

# 铁矿床物理模型相似材料正交配比试验<sup>\*</sup>

卢宏建<sup>1,2</sup>, 梁鹏<sup>1</sup>, 卢小娜<sup>3</sup>, 张松林<sup>1</sup>

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063009; 2. 河北省矿业开发与安全技术实验室, 河北 唐山 063009; 3. 华北理工大学 轻工学院, 河北 唐山 063009 )

**摘要:**以河砂、碳酸钙、石膏和重晶石为相似材料,应用正交设计方法,以骨料质量与胶结材料质量比、碳酸钙质量与石膏质量比、重晶石粉质量与骨料质量比为控制因素,制定了三因素五水平的试验方案。通过室内力学试验,在获取不同方案的密度、抗压强度、弹性模量等力学指标测试的基础上,分析了力学指标影响因素,得出了相似材料配比与力学指标关系方程。结果表明:重晶石含量对相似材料密度起控制作用;抗压强度力学指标主控因素是骨料质量与胶结材料质量比;相似材料的弹性模量力学指标受骨料质量与胶结材料质量比影响最大,其次为重晶石含量,受碳酸钙质量与石膏质量比影响最小。采用 MATLAB 程序进行多元线性回归得出,相似材料配比与力学指标关系方程可用于相似材料模型试验配比的确定。

**关键词:**铁矿床;相似材料;配比试验正交设计

中图分类号:TD851 文献标识码:B 文章编号:1001-0076(2016)01-0030-05

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2016.01.005

## Orthogonal Proportioning Test with Similar Material of Iron Deposit Physical Model

LU Hongji<sup>1,2</sup>, LIANG Peng<sup>1</sup>, LU Xiaona<sup>3</sup>, ZHANG Songlin<sup>1</sup>

(1. College of Mine engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Hebei Province Dey Laboratory of Mining Development and Safety Technique, Tangshan 063009, Hebei, China; 3. College of Qinggong, North China University of Science and Technology, Tangshan 064000, Hebei, China)

**Abstract:** Taking river sand, calcium carbonate, gypsum, barite as similar materials, an experiment scheme called three controlling factors with five variable levels, which consisted of the weight ratio of aggregates to cementing material, calcium carbonate to gypsum and barite powder to aggregates, was set up by applying orthogonal design method. Through laboratory mechanics experiment, mechanics indexes of different schemes such as density, compressive strength, and elastic modulus were obtained and analyzed, thus deduced relation equation between similar material proportion and mechanics index. The results show that the barite content has a key effect on density of similar material. The weight ratio of aggregates to cementing material was the primary controlling factor of compressive strength. The elastic modulus mechanics index was mostly affected by the weight ratio of aggregates to cementing material, then the barite content, and it was least affected by the weight ratio of calcium carbonate to gypsum. The regression relation equation between similar material proportion and mechanics index was obtained by using MATLAB, which could be used to determine the ratio of similar material model test.

\* 收稿日期:2015-12-02

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2014209093)

作者简介:卢宏建(1980-),男,博士,副教授。

**Key words:** iron deposit; similar material; proportioning text; orthogonal design

物理模型试验以其操作简单、结果直观、试验周期短等特点,一直是解决岩体工程问题的重要研究手段<sup>[1-2]</sup>。模型试验的基础是相似理论,即要求相似材料的力学特性与物理原型遵循一定的相似比,因此相似材料原料的选择与配比是模型试验成功的基础<sup>[3-4]</sup>。诸多学者对相似材料进行了相关研究并取得了一系列成果,刘亮亮等<sup>[2]</sup>以沙为骨料,粉煤灰和石膏为胶结料采用正交试验的方法进行配比试验,准确地配出了满足相似模拟试验需求的低强度相似材料;韩伯鲤<sup>[5]</sup>提出了以铁粉和石英砂为骨料,以松香酒精溶液为胶结料的相似材料;张强勇等<sup>[6]</sup>研制出了以铁矿粉、重晶石粉、石英砂、石膏粉和松香酒精配制而成的相似材料。本文在前人研究成果的基础上,以“多次扰动下铁矿床采空区围岩破裂失稳宏观细观特征演化规律研究”河北省自然科学基金项目为研究背景,对铁矿床物理模型相似材料原料的选择和配比进行试验研究。

## 1 相似材料配比正交试验方案

### 1.1 相似材料选择

本次试验所模拟的原岩为磁铁矿和闪长岩,结合相关文献和相似材料原料选择的一般原则<sup>[7-9]</sup>,选取石膏和碳酸钙为胶结材料,河砂和重晶石为骨料。石膏为高强石膏粉,碳酸钙为重质碳酸钙,河砂为级配粒径小于 1 mm 的细河砂,重晶石粒径为 0.5 ~ 1 mm。

### 1.2 正交试验方案设计

试验采用正交试验法考虑 3 个因素分别为骨料质量与胶结材料质量比(A)、碳酸钙质量与石膏质量比(B)、重晶石粉质量与骨料质量比(C),每个因素设置 5 个水平,如表 1 所示。设计方案 25 组,其材料配比方案如表 2 所示。试验中骨料取 2 000 g,水量为试件的 1/10,按配比方案计算不同试验号对应的原料质量。

## 2 试件制作与力学参数测试

### 2.1 试件制作步骤

按照配比方案计算的各试验号中各原料的配比备置原料,经过试模准备、原料拌合、装料、压制、脱模、养护等工序制作成标准试件。

表 1 配比试验正交设计水平

因素水平	因素 A	因素 B	因素 C
1	4 : 1	1 : 9	0
2	5 : 1	2 : 8	1 : 10
3	6 : 1	3 : 7	2 : 10
4	7 : 1	4 : 6	3 : 10
5	8 : 1	5 : 5	4 : 10

表 2 配比试验方案

试验号	因素 A	因素 B	因素 C
1	4 : 1	1 : 9	0
2	4 : 1	2 : 8	1 : 10
3	4 : 1	3 : 7	2 : 10
4	4 : 1	4 : 6	3 : 10
5	4 : 1	5 : 5	4 : 10
6	5 : 1	1 : 9	1 : 10
7	5 : 1	2 : 8	2 : 10
8	5 : 1	3 : 7	3 : 10
9	5 : 1	4 : 6	4 : 10
10	5 : 1	5 : 5	0
11	6 : 1	1 : 9	2 : 10
12	6 : 1	2 : 8	3 : 10
13	6 : 1	3 : 7	4 : 10
14	6 : 1	4 : 6	0
15	6 : 1	5 : 5	1 : 10
16	7 : 1	1 : 9	3 : 10
17	7 : 1	2 : 8	4 : 10
18	7 : 1	3 : 7	0
19	7 : 1	4 : 6	1 : 10
20	7 : 1	5 : 5	2 : 10
21	8 : 1	1 : 9	4 : 10
22	8 : 1	2 : 8	0
23	8 : 1	3 : 7	1 : 10
24	8 : 1	4 : 6	2 : 10
25	8 : 1	5 : 5	3 : 10

模具选用室内立方体铸铁模具,尺寸长 × 宽 × 高为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm。每个方案制作 3 个试件。

### 2.2 力学指标测试

利用 LP503 型电子精密天平和 HUALONG - WC500 型压力机对不同配比方案的试件进行密度、单轴抗压强度、弹性模量等物理力学指标进行测试,测试结果如表 3 所示。相似材料密度范围为 1.655 ~ 1.948 g/cm<sup>3</sup>,抗压强度范围为 0.304 ~ 1.415 MPa,弹性模量范围为 165.509 ~ 517028 MPa。在一定相似比条件下,制备的相似材料可以模拟部分常见铁矿床岩层。

表3 不同配比方案力学指标测试结果

试验号	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
1	1.655	1.228	416.028
2	1.769	1.237	424.423
3	1.792	1.305	446.621
4	1.813	1.334	482.378
5	1.948	1.415	517.028
6	1.713	1.051	366.534
7	1.712	1.091	387.454
8	1.793	1.154	411.768
9	1.881	1.211	405.432
10	1.756	1.102	357.569
11	1.742	0.649	291.872
12	1.784	0.764	327.369
13	1.786	0.821	346.789
14	1.693	0.845	284.276
15	1.744	0.911	307.192
16	1.722	0.543	252.056
17	1.813	0.576	272.198
18	1.716	0.527	203.842
19	1.684	0.568	236.243
20	1.754	0.701	267.027
21	1.739	0.321	213.501
22	1.653	0.276	165.509
23	1.709	0.304	186.042
24	1.735	0.425	203.101
25	1.797	0.482	215.063

### 3 相似材料力学性能影响因素分析

采用极差分析法分析不同配比方案力学指标测试结果<sup>[10-11]</sup>。依据表3数据,得出不同力学指标影响因素极差分析结果如表4所示,表中K为不同因素水平指标测试结果的平均值,R为极差。

为了直观地分析各因素力学指标的影响规律,根据表3数据绘制了各因素不同水平力学指标均值折线直观图,如图1~图3所示。

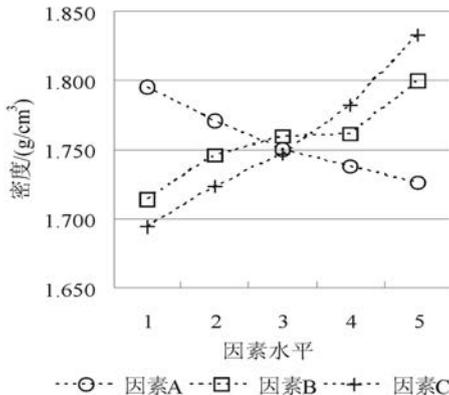


图1 密度影响因素分析

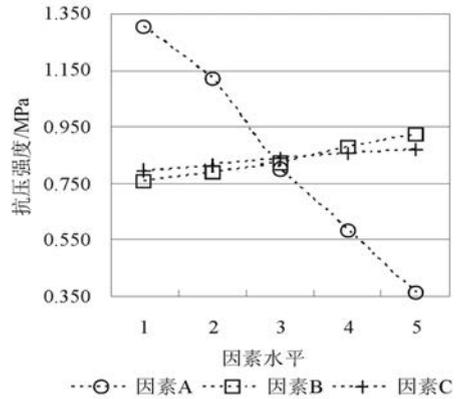


图2 抗压强度影响因素分析

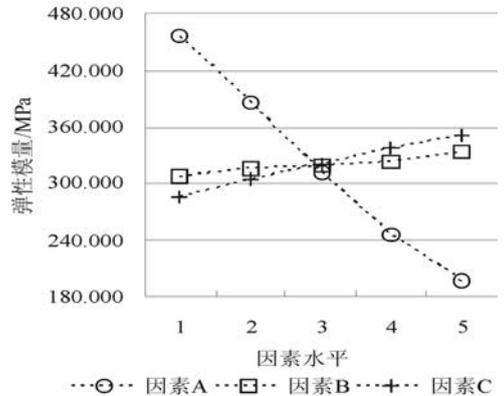


图3 弹性模量影响因素分析

表4 力学指标测试结果极差分析

指标	值	因素A	因素B	因素C
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	K <sub>1</sub>	1.795	1.714	1.695
	K <sub>2</sub>	1.771	1.746	1.724
	K <sub>3</sub>	1.750	1.759	1.747
	K <sub>4</sub>	1.738	1.761	1.782
	K <sub>5</sub>	1.727	1.800	1.833
	R	0.069	0.086	0.139
抗压强度/MPa	K <sub>1</sub>	1.304	0.758	0.796
	K <sub>2</sub>	1.122	0.789	0.814
	K <sub>3</sub>	0.798	0.822	0.834
	K <sub>4</sub>	0.583	0.877	0.855
	K <sub>5</sub>	0.362	0.922	0.869
	R	0.942	0.164	0.073
弹性模量/MPa	K <sub>1</sub>	457.296	307.998	285.445
	K <sub>2</sub>	385.751	315.391	304.087
	K <sub>3</sub>	311.500	319.012	319.215
	K <sub>4</sub>	246.273	322.286	337.727
	K <sub>5</sub>	196.643	332.776	350.990
	R	260652	24.778	65.545

通过分析不同力学指标影响因素分析折线图和不同因素水平指标测试结果极差数据可以得出以下结论。

(1) 重晶石含量对相似材料密度起控制作用。

碳酸钙质量与石膏质量比和骨料质量与胶结材料质量比影响程度相当,但其两种因素影响趋势相反。

(2) 抗压强度力学指标主控因素是骨料质量与胶结材料质量比,碳酸钙质量与石膏质量比和重晶石含量对其也有一定影响,影响趋势相反。

(3) 相似材料的弹性模量力学指标受骨料质量与胶结材料质量比影响最大,其次为重晶石含量,受碳酸钙质量与石膏质量比影响最小。

## 4 材料配比与力学指标关系方程确定及应用

### 4.1 相似材料配比与力学指标关系方程

通过各影响因素分析折线图可知,各因素与相似材料力学指标有明显的线性关系。运用 Matlab 程序进行多元线性回归分析,设因素 A 为  $X_1$ 、因素 B 为  $X_2$ 、因素 C 为  $X_3$ ;密度指标为  $Y_1$ 、抗压强度指标为  $Y_2$ 、弹性模量指标为  $Y_3$ 。通过表 2 和表 3 数据回归得出相似材料配比与力学指标关系方程,方程相关系数大于 0.95。

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 1.7507 - 0.0171X_1 + 0.0830X_2 + 0.3356X_3 \\ Y_2 &= 2.1582 - 0.2423X_1 + 0.1866X_2 + 0.1876X_3 \\ Y_3 &= 670.5126 - 66.0783X_1 + 25.1866X_2 + 0.1876X_3 \end{aligned} \right\} (1)$$

对公式(1)求解得出:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= 6.64Y_1 - 1.315Y_2 - 0.0120Y_3 - 0.7203 \\ X_2 &= 7.0354Y_1 + 4.9495Y_2 - 0.0199Y_3 - 9.609 \\ X_3 &= 1.5781Y_1 - 1.2911Y_2 + 0.0043Y_3 - 2.8769 \end{aligned} \right\} (2)$$

在相似模拟工程相似比确定的前提下,依据物理原型力学指标参数,得出相似材料力学指标参数,通过公式(2)确定相似材料配比。公式(2)中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  区间为  $[0, \infty)$ ,当计算结果小于零时,应通过添加剂或选用其他相似材料原料进行相似材料配比的确定。

### 4.2 工程应用

物理原型为邯邢地区典型铁矿床,岩层为磁铁矿和闪长岩。物理模拟采用 YJ203 相似材料加载模拟试验台。模型模拟区尺寸:长 × 宽 × 高 = 3 000 mm × 300 mm × 2 100 mm。综合考虑物理模拟区域尺寸和相似材料加载模拟试验台尺寸,相似材料模型试验选用几何相似比  $C_l = 80$ ,密度相似比  $C_\rho = 1.7$ ,应力和弹性模量相似比  $C_\sigma = C_E = 136$ 。物理原型与相似材料力学参数如表 5 所示。

将表 5 数据对应代入公式(2)后可以得出,磁铁矿相似材料的骨料质量与胶结材料质量比为 6.8,碳酸钙质量与石膏质量比为 1.1,重晶石粉质量与骨料质量比为 0.5;闪长岩相似材料的骨料质量与胶结材料质量比为 6.4,碳酸钙质量与石膏质量比为 0.1,重晶石粉质量与骨料质量比为 0.1。

根据得到的相似材料配比制作试件并进行力学指标测试,得出的相似材料力学参数如表 6 所示。

表 5 磁铁矿和闪长岩配比材料力学参数设计

岩性		密度 /(g cm <sup>-3</sup> )	抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa
磁铁矿	原型	3.26	110	46 000
	模型	1.91	0.81	338.235
闪长岩	原型	2.87	90	37 000
	模型	1.69	0.66	272.06

表 6 验证试验结果

材料	密度 /(g cm <sup>-3</sup> )	抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa
磁铁矿相似材料	186	0.83	341
闪长岩相似材料	1.91	0.61	251

对比相似材料理论值和试验值误差小于 10%,符合《建筑砂浆基本性能试验方法》中规定误差标准<sup>[12]</sup>。试验回归的相似材料配比与力学指标关系方程可以用于相似材料模型试验配比的确定。

## 5 结论

(1) 运用极差分析法对相似材料力学指标影响因素进行了分析,发现重晶石含量对相似材料密度起控制作用。碳酸钙质量与石膏质量比和骨料质量与胶结材料质量比影响程度相当,但其两种因素影响趋势相反。抗压强度力学指标主控因素是骨料质量与胶结材料质量比,碳酸钙质量与石膏质量比和重晶石含量对其也有一定影响,影响趋势相反。相似材料的弹性模量力学指标受骨料质量与胶结材料质量比影响最大,其次为重晶石含量,受碳酸钙质量与石膏质量比影响最小。

(2) 依据试验数据,采用 Matlab 程序进行多元线性回归分析,得出了相似材料配比与力学指标关系方程,通过工程应用验证了回归方程可以用于相似材料模型试验配比的确定。

## 参考文献:

- [1] 肖杰,刘保国.水泥石膏相似材料配比试验研究[J].岩土工程技术,2015,29(2):65-69.
- [2] 刘亮亮,王海龙,刘江波,等.低强度相似材料正交配比试验[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2014,33(2):188-192.
- [3] 陈陆望,白世伟.脆性岩体岩爆倾向性的相似材料配比试验研究[J].岩土力学,2006,27(S2):1050-1054.
- [4] 李宝富,任永康,齐利伟,等.煤岩体的低强度相似材料正交配比试验研究[J].煤炭工程,2011,58(4):93-95.
- [5] 韩伯鲤,陈霞龄,宋一乐,等.岩体相似材料的研究[J].武汉水利水电大学学报,1997,30(2):6-9.
- [6] 张强勇,李术才,郭小红,等.铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J].岩土力学,2009,29(8):2126-2130.
- [7] 蔚立元,靖洪文,徐帮树,等.海底隧道流固耦合相似模拟试验[J].中南大学学报:自然科学版,2015,46(3):983-990.
- [8] 王汉鹏,张庆贺,袁亮,等.含瓦斯煤相似材料研制及其突出试验应用[J].岩土力学,2015,36(6):1676-1682.
- [9] 史小萌,刘保国,肖杰.水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法[J].岩土力学,2015,36(5):1357-1362.
- [10] 袁宗盼,陈新民,袁媛,等.地质力学模型相似材料配比的正交试验研究[J].防灾减灾工程学报,2014,34(2):197-202.
- [11] 杨晓雨,郭保华,李振兴.物理模拟相似材料配比的正交试验研究[J].煤矿现代化,2014,24(4):62-65.
- [12] 中华人民共和国建设部. JGJ70-90 建筑砂浆基本性能试验方法[S].北京:中国建筑工业出版社,1990.