

# 岩爆物理模拟试验研究现状及思考

周 辉, 孟凡震, 张传庆, 卢景景, 徐荣超

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 岩爆受岩性、应力条件、开采条件等因素影响, 发生机制极其复杂, 而物理模拟试验研究岩爆具有独特优势。在总结前人研究成果的基础上, 从岩爆物理模拟研究的试验仪器、相似材料、加载、开挖、支护和监测测量方法等方面, 详细论述当前岩爆物理模拟研究存在的不足和未来的发展方向。主要得到以下结论: 建立适合于岩爆的脆性相似判据并研制“低强度、高脆性”的相似材料, 是岩爆物理模拟试验成功的基础; 分别在理论上和试验方法上解决硬性结构面的相似性判别方法和制作工艺, 是研究结构面型岩爆的关键; 在保证加载的准确性和受力的均匀性基础上, 研制大吨位的加载装置和可考虑复杂岩-机相互作用的 TBM 掘进机及钻爆法施工工艺, 是研究不同岩爆影响因素的保证; 开发能够与“硬岩”岩爆以开裂为主的典型变形破坏特征相适应的多元信息监测和测试系统, 是成功解译岩爆孕育演化特征和规律的先决条件。研究结论将有助于改进岩爆的物理模拟试验研究现状, 为建立岩爆风险的合理评估、准确预测及防控方法提供科学依据。

**关键词:** 岩石力学; 物理模拟试验; 岩爆; 现状; 发展方向

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2015)05-0915-09

## REVIEW AND STATUS OF RESEARCH ON PHYSICAL SIMULATION TEST FOR ROCKBURST

ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, LU Jingjing, XU Rongchao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071)

**Abstract:** The mechanism of rockburst is intricate, which is controlled by factors such as lithology, stress and excavation conditions, and the physical simulation test for rockburst has some unique advantages. On the basis of summarizing previous studies on rockburst with physical simulation test, the shortcomings in the present study and the future direction of study were described in detail from the aspects of the test instruments, the similar materials, the loading conditions and the methods of excavation, supporting and monitoring. The following conclusions are obtained. Establishing the similarity criterion of brittleness suitable for rockburst and developing similar materials with low strength and high brittleness are basic testing requirements for the successful physical simulation of rockburst. Solving the problems of the similarity criterion and the manufacturing technology for rigid structural plane theoretically and experimentally respectively are keys for the structural rockburst research. With the required loading accuracy and stressing uniformity, designing the large-tonnage loading device and the TBM which considers the complex rock-machine interaction, and the drill and blast construction technology, are guarantees for the study of different factors influencing the rockburst. Devising diverse information monitoring systems that are

**收稿日期:** 2014-03-24; **修回日期:** 2014-08-26

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046902); 中国科学院科技创新“交叉与合作团队”(人教字[2012]119号); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-QN115)

**作者简介:** 周 辉(1972-), 男, 1994年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0339

matched with the typical deformation and failure characteristics of hard rock cracking is prerequisite to successfully interpret the behavior of rockburst.

**Key words :** rock mechanics ; physical simulation test ; rockburst ; status ; future development direction

## 1 引言

随着我国经济的高速发展,国家对水电、能源、交通的需求越来越大,因此资源开采逐渐向深部转移。大量的交通隧道需穿山凿洞,西南水电工程中的引水隧洞和地下厂房大部分也是在高山峡谷中开挖,因此高埋深的长大隧洞遍布水利水电工程、交通工程、采矿工程和核废料处置、国防建设等领域。如锦屏二级水电站引水隧洞最大埋深达2 525 m,红透山铜矿、冬瓜山铜矿、安庆铜矿等的开采深度都接近或超过了1 000 m。随着埋深的增加,地应力明显增大,深埋隧洞开挖卸荷诱发的高强度岩爆频发,造成大量人员伤亡、机械损坏、工期延误和重大经济损失,且这种灾害的危害性随埋深和应力水平的增大而显著增大。岩爆灾害已经成为制约深埋隧洞工程安全建设的瓶颈问题,岩爆风险的合理评估和准确预测已经成为深埋硬岩隧洞工程安全建设和工程防灾减灾亟待解决的关键难题。

岩爆除受岩性条件和应力条件控制外,开采条件(包括地下工程几何形状、开采方式、开采顺序、开挖速率)、外界扰动等对岩爆的发生也有很大影响,甚至起控制作用。可见岩爆的影响因素众多,发生机制极其复杂,例如岩爆的机制方面就有强度理论、刚度理论、冲击倾向性理论、能量理论、失稳理论和断裂损伤理论等<sup>[1]</sup>;岩爆的分类就有:水平应力型、垂直应力型和混合应力型,爆裂弹射型、片状剥落型和洞壁垮塌型,爆裂松脱型、爆裂剥落型、爆裂弹射型和抛掷型<sup>[2]</sup>,应变型、断裂滑移型和应变-结构面滑移型<sup>[3]</sup>,应变型、屈曲板裂型、工作面挤出型、剪切断裂型和断层滑移型<sup>[4]</sup>,应变型、矿柱型、断层滑移型<sup>[5]</sup>等。可见岩爆机制的复杂性,而目前对岩爆的发生和破坏机制还没有完全认识清楚,对岩爆的预测还不够准确,对岩爆这种动力失稳破坏的防治也不成熟。

当前岩爆的研究主要通过室内岩石力学试验、数值分析、现场监测和物理模拟试验等手段。室内岩石力学试验主要包括通过获得岩石的强度参数、

脆性指数、弹性能指数或岩爆倾向性指数等指标,对隧洞围岩的岩爆倾向性进行评估,以及采用岩石常规三轴和真三轴试验研究开挖卸荷条件下坚硬围岩的力学特性和破坏机制<sup>[6-7]</sup>。但总体来看,室内岩石力学试验的研究方法只是对岩块进行基本力学特性的分析和认识,不能合理反映岩爆发生的实际条件。数值模拟方法可以对岩爆过程和条件进行模拟<sup>[8]</sup>,但受数值分析方法本身的条件所限,需要对实际岩爆的条件、岩爆过程的数值描述进行简化和处理,并且单元岩爆的判别条件、应变能和动能的转化关系、动力激发以及动力边界条件和初始条件的设置等问题都没有得到很好地解决,因此,数值分析方法也无法很好地再现复杂的岩爆形成机制和过程。现场监测方法通过多种监测手段(声发射、微震、钻孔摄像、跨孔声波、滑动测微计等)获得岩爆孕育过程的各种信息,可以最真实地揭示岩爆的形成机制和规律<sup>[9-10]</sup>,但是存在费用高,人员和设备安全风险大,且无法根据需要设定岩爆的不同影响条件等缺陷。物理模拟试验可以通过相似理论将岩爆的主要影响因素反映到模拟试验中,并且可以方便地设定不同的岩爆影响条件,可以在试件中预先布设相关的监测和测试仪器,获取岩爆发生前后应力、能量等的变化规律,从而合理揭示不同类型岩爆的形成机制、影响因素和演化规律,为建立岩爆风险的合理评估和准确预测方法以及可靠的防控方法提供科学依据<sup>[11-12]</sup>。

本文首先对岩爆的物理模拟研究现状和研究成果做简要回顾,进一步从岩爆物理模拟研究的试验仪器,模拟岩爆的相似材料,试验仪器的加载设备、开挖方法及设备、支护和监测测量方法等方面,详细论述当前岩爆物理模拟研究存在的不足和未来的发展方向。

## 2 岩爆的物理模拟研究简要回顾

物理模拟试验以相似理论为基础,通过配制满足要求的相似材料制作模型试件,进行加载、开挖和支护等,可以模拟各种施工工艺,研究在一定原

岩应力场的岩体中开挖洞室时,围岩应力的调整过程及其分布、变形和破坏形态、破坏机制、支护效果,且与数值模拟相互验证等。物理模拟方法在隧道、水电洞室群等稳定性分析、围岩的一般性破坏中得到了广泛的应用<sup>[13-17]</sup>。但由于岩爆是在高应力脆性岩体中发生的一种特殊破坏方式,具有突然性、动力性、瞬时性,岩爆的物理模拟研究对相似材料、相似理论、仪器设备(加载、开挖、支护、监测和测量)均具有特殊要求,因此岩爆的物理模拟研究相比地下洞室一般的围岩破坏研究要少一些。下文就前人通过物理模拟试验方法研究岩爆的一些成果进行简要总结和回顾。

杨淑清<sup>[18]</sup>利用砂、水泥、石膏、重晶石和松香酒精溶液作为相似材料模拟岩爆,通过对试件加载、开挖,研究了洞室的破坏形态、破坏过程以及二次应力分布特征,试验中洞壁出现掉渣、剥皮但未出现块体弹射现象,因此模拟的岩爆现象并不明显。潘一山等<sup>[19]</sup>将 $E/\lambda$ ( $E, \lambda$ 分别为弹性模量和峰后降模量)作为岩爆的相似准则,并且配制多种具有不同相似系数的材料,可模拟不同震级、不同类型的岩爆。费鸿禄等<sup>[20]</sup>认为,岩爆发生时模型试件孔壁水平位移产生多次突跳,不发生岩爆的孔壁位移随荷载平稳增加,但采用的模型试件是预先开挖成洞的方式,与现场实际开挖顺序不符。许迎年等<sup>[21]</sup>利用简易二维加载装置研究了试件厚度、开孔方式、不同侧压力大小等因素对岩爆的影响,而试验中采用的二维加载方式与岩体的实际受力状态不符。陈陆望等<sup>[22-23]</sup>研究了圆形洞室和马蹄形洞室岩爆破坏的平面应变模型试验,观察了不同侧压力系数下的破坏现象,测量了边墙不同位置的径向应力和切向应力的变化规律。A. H. Lu等<sup>[24]</sup>通过在试件中装炸药研究了爆炸应力波对已开挖洞室岩爆的影响,认为材料越软应力波衰减越快,控制应力波强度可减小围岩中的裂纹,阻止围岩中层状结构的形成可减小岩爆发生,但由于试验中采用的模拟材料强度较低、相对较软,因此试验现象与岩爆有较大差别。李天斌等<sup>[12]</sup>利用研制的相似材料研究了隧洞天然地应力和超载条件下的岩爆破坏现象,测量结果显示隧洞开挖过程中,拱顶、拱肩和边墙在不同的时间段内均有应力、应变突变现象,超载条件下出现了明显的围岩剥落和开裂现象。张晓君和郑怀昌<sup>[25]</sup>研究了具有岩爆倾向性的矩形巷道围岩破裂特征,通过

在模型试件一侧边墙插入3根锯条再拔出,模拟开挖损伤造成的非贯通裂隙,发现完整侧帮围岩剪切破坏形成中间厚边缘薄的破裂体,含裂隙侧帮围岩裂隙优先贯通并形成劈裂。W. Burget和M. Lippman<sup>[26]</sup>采用环氧树脂加3%~5%的硬化剂,研制出模拟岩爆的相似材料,但由于该材料强度高,价格贵,因此只能放在压力试验机上定性演示煤柱岩爆。陈智强等<sup>[27]</sup>利用相似材料模拟方法,研究了不同的材料强度、开挖速度和支护作用下岩爆发生和破坏规律。

### 3 岩爆物理模拟存在的问题和发展趋势

从上节的分析可知,采用物理模拟手段研究岩爆远不及研究隧洞(隧道、巷道)、水电厂房等一般性破坏(静力破坏)广泛,而且进行的相关研究也存在加载方式不合理、开挖方式不符合实际、模拟的岩爆现象与常规破坏现象几乎没有区别等问题。因物理模拟方法研究岩爆与研究岩石的一般静力破坏既有相通之处(如加载),又有特殊之处,本节将从岩爆模拟试验装置、岩爆模拟相似材料、试验仪器的加载设备、开挖方法及设备、支护方式及设备和监测测量方法等方面论述岩爆的物理模拟试验研究现状、存在的不足以及未来的发展趋势。

#### 3.1 岩爆物理模拟的试验设备

陈陆望等<sup>[11, 13, 17, 28-29]</sup>研制了具有不同功能和尺寸的地质力学模型试验系统,研究巷道、隧道、水电洞室群的稳定性问题。在专门针对岩爆的物理模拟试验研究方面,由于岩爆的发生过程极其复杂,对加载系统、监测方法和相似材料等均具有较高和特殊的要求,因此国内外专门的岩爆物理模拟试验装置很少,绝大多数采用简易试验台架进行平面应力<sup>[12, 21, 24]</sup>或平面应变<sup>[18, 22-23]</sup>的加载,亦或采用三维通用物理模拟试验系统,针对简单条件下的岩爆现象开展定性的或概念性的模拟试验和分析,国内外还缺少专门的岩爆物理模拟试验系统。因此在解决与岩爆相关的相似理论(相似材料的脆性相似、钻爆法开挖相关参数的动力相似、支护参数的相似性等)的前提下,研制集开挖(机械开挖、钻爆法开挖)、支护(吸能锚杆、抗大变形喷层)、监测和测量设备(适应岩爆以开裂为主的、小应变即产生非连续局部开裂大变形的破坏特点)等为一体的先进的岩爆物理

模拟试验系统,是今后开展岩爆物理模拟试验研究的关键。

### 3.2 岩爆物理模拟的相似材料研究

相似材料是开展岩土工程物理模拟研究的基础,如张强勇等<sup>[30-32]</sup>为研究隧洞的常规静力破坏,分别配制了具有不同力学性质的相似材料,模拟软岩、硬岩、岩盐或断裂构造,可通过改变材料配比使其力学性质在一定范围内变化。而对于“岩爆”这种特殊的岩石破坏而言,合适的相似材料更是试验成功的先决条件,杨淑清<sup>[18]</sup>利用砂、水泥、石膏和重晶石、松香酒精溶液作为相似材料;陈智强等<sup>[27]</sup>利用细硅砂、碳酸钙、石膏和水;陈陆望和白世伟<sup>[33]</sup>利用石英砂、石膏、水泥、水;潘一山等<sup>[19]</sup>尝试了松香膨润土、松香重晶石、石膏-砂-松香材料、松脂材料、环氧树脂材料来模拟岩爆。这些模拟岩爆的相似材料基本有骨料(砂、矿渣、重晶石等)、胶凝材料(石膏、水泥、环氧树脂等)和改善性能的添加剂(减水剂、缓凝剂、松香酒精溶液等)组成。从前人的研究成果可见,试验结果与模拟的一般的静力破坏几乎没有区别,只是出现掉渣、葱皮剥落、掉块,没有出现围岩从能量积聚到突然爆裂弹射的动力失稳过程。

受加载条件及需要满足的相似关系所限,相似材料强度一般很低(与岩石相比),较难积聚较高的能量,而现场岩爆多发生在高应力、强硬脆、高储能围岩中,这似乎是不可调和的矛盾。利用相似材料虽然不可能做到如现场那般发生剧烈弹射,但能发生具有一定微初速度的弹射是必要的。因此岩爆相似材料的强度不能太低,以便可以积聚一定能量,除满足基本力学参数相似外,最关键的一点应该满足脆性相似关系。目前缺少专门适合于岩爆的脆性相似判据,缺乏对材料脆性相似性的量化研究,陈陆望和白世伟<sup>[22]</sup>曾将压拉强度比作为脆性指标,而统计研究发现,压拉强度比与强度基本呈正相关性,即比值反映的是强度特征而非完全的脆性特征<sup>[34]</sup>;潘一山等<sup>[19]</sup>提出以峰前弹性模量和峰后降模量比作为岩爆材料的相似准则,该准则只考虑了峰后应力降的速率(即峰后降模量),未考虑峰后应力降的大小,因此也是不够准确的。

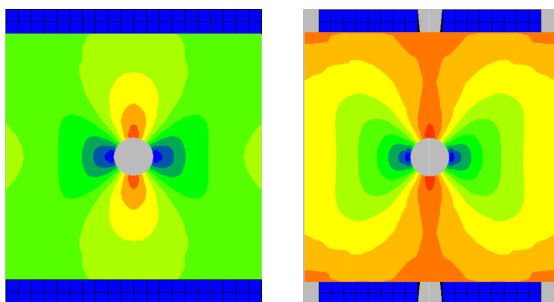
从锦屏二级水电站引水隧洞岩爆现场发现,硬性结构面对部分强烈岩爆的发生起了控制作用<sup>[35]</sup>,而通过物理模拟试验方法研究地质结构对岩爆的作

用机制具有独特的优势,可以在模型试件中预制不同产状、规模、几何形态和力学性质的结构面。模型试验中结构面的制作方法前人已做了较多尝试<sup>[36]</sup>,如采用不同光滑度的纸张、蜡纸、塑料薄膜、清漆掺润滑脂及滑石粉等方法。采用何种材料、如何考虑原岩硬性结构面与相似材料结构面之间的相似性、如何在试件中预制具有不同几何形态和力学性质的结构面,尽量真实地反映出结构面对岩爆的影响还需要做大量探索。

### 3.3 岩爆物理模拟设备的加载装置

前人所进行的岩爆物理模拟研究,为便于观察或受试验系统所限,多数采用简单的二维加载方式(平面应变或平面应力),加载能力也较小。岩爆多发生在深埋高应力岩体中,且岩体处于三向受力状态,二维加载与原岩受力状态不符,并且如上文所述,相似材料强度不能太低以便于积聚一定能量模拟出岩块弹射、抛掷的现象,因此试验设备的加载装置需具有较高的加载能力。

物理模拟试验的加载装置少数通过柔性囊加载<sup>[37]</sup>,大部分都是通过液压千斤顶加载<sup>[13, 15, 29]</sup>。柔性囊存在加载行程偏小、加载能力偏低等问题,不能满足大荷载的加载要求。液压千斤顶加载主要包括2种方式:(1)单个液压千斤顶加载:即采用一个大吨位的液压千斤顶对模型试件加载,其优点是可以较准确地对模型试件施加预定的高应力。但是为了得到足够的出力,需要液压千斤顶的尺寸很大,造成整个试验系统体积非常庞大,制作成本高,加载能力也不利于满足大荷载试验的要求。(2)多个液压千斤顶均布加载:通过在每个加载方向上平行布置多个相同的小吨位液压千斤顶,每个千斤顶对模型试件表面单独施加荷载,从而在试件表面形成“均布荷载”,如图1<sup>[13]</sup>所示。这种加载方式虽已被广泛采用,但也存在一些不可忽略的技术缺陷:一是由于加工精度和误差等原因,很难保证每个千斤顶的出力完全相同,这会导致施加在模型试件上的荷载不均匀;二是由于模型相似材料强度一般相对较低,每个小千斤顶或加载板会不同程度地陷入试件中,限制试件的侧向变形,造成模型试件加载面上存在不必要的“摩擦力”;三是每个小千斤顶都会在模型试件表面造成局部应力集中,从而无法获得预定的初始应力场或对开挖后的“围岩”应力场造成不必要的影响(见图2),从而影响试验结果的正确性。

图 1 均布压力加载器<sup>[13]</sup>Fig.1 Picture of uniform pressure loaders<sup>[13]</sup>

(a) 上下各 1 个千斤顶加载

(b) 上下各 4 个千斤顶加载

图 2 不同加载方式下的竖向应力云图

Fig.2 Contours of vertical stress under different loading conditions

岩爆的发生除受岩性和应力状态影响外，爆破扰动对岩爆具有诱发作用，而在真三维加载条件下，通过在试件一定位置处预埋真实炸药模拟爆破扰动对已开挖隧洞岩爆的诱发作用，操作上具有较大难度。而爆破扰动对围岩的作用实质是应力波传播的过程，因此可以通过改进加载装置，使其在提供静荷载(原岩应力)的同时，可提供具有一定频率和振幅的动荷载(模拟爆炸应力波)，研究应力波对岩爆的作用机制，而如何定量考虑现场爆炸应力波与模拟应力波之间的“动力相似性”则是需解决的理论问题。

因此需要改进，设计新型的真三维加载方式，既具有较高的加载能力，模拟深部高应力岩体所处的应力状态，又能准确地对模型试件施加预定应力，保证试件受力均匀，并且具有一定的动力加载能力。

### 3.4 岩爆物理模拟设备的开挖装置

模型试验中隧洞的开挖主要有 4 种形式：制作试件时在指定位置预埋与开挖洞型一致的柱体，待试件干燥后拔出柱体使隧洞一次成型，再加载<sup>[22-23]</sup>；制作试件时在指定位置预埋与开挖洞型一致的柱体，柱体由数小段组成，力学性质(如弹性模量)尽

量与试件一致，试件干燥后加载至初始应力，再将预埋的小段柱体依次顶出，模拟分段开挖<sup>[29]</sup>；将制作的试件干燥后加载至初始应力，在预定位置手动开挖出一定形状的隧洞；将制作的试件干燥后加载至初始应力，在预定位置利用钻机或小型开挖设备机械开挖出指定形状的隧洞<sup>[17]</sup>。

先开孔后加载的方式虽然成洞效果较好，但不能很好地模拟洞室开挖过程和应力重分布特征；加载后依次顶出预埋的小圆柱块模拟分步开挖的方法需要使小圆柱块的变形与试件变形相协调、一致，柱体不能影响试件的变形，且高压下也不易顶出；手动开挖的方法对简单的试验过程是可行的，但当开挖隧洞较长、存在隐蔽开挖时，在狭小的空间内手动开挖困难较大；采用钻机或微型开挖设备开挖时省时省力、效率较高，但李仲奎等<sup>[17]</sup>采用的简易机械开挖方法与现场机械开挖中的刀盘破岩机制、岩-机相互作用等还存在较大差别，无法做到准确模拟，而在物理模拟试验中，试验条件(岩性、应力、开挖方法等)与工程现场条件越相似，试验结果的可靠性和准确性越高，对工程现场的施工就越具有借鉴性和指导性。TBM 隧洞掘进机已经被广泛应用到隧道、深埋硬岩隧洞的开挖中，刀盘对掌子面岩体的巨大推力、撑靴对围岩强大支撑作用等均对岩爆的发生产生抑制作用，因此研制一套结构简单、操作方便，但又可以尽量准确模拟刀盘破岩过程，可充分考虑刀盘、护盾和撑靴与岩体的相互作用，从而研究 TBM 开挖速率、刀盘推力、扭矩、撑靴压力、护盾压力与岩爆的相互作用机制，是提高开挖效率和模拟结果的科学性和准确性、研究 TBM 开挖条件下机械对岩爆影响的必要条件。

在当前的研究成果中，由于操作上的复杂性和动力相似理论的缺失，物理模拟钻爆法开挖的研究较少。然而钻爆法开挖与 TBM 开挖对围岩的损伤具有很大不同，对岩爆的孕育过程的影响也有较大差别，如锦屏二级水电站引水隧洞采用钻爆法开挖和 TBM 开挖洞段发生的岩爆次数和等级均具有一定差别<sup>[38]</sup>，因此通过物理模拟试验模拟钻爆法开挖同样具有重要的意义。如何合理选取炸药类别和用量、并确定某个参量(如松动圈厚度、质点振动速度等)作为评价爆破效果的相似指标，是开展钻爆法开挖物理模拟研究的关键。

### 3.5 支护方法和支护装置

朱维申等<sup>[29]</sup>研制了用于模型试验的微型预应力锚索，通过在预制块中相应部位预埋锚索，待开挖

到此位置时,通过旋转螺栓一定圈数施加一定预应力;顾金才等<sup>[39]</sup>用模型试验研究,比较了自由式锚索和全长黏结式锚索加固效果;任伟中等<sup>[40]</sup>利用堆砌立方块制作大比尺模型试件,研究不同节理倾角、角度、应力和有锚无锚条件下围岩的变形;朱维申等<sup>[41]</sup>用模型试验研究了锚杆不同支护密度和布置形式(水平、垂直)对岩体强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角的影响。前人已就模型试验中隧洞的支护方面做了大量探索,如利用毛竹、塑料推棒、黄铜杆、漆包线等模拟锚杆,利用铝丝或细铜丝束模拟锚索。而在这些研究中,锚杆或锚索大都是试验前预埋在指定位置,然后进行开挖、监测和分析,所以在隧洞开挖前已经在试件内部起到了作用,这与锚杆、锚索实际的加固围岩过程还是有差距的。另外,支护操作大多手工进行,这样对开挖长度较大、洞径较小的隧洞由于空间狭小的限制,操作上较难。因此在总结和学习前人经验的同时,改进支护结构的施工工艺,并由手动支护到机械支护,提高物理模拟试验的准确程度和效率。

岩爆不同于岩石一般的静力破坏,其最突出特点是围岩破坏时岩块携带能量,围岩中形成竖直产状的层裂化结构是形成弯折、弹射型岩爆的条件,因此研究各种支护方法的吸能特性和对围岩的增韧止裂作用,是对围岩在岩爆条件下支护研究的重点。由于受上文所述各种条件的限制,当前模型试验中很少做出岩爆弹射这种动力失稳现象,因此在研制新型“低强度、高脆性”相似材料和加载设备的前提下,借助模型试验研究各种吸能锚杆、不同喷层材料对岩爆支护效果和支护机制具有很好的发展前景。

### 3.6 监测和测试方法及装置

合理获取并解译试验过程中的各种信息,是进行岩爆机制分析的基础。目前,相关的物理模拟试验中大多以监测“围岩”变形和应力为主<sup>[42-45]</sup>,但这并不能适应“硬脆围岩”岩爆孕育过程中围岩变形破坏的特点,这是由于岩爆孕育过程中硬岩变形破坏的典型特点是在小变形条件下即产生非连续开裂破坏,造成局部开裂大变形。因此,监测和测试重点应该是以围岩破裂及其演化规律监测为主,应力和变形监测为辅,并且变形测试手段要与局部开裂大变形相适应。除此之外,现在被广泛应用的基于数字图像的表面无损变形测量方法<sup>[27]</sup>在真三维、高应力条件下也难以获得应用。因此,在岩爆物理模拟试验研究中,开发能够与“硬岩”以开裂为主

的典型变形破坏特征相适应的高精度多元信息监测和测试系统,是成功解译岩爆孕育演化特征和规律的先决条件。

另外,除了以上几点,由于岩爆类型不同,发生机制、影响因素等也存在较大差别,如锦屏二级水电深埋隧洞发生的岩爆类型主要有:应变型、断裂滑移型和应变-结构面滑移型<sup>[3]</sup>,不同类型的岩爆模拟机制和实现方法存在较大差别,因此应在重视岩爆分类基础上,利用模型试验模拟、再现不同类型的岩爆,开展系统、全面的研究。

## 4 结 论

物理模拟试验可以较为方便地对试件加载,模拟不同的应力状态,可以模拟开挖、支护等,研究围岩应力的调整过程及其分布、变形和破坏形态、破坏机制和支护效果,并与数值模拟相互验证,共同为现场隧洞的开挖提供借鉴和指导。岩爆物理模拟试验研究与常规地质力学模型试验研究围岩的静力破坏相比,既有相通之处,又有特别之处。本文在对岩爆的物理模拟研究现状和研究成果简要回顾的基础上,从岩爆物理模拟研究的试验仪器,模拟岩爆的相似材料,试验仪器的加载设备、开挖设备,支护方法和设备以及监测测量方法与设备等方面,论述当前岩爆物理模拟研究方法存在的不足和未来的发展方向,主要获得以下结论:

(1) 要想在岩爆的物理模拟试验上取得突破,首先应建立适合于岩爆的脆性相似判据,并研制“低强度、高脆性”的相似材料。

(2) 物理模拟试验研究地质构造对岩爆的影响具有独到的优势,而选用何种材料、如何考虑原岩硬性结构面与相似材料结构面之间的相似性、如何在试件中预制具有不同几何形态和力学性质的结构面,则是试验成功的关键。

(3) 在保证模型试件受力均匀准确的条件下,分别研制大吨位真三维静力加载方式和动力扰动装置,模拟岩体所处的高地应力和爆炸应力波,从而研究处于深埋高应力条件下的围岩在爆破扰动作用下岩爆的发生过程和机制。

(4) 研制一套结构简单但又可以尽量准确模拟刀盘破岩过程、可综合考虑复杂的岩-机相互作用的TBM开挖设备,是提高开挖效率和模拟结果的

科学性和准确性的必要条件；合理选取炸药类别和用量、确定合适参数作为评价爆破效果的相似指标，是开展钻爆法开挖物理模拟研究的关键。

(5) 改进落后的手动支护方法、研究各种吸能锚杆、不同喷层材料对岩爆支护效果和支护机制的影响，可为现场岩爆的防护、治理提供指导。

(6) 开发能够与“硬岩”岩爆以开裂为主的典型变形破坏特征相适应的高精度多元信息监测和测试系统，是成功解译岩爆孕育演化特征和规律的先决条件。

### 参考文献(References)：

- [1] 郭雷,李夕兵,岩小明. 岩爆研究进展及发展趋势[J]. 采矿技术, 2006, 6(1): 16-20.(GUO Lei, LI Xibing, YAN Xiaoming. Research progress and development tendency of rockburst[J]. Mining Technology, 2006, 6(1): 16-20.(in Chinese))
- [2] 徐林生,王兰生,李天斌. 国内外岩爆研究现状综述[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 24-27.(XU Linsheng, WANG Lansheng, LI Tianbin. Present situation of rockburst research at home and abroad[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 24-27.(in Chinese))
- [3] 冯夏庭,陈炳瑞,明华军,等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 433-444.(FENG Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 433-444.(in Chinese))
- [4] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(1): 59-65.
- [5] KAISER P K, CAI M. Design for rock support system under rockburst condition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4(3): 215-227.
- [6] 吕庆,孙红月,尚岳全,等. 深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 982-2 988.(LU Qing, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Comprehensive study on prediction of rockbursts in deep and over-length highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 982-2 988.(in Chinese))
- [7] 陈卫忠,吕森鹏,郭小红,等. 脆性岩石卸围压试验与岩爆机制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 963-969.(CHEN Weizhong, LU Senpeng, GUO Xiaohong, et al. Unloading confining pressure for brittle rock and mechanism of rock burst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 963-969.(in Chinese))
- [8] 王耀辉,陈莉雯,沈峰. 岩爆破坏过程能量释放的数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 790-794.(WANG Yaohui, CHEN Liwen, SHEN Feng. Numerical modeling of energy release in rockburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 790-794.(in Chinese))
- [9] 陈炳瑞,冯夏庭,曾雄辉,等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275-283.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275-283.(in Chinese))
- [10] LI S J, FENG X T, LI Z H, et al. In situ monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station[J]. Engineering Geology, 2012(137/138): 85-96.
- [11] 陈陆望. 物理模型试验技术研究及其在岩土工程中的应用[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.(CHEN Luwang. Study on physical model-test technology and application in geotechnical engineering[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [12] 李天斌,王湘锋,孟陆波. 岩爆的相似材料物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增1): 2 610-2 616.(LI Tianbin, WANG Xiangfeng, MENG Lubo. Physical simulation study of similar material for rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp.1): 2 610-2 616.(in Chinese))
- [13] 陈安敏,顾金才,沈俊. 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. 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] 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 mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 433-438.(in Chinese))
- [15] 张强勇,陈旭光,林波. 深部巷道围岩分区破裂三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1 757-1 766.(ZHANG Qiangyong, CHEN Xuguang, LIN Bo. Study of 3D geomechanical model test of zonal disintegration of surrounding rock of deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1 757-1 766.(in Chinese))
- [16] 朱维申,李勇,张磊,等. 高地应力条件下洞群稳定性的地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 308-

- 1 314.(ZHU Weishen , LI Yong , ZHANG Lei , et al. Geomechanical model test on stability of cavern group under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2008 , 27(7) : 1 308 – 1 314.(in Chinese))
- [17] 李仲奎, 卢达溶, 中山元, 等. 三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9) : 1 430 – 1 436.(LI Zhongkui , LU Darong , NAKAYAMA H , et al. Development and application of new technology for 3D geomechanical model test of large underground powerhouses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2003 , 22(9) : 1 430 – 1 436.(in Chinese))
- [18] 杨淑清. 隧洞岩爆机制物理模型试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1993, 26(2) : 160 – 166.(YANG Shuqing. An experimental study on rockburst mechanism around tunnels by physical simulation[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering , 1993 , 26(2) : 160 – 166.(in Chinese))
- [19] 潘一山, 章梦涛, 王来贵, 等. 地下洞室岩爆的相似材料模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4) : 49 – 56.(PAN Yishan , ZHANG Mengtao , WANG Laigui , et al. Study on rockburst by equivalent material simulation tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1997 , 19(4) : 49 – 56.(in Chinese))
- [20] 费鸿禄, 徐小荷, 唐春安. 岩爆的物理模拟及其机制的研究[J]. 中国矿业, 2000, 9(6) : 35 – 37.(FEI Honglu , XU Xiaohu , TANG Chun'an. Study on rockburst by means of physical simulation[J]. China Mining Magazine , 2000 , 9(6) : 35 – 37.(in Chinese))
- [21] 许迎年, 徐文胜, 王元汉, 等. 岩爆模拟试验及岩爆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10) : 1 462 – 1 466.(XU Yingnian , XU Wensheng , WANG Yuanhan , et al. Simulation testing and mechanism studies on rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2002 , 21(10) : 1 462 – 1 466.(in Chinese))
- [22] 陈陆望, 白世伟. 坚硬脆性岩体中圆形洞室岩爆破坏的平面应变模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12) : 2 504 – 2 509.(CHEN Luwang , BAI Shiwei. Research on plane strain model test of rockburst of circular cavern in hard brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(12) : 2 504 – 2 509.(in Chinese))
- [23] 陈陆望, 白世伟, 殷晓曦, 等. 坚硬岩体中马蹄形洞室岩爆破坏平面应变模型试验[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10) : 1 520 – 1 525.(CHEN Luwang , BAI Shiwei , YIN Xiaoxi , et al. Plane-strain model tests on rock-burst of horseshoe section caverns in hard and brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2008 , 30(10) : 1 520 – 1 525.(in Chinese))
- [24] LU A H , MAO X B , LIU H S. Physical simulation of rock burst induced by stress waves[J]. Journal of China University of Mining and Technology , 2008 , 18(3) : 401 – 405.
- [25] 张晓君, 郑怀昌. 岩爆倾向性巷(隧)道围岩破裂的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(4) : 29 – 33.(ZHANG Xiaojun , ZHENG Huaichang. Experimental study on fracture of tunnels ' surrounding rock with rockburst proneness[J]. Mining Research and Development , 2011 , 31(4) : 29 – 33.(in Chinese))
- [26] BURGERT W , LIPPMAN M. Models of translatory rock bursting in coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1981 , 18(4) : 285 – 294.
- [27] 陈智强, 张永兴, 周检英. 基于数字散斑技术的深埋隧道围岩岩爆倾向相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 1) : 141 – 148.(CHEN Zhiqiang , ZHANG Yongxing , ZHOU Jianying. Experimental study of deep tunnel surrounding rock rockburst proneness with similarity material simulating method based on digital speckle correlation technique[J]. Rock and soil Mechanics , 2011 , 32(Supp.1) : 141 – 148.(in Chinese))
- [28] 姜耀东, 刘文岗, 赵毅鑫. 一种新型真三轴巷道模型试验台的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21) : 3 727 – 3 731.(JIANG Yaodong , LIU Wengang , ZHAO Yixin. Design and development of a new type of triaxial system for roadway model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 , 23(21) : 3 727 – 3 731.(in Chinese))
- [29] 朱维申, 张乾兵, 李 勇, 等. 真三轴荷载条件下大型地质力学模型试验系统的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1) : 1 – 7.(ZHU Weishen , ZHANG Qianbing , LI Yong , et al. Development of large-scale geomechanical model test system under true triaxial loading and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010 , 29(1) : 1 – 7.(in Chinese))
- [30] 张强勇, 李术才, 郭小红. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(8) : 2 126 – 2 130.(ZHANG Qiangyong , LI Shucai , GUO Xiaohong. Research and development of new typed cementitious geotechnical similitude material for iron crystal sand and its application[J]. Rock and Soil Mechanics , 2008 , 29(8) : 2 126 – 2 130.(in Chinese))
- [31] 张强勇, 刘德军, 贾 超, 等. 盐岩油气储库介质力学模型相似材料的研制[J]. 岩土力学, 2009, 30(12) : 3 581 – 3 586.(ZHANG Qiangyong , LIU Dejun , JIA Chao , et al. Development of geomechanical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium[J]. Rock and Soil Mechanics , 2009 , 30(12) : 3 581 – 3 586.(in Chinese))
- [32] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 模型材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J]. 水利发电学报, 2004, 23(1) : 48 – 51.(MA Fangping , LI Zhongkui , LUO Guangfu. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test[J]. Journal of Hydroelectric Engineering , 2004 , 23(1) : 48 – 51.(in Chinese))
- [33] 陈陆望, 白世伟. 脆性岩体岩爆倾向性相似材料概化配比试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增) : 1 054 – 1 058.(CHEN Luwang , BAI Shiwei.



- Proportioning test study on similar material generalization of rockburst tendency of brittle rock-mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(Supp.): 1 054–1 058.(in Chinese)
- [34] 周 辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(6): 1 114–1 122. (ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Quantitative evaluation methods of rock brittleness based on the stress strain curve[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6): 1 114–1 122. (in Chinese))
- [35] ZHANG C Q, FENG X T, ZHOU H, et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(3): 275–288.
- [36] 杜应吉. 地质力学模型试验的研究现状与发展趋势[J]. *西北水资源与水工程*, 1996, 7(2): 64–67.(DU Yingji. Research status and development trend of geomechanics model test[J]. *Northwest Water Resources and Water Engineering*, 1996, 7(2): 64–67.(in Chinese))
- [37] 房 倩, 张 顶, 王毅远, 等. 圆形洞室围岩破坏模式模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(3): 564–571.(FANG Qian, ZHANG Dingli, WONG Louisngaiyuen, et al. Model test study of failure modes of surrounding rock for circular caverns[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(3): 564–571.(in Chinese))
- [38] 罗志虎, 杨鹏飞. 锦屏二级水电站 TBM 施工中的岩爆问题分析及对策[J]. *岩土工程技术*, 2009, 23(1): 52–55.(LUO Zhihu, YANG Pengfei. Rockburst and its countermeasure of TBM construction in drainage tunnel of a hydropower station[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2009, 23(1): 52–55.(in Chinese))
- [39] 顾金才, 沈 俊, 陈安敏, 等. 锚固洞室受力反应特征物理模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(增): 1 113–1 117.(GU Jincai, SHEN Jun, CHEN Anmin, et al. Physical model tests research on force response characteristics of underground openings reinforced by anchor cables[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(Supp.): 1 113–1 117.(in Chinese))
- [40] 任伟中, 朱维申, 张玉军, 等. 开挖条件下节理围岩特性及其锚固效应模型试验研究[J]. *试验力学*, 1997, 12(4): 513–519.(REN Weizhong, ZHU Weishen, ZHANG Yujun, et al. Research on failure behaviour and anchoring effect of jointed rockmasses around an underground opening under excavation by model testing[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1997, 12(4): 513–519.(in Chinese))
- [41] 朱维申, 张玉军, 任伟中. 系统锚杆对三峡船闸高边坡岩体加固作用的块体相似模型试验研究[J]. *岩土力学*, 1996, 17(2): 1–6.(ZHU Weishen, ZHANG Yujun, REN Weizhong. Similar model block tests for reinforcing effects of systematic bolts on rock mass of high slope three gorges flight lock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1996, 17(2): 1–6. (in Chinese))
- [42] ZHU W S, ZHANG Q B, ZHU H H, et al. Large-scale geomechanical model test study of an underground cavern group under true three-dimensional stress state[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(9): 935–946.
- [43] 郭文兵, 李 楠, 王有凯. 软岩巷道围岩应力分布规律光弹性模拟试验研究[J]. *煤炭学报*, 2002, 27(6): 596–600.(GUO Wenbing, LI Nan, WANG Youkai. The photoelastic experiment simulating study on the law of stress distribution of the surrounding rock of soft rock roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(6): 596–600.(in Chinese))
- [44] 任伟中, 朱维申. CCD 图像处理量测技术在模型试验中的应用[J]. *水文地质与工程地质*, 1997, (6): 56–60.(REN Weizhong, ZHU Weishen. Application of CCD image processing technique in model test[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1997, (6): 56–60.(in Chinese))
- [45] 任伟中, 寇新建, 凌浩美. 数字化近景摄影测量在模型试验变形测量中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 436–440.(REN Weizhong, KOU Xingjian, LING Haomei. Application of digital close-range photography in deformation measurement of model test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 436–440.(in Chinese))