看出,实测值与预测值高度接近,所建立的模型能够较为准确地反映充填体坍落度及抗压强度的变化规律,预测模型具有较好的精度。由图 3(a)可知,当 C 为 5% 时, B 由 77% 增加至 81%, 充填料浆坍落度降低了 9.4%; 当 C 为 20% 时, B 从 77% 增加至 81%, 充填料浆坍落度降低了 7.2%, 可以看出充填料浆坍落度对 B 的敏感性随着 C 的增加有所降低, 说明在配制粗骨料料浆中, 掺入一定量的粗骨料可以降低因增加质量浓度(B)而带来的料浆输送性能不佳的不利影响。由图 3(b)可知, 当质量浓度为 77% 时, 灰砂比由 1:10 增加至 1:4, 充填体 28 d 强度增加了 88.1%; 当质量浓度(B)为 81% 时, 灰砂比(A)由 1:10 增加至 1:4, 充填体 28 d 强度增加了 60.9%, 可以得出充填体后期强度对灰砂比的敏感性受质量浓度(B)的提高而降低, 说明对于高浓度的粗骨料充填体, 提高灰砂比(A)对后期强度的改善是有限的。

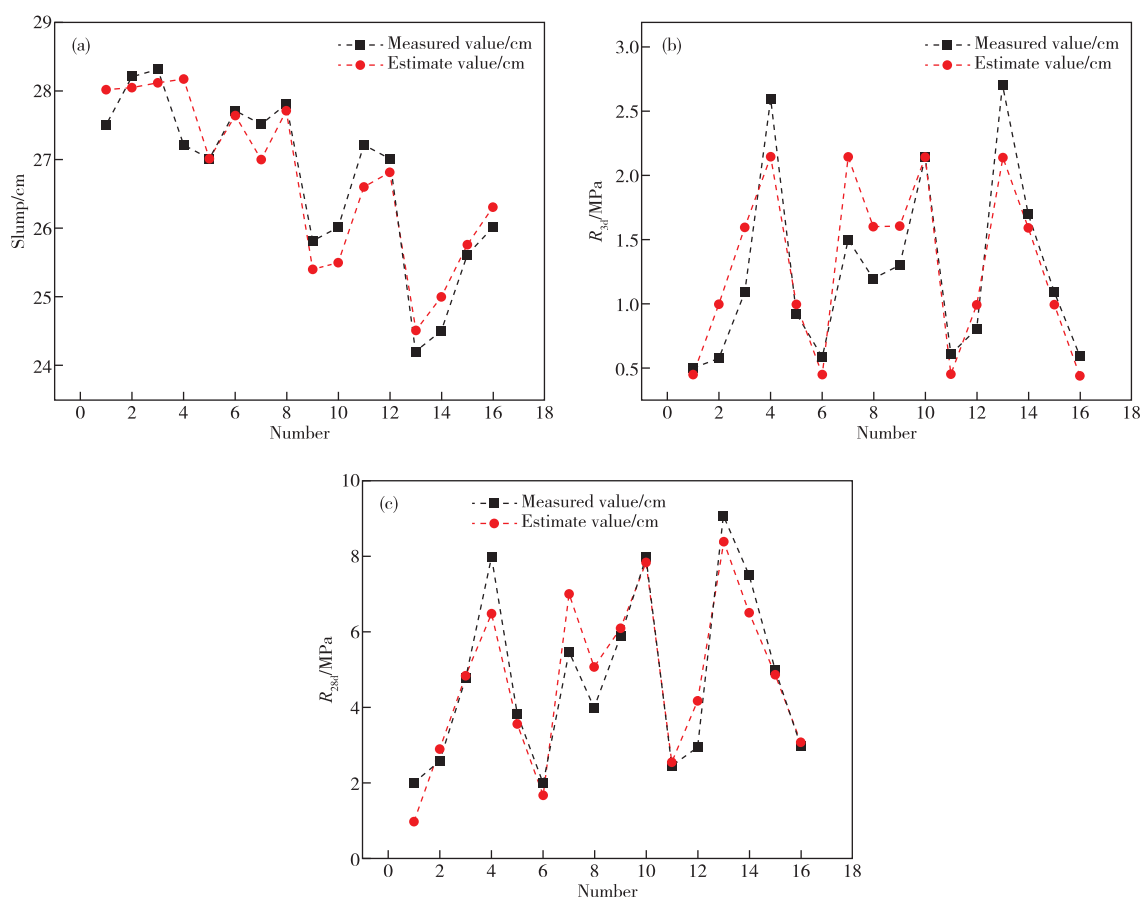


图 2 实测值与预测值曲线

Fig. 2 Actual and predicted values

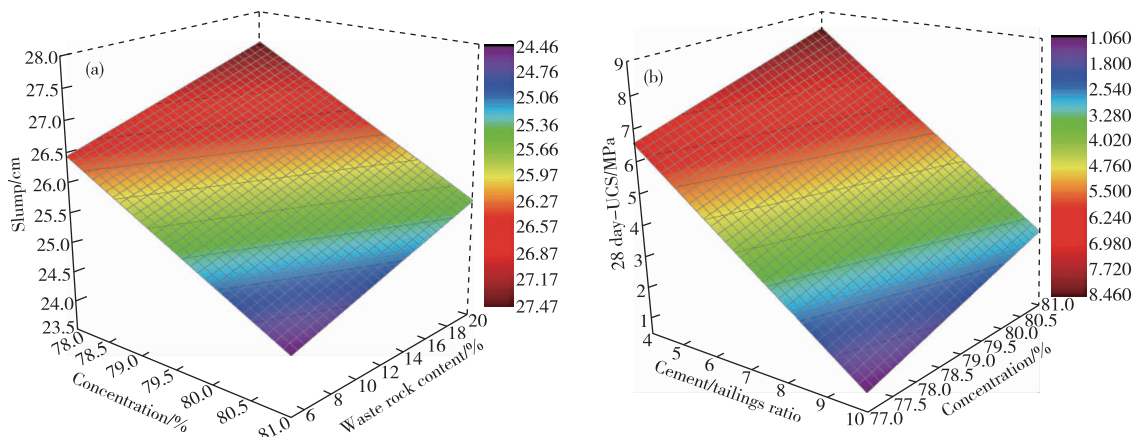


图 3 充填体性能影响因素三维可视化模型

Fig. 3 Three-dimensional visualization model of different factors on properties of backfilling

## 2.5 基于坍落度及抗压强度的配比参数优选

对于充填配比参数的选择最关键的因素在于料浆的流动性能及固结硬化后的抗压强度指标, 矿山充填现场一般采用料浆的坍落度指标来表征充填体工作性能的优劣, 根据金川矿、武山矿等矿山实践参数, 一般认为当充填料浆坍落度指标范围在 25~28 cm 时<sup>[18]</sup>, 料浆均具有较好的流动性能, 同时结合本矿的具体生产情况, 要求充填体 3 d 的抗压强度大于 0.5 MPa, 28 d 的抗压强度大于 2 MPa。因此, 结合建立的料浆坍落度、3 和 28 d 抗压强度的多元线性模型, 可建立如下配比参数寻优模型:

$$0.154A - 0.655B + 0.069C + 76.556 \leq 27 \quad (4)$$

$$3.233 - 0.0280A > 0.5 \quad (5)$$

$$-0.913A + 0.475B - 26.375C > 2 \quad (6)$$

对式(5)、(6)求解可知, 若要使充填体抗压强度满足要求, 则充填体灰砂比(A)应大于 1:9.7, 料浆的质量浓度(B)应大于 77%, 为求得废石掺量(C)的合理取值范围且降低充填体的用料成本, 取灰砂比为 1:9.5, 料浆质量浓度(B)为 80%, 得出废石掺量(C)的取值范围应不大于 20.01%。因此, 可取得一组配比参数为: 灰砂比(B)为 1:9.5、质量浓度(B)为 80%、废石掺量为 20%, 该组配比参数下的充填体符合本矿对充填体性能参数的要求。

## 3 结论

1) 质量浓度、废石掺量及灰砂比均为粗骨料胶结充填料浆坍落度的显著性影响因素。其中, 质量浓度为极显著性影响因素, 影响程度大小为: 质量浓度 > 废石掺量 > 灰砂比。

2) 通过正交试验可知, 灰砂比为粗骨料胶结充填体早期抗压强度的显著性影响因素, 而质量浓度及废石掺量对充填体早期抗压强度无显著性影响。对于充填体 28 d 抗压强度、灰砂比及质量浓度为显著性影响因素, 而废石掺量对后期强度无显著性影响。当废石掺量为 5%~20% 时, 废石的掺入对充填体早期、后期强度无显著性影响。

3) 对正交试验测试的数据构建了多元线性回归模型, 采用 Origin 数值处理软件结合多元线性回归模型构建了充填体 28 d 抗压强度及坍落度的三维可视化模型, 直观地展示了废石掺量、质量浓度及灰砂比的复合作用对坍落度、抗压强度的作用规律。

4) 基于充填料浆坍落度的合理取值范围及对充填体抗压强度的要求, 构建了充填配比参数优化模型, 选出一组充填组合参数为: 灰砂比 1:9.5、废石掺量 20%、质量浓度 80%, 该组配比参数下的充填体性能满足矿山要求。

## 参考文献:

- [1] 韩斌, 王贤来, 肖卫国. 基于多元非线性回归的井下采场充填体强度预测及评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 714-718.  
HAN Bin, WANG Xianlai, XIAO Weiguo. Estimation and evaluation of backfill strength in underground stope based on multivariate nonlinear regression analysis[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(5): 714-718.
- [2] 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 Guoyan, CHEN Ying. Multi-objective

- optimization for mix proportioning of mine filling materials [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(11): 101-108.
- [3] 王新民, 薛希龙, 张钦礼, 等. 碎石和磷石膏联合胶结充填最佳配比及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3767-3773.
- WANG Xinmin, XUE Xilong, ZHANG Qinli, et al. Optimum ratio and application of combined cemented filling with crushed stone and phosphogypsum [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(10): 3767-3773.
- [4] 高建科, 杨长祥. 金川二矿区深部采场围岩与充填体变形规律预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊2): 2625-2632.
- GAO Jianke, YANG Changxiang. Deformation rule of wall rock and filling in deep stope in deposit2 of Jinchuan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2625-2632.
- [5] 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 Zhenjiang, GAO Qian, WANG Yongding, et al. Development of composite cementitious material and optimization of slurry proportion based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(3): 698-707.
- [6] 温震江, 高谦, 王永定, 等. 不同浓度料浆流变特性与混合骨料级配相关性试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 642-648.
- WEN Zhenjiang, GAO Qian, WANG Yongding, et al. Experiment on correlation between R heological properties of filling slurry with different mass concentration and mixed aggregate gradation [J]. Journal of Northeast University (Science and Technology), 2020, 41(5): 642-648.
- [7] 吴立波, 王贻明, 陈威, 等. 基于正交实验的赤泥粉煤灰膏体充填材料配比优化[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(5): 45-49.
- WU Libo, WANG Yiming, CHEN Wei, et al. Ratio optimization of red mud-fly ash paste filling material based on orthogonal experiment [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(5): 45-49.
- [8] 吴凡, 杨晓炳, 杨志强, 等. 高浓度粗骨料充填料浆抗离析特性及其数学模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 1309-1316.
- WU Fan, YANG Xiaobing, YANG Zhiqiang, et al. Anti-segregation property and its mathematical model of high concentration filling slurry with coarse aggregate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(5): 1309-1316.
- [9] 徐文彬, 李乾龙, 田明明. 聚丙烯纤维加筋固化尾砂强度及变形特性[J]. 工程科学学报, 2019, 41(12): 1618-1626.
- XU Wenbin, LI Qianlong, TIAN Mingming. Strength and deformation properties of polypropylene fiber-reinforced cemented tailings backfill [J]. Journal of Engineering Sciences, 2019, 41(12): 1618-1626.
- [10] 周科平, 谷中元. 新型胶凝结构下全尾砂充填体配比决策模型[J]. 有色金属工程, 2018, 8(5): 113-118.
- ZHOU Keping, GU Zhongyuan. Decision-making model for the proportion of full tailings fillingbody under a new type of cemented structure [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2018, 8(5): 113-118.
- [11] 曹帅, 宋卫东, 薛改利, 等. 分层尾砂胶结充填体力学特性变化规律及破坏模式[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 717-722, 728.
- CAO Shuai, SONG Weidong, XUE Gaili, et al. Mechanical characteristics variation of stratified cemented tailings backfilling and its failure modes [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(4): 717-722, 728.
- [12] 曹帅, 薛改利, 宋卫东. 组合胶结充填体力学特性试验与应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 601-608.
- CAO Shuai, XUE Gaili, SONG Weidong. Experimental research on mechanical properties of combined cemented tailings backfill and its application [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(3): 601-608.
- [13] 徐文彬, 宋卫东, 王东旭, 等. 三轴压缩条件下胶结充填体能量耗散特征分析[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 808-814.
- XU Wenbin, SONG Weidong, WANG Dongxu, et al. Eenergy dissipation properties of cement backfill body under triaxial compression conditions [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(5): 808-814.
- [14] 尹升华, 刘家明, 邵亚建, 等. 全尾砂-粗骨料膏体早期抗压强度影响规律及固化机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(2): 478-488.
- YIN Shenghua, LIU Jiaming, SHAO Yajian, et al. Influence rule of early compressive strength and solidification mechanism of full tailings paste with coarse aggregate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(2): 478-488.

- [15] YIN S H, WU A X, HU K J, et al. The effect of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill [J]. *Minerals Engineering*, 2012, 35: 61-66.
- [16] 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 Xiaobing, WEN Zhenjiang, et al. Optimization of proportioning of mixed aggregate filling slurry based on BBD response surface method[J]. *Journal of Hunan University (Science and Technology)*, 2019, 46(6): 47-55.
- [17] 冯国瑞, 贾学强, 郭育霞, 等. 废弃混凝土粗骨料对充填膏体性能的影响[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(6): 1320-1325.  
FENG Guorui, JIA Xueqiang, GUO Yuxia, et al. Influence of the wasted concrete coarse aggregate on the performance of cemented paste backfill[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(6): 1320-1320.
- [18] 高峰, 王巧莉, 彭先艳, 等. 基于指标满意度的充填配比正交优化试验[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 422-427.  
GAO Feng, WANG Qiaoli, PENG Xianyan, et al. Orthogonal optimization test of backfill mix ratio based on index satisfaction[J]. *Journal of Fuzhou University (Science and Technology)*, 2015, 43(3): 422-427.
- 
- (上接第 91 页, Continued from P91)**
- [56] LI L, WU Y, LIU Y, et al. Extraction of alumina from coal fly ash with sulfuric acid leaching method[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2011, 11(2): 254-258.
- [57] MA Z, ZHANG S, ZHANG H, et al. Novel extraction of valuable metals from circulating fluidized bed-derived high-alumina fly ash by acid-alkali-based alternate method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230: 302-313.
- [58] VALEEV D, SHOPPERT A, MIKHAILOVA A, et al. Acid and acid-alkali treatment methods of Al-chloride solution obtained by the leaching of coal fly ash to produce sandy grade alumina [J]. *Metals*, 2020, 10(5): 585.
- [59] ZONG Y, LI F, CHEN W, et al. Extraction of alumina from high-alumina coal ash using an alkaline hydrothermal method[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(7): 1-9.
- [60] SHEMI A, MPANA R N, NDLOVU S, et al. Alternative techniques for extracting alumina from coal fly ash[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 34: 30-37.
- [61] XUE Y, YU W, MEI J, et al. A clean process for alumina extraction and ferrosilicon alloy preparation from coal fly ash via vacuum thermal reduction[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 118262. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118262.
- [62] SEN S K, DAS M M, BANDYOPADHYAY P, et al. Green process using hot spring bacterium to concentrate alumina in coal fly ash [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 88: 10-19.