

岩石力学与工程学报
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering
ISSN 1000-6915, CN 42-1397/O3

《岩石力学与工程学报》网络首发论文

题目：冲击地压物理相似模拟中煤的冲击倾向性影响规律研究
作者：鞠明和，姚宝山，窦林名，蔡武，曹安业，阚梓豪
DOI：10.13722/j.cnki.jrme.2024.0441
收稿日期：2024-06-06
网络首发日期：2024-09-13
引用格式：鞠明和，姚宝山，窦林名，蔡武，曹安业，阚梓豪. 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/OL]. 岩石力学与工程学报.
<https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2024.0441>



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。

冲击地压物理相似模拟中煤的冲击倾向性影响规律研究

鞠明和^{1,2}, 姚宝山², 窦林名³, 蔡武⁴, 曹安业³, 阚梓豪³

(1. 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; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 物理相似模拟是研究冲击地压问题的重要方法之一, 其相似材料的合理选型是巷道或采场采掘扰动响应过程有效模拟的重要前提。因此, 通过相似理论与数值模拟方法综合研究冲击地压物理相似模拟中不同冲击倾向性原型煤和相似煤材料的破坏特征及几何相似比关联性, 推导获得了基本参数、阻尼、能量及冲击倾向性指标的相似条件, 基于此借助连续-非连续模拟方法开展了不同冲击倾向性煤的煤样和煤巷模型冲击破坏特征几何相似比关联性研究。研究表明: 强冲击倾向性煤样呈脆性冲击破坏, 无冲击倾向性煤样峰后为应变软化形式的静态破裂; 对于几何相似比分别为 2, 5, 10, 20 的煤样相似模型, 其单轴抗压强度模拟值与理论值基本一致, 冲击能量指数随几何相似比增大先减小再趋稳, 煤样的碎裂程度和碎屑动能均随几何相似比增大而下降; 强冲击倾向性煤体的原型煤巷开挖有动态破坏过程, 且随着几何相似比增大, 巷帮煤体动能逐渐减小, 煤巷由动态破坏最终转变为静态破坏。最后, 讨论了物理相似模拟中动力破坏行为的几何相似比关联性原因并给出了冲击地压物理相似模拟材料选型及冲击现象模拟条件的一些建议。研究对开展冲击地压物理相似模拟研究具有指导意义。

关键词: 采矿工程; 冲击地压; 物理相似模拟; 冲击倾向性; 几何相似比; 动力显现

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2024)00 - 0000 - 16

Influence of coal bursting liability on physical similarity simulation of coal/rock burst

JU Minghe^{1,2}, YAO Baoshan², DOU Linming³, CAI Wu⁴, CAO Anye³, KAN Zihao³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 4. State Key Laboratory of Coal Exploration and Intelligent Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Physical similarity simulation is one of the important methods for studying coal/rock burst problems, and the rational selection of similar materials is a crucial prerequisite to ensure the effective simulation of mining disturbance response of roadway or longwall working face. Therefore, through the comprehensive study of similarity theory and numerical simulation methods, the fracturing characteristics as well as the effect of geometric similarity

收稿日期: 2024 - 06 - 06; **修回日期:** 2024 - 07 - 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104101, 52227901); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2023ZDYQ11002)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 52104101 and 52227901), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2023ZDYQ11002)

作者简介: 鞠明和(1990 -), 男, 2020 年于澳大利亚莫纳什大学土木工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩石动力学与深部煤岩动力灾害防控方面的研究工作。E-mail: minghe.ju@cumt.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2024.0441

ratio of different bursting-prone prototype coals and similar coal materials in physical similarity simulation of coal/rock burst were investigated. The similarity conditions for basic parameters, damping, energy and bursting liability indexes were obtained, and the geometric similarity ratio correlation of coal/rock burst failure characteristics of coal samples and coal roadway models with different coal bursting liabilities was studied using the continuous-discontinuous simulation method. The results show that the coal samples with strong bursting liability exhibit elasto-brittle dynamic failure, while those without bursting liability represent static rupture in forms of post-peak strain-softening. For the coal sample similarity model with geometric similarity ratios of 2, 5, 10 and 20, the simulated values of uniaxial compressive strength are basically consistent with the theoretical values. The bursting energy index decreases first and then stabilizes with the increase of geometric similarity ratio, and the fragmentation degree and debris kinetic energy of coal samples decrease with the increase of geometric similarity ratio. The kinetic energy of the coal ribs decreases gradually with increasing geometric similarity ratio, and the roadway eventually transforms from dynamic failure into static failure. Finally, the reasons for the correlation of geometric similarity ratio in the dynamic failure behavior of the physical similarity simulation are discussed, and some suggestions are given for the selection of materials for the physical similarity simulation of coal/rock burst and the simulation conditions of burst phenomena. This study provides guidance for the physical similarity simulation of coal/rock burst.

Key words: mining engineering; coal/rock burst; physical similarity simulation; bursting liability; geometric similarity ratio; bursting manifestation

1 引言

党的二十大报告指出要“确保能源资源安全”，而我国富煤贫油少气的基本国情决定了短期内煤炭的“压舱石”地位难以改变，其中深部煤炭资源的开发利用是保障我国能源资源安全供给的关键举措^[1]。据统计，2023 年我国原煤产量为 47.1 亿吨，同比增长 3.4%，煤炭占能源消费总量的 55.3%^[2]。随着我国浅部矿产资源日趋减少，未来全面进入 1 000~2 000 m 的深部开采已成必然趋势^[3]。目前，我国已建成开采深度千米以上的煤矿 47 座且在未来 10 年内还将建成 30 余座千米深井煤矿。深部“三高一扰动”的赋存属性迫使冲击地压这类重大灾害成为广大科研和技术工作者亟需面对和克服的难题^[4-5]。冲击地压是深部煤矿开采过程中煤岩体积聚的弹性能突然释放造成剧烈破坏的现象，严重时会造成煤岩体动力破坏并造成设备损坏与人员伤亡^[6]。在科技层面，“如何实现冲击地压煤层智能安全高效开采”入选 2023 年度中国科协十大产业技术问题^[7]。冲击地压已成为煤炭行业的“疑难杂症”。

国家标准 GB/T 25217.2-2010 指出，煤体冲击倾向性是指煤体具有的积聚变形能并产生冲击破坏的性质。煤体冲击倾向性是煤的固有属性，其是

冲击地压发生的必要条件和内在因素^[8]。煤的冲击倾向性研究对于冲击地压机理、预测和防治都非常重要，是评估和预测煤矿冲击危险性的主要依据之一。国内对冲击地压矿井的统计数据表明，煤层具有弱和强冲击倾向性的煤矿占比共 98.8%^[9]。国家标准 GB/T 25217.2-2010 规定了对煤层采用单轴抗压强度、动态破坏时间、弹性能量指数和冲击能量指数四个指标测定并综合判定煤层冲击倾向性。此外，其他学者提出了刚度冲击性指数、冲击能量速度指数、剩余弹性能指数、剩余能量释放速度指数等十余种冲击倾向性指标，从强度、刚度、能量、时间等角度为煤岩冲击倾向性鉴定提供了参考指标^[10-11]。

物理相似模型试验能够充分模拟巷道和采场的采掘扰动响应规律，已成为研究冲击地压的重要方法之一。相较于数值模拟方法，物理相似模型试验通过实物模型来展示实验过程，结果更加直观且易于理解。在研究巷道冲击地压方面，吕祥锋等^[12]根据配比制备脆性相似材料，对标准试块和三维巷道模型进行了相似试验研究，也为进一步揭示煤岩巷道冲击破坏规律提供了新的途径；潘一山等^[13-14]采用爆破冲击荷载对巷道在动、静荷载联合作用下的响应规律进行研究；朱小景等^[15]提出了矿震诱发巷道冲击地压的软化区能量极值判别准则并通过物理相似试验加以验证；顾洋等^[16]通过构建层状岩体

结构的模型和小块状岩体结构的模型研究巷道冲击地压的破坏特征，为深部煤矿巷道冲击地压的防治提供了借鉴依据。此外，一些学者通过搭建物理相似模型研究断层对冲击地压的影响，如崔峰等^[17]结合微震监测和应力监测方法，分析矿压对煤岩体能量积聚与释放的影响，揭示关键层破断诱冲机制；魏世明等^[18]以耿村煤矿为背景研究了逆断层上、下盘开采时应力变化及断层活化过程；李志华等^[19]采用冲击地压相似试验对微震信号频谱分析并结合采动过程中矿压显现特征总结提炼出断层滑移失稳微震信号的重要波形特征。

综上所述，目前冲击地压物理相似模拟研究的相似材料配比主要基于静力学的几何相似比和密度相似比获得，对相似材料冲击倾向性研究较少，对相似材料的动力学相似有效性和合理性未全面分析，未关注冲击地压物理相似模型性质的几何比关联性。因此研究从相似材料的冲击倾向性角度出发，利用数值模拟方法验证物理相似模拟参数的有效性和合理性，并以此构建不同几何相似比时无和强冲击倾向性煤体巷道冲击模型，通过推导关键指标参数的相似准则，重点验证煤冲击倾向性和物理相似模型冲击破坏过程与几何相似比的关联性，旨在探明煤体冲击倾向性和冲击破坏行为的尺寸效应响应规律，为冲击地压物理相似模拟材料选型以及冲击现象模拟条件提供指导。

2 冲击倾向性煤受载破裂特征

2.1 煤的冲击倾向性指标

煤的冲击倾向性是指煤体具有的积聚变形能并产生冲击破坏的性质。其鉴定结果是评价煤矿巷道及工作面冲击危险性的先决条件，对于煤的鉴定结果为有冲击倾向性的煤矿工作面必须开展冲击危险性评价。国家标准 GB/T 25217.2-2010 规定了煤冲击倾向性鉴定的四个关键指标，分别为单轴抗压强度、动态破坏时间、弹性能量指数和冲击能量指数，煤的冲击倾向性按其指标数值大小分为无、弱、强三类，各指标的具体分类数值如表 1 所示。对于冲击地压物理相似模拟研究而言，其较之常规采场的采动覆岩变形破断模拟具有特殊性，而煤的冲击倾向性是关键影响因素之一，冲击地压物理相似模拟对煤相似材料的选型和力学性能提出了更为严格的要求。

表 1 煤冲击倾向性指标及分类

Table 1 Coal bursting liability indexes and classification

类别	冲击倾向性	指标			
		单轴抗压强度 R_c /MPa	动态破坏时间 DT /ms	弹性能量指数 W_{ET}	冲击能量指数 K_E
I 类	无	$R_c < 7$	$DT > 500$	$W_{ET} < 2$	$K_E < 1.5$
II 类	弱	$7 \leq R_c < 14$	$50 < DT \leq 500$	$2 \leq W_{ET} < 5$	$1.5 \leq K_E < 5$
III 类	强	$R_c \geq 14$	$DT \leq 50$	$W_{ET} \geq 5$	$K_E \geq 5$

2.2 冲击倾向性煤破裂模拟

2.2.1 模拟方法介绍

利用基于连续—非连续耦合模拟方法 (finite and discrete element modeling, FDEM) 的 MultiFrac 软件开展不同冲击倾向性煤的破裂过程模拟。在二维 FDEM 模型中，将连续固体介质离散化为三角形有限单元网格，并在相邻单元网格的公共边缘插入具有黏结效应的四节点节理单元。根据三角形单元节点所受的不平衡力，通过牛顿第二定律求解并更新节点的位移与速度，其动力学控制方程为：

$$M \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + C \frac{\partial X}{\partial t} = F \quad (1)$$

其中， M 为节点质量矩阵， t 为计算步长， X 和 F 分别为节点位移向量和力向量， C 是为减小应力波振荡影响引入的黏性阻尼矩阵。此外，FDEM 中利用常应变三角形单元模拟外力作用下连续固体介质的变形，并通过节理单元的断裂失效实现外力作用下裂纹的萌生与扩展过程模拟。如图 1 所示，节理单元的断裂失效通过其法向和切向黏结应力 σ_t 和 τ_s 分别与法向和切向卸载位移量 δ_n 和 δ_s 的本构关系控制。以剪切破坏为例，当节理单元的剪切滑移位移量 δ_s 小于临界值 δ_{sp} 时， τ_s 随 δ_s 的增加而增大；当 $\delta_s \geq \delta_{sp}$ 时，黏结接触开始损伤并进入峰后软化阶

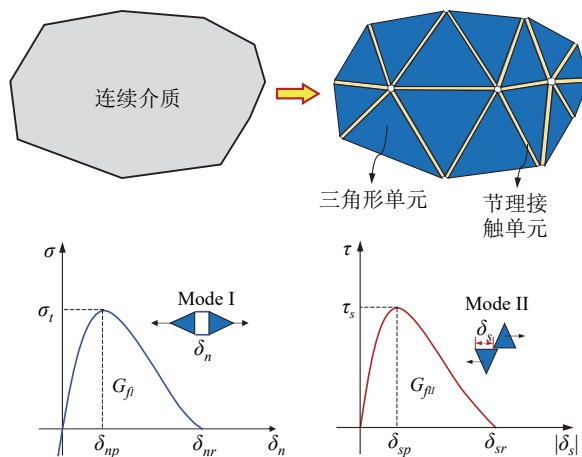


图 1 FDEM 模拟方法原理

Fig.1 Principles of FDEM simulation method

段,在此情况下 τ_s 随 δ_s 的增加而减小;当 τ_s 降至0时,节理接触单元发生宏观断裂失效。其中,Mode-I为拉伸破坏模式,由抗拉强度 σ_t 和I型断裂能 G_{II} 确定;Mode-II为剪切破坏模式,由抗剪强度 τ_s 和II型断裂能 G_{III} 控制。节理接触单元的抗剪强度满足摩尔-库伦强度准则,

$$\tau_s = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2)$$

其中, c 和 φ 分别为接触的内聚力和内摩擦角, σ_n 为作用在节理单元上的法向应力。

2.2.2 模拟参数确定

(1) 无和强冲击倾向性煤指标参数

在模拟对比无、弱、强冲击倾向性煤的破裂过程及差异时,需根据表1的指标参数区间选取煤样的力学性能参数。四个冲击倾向性指标中,动态破坏时间和弹性能量指数在数值模拟方法方面有限制,较难统一衡量,例如,弹性能量指数需考虑煤样加卸载过程的能量耗散行为,无冲击倾向性煤的动态破坏时间在静力学模拟中无参考价值;而单轴抗压强度表征煤的承载能力,冲击能量指数综合考虑峰前和峰后过程,分别有其代表性且两个指标共同控制煤的应力-应变曲线形状,能够直观有效地衡量煤的冲击倾向性,动态破坏时间和弹性能量指数在单轴压缩静力学模拟中极难获取^[20]。为较好地对比不同冲击倾向性煤的破裂过程差异,在此依据无冲击倾向性指标($R_c < 7 \text{ MPa}$ 且 $K_E < 1.5$)和强冲击倾向性指标($R_c > 14 \text{ MPa}$ 且 $K_E > 5$)对FDEM模拟参数校核,分别获得一组合适的参数用于无冲击倾向性煤和强冲击倾向性煤的静态单轴压缩模拟。

(2) 阻尼的确定

阻尼是材料研究领域的一个基本物理参量,其控制系统的动能衰减程度^[21]。在数值模拟中,阻尼对计算效率和模拟结果的准确性影响重大,尤其是在动力学问题求解时,阻尼至关重要^[22]。在二维FDEM模拟方法中,三角形节点的整体平衡方程如式(1)所示,对于黏性阻尼矩阵 \mathbf{C} 可表示为:

$$\mathbf{C} = u\mathbf{I} \quad (3)$$

其中, u 为阻尼系数, \mathbf{I} 为单位矩阵。阻尼系数一般可根据工程实际问题参考临界阻尼系数选取,临界阻尼系数 u_c 的表达式为^[23]

$$u_c = 2h\sqrt{E\rho} \quad (4)$$

其中, h 为单元尺寸,即三角形单元最小边长, E 为材料的弹性模量, ρ 为材料的密度。在对煤样单轴压缩模拟前,需确定阻尼系数关键输入参数。参照B. S. A. Tatone和G. Grasselli^[24]研究阻尼对岩

石单轴压缩应力-应变曲线特征的影响结论,当阻尼系数 u 为(0~1%) u_c 时,所模拟出的应力-应变曲线与实验结果基本重合。因此,原型尺寸煤的无冲击倾向性和强冲击倾向性模拟的阻尼输入参数分别取0.1% u_c 和1% u_c 。

(3) 罚参数的确定

罚参数一般被添加到模拟问题的目标函数中,作为一种附加的项,用于约束目标函数的最优优化过程。数值模拟的宏观弹性模量随法向和切向罚参数的增大而增大^[25]。在FDEM中,罚参数包括四边形单元罚参数 p_f 和三角形单元间的法向罚参数 p_n 以及切向罚参数 p_s 。数值样本的宏观力学参数也直接由法向和切向罚参数决定,C. Yan等^[26-27]在单轴压缩模拟时对FDEM中的接触罚参数标定,结果表明,法向和切向罚参数 $p_n/p_s = 1$ 且 $p_n > 50E$ 时,单轴压缩应力-应变曲线差异很小,当 $p_n = 100E$ 时,单轴压缩应力-应变曲线基本重合,对于 p_f 发现一旦 p_f 值大于100E,单轴压缩变形误差就小于2.17%。P. Deng等^[28]提出一种新的输入参数校准方法,通过四边形单元罚参数 $p_f = 1 \sim 100E$ 进行验证,当 $p_f > 30E$ 时,单轴压缩应力-应变曲线基本重合,且模拟结果在不同单元网格尺寸时仍保持一致;此外,在实际模拟中,罚参数的增大可限制三角形单元网格的嵌入,从而缩短时间步长。为提高计算效率,本模拟的四边形单元罚参数 $p_f = 100E$,三角形单元罚参数 $p_n(p_s) = 30E$ 。

2.2.3 模拟结果分析

无和强冲击倾向性煤破裂过程的模拟结果如图2所示。无冲击倾向性煤在单轴压缩情况下以形成宏观的拉伸和剪切破裂面模式为主,而强冲击倾向性煤在破裂过程中局部破裂程度远高于无冲击倾向性煤,形成大量小尺寸煤屑,与煤样单轴压缩室内实验现象基本一致^[29]。另外,无冲击倾向性煤的拉伸和剪切裂纹在应力峰值附近快速扩展,形成宏观的拉伸和剪切破裂面,应力-应变曲线峰后呈现应变软化特征,裂纹扩展趋于稳定,且最终以剪切裂纹为主,与实验中煤样破坏模式及模拟中裂纹占比总体一致^[29];而强冲击倾向性煤的应力-应变曲线及裂纹演化趋势与无冲击倾向性煤有显著差别,其呈现脆性破坏特征,且在峰后破坏过程中拉伸和剪切裂纹均急剧扩展,最终拉伸裂纹数量略大于剪切裂纹数量,相较于无冲击倾向性煤,强冲击倾向性煤动态破坏过程中以拉伸破裂为主,与前人研究结果类似^[29]。

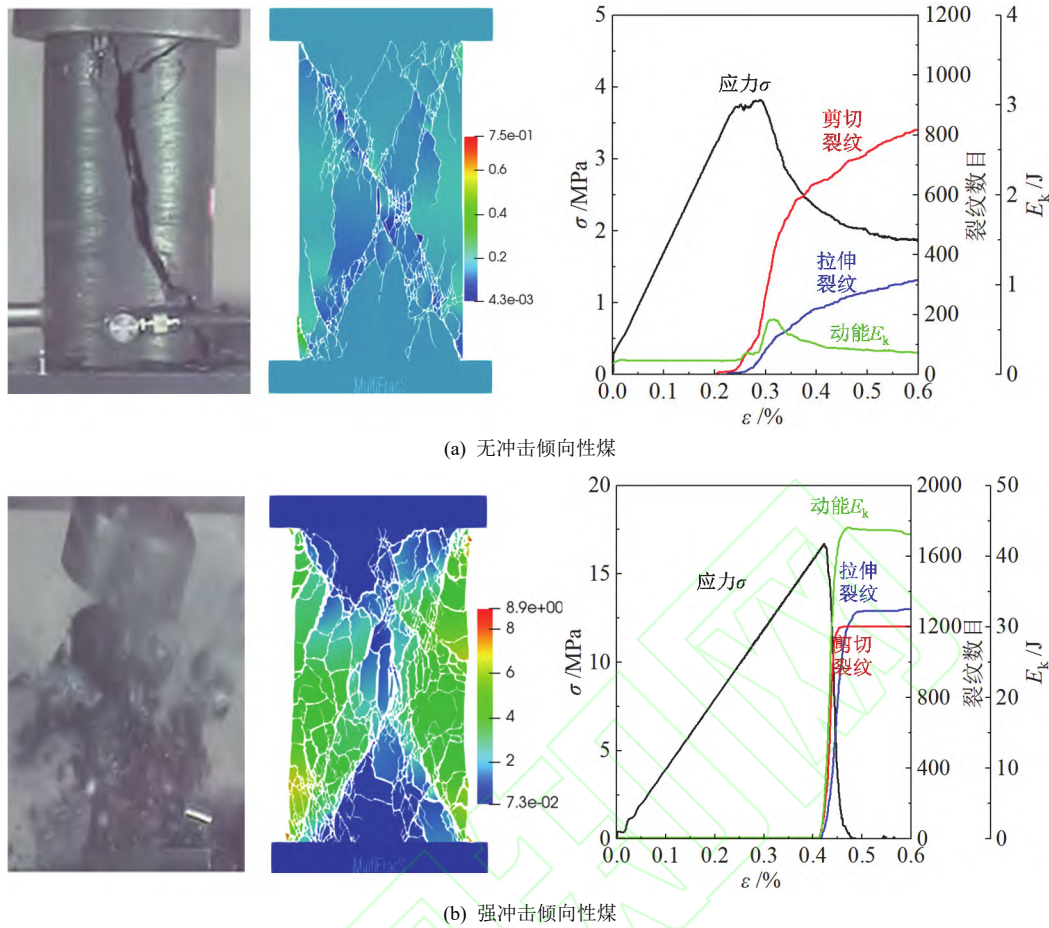


图 2 无和强冲击倾向性煤模拟结果

Fig.2 Simulation results of coal with non and strong bursting liabilities

依据图 2 的无和强冲击倾向性煤应力 - 应变曲线，分别计算获得煤的冲击倾向性指标见表 2。1# 和 2# 工况分别为无和强冲击倾向性煤统计结果，其模拟所得指标数值均在国标规定的指标区间(表 1)；另外，1# 工况碎屑最大速度 v_{max} 为 0.75 m/s，在当前 FDEM 模拟背景中速度小于 0.8 m/s 可视为静态破裂过程，2# 工况 v_{max} 达到 8.90 m/s，表 2 中统计结果与图 2 中煤样破坏现象相一致，强冲击倾向性煤在破裂过程中其脱离母体的碎屑明显具有较大的抛出速度，呈现强冲击现象，而无冲击倾向性煤呈静态稳定破裂过程。总体上，FDEM 模拟结果较好地复现了无和强冲击倾向性煤的破坏过程和失效模式，与室内实验的现象较一致，模拟结果合理有效。

表 2 无/强冲击倾向性煤模拟所得指标

Table 2 Indicators obtained from the simulation of coal with non/strong bursting liabilities

工况	弹性模量 E/GPa	单轴抗压强度 R_c/MPa	冲击能量指数 K_E	碎屑最大速度 $v_{max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	现象
1#	1.5	3.75	1.08	0.75	无冲击
2#	4.0	16.26	9.30	8.90	强冲击

3 煤冲击倾向性几何比关联性

3.1 模拟相似条件

3.1.1 网格尺寸

在二维 FDEM 模型中，连续固体介质由三角形有限单元网格表征，三角形网格单元的大小对计算结果会产生影响。A. Munjiza 和 N. W. M. John^[30]探讨了 FDEM 模拟断裂问题时网格尺寸敏感性，结果表明模型对网格尺寸的依赖性随网格尺寸减小而降低；但是，过小的单元尺寸会导致时间步长极小，严重影响计算效率^[31]。在模拟小尺度问题时，可以使用相对较小的网格和适度的 CPU 功率来获得准确结果。在本模拟中，确定原型的网格尺寸 $h_p = 1 \text{ mm}$ ，划分图 3 所示的数值模型为 17 394 个三角形单元网格，网格尺寸影响小。对于一定几何相似比 C_l 的更小模型，需保证足够数量的三角形单元网格细致模拟裂纹演化过程及路径，依据相似比 C_l 确定特定尺寸模型的网格尺寸 h_m ，即：

$$C_h = \frac{h_p}{h_m} \quad (5)$$

其中 C_h 为网格尺寸相似比, h_p 和 h_m 分别为原型和模型的三角形单元尺寸, 由式(5)确定 C_l 为 2、5、10、20 时, 单元网格尺寸分别为 0.5, 0.2, 0.1, 0.05 mm。

3.1.2 基本相似条件

为尽可能重现原型的物理现象和过程, 模型材料、结构和加载等均须遵循相似准则。根据相似三定律及原型和模型的平衡方程、几何方程、物理方程、应力边界条件和位移边界条件可得到以下煤岩力学模型的基本相似条件。

(1) 几何相似条件

假设冲击地压物理模型的原型尺寸为 l_p , 模型尺寸为 l_m , C_l 为几何相似比, 则原型与模型几何相似条件为:

$$C_l = \frac{l_p}{l_m} \quad (6)$$

模拟原型为 $\phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$ 标准圆柱形试样, 根据几何相似条件, 当几何相似比 C_l 为 2、5、10、20 时, 煤样单轴压缩模型尺寸分别为 $25 \times 50 \text{ mm}$ 、 $10 \times 20 \text{ mm}$ 、 $5 \times 10 \text{ mm}$ 、 $2.5 \times 5 \text{ mm}$, 如图 3 所示。

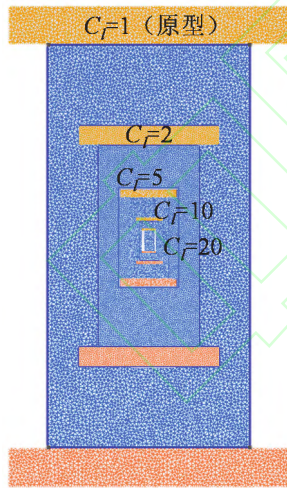


图 3 原型及不同几何比模型

Fig.3 Models of prototype and those with different geometric ratios

(2) 密度相似条件

设原型煤样的密度为 ρ_p , 模型煤样的密度为 ρ_m , C_ρ 为密度相似比, 则原型煤样密度与模型煤样密度相似条件为:

$$C_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_m} \quad (7)$$

密度相似比是根据原型煤密度与相似材料配比

后的材料密度之比获得, 由于配比出的相似模型材料各异, 因此密度相似比 C_ρ 也相应不同, 但其取值范围一般在 0.7~1.5。在本模拟中, 原型和模型煤样密度保持不变, 密度相似比取 1。

(3) 应力相似条件

根据量纲分析可知应力是单位面积的力, 由于岩层移动和破坏中起主要作用的是重力等围岩应力, 设 σ_p 为原型所受应力, σ_m 为模型所受应力, C_σ 为应力相似比, 则:

$$C_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{\rho_p a_p l_p}{\rho_m a_m l_m} = C_\rho \cdot C_l \quad (8)$$

(4) 弹性模量相似条件

设原型中煤的弹性模量为 E_p , 模型中煤的弹性模量为 E_m , C_E 为弹性模量相似比。由于弹性模量的量纲单位与应力量纲单位相同, 根据相似第三定律, 得到原型与模型弹性模量相似条件为:

$$C_E = \frac{E_p}{E_m} = C_\rho C_l \quad (9)$$

(5) 运动相似条件

由于模型与原型中对应点的运动轨迹相似, 则时间相似系数为原型与模型的几何相似路程所用的时间之比, 设 t_p 为原型运动时间, t_m 为模型运动时间, C_t 为运动时间相似比, 则:

$$C_t = \frac{t_p}{t_m} \quad (10)$$

由于模型与原型同属于一个地球物理场, 因此原型的重力加速度 a_p 与模型的重力加速度 a_m 相同, 则有:

$$\frac{l_p}{t_p^2} = \frac{l_m}{t_m^2} \quad (11)$$

综合上式(10)和(11), 整理得到时间相似条件为:

$$C_t = \frac{t_p}{t_m} = \sqrt{\frac{l_p}{l_m}} = \sqrt{C_l} \quad (12)$$

对于运动速度, 设原型的速度为 v_p , 模型的速度为 v_m , C_v 为速度相似比, 则:

$$C_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{l_p}{l_m} \frac{t_m}{t_p} = \sqrt{C_l} \quad (13)$$

3.1.3 阻尼的相似性

对于不同几何相似比尺寸模型, 由于单元网格尺寸以及弹性模量等参数会随几何相似比变化, 在此用 C_{μ_c} 来表示临界阻尼系数 μ_c 与几何相似比之间的关联性, 即:

$$C_{\mu_c} = \frac{\mu_{cp}}{\mu_{cm}} \quad (14)$$

带入式(4)，则：

$$C_{\mu_c} = \frac{2h_p \sqrt{E_p \rho_p}}{2h_m \sqrt{E_m \rho_m}} = \frac{h_p}{h_m} \sqrt{\frac{E_p}{E_m} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_m}} = C_h \sqrt{C_E C_\rho} \quad (15)$$

其中， C_h 、 C_E 、 C_ρ 分别为单元尺寸相似比、弹性模量相似比、密度相似比。

3.2 冲击倾向性指标相似条件

冲击地压物理相似模拟中煤的冲击倾向性几何相似比关联性对模型材料的选参设计至关重要。在判定模型材料的冲击倾向性时，需要基于原型煤的冲击倾向性指标相似推导获得。

(1) 单轴抗压强度

设 R_{cp} 为原型的单轴抗压强度， R_{cm} 为模型测定的单轴抗压强度， C_{Rc} 表示单轴抗压强度相似比，则有：

$$C_{Rc} = \frac{R_{cp}}{R_{cm}} \quad (16)$$

根据量纲分析，强度的量纲单位与应力量纲单位相同，则原型与模型单轴抗压强度相似条件为：

$$C_{Rc} = \frac{R_{cp}}{R_{cm}} = \frac{\rho_p}{\rho_m} \cdot \frac{a_p}{a_m} \cdot \frac{l_p}{l_m} = C_\rho \cdot C_l \quad (17)$$

(2) 动态破坏时间

煤的动态破坏时间由单轴压缩应力-时间峰后曲线获得，如图 4，OC 为加载过程，CD 为破坏过程，ED 为动态破坏时间。设 T_p 为原型的动态破坏时间， T_m 为模型的动态破坏时间， C_T 为动态破坏时间相似比，则有：

$$C_T = \frac{T_p}{T_m} = \frac{l_p}{l_m} \cdot \frac{v_m}{v_p} = \frac{C_l}{C_v} = \frac{C_l}{\sqrt{C_l}} = \sqrt{C_l} \quad (18)$$

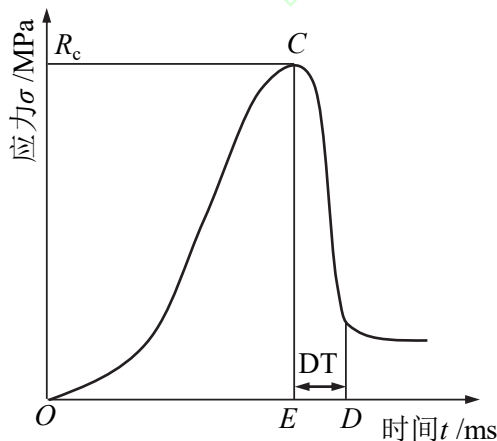


图 4 动态破坏时间曲线

Fig.4 Dynamic failure time curve

(3) 弹性能量指数

弹性能量指数是指煤样加载到其单轴抗压强度 80%~90%时卸载的弹性应变能与塑性应变能的比值，一般弹性能量指数用 W_{ET} 表示，如图 5。弹性能量指数的计算公式为：

$$W_{ET} = \frac{\Phi_{SE}}{\Phi_{SP}} = \frac{\Phi_{SE}}{\Phi_C - \Phi_{SE}} \quad (19)$$

其中，如图 5 所示， Φ_{SE} 为弹性应变能，即为图中卸载曲线下方面积； Φ_C 为总应变能，在图中为加载曲线下方面积； Φ_{SP} 指塑性应变能，在图中为加载曲线与卸载曲线以及横轴所围成的面积。

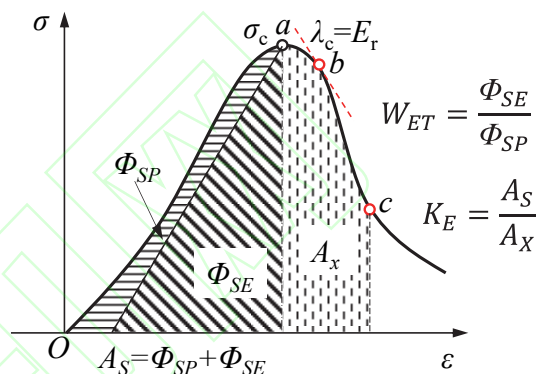


图 5 弹性能量指数与冲击能量指数

Fig.5 Elastic energy index and bursting energy index

设原型煤样的总应变能为 Φ_{cp} ，模型的总应变能为 Φ_{cm} ，用 C_{Φ_c} 表示总应变能相似比，则：

$$C_{\Phi_c} = \frac{\Phi_{cp}}{\Phi_{cm}} = \frac{\int_0^{L_2} P(L)_1 dL}{\int_0^{L_2} P(L)_2 dL} = \frac{P(L)_1^2}{P(L)_2^2} = \pi \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^2 = C_\sigma^2 \quad (20)$$

同理，弹性能相似比 $C_{\Phi_{SE}} = C_\sigma^2$ ，塑性能相似比 $C_{\Phi_{SP}} = C_\sigma^2$ ，根据式(19)可知：

$$C_{W_{ET}} = \frac{C_{\Phi_{SE}}}{C_{\Phi_{SP}}} = \frac{C_\sigma^2}{C_\sigma^2} = 1 \quad (21)$$

(4) 冲击能量指数

冲击能量指数 A_E 为煤样单轴压缩状态下，在全应力-应变曲线的峰前积蓄变形能 A_S 与峰后耗损变形能 A_X 之比，如图 5 所示，其计算表达式为：

$$A_E = \frac{A_S}{A_X} \quad (22)$$

设原型煤样峰前积蓄变形能为 A_{Sp} ，模型的峰前积蓄变形能为 A_{Sm} ，用 C_{A_S} 表示峰前积蓄变形能的相似比，则：

$$C_{A_S} = \frac{A_{Sp}}{A_{Sm}} = \frac{\int_E^Q \sigma_1(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_E^Q \sigma_2(\varepsilon) d\varepsilon} = C_\sigma^2 \quad (23)$$

同理，可得峰后耗损变形能相似比 $C_{A_x} = C_{\sigma}^2$ ，根据式(22)，则有：

$$C_{A_x} = \frac{C_{A_s}}{C_{A_x}} = \frac{C_{\sigma}^2}{C_{\sigma}^2} = 1 \quad (24)$$

根据上述冲击倾向性指标的相似准则推导，获得表 1 中指标不同 C_l 情况下的冲击倾向性判别标准，如表 3 所示。

表 3 不同几何比情况下冲击倾向性指标判别标准*

Table 3 Criteria for identifying bursting liability indexes at different geometric ratios*

冲击倾向性	几何相似比 C_l	单轴抗压强度 R_c	动态破坏时间 DT	弹性能量指数 W_{ET}	冲击能量指数 K_E
无	2	<3.5	>353		
	5	<1.4	>224	<2	<1.5
	10	<0.7	>158		
	20	<0.35	>112		
强	2	≥ 7	≤ 35.3		
	5	≥ 2.8	≤ 22.4	≥ 5	≥ 5
	10	≥ 1.4	≤ 15.8		
	20	≥ 0.7	≤ 11.2		

注：弱冲击倾向性煤在不同几何比情况下的指标数值介于无和强冲击倾向性数值之间

3.3 几何相似比关联性模拟

3.3.1 强冲击倾向性煤模拟

为获得不同 C_l 条件下煤的冲击倾向性差异，选取 C_l 为 2、5、10、20 建立单轴压缩数值模型，模型尺寸分别为：50×100 mm、25×50 mm、10×20 mm、5×10 mm、2.5×5 mm，试验采用强冲击倾向性煤的模拟参数，每组相似模型依据相似理论取材料输入参数，另外设定密度相似比 $C_{\rho} = 1$ ，依据式(9)和(17)获得弹性模量与强度的相似模型参数，见表 4。

表 4 不同几何相似比煤样的材料输入参数

Table 4 Material parameters of coal samples with different geometric similarity ratios

煤	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	黏聚力 c / MPa	抗拉强度 σ_t / MPa	弹性模量 E / GPa
$C_l = 1$ (原型)	1 700	9.80	1.700	4.0
$C_l = 2$	1 700	4.90	0.850	2.0
$C_l = 5$	1 700	1.96	0.340	0.8
$C_l = 10$	1 700	0.98	0.170	0.4
$C_l = 20$	1 700	0.49	0.085	0.2

图 6 展现了每组模拟的应力 - 应变及动能 - 应变关系。由图可知，不同 C_l 情况下煤样应力 - 应变曲线峰前和峰后两阶段均存在差异性。峰前线性阶段的斜率由输入的弹性模量 E 控制；模型的峰值抗

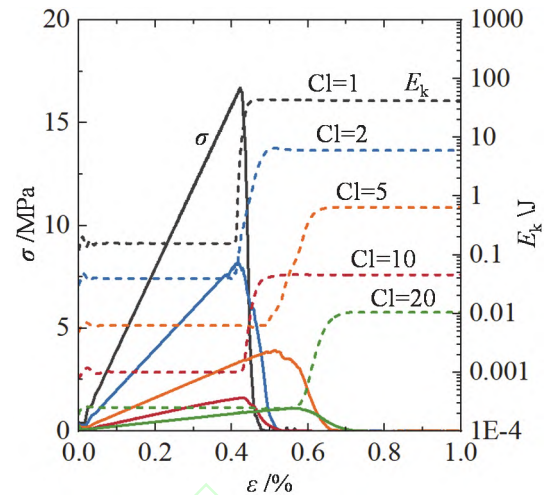
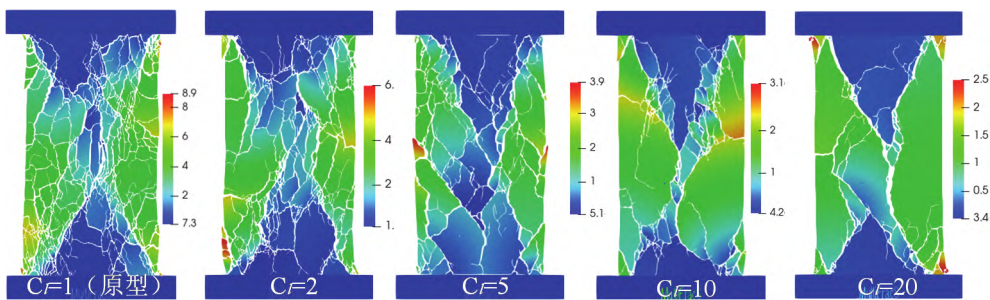


图 6 不同几何相似比的试样应力及动能随应变演化结果
Fig.6 Evolution of stress and kinetic energy of samples with strain at different geometric similarity ratios

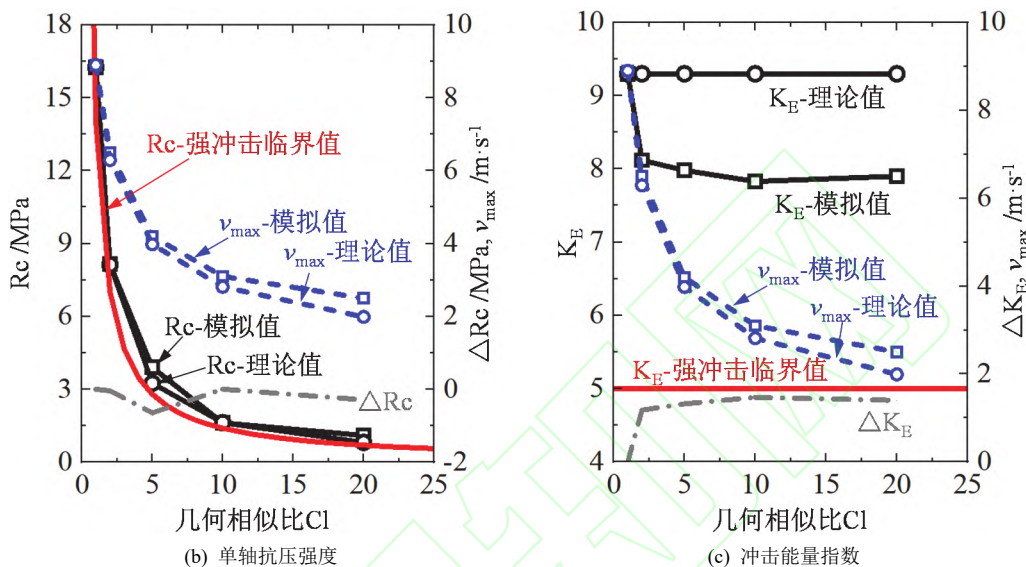
压强度随 C_l 增大而减小；在峰后阶段，煤样承载能力随应变急剧下降，表明其冲击破坏烈度较高，反映了强冲击倾向性模拟输入参数的有效性。值得注意，随着 C_l 的增大，煤样峰后应力 - 应变曲线下降幅度逐渐减小，即应力卸载逐步趋缓。动能 - 应变统计结果亦呈现相似规律，即随着 C_l 增大，煤样的峰值动能有明显下降趋势，表明煤样的动力破坏剧烈程度随着 C_l 增大而逐渐降低。

图 7(a)为不同 C_l 情况下强冲击倾向性煤的破裂模拟结果。由图可知，强冲击倾向性煤的动态破坏特征类似，弹射煤屑均较为细小，仍有较为明显的动力破坏现象，其表明不同 C_l 情况下强冲击倾向性煤仍在一定程度上表现为强冲击倾向性。从破坏特征来看， C_l 较大时，煤样更易形成贯穿整体的剪切面，而 C_l 较小的煤样，则产生较多局部竖向张拉裂纹，且裂纹密度明显高于 C_l 较大的工况。随着几何相似比 C_l 的增大，煤样裂纹和碎块的数量减小，碎屑最大弹射速度分别为 6.5, 3.9, 3.1, 2.5 m/s，碎屑最大弹射速度随 C_l 增大而减小。整体而言，煤样冲击破坏的剧烈程度随 C_l 的增大而降低。

煤的单轴抗压强度是表征其受载破裂承载能力的重要指标，煤的冲击能量指数综合了能量的输入和输出过程，可较好地反映煤冲击倾向性的物理力学本质，并揭示冲击地压的发生机理^[20]。如上所述，选取单轴抗压强度和冲击能量指数来探究煤冲击倾向性的 C_l 关联性，两个评价指标相似理论值分别通过式(17)和(24)计算，不同 C_l 情况下强冲击倾向性煤的指标模拟和理论值对比见图 7(b)-(c)。 C_l 为 2、10、20 时，模拟得到的单轴抗压强度与理论值基本



(a) 煤样破裂程度及特征



(b) 单轴抗压强度

(c) 冲击能量指数

图 7 煤的冲击倾向性及破坏特征几何相似比关联性

Fig.7 Correlation of bursting liability and failure characteristics of coal with geometric similarity ratio

吻合，当 $C_l = 5$ 时单轴抗压强度为 3.9 MPa，且均高于表 3 的强冲击倾向性分区临界值。此外，从图 7(b)~(c)可知，不同 C_l 情况下冲击能量指数均明显高于 5，表现为强冲击倾向性，但随着 C_l 的增大，冲击能量指数从 9.3 下降至 7.9，下降幅度随着 C_l 增大而减小。根据式(22)可知，冲击能量指数的理论相似比 C_{A_E} 为 1，即在不同 C_l 情况下冲击能量指数应不变，而模拟所得冲击倾向性指标数值随 C_l 增大略有减低；另外，式(13)的速度相似比 C_v 理论值与数值模拟获得的不同 C_l 情况下碎屑速度具有一致性。总体而言，煤样动态破坏及动力显现程度随 C_l 增大而降低，此变化规律是导致前人冲击地压物理相似模拟中很难模拟出冲击现象的主要原因之一。

3.3.2 煤的冲击倾向性影响规律

为探究不同冲击倾向性煤相似材料参数与相似比之间的关联性，选取了几何相似比 $C_l = 1$ 和 5 两种情况开展冲击倾向性关联的相似模拟研究。通过校核确定 6 种不同冲击倾向性材料的原型($C_l = 1$)输入参数，并以此确定相似比 $C_l = 5$ 时的各组材料参数，如表 5 所示。

表 5 不同冲击倾向性煤的模拟参数

Table 5 Simulation parameters of coal with different bursting liabilities

模拟工况	C_l	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$)	黏聚力 c / MPa	抗拉强度 σ_t / MPa	弹性模量 E / GPa
1	1		0.700	0.100	1.50
	5		0.140	0.020	0.30
2	1		0.580	0.050	1.30
	5		0.115	0.010	0.26
3	1		2.250	0.375	2.80
	5	1 700	0.450	0.075	0.56
4	1		2.450	0.510	1.00
	5		0.490	0.085	0.20
5	1		7.500	1.200	4.00
	5		1.500	0.240	0.80
6	1		9.800	1.700	4.50
	5		1.960	0.340	0.90

上节探究了强冲击倾向性煤的冲击倾向性随几何相似比 C_l 的变化规律，而不同冲击倾向性的煤参数与相似比之间的关联性有待认识。图 8 为不同冲击倾向性煤参数的关键指标模拟值，由式(24)可知 $C_{A_E} = 1$ ，则 $C_l = 1$ 时的冲击能量指数模拟值即为 $C_l = 5$ 时的理论值。由图可知，对于六组不同煤材

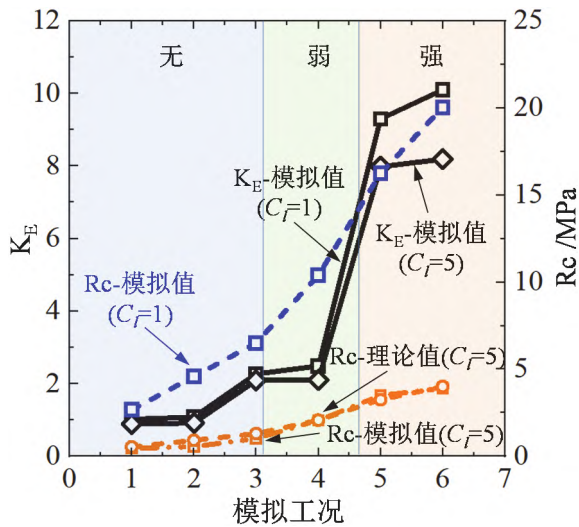


图 8 不同冲击倾向性煤的指标数值对比

Fig.8 Comparison of index values of coal with different bursting liabilities

料参数, $C_f = 5$ 时的冲击能量指数略低于原型, 相较于原型四种煤冲击能量指数分别降低 12.7%、14.8%、7.9%、15.2%、14.2%和 18.9%, 表明随着相似比增大, 该关键性指标降低。此外, 根据原型单轴抗压强度及式(17), 依据相似比确定 $C_f = 5$ 时的单轴抗压强度理论值, 图 8 中理论值与模拟实测数据基本吻合。

4 煤巷受载破裂过程模拟

4.1 原型煤巷破裂过程

建立煤巷平面相似模型探究不同冲击倾向性煤体巷道开挖破裂过程。煤巷模型尺寸为 $20 \times 15 \text{ m}$ (宽 \times 高), 巷道位于模型中部, 其尺寸为 $4 \times 3 \text{ m}$ (宽 \times 高), 煤层厚度取 3 m , 上下顶板岩层厚度均为 6 m 。在该模型垂直和水平方向分别施加 15 MPa 和 10 MPa 的地应力。整个模拟过程分为两阶段, $t \leq 0$ 为应力平

衡阶段, 该过程采用静力计算并运算足够步长保证模型的初始地应力平衡; $t > 0$ 为巷道开挖扰动损伤阶段, 模型参数设置方法与煤样单轴压缩类似, 分别模拟无和强冲击倾向性煤体在巷道开挖后的破坏过程。

图 9 为强冲击倾向性煤体的煤巷开挖动力显现过程的应变能和动能演化云图。由图可知, 在 $t \leq 0$ 的平衡阶段, 由于煤层与顶底板岩层的弹性模量分别为 4 和 10 GPa , 在相同的应力环境下煤层积聚的弹性应变能更大, 煤层的初始应变能密度为 30.6 kJ/m^3 , 是顶底板岩层应变能密度的 2.5 倍, 而此时由于模型各单元节点处于平衡状态, 模型动能基本为零, 与前人结果相符^[32]。

开挖之后, 强冲击倾向性煤体呈现动力破坏特征。如图 9 中左图所示, 煤层和顶底板岩层的动能均急剧增大并在 $t = 1.8 \text{ ms}$ 左右分别达到最大值 1.1 和 0.6 kJ/m^3 , 开挖后煤层和顶底板岩层应变能均开始释放, 一部分转变为煤层巷道帮部裂纹扩展的耗散能, 另一部分转变为巷帮煤体破裂碎屑的动能(考虑到顶底板内部并未出现裂纹); $t = 5 \text{ ms}$ 时巷道帮部局部区域煤体发生明显破裂, 同时煤岩体动能也有所下降, 且此趋势随时间愈加明显; $t = 15 \text{ ms}$ 时, 顶底板岩层应变能进一步释放, 巷道两帮塑性区增大, 应力集中区向远离巷道一侧转移, 煤帮内局部积聚的应变能大于初始值, 此时, 由于在黏性阻尼的作用下动能开始衰减, 顶底板岩层动能逐步下降, 而煤层由于黏性阻尼主导的动能衰减幅度大于巷道帮部新破碎煤块碎屑增加的动能而呈现整体动能密度下降的趋势; $t = 30 \text{ ms}$ 时, 顶底板岩层和煤层应变能趋于稳定, 动能也在黏性阻尼的作用下趋于平衡前状态, 此时, 由于整个系统没有外界能量继续输入, 系统处于相对平衡状态, 破坏过程近乎终止, 煤层应变能密度由 30.6 kJ/m^3 下降至 26.5 kJ/m^3 , 顶

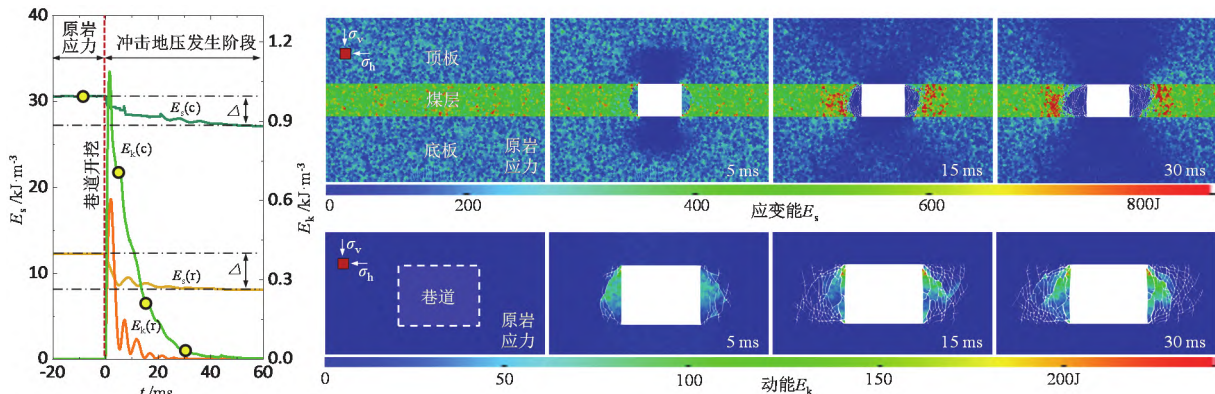


图 9 强冲击倾向性煤体的煤巷开挖能量演化过程

Fig.9 Energy evolution of roadway excavation with strong bursting liability

底板岩层应变能密度由 12.2 kJ/m³ 下降至 7.9 kJ/m³。整体而言，强冲击倾向性煤体开挖时，在不考虑外部动载扰动情况下仍表现出一定程度的动态破坏特征。

4.2 煤巷冲击几何比关联性

4.2.1 能量相似条件

冲击地压外部动载能量作用及动力灾害发生过程的能量演化行为是评估煤岩冲击危险性的重要指标之一，根据最小能量原理，煤岩体动力破坏消耗的单位体积能量为：

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (25)$$

其中， U 为煤岩体破坏时消耗的单位体积能量， σ 为煤岩体受到的单轴应力， E 为弹性模量。设 U_p 为原型煤动力破坏消耗的单位体积能量， U_m 为模型材料动力破坏消耗的单位体积能量， C_U 为能量密度相似比，则：

$$C_U = \frac{U_p}{U_m} \quad (26)$$

将 U_p 和 U_m 通过式(25)转化代入式(26)中，可得：

$$C_U = \frac{\sigma_p^2 E_m}{\sigma_m^2 E_p} \quad (27)$$

将式(8)、(9)代入式(27)得：

$$C_U = \frac{\sigma_p^2 E_m}{\sigma_m^2 E_p} = \frac{C_\sigma^2}{C_E} = \frac{C_\rho^2 C_l^2}{C_\rho C_l} = C_\rho C_l \quad (28)$$

4.2.2 模拟结果分析

选取节 2.2 中无冲击倾向性和强冲击倾向性煤的参数建立煤巷模型，并依据节 3.1 相似条件确定相似比为 2、5、10、20 时煤巷的材料参数，煤巷模拟结果如图 10 所示。

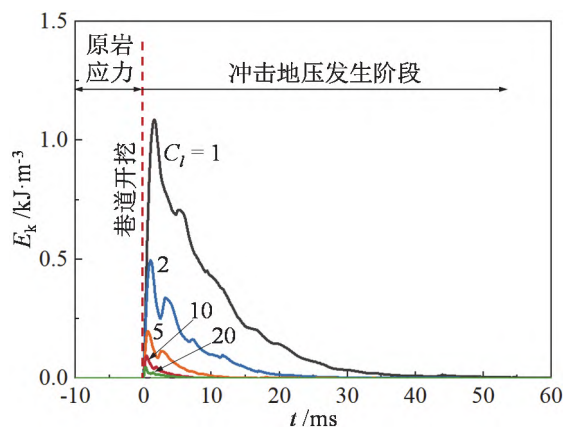


图 10 不同几何相似比情况下煤巷能量演化规律
Fig.10 Energy evolution of roadway under different geometric similarity ratios

如上节所述，煤巷开挖后的煤岩体破裂过程可分为两阶段，而不同 C_l 情况下的煤巷静载破裂过程也呈现类似现象。如图 10 所示，煤巷开挖后，各工况中开挖扰动打破应力平衡状态，导致煤岩应力路径改变及动能急剧上升，并在达到峰值后逐步衰减，能量传播在系统阻尼的影响下经多次震荡后衰减为零^[33]，巷帮煤体动能峰值随 C_l 的增大而减小。在本模拟中煤层特定时刻的动能是煤层各三角形单元动能之和，由于不同 C_l 情况下煤巷材料参数依据相似比确定，峰值动能应呈现几何比关联性，同时各工况煤层峰值动能应满足式(28)的能量相似条件，即在原型巷道的峰值动能基础上通过能量相似条件分别得到 C_l 为 2，5，10，20 时的峰值动能理论值。图 11 为不同 C_l 情况下数值模拟与相似理论所得煤巷峰值动能对比结果，两者差异性较小，也表明了能量相似条件在煤巷开挖相似模拟中动能表征的适用性，峰值动能满足能量相似理论。另外，由图可知，对于煤巷原型，强冲击倾向性和无冲击倾向性煤体峰值动能差异较大，分别为 1087.5 和 480.1 J/m³。

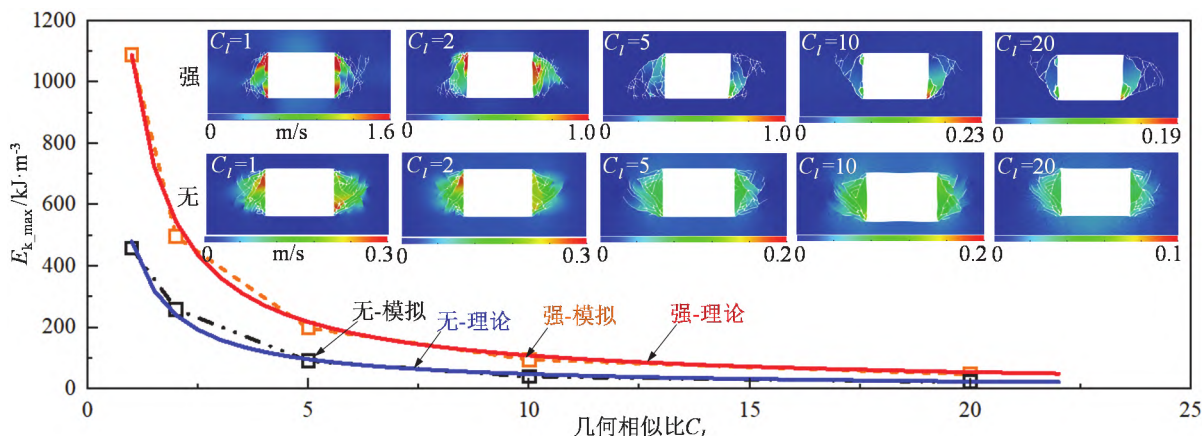


图 11 无/强冲击倾向性煤体的煤巷开挖动能几何比关联性

Fig.11 Correlation between kinetic energy and geometric ratio of roadway excavation with non/strong bursting liabilities

随着 C_I 增大, 在进行小尺寸煤巷模型相似模拟时动力现象会降低, 这与节 3.3.2 煤样单轴压缩模拟所得结论一致。

图 11 展示了强和无冲击倾向性煤不同 C_I 情况下煤层破裂碎块速度到达峰值时的云图。由图可知, 随着 C_I 增大, 巷道帮部破裂程度和碎块最大速度均减小。虽然 C_I 为 2 和 5 时碎块最大速度都为 1 m/s, 但从云图可知, $C_I = 5$ 时达到最大速度的碎块极小, $C_I = 10$ 时, 煤巷的碎块最大速度以及达到最大速度的单元均显著减少, 巷帮煤体趋于静态破裂。无冲击倾向性煤参数模拟结果随 C_I 的变化规律与强冲击倾向性煤类似, 但由于煤的冲击倾向性差异, 不同 C_I 情况下无冲击倾向性煤体碎块峰值速度明显小于强冲击倾向性煤体工况, 巷帮煤体呈静态破坏。通过无和强冲击倾向性煤体巷道开挖模拟结果对比可知, 即使原型为强冲击的煤巷, 其冲击破坏程度随 C_I 增大而降低, 与 3.3 节中不同 C_I 情况下煤样的破坏规律相似。

5 讨论

5.1 几何比关联性原因分析

(1) 模型的尺寸效应

对于不同尺寸的岩样, 其内部微观缺陷的数量和分布不同, 致使在相同加载条件下, 岩石强度与变形表现出显著的尺寸效应现象。如图 7(a)所示, 随着相似比增大, 试样碎块数量减少, 当相似比 $C_I = 5$ 时, 煤样沿对角破坏, 试样的破坏程度降低; 此外, 图 7(c)显示冲击能量指数随 C_I 增大而减小, 表明试样的脆性随几何尺寸减小而下降, 这与 Bazant 等在脆性混凝土类材料变形破断的尺寸效应研究结果一致^[34]。可从端面摩擦效应角度解释, 即由于端面摩擦效应导致试样两端附近横向变形约束, 类似围压作用。对于小尺寸试样, 这种“围压”贯穿整体, 阻碍试样的整体破裂, 而对于大尺寸试样, 这种“围压”只存在试样端部, 对大尺寸试样裂纹扩展影响减小。在冲击破坏过程中, 相对而言, 大尺寸试样更多的弹性应变能转化为动能, 使其冲击倾向性增加。同时, 材料脆性的差异也会导致试样的强度呈现差异性, 当脆性材料所受应力超过其承载极限时往往会突然断裂, 试样的强度可能会受到材料内在缺陷、裂纹等因素的影响而呈现差异性。因此, 在使用典型指标衡量煤的冲击倾向性时应考虑模型尺寸的影响。

(2) 阻尼的尺寸相关性

阻尼促使岩石或岩体非稳态振动衰减, 尤在地震或其他动态加载条件下, 其能防止岩石或岩体的异常失稳或破裂。也有一些学者在支护中附加阻尼耗能构件, 快速止息岩体震动并耗散冲击能量^[35]。不同材料的阻尼大小有所差异, 脆性岩石通常是拉伸裂纹主导的断裂模式, 通过内部摩擦或塑性变形耗散的能量很少, 阻尼较小; 偏软的岩石在震动或动态加载时会发生塑性变形, 而塑性变形耗能, 阻尼相对较大。这也是节 2.2.2 中无冲击倾向性和强冲击倾向性煤阻尼系数比的选取依据。

材料颗粒的大小会对阻尼特性产生影响, 已有研究表明小尺寸的颗粒具有更高的阻尼效率^[36], 这使得不同尺寸的试样峰后特征有所差异。对于小尺寸试样, 破坏过程中产生较小的碎块, 阻尼效率较高, 在试样破坏过程中使其释放的动能逐渐衰减, 能量耗散增加, 碎块脱离母体后抛出速度相比大尺寸减小, 整体脆性特征降低, 如图 7(a)。相反大尺寸试样由于较低的阻尼使峰后破碎煤体保持较高的动能而缓慢衰减, 从而表现出更明显的动力现象。几何相似比的改变使材料的阻尼产生差异, 这种阻尼的几何比关联性在一定程度上解释了 3.3.1 节 K_E 值随着相似比增大而减小的原因。

5.2 材料选型及冲击模拟条件

脆性煤样及煤巷的冲击破坏现象模拟研究有助于揭示煤体的动力破坏行为与机制, 对于深部煤矿安全生产意义重大^[37]。相似材料合理选型是确保物理模型实验与煤矿现场过程相似性的基础, 模拟材料的物理力学性质、应力-应变关系以及断裂破坏行为等特性需与实际地质体匹配。然而, 煤矿地质条件通常复杂多变, 冲击地压涉及多尺度动态演化过程, 因此需针对性地选择相似材料。首先, 模拟材料应尽量均质同性, 保证试验结果的可重复性, 排除次要影响因素的干扰, 使结果更具代表性^[38]。表 6 列举了前人在研究冲击地压时一些常用的煤岩相似材料及模拟结构。

如表 6 所示, 目前冲击地压的煤岩相似材料选型主要是通过配比获得强度低且具有一定脆性特征的材料, 对于相似材料本身的冲击倾向属性定量表征较少。此外, 冲击地压物理相似模拟在基于几何相似比和密度相似比基础上选型, 对于脆性煤岩的冲击破坏指标的相似理论及材料选参研究较少。

由 2.3.3 节可知, 煤体材料的冲击倾向性与其峰后破坏特征密切相关。从材料性质相似角度考虑,

表 6 前人冲击地压相似模拟常用相似材料
Table 6 Similar materials commonly used in similar simulations of coal/rock burst

参考文献	模拟工况	相似材料	尺寸/m	加载方式	几何相似比 C_l
顾洋等 ^[16]		低强度水泥砂浆	模型: 1.6×1.6×0.4 巷道: 高 0.08, 拱高 0.15, 底宽 0.3	静载+爆破荷载	20
王四巍等 ^[14]		低强度水泥砂浆	模型: 1.6×1.6×0.4 巷道: 高 0.08, 拱高 0.15, 底宽 0.3	静载+爆破荷载	20
朱小景等 ^[15]	巷道	砂子、石膏、石灰、云母	模型: 0.4×0.4×0.2 巷道: 半径 0.5	静载+震动波	50
吕详峰等 ^[12]		砂、水泥、石膏、松香、酒精	模型: 0.2×0.15×0.2 巷道: 0.04×0.03×0.2	静载	100
潘一山等 ^[13]		硅砂、碳酸钙、石膏	模型: 1.5×1.1×0.2 巷道: 0.15×0.20	静载+爆破荷载	30
崔峰等 ^[17]		河沙、大白粉、熟石膏	5×0.3×1.89	静载	200
魏世明等 ^[18]		河沙、石膏、碳酸钙	1.5×0.3×1 开采步距: 0.1	静载	200
赵善坤 ^[9]	采场	碳酸钙、石膏、硼砂	5×0.4×1.5 开采步距: 0.02	静载	200
李志华等 ^[19]		碳酸钙、石膏、硼砂	2.5×0.2×1.6 开采步距: 0.01	静载	100
勾攀峰和胡有光 ^[40]		砂子、石膏、水泥、硼砂	2.5×1.45×0.2	静载	20

选取的相似材料需具有冲击倾向性是模拟出动力破坏现象的充分条件。已有研究表明, 水泥石膏比及掺砂率对脆性岩石单轴抗压强度起到主控作用, 而重晶石含量和水泥石膏比分别对弹性能指数和冲击能指数起到主控作用^[41-42], 通过合理调整这些主要成分的配比可以制得具有强岩爆倾向性的相似材料。类似地, 可通过选取水泥、石膏、砂子、重晶石、水作为冲击地压相似材料的主要成分, 并根据具体需求调整配比, 用以制备出具有不同冲击倾向性的相似材料。另外, 冲击地压现象涉及多尺度力学过程, 从微细观的煤岩颗粒到宏观的煤岩体结构, 模拟材料需能够有效模拟不同尺度的力学行为。煤岩材料的力学性质通常存在尺寸效应^[43], 正如 3.3.1 节和 4.2.2 节中模拟所得煤的冲击倾向性与几何相似比相关, 故在相似模拟材料选型过程中应考虑几何相似比的选取范围, 即材料参数满足相似理论基础, 需根据几何相似比进行参数优化以达到理想的冲击破坏现象模拟结果。

在煤矿现场生产过程中, 单独以煤层或岩层冲击倾向性指标判定为弱冲击倾向性的煤层或顶底板却发生强冲击地压事件的情况^[44]。上述研究表明煤的冲击倾向性对其自身破坏失效过程及模式、煤巷开挖动力显现程度均有显著影响, 但如 4.1 节所述, 煤层巷道在冲击破坏过程中受到了顶底板的耦合作用, 能量的传递和转化并非仅是煤自身的行为, 因此在模拟煤巷破裂冲击现象时, 除考虑煤自身冲击

倾向性的关键影响, 还应保证煤岩体模型结构的相似。另外, 冲击地压通常是动静载叠加作用引发, 而动载一般由采掘动载扰动、坚硬顶板破断滑移、断层构造错动滑移等诱发并在冲击地压起关键作用^[45]。3.3 节和 4.1 节结果表明, 在无外部动载作用下的强冲击倾向性煤样和煤体巷道开挖模拟时, 煤呈现明显的动力破坏行为, 但相较于冲击加载的碎裂过程其程度偏低^[46], 尤其是在几何相似比较大时, 仅依靠煤自身的强冲击倾向性很难模拟出动力破坏现象。因此在物理相似模拟冲击地压时, 煤冲击倾向性的影响是一方面, 还须考虑外部动载的影响及其相似性, 即施加满足相似理论的一定量级动载, 重现煤矿现场冲击地压发生过程。

6 结 论

(1) 无/强冲击倾向性煤样的破裂过程和失效模式存在显著差异。强冲击倾向性煤样呈现弹脆性破坏特征, 峰后破坏过程中拉伸和剪切裂纹均急剧增长, 形成的碎屑携带有动能弹射飞出, 呈动态强冲击破坏现象; 无冲击倾向性煤样应力-应变曲线峰后呈现应变软化特征, 裂纹扩展稳定并以剪切裂纹贯通的形式破坏, 为静态破裂过程。

(2) 冲击地压物理相似模拟中煤的冲击倾向性具有几何比关联性。研究结果表明, 不同几何比时煤样的单轴抗压强度模拟值与理论值基本一致, 冲

击能量指数随几何比增大先减小再趋缓。煤样峰值动能及碎块最大速度均随几何比增大而减小，其为前人冲击地压物理相似模拟中很难模拟出冲击现象的主要原因之一，冲击地压物理相似模拟的相似比越小越好。

(3) 冲击地压煤巷模型冲击破坏规律具有几何比关联性。无/强冲击倾向性煤巷模型模拟结果表明冲击显现程度随几何相似比增大而减小；另外，冲击地压煤巷模型模拟结构符合能量相似条件，无/强冲击倾向性煤层的煤巷峰值动能在不同几何比时的模拟值与理论值基本吻合，表明能量相似条件在煤巷开挖相似模拟中动能表征的适用性。

(4) 冲击地压物理相似模拟应满足材料本身力学特征、模型结构及加载条件的相似性。相似材料应力-应变曲线的峰后行为严重影响冲击地压现象模拟，煤的相似材料应具有强冲击倾向性，还应考虑顶底板以及外部动载的耦合作用，其对冲击现象的有效模拟极为关键。

参考文献(References)

- [1] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报. 2021, 46(7): 2 197 - 2 211.(Xie Heping, Ren Shihua, Xie Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society. 2021, 46(7): 2 197 - 2 211.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报-国家统计局 [EB/OL]. [2024-03-14]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
- [3] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报. 2019, 44(5): 1 283 - 1 305.(XIE Heping. Research review of the state key research development program of China:Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1 283 - 1 305.(in Chinese))
- [4] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2005(16): 2 803 - 2 813.(HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanic in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2005(16): 2 803 - 2 813.(in Chinese))
- [5] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴. 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. 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.(in Chinese))
- [6] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 152 - 171.(DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152 - 171.(in Chinese))
- [7] 中国科协发布 2023 重大科学问题、工程技术难题和产业技术问题 | 第二十五届中国科协年会[EB/OL].[2024-03-14].https://www.cast.org.cn/xw/BWTJ/art_32e91b9e6bdd45d5aa8c1dd01b6c72aa.html.
- [8] 谭云亮, 张修峰, 肖自义, 等. 冲击地压主控因素及孕灾机制[J]. 煤炭学报. 2024, 49(1): 367 - 379.(TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367 - 379.(in Chinese))
- [9] 鞠文君, 卢志国, 高富强, 等. 煤岩冲击倾向性研究进展及综合定量评价指标探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1 839 - 1 856.(JU Wenjun, LU Zhiguo, GAO Fuqiang, et al. Research progress and comprehensive quantitative evaluation index of coal rock bursting liability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1 839 - 1 856.(in Chinese))
- [10] 宫凤强, 赵英杰, 王云亮, 等. 煤的冲击倾向性研究进展及冲击地压“人-煤-环”三要素机理[J]. 煤炭学报. 2022, 47(5): 1 974 - 2 010.(Gong Fengqiang, Zhao Yingjie, Wang Yunliang, et al. Research progress of coal bursting liability indices and coal burst “Human-Coal-Environment”three elements mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1 974 - 2 010.(in Chinese))
- [11] 宋朝阳, 纪洪广, 孙利辉. 煤岩冲击倾向性指标试验研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增 2): 401 - 407.(SONG Zhaoyang, JI Hongguang, SUN Lihui. Advances in evaluation indices and experiments for bursting liability of coal and rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2015, 11(Supp.2): 401 - 407.(in Chinese))
- [12] 吕祥锋, 王振伟, 潘一山. 煤岩巷道冲击破坏过程相似模拟试验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(3): 311 - 318.(LV Xiangfeng, WANG Zhenwei, PAN Yishan. Similar Simulation Experimental Study of Impact Failure Process of Coal Roadway[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3): 311 - 318.(in Chinese))
- [13] 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): 1 281 - 1 286.(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): 1 281 - 1 286.(in Chinese))

- [14] 王四巍, 刘汉东, 姜彤. 动静荷载联合作用下冲击地压巷道破坏机制大型地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2 095 - 2 100.(WANG Siwei, LIU Handong, JIANG Tong. Large geomechanical model test on failure mechanism of rockburst tunnel under static and explosive loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2 095 - 2 100.(in Chinese))
- [15] 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.(in Chinese))
- [16] 顾洋, 陈杰. 不同岩体结构巷道冲击地压破坏特征的模型试验研究[J]. 山东煤炭科技, 2022, 40(3): 155 - 157.(GU Yang, CHEN Jie. Model experimental study on failure characteristics of rock burst in roadways with different rock mass structures[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2022, 40(3): 155 - 157.(in Chinese))
- [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.(in Chinese))
- [18] 魏世明, 王富莹, 张泽升. 逆断层上下盘开采冲击危险性模拟及实验研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 124 - 130.(WEI Shiming, WANG Fuying, ZHANG Zesheng. Modeling and experimental analysis of rockburst risk of mining in hanging wall or footwall of reverse fault[J]. Coal Engineering, 2022, 54(11): 124 - 130.(in Chinese))
- [19] 李志华, 窦林名, 陆菜平, 等. 断层冲击相似模拟微震信号频谱分析[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 51 - 56.(LI Zhihua, DOU Linming, LU Caiping, et al. Frequency spectrum analysis on micro-seismic signal of similar simulation test of fault rock burst[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(4): 51 - 56.(in Chinese))
- [20] 丁鑫, 肖晓春, 潘一山. 瓦斯压力影响下煤岩力学性质与冲击能量指数演化规律及机制[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 98 - 106.(DING Xin, XIAO Xiaochun, PAN Yishan. Mechanical properties and impact energy index of coal affected by gas pressure and evolutionary mechanism[J]. Coal Geology and Exploration, 2022, 50(7): 98 - 106.(in Chinese))
- [21] DENG P, LIU Q, HUANG X, et al. A new hysteretic damping model and application for the combined finite-discrete element method (FDEM)[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2021, 132: 370 - 382.
- [22] WEI W, ZHAO Q, JIANG Q, et al. Three new boundary conditions for the seismic response analysis of geomechanics problems using the numerical manifold method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 105: 110 - 122.
- [23] MUNJIZA A. The combined finite-discrete element method[M]. The combined finite-discrete element method, 2004.
- [24] TATONE B S A, GRASSELLI G. A calibration procedure for two-dimensional laboratory-scale hybrid finite-discrete element simulations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 75: 56 - 72.
- [25] MAHABADI O K, LISJAK A, MUNJIZA A, et al. Y-Geo: New Combined Finite-Discrete Element Numerical Code for Geomechanical Applications[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, 12(6): 676 - 688.
- [26] YAN C, TONG Y. Calibration of Microscopic Penalty Parameters in the Combined Finite-Discrete-Element Method[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(7): 4020092.
- [27] YAN C, ZHENG Y, WANG G. A 2D adaptive finite-discrete element method for simulating fracture and fragmentation in geomaterials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 169: 105439.
- [28] DENG P, LIU Q, LU H. A novel joint element parameter calibration procedure for the combined finite-discrete element method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 276: 108924.
- [29] 鞠明和, 朱涵, 窦林名, 等. 局部震动诱发煤体非稳态裂纹扩展及其冲击显现特征[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2 035 - 2 048.(JU Minghe, ZHU Han, DOU Linming, et al. Local seismicity induced unstable crack propagation in a coal and its effect on coal burst characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2 035 - 2 048.(in Chinese))
- [30] MUNJIZA A, JOHN N W M. Mesh size sensitivity of the combined FEM/DEM fracture and fragmentation algorithms[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(2): 281 - 295.
- [31] WANG M, GAO K, FENG Y T. An improved continuum-based finite-discrete element method with intra-element fracturing algorithm[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 384: 113978.
- [32] GAO F, YANG L. Experimental and Numerical Investigation on the Role of Energy Transition in Strainbursts[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(9): 5 057 - 5 070.
- [33] Li JC, Li HB, Zhao J. An improved equivalent viscoelastic medium

- method for wave propagation across layered rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 73(1): 62-69.
- [34] BAŽANT Z P, PLANAS J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials[C]. 1997.
- [35] 唐 治, 潘一山, 王凯兴. 冲击地压巷道围岩支护作用动力学分析[J]. 岩土工程学报, 2015(8): 1 532 - 1 538.(TANG Zhi, PAN Yishan, WANG Kaixing. Dynamic analysis of support for surrounding rock of rockburst roadway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015(8): 1 532 - 1 538.(in Chinese))
- [36] KLUCZYK K, JACAK W. Damping-induced size effect in surface plasmon resonance in metallic nano-particles: Comparison of RPA microscopic model with numerical finite element simulation(COMSOL) and Mie approach[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2016, 168: 78 - 88.
- [37] 孔令海. 增量荷载作用下深部煤巷冲击破坏规律模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1 847 - 1 854.(KONG Linghai. Impact failure law of deep coal roadway under incremental load based on similar simulation test[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1 847 - 1 854.(in Chinese))
- [38] 郑 涛. 岩土工程模型试验的理论与方法[J]. 矿业快报, 2008, 24(3): 18 - 21.(ZHENG Tao. Discussion on theory and method of model experiment in geotechnical engineering[J]. Express Information of Mining Industry, 2008, 24(3): 18 - 21.(in Chinese))
- [39] 赵善坤. 采动影响下逆冲断层“活化”特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 354 - 360.(ZHAO Shankun. Experiments on the characteristics of thrust fault activation influenced by mining operation[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(2): 354 - 360.(in Chinese))
- [40] 勾攀峰, 胡有光. 断层附近回采巷道顶板岩层运动特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006(3): 285 - 288.(GOU Panfeng, HU Youguang. Effect of faults on movement of roof rock strata in gateway[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006(3): 285 - 288.(in Chinese))
- [41] 陈陆望, 白世伟. 脆性岩体岩爆倾向性的相似材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增 2): 1 050 - 1 054.(CHEN Luwang, BAI Shiwei. Proportioning test study on similar material of rockburst tendency of brittle rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Supp.2): 1 050 - 1 054.(in Chinese))
- [42] 周 辉, 陈 珺, 张传庆, 等. 低强度高脆岩爆模型材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2 039 - 2 049.(ZHOU Hui, CHEN Jun, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental study of the rockburst model material with low-strength and high-brittleness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2 039 - 2 049.(in Chinese))
- [43] 陈 瑜, 黄永恒, 曹 平, 等. 不同高径比时软岩强度与变形尺寸效应试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(3): 1 073 - 1 078.(YU Chen, YONG Henghuang, PING Cao, et al. Size effect experimental study of strength and deformation in different height-to-diameter ratio soft rocks[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1 073 - 1 078.(in Chinese))
- [44] 宋录生, 赵善坤, 刘 军, 等. “顶板-煤层”结构体冲击倾向性演化规律及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增 1): 23 - 30.(SONG Lusheng, ZHAO Shankun, LIU Jun. Experimental research on rules of rock burst tendency evolution and mechanical properties of “roof-coal” structure body[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(Supp.1): 23 - 30.(in Chinese))
- [45] 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): 1 469 - 1 476.(DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye. 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): 1 469 - 1 476.(in Chinese))
- [46] 王振宇, 岳高伟, 蔺海晓, 等. 单轴冲击荷载下煤体损伤及破坏特征分析[J]. 煤矿安全, 2024, 55(2): 10 - 18.(WANG Zhenyu, YUE Gaowei, LIN Haixiao, et al. Analysis of damage and failure characteristics of coal under uniaxial impact loading[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(2): 10 - 18.(in Chinese))