

煤与瓦斯突出模拟试验台的研制与应用

许江, 陶云奇, 尹光志, 李树春, 王维忠

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为更深层次地探索煤与瓦斯突出机制, 在同类突出装置的基础上自主研发了“大型煤与瓦斯突出模拟试验台”, 其主要由煤与瓦斯突出模具、快速释放机构、承载框架、电流伺服加载系统、翻转机构、主机支架及附属装置组成。分析后认为该试验台具有如下功能: (1) 利用电流伺服加载系统可对突出煤样施加均布荷载和阶梯形荷载, 模拟工作面前方造成突出的局部应力集中现象。(2) 可实现 5 种不同倾角煤层在不同地应力、不同瓦斯压力下的煤与瓦斯突出模拟试验。(3) 利用泡沫不锈钢隔离煤样与进气孔, 实现了对突出煤样的“面充气”功能。(4) 通过快速释放机构, 可瞬间打开突出口使突出端突然卸压。(5) 实现了煤与瓦斯突出试验的全过程回放。试验结果表明: 有典型的梨形突出孔洞出现, 突出的粉煤有明显分选性, 且瓦斯压力越大其突出强度越大。所得试验结果与现场突出特征吻合, 说明该试验台具有良好的煤与瓦斯突出试验模拟功能。

关键词: 采矿工程; 煤矿; 煤与瓦斯突出; 模拟; 瓦斯压力; 地应力

中图分类号: TD 713

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)11 - 2354 - 09

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF COAL AND GAS OUTBURST SIMULATION TEST DEVICE

XU Jiang, TAO Yunqi, YIN Guangzhi, LI Shuchun, WANG Weizhong

(Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of coal and gas outburst, the large-scale test device for coal and gas outburst simulation is developed. The device is composed of outburst assembly, fast-releasing component, load-bearing frame, electric servo-controlled loading system, reversal unit, main frame bracket and accessories. The functions of this test device are analyzed as follows. (1) By using the electric servo-controlled loading system, uniform load and step load on the outburst coal sample can be realized; meanwhile, the outburst phenomenon caused by the concentrated stress in front of the coal face can be simulated. (2) This device can simulate five kinds of coal and gas outburst experiments on coal beds with different obliquities, which are under the different gas pressures and geostresses. (3) The foam-stainless steel is used to separate the coal sample from the air intake on the soleplate of the outburst assembly to realize the plane-charging for the outburst coal sample. (4) By using the fast-releasing component, the outburst ostium can be opened at once and its pressure will become zero. (5) The full process of coal and gas outburst can be monitored by this device. The experimental results indicate that the typical outburst hole appears, the powder coal shows the obvious separation; and the larger the outburst intensity is, the larger the gas pressure is. The experimental results agree well with the in-situ outburst

收稿日期: 2008 - 04 - 18; **修回日期:** 2008 - 06 - 17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534080); 重庆市科技攻关计划重大项目(CSCT, 2006AA7002)

作者简介: 许江(1960 -), 男, 博士, 1982年毕业于重庆大学采矿系矿山工程物理专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

characteristics and indicate that the large-scale coal and gas outburst simulation test device can simulate the outburst of coal and gas effectively.

Key words: mining engineering; coal mines; coal and gas outburst; simulation; gas pressure; geostress

1 引言

煤与瓦斯突出是发生在煤矿井下的一种极其复杂的动力失稳现象^[1-3], 其由突出煤体向巷道或采场空间突然喷出大量的具有冲击波性质的煤和瓦斯, 可造成煤岩击中或掩埋井下人员、摧毁井下设施等事故, 甚至摧毁整个工作面或矿井。由于对现场煤与瓦斯突出过程进行全方位实时跟踪研究的危险性太大, 学者们^[4-6]大都依靠实验室模拟手段进行煤与瓦斯突出机制的研究与探索。并针对地应力、瓦斯压力、煤的物理力学性质在突出过程中的作用机制进行了卓有成效的研究工作, 同时研制了相应的试验装置。国内如煤炭科学研究总院抚顺分院、中国科学院力学研究所、中国矿业大学及河南理工大学等单位都先后开展了这方面的工作, 并开发性能不等的配套试验装置^[7-12]。

纵观同类试验装置, 国内外煤与瓦斯突出模拟试验装置的种类和样式较多。其中, 突出煤样的形状以圆柱体和长方体为主; 模型加载方式主要采用材料试验机加载; 模型在受力维数上一维、二维、三维均有; 而突出口的打开方式均为手动机械式; 充气介质以 CO_2 , CH_4 为主; 且突出煤样的尺寸和倾角均为小尺寸、水平倾角。故现有的煤与瓦斯突出试验装置, 虽在一定程度上加深了煤与瓦斯突出研究的进展, 但或多或少地存在一些缺点。如突出煤样均为小尺寸和水平倾角, 而现实情况井下水平倾角的煤层相对较少, 发生突出事故频繁的石门揭煤所遇到的也往往是倾斜煤层; 手动打开突出口速度较慢, 在一定程度上影响了煤与瓦斯突出的时间和强度; 对模型施加的荷载也都是均匀的, 不能模拟工作面前方由于采矿活动造成的局部应力集中, 而应力集中往往又是造成突出的重要因素。所以, 现有的突出试验装置存在一定的局限性, 迫切需要研制出一种更加先进的大型煤与瓦斯突出试验装置, 以更高层次地探索综合作用假说的作用机制。西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室(重庆大学)于 2007 年在综合同类煤与瓦斯突出试

验装置和洛阳总参工程兵科研三所的岩土工程多功能试验装置^[13]的基础上研制了“大型煤与瓦斯突出模拟试验台”, 该试验台可以进行大尺寸、不同倾角煤层在不同地应力和不同瓦斯压力条件下煤与瓦斯突出模拟试验; 同时通过对突出煤样施加均布荷载和阶梯形荷载, 还可模拟工作面前方造成突出的局部应力集中现象, 用于更深层次地探索煤与瓦斯突出机制。

2 研制思路及目的

2.1 研制思路

因煤与瓦斯突出的灾害性极大, 不可能在井下现场发生煤与瓦斯突出灾害时开展研究, 只能依托实验室进行试验模拟。尽管国内外相关科研机构开展了大量的煤与瓦斯突出相似模拟试验研究工作, 但确实还存在一些不足, 归纳起来有以下几点:

- (1) 突出煤样尺寸相对较小。
- (2) 只能模拟水平煤层。
- (3) 突出煤样充气源均为单一充气孔“点充气”。
- (4) 利用材料试验机对突出煤样施加荷载, 只能模拟均匀应力场。
- (5) 手动打开突出口的速度偏慢。
- (6) 无法了解突出瞬间的细小变化。

因井下现场所采煤层大部分都是缓倾斜或倾斜煤层; 发生突出灾害时工作面前方往往产生局部应力集中现象, 煤体内并不是均匀应力场; 井下煤体既是瓦斯的储存场所又是瓦斯的流动场所, 煤体中任一单元体的瓦斯都不是从一点流入, 而是从整个截面渗入。

为更好地解决现有煤与瓦斯突出试验装置中存在的弊端, 特制定了以下基本研制思路: 承载框架可立面旋转 360° , 并分别能在水平和竖直位置固定, 既方便向突出模具内装料、又不影响突出煤样在模拟试验台上直接成型和突出试验的照常进行; 在模拟试验台许可的空间内, 尽可能加大突出煤样尺寸; 研制 5 种不同倾角的突出模具, 使其能模拟

井下石门揭煤时经常遇到的缓倾斜或倾斜煤层发生的突出灾害；利用泡沫金属透气不透煤的特性避免充气孔与突出煤样直接接触，更真实地模拟井下煤层瓦斯源；开发一种加载系统，使其能对突出煤样施加均布和阶梯形荷载，模拟发生突出时工作面前方的局部应力集中；研制一种自动控制的快速释放机构，高速打开突出口以避免手动打开速度偏慢的问题；借助高速摄像机对突出发生的瞬间进行全程录像，以方便对突出过程进行细微研究。设备研制中要求：工作原理先进，结构构造简单，并尽量采用先进技术，使该模拟试验台更加完善。

冲击地压和煤与瓦斯突出的发生均是由于煤岩体破坏而导致煤体与围岩组织的变形，其力学系统平衡被破坏时，释放的能量大于消耗的能量，剩余能量则转化为使煤体抛出和围岩震动的动能，二者不同的是突出有瓦斯作用。故二者模拟方式的最大区别是在进行煤与瓦斯突出模拟时必须使突出煤样在突出发生前充分吸附瓦斯，并在突出时保持煤体内具有一定的瓦斯压力和含量。而井下瓦斯主要以吸附和游离两种状态赋存在煤层中，在外界条件不变的情况下处于动平衡状态。突出发生时，游离瓦斯首先放散并冲出煤体，然后是吸附瓦斯迅速加以补充。通常情况下，瓦斯压力越大、地应力越大、煤层透气性越低、煤层倾角越小的区域越易引起煤与瓦斯突出，且突出强度也越大。

因该试验台主要用于从宏观上模拟理想状态的煤与瓦斯突出而并非冲击地压，故而突出煤样在预定荷载下成型后进行试验时，须在保持一定瓦斯压力不变情况下使煤样充分吸附瓦斯，当其成为理想状态的含瓦斯煤体时方可进行突出试验，以完成正常地质构造区域下的煤与瓦斯突出模拟。

2.2 研制目的

本模拟试验台主要用于进行煤与瓦斯突出模拟试验研究。利用所研制的5套突出模具在模拟试验台上装配后，可使突出煤样呈现出5种不同倾角，分别考察5种倾角煤样在一定荷载、不同瓦斯压力以及一定瓦斯压力、不同荷载(分均布和阶梯形两种)条件下的突出情况。考察指标主要有突出强度、突出前与突出过程中煤样的温度变化、模具内的瓦斯压力分布情况、发生突出时的瓦斯压力与地应力临界值以及不同瓦斯压力下突出煤的粉碎性及分选性等。其最终目的在于进一步研究地应力、瓦斯压

力与煤的物理力学性质之间的相互耦合作用及其对突出的综合作用机制，以期在综合作用假说的基础上更深层次地揭示煤与瓦斯突出机制^[14~16]，为形成煤与瓦斯突出力学演化机制及预测煤与瓦斯突出的基础理论提供量化支撑。

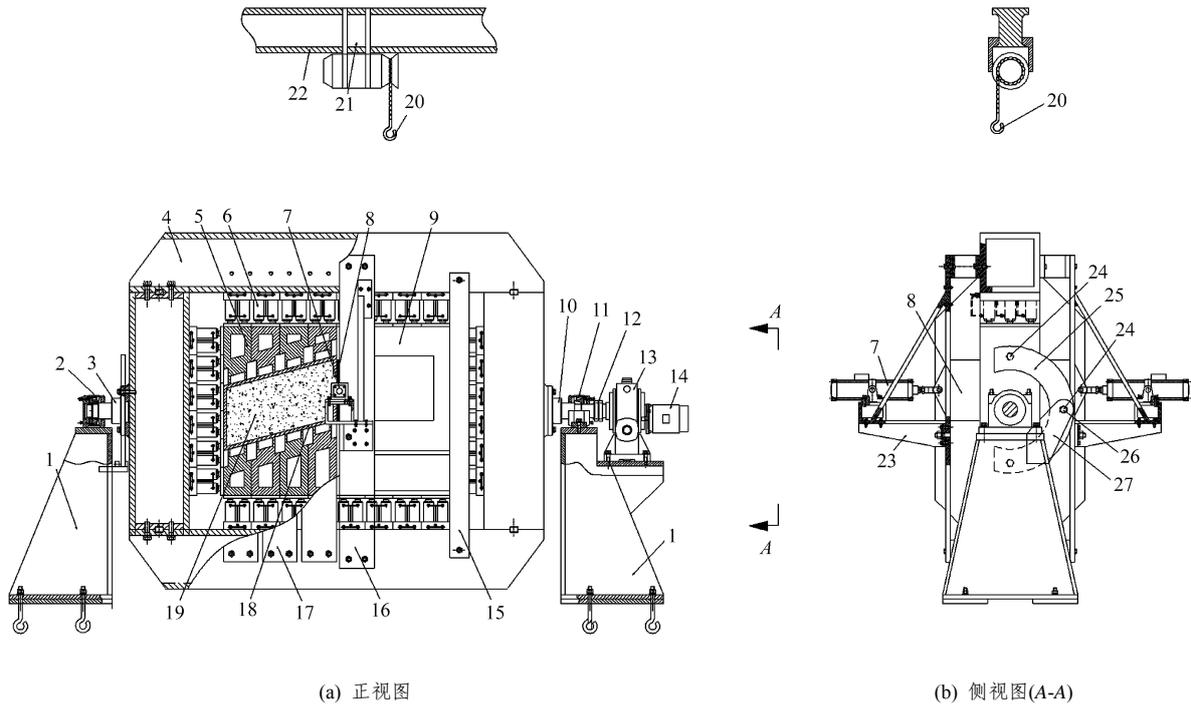
3 模拟试验台的结构方案设计

依据所制定的研制思路和目的，煤与瓦斯突出模拟试验台主要由煤与瓦斯突出模具、快速释放机构、承载框架、电流伺服加载系统、翻转机构、主机支架及附属装置组成，其结构如图1所示。

3.1 煤与瓦斯突出模具及瓦斯压力检测

本模拟试验台共开发煤与瓦斯突出模具5套，分别用来模拟倾角为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 及反 45° 煤层的煤与瓦斯突出试验。其中，模拟煤层倾角为 0° 、 15° 和 30° 时的模具均为六面体，倾角为 45° 与反 45° 时的模具为七面体，模具横截面尺寸均为 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 。所有模具均采用 30 mm 厚的Q235钢板焊接而成，突出端设有圆形开口以便煤样在外力作用下从模具中突出(图2给出了煤层倾角为 15° 时突出模具结构示意图)，每套模具均有两个活动面(侧封板、上压板)。突出模具的密封依靠密封圈、突出口专用密封膜和硅胶配合完成，经试验验证，突出模具密封效果良好，达到了试验要求。

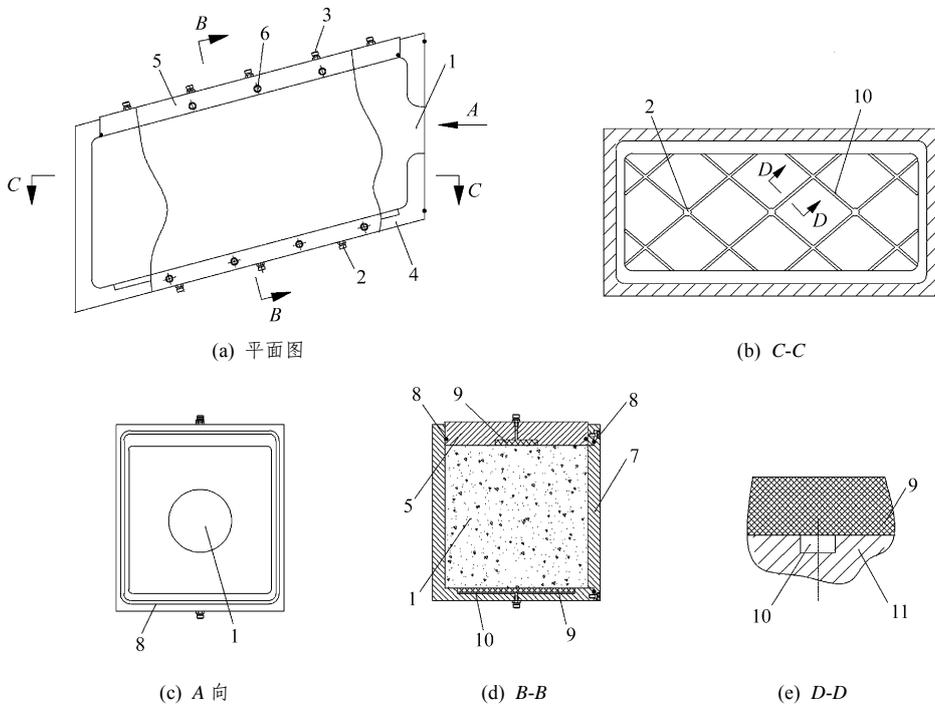
为达到能模拟井下煤层中任一单元体的瓦斯源均是从整个单元体截面渗入的目的，在每套模具底板上均刻有 5 mm 深纵横交错网状刻槽(见图2(b))，并在刻槽之上焊有 15 mm 厚的泡沫不锈钢材料以隔离进气孔和煤样(见图2(d)、(e))，该泡沫不锈钢强度高、孔隙孔径小，透气而不透粉尘，可保证煤样成型时煤粉不进入底板刻槽及进气孔中堵塞进气通道。对模型进行充气时，瓦斯气体首先从底板3个进气孔流入底板刻槽，再通过泡沫不锈钢渗入煤样。因此，本模拟试验台所研制的配套突出模具不仅能有效解决同类设备只能模拟水平倾角煤层的煤与瓦斯突出试验的技术难题，还真实再现了石门揭倾斜煤层时的煤与瓦斯突出灾害；同时，利用泡沫不锈钢材料隔离突出煤样和进气孔，既避免了现有同类设备中与实际情况有所偏差的“点充气”问题，又实现了对突出煤样实施均匀“面充气”，更加逼真地模拟了实际煤层瓦斯来源。



1—主机支架; 2—左轴承座; 3—左转轴; 4—承载架; 5—上压块; 6—液压千斤顶; 7—气压缸; 8—突出口侧封板; 9—支撑块; 10—右转轴; 11—右轴承座; 12—联轴器; 13—减速器; 14—步进电机; 15—固定梁; 16—气压缸支撑梁; 17—封梁; 18—突出模具; 19—突出煤样; 20—吊钩; 21—电动葫芦; 22—滑轨; 23—气压缸支架; 24—定位螺孔; 25—定位调节环; 26—定位支耳螺孔; 27—定位支耳

图 1 突出模拟试验台结构图

Fig.1 Structure of the outburst test device



1—突出口; 2—进气孔; 3—出气孔; 4—模具底板; 5—模具上压板; 6—螺杆(螺孔); 7—模具侧封板; 8—密封圈; 9—泡沫金属; 10—刻槽; 11—钢板

图 2 突出模具结构图

Fig.2 Structure of the outburst mould assembly

为了检测试验时突出发生前与突出过程中煤样的温度变化及煤样内的瓦斯压力分布情况,在每套模具的上压板上均匀布设5个出气孔(见图2(a)),分别接有快速气接头,并连接有最大测量压力范围为4 MPa的乙炔压力表,用于进行试验时检测煤样内所充瓦斯压力,同时,通过上压板的出气孔还可在煤样中埋设温度传感器,用来检测试验过程中温度的微小变化,以期开展利用温度变化来预测井下煤与瓦斯突出灾害发生与否的研究。瓦斯压力与温度数据均可通过MaxTest-Load试验控制软件显示。

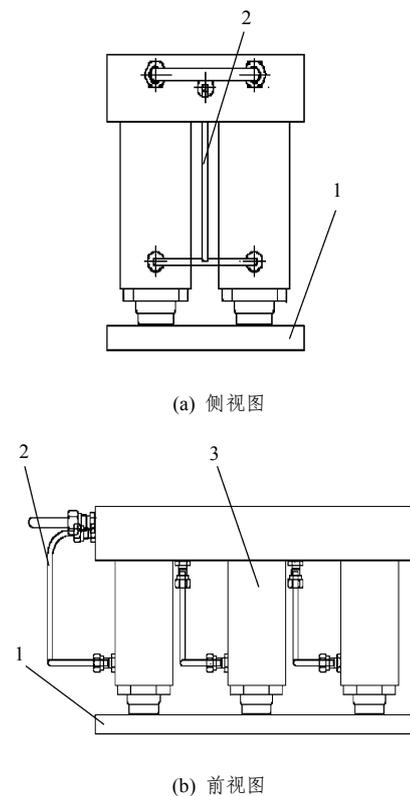
3.2 快速释放机构

快速释放机构主要由空气压缩机、气压缸、气压缸支撑梁、气压缸支架、突出口侧封板组成。空气压缩机型号为Y132S2-2,其上的气压自动开关型号为GYD20-20/C,调压范围为0.6~1.5 MPa;气压缸型号为KKP-15,压力范围为0.05~0.80 MPa;突出口双面侧封板最大行程170 mm,厚28 mm,表面加工精度 ≤ 0.01 mm。侧封板通过气压缸活塞杆与气压缸相连,试验前,两面侧封板对接于突出口中心并配合硅胶及专用密封膜将突出口封住,试验时,由空气压缩机供给气压缸预定的压力,通过气压缸活塞杆带动两侧封板高速收回而打开突出口,相当于井下煤体中起阻碍突出作用的“应力墙”突然破坏,使煤样突出端突然卸压以完成试验。整个装置实现了机械化自动控制高速打开突出口,有效解决了同类试验装置中由于手动打开突出口速度偏慢而影响突出强度的技术难题,更真实地模拟了井下石门揭煤突出的动力灾害现象。

3.3 电流伺服加载系统

电流伺服加载自动控制系统主要由液压千斤顶、伺服液压站、计算机、MaxTest-Load试验控制软件、16+1台联网的MaxTC测控仪以及测量传感器等组成,可实现试验过程全程自动化控制,安全可靠。MaxTest-Load软件具有控制液压千斤顶出力、试验数据的测量与屏显、试验曲线屏显、试验报表的打印等功能。伺服液压千斤顶共28套,每套由6个小液压千斤顶组成,呈2排3列布置;单套液压千斤顶最大顶出力300 kN;千斤顶活塞杆最大行程100 mm。28套液压千斤顶又按不同的组合分为18组,其中,进行煤与瓦斯突出试验时主要由第7,8,9,10套液压千斤顶对突出模型施加荷载,千斤顶压板为矩形,尺寸为400 mm×200 mm×20

mm,荷载测量精度为 $\pm 1.0\%$ 。研制的液压千斤顶结构如图3所示。其优点是结构合理、原理先进、性能优良、活塞行程大、荷载集度高等,对模型表面不均匀变形的适应能力强,可在模型块体内产生大范围的应变场。每套液压千斤顶均可以通过MaxTest-Load软件编程控制使其出力不同,从而对突出煤样施加阶梯形荷载。伺服液压千斤顶的使用有效解决了同类实验装置只能施加均匀荷载的弊端,通过施加阶梯形荷载,可模拟井下采煤工作面前方由于采矿活动造成突出的局部应力集中。



1—压板; 2—供油管路; 3—液压油缸

图3 液压千斤顶结构图

Fig.3 Structure of the hydraulic jack

液压千斤顶的液动力由16台独立的压差式伺服液压站通过16道供油管路供给。液压站型号为YTY100L1-4PA(见图4),额定流量4.5 L/min,额定压力21 MPa。

3.4 承载框架

承载框架整体为4条钢柱围成的矩形,外观尺寸为2400 mm×3000 mm,上下2条钢柱外形尺寸为400 mm×400 mm×3000 mm,左右2条钢柱尺寸为400 mm×400 mm×2400 mm;4条钢柱均由40 mm厚的Q235钢焊接而成,框架四角通过16根



图4 伺服液压站

Fig.4 Servo-controlled testing device

$\phi 45$ mm的螺杆和4根 $20\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的销子连接并做成倒角。框架在半幅加载 $2\ 000\text{ kN}$ 的情况下,主框架最大挠度 $\leq 1\text{ mm}$ 。框架四周共设置28套活塞式液压千斤顶(上下各8套,左右各6套),可对突出模具中的型煤施加均布荷载和阶梯形荷载。

3.5 翻转机构

翻转机构主要由步进电机、减速器、轴承、联轴器、定位支耳、定位调节环等部件组成。减速器为二级蜗轮蜗杆减速器,型号为WPEDKA;步进电机型号为YE2100L1-4,制动力矩 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 。翻转机构工作时,步进电机的驱动力经减速器减速后,通过联轴器由转动轴带动承载框架转动可进行立面 360° 旋转。定位调节环和定位支耳上设有定位螺孔与支耳螺孔,在突出煤样安装状态时,通过定位支耳螺孔与定位调节环上的中定位螺孔相连,使承载框架保持在水平位置,便于装料;在进行突出试验状态时,通过定位支耳螺孔与定位调节环上的上定位螺孔相连,这样可使得承载框架位于竖直位置(见图1(b))。通过翻转机构将承载框架旋转至水平和竖直位置,既可达到安装煤样方便又不影响突出试验时的工作状态目的。

3.6 主机支架

主机支架由 40 mm 厚的Q235钢焊接而成的左右两支架构成,高 $1\ 350\text{ mm}$,从侧面看呈梯形,上窄下宽,底端由8根 $\phi 45\text{ mm}$ 的地脚螺钉锚固在用C30混凝土固结的地基上,每根螺钉锚深 320 mm 。支架的作用主要用于安设翻转机构的转轴及承载框架,并保证承载框架旋转时模拟试验台的稳定性。

3.7 其他附属装置

本模拟试验台的附属装置主要包括突出模具夹持装置、单轨电动葫芦和高速摄像机等。

模具夹持装置主要由液压千斤顶、上下压块、支撑块、左右侧封梁组成。左右侧封梁各3个,均为4块 30 mm 厚的Q235钢板焊接而成的钢柱。试验时(见图1(a)),突出模具左端钢板直接与左排千斤顶抵接,突出端利用右排千斤顶施压于支撑块上将模具左右夹紧,承载框架上的上下两排千斤顶分别施压于上、下压块上使之分别与突出模具的上压板和底板抵接,将模具上下固定、夹紧,便可进一步对煤样施加压力。左右侧封梁的作用在于挡住模具的左右侧板,以保证在对煤样充一定瓦斯压力的情况下使其不发生横向应变而影响突出模具的气密性。

因模拟试验台所用的突出模型尺寸较大,突出模具和突出煤样的总重量过大,需设单轨电动葫芦提升方可完成突出模具的更换与安装。单轨电动葫芦主要有滑轨和电动葫芦组成,位于突出模拟试验台正上方,额定起重力 30 kN 。

模拟试验台配套的HG100K型高速摄像机由美国RCDIAKE MASD生产。该机方便安装在恶劣场合,具有研究快速运动特性、快速反应特性等优点,特别适合煤与瓦斯突出过程的全程录像。

4 模拟试验台优点

本模拟试验台与同类设备相比,具有以下独特优势:

(1) 突出煤样的纵向荷载由计算机软件控制多组液压千斤顶施加均布和阶梯形荷载,可模拟井下采煤工作面前方造成突出的局部应力集中。

(2) 与同类装置相比,煤样尺寸较大,并可模拟多种不同倾角煤层在不同地应力、不同瓦斯压力下的煤与瓦斯突出,有效解决了以往突出试验中仅能模拟水平倾角煤层突出的缺陷,真实再现了不同实验条件下的煤与瓦斯突出情形。

(3) 利用多孔介质材料泡沫不锈钢隔离煤样与进气孔,既有效解决了同类装置中与实际情况有所偏差的仅能对突出煤样进行“点充气”的弊端,又实现了对突出煤样均匀“面充气”,更加逼真地模拟了井下煤层瓦斯来源。

(4) 突出口密封板由快速释放机构实施机械化自动控制高速打开,较好地解决了同类装置中煤样突出端卸压速度偏慢而影响突出强度的技术难题。

(5) 采用高速摄像机录像, 首次实现了突出全程回放, 通过可录像分析突出能量衰减程度及声发射传播衰减机制随突出阶段(或时间)的变化关系。

5 模拟试验台精度检测

突出模具内煤样所承受的荷载大小, 关系着突出煤样是否能准确模拟在预定地应力下发生煤与瓦斯突出, 所以必须对模拟试验台上的液压千斤顶进行精度检测, 检测内容为 MaxTest-Load 软件中所显示的千斤顶出力数值是否与其真实出力一致。检测仪器为 0.3 级标准测力仪, 型号为 EHB - 600B, 最大可测力 600 kN, 精度为 0.30%。

检测时, 利用强度较高的实体钢块将测力仪固定在承载框架中, 通过 MaxTest-Load 软件设定每套液压千斤顶 8 个级别的出力值(见表 1)。由测力仪对千斤顶的每个出力级别进行逐级检测, 且每个级别出力进行 3 次测量取平均值, 将软件中显示的千斤顶出力数据与测力仪实测数值进行比较, 以验证液压千斤顶出力精度是否满足试验要求。篇幅有限, 这里只列出在进行煤与瓦斯突出试验时对煤样施加荷载作用的 4 套千斤顶中的 2 套, 它们在伺服加载系统中的标号分别为第 7, 8 套液压千斤顶。由表 1 可知, MaxTest-Load 软件中显示的 2 套千斤顶出力与实际出力值相比, 第 7 套千斤顶最大满量程误差 1.87%, 最大逐点相对误差为 2.09%; 第 8 套千斤顶最大满量程误差 0.27%, 最大逐点相对误差为 0.81%, 满足模拟试验台精度要求。

表 1 千斤顶精度检测数据表

Table 1 Data table accuracy test of the hydraulic jack

测试强度/kN	标准值/mm	第 7 套			第 8 套		
		平均值/mm	满量程误差/%	相对误差/%	平均值/mm	满量程误差/%	相对误差/%
30	1.430	1.421	0.21	2.09	1.427	0.08	0.81
50	1.711	1.704	0.17	1.05	1.710	0.02	0.14
80	2.142	2.137	0.13	0.48	2.140	0.05	0.18
100	2.427	2.430	0.06	0.18	2.429	0.03	0.11
150	3.145	3.169	0.56	1.12	3.150	0.12	0.23
200	3.860	3.876	0.36	0.54	3.869	0.21	0.31
250	4.580	4.540	0.93	1.12	4.589	0.21	0.25
300	5.302	5.222	1.87	1.87	5.314	0.27	0.27

6 试验实例

现场的回采或掘进工作面生产均遵循“先抽后采”的方针, 以此卸压来预防煤与瓦斯突出的发生, 故而正常生产的工作面并没有明显的异常特征出现。但若有煤与瓦斯突出发生时, 工作面则有明显特征出现: 煤壁上有形状各异的突出孔洞形成; 抛出的碎煤有明显的分选性; 瞬间涌出大量瓦斯、煤层层理紊乱等。

利用所研制的“大型煤与瓦斯突出模拟试验台”, 在安装调试期间, 分别于 2008 年 1 月 14 和 18 日成功进行了 2 次煤与瓦斯突出试验。图 5, 6 分别为煤与瓦斯突出试验前和突出过程中所拍图像, 试验所用煤样均采自重庆煤炭集团松藻煤电公司打通一矿有突出危险的 8# 煤层。首先利用粉碎机和振动筛将煤样粉碎、筛选, 然后将筛选好后的不同粒径的煤粉在不掺任何其他添加剂成分的情况下, 按照 5~10 目(标准筛筛孔尺寸的大小): 10~20 目: 20~40 目: 40~60 目: 60~80 目: 80~100 目=1:1:2:3:2:1 的配比方案拌匀, 并掺入 3% 的水分, 在模拟试验台上分 3 次装入 15° 倾角的突出模具内直接由液压千斤顶成型, 成型压力 1 200 kN, 稳定 30 min。2 次试验所充气体均为 99.99% 的高纯 CH₄, 密封后, 在充气压力分别为 0.5 和 1.5 MPa 的情况下均保持压力 24 h 不变, 使成型后的煤样充分吸附瓦斯并在模具内形成与井下实际情况相似的含瓦斯煤体, 最后, 利用快速释放机构的控制开关突然打开突出口侧封板, 使突出端瞬间卸压以完成突出, 并进行突出过程录像。2 次突出试验的边界条件(见图 1(a)): 突出模具上下两端面压力为 1 200 kN, 左右和前后 4 个端面采用位移约束, 位移为 0, 突出煤样内部突出时保持预定瓦斯压力(分别为 0.5 和 1.5 MPa)。通过试验初步得出如下结论:

(1) 突出^[17]时, 形成口小腔大的梨形突出孔洞(见图 7), 孔洞中心线与水平面的夹角为 40°~45°, 且突出孔洞容积与突出煤的体积相比为 1/2~2/3。

(2) 突出的碎煤具有明显的分选性, 在靠近突出出口附近主要为 5~20 目之间的煤粒, 离突出口较远处和煤堆上部主要为 60~100 目粒径的粉煤。

(3) 突出煤的堆积坡面角小于其自然安息角。



图 5 煤与瓦斯突出试验前状态图
Fig.5 State before coal and gas outburst test



图 6 煤与瓦斯突出试验过程状态图
Fig.6 State during coal and gas outburst test



图 7 突出孔洞形状
Fig.7 Shape of outburst hole

(4) 充气压力越大则突出强度越大, 煤粒被抛出的距离越远, 突出煤的粒径比例中, 小粒径的粉煤所占比例越大。

7 结 论

本文在分析同类现有煤与瓦斯突出试验装置优

缺点的基础上, 详细介绍了“大型煤与瓦斯突出模拟试验台”的研制思路、研制目的、结构方案设计、精度检测等内容, 并将组成模拟试验台的部件分七大部分进行了重点阐述。分析认为该试验台主要有如下功能:

(1) 利用电流伺服加载系统可对突出煤样施加均布荷载和阶梯形荷载, 模拟工作面前方造成突出的局部应力集中现象。

(2) 可实现 5 种不同倾角煤层在不同地应力、不同瓦斯压力下的煤与瓦斯突出模拟试验, 避免了以往只能模拟水平倾角煤层的突出试验。

(3) 利用泡沫不锈钢隔离煤样与进气孔, 实现了对突出煤样的“面充气”功能, 逼真模拟了井下煤层瓦斯源。

(4) 通过快速释放机构, 可瞬间打开突出口使突出端突然卸压, 减小了对突出强度的影响。

(5) 实现了煤与瓦斯突出试验的全过程回放。

最后简要介绍了利用该试验台成功进行的两次煤与瓦斯突出模拟试验, 观测到瓦斯压力越大突出强度越大、具有明显的典型突出孔洞以及突出的碎煤具有明显的分选性等现象, 与现场煤与瓦斯突出特征基本吻合, 进而证明该模拟试验台将在煤矿瓦斯灾害防治领域发挥一定作用, 为国内学者进一步深层次研究煤与瓦斯突出机制做出应有贡献。

参考文献(References):

- [1] 谭云亮, 肖亚勋, 孙伟芳. 煤与瓦斯突出自适应小波神经网络辨识和预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 373 - 3 377.(TAN Yunliang, XIAO Yaxun, SUN Weifang. Self-adaptive wavelet neural network for recognizing and predicating outburst of coal and gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 373 - 3 377.(in Chinese))
- [2] 胡千庭, 邹银辉, 文光才. 瓦斯含量法预测突出危险新技术[J]. 煤炭学报, 2007, 32(3): 276 - 280.(HU Qianting, ZOU Yinhui, WEN Guangcai. New technology of outburst danger prediction by gas content[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3): 276 - 280.(in Chinese))
- [3] 王海锋, 程远平, 俞启香, 等. 煤与瓦斯突出矿井安全煤量研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2): 236 - 240.(WANG Haifeng, CHENG Yuanping, YU Qixiang, et al. Research on amount of safely mineable coal in mines susceptible to coal and gas outburst[J]. Journal

- of China University of Mining and Technology, 2008, 37(2): 236 - 240.(in Chinese)
- [4] АИРУНИАТИДР N. Coal and gas outburst theory under blast[M]. Moscow: Moscow Mining Institute, 1955.
- [5] 栗原一雄. かス突出の発生機構の解明に关する基础的研究[J]. 炭矿技术, 1980, (1): 16 - 19.(KURIHARA K. Basic study on analyzing occurring mechanism of gas outburst[J]. Coal Mine Technology, 1980, (1): 16 - 19.(in Japanese))
- [6] ALEXEEVA A D, REVVA V N, ALYSHEV N A, et al. True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction[J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 58(4): 245 - 250.
- [7] 孟祥跃, 丁雁生, 陈力, 等. 煤与瓦斯突出的二维模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 57 - 62.(MENG Xiangyue, DING Yansheng, CHEN Li, et al. 2D simulation test of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1): 57 - 62.(in Chinese))
- [8] 蔡成功. 煤与瓦斯突出三维模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 66 - 69.(CAI Chenggong. Experimental study on 3D simulation of coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 66 - 69.(in Chinese))
- [9] 邓全封, 栾永祥, 王佑安. 煤与瓦斯突出模拟实验[J]. 煤矿安全, 1989, (11): 5 - 10.(DENG Quanfeng, LUAN Yongxiang, WANG You'an. Experimental simulation of coal and gas outbursts[J]. Safety in Coal Mines, 1989, (11): 5 - 10.(in Chinese))
- [10] 牛国庆, 颜爱华, 刘明举. 煤与瓦斯突出过程中温度变化的实验研究[J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(3): 245 - 248.(NIU Guoqing, YAN Aihua, LIU Mingju. Experimental study on temperature variation of coal and gas outburst[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(3): 245 - 248.(in Chinese))
- [11] 郭立稳, 俞启香, 蒋承林, 等. 煤与瓦斯突出过程中温度变化的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 366 - 368.(GUO Liwen, YU Qixiang, JIANG Chenglin, et al. Testing study on variation of coal temperature during the process of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 366 - 368.(in Chinese))
- [12] 赵毅鑫, 姜耀东, 祝捷, 等. 煤岩组合体变形破坏前兆信息的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 339 - 346.(ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, ZHU Jie, et al. Experimental study on precursory information of deformations of coal-rock composite samples before failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 339 - 346.(in Chinese))
- [13] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 岩土工程多功能模拟试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 372 - 378.(CHEN Anmin, GU Jincai, SHEN Jun, et al. Development and application of multifunctional apparatus for geotechnical engineering model tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 372 - 378.(in Chinese))
- [14] 王继仁, 邓存宝, 邓汉忠. 煤与瓦斯突出微机制研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(2): 131 - 135.(WANG Jiren, DENG Cunbao, DENG Hanzhong. Study on microcosmic mechanism for coal-gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 131 - 135.(in Chinese))
- [15] 景国勋, 张强. 煤与瓦斯突出过程中瓦斯作用的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 169 - 171.(JING Guoxun, ZHANG Qiang. Study on role of gas in coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 169 - 171.(in Chinese))
- [16] 张玉贵, 张子敏, 曹运兴. 构造煤结构与瓦斯突出[J]. 煤炭学报, 2007, 32(3): 281 - 284.(ZHANG Yugui, ZHANG Zimin, CAO Yunxing. Deformed-coal structure and control to coal-gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3): 281 - 284.(in Chinese))
- [17] 蒋承林. 煤壁突出孔洞的形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 225 - 228.(JIANG Chenglin. Study on forming mechanism of coal outburst hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 225 - 228.(in Chinese))