

文章编号:0253-9993(2012)01-0044-06

# 基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究

董金玉<sup>1,2</sup>,杨继红<sup>1</sup>,杨国香<sup>2</sup>,伍法权<sup>2</sup>,刘红帅<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电学院,河南 郑州 450011;2. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院工程地质力学重点实验室,北京 100029;3. 中国地震局 工程力学所,黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**在前人相似材料研究的基础上,应用正交设计方法,以(铁粉+重晶石粉)/骨料、铁粉/(铁粉+重晶石粉)、黏结剂浓度、石膏含量为4个因素,每个因素设置5个水平,设计了25组材料配比方案,进行了称重、单轴压缩、劈裂和直剪试验,获得了不同配比相似材料的密度、抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、内摩擦角和黏聚力等物理力学性质指标。试验结果表明:不同配比相似材料的物理力学参数分布的范围较大,能够满足不同性质岩体模型试验对岩体相似材料的要求;采用极差分析法分析了各因素的敏感性,发现(铁粉+重晶石粉)/骨料对试件密度、内摩擦角起主要控制作用,黏结剂浓度对试件的抗压强度、抗拉强度、弹性模量、黏聚力起主要控制作用;并作出了各因素对相似材料物理力学参数影响的直观分析图,分析了各因素对相似材料参数的影响规律。

**关键词:**正交设计方法;相似材料;极差分析法;敏感性;直观分析图

**中图分类号:**TD315.3 **文献标志码:**A

## Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design

DONG Jin-yu<sup>1,2</sup>, YANG Ji-hong<sup>1</sup>, YANG Guo-xiang<sup>2</sup>, WU Fa-quan<sup>2</sup>, LIU Hong-shuai<sup>3</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Haerbin 150080, China)

**Abstract:** On the basis of previous research of similar material, the weight ratio of iron ore powder plus barite powder to aggregates, the weight ratio of iron ore powder to iron ore powder plus barite powder, adhesive concentration and gypsum content were selected as four factors, and every factor had five variable levels. According to twenty five schemes of material mixture ratio designed by orthogonal design method, laboratory uniaxial compression test, split test and direct shear test were conducted. Physical and mechanical indexes of similar material such as unit weight, compressive strength, tensile strength, elastic modulus, poisson ratio, internal friction angle and cohesion were obtained under different material mixture ratios. The tests results show that physical and mechanical indexes of similar material vary in a large range and can meet the needs for rock similar material in different physical model test of rock slope. The sensitivity of every factor was analyzed by using extremum difference method. The results show that the weight ratio of iron ore powder plus barite powder to aggregates has control effect on density and internal friction angle of the specimen, and adhesive concentration has control effect on compressive strength, tensile strength, elastic modulus and cohesion of the specimen. The relationship between factors and parameters of similar material were studied by direct analysis charts of the factors affecting physical and mechanical indexes of the material.

**Key words:** orthogonal design method; similar material; extremum difference analysis; sensitivity; direct analysis chart

收稿日期:2011-02-01 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(40702055);汶川地震地质灾害调查评价资助项目(1212010914029);华北水利水电学院高层次人才引进项目

作者简介:董金玉(1977—),男,河南济源人,副教授,博士。Tel:0371-69127353, E-mail:dongjy0552@126.com

根据相似理论,选择并配制合适的相似材料,进行模型试验。相似材料的选择和配制对材料的物理力学性质具有很大的影响,并对模型试验的结果起着决定性的作用。关于相似材料的选择,已进行了大量的研究工作<sup>[1-9]</sup>。其中张强勇等<sup>[4-8]</sup>研制了由铁矿粉、重晶石粉、石英砂、石膏粉和松香酒精溶液拌合而成的混合材料(IBSCM)。选定相似材料之后,要满足试验所需物理力学参数的相似材料配比尚需进行大量的试验,选择何种试验设计方法就显得较为重要。试验设计方法主要有全因素试验、正交试验设计和均匀试验设计等。

本文在张强勇等相似材料研究的基础上,应用正交试验方法设计了相似材料的试验方案,进行了不同配比材料的室内物理力学指标试验,得到了不同配比相似材料的物理力学参数,并通过极差分析法,分析了各因素对物理力学参数的敏感性和影响规律。

## 1 相似材料配比正交设计方案

正交试验法是用于多因素试验的一种方法,它是从全面试验中挑选出部分有代表的点进行试验,这些代表点具有均匀和整齐的特点。正交试验设计是部分因子设计的主要方法,效率很高,试验中把所要考察的结果称为指标,把要考察的对试验指标可能有影响的因素简称为因素,把每个因素在试验中要比较的具体条件称为水平。假定设计一个试验,安排 $k$ 个因子,作 $n$ 次试验,因子的水平数分别为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 。若此试验满足2个条件:①每一因子的不同水平在试验中出现相同次数(均衡性);②任意两因子的不同水平组合在试验中出现相同次数(正交性),则这个试验称为正交试验。正交试验法采用正交表安排试验,既能使试验点分布得很均匀,又能减少试验次数<sup>[10-15]</sup>。

参照张强勇等的研究成果,本次试验选取的材料以铁矿粉、重晶石粉、石英砂为骨料,松香酒精为黏结材料,石膏为调节材料。其中铁矿粉为黑龙江通化铁厂生产,比重可达到4.3,重晶石粉为焦作壮丽精醇化工有限公司生产,目格为300~400目,石英砂规格为40~70目,酒精纯度为95%。在试验设计中,以(铁粉+重晶石粉)/骨料(A)、铁粉/(铁粉+重晶石粉)(B)、黏结剂浓度(松香/(松香+酒精))(C)、石膏含量(D)作为正交设计的4个因素(A,B,C,D),每个因素设置5个水平,见表1。

试验选用6因素5水平的正交设计方案L25( $5^6$ ),其材料配比方案见表2。

表1 相似材料正交设计水平

Table 1 Orthogonal design level of similar material

水平组数	(铁粉+重晶石粉)/骨料	铁粉/(铁粉+重晶石粉)	黏结剂浓度	石膏含量(占总量)
1	60	0	5	0
2	70	10	10	2
3	80	20	15	4
4	90	30	20	6
5	100	40	25	8

注:铁粉、重晶石粉、石英砂、石膏、松香的总质量为1 000 g,搅拌需要的酒精为50 g。

表2 相似材料配比方案

Table 2 Test schemes of similar material

试验组数	(铁粉+重晶石粉)/骨料	铁粉/(铁粉+重晶石粉)	黏结剂浓度	石膏含量(占总量)
1	60	0	5	0
2	60	10	10	2
3	60	20	15	4
4	60	30	20	6
5	60	40	25	8
6	70	0	10	4
7	70	10	15	6
8	70	20	20	8
9	70	30	25	0
10	70	40	5	2
11	80	0	15	8
12	80	10	20	0
13	80	20	25	2
14	80	30	5	4
15	80	40	10	6
16	90	0	20	2
17	90	10	25	4
18	90	20	5	6
19	90	30	10	8
20	90	40	15	0
21	100	0	25	6
22	100	10	5	8
23	100	20	10	0
24	100	30	15	2
25	100	40	20	4

## 2 试验结果总体分析

通过对25组不同配比材料试件进行称重、单轴压缩、劈裂和直剪试验,得到了各组材料的密度、抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、内摩擦角和黏聚力等物理力学性质指标,见表3。

表 3 相似材料配比正交试验结果

Table 3 Orthogonal experiment results of similar material ratio

试验	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
1	2.48	0.260	0.021	38.137	0.21	30.14	0.115
2	2.50	0.853	0.099	124.460	0.12	34.82	0.294
3	2.47	1.050	0.102	102.940	0.15	39.29	0.369
4	2.40	1.334	0.123	193.909	0.21	34.14	0.416
5	2.40	1.496	0.196	253.132	0.12	34.76	0.592
6	2.54	0.677	0.052	72.872	0.09	32.74	0.284
7	2.51	1.076	0.094	138.735	0.14	36.23	0.396
8	2.48	1.238	0.120	177.707	0.06	25.34	0.536
9	2.65	3.735	0.216	388.415	0.20	28.30	0.711
10	2.61	0.266	0.027	34.984	0.04	28.66	0.203
11	2.52	0.727	0.075	144.948	0.05	22.35	0.430
12	2.72	1.897	0.174	289.777	0.23	32.47	0.530
13	2.65	1.935	0.223	301.302	0.13	31.00	0.574
14	2.65	0.238	0.022	82.670	0.16	26.24	0.274
15	2.50	0.418	0.044	120.352	0.22	34.00	0.165
16	2.78	1.310	0.122	262.076	0.15	32.00	0.364
17	2.67	1.865	0.133	212.958	0.07	30.80	0.401
18	2.84	0.226	0.028	33.175	0.06	22.56	0.296
19	2.69	0.668	0.037	196.464	0.19	20.00	0.311
20	2.83	1.283	0.109	169.621	0.13	32.72	0.170
21	2.75	1.634	0.173	248.991	0.28	18.43	0.442
22	2.65	0.177	0.023	42.847	0.17	16.68	0.302
23	2.91	0.758	0.065	119.047	0.20	29.99	0.252
24	2.79	0.964	0.075	215.836	0.13	26.58	0.280
25	2.88	1.217	0.096	214.209	0.13	24.46	0.290

通过对试验总体结果进行分析,发现相似材料的密度分布在 2.40 ~ 2.91 g/cm<sup>3</sup>,抗压强度分布在 0.260 ~ 3.735 MPa,抗拉强度分布在 0.021 ~ 0.223 MPa,弹性模量分布在 38 ~ 388 MPa,内摩擦角分布在 16° ~ 40°,黏聚力分布在 0.115 ~ 0.711 MPa,相似材料的试验结果基本可以覆盖大部分岩体材料模型试验对相似材料的要求范围。同时,可以根据某一模型试验对相似材料物理力学参数的要求,从正交试验结果中(表 3)选择满足或近似满足相似要求的材料配比。

### 3 各因素敏感性分析

直观分析法是通过每一因素的极差来分析问题,极差大小反映了该因素选取不同水平变动对指标的影响大小。根据正交试验理论,将各个因素相同水平平均,极差是在各水平之和中由最大值减去最小值得,极差大说明此因素的不同水平产生的差异较大,是重要因素,对试验结果影响明显。下面通过极差分析法对各因素对材料物理力学性质的影响进行敏感性分析。

#### 3.1 密度影响因素敏感性分析

对正交试验结果中的对试件密度影响的各因素

每个水平求均值和极差,结果见表 4,从中可以看出,A 因素((铁粉+重晶石粉)/骨料)的极差最大,其次是 D 因素(石膏含量),再次是 B 因素(铁粉/(铁粉+重晶石粉)) 和 C 因素(黏结剂浓度),各因素对密度的敏感性由大到小为 A—D—B—C,这说明对于密度的控制 A 因素((铁粉+重晶石粉)/骨料)起主要作用。

表 4 密度极差分析

Table 4 Extremum difference analysis of density

水平 组数	(铁粉+重 晶石粉)/骨料	铁粉/(铁粉+ 重晶石粉)	黏结剂 浓度	石膏含量 (占总量)
1	2.45	2.61	2.64	2.72
2	2.56	2.61	2.63	2.66
3	2.61	2.67	2.62	2.64
4	2.76	2.63	2.65	2.60
5	2.80	2.65	2.62	2.55
极差	0.35	0.06	0.03	0.17

为了更直观地分析各因素对密度的影响,根据表 4 可作出各因素对密度影响的直观分析图,如图 1 所示。从图中可以看出,试件的密度随着铁粉+重晶石粉在骨料中的含量的增加而增大,随着石膏含量在材

料含量中的增加而减小,其他影响因素和试件密度的关系不是十分明显。

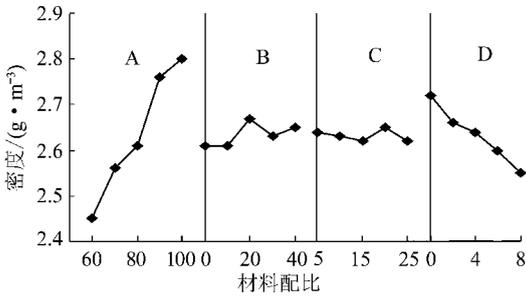


图 1 密度敏感性因素分析

Fig. 1 Sensitivity analysis of the factors affecting density

### 3.2 抗压强度影响因素敏感性分析

对正交试验结果中的对试件抗压强度影响的各因素每个水平求均值和极差,结果见表 5,从中可以看出,C 因素(黏结剂浓度)的极差最大,其次是 D 因素(石膏含量),再次是 B 因素(铁粉/(铁粉+重晶石粉)) 和 A 因素((铁粉+重晶石粉)/骨料),各因素对抗压强度的敏感性由大到小为 C—D—B—A,这说明对于试件抗压强度的控制 C 因素(黏结剂浓度)起主要作用。根据表 5 可作出各因素对试件抗压强度影响的直观分析图,如图 2 所示。从图中可以看出,试件的抗压强度随着黏结剂浓度的增加而增大,随着石膏含量在材料含量中的增加而减小,其他影响因素和试件抗压强度的关系不是十分明显。

表 5 抗压强度极差分析

Table 5 Extremum difference analysis of compressive strength MPa

水平组数	(铁粉+重晶石粉)/骨料	铁粉/(铁粉+重晶石粉)	黏结剂浓度	石膏含量(占总量)
1	0.999	0.922	0.233	1.587
2	1.398	1.174	0.675	1.066
3	1.043	1.041	1.020	1.009
4	1.070	1.388	1.399	0.938
5	0.950	0.936	2.133	0.861
极差	0.448	0.466	1.900	0.725

### 3.3 抗拉强度影响因素敏感性分析

对正交试验结果中对试件抗拉强度影响的各因素每个水平求均值和极差,结果见表 6,从中可以看出,C 因素(黏结剂浓度)的极差最大,其次是 D 因素(石膏含量),再次是 A 因素((铁粉+重晶石粉)/骨料) 和 B 因素(铁粉/(铁粉+重晶石粉)),各因素对抗拉强度的敏感性由大到小为 C—D—A—B,这说明对于试件抗拉强度的控制 C 因素(黏结剂浓度)起主要作用。根据表 6 可作出各因素对试件抗拉强度影

响的直观分析图,如图 3 所示。从图上可以看出,试件的抗拉强度随着黏结剂浓度的增加而增大,随着石膏含量的增加而先减小后增大,其他影响因素和试件抗拉强度的关系不是十分明显。

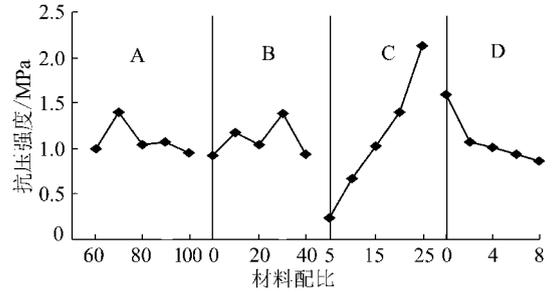


图 2 抗压强度敏感性因素分析

Fig. 2 Sensitivity analysis of the factors affecting compressive strength

表 6 抗拉强度极差分析

Table 6 Extremum difference analysis of tensile strength MPa

水平组数	(铁粉+重晶石粉)/骨料	铁粉/(铁粉+重晶石粉)	黏结剂浓度	石膏含量(占总量)
1	0.108	0.089	0.024	0.117
2	0.102	0.105	0.059	0.109
3	0.108	0.107	0.091	0.081
4	0.086	0.094	0.127	0.092
5	0.086	0.094	0.188	0.090
极差	0.023	0.019	0.164	0.036

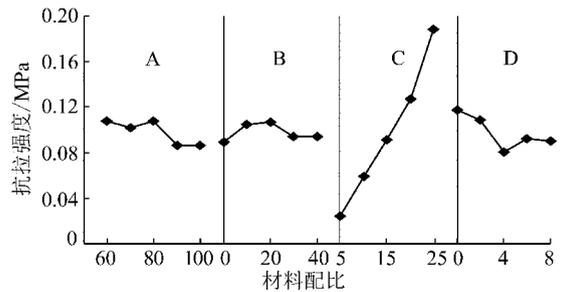


图 3 抗拉强度敏感性因素分析

Fig. 3 Sensitivity analysis of the factors affecting tensile strength

### 3.4 弹性模量影响因素敏感性分析

对正交试验结果中对试件弹性模量影响的各因素每个水平求均值和极差,结果见表 7,从中可以看出,C 因素(黏结剂浓度)的极差最大,其次是 B 因素(铁粉/(铁粉+重晶石粉)) 和 D 因素(石膏含量),再次是 A 因素((铁粉+重晶石粉)/骨料),各因素对试件弹性模量的敏感性由大到小为 C—B—D—A,这说明对于试件弹性模量的控制,C 因素(黏结剂浓度)起主要作用。根据表 7 可作出各因素对试件弹性模量影响的直观分析图,如图 4 所示。从图上可以看

出,试件的弹性模量随着黏结剂浓度的增加而增大,其他影响因素和试件弹性模量的关系不是十分明显。

表 7 弹性模量极差分析

Table 7 Extremum difference analysis of elastic modulus

MPa				
水平 组数	(铁粉+重 晶石粉)/骨料	铁粉/(铁粉+ 重晶石粉)	黏结剂 浓度	石膏含量 (占总量)
1	142.515	153.405	46.363	200.999
2	162.543	161.755	126.639	187.732
3	187.810	146.834	154.416	137.130
4	174.859	215.459	227.536	147.032
5	168.186	158.460	280.959	163.020
极差	45.294	68.625	234.597	63.869

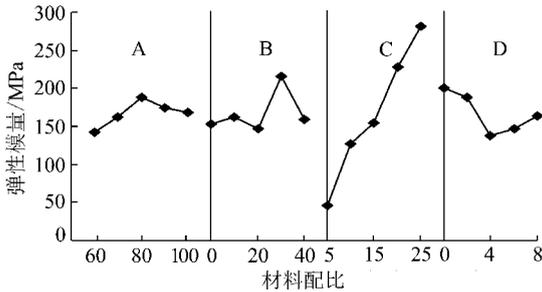


图 4 弹性模量敏感性因素分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of the factors affecting elastic modulus

### 3.5 内摩擦角影响因素敏感性分析

对正交试验结果中对试件内摩擦角影响的各因素每个水平求均值和极差,结果见表 8,从中可以看出,A 因素((铁粉+重晶石粉)/骨料)的极差最大,其次是 D 因素(石膏含量)和 C 因素(黏结剂浓度),再次是 B 因素(铁粉/(铁粉+重晶石粉)),各因素对试件内摩擦角的敏感性由大到小为 A—D—C—B,这说明对于试件内摩擦角的控制,A 因素((铁粉+重晶石粉)/骨料)起主要作用。

表 8 内摩擦角极差分析

Table 8 Extremum difference analysis of internal friction angle (°)

水平 组数	(铁粉+重 晶石粉)/骨料	铁粉/(铁粉+ 重晶石粉)	黏结剂 浓度	石膏含量 (占总量)
1	34.630	27.132	24.856	30.726
2	30.254	30.200	30.309	30.612
3	29.213	29.636	31.435	30.705
4	27.617	27.052	29.682	29.072
5	23.229	30.922	28.660	23.826
极差	7.013	3.870	6.579	6.900

根据表 8 可作出各因素对试件内摩擦角影响的

直观分析图,如图 5 所示。从图上可以看出,试件的内摩擦角随着铁粉+重晶石粉在骨料中含量的增加而减小,随着石膏在总材料中含量的增加也减小,其他影响因素和试件内摩擦角的关系不是十分明显。

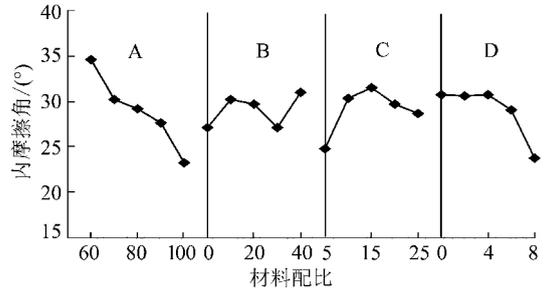


图 5 内摩擦角敏感性因素分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of the factors affecting internal friction angle

### 3.6 黏聚力影响因素敏感性分析

对正交试验结果中对试件黏聚力影响的各因素每个水平求均值和极差,结果见表 9。

表 9 黏聚力极差分析

Table 9 Extremum difference analysis of cohesion

MPa				
水平 组数	(铁粉+重 晶石粉)/骨料	铁粉/(铁粉+ 重晶石粉)	黏结剂 浓度	石膏含量 (占总量)
1	0.357	0.327	0.238	0.356
2	0.426	0.385	0.261	0.343
3	0.395	0.405	0.329	0.324
4	0.308	0.399	0.427	0.343
5	0.314	0.284	0.544	0.434
极差	0.037	-0.007	0.306	0.032

从表 9 中可看出,C 因素(黏结剂浓度)的极差最大,其次是 A 因素((铁粉+重晶石粉)/骨料)和 D 因素(石膏含量),再次是 B 因素(铁粉/(铁粉+重晶石粉)),各因素对试件黏聚力的敏感性由大到小为 C—A—D—B,这说明对于试件黏聚力的控制,C 因素(黏结剂浓度)起主要作用。根据表 9 作各因素对试件黏聚力影响的直观分析图,如图 6 所示。从图上可以看出,试件的黏聚力随着黏结剂浓度的增加而增加,其他影响因素和试件黏聚力的关系不是十分明显。

## 4 结 论

(1)应用正交设计方法,以(铁粉+重晶石粉)/骨料、铁粉/(铁粉+重晶石粉)、黏结剂浓度、石膏含量为 4 因素,每个因素设置 5 个水平,设计了 25 组材料配比方案进行了称重、单轴压缩、劈裂和直剪试验,得到了不同配比相似材料的密度、抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、内摩擦角和黏聚力等物理力学性

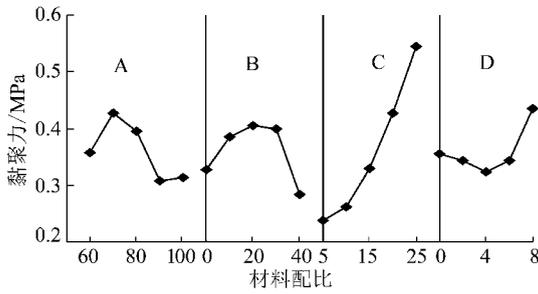


图6 黏聚力敏感性因素分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of the factors affecting cohesion

质指标。

(2)不同配比相似材料的物理力学参数分布的范围较大,能够满足不同岩体性质模型试验对岩体相似材料的要求,可为后期的模型试验相似材料配制的选取提供依据。

(3)采用极差分析法分析了各因素对材料物理力学参数的敏感性,发现(铁粉+重晶石粉)/骨料对试件密度、内摩擦角起主要控制作用,黏结剂浓度对试件的抗压强度、抗拉强度、弹性模量、黏聚力起主要控制作用;并作出了各因素对相似材料物理力学参数的影响的直观分析图,分析了各因素对相似材料参数的影响规律。

## 参考文献:

[1] 韩伯鲤,陈霞龄,宋一乐,等.岩体相似材料的研究[J].武汉水利电力大学学报,1997,30(2):6-9.  
Han Boli, Chen Xialing, Song Yile, et al. Research on similar material of rockmass[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(2): 6-9.

[2] 彭海明,彭振斌,韩金田,等.岩性相似材料研究[J].广东土木与建筑,2002,12(12):13-17.  
Peng Haiming, Peng Zhenbin, Han Jintian, et al. Research on similar material of geotechnical engineering[J]. Journal of Guangdong Civil Construction, 2002, 12(12): 13-17.

[3] 马芳平,李仲奎,罗光福. NIOS相似材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J].水力发电学报,2004,23(1):48-51.  
Ma Fangping, Li Zhongkui, Luo Guangfu. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 48-51.

[4] 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,2008,29(8):2126-2130.  
Zhang Qiangyong, Li Shucai, Guo Xiaohong, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2126-2130.

[5] 张强勇,刘德军,贾超,等.盐岩油气储库介质地质力学模型相似材料的研制[J].岩土力学,2009,30(12):3581-3586.  
Zhang Qiangyong, Liu Dejun, Jia Chao, et al. Development of geomechanical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3581-3586.

[6] 王汉鹏,李术才,张强勇,等.新型地质力学模型试验相似材料的研制[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1842-1847.  
Wang Hanpeng, Li Shucai, Zhang Qiangyong, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1842-1847.

[7] 张宁,李术才,李明田,等.新型岩石相似材料的研制[J].山东大学学报,2009,39(4):149-154.  
Zhang Ning, Li Shucai, Li Mingtian, et al. Development of a new rock similar material[J]. Journal of Shandong University, 2009, 39(4): 149-154.

[8] 李勇,朱维申,王汉鹏,等.新型岩土相似材料的力学试验研究及应用[J].隧道建设,2007(S):197-200.  
Li Yong, Zhu Weishen, Wang Hanpeng, et al. Study on mechanical experiment of a new type of geotechnical analogue material[J]. Tunnel Construction, 2007(S): 197-200.

[9] 左保成,陈从新,刘才华,等.相似材料试验研究[J].岩土力学,2004,25(11):1805-1808.  
Zuo Baocheng, Chen Congxin, Liu Caihua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1805-1808.

[10] 吴翊,李永乐,胡庆军.应用数理统计[M].北京:国防科技大学出版社,1995.

[11] 王益萍,周荣超.基于正交试验的边坡稳定性参数敏感性分析[J].盐城工学院学报(自然科学版),2007,20(4):67-69.  
Wang Yiping, Zhou Rongchao. An analysis of the sensitivity of the factors affecting slope stability based on orthogonal experiment[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2007, 20(4): 67-69.

[12] 高富强,王兴库.岩体力学参数敏感性正交数值模拟试验[J].采矿安全与工程学报,2008,25(1):95-98.  
Gao Fuqiang, Wang Xingku. Orthogonal numerical simulation on sensitivity of rock mechanical parameters[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 95-98.

[13] 彭永伟,齐庆新,李宏艳,等.高强度地下开采对岩体断裂带高度影响因素的数值模拟分析[J].煤炭学报,2009,34(2):145-149.  
Peng Yongwei, Qi Qingxin, Li Hongyan, et al. Numerical simulation and analysis on influencing factors of fractured zone height of high-strength underground mining[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 145-149.

[14] 彭好义,周子民,邓胜祥,等.采用正交试验法优选石灰立窑代焦型煤的研究[J].煤炭学报,2006,31(6):799-803.  
Peng Haoyi, Zhou Jiemin, Deng Shengxiang, et al. Optimization study of lime-upright-furnace briquette used as a substitution for coke with orthogonal experiments[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6): 799-803.

[15] 于怀昌,余宏明,刘汉东,等.基于正交试验与运动学的滚石防护计算方法[J].煤炭学报,2010,35(1):55-60.  
Yu Huaichang, Yu Hongming, Liu Handong, et al. The calculation method for protective structure against rockfall based on orthogonal test and kinematics[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 55-60.