

# 模拟原煤的相似材料试验研究

康向涛<sup>1,2</sup>, 黄 滚<sup>1,2</sup>, 邓博知<sup>2</sup>, 韩佩博<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400030)

**摘 要:** 为制备原煤的相似材料, 选用煤粉和沙子为两种骨料, 石膏和水泥为胶结剂, 应用单因素分析法, 分别就煤粉、石膏、水泥和沙子之间的不同对比对相似材料强度的影响进行了试验研究. 结果表明, 以煤粉为骨料的相似材料, 其试样强度与煤粉用量呈线性负相关, 且相关性显著, 相似材料性能也易掌控; 而以沙子为主料的相似材料, 其试样强度与沙子用量呈非线性关系, 试样强度波动较大, 相似材料性能不易掌控. 因此, 以煤粉做原煤相似材料的骨料比沙子要合适, 研究结果为原煤相似材料的制备提供了借鉴.

**关 键 词:** 原煤; 相似材料; 骨料; 煤粉; 配比

中图分类号: TD 315

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)01-0138-05

## Experimental Study on Similar Material for Simulating Raw Coal

KANG Xiang-tao<sup>1,2</sup>, HUANG Gun<sup>1,2</sup>, DENG Bo-zhi<sup>2</sup>, HAN Pei-bo<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China. Corresponding author: HUANG Gun, E-mail: hg023@cqu.edu.cn)

**Abstract:** Coal powder and sand are both used as two kinds of aggregates, and both gypsum and cement are used as cementing agent in the similar material preparation of raw coal. Through the single factor analysis, the influence on the strength of similar material under different composition proportions of coal powder, gypsum, cement and sand was studied during the experiments. The results indicated that the similar material of coal powder as aggregate shows a negative linear correlation between the strength and coal powder consumption dosage, meanwhile, the properties of similar material is easy to be controlled. While the similar material that uses sand as the aggregate shows a non-linear relationship, and the properties of similar material is difficult to be controlled. Therefore, the coal powder is more suitable than sand as the aggregate of similar material of raw coal. The results provide good references for similar material design of raw coal.

**Key words:** raw coal; similar material; aggregate; coal powder; composition proportion

在诸多科学研究方法中, 相似模型试验一直是探讨复杂工程问题的重要手段, 应用非常广泛, 尤其在煤矿开采领域, 如: 模拟煤岩体开挖后上覆岩层的破断特征<sup>[1-3]</sup>, 煤岩体的水力压裂试验等<sup>[4-5]</sup>. 同时, 随着矿井深部开采的不断增加, 开采过程中会遇到越来越多的难题, 需要借助于相似模型试验等来研究与探讨, 以便为企业解决这些问题.

相似材料是相似模型试验中的一个重要组成部分. 正确地选择相似材料不仅对试验研究的可靠性和准确性具有决定性作用, 也是能否正确模

拟工程原型的关键. 在相似模型试验中, 以相似理论为基础, 以原型材料为依据, 按照一定的相似比, 通过物理力学性质的反复测试, 获得试验所需的相似材料.

相似材料制作过程主要包括: (1) 原料选择, 即骨料、胶结剂、缓凝剂、硬化剂等<sup>[6]</sup>; (2) 原料配比选择, 即确定各种原料所占比例多少<sup>[7-9]</sup>. 骨料和胶结剂等原料的选择、对比对相似材料的物理力学性质具有很大影响. 在原煤相似材料研究方面, 孔令强等<sup>[10]</sup>以沙子为骨料, 水泥和石膏为胶结剂, 制备原煤的相似材料, 探讨了不同配比条件

下相似材料抗压强度和弹性模量的变化规律;杜春志<sup>[4]</sup>、黄炳香<sup>[5]</sup>以煤粉为主料,石膏和水泥为胶结剂,制备原煤的相似材料,用于水压致裂试验. 据统计,在原煤相似材料的制备中,以沙子为骨料进行研究的居多,也有部分以煤粉为骨料的. 那么在制备原煤相似材料时,选用沙子或煤粉做骨料效果是否相近? 两者之间有无差异? 哪种骨料配置的相似材料更合适? 目前未见这方面的研究报道. 为此,本文针对沙子和煤粉两种骨料的差异性进行了试验研究,研究结果可为原煤相似材料的制备提供借鉴.

# 1 原煤相似材料试验过程

在相似模型试验中,以相似理论<sup>[11-12]</sup>为基础,按照确定的相似比,依照原型构建试验模型,模型与原型之间满足相似性,即要求模型几何形状、材料组成和受到的荷载等遵循相似律. 由量纲分析方法可以推导出基本相似判据为

$$\left. \begin{aligned} C_{\sigma} &= C_{\gamma} C_L, \\ C_{\varepsilon} &= C_{\delta} C_L, \\ C_{\sigma} &= C_E C_{\varepsilon}, \\ C_{\mu} &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $C_{\sigma}$ ,  $C_{\varepsilon}$ ,  $C_{\delta}$ ,  $C_L$ ,  $C_{\gamma}$ ,  $C_E$ ,  $C_{\mu}$  分别表示应力、应变、位移、几何、容重、弹性模量、泊松比相似常数. 如果  $C_{\varepsilon} = 1$ , 则要求原型材料与模型材料的应力-应变曲线和莫尔强度包络线相似<sup>[9]</sup>.

## 1.1 相似材料选择

根据以往的实践经验,选择相似材料时通常考虑以下原则:①骨料为散体,添加胶结剂后能压制成型,方便制备;②物理力学性能稳定;③改变配比,性能易于掌控;④价格低、来源广;⑤无毒无害.

按照上述原则选择本次的试验原料. 煤粉取自松藻煤电集团公司逢春煤矿 M<sub>6</sub> 煤层的三号无烟煤, 经过室内粉碎、筛选, 粒径为 0.25 ~ 0.35 mm; 沙子取自河沙, 粒径 0.125 ~ 0.25 mm; 胶结剂为石膏粉和硅酸盐水泥(标号 32.5).

## 1.2 相似材料配比试验方案

采用单因素分析法探讨相似材料的配比(质量比), 即固定一种材料用量, 改变另一种材料用量, 来研究材料用量变化对混合料性质的影响. 为了探索原煤相似材料中原料(煤粉、沙子与胶结剂)不同配比对相似材料性能的影响, 设计四种配比试验方案见表 1.

## 1.3 相似材料试样制备与试验

本次相似材料试件制备采用机械法压制成型. 用专门定制的圆形三开模具, 压制标准试件( $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ), 巴西圆盘试件( $\phi 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ )则用标准试件经过锯断、打磨而成. 部分试样如图 1 所示.

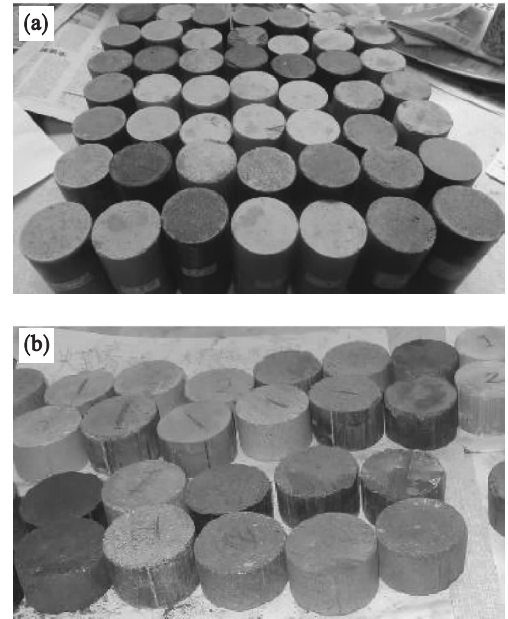


图 1 相似材料试样  
Fig. 1 Specimens of similar materials  
(a)—标准试样; (b)—巴西圆盘试样.

试样制作步骤:(1)配料,按配比称重骨料与胶结剂,将它们混合搅拌,加入适量的水,再快速搅匀后,倒入模具;(2)压模成型,在压力机上施加 50 kN 的压力,保持 20 min,脱模称重,贴上标签;(3)烘干,煤粉试样直接放入烘干机烘干 24 h. 沙子试样放置一天后,再烘干,时间相同.

试验过程:每种配比试样分别进行了单轴压缩和巴西劈裂试验. 每组试验制备 4 个试件,共进行了 168 次试验. 试验是在重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室进行的. 采用 250 kN 岛津压力机,通过位移控制加载速度(0.1 mm/min),直至试件破坏,试验数据由计算机自动采集.

# 2 试验结果及分析

## 2.1 试样破坏特征

试样极限荷载因材料配比不同而存在差异性. 四种配比试样的单轴压缩、巴西劈裂法试验的应力-应变曲线结果与原煤对比如图 2 所示. 从图 2 中可以看出,四种配比试样单轴压缩破坏都经过孔隙压密阶段、线弹性阶段、弹塑性阶段和脆

性破坏及残余强度阶段,与原煤破坏特性非常相似. 四种配比试样的巴西劈裂试验结果与原煤亦

相似. 所以,用煤粉、沙子、石膏和水泥为原料制备原煤的相似材料是可行的.

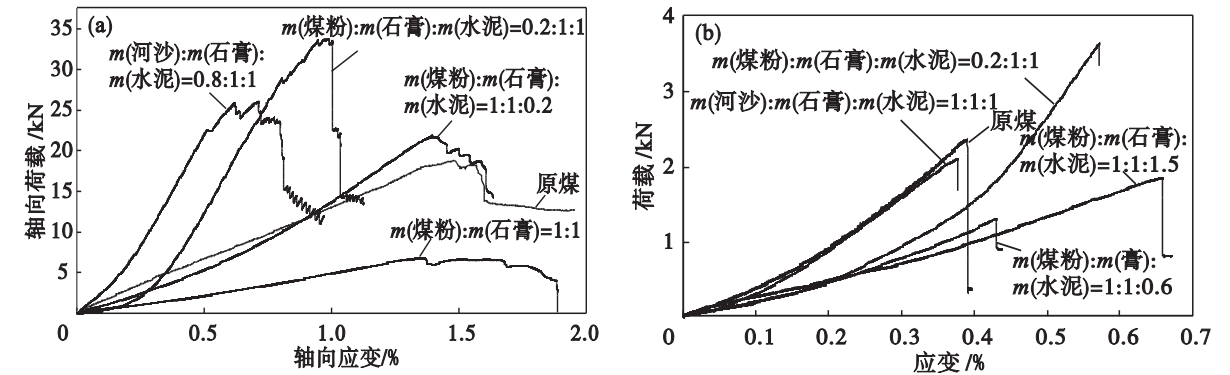


图 2 四种配比试样与原煤应力 - 应变曲线  
Fig. 2 Uniaxial stress-strain curves of similar material specimens with four composition proportions and raw coal specimen  
(a)—单轴压缩应力 - 应变曲线; (b)—巴西劈裂法应力 - 应变曲线.

2.2 试验结果与分析

按照四种试验方案进行的单轴压缩和巴西劈

裂试验,获得了不同配比试样的抗压、抗拉强度及干容重,见表 1,变化规律如图 3 ~ 图 5 所示.

表 1 煤粉、石膏、水泥和沙子不同配比试样强度  
Table 1 Strengths of similar material specimens made of different composition proportions of coal powder, plaster, cement and river sand

方案	原料	质量配比	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	干容重/( g·cm <sup>-3</sup> )
方案一	煤粉、石膏	1:0.2	1.74	0.17	1.44
		1:0.4	4.75	0.25	1.43
		1:0.6	5.22	0.38	1.43
		1:0.8	6.00	0.46	1.53
		1:1	7.88	0.57	1.57
		1:1.25	10.13	0.62	1.63
		1:1.5	11.62	0.72	1.59
方案二	煤粉、石膏和水泥	1:1:0.2	5.78	0.27	1.54
		1:1:0.4	6.73	0.32	1.52
		1:1:0.6	6.86	0.38	1.53
		1:1:0.8	8.15	0.55	1.57
		1:1:1	9.01	0.63	1.60
		1:1:1.2	9.64	0.40	1.62
		1:1:1.4	10.81	0.38	1.62
方案三	煤粉、石膏和水泥	0.2:1:1	16.53	0.90	1.64
		0.4:1:1	13.94	0.73	1.63
		0.6:1:1	11.91	0.60	1.55
		0.8:1:1	11.19	0.58	1.63
		1:1:1	9.35	0.60	1.57
		1.2:1:1	8.85	0.65	1.53
		1.4:1:1	6.49	0.36	1.56
方案四	沙子、石膏和水泥	0.2:1:1	11.42	0.88	1.81
		0.4:1:1	14.69	1.06	1.83
		0.6:1:1	15.26	1.07	1.86
		0.8:1:1	12.75	1.32	1.86
		1:1:1	10.98	1.13	1.90
		1.2:1:1	13.88	0.82	1.90
		1.4:1:1	9.28	0.74	1.89

分析试验结果可以得出：

1) 石膏用量对试样抗压强度和抗拉强度的影响如图 3 所示. 将试样试验数据进行拟合, 分别得到试样抗压强度  $\sigma_c$ 、抗拉强度  $\sigma_t$  与石膏用量  $x$  的函数关系:

$$\sigma_c = 1.5373x + 0.6146, R^2 = 0.9678; \quad (2)$$

$$\sigma_t = 0.0914x + 0.087, R^2 = 0.9925. \quad (3)$$

从图 3 和式(2), 式(3)可以看出, 试样抗压、抗拉强度与石膏用量呈线性正相关. 试样抗压强度变化范围为 1.74 ~ 11.62 MPa, 抗拉强度变化范围为 0.17 ~ 0.72 MPa, 干容重为 1.43 ~ 1.63 g/cm<sup>3</sup>.

2) 水泥用量对试样抗压、抗拉强度的影响, 如图 4 所示. 将试验数据进行拟合, 分别得到试样抗压强度  $\sigma_c$ 、抗拉强度  $\sigma_t$  与水泥用量  $y$  的函数关系:

$$\sigma_c = 0.8239y + 4.8447, R^2 = 0.9825; \quad (4)$$

$$\sigma_t = 0.0262y + 0.3154, R^2 = 0.196. \quad (5)$$

从图 4 和式(4), 式(5)可以看出, 试样抗压强度与水泥用量呈线性正相关, 而试样抗拉强度与水泥用量的线性关系不显著. 分析原因认为, 随着水泥用量的增加, 试样脆性增大, 导致其抗拉强度呈非线性变化. 试样抗压强度为 5.78 ~ 10.81 MPa, 抗拉强度为 0.27 ~ 0.63 MPa, 干容重为 1.52 ~ 1.62 g/cm<sup>3</sup>.

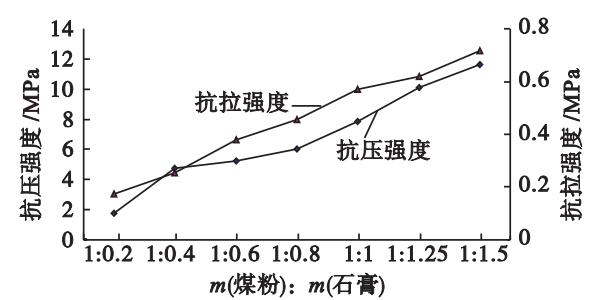


图 3 石膏用量对试样强度影响曲线  
Fig. 3 Influence of different of gypsum dosage on specimen strength

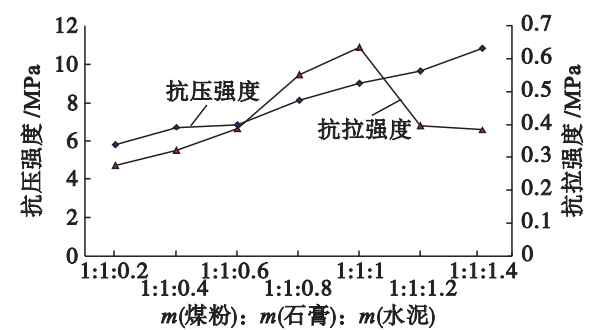


图 4 水泥用量对试样强度影响曲线  
Fig. 4 Influence of different of cement dosage on specimen strength

3) 煤粉用量对试样抗压强度和抗拉强度的影响, 见图 5. 通过对试验数据的拟合, 分别得到试样的抗压强度  $\sigma_c$  和抗拉强度  $\sigma_t$  与煤粉用量  $m$  的函数关系:

$$\sigma_c = -1.5302m + 17.3, R^2 = 0.9713; \quad (6)$$

$$\sigma_t = -0.0636m + 0.887, R^2 = 0.7089. \quad (7)$$

从图 5 和式(6), 式(7)可以看出, 试样抗压强度、抗拉强度与煤粉用量呈线性负相关, 即随着煤粉用量的增加, 试样强度减小. 试样抗压强度为 6.49 ~ 16.53 MPa, 抗拉强度为 0.36 ~ 0.90 MPa, 干容重为 1.53 ~ 1.64 g/cm<sup>3</sup>.

4) 以沙子作为骨料, 沙子用量对试样抗压、抗拉强度的影响, 如图 5 所示. 随着沙子用量的增加, 试样的强度变化波动较大, 对试验数据进行拟合, 分别得到试样的抗压强度  $\sigma_c$ 、抗拉强度  $\sigma_t$  与沙子用量  $n$  的函数关系:

$$\sigma_c = -0.4402n + 14.369, R^2 = 0.1932; \quad (8)$$

$$\sigma_t = -0.0293n + 1.1215, R^2 = 0.0998. \quad (9)$$

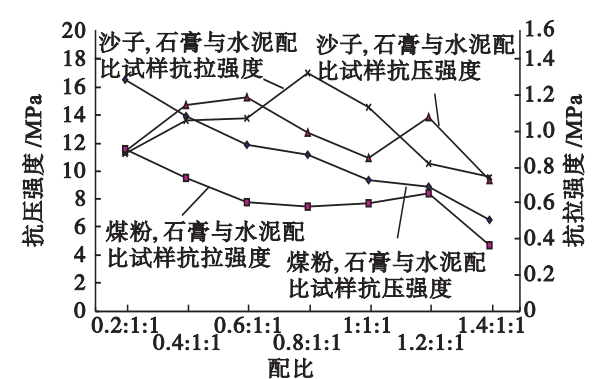


图 5 煤粉和沙子用量与试样强度关系曲线  
Fig. 5 Strength of specimens with different proportion of coal powders and sand dosage

从图 5 和式(8), 式(9)可以看出, 试样抗压强度和抗拉强度与沙子用量的线性不显著, 而是呈非线性变化. 由沙子做骨料配置的试样, 其强度变化不稳定, 试样抗压强度为 9.28 ~ 15.26 MPa, 抗拉强度为 0.74 ~ 1.32 MPa, 干容重为 1.81 ~ 1.90 g/cm<sup>3</sup>.

5) 煤粉或沙子做骨料对试样强度影响对比分析. 从表 1 可以看出, 以煤粉/沙子、石膏和水泥质量比 0.4:1:1 为分界点, 随着骨料(煤粉或沙子)用量的增加, 以煤粉为骨料的试样抗压强度和抗拉强度均低于以沙子为骨料的试样强度. 以煤粉为骨料的试样抗压、抗拉强度与煤粉用量呈线性负相关, 因而在相似材料配比时比较容易掌控其强度变化情况. 以沙子为骨料的试样随着沙子用量的增加, 其抗压、抗拉强度变化起伏不稳

定,呈非线性关系,因此,在相似材料配置时较难掌控其强度变化情况.

分析两种骨料用量对试样强度产生差异性的原因,可能是因为颗粒大小与强度,及颗粒与胶结剂的胶结紧密程度有关.沙子颗粒小但强度大于煤粉,另外,以水泥和石膏作为胶结剂,它们与沙子胶结产生的包裹力比煤粉的要好.

### 3 结 论

1) 以煤粉、沙子、石膏和水泥为原料制备的相似材料试样与原煤的应力 – 应变曲线及变化规律均相近.

2)  $m(\text{煤粉}):m(\text{石膏}):m(\text{水泥})$  为 1:1:0.2 时,制备的相似材料试样在变形性能和破坏特性方面与原煤的相似性非常好,用来模拟原煤是适合的.

3) 以煤粉做骨料配置的相似材料,其试样强度与煤粉用量呈线性负相关,且相关性显著,相似材料性能容易掌控.而以沙子为骨料的相似材料,其试样强度与沙子用量呈非线性关系,试样强度波动较大,相似材料性能难以掌控.因此,以煤粉做原煤相似材料的骨料比沙子要合适.

#### 参考文献:

[ 1 ] Wang M M. The application of similar material in the simulation of overlying strata movement in high inclined seam in Dongbaowei mine [ J ]. *Advanced Research on Environmental Science and Material Application*,2012,600: 194 – 198.

[ 2 ] Miao X X,Cui X M,Wang J A,et al. The height of fractured water-conducting zone in undermined rock strata [ J ]. *Engineering Geology*,2011,120(1/2/3/4):32 – 39.

[ 3 ] Xing P W,Song X M,Fu Y P. Study on similar simulation of the roof strata movement laws of the large mining height workplace in shallow coal seam [ J ]. *Advanced Materials*

*Research*,2012,450/451:1318 – 1322.

[ 4 ] 杜春志. 煤层水压致裂理论及应用研究[ D ]. 徐州:中国矿业大学,2008.

(Du Chun-zhi. Study on theoretics of hydraulic fracturing in coal bed and its applications[ D ]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2008. )

[ 5 ] 黄炳香. 煤岩体水力致裂弱化的理论与应用研究[ D ]. 徐州:中国矿业大学,2009.

(Huang Bing-xiang. Research on theory and application of hydraulic fracture weakening for coal-rock mass [ D ]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. )

[ 6 ] Burgert W,Lippman M. Models of translator rock bursting in coal [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*,1981,18:285 – 294.

[ 7 ] Meng Z P,Peng S P,Qu H L,et al. Physical modeling of influence of rock mass structure on roof stability[ J ]. *Journal of China University of Mining & Technology*,2000,10(12): 172 – 176.

[ 8 ] Guo Y H,Cao R J,Zhu L H. Research on similar material in physical specimen petrography of rock [ J ]. *Advanced Materials Research*,2013,616/617/618:346 – 349.

[ 9 ] Liu Q,Li S C,Li L P,et al. Development of geomechanical model similar material for soft rock tunnels [ J ]. *Advanced Materials Research*,2011,168/169/170:2249 – 2253.

[ 10 ] 孔令强,孙景民. 模拟煤体的相似材料配比试验研究[ J ]. 露天采矿技术,2007(4):33 – 36.

(Kong Ling-qiang, Sun Jing-min. Study for the ratio of similar materials for simulating coal[ J ]. *Opencast Mining Technology*,2007(4):33 – 36. )

[ 11 ] 范鹤,刘斌,王成,等. 高填土涵洞相似材料的试验研究[ J ]. 东北大学学报:自然科学版,2007,28(8):1194 – 1197.

(Fan He, Liu Bin, Wang Cheng, et al. Experimental investigation on similarity simulation of imitative materials for high earth-filled culvert [ J ]. *Journal of Northeastern University:Natural Science*,2007,28(8):1194 – 1197. )

[ 12 ] Shahani A R. Some problems in the anti-plane shear deformation of bi-material wedges[ J ]. *International Journal of Solids and Structures*,2005,42(11/12):3093 – 3113.