

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0750-06

# 胶结剂对“固-气”耦合相似材料特性的影响

李树刚, 赵鹏翔, 林海飞, 潘宏宇

(西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054)

**摘要** 实验室开展“固-气”耦合相似模拟实验,是研究卸压瓦斯运移规律的主要方法之一,煤岩瓦斯“固-气”耦合相似模拟材料的开发是“固-气”耦合相似模拟实验的基础。借助正交实验方法,将已选胶结材料石蜡和油作为影响相似材料的主要因素,对试件在改变胶结剂材料含量的条件下开展正交实验,分析石蜡和油对试件弹性模量 $E$ 及渗流速度 $v$ 的影响。从抗压强度 $\sigma_c$ 、抗拉强度 $\sigma_t$ 、弹性模量 $E$ 、脆性参数 $E/\lambda$ 及渗透性等方面,对不同配比条件下的相似材料试件开展实验研究。通过对实验数据的拟合,并结合渗透率计算公式,得到了渗透率随石蜡含量变化的方程,表明相似材料渗透率随着石蜡含量的增加,呈负指数函数变化。从而研制出能够应用于“固-气”耦合物理相似模拟实验的相似材料,为“固-气”耦合物理相似模拟实验的开展奠定了基础。

**关键词** “固-气”耦合; 相似材料; 正交实验; 胶结剂; 渗透性

**中图分类号** TD 712

**文献标志码** A

## Effect of cementing agents on properties of solid-gas coupling simulation material

LI Shugang, ZHAO Pengxiang, LIN Haifei, PAN Hongyu

(College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract** Solid-gas coupling simulation experiment in the lab is one of methods of studying on the law of relief methane migration. Development of similar material of coal-rock and gas solid-gas coupling is the basis of the simulation experiment. The cementing material of paraffin and oil have been chosen as affecting factors to carry out the orthogonal test under the condition of changing the content of cementing agents. The influence of paraffin and oil on elastic modulus  $E$  and flow rate  $v$  of the similar material test-pieces is analyzed. Different proportions of similar material test-pieces have been researched in compressive strength  $\sigma_c$ , tensile strength  $\sigma_t$ , elastic modulus  $E$ , brittle parameter  $E/\lambda$  and permeability. The equation of permeability has been obtained by combining permeability calculation formula and negative exponential fitting formula of experimental data. It is shown that with increase of paraffin content the permeability present negative exponential. The similar materials can be used in physically simulating experiment, which lays a foundation for the solid-gas coupling physically simulating experiment.

**Key words** solid-gas coupling; simulation materials; orthogonal test; cementing material; permeability

收稿日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金科学仪器基础研究专款项目(51327007); 国家自然科学基金项目(51174157, 51104118, 51204134); 陕西省科技新星项目(2014KJXX69)

作者简介: 李树刚(1963—), 男, 甘肃省会宁县人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事围岩活动与瓦斯治理技术、非稳态渗流力学、矿山安全工程技术方面的研究。

E-mail: lishg@xust.edu.cn

Tel: 029-85583007

“固-流”耦合是指岩体工程中流体(气体, 液体)与固体(岩体, 煤体等)间的相互作用, 由于流体的流动与岩体的变形和破坏产生耦合, 从而使其渗透性及力学行为受到影响<sup>[1]</sup>。目前对“固-液”耦合相似材料方面的研究很多<sup>[2-6]</sup>, 但是“固-气”耦合问题的研究也辐射到很多工程技术研究领域, 如采矿工程, 石油工程等<sup>[7-8]</sup>。成功地研究和运用“固-气”耦合规律可以有效地揭示煤层开采过程中, 卸压瓦斯的运移情况, 对煤矿瓦斯事故发生率的降低起到重要意义。但目前相似模拟方面的相关研究还较少, 制约了“固-气”耦合规律的物理相似模拟研究, 因此研究“固-气”耦合实验材料是必要的。本文通过正交实验<sup>[9-12]</sup>的方法, 对相似材料试件的抗压强度、抗拉强度、脆性参数及渗透速率等参数进行了实验研究, 并开展了定量分析, 为“固-气”耦合相似模拟实验奠定了基础。

1 实验设计

1.1 两水平正交实验设计

两水平型(2<sup>m</sup>)正交设计主要解决定性问题——明确因子的主次地位、因子间的交互作用、不同水平效应的差异。为了进一步确定每一种所选材料的必要性, 对所选的 3 种材料进行两水平正交实验设计方法, 找出每一种材料在相应性质之中所起的作用, 从而证明该种材料的不可替代性。

相似试件选取沙子为骨料, 石蜡和油为胶结剂。为考察各因子之间在某种性质上的交互作用, 特制作 L<sub>4</sub>(2<sup>2</sup>)的等水平正交表来对其进行分析(见表 1)。从表中可以看出由石蜡(A)、油(B)这 2 个影响因素, “用(1)”、“不用(2)”这 2 个水平共同所构成的正交表, 反映了三者之间的交互可能性。经过分析得, 在这 2 个影响因素均存在的情况下, 实验效果能达到预期的目标, 故在整个实验过程中 2 种影响因素必须存在, 但用量的多少还要由多水平正交实验所设计的正交表得出并开展实验。

表 1 两水平正交实验设计  
Table 1 Double dimensions orthogonal test

实验号	列号		实验组合
	A(石蜡)	B(油)	
1	1	1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub>
2	1	2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub>
3	2	1	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub>
4	2	2	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub>

1.2 多水平正交实验设计

多水平型正交设计主要解决定量问题——各因子取不同水平效应的比较, 以明确不同用量水平下所达到的效果。为了较全面地考察各因子用量上的差异所导致的材料试件各种性质上的差异, 特制作了各材料不同用量条件下的混合水平正交实验表, 对每种用量下相似材料力学性质及其渗透性开展实验, 见表 2。

表 2 多水平正交实验设计  
Table 2 Multiple dimensions orthogonal test

水平	A(石蜡/河沙)		B(油)/mL		
1	1/50	0	10	20	30
2	1/60	0	10	20	30
3	1/70	0	10	20	30
4	1/80	0	10	20	30
5	1/90	0	10	20	30
6	1/100	0	10	20	30

2 胶结剂对固气耦合相似材料试件力学性质的影响

根据正交实验分析结果, 通过一系列具体相似配比实验, 可以比较准确地对不同相似配比条件下相似材料试件的力学特征参数进行测试, 并就胶结剂对材料试件的抗压强度的影响开展分析。

2.1 相似材料试件力学参数测试

1) 表征试件脆性的参数  $E/\lambda$  的测试

实验利用 YYW 型手动无侧限压力仪对相似材料试件进行了抗压强度测试, 得到其全应力-应变曲线, 通过对曲线峰值前后段斜率进行计算, 得出试件峰前弹模和峰后弹模降, 其值如表 3 所示。

表 3 试件脆性特征测试结果  
Table 3 Parameters for brittle features of analogy material

试件组别	抗压强度 /MPa	峰前弹性模量 E/MPa	峰后弹模降 $\lambda$ /MPa	$E/\lambda$
1	0.46	56.06	18.98	2.954
2	0.45	55.33	18.74	2.953
3	0.44	54.01	18.29	2.953
4	0.43	52.81	17.88	2.954
5	0.43	52.15	17.66	2.953
6	0.41	49.46	16.75	2.953
7	0.34	41.59	14.08	2.954
8	0.29	36.55	12.37	2.955

研究成果表明<sup>[13]</sup>, 当  $E/\lambda < 3$  时材料属于脆性破坏材料。对实验结果分析后得, 不同配比的材料其

脆性参数均小于 3，证明其与岩石脆性相似。

2) 抗拉强度  $\sigma_t$  测试

为了确保试件抗拉强度数据的可重复性，对相同配比的相似材料试件进行 3 次抗压强度实验后，对每次抗压强度实验结果采用巴西劈裂法<sup>[14]</sup>计算其抗拉强度，之后取平均值得出结果如表 4 所示。

表 4 部分试件抗拉强度测试结果  
Table 4 Tensile strength values of some specimens

试件组别	$\sigma_c$ /MPa	$\sigma_t$ /MPa	试件组别	$\sigma_c$ /MPa	$\sigma_t$ /MPa
1	0.46	0.042	5	0.43	0.038
2	0.45	0.041	6	0.41	0.037
3	0.44	0.044	7	0.34	0.031
4	0.43	0.039	8	0.29	0.027

由表 4 可知：相似材料的抗拉强度为抗压强度的 0.086~0.1，而岩石的抗拉强度一般为抗压强度的 0.25~0.04，平均为 0.1<sup>[14]</sup>；所以该相似材料与岩石在抗拉强度方面的性质基本相似。

2.2 石蜡含量对试件抗压强度的影响

该实验选用河沙、石蜡和油为“固-气”两相实验相似材料的骨料和胶结剂，并从相似材料试件大量实验的数据中得出其物理力学参数随石蜡沙子质量之比变化而变化的规律，如图 1 所示。

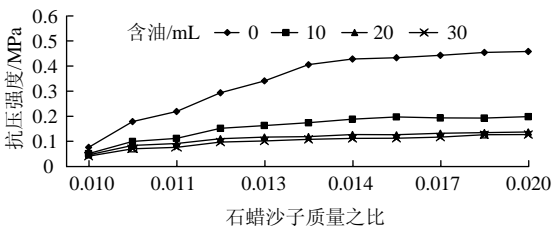


图 1 石蜡沙子质量比与试件抗压强度的关系曲线  
Fig.1 Relationship curve of compressive strength of test piece with different ratio of paraffin and sands

根据对实验数据的拟合，发现石蜡的含量与试件抗压强度符合对数曲线变化规律，见表 5 所示。

表 5 石蜡含量与抗压强度拟合关系式  
Table 5 Relationship between paraffin content and compressive strength

拟合公式	拟合度
$\sigma_c = 0.1733\ln(x) + 0.0635$	$R^2 = 0.978$
$\sigma_c = 0.0646\ln(x) + 0.0539$	$R^2 = 0.977$
$\sigma_c = 0.0368\ln(x) + 0.0531$	$R^2 = 0.975$
$\sigma_c = 0.0353\ln(x) + 0.0430$	$R^2 = 0.984$

从上述拟合结果可看出，在本实验所选的石蜡与沙子之比与试件抗压强度之间满足以下对数关

系式：

$$\sigma_c = A \ln x + B \tag{1}$$

式中： $\sigma_c$  为试件抗压强度； $x$  为石蜡与沙子之比； $A$ ， $B$  为拟合常数，由使用材料自身性质及制作工艺决定。其中  $A$ ， $B$  的范围分别为 [0.035，0.18]，[0.04，0.07]。

结合公式(1)及图 1 可知，试件的抗压强度随石蜡与沙子的比例不断增大，表现为增大趋势；但由于油含量不同，试件抗压强度增大快慢程度在相同比例区域有所不同。当试件中含油量为 0 时，其抗压强度在石蜡与沙子之比处于 0.01~0.014 范围内急速上升，而在 0.014~0.02 范围内呈现出较为平缓的上升趋势，最大为 0.46 MPa。当试件中含油量为 20 mL 时，其抗压强度在 0.01~0.014 范围内出现急速增大，而在石蜡与沙子之比处于 0.014~0.02 范围内上升速度变平缓，最大为 0.14 MPa。

通过图 1 可以发现：随着试件中含油量的不断增加，其抗压强度增大的速度，在相同石蜡与沙子的比例下明显变缓，抗压强度的随着含油量的变化，下降了 30%~70%，从而消除了单纯使用石蜡和沙子，材料抗压强度变化强烈的不足，使其抗压强度的可控范围变宽。

2.3 油含量变化对试件抗压强度的影响

当石蜡与沙子的比例固定时，如图 2 所示。

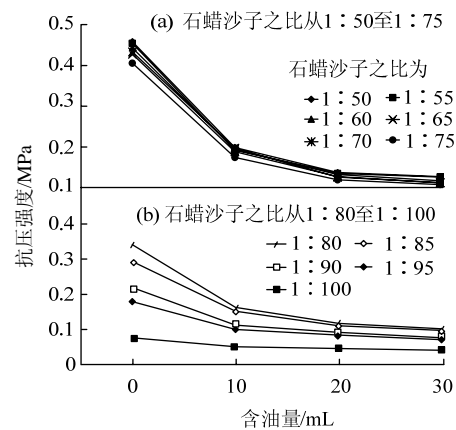


图 2 不同含油量与试件抗压强度的关系曲线  
Fig.2 Relationship curve of compressive strength of test piece with different oil content

当试件不含油时其抗压强度是加入 10 mL 油后抗压强度的 1.5~2.3 倍，通过加入 20，30 mL 油后，其抗压强度又分别降低了 10%~30%，20%~35%。由此可见单纯使用石蜡和沙子制作的试件其抗压强度要比加油后制作的试件抗压强度高得多，而通

过调整油量可以使试件的抗压强度得到较大范围的降低, 实验结果总体呈现出逐渐变小的负指数函数变化趋势, 且满足以下负指数函数关系式:

$$\sigma_c = Ce^{-Dx} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_c$  为试件抗压强度;  $x$  为含油量;  $C, D$  为拟合常数, 由使用材料自身性质及制作工艺决定。

### 3 胶结剂对“固-气”耦合相似材料试件渗透性的影响

#### 3.1 油含量对试件渗透性的影响

按照相似实验材料中骨胶比从大到小, 并根据正交实验设计结果进行实验, 整理部分试件测试数据, 在石蜡沙子之比一定的情况下, 对含油量的变化对相似材料试件渗透性的影响进行分析, 结果如图3所示。

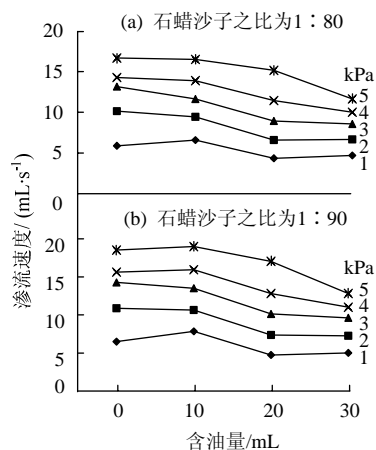


图3 含油量与试件渗透性的关系曲线  
Fig.3 Relationship curve of permeability of test piece with oil content

从测试结果可看出: 当石蜡与沙子质量比一定时, 随着试件中含油量的增加, 试件渗流速度在含油量处于 0~10 mL 阶段时呈现缓慢上升的变化趋势, 而在 10~20 mL 阶段则保持平稳的变化, 20~30 mL 阶段则出现缓慢下降的变化趋势。这种先缓慢升高再保持平稳最后缓慢下降的变化趋势说明其在石蜡沙子之比一定的情况下, 对试件渗透性影响不稳定, 但在整个过程中变化比较缓和, 以至于不会影响其在降低试件抗压强度方面的效果, 因此为模拟不同渗透性的岩石提供条件。

#### 3.2 石蜡含量对试件渗透性的影响

按照相似材料中骨胶比从大到小, 并根据正交实验设计结果进行实验, 整理部分试件测试数据, 在含油量一定的条件下, 分析相似材料试件渗透性随石蜡沙子之比的变化情况, 如图4所示。

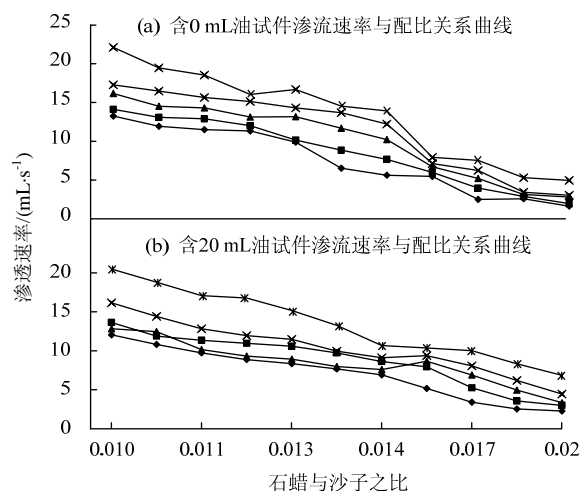


图4 不同石蜡沙子之比与试件渗透性的关系曲线  
Fig.4 Relationship curve of permeability of test piece with different ratio of paraffin and sands

从图4a, b中可看出: 在相同含油量的条件下, 试件的渗透率随着石蜡与沙子之间比例的增大而增大。从图中可以清晰地看到: 当石蜡与河沙之比处于 0.01~0.014 之间时, 试件渗透速率下降速度较快, 与此阶段相似材料的抗压强度下降速度较快相结合分析可得, 此阶段配比的相似材料可对渗透性好但强度较低的岩石进行模拟, 且变化范围较宽。

当石蜡与沙子之比处在 0.014~0.02 之间时, 试件渗透速率下降缓慢, 且近乎于平直, 从而可以得出在这一阶段中, 所用材料的配比可以模拟渗透率相近的岩石; 而结合其在这一配比阶段的抗压强度分析可知, 该配比范围可模拟渗透性较差, 抗压强度较大, 且其二者波动较小的岩石。可见通过调整石蜡沙子之比及含油量之间的关系, 可对不同抗压强度及渗透性的岩石进行模拟, 从而开展固气耦合物理相似模拟实验。

通过对实验数据整理分析并拟合得到实验结果满足公式(3):

$$v = ae^{-bx} \quad (3)$$

根据实验测得的进气孔口气体的压力和出气孔口的流量, 计算相应压力条件下气体渗透率<sup>[15]</sup>, 使用如下的计算公式:

$$k = \frac{2Qp_a\mu L}{A(p_1^2 - p_2^2)} = \frac{K\mu}{\rho g} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)整理可得

$$k = \left( \frac{2ap_a\rho g}{p_1^2 - p_2^2} \right) e^{-bx} \quad (5)$$

式中： $A$  为试件的横截面积， $\text{cm}^2$ ； $p_a$  为大气压力， $0.1\text{ MPa}$ ； $L$  为试件的长度， $\text{cm}$ ； $\mu_g$  体动力黏性系数； $p_1$  为气体通过试件前的压力， $\text{MPa}$ ； $p_2$  为气体通过试件后的压力， $\text{MPa}$ ； $Q$  为气体的平均流量， $\text{mL}$ ； $v$  为试件气体渗流速率， $\text{mL/s}$ ； $x$  为石蜡含量； $\rho$  为介质密度， $\text{kg/m}^3$ ； $a$ ， $b$  为拟合常数。

从式(5)中可看出：相似材料试件的渗透系数随着石蜡含量的变化成负指数函数变化，即材料的渗透性随石蜡含量的增大，逐渐下降，使得研制出的相似材料具备模拟不同渗透性条件的岩石。

4 正交实验结果分析

由表 1，2 中可知，相似材料抗压强度及渗透性实验的数量相当大，故从设计的实验方案中选取部分实验配比制作试件，并开展实验，以此作为验证石蜡和油在影响相似材料弹性模量与渗流速度中所起作用的主次，并对实验结果展开综合因素分析<sup>[16-17]</sup>。选取不同的油量(0，10，20，30 mL)及不同的石蜡用量(0.02，0.017，0.014，0.012 5 g)进行验证实验。实验对试件进行抗压强度及渗透性能测定，获得不同实验方案条件下  $E$ ， $v$  的值，见表 6。

表 6 正交实验结果  
Table 6 Results of orthogonal test

实验 编号	影响因素		实验结果分析			实验 编号	影响因素		实验结果分析		
	$A$ (石蜡)	$B$ (油)	$E/\text{MPa}$	$v/(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$	综合 评价分		$A$ (石蜡)	$B$ (油)	$E/\text{MPa}$	$v/(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$	综合 评价分
1	1(0.02)	1(0)	0.458	2.801	1.629 5	9	1	3(20)	0.138	3.329	1.733 5
2	2(0.017)	1	0.443	5.202	2.822 5	10	2	3	0.132	6.894	3.513 0
3	3(0.014)	1	0.428	10.224	5.326 0	11	3	3	0.127	7.591	3.859 0
4	4(0.0125)	1	0.341	13.184	6.762 5	12	4	3	0.117	8.946	4.531 5
5	1	2(10)	0.199	3.694	1.946 5	13	1	4(30)	0.127	5.934	3.030 5
6	2	2	0.194	7.191	3.692 5	14	2	4	0.117	9.668	4.892 5
7	3	2	0.188	8.789	4.488 5	15	3	4	0.112	11.828	5.970 0
8	4	2	0.163	11.651	5.907 0	16	4	4	0.102	13.589	6.845 5

	$E$		$v$		综合评分		说明： $K_i$ 表示第 $i$ 个因素位级数相同的各次实验结果的总和； $R$ 大小表示实验中的相应因素对指标作用的显著性。本实验为两指标正交实验，对指标的分析采用综合评分法。根据实验目的，所选的 2 个指标应具有相等的重要性，即实验必须同时具备这 2 个指标的要求，所以 2 个指标的权重应是一样的，各取 0.5，二者之和为综合量化指标。				
$K_1$	1.670	0.922	31.411	15.758	16.541	8.340					
$K_2$	0.744	0.886	31.325	28.955	16.035	14.921					
$K_3$	0.514	0.855	26.760	38.432	13.637	19.644					
$K_4$	0.458	0.723	41.019	47.370	20.739	24.047					
$R$	1.212	0.199	14.259	31.612	7.102	15.707					

通过表 6 可以发现：

1) 对于指标  $E$ ， $R_1>R_2$ ；对于指标  $v$ ， $R_2>R_1$ ；对于综合指标， $R_2>R_1$ 。在这 2 种胶结剂中，油对模拟材料的塑性影响比较大；而石蜡则对材料的渗透性能影响比较大。

2) 就单因素含量来看，各种材料又具有不同特点，需要在配制模拟材料时斟酌采用。油随其含量的增加指标  $E$  减小，说明油有降低试件抗压强度的效果，而且效果较明显；随着石蜡的增加，试件的塑性增强，渗透性变小，这说明石蜡在“固-气”耦合相似材料中起着双方面的作用，适当调整石蜡的用量可以使相似材料在性能上发生较大变化，但这也决定了石蜡用量较难控制，需要用油来调和。

5 结 论

1) 通过调整试件中石蜡与油的含量，得到试件

抗压强度与石蜡含量之间呈对数关系，与油含量之间呈负指数函数关系，并且通过调节含油量，使其抗压强度较单独使用石蜡时降低 1.5~2.65 倍。

2) 结合实验数据及渗透率计算公式，发现试件渗透速度与石蜡含量之间呈负指数函数变化。

3) 由正交实验综合因素法分析实验结果可知，油含量在调节材料抗压强度方面起主要作用，石蜡在调节材料渗透性方面起主要作用，通过调节二者的含量，可以模拟不同抗压强度、不同渗透性的岩石，为开展固气耦合物理相似模拟实验奠定基础。

参考文献：

[1] 梁冰，孙可明，薛强. 地下工程中的流-固耦合问题的探讨[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4): 120-122.  
LIANG Bing, SUN Keming, XUE Qiang. The Research of fluid-solid coupling in the ground engineering[J].

- Journal of Liaoning Technical University, 2001, 20(4): 120-122.
- [2] 张杰, 侯忠杰. 固液耦合试验材料的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3157-3161.  
ZHANG Jie, HOU Zhongjie. Experimental study of simulation materials for solid-liquid coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3157-3161.
- [3] 侯忠杰, 张杰. 陕北矿区开采潜水保护固液两相耦合试验及分析[J]. 湖南科技大学学报, 2004, 19(4): 1-5.  
HOU Zhongjie, ZHANG Jie. The solid-liquid coupling two-phase experiment and analysis of the protection of potential water in northern mining area of Shaanxi[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology, 2004, 19(4): 1-5.
- [4] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋. 三维固液耦合相似模拟理论与方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2): 204-206.  
HU Yaoqing, ZHAO Yangsheng, YANG Dong. 3D solid-liquid coupling experiment study of deformation destruction of coal stope[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(2): 204-206.
- [5] 刘见中, 张东明, 袁地镜. 含瓦斯煤在不同围压下的渗流特性试验[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(7): 70-72.  
LIU Jianzhong, ZHANG Dongming, YUAN Dijing. Vadose features test of gas content coal under different surrounding pressures[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(7): 70-72.
- [6] 黄庆享, 张文忠, 侯志成. 固液耦合试验隔水层相似材料的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2813-2818.  
HUANG Qingxiang, ZHANG Wenzhong, HOU Zhicheng. Study of simulation materials of aquifuge for solid-liquid coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1): 2813-2818.
- [7] 郑少河, 朱维申, 王书法. 承压水上采煤的固-流耦合问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 421-423.  
ZHENG Shaohe, ZHU Weishen, WANG Shufa. Study on the coupling problem between flow and solid of mine in confined aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 421-423.
- [8] LI Shugang, XIAO Peng, PAN Hongyu, et al. Experimental investigation on the seepage law of pressure-relieved gas under the influence of mining[J]. Safety Science, 2012, 50: 614-617.
- [9] 白占平, 曹兰柱, 白润才. 相似材料配比的正交试验研究[J]. 露天采煤技术, 1996(3): 22-23.
- BAI Zhanping, CAO Lanzhu, BAI Runcai. Orthogonal test's research on components of equivalent materials[J]. Opencast Mining Technology, 1996(3): 22-23.
- [10] 滕素珍. 数理统计[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2000: 344.
- [11] 盛永莉. 正交试验设计及其应用[J]. 济南大学学报, 1997, 7(3): 69-73.  
SHENG Yongli. Orthogonal test design and its application[J]. Journal of Jinan University, 1997, 7(3): 69-73.
- [12] 攀统江. 采用正交试验方法进行 SMA 混合料的配合比设计研究[J]. 石油沥青, 2000, 14(2): 18-28.  
PAN Tongjiang. Research on the mixtures design of stone matrix asphalt (SMA) using the method of orthogonal test[J]. Petroleum Asphalt, 2000, 14(2): 18-28.
- [13] 潘一山, 章梦涛, 王来贵, 等. 地下硐室岩爆的相似材料模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 49-56.  
PAN Yishan, ZHANG Mengtao, WANG Laigui, et al. Research on the tests of rock burst of the underground chamber simulated by similar materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 49-56.
- [14] 李树忱, 冯现大, 李术才, 等. 新型固液耦合相似材料的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 281-288.  
LI Shuchen, FENG Xianda, LI Shucai, et al. Research and development of a new similar material for solid-fluid coupling and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 281-288.
- [15] 李志强, 鲜学福, 隆晴明. 不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 523-527.  
LI Zhiqiang, XIAN Xuefu, LONG Qingming. Experiment study of coal permeability under different temperature and stress[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(4): 523-527.
- [16] 郝行舟, 李春生. 正交试验设计方法在试验设计中的应用[J]. 河南交通科技, 1999, 19(6): 26-28.  
HAO Xingzhou, LI Chunsheng. Orthogonal test method's applications on testing designs[J]. Science and Technology of Henan Communication, 1999, 19(6): 26-28.
- [17] 黄庆享, 侯志成, 张文忠, 等. 黏土隔水层相似材料胶结剂的正交实验分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 42-46.  
HUANG Qingxiang, HOU Zhicheng, ZHANG Wenzhong, et al. Orthogonal tests on cementing agents of similar of clay aquiclude[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(1): 42-46.