

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.05.017

水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法

史小萌¹, 刘保国¹, 肖 杰²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中兵勘察设计研究院, 北京 100053)

摘 要: 对以水泥和石膏为胶结材料、石英砂和重晶石粉为骨料的相似材料, 规范了其制作原料与工艺, 以砂胶比(骨料与胶结材料质量比)、水膏比(水泥与石膏质量之比)和重晶石含量(重晶石质量占骨料百分比)为控制因素, 设计了一个正交试验, 开展了称重、单轴压缩试验, 获得了不同配比相似材料的密度、单轴抗压强度和弹性模量等物理力学性质指标。采用极差分析法分析了各因素的敏感性, 研究了各因素对相似材料参数的影响规律。研究表明: 重晶石含量对相似材料密度有明显的控制作用, 而砂胶比和水膏比对密度也有明显的影响; 砂胶比对相似材料单轴抗压强度和弹性模量影响最大, 水膏比和重晶石含量的影响次之。相似材料密度随砂胶比的增大而降低, 随水膏比和重晶石含量的增大而增大; 抗压强度随砂胶比的增大而显著降低, 但随着水膏比和重晶石含量的增大而缓慢增大; 弹性模量随砂胶比的增大而显著降低, 随重晶石含量增大而增大, 随水膏比增大而缓慢升高。采用 MATLAB 程序对试验数据进行多元线性回归分析, 得到确定相似材料配比的经验方程。工程应用证明, 采用经验方程计算得到相似材料配比, 并按规范的制作工艺, 可以得到满足试验要求的相似材料。

关 键 词: 相似材料; 试验技术; 正交设计方法; 回归分析

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)05-1357-06

A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents

SHI Xiao-meng¹, LIU Bao-guo¹, XIAO Jie²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Ordnance Industry and Geotechnical Institute, Beijing 100053, China)

Abstract: In this study, a production method is proposed for making the similar material of sand and barite powder using cement and plaster as bonding agents. Three controlling factors including sand-blinder ratio, cement-plaster ratio and barite content are chosen to perform the orthogonal tests. The ratio schemes are obtained. A series of tests is carried out to determine the density, uniaxial compression strength and elasticity modulus of different similar materials. The extremum difference analysis is adopted to analyze the sensibilities of three factors to parameters of the similar material. It is found that the density is primarily controlled by the barite content, secondly by sand-blinder ratio, cement-plaster ratio; the uniaxial compression strength and the elasticity modulus are significantly affected by the sand-blinder ratio, next by the cement-plaster ratio and barite content. The density decreases as sand-blinder ratio increases, and increases with the cement-plaster ratio and barite content; the uniaxial compression strength and the elasticity modulus significantly decreases as the sand-blinder ratio increases, but gradually increases as cement-plaster ratio and barite content increase. Empirical equations for determining the similar material ratio are developed based on the multiple linear regressions of the test data using the program of MATLAB. The proposed method is validated through a practical case.

Keyword: similar material; test technology; orthogonal design method; regression analysis

1 引 言

相似材料原料的选择及配比一直是相似材料模型试验研究中很重要的一部分, 林韵梅^[1]、康希并^[2]、顾大钊^[3]、付小敏^[4]、Fumagalli^[5]、Kim^[6]等均对此进行过系统的研究。随着相似材料模型试验

技术的发展, 越来越多的原料被用于配制相似材料。张强勇^[7]、马芳平^[8]、韩伯鲤^[9]等完成了一些新型相似材料的研究, 并解决了许多试验问题。但传统的以水泥、石膏为胶结剂, 石英砂和重晶石粉为骨料的传统相似材料在试验中仍被广泛使用, 其理论研究也仍未停止。白占平^[10]、董金玉^[11]、彭海明

收稿日期: 2014-01-20

基金项目: 国家科技支撑计划资助(No. 2013BAB10B06); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 2013YJS064)。

第一作者简介: 史小萌, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学试验方面的研究工作。E-mail: snsxm@qq.com

[12]等针对此种相似材料进行了研究。但目前的研究大多只限于定性分析各因素对相似材料性质的影响,缺乏定量的研究和一套明确的确定相似材料配比的方法。在相似材料配比试验过程中没有一个统一的标准和规范可遵循,往往都是在前人研究成果基础上,找寻大致适合所研究工程模型试验的相似材料,然后再通过大量试验来反复调整配比,得到合适的配比。这样,在模型试验材料配比确定中,前人的成果难以为后人所利用,很难推动相似材料研究的发展。

本文针对以水泥和石膏作为胶结剂,石英砂和重晶石粉作为骨料的相似材料配比试验,规范了试验方法,并通过相似材料配比正交试验,分析了不同因素对材料密度、单轴抗压强度和弹性模量的影响关系,总结出相似材料配比的经验公式。

通过规范相似材料原料、相似材料模具、相似材料试件制作方法,结合相似材料配比经验公式,提出一套完整的水泥、石膏胶结相似材料配比确定方法。将本文提出的方法应用于模拟神华集团新街矿区长距离盾构斜井煤层开采对斜井管片结构稳定性影响规律的大型三维模型试验,确定了相似材料配比,并通过试验验证了此方法的有效性。本文研究成果亦可为其他相似材料模型试验提供一种简单、有效的配比确定方法。

2 相似材料配比正交设计方案

本次试验选取的材料以重晶石、石英砂为骨料,水泥、石膏为胶结材料,硼砂作为添加剂。采用“钻牌”425 早强型硅酸盐水泥和高强石膏粉。所选材料参数如表 1 所示。

表 1 相似材料原料参数
Table 1 Parameters of raw material

材料	性状	主要成分	粒径 / mm	密度 / (g/cm ³)
石英砂	黄白相间	石英>95%	0.5~1.0	2.6
重晶石粉	灰黑色	重晶石>95%	0.5~1.0	4.0
硼砂	白色结晶性粉末	四硼酸钠>99.5%		

通过控制骨料与胶结材料之比以及胶结材料水泥和石膏的含量,利用水泥和石膏在胶结之后强度的差异,可以使得相似材料在力学性质上产生很大变化。采用石英砂和重晶石为骨料,可以利用两者密度上的差异,通过骨料中重晶石含量的变化,改变相似材料的密度^[3]。因此,在试验设计中,以骨料质量/胶结材料质量(砂胶比)、水泥质量/石膏质量(水膏比)、重晶石粉质量/骨料质量(重晶

石比)作为正交设计的 3 个因素,每个因素设置 5 个水平,具体设置见表 2。

表 2 相似材料正交设计水平
Table 2 Orthogonal design levels of similar material

水平	砂胶比	水膏比	重晶石含量 / %
1	4:1	3:7	0
2	5:1	4:6	10
3	6:1	5:5	20
4	7:1	6:4	30
5	8:1	7:3	40

注:用水量为试件质量的 1/10;水中硼砂的浓度为 1%。

试验选用 3 因素 5 水平的正交设计方案 L25(5³),其材料配比方案见表 3。

表 3 相似材料配比方案
Table 3 Test schemes of similar material

试验号	砂胶比	水膏比	重晶石含量/ %
1	4:1	3:7	0
2	4:1	4:6	10
3	4:1	5:5	20
4	4:1	6:4	30
5	4:1	7:3	40
6	5:1	3:7	10
7	5:1	4:6	20
8	5:1	5:5	30
9	5:1	6:4	40
10	5:1	7:3	0
11	6:1	3:7	20
12	6:1	4:6	30
13	6:1	5:5	40
14	6:1	6:4	0
15	6:1	7:3	10
16	7:1	3:7	30
17	7:1	4:6	40
18	7:1	5:5	0
19	7:1	6:4	10
20	7:1	7:3	20
21	8:1	3:7	40
22	8:1	4:6	0
23	8:1	5:5	10
24	8:1	6:4	20
25	8:1	7:3	30

3 相似材料试件制作方法

(1) 准备原料。按照表 3 各试验配比中石英砂、重晶石粉、水泥、石膏以及硼砂水溶液的用量备置原料。

(2) 准备试模。本试验总结现有试模优劣,重新优化并设计了用于本次试验的试模,如图 1 所示。

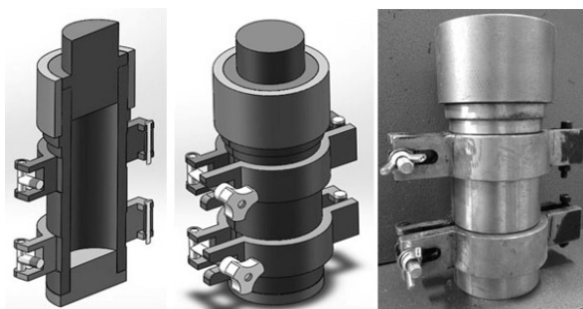


图 1 全新设计的模具

Fig.1 New designed mold

(3) 拌合。开动搅拌机，向搅拌机内依次加入石英砂、重晶石粉、水泥、石膏，干拌均匀，再将水溶液徐徐加入，全部加料时间控制在 2 min，水溶液全部加入后，继续拌合 2 min。拌合好后，将混合物取出备用。

(4) 装料。将拌合好的材料依次装满 7 个模具并人工捣实，捣实后装量控制在试件体积的 110%~115%之间。

(5) 压制。安装模具顶盖并加压，将试件制成预定的尺寸。

(6) 脱模。在室温条件下，静置 30 min，脱模。

(7) 编号。 i 为表 3 中所述的试验号，共 25 组试验， $i=1, 2, \dots, 24, 25$ 。每组试验制作 7 个试件，分别编号为 $i-1, i-2, \dots, i-6, i-7$ 。

(8) 养护。将编好号的试件，在室温 20℃ 左右、自然干燥条件下，养护 7 d。养护中的试件如图 2 所示。



图 2 养护中的试件

Fig.2 Maintained specimen

4 试验结果总体分析

对 25 组不同配比材料试件开展尺寸测量、称重、单轴抗压试验，得到了各组材料的密度、单轴抗压强度、弹性模量等物理力学性质指标，见表 4。

表 4 相似材料配比正交试验结果

Table 4 Orthogonal experimental results of similar material ratio

试验号	密度 /(g/cm ³)	抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa
1	1.697	2.651	569.358
2	1.874	2.67	580.667
3	1.877	2.783	610.306
4	1.919	2.864	690.121
5	2.105	2.945	717.347
6	1.753	2.315	570.186
7	1.766	2.495	596.741
8	1.867	2.821	590.502
9	1.975	2.893	554.071
10	1.859	2.398	444.894
11	1.807	1.512	310.654
12	1.834	1.584	316.649
13	1.849	1.782	410.143
14	1.765	1.846	340.368
15	1.799	1.997	400.256
16	1.751	1.287	350.741
17	1.856	1.371	377.596
18	1.786	1.264	271.788
19	1.744	1.317	289.656
20	1.826	1.603	370.703
21	1.765	0.857	299.388
22	1.688	0.961	275.465
23	1.753	0.821	290.056
24	1.790	1.043	310.894
25	1.861	1.157	340.897

分析试验结果可以发现，相似材料密度分布在 1.697~2.105 g/cm³，抗压强度分布在 0.821~2.945 MPa，弹性模量分布在 275.465~717.347 MPa，相似材料性质变化范围较广。将制备的相似材料与常见岩石的物理力学参数进行对比，可以发现，在一定的相似比条件下，制备材料可以满足模拟部分常见岩石的相似要求。

5 各因素敏感性分析

直观分析法是通过对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^[13]。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。

5.1 密度影响因素的敏感性分析

对正交试验结果中影响试件密度的各因素每个水平求均值和极差，结果如表 5 所示。从中可以看出，重晶石含量的极差最大，略大于石膏比和砂胶比，这说明重晶石含量对相似材料密度有明显的控制作用，而砂胶比和石膏比对密度也有很明显的

影响。

表 5 密度极差分析

Table 5 Extremum difference analysis of density

不同配比	密度/(g/cm ³)					极差
	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	
砂胶比	1.894	1.844	1.811	1.793	1.771	0.123
水膏比	1.755	1.804	1.826	1.839	1.890	0.135
重晶石含量	1.759	1.785	1.813	1.846	1.910	0.151

为了更直观地分析各因素对密度的影响, 由表 5 可作出各因素对密度影响的直观分析图, 如图 3 所示。从中可以看出, 试件的密度随砂胶比的增大而降低, 随水膏比和重晶石含量的增大而增大。

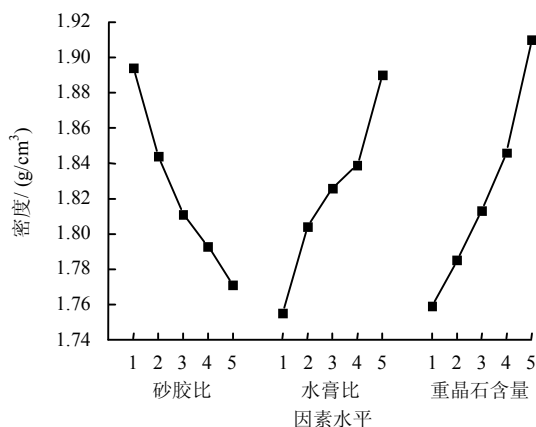


图 3 密度敏感性因素分析

Fig.3 Sensitivity analysis of factors affecting density

5.2 单轴抗压强度影响因素敏感性分析

对正交试验结果中单轴抗压强度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, 砂胶比的极差远大于水膏比和重晶石含量, 这说明控制试件抗压强度的主要因素是砂胶比, 而水膏比和重晶石含量亦对相似材料的抗压强度有一定影响。

表 6 抗压强度极差分析

Table 6 Extremum difference analysis of compressive strength

不同配比	单轴抗压强度/MPa					极差
	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	
砂胶比	2.783	2.584	1.744	1.368	0.968	1.815
水膏比	1.724	1.816	1.894	1.993	2.020	0.296
重晶石含量	1.824	1.824	1.887	1.943	1.970	0.146

根据表 6 作出各因素对试件单轴抗拉强度影响的直观分析图, 如图 4 所示。从中可以看出, 试件的抗压强度随砂胶比的增大而显著降低, 但随着水膏比和重晶石含量的增大而缓慢增大。

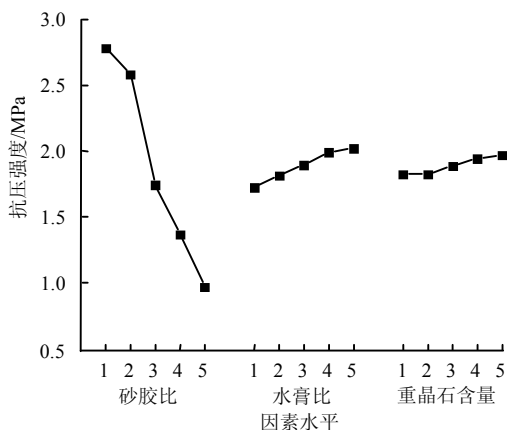


图 4 抗压强度敏感性因素分析

Fig.4 Sensitivity analysis of factors affecting compressive strength

5.3 弹性模量影响因素敏感性分析

对正交试验结果中弹性模量的各因素每个水平求均值和极差, 结果如表 7 所示。从中可以看出, 砂胶比的极差最大, 重晶石含量极差次之, 水膏比的极差最小, 这说明试件的弹性模量受砂胶比影响较大, 重晶石含量也有一定影响, 而受水膏比影响较小。

表 7 弹性模量极差分析

Table 7 Extremum difference analysis of modulus of elasticity

不同配比	弹性模量/MPa					极差
	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	
砂胶比	633	550	355	331	302	330.0
水膏比	419	428	434	436	454	34.6
重晶石含量	379	425	439	457	471	91.6

根据表 7 作出各因素对试件弹性模量影响的直观分析图, 如图 5 所示。从中可以看出, 试件的弹性模量随砂胶比的增大而显著降低, 随重晶石含量增大而增大, 随水膏比增大而缓慢升高。

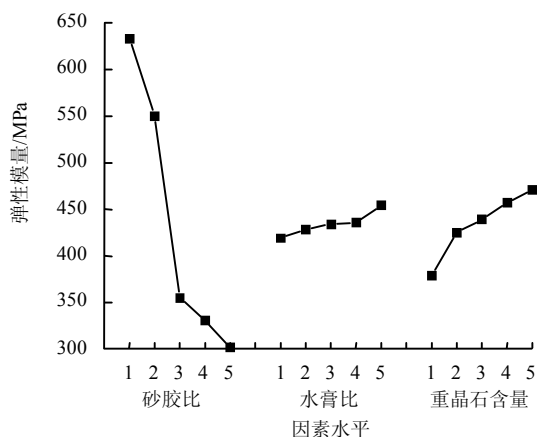


图 5 弹性模量敏感性因素分析

Fig.5 Sensitivity analysis of factors affecting elasticity modulus

6 多元线性回归分析

针对表4的数据,通过各因素的直观分析以及关系图,可以看出,各因素与相似材料性质具有明显的线性关系。设砂胶比为 X_1 、水膏比为 X_2 、重晶石含量为 X_3 ;密度指标为 Y_1 、单轴抗压强度指标为 Y_2 、弹性模量指标为 Y_3 。因此,采用MATLAB程序进行多元线性回归分析,得到回归方程如下:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 1.854 - 0.030X_1 + 0.062X_2 + 0.364X_3 \\ Y_2 &= 4.537 - 0.485X_1 + 0.150X_2 + 0.410X_3 \\ Y_3 &= 900.617 - 87.962X_1 + 16.426X_2 + 214.287X_3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

通过式(1)可以在已知砂胶比、水膏比和重晶石含量情况下,计算得到所配制相似材料的密度、单轴抗压强度和弹性模量,但在实际工程应用中,常用的是根据满足相似要求的相似材料物理力学参数而确定相似材料配比,因此,对式(1)进行求解,得到经验关系式如下:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= 4.751Y_1 - 1.366Y_2 - 0.005Y_3 + 2.304 \\ X_2 &= 12.689Y_1 + 4.785Y_2 - 0.031Y_3 - 17.577 \\ X_3 &= 0.977Y_1 - 0.928Y_2 + 0.005Y_3 - 1.910 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

通过式(2),可以在已知相似材料密度、单轴抗压强度和弹性模量情况下,计算得到相似材料砂胶比、水膏比和重晶石含量,从而确定相似材料配比。

式(2)中,砂胶比 $X_1 \in [0, \infty)$ 、水膏比为 $X_2 \in [0, 1]$ 、重晶石含量为 $X_3 \in [0, 1]$,因此,在运用式(2)确定相似材料配比时,结果应该在取值范围以内。若计算结果超出了取值范围,则说明以水泥和石膏为胶结剂、石英砂和重晶石粉为骨料的相似材料无法满足试验要求,应该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。

7 工程应用

神华新街矿区采用盾构施工长距离斜井及预制混凝土管片支护在国内外建井史上尚属首次。斜井将穿越三叠系、侏罗系、白垩系、第四系地层,工程和水文地质比较复杂,最大埋深达600 m以上,地层压力大。通过模拟的煤层开采对斜井稳定性影响三维模型试验,研究在斜井盾构掘进、管片支护完成以后,煤层开采引起顶板垮落、上覆地层沉降变形对斜井管片结构稳定性的影响。

相似材料模型试验选用几何相似比 $C_l = 35$,重度相似比 $C_\gamma = 1.3$,应力、弹性模量相似比 $C_\sigma = C_E = 35 \times 1.3 = 45.5$ 。模拟原型地形物理力学参数和对应相

似材料物理力学参数如表8所示。

表8 试验原型和模型材料物理力学参数

Table 8 Parameters of the prototype and model material

材料	密度 /(g/cm ³)	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa
原型岩体	2.42	31.40	14.22
相似材料理论值	1.86	0.69	0.30

根据表8中相似材料物理力学参数,结合经验公式(2),将密度 $Y_1 = 1.86 \text{ g/cm}^3$ 、单轴抗压强度 $Y_2 = 0.69 \text{ MPa}$ 、弹性模量 $Y_3 = 300 \text{ MPa}$ 代入式(2),可得 $X_1 = 8.70$, $X_2 = 0.0262$, $X_3 = 0.767$ 。

根据经验公式得到的相似材料配比,考虑到相似材料制作误差以及试验的便捷性和可操作性,选定砂胶比为8.7、水膏比为0、重晶石含量为77%进行验证试验,选用上述同样相似材料原料以及试验方法,得到相似材料物理力学参数如表9所示。

表9 验证试验结果

Table 9 Results of the verification test

材料	密度 /(g/cm ³)	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa
相似材料试验值	1.88	0.75	326

由于对于相似材料模型试验,相似材料性质往往离散性比较大,对允许偏差并没有明确规范。参考《建筑砂浆基本性能试验方法》^[14],“当6个试件的最大值或最小值与平均值的差超过20%时,以中间4个试件的平均值作为该组试件的抗压强度值”。因此,将回归值与试验值之差最大为20%作为衡量回归方程是否能够与试验值很好拟合的标准。通过对相似材料理论值和相似材料试验值的比较可以发现,密度、弹性模量和单轴抗压强度试验值与理论值差异在10%以内。因此,试验研究得到的经验方程可以有效用于相似材料模型试验配比的确定。

8 结 论

(1) 应用正交设计方法,以砂胶比、水胶比、重晶石含量为控制因素,每个因素设置5个水平,设计了25组材料配比方案进行称重、单轴压缩试验,得到了不同配比相似材料的密度、单轴抗压强度和弹性模量等物理力学性质指标。

(2) 不同配比相似材料具有物理力学参数分布范围较大特点,可以模拟满足部分常见岩石的相似要求。

(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,发现砂胶比、水膏比和重晶石含量均对相似材料密度有一定影响,而砂胶比对相似材料单轴抗压强度和弹性模量起主要控制作用。作出各因素对相似材料物理力学参数的影响直观分析图,分析了各因素对相似材料参数的影响规律,研究表明:相似材料密度随砂胶比的增大而降低,随水膏比和重晶石含量的增大而增大;抗压强度随砂胶比的增大而显著降低,但随着水膏比和重晶石含量的增大而缓慢增大;弹性模量随砂胶比的增大而显著降低,随重晶石含量增大而增大,随水膏比增大而缓慢升高。

(4) 针对试验数据采用 MATLAB 程序进行多元线性回归分析,得到用于相似材料配比的经验方程。

(5) 通过规范相似材料原料、相似材料模具、相似材料试件制作方法,结合相似材料配比经验公式,提出一套完整的水泥石膏胶结相似材料配比确定方法。

参考文献

- [1] 林韵梅. 试验岩石力学——模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [2] 康希并, 张建义. 相似材料模拟中的材料配比[J]. 淮南矿业学院学报, 1988, 2(4): 50—64.
KANG Xi-bing, ZHANG Jian-yi. Mixture ratio in equivalent material modelling[J]. *Journal of Huainan Institute of Mining*, 1988, 2(4): 50—64.
- [3] 顾大钊. 相似材料和相似模型[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- [4] 付小敏, 邓荣贵. 室内岩石力学试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2012.
- [5] FUMAGALLI E. Statical and geomechanical model[M]. New York: Springer, 1973.
- [6] KIM S H, BURD H J. Model testing of closely spaced tunnels in clay[J]. *Geotechnique*, 1998, 48(3): 375—388.
- [7] 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 Qiang-yong, LI Shu-cai, GUO Xiao-hong, 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.
- [8] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 模型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 Fang-ping, LI Zhong-kui, LUO Guang-fu. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2004, 23(1): 48—52.
- [9] 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 Bo-li, CHEN Xia-ling, SONG Yi-le, et al. Research on similar material of rockmass[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1997, 30(2): 6—9.
- [10] 白占平, 曹兰柱. 相似材料配比的正交试验研究[J]. 露天采煤技术, 1996, (3): 22—23.
- [11] 董金玉, 杨继红, 杨国香, 等. 基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 44—49.
DONG Jin-yu, YANG Ji-hong, YANG Guo-xiang, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 44—79.
- [12] 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 Hai-ming, PENG Zhen-bin, HAN Jin-tian. Research on similar material of geotechnical engineering[J]. *Journal of Guangdong Civil Construction*, 2002, 12(12): 13—17.
- [13] 朱焕春, 谢谟文. 确定相似材料配比的正交试验途径[J]. 武汉水利电力学院学报, 1990, 23(4): 103—109.
ZHU Huan-chun, XIE Mo-wen. The way using orthogonal experiment to make up a prescription of similar materials[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1990, 23(4): 103—109.
- [14] 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.