

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0277-06

# 仿制构造煤的初始释放瓦斯膨胀能特性研究

王浩, 蒋承林, 杨飞龙

(中国矿业大学安全工程学院, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 通过理论分析及采用一定破碎程度的非构造煤来仿制构造煤试验, 研究仿制构造煤在初始释放瓦斯膨胀能方面的特征, 并探讨其用于鉴定煤层突出危险性的可行性。试验结果表明: 在瓦斯解吸的初始阶段, 构造煤与仿制构造煤的瓦斯压力、瓦斯放散量、膨胀能均以负指数规律衰减, 且在 1000 ms 之后就基本维持恒定值, 并且膨胀能在超临界压力下的衰减速度小于亚临界状态下的衰减速度, 衰减曲线在临界压力处产生拐点。相同破碎程度的仿制构造煤与构造煤的初始释放瓦斯膨胀能表现基本一致, 这对解决煤层的突出危险性鉴定过程中, 由于无法采集或不易采集到那些导致突出的构造煤煤样而采用非构造煤样做出判断失实的问题, 有着十分重要的意义。

**关键词** 初始释放瓦斯膨胀能; 仿制构造煤; 突出

**中图分类号** TD 353 **文献标识码** A

## Study on the Initial Released Gas Expansion Energy Property of Imitation Tectonic Coal

WANG Hao, JIANG Cheng-lin, YANG Fei-long

(Faculty of Safety Engineering, State Key Laboratory of Coal Resources and Mining safe Mining,  
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** Through theoretical analysis and the trial of imitation tectonic coal which is made of certain fragmentation degrees of non-tectonic coal, the thesis studies on the Initial Released Gas Expansion Energy Property of Imitation Tectonic Coal and discusses the possibility of taking the place of tectonic coal with imitation tectonic coal. The result of lab test proves that gas pressure, gas released volume and expansion energy of initial released gas of both tectonic coal and imitation tectonic coal all keep consistent with negative exponent curve. They stand still 1 000 ms later while cumulative volume of released gas is increasing continuously, and decay rate of expansion energy in the super critical state is smaller than that in the subcritical state. At the same time there is an inflection point at critical pressure. Expansion energy of initial released gas of imitation tectonic coal which has the same fragmentation degree as tectonic coal is equal to that of tectonic coal approximately. It is very significant to solve the problem of making wrong determination using non-tectonic coal instead of tectonic coal in coal and gas outburst identification, which caused by the difficulty of collecting tectonic coal.

**Key words** expansion energy of initial released gas; imitation tectonic coal; outburst

收稿日期: 2011-07-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB202204-3)

作者简介: 王浩(1988-), 男, 山西省长治市人, 研究生, 从事煤矿安全工程方面的研究。

Email: herohao\_cumt@163.com

Tel: 13852044136

煤层的突出危险性鉴定是指根据一定区域内的煤层是否发生过瓦斯动力现象或测定的突出参数是否超标来判断该煤层是否为突出煤层的<sup>[1]</sup>。其中,后者应用于大部分煤层的实际鉴定过程中。鉴定要求是测得该煤层的最大瓦斯压力,采集到最软的煤样,并根据这些最软煤样在最危险的条件下是否突出来鉴定该煤层是否为突出煤层。但是,由于煤层是一种严重非均质的介质,而煤层的突出鉴定是某个时期内进行的工作,在突出鉴定过程中,有时暴露的煤层面积有限,与突出密切相关的构造煤<sup>[2-4]</sup>不一定能暴露,这就给构造煤样的取样工作带来麻烦,导致鉴定不准确等现象,甚至造成重大事故和无法挽回的损失。如淮北的卧龙湖煤矿,在突出鉴定工作期间,现场只能找到硬煤(非构造煤),坚固性系数达到 1.396 7~1.675 1,但是在后续的掘进过程中,却出现了突出现象<sup>[5]</sup>,引起突出的就是在鉴定工作时尚未暴露的构造煤。因此,在煤层的突出鉴定过程中,如何处理当在鉴定现场内一时取不到构造煤而无法准确判断煤层突出危险性的问题至今尚未解决,尤其对于那些鉴定煤层范围较大的矿井,解决该问题则有着十分重要的意义。

## 1 实验设计

### 1.1 煤样选取

由原生煤和构造煤的形成过程<sup>[6-7]</sup>可知,构造煤与原生煤最大的区别在于煤化作用阶段压力、温度以及二者作用的时间不同。构造应力主要作用于成岩阶段,它的扰动改变了煤的结构。温度主要在变质作用阶段发生作用,由于温度的异常升高源于在构造应力作用下内摩擦产生的热量,因此温度升高有限,作用的范围有限,在构造应力作用面附近的构造煤的变质程度比原生煤的变质程度略高,但是范围非常有限。也就是说构造煤与非构造煤在变质程度上是基本相同的,二者的区别主要在结构上。

本文采用一定破碎程度的非构造煤来仿制构造煤试验,研究仿制构造煤在初始释放瓦斯膨胀能方面的特征,并探讨其用来判断煤层的突出危险性的可行性。本文试验的煤样应选择同一矿区、同一煤层的构造煤与非构造煤。试验的煤样均选自贵州黄家山煤矿 C201 煤层,该煤层的构造煤和非构造煤如图 1 所示。

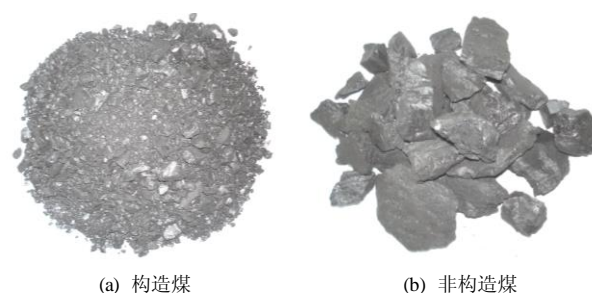


图 1 黄家山煤样

Fig.1 Coal samples of huangjiashan

### 1.2 煤样的制备

要从破碎程度上仿制构造煤,最接近的方法就是使仿制构造煤和构造煤的粒径分布完全相同,在此通过拓展细度模数的定义来仿制构造煤,能够有效避免粒径对膨胀能的影响。

煤样的筛分就是把煤样依次通过标准的实验筛,并记下各筛的筛下量和筛余量。煤样的筛分是进行煤屑破碎程度量化评价和仿制构造煤的前提条件。为保证筛分结果的可靠性、重复性和精确性,筛分的过程应该规范、标准,具体要求如下所示:

1) 分样筛和天平的准备。孔径为 0.080, 0.160, 0.315, 0.630, 1.250, 2.500, 5.000, 10.000 mm 的试样筛各一个,筛框直径为 300 mm 或 200 mm。其产品质量应符合现行国家标准《金属丝编织网试验筛》GB/T6003.1 和《金属穿孔板试验筛》GB/T6003.2 的要求<sup>[8]</sup>。

2) 准确称取烘干试样 500 g,置于按筛孔大小顺序排列(大孔在上、小孔在下)的套筛的最上一只筛(公称直径为 10.00 mm 的方孔筛)上;将套筛装入摇筛机内固筛,筛分 10 min;然后取出套筛,再按筛孔由大到小的顺序,在清洁的浅盘上逐一进行手筛,直至每分钟的筛出量不超过试样总量的 0.1% 时为止;通过的颗粒并入下一只筛子,并和下一只筛子中的试样一起进行手筛,按这样的顺序依次进行,直至所有的筛子全部筛完为止。

3) 试样在各只筛子上的筛余量均不超过下式计算出的剩余量。

$$m_r = \frac{A\sqrt{d}}{300} \quad (1)$$

式中:  $m_r$  为某一筛上的剩留量, g;  $d$  为筛孔边长, mm;  $A$  为筛的面积,  $\text{mm}^2$ 。

2 初始释放瓦斯膨胀能简介

测定初始释放瓦斯膨胀能的中心思想是：把煤样抽真空后还原到原始煤层的瓦斯压力下，让其充分吸附后，模拟理想石门揭煤的过程，突然让煤样暴露到大气条件下，测定从煤样中释放出的瓦斯流的能量<sup>[9]</sup>。为方便测定瓦斯流的状态参数（压力、速度、温度等），设计一个渐缩形状的喷口让瓦斯从中流过。渐缩管可使气流速度变大，通常喷管又比较短，流速比较高，流体来不及和外界环境进行热交换，因而气体通过渐缩管可以认为是绝热过程<sup>[10]</sup>，从而为简化测量、计算带来了方便。

本文所做膨胀能实验的装置均采用 JC-4 型初始释放瓦斯膨胀能测定装置（见图 2a），数据采集系统由一台电脑主机和显示器组成（见图 2b），电脑内装有专用相关数据采集处理软件。

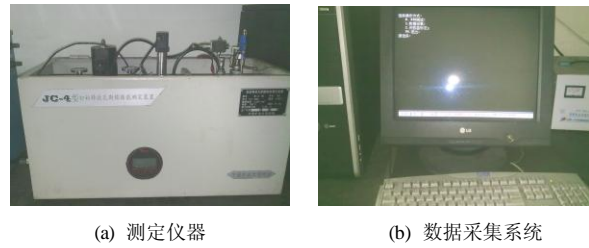
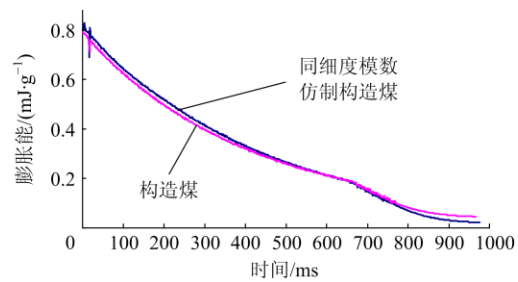


图 2 JC-4 型初始释放瓦斯膨胀能测定装置  
Fig.2 Measurement equipment of initial released gas expansion energy (JC-4)



(a) 仿制构造煤与构造煤细度模数相同

3 仿制构造煤的初始释放瓦斯膨胀能特性分析

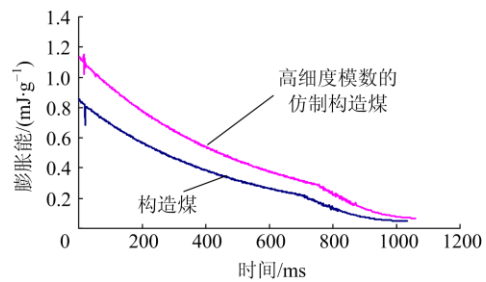
3.1 仿制构造煤的能量耗散规律

初始释放瓦斯膨胀能是煤屑解吸初期所释放出来的动能，它与解吸出来的瓦斯质量和瓦斯流速紧密相关，即与瓦斯的流量和出口压力有关。把测得的压力数据经过数据处理可得相应的能量衰减曲线。由于不同煤样不同压力下的曲线形态比较一致，限于篇幅只选择了一个压力下的图形。

1) 仿制构造煤与构造煤的细度模数相同时

黄家山煤样的膨胀能衰减曲线如图 3 所示。从曲线形态来看，构造煤和同细度模数的仿制构造煤的一致性仍然比较高，在曲线上都存在一个拐点，拐点之前的衰减速度要小于拐点之后的衰减速度。之所以会出现拐点是因为在超临界和亚临界状态下膨胀能的计算方法是有所区别的，对应压力衰减曲线可知拐点处对应的压力约为 0.183 4 MPa，这恰好是临界压力。

黄家山煤样中同细度模数的仿制构造煤的膨胀能衰减速度略微慢于构造煤，导致累计的初始释放瓦斯膨胀能要略微大于构造煤。但是在不同的压力下表现出的规律不尽相同。



(b) 仿制构造煤煤细度模数高于构造煤

图 3 黄家山煤样膨胀能衰减曲线

Fig.3 Gas discharge curve of Huangjiashan tectonic coal

数据拟合的结果如表 1 所示，由于曲线中拐点的存在，数据拟合的相关度（约 95%）要小于压力衰减和流量衰减的相关度（>99%）。拟合的公式从形式上符合负指数规律，如式 2 所示。由于拟合的相关度比较低，单从指数难以判断二者的衰减速度大小。

$$E = E_1 e^{-\alpha t} \tag{2}$$

式中： $E_1$  为初时刻的瓦斯压力，mJ； $E$  为任一时刻

的瓦斯压力，mJ； $\alpha$  为系数，通过实验求得； $t$  为解吸时间，ms。

表 1 膨胀能曲线拟合结果一览表

Table 1 Expansion energy curve fitting results list			
煤种	类别	方程	R 平方值
黄家山 C201 煤样	构造煤	$E = 0.9093e^{-0.0028t}$	0.9541
	仿制构造煤	$E = 1.0526e^{-0.0032t}$	0.9045

2) 仿制构造煤的细度模数高于构造煤时

图 3b 是采用黄家山煤样的仿制构造煤（细度模数为 4.21）在压力为 0.6 MPa 时的膨胀能衰减曲线。仿制构造煤的能量整体上明显大于构造煤，且仿制构造煤的拐点晚于构造煤。累计的初始释放瓦斯膨胀能将明显大于构造煤。数据拟合的结果如表 2 所示。构造煤的衰减趋势要略小于仿制构造煤。

表 2 膨胀能曲线拟合结果一览表  
Table 2 Expansion energy curve fitting results list

煤种	类别	方程	R 平方值
黄家山 C201 煤样	构造煤	$E = 0.9964e^{-0.0025t}$	0.9405
	仿制构造煤	$E = 1.3118e^{-0.0023t}$	0.9305

总之仿制构造煤的膨胀能衰减要慢于构造煤的衰减趋势，但是两者相差不大。其原因可能是衰减区间比较大，衰减的时间比较长以及实验本身的局限所致。

3.2 仿制构造煤的能量大小

仿制构造煤与构造煤的耗散规律反映的是二者的细节差异，但是一定数值的能量才是真正导致煤与瓦斯突出的根源<sup>[11]</sup>。耗散规律反映的是 1000 ms 的能量特征，这部分能量占总能量的 98% 以上；此后解吸进入到低压段，对应的能量大约在  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  mJ/s 左右，但是构造煤的数据采集时间一般比仿制构造煤的长，由于采集的次数比较多还是对结果还是有细微的影响。从能量的大小来考虑仿制构造煤的初始释放瓦斯膨胀能，不仅能够避免上述误差，而且能更加全面的反映这种煤的突出危险性。

1) 和构造煤细度模数相等的仿制构造煤

本次试验所用的仿制构造煤是按照构造煤的不同筛分区间将相同细度模数的非构造煤混合而成的。为了反映同细度模数的仿制构造煤与非构造煤在初始释放瓦斯膨胀能指标大小的区别，每个煤样分别做 5 个压力下的膨胀能测定，结果如表 3 所示，根据表格生成的图如图 4 所示。从图形来看，在各压力点仿制构造煤与构造煤的初始释放瓦斯膨胀能基本持平，压力越大误差越小。当压力较小时，仿制构造煤的膨胀能要小于构造煤的膨胀能；压力较大时仿制构造煤的膨胀能逐渐大于构造煤的膨胀能，而且两者之间的误差也越来越小。当压力大于转折点 0.65 MPa 后仿制构造煤的膨胀能要略微大于构造煤的膨胀能，但是都小

于 5% 的工程误差，如表 3 所示。也就是说用和构造煤相同质量比的非构造煤仿制成的构造煤在初始释放瓦斯膨胀能方面和真正的构造煤有相似的性质。

表 3 黄家山矿仿制构造煤与构造煤的初始释放瓦斯膨胀能对比

Table 3 Comparison of expansion energy of initial released gas between tectonic coal and imitation tectonic coal from Huangjiashan coal mine

类别 压力/MPa	构造煤/ (mJ g <sup>-1</sup> )	仿制构造煤/ (mJ g <sup>-1</sup> )	误差/%
0.30	34.158	30.821	-9.76931
0.50	54.120	51.698	-4.47524
0.74	79.548	80.543	1.250817
1.00	104.415	107.632	3.080975
1.20	125.782	131.447	4.503824

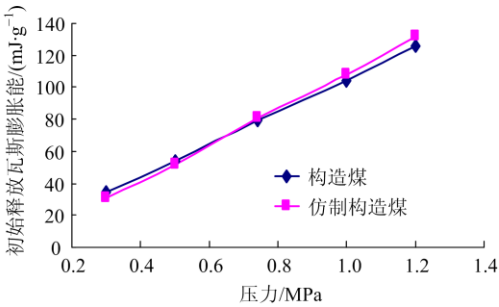


图 4 黄家山矿仿制构造煤与构造煤膨胀能对比图  
Fig.4 Comparison chart of Huangjiashan imitation tectonic coal and tectonic coal expansion energy of initial released gas

2) 细度模数大于构造煤的仿制构造煤

如果一个煤层的瓦斯压力比较大，接近（或略微大于）0.74 MPa 的临界点，而能取到的煤本身又比较硬，坚固性系数和煤的破坏类型达不到突出鉴定的临界值，但是里面又有存在构造煤的可能，此时如果依据突出鉴定规范认为该煤层没有突出危险性，则是相当危险的，一旦遇到构造煤，突出的可能性就大大增加；如果判断为有突出危险性，又显得证据不足。这时候，如果能够采集并仿制构造煤，上面的问题即可迎刃而解。

但是不同种类构造煤的破碎程度是不一样的。如果能够找到很多符合本实验要求的煤样，那么通过统计分析找出一般构造煤不同粒径的分布状态，进而可为仿制构造煤的配比提供依据。但是本论文所需要的煤样选取比较困难，短期内难以采集到足够的煤样。由于突出鉴定往往都是从最危险的角度去判断，所以在煤样不足、无法



得出通用的构造煤配比的情况下，以典型构造煤样的粒度分布来仿制构造煤，用以判断该煤层的突出危险性也是基本可行的。

本文所做对比试验采用的薛湖二<sub>2</sub>煤层煤样是经事实验证为突出的构造煤煤样，且非构造煤赋存较广，一般难以发现构造煤，它是非常典型的坚硬煤层中的构造煤样。因此以薛湖构造煤的粒径分布规律来配制黄家山煤样的仿制构造煤，分别做 0.30, 0.50, 0.74, 1.00, 1.20 MPa 5 个压力下的膨胀能试验来做对比分析，2 矿构造煤粒径分布见表 4 和图 5。

表 4 两矿构造煤粒径对比表

Table 4 Comparison table of two tectonic duff size

粒径/mm	< 0.08	0.08~0.16	0.16~0.32	0.32~0.63	0.63~1.25	1.25~2.50	2.50~5.00	5.00~10.00	> 10
薛湖二 <sub>2</sub> 煤层	7.14	14.92	15.11	16.06	13.25	14.74	11.56	5.86	1.36
黄家山 C201 煤层	3.57	3.89	5.69	10.13	10.83	16.95	19.99	20.22	8.73

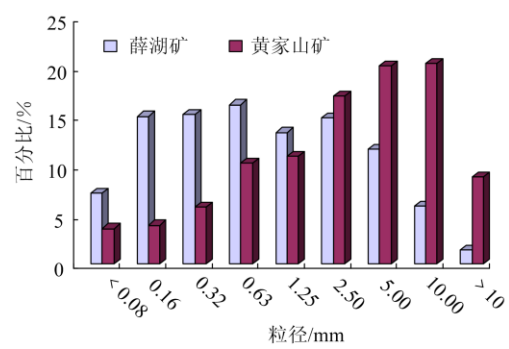


图 5 黄家山矿、薛湖矿构造煤粒径分布对比  
Fig.5 Comparison of tectonic duff size distribution

实验结果如表 5 和图 6 所示。构造煤和非构造煤在不同的压力下均呈线性，但是仿制构造煤的斜率大于构造煤的斜率。在压力为 0.3 MPa 时，以薛湖粒径分布制成的仿制构造煤与以黄家山粒径分布制成的仿制构造煤的膨胀能基本一致，前者为 30.821(mJ g<sup>-1</sup>)后者为 30.759(mJ g<sup>-1</sup>)。此后随着压力的增大，仿制构造煤的膨胀能越来越大大于构造煤的膨胀能，两者之间的最大相对误差达到了 28.41%。由此可见，无论是选用相同细度模数的模式还是选用典型构造煤的配比模式制成的仿制构造煤，所测定的膨胀能随着压力的增加，都有比原构造煤对应的膨胀能大的趋势。其原因在于前 1 000 ms 构造煤的压力、能量衰减比较缓，非构造煤（仿制构造煤）的能量衰减比较急，而膨胀能

又主要集中在前 1 000 ms 内。因此随着压力的升高，前期积聚的能量也越多。从突出判定的角度而言，仿制构造煤用来判定不突出的可能性要高于用来判断突出的可能性，如果一个煤层的仿制构造煤的膨胀能未达到突出标准，那么整个煤层发生突出的可能性就比较小。

表 5 黄家山矿仿制构造煤与构造煤的初始释放瓦斯膨胀能对比

Table 5 Comparison of expansion energy of initial released gas of Huangjiaoshan imitation tectonic coal and tectonic coal

压力/MPa	类别	构造煤/(mJ g <sup>-1</sup> )	仿制构造煤/(mJ g <sup>-1</sup> )	误差/%
0.30		34.158	30.75896	-9.95092
0.50		54.120	64.37547	18.94951
0.74		79.548	102.1443	28.40585
1.00		104.415	143.273	37.21496
1.20		125.782	176.547	40.35951

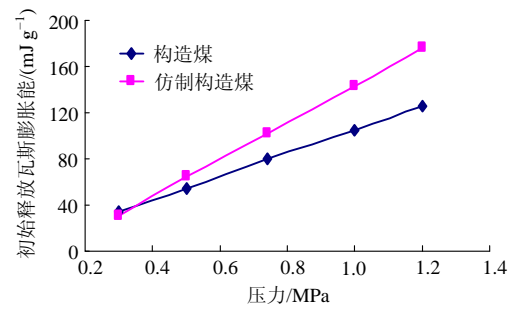


图 6 黄家山矿仿制构造煤与构造煤膨胀能对比图  
Fig.6 Comparison chart of Huangjiaoshan imitation tectonic coal and tectonic coal expansion energy of initial released gas

通过实验研究了和构造煤的粒径分布一致的仿制构造煤在瓦斯压力衰减特征、瓦斯放散量特征和初始释放瓦斯膨胀能的放散特征，他们的耗散规律服从负指数规律，如下式所示。压力和流量衰减曲线的拟合精度都在 99% 以上，膨胀能的衰减曲线由于超临界状态和亚临界状态的衰减速度不一样，因而拟合精度要低些，约在 95% 左右。无论是那种指标，仿制构造煤的衰减指数 $n$ 与构造煤都比较接近。

$$Y = Y_1 e^{-at}$$

(3)

式中： $Y_1$  为初时刻的瓦斯压力、瓦斯放散量、膨胀能等指标； $Y$  为任一时刻的瓦斯压力、瓦斯放散量、膨胀能等指标； $a$  为系数，通过实验求得； $t$  为解吸时间，ms。

## 4 结 论

本文主要针对本身已证明存在构造煤并且属于突出煤层,但是在判断时由于煤层暴露面有限无法采集到比较松软的构造煤样而造成判断错误这一典型情况,探讨用同一煤层一定破碎程度的非构造煤(硬煤)的初始释放瓦斯膨胀能指标来判断突出的可行性。本文从分析构造煤、非构造煤的形成过程以及通过试验分析不同煤样的压力、瓦斯放散量、膨胀能的衰减特性以及膨胀能的对比入手,取得了以下主要结论:

1) 构造煤与非构造煤在成煤环境、成煤过程上是相同的。由于大部分构造运动比较缓慢,因构造运动产生内摩擦热导致的温度升高有限,所以构造煤的性质与非构造煤没有明显差别。这为仿制构造煤提供了理论前提。

2) 无论是仿制构造煤还是构造煤的压力衰减特性、瓦斯放散特性还是膨胀能衰减特性基本保持一致,数据拟合表现出良好的负指数规律。膨胀能在超临界和亚临界的衰减速度不一致,因而在图形上表现出一个拐点,呈现先慢后快的特征。

3) 仿制构造煤和构造煤的膨胀能都随瓦斯压力的升高而升高并呈线性相关,但是不同煤种、不同配比的仿制构造煤的斜率各不相同;随着压力的升高,仿制构造煤的膨胀能有大于构造煤膨胀能的趋势。相同细度模数的仿制构造煤与对应的构造煤的膨胀能一致性比较好,误差小于 5% 的工程误差;采用薛湖构造煤粒径分布来配制(细度模数为 4.21)黄家山煤样的仿制构造煤的膨胀能在压力较低时与构造煤吻合比较好,随着压力的升高,误差也越来越大。

4) 用仿制构造煤的初始释放瓦斯膨胀能来判断煤层的突出危险性,判定为不突出的准确性要高于判定为突出的准确性。

虽然和原构造煤一致的粒径分布的仿制构造煤的初始释放瓦斯膨胀能与构造煤的初始释放瓦斯膨胀能吻合的比较好,但是在没有找到构造煤时,这个粒径分布(即细度模数)是无法得到的。从最危险的角度考虑,以典型构造煤的细度模数配制的仿制构造煤在判定为不突出时较为可信,判断结果为突出时则准确性不高。其主要原因是可供本研究的煤样数量比较少,缺少一个广泛的有普遍意

义的粒径分布,这也是今后研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 国家安全生产监督总局.《煤与瓦斯突出矿井鉴定规范》(AQ1024-2006)[S]. 北京:煤炭工业出版社, 2006.
- [2] 刘明举, 龙威成. 构造煤对突出的控制作用及其临界值的探讨[J]. 煤矿安全, 2006, 37(10): 45-46.  
LIU Ming-ju, LONG Wei-cheng. Controlling action of tectonic coal to outburst and probing into its critical Value[J]. Safety in Coal Mines, 2006, 37(10): 45-46.
- [3] 郝吉生, 袁崇孚. 构造煤及其对煤与瓦斯突出的控制作用[J]. 焦作工学院学报: 自然科学版, 2000, 19(6): 403-406.  
HAO Ji-sheng, YUAN Chong-fu. The tectonic coal and its effects on coal and gas outburst[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology: Natural Science, 2000, 19(6): 403-406.
- [4] 姜波, 秦勇. 构造煤化学结构演化与瓦斯特性耦合机理[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学), 2009, 16(2): 263-269.  
JIANG Bo, QIN Yong. The coupling mechanism of the evolution of chemical structure with the characteristics of gas of tectonic coals[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 263-269.
- [5] 焦殿, 刘双跃. 卧龙湖煤矿煤层突出原因及其防治技术研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(5): 148-149.  
JIAO Dian, LIU Shuang-yue. Research on the reasons of coal overhang of Wolonghu coal mine and the preventing technique[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(5): 148-149.
- [6] 杨起, 韩德馨. 中国煤田地质学(上册)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1979.
- [7] 孙平. 煤田地质与勘探[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [8] 中华人民共和国建设部.《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ/52-2006)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [9] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [10] 陈卓如. 工程流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [11] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出过程中能量耗散规律的研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 177-178.  
JIANG Cheng-lin, YU Qi-xiang. Rules of energy dissipation in coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2): 177-178.