

文章编号: 1673-3363-(2013)04-0605-05

# 揭煤突出模拟试验的相似条件研究

陈裕佳<sup>1,2</sup>, 蒋承林<sup>1,2</sup>, 吴爱军<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要** 为解决石门揭煤突出危险性预测指标现场检验的困难, 在对相似理论进行研究的基础上, 针对突出发生的力学条件, 采用因次分析的方法, 对实验室进行突出模拟试验与现场相似的条件进行了分析。据此设计了实验室的突出模拟试验装置。通过在该装置上施加与现场相近的地应力、瓦斯压力进行了突出模拟试验, 并在相同条件下对各石门揭煤突出危险性预测指标进行了测定, 研究了使用各指标进行预测的准确性。为石门及井筒揭煤突出危险性预测指标的实验室检验创造了条件。

**关键词** 突出模拟; 力学条件; 相似; 检验

**中图分类号** TD 713

**文献标志码** A

## Similar conditions of outburst simulation test for rock cross-cut coal uncovering

CHEN Yu-jia<sup>1,2</sup>, JIANG Cheng-lin<sup>1,2</sup>, WU Ai-jun<sup>3</sup>

(1. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

**Abstract** In this paper, to solve the field inspection difficulties for outburst prediction indicators in rock cross-cut coal uncovering, on the basis of similarity theory and the mechanics condition of outburst, the similar conditions of outburst simulation test in laboratory was analyzed by using dimensional analysis method, and the testing equipment for outburst simulation were designed. By applying similar ground stress and gas pressure on the equipment, the outburst simulation test was conducted. Moreover, all the outburst prediction indexes for rock cross-cut coal uncovering were tested under the same condition, and the accuracy of each prediction index was studied. The study in this paper produces conditions for the laboratory examination of outburst prediction indexes in both rock cross-cut and shaft coal uncovering.

**Key words** outburst simulation; mechanics condition; similarity; test

煤与瓦斯突出是煤矿井下发生的、严重威胁煤矿安全的灾害事故。由于其发生的突然性和产生破坏的严重性, 它一直是煤矿安全科学研究的重点。

实验室的突出模拟试验是对石门揭煤突出危险性进行预测和效果检验研究的有效途径, 兼顾了检验的安全性和经济性。但是, 如何才能保证实验室的

收稿日期: 2012-02-13

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: 陈裕佳(1983-), 男, 湖北省钟祥市人, 讲师, 博士, 从事煤与瓦斯突出预测及防治方面的研究。

E-mail: 13813485483@163.com

Tel: 0516-85111975

突出模拟与现场实际的石门揭煤过程保持最大程度的相似? 它们的预测指标能否通用? 这些都是在进行突出模拟试验之前必须要考虑的问题。而上述问题的关键就是研究这2个过程是否相似。本文就将以相似理论为基础, 使用因次分析的方法, 对现有实验室条件下的突出模拟试验与现场的相似性进行研究, 为相似试验设计创造条件<sup>[2]</sup>。

## 1 相似理论及要求

相似模拟试验是以相似理论为基础, 模型试验技术, 是利用事物或现象间存在的相似和类似等特征来研究自然规律的一种方法。对于一个复杂的过程, 要使模型和原型完全满足相似定理的要求是相当困难, 甚至不可能的。这时可根据研究对象的主要特征, 合理选取那些对现象影响重大的因素, 抓住现象的主要矛盾, 略去次要因素, 使得模拟研究得以实现, 这就是所谓的“近似模化”。近似模化能否成功, 主要取决于影响因素的选择<sup>[3]</sup>。

对于此种试验, 它包含了突出煤层的制备、打钻取样, 然后在与取样相同的条件下制备煤层并进行突出模拟试验, 并通过对所取煤样进行相关参数测定, 对现有的突出预测方法和指标进行研究比较。即试验的目的是通过突出模拟试验对现有的石门及井筒揭煤突出危险性预测方法进行研究, 可根据相似理论, 采用因次分析的方法, 从突出发生的力学条件出发对突出过程进行分析, 说明其相似条件, 为相似试验设计创造条件。

## 2 突出发生的力学条件

根据对突出机理的研究, 认为突出的发生需要以下几个条件: 首先含瓦斯的煤体能在地应力的作用下发生破坏; 然后, 煤体中的裂隙能在其中瓦斯压力的作用下发生扩展; 最后, 裂纹切割形成的煤壳能在裂缝内瓦斯压力的作用下发生失稳破坏。上述3个力学条件中的前2个条件可用下式表达<sup>[4-5]</sup>:

$$\sigma_{\theta} \geq \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} \sigma_r + \frac{2K \cos \varphi}{1-\sin \varphi} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_r$  为应力峰处的切向应力、径向应力, MPa;  $\varphi$  为含瓦斯煤体的摩擦角, ( $^{\circ}$ );  $K$  为含瓦斯煤体的内聚力, MPa。

$$p_{if} - p_2 \geq M_1 \frac{K_{lc} \sqrt{\pi}}{2\eta \sqrt{a}} \quad (2)$$

式中:  $p_{if}$  为圆盘形裂纹中积聚的瓦斯压力, MPa;  $p_2$  为巷道中的大气压力, MPa;  $K_{lc}$  为煤体的断裂

韧性,  $\text{MN/m}^{1.5}$ ;  $a$  为圆盘形裂纹的半径, m;  $\eta$  为周围裂纹的影响系数;  $M_1$  为随  $a/H$  增加而增大的影响系数;  $H$  为裂纹距暴露表面的深度, m。

第3个力学条件则相对较复杂, 它也是突出最终能否发生的关键, 其求解过程如下:

### 1) 模型建立和基本假设

煤与瓦斯突出是含瓦斯的软煤中发生的一种动力现象<sup>[6]</sup>。在突出过程中, 煤和瓦斯不断地由暴露面向巷道空间抛出, 突出阵面不断向前移动, 推动地应力峰移向煤体深部。通过用理想模型的方法进行简化分析和论证, 可得到突出过程中突出阵面前方的静态应力场, 如图1所示。

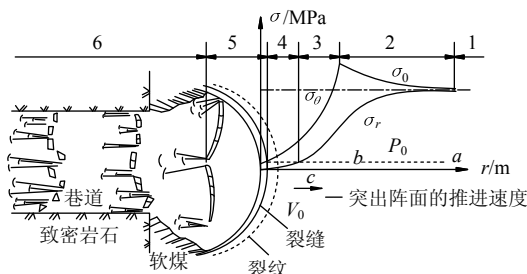


图1 突出过程中的静态应力场

Fig.1 Static stress field in the process of outburst

针对这样突出模型抽象出单一剥离的煤球壳。球壳内受到瓦斯压力均匀作用, 球壳外受到巷道大气压力的作用, 球壳边沿因受到周边煤壁的约束, 所以为固支约束。为了理想化模型, 作以下基本假设:

- ① 软煤被高压瓦斯撕裂成完整的球壳状后, 其壳壁厚度均匀, 又壳面均质无缺陷;
- ② 球壳内的瓦斯不外泄, 被封闭在球壳之间;
- ③ 球壳与下一个球壳之间通过瓦斯联通, 除四周边沿外均不接触, 壳体周边与煤壁固定约束;
- ④ 整个球壳关于球心对称, 壳体除受到瓦斯和大气压力外, 不受地质构造力的作用, 重力可忽略不计;

⑤ 壳壁的厚度相对于球心半径来说, 比值很小, 能满足理论计算需要, 故可看做薄壳。

基于以上假设, 可抽象出图2所示的一个理想力学模型。

### 2) 问题的求解<sup>[7-9]</sup>

在上述基本假设的前提下, 通过计算可得临界载荷:

$$p_{cr} = \frac{2}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} E \left( \frac{h}{R} \right)^2 \quad (3)$$

或临界应力

$$\sigma_{cr} = \frac{p_{cr} R}{2h} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} E \frac{h}{R} \quad (4)$$

式中:  $p_{cr}$  为煤壳发生破坏的临界载荷, MPa;  $\mu$  为煤体的泊松比;  $E$  为煤体的弹性模量, GPa;  $h$  为煤壳厚度, m;  $R$  为煤壳的曲率半径, m;  $\sigma_{cr}$  为煤壳发生破坏的临界应力, N。

这样就得出了球壳失稳时的临界条件:

$$p \geq p_{cr} \text{ 或 } \sigma \geq \sigma_{cr} \quad (5)$$

而根据对煤体质点在突出过程中的能量耗散规律的研究可知<sup>[10]</sup>, 此时的煤壳已经历了地应力的破坏并在瓦斯压力的作用下发生了扩展, 它上面所承载的弹性潜能已消耗殆尽, 不足以使煤体发生破坏, 因此可认为在煤与瓦斯突出过程中, 煤体能否失稳破坏发生突出, 仅取决于式(3)中瓦斯压力的作用。

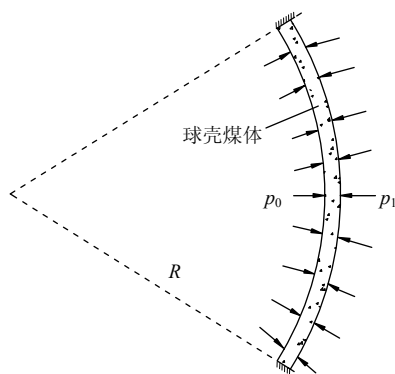


图2 单层球壳理想力学模型

Fig.2 Ideal mechanical model of single-layer spherical shell

### 3 相似准数的求解及分析

根据因次分析理论, 要在实验室进行相似性试验, 需要针对各力学条件求解对应的相似准数。上述3个力学条件中, 第1条和第2条都是针对掘进头前方某一微元体的受力情况分析推导而得, 其是否成立与试验装置与现场的相似无关<sup>[11]</sup>。因此, 这里主要针对第3个力学条件来求解相似准数。根据式(3), 可用下式来描述球盖状煤壳在裂隙内瓦斯压力的作用下失稳抛出的过程。

$$\varphi\left(\frac{E}{p_{cr}}, \frac{R}{h}, \frac{R}{h}\right) = 0 \quad (6)$$

式中:  $\frac{E}{p_{cr}}, \frac{R}{h}$  均为无因次相似准数, 通过对相似准数的分析, 它们当中均含有  $\frac{R}{h}$  项, 因此可用下式来表示:

$$\varphi\left(\frac{E}{p_{cr}}, \frac{R}{h}\right) = 0 \quad (7)$$

$$\text{令 } \Pi_1 = \frac{E}{p_{cr}}, \quad \Pi_2 = \frac{R}{h}。$$

要使所设计的实验室模型与现场相似, 就必须保证现场与实验室模拟装置中的  $\Pi_1$  和  $\Pi_2$  均相同, 其实质是保证模型与现场在相应位置上的  $R/h$  相等, 并且在球盖状煤壳后的裂缝中积聚起来的瓦斯压力也相等。以下就将分别对其进行研究, 以找出合适的相似条件。

#### 3.1 特定位置裂缝中瓦斯压力的相似性分析

在煤层刚刚揭开的瞬间, 暴露面附近煤体由之前的三向受压状态变为两向受压, 由于煤体强度较低, 将在地应力的作用下发生破坏。此时煤层中的瓦斯由于其与外界的压力差而向外涌出, 伴随着瓦斯的向外涌出, 暴露面附近将形成一个卸压带。由于突出的发生一般在几秒到十几秒内完成, 而瓦斯向外涌出和卸压带的扩展相对这个过程则慢得多, 因此可认为在这个过程中突出模拟装置的内部边壁对卸压带的扩展不会产生限制。

为便于上述过程进行研究, 对模型进行理想化处理, 特做如下基本假设:

- ① 煤层厚度足够大, 且为均质、各向同性;
- ② 巷道暴露面为圆壳形;
- ③ 煤层中瓦斯的解吸在瞬间完成, 承压状态下的瓦斯气体可视为理想气体;
- ④ 瓦斯在煤层中的流动为线性渗透, 遵循Darcy 渗透定律, 流动过程为等温过程;
- ⑤ 煤层卸压带之外的瓦斯压力为原始瓦斯压力, 且巷道中的大气压力为定值。

在上述基本假设的前提下, 可认为煤壁暴露面前方瓦斯的涌出属于球向流场, 自球向流场的卸压带范围内, 瓦斯压力的分布可表示如下<sup>[12]</sup>:

$$p = \left[ (p_0^2 - p_2^2) \frac{r - R_1}{R_0 - R_1} \cdot \frac{R_0}{r} + p_2^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中:  $R_1$  为暴露面半径, m;  $R_0$  为卸压带半径, m;  $p_0$  为煤层原始瓦斯压力, MPa。

不管模型和流场的大小如何, 瓦斯压力的分布均能够满足上式。即对于卸压带内瓦斯压力的分布来说, 在上述基本假设的前提下, 该过程是相似的。通过对上式进行因次分析, 可得到4个相似准数如下:

$$\Pi_3 = \frac{p_0}{p}; \quad \Pi_4 = \frac{p_2}{p}; \quad \Pi_5 = \frac{R_1}{r}; \quad \Pi_6 = \frac{R_0}{r}$$

由于过程相似,  $p_0/p$ ,  $p_2/p$ ,  $R_1/r$  和  $R_0/r$  均为定值, 此时令  $R_1/r = c_1$ ,  $R_0/r = c_2$ , 将其代入式(8)可得:

$$p = \left[ \frac{c_2(1-c_1)p_0^2 + c_1(c_2-1)p_2^2}{c_2-c_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中:  $c_1$ ,  $c_2$  为常数, 这样在给定煤层原始瓦斯压力  $p_0$  和巷道大气压  $p_2$  的条件下, 半径  $r$  处的瓦斯压力也是定值, 且此压力值主要取决于煤层原始瓦斯压力。也就是说, 对于给定地应力和瓦斯压力的条件下, 在煤层中对应位置的裂隙中的  $p_{im}$  是相等的。这样模型和现场的相似准数  $\Pi_1$  也是相同的。

### 3.2 特定位置裂缝中 $R/h$ 的相似性分析

$R/h$  表示球壳的曲率半径与煤壳厚度之比。在前文基本假设的基础上可知煤壳的球心坐标在巷道的轴线上, 因此可认为特定位置球壳的曲率半径为球壳中心到巷道中心的距离。

当煤层被揭开后, 由于失去侧向支撑, 煤体会在地应力的作用下发生破坏形成裂纹, 并在瓦斯压力的作用下被撕裂, 生成球盖状煤壳。地应力在这个过程中主导作用是作用在微元体上的切向应力。根据推导, 掘进头前方破裂带内径向应力分布可用下式表示:

$$\sigma_{h\theta p} = \frac{0.1 + K \cot \varphi}{1 - A_1} \left[ \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left( \frac{R}{R_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1 \right] + \frac{0.1 - p A_1}{1 - A_1} \quad (10)$$

式中:  $A_1$  为破裂带中单位煤体表面上孔隙所占面积比;  $R$  为微元体距离球心的距离, m;  $\sigma_{h\theta p}$  为破裂带内作用在微元体上的切向应力, MPa。

式中煤的内聚力  $K$ , 内摩擦角  $\varphi$ , 孔隙面积比  $A_1$  及孔隙瓦斯压力  $p$  均为定值。由式(10)可知, 受某一固定切向应力  $\sigma_{h\theta p}$  作用的微元体, 其距离球心的距离与巷道半径成正比。可用下式表示:

$$R = c_3 R_1$$

这里的微元体距离球心的距离  $R$  就是煤壳的曲率半径。

由于假设煤体为均质、各向同性, 因此这时可认为煤体在切向应力下发生破坏的临界载荷也是相同的, 这样就能在破裂带内选取 2 条邻近的等切向应力线, 用它们之间的距离来近似表示煤壳厚度  $h$ 。此时, 煤壳厚度  $h$  实际上是相邻 2 个等应力面

所对应微元体的距离, 即微元体距离球心距离之差。前已述及, 微元体距离球心的距离  $r$  与巷道半径成正比, 那么它们之差将仍然与巷道半径成正比, 可用下式表示:

$$h = c_4 R_1$$

这样, 球壳的曲率半径与煤壳厚度之比为:

$$\frac{R}{h} = \frac{c_3 R_1}{c_4 R_1} = \frac{c_3}{c_4}$$

式中:  $c_3$ ,  $c_4$  均为常数, 即在前述的基本假设下, 球壳的曲率半径与煤壳厚度之比为常数。模型和现场的相似准数  $\Pi_2$  也就是相同的。

通过以上分析可知: 在实验室进行的突出模拟试验时, 虽在体积上相对现场要小, 但发生突出的条件却是一样的。换言之, 在突出模拟试验中, 对煤层加载与现场相同的地应力, 其发生突出所需的瓦斯压力也是相同的。那么, 在对各预测指标进行测定时, 与地应力和瓦斯压力相关的参数无需进行转换, 可直接使用原始值。

## 4 试验装置的设计及试验

根据上述研究, 我们设计了实验室的突出模拟试验装置, 它由缸体、堵头、横档和压柱等部件组成, 如图 3 所示。通过突出模拟装置将破碎到一定程度的煤样压制成型并充入一定压力的气体后进行打钻取样和突出模拟试验。试验后缸体内突出遗留煤样的照片见图 4 所示。不难发现, 突出后缸体内遗留的煤样呈球壳状, 与理论推导时所建立的应力场模型是相符的。



图 3 突出模拟装置图

Fig.3 Coal seam simulator



图 4 揭盖后发生突出时遗留下的煤样

Fig.4 Left coal sample after uncovering covers

在上述突出模拟试验的基础上, 还在相同条件下对模拟煤层中各项突出预测指标进行了测定, 测定时地应力大小取突出模拟时压力机所施加的围压, 而瓦斯压力测取所充入气体的实际压力, 同时结合突出模拟试验时分析煤层是否发生突出, 对使用各指标预测的准确性进行了研究<sup>[13]</sup>。

## 5 结 论

1) 结合煤与瓦斯突出的“球壳失稳”假说, 提出了煤与瓦斯突出发生的3个力学条件;

2) 对突出发生的力学条件进行因次分析, 得到了无因次相似准数;

3) 通过对相似准数的分析, 得出在实验室的突出模拟试验与现场石门揭煤突出发生的条件是相同的, 即进行实验室试验时对煤层加载与现场相同的地应力, 其发生突出所需要的瓦斯压力也是相同的;

4) 在理论分析的基础上设计了实验室的突出模拟试验装置, 并通过大量试验分析研究了使用各石门揭煤预测指标进行预测的准确性。

## 参考文献:

- [1] 邓全封, 栾永祥, 王佑安. 煤与瓦斯突出模拟试验[J]. 煤矿安全, 1989(11): 5-10.  
DENG Quan-feng, LUAN Yong-xiang, WANG You-an. The simulation test on coal and gas outburst[J]. Coal Mine Safety, 1989(11): 5-10.
- [2] 李鸿昌. 矿山压力的相似性模拟试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [3] 李之光. 相似与模化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [4] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳假说[J]. 煤矿安全, 1995(2): 17-25.  
JIANG Cheng-lin, YU Qi-xiang. Spherical shell instability of coal and gas outburst[J]. Coal Mine Safety, 1995(2): 17-25.
- [5] 蒋承林. 煤与瓦斯突出阵面的推进过程及力学条件分析[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(4): 1-9.  
JIANG Cheng-lin. Analysis on advancing progress and mechanical conditions of coal and gas outburst front[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1994, 23(4): 1-9.
- [6] 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: 94-98.
- [7] 徐芝纶. 弹性理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1978: 295-323.
- [8] 吴连元. 板壳理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989: 456-466.
- [9] 成祥生. 应用板壳理论[M]. 济南: 山东科技出版社, 1989: 531-557.
- [10] 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): 173-179.  
JIANG Cheng-lin, YU Qi-xiang. Research on energy dissipation regular process of coal and gas outburst[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 1996, 21(2): 173-179.
- [11] 华安增. 矿山岩石力学基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1980: 49.
- [12] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998: 82-83.
- [13] 陈裕佳. 石门揭煤突出危险性预测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学安全工程学院, 2010.