



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: 深地工程动力致灾机理与物理相似模拟研究现状及展望
作者: 袁亮, 窦林名, 南天琦, 康建宏, 曹安业, 鞠明和, 王桂峰, 何江, 王恩元, 华心祝, 马衍坤, 王汉鹏, 阚梓豪, 彭程阳, 李浩丙, 闫晨龙
DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.DE26.0954
网络首发日期: 2026-09-09
引用格式: 袁亮, 窦林名, 南天琦, 康建宏, 曹安业, 鞠明和, 王桂峰, 何江, 王恩元, 华心祝, 马衍坤, 王汉鹏, 阚梓豪, 彭程阳, 李浩丙, 闫晨龙. 深地工程动力致灾机理与物理相似模拟研究现状及展望[J/OL]. 煤炭学报.
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.DE26.0954>



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.DE26.0954

深地工程动力致灾机理与物理相似模拟研究现状及展望

袁亮^{1,2,3}, 窦林名^{4,5,*}, 南天琦^{4,5,*}, 康建宏⁶, 曹安业^{4,5}, 鞠明和⁷, 王桂峰^{4,5}, 何江^{4,5}, 王恩元⁶, 华心祝^{1,2}, 马衍坤⁸,王汉鹏^{9,10}, 阚梓豪^{4,5}, 彭程阳⁶, 李浩丙^{4,5}, 闫晨龙^{4,5}

(1. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽 淮南 232001; 4. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 5. 中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室, 江苏 徐州 221116; 6. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 7. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 8. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 9. 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; 10. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250061)

摘要：随着资源开发持续向深部延伸，煤岩体将处于高地应力、强动力扰动及高压流体协同作用的复杂环境中，冲击地压、岩爆、煤与瓦斯突出及突水等动力灾害呈现出显著的多场耦合致灾特征。物理相似模拟是揭示该类灾害发生机制的重要技术手段，而相似原理及其构成的体系则是保障模拟结果可靠性的理论基础。本文系统梳理深地工程“力-震-流”多场耦合致灾机理，围绕冲击地压、岩爆、煤与瓦斯突出及采掘突水等典型动力灾害，综述其物理模拟研究进展，重点归纳并分析动力学相似准则、多场耦合相似关系及关键控制参数体系，讨论不同相似判据的适用范围及尺度约束。综合分析表明：冲击地压与岩爆模拟应重点约束动载能量、加速度、破坏时间及应变率；煤与瓦斯突出模拟还需考虑吸附解吸、瓦斯渗流、煤体强度劣化、裂隙扩展和气固两相运动；突水模拟则需同时表征固体与流体惯性、黏滞阻力、孔隙压力扩散及裂隙渗透演化。进一步结合已有研究，厘清深部煤岩动力致灾物理模拟由静力学相似向动力学相似、由单场耦合向多场协同演化的发展脉络。针对当前研究中存在的动力学相似理论体系尚不完善、多场耦合统一相似准则缺失以及多功能相似材料协同响应能力不足等关键问题，从多场耦合动力相似理论构建、跨尺度物理模拟方法发展、新型多功能相似材料研发及物理-数值耦合模拟技术融合等方面提出未来的研究方向。综述性研究成果可为深部煤岩动力灾害机理认知及物理模拟试验设计提供系统的研究方法 with 理论支撑。

关键词：深地工程；动力灾害；相似准则；相似材料；物理模型

中图分类号：TD324

Status and prospects on dynamic disaster-causing mechanisms of deep coal and rock and physical similarity simulation

YUAN Liang^{1,2,3}, DOU Linming^{4,5,*}, NAN Tianqi^{4,5,*}, KANG Jianhong⁶, CAO Anye^{4,5}, JU Minghe⁷, WANG Guifeng^{4,5}, HE Jiang^{4,5}, WANG Enyuan⁶,
HUA Xinzhuzhu^{1,2}, MA Yankun⁸, WANG Hanpeng^{9,10}, KAN Zihao^{4,5}, PENG Chengyang⁶, LI Haobing^{4,5}, YAN Chenlong^{4,5}

(1. State Key Laboratory of Deep Coal Mining and Environment Protection, Huainan 232001, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. State Key Laboratory of Digital and Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 4. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 6. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 7. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation & Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 8. Key Laboratory of Safe and Efficient Coal Mining, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 9. State Key Laboratory
基金项目：国家自然科学基金重大科研仪器研制资助项目 National Major Scientific Instruments and Equipments Development Project of National Natural Science Foundation of China (5227901)

作者简介：第一作者：袁亮(1960—)，男，安徽省六安市人，中国工程院院士。E-mail: Yuanl_1960@sina.com。通讯作者：窦林名(1963—)，男，青海省平安县人，教授，博士生导师。E-mail: lmdou@126.com; 南天琦(2001—)，男，安徽省淮北市人，博士研究生。E-mail: tianqi_nan@163.com。

Abstract: As resource extraction extends to greater depths, coal-rock masses are increasingly exposed to complex environments involving high in situ stress, strong dynamic disturbance and high-pressure fluids. Dynamic disasters, including coal bursts, rockbursts, coal and gas outbursts and water inrush, therefore show pronounced multi-field coupled disaster characteristics. Physical similarity modelling is an important method for revealing the mechanisms of such disasters, while similarity principles and their theoretical framework provide the basis for reliable simulation results. This paper systematically reviews the stress-seismic-fluid multi-field coupled disaster mechanisms in deep underground engineering. Focusing on typical dynamic disasters, including coal bursts, rockbursts, coal and gas outbursts and mining-induced water inrush, this review summarizes the progress in physical modelling studies. Particular attention is given to dynamic similarity criteria, multi-field coupled similarity relationships and key control parameters. The applicability and scale constraints of different similarity criteria are also discussed. The synthesis shows that physical modelling of coal bursts and rockbursts should primarily constrain dynamic-load energy, acceleration, failure duration and strain rate. Modelling of coal and gas outbursts should further account for adsorption and desorption, gas seepage, coal strength degradation, fracture propagation and gas-solid two-phase motion. For water inrush, the model should simultaneously represent solid and fluid inertia, viscous resistance, pore pressure diffusion and fracture permeability evolution. Based on previous studies, this review clarifies the development of physical modelling for dynamic disasters in deep coal-rock masses, from static similarity to dynamic similarity and from single-field coupling to multi-field coordinated evolution. In view of unresolved issues, including the incomplete theoretical framework of dynamic similarity, the lack of unified similarity criteria for multi-field coupling and the insufficient coupled response capacity of multifunctional analogue materials, future research directions are proposed. These include the construction of multi-field coupled dynamic similarity theory, the development of cross-scale physical modelling methods, the design of new multifunctional analogue materials and the integration of physical-numerical coupled simulation techniques. This review provides a systematic methodological and theoretical basis for understanding dynamic disaster mechanisms and designing physical modelling tests in deep coal-rock engineering.

Key words: deep underground engineering; dynamic disasters; similarity criteria; similar materials; physical modelling

能源是人类文明发展的基础,浅部能源矿产资源与空间资源将不足以支撑人类物质与能量的飞速发展,深地丰富资源的开发是解决这一急迫问题的必然选择^[1,2]。目前,矿产与岩体资源的开采正以极快的速度向地球深部进军,空间资源的开发以及国家重要建设工程也在大幅向深地迈进,深地已成为维系国民经济发展的命脉^[3]。

进入深部乃至超深部后,工程岩体所处的地质环境发生了根本性改变,其处于典型的“三高一强”的环境中^[4],煤岩体呈现出显著的非线性大变形、强流变性以及多相多场强耦合特征。岩爆、冲击地压、煤与瓦斯突出以及突水等深部煤岩动力灾害发生频率显著上升,其孕灾机制的隐蔽性、突发性和破坏性与浅部地层的表现存在巨大差异^[5,6]。深地工程灾害本质上是煤岩体在应力场、震动场、渗流场等多物理场耦合作用下,能量急剧聚集与瞬态释放的宏观力学显现。

针对深部煤岩动力灾害的形成机制,国内外学者开展了大量理论与实验研究,并逐渐形成了多种具有代表性的解释框架^[7,8]。但由于深地工程条件十分复杂,灾害发生过程往往具有强突发性和高度非线性,仍需进一步探究其孕育与演化机制。

基于相似理论的三维大型物理模拟试验,作为连接理论分析、数值模拟与真实工程现场的核心桥梁,能够真实再现工程灾变演化的全过程^[9-11]。通过科学配比相似材料、精细控制多场边界条件,物理模拟不仅为揭示多场耦合致灾机理提供了不可替代的实证手段,更为深地工程防灾减灾技术的工程应用奠定了坚实基础。然而,与传统围岩稳定性研究不同,深部动力灾害通常涉及瞬时能量释放与动力响应过程,传统以几何相似和静力相似为核心的相似理论难以全面反映动力灾害中的惯性效应、应变率效应及多场耦合效应,所以,构建适用于深部煤岩动力灾害研究的物理模拟相似理论体系成

为当前研究的重要方向。

学者们围绕动力学灾害问题开展了大量物理模拟研究，并在动力学相似准则、多场耦合相似关系以及新型相似材料研发等方面取得了一系列进展^[12-14]。但深部煤岩动力致灾物理模拟的研究仍处于不断发展阶段，现有研究在多场耦合致灾机理、动力相似理论、多相介质相似材料以及大尺度模型试验技术等方面仍存在一定局限。因此，本文聚焦深部煤岩动力致灾物理模拟中的核心问题，深入剖析多场多相耦合致灾机理，系统梳理动力灾害的研究脉络，探讨物理模拟的相似原理、材料与装备研制成果，并展望未来发展方向。

1. 深地工程多场耦合致灾机理

深部煤岩体动力灾害的孕育、演化与突发是多物理场非线性叠加的结果，此过程中包含了煤岩体的静态应力场、工程扰动与微震诱发瞬态动载荷的震动场以及高压瓦斯、地下水等多相介质的渗流场

相互作用与能量交换。在深部开采扰动下，原岩系统的三维应力平衡态被瞬间打破，致使深部煤岩体内部的物理场发生极其剧烈的时空演化。深地工程动力灾害致灾机理可依据致灾类型的不同，分为冲击地压、岩爆、煤与瓦斯突出、突水流固耦合型三大典型致灾类别进行系统综述。

1.1 冲击地压致灾机理研究

冲击地压是煤矿煤层巷道或工作面周围煤岩体内部储存的弹性能在采掘扰动下突然释放，并伴随显著动力显现的灾害现象。对于冲击地压致灾机理的研究始于冲击地压的强度理论、能量理论和刚度理论，并逐步发展出了粘滑失稳机制、能量平衡框架、三准则理论等^[15-17]。随着我国煤炭开采持续向深部推进，冲击地压已逐渐演化为高应力集中、强动载作用和煤矿采场结构多因素耦合破坏的复杂动力灾害问题。深地工程冲击地压致灾机理研究历程如图1所示。

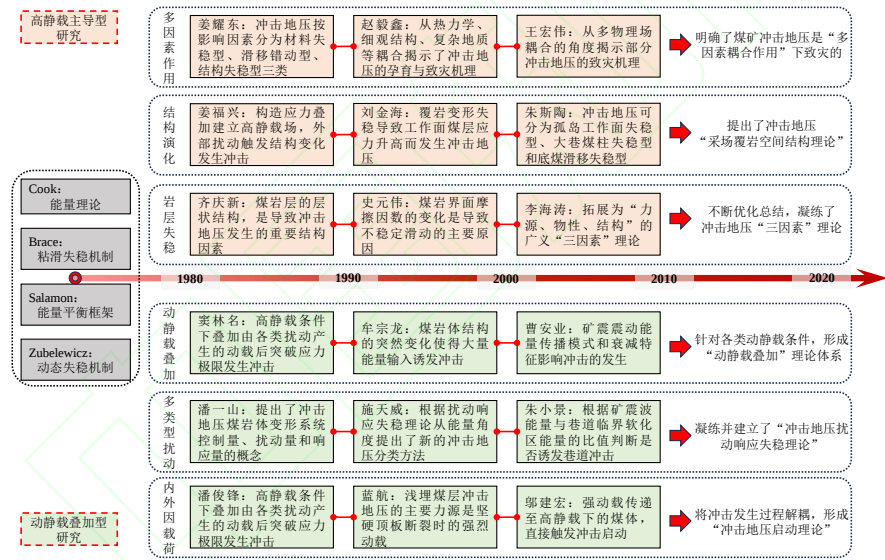


图1 深地工程冲击地压致灾机理研究历程

Fig.1 Research progress in coal burst disaster mechanisms in deep underground engineering

冲击地压的致灾基本条件可以概括为原岩应力、构造应力、支承压力和结构几何约束共同形成的高静载场。并与动载扰动叠加后煤岩系统在这一高静载场中经历强度极限接近、弹性能积聚、局部弱面滑移、塑性区形态突变和整体承载结构退化。当系统越过极限平衡或准极限平衡后，就会发生冲击地压显现。因此，从煤岩层结构、应力场演化、构造区作用等方面研究静载的演化规律，对于揭示冲击地压发生机理至关重要。

不同于岩体，煤体内部具有鲜明的层状结构控制特征，因此大多情况下并非均匀受压破坏，而是

沿弱面、界面和夹层发生瞬时粘滑失稳。由此发展出了冲击地压的“三因素”理论。齐庆新等^[18]认为冲击地压实质为具有冲击倾向性的煤岩结构体在高应力作用下发生变形，局部形成高应力集中并积聚能量，在采动应力扰动下，沿煤岩结构弱面或接触面发生粘滑并释放大量能量的动力现象。在此基础上史元伟^[19]、李海涛^[20]等人进一步研究了煤岩界面与煤岩体结构面导致岩层与结构失稳的作用机制，丰富了冲击地压“三因素”理论的体系并拓宽成为更广义的理论。

另外，采场覆岩空间结构演化使得静载应力场

发生显著变化,进而导致冲击地压的发生。姜福兴^[21,22]系统研究了采场上覆岩层在采动影响下形成的各种典型空间结构,揭示了空间结构变化导致采动应力场剧烈演化产生应力集中,诱发冲击地压。刘金海等^[23]在此基础上,进一步研究确定了覆岩变形失稳对静载应力场演化的巨大影响;后朱斯陶等^[24]将结构演化诱发冲击总结为孤岛工作面失稳型、大巷煤柱失稳型和底煤滑移失稳型三类,逐渐形成了较为完整的冲击地压“采场覆岩空间结构理论”。

研究深地冲击地压致灾机理,需要将基础的应力场与温度场、细观力学等相结合,姜耀东^[25]明确了煤矿冲击地压是多因素耦合作用的结果,并按影响因素将冲击地压分为材料失稳型、滑移错动型和结构失稳型三类。更针对性地从多因素的角度分析,赵毅鑫^[26]研究了热力学、细观结构、复杂地质的耦合作用,揭示了冲击地压的孕育与致灾机理;文献^[16,27]从多物理场耦合的角度进一步的研究了其他类型冲击地压的致灾机理。

高静载为煤岩体提供能量积聚和应力集中条件,使巷道围岩、煤柱、顶板或断层等结构逐渐进入临界失稳状态,而顶板破断、断层活化、矿震扰动、采掘扰动及远场应力波等动载则进一步改变局部应力状态和损伤演化过程,使原本处于极限平衡或准平衡状态的煤岩体突破强度极限,最终发生瞬时破坏、块体弹射和巷道失稳等动力显现。冲击地压致灾机理的根本是高静载孕育与动载触发之间的耦合作用,冲击地压是多源动载与高静载煤岩结构系统共同作用下的动力失稳过程。

动静载叠加诱冲机理认为,冲击地压的发生一般不会对单纯静载的条件下发生,更多的表现为煤岩体在高静载条件下叠加由顶板破断、断层位移、矿震和采掘扰动等产生的动载后突破应力极限而发生冲击地压的过程。窦林名^[15]系统提出了动静载叠加诱冲原理,指出冲击地压由能量条件和应力条件共同约束。能量条件是煤岩体储存的能量与动态扰动所输入的能量之和超过煤岩破坏需要消耗的能量,应力条件是煤矿井巷或工作面周围煤体中的静载荷与矿震形成的动载叠加大于冲击临界载荷,则造成煤体突然、剧烈破坏的冲击矿压动力灾害。对应的表达式为:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU_R}{dt} + \frac{dU_C}{dt} + \frac{dU_S}{dt} > \frac{dU_b}{dt} \quad (1)$$

$$\sigma_j + \sigma_d > \sigma_{b\min}$$

式中: U_R 为围岩中储存的能量; U_C 为煤体中储存的能量; U_S 为矿震输入的能量; U_b 为冲击地

压发生时煤岩体消耗的能量; σ_j 为静载; σ_d 为动载; $\sigma_{b\min}$ 为煤岩破坏需要的最小载荷。

进一步地,文献^[28]揭示了工作面上方巨厚关键层破断诱发工作面冲击地压的机理,并基于矿震关键层特征把巨厚覆岩型矿震细分为远场岩层型、近场岩层型和近场岩组型三类。文献^[29]揭示了急倾斜分段轻放开采冲击地压静载来源于上部采空区覆岩形成的空间结构,动载来源于工作面上方岩层顶板破断产生的应力波动载,两者共同作用导致了冲击地压的发生。除覆岩破断之外,断层和构造活动也是重要的动载源。文献^[30]指出,断层型冲击地压本质上是断层中高静载与断层再激活产生的动载叠加的结果,并区分了由采动准静态应力主导型和由矿震动态应力主导型两种再活化模式。文献^[31]对高构造应力区底板远源震源的研究进一步扩展了动载源的范围,提出高静载是主要力源,而远源动态应力波则会增加局部损伤并促成最终失稳。

冲击地压被证实是煤岩体受剧烈扰动而失稳的结果。由此,潘一山^[32]构建了冲击地压煤岩体变形系统控制量、扰动量和响应量的概念,提出了“冲击地压扰动响应失稳理论”。文献^[33]根据扰动响应失稳理论从能量的角度提出了新的冲击地压分类方法。文献^[34]进一步研究提出了以矿震波能量与巷道临界软化区能量的比值来判断是否诱发巷道冲击的方法。

聚焦于冲击地压致灾内外因载荷,潘俊锋^[35]从冲击启动、能量传递、灾害显现三阶段将煤矿中的载荷分为集中静载荷和集中动载荷两类,并将冲击发生过程解耦,发现冲击是因为高静载与各类扰动产生的动载叠加后突破应力极限,提出了“冲击地压启动理论”^[36]。基于这一理论,文献^[37]表明浅埋煤层冲击地压的主要力源是坚硬顶板断裂时的强烈动载。文献^[38]的研究指出强动载传递至高静载下的煤体,将直接触发冲击启动。

除了对动载源的研究之外,可通过研究应力波对煤岩体的影响来探究应力波作用下冲击地压致灾机理。曹安业^[39]从矿震动载角度出发,研究了矿震能量的传播模式和衰减规律,分析了矿震动载作用下巷道围岩发生冲击破坏的机理,当煤岩系统满足冲击破坏的能量条件和刚度条件时就会发生冲击地压。王恩元^[40]从应力波产生、传播与作用全过程着手,指出坚硬顶板破断和深部煤岩破裂都可释放高能量动态应力波,高静载、高动载应力波或两者耦合均可导致冲击地压。唐杰兵^[41]围绕矿震应力波诱发巷道冲击地压建立了“源-路-体”完整链条,

指出厚硬顶板破断产生强矿震，应力波在不同传播路径中呈现明显频散与衰减差异。

1.2 岩爆致灾机理研究

岩爆致灾机理研究是深刻认识岩爆现象、系统开展深地工程防灾减灾工作的理论基础。然而，由于深部岩体物理力学性质的非均匀性、地质环境的

复杂性及工程扰动的随机性，至今仍未完全揭示岩爆的发生机理。随着高应力岩爆试验的开展与重大工程实践的积累，学术界对岩爆灾害的认知正由浅入深，逐步形成了以强度、能量、刚度及失稳理论为核心的多元理论体系，为解析岩爆物理本质提供了重要的力学判据。深地工程岩爆致灾机理研究历程如图 2 所示。

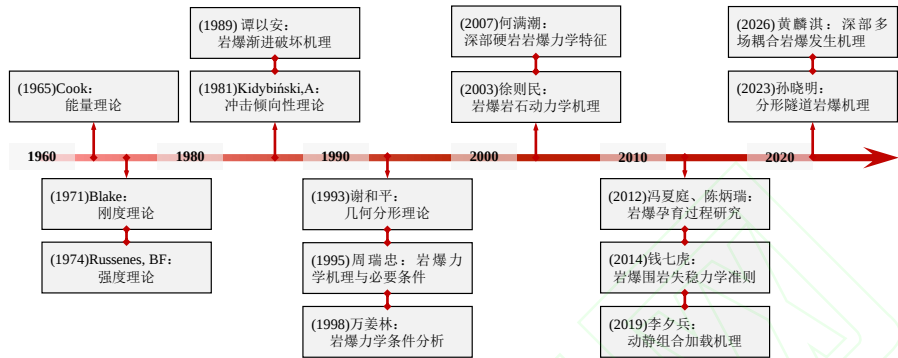


图 2 深地工程岩爆致灾机理研究历程

Fig.2 Research progress in rockburst disaster mechanisms in deep engineering

早期的研究多从静态应力或能量平衡角度出发。Russenes^[42]提出了强度理论，认为地下工程开挖诱发的局部二次应力集中一旦超过岩体强度极限，即会引发爆裂破坏。Cook^[43]基于南非深部矿山的研 究总结出了能量理论，认为当围岩系统平衡被打破且释放的弹性应变能大于岩体破坏耗散能时，将诱发岩爆动力灾害。随着刚性试验机的应用，刚度理论进一步明确，即当矿山结构系统的局部刚度小于岩体破坏阶段的负刚度时，能量将爆发式释放造成岩体失稳。此外，Kidybiński^[44]提出的冲击倾向性理论强调了岩石固有的能量积聚属性，认为能量指数、脆性系数等指标是判别岩爆风险的关键。这些经典理论初步构筑了岩爆评价的基础。

随着非线性科学的应用，谢和平^[45]引入分形几何与突变理论，揭示了微裂缝演化在临界失稳状态下的自相似特征，反映了能量从无序积聚到有序释放的本质。在实验观测方面，何满潮^[46]利用深部岩爆实验系统，提出了能量积聚、弱面释放及工程释放三条定律，阐明了高应力状态与高应力降速率诱发瞬时岩爆的力学特征。文献^[5]进一步统一了岩爆与冲击地压的能量本质，阐明了从稳态积聚到失稳爆发的转换准则。文献^[47-49]系统总结了从应力调整到最终崩落弹射的四个特征阶段孕育过程，为全过程监测提供了依据。

上述理论虽从不同侧面解析了岩爆，但近年来的研究表明高静载与动载荷扰动的耦合作用才是

最主要的致灾诱因。李夕兵^[50]认为深部硬岩岩爆是高静应力与外动力扰动共同作用下的动静组合加载过程，并阐明了动载诱发弹性应变能瞬间释放的动力学机理。文献^[51]也强调，岩爆本质由内部的能量积聚水平与外部的扰动触发能量的共同控制。

然而，即便确立了高静载与动载扰动的核心地位，具体的致灾机理仍存在模糊性。例如，动载应力波如何在预应力岩体中传播并触发失稳，高应力环境下微破裂演化与动载响应的耦合逻辑仍未明确揭示。对岩爆发生机理的尚不明晰导致现有预测预警体系难以应对深部岩爆灾害治理难题。针对这一科学瓶颈，当前研究亟需基于动力学相似理论开展物理相似模拟研究，通过研制满足脆性与能级相似要求的模拟材料，并结合动静组合加载装置，在实验室尺度下高保真地还原高静载与动力扰动耦合的力学场景，并依托应力与声发射监测技术，捕捉动静载叠加下围岩从微裂纹萌生到宏观非线性失稳的全过程，从而进一步深挖岩爆致灾的内在机理。

1.3 煤与瓦斯突出致灾机理研究

深地工程岩体在复杂应力场-渗流场耦合作用下极易发生煤与瓦斯突出等动力灾害。部分统计结果显示^[52,53]，在煤矿开采发生的事故中，煤与瓦斯突出、突水事故的比例高达 56.1%。可见充分研究煤与瓦斯突出作用机制，对于深地工程安全作业与渗流灾害防治具有重要的科学与实践意义。深地工

程煤与瓦斯突出致灾机理研究历程如图 3 所示。

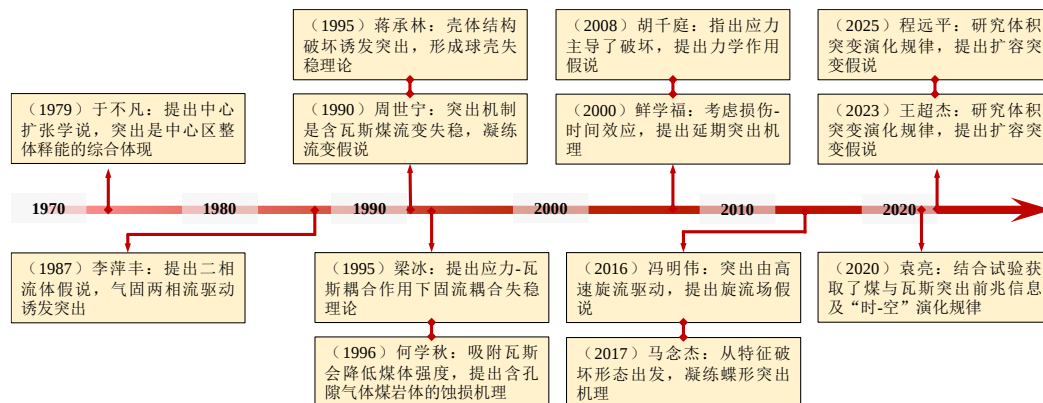


图 3 深地工程煤与瓦斯突出致灾机理研究历程

Fig.3 Research progress in in coal and gas outburst disaster mechanisms in deep engineering

煤与瓦斯突出机理研究是矿山动力灾害领域的核心科学问题。国外早期煤与瓦斯突出机理研究主要以单因素假说为主^[54-56], 代表性观点可归纳为瓦斯作用假说、地应力作用假说及化学本质假说三大类。随着研究的深入, 多因素耦合思想逐渐形成。Soleimani^[57]提出能量假说, 从能量角度阐明了突出的发生条件, 认为煤体变形储能与瓦斯内能协同释放是突出的本质驱动力。Voitenko^[58]系统分析了瓦斯、地应力与煤体强度之间的相互作用关系, 检验了脆性断裂准则在预测地下煤矿压缩负荷下大规模煤气爆发的适用性。

自 20 世纪 70 年代以来, 国内学者围绕突出发生的动力来源、演化过程及控制因素开展了系统探索, 逐步形成了由单一因素解释向多因素耦合、由宏观现象描述向多尺度机制解析演进的发展脉络。于不凡^[59]认为突出能量来源于突出中心区域煤-岩-瓦斯体系的整体释放, 奠定了突出动力来源研究的基础。文献^[60]从流体力学角度将突出过程解释为煤与瓦斯组成的气固两相体系在压力驱动下的膨胀与喷出。周世宁^[61]进一步引入时间效应, 指出含瓦斯煤体在应力与瓦斯耦合作用下发生快速流变失稳。这一阶段的研究以突出动力来源与基本过程解释为主, 但整体仍局限于单一主导因素分析。蒋承林^[62]从结构力学角度揭示了突出过程中煤体破坏的空间演化特征。文献^[63]强调采掘扰动条件下应力场与瓦斯场的相互作用。何学秋等^[64]将岩石力学、表面物理化学和岩石断裂力学结合起来, 指出吸附瓦斯会降低煤体强度, 提出了含孔隙气体煤岩体的蚀损机理。文献^[65]提出突出会延期作用, 从损伤蠕变角度解释突出发生的时间滞后性。

21 世纪后, 煤与瓦斯突出机理研究向非线性与多因素综合发展。胡千庭^[66]强调突出本质上是应力

主导的动力破坏过程。文献^[67]提出了旋流场假说, 认为封闭空间内形成的高速高压瓦斯旋流是突出的重要驱动机制。进一步, 潘一山^[68]尝试从应力、瓦斯及结构演化角度建立综合分析框架。

近年, 煤与瓦斯突出机理研究更加强调了多场耦合与统一描述。文献^[69]提出蝶型突出机理, 从破坏形态角度揭示突出演化特征; 袁亮等^[70]研发了巷道掘进揭煤诱导煤与瓦斯突出模拟试验系统, 获取了煤与瓦斯突出前兆信息及“时-空”演化规律, 揭示了突出机理。文献^[71]将突出过程划分为扩容缓增、快增、突增及骤增等阶段, 强调体积应变突变在失稳中的关键作用。文献^[72]提出了级联破裂假说, 为解释突出的突发性和灾变放大效应提供了新的理论框架。文献^[73]系统研究了处于复杂地应力条件下煤岩组合体在瓦斯作用下的致灾过程, 阐明了应力主导型煤与瓦斯突出的孕育机制并提出了能量判据。

1.4 突水致灾机理研究

深地工程煤岩体突水的液固耦合叠加致灾机理极其复杂, 早期针对此类灾害的机理揭示多依赖于宏观静力学与几何边界经验评价, 例如长期指导我国煤矿防治水的“突水系数法”^[74]及下三带理论等^[75]。但随着深地工程赋存环境复杂化, 以尹尚先^[74]、武强^[76]等为代表的学者指出, 传统的静态连续均质介质假设已无法准确刻画强采动卸荷与承压水导升双重作用下的岩体动态劣化特征。为此, 现代致灾机理研究逐渐向微细观断裂力学与有效应力理论延伸, 研究孔隙水压力对岩体的动态削弱机制, 以及高渗透压下裂隙萌生、扩展至宏观水流通道的损伤演化规律。深地工程突水致灾机理研究历程如图 4 所示。

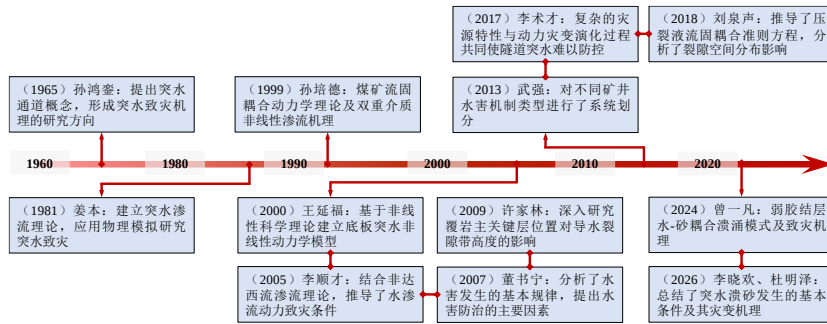


图4 深地工程突水致灾机理研究历程

Fig.4 Research progress in water intrusion disaster mechanisms in deep engineering

在隧道工程及水利水电工程领域，突水突泥是一个明显的流固耦合作用下的复杂灾变。李利平^[77]总结了隧道突水的力学特征与演化规律，结合断裂力学、弹塑性力学等理论推导得到了隧道突水的灾变力学机理。李术才^[78]梳理了隧道突水的概念与构成，总结了突水灾害的力学判据与致灾机理，研究表明复杂的灾源特性与动力灾变演化过程共同使隧道突水难以防控。文献^[79]研究了处于饱和土壤中的地下结构对震动的响应特性，推导了流固耦合动力学控制方程与模拟力学模型。文献^[80]结合了断层诱发震动与流固耦合两种机制，总结了不同水位下的流固耦合动力学响应机理。

在煤岩体开发领域，流固耦合致灾模式表现出显著的多源介质与非饱和渗流特征。李顺才^[81]综合了多孔介质有效应力原理、非达西流渗流运动理论，推导得到了流固耦合作用下的水渗流动力灾害致灾条件。针对底板突水，郭方旭^[82]的研究表明，采掘扰动使岩体在经历加载与卸载交替过程中产生了损伤扩容，导致渗透系数发生数量级跃变。文献^[83]基于CT与三维重建技术，说明了岩体的孔隙结构是影响裂隙渗流特性的主要影响因素。刘泉声^[84]以西南地区页岩气储层作为研究背景，使用推导的压裂液流固耦合准则方程数值模拟了三维水力压裂，提出了高水压下岩体中流固耦合破裂机理。文献^[85]根据组合梁理论修正了传统的离层判据，并推导了导水裂隙带上方离层水危害的判别式。文献^[86]指出工作面覆岩离层上部岩层破断时产生的动载会导致导水裂隙带向上发展，继而造成顶板异常突水。文献^[87]对岩石相似材料进行水力压裂试验，分析了突水的致灾机制。文献^[88]研究了煤层突水中的渗流-应力-损伤耦合的致灾机制与演变机理，建立了三者耦合作用的理论模型。

可以看出，针对流固耦合型动力学致灾机理的研究，在从单因素假说、宏观现象描述、静态评价向多场耦合、多尺度机制解析、动态演化模拟不断

强化。然而，对于流固耦合动力学的灾变全过程研究还不充分，亟需在多场耦合机理等关键科学问题上实现突破，提出系统的多场多相耦合动力学致灾机理。

2. 深地工程动力致灾相似理论研究现状

2.1 冲击地压与岩爆

目前冲击地压和岩爆领域研究使用的静力学相似准则是由数学、力学、土木工程和采矿工程学科共同发展而来。在物理场中，当系统仅承受静载荷且材料呈现出线性弹性特征时，弹性力学相似与静力学相似具有等效性，通过方程计算可得到静力学相似准则，静力学相似准则如下式所示：

$$\begin{cases} C_\varepsilon = 1 \\ C_t = \sqrt{C_l} \\ C_E = C_\sigma = C_\rho C_l \end{cases} \quad (2)$$

式中： C_ε 为应变相似比； C_σ 为应力相似比； C_l 为几何长度相似比； C_E 为弹性模量相似比； C_ρ 为密度相似比。

在冲击地压和岩爆物理模拟领域中，早期研究多沿用上述静力学相似准则，通过设定几何相似比和密度相似比确定模型材料的强度、弹性模量和应力水平，并在此基础上施加采掘扰动、冲击加载或快速卸载，以模拟深部煤岩体冲击破坏过程。

由此建立的静力学相似准则能够保证模型与原型在静载条件下的应力-应变关系相似，但冲击地压和岩爆是动静载叠加作用下发生的动力灾害，灾害发生过程还受到动载的扰动影响，因此相似理论必须引入动力学参数。已有的研究中，文献^[89]基于密度、重力和体积推导了用炸药施加动载时，爆炸能量的动力学相似准则；文献^[90]根据量纲分析推导出能量相似比，计算出断层活化作用下的动载能量并进行了断层冲击地压物理模拟实验；文献^[91]推导

出了动力学能量相似比,并计算出了物理模拟时大能量事件的临界值。煤岩基础相似准则整理总结为表 1。

而从静力学相似准则出发,引入某些动力参数得到的相似定理,始终无法准确再现真实动力学灾害的全过程。鞠明和等^[92]通过数值模拟表明,煤岩体模型的弹性模量和强度会随几何相似比的增大而降低,脆性与冲击倾向性减弱,表明静力学相似理论指导下的相似材料无法还原出原型的动态冲击破坏特征。因此,亟需研究出符合煤岩体实际破坏动力特征的动力学相似准则,为冲击地压和岩爆的物理模拟实验提供理论依据。

表 1 煤岩基础相似准则

Table 1 Basic similarity criteria for coal and rock

物理量	参数	表达式
几何相似比	C_L	$C_L = \frac{L_p}{L_m}$
面积相似比	C_A	$C_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{(L_1 \cdot L_2)_p}{(L_1 \cdot L_2)_m}$
体积相似比	C_V	$C_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{(L_1 \cdot L_2 \cdot L_3)_p}{(L_1 \cdot L_2 \cdot L_3)_m}$
应变相似比	C_ε	$C_\varepsilon = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m} = 1$
时间相似比	C_t	$C_t = \frac{t_p}{t_m} = \frac{C_L}{C_v} = \frac{C_L}{C_a \cdot C_t} = \frac{C_L}{C_t} = \sqrt{C_L}$
速度相似比	C_v	$C_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{C_L}{C_t} = \sqrt{C_L}$
加速度相似比	C_a	$C_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{g}{g} = 1$
密度相似比	C_ρ	$C_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_m}$
质量相似比	C_m	$C_m = \frac{m_p}{m_m} = C_\rho C_v = C_\rho C_L^3$
应力相似比	C_σ	$C_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{C_F}{C_A} = C_\rho C_L$
压力相似比	C_P	$C_P = \frac{P_p}{P_m} = \frac{C_F}{C_A} = C_\rho C_L$
弹性模量相似比	C_E	$C_E = \frac{E_p}{E_m} = \frac{C_\sigma}{C_\varepsilon} = C_\rho C_L$
粘聚力相似比	C_c	$C_c = \frac{c_p}{c_m} = C_\sigma = C_\rho C_L$
内摩擦角相似比	C_ϕ	$C_\phi = \frac{\phi_p}{\phi_m} = 1$
泊松比相似比	C_ν	$C_\nu = \frac{\nu_p}{\nu_m} = 1$
爆破能量相似比	C_{BE}	$C_{BE} = \sqrt[3]{\frac{W_M}{W_H}} = \sqrt[3]{\frac{Q_M}{Q_H}}$
断层能量相似比	C_{FE}	$C_{FE} = C_L^4 C_\rho$
破坏能量相似比	C_{DE}	$C_{DE} = \frac{C_L^2 C_\rho^2}{C_E}$

表中: W_H 、 W_M 和 Q_H 、 Q_M 分别代表原型和模型的炸药的消耗量和爆炸产生的能量。

2.2 煤与瓦斯突出

煤与瓦斯突出涉及多过程、多因素、多物理场及其相互耦合,当前仍难以建立能全面描述其发生过程的数学模型,因此难以严格遵循相似准则,往往考虑致灾关键要素从而简化模型。目前对于煤与瓦斯突出的相似模拟研究主要考虑了几何相似和动力相似,即部分相似。

20 世纪 80 年代,谈庆明^[93]提出了破裂波理论,近似把煤看成刚脆性材料,而把弹性波的波速看成无限大,从而推导出对应相似参数。蔡成功^[94]指出煤体在突出破坏前可近似认为是线弹性体,使用方程分析法推导得到了相似指标。文献^[95]根据方程分析法和量纲分析法,认为突出模拟试验中应力和瓦斯压力的相似常数相同。文献^[96]在模拟特定煤层埋深条件时,给出了几何相似常数和应力相似常数的建议值。文献^[97]在模拟不同埋深煤层条件时,给出了几何相似常数和应力相似常数的取值范围。张庆贺等^[98]从力学和能量两个角度分别推导了煤与瓦斯突出全过程物理模拟的相似准则,解释了突出模型试验中为什么会地应力折减、瓦斯压力不折减,为后续物理模拟试验提供了指导。煤与瓦斯突出的全过程物理相似模拟理论主要总结为表 2 的一系列相似准则。

表 2 煤与瓦斯突出全过程物理模拟的相似准则

Table 2 Similarity criteria for the physical simulation of the entire process of coal and gas outburst

学者	相似准则	分析方法
蔡成功 ^[94]	$C_\sigma = C_l C_\rho = C_\varepsilon C_E; C_s = C_\varepsilon C_l; C_v = 1$	相似转换
陈永超 ^[99]	$C_g C_l = C_\sigma^2; C_v = C_\varepsilon; C_\rho C_v C_l = C_\mu$	相似转换
张春华 ^[100]	$C_t = C_l^{1/2}; C_\sigma = C_l C_\rho$	相似转换
郭品坤 ^[101]	$C_t = C_l^{1/2}; C_\sigma = C_l C_\rho$	相似转换
张淑同 ^[102]	$C_\sigma = C_E = C_c = C_l;$ $C_p = C_\gamma = C_n = C_\eta = C_\mu = C_\phi = C_p = C_a = C_b = 1$	量纲分析
康向涛 ^[103]	$C_\sigma = C_l C_\rho = C_\varepsilon C_E; C_s = C_\varepsilon C_l; C_v = 1$	相似转换
张庆贺 ^[98]	$C_\sigma = C_c = C_l; C_p = C_\gamma = C_n = C_\eta = C_\mu = C_\phi = 1; C_E = C_\sigma^2$	量纲分析与方程分析
黄志安 ^[104]	$C_\sigma = C_l C_\rho = C_E; C_p = 1$	方程分析

2.3 采掘扰动突水

当岩土工程问题进一步涉及到孔隙流体的流动时,液固耦合相似理论需要额外引入渗流相似的要求。其核心目标是确保模型中的渗流场能够复现原型中的情况。

李利平和李术才等^[77]从均匀连续介质渗流方程出发,考虑了岩体破裂后引起渗透性的演变及其对力学性能的影响,推导了适用于岩溶隧道突水的固流耦合相似理论。部分研究^[78,105]表明,通过连续介质流固耦合模型推导得到的以渗透系数、渗流量

等为代表的渗流相似理论，是固液耦合相似模拟研究的理论基础。文献^[106]综合均匀连续体流固耦合的渗流方程、有效应力方程和平衡方程，在消除应力和变形分量后，得到了适用于研究含水地层岩石力学特性的相似理论关系。文献^[107]使用弗劳德准则、谢才公式、曼宁公式等，推导了流速、流量和压强等物理量的相似关系，得到了固液耦合模型试验相似理论。文献^[108]总结了固液耦合传统相似理论，并将静力学渗流参数拓宽到处于动静载叠加条件下的动力学方程，构筑了突水动力灾害物理相似模拟理论体系。文献^[109]从有限相似理论出发推导了冲击载荷响应相似方程，并建立了全尺度模型、试验模型、反向试验模型和全尺度模型的缩尺映射模型。

为了在实践中满足这些渗流相关的相似要求，必须对模型材料的渗透属性和所用流体的物理性质进行精心的选择和配比。这包括了对渗透率、储水率等多孔介质固有属性的相似要求，以及对流体密度和动力粘度的考量。传统渗流相似理论总结为表 3。

表 3 传统渗流相似理论体系

Table 3 Traditional seepage similarity theory system

物理量	比尺	量纲	相似关系
水头相似比尺	C_h	L	$C_h = \frac{h_{\text{原型}}}{h_{\text{模型}}}$
水力坡度相似比尺	C_i	1	$C_i = \frac{i_{\text{原型}}}{i_{\text{模型}}} = 1$
渗流速度相似比尺	C_v	LT^{-1}	$C_v = \frac{v_{\text{原型}}}{v_{\text{模型}}} = \frac{C_L}{C_t}$
流量相似比尺	C_Q	L^3T^{-1}	$C_Q = \frac{Q_{\text{原型}}}{Q_{\text{模型}}} = C_A C_v = \frac{C_L^3}{C_t}$
流体密度相似比尺	C_ρ	ML^{-3}	$C_\rho = \frac{\rho_{\text{原型}}}{\rho_{\text{模型}}}$
动力粘度相似比尺	C_μ	$ML^{-1}T^{-1}$	$C_\mu = \frac{\mu_{\text{原型}}}{\mu_{\text{模型}}} = \frac{C_t}{C_v} = \frac{C_m C_L^{-1} C_t^{-2}}{C_t C_t^{-1} C_L^{-1}} = C_m C_L^{-1} C_t^{-1}$
运动粘度相似比尺	C_ν	L^2T^{-1}	$C_\nu = \frac{\nu_{\text{原型}}}{\nu_{\text{模型}}} = \frac{C_\mu}{C_\rho} = C_m C_L^{-1} C_t^{-1} C_\rho^{-1}$
渗透系数相似比尺	C_K	LT^{-1}	$C_K = \frac{R_{\text{原型}}}{R_{\text{模型}}} = \frac{C_v}{C_i} = C_L C_t^{-1}$
渗透率相似比尺	C_k	L^2	$C_k = \frac{k_{\text{原型}}}{k_{\text{模型}}} = \frac{C_K C_\mu}{C_\rho C_g} = \frac{C_L C_t^{-1} C_m C_L^{-1} C_t^{-1}}{C_\rho \cdot 1} = C_m C_\rho^{-1} C_t^{-2}$
导水系数相似比尺	C_T	L^2T^{-1}	$C_T = \frac{T_{\text{原型}}}{T_{\text{模型}}} = C_K C_L = C_L^2 C_t^{-1}$
孔隙度相似比尺	C_ϕ	1	$C_\phi = \frac{\phi_{\text{原型}}}{\phi_{\text{模型}}} = 1$

压缩系数相似比尺	C_β	$M^{-1}LT^2$	$C_\beta = \frac{\beta_{\text{原型}}}{\beta_{\text{模型}}} = \frac{C_{\Delta e}}{C_\sigma} = C_m^{-1} C_L C_t^2$
固结系数相似比尺	C_c	L^2T^{-1}	$C_{cc} = \frac{cc_{\text{原型}}}{cc_{\text{模型}}} = \frac{C_K}{C_m C_\gamma} = \frac{C_L C_t^{-1}}{C_\rho C_L^3}$
储水率相似比尺	C_S	1	$C_S = \frac{S_{\text{原型}}}{S_{\text{模型}}} = 1$
给水度相似比尺	$C_{\mu s}$	1	$C_{\mu s} = \frac{\mu s_{\text{原型}}}{\mu s_{\text{模型}}} = 1$
Biot 系数相似比尺	C_α	1	$C_\alpha = \frac{\alpha_{\text{原型}}}{\alpha_{\text{模型}}} = 1$

当然，相似模拟试验的成功进行离不开可靠的相似材料。袁亮^[110]系统综述了灾变地层模拟材料的发展历程，包括冲击地压、岩爆、软岩大变形等灾害相似材料的发展研制历程，指出了单项和多项煤岩动力灾害目前相似材料的研究现状及不足之处，以及物理模型构建方面目前的发展方向及难点。同时，相似材料的研制需要有相似理论体系的合理约束。

3. 深地工程动力致灾物理相似模拟研究成果

3.1 深地工程气-固-液耦合致灾机理

深部煤岩体在原岩应力长期作用下处于高应力静载状态，内部裂隙闭合、结构致密并储存大量弹性能量；当采掘扰动、断层滑移或矿震活动产生的动态载荷叠加于静载应力场时，将导致局部区域应力瞬时集中与快速重分布，从而显著降低煤岩体稳定性并诱发动力失稳。在此过程中，瓦斯与水作为典型流体介质，通过渗流-应力耦合作用进一步改变煤岩体的力学响应特征。因此，煤岩气-固-液体系的动力致灾过程，本质上是动静载叠加条件下多场多相耦合作用驱动的非线性能量失稳过程。凝练出的动静载叠加原理如图 5 所示。

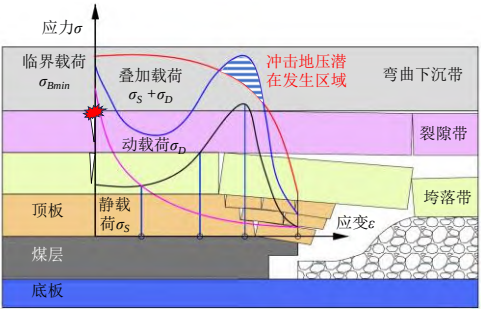


图 5 动静载叠加原理^[115]

Fig.5 Principle of superposition of dynamic and static loads

从致灾判据角度分析，煤岩气-固-液耦合系统的失稳演化主要受能量条件与应力条件的协同控

制。其本质可归结为应力扰动驱动下多源能量协同释放过程。其中，应力条件主要体现为动静载叠加作用下的等效应力状态，当局部应力超过煤岩体强度极限或达到结构失稳判据时，系统进入破坏临界状态。而能量条件则反映了煤岩体及流体系统中能量积聚与释放的能力。当系统内储存的弹性能、瓦斯膨胀能及水力势能超过一定阈值时，将驱动煤岩体发生快速破坏并释放能量，形成冲击地压、煤与瓦斯突出或突水等动力灾害。为比较不同灾害的共同约束，本文在已有应力与能量判据基础上，将煤岩气-固-液耦合系统的失稳条件概括为式（3）。

$$\begin{cases} \text{应力条件: } \sigma_s + \sigma_d + \sigma_g + \sigma_w \geq [\sigma] \\ \text{能量条件: } \frac{\partial U_r}{\partial t} + \frac{\partial U_d}{\partial t} + \frac{\partial U_g}{\partial t} + \frac{\partial U_w}{\partial t} \geq \frac{\partial U_p}{\partial t} \end{cases} \quad (3)$$

式中： σ_s 为固体赋存环境静载； σ_d 为工程扰

$$\begin{cases} \text{应力作用: } \sigma_s = f(\sigma_g, \sigma_w, T) \quad \varepsilon = \frac{1}{2G} \left(\boldsymbol{\sigma} - \frac{\nu}{1+\nu} \text{tr} \boldsymbol{\sigma} \right) + \frac{\alpha}{3K} p \mathbf{I} + \alpha_T \Delta T \mathbf{I} \\ \text{渗流作用: } \sigma_g = f(\sigma_s, \sigma_w, T) \quad Q_f = \frac{\partial(\varphi \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_f \left[-\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho_f g) \right] + \rho_f \alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \\ \text{温度作用: } \sigma_w = f(\sigma_s, \sigma_g, T) \quad Q_h = \left[(1-\varphi) \rho_s H_{p,s} + \varphi \rho_f H_{p,f} \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f H_{p,f} \mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} \end{cases} \quad (4)$$

式中： T 为温度； ε 为应变； G 为剪切模量， $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量； ν 为泊松比； $\text{tr} \boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量的迹； α 为 Biot 系数； K 为体积模量； p 为孔隙压力； α_T 为热膨胀系数； ΔT 为温度变化量； $p \mathbf{I}$ 表示各向同性孔隙压力； $\Delta T \mathbf{I}$ 表示均匀热膨胀效应； Q_f 为源汇项； φ 为孔隙度； ρ_f 为流体密度； k 为渗透率； μ 为流体粘度； ∇p 为压力梯度； g 为重力； ε_v 为体积应变； Q_h 为热源汇项； ρ_s 为固体骨架密度； $H_{p,s}$ 为固体比热容； $H_{p,s}$ 为流体比热容； $\mathbf{v}$ 为流体速度； $\nabla \cdot \mathbf{q}$ 为热量散度。

进一步看，在不同主导因素控制下，煤岩气-固-液耦合致灾过程可表现出不同的演化路径，不同致灾模式在表现形式上存在一定的差异。当高地应力主导时，表现为弹性能量主控型失稳；当动态扰动占主导时，体现为应力波触发型失稳；在高瓦斯或高水压条件下，呈现出流体能量参与驱动的耦合失稳模式。如式（5）、（6）所示。

动动载； σ_g 为气体赋存环境静载； σ_w 为液体赋存环境静载； $[\sigma]$ 为诱发工程动力灾害的临界载荷；

$\frac{\partial U_r}{\partial t}$ 为固体应变能释放率； $\frac{\partial U_d}{\partial t}$ 为动载扰动能量释放率； $\frac{\partial U_g}{\partial t}$ 为气体应变能释放率； $\frac{\partial U_w}{\partial t}$ 为液体应变能释放率。 $\frac{\partial U_p}{\partial t}$ 为煤岩体破裂过程中的能量消耗率。

深部地层应力环境是非线性行为，是多相多场耦合关联作用的结果。在应力场、渗流场、温度场三场耦合作用下，动静载荷、气体压力、液体压力以及温度是深部地层煤岩体致灾的主要参数。因此进一步综合应力场、渗流场和温度场的常用控制关系，总结了三场对应的参量作用效应公式：

$$\begin{cases} \text{冲击岩爆: } \sigma_s + \sigma_d \gg \sigma_g + \sigma_w \\ \text{煤层突出: } \sigma_s + \sigma_g \gg \sigma_d + \sigma_w \\ \text{采场透水: } \sigma_s + \sigma_w \gg \sigma_d + \sigma_g \\ \text{复合灾害: } \sigma_s + \sigma_d \approx \sigma_g \approx \sigma_w \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \text{冲击岩爆: } \frac{\partial U_r}{\partial t} + \frac{\partial U_d}{\partial t} \gg \frac{\partial U_g}{\partial t} + \frac{\partial U_w}{\partial t} \\ \text{煤层突出: } \frac{\partial U_r}{\partial t} + \frac{\partial U_g}{\partial t} \gg \frac{\partial U_d}{\partial t} + \frac{\partial U_w}{\partial t} \\ \text{采场透水: } \frac{\partial U_r}{\partial t} + \frac{\partial U_w}{\partial t} \gg \frac{\partial U_d}{\partial t} + \frac{\partial U_g}{\partial t} \\ \text{复合灾害: } \frac{\partial U_r}{\partial t} + \frac{\partial U_d}{\partial t} \approx \frac{\partial U_g}{\partial t} \approx \frac{\partial U_w}{\partial t} \end{cases} \quad (6)$$

3.2 冲击地压与岩爆的相似模拟

静力学相似理论未能考虑冲击过程的高应变率效应、惯性力影响以及能量积聚与突然释放等关键因素。因此，有必要引入反映动力响应特征的相似控制变量，构建动力学下的相似准则^[12]。基于冲击过程中的主要影响参数，通过相似第二定理对煤岩动力学的物理力学性质参数的相似准则进行推导，并选取质量、几何长度和时间作为特征值进行

分析，如式（7）所示：

$$f(t, \sigma, E, \dot{\varepsilon}, M, L, T) = 0 \quad (7)$$

其中， t 为时间； σ 为应力； E 为弹性模量； $\dot{\varepsilon}$ 为应变率； M 、 L 、 T 分别为质量、几何长度和时间。

文献^[12]静力学相似准则总结表示为式（8）：

$$\begin{cases} C_t = \sqrt{\frac{C_l}{C_{a_d}}} \\ C_\sigma = C_l C_\rho C_{a_d} \\ C_E = C_l C_\rho C_{a_d} \\ C_{\dot{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{C_l}{C_{a_d}}}^{-1} \\ C_{Q_d} = C_m C_l C_{a_d} = C_l^4 C_\rho \end{cases} \quad (8)$$

式中： C_t 为时间相似比； C_l 为几何相似比； C_{a_d} 为动力学加速度相似比； C_σ 为应力相似比； C_ρ 为密度相似比； C_E 为弹性模量相似比； $C_{\dot{\varepsilon}}$ 为应变率相似比； C_{Q_d} 为能量相似比； C_m 为质量相似比。

在传统静力学理论中，加速度相似比默认为1，无法反应真实的冲击地压动力学特征，因此基于震动波传播理论（如图6所示）推导提出了动力学相似准则系数（Y-D系数） β 。

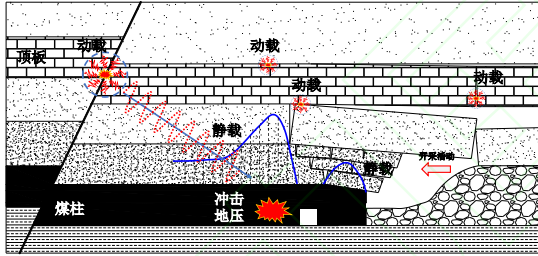


图6 矿井冲击动载源作用示意图^[12]

Fig.6 Schematic diagram of dynamic load sources in coal mine coal burst events

动力学加速度的相似比可表示为：

$$\begin{aligned} \sigma_{dP} &= \frac{\rho v_P^2 \dot{\varepsilon}_{\max}}{2\pi f_d} \\ \beta &= C_{a_d} = \frac{a_d}{a_d'} = C_{v_P}^2 C_{\dot{\varepsilon}}^{-1} C_L^{-1} C_t \end{aligned} \quad (9)$$

式中： σ_{dP} 为震动传播动载； ρ 为密度； v_P 为P波传播速度； $\dot{\varepsilon}_{\max}$ 为应变率的极大值； f_d 为动载频率； a_d 为动力学加速度； β 为动力学相似准则系数。

将动力学相似准则系数 β 带入到动力学相似准则中，采用量纲分析法推导得到了冲击地压的煤岩动力学相似准则，如式（10）所示：

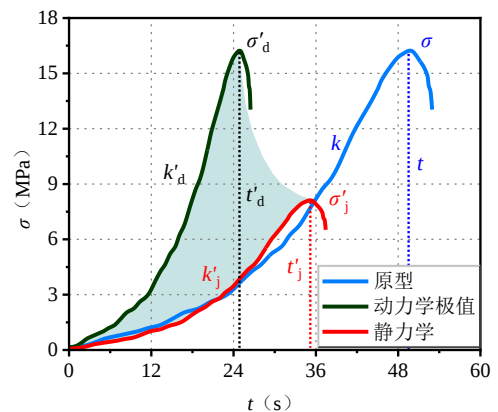
$$\begin{cases} C_t = \sqrt{\frac{C_l}{\beta}} \\ C_{a_d} = \beta \\ C_\sigma = C_l C_\rho \beta \\ C_E = C_l C_\rho \beta \\ C_{\dot{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\beta}{C_l}} \\ C_{Q_d} = C_m C_l C_{a_d} = C_l^4 C_\rho \beta \end{cases} \quad (10)$$

β 本质上是反映动力过程时间尺度、惯性力比例关系及能量释放同步性的综合控制参数。当 $\beta=1$ 时，模型与原型满足静力相似关系，系统处于静力学相似状态；当 $\beta \neq 1$ 时，表明模型试验已由静力相似扩展至动力相似范畴。通过引入 β ，可对不同加载速率、不同能量等级条件下模型与原型之间的动力相似程度进行定量表征；还可在实验室尺度内通过调控 β 实现原型不同动态强度水平的等效再现，从而为冲击地压等动力灾害的相似模拟试验提供理论依据。

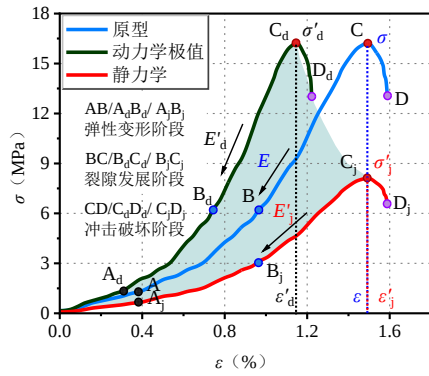
根据应力-时间的曲线，当密度相似比设定为“1”时，以静力学与动力学极值作为边界，可将模型冲击破坏划分为弱冲击倾向性和强冲击倾向性两类，并据此确定动力学相似准则系数 β 的取值区间：

$$\begin{aligned} \text{强冲击倾向性模型: } C_l^{-1} < \beta < C_l^{\frac{1}{3}} \\ \text{弱冲击倾向性模型: } C_l^{\frac{1}{3}} < \beta < 1 \end{aligned} \quad (11)$$

因此，当密度相似比确定为“1”时，可得动力学相似准则下模型的应力-时间与应力-应变曲线，如图7所示。能够清晰对比原型、静力学与动力学三种状态下试样岩石力学性质响应的不同。



(a) 应力-时间曲线



(b) 应力-应变曲线

图 7 动力学相似准则下模型的强度曲线^[12]

Fig.7 Strength curves of model under dynamic similarity criterion

为直观展示动力学相似理论的指导作用，这里选择确定特征参数取值的煤岩原型，并分别进行静力学和动力学下的相似计算，得到对应的相似模型参数^[12]，如表 4 所示。

表 4 动力学和静力学状态下的模型参数^[12]

Table 4 Model parameters under dynamic and static states

参数	原型赋值	$C_f=2$		$C_f=5$		$C_f=10$		$C_f=20$	
		动力学 $\beta=0.79$	静力学 $\beta=1$	动力学 $\beta=0.58$	静力学 $\beta=1$	动力学 $\beta=0.46$	静力学 $\beta=1$	动力学 $\beta=0.37$	静力学 $\beta=1$
t/ms	50	31.4	35.4	15.8	22.3	10.7	15.8	6.80	11.2
σ/MPa	16	10.1	8.0	5.5	3.2	3.5	1.6	2.2	0.8
E/GPa	1	0.63	0.5	0.34	0.2	0.22	0.1	0.14	0.05
Q/J	100 000 000	7 911 000	6 250 000	362 500	160 000	21 730	10 000	1 689	625

由表 4 计算结果可知，在相同原型参数条件下，采用动力学相似准则换算得到的模型参数与静力学结果存在明显差异。动力学准则下模型的应力、弹性模量及动载能量均高于静力学准则结果，而破坏时间则明显缩短。因此，动力学相似准则能够显著增强模型的脆性特征与快速响应能力，使其在能量积聚、瞬时释放及突发破坏等方面更接近原型。

相应地，应在动力学相似关系下重新定义模型的动态破坏时间和单轴抗压强度等判据，重新构建冲击倾向性指标，以更符合模型与原型间的动态响应相似性。根据 GB/T 25217.2—2010 规定的冲击倾向性鉴定指标，进行动力学相似推导分析，推导后的动力学状态下的模型冲击倾向性指标见表 5。

表 5 模型冲击倾向性指标^[12]

Table 5 Model impact tendency index

判别指标	准则条件	公式	倾向性		
			无	弱	强
弹性能量指数	静力学	$W_{ET} = \frac{\Phi_{SE}}{\Phi_{SP}}$	<2	2~5	≥ 5
	动力学	$W_{ET} = \frac{\Phi_{SE}}{\Phi_{SP}}$	<2	2~5	≥ 5
冲击能量指数	静力学	$K_E = \frac{A_s}{A_x}$	<1.5	1.5~5	≥ 5
	动力学	$K_E = \frac{A_s}{A_x}$	<1.5	1.5~5	≥ 5
动态破坏时间	静力学	DT	>500	50~500	≤ 50
	动力学	$t' = t\sqrt{C_{a_d}/C_l}$	$>500\sqrt{C_{a_d}/C_l}$	$50\sim 500\sqrt{C_{a_d}/C_l}$	$\leq 50\sqrt{C_{a_d}/C_l}$
单轴抗压强度	静力学	σ_c	<7	7~14	≥ 14
	动力学	$\sigma' = \frac{\sigma}{C_l C_p C_{a_d}}$	$<\frac{7}{C_l C_p C_{a_d}}$	$\frac{7}{C_l C_p C_{a_d}} \sim \frac{14}{C_l C_p C_{a_d}}$	$\geq \frac{14}{C_l C_p C_{a_d}}$

表中： Φ_{SE} 为弹性应变能，J； Φ_{SP} 为塑性应变能，J； A_s 为峰值前积聚的变形能，J； A_x 为峰值后耗损的变形能，J。

3.3 气固耦合突出的相似模拟

煤与瓦斯突出是一个典型的非线性气固耦合动力破坏过程，研究应从灾害孕育、激发至动力演化的全周期物理本质出发，构建涵盖突出全周期的多场耦合相似准则体系。

煤与瓦斯突出可按灾变孕育、激发、发展和

抛出阶段组织其相似关系。孕育与激发阶段涉及应力-变形、吸附解吸热效应、基质扩散和裂隙渗流；发展与抛出阶段涉及裂纹扩展、煤体破碎耗能、高压瓦斯膨胀及气固两相运动。本文依据煤与瓦斯突出全过程相似研究^[98]和灾变地层材料研究^[110]，对上述控制环节作结构化归纳，见式(12)。

$$\left[\begin{array}{l} \text{弹性变形相似: } \frac{C_\sigma}{C_{FV}C_L} = \frac{C_\sigma}{C_K} = \frac{C_\sigma}{C_\alpha C_P} = \frac{C_\sigma}{C_\beta C_T} = 1 \\ \text{塑性屈服相似: } \frac{C_{Fa}}{C_c} = C_\varphi = 1 \\ \text{热传导相似: } \frac{C_T C_k}{C_H C_L^2} = \frac{C_T C_\lambda}{C_H C_t} = 1 \\ \text{瓦斯运移相似: } \frac{C_D C_t}{C_L^2} = \frac{C_k C_t C_P}{C_\mu C_L^2} = 1 \\ \text{裂隙扩展相似: } \frac{C_{pif} C_L^{1/2}}{C_{Kc}} = 1, \quad \frac{C_{\sigma\sigma} C_L^{1/2}}{C_{Kc}} = 1 \\ \text{能量演化与两相介质抛出相似: } \frac{C_{p0}}{C_E} = \frac{C_{p0} C_V}{C_W} = \frac{C_M C_{Rg} C_T}{C_{p0} C_L^3} = \frac{C_{Qs} C_t}{C_V C_\rho} = 1 \end{array} \right] \quad (12)$$

式中, C_σ 为应力相似比; C_{FV} 为体积力相似比; C_K 为体积模量相似比; C_α 为膨胀系数相似比; C_β 为 Biot 系数相似比; C_{Fa} 为抗压强度相似比; C_c 为黏聚力相似比; C_φ 为内摩擦角相似比; C_T 为温度相似比; C_k 为导热系数相似比; C_H 为吸附热相似比; C_L 为几何相似比; C_λ 为热容相似比; C_t 为时间相似比; C_D 为扩散系数相似比; C_k 为渗透率相似比; C_μ 为气体动力黏度相似比; C_{pif} 为外部流体压力相似比; C_{Kc} 为断裂韧度相似比; C_{p0} 为初始瓦斯压力相似比; C_E 为弹性模量相似比; C_W 为破碎功相似比; C_M 为抛出质量相似比; C_{Rg} 为气体常数相似比; C_{Qs} 为质量流量相似比; C_ρ 为密度相似比;

根据式 (12), 可以推导并简化为如表 6 所示的 28 个从不同角度描述煤与瓦斯气固耦合突出过程的相似 π 准则。

表 6 气固耦合煤与瓦斯突出基础无量纲 π 准则

Table 6 Dimensionless π criterion for the basic model of gas-solid coupling coal and gas outburst

相似类别	表达式
温度场及传热相似	$\pi_1 = \frac{kt}{\rho_s \lambda l^2}; \pi_2 = \frac{H_{int} C_g}{\lambda \rho_s T_0}$
煤岩应力场弹性相似	$\pi_3 = \frac{F_s}{\sigma_0}; \pi_4 = \frac{K \varepsilon_d}{\sigma_0}; \pi_5 = \frac{K}{G}; \pi_6 = \frac{\alpha p_0}{\sigma_0}; \pi_7 = \frac{\beta p_0}{\sigma_0}; \pi_8 = f$
煤岩应力场屈服破坏相似	$\pi_9 = \varphi; \pi_{10} = \frac{I_1}{F_a}; \pi_{11} = \frac{c_a}{F_a}; \pi_{12} = \frac{J_2^{0.5}}{F_a}$
基质瓦斯扩散场相似	$\pi_{13} = \frac{D_0 t}{\phi l^2}; \pi_{14} = T_0 V_L; \pi_{15} = \frac{P_L}{T_0}$
裂隙瓦斯渗流场相似	$\pi_{13} = \frac{D_0 t}{\phi l^2}; \pi_{16} = \frac{k_0 p_0 t}{\phi \mu_g l^2}$
煤岩裂隙扩展相似	$\pi_{17} = \frac{p_0}{\sigma_a}; \pi_{18} = \frac{K_c}{l^{0.5} \sigma_a}; \pi_{19} = \frac{p_{air}}{\sigma_a}$
煤与瓦斯两相介质抛出相似	$\pi_{20} = \frac{\gamma^{0.5} p_0^{0.5} \rho_g^{0.5} t}{M}$
煤与瓦斯突出能量相似 (煤体破碎过程)	$\pi_{21} = \frac{B_s \phi p_0 E}{\sigma_0^2}; \pi_{22} = \frac{\rho_s \gamma p_0 \rho_g E}{\sigma_0^2}; \pi_{23} = \frac{l}{R_b}; \pi_{24} = \nu$

煤与瓦斯突出能量相似 (破碎搬运过程)

$$\pi_{25} = \vartheta; \pi_{26} = \frac{p_0}{p_{air}}; \pi_{27} = \frac{\mu_s S M g}{p_{air} V_0}; \pi_{28} = \frac{Q_s}{A \rho_s}$$

此外, 在传统应力相似关系中, 大都忽略了瓦斯分子进入煤体后, 会影响煤体的孔隙裂隙结构并削弱其微观结构中的范德华力与分子键合力, 从而引起宏观强度和模量的下降。故而需要构建模型强度随瓦斯压力变化的强度衰减函数 $f(p_g)$, 来有效描述这种瓦斯削弱效应。

传统应力相似关系可以表示为:

$$\frac{\sigma_c^{(r)}(p_g^r)}{\sigma_c^{(m)}(p_g^m)} = C_\sigma = C_l C_\rho \quad (13)$$

式中, $\sigma_c^{(r)}$ 为原型无瓦斯作用的煤样单轴抗压强度; $\sigma_c^{(m)}$ 为模型无瓦斯作用的煤样单轴抗压强度; p_g^r 为原型的瓦斯压力; p_g^m 为模型的瓦斯压力。

瓦斯削弱效应作用下的煤样强度可以表示为:

$$\sigma_c = \sigma_{c0} \cdot f(p_g) \quad (14)$$

式中, σ_c 为瓦斯削弱后的煤样单轴抗压强度; σ_{c0} 为无瓦斯作用的煤样单轴抗压强度; $f(p_g)$ 表示材料在瓦斯场的作用下强度衰减函数。

将气体引起的强度降低可解耦为: 有效应力降低、吸附膨胀等效内应力、微裂隙演化导致的材料参数退化。结合 Biot 有效应力公式、Langmuir 吸附饱和型膨胀应变公式与 Mohr-Coulomb 准则, 得到了瓦斯作用下试样的单轴抗压强度表达式:

$$\sigma_c(p) = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left[\alpha p + 3K_m \varepsilon_L \frac{bp}{1 + bp} \right] \quad (15)$$

式中, $\sigma_c(p)$ 为瓦斯作用下的煤样单轴抗压强度; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; α 为 Biot 系数; p 为瓦斯压力; K_m 为煤岩基质体积模量; ε_L 为饱和膨胀应变; b 为亲和系数。

吸附膨胀与解理面润滑会促使微裂隙扩展、界面摩擦下降:

$$\sigma_c(p) = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \left[1 - \chi \varepsilon_L \frac{bp}{1 + bp} \right] - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left[1 - \kappa \varepsilon_L \frac{bp}{1 + bp} \right] \left[\alpha p + 3K_m \varepsilon_L \frac{bp}{1 + bp} \right] \quad (17)$$

式中, χ 为材料的参数劣化系数; κ 是由 ζ 、 φ_0 组合得到的一阶系数。

鉴于天然原煤与人工相似材料在孔隙拓扑结构与流固耦合敏感性上存在显著差异, 两者的衰

$$c(p) = c \left[1 - \eta \varepsilon_L \frac{bp}{1 + bp} \right], \tan \varphi(p) = \tan \varphi \left[1 - \zeta \varepsilon_L \frac{bp}{1 + bp} \right] \quad (16)$$

式中, $c(p)$ 为瓦斯作用下的黏聚力; $\tan \varphi(p)$ 为瓦斯作用下的内摩擦角正切值; η 、 ζ 为无量纲劣化系数。

因此, 单轴抗压强度的表达式如式 (17) 所示:

$$\lambda = \frac{f_r(p_g^r)}{f_m(p_g^m)} = \frac{1 - \frac{m_1^{(r)}}{\sigma_c^{(r)}} p_g^r - \frac{m_2^{(r)}}{\sigma_c^{(r)}} \frac{bp_g^r}{1 + bp_g^r}}{1 - \frac{m_1^{(m)}}{\sigma_c^{(m)}} p_g^m - \frac{m_2^{(m)}}{\sigma_c^{(m)}} \frac{bp_g^m}{1 + bp_g^m}} \quad (18)$$

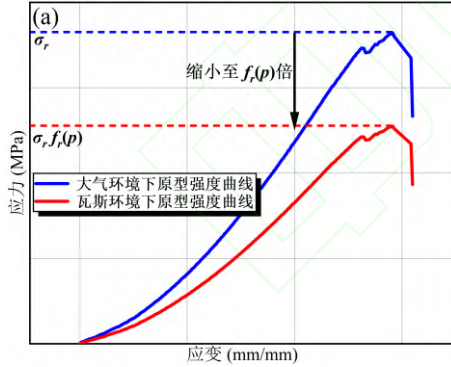
$$\text{其中, } m_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \alpha; m_2 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} 3K_m \varepsilon_L + \chi \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

式中, r 标志表示原型; m 标志表示模型; $3K_m \varepsilon_L$ 为吸附膨胀等效内应力。

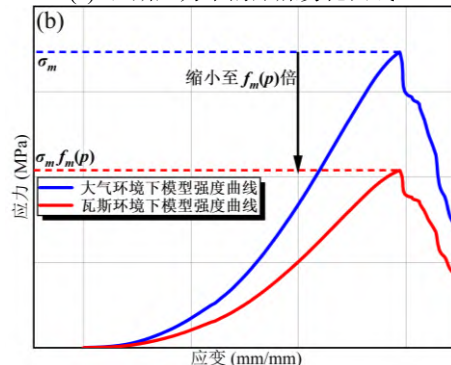
因此, 在考虑修正因子 λ 时, 能够推导出修正后的有效强度相似比:

$$C_\sigma^{eff} = C_\sigma \cdot \lambda \quad (19)$$

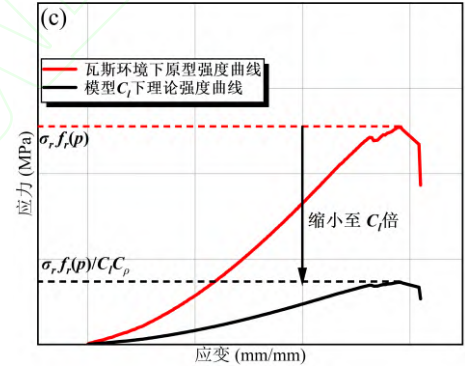
有无瓦斯压力作用及是否进行修正的原型与模型的强度曲线如图 8 所示。



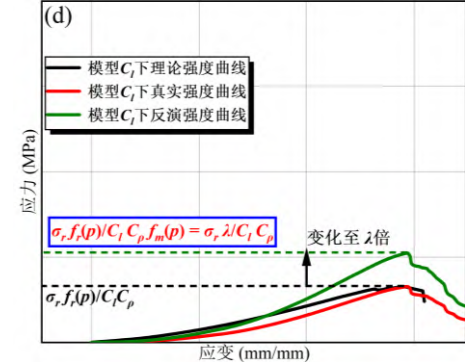
(a) 瓦斯压力下的原煤劣化曲线



(b) 瓦斯压力下的相似材料劣化曲线



(c) 相似准则下的相似材料强度曲线



(d) 相似准则下相似材料修正强度曲线

图 8 不同瓦斯压力下及是否进行修正的原型与模型的强度曲线

Fig.8 Strength curves of prototype and model under different gas pressures and whether to modify them.

3.4 液固耦合突水的相似模拟

液固耦合的力学本质在于多孔介质力学领域,

其理论基础是由 Biot 所建立的饱和多孔介质理论。这一理论的核心可以概括为两个相互耦合的动量守恒方程和一个质量守恒方程^[111,112]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \sigma + \rho_b g = \rho_b \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \rho_f \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \\ -\nabla p + \rho_f g = \frac{\mu}{k} v_r + \frac{\rho_f}{\phi} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \\ \nabla \cdot v_r + \alpha \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot u) + \frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\nabla \cdot \sigma$ 为应力张量的散度, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$; ρ_b 为骨架或等效整体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; $\partial^2 u / \partial t^2$ 为固体骨架产生的加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;

$$\begin{cases} CA = \frac{\text{动力惯性力}}{\text{弹性恢复力}} = \frac{\rho_{dx} L^3 a}{E \varepsilon L^2} = \frac{[(1-\phi)\rho_s + \phi\rho_l] La}{E \varepsilon} \\ EU = \frac{\text{总驱动压力}}{\text{总流体惯性效应}} = \frac{\Delta p_j + \rho_{dx} v_w \frac{a}{2\pi f}}{\rho_{dx} \left[\left(\frac{Q}{A} \right)^2 + \left(\frac{a}{2\pi f} \right)^2 \right]} = \frac{\Delta p_j + [(1-\phi)\rho_s + \phi\rho_l] v_w \frac{a}{2\pi f}}{[(1-\phi)\rho_s + \phi\rho_l] \left[\left(\frac{Q}{A} \right)^2 + \left(\frac{a}{2\pi f} \right)^2 \right]} \\ DA = \frac{\text{流体惯性力}}{\text{粘性阻力}} = \frac{\rho_{dx} v_{dx}^2 L^2}{(\frac{\mu v_{dx}}{k}) L^3} = \frac{k [(1-\phi)\rho_s + \phi\rho_l] \sqrt{\left(\frac{Q}{A} \right)^2 + \left(\frac{a}{2\pi f} \right)^2}}{\mu L} \\ BI = \frac{\text{惯性响应时间}}{\text{压力扩散时间}} = \frac{L \sqrt{\frac{\rho_{dx}}{E}}}{\frac{L^2}{c_v}} = \frac{Mk}{\mu L} \sqrt{\frac{[(1-\phi)\rho_s + \phi\rho_l]}{E}} \end{cases} \quad (21)$$

式中, E 为弹性模量, Pa ; ε 为应变, 1; a 为动载加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; ρ_{dx} 为整体的等效密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; L 为特征长度, m ; ϕ 为孔隙度, 1; ρ_s 为固体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_l 为液体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; Δp_j 为静态压力差, Pa ; Δp_d 为动态压力差, Pa ; v_w 为波速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; Q 为流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; A 为过流面积, m^2 ; f 为动态扰动特征频率, Hz ; μ 为动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; v_{dx} 为等效特征速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为固有渗透率, m^2 ; c_v 为固结系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; M 为 Biot 模量, Pa 。

根据相似性理论, 可将式 (21) 转化为相似比的形式。

$$\begin{cases} C_{CA} = \frac{C_{\rho_{dx}} C_L C_a}{C_E C_\varepsilon} \\ C_{EU} = \frac{C_{\Delta p_d}}{C_{\rho_{dx}} C_{v_{dx}}^2} \\ C_{DA} = \frac{C_k C_{\rho_{dx}} C_{v_{dx}}}{C_\mu C_L} \\ C_{BI} = \frac{C_M C_k}{C_\mu C_L} \left(\frac{C_{\rho_{dx}}}{C_E} \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (22)$$

结合 Π 定理进行量纲分析, 确定了 10 个相互

ρ_f 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\partial^2 w / \partial t^2$ 为流体产生的加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; ∇p 为孔隙压力梯度, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$; μ 为动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; k 为固有渗透率, m^2 ; v_r 为渗流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ϕ 为孔隙度, 1; $\nabla \cdot v_r$ 为渗流速度散度, s^{-1} ; α 为 Biot 有效应力系数, 1; $\nabla \cdot u$ 为体积应变, 1; M 为 Biot 模量, Pa ; p 为孔隙压力, Pa 。

Nan 等^[108]从 Biot 型饱和多孔介质动力控制方程出发, 将固体惯性、流体惯性、黏滞阻力及耦合扩散等作用归纳为 CA、EU、DA 和 BI 等无量纲参数, 用于描述动静载叠加下固液耦合过程:

独立的关键物理量, 如式 (23) 所示。

$$\{L, \rho_{dx}, E, \varepsilon, k, \mu, M, a, \Delta p_d, v_{dx}\} \quad (23)$$

采用指数法矩阵, 将所有物理量表示为基本量纲 M, L, T 的幂次乘积形式来构建无量纲 Π 项。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & q_4 & q_5 & q_6 & q_7 & q_8 & q_9 & q_{10} \\ L & \rho_{dx} & E & \varepsilon & k & \mu & M & a & \Delta p_d & v_{dx} \\ M & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ L & 1 & -3 & -1 & 0 & 2 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ T & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & -1 & -2 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

根据 Π 定理，描述该系统的 $n-k=7$ 个独立的无量纲 Π 项，可以通过求解一个线性代数方程组 $\mathbf{AX}=0$ 来获得。其中 $\mathbf{X}$ 是 $(n) \times (n-k)$ 的指数矩阵。为了简化求解，选取特征长度 L 、等效密度 ρ_{dx} 和弹性模量 E 作为相互独立的基本量组。将量纲矩阵 $\mathbf{A}$ 分解为一个由基本量组构成的 $k \times k$ 的可逆方阵 $\mathbf{B}$ 和一个由剩余 $n-k$ 个物理量构成的 $k \times (n-k)$ 的矩阵 $\mathbf{D}$ ：

$$\mathbf{A} = [\mathbf{B}][\mathbf{D}]$$

其中， $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} L & \rho_{dx} & E \\ \mathbf{M} & 0 & 1 & 1 \\ \mathbf{L} & 1 & -3 & -1 \\ \mathbf{T} & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix} \quad (25)$

无量纲 Π 项可以表示为公式 (26) 的形式。其指数向量可以通过求解公式 (27) 的方程来获得。

$$\Pi_j = q_{k+j} \cdot q_1^{x_1} q_2^{x_2} q_3^{x_3} \quad (26)$$

$$\mathbf{B} \cdot [x_1, x_2, x_3]^T + \mathbf{D}_j = 0 \quad (27)$$

通过逐个对 Π 项的推导，得到了如表 7 所示的一系列无量纲 π 准则。

表 7 液固耦合突水基础无量纲 π 准则^[108]

Table 7 Dimensionless π criterion for the foundation of liquid-solid coupling water gushing

类别	Π 项	表达式	物理意义
几何与耦合	π_1	ε	描述系统的宏观变形程度。
渗流特性	π_2	$\frac{k}{L^2}$	描述介质的相对渗透能力。
流固属性比	π_3	$\frac{\mu}{L\sqrt{\rho_{dx}E}}$	描述流体粘性与固体骨架动力学效应的比值。
	π_4	$\frac{M}{E}$	描述固液耦合储压模量与骨架弹性模量的

比值。

	π_5	$\frac{\rho_{dx}aL}{E}$	描述外部动载强度与材料刚度的比值。
动力与压力	π_6	$\frac{\Delta P_d}{E}$	描述动态压力与材料刚度的比值。
	π_7	$v_{dx}\sqrt{\frac{\rho_{dx}}{E}}$	描述综合流速与介质 P 波波速的比值。

4. 深地工程动力致灾物理模拟研究展望

面对深地极端工况，动力学相似理论在处理极端高应变率与多相介质耦合时的有效性与标度法则仍不完善。受限于实验室物理空间的尺寸效应，深地大范围区域构造应力场的非线性演化与局部采掘动载的耦合过程仍难以在单一物理模型中被真实地重现。因此，本文将从力-震-流多场耦合相似理论的完善、动力学致灾相似材料体系的构建以及深地工程动力学灾变试验仪器的研制三个方面阐述深部煤岩动力致灾物理模拟相似原理研究面临的突出挑战并进行展望。

4.1 力-震-流多场耦合相似理论的完善

在深地工程物理模拟中，实现应力、动力和渗流的综合相似是重现致灾过程的关键，基于多场多相耦合动力致灾条件建立的相似理论体系，将指导深地工程动力灾变的规律再现，并为相似实验材料与实验仪器的研制提供有效依据，如图 9 所示。但目前基础理论研究仍存在显著局限，亟待突破。

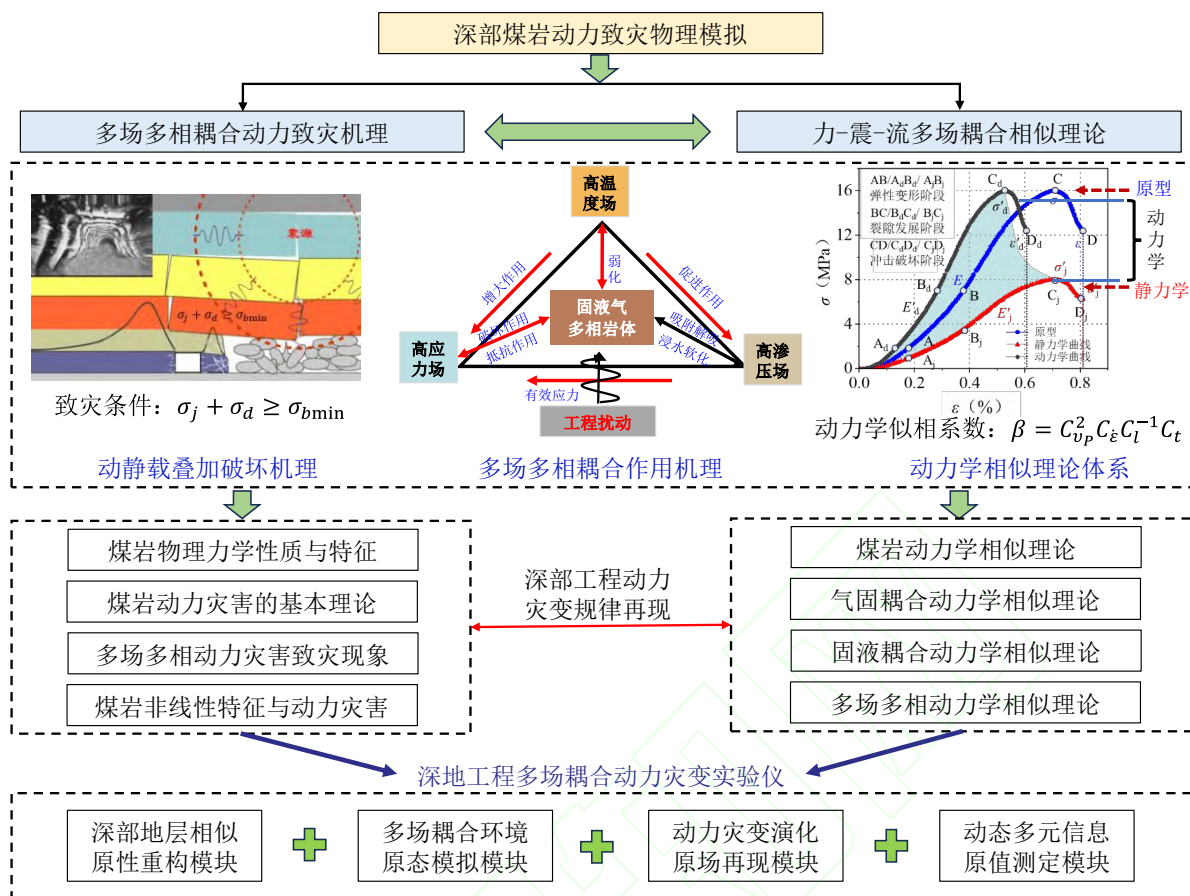


图9 深地工程动力致灾物理模拟体系的构建

Fig.9 Construction of a physical modelling system for dynamic disasters in deep coal-rock masses

力-震-流多场耦合相似理论的完善主要面临了相似准则不完备、介质假设与真实脱节、模型畸变理论薄弱这三个主要问题：

(1) 现有的相似理论多侧重于单一物理场，而在动静载荷叠加以及伴随流体参与的复杂环境下，尚未建立起严密、完备的多相多场相似物理方程组。由于理论上的缺失，在确定物理模型试验材料的动态强度、波阻抗、流体扩散时间比尺等多场性能参数时，大都采用经验公式估算，缺乏严谨的科学相似理论依据。

(2) 现有的耦合相似准则建立在连续、均质和线弹性的理想假设基础之上，但深部岩土体在灾变时微裂隙的萌生、扩展直至宏观破裂显然是一个复杂的损伤演化过程，静力学的相似准则未能充分刻画耦合过程中参数的动态演化规律。

(3) 在相似物理模型试验中，由于试验空间、材料性质和加载条件等的限制，不能完全满足所有独立的相似准则。现有修正方法面临关键参数获取困难、计算量巨大、精度难以保证等问题，缺乏对多种参数耦合影响进行有效约束的相似理

论体系。

上述问题表明，多场物理模拟中通常难以同时满足全部相似准则：几何缩尺会改变材料脆性和断裂过程区的相对尺度；应力波传播、流体扩散和热传导对应的时间比尺并不一致；材料强度、密度、波速与孔渗参数也难以独立调节。国际相似方法研究同样指出尺寸效应和率敏感会限制严格相似^[113,114]。因此，试验设计应围绕主控致灾过程确定优先满足的准则，并明确其余参数的畸变范围，而不宜追求形式上的全参数相似。

4.2 动力学致灾相似材料体系的构建

相似材料是深地动力致灾物理模拟的物质载体，其物理力学性质与多场响应特征直接决定了模型试验的宏微观相似度。面对深地复杂孕灾环境，现有相似材料体系在动力学响应特征、流体运移规律、热力学传递规律等方面的相似性还存在欠缺，需要在完善的多场多相动力学相似理论的指导下不断研发优化。当前灾害地层物理模拟试验所选取的典型材料如图10所示，但在材料性能匹配、模型合理构筑等方面需要寻求突破。

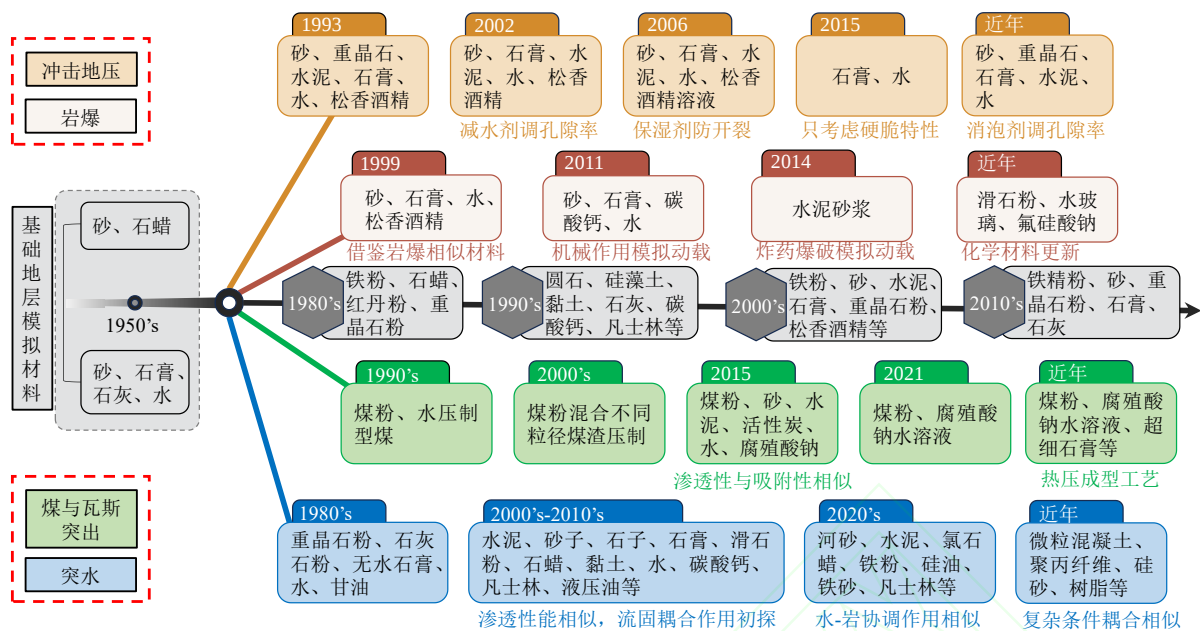


图 10 深地工程灾害地层模拟典型材料体系

Fig.10 Typical material systems for simulating disaster-prone strata in deep engineering

在多相多场材料性能的匹配方面，目前的相似材料制备体系大多针对单一的静力学条件，难以全面满足深地工程中多相介质与复杂多场耦合的要求。尤其是在缩尺比例较大的低强度物理模型中，真实重现煤岩的高应变率脆性破裂及冲击致灾现象极为困难。此外，在制作缩尺模型试件时精度不足，虽然可以通过配比调整在总体上达到抗压强度、弹性模量等宏观力学性能的相似，但在微观尺度上与天然原型煤岩仍存在显著差异，降低了耦合致灾演化模拟结果的可靠性。在相似模型合理构建的工艺方面，现阶段大都采用依赖人工捣实、小块体砌筑及浇筑成型等传统经验方法。而这些方法由于操作的不可控失误，会导致物理模型内部存在密实度不均，整体均质性极差。除此之外，深部真实岩体往往包含复杂的层理、节理网络、断层破碎带及软弱夹层等，较难精确重现这些复杂地质构造和多尺度非连续结构面，无法模拟天然岩体中裂隙的粗糙度与咬合特性，从而导致模型在加载过程中的局部应力场畸变和灾变破裂路径失真。

为满足深地工程动力学灾变机理探索的前沿需求，相似材料体系的构建必须向多功能化、微观可控化及智能化制造方向等进行创新。未来的材料研发需要突破传统无机胶结体系的限制，研制新型轻质骨料、高分子改性胶结剂和特殊外加剂。相似材料不仅需要满足复杂的动态力学相似条件，更应具备真实的气体吸附解吸和多孔介质流体非线性渗流功能。通过材料成分与微观孔隙

结构的协同调控，真正在物理模型中重现多相作用和复杂多场叠加的复合灾变响应。同时，应当积极引入机器学习和人工智能等前沿技术，以海量材料配比试验数据为驱动，大幅提高新型相似材料研发的效率和准确性，建立配比-结构-性能的预测模型，实现对材料力学与渗透性能的精确、定制化调控。

针对传统人工制模的严重弊端，大型地质力学物理模型的构建需要迈向高精度、自动化的3D智能打印制造。未来需要重点开发适用于岩土类多相混合浆料的大型智能打印设备与控制系统，并配套研发针对复杂地质演化模型的3D打印路径规划算法。3D打印有助于提高复杂结构的几何再现精度和制模重复性，通过3D打印与数字孪生技术的结合，最终能实现深部地质体宏观结构的高保真物理重构，为再现真实动力致灾过程提供完美的物理载体。

4.3 深地工程动力学灾变试验仪器的研制

深地工程动力学灾变试验仪器是支撑物理模拟试验的基础硬件保障，面对深部水、气、热、力等多场耦合的复杂地质环境，现有的试验加载设备与测试技术存在一定的局限性。当前的大型物理模拟加载系统大多处于静载荷的单纯构建与动载荷的简单控制上，难以动态重现深地工程复杂的多场交互孕灾环境。在工程扰动相似性的模拟方面，现有设备缺乏针对爆破强扰动、复杂机械振动以及物理-化学等多源耦合扰动类型的专用测试设备和针对性的精细化测量方法。此外，

测试系统缺乏对岩土体灾变临界状态的自动感知与加载路径自适应调节能力，且传感器在复杂的电磁或一些特殊测试环境下容易受到外部干扰，导致监测结果的稳定性和可靠性不足。

为满足物理模拟高度还原深地动力灾害，试验仪器需向多场联合加载与全面智能化方向进行研制与升级，开发精细化的动静耦合加载设备以及多场联合加载系统，以满足复杂环境条件的模拟需求，从而真实再现深地工程多重扰动叠加下的瞬态灾变效应。需要特别关注到，为实现多场耦合环境原态模拟，需要攻克深地工程高地应力、高气液渗透压、高地温多场耦合环境构建和远场

动力扰动及近场应变能释放的模拟等难题；为实现深部地层相似原性重构，需要攻克多相岩体相似材料研发、制备与地质模型的立体重构难题；为实现动态多元信息原值测定，需要攻克深地工程多场耦合灾变模拟试验全过程的多物理量信息快速获取难题。

目前，综合考虑开挖采掘等深地工程诱发的动力灾害，可开展大尺度原位模拟试验、多尺度工程模拟试验、支护结构原型模拟试验的深地工程多场耦合动力灾变试验仪正在高效率地研发。深地工程多场耦合动力灾变试验仪研制的综合示意图如图 11 所示。

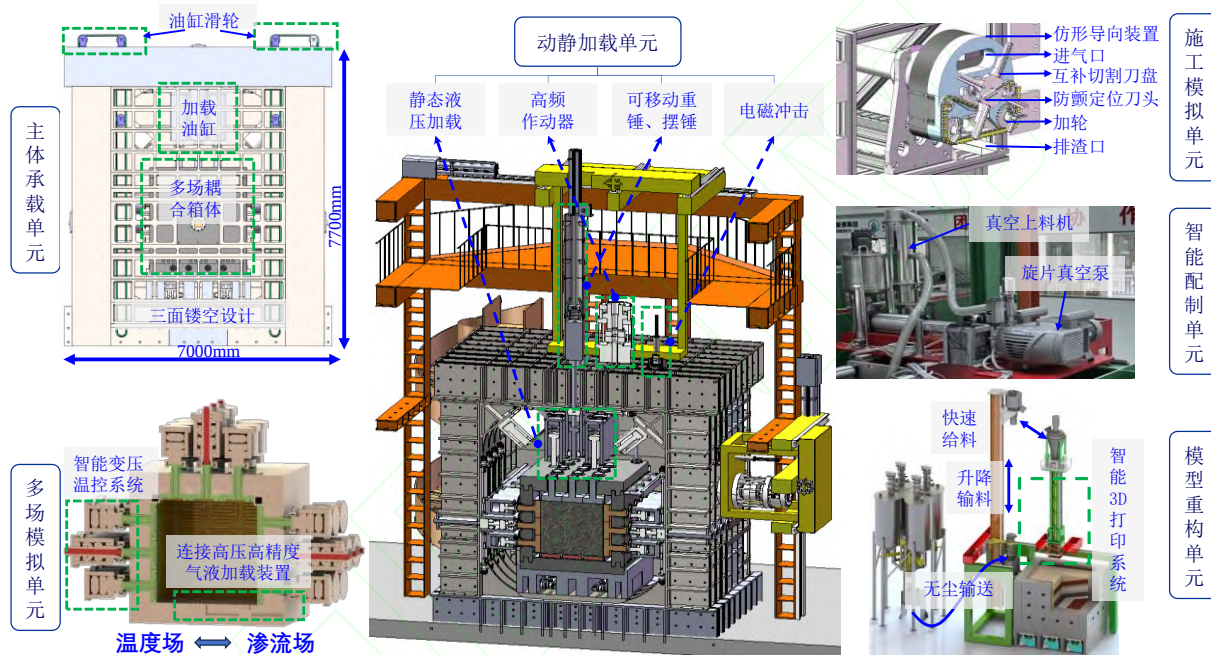


图 11 深地工程多场耦合动力灾变试验仪的研制

Fig.11 Development of multi-field coupled dynamic disaster test instrument for deep engineering

基于基础理论和相似原理研发的深地工程多场耦合动力灾变实验仪，同时考虑到了多场多相复杂地质环境模拟、采掘活动及施工模拟和多应变率动力扰动施加。仪器能适应不同的模型尺度和多种组合孕灾环境，实现对深部地层资源能源开采和地下空间开发等采掘工程活动诱发的多种深地动力灾害真实模拟，既可真实开展深地工程岩体原型及大比尺缩尺试验，又可真实开展深部煤岩动力致灾动力学相似理论的验证试验。

5. 主要结论

本文围绕深地工程动力灾害的多场耦合致灾机理与物理模拟相似原理，系统梳理了冲击地压、岩爆、煤与瓦斯突出和采掘突水等典型灾害的机理认识，归纳动力学相似准则与多场多相耦合相似关系，并对深部煤岩动力致灾物理模拟的关键

问题与发展方向进行讨论，主要结论如下：

(1) 深部煤岩动力灾害的孕育与发生，本质上是高地应力作用下煤岩体能量积聚、采掘扰动或矿震等动载触发以及瓦斯、水等流体介质参与驱动的多场多相耦合失稳过程。冲击地压和岩爆主要表现为高静载与强动载叠加条件下的结构失稳和能量瞬时释放，煤与瓦斯突出体现为应力场、瓦斯渗流场与煤体损伤破坏的气固耦合突变，采掘突水则表现为应力重分布、裂隙扩展、渗流通道贯通及水压驱动共同控制的液固耦合灾变。不同灾害类型的主控因素虽存在差异，但均可统一归结为应力条件、能量条件与介质运移条件共同约束下的动态非线性失稳。

(2) 传统以几何相似和静力相似为核心的物理模拟方法，难以完整表征深地动力灾害中的惯性效应、应变率效应、波动传播、能量突释和流

体扩散等关键过程。深地工程动力致灾物理模拟需要由静力相似向动力相似拓展,由单一物理场相似向多场多相耦合相似拓展,并在相似准则中同时约束应力、时间、能量、加速度、渗流和损伤演化等控制量。只有将灾害主控机制与相似理论推导相结合,才能提高模型试验对原型灾变过程的等效再现能力。

(3) 针对冲击地压与岩爆,引入动力学相似准则系数能够更好表征高应变率、惯性效应、动载能量和破坏时间等关键动力响应指标;针对煤与瓦斯突出,需在力学相似基础上同时考虑吸附解吸、瓦斯渗流、煤体强度劣化、裂隙扩展和两相抛出过程;针对突水灾害,则应将固体惯性、流体惯性、黏滞阻力、孔隙压力扩散及裂隙渗透演化等过程纳入统一的无量纲相似准则体系。

(4) 现阶段深部煤岩动力致灾物理模拟仍面临相似准则不完备、模型畸变约束不足、相似材料多功能响应能力有限和试验仪器多场协同加载能力不足等问题。特别是在极端高应变率、强动载扰动、高瓦斯压力、高水压、高地温以及复杂构造共同作用条件下,模型与原型之间的时间尺度、能量尺度、波动传播、流体扩散和损伤演化难以同时满足相似要求,导致部分试验仍存在对灾变全过程刻画不足、关键参数可测性不强和工程外推可靠性有限等局限。

(5) 未来研究应以深地工程“力-震-流”多场耦合动力相似理论为核心,进一步建立覆盖应力场、震动场、渗流场、温度场和损伤场等的统一控制方程与相似判据,发展可量化的模型畸变修正方法;同时,应面向动力脆性破坏、瓦斯吸附解吸、非线性渗流和多场耦合响应,研发多功能、微结构可控、参数可调的新型相似材料体系,并结合智能配比优化、3D 打印制模和数字孪生重构技术提高模型构筑精度。在此基础上,需研制具备高地应力、高气液渗透压、高地温、远近场动力扰动和多元信息原值测定能力的大尺度试验平台,推动物理模拟、数值模拟、现场监测和智能感知的深度融合,为深部煤岩动力灾害机理揭示、风险预测和防控技术研发提供更加可靠的理论与实验支撑。

参考文献

[1] 袁亮,王恩元,马衍坤,等.我国煤岩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 tech-

nological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825-1845.

[2] 张权,陈凯,李杰,等.深地工程高效定向破岩技术研究进展及展望[J/OL].采矿与岩层控制工程学报,2026[2026-05-11].
ZHANG Quan, CHEN Kai, LI Jie, et al. Research progress and prospect of efficiency directional rock fracture technique in deep underground engineering[J/OL]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2026[2026-05-11].

[3] 谢和平,张茹,张泽天,等.深地科学与深地工程技术探索与思考[J].煤炭学报,2023,48(11):3959-3978.
XIE Heping, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959-3978.

[4] 杨仁树,左进京,李永亮,等.深部煤矿“以爆抑灾”机理与技术研究进展[J].煤炭学报,2025,50(1):132-149.
YANG Renshu, ZUO Jinjing, LI Yongliang, et al. Research progress on mechanism and technology of “disaster treatment by blasting” in deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 132-149.

[5] 钱七虎.岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J].岩土力学,2014,35(1):1-6.
QIAN Qihu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 1-6.

[6] 袁亮,张通,王玥晗,等.深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术[J].煤炭学报,2025,50(1):1-12.
YUAN Liang, ZHANG Tong, WANG Yuehan, et al. Scientific problems and key technologies for safe and efficient mining of deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 1-12.

[7] 王凯,孙加智,杜锋,等.深部煤岩瓦斯复合动力灾害中围岩与煤层的能量互馈机制[J].中国矿业大学学报,2025,54(6):1242-1260.
WANG Kai, SUNJiazhi, DU Feng, et al. Energy mutual feedback mechanism between surrounding rock and coal seam in deep coal-gas compound dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(6): 1242-1260.

[8] 袁亮,汤皓朋,马衍坤,等.我国煤岩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,2026,54(5):1-18.
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, 54(5): 1-18.

[9] WANG Qi, HE Manchao, LI Shucai, et al. Comparative study of model tests on automatically formed roadway and gob-side entry driving in deep coal mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(4): 591-601.

[10] 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 Weili, et al. Mechanism of ejective rockburst and model testing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1081-1089.

- [11] FENG Xiating, LI Zhengwei, MEI Shiming, et al. A novel large-scale three-dimensional physical model experimental system for deep underground engineering[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(11): 8395-8413.
- [12] 窦林名, 阚梓豪, 曹安业, 等. 冲击地压的煤岩动力学物理模拟相似原理[J]. 煤炭学报, 2026, 51(1): 274-292.
DOU Linming, KAN Zihao, CAO Anye, et al. Physical similarity principles of coal-rock dynamics simulation for coal burst[J]. Journal of China Coal Society, 2026, 51(1): 274-292.
- [13] 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): 132-144.
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): 033512.
- [14] 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.
- [15] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(7): 1469 - 1476.
- [16] 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. State of the art: Investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204.
- [17] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业学院学报, 1985(3): 1-7.
LI Yusheng. Rockburst Mechanism and Its Preliminary Application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985(3): 1-7.
- [18] 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 prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(5): 1567-1584.
- [19] 齐庆新, 史元伟, 刘天泉. 冲击地压粘滑失稳机理的实验研究[J]. 煤炭学报, 1997(02): 34-38.
QI Qingxin, SHI Yuanwei, LIU Tianquan. Mechanism of instability caused by viscous sliding in rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 1997(02):34-38.
- [20] 李海涛, 齐庆新, 赵善坤, 等. 煤矿动力灾害广义“三因素”机理探讨[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 42-52.
LI Haitao, QI Qingxin, ZHAO Shankun, et al. Discussion on generalized “Three Factors” mechanism of coal mine dynamic disaster[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6):42-52.
- [21] 姜福兴, 魏全德, 王存文, 等. 巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机理分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1191-1196.
JIANG Fuxing, WEI Quande, WANG Cunwen, et al. Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(7): 1191 - 1196.
- [22] 邹德蕴, 姜福兴. 煤岩体中储存能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究[J]. 煤炭学报, 2004(2): 159-163.
ZOU Deyun, JIANG Fuxing. Research of energy storing and gestation mechanism and forecasting of rockburst in the coal and rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2004(2): 159-163.
- [23] 刘金海, 姜福兴, 朱斯陶, 等. 典型深厚表土煤层冲击地压模式研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1753-1763.
LIU Jinhai, JIANG Fuxing, ZHU Sitao, et al. Rock burst model of typical coal seam under thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1753-1763.
- [24] 朱斯陶, 姜福兴, 刘金海, 等. 我国煤矿整体失稳型冲击地压类型、发生机理及防治[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3667-3677.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, LIU Jinhai, et al. Types, occurrence mechanism and prevention of overall instability induced rock-bursts in China coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(11): 3667-3677.
- [25] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):205-213.
- [26] 赵毅鑫, 姜耀东, 韩志茹. 冲击倾向性煤体破坏过程声热效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(5): 965-971.
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, HAN Zhiru. Experimental study on acoustic and thermal infrared characteristics of bump-prone coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, (5):965-971.
- [27] 王宏伟, 王晴, 石瑞明, 等. 煤矿冲击地压与断层构造失稳的多物理场互馈机制研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 762-790.
WANG Hongwei, WANG Qing, SHI Ruiming, et al. A review on the interaction mechanism between coal bursts and fault structure instability from the perspective of multi-physical field[J]. Journal of China Coal Society, 2022,47(2):762-790.
- [28] 曹晋荣, 窦林名, 何江, 等. 巨厚坚硬岩层承载特征及分层破坏机制[J]. 中国矿业大学学报, 2026, 55(4): 1066-1082.
CAO Jinrong, DOU Linming, HE Jiang, et al. Load-bearing characteristics and layered fracture mechanism of hard and extra-thick rock strata[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(4): 1066-1082.
- [29] 何江, 邵嗣华, 李小龙, 等. 急倾斜煤层分段轻放开采冲击地压发生机理[J]. 煤炭学报, 2026, 51(2): 1090-1101.
HE Jiang, SHAO Sihua, LI Xiaolong, et al. Mechanism of rock burst of steeply inclined coal seam using sublevel light-duty top

- coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2026, 51(2): 1090-1101.
- [30] CAI Wu, DOU Linming, SI Guangyao, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses[J]. Engineering, 2021, 7(5): 687-700.
- [31] WANG Songwei, CAO Anye, WANG Changbin, et al. Mechanism of rockburst induced by the microseismic event in the floor strata of high tectonic stress zones: A case study[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2024, 11(1): 76-90.
- [32] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2091-2098.
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8):2091-2098.
- [33] 施天威, 潘一山, 王爱文, 等. 基于能量贮存及释放主体的煤矿冲击地压分类[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2):524-532.
SHI Tianwei, PAN Yishan, WANG Aiwu, et al. Classification of rock burst in coal mine based on energy storage and release bodies[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2):524-532.
- [34] 朱小景, 潘一山, 齐庆新, 等. 矿震诱发巷道冲击地压力学机制及判别准则研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 493-503.
ZHU Xiaojing, PAN Yishan, QI Qingxin, et al. Study on mechanical mechanism and criterion of roadway rockburst induced by mine earthquake[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3):493-503.
- [35] 潘俊锋. 冲击地压的冲击启动机理及其应用[D]. 煤炭科学研究总院, 2017.
Pan Junfeng. The Initiation Mechanism of Impact Ground Pressure and Its Application [D]. China Coal Research Institute, 2017.
- [36] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 586-596.
PAN Junfeng, NING Yu, MAO Debing, et al. Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3):586-596.
- [37] 蓝航, 杜涛涛, 彭永伟, 等. 浅埋深回采工作面冲击地压发生机理及防治[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1618-1623.
LAN Hang, DU Taotao, PENG Yongwei, et al. Rock-burst mechanism and prevention in working face of shallow buried coal-seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1618-1623.
- [38] 郭建宏, 潘俊锋, 冯美华, 等. 顶板不同区域压裂程度覆岩采动响应特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11):4351-4364.
WU Jianhong, PAN Junfeng, FENG Meihua, et al. Response characteristics of mining-induced overburden strata under different degrees of regional fracturing on the roof[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11):4351-4364.
- [39] 曹安业, 范军, 牟宗龙, 等. 矿震动载对围岩的冲击破坏效应[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2006-2010.
CAO Anye, FAN Jun, MU Zonglong, et al. Burst failure effect of mining-induced tremor on roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2006-2010.
- [40] 王恩元, 冯俊军, 张奇明, 等. 冲击地压应力波作用机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 100-110.
WANG Enyuan, FENG Junjun, ZHANG Qiming, et al. Mechanism of rockburst under stress wave in mining space[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 100-110.
- [41] 唐杰兵. 矿震应力波诱发巷道冲击地压机制研究[D]. 煤炭科学研究总院, 2022.
TANG Jiebing. Study on mechanism of roadway rockburst induced by stress wave of mining tremor[D]. China University of Mining and Technology Research Institute, 2022.
- [42] RUSSENE BF. Analysis of rock spalling for tunnels in steep valley sides[D]. Norwegian Institute of Technology, 1974.
- [43] COOK N G W. The failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 2(4): 389-403.
- [44] KIDYBIŃSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 295-304.
- [45] 谢和平, W.G.PARISEAU. 岩爆的分形特征和机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1993(1): 28-37.
XIE Heping, W.G. PARISEAU. Fractal character and mechanism of rock bursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993(1): 28-37.
- [46] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(5): 865-876.
HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(5): 865-876.
- [47] 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.
- [48] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 561-569.
CHEN Bingrui, FENG Xiating, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockburst in deep tunnel: Time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 561-569.
- [49] 冯夏庭, 肖亚勋, 丰光亮, 等. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 649-673.
FENG Xiating, XIAO Yaxun, FENG Guangliang, et al. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 649-673.
- [50] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846-866.
LI Xibing, GONG Fengqiang. AResearch progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 846-866.
- [51] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(10): 2034-2042.

- ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(10):2034-2042.
- [52] 王云刚, 崔春阳, 张飞燕, 等. 2011—2020 年我国较大及以上煤矿事故统计分析研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(9): 3269-3276.
- WANG Yungang, CUI Chunyang, ZHANG Feiyan, et al. Statistical analysis and research on major and above coal mine accidents in China from 2011 to 2020[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(09):3269-3276.
- [53] 孙振海, 韦建昌, 韩玉, 等. 隧道施工事故统计分析[J]. 西部交通科技, 2020(7): 91-93.
- SUN Zhenhai, WEI Jianchang, HAN Yu, et al. Statistical Analysis of Tunnel Construction Accidents [J]. Western China Communications Science & Technology, 2020(7): 91-93.
- [54] SHEPHERD J, RIXON L K, GRIFFITHS L. Outbursts and geological structures in coal mines: A review[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 267-283.
- [55] CHEN Kang Ping. A new mechanistic model for prediction of instantaneous coal outbursts — dedicated to the memory of prof. Daniel D. Joseph[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 87(2): 72-79.
- [56] FARMER I W, POOLEY F D. A hypothesis to explain the occurrence of outbursts in coal, based on a study of west wales outburst coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1967, 4(2): 189-193.
- [57] SOLEIMANI Fatemeh, SI Guangyao, ROSHAN Hamid, et al. Numerical modelling of coal and gas outburst initiation using energy balance principles[J]. Fuel, 2023, 334: 126687.
- [58] VOITENKO Yu I, KOVTUN A V. About the pre-outburst state of the coal and sandstone and the possible mechanism of coal and gas outburst process[J]. Мінеральні ресурси України, 2018(2): 32-35.
- [59] 于不凡. 谈煤和瓦斯突出机理[J]. 煤炭科学技术, 1979(8): 34-42.
- YU Bufan. Discussion on the Mechanism of Coal and Gas Outburst [J]. Coal Science and Technology, 1979(8): 34-42.
- [60] 李萍丰. 浅谈煤与瓦斯突出机理的假说——二相流体假说[J]. 煤矿安全, 1989(11): 29-35.
- LI Pingfeng. Discussion on the Hypothesis of Coal and Gas Outburst Mechanism: Two-Phase Fluid Hypothesis [J]. Safety in Coal Mines, 1989(11): 29-35.
- [61] 周世宁, 何学秋. 煤和瓦斯突出机理的流变假说[J]. 中国矿业大学学报, 1990(02): 4-11.
- ZHOU Shining, HE Xueqiu. Rheological hypothesis of coal and methane outburst mechanism[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1990(02):4-11.
- [62] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出机理的球壳失稳假说[J]. 煤矿安全, 1995(2): 17-25.
- JIANG Chenglin, YU Qixiang. Hypothesis of Shell Instability for Coal and Gas Outburst Mechanism [J]. Safety in Coal Mines, 1995(2): 17-25.
- [63] 梁冰, 章梦涛, 潘一山, 等. 煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论[J]. 煤炭学报, 1995(05): 492-496.
- LIANG Bing, Zhang Mengtao, Pan Yishan, et al. Theory of instability of flow fixation coupling for coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1995(05):492-496.
- [64] 何学秋, 王恩元, 林海燕. 孔隙气体对煤体变形及蚀损作用机理[J]. 中国矿业大学学报, 1996, (1):6-11.
- HE Xueqiu, WANG Enyuan, LIN Haiyan. Coal deformation and fracture mechanism under pore gas action[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1996, (1):6-11.
- [65] 鲜学福, 辜敏, 李晓红, 等. 煤与瓦斯突出的激发和发生条件[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 577-581.
- XIAN Xufu, GUO Min, LI Xiaohong, et al. Excitation and occurrence conditions for coal and gas outburst[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2009, 30(3): 577-581.
- [66] 胡千庭, 周世宁, 周心权. 煤与瓦斯突出过程的力学作用机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1368-1372.
- HU Qianting, ZHOU Shining, ZHOU Xinquan. Mechanical mechanism of coal and gas outburst process[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1368-1372.
- [67] 冯明伟. 旋流场假说——煤与瓦斯突出机理新探[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(4): 102-104.
- FENG Mingwei. Hypothesis of swirl flow field —— a new exploration of coal and gas outburst mechanism[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(4): 102-104.
- [68] 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 105-112.
- PAN Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(1):105-112.
- [69] 马念杰, 赵希栋, 赵志强, 等. 掘进巷道蝶型煤与瓦斯突出机理猜想[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(2): 137-149.
- MA Nianjie, ZHAO Xidong, ZHAO Zhiqiang, et al. Conjecture about mechanism of butterfly-shape coal and gas outburst in excavation roadway[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017,2(2):137 - 149.
- [70] 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.
- [71] 王超杰, 李晓伟. 煤与瓦斯突出的扩容突变机理[J]. 煤炭学报, 2024,49(S2):1007-1024.
- WANG Chaojie, LI Xiaowei. Mechanism of dilatation catastrophe of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(S2):1007-1024.
- [72] 雷杨, 程远平. 煤与瓦斯突出的级联破裂发展机制[J]. 煤炭学报, 2026,51(3):2086-2104.
- LEI Yang, CHENG Yuanping. Cascade rupture development mechanism of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2026, 51(3):2086-2104.
- [73] 杜锋, 王凯, 孙加智, 等. 深部应力主导型煤与瓦斯突出宏观破坏特征及能量机制研究[J]. 煤炭学报, 2026, 51(2):

- 1357-1376.
- DU Feng, WANG Kai, SUN Jiazhi, et al. Research on macroscopic and microscopic failure characteristics and energy mechanism of deep stress-dominated coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2026, 51(2):1357-1376.
- [74] 孟晗, 杨玉中, 侯玮, 等. 瓦斯压力对突出发生过程及耗散能影响规律研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 2026[2026-04-16].
- MENG Han, YANG Yuzhong, HOU Wei, et al. Research on the influence of gas pressure on the process of coal and gas outburst and dissipation energy[J/OL]. Coal Science and Technology, 2026 [2026-04-16].
- [75] 李文平, 乔伟, 李小琴, 等. 深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2437-2448.
- LI Wenping, QIAO Wei, LI Xiaoqin, et al. Characteristics of water disaster, evaluation methods and exploration direction for controlling groundwater in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2437-2448.
- [76] 武强, 朱慧聪, 胡辰睿, 等. 我国煤层水害基本架构及发展形势[J]. 煤炭工程, 2024, 56(10): 12-21.
- WU Qiang, ZHU Huicong, HU Chenrui, et al. The basic structure and development situation of coal seam water disaster in China[J]. Coal Engineering, 2024, 56(10): 12-21.
- [77] 李利平, 李术才, 陈军, 等. 基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1345-1355.
- LI Liping, LI Shucai, CHEN Jun, et al. Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1345-1355.
- [78] 李术才, 王康, 李利平, 等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22-30.
- LI Shucai, WANG Kang, LI Liping, et al. Mechanical mechanism and development trend of water-inrush disasters in karst tunnels[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(1): 22-30.
- [79] LIANG Li, HONGYUN Jiao, XIULI Du, et al. Fully fluid-solid coupling dynamic model for seismic response of underground structures in saturated soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 19(2): 257-268.
- [80] 惠迎新, 李杰星, 张尚荣, 等. 考虑流固耦合作用的渡槽结构近断层地震响应分析[J]. 地震工程学报, 2026, 48(2): 389-401.
- HUI-Yingxin, LIJiexing, ZHANG Shangrong, et al. Seismic response of aqueduct structures near fault zones considering fluid-structure interaction[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(2): 389-401.
- [81] 李顺才, 缪协兴, 陈占清. 破碎岩体非达西渗流的非线性动力学分析[J]. 煤炭学报, 2005(5): 15-19.
- LI Shunca, MIU Xiexing, CHEN Zhanqing. Nonlinear dynamic analysis on non-Darcy seepage in over-broken rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2005(5): 15-19.
- [82] 郭方旭, 王文强, 张帅阳, 等. 采动影响下承压含水层底板断层突水机理与防控技术研究进展[J]. 有色设备, 2025, 39(4): 16-30.
- GUO Fangxu, WANG Wenqiang, ZHANG Shanyang, et al. Research Progress on Mechanism and Control Technology of Groundwater Discharge Caused by Faulting on the Floor of Pressurized Aquifer under Mining Influence [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(4): 16-30.
- [83] 王刚, 江成浩, 刘世民, 等. 基于 CT 三维重建煤骨架结构模型的渗流过程动态模拟研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1390-1399.
- WANG Gang, JIANG Chenghao, LIU Shimin, et al. Dynamic simulation of seepage process based on CT 3D reconstruction of coal skeleton structure model[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1390-1399.
- [84] 刘泉声, 甘亮, 吴志军, 等. 基于零厚度黏聚力单元的水力压裂裂隙空间分布影响分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 393-402.
- LIU Quansheng, GAN Liang, WU Zhijun, et al. Analysis of spatial distribution of cracks caused by hydraulic fracturing based on zero-thickness cohesive elements[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 393-402.
- [85] FAN Kaifang, LI Wenping, WANG Qiqing, et al. Formation mechanism and prediction method of water inrush from separated layers within coal seam mining: A case study in the shilawusu mining area, China[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 103: 158-172.
- [86] CHEN Luwang, OU Qinghua, PENG Zhihong, et al. Numerical simulation of abnormal roof water-inrush mechanism in mining under unconsolidated aquifer based on overburden dynamic damage[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 133: 106005.
- [87] CHEN Yanhao, CHENG Shuai, LI Liping, et al. Evolution mechanism and microseismic response characteristics of water inrush channel[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(10): 4742-4755.
- [88] NING Dianyan, ZHU KaiPeng, ZHU Yongsheng, et al. Numerical simulation of coal seam floor water inrush based on acoustic emission technology[J]. Applied Water Science, 2026, 16(3): 68.
- [89] 潘一山, 吕祥锋, 李忠华, 等. 高速冲击载荷作用下巷道动态破坏过程试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1281-1286.
- PAN Yishan, LÜ Xiangfeng, LI Zhonghua, et al. Experimental study of dynamic failure process of roadway under high velocity impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1281-1286.
- [90] 蔡武. 断层型冲击矿压的动静载叠加诱发原理及其监测预警研究[D]. 中国矿业大学, 2015.
- CAI Wu. Fault Rockburst Induced by Static and Dynamic Loads Superposition and its Monitoring and Warning[D]. China University of Mining and Technology, 2015.
- [91] 崔峰, 杨彦斌, 来兴平, 等. 基于微震监测关键层破断诱发冲击地压的物理相似材料模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 803-814.
- CUI Feng, YANG Yanbin, LAI Xingping, et al. Similar material simulation experimental study on rockbursts induced by key stratum breaking based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 803-814.

- [92] 鞠明和, 姚宝山, 窦林名, 等. 冲击地压物理相似模拟中煤的冲击倾向性影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(12): 2940-2955.
- JU Minghe, YAO Baoshan, DOU Linming, et al. Influence of coal bursting liability on physical similarity simulation of coal/rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(12): 2940-2955.
- [93] 谈庆明, 俞善炳, 朱怀球, 等. 含瓦斯煤在突然卸压下的开裂破坏[J]. 煤炭学报, 1997(05): 68-72.
- TAN Qingming, YU Shanbing, ZHU Huaiqiu, et al. Fracture of coal containing pressurized gas by sudden relieving[J]. Journal of China Coal Society, 1997,(05):68-72.
- [94] 蔡成功. 煤与瓦斯突出三维模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2004(1): 66-69.
- CAI Chenggong. Experimental study on 3-D simulation of coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2004(1): 66-69.
- [95] 张超林. 深部采动应力影响下煤与瓦斯突出物理模拟试验研究[D]. 重庆大学, 2015.
- ZHANG Chaolin. Physical simulation experiment on coal and gas outburst under deep mining-induced stress[D]. Chongqing University, 2015.
- [96] 高魁, 刘泽功, 刘健. 地应力在石门揭构造软煤诱发煤与瓦斯突出中的作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 305-312.
- GAO Kui, LIU Zegong, LIU Jian. Effect of geostress on coal and gas outburst in the uncovering tectonic soft coal by cross-cut[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 305-312.
- [97] 唐巨鹏, 杨森林, 王亚林, 等. 地应力和瓦斯压力作用下深部煤与瓦斯突出试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2769-2774.
- TANG Jupeng, YANG Forest, WANG Yalin, et al. Experiment of coal and gas outbursts under ground stress and gas pressure in deep mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2769-2774.
- [98] 张庆贺, 袁亮, 王汉鹏, 等. 煤与瓦斯突出物理模拟相似准则建立与分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2773-2779.
- ZHANG Qinghe, YUAN Liang, WANG Hanpeng, et al. Establishment and analysis of similarity criteria for physical simulation of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2773 - 2779.
- [99] 陈永超. 煤与瓦斯突出冲击波传播规律的实验研究[D]. 河南理工大学, 2009.
- CHEN Yongchao. Experimental study on shock wave propagation law of coal and gas outburst[D]. Henan Polytechnic University, 2009.
- [100] 张春华. 石门揭突出煤层围岩力学特性模拟试验研究[D]. 安徽理工大学, 2010.
- ZHANG Chunhua. Simulation experiment on the mechanical characteristics during outbursting coal seam uncovered by cross-cut[D]. Anhui University of Science and Technology, 2010.
- [101] 郭品坤. 煤与瓦斯突出层裂发展机制研究[D]. 中国矿业大学, 2014.
- GUO Pinkun. Research on laminar spallation mechanism of coal and gas outburst propagation[D]. China University of Mining & Technology, 2014.
- [102] 张淑同. 煤与瓦斯突出模拟的材料及系统相似性研究[D]. 安徽理工大学, 2015.
- ZHANG Shutong. Research on similarity of material and system for coal and gas outburst simulation test[D]. Anhui University of Science and Technology, 2015.
- [103] 康向涛, 黄滚, 邓博知, 等. 模拟原煤的相似材料试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 138-142.
- KANG Xiangtao, HUANG Rong, DENG Bozhi, et al. Experimental study on similar material for simulating raw coal[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(1): 138-142.
- [104] 黄志安, 岳红娟, 张英华, 等. 煤与瓦斯突出模拟实验相似比研究[J]. 华北科技学院学报, 2015, 12(5): 16-18.
- HUANG Zhian, YUE Hongjuan, ZHANG Yinghua, et al. Similarity ratio study on simulation experiment of coal and gas outburst[J]. Journal of North China University of Science and Technology, 2015, 12(5): 16-18.
- [105] 肖猛, 巨峰, 何泽全, 等. 侏罗系富水煤层采动裂隙演化及涌水特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(4): 890-903.
- XIAO Meng, JU Feng, HE Zequan, et al. Investigation of mining-induced fracture evolution and water inflow patterns in water-rich coal seams of a typical Jurassic mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(4): 890-903.
- [106] SHEN Xiong, LI Jizu, FENG Guorui, et al. Experimental study on the properties of simulation materials for an aquifer for a fluid-solid coupling physical similarity model test[J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): 8667.
- [107] 国宪顺. 尾矿库复杂排洪系统水力特性研究[D]. 石家庄铁道大学, 2025.
- Guo Xianhong. Research on hydraulic characteristics of complex drainage system in tailings pond[D]. Shijiazhuang Tiedao University, 2025.
- [108] NAN Tianqi, DOU Linming, CHAI Yanjiang, et al. Dynamic similarity framework and governing criteria for saturated rock masses under combined static and dynamic loading[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 45334.
- [109] XU Chongxi, WANG Zhuo, ZHOU Hu, et al. Finite similitude theory-based similarity design of structures subjected to various types of impact loads through nonlinear mapping of material properties[J]. Ocean Engineering, 2026, 353: 124731.
- [110] 袁亮, 马衍坤, 黄勤豪, 等. 煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(5): 827-856.
- YUAN Liang, MA Yankun, HUANG Qin hao, et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 827-856.
- [111] YAN Qingming, CUI Lan, DONG Youkou, et al. A numerical solution of coupling hydro-mechanical behavior for subsea tunnels in strain-softening rock masses: theory and case study[J].

- European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2025, 30(1): 1-28.
- [112] AI Zhiyong, SHI Liwei. Eccentric dynamic response of embedded rigid strip foundation in layered transversely isotropic unsaturated soils with groundwater level[J]. Applied Mathematical Modelling, 2025, 147: 116198.
- [113] ALESSANDRO Casaburo, GIUSEPPE Petrone, FRANCESCO Franco, et al. A review of similitude methods for structural engineering[J]. Applied Mechanics Reviews, 2019, 71(3): 030802.
- [114] KEITH Davey, HAMED Sadeghi, ROOHOLAMIN Darvizeh, et al. A finite similitude approach to scaled impact mechanics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 148: 103744.

