

# 基于局部矿井刚度理论的冲击地压试验装置研制及应用

高富强<sup>1,2</sup>, 原贵阳<sup>1,2</sup>, 娄金福<sup>1,2</sup>, 卢志国<sup>1,2</sup>, 李建忠<sup>1,2,3</sup>

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 煤层加载刚度及峰后承载刚度是影响冲击地压发生的重要因素, 为了系统研究基于局部矿井刚度理论的冲击地压发生机理及煤柱冲击破坏规律, 开发了冲击地压实验室试验装置。试验装置主要由静力加载系统、储能系统、变刚度加载系统、开挖系统和多源信息监测系统5部分组成。该试验系统的主要创新如下: ① 加载系统中增加开挖装置, 可在保压状态下通过开挖诱发试样产生应力集中及局部矿井刚度的降低, 当试样受力达到其承载强度、局部系统刚度低于试样峰后刚度时将发生冲击破坏; ② 加载系统中设置了气囊式蓄能器-油缸的复合液压弹簧储能装置, 可在静力加载过程中完成能量的储存; ③ 设置了一种变刚度加载装置, 系统可通过蓄能器初始气囊压力的调整实现不同加载刚度的设置; ④ 试验装置可对试样从加载—稳压—开挖—冲击全过程进行实验室再现, 使得冲击地压发生全过程煤柱应变监测以及冲击过程观测成为可能。通过对高强度混凝土试块和强冲击倾向性煤样进行初步实验室试验, 验证了该模拟设备的准确性和可靠性, 初步试验结果表明: 低刚度加载条件下通过开挖底部试样可有效诱发煤柱发生冲击破坏, 煤柱破坏由低刚度侧向高刚度侧扩展贯通, 破坏后的残留煤柱呈现出“两侧宽中心窄”的哑铃状态。冲击破坏后的煤柱中心被一条横向锯齿裂纹贯穿, 致使煤柱承载能力大幅度降低。该试验系统从加载储能及刚度角度出发, 可实验室再现煤体在加载—稳压—开挖—冲击破坏的冲击地压发生全过程, 为煤矿冲击地压发生机理研究提供试验平台。

**关键词:** 局部系统刚度; 冲击地压; 试验系统; 变刚度加载

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2023)05-1985-11

## Development and application of coal burst experiment system based on local mine stiffness theory

GAO Fuqiang<sup>1,2</sup>, YUAN Guiyang<sup>1,2</sup>, LOU Jinfu<sup>1,2</sup>, LU Zhiguo<sup>1,2</sup>, LI Jianzhong<sup>1,2,3</sup>

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The loading mine stiffness and the post-peak stiffness of a coal pillar are important factors affecting the occurrence of coal bursts. In order to systematically study the mechanism of coal bursts and pillar bursts based on local mine stiffness theory, a laboratory-scale coal burst experiment system has been developed. The system is mainly composed of static loading system, energy storage system, variable stiffness loading system, excavation system and multi-source information monitoring system. The main innovations of the test system are as follows: ① An excavation device is added to

收稿日期: 2022-10-29 修回日期: 2023-05-15 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1551

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274085, 52074154); 天地开采设计事业部科技创新基金资助项目(TDKC-2022-QN-01)

作者简介: 高富强(1981—), 男, 河南周口人, 研究员, 博士。E-mail: gaofq0215@gmail.com

通讯作者: 原贵阳(1994—), 男, 山西长治人, 硕士。E-mail: 1185413007@qq.com

引用格式: 高富强, 原贵阳, 娄金福, 等. 基于局部矿井刚度理论的冲击地压试验装置研制及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1985-1995.

GAO Fuqiang, YUAN Guiyang, LOU Jinfu, et al. Development and application of coal burst experiment system based on local mine stiffness theory[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1985-1995.



移动阅读

the loading system, which can induce the stress concentration of the specimen and the reduction of local mine stiffness through excavation in the pressure-holding state. Coal bursts will occur when the specimen is stressed to its bearing capacity and the local system stiffness is lower than the post-peak stiffness of the specimen. ② The loading system is equipped with an energy storage device of oil cylinder airbag accumulator, which can store energy during loading. ③ A variable stiffness loading device is set up to adjust different loading stiffnesses by adjusting the initial airbag pressure of airbag accumulator. ④ The experiment system can reproduce the whole process of specimen from loading-stabilization-excavation-burst in laboratory, which makes it possible to monitor the strain of coal pillar during the whole process of coal bursts and observe the burst process. The accuracy and reliability of the simulation equipment are verified by preliminary laboratory tests on high-strength concrete blocks and realistic coal samples. The test results show that under the condition of low stiffness loading, the unstable failure of coal pillars can be effectively induced by excavating bottom samples, and the failure position extends from the low stiffness side to the high stiffness side. The damaged central residual coal pillar is dumbbell shaped under the action of top and bottom plate friction, and is cut off at the center by a transverse sawtooth crack penetrating the sample, resulting in a significant reduction in the bearing capacity of the coal pillar. The development of the experiment system can reproduce the whole process of coal bursts from loading, pressure stabilization, excavation and unstable failure in the laboratory from the perspective of local mine stiffness, and can provide an experimental basis for the mechanism of coal bursts in coal mines.

**Key words:** local system stiffness; coal burst; experiment system; variable stiffness loading

在采掘过程中井巷或工作面周围煤岩体在一定条件下发生突然剧烈破坏的动力现象,并伴有煤岩体抛出、巨响及气浪等,具有很强的破坏性,此种现象称为冲击地压(在水电交通隧道等行业称为岩爆)<sup>[1-2]</sup>。目前随着我国煤炭开采深度增加及范围不断扩大,冲击地压发生的频次和破坏程度也愈发强烈。冲击地压的易发、频发、难防治特征使得传统防治措施受到极大挑战,严重制约矿井的安全高效开采<sup>[3]</sup>。

实验室试验及机理研究一直是冲击地压(岩爆)防治的源头治理措施,而地质物理模型试验作为研究深部地下工程结构失稳机制的一种重要手段,具有成本低、易操作、高保真等优点,便于定性或定量分析工程结构体的受力特性<sup>[4-6]</sup>。针对冲击地压及岩爆机理研究,国内外大量学者进行了相关设备的研发及试验工作。李夕兵团队对硬岩岩爆实验室试验机理、方法和设备进行了大量、系统性的研究,从“动静组合”力学作用的思路出发,分别进行了“高静力+卸载扰动”、“高静力+加载扰动”及“高静应力+开挖结构+应力调整”等不同条件下岩爆的试验研究<sup>[7-11]</sup>。赵同彬等<sup>[12]</sup>自主研发了一套内外框架组合式变刚度煤岩动力破坏试验系统,加载刚度调控范围为0.35~10.00 GN/m,为不同加载刚度下矿山典型岩石的力学行为测试提供了新的试验装备与测试方法;何满潮等<sup>[13]</sup>研发了冲击岩爆试验系统,利用简谐波模拟动载开挖爆破、顶板垮落、断层滑移等产生的动态扰动波,通过巷道单元岩体动应力和能量的分析,建立了冲击岩爆的动应力和能量判别方法。顾金才等<sup>[14]</sup>研发了新型岩爆模

拟试验装置并成功模拟了抛掷型岩爆现象,并针对抛掷型岩爆提出了4点新认识,为岩爆机制研究、教学及相关工程建设提供参考。齐燕军<sup>[15]</sup>围绕煤矿高应力巷道岩爆孕育机理及发生过程,自主研发试验系统和相似材料,实验室再现了高应力岩体岩爆的发生、发展全过程,提出了岩爆的孕育机理、灾变过程、发生条件、分级标准及预测方法。胡李华<sup>[16]</sup>采用“单面临空—五面施加静载—一切向施加动力扰动”的加载路径,解决了触发型岩爆的应力路径和边界条件转化、动静组合加载关键问题,研发了新型高压伺服动真三轴岩爆试验系统,探讨了触发型岩爆工程防治措施,提出了触发型岩爆及时支护、全生命周期支护及增强围岩抗拉强度支护等设计原则。李浪等<sup>[17]</sup>基于弹性加载边界开展了地下开挖卸荷诱发应变型岩爆试验,为岩爆理论研究、工程实践提供试验依据和数据支撑。单仁亮等<sup>[18]</sup>研发了动压巷道支护相似模拟试验装置,该试验系统通过静载油缸施加初始静载荷,采用动载油缸施加动载应力模拟顶板破断等产生的外部动力源,再现了动压巷道冲击失稳过程。史新帅等<sup>[19]</sup>研制了大尺度三维巷道冲击地压灾变演化与失稳模拟试验系统,采用液压加载提供静荷载模拟初始地应力场,炸药爆破模拟动载源,对深部巷道在动静载组合作用下的冲击失稳过程进行研究。上述研发设备及研究内容均取得了较大的进展,对岩爆及冲击地压防治提供了坚实的基础研究平台。

目前现有的设备均是采用卸载或者动载、动载荷波扰动的方式模拟冲击地压及岩爆,其具体做法是在

卸载前就在试件的某个方向施加了超过材料单轴抗压强度的应力或者人为施加动载荷诱发冲击地压发生<sup>[5]</sup>。关于能量与加载刚度方面的冲击地压试验系统研究成果较少, 值得关注的是顾金才院士在 2014 年所研发的 2 套岩石力学设备, 通过弹簧压缩储存一定的弹性能, 在试样失稳瞬间完成能量释放成功模拟了抛掷型岩爆<sup>[14]</sup>。笔者所研发设备是在顾金才研发成果的基础上辅以局部矿井刚度理论进行进一步研究与完善。笔者根据顾金才院士对抛掷型岩爆及冲击地压模拟提出的 3 个建议: ① 试件材料要有硬脆性特征; ② 在试件上要产生应力集中现象 (模拟洞壁围岩的应力集中现象); ③ 在加载过程中要有能量补充。

研发了基于局部矿井刚度理论的冲击地压试验装置。该试验装置采用液压加载提供静载荷模拟初始地应力, 利用液压弹簧油缸进行能量储存及变刚度加载, 通过开挖诱导试样产生应力集中。试验装置配备了声发射监测系统、高速摄像机测量系统及动、静态应变采集系统等监测手段, 可用于实验室再现应变型冲击地压从初始加载至冲击完成全过程, 为煤矿巷道动力灾害防治提供基础试验平台与基础测试数据。

## 1 系统研制理论背景

### 1.1 局部矿井刚度理论

局部矿井刚度的概念由 Salamon 于 1970 年提出, 定义为矿井不同位置在不同开采阶段煤层及其顶、底板系统的相应刚度<sup>[20]</sup>。为了便于理解, 可通过图 1 岩石试件的单轴压缩峰后曲线来说明:

(1) 当加载系统的刚度 (表达为直线 AB 的斜率) 大于试样的峰后刚度 (表达为直线 AC 的斜率), 则其在岩石破坏瞬间释放的能量 (表达为四边形 ABED 面积) 小于岩石可以吸收的能量 (四边形 AFED 面积), 岩石发生稳定性破坏。

(2) 当加载系统的刚度 (AG) 低于试样的峰后刚度 (AC), 则其在岩石破坏期间释放的能量 (AGED) 将大于岩石可以吸收的能量 (AFED), 岩石发生不稳定性破坏。

(3) 岩石加载过程中存在临界刚度, 当加载刚度低于临界刚度时, 岩石发生不稳定性破坏, 当加载刚度高于临界刚度时, 岩石将发生稳定性破坏。

与实际情况相对应, 地下工程中随着采掘活动的不断进行, 岩煤体不断被采出, 局部矿井刚度 (可以看作是加载系统刚度) 逐步减小<sup>[21-22]</sup>, 当局部系统刚度低于煤柱 (可以看作是试样) 刚度时, 煤体发生不稳定性破坏 (如冲击地压) 的概率将逐步增加, 刚度变化情况如图 2 所示<sup>[23-24]</sup>。

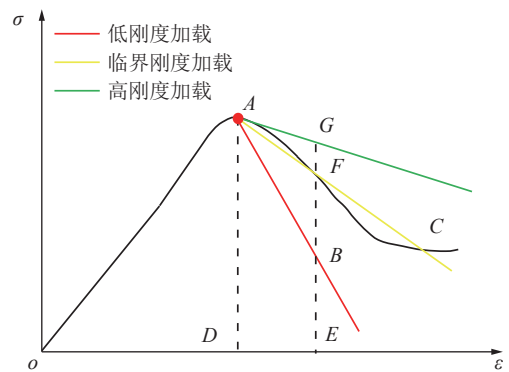


图 1 加载刚度示意

Fig.1 Schematic of loading stiffness

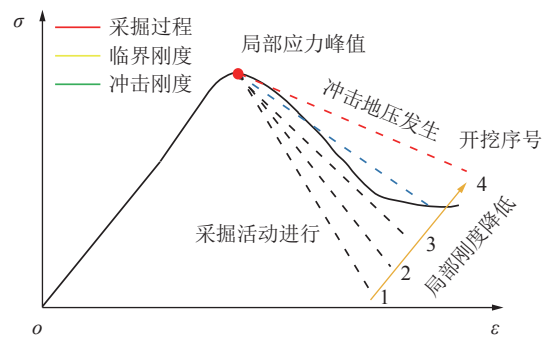


图 2 局部矿井刚度示意

Fig.2 Schematic diagram of local mine stiffness

局部矿井刚度理论从系统刚度的方向对冲击地压进行分析, 可用来解释近年来部分冲击地压事故发生的 3 个特点: ① 浅埋矿井也可以发生冲击地压; ② 无冲击倾向性的煤层也发生冲击破坏; ③ 冲击地压多发生在采掘过程中, 而在矿井基建过程中很少发生冲击。基于局部矿井刚度理论可知, 地下煤体在采掘过程中, 随着冲击煤柱周边煤体被不断开挖, 自身应力集中程度逐渐升高, 且局部矿井刚度逐渐降低, 煤柱加载系统变“软”, 煤柱发生不稳定性破坏的概率增加。

### 1.2 系统原理

基于现有的冲击地压普遍认知及局部系统刚度理论研制一套试验设备, 实验室再现冲击地压发生全过程。根据前文所述冲击地压发生的 3 个关键因素: 高应力、能量释放以及低刚度 (低于负载系统刚度) 加载, 只有在实验室有效还原这 3 个关键因素, 才能有效还原冲击地压的发生过程。

(1) 应力集中。完整煤层中上部垂直地应力可近似看作为均匀分布状态, 随着开采活动的进行, 大部分煤体被采出, 煤层受力面积逐渐减小, 此时采掘空间内遗留煤柱将逐渐产生应力集中。开采范围越大, 煤柱应力集中程度越剧烈。为了还原煤体由均匀受力到应力集中的变化过程, 设备中须增加开挖装置, 且开挖必须在地应力环境中进行。



(2) 能量释放。煤层上覆坚硬岩层的压缩储能是导致冲击地压发生的主要能量来源,且不同性质的岩层储存弹性能的能力差异较大<sup>[25]</sup>。当下部某个煤柱发生突然失稳时,上部坚硬岩层储存的能量将通过煤柱破坏进行释放,加剧煤柱的不稳定破坏程度。因此在试验设备中必须设置一种能量储存结构,且该装置的能量积聚须在地应力施加过程中完成。限于液压系统的缺陷,现有的大部分设备无法通过液压实现此类作用方式,因此顾金才院士在设备中加入了机械弹簧结构。试验过程中随着上部载荷的施加,弹簧逐渐被压缩以完成能量的存储,更换不同刚度的弹簧可实

现不同性质岩层或不同程度能量积聚的模拟。

(3) 变刚度加载(二次加载)。不同性质的岩层在下部煤柱发生冲击破坏进行能量释放的同时也伴随着二次加载,而不同弹性模量的岩层具有不同的二次加载刚度。为了有效模拟系统的不同加载刚度,需进行弹簧刚度的变更,弹簧刚度越高,二次加载刚度越高,试样越不容易发生冲击破坏,此类原理在本质上与岩石力学经典刚性试验机、柔性试验机原理一致<sup>[26]</sup>。

经过上述 3 个关键因素分析,拟研制整体试验系统模拟原理如图 3 所示。

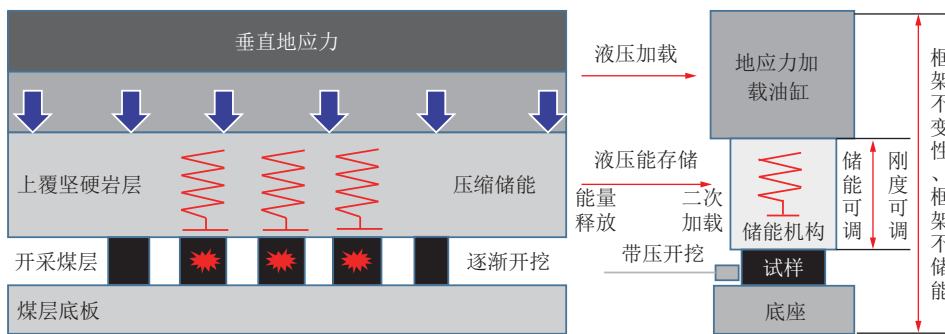


图 3 系统模拟原理

Fig.3 Principle of simulation system

## 2 试验系统研制

局部系统刚度冲击地压试验装置主要由静力加载系统、能量储存系统、变刚度加载系统、开挖系统及多源信息监测系统 5 部分组成,试验装置如图 4 所示。

该试验系统可对真实煤样在加载—保压—开挖—诱发冲击 4 个阶段进行实验室模拟,且试验装置加载刚度、存储能量大小灵活可调,可实现对煤体在不同

开挖方式及加载刚度作用下的冲击地压发生机理研究提供基础试验平台。下面主要就静力加载系统、能量储存系统、变刚度加载系统、开挖系统及多源信息监测系统做重点介绍。

### 2.1 静力加载系统

试验机静力加载系统主要由主机框架、拉杆、加载底座、滑移小车、法向油缸、加载压头以及动力系统 7 部分组成。主机框架、拉杆及加载底座是整个试验系统的反力框架。为保证试验机具有足够的刚度,即在加载过程中保证试验机框架不发生过大变形、不进行过多能量积聚,分别配备了 6 根高强拉杆将试验机底座与顶板反力架进行连接,连接装置为高强法兰螺栓;为了便于试验试样摆放及压头放置,在试验机水平方向上设置了滑移小车装置,该装置可在试验机水平方向进行自由滑动。滑移小车下部布置 4 个升降油缸以及滑轮,试验过程中首先将小车推出并将试样及加载压头布置于升降小车上,手动推送至试验机中心加载位置,并调节油缸使滑移小车降落至试验机底座,滑移小车结构如图 5 所示;动力系统由油源、油泵及阀等构件组成,用于为静载加载及储能系统提供动力;法向油缸是静力加载系统的主要施载装置,油缸设计加载能力为 6 000 kN,系统工作压力为 25 MPa。

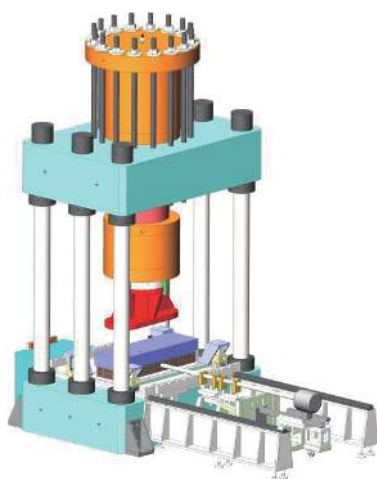


图 4 试验系统模型设计

Fig.4 Design of the experiment system



图 5 加载移动小车与加载压头结构

Fig.5 Structure of loading mobile trolley and loading indenter

### 2.2 储能系统

顾金才院士在抛掷型岩爆模拟试验技术中提出: 在试样加载过程中进行能量补充是试样产生冲击破坏的重要条件, 因此在加载系统中引入弹簧类储能装置是很有必要的。

笔者研制了一种弹簧油缸储能结构, 目的是采用液压加载系统来有效模拟弹簧的储能工况。弹簧油缸由一个普通液压油缸与 6 套气囊式蓄能器 (总容积 120 L) 组成。蓄能器作为一种常见的液压操控部件, 主要包括耐压壳体、气腔、弹性气囊以及液腔 4 部分。储能过程中首先通过充气阀对气腔补充不同压力的氮气 (一般要低于油腔压力), 当油腔工作压力大于气腔压力时, 气体的可压缩性质导致弹性气囊不断被压缩, 直至气体压力与油腔压力相同, 以此完成能量的存储过程。在本类试验中, 首先根据试验目标值以及油缸截面计算出实际工作压力, 并采用充氮装置调节蓄能器气囊压力, 例实际工作压力为 7.9 MPa, 气囊压力设置为 3 MPa。系统中油泵、蓄能器、油缸 3 者为串联关系, 当油泵工作时, 液压油经油泵产生并通过进油管进入蓄能器以及油缸内, 此时油泵作为主要的动力源分别完成了油缸载荷的施加以及蓄能器气囊的压缩, 而此刻实际工作压力、蓄能器油腔压力、弹性气囊压力 3 者相等。当油缸底部试样发生破坏致使其承载能力降低时, 油缸活塞杆伸出, 弹簧油缸进油腔容积变大。相同油量的前提下, 容积增大, 油压降

低, 此时蓄能器内气囊压力高于油腔压力, 气囊将产生瞬间膨胀, 将油腔内的液压油以气体膨胀的速度打入油缸内部完成弹簧的回弹及能量释放过程, 系统整体工作原理如图 6 所示。本类弹簧油缸结构是通过外置蓄能器的方式克服了传统液压供油速度过慢的问题, 将机械弹簧液压化, 在实现储能功能的基础上提高加载精度。

### 2.3 变刚度加载系统

采用普通的油压控制系统对试样进行加载时, 材料荷载-变形曲线达到峰值后材料强度降低, 变形加大, 会造成千斤顶瞬间卸载 (因油路供油过程缓慢), 使材料破坏停止在某一个阶段, 这也是油压控制系统加载条件下试样发生静力型破坏的主要原因<sup>[7]</sup>。本类系统引入了弹簧油缸装置, 通过气体的膨胀实现快速供油的目的以此来模拟弹簧回弹过程, 而弹簧回弹过程必然伴随着二次加载, 为了模拟不同岩层的二次加载过程, 需进行不同二次加载刚度的设置, 即弹簧油缸的变刚度加载问题。

为了便于理解, 将弹簧油缸结构比作一根弹簧, 不同的加载刚度对应于不同刚度的弹簧, 高刚度加载对应于硬弹簧, 低刚度加载对应于软弹簧。本类设备中主要通过调整蓄能器气囊的初始压力实现不同加载刚度的变更 (在本质上是调整气囊内初始气体量)。例如试验过程中, 高刚度加载气囊压力设置为 7 MPa, 低刚度加载气囊压力设置为 3 MPa, 初始充气过程中, 7 MPa 压力设置中气囊所充入的气体量要比 3 MPa 压力设置多, 在初始压力作用下, 2 类含有不同量气体的气囊均压缩至 7.9 MPa, 显然初期气体量多的气囊二次加载刚度更高。还可以理解为: 初始气体越多, 对应制作弹簧所用的钢材越多, 弹簧越粗, 相同压力作用下弹簧的压缩量更小, 二次加载刚度越高; 初始气体越少, 对应制作弹簧所用的钢材越少, 弹簧越细, 相同压力作用下弹簧的压缩量更大, 二次加载刚度越低。弹簧油缸变刚度加载原理如图 7 所示。

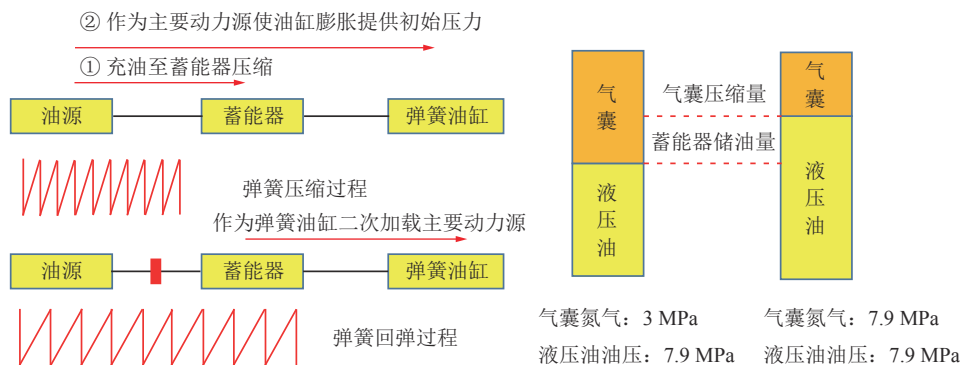


图 6 弹簧油缸储能原理

Fig.6 Schematic diagram of energy storage in the spring cylinder

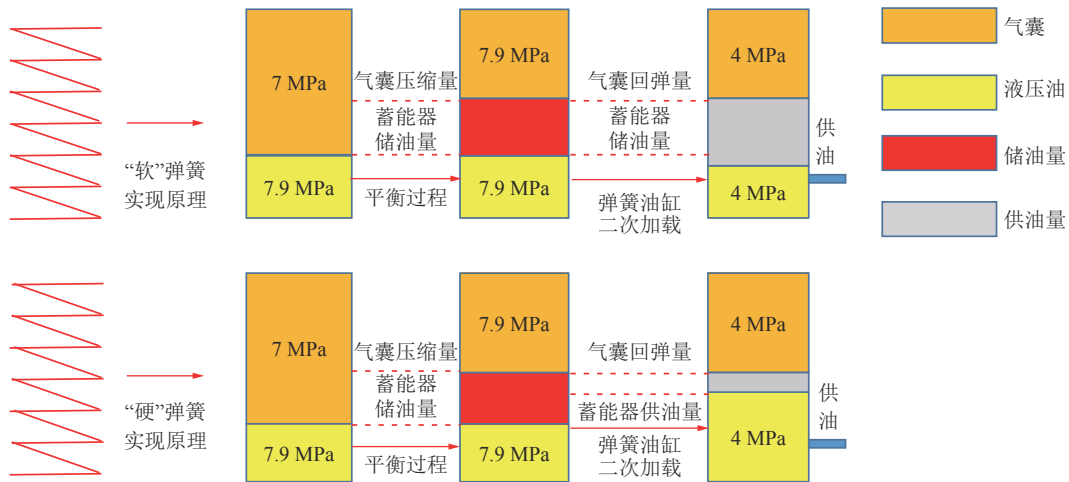


图 7 弹簧油缸变刚度加载原理

Fig.7 Schematic of variable stiffness loading of spring cylinder

2.4 开挖系统

试样产生应力集中是发生不稳定破坏的前提条件,笔者所研发设备中配备了一套开挖装置,通过开挖引起试样产生不同程度的应力集中,模拟矿井煤柱真实应力集中过程。

开挖系统由钻机、钻杆定向装置及除尘装置 3 部分组成。钻杆定向装置由高强度钢板制成,根据试样的摆放位置分别进行开孔,并在上部配合钻杆锁定装置进行钻杆固定。钻杆定向装置设置于试验机底座,分别在水平及垂直方向上设置长孔用以调节水平位置及垂直高度,实现对试样的不同位置精准开挖,钻杆定向装置如图 8 所示。由于本试验系统实验对象是原煤或者强度较高的岩石材料,且试样在地应力作用下内部裂隙被压实,大幅度增加了试样的开挖难度。为了便于开挖,在开挖装置中配套了电机驱动以及液压驱动 2 套动力系统,电机驱动用于控制钻头旋转切岩,液压驱动用于控制钻杆的水平推进,钻杆推进距离即切割深度需提前在钻杆做出相应的标记,通过控制标记点与定向装置之间的水平位移实现指定深度开挖。开挖过程中为了达到较好的试验效果,配备了手持式电锤开挖装置,通过一字形钻头冲击开挖试样周边区域。开挖过程中首先利用钻机在开挖试样中心切割圆孔进行卸压,再使用手持式电锤开挖装置将试样周边的残留岩石进行进一步清除,开挖过程如图 9 所示;除尘装置为大功率工业吸尘器,用于开挖过程中试样残渣及粉尘的清理。

2.5 多源信息监测系统

多源信息监测系统包括应力监测系统、声发射监测系统、压力及位移监测系统、高速相机等,可实现在试样加载—稳压—开挖—冲击全过程的应力、声发射信息实时采集,同时借助高速相机捕捉中心煤柱在冲

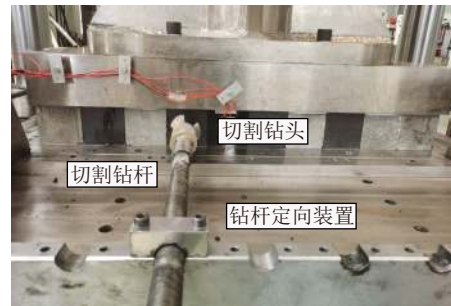


图 8 钻杆定向装置

Fig.8 Drill pipe orientation device



(a) 钻孔卸压



(b) 电锤清理

图 9 试样开挖方式

Fig.9 Excavation method

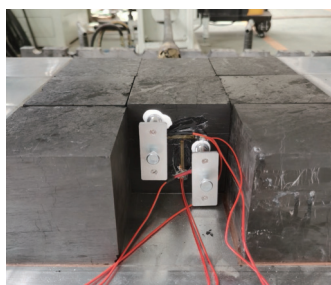
击破坏瞬间的破坏方式及块体抛出特征。

(1) 压力、位移监测系统。压力、位移监测系统主要包括对试样加载—稳压—开挖过程中的弹簧油缸压力、活塞杆伸出量进行监测。其中位移传感器为弹



簧式位移计, 量程 20 mm, 线性误差 $\pm 0.5\%$ , 固定于弹簧油缸底部, 实时监测弹簧油缸的位移伸出量。压力传感器布置于法向油缸位置, 综合精度 $< 0.05\%F.S.$ , 灵敏度 $(2.0\pm 0.01) mV/V$ , 可对试验系统的整体垂直压力进行监测, 2类传感器最高采集频率可达 100 Hz。

(2) 煤柱应力、应变监测系统。煤柱应力、应变监测系统用于监测中心煤柱在加载—稳压—开挖诱发应力集中至冲击破坏过程中的应力、应变分布情况。关于中心煤柱内部应力监测配备了土工压力盒, 表面应变监测配备了 VIC-3D HS-VEO440H 监测系统与 DH5922D 动态信号测试分析系统, 其中 VIC-3D HS-VEO440H 监测系统最高帧率可达 290 kHz, 最高分辨率为  $2\ 560\times 1\ 600$ 。DH5922D 动态信号测试分析系统最高采样频率为 128 kHz, 最大量程为  $1.0\times 10^5$ , 桥压精度为 0.1%(图 10(a))。



(a) 应变及声发射监测



(b) 高速相机监测

图 10 监测系统布置方式

Fig.10 Layout of monitoring system

(3) 声发射监测系统。试样加载过程中, 试样内部在加载、开挖及后期冲击破坏 3 个阶段内均会产生不同程度的裂隙, 为了有效捕捉裂隙发育特征, 试验设备配备了声发射监测设备, 声发射探头采用固定装置粘结于试样表面, 有效捕捉观测煤柱的裂隙发育特征, 为冲击地压发生的前兆信息提供参考(图 10(a))。

(4) 高速相机监测系统。煤样发生冲击破坏持续时间一般为毫秒级, 普通相机无法有效监测煤样冲击破坏的全过程。为了有效监测观测煤柱的冲击破坏方式, 试验系统配备了高速相机, 高速相机最高分辨率可达  $2\ 560\times 1\ 600$ , 最高采集频率可达 290 000 帧, 可用于捕捉冲击煤样的动力破坏方式和碎屑冲击能

量以及运行轨迹计算, 定量评价煤样冲击破坏特征(图 10(b))。

(5) 冲击碎屑分级及残留煤柱称重系统。中心煤柱冲击完成后, 将其冲击完成的碎屑使用筛网进行不同粒径颗粒筛选并进行称重, 通过碎屑尺寸及质量分布定量分析冲击地压发生过程。煤柱冲击完成后往往会存在残留煤柱, 此煤柱一般不具备承载能力, 可进行称重进而对比分析不同加载刚度情况下冲击地压发生的剧烈程度, 以此量化分析基于局部矿井刚度理论的冲击地压发生机理。

## 2.6 系统工作方式

(1) 根据试验加载能力计算实际工作压力, 并根据加载刚度设定蓄能器气囊压力, 一般蓄能器气囊压力低于或者等于实际工作压力。

(2) 打开蓄能器进油管(阀 1), 关闭蓄能器回油管(阀 2), 利用静力油缸采用力控或者位移控的加载方式对试样施加初始地应力。

(3) 加载完毕时, 由于实际工作压力高于气囊压力, 蓄能器气囊将被持续压缩, 直至气腔压力、油腔压力、实际工作压力 3 者相等。为了避免压力损失, 将静力油缸做位移保持, 可进行一定的稳压操作。

(4) 关闭蓄能器进油管(阀 1), 切断弹簧油缸与油泵之间的联系, 此时油泵用于控制静力油缸做位移保持, 蓄能器作为辅助动力源控制弹簧油缸加载。

(5) 保压状态下进行试样开挖工作, 待其整体失稳发生冲击破坏时, 打开蓄能器回油管将蓄能器油腔液压油回放至油箱内。

系统整体工作原理如图 11 所示。

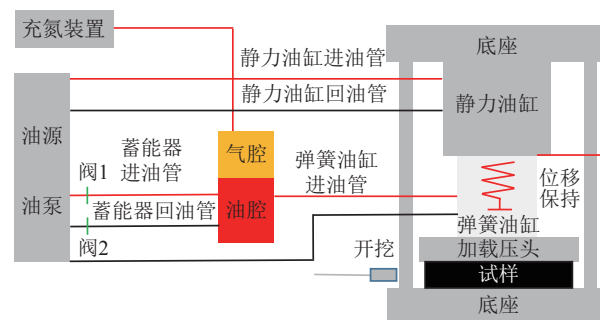


图 11 局部系统刚度工作示意

Fig.11 Working of local system stiffness testing system

## 2.7 系统主要技术特点

本试验装置是在顾金才院士研发设备基础上辅以局部系统刚度理论, 配套气囊式液压加载系统代替机械弹簧, 增加带压开挖装置而成, 本模型试验系统具有如下显著的特点:

(1) 加载系统中增加了开挖装置, 可在保压状态下

改变底部试样的应力集中程度,当试样达到其峰值强度时,若系统峰后承载刚度高于弹簧油缸加载刚度,试样将发生不稳定性冲击破坏。

(2) 加载系统设置了气囊式蓄能器-油缸复合储能装置,可在静力加载过程中完成能量的储存。

(3) 设置了一种变刚度加载装置,系统可通过气囊式蓄能器初始气囊压力的调整实现不同加载刚度的设置。

(4) 试验装置可对试样从加载—稳压—开挖—冲击全过程进行实验室模拟,用于监测冲击地压发生全过程煤柱应变变化规律以及冲击破坏模式。

### 3 测试性试验

为了检测试验系统的可靠性,分别采用高强度混凝土试块以及煤体进行了实验室试验。其中高强度混凝土试块用于测试弹簧油缸的蓄能及二次加载功能,煤样用于整体试验系统的可靠性测试。

#### 3.1 弹簧油缸测试性试验

采用河沙、石子及水泥等材料制作  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的方形混凝土试块,将其上下表面分别进行打磨确保整体受力均匀,试样平均单轴抗压强度  $33.1\text{ MPa}$ 。为了保证实验效果提前按照试块强度计算出实验系统的加载能力,并将系统中每个试样采用四面临空的方式进行布置,使每一个试块均处于单轴压缩状态,系统中共布置 14 个混凝土试块,试样布置方式如图 12 所示。试验加载能力设置为  $4\ 700\text{ kN}$ ,实际工作压力为  $23\text{ MPa}$ ,蓄能器气囊压力设置为  $18\text{ MPa}$ ,气囊与实际工作压力之间  $5\text{ MPa}$  的压差可使弹簧油缸在加载过程中不断储存能量。试验初期打开蓄能器进油阀门,采用油源及油泵进行持续加载,加载速率为  $2\text{ kN/s}$ ,当油缸加载至  $4\ 235\text{ kN}$  时,混凝土试块逐渐产生脆性破裂声并愈发密集,当加载力提升至  $4\ 242\text{ kN}$  时,所有试样瞬间发生冲击破坏,弹簧油缸活塞杆以较快的速度完成二次加载。试块破坏模式如图 13 所示。

高速相机监测结果表明:混凝土试块发生动力破



图 12 试样布置方式

Fig.12 Sample placement



图 13 混凝土试块破坏模式

Fig.13 Failure mode of concrete test block

坏时,试样瞬间在纵向方向形成 2 条贯穿裂纹,并在表面逐渐产生大量的拉伸弹射破坏,破碎块体呈长条式向外抛出,随后破裂深度进一步增加,直至整体试样全部发生冲击破坏。总体来说,混凝土试块在指定加载条件下发生了明显的冲击破坏,表明弹簧油缸可按照指定要求完成能量储存及二次加载。

#### 3.2 试验系统整体可靠性验证试验

为了验证试验系统的整体可靠性,采用  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的方形煤样进行实验室验证试验,试验步骤包括煤样的加载—稳压—开挖—冲击破坏 4 个阶段。

##### 3.2.1 试验方法

为了便于对比,试样系统中引入了低刚度吸能体结构,低刚度吸能体由高强度混凝土试块及柔性硅胶垫组合而成,其中试样高度  $95\text{ mm}$ ,硅胶垫厚度  $5\text{ mm}$ ,相比于  $100\text{ mm}$  高度的煤样具有更低的刚度以及更高的吸能特性。原煤取自何家塔煤矿,煤体材料较脆,具有较高的冲击倾向性,平均单轴抗压强度  $23\text{ MPa}$ ,试样开挖顺序如图 14 所示。试验加载能力为设置为  $1\ 900\text{ kN}$ ,加载速率为  $2\text{ kN/s}$ ,系统实际工作压力为  $7.9\text{ MPa}$ ,蓄能器气囊压力  $7\text{ MPa}$ ,弹簧油缸开度为  $50\%$ 。为了保证弹簧油缸在压缩阶段的加载稳定性,试样加载完毕之后进行稳压  $30\text{ min}$  再关闭蓄能器进油阀门。每次开挖结束稳压  $10\text{ min}$ ,待其试样变形稳定之后再次进行下一步开挖工作。试验系统中取中心煤柱为主要观测对象,并在其表面粘贴应变片及声



发射探头,用以捕捉煤样在加载、保压、开挖及冲击破坏过程中的应变及破裂信号。同时试验系统配备了高速相机监测系统,高速相机频率为 3 300 Hz,分辨率

设置为 1 280×960,用于监测中心煤柱的整体冲击破坏过程。试验结果中,当开挖至第 10 个煤样时,中心煤柱发生了明显的冲击破坏。

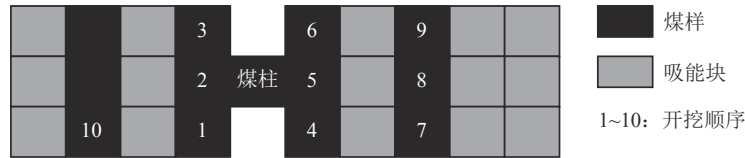


图 14 试样开挖顺序示意

Fig.14 Excavation sequence of samples

### 3.2.2 试验结果分析

(1) 煤柱应变分析。中心观测煤柱纵向应变变化规律如图 15 所示,按照试验的 3 个步骤,煤柱应变呈现出不同的变化规律:加载阶段内,随着上部载荷的施加应变逐渐增加,在稳压阶段内,由于上部油缸保持恒定压力,煤柱应变也未发生明显的变化,在开挖阶段内,随着不同开挖步骤的进行,应变呈现阶梯状增大的特征,且在开挖 1~5 号试样时,煤柱应变呈现出迅速增加的变化趋势。当开挖至第 7 号试块时,煤柱表面产生了片状剥离破坏,应变片监测失效。由此可以看出,试样系统随着周边煤样不断被开挖,局部矿井刚度逐渐降低,中心煤柱产生应力集中,自身纵向应变逐渐增加,导致煤柱整体被不断压缩。当试样应力集中至其强度极限时,由于峰后刚度高于试验系统加载刚度,中心煤柱瞬间发生了动力冲击破坏。

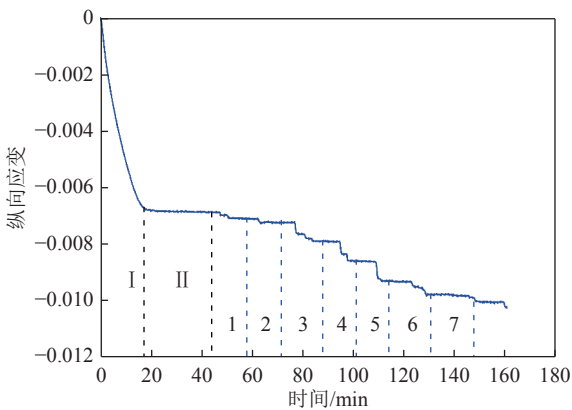


图 15 煤柱纵向应变变化规律

Fig.15 Change of longitudinal strain of the coal pillar with excavations

(2) 声发射规律分析。试验过程中煤柱破裂声发射监测信号如图 16 所示,加载阶段内,完整煤样在承载过程中内部有部分微裂隙逐渐产生,声发射监测设备可监测到一些微弱的能量计数信号;在稳压阶段内,由于上部载荷保持不变,煤柱整体呈现出较为稳定的状态,在此阶段内无明显声发射信号;在开挖阶段,随

着开挖工作的进行,煤柱逐渐产生不同程度的裂隙与破坏。在开挖 1、2 号试块时,煤柱未发生明显的破坏,声发射信号较弱。当开挖至 3~6 号试样过程中,中心观测煤柱产生了明显的声发射信号。当开挖至 10 号试样时,中心煤柱发生瞬间冲击破坏,声发射监测系统监测到了较高的声发射信号,且在煤柱发生冲击破坏之前煤柱产生了非常明显的破裂信号。

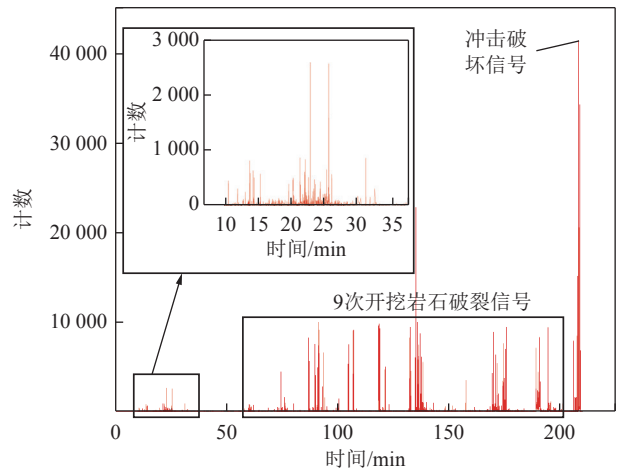


图 16 煤柱破裂声发射信号

Fig.16 Acoustic emission signal of the coal pillar

(3) 冲击破坏过程分析。当试样系统开挖至第 10 个块体时,中心观测煤柱发生了显著的冲击破坏,高速相机监测破坏过程如图 17 所示。煤柱冲击时间持续 86.94 ms 左右,且煤柱发生冲击之前首先在表面产生一定的片状碎屑崩落,崩落位置以试样中部为主,随后内部破碎块体以较快的速度向外喷出,喷出块体较小,喷出位置从煤柱左下角处开始延伸,逐渐贯穿整个煤柱。相比于混凝土试块的冲击破坏方式,煤柱冲击破坏时破裂碎屑较小,主要以碎渣的形式向外喷出,整体破坏方式及速度较为剧烈。

(4) 残留煤柱破坏分析。煤柱冲击破坏完成,清理周边碎屑提取出破坏后的残留煤柱如图 18 所示,中心煤柱呈现出两侧宽中心窄的哑铃状分布特征,越靠近试样中心位置,破坏情况愈严重。在煤柱中心位置

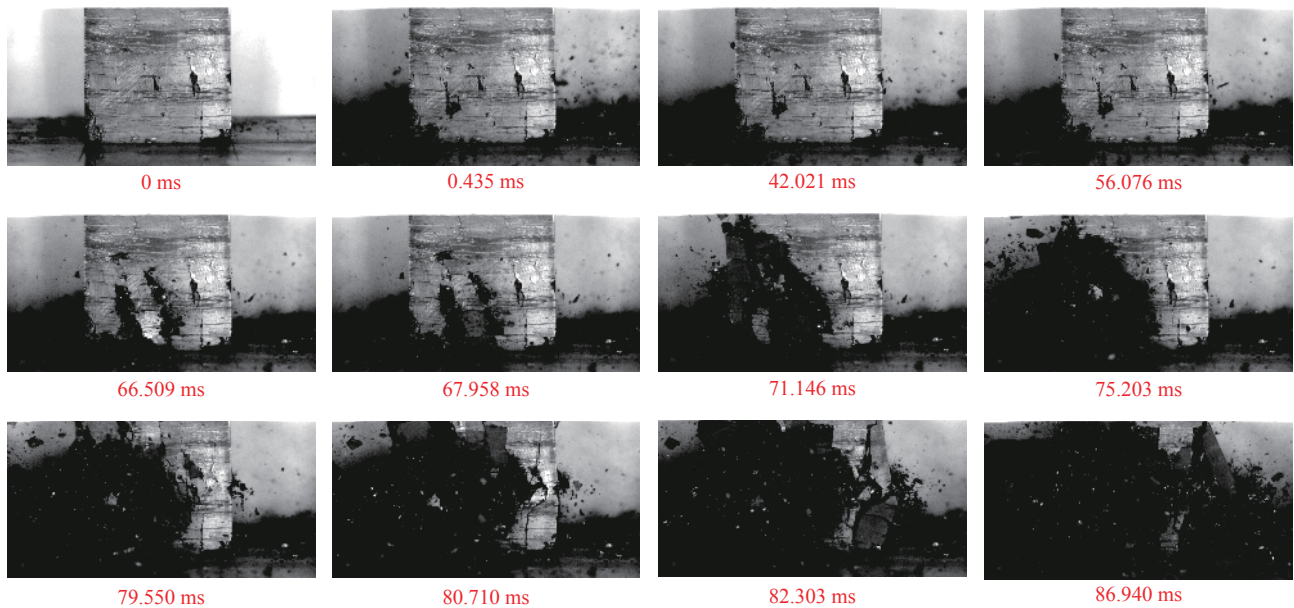


图 17 中心煤柱冲击破坏模式

Fig.17 Snapshots showing the burst process of the coal pillar



图 18 冲击发生后残余煤柱破坏形态

Fig.18 Profile of the coal pillar after burst

产生一条贯穿的锯齿状裂纹,导致煤柱整体被拦腰折断,同时也致使煤柱在冲击破坏之后的承载能力大幅度降低。

## 4 结 论

(1) 提出了基于局部系统刚度理论的试验系统研制思路,该系统主要由静力加载系统、储能系统、变刚度加载系统、开挖系统以及多源信息监测系统 5 部分组成。

(2) 研制了一种气囊式蓄能器-油缸组合而成的液压弹簧储能结构,克服了传统液压系统供油速度慢导致岩石试样峰后瞬间卸载而出现静力破坏的缺陷,还可实现在试样加载过程中完成能量存储以及不同加载刚度的设置。

(3) 在岩石力学试验系统中增加了开挖装置,可针对真实试样进行带压开挖,模拟井下由于煤层不断被采出导致煤柱应力集中以及局部系统刚度降低的过程。

(4) 采用高强度混凝土试块以及强冲击倾向性煤

体验证了弹簧油缸的储能、二次加载效果及整体试验系统的可靠性,并成功实现了煤样在加载—稳压—开挖—冲击破坏全过程模拟。

(5) 煤样承载系统在开挖过程中,应变随着开挖的进行呈现出阶梯状变化特征,且在冲击破坏前期有明显的声发射前兆信息。冲击破坏后的煤柱呈现出两侧宽中心窄的哑铃状破坏方式,贯穿煤柱中心的锯齿状的横向裂纹是导致煤柱冲击破坏后承载能力大幅度降低的重要原因。

## 参考文献(References):

- [1] 姜耀东,赵毅鑫.我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2188-2204.  
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. Research status of coal mine rockburst in China: Mechanism, early warning and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204.
- [2] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.  
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Study on distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [3] 齐庆新,潘一山,李海涛,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J].煤炭学报,2020,45(5):1567-1584.  
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of coal and rock dynamic disaster prevention and control in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [4] 顾金才,顾雷雨,陈安敏,等.深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):433-438.

- GU Jincai, GU Leiyu, CHEN Anmin, et al. Model test study on layered fracture failure mechanism of surrounding rock of deep excavation cavern[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 433–438.
- [5] 沈俊, 顾金才, 陈安敏, 等. 岩土工程抗爆结构模型试验装置研制及应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(6): 1077–1080, 1132.
- SHEN Jun, GU Jincai, CHEN Anmin, et al. Development and application of a model test device for anti explosion structures in geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(6): 1077–1080, 1132.
- [6] 徐景茂, 顾金才, 陈安敏, 等. 拱脚局部加长锚杆锚固洞室抗爆模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(11): 2182–2186.
- XU Jingmao, GU Jincai, CHEN Anmin, et al. Experimental study on anti explosion model of caverns anchored by locally lengthened bolts at arch foot[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11): 2182–2186.
- [7] LI X B, FENG F, LI D Y, et al. Failure characteristics of granite influenced by sample height to width ratios and intermediate principal stress under true triaxial unloading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(5): 1321–1345.
- [8] LI X B, DU K, LI D Y. True triaxial strength and failure modes of cubic rock specimens with unloading the minor principal stress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(6): 2185–2196.
- [9] LI X B, WANG S F, WANG S Y. Experimental investigation of the influence of confining stress on hard rock fragmentation using a conical pick[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(1): 255–277.
- [10] GONG F Q, LUO Y, LI X B, et al. Experimental simulation investigation on rockburst induced by spalling failure in deep circular tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81(3): 413–427.
- [11] GONG F Q, SI X, LI X, et al. Experimental investigation of strain rockburst in circular caverns under deep three-dimensional high-stress conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(5): 1–16.
- [12] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 变刚度加载试验系统的研制及其在煤岩破坏力学行为测试中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1846–1857.
- ZHAO Tongbin, YIN Yanchun, TAN Yunliang, et al. Development of a variable stiffness loading test system and its application in testing the mechanical behavior of coal and rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1846–1857.
- [13] 何满潮, 刘冬桥, 宫伟力, 等. 冲击岩爆试验系统研发及试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1729–1739.
- HE ManChao, LIU Dongqiao, GONG Weili, et al. Development and test of rock burst test system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1729–1739.
- [14] 顾金才, 范俊奇, 孔福利, 等. 抛掷型岩爆机制与模拟试验技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6): 1081–1089.
- GU Jincai, FAN Junqi, KONG Fuli, et al. Throwing rockburst mechanism and simulation test technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6): 1081–1089.
- [15] 齐燕军. 煤矿高应力巷道岩爆孕育过程试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- QI Yanjun. Experimental study on rockburst incubation process in high stress roadway of coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [16] 胡李华. 低应变率动力扰动下触发岩爆过程研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- HU Lihua. Study on triggered rockburst process under low strain rate dynamic disturbance [D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [17] 李浪, 蒋海明, 陈显波, 等. 应变型岩爆模型试验及其力学机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(12): 2733–2741.
- LI Lang, JIANG Haiming, CHEN Xianbo, et al. Model test of strain rock burst and its mechanical mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(12): 2733–2741.
- [18] 单仁亮, 黄博, 郑赟, 等. 竖向动载下巷道支护相似模拟试验装置的研制[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(2): 294–302.
- SHAN Renliang, HUANG Bo, ZHENG Yun, et al. Development of similar simulation test device for roadway support under vertical dynamic load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(2): 294–302.
- [19] 史新帅, 靖洪文, 赵振龙, 等. 大尺度三维巷道冲击地压灾变演化与失稳模拟试验系统研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(3): 556–565.
- SHI Xinshuai, JING Hongwen, ZHAO Zhenlong, et al. Development and application of large-scale three-dimensional roadway rockburst disaster evolution and instability simulation test system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3): 556–565.
- [20] SHAN Renliang, HUANG Bo, ZHENG Yun, et al. Development of similar simulation test device for roadway support under vertical dynamic load[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(2): 294–302.
- [21] GAO F, KANG H, LOU J, et al. Evolution of local mine stiffness with mining process: insight from physical and numerical modeling[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(10): 3947–3958.
- [22] 卢志国. 基于局部矿井刚度理论的应变型冲击地压机理研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.
- LU Zhiguo. Research on the mechanism of strain-type rockburst based on the theory of local mine stiffness [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2022.
- [23] KARL R, ZIPF J, MARK C. Design methods to control violent pillar failures in room and pillar mine[J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 1997, 106: 124–131.
- [24] KAISER, CAI. Critical review of design principles for rock support in burst-prone ground time to rethink[C]//Perth. Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction. 2008.
- [25] 王宏伟, 姜耀东, 邓代新, 等. 义马煤田复杂地质赋存条件下冲击地压诱因研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(S2): 4085–4092.
- WANG Hongwei, JIANG Yaodong, DENG Daixin, et al. Study on the inducement of rockburst under complex geological conditions in Yima coalfield[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S2): 4085–4092.
- [26] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.