

# 中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟装置研制与验证

聂百胜<sup>1, 2, 3</sup>, 马延崑<sup>1, 2, 3</sup>, 孟筠青<sup>1, 2, 3</sup>, 胡守涛<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 共伴生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083; 4. 北京市安全生产工程技术研究院, 北京 102617)

**摘要:** 煤与瓦斯突出模拟实验可以揭示突出灾害的发生规律。研发一种中等尺度煤与瓦斯突出模拟装置, 旨在一定程度上满足与采场工作面的开采环境的近似, 同时便于地质模型的灵活设计与铺设, 实现在不同地质及不同瓦斯参数条件下的突出模拟。该实验系统由高压实验腔体、非均布加载系统、突出诱导装置、抽真空及充气系统、数据采集系统组成, 具有如下特点: 可基于相似原理按照采掘工作面顶、底板岩层分布、地质条件, 灵活铺设尺寸为 1 500 mm×600 mm×1 000 mm 的模型; 按照工作面超前应力分布形式进行表面应力加载; 预埋直径 5 mm 侧向均匀开孔管路分级注气, 实现煤体瓦斯快速吸附平衡; 采用直径 200 mm 规格爆破片安装突出口作为突出诱导装置, 压力超限自动破裂, 诱导突出; 多元化信息采集系统, 记录压力、温度、应力等物理参数变化, 高速摄影记录突出瞬间煤瓦斯混合流态。开展了一次吸附平衡压力为 0.30 MPa、诱导压力 0.53 MPa 的突出实验, 在实验中煤体瓦斯压力、温度由于气体的吸附-解吸特性发生了规律性波动变化, 突出发生持续 1.92 s, 抛出煤岩样 369.9 kg, 最远抛射距离 41.4 m, 并呈扇形分布。该装置为深入研究突出动力灾害机制与预防技术提供了可行的手段。

**关键词:** 采矿工程; 煤矿安全; 煤与瓦斯突出; 实验装置研制; 相似模拟

**中图分类号:** TD 713

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2018)05-1218-08

## Middle scale simulation system of coal and gas outburst

NIE Baisheng<sup>1, 2, 3</sup>, MA Yankun<sup>1, 2, 3</sup>, MENG Junqing<sup>1, 2, 3</sup>, HU Shoutao<sup>4</sup>

(1. *State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China*; 2. *Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China*; 4. *Beijing Academy of Safety Engineering and Technology, Beijing 102617, China*)

**Abstract:** The similar simulation experiment of coal and gas outburst can reveal the developing mechanism of outburst hazard. The development of an outburst simulating apparatus in middle scale is shown in this paper. The apparatus should adapt to experiments with specific mining environment and operations of presetting experimental conditions is simple and flexible. The outbursts occurred in a certain geological circumstance, such as gas rich area or regional tectonics, can be simulated with the experimental system. The apparatus is composed of a test chamber, a distributed load system, an outburst-inducing device, a vacuum pumping and gas charging system, and a data acquisition system. A geological model with the dimensions of 1 500 mm×600 mm×1 000 mm, containing coal seam, roof and floor and tectonic structure, can be moulded flexibly. The distributed loading on the top face of model simulates the abutment stress in working face. The sieve tube with the diameter of 5 mm is

**收稿日期:** 2017-09-07; **修回日期:** 2018-01-02

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0600708); 国家自然科学基金资助项目(51374216); 中央高校基本科研业务费资助项目(2009kz03)

Supported by the State Key Research Development Program of China(Grant No. 2016YFC0600708), National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51374216) and Research Funds for the Central Universities(Grant No. 2009kz03)

**作者简介:** 聂百胜(1973-), 男, 1995年毕业于太原理工大学采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事矿山安全工程方面的教学与研究工作。  
E-mail: bshnie@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1125

embedded in the coal sample for gas charging. Charging with the graded pressure makes sure that the coal sample reaches the adsorption equilibrium rapidly. A rupture disc installed on the outburst port is used as the outburst-inducing device, and it is destroyed immediately if the gas pressure is over the threshold value. A transparent window on the test chamber shows the fracture process of coal and rock. Data acquisition system collects the most of physical parameters, such as the pressure, temperature and stress. The high-speed photographing captures the movement of outburst coal. An artificial outburst was conducted with absorption equilibrium pressure of 0.30 MPa and inducing pressure of 0.53 MPa. The gas pressure and temperature in the coal sample showed the fluctuating variations because of the adsorption-desorption process during experiment. The duration of the outburst was 1.92 s and 369.9 kg of specimens was expelled from the outburst port. The expelled materials appeared as the fan-shaped distributions and the propagation distance reached 41.4 m.

**Key words:** mining engineering; coal mine safety; coal and gas outburst; device development; similar simulation

## 1 引言

煤与瓦斯突出是煤炭资源开采中具有剧烈破坏性的动力灾害，其孕育、发生过程无较明显前兆信息，短时间产生煤岩破坏效应、释放大量瓦斯<sup>[1-3]</sup>。伴随煤炭资源的深部开采，煤与瓦斯突出灾害逐渐成为煤炭安全、高效开采的主要威胁之一<sup>[4-6]</sup>。鉴于突出过程的瞬发性、破坏性、灾变性<sup>[7-8]</sup>，在实验室进行煤与瓦斯突出相似模拟实验，精细化研究突出发生的各个阶段，分析相关因素的敏感性，再现事故现场，提出可靠的预防理论及措施，无疑是一种重要的科学研究方法。近年来，大量学者通过开发不同尺度的煤与瓦斯突出实验平台，研究煤与瓦斯突出发生的物理过程，进行理论反演，以期能够加深突出机制的认识，完成突出过程的准确预测<sup>[9-11]</sup>。这对提高突出防治的时效性以及降低突出预防工程实践的盲目性具有重要意义。

尹光志等<sup>[9-11]</sup>研制了大型煤与瓦斯突出实验平台，可以满足煤样的阶梯加载、不同突出口径以及 2 MPa 瓦斯压力条件的实验模拟；欧建春等<sup>[12]</sup>研制了带透明视窗的突出过程模拟实验装置，实现了突出过程煤体裂隙演化的分析；王刚等<sup>[13]</sup>研制了综合考虑地应力、瓦斯压力及煤体结构的石门揭煤突出模拟实验台；唐巨鹏等<sup>[14-15]</sup>研制了三维应力下的突出模拟仪，设置突出弱面(有机玻璃作为挡板)控制突出口的打开，进行了深部煤与瓦斯突出的实验研究；袁瑞甫和李怀珍<sup>[16]</sup>为分析瓦斯压力、应力及煤体强度 3 因素不同组合的动态破坏规律，研制了含瓦斯动态破坏模拟实验设备；高魁等<sup>[17]</sup>研制了大型石门揭煤的煤与瓦斯突出实验平台，进行了石门揭构造软煤的相似模拟实验；王汉鹏等<sup>[18]</sup>基于 CSIRO 模型，设计了煤与瓦斯突出物理实验系统，实现了地应力、瓦斯压力和煤体参数的方便可调。

煤与瓦斯突出实验装置的研制，为突出灾害的科学研究带来了很大便利，但现有突出装置存在模拟尺度上不适宜的情况。装置尺寸小，试件模型尺寸小，突出煤量少，采场顶、底板条件不符，不能反映工作面实际应力环境；尺寸大，操作不便利，实验费时、费工，不利于实验大量开展。本文拟研发一种“中等尺度的煤与瓦斯突出模拟实验装置”，旨在一定程度上满足与采场工作面的开采环境的近似，同时便于地质模型的灵活设计与铺设，实现在不同地质及不同瓦斯参数条件下的突出模拟。

## 2 研制思路

煤与瓦斯突出的过程极为复杂，多发生于采掘工作面，影响因素众多，有瓦斯、地应力、地质构造、煤体性质等。实验室进行突出模拟，既要真实反映现场突出的全过程，揭示灾害的发生机制，又要具有可操作性，便于大量实验正交分析相关因素的敏感性。图 1 为煤与瓦斯突出实验模型，综合前人研究成果，对实验模型提出相应技术要求，各技术要求通过对应子系统完成(见图 2)，具体实现如下：

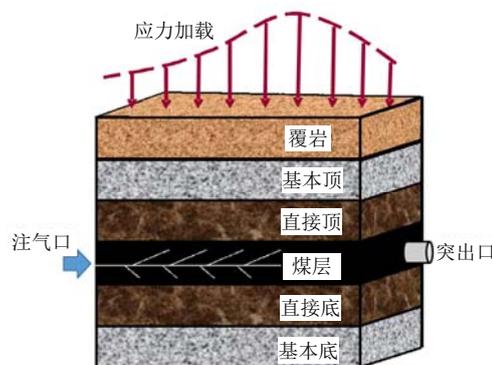


图 1 煤与瓦斯突出实验模型

Fig.1 Experiment model layout of coal and gas outbursts

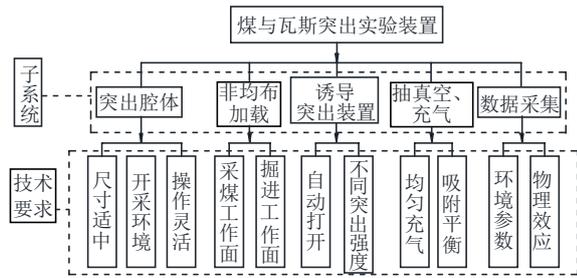


图2 突出实验装置技术要求及系统图

Fig.2 System diagram of technical requirements for the experimental apparatus in laboratory-scale

(1) 铺设模型的突出腔体设计为中等尺寸，基于相似原理按照采掘工作面顶、底板岩层分布、地质构造分布铺设模型，操作简便灵活。

(2) 模型应力非均匀加载，按照工作面超前应力分布形式施加，模拟采煤工作面和掘进工作面支撑压力的分布。

(3) 配置自动诱导突出装置，实现不同强度条件的煤与瓦斯突出。拟采用爆破片，腔内压力超限自动破裂，发生突出。

(4) 对突出腔体内煤体均匀充气，达到吸附平衡，以实现快速充气。

(5) 多元化数据采集系统，全面采集突出过程中压力、温度、应力、应变等环境参数和声发射、电磁辐射等物理效应参数。

### 3 实验系统研制

基于上述研发思路，中等尺度煤与瓦斯突出模拟实验系统结构设计如图3所示，系统由高压实验腔体、非均匀加载系统、诱导突出装置、抽真空及注气系统和数据采集系统等组成。实验系统研制实物如图4所示。

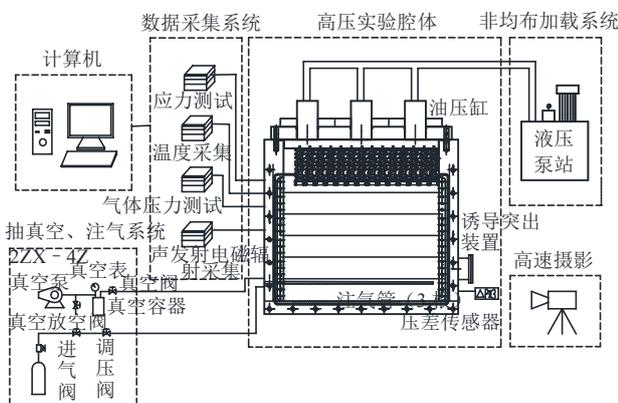


图3 中等尺度煤与瓦斯突出模拟实验系统结构

Fig.3 System diagram of outburst simulation apparatus



图4 煤与瓦斯突出模型系统实物

Fig.4 The experimental apparatus of coal and gas outburst

#### 3.1 高压实验腔体及密封

高压实验腔体如图4所示，采用不锈钢材质，其外形尺寸为1 900 mm×1 000 mm×1 960 mm，内腔尺寸为1 500 mm×600 mm×1 000 mm。腔体左端面装有气体注入口、各类传感器接口，右端面设有煤与瓦斯突出出口，后端面装有耐高压透明视窗。

模型铺设完毕，实验腔体前端面密封槽内安装密封圈、螺栓固定5块小型盖板，将腔体完全密封，腔体耐高压2.0 MPa。

#### 3.2 非均匀加载系统

非均匀加载系统由液压泵站、油缸、活塞、弹簧组、大型压板及小型压板组成。系统仅对试件模型上表面进行垂直加载，油缸与加载面之间布置弹性系数各异的高强度弹簧组，以灵活改变加载应力的分布形式。

液压泵站最大压力为20 MPa，活塞最大行程为260 mm。3个油缸安装在装置正上方(见图4)，对尺寸为1 490 mm×600 mm×80 mm的大型压板施加荷载，下方安装14组一定规格的压缩弹簧，每组6根弹簧连接一块尺寸为600 mm×100 mm×30 mm小型压板。实验中，系统可用于试件加载成型、模拟不同埋深的荷载及其分布形式，例如：不同弹性系数的压缩弹簧组按照图1中应力的分布形式沿突出出口方向布置，对成型试件加压，以模拟工作面的超前应力分布。弹簧组初始分布，默认按照最大应力集中系数1.6布置。

#### 3.3 突出诱导装置

突出诱导装置由爆破片及爆破片夹持装置组成，如图4所示。在模型突出出口安装爆破片，腔内压力达到阈值将自行打开，诱导突出发生，实现实验过程的可控，提高实验成功率。爆破片规格可根据模拟的突出强度选择。

设置突出出口直径为200 mm，通过法兰连接相

应规格爆破片，用压板和胶圈进行加固和密封。揭煤时煤层暴露的面积不同可影响突出的发生发展<sup>[11]</sup>，突出孔洞通常呈口小腔大的梨形、舌形、倒瓶形、分叉型等<sup>[19]</sup>。实验模型的突出口面积可以在直径 200 mm 以内调节，在内部安装不同尺寸的开口挡板来实现。

### 3.4 抽真空及注气系统

装置内开始注气时，须对突出腔体进行抽真空检查气密性。抽真空及注气系统主要由真空表、真空泵、泄压阀、精密压力表及真空管路组成。模型铺设煤层时，预埋多条直径 5 mm 开孔管路(管路侧向均匀布置气孔，并用纱网缠绕防堵)，与充气回路相连，确保气体的快速、均匀吸附。

### 3.5 数据采集系统

数据采集系统实时监测突出内腔环境参数变化，尤其突出发生时的临界状态参数，如煤体温度、压力、应力、应变等参数，以及记录煤岩动力响应过程中物理效应，如声发射、电磁辐射等参数。应力采集选用 DH3820 高速静态应变测试分析及压力盒；温度采集选用高精度微型铂电阻温度传感器，温度误差范围为±0.03 °C+0.000 5 °C，温度承受范围-50 °C~200 °C；电磁辐射及声发射采集主机可实现 8 通道、高达 10 MHz 采样速率同步数据采集。

煤与瓦斯突出过程时间极为短暂，须实时记录瞬态现象，并分析煤与瓦斯混合流体的运动规律。腔体内煤岩体的动态突出过程，可通过突出腔体后盖板耐高压透明视窗实时观察记录；腔体外煤岩的喷出过程，借助日本 NAC 公司 Memrecam GX-3 型高速摄影全程拍摄。

## 4 实验验证

### 4.1 实验过程

中等尺度煤与瓦斯突出实验属于较大规模的实验，选择在空间较大、开阔的位置进行。突出实验过程主要包括煤样制备，顶底板岩层相似材料制备，模型铺设加压，诱导突出装置安装，气密性检查，数据采集，煤样充气与吸附，完成突出等工序。实验过程流程图如图 5 所示。

#### 4.1.1 煤岩体模型铺设

实验所用煤样取自冀中能源集团大淑村矿 172103 采煤工作面。该工作面主采 2#煤层，埋深约 560 m，走向长度为 893 m，倾向长度为 190.1 m。煤层赋存稳定，煤厚为 4.8~5.9 m，平均厚度为 5.3 m，煤样参数如表 1 所示。

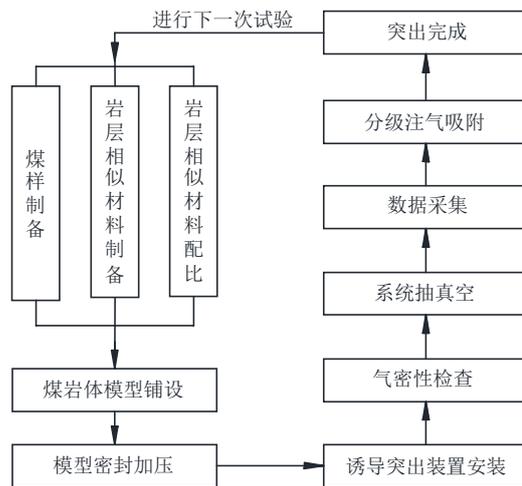


图 5 实验流程图

Fig.5 Flow chart of test process of coal and gas outburst

表 1 煤样参数

Table 1 Physical properties of coal sample

煤样	取样深度/m	坚固性系数 <i>f</i>	瓦斯放散初速度Δ <i>P</i> /mmHg	破坏类型
大淑村矿 2#煤	548	0.347	12.38	IV

当前突出实验研究中，由于实验煤样为现场采样，通常认为与现场煤体孔隙率、吸附特性等相同，为简化相似比尺的选择，瓦斯压力比尺取 1，地应力比尺借鉴固体力学的相似准则成果<sup>[11-18]</sup>。地应力比尺、几何比尺、容重比尺、弹性模量比尺等满足如下关系<sup>[20-22]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} C_{\sigma} &= C_{\gamma} C_l \\ C_{\sigma} &= C_E \\ P_p / P_m &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $C_{\sigma}$ 为应力相似常数， $C_{\sigma} = \sigma_p / \sigma_m$ ， $\sigma_p$ 和 $\sigma_m$ 分别为实际和模型应力； $C_l$ 为几何相似常数； $C_{\gamma}$ 为容重相似常数； $C_E$ 为弹性模量相似常数； $P_p$ 和 $P_m$ 分别为实际和模型瓦斯压力。

实验模型材料具体配制如表 2 所示。大淑村 2#煤为软煤，结构松散，无法取芯进行力学测试。将现场取回煤样粉碎 1 mm 左右颗粒，加入 6%的水，加载成型<sup>[23]</sup>。取地应力相似指数  $C_{\sigma} = 10$ ，由地应力  $\sigma_p = 15$  MPa 得出模型应力  $\sigma_m = 1.5$  MPa，换算泵站压力为 5.6 MPa。如图 6 所示，将对应的模型材料按照 10 cm 的厚度逐层铺设，每铺完一层，放置压架并启动液压加载系统，加载压力达到 5.6 MPa 后，维持压力 30 min 后卸压。模型中传感器布置如图 7 所示，温度、压力传感器及注气管路预埋在煤层中。将涂抹锂基脂的密封圈装入密封槽，吊装外层前盖板，在突出口安装 0.5 MPa 规格的爆破片。安装完

表2 模型材料参数

Table 2 Similar materials and mechanical parameters

岩性	层厚/ cm	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强 度/(g·cm <sup>-2</sup> )	配比号
				砂子:石灰:石膏
粉砂质泥岩	10	1.7	2.8	9:0.7:0.3
泥岩	10	1.7	2.7	9.1:0.7:0.2
粉砂质泥岩	10	1.7	2.8	9:0.7:0.3
粉砂岩	10	1.7	2.9	8.9:0.7:0.4
2 <sup>#</sup> 煤	20	1.67	-	-
泥质粉砂岩	10	1.7	2.6	8.9:0.8:0.3
泥岩	10	1.7	2.7	9.1:0.7:0.2

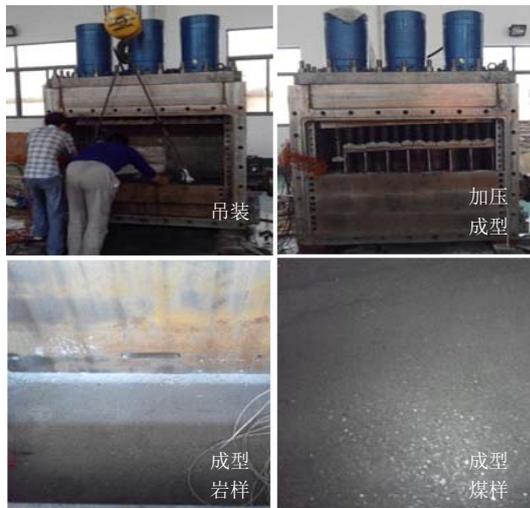


图6 煤岩体模型成型过程

Fig.6 Moulding process of rock and coal sample

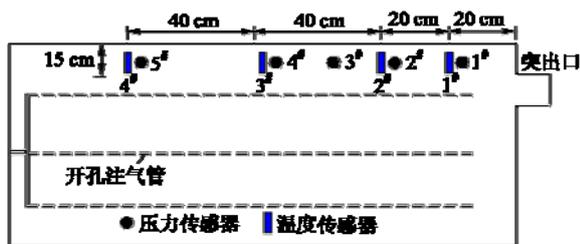


图7 模型中注气管路及传感器布置(俯视图)

Fig.7 Layouts of sensor units and pipelines in model(top view)

成,开始对模型加压,成型压力为 20 MPa(泵站压力),最终加载应力恒定为 5.6 MPa。

4.1.2 煤体注气至吸附平衡

实验腔体内注入适量空气,用肥皂水检查各密封位置,待确认无漏气后,抽真空至-0.1 MPa,关闭真空阀并放置 12 h,检查装置密封效果。密封良好,可启动数据采集系统,进入煤样的充气与吸附阶段。

考虑到 CH<sub>4</sub> 气体的爆炸性,采用 CO<sub>2</sub> 代替 CH<sub>4</sub> 气体进行实验,充气过程中在突出口前方划出警戒

隔离带。为确保煤体充分吸附平衡,且预留一定的安全余量,采用分级充气的方法使气体吸附平衡压力达到 0.3 MPa。先以 0.2 MPa 的压力向腔体内反复注气,至气体吸附平衡压力达到 0.2 MPa(初次充气 5~10 h 吸附平衡),再将压力升高至 0.3 MPa 向腔体充气至吸附平衡压力达到 0.3 MPa,停止注气。最后,将注气压力提高至 0.5 MPa 以上,诱导发生突出。

综上,中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟实验时,实验系统调试、模型材料配制及成型、分级充气至预定吸附平衡压力和实验完成,实验周期约为 25 d,实验准备各个阶段参数如表 3 所示。

表3 实验准备阶段参数

Table 3 Experiment parameters in the preparatory stage

煤样	煤样 质量/kg	岩样 质量/kg	加载 应力/MPa	吸附稳定 压力/MPa	诱导突出 压力/MPa
大淑村 2 <sup>#</sup>	307.4	878.6	1.5	0.3	0.53

4.2 实验结果分析

4.2.1 瓦斯压力变化

如图 8 所示,装置进行抽真空后,煤体瓦斯注气吸附至发生突出,共经历 13 次注气,每次注气伴随瓦斯压力波动变化。

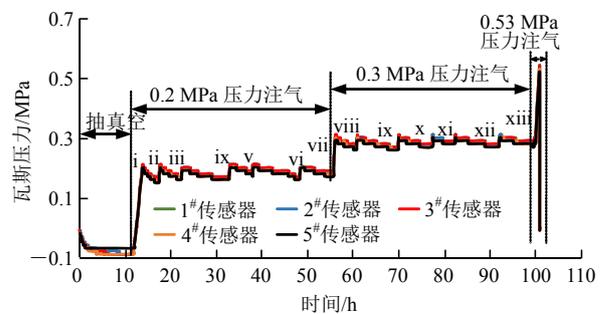


图8 实验过程瓦斯压力传感器压力值变化

Fig.8 Variation of gas pressure during experiment

由气体的等温吸附曲线可知,随压力的升高,煤对瓦斯的吸附量一定程度增加,压力降低,煤体瓦斯的解吸量相应增加<sup>[24-25]</sup>。抽真空阶段,气体压力维持 0 MPa 以下 12 h,气体大部分脱附。气体压力在以 0.2, 0.3 MPa 注气过程中,初始煤体游离瓦斯量增加,瓦斯压力值上升,煤体对瓦斯的吸附导致游离瓦斯量减少,瓦斯压力下降。再次注气,压力升高导致气体的吸附量增加;直至气体吸附平衡,压力呈现较为稳定状态。注气压力达到 0.53 MPa 时,爆破片发生破坏,腔内压力迅速降低,大量瓦

斯解吸膨胀，煤与瓦斯突出发生。

### 4.2.2 温度变化

实验过程煤体温度及室温变化如图 9 所示。煤体温度变化趋势整体上与室温的变化一致，由于瓦斯吸附是放热过程，解吸过程吸热<sup>[24-25]</sup>，故每次向煤体中注气吸附伴随温度的小幅上升，之后受室温影响而变化。1#传感器更靠近突出口，受室温影响较大，2#次之，3#，4#受影响较小。

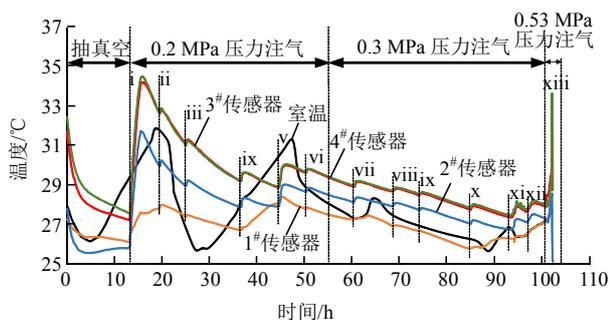


图 9 实验过程温度传感器数值变化

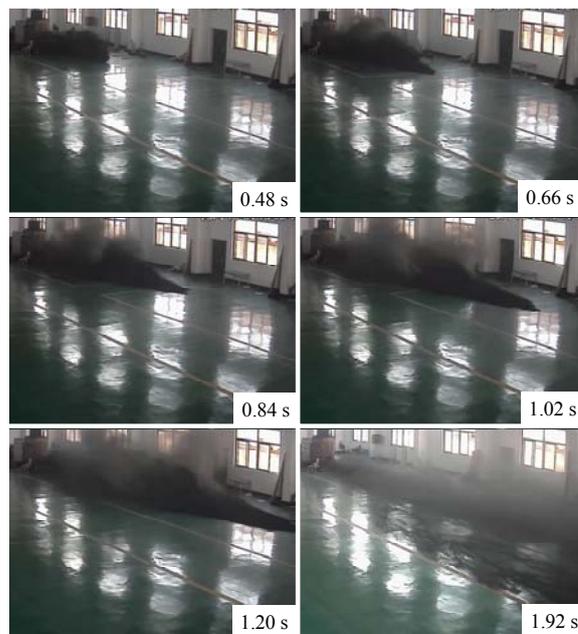
Fig.9 The temperature variation of coal sample during test

抽真空状态，煤体内瓦斯完全脱附，故温度急剧下降；初次注气，瓦斯大量吸附，温度大幅升高，上升 4 ℃~6 ℃；压力升高诱导突出时，温度再次急剧升高(上升约 5 ℃)，直至突出，压降导致瓦斯的快速解吸，煤体温度迅速又下降(下降约 4 ℃)。

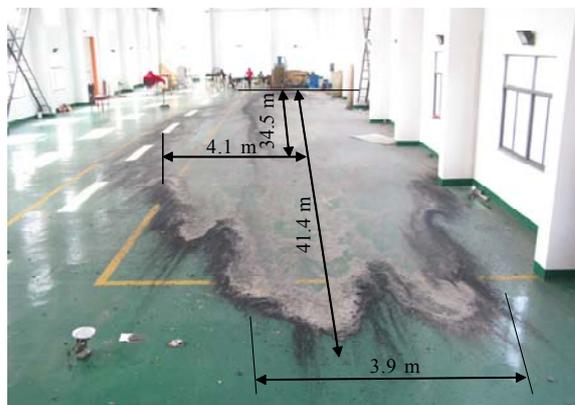
### 4.2.3 突出动力特征

突出过程捕捉煤粉与气流混合喷出的图像如图 10 所示。抛出煤岩样共 369.9 kg，持续 1.92 s，最远抛射距离 41.4 m，呈扇形分布。煤体在密闭受限空间应力加载的条件下积聚弹性能，吸附平衡过程中膨胀变形，当腔内压力超过爆破片破坏的阈值 0.5 MPa 时，即达到突出诱导压力，腔内气压瞬间降低，吸附气体急剧解吸膨胀，型煤被粉碎，伴随强大的冲击气流喷出，并有较大响声，产生强大的动力效应。

根据突出煤粉不同时间段内运动的距离可计算抛出物的平均运动速度，得出距突出位置不同距离的速度衰减关系，如图 11 所示。突出煤粉的运动速度初始状态为 1~11 m 范围衰减最快，16~42 m 范围衰减缓和。煤粉在 1~6 m 范围运动平均速度达到 21.43 m/s，36~42 m 范围平均速度衰减至最低 5 m/s。采用对数关系式拟合得出速度与位置关系式： $y = -11.7 \ln x + 49.719$ ，相关性  $R^2 = 0.9322$ 。将突出的煤岩样进行分堆称重，得出距突出位置不同距离的重量分布，如表 4 所示。31~36 m 范围内煤岩样质量最大，84.2 kg，占总体 22.18%；36~42 m 次



(a) 突出瞬态过程记录



(b) 突出结束煤岩样分布

图 10 突出动力过程图像采集

Fig.10 The captured images in the process of outburst

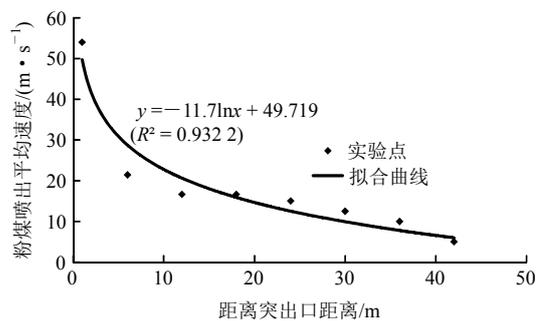


图 11 喷出煤粉速度衰减曲线

Fig.11 The velocity attenuation curve of outburst specimens

之，62 kg，占 16.8%；6~11 m 再次之，48.9 kg，占 13.09%，11~16，16~21 和 21~26 m 范围煤岩质量相当，约 34 kg、占 9%。

通过本次实验，验证了该装置达到了研制技术需求，实现接近于现场突出过程的模拟，为突出动

表4 突出煤岩样称重结果  
Table 4 The weight of outburst specimens

序号	煤岩样分布范围/m	质量/kg	占总体比例/%
1	0~6	32.6	8.85
2	6~11	48.9	13.09
3	11~16	31.2	8.46
4	16~21	36.2	9.64
5	21~26	31.8	8.64
6	26~31	40.4	10.90
7	31~36	84.2	22.18
8	36~42	62.0	16.80

力灾害预防奠定了实验基础。

## 5 结 论

在分析当前突出模拟实验装置基础上,提出了实验系统的研发思路及技术要求,研制了中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟实验装置,并进行了模拟实验验证,得出主要结论如下:

(1) 提出了与工作面开采环境相近的突出实验系统研制思路,该系统由高压实验腔体、非均布加载系统、诱导突出装置、抽真空及注气系统和数据采集系统等组成。

(2) 突出模拟装置具有以下优点:尺寸为中等尺度,可以基于相似原理按照采掘工作面顶底板岩层分布、地质条件铺设模型,操作简便、灵活;应力加载按照工作面超前应力分布形式,与现场实际条件吻合;采用爆破片作为突出诱导装置,压力超限自动突出。

(3) 开展了突出实验,分析了抽真空、分级注气和突出发生过程中,由于瓦斯吸附/解吸而导致压力和温度变化的特征,以及突出发生煤与瓦斯混合流动态过程,验证了装置的可行性,表明能够模拟突出的过程,为深入研究突出动力灾害机制与预防理论提供了可行的手段。

(4) 本次突出模拟中,瓦斯吸附平衡压力 0.3 MPa,诱导突出压力为 0.53 MPa,低于突出鉴定规范中瓦斯压力 0.74 MPa 的指标,属低指标突出状况,与工程现场发生的低指标突出的现象有相近之处。例如 1989~2011 年期间,新密矿区发生 40 次突出,0.74 MPa 以下的瓦斯突出现象占到了 75%,最低瓦斯压力只有 0.3 MPa<sup>[26]</sup>。关于低指标突出

象的研究需进一步深入,主要考虑瓦斯含量、透气性系数及地质构造因素的主导作用,可借助中等尺度煤与瓦斯突出装置开展大型模拟实验,研究该现象的演化机制。

## 参考文献(References):

- [1] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):93-101.(ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 93-101.(in Chinese))
- [2] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.我国煤与瓦斯共采:理论、技术与工程[J].煤炭学报,2014,39(8):1391-1397.(XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1391-1397.(in Chinese))
- [3] HUDECEK V. Analysis of safety precautions for coal and gas outburst hazardous strata [J]. Journal of Mining Science, 2008, 44(5): 464-472.
- [4] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].煤炭学报,2016,41(1):8-13.(YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 8-13.(in Chinese))
- [5] 袁亮.煤炭精准开采科学构想[J].煤炭学报,2017,42(1):1-7.(YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.(in Chinese))
- [6] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究及探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.(XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.(in Chinese))
- [7] WACLAW D, ADNRZEJ K. Mathematical model of methane emission caused by a collapse of rock mass crump[J]. Archives of Mining Sciences, 2001, 46(4): 433-449.
- [8] 徐超,袁亮,程远平,等.岩浆岩床环境离层瓦斯灾变机制及工程防治方法[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6):1152-1159.(XU Chao, YUAN Liang, CHENG Yuanping, et al. Mechanism and prevention of gas ejection hazards in splitting bed under igneous strata[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(6): 1152-1159.(in Chinese))
- [9] 尹光志,李晓泉,蒋长宝,等.石门揭煤过程中煤与瓦斯延期突出模拟实验[J].北京科技大学学报,2010,32(7):11-16.(YIN Guangzhi, LI Xiaoquan, JIANG Changbao, et al. Simulation experiments of coal and gas delay outburst in rock cross-cut coal un-covering[J]. Journal of University of Science and Technology

- Beijing, 2010, 32(7): 11 - 16.(in Chinese))
- [10] 许江, 陶云奇, 尹光志, 等. 煤与瓦斯突出模拟实验台的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 199 - 207.(XU Jiang, TAO Yunqi, YIN Guangzhi, et al. Development and application of coal and gas outburst simulation test device[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 199 - 207.(in Chinese))
- [11] 许江, 刘东, 彭守建, 等. 不同突出口径条件下煤与瓦斯突出模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 9 - 14.(XU Jiang, LIU Dong, PENG Shoujian, et al. Coal and gas outburst analogous test under the different diameter of exposed coal seam surface[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 9 - 14.(in Chinese))
- [12] 欧建春, 王恩元, 马国强, 等. 煤与瓦斯突出过程煤体破裂演化规律[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 978 - 983.(OU Jianchun, WANG Enyuan, MA Guoqiang, et al. Coal rupture evolution law of coal and gas outburst process[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 978 - 983.(in Chinese))
- [13] 王刚, 程卫民, 张清涛, 等. 石门揭煤突出模拟实验台的设计与应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1 202 - 1 210.(WANG Gang, CHENG Weimin, ZHANG Qingtao, et al. Design of simulation experiment and its application system of outburst in uncovering coal seam in cross-cut[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1 202 - 1 210.(in Chinese))
- [14] 唐巨鹏, 杨森林, 王亚林, 等. 地应力和瓦斯压力作用下深部煤与瓦斯突出实验[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 38 - 43.(TANG Jupeng, YANG Senlin, WANG Yalin, et al. Experiment of coal and gas outbursts underground stress and gas pressure in deep mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 38 - 43.(in Chinese))
- [15] 唐巨鹏, 潘一山, 杨森林. 三维应力下煤与瓦斯突出模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 102 - 107.(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): 102 - 107.(in Chinese))
- [16] 袁瑞甫, 李怀珍. 含瓦斯煤动态破坏模拟实验设备的研制与应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增 1): 117 - 123.(YUAN Ruifu, LI Huaizhen. Development and application of simulation test apparatus for gassy coal dynamic failure[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(Supp.1): 117 - 123.(in Chinese))
- [17] 高魁, 刘泽功, 刘健. 基于相似模拟和地质力学模型实验的突出装置研制及应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 711 - 718.(GAO Kui, LIU Zegong, LIU Jian. Design of outburst experiment device based on similar simulation and geomechanical model test and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 711 - 718.(in Chinese))
- [18] 王汉鹏, 张庆贺, 袁亮, 等. 基于 CSIRO 模型的煤与瓦斯突出模拟系统与实验应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2 301 - 2 308.(WANG Hanpeng, ZHANG Qinghe, YUAN Liang, et al. Coal and gas outburst simulation system based on CSIRO model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2 301 - 2 308.(in Chinese))
- [19] 中华人民共和国行业标准编写组. AQ 1024—2006 煤与瓦斯突出矿井鉴定规范[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. AQ 1024—2006 Specification for identification of coal and gas outburst mine[S]. Beijing: China Coal Industrial Publishing House, 2006.(in Chinese))
- [20] 黄志安, 岳红娟, 张英华, 等. 煤与瓦斯突出模拟实验相似比研究[J]. 华北科技学院学报, 2015, 12(5): 22 - 24.(HUANG Zhian, YUE Hongjuan, ZHANG Yinghua, et al. Similarity ratio study on simulation experiment of coal and gas outburst[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2015, 12(5): 22 - 24.(in Chinese))
- [21] 陶云奇. 含瓦斯煤 THM 耦合模型及煤与瓦斯突出模拟研究[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 113 - 116.(TAO Yunqi. Study on The gassy coal THM coupling model and coal and gas outburst simulation[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2009: 113 - 116.(in Chinese))
- [22] 张庆贺, 袁亮, 王汉鹏, 等. 煤与瓦斯突出物理模拟相似准则建立与分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2 773 - 2 779.(ZHANG Qinghe, YUAN Liang, WANG Hanpeng, et al. Establishment and analysis of similarity criteria for physical simulation of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2 773 - 2 779.(in Chinese))
- [23] TU Q, CHENG Y, GUO P, et al. Experimental study of coal and gas outbursts related to gas-enriched areas[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 3 769 - 3 781.
- [24] GUO W, XIONG Wi, GAO S, et al. Impact of temperature on the isothermal adsorption/desorption of shale gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 514 - 519.
- [25] NIE B, LIU X, YANG L, et al. Pore structure characterization of different rank coals using gas adsorption and scanning electron microscopy[J]. Fuel, 2015, 158(6): 908 - 917.
- [26] 李云波, 姜波, 张玉贵. 新密矿区低临界值瓦斯动力现象及机理[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(6): 1 - 7.(LI Yunbo, JIANG Bo, ZHANG Yugui. Low-threshold coal and gas outburst dynamic phenomenon and mechanism in Xinmi coal mining area[J]. Coal Geology and Exploration, 2015, 43(6): 1 - 7.(in Chinese))