



中国矿业大学学报
Journal of China University of Mining & Technology
ISSN 1000-1964, CN 32-1152/TD

《中国矿业大学学报》网络首发论文

题目：基于煤岩动力学相似理论的冲击地压物理模拟试验与数值模拟
作者：南天琦，窦林名，袁亮，阚梓豪，陈佩圆，王恩元，马衍坤，曹安业，李浩丙，闫晨龙，张力，范鑫钰
收稿日期：2026-06-16
网络首发日期：2026-09-11
引用格式：南天琦，窦林名，袁亮，阚梓豪，陈佩圆，王恩元，马衍坤，曹安业，李浩丙，闫晨龙，张力，范鑫钰. 基于煤岩动力学相似理论的冲击地压物理模拟试验与数值模拟[J/OL]. 中国矿业大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/32.1152.TD.20260910.2046.002>



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。

基于煤岩动力学相似理论的冲击地压物理模拟 试验与数值模拟

南天琦^{1,2}, 窦林名^{1,2}, 袁亮³, 阚梓豪^{1,2}, 陈佩圆³, 王恩元⁴, 马衍坤³, 曹安业^{1,2}, 李浩丙^{1,2},
闫晨龙^{1,2}, 张力⁴, 范鑫钰⁴

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 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; 3. 安徽理工大学 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; 4. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要：冲击地压是深部煤矿高静载储能与瞬时动载扰动耦合作用下发生的突发性动力灾害。传统静力学相似准则难以保证模型与原型在冲击倾向性及能量释放过程上的一致性。为提高实验室物理模型对冲击地压动力致灾过程的模拟能力，以彬长矿区某次冲击地压事件为研究对象，依据煤岩动力学相似理论开展物理模拟试验及数值模拟对比研究。将工程原型抽象为简单的煤层与顶底板三层结构，根据原型的煤岩体参数、载荷条件与冲击能量等，确定了几何、密度的相似比与动力学相似准则系数的取值，完成模型一系列参数取值的计算。根据设计指标取值，使用低强高脆相似材料浇筑了中尺度相似模型并进行了动静载叠加冲击试验。动静载叠加试验结果表明：动载作用后模型顶部应力瞬时增加，巷道左帮上部靠近顶板区域发生剥落、块体失稳和断面收缩；声发射能量量级也显著增加，剪切裂纹占比最大，模型破坏以剪切剥落和块体滑移为主。数值模拟结果显示，静力学相似模型位移响应较分散、速度增长较平缓、动载后应力扰动较弱；动力学相似模型和相似材料参数模型在位移集中位置、速度突增特征和应力扰动形态上与原型更接近。研究结果表明：煤岩动力学相似理论能够有效约束冲击地压物理模拟中的动载能量、惯性响应和动力破坏过程，适用于动载触发型冲击地压灾害的物理模拟与参数设计。研究成果可为使用动力学相似理论进行冲击地压物理相似模拟提供有力支撑。

关键词：冲击地压；动力学相似；动静载叠加；物理模拟；数值模拟

中图分类号：TD 324 **文献标志码：**A

Physical modelling tests and numerical simulations of coal burst based on coal-rock dynamic similarity theory

Nan Tianqi^{1,2}, Dou Linming^{1,2}, Yuan Liang³, Kan Zihao^{1,2}, Chen Peiyuan³, Wang Enyuan⁴,
Ma Yankun³, Cao Anye^{1,2}, Li Haobing^{1,2}, Yan Chenlong^{1,2}, Zhang Li⁴, Fan Xinyu⁴

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Anhui University of Science;

收稿日期：2026-06-16 **修回日期：**2026-07-02

基金项目：国家重大科研仪器研制项目(部门推荐)(52227901);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX25_2795);中国矿业大学研究生创新计划项目资助(2025WLKXJ022)

第一作者：南天琦(2001—),男,安徽省淮北市人,博士研究生. E-mail: tianqi_nan@163.com

通信作者：袁亮(1960—),男,安徽省六安市人,中国工程院院士. E-mail: Yuanl_1960@sina.com

引用格式：南天琦, 窦林名, 袁亮, 等. 基于煤岩动力学相似理论的冲击地压物理模拟试验与数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, XXXX, XX(XX): 1-14.

Nan Tianqi, Dou Linming, Yuan Liang, et al. Physical modelling tests and numerical simulations of coal burst based on coal-rock dynamic similarity theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology, XXXX, XX(XX): 1-14.

and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 4. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Coal burst is a sudden dynamic hazard in deep coal mines caused by the coupling between energy accumulation under high static loading and transient dynamic disturbance. Conventional static similarity criteria cannot adequately reproduce the consistency between a physical model and its prototype in burst proneness and energy release. To improve the ability of laboratory physical models to reproduce the dynamic disaster evolution of coal burst, this study examines a coal burst event in the Binchang mining area as an engineering case. Physical modelling tests and comparative numerical simulations are conducted using coal-rock dynamic similarity theory. The engineering prototype is simplified as a structure consisting of three layers: a coal seam, roof strata, and floor strata. On the basis of the coal-rock mass properties, loading conditions, and burst energy of the prototype, the similarity ratios for geometry and density are determined together with the dynamic similarity coefficient. The corresponding model parameters are then derived. Using these design parameters, a medium-scale physical analogue model is cast with materials of low strength and high brittleness. Impact loading tests under combined static and dynamic loads are then performed. The test results show that dynamic loading induces an instantaneous increase in stress at the top of the model. Spalling, block instability, and contraction of the roadway cross-section occur in the upper part of the left roadway rib near the roof. Acoustic emission energy also increases markedly, with shear cracks accounting for the largest proportion. These observations indicate that the model failure is dominated by shear spalling and block sliding. The numerical simulations show that the static similarity model produces more dispersed displacement responses, slower velocity growth, and weaker stress disturbance after dynamic loading. In contrast, the dynamic similarity model and the model based on analogue material parameters better reproduce the prototype response, especially in displacement concentration, abrupt velocity increase, and stress disturbance pattern. These results indicate that coal-rock dynamic similarity theory can effectively constrain dynamic loading energy, inertial response, and dynamic failure processes in physical modelling of coal burst. The theory is therefore suitable for physical simulation and parameter design of coal burst hazards triggered by dynamic loading. The findings provide theoretical and methodological support for applying dynamic similarity theory to physical similarity modelling of coal burst.

Key words: coal burst; dynamic similarity; coupled static-dynamic loading; physical simulation; numerical simulation

人类物质与能量飞速发展的现在,面临着浅部能源矿产资源与空间资源不足的问题,深部丰富资源的有效开发是解决这一急迫问题的必然选择^[1-2].随着煤炭资源开发向深部转移,采深增加、构造应力增强、厚硬覆岩大尺度破断及采掘扰动叠加,使煤岩动力灾害呈现更强的突发性和复杂性^[3-5].

冲击地压作为深部煤矿最具破坏性的动力灾害之一,通常表现为煤岩体在高静载储能基础上受到采动、断层滑移、顶板破断或局部扰动触发,短时间内发生失稳破坏并释放大量弹性能^[6-8].其灾害后果不仅表现为巷道断面急剧收缩、顶板下

沉、底鼓、帮部内移和支护系统破坏,还可能造成设备损毁和人员伤亡^[9-11].

物理相似模拟是揭示冲击地压发生机制的重要手段^[8,12-13].与现场观测相比,物理模型能够在可控边界条件下再现煤岩结构演化、应力集中、裂隙扩展和巷道破坏过程;与数值模拟相比,物理模型能够更直接地反映材料非均质性、结构面影响和动力加载下的真实破裂响应^[12,14-15].早期研究多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^[16-18]。

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^[19-21]。然而,冲击地压属于典型强动力灾害,仅满足几何、密度、强度和静态应力相似,难以保证模型与原型在惯性效应、动载传播、应变率、破坏持续时间和能量释放过程上的一致性,进而可能削弱模型对真实冲击破坏过程的再现能力^[22-23]。

因此,需要将加速度相似比作为核心控制参数,引入动力学相似准则系数以约束模型与原型之间的惯性响应和能量传递关系^[15,24]。本文以彬长矿区某冲击地压事件为工程背景,提取控制巷道动力失稳的地层结构、边界载荷和动载能量参数,依据煤岩动力学相似准则确定模型应力、能量、时间和煤岩层目标力学参数;在此基础上使用低强高脆的相似材料,开展动静载叠加物理模拟试验,并通过 UDEC 多工况数值模拟验证动力学相似理论的适用性。

1 原型抽象及关键参数确定

1.1 研究原型的抽象化选取

冲击地压物理相似模拟并非对现场全部地层、

构造和开采过程进行逐层等比例复原,而是需要在试验尺度内保留控制巷道动力失稳的关键结构单元、载荷边界和能量传递路径。受试验装置尺寸、相似材料制备能力和监测条件限制,本文以陕西彬长矿区某次巷道冲击显现为研究背景,将复杂地层条件抽象为“粉砂岩顶板-煤层-泥岩底板”三层结构。

从研究区域工程条件看,采深约为 580~680 m,具备深部开采高地应力环境;地应力测试表明水平应力显著高于垂直应力,水平应力为 33.87 MPa,为垂直应力的 2.20 倍,体现出明显的水平构造应力主导特征;煤层直接顶为厚约 14.7 m 的砂岩层,其上为厚约 34.2 m 的粉砂岩和粗砂岩顶板,煤层上方约 120 m 以上发育厚层洛河组砂岩顶板,厚硬覆岩大面积悬顶和回转加载为冲击失稳提供了重要结构条件;正断层切割厚硬覆岩并改变局部承载结构,使断层、区段煤柱、工作面 and 回风巷之间形成复杂的应力传递关系。这些表明事故区域具备冲击地压发生的冲击倾向性条件和应力条件。

因此,根据冲击显现巷道的基本条件以及地层柱状图,抽象出长 26 m,高 26 m,宽 16 m 的研究区域,巷道设计为高 4 m,宽 5.4 m。具体的研究设计如图 1 所示。

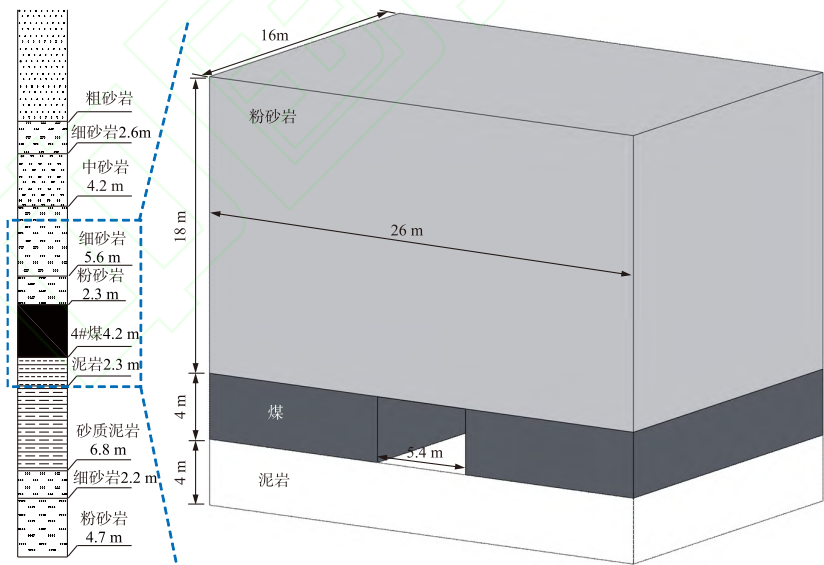


图1 试验原型的抽象化设计
Fig. 1 Schematic abstraction of the experimental prototype

如图 1 所示,模型中巷道布置于煤层中部,两侧保留煤体约束,上覆粉砂岩作为主要承载和动载传播层,下伏泥岩作为底板约束层。动载扰动作用于模型顶部偏左区域,而非直接作用于巷道内部,其目的在于模拟现场矿震应力波或顶板结构扰动经厚硬顶板传播后诱发巷道局部破坏的过程。

由此,本文研究原型概化为在高静载储能背景下,厚硬顶板受到局部动力扰动后,应力波和扰动能量向煤层巷道围岩传递,并诱发帮顶交界区破坏、块体剥落和巷道断面收缩。受模型尺度和试验可控性限制,本文未对现场中的断层、煤柱和非均匀地应力等因素进行实体化模拟,但可以通过

静载、动载能量与作用位置等条件进行等效反映。

1.2 动力学相似准则下的参数确定

冲击地压模型试验不仅需要满足几何尺寸和静态应力相似,还应保持破坏时间、应变率、动载能量和惯性响应等动力学控制量的相似。仅采用传统静力相似准则难以同时保证模型在这些动力学参数上与原型保持对应。

因此,本文依据冲击地压煤岩动力学物理模拟相似原理确定了模型的关键参数。文献[15]基于震动波传播理论推导提出了动力学相似准则系数 β ,如式(1)所示:

$$\begin{cases} \sigma_{dP} = \rho v_P v_{PP} = \frac{\rho v_P^2 \dot{\epsilon}_{\max}}{2\pi f} = \rho l a_d, \\ \beta = C_{a_d} = \frac{a_d}{a_d'} = C_{v_P}^2 C_{\epsilon} C_L^{-1} C_t, \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_{dP} 为震动传播动载; ρ 为介质密度; v_P 为P波传播速度; v_{PP} 为质点震动速度; $\dot{\epsilon}_{\max}$ 为应变率的极大值; f 为频率; l 为传播距离; a_d 为动力学加速度; C_t 为时间相似比; C_{a_d} 为动力学加速度相似比; C_{v_P} 为P波传播速度相似比; C_l 为传播距离相似比; C_{ϵ} 为应变率相似比。

由此确定了基本动力学详细准则方程组:

$$\begin{cases} C_T = \sqrt{\frac{C_L}{\beta}}, \\ C_{a_d} = \beta, \\ C_{\sigma} = C_L C_{\rho} \beta, \\ C_E = C_L C_{\rho} \beta, \\ C_{\epsilon} = \sqrt{\frac{\beta}{C_L}}, \\ C_{Q_d} = C_M C_L C_{a_d} = C_L^4 C_{\rho} \beta, \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_L 为几何相似比; 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_{Q_d} 为能量相似比; C_m 为质量相似比。

结合动力学相似准则系数与基础准则方程组,动力学加速度的相似比可以表示为式(3)的形式:

$$\beta = C_{a_d} = C_L C_T^{-2}. \quad (3)$$

冲击地压动载破坏过程具有明显的瞬态加载特征,应力-时间曲线斜率可用于表征煤岩体动力响应强弱。应力-时间曲线斜率 k 可表示为:

$$k = \frac{\sigma}{t}. \quad (4)$$

将动力学加速度相似比和应力相似比代入式(4),可得:

$$C_k = \frac{C_{\sigma} C_L \beta}{(C_L / \beta)^{1/2}} = C_{\rho} C_L^{1/2} \beta^{3/2}, \quad (5)$$

式中: C_k 为应力-时间曲线斜率的相似比。

当模型动力响应达到与原型相一致的力学极值边界时,可认为模型与原型的应力-时间曲线斜率保持一致,即:

$$C_k = C_{\rho} C_L^{1/2} \beta^{3/2} = 1. \quad (6)$$

由此可以推导出动力学相似设计下, β 应该满足:

$$\beta = C_{\rho}^{-2/3} C_L^{-1/3}. \quad (7)$$

同时,根据文献[15], β 应处于强冲击倾向性的约束范围内:

$$\begin{cases} \text{强冲击倾向性模型: } C_L^{-1} < \beta < C_L^{-\frac{1}{3}}, \\ \text{弱冲击倾向性模型: } C_L^{-\frac{1}{3}} < \beta < 1, \end{cases} \quad (8)$$

受动静组合物理模拟加载平台尺寸限制,模型尺寸确定为0.65 m×0.65 m×0.40 m(长×宽×高),几何相似比确定为40,结合相似材料的可实现范围,选择密度相似比为2。模型层位按原型顶底板结构进行简化,选取细砂岩、中砂岩、煤层和泥岩作为主要模拟层位。其中,粉砂岩层厚0.45 m,煤层厚0.1 m,泥岩层厚0.1 m;巷道宽0.135 m,高0.1 m。

由上述相似关系可确定原型与模型之间的强度、弹性模量、黏聚力、密度及边界载荷计算关系。表1给出了动力学相似准则下粉砂岩、煤层和泥岩的原型参数及模型目标参数。

表1 原型和动力学相似下模型的煤岩体基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of the coal-rock mass in the prototype and dynamically similar model

参数	粉砂岩		煤		泥岩	
	原型	模型	原型	模型	原型	模型
单轴抗压强度/MPa	65.00	4.06	30.00	1.88	50.00	3.13
抗拉强度/MPa	4.00	0.25	1.80	0.11	3.00	0.19
弹性模量/GPa	15.00	0.94	3.00	0.19	12.00	0.75
泊松比	0.25	0.25	0.26	0.26	0.30	0.30
黏聚力/MPa	12.00	0.75	3.00	0.19	8.00	0.50
内摩擦角/(°)	39.4	39.4	35.5	35.5	35.7	35.7
密度/(kg·m ⁻³)	2600	1300	1360	680	2400	1200

在模型加载方面，原型水平应力为 33.87 MPa，垂直应力为 15.40 MPa，折算为模型的水平应力为 2.12 MPa，垂直应力为 0.96 MPa。试验仪器的动载加载方式为由质量为 30 kg 的落锤自由落体产生，因此要根据原型动载源的能量来计算模型输入动载的大小。

现场监测到的震级 $M=1.6$ ，震动能量为 $2.9\times10^5\text{ J}$ ，为应力波传播至监测系统后的能量，并不等同于震源处或作用于巷道围岩前的衰减前实际能量。矿震应力波在煤系地层传播过程中会受到几何衰减、材料衰减和结构面散射等因素影响^[25-26]。

对于该类型冲击震动，可以采用震级能量关系来计算原型等效震源能量^[25,27]：

$$\lg E_0=1.5M_L+4.8,$$

(9)

式中： E_0 为等效震源能量，J； M_L 为里氏震级。

根据震级-能量关系得到原型等效震源能量为 $1.58\times10^7\text{ J}$ ，结合动力学能量相似比，模型所需有效动载输入能量为 15.45 J。该能量为传入模型的有效能量，而非落锤自由下落产生的直接势能。

本试验采用落锤冲击方式施加动载，落锤和模型之间垫有钢制传力板，传力板能使动载作用有效传导进模型中，但会因为落锤与钢板之间的接触反射、波阻抗不匹配、声热耗散等方式造成能量损失，只有部分能量透射进入下部介质。则输入的有效能量需要满足如下方程组^[28-30]：

$$\begin{cases} T_E=\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2}\approx\frac{4r}{(1+r)^2}, \\ Z=\rho c, \\ \eta=T_E\eta_1\eta_2, \\ E_{\text{eff}}=\eta E_h=\eta mgh, \end{cases}$$

(10)

式中： T_E 为界面能量透射系数； Z 为介质的波阻抗，下标 1,2 表示不同介质； c 为应力波传播速度； η 为综合有效能量输入系数； E_{eff} 为有效输入能量； E_h 为落锤输入能量； m 为落锤的重量； g 为重力加速度； h 为落锤自由落体的高度。

因此，当传力钢板尺寸为 100 mm×100 mm×20 mm(长×宽×厚)时，考虑能量耗散，应使落锤的落高为 30 cm，满足动力学相似准则下原型矿震能量折算后的模型加载要求。

综上，确定了动力学相似下模型的边界条件与动载作用参数，如表 2 所示。

表 2 原型和动力学相似下模型的加载参数

Table 2 Loading parameters of the prototype and dynamically similar model

加载参数	原型	模型
水平应力/MPa	33.87	2.12
垂直应力/MPa	15.4	0.96
动载	震源能量 $1.58\times10^7\text{ J}$	30 kg 重锤落高 30 cm， 经传力钢板衰减后约为 15.45 J

2 相似模型的制备与试验设计

2.1 制备过程

灾变地层模拟材料是物理模型试验能否有效再现煤岩动力灾害的基础。文献[31]关于煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料的研究指出，深地工程模拟材料正从单相、单场响应向多相、多场耦合响应发展；对于冲击地压等动力灾害，仅用单轴压缩强度评价材料性能已难以满足试验要求，还需关注材料在低强度条件下的脆性破坏、能量释放和多场响应能力。近年来，低强度、高脆性和高冲击倾向性相似材料的研制也为冲击地压物理模拟提供了新的材料基础^[8,32-33]。

相似材料的配置需满足：强度可调，使煤层、砂岩顶板和泥岩底板分别达到动力学相似准则确定的目标强度；脆性可控，使模型煤岩体在动静载叠加下能够发生突发破裂，而不是长时间塑性压密；层间差异明确，使顶板、煤层和底板在强度、刚度和破坏模式上保持原型差异；施工稳定，满足模型分层浇筑、养护和后续加载需求。因此，本研究选用安徽理工大学深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室研制的低强高脆相似材料，以满足模型低强度、脆性破坏以及层间力学差异可控的试验需求。

相似模型浇筑时，首先按层位分别称取原材料，并进行干料混合、加溶剂用搅拌机均匀拌合；随后按照模型设计层厚进行分层浇筑。每一层浇筑完成后，使用振捣器消除材料中的气泡，并静置 30 min 确保达到分层。模型浇筑完成后进行整体养护，使各层材料达到后续动静载叠加试验所需的成型强度和结构完整性。模型制作基本过程如图 2 所示。

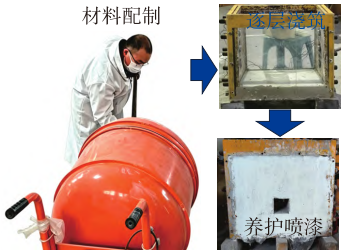


图 2 相似模型制作的基本过程

Fig. 2 Basic procedure for fabricating the similarity model

相似材料的应力-应变曲线如图 3 所示,1~3 号为煤层相似试样、11~13 号为泥岩相似试样、21~23 号为粉砂岩相似试样.可以看出,3 类材料的峰值强度呈粉砂岩>泥岩>煤层的分级特征,与原型岩层强度差异一致.煤层、泥岩、粉砂岩的单轴压缩试验峰值强度分别约为 1.8~2.0,2.8~3.4 和 4.0 MPa,结合动力学相似准则下的目标参

数可知,所制备相似材料的单轴抗压强度总体处于设计值附近,能够满足模型中不同岩层强度分级和力学差异表达的要求.虽然同类试样之间存在一定离散性,但其主要来源于相似材料拌和均匀性、成型密实度、端面平整度及内部微孔隙差异,属于相似材料物理试验中的常见现象,不影响其整体力学分级关系.

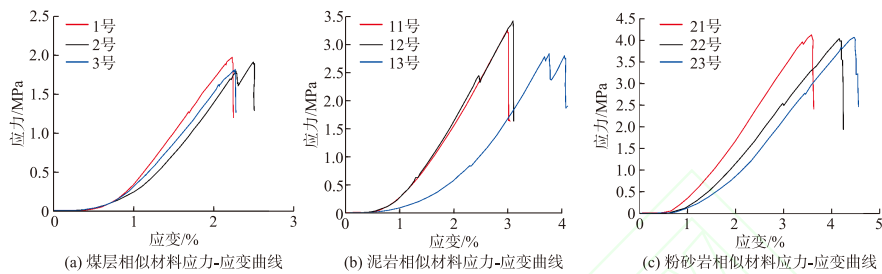


图 3 相似材料的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of analogue materials

综上,本文配制的煤层、泥岩和粉砂岩相似材料在强度水平、应力-应变曲线形态方面能够较好地满足动力学相似模型试验要求.证明相似材料配比具有合理性,可为后续动静载叠加物理相似模拟试验提供可靠的材料基础.

2.2 物理相似模拟试验设计

为检验动力学相似参数能否指导冲击地压物理模型试验,本文构建中尺度动静载叠加物理模型.模型尺寸为 0.65 m×0.65 m×0.40 m,巷道尺寸为 0.135 m×0.1 m×0.40 m.模型按粉砂岩、煤层和泥岩这 3 个层位分层铺设,用于表征原型厚硬顶板、煤层和软弱底板之间的主要承载关系.巷道布置于煤层中部,以巷道围岩作为重点监测对象.

试验首先施加侧向和垂向静载,使模型达到相对稳定状态;随后停止静载增量加载并施加重锤动载扰动.动载由 30 kg 重锤从落高为 30 cm 处自由落体产生,用于模拟高静载背景下短时动载触发冲击失稳的过程.试验设计如图 4 所示.试验现场的整体布局见图 5.

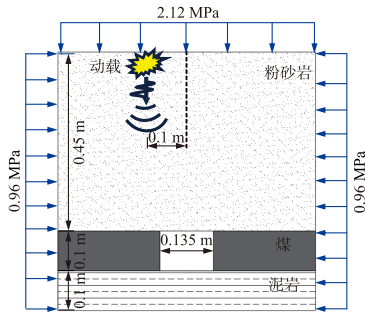


图 4 相似模拟试验的设计示意

Fig. 4 Schematic design of the similarity simulation test

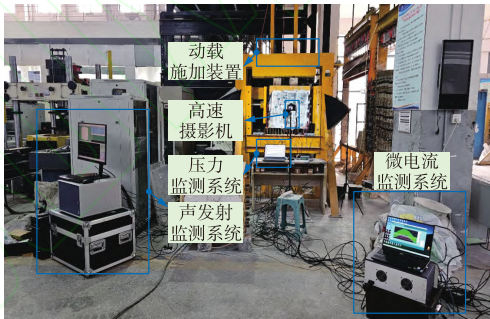


图 5 物理相似模拟试验的整体布局

Fig. 5 Overall layout of the physical similarity simulation test

试验采用压力监测、声发射和微电流系统进行多参量监测.压力测试用于记录模型加载过程中的应力演化和动载后的应力跃升;声发射用于表征裂纹活动强度、事件定位和能量释放;微电流用于捕捉不同部位煤岩体在受载破裂过程中的电响应时序.3 种主要监测手段如图 6 和图 7 所示.

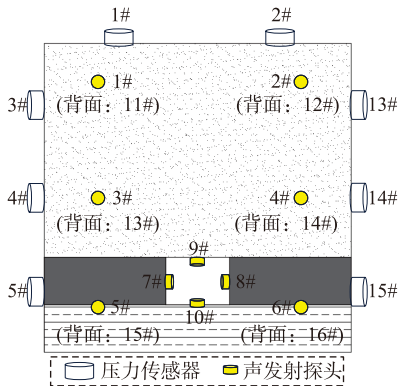


图 6 相似试验压力传感器和声发射探头的布置示意

Fig. 6 Schematic layout of pressure sensors and acoustic emission probes in the similarity test

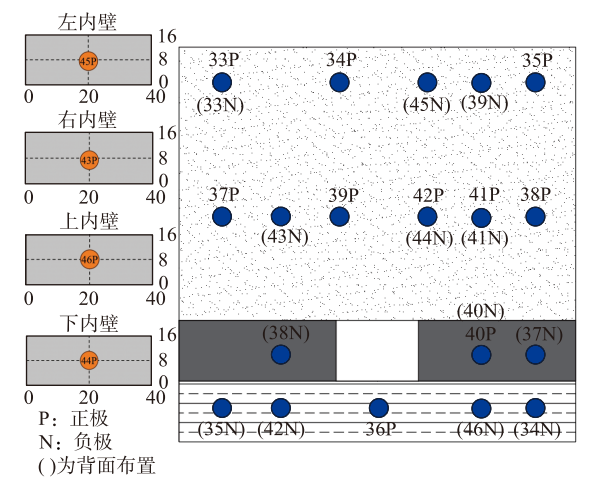


图 7 相似试验微电流电极片的布置示意

Fig. 7 Schematic layout of microcurrent electrode plates in the similarity test

3 动静载叠加物理模拟试验分析

3.1 应力响应特征分析

压力监测数据截取了顶部加载至动载作用后应力下降并趋于平稳的关键阶段进行分析。如图 8 的压力曲线所示,试样顶部应力在前期分级加载后进入相对稳定阶段,动载施加前维持在约 1.1~1.3 MPa;侧向压力呈现明显分层特征,表现为侧面上部约为 2.7~2.9 MPa、侧面中部约为 2.3~2.5 MPa、侧面下部约为 1.8~1.9 MPa,表明模型在动载施加前已形成较稳定的高静载储能状态和明显的侧向约束效应。动载作用时,顶部压力瞬时升至约为 4.0~4.2 MPa,随后快速下降并缓慢衰减,表明动载输入引起顶部围岩应力突增及后续卸压破坏。动载后,侧面上部和中部压力略有下降,侧面下部压力小幅升高,反映出模型内部承载结构发生调整,应力由顶部及中上部向下部或剩余承载区转移。模型破坏过程具有明显的“静载储能-动载触发-裂纹扩展-应力释放”特征。

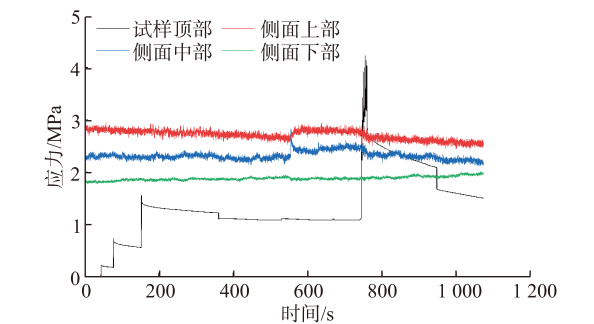


图 8 相似模拟试验的应力监测分析

Fig. 8 Stress monitoring analysis of the similarity simulation test

3.2 声发射响应与破坏模式

声发射直接反映了试样内部的裂纹萌生、扩展和能量释放位置。声发射事件定位结果如图 9 所示,由图可见,1350 s 动载施加前,模型内部已出现一定数量的声发射事件,但事件能量整体较低,最大能量约为 1155 J,主要反映静载加载过程中的微裂纹萌生和局部损伤累积。事件空间分布集中于巷道顶板及上覆岩层附近,说明巷道上方围岩在静载阶段已成为主要损伤积累区。1350 s 施加顶部动载后,声发射能量等级显著提高,最大能量增至约 9850 J,高能事件数量明显增加,并主要分布于巷道上方及上覆岩层中。该结果表明,顶部动载激活了静载阶段已积累损伤的顶板及邻近围岩,使模型由低能微裂纹扩展阶段转入高能裂纹扩展和块体失稳阶段。

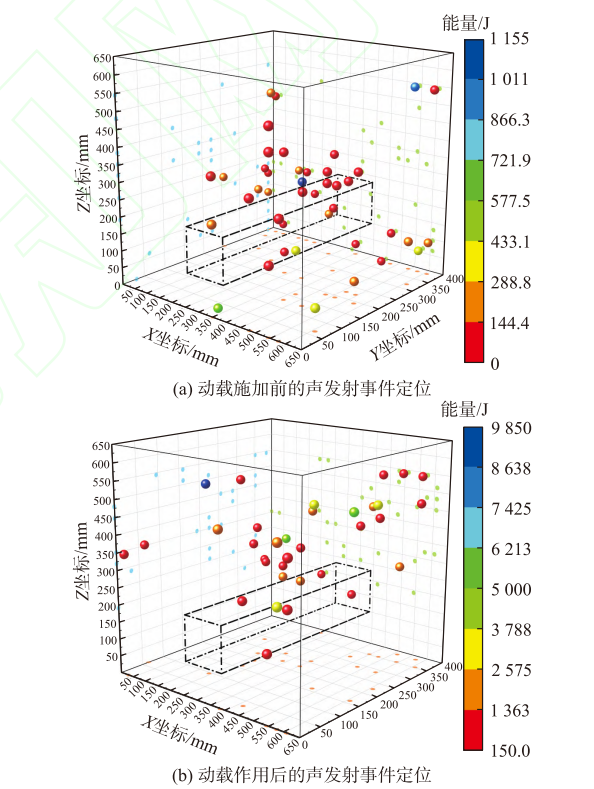


图 9 相似模拟试验的声发射事件定位情况分析

Fig. 9 Analysis of acoustic emission event location in the similarity simulation test

声发射裂纹类型判别结果如图 10 所示,试验过程中剪切裂纹占比为 85.7%,张拉裂纹占比为 14.3%,模型破裂模式以剪切破坏为主。多数分布在低 A_F 、低 R_A 区域,说明裂纹活动主要表现为压剪破坏、层间错动或煤岩界面滑移;少量集中于低 R_A 、高 A_F 区域,可能对应顶板弯曲下沉或局部裂纹张开。结合声发射定位、压力响应的监测结果可知,动载作用后模型并非发生单纯张拉开裂,而是

在高静载储能基础上形成以剪切失稳为主、张拉破坏参与的复合动力破坏模式。

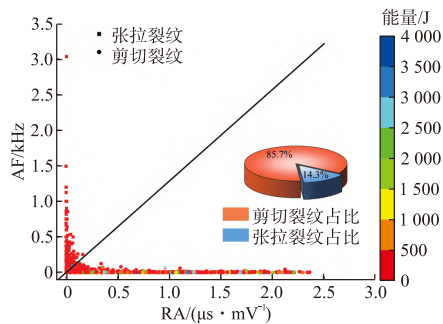


图 10 相似模拟试验的声发射裂纹类型分析

Fig. 10 Analysis of acoustic emission crack types in the similarity simulation test

3.3 微电流响应特征分析

微电流监测在煤岩相似模拟里通常用来捕捉受载破裂过程中由裂纹扩展、颗粒摩擦、界面滑

移、离子迁移及电荷重新分布引起的弱电流变化。特征通道的微电流响应情况如图 11 所示。图中绿色点划线为 1 350 s 动载施加时刻,用于对比各通道在动载前后的响应差异。可以明显看出,1 350 s 施加顶部偏左的动载后,微电流信号出现明显分区响应特征。通道 43 表现为电流基值抬升,说明侧帮区域在动载后进入持续损伤和应力重分布状态;通道 45 由稳定高值迅速衰减,并在后期出现负向突变,表明靠近动载影响侧的导电路径可能发生破坏或电荷极性反转;通道 39 在动载后出现高幅密集振荡,是裂纹活动最强烈的监测通道;通道 38 则表现为延迟型脉冲增强,反映动载扰动向远端或次级损伤区传播。整体来看,各通道微电流并非同步增强,而是呈现侧帮先响应、顶板强烈活化、远端滞后波动的时序特征,反映了动载扰动在模型内部的分区传递和渐进破坏过程。

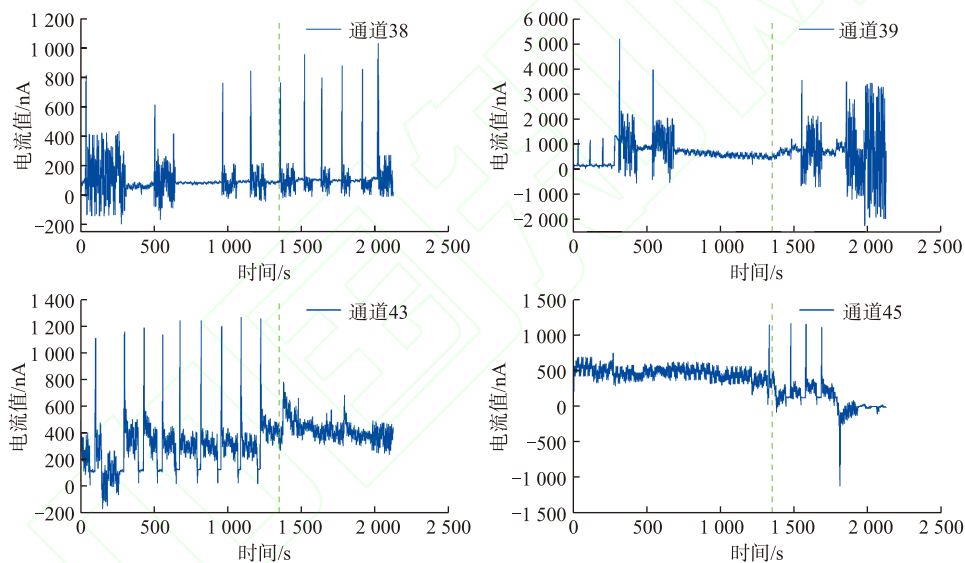


图 11 相似模拟试验的微电流响应特征分析

Fig. 11 Analysis of microcurrent response characteristics in the similarity simulation test

3.4 模型破坏特征分析

由于动载后模型表面局部脱落,散斑区域发生缺失,DIC 相关匹配稳定性降低,难以连续表征巷道围岩变形全过程。因此,本节主要依据高速摄像图像和破坏照片分析模型宏观破坏特征。由图 12 的巷道破坏情况可见,动载施加前巷道断面整体保持完整,但左帮靠近顶板区域已出现局部松动,说明静载作用下帮顶交界处首先发生损伤积累。动载作用初期,左帮上部靠近顶板处出现明显剥落,局部块体从帮顶交界区域脱离;随后破碎块体向巷道空间内快速运动,巷道断面出现瞬时收缩。最终破坏形态表现为左帮上部剥落、顶帮交界

区块体失稳和破碎块体堆积,巷道有效断面明显减小。该过程表明,模型破坏并非巷道围岩整体均匀压缩,而是以左帮上部靠近顶板区域的局部破坏为起点,在动载扰动下发生渐进扩展和瞬态失稳。

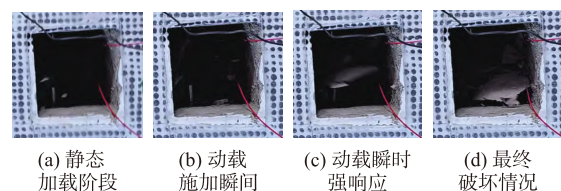


图 12 相似模拟试验的模型破坏特征分析

Fig. 12 Analysis of model failure characteristics in the similarity simulation test

左帮上部靠近顶板区域的剥落破坏,与压力曲线中动载后顶部应力突增并快速衰减相对应,说明顶部动载触发后,模型承载结构发生卸压和局部失稳.声发射定位中高能事件主要分布于巷道上方及邻近围岩, A_F-R_A 结果显示剪切裂纹占比为85.7%,表明该破坏以剪切剥落和块体滑移为主.微电流监测中部分通道在动载后出现基值突变和脉冲增强,也反映了局部裂纹扩展及导电路径破坏.多源监测结果共同说明,模型在静载储能基础上受动载触发后,主要沿帮顶交界区发生局部剪切失稳,并进一步发展为巷道断面收缩和块体弹射.

从时序关系看,动载施加后,模型顶部压力首先出现瞬时突增并快速衰减,表明顶部扰动已传入模型并诱发承载结构卸压.随后声发射高能事件明显增多,说明静载阶段积累的顶板及邻近围岩损伤被动载激活;微电流通道出现基值突变、高幅振荡和延迟脉冲响应,反映裂纹扩展、界面滑移和导电路径破坏逐步发生.压力突增、声发射能量增强、微电流突变和宏观剥落破坏在时间上具有对应关系,共同揭示了动载输入、应力突变、裂纹活化、电响应异常和块体剥落依次关联的动力破坏历程.

4 数值模拟对比及动力学相似有效性验证

4.1 原型-模型-试验的破裂现象对比

为从破裂现象层面验证动力学相似理论的有效性,本文采用 UDEC 离散元数值模拟方法,对原型工况、静力学相似煤岩体参数模型、动力学相似煤岩体参数模型以及相似材料参数模型共4种工况进行对比分析.考虑到冲击地压巷道破坏具有明显的局部失稳、块体滑移和顶帮交界区剥落特征,本节主要选取动载作用后巷道围岩破坏阶段的位移云图作为对比依据,重点分析不同参数体系下巷道围岩的破坏位置、位移集中区域、破坏扩展方向和断面收缩特征.动载作用过程如图13所示.图中黄色区域表示顶部动载施加位置及主要作用范围,动载由模型顶部偏左区域输入后,经上覆粉砂岩层向煤层巷道围岩传播.

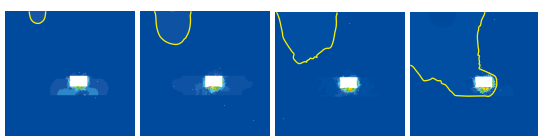


图13 动载传播与作用过程示意

Fig. 13 Schematic of dynamic load propagation and action process

从图14原型的数值模拟最大位移云图结果看,动载作用后巷道围岩位移并非呈全断面均匀分布,而是表现出明显的局部集中破坏特征.位移高值区主要出现在巷道下部及下侧围岩,最大位移达到约1.235 m,说明在高静载储能和瞬时动载扰动共同作用下,巷道底部及下帮围岩发生了显著的块体错动和局部失稳.巷道顶板及两帮虽然也出现了一定范围的裂隙扩展和块体松动,但其位移幅值整体低于巷道下部高值区,表明最大位移云图反映的是破坏后的累计变形优势区域,而不完全等同于初始起裂位置.

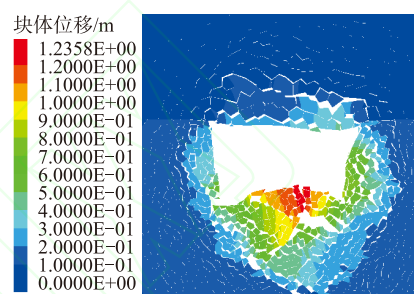


图14 原型数值模拟巷道破坏的位移云图

Fig. 14 Displacement contour of roadway failure in the prototype numerical simulation

从图15所示的3种情况下模拟的对比结果来看,静力学相似模型中,位移高值区主要呈较为分散的下部变形,巷道周边虽然形成一定范围的扰动区,但高值区集中程度较弱,局部突增不明显.该结果说明静力学相似参数能够在一定程度上反映开挖后围岩的整体变形趋势,但对动载作用下的局部失稳、块体快速错动和能量集中释放过程刻画不足,导致模型破坏形态相对平缓.

动力学相似模型的位移分布与原型更为接近.动载作用后,巷道下部及右下侧区域出现明显位移集中,高值区由巷道轮廓附近向围岩内部扩展,局部呈现橙红色突增区,说明模型能够较好再现原型中动载诱发的局部块体失稳特征.与静力学相似模型相比,动力学相似模型不仅位移集中程度更强,而且破坏区边界更清晰,巷道周边裂隙扩展和块体错动更充分,表明动力学相似准则对动载能量、惯性响应和破坏时间尺度的约束能够提高模型对冲击破坏过程的模拟能力.

相似材料参数标定模型的破坏形态与动力学相似模型具有较好一致性.其最大位移同样集中在巷道下部及右下侧区域,并在巷道周边形成较完整的变形集中带,说明实际制备并经力学测试标定后的相似材料能够基本继承动力学相似设计

所要求的动力破坏响应. 与动力学相似理论参数模型相比, 相似材料参数模型的局部高值区范围和峰值位置存在轻微差异, 这主要反映了实际材料参数与目标相似参数之间不可避免的偏差, 但其整体破坏模式并未发生根本改变.

综合来看, 静力学相似模型主要表现为较弱、较分散的变形响应, 难以充分反映原型巷道在动载

扰动下的局部位移突增和块体失稳特征; 动力学相似模型则在位移集中位置、破坏扩展形态和局部失稳特征上与原型更一致; 相似材料参数标定模型进一步证明, 基于动力学相似准则制备的相似材料在数值层面具有可实现性. 该对比表明, 动力学相似理论相较于传统静力学相似方法, 更适用于模拟冲击地压条件下巷道围岩的动力破坏过程.

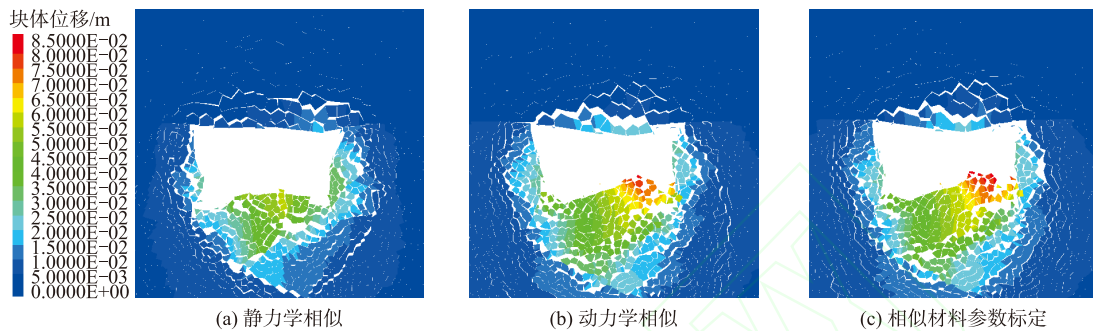


图 15 静力学相似、动力学相似与相似材料参数标定三种数值模拟情况下巷道破坏的位移云图

Fig. 15 Displacement contours of roadway failure under three numerical simulation cases: static similarity, dynamic similarity, and similar-material parameter calibration

将 4 种工况进行综合对比可知, 原型工况为模型相似性评价提供了动力破坏基准. 静力学相似煤岩体参数模型能够反映一定的静载变形和局部扰动, 但位移集中程度较弱、局部突变特征不明显, 对动载触发下的块体失稳再现不足; 动力学相似煤岩体参数模型在破坏位置、位移集中和局部失稳特征上与原型更加接近; 相似材料参数模型则进一步说明动力学相似参数在实际材料条件下具有可实现性. 由此表明, 动力学相似理论不仅能够用于模型参数折算, 而且能够在破裂现象层面更有效地保持原型冲击失稳的主要动力学特征.

结合物理相似模拟试验观察, 模型巷道在动载作用后主要表现为帮顶交界区破坏、局部块体剥落和巷道断面收缩. 该破坏形态与数值模拟中动力学相似参数模型和相似材料参数模型的位移集中区域具有较好对应关系, 说明动载作用下巷道破坏并非由均匀压缩控制, 而是由高静载储能背景下的局部动力扰动触发, 进而形成顶板-帮部耦合失稳和块体滑移破坏. 数值模拟与物理试验在破坏部位和破坏模式上的一致性, 为动力学相似理论用于冲击地压相似模拟提供了现象层面的验证依据.

4.2 速度-应力监测结果对比分析

为进一步验证动力学相似理论对冲击地压动力致灾过程的适用性, 本文对原型、静力学相似准

则直接计算模型、动力学相似准则直接计算模型、静力学相似煤岩体参数模型、动力学相似煤岩体参数模型以及相似材料参数模型共 6 种工况进行了动静载叠加作用下的主要参数对比分析. 重点选取动载作用过程中的最大速度和巷道围岩应力作为评价指标. 其中, 最大速度用于表征模型在动载输入后的动力响应强度, 巷道围岩应力用于反映动载作用下顶板承载结构的应力扰动与传播特征.

监测点围绕巷道轮廓布置, 重点选取顶板、两帮及底板的中部为典型测点, 记录动载作用前后的应力时程; 最大速度则提取模型计算过程中巷道围岩区域的速度峰值, 用于表征局部块体运动和动力失稳强度. 不同工况采用相同的监测位置和统计方式, 以保证结果具有可比性.

6 种工况下数值模拟的最大速度监测与计算情况如图 16 所示. 从最大速度监测结果看, 6 种工况在加载初期均经历了速度调整阶段, 随后随静载持续作用逐渐进入速度增长过程. 但不同相似准则下速度响应差异明显. 静力学相似相关工况的速度曲线整体处于较低水平, 曲线增长相对平缓, 动载作用阶段未出现显著的瞬态速度突增, 说明静力学相似准则虽然能够保证几何尺寸、密度、强度和静态应力水平的基本对应, 但对动载扰动下的惯性响应和能量瞬时释放约束不足, 导致模型动力响应被明显削弱.

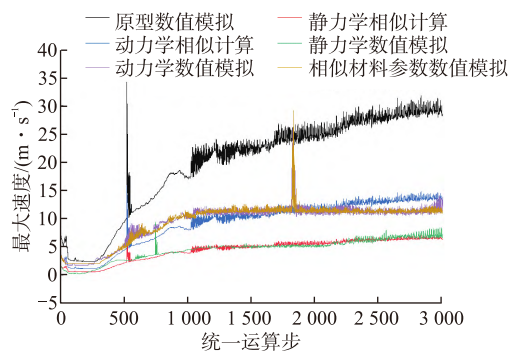


图 16 动静载叠加作用下各种工况的最大速度监测情况
Fig. 16 Monitoring results of maximum velocity under various dynamic-static coupled loading conditions

相比之下,动力学相似相关工况在速度曲线上表现出更强的动力响应特征. 动载作用前,动力学相似准则直接计算模型、动力学相似煤岩体参数模型以及相似材料参数模型的速度水平已明显高于静力学相似相关工况;动载作用后,相关曲线出现突增峰值和持续振荡,表明模型在动静载叠加条件下产生了更明显的瞬态运动响应. 其中,动载作用附近出现的尖峰说明冲击扰动能够在模型中迅速转化为围岩运动响应,反映出较强的能量释放和局部失稳特征. 该现象与冲击地压发生过

程中围岩速度突变、块体快速错动和动力失稳的基本特征相一致.

从速度曲线的后期演化看,静力学相似下虽然也存在一定增长趋势,但整体波动幅值较小,曲线变化较为平缓;动力学相似相关工况则在动载后保持较高速度水平,并伴随明显振荡. 这表明动力学相似准则并非仅改变动载瞬间的峰值响应,而是能够影响动载输入后的能量释放持续过程. 相似材料参数模型与动力学相似模型的速度响应趋势较为接近,说明实际制备并经参数标定后的相似材料能够较好继承动力学相似设计所要求的速度响应特征.

6 种工况下数值模拟的巷道围岩应力监测情况如图 17 所示. 从巷道围岩应力监测结果看,各测点在动载作用前总体处于相对稳定状态,说明模型已完成初始静载平衡. 动载施加后,局部放大图中各工况应力曲线均出现不同程度扰动,表明动载已传递至巷道围岩并引起应力重新分配. 但不同相似准则下应力扰动幅度和波动形式存在明显差异. 静力学相似相关工况应力扰动幅值较小,曲线整体较平稳,说明其对动载引起的应力波动和局部应力重分布反映不充分.

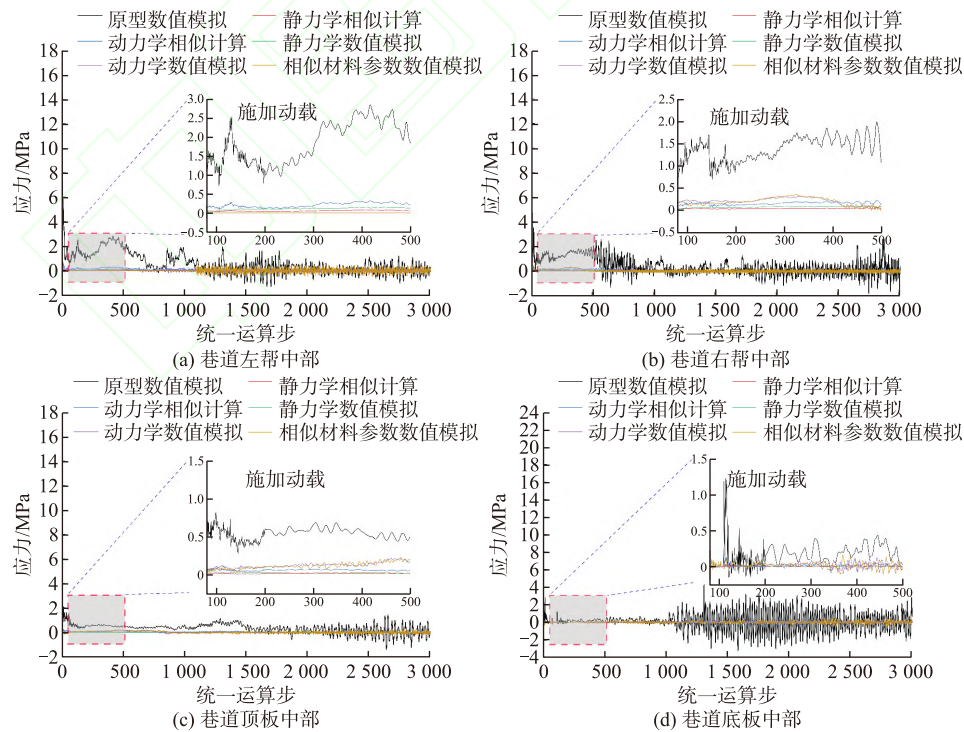


图 17 动静载叠加作用下各种工况的巷道围岩应力监测情况

Fig. 17 Stress monitoring results of roadway surrounding rock under various dynamic-static coupled loading conditions

动力学相似相关工况在动载阶段的应力响应更加敏感,局部放大曲线中可见更明显的应力波

动、峰值扰动和持续振荡. 部分测点在动载后出现应力快速上升或波动增强,说明动载作用使巷道

围岩承载结构发生了明显调整,应力集中、卸压和再分配过程更加充分.尤其是动力学相似模型与相似材料参数模型在多个测点上表现出相近的扰动形态,说明动力学相似参数体系不仅能够控制模型的速度响应,也能够较好约束巷道围岩的应力响应过程.

最大速度与巷道围岩应力响应具有一致的动力学指示意义.速度响应较强的动力学相似相关工况,在应力监测中同样表现出更明显的动载扰动和持续振荡;速度响应较弱的静力学相似工况,其应力曲线也相对平缓.这说明动载作用下的速度突增并非孤立的运动现象,而是与巷道围岩内部应力重分布和能量释放过程密切相关.动力学相似准则通过同时约束动载能量、时间尺度、应力水平和惯性效应,使模型能够在动载作用后形成更接近原型的动力响应过程.

综合两类监测结果可知,静力学相似准则主要适用于静态应力和强度折算,对冲击地压动载触发过程中的速度突变、应力波动和能量释放刻画不足,容易低估模型的动力破坏强度.动力学相似准则则将动载能量和惯性响应纳入相似关系,使模型在动静载叠加作用下表现出更高的速度峰值、更强的应力扰动和更明显的持续振荡特征.相似材料参数模型与动力学相似模型在速度和应力响应上的一致性进一步表明,按动力学相似理论确定的参数体系具有较好的可实现性和验证效果.由此说明,动力学相似理论较传统静力学相似方法更适用于冲击地压动载触发、能量释放及巷道围岩动力失稳过程的模拟.

5 结论

1) 基于煤岩动力学相似准则建立了厚硬顶板控制下巷道冲击失稳的相似模型参数体系.原型加载条件经相似关系折算后,模型水平应力为 2.12 MPa、垂直应力为 0.96 MPa;原型等效震源能量为 1.58×10^7 J,模型所需有效输入动载能量为 15.45 J,可通过 30 kg 落锤在 0.30 m 落距下经传力钢板作用实现.

2) 使用的相似材料能够满足动力学相似模型的强度分级要求.煤层、泥岩和粉砂岩相似材料峰值强度分别约为 1.8~2.0、2.8~3.4 和 4.0 MPa,呈现粉砂岩>泥岩>煤层的强度梯度,与原型岩层力学性质分级一致;试样破坏以竖向裂纹扩展、片状剥落和块体崩落为主,表现出明显脆性破坏

特征.

3) 动静载叠加作用下,模型巷道破坏主要表现为左帮上部靠近顶板区域剥落、帮顶交界区块体失稳和巷道断面收缩.动载作用时,模型顶部应力由约 1.2 MPa 瞬时升至约 4 MPa 后快速衰减;声发射最大能量由动载前约 1155 J 增至动载后约 9850 J,剪切裂纹占比为 85.7%,表明模型破坏以剪切剥落和块体滑移为主.微电流响应中的基值突变和脉冲增强进一步反映了裂纹扩展、导电路径破坏和应力重分布过程.

4) 数值模拟结果表明,动力学相似模型较静力学相似模型更能反映动载触发下的巷道围岩动力响应.静力学相似模型位移响应较分散、速度增长较平缓、动载后应力扰动较弱;动力学相似模型在位移集中位置、速度突增和应力扰动形态上与原型更接近.相似材料参数模型与动力学相似模型在破坏位置、最大速度演化和巷道围岩应力响应上具有较好一致性,说明煤岩动力学相似理论对冲击地压物理模拟参数设计具有较好的指导作用.

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 technological problems in China [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825-1845.
- [2] 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.
- [3] 赵兴东,曹学文,王 昌,等.深部硬岩矿山岩爆现状、预测与防治研究进展[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):559-580.
Zhao Xingdong, Cao Xuewen, Wang Chang, et al. Research progress on rockburst status, prediction, and prevention in deep hard rock mines [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 559-580.
- [4] 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.
- [5] Cai W, Dou L M, Si G Y, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses [J]. Engineering, 2021, 7(5): 687-700.
- [6] 潘一山, 宋义敏, 刘 军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081-2095.
- Pan Yishan, Song Yimin, Liu Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081-2095.
- [7] 曹安业, 梁颖欣, 杨 旭, 等. 人工智能赋能下的冲击地压监测预警方法研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2026, 55(3): 581-600.
- Cao Anye, Liang Yingxin, Yang Xu, et al. Research progress on monitoring and early warning methods of rockburst in coal mines empowered by artificial intelligence [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 581-600.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杨 磊, 高富强, 卢志国, 等. 动载扰动巷道再现冲击地压模拟试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(3): 57-66.
- Yang Lei, Gao Fuqiang, Lu Zhiguo, et al. Experimental rockburst simulation of roadway under dynamic disturbance [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(3): 57-66.
- [12] 齐庆新, 王守光, 王美美, 等. 煤矿冲击地压数值物理模拟方法与应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(1): 1-13.
- Qi Qingxin, Wang Shouguang, Wang Meimei, et al. Research on numerical-physical simulation methods and applications for coal mine rock burst [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2025, 52(1): 1-13.
- [13] Kan Z H, Dou L M, Cai W, et al. Establishment and analysis of impact coal physical analog similarity criteria in coal burst [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(7): 7605-7630.
- [14] Wang Q, He M C, Li S C, 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.
- [15] 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.
- [16] 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, Lyu 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.
- [17] 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.
- [18] Feng X T, Li Z W, Mei S M, 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.

- [19] 唐巨鹏, 张 昕, 潘一山, 等. 深部巷道煤与瓦斯突出及冲击演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1081-1092.
Tang Jupeng, Zhang Xin, Pan Yishan, et al. Experimental study on outburst and impact evolution characteristics of coal and gas in deep roadways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1081-1092.
- [20] Nan T Q, Dou L M, Chai Y J, 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.
- [21] 王爱文, 潘一山. 深部残采区域下冲击危险易突出煤层开采的相似模拟试验[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 578-584.
Wang Aiwen, Pan Yishan. Similar simulation test on mining of rockburst danger and easy outburst coal seam under deep residual area [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 578-584.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 朱建波, 郑福润, 谢和平, 等. 煤矿矿震应力波传播衰减理论模型及应用研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(2): 22-35.
Zhu Jianbo, Zheng Furun, Xie Heping, et al. A theoretical model of stress wave propagation attenuation in mining-induced seismicity and field application [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2): 22-35.
- [26] 窦林名, 曹晋荣, 曹安业, 等. 煤矿矿震类型及震动波传播规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 23-31.
Dou Linming, Cao Jinrong, Cao Anye, et al. Research on types of coal mine tremor and propagation law of shock waves [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 23-31.
- [27] Richter C F. An instrumental earthquake magnitude scale [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1935, 25(1): 1-32.
- [28] Johnson K L, Keer L M. Contact mechanics [J]. Journal of Tribology, 1986, 108(4): 659.
- [29] Hopkins H G. Wave motion in elastic solids [J]. Physics Bulletin, 1976, 27(1): 30.
- [30] Achenbach J D, Thau S A. Wave propagation in elastic solids [J]. Journal of Applied Mechanics, 1974, 41(2): 544.
- [31] 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.
- [32] Li Y H, Bai J B, Wang X Y, et al. Development and performance study on low strength and high rockburst tendency similar simulation material of coal [J]. Construction and Building Materials, 2023, 404: 133230.
- [33] Huang J, Xia Y Y, Zhang Y H, et al. Experimental study of low-strength, high-brittleness material for rockburst simulation; mechanical and non-mechanical properties [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84(5): 254.

(责任编辑 沈春妮)