

煤与瓦斯突出相似模拟试验的能量原理

程远平^{1,3,4}, 雷 杨², 杨斯杰^{1,3,4}

(1. 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 2. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:煤与瓦斯突出作为一种破坏力极强的矿井动力灾害, 由于这种动力灾害通常难以直接观测, 煤与瓦斯突出的物理相似模拟成为了收集突出观测数据和研究突出机理的重要方法。然而, 突出相似模拟试验的能量原理目前仍缺乏系统性研究。通过对过去 70 a 中突出模拟试验的回顾, 发现实验型煤具有普遍较高的孔隙率 (10%~40%, 中位数为 21.2%), 显著增大了煤孔隙中储存的初始游离瓦斯膨胀能 (几倍到几十倍)。为了进一步获得突出模拟试验的能量释放特征, 基于相似准则, 利用真三轴煤与瓦斯突出模拟系统开展了一系列突出模拟试验。结合观测数据与能量分析, 发现瓦斯膨胀能是突出能量的主要组成部分, 占总能量的 87.50%~95.31%, 其中初始游离气体的贡献占比为 1/3~2/3; 证明了实验室模拟试验的本质, 是将突出过程等效为煤中高压气体驱动的动力过程。特别是, 由于实验型煤高孔隙率引起的高初始游离瓦斯膨胀能, 模拟试验可以不依赖应力条件, 甚至可以由非吸附性气体 (如 He) 在低压下 (约 0.45 MPa) 诱发。与现场实际突出相比, 模拟试验往往表现为瓦斯膨胀能与应力能的同时释放, 缺乏应力与瓦斯之间的相互作用, 因而难以还原突出的激发过程。在未来的试验装置设计中, 如何使实验型煤孔隙率与原始煤层相当 (通常为 1%~11%) 是突出相似模拟能否在相似性上获得突破性进展的关键。

关键词:煤与瓦斯突出; 瓦斯膨胀能; 试验仪器; 能量原理; 突出机理

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2023)11-4078-19

Energy principle of simulation experiments on coal and gas outburst

CHENG Yuanping^{1,3,4}, LEI Yang², YANG Sijie^{1,3,4}

(1. National Engineering Research Center for Coal Gas Control, Xuzhou 221116, China; 2. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Key Laboratory of Coal Methane and Fire Control under Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 4. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Coal and gas outburst is an extremely destructive gas dynamic disaster in mines. Since such dynamic disasters are usually difficult to observe directly, physical similarity simulation of coal and gas outburst has become an important method for collecting observational data on outburst and studying outburst mechanisms. However, the energy principles of outburst similarity simulation experiments still lack systematic research. A review of outburst simulation experiments over the past 70 years revealed that experimental coals generally have a higher porosity (10%~40%, median 21.2%), which significantly increases the expansion energy of the initial free gas stored in the coal pores (by several times to several tens of times). To further elucidate the energy release characteristics of outburst simulation experiments, a series of outburst simu-

收稿日期: 2023-07-04 修回日期: 2023-09-13 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0813

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52034008, 52374240)

作者简介: 程远平 (1962—), 男, 吉林集安人, 教授。E-mail: ypc620924@163.com

通讯作者: 雷 杨 (1994—), 男, 贵州贵阳人, 特聘教授。E-mail: leiyc@cumt.edu.cn

引用格式: 程远平, 雷杨, 杨斯杰. 煤与瓦斯突出相似模拟试验的能量原理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4078-4096.

CHENG Yuanping, LEI Yang, YANG Sijie. Energy principle of simulation experiments on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4078-4096.



移动阅读

lation experiments were conducted using a true triaxial coal and gas outburst simulation system, based on similarity criteria. Combined with observational data and energy analysis, it was found that gas expansion energy is the predominant component of outburst energy, accounting for 87.50%–95.31% of the total energy, of which the contribution of initial free gas accounts for 1/3 to 2/3. This demonstrates that the essence of laboratory simulation experiments is to represent the outburst process as a dynamic process driven by high-pressure gas in coal. Due to the high initial free gas expansion energy resulting from the high porosity of experimental coal, simulation experiments can be induced without relying on stress conditions, and even by non-adsorptive gases (such as He) under low pressure (about 0.45 MPa). In contrast to actual field outburst, simulation experiments often exhibit simultaneous release of gas expansion energy and stress energy, lacking interaction between stress and gas, thus making it difficult to reproduce the excitation process of outburst. In the design of future experimental apparatuses, matching the porosity of experimental coal to that of the original coal seam (usually 1%–11%) is key to whether outburst similarity simulation can achieve breakthrough progress in similarity.

Key words: coal and gas outburst; gas expansion energy; experimental apparatus; energy principle; outburst mechanism

煤与瓦斯突出是地下煤矿开采中常见的动力灾害,其特点是煤岩体系在极短时间内连续破裂失稳,并伴随高压瓦斯猛烈的喷向采掘空间^[1-3]。随着我国浅部煤炭资源逐渐枯竭,深部资源开采将逐渐成为新常态^[4],而如何应对深部煤层更为频繁和复杂的突出灾害是煤矿安全生产面临的一个重大挑战。由于技术和空间限制,实际突出过程难以直接观测和记录,因此开展煤与瓦斯突出的模拟试验是研究突出机理和获取相关数据的重要手段。

最早的实验室突出模拟可以追溯到 20 世纪 50 年代,由苏联学者霍多特^[5]使用 CO₂ 在实验室完成,其基本原理是将突出过程视为由煤中高压瓦斯驱动的动力过程,该试验方案为后来的研究者设计模拟试验提供了重要参考。基于试验观测数据,一些关键的突出特征逐渐揭示,有效推动了突出防治技术的进步。例如, KRAVCHENKO 等^[6]使用示波器记录了 25 次突出实验中煤样的破坏波速,强调了充分抽采煤层瓦斯和避免煤层突然暴露的重要性。YARTSEV 等^[7]通过多次突出实验发现,突出激发是由于煤体暴露面瓦斯压力突然降低引起的,进一步突显了降低瓦斯压力的重要性。HARGRAVES 等^[8]利用突出煤层的煤样与不同气体在不同装置内进行突出实验,认为突出与工作面前方的应力集中和瓦斯压力梯度密切相关,强调了应力条件的控制。KUROIWA 等^[9]使用压制成型的煤样进行不同气体压力下的突出实验,指出瓦斯压力越大,煤体粉化程度和瓦斯涌出量越大,将瓦斯能量释放与煤体破碎联系起来。BODZIONY 等^[10-13]进行了较为系统的突出模拟试验,探讨了煤粉粒度分布、水分及孔隙率对型煤强度的影响,不同实验气体 (CO₂、N₂、He) 对突出阈值的影响,以及渗透率对突出传播速度的影响等。

总体而言,物理相似模拟是研究突出机理和揭示

突出特征的重要方法,这些早期的实验研究不仅为突出防治提供了指导,也为现今的仪器设计和试验模拟方案制定提供了重要参考。

1 煤与瓦斯突出模拟试验的基本原理

近年来,我国的学者们研发了许多的突出模拟试验装置。袁亮等^[2, 14-16]研发了一系列突出模拟试验系统,成功模拟了巷道掘进揭煤诱导突出的物理过程。李术才等^[17]研发的大尺度真三轴突出定量物理模拟试验系统考虑了实际煤层环境,实现了三维气固耦合条件下的突出模拟。文光才等^[18]分析了深井环境对突出模拟系统的要求,研制了深井煤岩瓦斯动力灾害模拟试验系统。许江等^[19-20]利用多场耦合煤矿动力灾害大型物理模拟试验系统,探究了不同巷道布置方式下煤粉-瓦斯两相流的动力过程;基于该装置,彭守建等^[21]进一步揭示了突出煤体的运移和冲击特性。唐巨鹏等^[22]研发了真三轴突出实验系统,分析了突出孕育阶段煤体破裂规律,探讨了深部和浅部突出发生机理的差异。金侃等^[23-24]以研究巷道内气-固两相流为重点开展了突出煤粉-瓦斯两相流实验,指出突出煤-瓦斯流动的破坏性和输运特性会因为吸附瓦斯的快速解吸受到显著影响。张超林等^[25]基于模块化思路研制了多功能煤与瓦斯突出模拟试验系统,并以河南龙山煤矿为背景进行突出模拟试验,结果表明该试验系统稳定可靠,能准确测定试件渗透率,并真实模拟再现突出的全过程。尹光志等^[26-27]以煤体含水率对突出强度的影响为关注点开展了模拟试验研究,结果表明突出强度随着含水率的增加而下降,2 者近似为二次曲线关系。张春华等^[28]通过搭建煤与瓦斯突出模拟试验台研究了石门揭煤引发的突出现象,分析了地质构造对突出过程和灾害防治的影响,结合模拟试验和数值模拟得到了含“构造包体”煤层突出的原

因和规律。

王刚等^[29]研发的石门揭煤突出模拟试验系统能够全面考虑地应力、瓦斯压力和煤体结构对突出现象的影响,同时能反映地应力和瓦斯压力的变化。郭品坤^[30]设计了一种真三轴煤与瓦斯突出模拟试验系统,并在此基础上进行了相似模拟试验,研究了瓦斯压力、气体吸附能力、煤体断裂韧度和渗透率等因素对突出过程的作用,提出突出发展阶段可划分为加速期、稳定期和衰减期。LU Y 等^[31]开发了一种多功能突出模拟试验系统,能够模拟煤岩体复杂应力环境,并用于研究气固耦合和气液固多相耦合条件下的强度变形、渗透性和失稳破坏特性。CAO J 等^[32]设计了一种大型三维模拟试验装置,能够模拟突出的整个过程(包括孕育、激发、发展和终止阶段),并对突出特征和机理进行了全面研究。聂百胜等^[33]开发了一种中等尺度的突出模拟装置,该装置能够模拟接近采场工作面的开采环境,实现在不同地质条件和瓦斯参数下的突

出模拟;基于该装置,还研究了突出过程中的能量演化特征,指出瓦斯膨胀能远大于煤体弹性能,是突出的主要能量来源^[34]。

总的来说,煤与瓦斯突出模拟试验装置种类繁多,设计者综合考虑了多种物理因素,能够实现不同条件下的突出模拟试验。对于许多突出模拟试验,其基本方法如图 1 所示,可以简化为:通过机械手段主动打开突出口,使达到瓦斯吸附平衡的封闭煤体突然暴露,引发煤与瓦斯突出。因此,压力阈值被广泛应用于突出条件判断,即将突出发生的条件等同于煤中的瓦斯压力是否超过特定压力阈值。随着科学技术的发展,气体抽真空/充气系统、数据收集系统(包括收集气体压力信号、微震信号、各种频段的声信号以及应力变化等)、应力加载系统、温度控制系统、模拟巷道采掘系统等被逐渐应用于突出的相似模拟试验中,它们旨在尽可能还原实际突出的物理环境并捕捉与突出过程相关的重要信息。

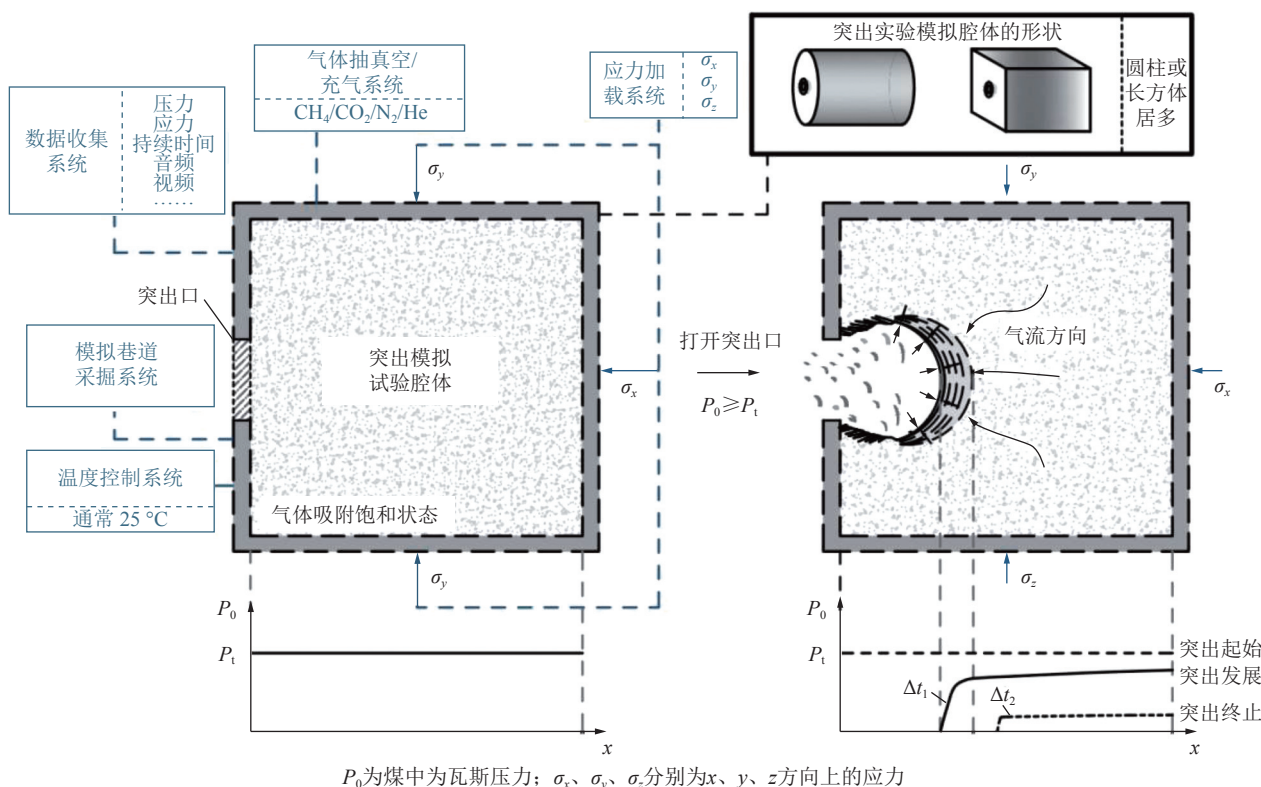


图 1 实验室模拟突出的基本原理

Fig.1 Fundamental principles for simulating an outburst in the laboratory

2 突出模拟试验的相似性分析

2.1 相似准则

对于物理相似模拟试验,相似性是至关重要的,即需要确保研究的物理过程在模型和原型之间具有较好的一致性。2个物理现象相似性包括几何相似、

运动相似和动力相似等多个方面,以往绝大部分实验研究均以下述 5 个方面的相似性为重点关注对象^[7, 10-13, 32, 35-39]。

(1) 几何相似。

几何相似是进行模拟试验的基础之一,它要求模型与原型中各种物理过程所处的物理空间几何形状

相似。这种比例关系可表示为

$$\frac{l_{p1}}{l_{m1}} = \frac{l_{p2}}{l_{m2}} = \dots = K_l \quad (1)$$

式中, K_l 为几何相似常数; l_{p1} 、 l_{p2} 为原型线性长度; l_{m1} 、 l_{m2} 为模型线性长度。

值得注意的是, 几何相似常数 K_l 通常是相似准则中首先考虑和确定的, 因为它是其他各种物理缩尺关系转换的基础。例如, 基于 K_l , 可确定面积相似常数 $K_A = K_l^2$ 、体积相似常数 $K_V = K_l^3$ 、时间相似常数 $K_t = t_p/t_m = \sqrt{l_p/l_m} = \sqrt{K_l}$ 。

(2) 运动相似。

运动相似要求模型和原型中的物理质点在相应点上的速度和加速度方向相同且成比例, 包含速度相似和加速度相似。

速度相似:

$$\frac{v_{p1}}{v_{m1}} = \frac{v_{p2}}{v_{m2}} = \dots = K_v \quad (2)$$

加速度相似:

$$\frac{a_{p1}}{a_{m1}} = \frac{a_{p2}}{a_{m2}} = \dots = K_a \quad (3)$$

式中, K_v 为速度相似常数; K_a 为加速度相似常数; v_{p1} 、 v_{p2} 为原型中质点的速度, m/s; v_{m1} 、 v_{m2} 为模型中质点的速度, m/s; a_{p1} 、 a_{p2} 为原型中质点的加速度, m/s²; a_{m1} 、 a_{m2} 为模型中质点的加速度, m/s²。

根据运动学规律可进一步得到运动相似比 (K_v 和 K_a) 与几何相似比 (K_l) 的关系为

$$K_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{\lim_{\Delta t_p \rightarrow 0} \frac{\Delta l_p}{\Delta t_p}}{\lim_{\Delta t_m \rightarrow 0} \frac{\Delta l_m}{\Delta t_m}} = \sqrt{K_l} \quad (4)$$

(3) 动力相似。

动力相似要求模型与原型中对应质点所受同种力 (例如重力、黏滞力、弹性力等) 的方向相同且大小成比例:

$$\frac{F_{p1}}{F_{m1}} = \frac{F_{p2}}{F_{m2}} = \dots = K_F \quad (5)$$

式中, K_F 为动力相似常数; F_{p1} 、 F_{p2} 为原型中质点所受的力, N; F_{m1} 、 F_{m2} 为模型中质点所受的力, N。

(4) 非定常相似准则。

在突出过程中, 煤体内部的瓦斯流动以及巷道中的煤粉-瓦斯流均属于非定常流, 因此突出模拟试验的 Strouhal 数需要与实际突出相等^[23-24]:

$$\frac{St_p}{St_m} = \frac{l_p/(v_p t_p)}{l_m/(v_m t_m)} = 1 \quad (6)$$

式中, St_p 为原型中的 Strouhal 数; St_m 为模型中的 Strouhal 数。

(5) 相似材料。

鉴于构造煤与突出事故之间的密切关联^[1, 40], 构造煤通常是突出模拟试验中的首选材料。然而, 与结构完整、抗扰动能力强的原生煤不同, 构造煤的强度较低, 黏聚力也较弱, 因此很难直接从中获取岩心试样^[4, 41-42]。为了解决这个问题, 通常使用粉碎的构造煤颗粒 (有时加入胶结剂) 制备重构岩心试样, 以便广泛用于突出模拟试验。在这种情况下, 实验材料与原始煤层的密度相似常数可表示为

$$\frac{\rho_{p1}}{\rho_{m1}} = \frac{\rho_{p2}}{\rho_{m2}} = \dots = K_\rho \quad (7)$$

式中, K_ρ 为密度相似常数; ρ_{p1} 、 ρ_{p2} 为原型中质点的密度, g/cm³; ρ_{m1} 、 ρ_{m2} 为模型中质点的密度, g/cm³。

此时, 可获得动力相似比 (K_F) 与运动相似比 (K_a) 的关系为

$$K_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{m_p a_p}{m_m a_m} = K_\rho K_l^3 K_a \quad (8)$$

式中, m_p 、 m_m 分别为原型、模型中的质点质量, g。

为了更好地揭示煤与瓦斯突出过程的本质, 以往学者们开展了大量研究以增加突出模拟试验与实际突出之间的相似性。例如, 袁亮等^[15-16]考虑了力学模型和能量模型建立了一种新的物理模拟准则, 并研发了高吸附含瓦斯煤相似材料; 王汉鹏等^[43]研制出一种新型的含瓦斯煤体相似材料 (以煤粉为骨料, 腐植酸钠水溶液为胶结剂, 混合压制成型后干燥), 并采用该相似材料制作的型煤成功模拟了突出过程, 证明了该相似材料能较好地模拟含瓦斯煤体; 张淑同等^[44]通过统计分析煤与瓦斯突出现场资料及现有研究成果, 得出了突出煤层和突出孔洞的特征, 推导出了基于突出力学作用机理的相似准则, 研究了突出相似模拟系统和相似材料参数, 建立了固-气耦合的数值模型, 并进一步研究了突出的发展过程和运动规律。

2.2 几何相似与相似材料

在突出的相似模拟试验中, 几何相似与相似材料是被广泛关注的 2 个方向, 它们是运动相似与动力相似的基础。总体而言, 相似准则中各相似常数的取值范围尚未有统一的约束, 不同模拟试验之间可能存在较大差异。

在进行突出模拟试验时, 通常使用基于构造煤的重制型煤。在以往的试验中, 型煤的密度相似常数 K_ρ 为 1.04~1.65, 其控制因素主要是型煤的重制过程, 尤其是成型压力。使用构造煤的重制型煤而非原始煤

层的岩心取样主要有 2 个原因:

(1) 与结构完整、抗扰动能力强的原生煤相比, 构造煤强度较低、黏聚力较弱, 难以直接获得岩心试样。为解决此问题, 通常将原始构造煤样粉碎 (有时加入胶结剂), 并在一定应力条件下压制成型试样。这是一种普遍做法, 可有效获取构造煤的物理力学性质参数。

(2) 构造煤通常具有较高的瓦斯含量和瓦斯解吸速率, 这使得构造煤层的突出危险性普遍大于原生煤层^[4, 45-46]。许多观测结果也证实了构造煤与突出之间存在密切关系^[3, 30, 40, 47]。

因此, 型煤的压制通常是突出模拟试验的必备步骤。图 2 展示了一些实验中孔隙率与成型压力之间的关系^[16, 38-39, 48-52], 可以看到, 制样过程中的成型压力普遍小于 80 MPa, 这使得型煤孔隙率大多在 10%~40%。基于图 2 中的实验数据可估计出, 要使型煤孔隙率降低到 1%, 成型压力可能至少需要 256 MPa。显然, 这在目前的实验条件下是难以达到的, 因此高孔隙率的型煤普遍被用于突出模拟试验。然而, 需要指出的是, 型煤压制应力的保压时间、压制次数, 煤体的几何性质 (例如体积、形状) 以及力学参数 (例如抗压强度、弹性模量) 等都可能影响成型应力与成型孔隙率之间的关系^[53-57]。事实上, 由于以往的突出模拟试验中较少关注于型煤孔隙率, 因此相当缺乏孔隙率的分布数据, 型煤孔隙率与成型压力之间的关系也仍未清晰。图 3 展示了部分突出模拟试验中实验型煤的孔隙率分布^[10-13, 23, 38-39, 48, 50-52, 57-70], 其中未指明孔隙率的试验研究参考图 2 中蔡成功^[48]得出的成型压力与孔隙率的关系式进行估算, 最终可以得到实验型煤的孔隙率中位数约为 21.2% (这种估算是保守的, 实际中可能会更高), 这显著大于实际煤层条件 (通常 1%~11%)^[49-53]。

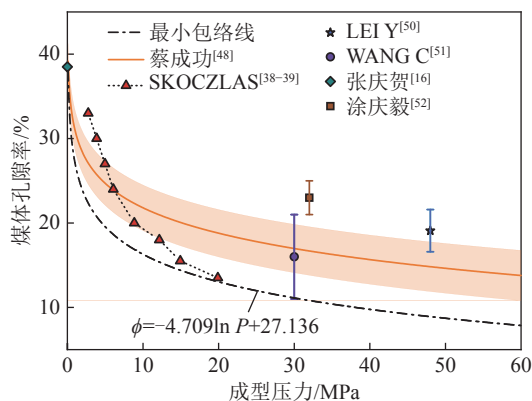


图 2 成型压力与孔隙率之间的关系^[16, 38-39, 48-52]

Fig.2 Relationship between molding pressure and briquette porosity^[16, 38-39, 48-52]

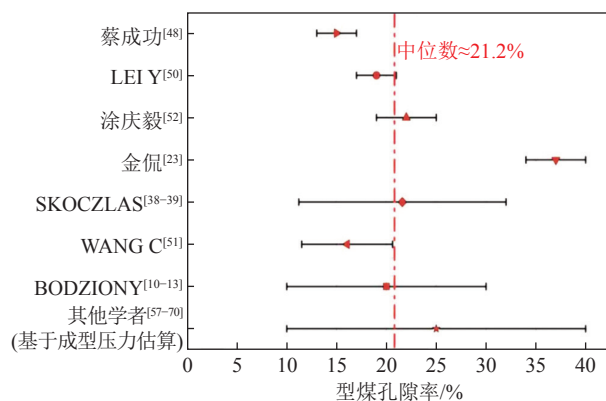


图 3 突出模拟试验中实验型煤的孔隙率范围^[10-13, 23, 38-39, 48, 50-52, 57-70]

Fig.3 Porosity range of experimental briquettes in outburst simulation tests^[10-13, 23, 38-39, 48, 50-52, 57-70]

表 1 汇总了 1958—2020 年部分突出模拟装置的关键参数, 这些实验腔体的体积为 $2.83 \times 10^{-4} \sim 6.75 \text{ m}^3$, 横跨 4 个数量级。在现场巷道“宽×高”取 $4 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ 的情况下, 以往大多数仪器的几何相似常数 $K_l = 10 \sim 100$, 而最近一些大型仪器的 $K_l = 2 \sim 10$ 。从实验结果上来看, 不同尺度实验仪器的模拟结果总体上是互相支持的, 其中大部分结论与实际发生的大尺度突出能建立较好的联系。因此, 尺度效应对实验室模拟的影响并不明显。此外, 实验型煤的成型压力、保压时间、添加剂、粒度分布等没有统一规定。以黏结剂为例, 多数实验中采用质量分数为 3%~6% 的水, 这有助于保持煤原有特性; 当对试验煤体的物理性质有特殊要求时, 有机黏结剂 (如腐植酸和聚乙烯醇, 特点为强度低、灰分低)、无机黏结剂 (如水泥和石膏, 特点为强度高、灰分高) 或复合黏结剂 (2 种及 2 种以上黏结剂混合) 也常被用于型煤的压制过程中^[54-55]。总体而言, 突出模拟试验中型煤的抗拉强度通常 ($\sigma_t = 0 \sim 1.2 \text{ MPa}$) 显著小于原生煤 ($\sigma_t = 1 \sim 20 \text{ MPa}$), 而相当于构造煤 ($\sigma_t = 0.2 \sim 8.0 \text{ MPa}$) 中“软煤”, 因此具有低强度的易突属性^[4, 56]。

2.3 初始力学条件的相似性

在突出模拟试验中, 由于重构煤样的密度 (或孔隙率) 往往偏大, 这会导致其孔隙率 (通常 $\phi = 10\% \sim 40\%$) 超过实际煤层的通常范围 ($\phi = 1\% \sim 11\%$), 如图 4 所示。同时, 实验型煤的渗透率 (普遍超过 10^{-10} m^2 , $1 \text{ mD} = 0.987 \times 10^{-15} \text{ m}^2$) 可能比现场测定的煤层渗透率 (通常渗透率 $k = 10^{-13} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$) 高出 3 个数量级以上^[4, 70-71]。因此, 在开展突出模拟试验时, 型煤内部几乎没有瓦斯压力梯度, 这与实际中煤层工作面前方的瓦斯压力条件有很大差异, 如图 5 所示。在这种情况下, 实验室模拟突出通常依靠机械方式主动打开突出

表 1 1958—2020 年部分突出模拟装置的物理参数

Table 1 Physical parameters of selected outburst simulation devices from 1958 to 2020

文献	内部煤样尺寸/mm	型煤		气体	
		成型压力/MPa	孔隙率/%	类型	压力/MPa
[7]	直径60、高100			CH ₄	0.5~4.0
[9]	圆柱, 容积 $1.2 \times 10^5 \text{ mm}^3$			CH ₄	0.5~3.0
[10-13]	直径96、高300		10~30	CO ₂ , N ₂ , He	
[48]	225×225×187.5	15~60		CH ₄	0.25~0.50
[57-59]	1 500×1 500×3 000	15		CO ₂ , N ₂	≤3.0
[60]	直径442, 高30~200	30		CO ₂ , N ₂ , CH ₄	0.311~0.974
[61]	100×100×100	25		CH ₄	0.65~0.75
[62-66]	385×385×570	4		CH ₄	0.5~1.5
[35-36, 67]	1 050×410×410	≤10		CH ₄ , CO ₂	≤2
[34]	1 500×600×1 000	≤20		CO ₂	0.53
[32, 37]	1 500×800×800	≤25		CH ₄	≤6.0
[68]	3 000×800×500	5.95		CH ₄	1.0
[38-39]	直径48, 高50	1.8~17.2	11.2~32.0	CH ₄	0.14~3.17
[24]	直径200, 高300		>35	CO ₂ , N ₂	0.1~0.5
[46, 69-70]	250×250×250	30~80	19.09~25.01	CO ₂ , N ₂ , He	0.3~0.7

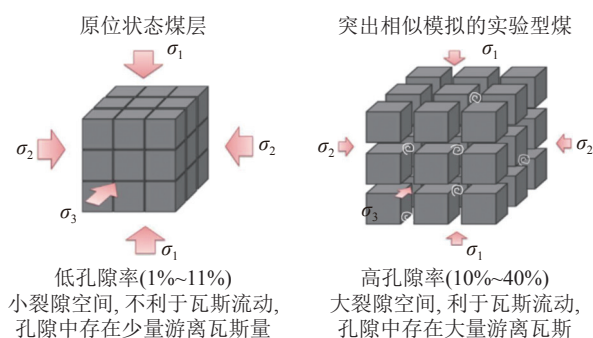


图 4 实际煤层与实验型煤之间的孔隙差异

Fig.4 Pore differences between actual coal seams and experimental briquettes

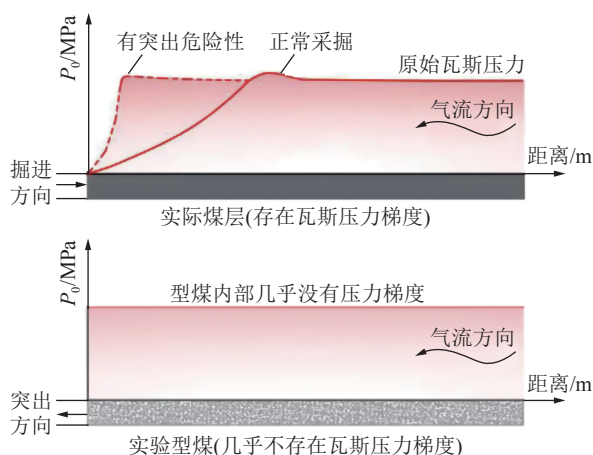


图 5 突出激发阶段的压力梯度条件

Fig.5 Pressure gradient conditions in outburst trigger stage

口来诱发突出,即突然释放密封空间内的高压瓦斯,利用瓦斯膨胀能驱动突出的发展。

实际采掘过程中遭遇突出通常是因为触碰到了工作面前方的高瓦斯压力梯度区域。突出发生时,煤体暴露表面的高瓦斯压力梯度会导致煤体的破碎,破坏类型主要为拉伸破坏,此时煤体是否发生破碎取决于暴露表面附近的瓦斯压力差 ($P_0 - P_1$) 是否超过煤的抗拉强度 (σ_t),其力学条件^[49, 70, 72]可表示为

$$P_0 - P_1 \geq \sigma_t \quad (9)$$

式中, P_1 为环境压力, MPa。

虽然突出模拟试验与实际突出在能量来源上一致 (均由瓦斯充当驱动力), 但实验型煤的高渗透率性质在一定程度上限制了利用物理模拟试验还原实际突出激发过程的能力^[18]。具体来说, 在突出模拟试验中, 当打开突出口使得煤体暴露后, 可观测到 2 种不同结果: ① 如果煤体暴露表面的瓦斯压力差超过煤体的抗拉强度 ($P_0 - P_1 \geq \sigma_t$), 则突出发生; ② 如果煤体暴露表面的瓦斯压力差低于煤体的抗拉强度 ($P_0 - P_1 < \sigma_t$), 则瓦斯压力迅速降为环境压力, 不发生突出或仅发生小型的压出 (由实验应力条件决定)。

因此, 在时间维度上, 煤与瓦斯突出相似模拟的激发过程通常是瞬时完成的, 即表现为煤中的瓦斯能和应力能的同时释放, 而难以模拟真实的突出激发过程或孕育过程——这是由于实验设计 (依靠机械方法

主动打开突出口) 的不可避免结果^[15, 73-75]。相比之下, 实际突出发生之前通常伴随着采矿活动以及煤层内瓦斯压力梯度的变化, 因此其激发过程可能持续数小时、数天甚至更长时间, 并伴随着潜在的“预警信号”(或称为“前兆信号”), 如声信号、微震信号和瓦斯异常等。这些与突出激发过程密切相关的信号在实验室中几乎从未被捕获。为了模拟真实的突出激发过程, 近年来部分煤与瓦斯突出模拟试验已经开始考虑模拟巷道开挖对压力梯度的影响^[14-15], 但仍受限于实验型煤过高的孔隙率。尤其是, 煤样孔隙率的增加可能导致游离瓦斯量增加, 从而进一步影响突出潜能的聚集和消散过程。然而, 这个现象以及背后潜在的问题目前尚未引起充分关注。接下来将对这个问题进行深入研究。

3 煤与瓦斯突出模拟试验的能量分析

3.1 突出过程中的能量转化特征

突出发生后, 煤层系统会经历从一个平衡态向另一个平衡态的转变。以往学者们对煤与瓦斯突出的能量原理进行了深入探讨, 研究重点包括揭示煤层系统能量变化特性以及突出各个阶段的能量平衡^[24, 76-79]。普遍认为, 瓦斯膨胀能和煤体弹性能是煤与瓦斯突出的主要能量来源, 这些能量导致了煤体的破碎和抛出; 在发展阶段中, 瓦斯和破碎的煤/岩体会混合形成在巷道中快速运动的气-固两相流, 该过程还存在着瓦斯残余动能、煤体摩擦、热量、声发射以及振动等其他各种能量损耗。因此, 总体而言, 突出过程中的能量转换关系^[50, 80-81]可概括为

$$A_1 + A_s = W_1 + W_2 + W_3 \quad (10)$$

式中, A_1 为煤体弹性能, J; A_s 为瓦斯膨胀能, J; W_1 为煤体搬运功, J; W_2 为煤体破碎功, J; W_3 为其他能量消耗的总和, J。

煤层释放的能量与能量释放区的体积密切相关^[52, 82]; 在实际中, 该区域会随着突出的发展而向煤层内部移动, 引起内部煤体的破碎或损伤^[30, 52]。因此, 煤层释放的总能量 A_t 可进一步表示为

$$A_t = E_1 V_{s,1} + E_s V_{s,2} \quad (11)$$

式中, E_1 为单位体积煤体具有的弹性能, J/m³; E_s 为单位体积煤体具有的瓦斯膨胀能, J/m³; $V_{s,1}$ 和 $V_{s,2}$ 分别为煤体弹性能与瓦斯膨胀能的能量释放区体积, m³。

在大多数突出模拟试验中, $V_{s,1}$ 和 $V_{s,2}$ 是可视作相等, 且等价于试验腔体中煤体的总体积。在应力条件下, 单位体积煤体的弹性能^[52, 82]可表示为

$$E_1 = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z)] \quad (12)$$

式中, E 为弹性模量, MPa; μ 为泊松比。

对于瓦斯的热力学过程, 考虑到高压瓦斯在煤孔隙中经历减压并膨胀, 因此等容和等压变换不适用——主要的争议在于突出过程究竟是更接近于绝热过程还是等温过程^[24, 38, 50, 77, 83-84]。

若突出过程中瓦斯与周边煤岩体之间有充足的热量交换使得瓦斯温度基本保持恒定, 即可认为煤与瓦斯突出过程近似为等温过程^[52, 85]:

$$W_{G,i} = P_0 V_0 \ln \left(\frac{P_0}{P_1} \right) \quad (13)$$

式中, $W_{G,i}$ 为瓦斯等温膨胀过程中释放的能量, J; V_0 为突出总瓦斯体积, L。

另一方面, 若系统内相关材料的导热系数较低且热力过程进行得非常迅速, 则瓦斯将几乎不与周围环境进行热交换, 此时可假设突出过程是绝热的。该过程中的瓦斯膨胀能^[46, 69-70, 83]可表示为

$$W_{G,a} = \frac{P_0 V_0}{\gamma_n - 1} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma_n - 1}{\gamma_n}} \right] \quad (14)$$

式中, $W_{G,a}$ 为瓦斯绝热膨胀过程中释放的能量, J; γ_n 为绝热系数。

无论突出过程是等温还是绝热, 瓦斯膨胀能主要与瓦斯压力以及瓦斯体积 2 个因素相关。鉴于突出总瓦斯体积 (V_0) 由孔隙中的游离瓦斯体积与煤中吸附瓦斯的解吸量组成, 存在

$$V_0 = V_f + V_d \quad (15)$$

$$A_s = A_f + A_d \quad (16)$$

式中, V_f 为初始煤孔隙中游离瓦斯的体积, m³; V_d 为吸附瓦斯解吸后参与突出的体积, m³; A_f 为游离瓦斯膨胀能, J; A_d 为解吸瓦斯膨胀能, J。

在给定的煤层瓦斯压力 (P_0) 下, 单位体积煤体中的游离瓦斯量 (V_f) 可根据气体状态方程获得, 即

$$V_f = \frac{P_0 \phi T_1}{P_1 T_0 \xi} \quad (17)$$

式中, T_0 为突出前的瓦斯温度, K; ϕ 为孔隙率; T_1 为突出后的瓦斯温度, K; ξ 为气体压缩系数, 将煤中的瓦斯近似为理想气体时可取 $\xi = 1$ 。

解吸瓦斯的参与量将在 3.4 节中进一步讨论。根据式 (17) 可知, 对于给定的环境条件, 煤体孔隙率与游离瓦斯量呈正比关系, 进而控制着初始瓦斯膨胀能。需要指出的是, 鉴于突出过程究竟是更接近绝热

(式 (14)) 还是更接近等温 (式 (13)) 仍存争议, 下文的计算中将基于这 2 种计算方法得出的能量区间进行分析讨论。

3.2 突出模拟试验的仪器与方案

为了深入研究突出模拟试验中的能量释放特征, 参考了 1988—2018 年突出模拟试验装置的典型结构

特征与试验设计 (图 6), 使用自主研发的真三轴煤与瓦斯突出模拟试验系统进行了一系列模拟试验, 旨在通过突出观测数据来估算突出能量。

图 7 展示了突出模拟系统的组成, 主要包括:

① 突出模拟试验腔体, 尺寸为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高); ② 应力加载系统, 垂直加载应

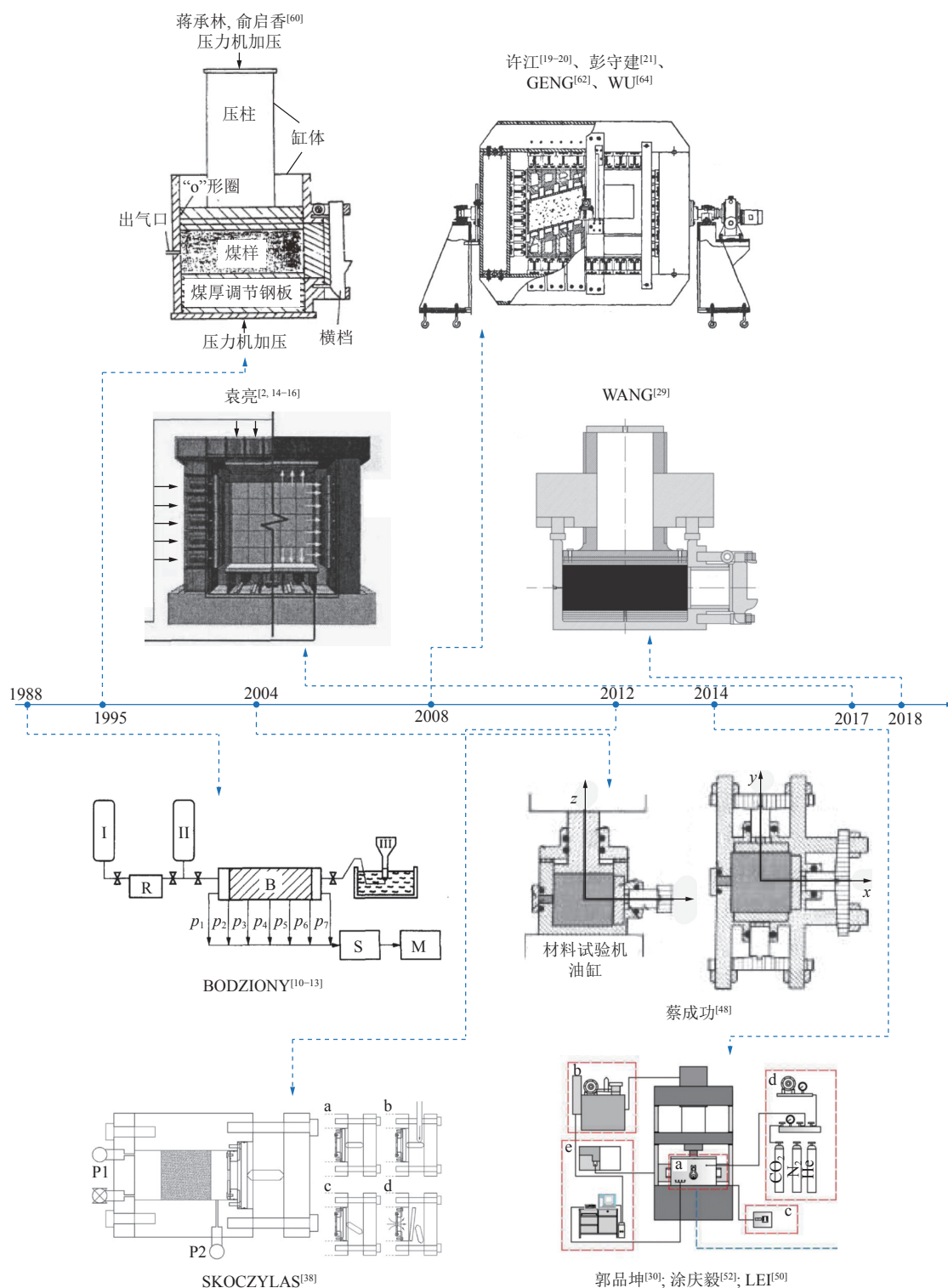
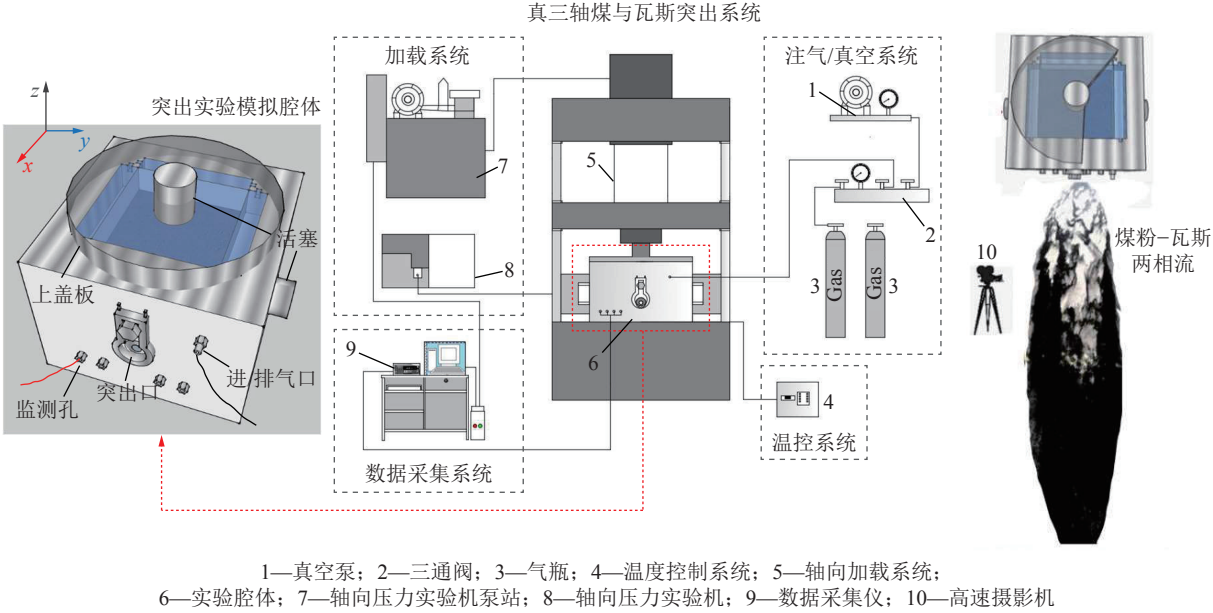


图 6 1988—2018 年典型突出装置的示意

Fig.6 Schematic diagram of some typical outburst simulation instruments from 1988 to 2018



1—真空泵；2—三通阀；3—气瓶；4—温度控制系统；5—轴向加载系统；6—实验腔体；7—轴向压力实验机泵站；8—轴向压力实验机；9—数据采集仪；10—高速摄影机

图 7 真三轴煤与瓦斯突出模拟系统的构造示意

Fig.7 Test system diagram of triaxial coal and gas outburst simulation systems

力 ≤ 80 MPa, 左右及前后向水平应力 ≤ 27 MPa; ③ 注气/真空抽气系统, 使用 ZJP-30 罗茨真空泵抽真空, 并利用高灵敏度压力表准确调节气体压力; ④ 恒温控制系统, 采用电阻加热带包覆腔体的恒温系统, 外层加保温材料; ⑤ 数据采集系统, 包括瓦斯压力传感器、高速摄影机、温度传感器和数据采集仪。

实验煤样的基本参数见表 2, 煤样原始孔隙率为 4.1%, 型煤成型孔隙率为 20.08%, 该范围接近以往试

验的中位数 (图 3), 密度相似常数 K_p 约为 1.25, 其抗拉强度与较软的构造煤相当。此外, 为了探究气体吸附/解吸差异对突出能量的影响, 突出模拟试验选择 CO_2 (强吸附性气体)、 N_2 (弱吸附性气体)、 He (非吸附性气体) 作为实验气体; 基于实验室安全的考虑, 未采用易燃易爆的 CH_4 作为实验气体, 具体方案见表 3。以 CO_2 和 N_2 等气体替代 CH_4 作为突出气体的做法在以往的研究中是较为普遍的^[10-13, 34-36, 57-58, 67, 86]。

表 2 实验煤样基本物性参数

Table 2 Basic physical parameters of the experimental coal sampe

吸附常数(CO_2)		吸附常数(N_2)		工业分析/%			真密度	孔隙率	抗拉强度
$V_L/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	$P_L/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	$V_L/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	$P_L/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	$\rho/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	$\phi/\%$	σ_t/MPa
59.02	0.77	13.45	0.91	4.54	5.88	6.78	1.46	20.08	0.4

注: V_L 为Langmuir体积, m^3/t , 是基于单层吸附的吸收剂的最大吸附容量; P_L 为Langmuir压力, 是吸附体积等于 V_L 一半时的压力, MPa。

表 3 煤与瓦斯突出模拟试验方案

Table 3 Experimental scheme of coal and gas outburst tests

试验编号	气体类型	气体吸附能力	气体压力/MPa	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	应力条件 ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$, MPa)
1- i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)	He	无	0.1~0.7	25	5
2- i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)	N_2	弱	0.1~0.7	25	5
3- i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)	CO_2	强	0.1~0.7	25	5

开展模拟试验的关键步骤如下:

① 制备样品。将原始煤样粉碎至粒径 0.25~0.50 mm, 加入 6% 水分后搅拌均匀。② 煤样成型。将煤样置于实验腔体中, 用应力加载系统压制成型, 压力垂直应力为 60 MPa, 保压时间 60 min。③ 腔体

准备。在确认实验腔体密封后, 抽真空 24 h, 然后注入实验气体, 在指定气体压力下保持 72 h 以上, 使实验型煤接近气体饱和状态。④ 突出前准备。对实验型煤施加 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 5$ MPa 的环境应力, 通过压力传感器检查煤体内部气体压力是否达到规定的突出压力,

并进行调整。⑤ 启动突出。打开密封堵头, 诱发突出。⑥ 数据收集。利用高速摄影机记录突出过程, 获取突出孔洞特征、突出强度、煤体堆积特性和粒度分布等突出特征。

3.3 煤与瓦斯突出模拟试验结果

在实践中, 瓦斯压力被广泛作为突出条件的判定参数, 即认为突出的发生与瓦斯压力超过某个阈值密切相关^[4, 87]。模拟试验的结果表明 (表 4), 突出的瓦斯压力阈值呈现随实验气体吸附能力增加而减小的趋

势, CO₂ 为 0.35~0.40 MPa、N₂ 为 0.40~0.45 MPa、He 为 0.45~0.50 MPa, 该现象可能与气体吸附导致的煤强度降低密切相关^[88-89]。

相对突出强度 (R_o) 通常被用来定量评价突出的破坏性^[24, 51, 69, 79], 其定义为

$$R_o = \frac{M_o}{M_L} \quad (18)$$

式中, M_o 为突出煤体的质量, 即突出强度, kg; M_L 为装入突出试验腔体的煤体总质量, kg。

表 4 煤与瓦斯突出模拟试验结果

Table 4 Results of the coal and gas outburst simulation experiments

试验编号	气体类型	气体压力/MPa	观测结果	突出强度/kg	相对突出强度/%	突出距离/m
1-1 ~ 1-8	He	0.10 ~ 0.45	未突出			
1-9	He	0.5	突出	2.170	10.327	10.3
1-10	He	0.6	突出	2.355	11.293	15.4
1-11	He	0.7	突出	2.649	12.655	16.2
2-1 ~ 2-7	N ₂	0.1 ~ 0.4	未突出			
2-8	N ₂	0.45	突出	2.791	13.571	16.0
2-9	N ₂	0.5	突出	3.027	15.329	17.1
2-10	N ₂	0.6	突出	3.421	17.003	18.5
2-11	N ₂	0.7	突出	3.992	18.829	19.4
3-1 ~ 3-6	CO ₂	0.10 ~ 0.35	未突出			
3-7	CO ₂	0.4	突出	3.721	17.908	17.2
3-8	CO ₂	0.5	突出	4.881	23.292	18.1
3-9	CO ₂	0.6	突出	5.342	25.394	21.8
3-10	CO ₂	0.7	突出	6.020	29.790	24.9

结果表明, 相对突出强度 R_o 随着突出压力的增加呈上升趋势; 在相同突出压力下, CO₂ 试验中的 R_o 分别是 N₂ 和 He 的 1.96~2.02 倍和 1.80~1.82 倍。特别是, 结果表明只有在吸附性气体 CO₂ 和 N₂ 的突出模拟试验中可以观测到煤体层裂现象 (图 8(a)、(b)), 而在非吸附性气体 He 的突出试验中则几乎没有层裂现象 (图 8(c))。上述结果强调了吸附气体对突出强度的显著贡献以及对层裂发展的决定性影响。

为了获得煤体在突出过程中的破碎特征, 每次试验后均对现场突出煤体进行了仔细收集和筛分。图 9 展示了瓦斯压力为 0.5~0.7 MPa 时突出煤体的粒度分布, 大多数煤体 (质量占比 48.57%~78.84%) 均在粒径 0.25~0.50 mm, 仅有 13.65%~17.83% 的煤体被破碎到 0.25 mm 以下。尽管小颗粒煤体的质量占比较小, 但以往研究普遍指出具有这些解吸速度极快的煤粉对于促进突出发展有重要作用^[24, 79, 90]。突出煤体的粒度分布数据将有助于在下面估算突出过程中

的瓦斯解吸量。

为了获得突出煤体的堆积特征, 喷出的煤体在试验后均以 1 m 为间隔被收集并称重, 结果如图 10 所示。可以发现, 堆积的突出煤体表现为具有起伏的波浪形分布, 这意味着突出过程中煤层的破裂传播可能具有周期性特征, 即暴露表面的层裂在高压梯度下规律性的形成并抛出, 这种近似周期性的动态破裂最终使得突出煤体出现局部质量聚集, 因此质量随突出距离的演化曲线呈现为波浪形。这种力学破坏的周期性本质上是突出能量释放的周期性, 这将在第 4 节中进一步讨论。

此外, 突出煤体堆积特征 (图 10) 还展现了突出发展阶段中气体解吸对突出煤体搬运的显著贡献。具体而言, 与非吸附性气体 He 的突出试验相比, N₂ 和 CO₂ 的试验中可以观测到普遍较远的突出距离, 并且大量的突出煤体聚集在距离突出口较远的位置, 证明煤中吸附气体的参与对煤粉-瓦斯流的运动起着促进

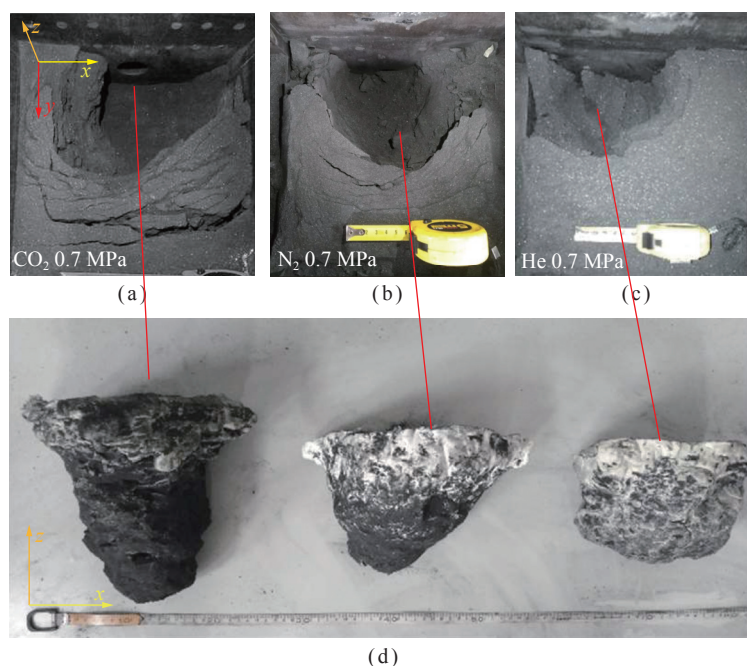


图8 不同实验气体诱发突出的孔洞特征

Fig.8 Outburst hole characteristics induced by different experimental gases

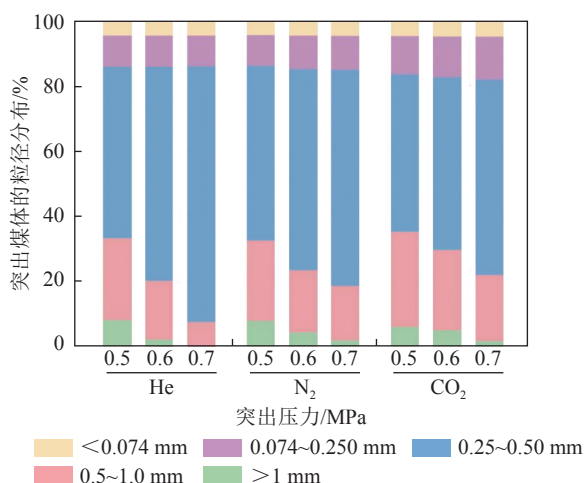


图9 突出煤体的粒度分布

Fig.9 Particle-size distribution of outburst coal

作用,导致了更强的搬运能力。

3.4 突出模拟试验中的能量估算

通过突出模拟试验可以发现,完全由游离气体参与的 He 试验也能发生突出——高孔隙率型煤为游离气体提供了良好的空间条件,导致游离气体膨胀能足以诱发突出,而不再依赖于吸附气体的贡献。下面将对其中的能量释放特征做进一步估算。

煤孔隙中游离气体的体积在已知压力 (P_0) 与孔隙率 (ϕ) 的前提下可以通过式 (17) 进行估算,而游离气体膨胀能可以通过式 (13) 和式 (14) 进行估算。然而,对于煤中吸附气体的能量贡献,则需要一定假设下进行估算。煤中吸附气体参与突出是一个较为复杂的过程,涉及到吸附气体的脱附、在孔隙内的扩

散以及在裂隙系统中的渗流等^[88, 91-94]。作为一个总的计算思路,假设在突出持续时间内,突出煤体与能量释放区内的煤体均对解吸气体参与量有贡献。在这种假设下,可能会高估解吸气体实际参与突出的量,但是仍然可以作为与游离气体参与量的对比。因此,基于煤体的解吸性能测试,参考突出压力 (表 4) 与突出煤体粒径分布 (图 9),通过计算试验腔体中煤体与突出煤体在突出持续时间内的气体解吸量来估计突出过程中的解吸气体参与量 V_d ,可表示为

$$V_d = t_0 v_i \gamma_i M_L \quad (19)$$

式中, t_0 为突出持续时间, s; γ_i 为给定粒度范围内煤体的质量分数, %; v_i 为给定粒度范围内煤体在给定时间内的平均解吸速率, $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{s})$ 。

为了获得式 (19) 中的平均解吸速率 v_i , 开展了平衡压力为 0.5、0.6、0.7 MPa, 煤样粒径为 <0.074、0.074~0.250、0.25~0.50、0.5~1.0、>1 mm 的 N_2 和 CO_2 解吸实验。鉴于本文所有突出模拟试验的持续时间均 <2.5 s, 每个粒径区间取前 2.5 s 的平均解吸速率 (v_i), 且均由 3 次重复的解吸实验平均得到。

计算参数列于表 5, 其中在计算质量分数 γ_i (式 (19)) 时, 考虑到突出试验腔体内未突出的型煤具有较大的孔隙率, 将这些煤体的解吸速率等价为粒径 > 1 mm 的部分 (实际上可能达不到该解吸速率), 这种处理会高估解吸气体的参与量。另一方面, 在突出模拟试验中, 施加的围压会挤压煤体的大孔 (减小孔隙空间), 所以相对于无应力条件下吸附/解吸实验

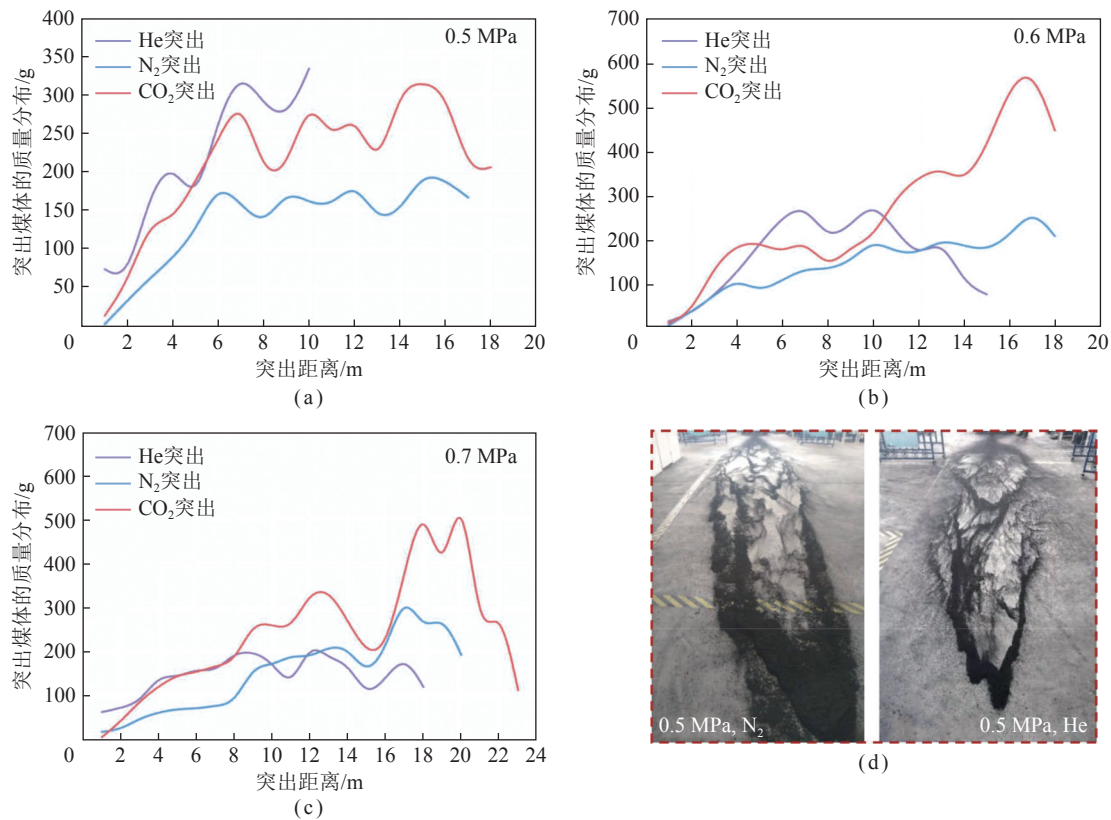


图 10 突出煤体的质量分布特征

Fig.10 Mass distribution characteristics of outburst coal

表 5 突出过程中气体解吸量的计算参数

Table 5 Parameters related to initial desorption amount of outburst

气体	平衡压力/MPa	<0.074 mm		0.074~0.250 mm		0.25~0.50 mm		0.5~1.0 mm		>1 mm	
		$v_i/(\text{m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{s})^{-1})$	$\gamma_i/\%$	$v_i/(\text{m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{s})^{-1})$	$\gamma_i/\%$	$v_i/(\text{m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{s})^{-1})$	$\gamma_i/\%$	$v_i/(\text{m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{s})^{-1})$	$\gamma_i/\%$	$v_i/(\text{m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{s})^{-1})$	$\gamma_i/\%$
N ₂	0.5	0.53	0.54	0.38	1.19	0.31	5.92	0.21	2.70	0.10	89.82
N ₂	0.6	0.57	0.60	0.42	1.39	0.34	8.17	0.23	2.24	0.11	87.84
N ₂	0.7	0.60	0.68	0.44	1.58	0.36	10.83	0.24	0.78	0.12	86.41
CO ₂	0.5	1.69	0.99	1.22	2.56	0.84	6.55	0.56	3.00	0.28	88.97
CO ₂	0.6	2.00	1.17	1.40	3.08	0.91	8.39	0.61	2.60	0.30	87.15
CO ₂	0.7	2.06	1.35	1.49	3.66	0.98	10.15	0.66	2.84	0.33	84.79

获得的结果,突出模拟试验中的煤体会具有较低瓦斯的解吸能力。因此,上述一系列估算是较为粗略的,其计算结果会在第 4 节中进一步与以往试验研究的计算结果进行结合分析。

突出强度取决于多种物理因素,包括气体压力、煤体性质和环境应力等^[76, 95-97]。利用表 5 和式 (19),可以估算出突出模拟试验中的气体能量;煤体弹性能则可根据式 (12)、施加的应力条件 ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 5 \text{ MPa}$) 以及表 2 中的煤体力学参数进行计算。结果表明 (表 6),对于同种气体的试验,相对突出强度随着总突出能量 (A_t) 的增长近似线性的增大,如图 11 所

示。在瓦斯膨胀能 (A_s) 中,解吸瓦斯的能量贡献 (A_d) 占 25.66%~66.02%;具体来说,吸附性气体 N₂ 和 CO₂ 试验中释放的气体膨胀能比非吸附性气体 He 的试验中的增大 1.34~2.94 倍,表明了煤中吸附瓦斯解吸参与突出后对总瓦斯能量的显著贡献。另一方面,瓦斯膨胀能在总突出能量中 (A_t) 的占比为 87.50%~95.31%(表 6),证明了突出过程是气体驱动的动力过程。值得一提的是,本文使用气体压力范围 (0.5~0.7 MPa) 以及围压范围 (5 MPa) 是符合相似准则的,大量研究也表明了更高的压力或者围压下仍具有相似的能量分布特征^[24, 98-100]。

表 6 不同实验条件下的气体能量及比较

Table 6 Gas energy under different conditions and their comparison

气体	压力 /MPa	$A_f/(MJ \cdot m^{-3})$	$A_s/(MJ \cdot m^{-3})$	$A_t/(MJ \cdot m^{-3})$	$(A_d/A_s)/\%$	$(A_s/A_t)/\%$
He	0.5	0.195	0.195	0.230	—	84.78
He	0.6	0.252	0.252	0.287	—	87.80
He	0.7	0.313	0.313	0.348	—	89.94
N ₂	0.5	0.195	0.267	0.302	26.97	88.41
N ₂	0.6	0.252	0.339	0.374	25.66	90.64
N ₂	0.7	0.313	0.425	0.460	26.35	92.39
CO ₂	0.5	0.195	0.561	0.596	65.24	94.13
CO ₂	0.6	0.252	0.735	0.770	65.71	95.45
CO ₂	0.7	0.313	0.921	0.956	66.02	96.34

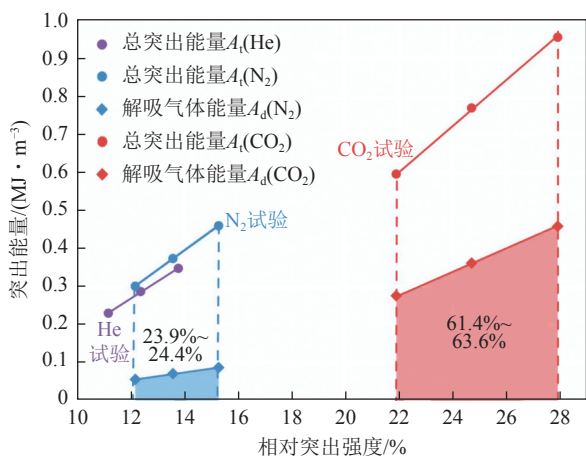


图 11 突出能量与相对突出强度之间的关系

Fig.11 Correlation between the relative intensity of outburst and outburst energy

4 讨 论

一些需要关注的现象是,突出模拟试验的突出压力阈值通常远低于实际突出的压力条件,普遍为 0.1~0.7 MPa(本文为 0.4~0.5 MPa)^[45, 101-104],如图 12 所示。特别是,本文的研究结果还表明,在较低的应力条件下 (5 MPa),使用非吸附性气体也能在较低的压力下 (≥ 0.4 MPa) 诱发突出^[45-46, 87]。结合瓦斯膨胀能表达式 (式 (13)、(14)) 与游离瓦斯计算式 (式 (17)) 可知,实验型煤较高的孔隙率 (10%~40%) 不可避免地导致了较高的初始游离瓦斯膨胀能,进而导致突出模拟试验可以不依赖于吸附瓦斯提供的突出能量。具体而言,当孔隙率发生变化时,游离瓦斯膨胀能也会相应地发生变化:

$$\frac{\phi}{\phi_0} \approx \frac{E_f}{E_{f,0}} \quad (20)$$

式中, $E_{f,0}$ 为初始参考状态下单位体积煤体中的游离

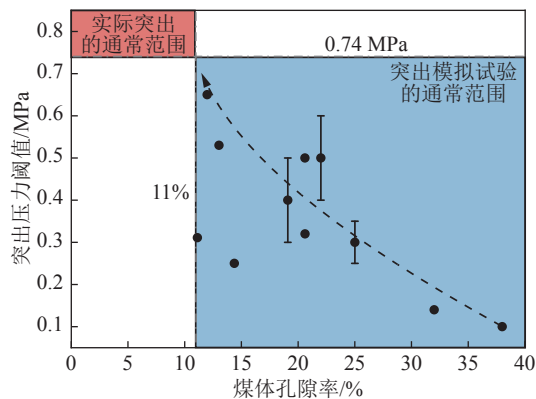


图 12 突出压力阈值的范围

Fig.12 Range of outburst pressure thresholds

瓦斯膨胀能, J/m^3 ; ϕ_0 为初始参考状态下煤体孔隙率, %。

通过比较原位条件 (设 $\phi_0=1\% \sim 11\%$) 与实验型煤 (设 $\phi=10\% \sim 40\%$) 条件下的游离瓦斯膨胀能,可以发现游离瓦斯膨胀能会随着实验型煤孔隙率的增大而显著增大,甚至可能达到 40 倍。一个直接的影响是,与实际突出相比,突出模拟试验中的游离瓦斯膨胀能占比普遍偏高。

如图 13 所示,基于实际突出事故结果的能量分析表明,游离瓦斯膨胀能 (E_f) 在总瓦斯膨胀能中的占比 (R_d) 通常不超过 20%,而该比例在突出模拟试验中则通常为 30%~70%(与试验气体相关);对于非吸附性气体 He 诱发的突出, R_d 则可视作 100%。换言之,实际突出过程中的主要能量来源是煤中的吸附瓦斯,而突出模拟试验中则普遍由游离瓦斯主导,甚至可以完全不依赖于吸附瓦斯解吸后释放的能量。值得一提的是,以往模拟试验对 R_d 的估算结果 (30%~70%) 与本文的 (25.66%~66.02%) 几乎一致,表明了 3.4 节中近似计算方法引起的误差在可被接受的范围内。

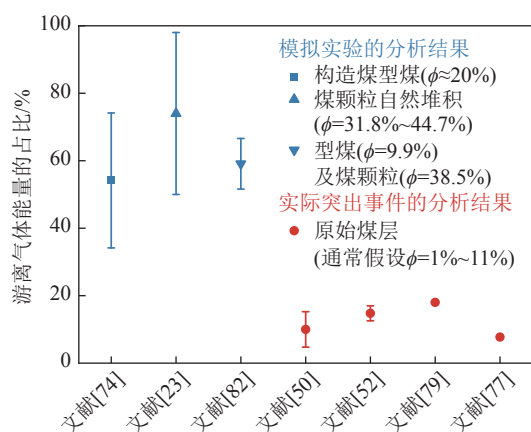


图 13 初始游离瓦斯能量在总突出能量中的占比

Fig. 13 Proportion of free gas energy in total gas energy

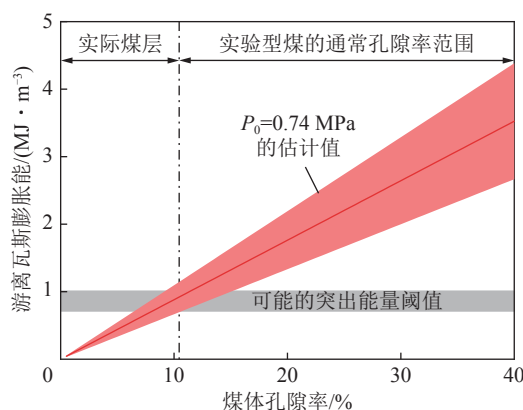


图 14 煤体孔隙率对游离瓦斯膨胀能的影响

Fig. 14 Proportion of free gas energy in total gas energy

若假设孔隙率变化不影响解吸瓦斯的能量贡献, 那么结合式 (13)、(14) 和式 (17) 可得孔隙率变化时对游离瓦斯膨胀能 (E_f) 的影响, 如图 14 所示。其中, 能量阈值是基于突出压力阈值 (取 $0.4 \sim 0.5$ MPa) 进行估算的, 等效于成功进行突出试验所需的总能量。结果表明, 型煤高孔隙率引起的高初始游离瓦斯膨胀能是突出模拟试验可以不依赖于解吸瓦斯膨胀能的关键——在原始煤层的低孔隙率 (通常小于 11%) 下, 难以仅依赖孔隙中的游离瓦斯膨胀能诱发突出。

实际上, 大量观测均表明突出的发生与煤体破碎导致的局部瓦斯聚集以及伴随的瓦斯压力变化密切相关^[76, 81, 105], 该突出激发过程的关键在于煤层破裂后为游离瓦斯膨胀能的增加创造了有利条件。在采掘过程中观测到的突出前兆信号 (如声信号、微震和瓦斯流量异常等) 也通常被认为与工作面前方煤层中应力集中引起的局部煤体破裂密切相关^[69, 79, 100], 表明突出的激发具有一定的延迟性。这些研究结果都强调了煤层局部破裂或变形引起的孔隙率增大对突出激发过程的促进作用——孔隙空间增大导致了游离瓦斯膨胀能增大, 进而为突出激发提供能量来源。

因此, 从煤层局部破裂失稳到突出的发生是一个能量持续积累的过程, 而非瞬间完成的。从能量演化的角度来看, 当局部区域的应力能 (E_1) 释放引起该区域的破裂或变形后, 孔隙率 (ϕ) 的增大对应着游离瓦斯膨胀能 (E_f) 的增长——当物理条件合适时 (例如煤层渗透性较低导致瓦斯持续聚集时), 局部能量变化表现为 $\Delta E_1 + \Delta E_f > 0$, 此时能量演化过程表现为“储能”, 即总的突出潜能 ($E_f + E_1$) 会不断趋近于导致突出发生的能量阈值条件。对应的, 在某些环境下, 局部应力能 (E_1) 的释放也可能导致 $\Delta E_1 + \Delta E_f > 0$, 即表现为“耗能”。在这种情况下, 该区域中储存的突出潜能 ($E_f + E_1$) 总体上在减小, 伴随着突出危险性的减小。

在实际中, 突出激发过程可能是储能与耗能过程的不不断叠加。本质上, 突出的“延迟性”是煤体孔隙中的游离瓦斯在持续储能的过程。早在 20 世纪 50 年代, 苏联的Makeevka 科学研究所就发现很多突出事件是在震动性放炮后几分钟或者几小时后才发生的^[6-7, 106-107]。具体来说, 1946—1953 年间的 289 次突出中有 32% 延迟几分钟, 5% 延迟 30 min 以上。在现场观测中^[1, 5, 23, 52, 89], 广泛报道了突出灾害前存在的“前兆信号”, 包括但不限于小尺度的动力现象、异响以及瓦斯涌出异常。上述结果均表明, 突出的激发过程是一个能量逐步积累的过程。

图 15 展示了模拟试验与实际突出中能量演化特征的对比。在实际煤层情况下 (图 15(a)), 由于煤层原始低孔隙率对游离瓦斯膨胀的限制, 总突出潜能通常较低。因此, 在未受外力扰动前, 煤层储能一般低于突出的能量阈值。然而, 当煤层局部区域因外力作用而破裂时, 游离瓦斯量会随着煤层孔隙率的增大而显著增加。根据图 14 可知, 单位体积煤体中的游离瓦斯膨胀能可能增加数倍甚至几十倍 (与孔隙率变化倍数相关), 最终发生突出。

然而, 对于模拟试验, 由于重制型煤的高孔隙率对应着很高的渗透率, 通常无法完全模拟实际采掘过程 (图 6)。因此, 模拟试验通常依赖于通过主动打开突出口的方式来诱发突出 (图 2)。在这种情况下, 模拟试验并不存在应力能局部释放和瓦斯能量逐渐累积的过程 (图 15(b)), 这在一定程度上也限制了实验室对前兆信号的研究。

在某种程度上, 突出模拟试验中对原始煤样的取样、粉碎、筛分和压制等一系列导致裂隙空间增大的过程与实际突出之前的激发过程在结果上是等效的, 即煤体的高孔隙率不可避免地导致了突出模拟试验在初始时就具有较高的游离瓦斯膨胀能, 进而可以不依赖于应力条件以及吸附瓦斯的贡献。

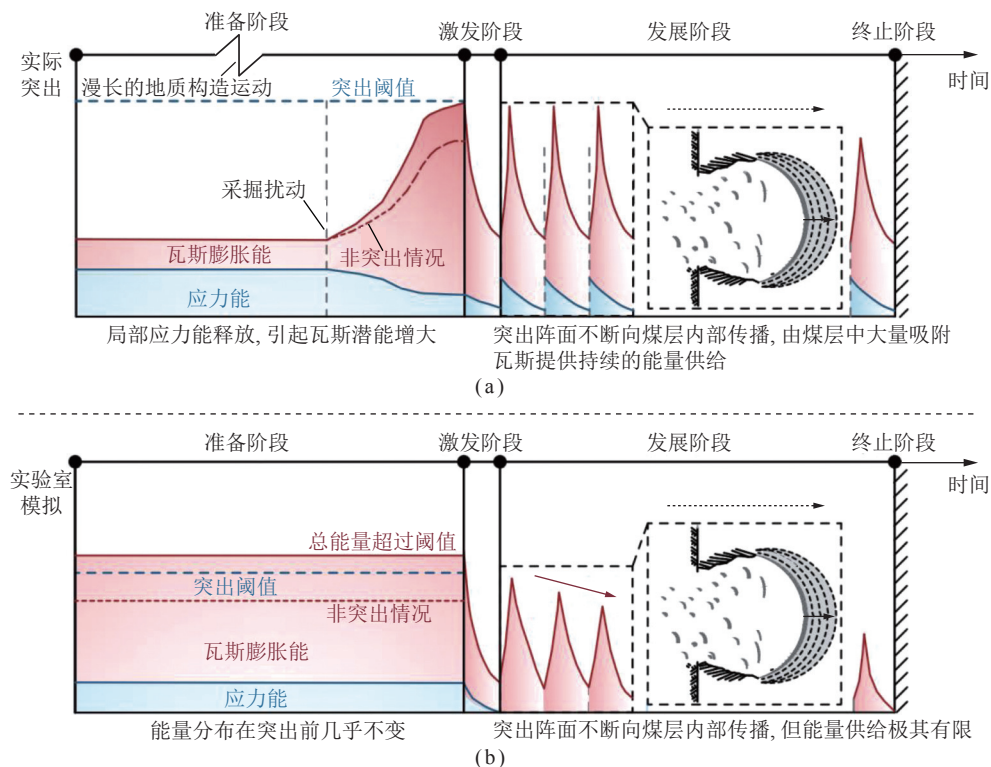


图 15 突出过程中的能量演化原理

Fig.15 Schematic diagram of the energy evolution in the outburst process

5 结 论

(1) 突出模拟试验通常使用重制的型煤, 重制型煤相对于实际煤层 (通常 $\phi=1\%\sim 11\%$) 而言具有普遍较高的孔隙率 ($\phi=10\%\sim 40\%$, 中位数约为 21.2%), 这一方面导致了初始较高的游离瓦斯膨胀能 (增大几倍至几十倍), 另一方面导致了高渗透率 (高出至少 3 个量级)。

(2) 突出模拟试验的结果表明, 气体膨胀能可占到总突出能量的 87.50%~95.31%, 其中初始游离气体的贡献占比为 1/3~2/3。结合以往实验研究的结果, 证明了突出模拟试验的本质, 是将突出过程视为由煤中高压瓦斯驱动的动力过程, 即突出试验的成功开展可以不依赖于应力条件, 甚至可以利用非吸附性气体 (如氦气) 诱发。

(3) 由于重制型煤具有较高的渗透率, 突出模拟试验通常无法还原实际突出的孕育过程以及激发过程, 表现为瓦斯膨胀能与应力能的同时释放; 相反, 在实际煤层中, 突出的发生往往依赖于局部应力能释放造成的局部煤体破裂, 表现为突出激发的“延迟性”, 即应力能先于瓦斯膨胀能释放, 前者为后者的持续增长提供条件。总体而言, 突出模拟试验中型煤的高孔隙率严重限制了突出激发过程的相似性。

(4) 在未来的研究中, 开发可以降低实验型煤孔隙

率的压制工艺有望让模拟试验与实际突出具有更为接近的能量释放特征, 从而使突出模拟试验在相似性上有突破性的进展; 更重要的是, 低渗透率型煤可以用于实验探究突出的激发过程, 例如在实验室中捕捉和研究突出前兆信号, 进而完善突出灾害的防治理论与技术。

参考文献(References):

- [1] 程远平, 雷杨. 构造煤和煤与瓦斯突出关系的研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 180-198.
CHENG Yuanping, LEI Yang. Causality between tectonic coal and coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 180-198.
- [2] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.
- [3] 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, 24(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [4] CHENG Y, PAN Z. Reservoir properties of Chinese tectonic coal: A review[J]. Fuel, 2020, 260: 116350.
- [5] 霍多特. 煤与瓦斯突出[M]. 宋士钊等, 译. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [6] KRAVCHENKO V S. On the nature and mechanism of sudden outbursts of gas and coal[J]. Nauchnye Soobshcheniya Instituta Gor-

- nogo Dela Im AA Skochinskogo, 1955, 6: 101–108.
- [7] YARTSEV V A. Crushing of coal in sudden drop of gas pressure[J]. *Ugol*, 1958, 5: 35–36.
 - [8] HARGRAVES A, UPFOLD R. Aspects of laboratory simulations of instantaneous outbursts [C]//Proceedings of the 21st International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Harrogate: Springer Press, 1985.
 - [9] KUROIWA T, TASHIRO T. Experimental study on coal pulverisation and gas emission in a moment of outbursts of gas and coal[J]. *Journal of Japanese Mining*, 1960, 76: 227–233.
 - [10] BODZIONY J, NELICKI A, TOPOLNICKI J. Results of laboratory investigations of gas and coal outbursts[J]. *Archives of Mining Sciences*, 1989, 94(3): 581–591.
 - [11] BODZIONY J, NELICKI A, PINDEL Z, et al. Laboratory trial of inducing aquasi-outburst [C]//Proceedings of the 12th Conference on Tendencies in Gas and Rock Outburst Hazard Prevention in Underground Mines. Nowa Ruda Radkow: Springer Press, 1988.
 - [12] BODZIONY J, NELICKI A, TOPOLNICKI J. Investigations of experimental generation of gas and coal outbursts[J]. *Strata as Multiphase Medium Rock and Gas Outburst* Ed J Litwiniszyn, Kraków, 1990, 2: 489–509.
 - [13] BODZIONY J, KRAWCZYK J, TOPOLNICKI J. Determination of the porosity distribution in coal briquettes by measurements of the gas filtration parameters in an outburst pipe [C]//Proceedings of the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. New York: Elsevier Press, 1994.
 - [14] 袁亮, 薛阳, 王汉鹏, 等. 煤与瓦斯突出物理模拟试验研究新进展[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2020, 2(1): 1–10.
YUAN Liang, XUE Yang, WANG Hanpeng, et al. New progress in physical simulation experiment of coal and gas outburst[J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2020, 2(1): 1–10.
 - [15] 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.
 - [16] 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.
 - [17] 李术才, 李清川, 王汉鹏, 等. 大型真三维煤与瓦斯突出定量物理模拟试验系统研发[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S1): 121–129.
LI Shucai, LI Qingchuan, WANG Hanpeng, et al. A large-scale three-dimensional coal and gas outburst quantitative physical modeling system[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S1): 121–129.
 - [18] 文光才, 孙海涛, 曹偲, 等. 深井煤岩瓦斯动力灾害模拟实验系统[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 223–231.
WEN Guangcai, SUN Haitao, CAO Jie, et al. Simulation experiment system of coal and gas dynamic disaster in deep mine and its application in accident analysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 223–231.
 - [19] 许江, 程亮, 魏仁忠, 等. T型巷道中突出煤–瓦斯两相流动力学试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(6): 1423–1433.
XU Jiang, CHENG Liang, WEI Renzhong, et al. Propagation characteristics of coal-gas two-phase flow in T-shaped roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 43(6): 1423–1433.
 - [20] 许江, 程亮, 彭守建, 等. 煤与瓦斯突出冲击气流形成及传播规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 333–347.
XU Jiang, CHENG Liang, PENG Shoujian, et al. Formation and propagation law of coal and gas outburst impact airflow[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 333–347.
 - [21] 彭守建, 杨海林, 程亮, 等. 真三轴应力状态下煤与瓦斯突出两相流 L型巷道运移特性试验研究[J]. *煤炭学报*: 1–11. [2023–10–10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20221116.1806.017.html>.
PENG Shoujian, YANG Hailin, CHENG Liang, et al. Experimental study on migration characteristics of coal and gas outburst two-phase flow in L-shaped roadway under true triaxial conditions [J]. *Journal of China Coal Society*: 1–11. [2023–10–10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20221116.1806.017.html>.
 - [22] 唐巨鹏, 郝娜, 潘一山, 等. 基于声发射能量分析的煤与瓦斯突出前兆特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 31–42.
TANG Jupeng, HAO Na, PAN Yishan, et al. Experimental study on precursor characteristics of coal and gas outbursts based on acoustic emission energy analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 31–42.
 - [23] 金侃. 煤与瓦斯突出过程中高压粉煤–瓦斯两相流形成机制及致灾特征研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
JIN Kan. Research on formation mechanism of high pressure pulverized coal-gas two phase flow during outburst and its disaster characteristic [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
 - [24] JIN K, CHENG Y, REN T, et al. Experimental investigation on the formation and transport mechanism of outburst coal-gas flow; Implications for the role of gas desorption in the development stage of outburst[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 194: 45–58.
 - [25] 张超林, 王恩元, 王奕博, 等. 多功能煤与瓦斯突出模拟试验系统研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(5): 995–1007.
ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, WANG Yibo, et al. Development and application of multi-functional test system for coal and gas outburst simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(5): 995–1007.
 - [26] YIN G Z, JIANG C B, WANG J G, et al. A new experimental apparatus for coal and gas outburst simulation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(5): 2005–2013.
 - [27] 尹光志, 赵洪宝, 许江, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8): 1674–1680.
YIN Guangzhi, ZHAO Hongbao, XU Jiang, et al. Experimental study of simulation of coal and gas outburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1674–1680.

- [28] 张春华. 石门揭突出煤层围岩力学特性模拟试验研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010.
ZHANG Chunhua. Simulation experiment on the mechanical characteristics during outbursting coal seam uncovered by crosscut [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2010.
- [29] 王刚, 程卫民, 张清涛, 等. 石门揭煤突出模拟实验台的设计与应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1202–1210.
WANG Gang, CHENG Weimin, ZHANG Qingtao, et al. Design of simulation experiment and its application system of outburst in uncovering coal seam in cross-cut[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1202–1210.
- [30] 郭品坤. 煤与瓦斯突出层裂发展机制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
GUO Pinkun. Research on laminar spallation mechanism of coal and gas outburst propagation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [31] LU Y, WANG H, XIA B, et al. Development of a multi-functional physical model testing system for deep coal petrography engineering[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(2): 269–283.
- [32] CAO J, SUN H, WANG B, et al. A novel large-scale three-dimensional apparatus to study mechanisms of coal and gas outburst[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 118: 52–62.
- [33] 聂百胜, 马延崑, 孟筠青, 等. 中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟装置研制与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1218–1225.
NIE Baisheng, MA Yankun, MENG Junqing, et al. Middle scale simulation system of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1218–1225.
- [34] NIE B, MA Y, HU S, et al. Laboratory study phenomenon of coal and gas outburst based on a mid-scale simulation system[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 15005.
- [35] GENG J, NIE W, YANG S, et al. Experimental study on dynamic evolution mechanism during coal and gas outburst[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570(4): 1–10.
- [36] LIU D, XU J, YIN G, et al. Development and application of multi-field coupling testing system for dynamic disaster in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 966–975.
- [37] ZHAO X, CAO J, WANG B, et al. Experiment study of outburst pulverized coal-gas two-phase flow and characteristic analysis of outburst wave [J]. Geofluids, 2021, 2021: 1–11.
- [38] SKOCZYLAS N, IJRMMS J. Laboratory study of the phenomenon of methane and coal outburst[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, 55(10): 102–107.
- [39] SKOCZYLAS N, DUTKA B, SOBCZYK J. Mechanical and gaseous properties of coal briquettes in terms of outburst risk[J]. Fuel, 2014, 134: 45–52.
- [40] GRAY I. Outburst risk determination and associated factors [M]. Brisbane: Australian Coal Research Ltd., 2015.
- [41] WANG C, CHENG Y, YI M, et al. Surface energy of coal particles under quasi-static compression and dynamic impact based on fractal theory[J]. Fuel, 2019, 264: 116835.
- [42] WANG C, CHENG Y, HE X, et al. Size effect on uniaxial compressive strength of single coal particle under different failure conditions[J]. Powder Technology, 2019, 345: 169–181.
- [43] 王汉鹏, 张庆贺, 袁亮, 等. 含瓦斯煤相似材料研制及其突出试验应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1676–1682.
WANG Hanpeng, ZHANG Qinghe, YUAN Liang, et al. Development of a similar material for methane-bearing coal and its application to outburst experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1676–1682.
- [44] 张淑同. 煤与瓦斯突出模拟的材料及系统相似性研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
ZHANG Shutong. Research on similarity of material and system for coal and gas outburst simulation test [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015.
- [45] LEI Y, CHENG Y, WANG L, et al. Mechanisms of coal and gas outburst experiments: Implications for the energy principle of natural outbursts[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(1): 363–377.
- [46] TU Q, CHENG Y, REN T, et al. Role of tectonic coal in coal and gas outburst behavior during coal mining[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4619–4635.
- [47] 高魁. 石门揭构造软煤诱发煤与瓦斯突出模拟试验研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
GAO Kui. Similar simulation test of induce coal and gas outburst during the uncovering tectonic soft coal by crosscut [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.
- [48] 蔡成功. 煤与瓦斯突出三维模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 66–69.
CAI Chenggong. Experimental study on 3-D simulation of coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 66–69.
- [49] SKOCZYLAS N, DUTKA B, SOBCZYK J. Mechanical and gaseous properties of coal briquettes in terms of outburst risk[J]. Fuel, 2014, 134(134): 45–52.
- [50] LEI Y, CHENG Y, REN T, et al. The energy principle of coal and gas outbursts: Experimentally evaluating the role of gas desorption[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 54(1): 11–30.
- [51] WANG C, YANG S, YANG D, et al. Experimental analysis of the intensity and evolution of coal and gas outbursts[J]. Fuel, 2018, 226: 252–262.
- [52] 涂庆毅. 构造煤表观物理结构及煤与瓦斯突出层裂发展机制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
TU Qingyi. Study on apparent physical structure of tectonic coal and spallation development mechanism of coal and gas outburst [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [53] 王刚, 陈雪畅, 程卫民, 等. 煤孔裂隙多尺度表征及其对渗透率的影响分析——以中国 14 个大型煤炭基地为例 [J]. 重庆大学学报, 2023: 1–17. [2023-10-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20230615.0835.002.html>.
WANG Gang, CHEN Xuechang, CHENG Weimin, et al. Multi-scale characterization of coal pore and fractures and its influence on permeability—Taking 14 large coal bases in China as examples [J].

- Journal of Chongqing University, 2023; 1–17. [2023-10-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20230615.0835.002.html>.
- [54] WANG H, ZHANG Q, YUAN L, et al. Development of a similar material for methane-bearing coal and its application to outburst experiment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1676–1682.
- [55] ZHU M, XIONG Y, DAI L, et al. Research status and prospect of similar materials for coal and gas outburst[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(4): 173–176,180.
- [56] WANG C, CHENG Y, JIANG J, et al. Effect of gas adsorption on breakage energy of tectonic coal particles[J]. *Powder Technology*, 2022, 406: 117575.
- [57] 袁亮, 薛阳, 王汉鹏, 等. 煤与瓦斯突出物理模拟试验研究新进展[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2020, 2(1): 1–10.
- YUAN L, XUAN Y, WANG H P, et al. New progress in physical simulation experiment of coal and gas outburst[J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2020, 2(1): 1–10.
- [58] 王汉鹏, 李清川, 袁亮, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验型煤相似材料研发与特性分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(6): 1277–1283.
- WANG Hanpeng, LI Qingchuan, YUAN Liang, et al. Similar material research and property analysis of coal briquette in coal and gas outburst simulation test[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(6): 1277–1283.
- [59] 张庆贺. 煤与瓦斯突出能量分析及其物理模拟的相似性研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- ZHANG Qinghe. Analysis of coal and gas outburst energy and research on similarity of physical simulation for it [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [60] 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(2): 17–25.
- JIANG Chenglin, YU Qixiang. Rheological hypothesis of coal and gas outburst mechanism[J]. *Safety in Coal Mines*, 1995, 2(2): 17–25.
- [61] LI H, FENG Z, ZHAO D, et al. Simulation experiment and acoustic emission study on coal and gas outburst[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(8): 2193–2205.
- [62] GENG J, XU J, NIE W, et al. Regression analysis of major parameters affecting the intensity of coal and gas outbursts in laboratory[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(2): 327–332.
- [63] PENG S, XU J, YANG H, et al. Experimental study on the influence mechanism of gas seepage on coal and gas outburst disaster[J]. *Safety Science*, 2012, 50(4): 816–821.
- [64] WU X, PENG Y, XU J, et al. Experimental study on evolution law for particle breakage during coal and gas outburst[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2019, 7(1): 97–106.
- [65] 许江, 陶云奇, 尹光志, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验台的研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2354–2362.
- XU Jiang, TAO Yunqi, YIN Guangzhi, et al. Amelioration and application of coal and gas outburst simulation experiment device[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2354–2362.
- [66] 许江, 陶云奇, 尹光志, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验台的改进及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(9): 1804–1809.
- XU Jiang, TAO Yunqi, YIN Guangzhi, et al. Development and application of coal and gas outburst simulation test device[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(9): 1804–1809.
- [67] 孙东玲, 曹偲, 熊云威, 等. 突出过程中煤-瓦斯两相流运移规律的实验研究[J]. *矿业安全与环保*, 2017, 44(2): 26–30.
- SUN Dongling, CAO Jie, XIONG Yunwei, et al. Experimental study on migration rule of coal-gas flow in process of outburst[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2017, 44(2): 26–30.
- [68] WANG G, CHENG W, ZHANG Q, et al. Design of simulation experiment and its application system of outburst in uncovering coal seam in cross-cut[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4): 1202–1210.
- [69] TU Q, CHENG Y, GUO P, et al. Experimental study of coal and gas outbursts related to gas-enriched areas[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2016, 49(9): 3769–3781.
- [70] TU Q, CHENG Y, LIU Q, et al. Investigation of the formation mechanism of coal spallation through the cross-coupling relations of multiple physical processes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 105: 133–144.
- [71] YANG D, CHEN Y, TANG J, et al. Experimental research into the relationship between initial gas release and coal-gas outbursts[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 50: 157–165.
- [72] AN F H, CHENG Y P, WANG L, et al. A numerical model for outburst including the effect of adsorbed gas on coal deformation and mechanical properties[J]. *Computers & Geotechnics*, 2013, 54(10): 222–231.
- [73] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 297–322.
- WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 297–322.
- [74] LEI Y, CHENG Y, REN T, et al. Experimental investigation on the mechanism of coal and gas outburst: Novel insights on the formation and development of coal spallation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(11): 5807–5825.
- [75] 许江, 周斌, 彭守建, 等. 基于热-流-固体体系参数演变的煤与瓦斯突出能量演化[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 213–222.
- XU Jiang, ZHOU Bin, PENG Shoujian, et al. Evolution of outburst energy based on development of heat-flow-solids parameters[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 213–222.
- [76] AGUADO M B D, NICIEZA C G. Control and prevention of gas outbursts in coal mines, Riosa-Olloniego coalfield, Spain[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 69(4): 253–266.
- [77] AN F, YUAN Y, CHEN X, et al. Expansion energy of coal gas for the initiation of coal and gas outbursts[J]. *Fuel*, 2019, 235: 551–557.
- [78] AN F, CHENG Y, WANG L, et al. A numerical model for outburst including the effect of adsorbed gas on coal deformation and

- mechanical properties[J]. *Computers & Geotechnics*, 2013, 54(10): 222–231.
- [79] ZHAO W, CHENG Y, JIANG H, et al. Role of the rapid gas desorption of coal powders in the development stage of outbursts[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 28: 491–501.
- [80] BEAMISH B B, CROSDALE P J. Instantaneous outbursts in underground coal mines: An overview and association with coal type[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1–4): 27–55.
- [81] SKOCHINSKI A A. Communication of the initiation of sudden outburst of gas and coal in the model in outburst laboratory in the institute of mining of AN, SSSR[J]. *Ugol*, 1953, 10: 1–10.
- [82] LEI Y, CHENG Y, WANG L, et al. Identical acoustic waveforms found between different-sized outbursts: Implications for the propagation mechanism of coal and gas outbursts[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(11): 6887–6903.
- [83] KOZIEL K, TOPOLNICKI J, SKOCZYLAS N. The intensity of heat exchange between rock and flowing gas in terms of gas-geodynamic phenomena[J]. *Entropy*, 2021, 23(5): 1–17.
- [84] KOZIEL K, SKOCZYLAS N, SOROKO K, et al. Gas and dolomite outbursts in ore mines—Analysis of the phenomenon and the energy balance[J]. *Energies*, 2020, 13(11): 2999.
- [85] 许江, 耿加波, 彭守建, 等. 煤与瓦斯突出脉动式发展过程的试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 145–154.
- XU Jiang, GENG Jiabo, PENG Shoujian, et al. Analysis of the pulsating development process of coal and gas outburst[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 145–154.
- [86] LEI Y, CHENG Y, WANG L, et al. Potential infrasonic tremors in coal seam systems: Implications for the prediction of coal and gas outbursts[J]. *Fuel*, 2022, 326: 125000.
- [87] KURSUNOGLU N, ONDER M. Application of structural equation modeling to evaluate coal and gas outbursts[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 88: 63–72.
- [88] ZHAO W, CHENG Y, GUO P, et al. An analysis of the gas-solid plug flow formation: New insights into the coal failure process during coal and gas outbursts[J]. *Powder Technology*, 2017, 305: 39–47.
- [89] LEI Y, CHENG Y, WANG L, et al. Evidence for universal rupture behavior during coal and gas outbursts[J]. *Fuel*, 2022, 324: 124592.
- [90] PAN Z, CONNELL L D. A theoretical model for gas adsorption-induced coal swelling[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 69(4): 243–252.
- [91] BUSCH A, GENSTERBLUM Y, KROOSS B M, et al. Investigation of high-pressure selective adsorption/desorption behaviour of CO₂ and CH₄ on coals: An experimental study[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66(1): 53–68.
- [92] XIAO X, WANG L, XU J, et al. Damage characteristics and catastrophic failure mechanism of coal rock induced by gas adsorption under compression[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(3): 587–595.
- [93] HU B, CHENG Y, HE X, et al. New insights into the CH₄ adsorption capacity of coal based on microscopic pore properties[J]. *Fuel*, 2020, 262: 116675.
- [94] CAO J, DAI L, SUN H, et al. Experimental study of the impact of gas adsorption on coal and gas outburst dynamic effects[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 128: 158–166.
- [95] ZHAO W, CHENG Y, YUAN M, et al. Effect of adsorption contact time on coking coal particle desorption characteristics[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(4): 2287–2296.
- [96] LAMA R D, BODZIONY J. Management of outburst in underground coal mines[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(97): 83–115.
- [97] LITWINISZYN J. A model of rock and gas mass outburst[J]. *Archives of Mining Sciences*, 1983, 28(4): 453–466.
- [98] YUAN L. Control of coal and gas outbursts in Huainan mines in China: A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(4): 559–567.
- [99] MEDHURST T, BROWN E. A study of the mechanical behaviour of coal for pillar design[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(8): 1087–1105.
- [100] MCGARR A. A mechanism for high wall-rock velocities in rockbursts [M]. Basel: Birkhäuser Basel, 1997.
- [101] LU Y, WANG H, XIA B, et al. Development of a multi-functional physical model testing system for deep coal petrography engineering[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2016, 50(2): 269–283.
- [102] SHU L Y, WANG K, LIU Z S, et al. A novel physical model of coal and gas outbursts mechanism: Insights into the process and initiation criterion of outbursts[J]. *Fuel*, 2022, 323: 124305.
- [103] WANG H, CHENG Z, ZOU Q, et al. Elimination of coal and gas outburst risk of an outburst-prone coal seam using controllable liquid CO₂ phase transition fracturing[J]. *Fuel*, 2021, 284: 119091.
- [104] ZHOU B, XU J, PENG S J, et al. Influence of geo-stress on dynamic response characteristics of coal and gas outburst[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(11): 4819–4837.
- [105] YANG W, LU C, LIN B, et al. Tunnelling outburst potential affected by mechanical properties of coal seam[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83: 99–112.
- [106] CAO Y, HE D, GLICK D C. Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2001, 48(1–2): 47–63.
- [107] BERENBLUT I I. The mathematics of diffusion[J]. *Physics Bulletin*, 1956, 7(10): 276.