

模拟煤与瓦斯突出的相似材料配比试验研究

张淑同^{1,2,3} 戴林超^{1,2}, 王波^{1,2}, 曹偈^{1,2}

(1. 中国煤炭科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037; 2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037;
3. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了开展煤与瓦斯突出模拟试验, 选用水泥作为胶结剂, 碎煤作为骨料, 水、沙子和活性炭作为辅料, 设计了5因素7水平的软煤相似材料配比方案, 压制了Φ50 mm相似材料试件, 研究了煤与瓦斯突出相似模拟材料配制方法。研究结果表明: 相似材料试件单轴抗压强度与水泥质量百分比、水泥和沙子二者总量比例与相似材料密度呈线性关系, 所配制的相似材料与煤在物理、力学性质具有较好的相似性, 相似材料的吸附解吸CO₂性能与煤吸附解吸CH₄性能也具有较好的相似性。研究结果为煤与瓦斯突出模拟试验相似模型制作及相似材料进一步精细化配比试验提供了重要依据。

关键词: 煤与瓦斯突出; 相似材料; 水泥胶结剂; 物理力学性质; 吸附解吸性能

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2015)06-0076-05

Experiment study on mixture ratio of similar material for simulation of coal and gas outburst

Zhang Shutong^{1,2,3}, Dai Linchao^{1,2}, Wang Bo^{1,2}, Cao Jie^{1,2}

(1. Chongqing Research Institute Company Limited, China Coal Technology Engineering Group, Chongqing 400037, China;
2. National Key Lab of Gas Disaster Monitoring, Control and Emergency Technology, Chongqing 400037, China;
3. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to conduct a simulation test of coal and gas outburst, cement was selected to be a binder. Broken coal was applied to be the aggregates and water, sands and activated carbon were applied to be the auxiliary material. A mixing ratio plan of the soft coal similar materials with five factors and seven levels was designed. A similar material specimen with the diameter of 50 mm was pressed. A similar simulation material preparation method of the coal and gas outburst was studied. The study results showed that the uniaxial compressive strength and the cement quality percentage of the similar material specimen, the cement and sand percentage and similar material density would be in a linear relationship. The similar material prepared could have a good similarity with coal in physics, mechanics property. The properties of similar material absorption and desorption CO₂ could have a good similarity with coal absorption and desorption CH₄. The study results provided important basis to the similar model preparation of the coal and gas outburst simulation test and the fine mixing ratio test of the similar material.

Key words: coal and gas outburst; similar material; cement binder; physical and mechanical property; adsorption and desorption properties

0 引言

地质力学模型试验方法是研究岩土工程问题的一种行之有效的方法^[1-2], 已在岩土工程研究中得到广泛应用^[3]。相似材料和相似模型是进行相似

模拟试验的必要条件, 相似材料的配比对其物理力学性质具有很大影响, 对物理模型的相似性起着决定性作用^[4]。目前, 国内外学者在采用相似模拟试验研究地下空间结构的稳定性过程中, 研制了力学性质符合其力学破坏过程的岩性相似材料配比方

收稿日期: 2014-12-15; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2015.06.014

基金项目: “两江学者”计划专项经费资助项目([2013]渝九证字第1406号); 中国煤炭科工集团青年创新基金资助项目(2014QN007); 中煤科工集团重庆研究院有限公司资助项目(2014YBXM55)

作者简介: 张淑同(1979—), 男, 山东新泰人, 副研究员, 博士研究生。Tel: 023-65239052, E-mail: zstsdsd@hotmai.com

引用格式: 张淑同, 戴林超, 王波, 等. 模拟煤与瓦斯突出的相似材料配比试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 76-80, 145.

Zhang Shutong, Dai Linchao, Wang Bo, et al. Experiment study on mixture ratio of similar material for simulation of coal and gas outburst [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 76-80, 145.

法:采用纯石膏材料、石膏水泥混合材料、石蜡、机油以及松香为粘结剂的相似材料^[5]。

煤与瓦斯突出是威胁煤矿安全生产的重要灾害之一,由于其发生具有复杂性、突然性和产生破坏的严重性^[6],相似模拟试验成为研究突出机理的有效手段。突出模拟相似材料的发展伴随着突出模拟试验的开展,国外学者最早制作了突出模拟相似材料并开展了突出模拟试验,之后伴随突出模拟试验的开展,相似材料的配制得到了快速发展,如2012年波兰自然科学院的Norbert Skoczylas用粉煤制作了直径48 mm、长度110 mm的型煤^[7]。2012年欧建春等采用粒径1 mm以下粉煤添加煤焦油配置成相似材料^[8]。2008—2013年重庆大学利用粉煤添加水压制了系列相似材料^[9-11]。2013年唐巨鹏等采用0.250~0.425 mm(40~60目)粉煤在78 MPa压力下压制成16 cm×16 cm×16 cm的相似模型^[12]。

现有的煤与瓦斯突出相似材料多以粉煤添加胶结剂在一定压力下成型制作,尽管研究成果促进了试验的开展,推动了突出机理的研究进展。但目前突出模拟试验相似材料物理力学指标与原型相似程度较低,致使对突出机理的认识定性研究较多,定量研究较少,因此,需要开展系统性的突出模拟相似材料配比研究。笔者针对大型相似模型制作需要,以水泥、碎煤、沙子、活性炭和水为原材料,设计了相似材料配比方案,研究了相似材料物理力学性质与原材料配比间关系,以便为煤与瓦斯突出模拟相似模型的制作及相似材料的进一步准确配比提供依据。

1 相似指标及原料选择

1.1 相似指标

煤与瓦斯突出相似模拟试验需要遵循相似理论。根据煤与瓦斯突出力学作用机理^[13],突出模拟试验需要满足突出3个阶段的相似性要求。
①突出准备阶段媒体的静态变形与破坏:采掘工作面前方的支承压力区部分媒体发生强度破坏,媒体的变形和破坏是一个准静态过程,该阶段需要满足几何形状、材料性质、载荷、位移约束方面的相似性。
②突出发动和发展阶段含瓦斯媒体的破碎:突出发动和发展阶段是由地应力和瓦斯压力在媒体中孔、裂隙尖端造成拉应力集中而导致媒体的裂隙扩张与贯通及含瓦斯媒体的快速破碎,该阶段需要满足孔隙率、媒体抗拉强度、地应力状态、瓦斯压力以及孔、裂隙的长度等参数的相似性。
③碎煤瓦斯流在采掘空间

中的运动:突出碎煤瓦斯流属于气-固两相流。煤与瓦斯突出具有明显的动力现象和分选性,该阶段要满足几何尺寸、瓦斯赋存参数和瓦斯涌出参数的相似性。

以上参数的相似性要求中,模拟试验的力学参数、孔隙率、瓦斯赋存及涌出等参数的相似性由相似材料的性质所决定。因此,本次突出模拟相似材料配比将以相似材料的单轴抗压强度、弹性模量、密度及吸附解吸性能作为考核指标。

1.2 原料选择

根据现有相似材料研究成果,相似材料原料的选取应符合如下原则:
①满足原型材料有关特征的要求;
②配比比例对相似材料的物理力学指标有较大程度的影响;
③环境安全、来源丰富且成本低;
④材料制作工艺简单且成型速度快等^[4,14]。

相似材料原料一般由骨料、胶结剂和辅料构成。胶结料的力学性质在很大程度上决定了相似材料的力学性质,根据力学性质,相似材料胶结料可分为4类:具有脆性破坏力学特征的无机胶结料、具有弹塑性和塑形变形力学特征的碳氢类石油产品、具有由脆性直至塑形特点的合成树脂、具有脆性破坏力学特征的无机胶结料天然胶质产品。煤体是一种具有一定抗压强度的材料,综合现有突出模拟相似材料成果,为满足大尺寸突出模型制作以及吸附解吸CH₄性能的要求,本次相似材料配比试验选择水泥作为胶结剂,碎煤作为骨料,沙子、活性炭、水作为辅料,见表1。

表1 煤与瓦斯突出模拟相似材料原料

Table 1 Raw materials of similar material for coal and gas outburst simulation

类别	原材料名称	型号/粒级	备注
骨料	碎煤	0.180~0.425 mm、 0.425~0.850 mm	渝阳煤矿 M8 煤层煤样
		425号普通硅酸盐水泥	
胶结剂	沙子	0.425~0.850 mm	河沙
		—	
辅料	活性炭 水	普通自来水	颗粒状
		—	—

2 相似材料配比试验

2.1 相似材料配比试验方案

本次相似材料原料质量配比范围见表2。

水泥比例影响相似材料强度,因此,以不同水泥比例为依据设计了5因素7水平的相似材料质量配比试验方案,见表3。

表2 相似材料原料配比范围

Table 2 Raw material ratio range of similar material

原材料名称	配比范围/%	备注
水泥	7.00~15.43	425号普通硅酸盐水泥
沙子	1.04~6.92	普通河沙、粒级为0.425~0.85 mm
水	7.99~9.54	一般自来水
活性炭	0.74~0.88	约φ2.6 mm×5.6 mm颗粒状
粉煤	70.94~78.16	粒级0.18~0.425 mm、0.425~0.85 mm二者质量比1:1

表3 相似材料质量配比
Table 3 Mass ratio of raw material

配比序号	比例/%				
	水泥	沙子	水	活性炭	煤粉
1	7.00	5.50	8.50	0.84	78.16
2	10.03	3.23	8.02	0.84	77.88
3	11.83	6.92	9.18	0.87	71.21
4	12.92	1.04	9.54	0.88	75.61
5	12.61	4.01	8.27	0.74	74.36
6	15.11	5.14	7.99	0.81	70.94
7	15.43	2.20	8.58	0.85	72.95

2.2 相似材料配比试验及结果分析

按照表3采用TAW-2000微机控制电液伺服岩石三轴试验机,以及内径50 mm、高210 mm的模具进行了相似材料试件的制作,压制压力为25 MPa,稳压时间30 min,每组配比制作1~2个试件,共制作12个相似材料试件,养护成型后对12个相似材料试件进行标准力学试件制作,其外形尺寸为φ50 mm×100 mm。通过相似材料试件称重、力学参数测试,得到了7组共12个相似材料试件的密度、单轴抗压强度、弹性模量等物理力学参数,见表4,相似材料试件的典型应力-应变曲线如图1所示。

3 相似材料物理力学性质分析

3.1 相似材料的强度

在其他条件不变的情况下,胶结材料的比例对相似材料的强度具有重要影响,通过分析表4,可以得到胶结材料比例与相似材料单轴抗压强度关系,如图2所示。从图2可以看出,相似材料的单轴抗压强度随着胶结材料比例的增大而增大,二者呈线性关系,而其他原料与相似材料的单轴抗压强度无显著关系。

表4 相似材料物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of similar material

编号	质量/kg	直径/mm	高度/mm	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	密度/(g·cm ⁻³)
1-1	0.268	49.51	99.48	1.162	113.0	1.399
1-2	0.270	49.53	100.46	1.033	62.1	1.395
2	0.264	49.56	99.99	1.822	238.4	1.369
3-1	0.268	49.55	100.00	1.848	414.4	1.390
3-2	0.270	49.52	100.03	1.782	276.2	1.401
4	0.265	49.58	99.79	1.976	328.0	1.375
5-1	0.270	49.57	99.82	2.456	305.5	1.401
5-2	0.271	49.55	99.90	2.304	267.8	1.406
6-1	0.275	49.55	99.93	2.588	—	1.426
6-2	0.274	49.53	99.95	2.512	—	1.421
7-1	0.272	49.54	99.84	2.675	—	1.411
7-2	0.272	49.54	99.90	2.726	621.2	1.411

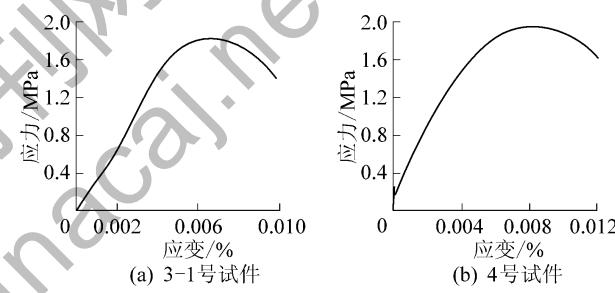


图1 相似材料试件典型应力-应变曲线

Fig. 1 Typical stress-strain curve of similar material samples

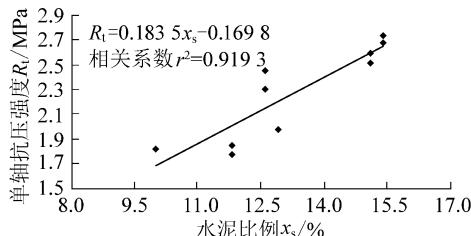


图2 胶结材料比例与相似材料单轴抗压强度关系

Fig. 2 Relationship between the ratio of cementitious material and uniaxial compressive strength of similar material

3.2 相似材料的密度

在相似材料原料中,水泥、沙子的密度大于煤的密度,水泥和沙子所占比例将决定相似材料的密度,根据表4可以得出水泥和沙子比例与相似材料密度的关系,如图3所示。

由表4可知,本次压制的相似材料密度为1.369~1.426 g/cm³,试验所用碎煤煤样取自松藻三联煤业有限公司渝阳煤矿M8煤层,该煤层实测密度为1.34~1.39 g/cm³,因此,所压制的相似材料

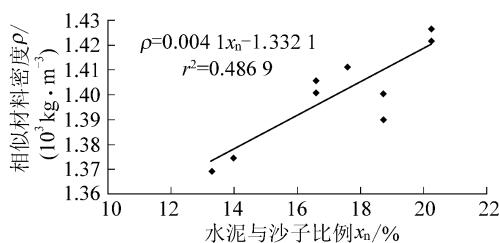


图3 水泥和沙子比例与相似材料密度的关系

Fig. 3 Relationship between the ratio of cement and sand and density of similar material

的密度与原煤的密度具有较好的一致性。

3.3 相似材料的弹性模量

由表4可知,本次压制的相似材料弹性模量为62.1~621.2 MPa。坚硬煤体的弹性模量一般较大,为1~10 GPa,由于突出煤层较软,且含孔隙、裂隙较多,远小于坚硬煤体的弹性模量。根据文献[15]的研究成果,当第三主应力 $\sigma_3=3$ MPa时,煤的弹性模量小于600 MPa。由此可知,在单轴压缩条件下突出煤层的弹性模量数量级小于1 GPa,说明本次试验压制的相似材料与突出煤层的弹性模量数量级相一致。

4 相似材料吸附解吸性能相似性研究

由于瓦斯具有爆炸危险性,目前相似模型几何尺寸较大的突出模拟试验多采用CO₂、N₂等非爆炸性气体作为试验气体。考虑到相似模型的几何尺寸大,试验气体放散量较大,为避免试验气体的爆炸危险性,并弥补相似材料混入非吸附性原料降低的吸附性能,拟开展的煤与瓦斯突出模拟试验采用CO₂作为试验气体,因此,有必要开展相似材料吸附解吸CO₂性能与原煤吸附解吸CH₄性能的相似性研究。根据相关研究,采用Langmuir方程进行高变质煤吸附CO₂的拟合效果较好^[16],因此,笔者采用Langmuir方程描述相似材料对CO₂的吸附。

由表3可知,本次煤与瓦斯突出相似材料配比原材料中,水质量比为7.99%~9.54%、活性炭质量比为0.74%~0.88%,可将水、活性炭对不同配比相似的吸附解吸性能的影响作为定值,因此,影响相似材料吸附解吸性能变化的主要因素为碎煤质量比。根据Langmuir方程,碎煤质量比为70.94%~78.16%时,相同吸附平衡压力条件下,7组配比相似材料吸附瓦斯量最大相差9.1%,因此,可认为本次配比相似材料试件具有相似的吸附解吸性能。

4.1 相似材料吸附性能相似性试验研究

选取1号配比相似材料试件,采用高压容量法测定装置及PCT Pro-evo吸附装置对其吸附CH₄和CO₂等温吸附曲线(图4)进行了测定,该相似材料吸附常数(a b)、灰分、水分、真密度、视密度等参数见表5。

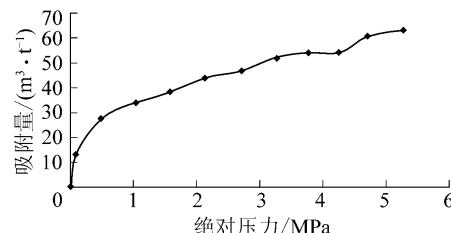
图4 1号配比相似材料试件吸附CO₂等温曲线

Fig. 4 CO₂ isothermal adsorption curve of

No. 1 similar materials sample

表5 1号配比相似材料试件吸附CH₄、CO₂及工业分析结果Table 5 Result of CH₄ and CO₂ adsorption and industrial analysis of No. 1 similar material sample

工业分析/%	真密度	视密度	CH ₄ 吸附常数		CO ₂ 吸附常数	
			M _{ad}	A _d	a	b
4.20	27.30	1.68	1.59	5.36	33.979	1.627
					68.966	1.066

采用HCA型高压容量法测定装置对渝阳煤矿M8煤层煤样CH₄吸附常数(a b)进行了测定,并对灰分、水分、真密度、视密度等参数进行了测定,见表6。

表6 M8煤层煤样CH₄吸附常数、工业分析及孔隙率指标Table 6 CH₄ adsorption constant, industrial analysis and porosity index of M8 coal seam

工业分析/%	真密度	视密度	CH ₄ 吸附常数			
			M _{ad}	A _d	a	b
0.94	16.25	1.51	1.39	7.95	34.025	1.410

按照Langmuir方程计算得到了不同压力下M8煤层煤样吸附CH₄量、1号配比相似材料吸附CH₄和CO₂量曲线,如图5所示。

由图5可以看出,由于相似材料中混入了水泥、沙子、水等非吸附原料,且相似材料水分较大,导致相似材料吸附CH₄能力大幅降低,已无法保持与原煤吸附CH₄的相似性;鉴于煤层CH₄压力在现有开采深度下多低于2 MPa,在CH₄压力低于2 MPa时,原煤吸附CH₄与相似材料吸附CO₂误差最大为

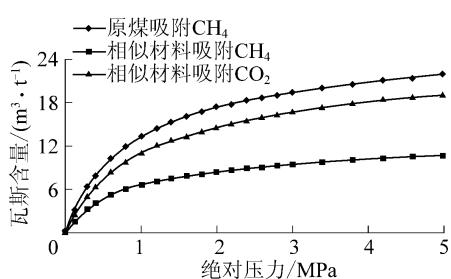


图5 不同压力下M8煤层煤样吸附CH₄、1号配比相似材料吸附CH₄和CO₂曲线

Fig. 5 CH₄ adsorption curve of M8 coal seam sample and CH₄, CO₂ adsorption curves of No. 1 similar material

15.1%, 而原煤吸附CH₄与相似材料吸附CH₄误差最大为51.3%。采用吸附能力更强的CO₂作为试验气体, 可有效弥补相似材料的吸附性能, 相似材料吸附CO₂性能与原煤吸附CH₄具有较好的相似性。

4.2 相似材料解吸性能相似性试验研究

瓦斯放散初速度(Δp)表征了煤解吸瓦斯速度的快慢程度, 采用WFC-2型瓦斯放散初速度指标自动测定仪对M8煤层煤样瓦斯放散初速度以及1号配比相似材料的CH₄、CO₂放散初速度进行了测定, 测定结果见表7。

表7 M8煤层煤样、1号配比相似材料的CH₄和CO₂放散初速度

Table 7 CH₄ and CO₂ initial diffusion speed of M8 coal seam sample and No. 1 similar material

煤样或相似材料	气体放散初速度 Δp	
	CH ₄	CO ₂
M8煤层煤样	22~43	—
1号配比相似材料	23	37

由表7可以看出, 相似材料CO₂的放散初速度为37, 与渝阳煤矿M8煤层煤样的瓦斯放散初速度22~43内, 因此二者具有较好的相似性。

因此, 采用碎煤作为相似材料骨料配制相似材料, 并采用CO₂作为试验气体, 可保证相似材料与原煤吸附解吸性能的相似性。

5 结 论

1) 水泥胶结材料比例与相似材料试件单轴抗压强度呈线性关系: $R_t = 0.1835x_s - 0.1698$, 在水泥比例7.00%~15.43%内所配制的相似材料试件单轴抗压强度为1.033~2.726 MPa。

2) 水泥和沙子密度较大, 相似材料试件密度与水泥、沙子质量之和呈线性关系: $\rho = 0.0067x_n + 1.2839$, 所配制的相似材料试件密度1.369~1.426 g/cm³; 相似材料试件弹性模量62.1~621.2 MPa, 与突出软煤相适应。

3) 通过对渝阳煤矿M8煤层煤样吸附解吸CH₄参数、代表性相似材料分别吸附解吸CH₄和CO₂的参数进行测试, 得到相似材料吸附解吸CO₂性能与原煤吸附解吸CH₄性能具有较好的相似性。

参考文献:

- [1] 刘翼洲, 高春珍. 冷压成型压力和粒度级配对型煤强度的影响[J]. 煤炭加工与综合利用, 1996(4): 68~69.
Liu Yizhou, Gao Chunzhen. Effect of cold press forming pressure and particle size distribution on strength of briquette [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 1996(4): 68~69.
- [2] 王汉鹏, 李术才, 郑学芬等. 地质力学模型试验新技术研究进展及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2765~2771.
Wang Hanpeng, Li Shucai, Zheng Xuefen, et al. Research progress of geomechanical model test with new technology and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2765~2771.
- [3] 王佑安, 杨思敬. 煤和瓦斯突出危险煤层的某些特征[J]. 煤炭学报, 1980, 5(1): 47~53.
Wang Youan, Yang Sijing. Some characteristics of coal seams with hazard of outburst [J]. Journal of China Coal Society, 1980, 5(1): 47~53.
- [4] 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.
- [5] 吴梦军. 隧道工程模型材料研究进展[J]. 公路隧道, 2007(4): 64~67.
Wu Mengjun. Research progress of model material in tunnel engineering [J]. Highway Tunnel, 2007(4): 64~67.
- [6] 高魁, 刘泽功, 刘健等. 构造软煤的物理力学特性及其对煤与瓦斯突出的影响[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(2): 129~133.
Gao Kui, Liu Zegong, Liu Jian, et al. Physical and mechanical characteristics of tectonic soft coal and their effects on coal and gas outburst [J]. Journal of China Safety Science, 2013, 23(2): 129~133.
- [7] Norbert Skoczyłas. Laboratory study of the phenomenon of methane and coal outburst [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, 55: 102~107.
- [8] 欧建春. 煤与瓦斯突出演化过程模拟实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [9] 陶云奇. 含瓦斯煤THM耦合模型及煤与瓦斯突出模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

(下转第145页)

- Xian Xuefu. The further development and application of the mechanics of gas flow in coal seams in China [R]. Chongqing: Chongqing University ,1997: 25–28.
- [6] 吴明铂, 郑经堂, 王茂章, 等. 碳分子筛概述 [J]. 碳素技术, 1997(6): 19–22.
- Wu Mingbo, Zheng Jingtang, Wang Maozhang, et al. General report on CMS [J]. Carbon Techniques, 1997(6): 19–22.
- [7] 郭璞, 李明. 煤层气中 CH_4/N_2 分离工艺研究进展 [J]. 化工进展, 2008, 27(7): 963–965.
- Guo Pu, Li Ming. Research progress of separation of CH_4/N_2 in coal-bed methane [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(7): 963–965.
- [8] Olajossy A, Gawdzik A, Budner Z, et al. Methane separation from coal mine methane gas by vacuum pressure swing adsorption [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2003, 81(4): 474–476.
- [9] 张进华, 梁大明, 李兰廷. 煤基碳分子筛的研究进展及应用现状 [J]. 洁净煤技术, 2010, 16(5): 53–55.
- Zhang Jinhua, Liang Daming, Li Lanting. Preparation of coal-based carbon molecular sieve and its application effects in CH_4/N_2 Separation [J]. Clean Coal Technology, 2010, 16(5): 53–55.
- [10] 壬敏. 提高抽放煤层气中甲烷浓度的变压吸附基础研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2000: 10–30.
- Gu Min. Study on pressure swing adsorption for increasing the concentration of extracted coalbed methane [D]. Chongqing: Chongqing university, 2000: 10–30.
- [11] Cavenati S, Grande C A, Rodrigues A E. Layered pressure swing adsorption for methane recovery from $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{N}_2$ streams [J]. Adsorption, 2005, 11(1): 549–554.
- [12] 梁大明. 煤基炭材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 30–62.
- Liang Daming. Coal-based carbon materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 30–62.
- [13] 张艳, 尤隆渤, 胡浩权. 酚醛树脂基碳分子筛的研究 [J]. 新型炭材料, 2000, 15(3): 55–57.
- Zhang Yan, You Longbo, Hu Haoquan. Study on molecular sieves from phenol-formaldehyde resin [J]. New Carbon Materials, 2000, 15(3): 55–57.
- [14] 叶振华. 化工吸附分离过程 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1992: 286–307.
- Ye Zhenhua. Process of chemical adsorption separation [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1992: 286–307.
- [15] 董卫果. 沉积温度对 CH_4/N_2 分离用碳分子筛性能的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 112–115.
- Dong Weiguo. Deposition temperature affected to performance of carbon molecular sieve applied to CH_4/N_2 separation [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 112–115.
- [16] Cui Xiaojun, Bustin R M, Dipple G. Selective transport of CO_2 , CH_4 and N_2 in coals insights from modeling of experimental gas adsorption data [J]. Fuel, 2004, 83(3): 294–304.
- [17] 孙培德. 煤与甲烷气体相互作用机理的研究 [J]. 煤, 2000, 9(1): 18–21.
- Sun Peide. Study on the mechanism of interaction for coal and methane gas [J]. Coal, 2000, 9(1): 18–21.
- [18] 张薄, 壬敏, 鲜学福. 碳分子筛的结构和表面性质对其吸附分离 CH_4/N_2 和 CO_2/N_2 的影响 [J]. 功能材料, 2012, 43(20): 2860–2861.
- Zhang Bo, Gu Min, Xian Xuefu. Effects of structure and surface on adsorptive separation of carbon molecular sieve for CH_4/N_2 and CO_2/N_2 [J]. Functional Materials, 2012, 43(20): 2860–2861.
- [19] 刘利恒, 壬敏, 鲜学福, 等. 粘结剂对颗粒活性炭 PSA 分离 CH_4/N_2 性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2011, 25(3): 250–254.
- Liu Liheng, Gu Min, Xian Xuefu, et al. Effect of binders on CH_4/N_2 performances of granular activated carbons by pressure swing adsorption [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2011, 25(3): 250–254.

(上接第 80 页)

- [10] 许江, 刘东, 尹光志, 等. 非均布荷载条件下煤与瓦斯突出模拟实验 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 836–842.
- Xu Jiang, Liu Dong, Yin Guangzhi, et al. Simulation experiment of coal and gas outburst under non-uniform load [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 836–842.
- [11] 刘东, 许江, 尹光志, 等. 多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统研制与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 966–975.
- Liu Dong, Xu Jiang, Yin Guangzhi, et al. Development and application of multifield coupling testing system for dynamic disaster in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 966–975.
- [12] 唐巨鹏, 潘一山, 杨森林. 三维应力下煤与瓦斯突出模拟试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 960–965.
- Tang Jupeng, Pan Yishan, Yang Senlin. Experimental study of coal

- and gas outburst under tridimensional stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 960–965.
- [13] 胡千庭, 文光才. 煤与瓦斯突出的力学作用机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] 吴俊. 突出煤的显微结构及表面特征研究 [J]. 煤炭学报, 1987(2): 40–46.
- Wu Jun. Study micro-structure and surface features of coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 1987(2): 40–46.
- [15] 梁冰, 章梦涛, 潘一山, 等. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应影响的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 12–18.
- Liang Bing, Zhang Mengtao, Pan Yishan, et al. The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1995, 17(5): 12–18.
- [16] 崔永君. 煤对 $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{CO}_2$ 及多组分气体吸附的研究 [D]. 西安: 煤炭科学研究院西安分院, 2003.