

# 基于灰关联法的影响充填体强度因素的敏感性分析

Sensitivity Analysis of the Factors Affecting Strength of Backfill Based on the Grey Association Method

王怀勇<sup>1</sup>, 高圣成<sup>2</sup>, 梁新民<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 内蒙古兴业矿业股份有限公司, 内蒙古 赤峰 024000)

**摘要:**根据充填材料配比试验结果,采用灰色系统理论中的灰关联分析法,分析了影响充填体强度的各种因素的主次关系,为充填体强度影响因素的敏感性分析提供了一种简捷而有效的方法。结果表明,灰砂比是影响充填体强度的最主要因素,矿山可根据不同充填体强度要求,选择合适的灰砂比,以节省充填成本。

**关键词:**灰色系统理论;灰关联分析;充填体强度;敏感性分析

**中图分类号:** TD235      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2021)05-0031-04

**Abstract:** According to the strength test results, the grey correlation analysis method of grey system theory is used to analyze relationship of various factors affecting the strength of backfill, it provides a simple and effective method for sensitivity analysis of factors affecting the strength of backfill. The results show that the lime-sand ratio is the primary factor affecting the strength of backfill. According to different strength requirements of backfilling, the mine can select the appropriate lime-sand ratio to save the backfilling cost.

**Key words:** grey system theory; gray association analysis; strength of backfill; sensitivity analysis

## 1 前言

随着国家对环保和绿色矿山建设的要求越来越严格,新尾矿库越来越难获得,迫使新建的矿山和已经采用崩落法、空场法开采的矿山逐渐转为充填采矿法开采,以消耗更多的尾砂,并保护地表安全。对于采用充填采矿法回采的矿山,充填体强度过高会增加充填成本,而充填体强度过低又影响着采空区稳定性和回采效率等,需要对充填体强度的影响因素进行分析,以权衡充填成本和充填强度。以尾砂胶结充填为例,影响胶结充填体强度的主要因素有充填料浆浓度、尾砂级配组成、尾砂化学成分、胶凝材料类型、灰砂比(胶凝材料:尾砂)、添加剂和养护龄期等<sup>[1-2]</sup>。针对不同的充填材料,如何从众多因素中确定充填体强度影响因素的主次关系是改善充填体质量、节省充填成本的重要研究方向。

由于各种影响因素的随机性、模糊性和各因素之间不确定的相关性,使得它们对充填体强度影响程度并不明确,因此可将影响充填体强度的因素分析作为灰色系统加以研究。本文采用灰色系统理论中的灰关联分析法对影响充填体强度因素的敏感性进行分析。

## 2 全尾砂充填强度试验

内蒙古某地下矿山采用分段空场嗣后充填采矿法和上向水平分层充填采矿法回采,采用全尾砂膏体泵送充填工艺,充填尾砂来自选厂。实验室测得全尾砂粒径 $-74\ \mu\text{m}$ 占比为85.12%, $-37\ \mu\text{m}$ 占比为64.49%,属于细尾砂。实验室参考《土工试验规程》SL237-1999中无侧限抗压强度试验方法,测试了该矿不同浓度、灰砂比和养护龄期条件下的试块单轴抗压强度。试验采用可供选择的砭辉水泥和冀东水泥作胶凝材料,全尾砂作为骨料,实验用水为自来水。根据坍落度和料浆流变特性试验结果,选取充填料浆质量浓度分别为58%、60%、62%,灰砂比分别为1:10、1:6、1:4、1:3、1:25,养护龄期为3 d、7 d、28 d和60 d。

[作者简介] 王怀勇(1982—),男,湖北麻城人,硕士,高级工程师,主要从事采矿工程咨询、设计和研究工作。

[引用格式] 王怀勇,高圣成,梁新民.基于灰关联法的影响充填体强度因素的敏感性分析[J].中国矿山工程,2021,50(5):31-34.

实验室采用 C-10 型搅拌机搅拌充填料浆,将搅拌好的料浆装入长×宽×高为 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 的标准三联试模制作试块,试块脱模后放入 HB Y-40A 型恒温恒湿标准养护箱,采用 WHY-300/10 型微机控制压力试验机测定不同养护龄期下试块的单轴抗压强度,每组试块测试 3 次,再取 3 次平均值。实验室测得的充填试块单轴抗压强度试验结果见表 1<sup>[3]</sup>。

表 1 充填试块单轴抗压强度试验结果表

单位:MPa

养护龄期/d	料浆浓度/%	水泥种类	灰砂比				
			1:10	1:6	1:4	1:3	1:2.5
3	58	矽辉水泥	0.06	0.16	0.26	0.64	0.67
3	60	矽辉水泥	0.08	0.23	0.23	0.63	0.96
3	62	矽辉水泥	0.13	0.35	0.35	0.82	1.02
7	58	矽辉水泥	0.10	0.27	0.45	1.23	1.43
7	60	矽辉水泥	0.16	0.38	0.67	1.38	1.78
7	62	矽辉水泥	0.22	0.57	0.89	1.65	2.21
28	58	矽辉水泥	0.58	1.01	1.41	1.92	2.49
28	60	矽辉水泥	0.72	1.16	2.00	2.10	3.17
28	62	矽辉水泥	0.84	1.43	2.49	3.02	3.76
60	58	矽辉水泥	0.76	1.08	1.76	2.52	3.09
60	60	矽辉水泥	0.92	1.47	2.17	2.83	3.65
60	62	矽辉水泥	1.07	1.70	2.55	3.30	3.82
3	58	冀东水泥	0.13	0.27	0.48	-	-
3	60	冀东水泥	0.17	0.35	0.62	-	-
3	62	冀东水泥	0.22	0.4	0.87	-	-
7	58	冀东水泥	0.25	0.5	0.89	-	-
7	60	冀东水泥	0.33	0.61	1.09	-	-
7	62	冀东水泥	0.42	0.72	1.56	-	-
28	58	冀东水泥	0.23	0.66	1.33	-	-
28	60	冀东水泥	0.3	0.95	1.57	-	-
28	62	冀东水泥	0.58	0.96	1.65	-	-
60	58	冀东水泥	0.59	1.07	1.74	-	-
60	60	冀东水泥	0.67	1.4	2.06	-	-
60	62	冀东水泥	0.79	1.56	2.37	-	-

注:冀东水泥灰砂比 1:3 和 1:2.5 未测试。

### 3 充填体强度影响因素的灰关联分析

#### 3.1 灰关联分析法

灰关联分析法是基于行为因子序列的微观或宏观接近,是分析确定因子间的影响程度或因子

对主行为的贡献测度的一种分析方法。该方法优点是不要求有大样本的数据来源,可在不完整的信息中对所要研究的各影响因素通过一定的数据处理后,在随机的因素序列间找出它们的关联程度,再通过关联度大小排序找到主要影响因素。参与分析的各影响因素之间的关联程度以关联度大小来衡量<sup>[4]</sup>。

假设参考序列表示为  $X_0 = (x_0(k), k=1, 2, 3, \dots, n)$ , 比较序列表示为  $X_i = (x_i(k), k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m)$ 。以全尾砂充填强度试验结果为例,参考序列  $X_0$  为充填试块强度,比较序列  $X_1$  为养护龄期、 $X_2$  为料浆浓度、 $X_3$  为水泥种类、 $X_4$  为灰砂比。

根据灰关联分析方法,关联系数的计算公式为

$$\varepsilon_i(k) = \left[ \min_i \min_k |X_i(k) - X_0(k)| + \rho \max_i \max_k |X_i(k) - X_0(k)| \right] / \left[ |X_i(k) - X_0(k)| + \rho \max_i \max_k |X_i(k) - X_0(k)| \right] \quad (1)$$

式中,  $\rho \in (0, +\infty)$  为分辨系数,一般在  $[0, 1]$  区间取值。 $\rho$  越小,分辨力越大。一般的取  $\rho = 0.5$ 。

通常关联度的计算方法是采用平均值法,相关系数的关联度一般表达式为

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

对参考序列  $X_0$  与比较序列  $X_i (i=1, 2, \dots, m)$ , 其关联度分别为  $\gamma_i (i=1, 2, \dots, m)$ , 按从大到小进行排序,即得灰关联序。

若设灰关联序为:  $\gamma_1 > \gamma_2 > \dots > \gamma_m$ , 表明  $X_1$  对  $X_0$  的影响最大,  $X_2$  次之,  $\dots$ , 依次排列。

#### 3.2 计算关联度的基本步骤

##### 1) 无量纲化处理

在确定参考数列和比较数列对抽象系统进行关联分析时,首先要确定表征系统特征的特征参数,对特征变量和相关变量进行无量纲化处理,得到对应的参考序列  $X_0$  与比较序列  $X_i$ <sup>[5]</sup>。以全尾砂充填强度试验结果为例,试块强度  $X_0$ 、养护龄期  $X_1$ 、料浆浓度  $X_2$ 、灰砂比  $X_4$  均按表 1 中数值取,水泥种类  $X_3$  序列中矽辉水泥取 1、冀东水泥取 2。

##### 2) 数据变换

为了保证各因素具有等效性和同序性,需要对因素的指标值进行数据变换,数据变换常用方法有初值化、均值化、区间值化、倍数变换以及归一化变换等,文中采用了均值化变换方法,对全尾砂充填强度试验数据进行。

在无量纲化的基础上,对每个序列中的所有数据均除以该序列的平均值,从而得到一个新序列。即

$$\tilde{X}_i(k) = \frac{X_i(k)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m X_i(k)} \quad (3)$$

3) 构造关联离散函数  
关联系数为

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (4)$$

需要计算:

(a) 接近度  $\Delta_i(k) = |\tilde{X}_i(k) - \tilde{X}_0(k)|$ ;

(b) 最小和最大极差  $\Delta_{\min}, \Delta_{\max}$ , 即  $\Delta_{\min} = \min_i \min_k \{\Delta_i(k)\}, \Delta_{\max} = \max_i \max_k \{\Delta_i(k)\}$

通过以上步骤即可求得关联系数,再由式(2)可求关联度。

### 3.3 计算结果

按照上述步骤对表1 试验结果进行计算,采用式(3)进行均值化数据变换,结果见表2。利用式(4)和式(2)得出养护龄期、料浆浓度、水泥种类和灰砂比与试块强度的灰关联度及关联度排序见表3所示。

表2 均值化数据变换结果表

序号	养护日期/ $\tilde{X}_1(k)$	料浆浓度/ $\tilde{X}_2(k)$	水泥种类/ $\tilde{X}_3(k)$	灰砂比/ $\tilde{X}_4(k)$	试块强度/ $\tilde{X}_0(k)$	序号	养护日期/ $\tilde{X}_1(k)$	料浆浓度/ $\tilde{X}_2(k)$	水泥种类/ $\tilde{X}_3(k)$	灰砂比/ $\tilde{X}_4(k)$	试块强度/ $\tilde{X}_0(k)$
1	0.122 4	0.966 7	0.727 3	0.452 8	0.051 8	49	0.122 4	0.966 7	0.727 3	1.811 3	0.578 8
2	0.122 4	1.000 0	0.727 3	0.452 8	0.069 1	50	0.122 4	1.000 0	0.727 3	1.811 3	0.829 3
3	0.122 4	1.033 3	0.727 3	0.452 8	0.112 3	51	0.122 4	1.033 3	0.727 3	1.811 3	0.881 1
4	0.285 7	0.966 7	0.727 3	0.452 8	0.086 4	52	0.285 7	0.966 7	0.727 3	1.811 3	1.235 3
5	0.285 7	1.000 0	0.727 3	0.452 8	0.138 2	53	0.285 7	1.000 0	0.727 3	1.811 3	1.537 7
6	0.285 7	1.033 3	0.727 3	0.452 8	0.190 0	54	0.285 7	1.033 3	0.727 3	1.811 3	1.909 1
7	1.142 9	0.966 7	0.727 3	0.452 8	0.501 0	55	1.142 9	0.966 7	0.727 3	1.811 3	2.151 0
8	1.142 9	1.000 0	0.727 3	0.452 8	0.622 0	56	1.142 9	1.000 0	0.727 3	1.811 3	2.738 4
9	1.142 9	1.033 3	0.727 3	0.452 8	0.725 6	57	1.142 9	1.033 3	0.727 3	1.811 3	3.248 1
10	2.449 0	0.966 7	0.727 3	0.452 8	0.656 5	58	2.449 0	0.966 7	0.727 3	1.811 3	2.669 3
11	2.449 0	1.000 0	0.727 3	0.452 8	0.794 7	59	2.449 0	1.000 0	0.727 3	1.811 3	3.153 1
12	2.449 0	1.033 3	0.727 3	0.452 8	0.924 3	60	2.449 0	1.033 3	0.727 3	1.811 3	3.299 9
13	0.122 4	0.966 7	0.727 3	0.754 7	0.138 2	61	0.122 4	0.966 7	1.454 5	0.452 8	0.112 3
14	0.122 4	1.000 0	0.727 3	0.754 7	0.198 7	62	0.122 4	1.000 0	1.454 5	0.452 8	0.146 9
15	0.122 4	1.033 3	0.727 3	0.754 7	0.302 3	63	0.122 4	1.033 3	1.454 5	0.452 8	0.190 0
16	0.285 7	0.966 7	0.727 3	0.754 7	0.233 2	64	0.285 7	0.966 7	1.454 5	0.452 8	0.216 0
17	0.285 7	1.000 0	0.727 3	0.754 7	0.328 3	65	0.285 7	1.000 0	1.454 5	0.452 8	0.285 1
18	0.285 7	1.033 3	0.727 3	0.754 7	0.492 4	66	0.285 7	1.033 3	1.454 5	0.452 8	0.362 8
19	1.142 9	0.966 7	0.727 3	0.754 7	0.872 5	67	1.142 9	0.966 7	1.454 5	0.452 8	0.198 7
20	1.142 9	1.000 0	0.727 3	0.754 7	1.002 1	68	1.142 9	1.000 0	1.454 5	0.452 8	0.259 2
21	1.142 9	1.033 3	0.727 3	0.754 7	1.235 3	69	1.142 9	1.033 3	1.454 5	0.452 8	0.501 0
22	2.449 0	0.966 7	0.727 3	0.754 7	0.933 0	70	2.449 0	0.966 7	1.454 5	0.452 8	0.509 7
23	2.449 0	1.000 0	0.727 3	0.754 7	1.269 9	71	2.449 0	1.000 0	1.454 5	0.452 8	0.578 8
24	2.449 0	1.033 3	0.727 3	0.754 7	1.468 6	72	2.449 0	1.033 3	1.454 5	0.452 8	0.682 4
25	0.122 4	0.966 7	0.727 3	1.132 1	0.224 6	73	0.122 4	0.966 7	1.454 5	0.754 7	0.233 2
26	0.122 4	1.000 0	0.727 3	1.132 1	0.198 7	74	0.122 4	1.000 0	1.454 5	0.754 7	0.302 3
27	0.122 4	1.033 3	0.727 3	1.132 1	0.302 3	75	0.122 4	1.033 3	1.454 5	0.754 7	0.345 5

续表 2

序号	养护日期/	料浆浓度/	水泥种类/	灰砂比/	试块强度/	序号	养护日期/	料浆浓度/	水泥种类/	灰砂比/	试块强度/
	$\bar{X}_1(k)$	$\bar{X}_2(k)$	$\bar{X}_3(k)$	$\bar{X}_4(k)$	$\bar{X}_0(k)$		$\bar{X}_1(k)$	$\bar{X}_2(k)$	$\bar{X}_3(k)$	$\bar{X}_4(k)$	$\bar{X}_0(k)$
28	0.285 7	0.966 7	0.727 3	1.132 1	0.388 7	76	0.285 7	0.966 7	1.454 5	0.754 7	0.431 9
29	0.285 7	1.000 0	0.727 3	1.132 1	0.578 8	77	0.285 7	1.000 0	1.454 5	0.754 7	0.527 0
30	0.285 7	1.033 3	0.727 3	1.132 1	0.768 8	78	0.285 7	1.033 3	1.454 5	0.754 7	0.622 0
31	1.142 9	0.966 7	0.727 3	1.132 1	1.218 0	79	1.142 9	0.966 7	1.454 5	0.754 7	0.570 1
32	1.142 9	1.000 0	0.727 3	1.132 1	1.727 7	80	1.142 9	1.000 0	1.454 5	0.754 7	0.820 7
33	1.142 9	1.033 3	0.727 3	1.132 1	2.151 0	81	1.142 9	1.033 3	1.454 5	0.754 7	0.829 3
34	2.449 0	0.966 7	0.727 3	1.132 1	1.520 4	82	2.449 0	0.966 7	1.454 5	0.754 7	0.924 3
35	2.449 0	1.000 0	0.727 3	1.132 1	1.874 6	83	2.449 0	1.000 0	1.454 5	0.754 7	1.209 4
36	2.449 0	1.033 3	0.727 3	1.132 1	2.202 8	84	2.449 0	1.033 3	1.454 5	0.754 7	1.347 6
37	0.122 4	0.966 7	0.727 3	1.509 4	0.552 9	85	0.122 4	0.966 7	1.454 5	1.132 1	0.414 6
38	0.122 4	1.000 0	0.727 3	1.509 4	0.544 2	86	0.122 4	1.000 0	1.454 5	1.132 1	0.535 6
39	0.122 4	1.033 3	0.727 3	1.509 4	0.708 4	87	0.122 4	1.033 3	1.454 5	1.132 1	0.751 6
40	0.285 7	0.966 7	0.727 3	1.509 4	1.062 5	88	0.285 7	0.966 7	1.454 5	1.132 1	0.768 8
41	0.285 7	1.000 0	0.727 3	1.509 4	1.192 1	89	0.285 7	1.000 0	1.454 5	1.132 1	0.941 6
42	0.285 7	1.033 3	0.727 3	1.509 4	1.425 4	90	0.285 7	1.033 3	1.454 5	1.132 1	1.347 6
43	1.142 9	0.966 7	0.727 3	1.509 4	1.658 6	91	1.142 9	0.966 7	1.454 5	1.132 1	1.148 9
44	1.142 9	1.000 0	0.727 3	1.509 4	1.814 1	92	1.142 9	1.000 0	1.454 5	1.132 1	1.356 2
45	1.142 9	1.033 3	0.727 3	1.509 4	2.608 8	93	1.142 9	1.033 3	1.454 5	1.132 1	1.425 4
46	2.449 0	0.966 7	0.727 3	1.509 4	2.176 9	94	2.449 0	0.966 7	1.454 5	1.132 1	1.503 1
47	2.449 0	1.000 0	0.727 3	1.509 4	2.444 7	95	2.449 0	1.000 0	1.454 5	1.132 1	1.779 5
48	2.449 0	1.033 3	0.727 3	1.509 4	2.850 7	96	2.449 0	1.033 3	1.454 5	1.132 1	2.047 3

表 3 灰关联分析计算结果表

影响因素	养护龄期	料浆浓度	水泥种类	灰砂比
关联度( $\gamma_i$ )	0.734 3	0.700 5	0.676 5	0.753 0
关联序	2	3	4	1

由灰关联分析法得到影响充填体强度因素的敏感性从强到弱依次为灰砂比、养护龄期、料浆浓度和水泥种类。

## 4 结论

(1)由关联序可以看出,灰砂比是影响充填体强度的主要因素。胶凝材料含量越多,从而使水化反应所生成的C-S-H凝胶越多,颗粒更能有效地凝固在一起,有利地促进了胶结充填体强度的增加。胶凝材料添加量增加,导致充填成本也会相应地增加。矿山应研制和选取适合尾砂性质的胶凝材料,以降低胶凝材料消耗量,从而降低充填成本。在生产过程中,可根据不同充填强度要求,选择合理的灰砂比。

(2)养护龄期是影响充填体强度的重要因素,在满足生产要求的条件下,应尽量延长采空区内充填体的养护时间。

(3)在相同灰砂比、养护龄期条件下,充填体强度随着料浆浓度的增加而呈上升趋势。在满足输送的前提条件下,应尽可能提高充填料浆的浓度。

### [参考文献]

- [1] 于润沧. 金属矿山胶结充填理论与工程实践[M]. 北京:冶金工业出版社,2020.
- [2] 杨安国,周宗红,张秋华. 胶结充填体抗压强度的影响因素分析[J]. 价值工程,2014,33(23):80-81.
- [3] 王伟,王怀勇,裴斌,等. 全尾砂充填材料配比及输送特性试验研究[J]. 有色设备,2020,34(3):21-25,31.
- [4] 史秀志,王怀勇,田建军,等. 基于灰关联法的爆破振动对民房破坏致因因素的敏感性分析[J]. 爆破,2008(3):17-21.
- [5] 管晓芳. 正交试验灰关联度分析法[J]. 水利与建筑工程学报,2007(2):76-77,88.