



煤炭学报

Journal of China Coal Society

ISSN 0253-9993, CN 11-2190/TD

《煤炭学报》网络首发论文

题目: 深地工程多场耦合动力灾变物理模拟仪器研制及关键技术突破
作者: 袁亮, 宋佳辉, 王汉鹏, 张冰, 王伟, 窦林名, 王恩元, 王静, 李梦天, 马衍坤, 郭彦双, 张金厚, 谢欣媛
DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.DE26.0930
网络首发日期: 2026-09-11
引用格式: 袁亮, 宋佳辉, 王汉鹏, 张冰, 王伟, 窦林名, 王恩元, 王静, 李梦天, 马衍坤, 郭彦双, 张金厚, 谢欣媛. 深地工程多场耦合动力灾变物理模拟仪器研制及关键技术突破[J/OL]. 煤炭学报.
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.DE26.0930>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.13225/j.cnki.jccs.DE26.0930

深地工程多场耦合动力灾变物理模拟仪器研制及关键技术突破

袁亮¹³⁴ 宋佳辉¹⁵ 王汉鹏^{15*} 张冰¹ 王伟¹⁵ 窦林名² 王恩元³ 王静⁶ 李梦天¹ 马衍坤⁴ 郭彦双⁷张金厚¹⁵ 谢欣媛¹⁵

1.山东大学 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 山东 济南 250061; 2.中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3.中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 4.安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 5.山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250061; 6.山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 7. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

摘要：深部煤炭资源安全高效开发、深地空间利用与地下能源储备是支撑国家能源资源安全和重大工程建设的重要方向。随着深地资源开发深度持续增加，地下工程逐渐进入高地应力、高地温、高水压/气压、强扰动共存的极端赋存环境，深地灾变问题呈现复杂关联特征。物理模拟试验作为连接理论分析、数值模拟与现场工程的重要手段，是揭示深地工程多场耦合动力灾变孕育机制、演化规律和防控机理的关键技术途径。本文围绕深地工程多场耦合动力灾变物理模拟仪器的研制历程与关键技术突破，系统梳理了国内外物理模拟试验装备在模型尺度、加载方式、多场耦合、监测技术等方面的演化特征。研究表明，物理模拟仪器经历了由小尺度机理试验向中尺度灾害过程模拟、再向大尺度工程系统重构的发展过程；加载方式由单一静载逐步发展为动静载叠加、多应变率扰动与真三维非均布加载；物理场模拟由单一应力场扩展至应力-瓦斯渗流、应力-水压、热-流-固等多场耦合；监测手段由外部形态观测和点式传感，发展为声发射、微震、红外热成像、分布式光纤和电阻率成像等多源信息融合监测。进一步分析指出，当前物理模拟技术仍面临多场多相相似材料难以协同匹配、深地耦合环境模拟不足、模型内部灾变过程透明化程度低及多源数据融合解释体系不完善等问题。基于此，团队创新性突破了深地多场耦合环境原位赋存模拟、三维地层相似原性重构、多应变率动静组合自适应加载、气液耦合保压加载与动态密封、多物理量多元信息联合监测等五大关键技术难题，可实现等效埋深 6000 m、最高原岩应力 150 MPa、地温 200 °C、水气压力 60 MPa 的极端地质环境模拟；未来将继续攻克多场多相透明相似材料研发及三维地质可视化技术两大难题，推动地下工程物理模拟由灾害现象再现向深地原态环境重构、灾变过程透明化和防控机制定量化转变。

关键词：深地工程动力灾变；相似物理模拟；多场多相耦合；仪器装备研发

Development of Physical Simulation Instruments and Key Technological Breakthroughs for Multi-Field Coupled Dynamic Disasters in Deep Engineering

YUAN Liang¹³⁴ SONG Jiahui¹⁵ WANG Hanpeng¹⁵ ZHANG Bing¹ WANG Wei¹⁵ DOU Linming²
WANG Enyuan³ WANG Jing⁶ LI Mengtian¹ MA Yankun⁴ GUO Yanshuang⁷
ZHANG Jinhou¹⁵ XIE Xinyuan¹⁵

1.State Key Laboratory of Tunnel Engineering, Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Shandong Jinan, 250061, China; 2.School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116, China; 4. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China; 5. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, China; 6.School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 7. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: Safe and efficient development of deep coal resources, deep underground space utilization, and subsur-

基金项目：国家重大科研仪器研制项目(52227901)；泰山学者工程专项经费资助(tstp20230603) National Major Scientific Instruments and Equipments Development Project of National Natural Science Foundation of China(52227901)；Taishan Scholar Foundation of Shandong Province(tstp20230603)

作者简介：袁 亮(1960—)，男，安徽金寨人，教授，中国工程院院士。E-mail: Yuanl_1960@sina.com

通讯作者：王汉鹏(1978—)，男，山东济南人，教授，博士。E-mail: whp@sdu.edu.cn

face energy storage are critical to national energy and resource security as well as major engineering construction. As resource extraction extends to greater depths, underground engineering is increasingly conducted in extreme in-situ environments characterized by the coexistence of high in-situ stress, high temperature, high water/gas pressure, and strong disturbances. Consequently, deep geoenvironmental disasters exhibit complex coupled characteristics. Physical simulation experiments, which bridge theoretical analysis, numerical simulation, and field engineering, are a key technical approach for revealing the initiation mechanisms, evolutionary patterns, and prevention and control mechanisms of multi-field coupled dynamic disasters in deep engineering. This paper reviews the development history and key technological breakthroughs of physical simulation equipment for multi-field coupled dynamic disasters in deep engineering. It systematically summarizes the evolution of physical simulation test systems worldwide in terms of model scale, loading methods, multi-field coupling, and monitoring technologies. The results indicate that physical simulation instruments have evolved from small-scale mechanistic testing to medium-scale disaster-process simulation and subsequently to large-scale reconstruction of engineering systems. Loading methods have progressed from single static loading to combined dynamic-static loading, multi-strain-rate disturbances, and true triaxial non-uniform loading. Physical-field simulation has expanded from a single stress field to coupled stress-gas seepage, stress-water-pressure, and thermo-hydro-mechanical fields. Monitoring techniques have advanced from external morphology observation and point-based sensing to multi-source information fusion involving acoustic emission, microseismic monitoring, infrared thermography, distributed optical fibers, and electrical resistivity imaging. Further analysis shows that current physical simulation technologies still face several challenges, including the difficulty of achieving coordinated matching of similarity materials for multi-field and multiphase conditions, insufficient simulation of deep coupled environments, limited transparency of internal disaster processes within models, and inadequate interpretation frameworks for multi-source data fusion. In response, our team has innovatively addressed five key technical challenges: in-situ simulation of deep multi-field coupled environments, three-dimensional reconstruction of strata with similarity principles, adaptive combined dynamic-static loading at multiple strain rates, coupled gas-liquid pressure-maintaining loading with dynamic sealing, and integrated monitoring of multiple physical parameters using diverse information sources. The developed system can simulate extreme geological conditions equivalent to a burial depth of 6,000 m, with a maximum in-situ stress of 150 MPa, a geothermal temperature of 200 °C, and water/gas pressure of 60 MPa. Future research will continue to address two major challenges: the development of transparent similarity materials for multi-field and multiphase conditions, and three-dimensional geological visualization technologies. These advances will promote the transformation of underground engineering physical simulation from reproducing disaster phenomena to reconstructing deep in-situ environments, visualizing disaster evolution processes, and quantitatively characterizing prevention and control mechanisms.

Key words: Dynamic Disasters in Deep Underground Engineering; Similarity Physical Modelling; Multi-field and Multi-phase Coupling; Development of Instrumentation and Facilities

深部煤炭资源安全高效开发和深地空间建设储备是保障我国能源资源安全、服务国家重大工程的重要基础^[1,2]。当前我国浅部资源逐渐减少,深部资源开发开始不断向千米乃至更深层延伸,但会面临高地应力、高地温、高水压/气压、强扰动等复杂环境的影响^[3,4],导致“深部资源不敢采,开采过程怕灾害”的重大工程难题。与浅部工程相比,深地煤岩体处于力-热-流-气-固多场耦合环境中^[5],其力学性质及储能特征等发生显著变化。在此工程背景下,煤与瓦斯突出、冲击地压、突

水等动力灾变问题表现出突发性和隐蔽性特征,严重制约深部资源安全开采和地下空间可持续利用,准确揭示深地复杂环境下多场耦合动力灾变演化机制,是当前亟待解决的重大科学问题。

深地工程多场耦合动力灾变机理研究通常依赖理论分析、数值模拟、现场监测和物理模拟试验等方法^[6,7]。理论分析能够揭示基本力学关系,但难以处理复杂地质结构和多场耦合问题;数值模拟具有过程可视化的优势,但其可靠性高度依赖本构模型、边界条件和参数选取;现场监测最

再到整体失稳的基本力学过程。小尺度物理模型具有一定的优势，使得边界条件简单、变量容易

控制，因此适合解决破坏机制类的相关问题。

表 1 小尺度代表性物理模拟仪器

研发人员	仪器名称	模型尺寸	研究对象
许迎年 等 ^[12]	岩爆模拟试验装置	200 mm × 200 mm × 70 mm	岩爆、洞室围岩破坏
Zhou 等 ^[13]	煤岩动静载物理模拟试验系统	100 mm × 100 mm × 100 mm	巷道围岩动静载破坏
王同涛 等 ^[15]	大型盐穴储能库地质力学物理模拟实验装置	φ200 mm × 400 mm	盐穴储能库围岩响应
张超林 等 ^[16]	多功能煤与瓦斯突出模拟试验系统	腔体: φ200 mm × 700 mm; 巷道 φ200 mm × 10 m	突出后两相流、冲击波传播
王汉鹏 等 ^[17]	盐穴造腔模拟与形态控制试验装置	不同尺寸盐芯试件; 具体尺寸需后续精核	盐穴储库造腔过程
孟祥跃 等 ^[18]	二维煤与瓦斯突出模拟实验装置	具体尺寸需后续精核	地应力与瓦斯压力共同作用下的破坏阵面传播
欧建春 等 ^[19]	煤与瓦斯突出模拟实验装置	具体尺寸需后续精核	煤体裂纹和抛出过程
冯晓巍 等 ^[20]	内置等强缩尺 3D 打印支护系统的矿山相似物理模拟试验系统	缩尺比例 30:1, 具体尺寸需后续精核	3D 打印使支护系统、裂隙结构、巷道构件
许慧聪 等 ^[21]	深部煤岩动力灾害多场耦合试验系统	具体尺寸需后续精核	煤岩体单轴、三轴、循环加卸载、渗流和低频扰动试验

笔者认为，小尺度模型的意义体现在两个方面：首先是提供破坏判据。例如裂纹起裂条件、动静载损伤阶段、瓦斯吸附损伤规律、锚固界面应力传递规律等，均是中-大尺度模型解释现象的理论基础；其次提供相似材料参数和本构参数。大尺寸模型必须依赖合理的相似材料。如果无法理清材料在应力、渗流、温度、扰动下的力学响应，大模型的相似理论就仅是几何相似，而非力学相似。但是小尺寸模型的局限也非常明显，虽然能够解释裂纹起裂，却难以解释裂纹在真实地下工程中如何与巷道、采空区、煤柱等发生相互作用，因此，小尺寸模型难以研究传播路径和灾害后果。

1.1.2 中尺度物理模拟装备

中尺寸模型开始把研究对象推进到局部工程

场景，摒弃小尺度试验过度简化方式，减少大平台复杂难控的难度，既保留一定的边界可控性，又能再现灾害孕育、触发、发展和终止的过程。例如，煤与瓦斯突出模拟装置开始引入突出口、瓦斯充填、快速卸压和非均布加载；突水溃砂模型开始引入含水层、采动裂隙和水砂通道；巷道动静载模型开始引入支护结构和重复冲击扰动。聂百胜等^[22]的中等尺度煤与瓦斯突出装置模型尺寸达到 1500 mm × 600 mm × 1000 mm，已经可以铺设煤层、顶底板和构造结构，并模拟工作面超前应力分布；刘永茜等^[23]的新型突出系统虽然试件尺寸为 400 mm × 400 mm × 1200 mm，但通过三向独立压头、分层加载和多种诱突方式，已经从简单卸压突出转向更复杂的采掘诱突模拟。

表 2 中尺度代表性物理模拟仪器

研发人员	仪器名称	模型尺寸	研究对象
杨科 等 ^[30]	地下空间储能防渗实验装置	500 mm × 500 mm × 500 mm	地下空间储能、防渗、围岩稳定
李元海 等 ^[31]	中小型隧道物理模拟试验系统	600 mm × 600 mm × 400 mm	隧道围岩变形破裂
Yang 等 ^[30]	大型盐穴储能库地质力学物理模拟实验装置	800 mm × 800 mm × 150 mm	巷道冲击破坏、支护响应

彭守建 等 ^[32]	深部煤岩冲击地压多功能物理模拟试验系统	300 mm × 300 mm × 600 mm	冲击地压、剪切扰动、临空面破坏
郭惟嘉 等 ^[33]	采动覆岩涌水溃砂灾害模拟试验系统	1200 mm × 400 mm × 610 mm	采动覆岩、涌水溃砂
刘东 等 ^[34,35]	多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统	1050 mm × 410 mm × 410 mm	煤与瓦斯突出、多场耦合
康红普 等 ^[36]	煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统	1.50 m × 0.75 m × 0.75 m	断层滑移型冲击地压
聂百胜 等 ^[22]	中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟装置	1500 mm × 600 mm × 1000 mm	煤与瓦斯突出、地质构造模拟
刘爱华 等 ^[27]	深部开采承压突水机制相似物理模型试验系统	1600 mm × 800 mm × 200 mm	承压突水、流固耦合

早期小型或二维突出装置更多关注瓦斯压力、地应力或卸压对煤体破裂的影响。随着学者们^[22-26]研制的相关系统的发展，突出模拟逐渐从煤样突然卸压喷出进而发展到在地应力、瓦斯压力、煤体结构、巷道掘进、诱突方式和多源监测共同作用下的全过程模拟。例如，许江等^[24,25]试验台通过电液伺服加载、面充气和快速释放机构模拟不同倾角煤层突出；聂百胜等^[22]中等尺度装置能够铺设顶底板和构造结构；刘永茜等^[23]系统则进一步引入三轴非均匀连续加载、水平应力分层加卸载和多种诱突方式。煤与瓦斯突出模拟仪器的发展，不仅是模型尺度增大，而是突出研究手段的改变，从单一因素触发转向多因素耦合致灾；突水溃砂和承压突水模型也体现相同的发展规律，刘爱华等^[27]系统的模型尺寸为 1600 mm×800 mm×200 mm，能够在复杂应力、水压力和采动影响共同作用下模拟岩体变形破坏及水流突变；赵启峰等^[28]气液联动突水溃砂装置则把含水层赋存、采动裂隙和突水溃砂通道联系起来。研究问题将不只是裂隙是否扩展的简单问题，而是裂隙如何贯通含水层并最终形成突水溃砂通道等此类复杂问题；巷道动静载模型同样如此，Yang 等^[29]的动静载巷道模型通过 800 mm×800 mm×150 mm 试件和最大 2100 J 落锤冲击，比较无支护、锚杆支护和锚杆—护盾协同支护下巷道的响应，这类模型不是单纯研究岩石强度，而是研究支护结构如何改变裂纹扩展、塑性变形和冲

击响应。因此，中尺寸模型把小尺寸试验揭示的机制放入局部工程环境中，检验这些机制如何组合成灾害过程。

1.1.3 大尺度物理模拟系统

大尺寸模型的核心关注点已不是某一处裂纹或某一次突出，而是开挖、卸荷、支护、采动、覆岩运动、应力重分布和工程工法之间的整体复杂耦合关系，如表 3。由于许多地下工程现象并不是局部决定的，而是由更大空间范围内的结构关系控制的，此时中尺寸模型就会遇到明显限制。例如，采动覆岩破断不是某一处岩层强度不足造成的，而是煤层开采、采空区形成、关键层弯曲破断、离层裂隙扩展、支架阻力变化和上覆岩层协同运动共同作用的结果。

例如，李术才等^[37]研制的隧道施工大比尺三维模型系统，能够在大空间内连续模拟隧道开挖与支护过程，使围岩应力重分布和支护条件以更接近真实工程的方式呈现。王琦等^[38]研制的无煤柱自成巷三维地质力学模型系统可以模拟推采、切缝、成巷等核心过程，说明大尺寸仪器从灾害模拟工具转变为工法验证工具。近些年，学者们研制的大尺寸系统不仅局限于单一情况下的试验，而是服务于深部煤岩工程中的多类灾害和多种工程行为。卢义玉等^[39]研制的深部煤岩工程多功能物理模拟系统既可进行煤与瓦斯突出，也可开展水力增透、围岩变形破坏和超临界 CO₂压裂等试验。

表 3 大尺度代表性物理模拟仪器

研发人员	仪器名称	模型尺寸	研究对象
Lv 等 ^[40]	大尺度相似物理模型试验系统	1.8 m × 1.1 m × 0.4 m	超厚煤层开采、覆岩裂隙
He 等 ^[41]	浅埋煤层群跨煤柱开采相似模拟平台	300 cm × 20 cm × 155.5 cm	跨煤柱开采、覆岩结构、支架阻力
高魁 等 ^[42]	大型石门揭煤煤与瓦斯突出试验平台	箱体净尺寸 2.5 m × 1.0 m × 1.5 m	石门揭煤突出、构造软煤

李术才 等 ^[43]	大型真三维煤与瓦斯突出定量物理模拟试验系统	1.5 m × 1.5 m × 3.0 m	真三维煤与瓦斯突出
李术才 等 ^[44]	深部厚顶煤巷道大型地质力学模型试验系统	2400 mm × 2400 mm × 2000 mm	深部厚顶煤巷道、开挖支护
李术才 等 ^[37]	隧道施工过程大比尺三维模型试验系统	5.2 m × 4.5 m × 2.7 m	隧道开挖、支护、施工
王琦 等 ^[38]	切顶卸压无煤柱自成巷三维地质力学模型试验系统	5.5 m × 2.4 m × 3.0 m	无煤柱自成巷、N00 工法
李树刚 等 ^[45]	煤与瓦斯共采三维大尺度物理模拟实验系统	箱体 3.0 m × 2.5 m × 1.8 m	煤与瓦斯共采、裂隙演化、瓦斯运移
卢义玉 等 ^[39]	深部煤岩工程多功能物理模拟实验系统	2060 mm × 1200 mm × 1200 mm	煤与瓦斯突出、增透、围岩变形、CO ₂ 压裂

综上，笔者从以下几点分析模型尺寸扩大可能带来的影响，这将是未来大尺度相似模拟技术发展过程中的难点。第一，相似材料更难满足多场相似，大模型中不同煤岩层和构造面均需要满足相似关系，若渗透性、吸附性、动力响应等不相似，模型仍可能无法真实反映原型；第二，加载边界更难真实再现。深部地下工程的边界不是简单的刚性或均布应力边界，而具有储能、卸荷、应力补偿和扰动传播特征；第三，变量控制难度增加，大模型中的材料非均匀性、加载误差、施工过程扰动、边界摩擦等因素都会影响结果。第四，重复性下降、成本升高，大尺寸模型往往成本高、周期长、重复次数有限，更适合验证关键过程，而不适合做大量参数敏感性研究。

1.2 物理模拟边界加载条件维度

1.2.1 模拟装置加载类型改进

深地工程物理模拟试验仪器当前主要还是围绕静载加载的方式，深地工程开挖、采动、支护和突水等问题，首先是由原岩应力重分布控制的。因此，相当一部分大比尺地质力学模型试验系统，主要任务是建立稳定的竖向压力、水平侧压力或均布边界压力，用来模拟覆岩压力、侧向约束、开挖卸荷和支护反力，但这不能完全代表深部地下空间的真实应力状态，只是学者们将地下空间环境理想化，假设不存在动载的影响，这实际上是对应力环境的简化，也可理解为地下工程物理模拟加载的基础条件。例如隧道施工大比尺模型^[37]、深部厚顶煤巷道模型^[44]、承压突水模型^[27,46]等，都首先依赖稳定可靠的静载边界。上述模型试验仪器共同解决了重构地下工程开挖前后的应力场变化的基本问题。隧道施工、厚顶煤巷道支护、无煤柱自成巷和承压突水等问题，其实都需要通过静载加载来再现围岩应力集中、卸荷变形、支护承载和裂隙贯通过程。

随着研究对象从浅部逐渐转向深部煤岩动力灾害，单纯静态加载已不满足要求。深部巷道冲击地压、煤与瓦斯突出、爆炸扰动下洞室破坏等^[12,36,47-50]问题，并非简单的静态强度破坏，而是煤岩体在长期高静载作用下积累能量，在外部扰动作用下突然失稳。因此，仪器加载方式开始从施加稳定应力场向模拟扰动触发过程转化。近些年来，一批学者^[51-54]将传统的静态加载阶段推进到了动静载耦合阶段，学者们普遍认为真实深部灾害往往不是单独由静载或动载造成，而是由二者共同控制。静载决定煤岩体是否接近临界状态，动载决定临界系统何时失稳、以何种方式失稳。动载也不能简单地在静载基础上增加一个荷载峰值，地下工程灾害也不再被看作围岩强度达到极限后的渐进破坏，而是高静载储能体在扰动作用下的非稳定释放。换言之，静载提供灾害孕育条件，动载提供灾害触发机制。深部巷道动静载试验系统^[55]、深埋巷道动静载叠加诱冲系统^[53]和深井巷道动力冲击模拟系统^[56]等一系列装备，实际上都在围绕高静载背景下的外部扰动如何改变围岩—支护系统稳定性这一问题展开的。系统不再局限于围岩在单调加载下的破坏强度，而更关注循环扰动冲击、顶板断裂、应力波传播和支护吸能之间的关系。同时动载形式也在发生变化，早期动载更多表现为单次冲击或简单振动，后续逐渐发展为落锤冲击、剪切扰动、循环加卸载、爆炸冲击、顶板断裂模拟、瞬时补偿等多种形式。



图2 不同加载类型的物理模拟仪器

1.2.2 模拟装置加载性质改进

在小尺度试验中,大多采用一个主加载方向[13,14,57],单向加载的局限也很明显,地下工程原型不是单向受压体,而是处于竖向覆岩压力、水平构造应力、开采扰动和局部卸荷等共同作用下的复杂三维应力场。单向加载可以解释材料或局部结构破坏原因,却难以解释破坏在空间中扩展问题,也难以反映主应力方向变化对裂隙网络、瓦斯运移和突出通道的控制。双向加载主要解决平面应变条件下竖向压力与水平侧压共同作用的问题,工程模拟试验中的侧压系数、水平约束、竖向覆岩压力和开挖卸荷共同影响裂纹扩展和围岩变形[27,31,58]。单向或双向加载下,裂纹和灾害通道常常受到边界简化的限制;三轴加载下,最大主应力、中间主应力和最小主应力之间的关系会直接控制裂隙扩展、煤体抛出、瓦斯压力迁移和巷道围岩失稳。三轴加载使试验从局部力学相似进一步接近原位应力相似[43,59-61]。以煤与瓦斯突出为例,突出并不是在一个平面内发生的煤体破坏,而是地应力场、瓦斯压力场、开挖卸荷区、煤体结构面和突出孔洞在三维空间中共同演化的结果,二维或准二维加载已经不足,不同主应力方向不仅影响煤体破裂形态,还会改变瓦斯压力下降区的扩展方向和突出发展速度。大型真三维煤与瓦斯突出定量物理模拟系统[43]、多场耦合煤矿动力灾害大型模拟系统[34]、石门揭煤突出模拟系统[61]、深井煤岩瓦斯动力灾害模拟系统[59]等仪器开始实现同时施加竖向应力和两个方向水平应力的条件,以重构煤岩体真实三维地应力状态。



图3 不同加载性质的物理模拟仪器

近年来,相似物理模拟仪器又从三轴均布加

载发展到真三维非均布、多点独立、分区分层加载[23,34,35,39]。真实地下工程中的应力场往往不是均匀的,例如采动会形成超前支承压力,断层和构造会造成局部应力集中,巷道掘进会导致前方卸荷,煤层倾角和软硬夹层会导致分层差异。均匀三轴加载虽然比双向加载更真实,但仍难以表达这些复杂边界。此类系统的关键在于能模拟应力梯度、局部卸荷、分区加载和非对称边界,使模型边界由理想化均布压力进一步接近真实地下工程边界。

1.3 物理模拟单一及多物理场维度

1.3.1 单一场赋存阶段

多数的深地工程物理模拟试验首先围绕应力场模拟展开。模拟单一场的仪器大多把深地工程简化为一个力学边界问题,即模型外部加载代表原岩应力,开挖代表卸荷,变形和裂纹代表围岩响应。李术才等大比尺隧道施工模型系统[37]以及深部厚顶煤巷道模型系统[44],重点均在开挖、支护和围岩应力演化的准静态模拟上;许迎年等[12]岩爆含孔试件则将洞室岩爆简化为孔洞周边应力集中和脆性破坏问题。

但单一应力场模拟的问题在于不能真实完整重现深地复杂环境,地下工程灾害并不是单纯受力过大导致的。例如煤与瓦斯突出不只是煤体承载失稳,还涉及瓦斯吸附解吸、渗流压力梯度、煤体破裂扩容和气体驱动抛出;突水溃砂也不只是底板破坏,还涉及裂隙贯通、水压驱动和颗粒迁移;盐穴储能和地下空间储能也不仅是围岩稳定问题,还涉及温度、气压、水压、渗流和循环荷载等因素。因此,单一应力场只能解释破坏发生的力学条件,却难以解释灾害如何发展为流体迁移、能量释放和工程失稳的问题。

1.3.2 两场耦合赋存阶段

物理模拟试验仪器开始把应力场与流体场结合起来,流体场在不同工程问题中表现不同,在煤与瓦斯突出中是瓦斯渗流场;在突水溃砂中是水渗流场;在盐穴储能、地下空间储能中则表现为气液介质渗流。在两场耦合阶段,仪器不再把深地工程灾害看成单纯的力学破坏,而是看成力学变形破坏与流体压力迁移共同作用的过程,即:应力场控制裂隙开闭和岩体破坏,流体场控制渗流发育和灾害扩展。

早期煤与瓦斯突出的研究只考虑瓦斯压力或地应力,无法解释突出过程中的非线性突发性。瓦斯突出本质上是应力场与瓦斯渗压场耦合作用

的过程，开挖或卸压导致煤体应力重分布，煤体破裂使孔隙裂隙结构发生变化，裂隙扩展又改变瓦斯渗流通道，瓦斯压力梯度进一步驱动煤体破碎和抛出。众多学者关于煤与瓦斯突出模拟系统展开系列研究，从地应力和瓦斯压力的共同加载，到面充气、快速卸压、三维应力、气固耦合和多参数采集。张超林等^[16]也明确指出，煤与瓦斯突出物理模拟经历了由一维受力、单一场、小尺度向多维、多场、多尺度过渡的过程。刘东等^[34,35]研制的多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统不仅能够模拟煤与瓦斯突出，而且能够同时采集煤岩体不同空间位置的温度、应力和气体压力信息，这也说明仪器已经不再满足于施加瓦斯压力后观察是否突出，而是开始追踪突出过程中瓦斯压力、温度和应力在空间与时间上的演化。在突水灾害研究中，刘爱华等^[27]研制的深部开采承压突水机制模型系统将水平侧压力、竖向压力和水压力结合起来，模拟采动应力与承压水共同作用下底板岩体的变形、裂隙扩展和突水过程。郭惟嘉等^[33]研制的采动覆岩涌水溃砂系统则进一步把采动覆岩破坏、裂隙发育、水砂通道形成和水砂突涌联系起来，此时，水不再只是一个外部边界压力，而是通过裂隙网络与围岩破坏共同演化的主动因素。



图4 多场耦合加载模块装置

1.3.3 多场耦合赋存阶段

随着开采深度增加，煤岩体所处环境不再只是“高应力+高瓦斯”或“高应力+高水压”，而是同时具有高地应力、高瓦斯压力、高地温、强扰动等复杂环境。文光才等^[49,59]深井煤岩瓦斯动力灾害模拟系统围绕超千米深井环境设计，可实现高地应力、高瓦斯压力和高地温三个核心环境因素，加载能力不小于 25 MPa，水平加载能力不小

于 16 MPa，瓦斯压力 6 MPa，地温控制 60 ℃，可模拟 1000-1500 m 深井煤层赋存环境。许慧聪等^[21]深部煤岩动力灾害多场耦合试验系统将“应力-温度-渗流-扰动”多物理场耦合方法用于冲击地压影响因素分析，不仅开展单轴、三轴等单物理场试验，也开展围压-渗流、围压-扰动等多物理场对比试验。王粟^[52]关于热流耦合环境下受冲击扰动煤体损伤-渗流特性的研究进一步把温度、瓦斯压力、冲击扰动和渗流演化联系起来。动载扰动场的引入，则使多场耦合进一步接近深部灾害实际。冲击地压、断层滑移型冲击、煤与瓦斯突出等都不是单纯静态过程，而是高静载条件下由外部扰动触发的动力失稳。

在当前学者们的研究中，可以看出多场耦合不是简单地把多个加载模块安装在一个平台上，而是试图再现一个完整的灾害演化过程，高静载使煤岩体进入临界储能状态，瓦斯或水压改变孔隙裂隙内压力与有效应力，温度影响材料性质和流体迁移，动载扰动触发临界破坏。

2. 深地工程多场耦合动力灾变物理模型监测技术演变历程

2.1 外部几何形态表征

物理模拟试验的监测方式大多采用比较直接的方式，模型试验中研究者主要关注模型是否出现剥落、片帮、弹射、裂纹扩展和煤体抛出等宏观现象，而这些现象的捕捉主要依靠试验后裂纹提取、位移记录、压力传感器以及高速摄像等手段，例如早期许迎年^[12]的岩爆含孔试件试验、孟祥跃^[18]的二维煤与瓦斯突出模拟、欧建春^[19]的煤体破裂演化试验。尤其是欧建春等通过高速摄像对突出全过程进行实时观测，把煤与瓦斯突出划分为孕育、启动、发展和停止等阶段。但这一阶段的监测仍然以外部可见现象为主，对模型内部应力、气压、裂隙和能量演化的识别能力有限。

2.2 内部局域多物理场点式监测

模型试验仅凭观察裂纹和破坏形态无法解释灾害的孕育机制。煤与瓦斯突出需要知道煤体内部瓦斯压力如何下降，突水溃砂需要知道水压和流量如何变化，巷道支护需要知道围岩应力如何演化。因此，物理模拟试验仪器开始大量引入应力、应变、位移、瓦斯压力、水压力、温度和流量等传感器。

在煤与瓦斯突出模拟装置中,许江等^[24]改进了瓦斯突出试验台,将温度传感器和瓦斯压力传感器布设到煤体内部,用于实时监测突出过程中煤体温度和瓦斯压力的变化;刘东等^[34,35]研制的多场耦合煤矿动力灾害大型模拟系统进一步发展到多通道采集,可同时监测不同空间位置的温度、应力和气体压力。此时,突出试验不再只是判断是否突出,而是开始分析突出过程中应力场、瓦斯压力场和温度场之间的时空响应关系。在隧道和巷道模型试验中,李利平等^[62]超大断面隧道三维地质力学模型试验中,采用光纤光栅传感器、电阻式应变计、多点位移计和微型压力盒,监测洞壁及近区围岩应力、位移和荷载变化。这类监测方式使模型试验能够从宏观破坏形态进一步深入到围岩应力传递、支护承载和变形分区的内部过程。突水溃砂与承压突水试验中,前期的突水模型主要观察裂隙是否贯通、是否发生突水^[27],而后续装置实现水压力、水量、渗流路径和区域流量的精确监测。李杨杨等^[63]对采动底板突水平台进行改造,实现了突水水量区域化定量监测、恒压供水和全方位密封。笔者认为这类传感器大多仍属于点式或局部监测,其优势是精确,但缺点是空间连续性不足。模型内部没有布设传感器的位置,往往仍然是监测盲区。



图5 物理模型监测技术(部分)

2.3 多源瞬态前兆信息监测

深地工程动力灾害具有突发性。冲击地压、煤与瓦斯突出等灾害往往在短时间内完成能量释放,单纯的传感器未必能够捕捉破坏前兆。因此,监测技术进一步向声发射、微震、电磁辐射、红外热成像、高速摄影、加速度响应和超动态应变采集发展,监测目标从记录过程转向识别前兆。

微震和声发射并不直接测量裂纹几何形态,而是通过煤岩内部微破裂释放的弹性波信号,反演破裂活动的强度和阶段性。雷文杰和朱权洁等^[48,64]利用大型煤与瓦斯突出模拟系统和高灵敏微震系统,对突出全过程进行动态响应监测,将突

出过程划分为孕育、激发、发生、延续终止等阶段,并通过事件数、能量、频带特征等指标识别突出前兆。在冲击地压和深部巷道动力灾害研究中,多源动态监测表现得更加明显,史新帅等^[65]研制的大尺度三维巷道冲击地压系统集成网络并行电法、静态应变、超动态应变、高速摄像机、加速度传感器等手段,实现应力场、变形场和电场等多源信息同步采集。彭守建等^[60]研制的深部煤岩冲击地压多功能物理模拟系统进一步引入声发射、红外热成像和电磁辐射监测,用于识别扰动加载期和全面破坏期的能量释放过程,红外热成像反映破碎区能量释放和温度异常,电磁辐射反映裂纹扩展和电荷分离,声发射反映微破裂活动,这些信息共同构成动力灾害的前兆识别体系。

2.4 全场多维空间监测

前述的方法无法完整描述裂隙网络、变形场和破坏的空间扩展。为弥补这一不足,近年来大量文献开始引入DIC、数字散斑、三维激光扫描、工业内窥镜、探地雷达和电阻率成像等技术。监测对象由“点”扩展为“线、面、体”。

DIC 和数字散斑技术能够将围岩表面变形从若干测点扩展为连续位移场和应变场。李元海等^[31]中小型隧道物理模拟系统配套数字照相变形测量系统,王宗可等^[66]基于3D打印裂隙围岩巷道模型并结合DIC技术,分析完整围岩与裂隙围岩巷道变形破坏差异。Lv等^[40]超厚煤层分阶段开采研究则将大尺度物理模型、DIC、分形维数和UDEC数值模拟结合起来,定量分析覆岩裂隙扩展和破坏区演化。这说明模型试验正在从布点测变形向全场识别裂隙和变形转变。刘新杰等^[67]研制的大型三维高精度物理模拟平台集成工业内窥镜、探地雷达、三维激光扫描和运动相机延迟拍摄,能够从多个维度捕捉覆岩破坏、裂隙发育和地表沉陷过程。刘斌等^[68]通过隧道含水构造超前探测物理模拟试验验证直流电阻率法对含水构造的识别能力;刘征宇等^[69]利用三维电阻率跨孔CT物理模型研究盾构区间孤石探测。这类监测手段使物理模拟试验不再只是二维剖面观察,而开始向三维结构重构发展。

3. 深地工程多场耦合动力灾变物理模拟技术原创性突破

基于前述的国内外现有技术存在的空缺,团

队实现了相关技术的原创性突破，提出了 5 大创新性技术，真正解决了动载“模拟更准”、瓦斯“赋存更真”、数据“监测更精”的重大难题。

3.1 深地多场耦合环境原位赋存模拟技术

在深部工程的建设中，深部岩体存在极端的复杂环境，设备需要克服高地应力、高地温和高水气压力耦合精准施加的难题，团队创新性提出了“力-热-流”同步加载技术，可模拟深地 6000 m 的极端地质环境，可以实现 0-180MPa 静态+5~20kJ 动态的应力加载、0-60MPa 渗流加载、20-200℃的温度加载。

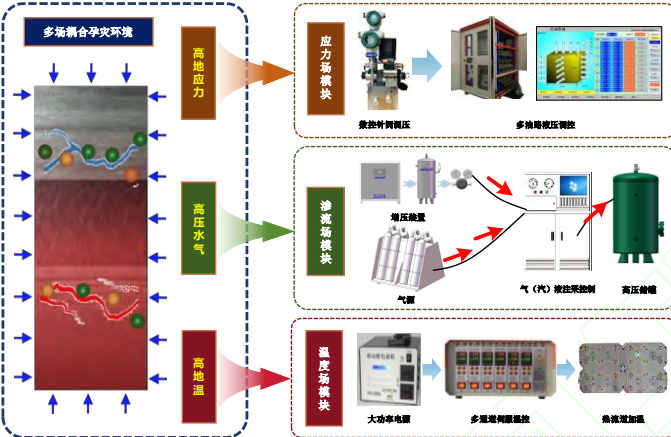


图 6 多场耦合模拟技术原理

应力场满足静载与动载双重要求，可以实现 10^{-4} - 10^4 s⁻¹ 不同梯度的低-中-高-超高应变率加载，可复现多应变率远场扰动和多类型近场储能的灾变诱发动力学条件，其中静载采用多油路液压数控针阀调控技术与真三维高地应力梯度加载技术；渗流场采用面式充填技术，充气储气罐与面式充气板连接，模拟试验原型岩层远场气体的持续供给，实现对模型岩层的抽真空和大流量高压气体均匀充填，并采用伺服控制气压驱水技术及数控变频调压技术，实现模型内部大流量高水压、高气压定量施加；温度场则采用热流道技术，在内部多场模型箱体和力热加载板表面设有加温结构，其中力热加载板的热流道控制线路穿过活塞引出，配合自主研发高精度多通道温度智能控制系统，实现温度平滑调节，实时反馈并分别调节各个加热原件的温度。

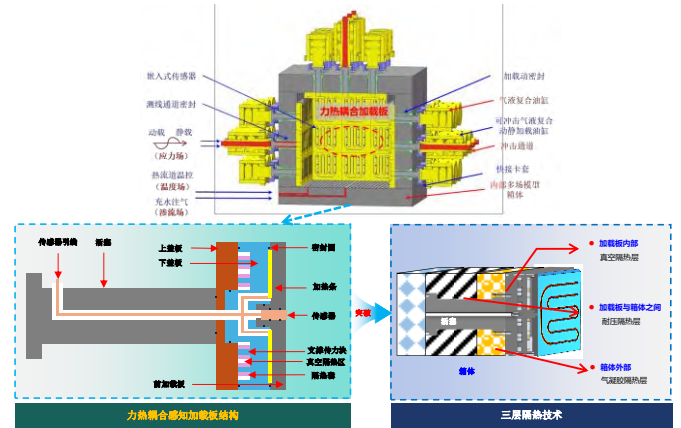
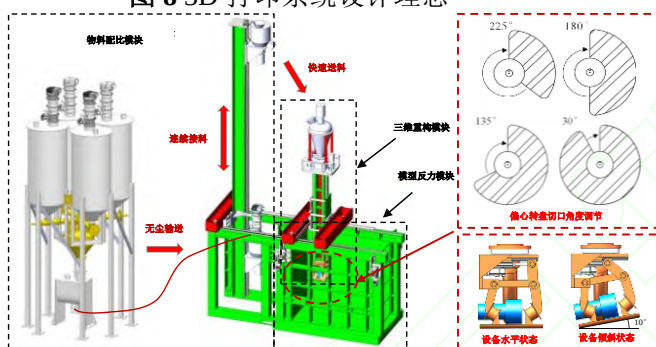
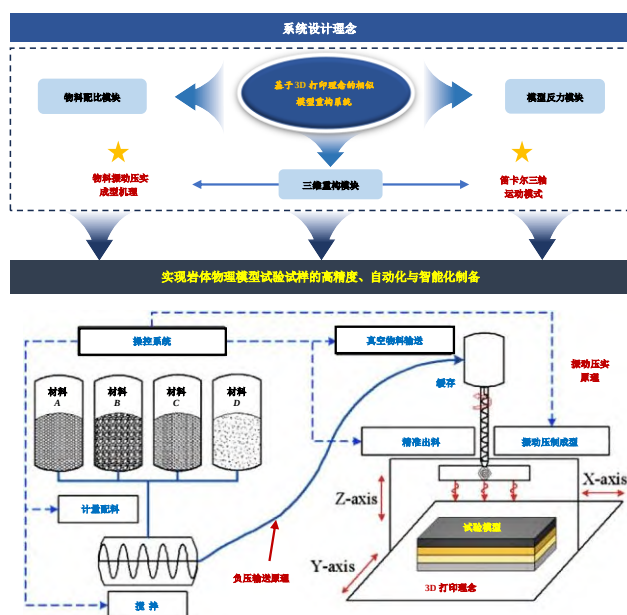


图 7 “力-热-流”耦合加载技术

本技术创新不在于传统仪器的单一加载指标，而在于米级模型尺度、多相多场耦合、动静叠加载、多源监测等在同一平台中的协同实现。通过真三维高地应力梯度加载、热流道温控、大流量高压气液加载、气液分区保压与动态密封、多源传感引出和多应变率动静组合加载的集成，实现深地力-热-流-气-固多场多相环境在同一大尺度模型中的协同施加和实时感知。该技术可应用于高静载背景下由采掘扰动、顶板破断、断层滑移、爆破振动等触发的动力灾变过程模拟。

3.2 深部复杂地层 3D 地层相似原性重构技术

当前的相似物理模型的构建方式中，绝大多数的模型均采用现浇或预制的形式，采用 3D 打印技术进行米级至十米级模型制作方法在国内外属于技术空白，3D 打印技术原理如图所示。为实现深部地层相似原性重构，攻克了多相岩体相似材料研发制备、相似材料自动化配制与无尘输送、复杂试验模型智能高效重构与参数精确控制难题，团队自主研发了“基于 3D 打印理念的地层相似重构系统”，如图所示。系统主要包括物料配比模块、三维重构模块和模型反力模块三个关键单元。



框架反力模块为模型岩体制作提供成型空间，同时可避免三维重构单元在模型制作过程中对已成型材料层的扰动破坏，框架采用模块化设计，实现整体榫式拼接，方便拆卸及后期扩展；材料配送模块可实现相似材料称量、搅拌、混合配置过程的精细化、自动化、智能化控制，以及通过真空负压管实现相似材料的无尘高效定量输送；三维重构模块基于 3D 打印和振动成型原理，利用三维移动框架实现模型岩体三维空间的立体构筑，为实现均匀布料，设计了螺旋下料机构，通过改变步进电机的转速精准控制出料。模型的压实效果可通过调节盘面缺口进而调节电机振动的激振力大小来实现，同时角度调节电缸（如图 9e）可带动整个振动压实装置倾斜，实现倾斜角度 0° ~ 10° 可调。

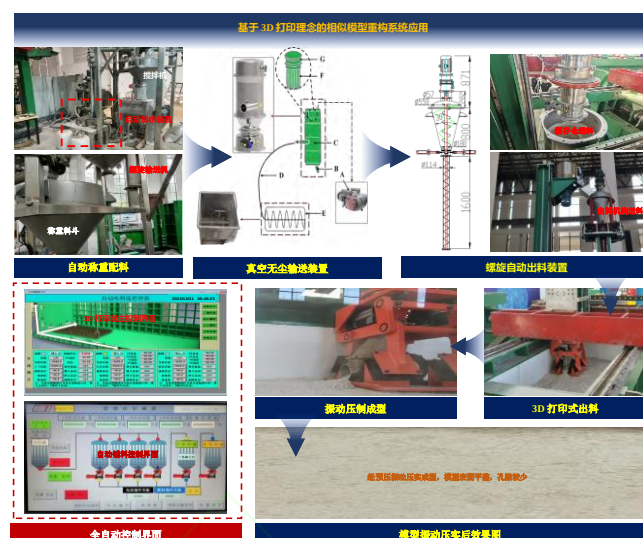


图 10 3D 相似原性重构流程

3.3 多应变率动静组合自适应加载技术

深地环境中除了受“三高”的影响，深地工程围岩会受到近场应变能释放和远场动力扰动导致的动静叠加荷载，并在其影响下产生破裂，如冲击地压及煤岩复合动力灾害。团队自主研发了多应变率动静组合自适应加载技术，其中自适应加载体现在静载保持与动载叠加的自适应协调、模型变形过程中的跟随式补压、应变率和扰动形式的自适应切换、多通道反馈控制的自适应调节。该技术可实现超大静载到超高应变率的全方式模拟，研制仪器可对模型进行高精度真三维地应力梯度加载以及低频交变振动、中高应变率冲击、高应变率冲击和超高应变率等多应变率动态扰动加载，模拟深地工程围岩近场和远场动静叠加荷载，既可实现近场围岩受静载后的应变能快速释放（模拟应变型岩爆），又可实现近场和远场动载扰动模拟（模拟爆破施工振动、岩层破断冲击、断层滑移等扰动荷载诱发的动力灾害）。

通过高频作动器可以实现模型低应变率加载,其中创新研发的可冲击气液复合油缸可对模型表面施加振动荷载,模拟岩体弹性能突然释放引发冲击;研发的落锤式和摆锤式冲击装置可以实现水平和竖直方向上中应变率自动连续加载,且冲击能量和频率可调;高应变率则通过高强度的磁场与电流的相互作用产生瞬时的冲击力进行高速电磁冲击;超高速应变率加载通过电火花震源,实现高能级冲击荷载短时间赋能。如图11所示。

仪器可根据不同的模拟对象和试验目的,对加载方式进行自适应调整。若研究单一扰动源,可采用单向加载;若研究断层滑移、顶板破断、

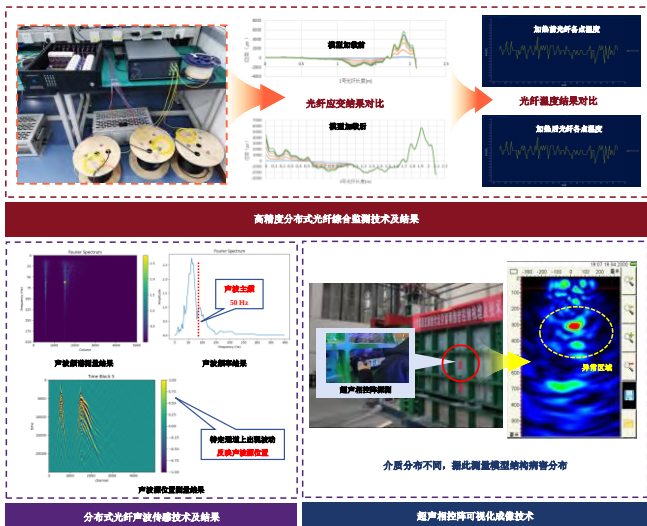


图 14 分布式光纤与可视化成像联合监测技术

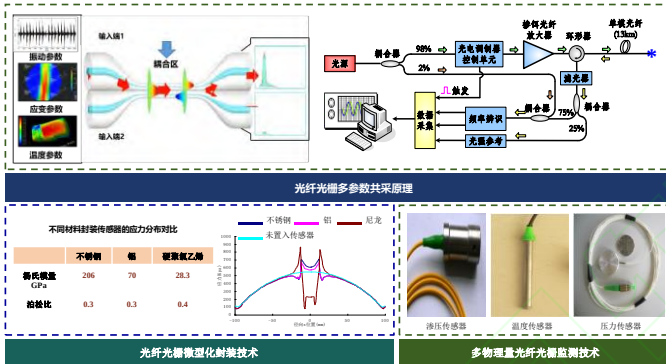


图 15 光纤光栅多参数共采技术

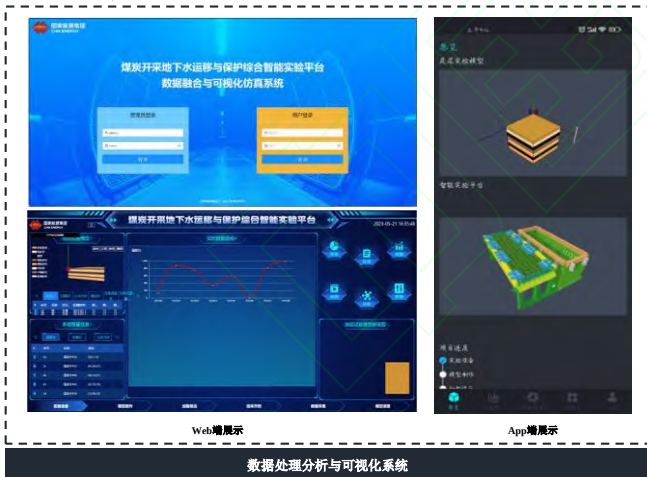


图 16 多端可视化监测

试验过程中所有监测数据将同步上传云端,通过自研的数据处理分析与可视化系统实现数据清晰化展示,将裂隙发育、岩层力学性能、地下水运移路径作为观察对象,将光纤光栅、分布式光纤、温度、渗压、应力等作为指标层,可实现煤岩层三维可视化、监测数据定点展现等功能。提出前端(用户界面)和后端(服务器端逻辑)分离的整体技术架构与 Web 技术架构,实现电脑 web 端+手机移动端 APP 实时同步交互和实验管理的

深度参与。

4. 深地工程多场耦合动力灾变物理模拟技术难题与未来攻关方向

袁亮院士曾在文献^[8]中提及仪器研制的 3 大难题,上述的 5 大技术突破是对该问题的有效解答。由于深地多场多相耦合的复杂赋存环境,笔者认为需要从材料多场多相及透明化特性和监测手段多元性的根本问题出发,以期实现地质条件更真和灾害监测更直观,由此笔者提出的具体观点如下:

4.1 深地原位多场多相准则与材料匹配难题

相似材料设计目前仍以力学参数相似为主^[9,10],只能优先满足其中一部分相似关系,难以同步满足渗流、热学和动力相似的复杂条件。首先我们需要探究千米深井煤岩体在“高地应力+高瓦斯+高地温”耦合作用下的原位参数演化规律,厘清不同深度赋存环境下本真参数与岩体物理力学性质差异性规律,建立深部多场多相赋存环境影响的原位岩体力学理论,进而需要构建典型动力灾害的“力-热-流”耦合相似准则^[70],分析渗流力学、热力学、动力学相似准则参数与各物理量相似比之间的耦合关系^[71],在相似材料配置方面,需建立起相似材料配比与关键力学参数之间的定量关系,真正实现不同深度岩层及差异岩层对应不同的多场多相相似材料配比。

4.2 地质透明化相似材料研制及裂隙智能识别难题

在上述研究的基础上,地质相似材料在满足多场多相特性的同时,须实现材料透明化^[72-74]。传统相似模型材料难以直接观察模型内部裂隙萌生、扩展、贯通以及渗流通道形成过程,导致许多灾害机制只能通过外部破坏形态和局部传感器数据间接推断,内部灾变行为透明化表征方法和多尺度裂隙智能识别技术成为亟待解决的难题^[75]。透明相似材料需同步满足煤岩力学强度、瓦斯吸附解吸与渗流特性的相似要求,重点解决采动裂隙萌生扩展、渗流通道演化、突水溃砂路径发育等过程的透明化观测难题,揭示煤与瓦斯共采等工程场景的灾变机制。

团队正在尝试使用熔融石英砂、玻璃砂、环氧树脂等材料研制透明相似材料,但技术仍不成

熟，需要后期进一步探索。在研制过程中提出一种基于多尺度深度学习网络的透明相似材料裂隙识别方法，可以实现三维裂纹的透明化量化表征，可精准识别岩石静载施加、裂隙萌生、失稳破坏等阶段的偏差像素，转化形成偏差像素二值图，并最终自动生成对应的像素偏移量数据图，基于监督学习的卷积神经网络模型，对照片进行标注组成训练集，通过对训练集的深度学习，该模型能够框选出裂隙的轮廓和位置，并并行裂隙占比计算。未来团队将考虑结合上述自研的 3D 模型重构系统进行透明地层的 3D 打印，并致力将裂隙识别技术应用于米级大尺度模型试验中。

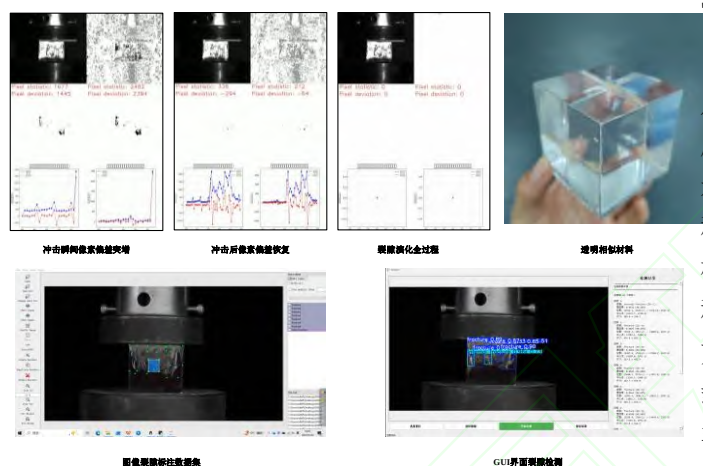


图 17 透明相似材料及裂隙识别

4.3 三维地质可视化探测与多元数据全场融合难题

地下工程物理模拟试验中，监测手段存在一个共性问题：空间识别能力不足。点式传感器只能反映布设位置处的物理量变化，无法完整揭示模型内部三维裂隙网络、灾害演化路径。高速摄像和 DIC 虽然能获得表面变形场，但对模型内部结构的识别仍然有限。声发射、微震可以反映破裂活动，但定位精度、能量解释和裂隙几何形态重建仍存在不确定性。

现阶段三维可视化探测仍存在三方面不足：一是探测结果多停留在异常体识别层面，与裂隙扩展、渗流通道形成和围岩破坏机制之间的定量关系尚不清晰；二是单一探测方法存在多解性，例如电阻率异常可能同时受含水率、裂隙率、材料密度和边界效应影响；三是探测技术与加载、开挖、渗流和破坏过程耦合不足，难以实现灾害过程的实时动态成像。

未来应推动三维地质可视化探测与透明化相似材料、多源监测、数字孪生和智能反演深度融

合[57,76,77,78,79]。构建适配冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害的三维可视化探测与数据融合体系，实现应力集中区、裂隙发育带、瓦斯富集区的空间定位与动态追踪。可利用透明材料、3D 打印裂隙网络和荧光示踪建立真实可见的三维裂隙形态与流体渗流路径，用于校正电阻率、雷达、声波和微震等反演结果；构建电阻率 CT、探地雷达、三维扫描、光纤传感等监测的多源融合体系，实现模型内部结构、外部变形和流体运移的同步识别。最终，三维地质可视化探测应从静态成像发展为动态灾害过程成像。

5. 结论

(1) 深地工程物理模型试验仪器经历了由小尺度机理试验向中尺度灾害过程模拟、再向大尺度工程系统重构的发展过程，小尺度模型主要揭示机制问题，中尺度模型连接基础机制与灾害过程，大尺度模型则实现完整过程模拟。不同尺度模型不是替代关系，而是构成了由参数识别、过程验证到工程系统重构的多尺度研究体系；加载方式由单一静载向动静载耦合和多应变率扰动加载发展，由单向、双向加载向三轴加载和真三维非均布加载发展，使物理模型能够更接近深部地下工程应力环境；物理场模拟已由单一应力场逐步发展为多场耦合环境重构，物理模拟仪器已由单纯加载装置转变为深地灾害环境重构平台。

(2) 监测技术的发展推动物理模拟试验由宏观现象复现向灾变过程定量识别转变。传统监测主要依赖外部破坏形态、裂纹观察和点式传感，难以完整揭示模型内部灾害演化过程。近年来，声发射、微震、红外热成像、三维激光扫描、工业内窥镜、探地雷达、电阻率成像和分布式光纤等技术的引入，使应力场、变形场、裂隙场、渗流场、温度场和动力响应场能够被同步识别。未来监测系统应进一步向多源融合、实时反演和数字孪生反馈方向发展。

(3) 当前物理模拟技术仍存在多场多相相似材料体系不完善、深部边界能量环境模拟不足、复杂地质结构三维重构能力有限、模型内部灾变过程透明化程度低、多源监测数据融合解释不足等关键问题。团队提出深地深地多场耦合环境原位赋存模拟技术、复杂地层 3D 相似原性重构、多应变率动静组合加载、气液耦合保压加载与动态密封、多物理量多元信息来联合监测等 5 大关键技术，推动地下工程物理模拟由灾害现象再现向

深地原态环境重构和灾变机制定量揭示发展。

(4) 地下工程物理模拟试验未来存在两大技术难点, 即多场多相透明相似材料研制和三维地质可视化探测技术。建立起“真实环境重构、复杂结构可控、多场多相耦合、内部灾变透明、多源数据融合”的发展方向。通过物理模拟试验、数值模拟、现场监测和数字孪生的协同发展, 为深部煤炭安全开采、地下空间开发、隧道工程建设和地下能源储备灾害防控提供更加可靠的实验基础与理论支撑。

参考文献

- [1] 袁亮, 张通, 吕鑫, 等. 煤与共伴生能源矿产无人值守智能化开采研究[J]. 煤炭学报, 2026, 51(1): 43-59.
YUAN Liang, ZHANG Tong, LYU Xin, et al. Research on unmanned intelligent collaborative mining of coal and co-associated energy minerals[J]. Journal of China Coal Society, 2026, 51(1): 43-59.
- [2] 王双明, 孙强, 郭晨, 等. 新质生产力赋能煤炭地质工作发展[J]. 中国煤炭, 2025, 51(10): 1-16.
WANG Shuangming, SUN Qiang, GUO Chen, et al. The development of coal geology work empowered by new quality productive forces[J]. China Coal, 2025, 51(10): 1-16.
- [3] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1409-1417.
HE Manchao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1409-1417.
- [4] SONG J H, WANG H P, WANG W, et al. Theory, application and prospect of full-life-cycle operation and maintenance technique system in coal underground water reservoir[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2026, 173: 107623.
- [5] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on Rock Mechanics in Deep Mining Engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(16): 2803-2813.
- [6] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤炭动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825-1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825-1845.
- [7] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725.
- [8] 袁亮, 汤皓朋, 马衍坤, 等. 我国煤炭动力灾害模拟试验仪器研制现状与关键难题[J]. 煤田地质与勘探, 2026: 1-19.
YUAN Liang, TANG Haopeng, MA Yankun, et al. Current status of development and key challenges of coal and rock dynamic disaster simulation test instruments in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2026: 1-19.
- [9] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(9): 1842-1847.
WANG Hanpeng, LI Shucai, ZHANG Qiangyong, et al. Development of A New Geomechanical Similar Material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(9): 1842-1847.
- [10] 李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128-1137.
LI Shucai, ZHOU Yi, LI Liping, et al. Development and Application of A New Similar Material for Underground Engineering Fluid-Solid Coupling Model Test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1128-1137.
- [11] 李利平, 贾超, 孙子正, 等. 深部重大工程灾害监测与防控技术研究现状及发展趋势[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2539.
LI Liping, JIA Chao, SUN Zizheng, et al. Research status and development trend of major engineering disaster prevention and control technology in deep underground[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2539.
- [12] 许迎年, 徐文胜, 王元汉, 等. 岩爆模拟试验及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1462-1466.
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): 1462-1466.
- [13] ZHOU X, ZHANG D, NOWAMOOZ H, 等. Investigation on damage and failure mechanisms of roadway surrounding rock triggered by dynamic-static combined loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(9): 5639-5657.
- [14] 付金伟, 朱维申, 张新中, 等. 内水压下含中空裂隙新材料的压裂试验及数值模拟研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(4): 78-85.
FU Jinwei, ZHU Weishen, ZHANG Xinzong, et al. Fracturing Experiment and Numerical Simulation Study on New Material Containing a Hollow Internal Crack Under Internal Water Pressure[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(4): 78-85.
- [15] 王同涛, 杨春和, 廖友强, 等. 大型盐穴储能库地质力学物理模拟实验装置研制与应用[J]. 石油学报, 2026, 47(1): 268-278.
WANG Tongtao, YANG Chunhe, LIAO Youqiang, et al. Development and application of a geomechanical physical modeling experimental device for large-scale salt cavern energy storages[J]. Acta Petrolei Sinica, 2026, 47(1): 268-278.
- [16] 张超林, 王恩元, 王奕博, 等. 多功能煤与瓦斯突出模拟试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 995-1007.
ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, WANG Yibo, et al. Development and application of multi-functional test system for coal and gas outburst simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(5): 995-1007.
- [17] 王汉鹏, 李建中, 冉莉娜, 等. 盐穴造腔模拟与形态控制试验装置研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(5): 921-928.

- WANG Hanpeng, LI Jianzhong, RAN Lina, et al. Testing Device Development for Cavern Simulation and Morphology Control in Salt Rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(5): 921-928.
- [18] 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(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(1): 57-62.
- [19] 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.
- [20] 冯晓巍, 汪明坤, 薛飞, 等. 内置等强缩尺 3D 打印支护系统的矿山相似物理模拟试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 232-243,256.
- FENG Xiaowei, WANG Mingkun, XUE Fei, et al. Investigation on mine physical simulation model embedded with iso-strength scaled 3D printed support system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(2): 232-243,256.
- [21] 许慧聪, 来兴平, 单鹏飞, 等. 深部煤岩动力灾害多场耦合试验系统研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(4): 926-939.
- XU Huicong, LAI Xingping, SHAN Pengfei, et al. Development and application of multi-field coupling test system for deep coal-rock dynamic disaster[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(4): 926-939.
- [22] 聂百胜, 马延崑, 孟筠青, 等. 中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟装置研制与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1218-1225.
- NIE Baisheng, MA Yankun, MENG Junqing, et al. Middle scale simulation system of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1218-1225.
- [23] 刘永茜, 霍中刚, 李宏艳, 等. 一种新型煤与瓦斯突出物理模拟系统研制与应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(z1): 327-339.
- LIU Yongqian, HUO Zhonggang, LI Hongyan, et al. Development and application of a new physical simulation system for coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(z1): 327-339.
- [24] 许江, 陶云奇, 尹光志, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验台的改进及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1804-1809.
- XU Jiang, TAO Yunqi, YIN Guangzhi, et al. Amelioration and application of coal and gas outburst simulation experiment device[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1804-1809.
- [25] 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试验研究[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.
- [26] 袁亮, 王伟, 王汉鹏, 等. 巷道掘进揭煤诱导煤与瓦斯突出模拟试验系统[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 205-214.
- YUAN Liang, WANG Wei, WANG Hanpeng, et al. A simulation system for coal and gas outburst induced by coal uncovering in roadway excavation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 205-214.
- [27] 刘爱华, 彭述权, 李夕兵, 等. 深部开采承压突水机制相似物理模型试验系统研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1335-1341.
- LIU Aihua, PENG Shuquan, LI Xibing, et al. Development and application of similar physical model experiment system for water inrush mechanism in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1335-1341.
- [28] 赵启峰, 张农, 韩昌良, 等. 浅埋薄基岩含水层下煤层开采突水溃砂相似模拟实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 444-451.
- ZHAO Qifeng, ZHANG Nong, HAN Changliang, et al. Simulation experiment of water-sand inrush during the mining of the shallow coal seam under roof aquifer with thin bedrock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 444-451.
- [29] YANG L, GAO F Q, LU Z G, et al. Dynamic failure of roadways under dynamic disturbances – a physical modeling study[J]. Results in Engineering, 2025, 28: 108094.
- [30] 杨科, 吴犇牛, 刘钦节, 等. 地下空间储能防渗实验装置研制与初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(1): 43-55.
- YANG Ke, WU Benniu, LIU Qinjie, et al. Development and preliminary application of experimental device for energy storage and seepage prevention in underground space[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(1): 43-55.
- [31] 李元海, 刘德柱, 杨硕. 基于电机双轴加载的中小型隧道物理模拟试验系统研制与应用[J/OL]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1556-1563.
- LI Yuanhai, LIU Dezhu, YANG Shuo. Development and application of physical simulation test system for small and medium-sized tunnels based on biaxial motor loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(8): 1556-1563.
- [32] 彭守建, 许庆峰, 许江, 等. 深部煤岩冲击地压多功能物理模拟试验系统研制与应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11): 4417-4428.
- PENG Shoujian, XU Qiangfeng, XU Jiang, et al. Multifunctional physical simulation test system for deep coal rockburst development and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4417-4428.
- [33] 郭惟嘉, 王海龙, 陈绍杰, 等. 采动覆岩涌水溃砂灾害模拟试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1415-1422.
- GUO Weijia, WANG Hailong, CHEN Shaojie, et al. Development and application of simulation test system for water and sand inrush across overburden fissures due to coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1415-1422.
- [34] 刘东, 许江, 尹光志, 等. 多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 966-975.
- LIU Dong, XU Jiang, YIN Guangzhi, et al. Development and application of multifield coupling testing system for dynamic

- disaster in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 966-975.
- [35] 刘东, 许江, 尹光志, 等. 多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统的研制和应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(z2): 3505-3514.
- LIU Dong, XU Jiang, YIN Guangzhi, et al. Development and application of multi-field coupling test system for coal-bed methane(cbm) exploitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(z2): 3505-3514.
- [36] 康红普, 高富强, 王晓卿, 等. 煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统研制与试验验证[J]. 煤炭学报, 2024, 49(9): 3701-3710.
- KANG Hongpu, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqing, et al. Development and experimental validation of a test system for simulation of fault-slip rockbursts in coal mine roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3701-3710.
- [37] 李术才, 刘钦, 李利平, 等. 隧道施工过程大比尺模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1368-1374.
- LI Shucai, LIU Qin, LI Liping, et al. Development of large-scale geomechanical model test system for tunnel construction and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1368-1374.
- [38] 王琦, 江贝, 辛忠欣, 等. 无煤柱自成巷三维地质力学模型试验系统研制与工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1582-1594.
- WANG Qi, JIANG Bei, XIN Zhongxin, et al. Development of a 3D geomechanical model test system for non-pillar mining with automatically formed roadway and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1582-1594.
- [39] 卢义玉, 彭子烨, 夏彬伟, 等. 深部煤岩工程多功能物理模拟实验系统——煤与瓦斯突出模拟实验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 272-283.
- LU Yiyu, PENG Ziyue, XIA Binwei, et al. Coal and gas outburst multi-functional physical model testing system of deep coal petrography engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 272-283.
- [40] LV H Y, CHENG Z B, LIU L L, et al. Fracture evolution and strata failure mechanisms in ultra-thick coal seams during staged mining: insights from physical and numerical modeling[J]. Engineering Geology, 2026, 366: 108684.
- [41] HE Y F, ZHANG J, YANG T, et al. Study on overburden structure and support load characteristics under concentrated load in shallow coal seam mining across-coal pillar[J]. Results in Engineering, 2025, 27: 106532.
- [42] 高魁, 刘泽功, 刘健. 基于相似模拟和地质力学模型试验的突出装置研制及应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 1-8.
- 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): 1-8.
- [43] 李术才, 李清川, 王汉鹏, 等. 大型真三维煤与瓦斯突出定量物理模拟试验系统研发[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1): 121-129.
- LI Shucai, LI Qingchuan, WANG Hanpeng, et al. A large-scale three-dimensional coal and gas outburst quantitative physical modeling system[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 121-129.
- [44] 李术才, 王德超, 王琦, 等. 深部厚顶煤巷道大型地质力学模型试验系统研制与应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1522-1530.
- LI Shucai, WANG Dechao, WANG Qi, et al. Development and application of large-scale geomechanical model test system for deep thick top coal roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1522-1530.
- [45] 李树刚, 魏宗勇, 林海飞, 等. 煤与瓦斯共采三维大尺度物理模拟实验系统的研制与应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 236-245.
- LI Shugang, WEI Zongyong, LIN Haifei, et al. Research and development of 3D large-scale physical simulation experimental system for coal and gas co-extraction and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 236-245.
- [46] 李术才, 李利平, 李树忱, 等. 地下工程突涌水物理模拟试验系统的研制及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 299-304.
- LI Shucai, LI Liping, LI Shuchen, et al. Development and application of similar physical model test system for water inrush of underground engineering[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 299-304.
- [47] 曹偈, 孙海涛, 戴林超, 等. 煤与瓦斯突出动力效应的模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 113-120,154.
- CAO Jie, SUN Haitao, DAI Linchao, et al. Simulation research on dynamic effect of coal and gas outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 113-120,154.
- [48] 雷文杰, 李绍泉, 商鹏, 等. 微震响应煤与瓦斯突出模拟试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2014(1): 161-166.
- LEI Wenjie, LI Shaoquan, SHANG Peng, et al. Coal and gas outburst simulation experiment reacted by microseismic monitoring[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014(1): 161-166.
- [49] 杨雪林, 文光才, 孙海涛, 等. 煤与瓦斯突出冲击动力效应及致灾特征模拟实验系统研制与应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3731-3749.
- YANG Xuelin, WEN Guangcai, SUN Haitao, et al. Development and application of simulation experimental system for impact dynamic effect and disaster-causing characteristics of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3731-3749.
- [50] 熊自明, 李志浩, 高磊, 等. 爆炸地冲击扰动诱发含结构面围岩破坏模拟试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 827-838.
- XIONG Ziming, LI Zhihao, GAO Lei, et al. Experimental simulation of explosive impact disturbance induced damage of surrounding rock containing structural surfaces[J]. Journal of Tongji University(Natural science), 2023, 51(6): 827-838.
- [51] 邢文彬. 双动载叠加下含瓦斯煤扰动损伤破坏机制与动力致灾模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
- XING Wenbin. Research on the disturbance damage failure mechanism and dynamic disaster simulation of gas-bearing coal

- under double dynamic load superposition[D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [52] 王粟. 热流耦合环境下受冲击扰动媒体损伤-渗流特性与致灾规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
- WANG Su. Research on seepage evolution and damage mechanism of coal subjected to dynamics disturbance under thermal-hydro-mechanical conditions[D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [53] 卢志国, 高富强, 杨磊, 等. 深埋巷道动静载叠加诱冲物理模拟试验系统研制与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(5): 959-970.
- LU Zhiguo, GAO Fuqiang, YANG Lei, et al. Development and application of a novel physical simulation test system for deep coal burst roadway with dynamic-static combined loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(5): 959-970.
- [54] 刘众众. 动静载作用下吸附瓦斯媒体损伤渗流规律与致灾机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- LIU Zhongzhong. Study on damage seepage law and disaster mechanism of gas adsorbed coal under dynamic and static load[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [55] 谭云亮, 郭伟耀, 赵同彬, 等. 深部巷道动静载试验系统研制及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1513-1524.
- TAN Yunliang, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Development and application of a novel deep roadway test system with dynamic-static loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1513-1524.
- [56] 王琦, 蒋振华, 江贝, 等. 深井巷道动力冲击与吸能控制物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(9): 2081-2091.
- WANG Qi, JIANG Zhenhua, JIANG Bei, et al. Physical simulation test research on dynamic impact and energy absorption control in deep roadways of coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(9): 2081-2091.
- [57] ZHANG X K, YUAN Q, JIANG D Y, et al. A fiber-optic monitoring approach for safety assurance of anchor bolt support with application to deep mining roadways[J]. Results in Engineering, 2026, 30: 110225.
- [58] 单仁亮, 黄博, 郑赞, 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 equipment for roadway support subjected to vertical dynamic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 294-302.
- [59] 文光才, 孙海涛, 曹偲, 等. 深井煤岩瓦斯动力灾害模拟实验系统[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 223-231.
- WEN Guangcai, SUN Haitao, CAO Jie, et al. Simulation experiment system of coal and gas dynamic disaster in deep mine and its application in accident analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 223-231.
- [60] 彭守建, 杨文健, 周斌, 等. 真三维应力状态下煤与瓦斯突出过程中瓦斯压力时空演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1762-1772.
- PENG Shoujian, YANG Wenjian, ZHOU Bin, et al. Study on the evolution law of gas pressure in the process of coal and gas outburst under true triaxial stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1762-1772.
- [61] 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): 1202-1210.
- 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): 1202-1210.
- [62] 李利平, 李术才, 赵勇, 等. 超大断面隧道软弱破碎围岩渐进破坏过程三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 551-560.
- LI Liping, LI Shucui, ZHAO Yong, et al. 3D geomechanical model for progressive failure progress of weak broken surrounding rock in super large section tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 551-560.
- [63] 李杨杨, 张士川, 孙熙震, 等. 煤层采动底板突水演变过程可视化试验平台研制与试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3515-3524.
- LI Yangyang, ZHANG Shichua, SUN Xizhen, et al. Development and experimental study on visualization test platform for water inrush evolution process of coal seam mining floor[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3515-3524.
- [64] 朱权洁, 李青松, 李绍泉, 等. 煤与瓦斯突出试验的微震动态响应与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(s2): 3813-3821.
- ZHU Quanjie, LI Qingsong, LI Shaoquan, et al. Microseismic dynamic response and characteristic analysis of coal and gas outburst experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(s2): 3813-3821.
- [65] 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 a large scale 3D roadway rockburst disaster evolution and instability simulation test system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 556-565.
- [66] 王宗可, 蒋力帅, 刘玉磊, 等. 基于 3D 打印的裂隙围岩巷道变形破坏特征物理模拟研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(3): 128-140.
- WANG Zongke, JIANG Lishuai, LIU Yulei, et al. Deformation and failure behavior of fractured rock roadway: physical simulation with 3D printing[J]. Journal of mining and strata control engineering, 2025, 7(3): 128-140.
- [67] 刘新杰, 方杰, 李全生, 等. 大型三维高精度物理模拟试验平台的研发与应用[J]. 煤炭学报, 2025, 50(S2): 1007-1018.
- LIU Xinjie, FANG Jie, LI Quansheng, et al. Development and application of large-scale three-dimensional high-precision physical simulation platform[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(S2): 1007-1018.

- [68] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 隧道含水构造电阻率法超前探测正演模拟与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 246-253.
- LIU Bin, LI Shucui, LI Shuchen, et al. Forward Modeling and Application of Electrical Resistivity Method for Detecting Water-Bearing Structure in Tunnel[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(1): 246-253.
- [69] 刘征宇, 李术才, 刘斌, 等. 用于地铁盾构区间孤石探测的三维电阻率跨孔 CT 方法研究及物理模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2519-2530.
- LIU Zhengyu, LI Shucui, LIU Bin, et al. Boulder detection method based on 3d resistivity cross-hole tomography in metro shield zones and its physical model experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2519-2530.
- [70] 张冰, 王汉鹏, 袁亮, 等. 废弃煤矿压缩空气储能过程力-热-流耦合相似准则建立与分析[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(4): 743-753.
- ZHANG Bing, WANG Hanpeng, YUAN Liang, et al. Establishment and analysis of thermo-hydro-mechanical coupling similarity criteria for compressed air energy storage process in abandoned coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(4): 743-753.
- [71] 阚梓豪, 袁亮, 窦林名, 等. 煤岩动力学相似准则下的相似材料配比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2026, 55(3): 617-635.
- KAN Zihao, YUAN Liang, DOU Linming, et al. Study on the proportioning of similar materials under the dynamic similarity criteria of coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 617-635.
- [72] 李元海, 林志斌. 透明岩体相似物理模拟试验新方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2031-2039.
- LI Yuanhai, LIN Zhibin. Innovative experimental method based on development of transparent rock mass materials for physical tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2031-2039.
- [73] 杜建明, 房倩, 刘翔, 等. 透明土物理模拟试验技术现状与趋势[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 852-861.
- DU Jianming, FANG Qian, LIU Xiang, et al. The present and development trend of physical simulation experiment technology for transparent soils [J]. Science technology and engineering, 2021, 21(3): 852-861.
- [74] 胡南燕, 黄建彬, 罗斌玉, 等. 环氧树脂基脆性透明岩石相似材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3471-3480.
- HU Nanyan, HUANG Jianbin, LUO Binyu, et al. Experimental study on mix proportion of transparent similar materials for rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2023, 44(12): 3471-3480.
- [75] SONG J H, WANG H P, WANG W, et al. Novel graphene oxide-reinforced concrete for artificial dam bodies of underground reservoirs: Dynamic mechanical properties under multiaxial stress[J]. Construction and Building Materials, 2026, 538: 147235.
- [76] ZOU J Q, YUAN Y, YANG W H, et al. Development of intelligent physical model similar materials for high strength rock based on optical fiber testing and reactive powder concrete[J]. Construction and Building Materials, 2026, 506: 144854.
- [77] MEI X, GUO C, LI Z J, et al. A digital twin model for top beam stress monitoring based on multi-source data fusion[J]. Measurement, 2026, 277: 121606.
- [78] DANG Zizheng, ZHANG Bing, WANG Hanpeng, et al. Experimental study of leakage characteristics and microscopic mechanisms in the sealing plug areas of underground compressed air energy storage caverns[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2026, 36: 997-1020.
- [79] 王汉鹏, 武允昊, 张冰, 等. 废弃矿井压缩空气储能技术研究现状与新设计构想[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 29-44.
- WANG Hanpeng, WU Yunhao, ZHANG Bing, et al. Research status and new design concept of compressed air energy storage technology in abandoned mine[J]. Coal Science and Technology, International Journal of Mining Science and Technology, 2025, 53(4): 29-44.