



煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤与瓦斯突出两相流运移规律研究进展

张超林 蒲静轩 宋世豪 严吉立 陆杰

引用本文:

张超林, 蒲静轩, 宋世豪, 等. 煤与瓦斯突出两相流运移规律研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 129–139.

ZHANG Chaolin, PU Jingxuan, SONG Shihao. Research progress on the two-phase flow migration law of coal and gas outburst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 129–139.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1826>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤与瓦斯突出流体多物理参数动态响应试验研究

Experimental study on dynamic response of coal and gas outburst fluid with multiple physical parameters

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 159–168 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/55f1d3b7-b25a-47aa-ba38-253dbac3f024>

煤层气井多相流条件下不同粒径煤粉启动 – 运移规律

Start-migration law of coal powder with different particle sizes under multi-phase flow conditions in coalbed methane wells

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/da890537-828a-4668-86c6-3d477f769c74>

煤与瓦斯突出对矿井通风系统的影响研究现状及展望

Research status and prospects of the influence of coal and gas outburst on ventilation system

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 100–105 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.012>

天然气储层裂隙中气液两相流的流态转变条件数学模型

Mathematical model for flow regime transition conditions of gas-liquid two-phase flow in natural gas reservoir fracture

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 155–164 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1054>

高地应力条件煤与瓦斯突出冲击力演化规律研究

Study on the impact force evolution law of coal and gas outburst under high ground stress

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 116–128 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0503>

小断层影响下的采空区瓦斯运移规律研究

Study on gas migration law in goaf under the influence of small faults

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 214–230 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0672>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张超林, 蒲静轩, 宋世豪, 等. 煤与瓦斯突出两相流运移规律研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 129–139.
ZHANG Chaolin, PU Jingxuan, SONG Shihao, *et al.* Research progress on the two-phase flow migration law of coal and gas outburst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 129–139.

煤与瓦斯突出两相流运移规律研究进展

张超林, 蒲静轩, 宋世豪, 严吉立, 陆 杰

(中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:煤与瓦斯突出是煤矿中一种极其复杂的动力现象, 主要表现为瓦斯窒息和煤粉冲击、掩埋, 严重威胁煤矿的安全生产。揭示煤与瓦斯突出两相流运移规律及其主控因素, 对于厘清突出发生致灾机理、指导现场防灾避灾具有重要意义。近年来, 相关学者开展了大量的煤与瓦斯突出两相流试验和理论研究, 并取得了丰硕的研究成果, 本文就两相流模拟试验装置及国内外学者在突出两相流领域取得的研究成果2个方面进行总结与分析。首先, 系统回顾了现有的煤与瓦斯突出两相流物理模拟试验装置, 对比分析了不同试验装置的关键参数及功能优势; 在此基础上, 深入总结了突出煤粉流的运移速度、运移形态和堆积分布特征, 以及突出冲击波的形成原因、传播速度和衰减规律; 最后, 重点梳理了巷道结构、瓦斯压力、煤粉粒径、地应力和气体组分等因素对突出两相流的影响和控制作用。分析认为, 现阶段煤与瓦斯突出两相流研究呈现出突出过程可视化、巷道结构复杂化、数据采集多元化、影响因素全面化、研究手段多样化等特点, 基本掌握了突出两相流的发生机理及传播致灾规律, 但在相似体系(相似准则和相似材料)的建立和完善、两相流与通风系统共存互扰机制、两相流多因素耦合致灾机理、两相流“致灾-防控一体化”研究等方面仍需进一步深入探索。

关键词:煤与瓦斯突出; 两相流; 冲击波; 运移规律; 流体力学

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)08-0129-11

Research progress on the two-phase flow migration law of coal and gas outburst

ZHANG Chaolin, PU Jingxuan, SONG Shihao, YAN Jili, LU Jie

(School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Coal and gas outburst is an extremely complex dynamic phenomenon in coal mines. It is mainly manifested as gas suffocation, pulverized coal impact and burial, which seriously threatens the safety production of coal mines. Revealing the migration law and its main controlling factors of two-phase flow in coal and gas outburst is of great significance for clarifying the disaster-causing mechanism of outburst and guiding disaster prevention and avoidance on site. In recent years, relevant scholars had carried out a large number of coal and gas outburst two-phase flow test and theoretical research, and had achieved fruitful research results. This paper summarized and analyzed the two-phase flow simulation test device and the research results obtained by domestic and foreign scholars in the two-phase flow field. Firstly, the existing two-phase flow physical simulation test devices for coal and gas outburst were systematically reviewed, and the key parameters and functional advantages of different test devices were compared and analyzed. On this basis, the migration velocity, migration pattern and accumulation distribution characteristics of outburst pulverized coal flow, as well as the formation reason, propagation velocity and attenuation law of outburst shock wave were summarized. Finally, the influence and control effect of roadway structure, gas pressure, coal particle size, ground stress and gas composition on outburst two-phase flow were analyzed. According to the analysis, the research on the two-phase flow of coal and gas outburst at the present stage shown the characteristics of visualization of outburst process, complexity of roadway structure, diversification of data collection, comprehensiveness of influencing factors and diversification of research methods, and basically grasped the occurrence mechanism, propagation and disaster-causing law of outburst two-phase flow.

收稿日期: 2022-11-01

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1826

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274242, 51904293); 国家级大学生创新计划训练资助项目(202110290007Z)

作者简介: 张超林(1991—), 男, 安徽阜阳人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: chaolinzhang@cumt.edu.cn

通讯作者: 蒲静轩(2002—), 男, 陕西宝鸡人, 本科。E-mail: pjx20022@163.com

However, the establishment and improvement of similarity system (similarity criteria and materials), the coexistence and mutual interference principle of two-phase flow and ventilation system, the multi-factor coupling disaster-causing mechanism of two-phase flow, and the integration of disaster-causing and prevention and control of two-phase flow still need further in-depth study.

Key words: coal and gas outburst; two-phase flow; shock wave; migration law; fluid mechanics

0 引言

2022 年煤炭消费量占全国能源消费总量的 56.2%^[1],表明煤炭在未来相当长一段时期仍将是我国的主体能源。我国高度重视煤矿安全管理工作,全国煤矿事故由 2002 年的 4 344 起、死亡 6 995 人下降到 2021 年的 91 起、死亡 178 人,重大事故由 2005 年的 58 起、死亡 1 739 人,下降到 2021 年的 2 起、死亡 41 人;近 5 年共发生各类煤矿事故 827 起,死亡 1 430 人,其中瓦斯事故共 83 起,死亡 332 人^[2],而煤与瓦斯突出是造成瓦斯事故的主要原因^[3]。煤与瓦斯突出是在地应力和瓦斯压力共同作用下,大量的煤和瓦斯由煤岩深部突然向采掘空间抛出的异常动力现象^[4],严重威胁煤矿的安全生产。截至 2022 年底,全国煤矿数量约 4 366 处,其中高突危险性矿井共占 33.6%^[5]。随着浅部资源的逐渐枯竭,向深部要资源成为必然趋势,深矿井的数目将逐渐增加,使得煤与瓦斯突出的危害性也将进一步增强。因此,开展煤与瓦斯突出防治工作研究刻不容缓。

科研工作者多从煤与瓦斯突出机理入手,研究煤与瓦斯突出发生的原因、条件及其发生、发展过程^[6],并形成被国内外多数学者普遍接受的煤与瓦斯突出综合作用假说。越来越多的研究结果表明煤与瓦斯突出两相流及形成的冲击波是造成煤矿人员伤亡和设备损坏的主要因素之一^[7-8]。掌握煤与瓦斯突出两相流作用机理及其破坏过程,揭示突出致灾机理,对于指导现场防灾避灾、保障人员及设备安全具有重要意义。为此大量研究人员积极开展煤与瓦斯突出试验和理论分析,研究突出过程中煤与瓦斯两相流的运移规律及影响因素,分析突出冲击波传播过程及多物理场参数演化规律。笔者在梳理煤与瓦斯突出两相流物理模拟试验装置的基础上,系统总结了突出两相流研究进展,重点分析了煤粉流与冲击波在巷道内的传播规律及其受控因素,并指出了现阶段突出两相流研究特点与未来发展趋势。

1 突出两相流物理模拟试验装置

为了研究煤与瓦斯突出两相流运移规律,学者们设计研发了一系列连接巷道的突出模拟试验装置。笔者^[9]采用模块化设计思路,自主研发了多功能煤

与瓦斯突出模拟试验系统(图 1),包括试验腔体、加载模块、渗流模块、诱突模块、巷道模块和采集模块。其中,试件腔体尺寸为 $\phi 200\text{ mm}\times 700\text{ mm}$,密封气压 10.0 MPa;巷道尺寸 $\phi 200\text{ mm}\times 10\,000\text{ mm}$ 、透光率 94%;能够实现型煤一次性成型、渗透性测试和突出两相流可视化等多种功能,同时利用两级爆破片诱突系统可以达到毫秒级精准诱突。刘义等^[10]研发了煤与瓦斯突出模拟试验装置,主要包括煤与瓦斯突出发生装置、管道系统、数据采集系统及传感器等。突出发生装置由突出腔体、气瓶及快速揭露装置组成;突出腔体材料为型钢,其最大承压为 5 MPa。数据采集系统由多通道高速采集器和高速成像系统组成。该系统结构与材料的设计具有稳定性好、压力分布规律测量精确等特点。王凯等^[11]基于相似理论自主研发了突出粉煤-瓦斯两相流模拟试验系统,系统包括突出腔体、突出控制箱、试验巷道、数据采集系统和抽真空-注气设备、高速摄像系统和纹影系统等部分。其中纹影系统用于分析透明介质中的非均匀性流场,纹影系统的纹影图像能够反映折射率的一阶导数场。因此该试验系统在测试突出冲击波波阵面以及突出气流压力等方面具有明显优势。

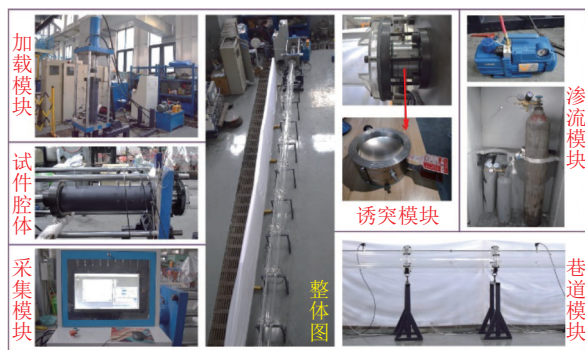


图 1 多功能煤与瓦斯突出模拟试验系统^[9]

Fig.1 Multi-functional test system for coal and gas outburst simulation^[9]

为了更加真实模拟煤矿现场巷道布置情况,一些连接复杂网络巷道的突出模拟试验系统相继被研发。许江等^[12]自主研发的多场耦合煤矿动力灾害大型物理模拟试验系统包括动力源系统、巷道网络系统数据采集系统、充气系统和泄压装置等结构,如图 2 所示。该试验系统设计的关键在于巷道网络系

统通过扩口段与动力系统连接,主要包括直通巷道、十字通巷道、摄像头、传感器及传感器支架等结构,巷道内部断面尺寸为 $\phi 400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,系统能布置为多种巷道网络形态。巷道网络系统的各种结构管道和可视化组件能够捕获煤与瓦斯突出两相流冲击破坏动力特性参数。文光才团队^[13]设计的煤与瓦斯突出动力效应模拟试验系统主要包括动力系统、充气系统、管道系统、数据采集系统、除尘系统五大系统。该试验系统的管道系统为“H”型结构,动力系统的突出口与 20.0 m 长的主巷道相连并后接除尘系统,主巷 11.0 m 位置处连接 2.7 m 长的联络巷,联络巷连接的 20.0 m 支巷与主巷平行,如图 3 所示。利用该结构的设计能够较好地探究煤与瓦斯突出对于除主巷道以外的联络巷和支巷的影响情况。

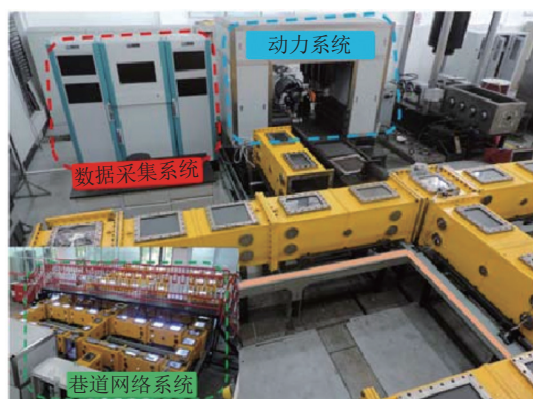


图 2 多场耦合煤矿动力灾害大型物理模拟试验系统^[12]
Fig.2 Multi-field coupled coal mine dynamic disaster large-scale physical simulation test system^[12]

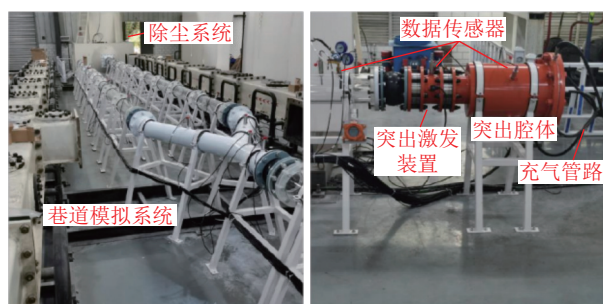


图 3 煤与瓦斯突出动力效应模拟试验系统^[13]
Fig.3 Coal and gas outburst dynamic effect simulation test system^[13]

可以看出,煤与瓦斯突出两相流物理模拟试验装置主要包括煤与瓦斯突出动力发生装置、巷道系统和数据采集系统 3 部分组成,不同试验装置的区别和特色主要在于煤样的加压成型、渗透性的测试、诱突装置的改进以及巷道的可视化和网格化设计等。同时,试验装置的研发也逐渐从模拟煤矿井下较为

单一的巷道情形向模拟多场耦合条件下的复杂网络巷道布置过渡。

2 突出两相流运移规律研究进展

2.1 突出煤粉流运移分布规律

煤体的失稳、破碎和抛出是突出过程中的典型动力现象。刘伟^[14]认为当煤体中的应力达到屈服极限时,煤体产生裂纹,不仅导致煤体强度下降,同时软弱煤碎裂产生的破碎面会增加煤的比表面积,使得大量吸附瓦斯解吸,为煤体的破碎和抛出提供条件。突出后煤粉流在巷道内的运移速度是衡量突出冲击破坏性的重要参数。张超林等^[9]设计的煤与瓦斯突出物理模拟试验,结合可视化巷道并利用图像处理法计算得到突出煤粉在巷道内的运移速度,结果表明突出发生后煤粉流速度高达 40.0 m/s,并快速向巷道内运移,随着运移距离的增加会出现 4 次再加速过程,但总体上仍然呈现逐渐降低的趋势,如图 4 所示。周斌等^[15]基于突出物理模拟试验研究指出,煤与瓦斯突出过程中固相煤粉流的运动情况可以由巷道煤粉流灰度变化情况很好地反映,并发现煤粉在突出过程中存在振发特性及二次加速的特征。

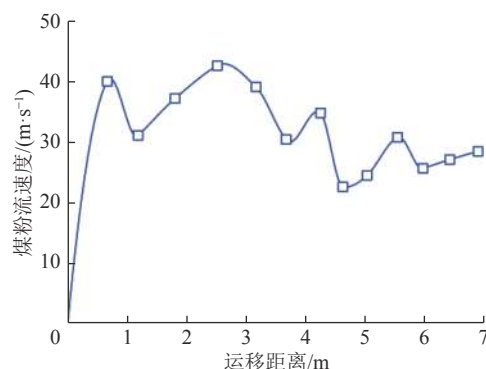


图 4 煤粉运移速度沿巷道的变化规律^[9]
Fig.4 Variation law of coal powder migration velocity along roadway^[9]

刘义等^[10]在研究突出煤粉在巷道内的分布情况时发现,突出口附近的煤粉的质量分布较少,而巷道中部突出煤粉的质量分布较大,两者分别占突出煤粉质量的 30% 和 60%,前者多为小粒径,后者粒径分布范围较广。许江等^[16]也得出类似结论:沿着突出巷道,煤粉质量呈先增加后减小再增大的趋势,处于巷道中后部的突出煤粉质量占比最高;煤粉以粒径小于 0.150 mm 的煤粉为主且破碎程度较高。孙东玲等^[17]试验发现,煤粉堆积高度在突出巷道中呈现先增大后减小的分布规律(图 5)。曹偈等^[18]进行了低气压条件下煤与瓦斯突出试验,发现突出煤粉流

的运移大体上经过加速、减速和沉降 3 个阶段。金侃^[19] 通过对突出两相流结构、运动特征等进行研究,将煤粉流运动过程划分为初期的加速阶段、中期的稳定输运阶段和末期的速度衰减 3 个不同阶段;同时采用 DEM-CFD 方法对突出煤体的碰撞、破碎和粉化特点进行了研究,认为突出过程中巷道内主要存在高频低速的颗粒间碰撞和低频高速的颗粒-壁面间碰撞 2 种碰撞粉化形式。王锐等^[20] 利用 PFC^{3D} 流固耦合理论,模拟再现了煤与瓦斯突出过程中煤粉的堆积过程,实现了对单个煤粉颗粒运移轨迹的追踪。ZHANG^[21] 基于新表面理论,研究了突出煤体的破碎分布规律,并建立了煤体破碎程度与突出强度的定量关系。

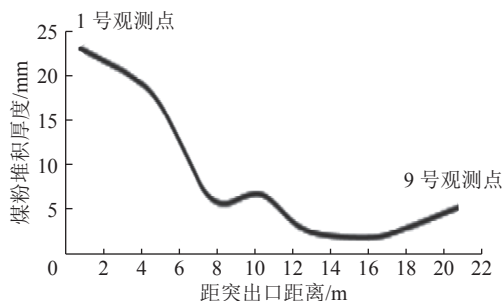


图 5 突出巷道煤粉堆积分布特征^[17]

Fig.5 Distribution characteristics of pulverized coal accumulation in outburst roadway^[17]

2.2 突出冲击波演化规律

在井下煤与瓦斯突出过程中,瞬间涌出的大量煤和瓦斯必然会压缩巷道气体,导致冲击波的产生。王凯等^[22-23] 认为井下突出发生的瞬间,高应力区域的煤体发生卸载、破碎,吸附状态的瓦斯大量解吸,高压瓦斯作用于破碎的煤体,并携带其涌入巷道空间中,冲击压缩原巷道内空气导致突出冲击气流的形成。苗法田等^[24] 指出,当处于临界状态之下或处于低度未完全膨胀状态的煤-瓦斯两相流从孔洞中喷出时,巷道空间中的流体完全膨胀后速度相对较低,其产生的冲击波超压值相对较小;当处于高度或超高度未完全膨胀状态的流体在巷道空间中发生膨胀时,基于足够大的巷道空间,流体将急剧加速并可能产生强冲击波。程五一等^[25] 根据煤与瓦斯突出后产生动力效应的现象,讨论了突出冲击波如何形成及其结构如何,认为煤与瓦斯突出冲击波与炸药、挥发性气体爆炸产生的冲击波波形差异较大,属于不同类型的冲击波。

张超林等^[9] 试验发现突出过程中,巷道内空气受压缩会产生多道以正相压和负相压交替向前传播的

冲击波,在巷道中部冲击波超压达到峰值 15.41 kPa (图 6),并计算得出冲击波阵面速度峰值为 361.76 m/s,远大于煤粉流运移速度,且超前于粉煤-瓦斯两相流以超声速传播。刘义等^[10,26] 研究得出,对于瓦斯流产生的冲击气流,随着距突出口距离的增大,气流超压峰值衰减速度会增加,气流超压峰值减小(图 7);同时发现突出后冲击气流会出现压力迅速上升,达到峰值后下降的现象,且压力上升速率大于衰减速率。曹偲等^[18] 认为,试验中由于突出会产生瓦斯流,并会伴随有冲击气流,出现巷道内距离突出口越远,超压峰值出现时间越延后,超压值越小的现象,说明冲击波超压峰值基本沿巷道呈衰减趋势。杨雪林^[13] 通过理论分析和物理模拟,建立了突出冲击波超压预测模型,发现冲击波超压峰值随传播距离呈幂函数衰减。OTUONYE^[27] 利用 MacCormack 显式有限差分法模拟了突出后瓦斯气流和冲击波在巷道内的传播过程,发现冲击波传播速度超前于瓦斯气流。XUE^[28] 通过模拟巷道内气体流动过程,得出突出冲击波在长距离传播后继续衰减,此外它也会以直角衍射并被削弱,同时伴随着其压力的衰减,反射冲击

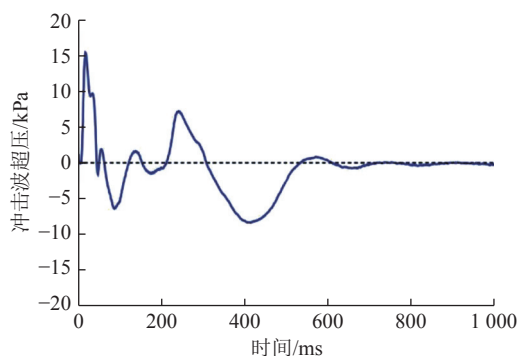


图 6 巷道中部冲击波超压随时间的变化规律^[9]

Fig.6 Variation law of shock wave overpressure in middle roadway^[9]

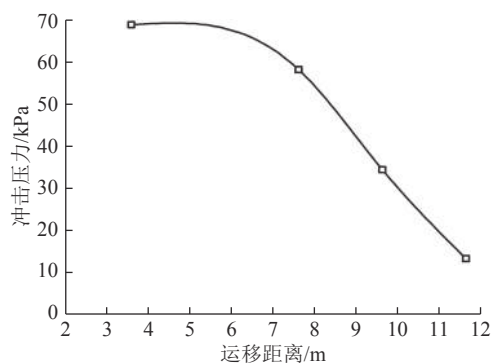


图 7 管道不同位置处冲击气流峰值压力变化曲线^[10]

Fig.7 Variation curve of peak pressure of impinging air flow at different positions of pipeline^[10]

波和入射冲击波的叠加将导致区域单位面积冲击波峰值超压增大。WANG^[29]数值模拟发现,通过交叉口的冲击波和气流大部分会流入交叉口对面路段的巷道,小部分会流入路口下方的道路并出现湍流,冲击波在对交叉路口下方道路会对更大的分支处的反射和衍射产生影响。杨书召等^[7]研究得出冲击波的衰减速度相对冲击气流衰减速度更快,由于突出能量没有补给,且存在巷道阻力等因素的作用,冲击混合气流速度会迅速衰减,因此存在极限伤害距离。

2.3 突出两相流影响因素

煤与瓦斯突出两相流在巷道的运移规律受众多因素影响,主要有巷道结构、瓦斯压力、煤粉粒径、地应力和气体组分等。

巷道结构方面,孙东玲等^[17]开展了“H”型巷道布置条件下的突出两相流模拟试验,得出突出后煤粉主要在主巷堆积,且煤样堆积高度与距突出口距离呈负相关关系,同时分流作用会导致联络巷与支巷气体压力峰值有所降低,出现支巷气体压力经多次波动降为0的现象。许江等^[30-31]开展了“T”型巷道布置条件下突出模拟试验,得出由于突出气流在分岔结构处会受到阻泄作用并以斜激波继续传播,单相气流阶段,分岔后支巷的冲击力就上升至最高值,且存在分岔后冲击力峰值高于分岔前的现象(图8)。并进一步对比了“直角L”型、“T”型及“圆弧L”型3种巷道结构对突出流体冲击的影响规律,通过动力致灾毁伤等级分布云图(图9)得到了尾部结构对直线段冲击力的影响表现为“直角L”型>“T”型>“圆弧L”型,且“圆弧L”型和“T”型的动力致灾力度和致灾面积都小于“直角L”型,因此得出弧形

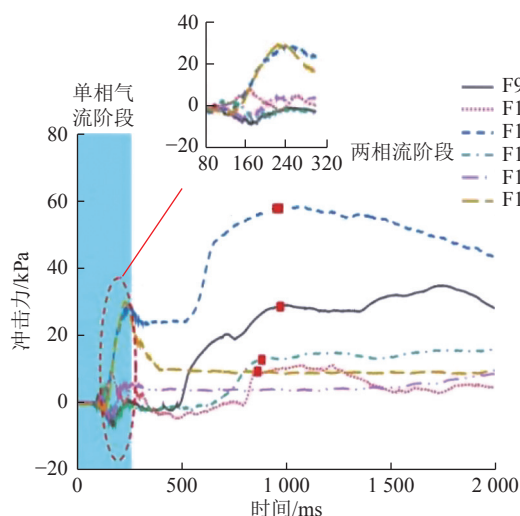


图8 分岔结构前后冲击力对比分析^[30]

Fig.8 Comparative analysis of impact force before and after bifurcation structure^[30]

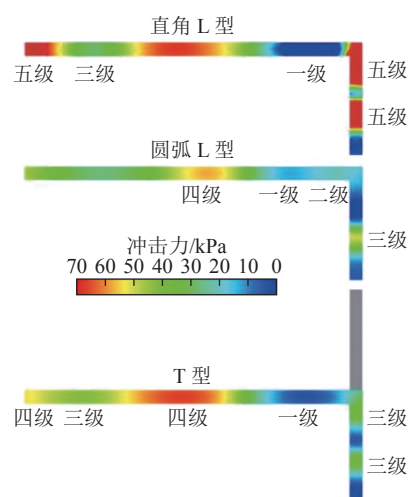


图9 突出动力致灾毁伤等级分布^[31]

Fig.9 Distribution of damage grade caused by dynamic disaster of coal and gas outburst^[31]

结构可使巷道内冲击致灾的力度降低、有效缩短冲击力的正压作用时间。刘星魁等^[32]利用计算机模拟了直角拐弯和障碍物对冲击波影响,得出在拐角处冲击波压力会造成弹射,波阵面处会形成高、低压区,且产生漩涡区与加速区;而在障碍物附近,冲击波近湍流强度增大,且在第二障碍物附近二次加速,且冲击波强度会随着障碍物距离及数量的增大而减小。

张超林等^[33-34]开展了不同瓦斯压力条件下(0.35、0.85、2.0 MPa)突出两相流试验,得出煤层瓦斯压力越大,突出煤粉运移速度越大、距离越远,突出煤粉粉碎率(突出煤粉中小于原始粒径煤粉质量占比)越高(图10);并且将煤粉流运移分为加速和减加速循环2个阶段,冲击波的传播分为加速、慢减速和快减速3个阶段,且瓦斯压力越大,最大冲击波阵面速度越大。程亮等^[35]研究了不同瓦斯压力条件(1.0、1.5、2.0 MPa)下的两相流冲击力及运动特征,发现随着瓦斯压力的增高,冲击力平均衰减系数逐渐降低,煤粉流速度峰值增大,同时煤粉流运移速度到达二次加速阶段的距离越短(图11)。王亮^[36]试验发现随着初始瓦斯压力的增大,波阵面压力和突出冲击波的传播速度增大,冲击压力和煤粉的运移速度也增大,并且增加比例与瓦斯压力增加的比例相仿。耿加波^[37]认为气体压力较高时,由于两相流的喷射速度极高,突出两相流的移动接近于层流运动,因此煤粉的沉降更具规律性;并且随着瓦斯压力增大,会导致煤与瓦斯突出强度增强,突出后巷道内温度下降量变大,气体浓度增加量升高。蒋安飞等^[38]试验发现冲击波超压特征值随着初始瓦斯压力的增大呈现对数递增的趋势,且冲击波超压在巷道前端衰减较慢,后端衰

减加快。孙冬玲等^[39]利用 Mixture 模型对临界流动理论进行了描述,发现不同入口压力条件下,突出两相流的运动状态也不同,且由于气、固相之间的松弛现象会导致两相流中声速远小于常温常压中空气声速。唐巨鹏等^[40]建立了突出射流数值模型,得出瓦斯压力与突出能量间呈线性增加关系,与突出强度和瓦斯涌出量均呈幂指数增加关系。

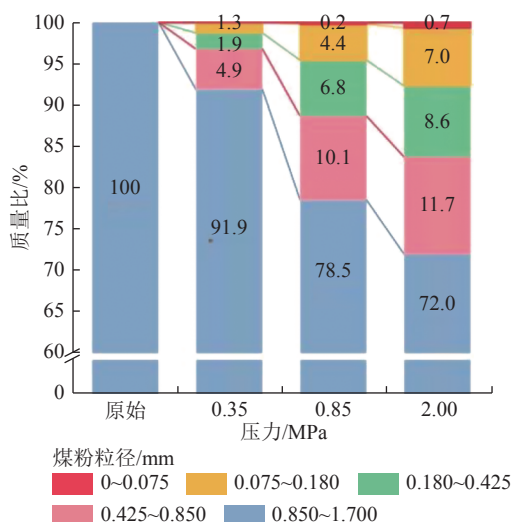


图 10 不同瓦斯压力条件下突出煤粉质量分布特征^[33]

Fig.10 Particle size distribution characteristics of outburst pulverized coal under different gas pressure^[33]

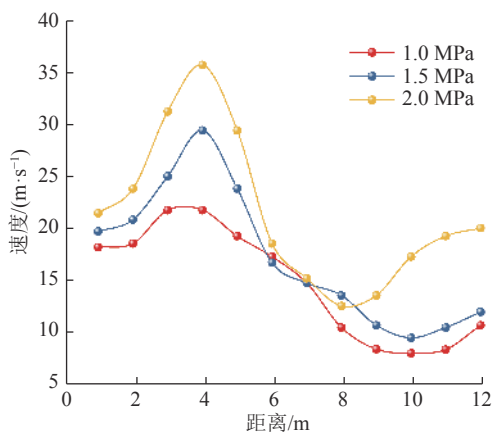


图 11 突出煤粉流运动速度分布^[35]

Fig.11 Velocity distribution of coal and gas outburst pulverized coal flow^[35]

蒋安飞等^[41]开展了不同煤粉粒径条件(0.5~1.0, 1.0~3.0, 3.0~10.0 mm)下的突出模拟试验,得出冲击波超压会随煤粉粒径的增大而上升,但冲击波传播速度与煤粉粒径呈负相关关系。王凯等^[11]采用 4 种不同粒径的煤粉(0~0.075, 0.075~0.18, 0.18~0.5, 0.5~2 mm)开展突出试验,得到了突出煤粉迁移速度会随煤粉粒径的减小而增加(图 12)。王亮^[36]

通过控制试验中煤粉粒径的大小,得出突出冲击波波阵面和煤粉的各项动力参数、突出煤粉质量会随煤粉粒径的减小而增大。因此煤粉粒径对突出两相流的影响规律和机制仍需进一步深入探究。

唐巨鹏等^[42-44]利用自主研发的真三轴煤与瓦斯突出巷道模拟试验系统,开展了不同埋深(1 000, 1 200, 1 400, 1 600, 1 800, 2 000 m)下的突出模拟试验,得出埋深加大、地应力作用增强使煤粉突出的质量占比增大,导致煤粉在巷道内突出距离逐渐减小(图 13);并且发现,随着埋深增加,地应力、瓦斯压力与突出强度和突出距离间均呈幂指数增加关系,而埋深的增加,同时也会使突出距离和突出强度增大,煤与瓦斯突出频度增加,但突出强度和破坏程度总体上仍呈趋于平缓的趋势。张超林^[45]进行了深部采动应力影响下煤与瓦斯突出物理模拟试验,发现采动应力集中系数越大,相对突出强度越大,突出煤粉的分选作用越显著。

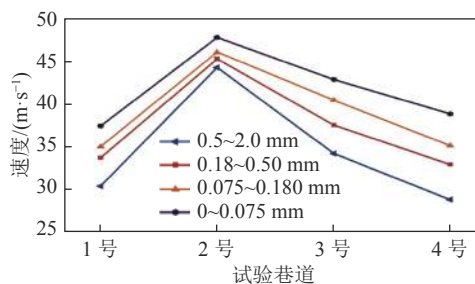


图 12 煤粉粒径与煤粉迁移速度关系^[11]

Fig.12 Relationship between coal particle size and coal migration velocity^[11]

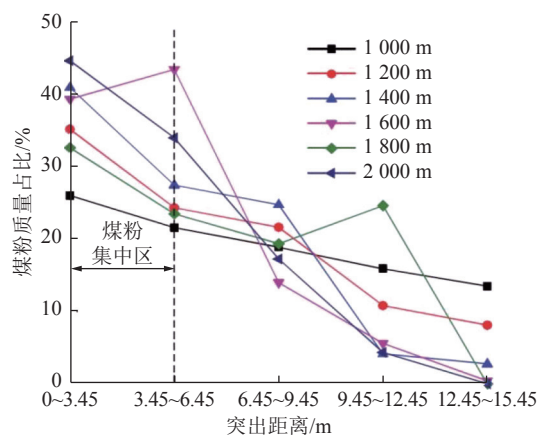


图 13 不同模拟埋深下突出煤粉质量分布^[42]

Fig.13 Quality distribution of outburst pulverized coal under different simulation depths^[42]

金侃^[19]通过采用不同气体介质(N_2 , CO_2)开展突出粉煤-瓦斯两相流试验,研究了吸附瓦斯快速解吸及不同种类气体对突出两相流的影响。研究表明

突出发动瞬间,煤粉-瓦斯流加速阶段受到煤中解吸的瓦斯与游离瓦斯共同作用,会使煤粉流速度增大;当煤粉-瓦斯流处于稳定运输阶段时,煤中解吸的瓦斯为煤粉流运动提供动力,会进一步维持其高速运动状态,甚至出现自加速现象,因此吸附性越强的气体(CO_2)对应的煤粉流运移速度也就越大(图14)。

高布桐等^[46]利用Fluent软件建立了瓦斯逆流运移扩散模型,开展了煤与瓦斯突出气体逆流影响模式研究,发现在逆流过程中会出现浓度上升速度快、下降慢的现象,瓦斯逆流速度会随着风速增大而增大,同一位置或时刻的瓦斯浓度峰值会随风速的增大而减小,瓦斯涌出量增大会导致运移至同一位置的时间缩短、瓦斯浓度峰值增大(图15),同时对群力煤矿“11·8”特别重大煤与瓦斯突出事故进行了案例分析。

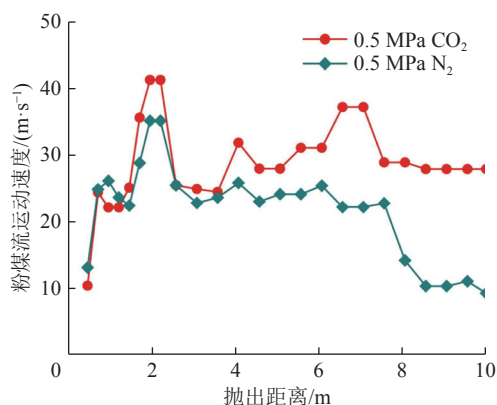


图14 不同吸附气体对突出煤粉流运动速度的影响^[19]

Fig.14 Effect of rapid gas desorption on the speed of outburst coal flow^[19]

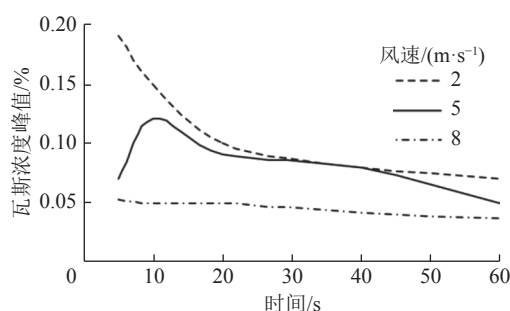


图15 不同风速同一时间瓦斯浓度峰值变化曲线^[46]

Fig.15 Variation curves of gas concentration peak at different wind speeds at the same time^[46]

3 煤与瓦斯突出两相流研究特点及展望

3.1 现阶段突出两相流研究特点

1)突出过程可视化。为了保证试验的安全性,早期的突出模拟巷道主要采用钢管焊接而成,无法

直接观测巷道内两相流运移过程;为了克服以上缺点,现有的模拟巷道多由高强度、高透光亚克力材制成,实现了突出过程中两相流的可视化,为直观观测突出两相流运移过程及采集巷道两相流参数提供了条件。

2)巷道结构复杂化。试验研究煤与瓦斯突出两相流离不开模拟巷道,巷道结构逐渐从单一的“直线”型结构逐渐过渡至复杂网络结构,如“H”型、“T”型、“直角L”型、“圆弧L”型等,为进一步模拟井下巷道真实布置情况、研究两相流传播衰减规律奠定基础。

3)数据采集多元化。最初的突出试验装置没有模拟巷道,突出过程多为“开放式”,主要采集突出结束后煤粉的质量分布数据;随着试验装置的不断升级改造,实现了对突出过程中突出两相流的视频图像、压力、浓度、冲击力等数据进行实时动态采集,数据采集手段更加丰富、数据种类更加多元。

4)影响因素全面化。影响煤与瓦斯突出两相流的因素较多,现有物理模拟试验研究除了考虑巷道结构外,还包括煤体性质(煤粉粒径)、瓦斯(瓦斯压力、气体组分)和地应力(地应力大小及分布)等方面,全面涵盖了“突出三要素”,基本实现了突出两相流影响因素的系统研究。

5)研究手段多样化。随着工业技术的进步,煤与瓦斯突出两相流的研究逐渐从单纯的理论研究转向物理模拟试验研究,近年来进一步开发了不同的数值模拟软件和平台,实现了研究手段的多样化。由于煤与瓦斯突出的特殊性,目前仍以物理模拟试验手段为主,物理模拟研究结果不仅能证实理论推导,也能为数值模拟提供基础参数,三者相互补充、互为支撑。

3.2 煤与瓦斯突出两相流研究展望

煤与瓦斯突出目前仍是煤矿生产中的主要灾害之一,煤矿安全形势依然严峻。经过众多学者多年来的研究,已基本掌握了煤与瓦斯突出两相流的传播致灾规律,有效指导了现场突出防控工作。结合突出两相流研究现状及现场实际需求,提出以下建议与展望。

1)相似体系的建立和完善。相似准则是现场原型与试验模型转换的理论基础,相似材料是开展物理模拟试验的物质基础^[47-49]。相似准则方面,由于煤与瓦斯突出过程的复杂性,目前突出物理模拟仍无法严格遵循相似原理,往往忽略次要因素从而对突出过程进行简化,主要考虑了几何相似性,在运动

相似和动力相似方面的相似程度不高,不能满足突出两相流运移规律的量化关系研究;相似材料方面,大尺度原煤获取难度大,仍以型煤试件为主,然而型煤试件制作过程中煤样孔隙结构、吸附特性及颗粒完整性均遭到不同程度的破坏,对于研究突出发生发展过程尤其是瓦斯的流动以及煤粉的运移、破碎和分布规律会产生较大影响。因此,煤与瓦斯突出两相流的研究仍需进一步建立更加完善的相似体系。

2)突出两相流与通风系统共存互扰机制。煤与瓦斯突出发生后,突出两相流涌入巷道,对矿井通风系统造成严重影响,如:冲击波破坏通风设施、突出瓦斯诱导风流灾变、突出煤体堵塞巷道掩埋通风设施等^[50];与此同时,通风系统的变化和响应会反作用于突出两相流,如隔离风门在延缓两相流运移的同时也会阻碍突出后瓦斯流的排出,极易构成巷道滞留瓦斯源并导致瓦斯爆炸等二次灾害^[51]。因此,应在研究突出两相流对矿井通风系统影响的基础上,进一步开展矿井风流紊乱、通风系统响应以及应急救援动作等对突出两相流的干扰和影响规律,揭示突出两相流与通风系统共存互扰机制,指导提高矿井通风系统应急抗灾能力,有效切断二次灾害传播链,减少突出发生造成的人员伤亡及财产损失。

3)突出两相流多因素耦合致灾机理研究。近年来,众多学者开展了大量的煤与瓦斯突出两相流物理模拟试验研究,获得了不同因素(巷道结构、瓦斯压力、煤粉粒径、地应力和气体组分等)对突出两相流的影响规律。然而,煤与瓦斯突出的发生和发展是一个多因素共同作用、相互耦合的结果,目前多侧重单一因素条件下的突出两相流运移规律研究,且仍未完全揭示清楚突出两相流致灾机理。后续可进一步开展多因素耦合条件下的突出两相流传播衰减特征、突出两相流灾害链传递模式、突出两相流对人体的损伤规律及安全阈值等方面的研究。同时考虑到物理模拟试验周期较长,可在掌握单一因素影响下突出两相流运移规律的基础上,建立突出两相流运移模型,借助数值模拟等手段开展多因素耦合致灾规律相关研究。

4)突出两相流“致灾-防控一体化”研究。开展煤与瓦斯突出两相流研究的最终目的是防控煤与瓦斯突出、降低突出致灾后果,现阶段的研究多集中于突出两相流的运移致灾规律及其影响因素方面。因此,后续可基于突出两相流“致灾-防控一体化”研究思路,在揭示突出两相流致灾机理的基础上,进一步研究突出两相流对井下“人员-设备-环境”的损毁

情况^[52],同时结合安全管理、安全人机、职业健康等相关理论^[53],分析不同情形条件下采取不同技术手段和管理措施的防控效果,从而针对性的提出防灾减灾措施和应急救援预案,保障煤矿工人生命安全和煤炭高效生产。

4 结 语

1)物理模拟试验是当前研究煤与瓦斯突出两相流规律的主要手段,系统总结了不同煤与瓦斯突出两相流物理模拟试验装置特点,发现试验装置的研发逐渐从模拟煤矿井下较为单一的巷道情形向模拟多场耦合条件下的复杂网络巷道布置过渡。

2)从理论分析、物理模拟、数值仿真等方面系统阐述了煤与瓦斯突出两相流研究进展,总结了突出煤粉流的运移速度、运移形态和堆积分布特征,以及突出冲击波的形成原因、传播速度和衰减规律,分析了巷道结构、瓦斯压力、煤粉粒径、地应力和气体组分等因素对突出两相流的影响和控制作用。

3)现阶段煤与瓦斯突出两相流研究具有突出过程可视化、巷道结构复杂化、数据采集多元化、影响因素全面化、研究手段多样化等特点,未来可在加强物理模拟相似体系完善的基础上,进一步开展两相流与通风系统共存互扰机制、突出两相流多因素耦合致灾机理和突出两相流“致灾-防控一体化”等方面的研究。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报[R]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/28/content_5743623.htm?eqid=f3ae8d87000708e500000006645b2b44. 2023.02.28.
- [2] 许鹏飞. 2000—2021年我国煤矿事故特征及发生规律研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(7): 129-133.
XU Pengfei. Characteristics and occurrence regularity of coal mine accidents in China from 2020 to 2021[J]. Coal Engineering, 2022, 54(7): 129-133.
- [3] 张超林, 王恩元, 王奕博, 等. 近20年我国煤与瓦斯突出事故时空分布及防控建议[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 134-141.
ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, WANG Yibo, et al. Spatial-temporal distribution of outburst accidents from 2001 to 2020 in China and suggestions for prevention and control[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 134-141.
- [4] 张超林, 彭守建, 许江, 等. 煤与瓦斯突出过程中气压时空演化规律[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 81-90.
ZHANG Chaolin, PENG Shoujian, XU Jiang, et al. Temporospatial evolution of gas pressure during coal and gas outburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 81-90.
- [5] 张超林, 王培仲, 王恩元, 等. 我国煤与瓦斯突出机理70年发展历程与展望[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 59-94.

- ZHANG Chaolin, WANG Peizhong, WANG Enyuan, *et al.* Coal and gas outburst mechanism: Research progress and prospect in China over the past 70 years[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(2): 59–94.
- [6] 张超林, 许江, 彭守建, 等. 煤与瓦斯突出及其防控物理模拟试验研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2020.
- [7] 杨书召, 张瑞林. 煤与瓦斯突出冲击波及瓦斯气流所致伤害研究[J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(11): 62–66.
- YANG Shuzhao, ZHANG Ruilin. Research on injuries due to shock wave and gas flow from coal and gas outburst[J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(11): 62–66.
- [8] 程卫民, 王刚, 张睿, 等. 煤与瓦斯突出形成冲击波的灾变损害[J]. *科技导报*, 2008, 26(24): 61–65.
- CHENG Weiming, WANG Gang, ZHANG Rui, *et al.* Formation of coal and gas outburst blast wave[J]. *Technology Review*, 2008, 26(24): 61–65.
- [9] 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.
- [10] 刘义, 石必明, 张煜, 等. 煤与瓦斯突出两相流传播特性实验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(7): 91–96.
- LIU Yi, SHI Biming, ZHANG Yu, *et al.* Experimental study on propagation characteristics of two-phase flow in coal and gas outburst[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(7): 91–96.
- [11] 王凯, 王亮, 杜锋, 等. 煤粉粒径对突出瓦斯-煤粉动力特征的影响[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1369–1377.
- WANG Kai, WANG Liang, DU Feng, *et al.* Influence of coal powder particle sizes on dynamic characteristics of coal and gas outburst[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1369–1377.
- [12] 许江, 魏仁忠, 程亮, 等. 煤与瓦斯突出流体多物理参数动态响应试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 159–168.
- XU Jiang, WEI Renzhong, CHENG Liang, *et al.* Experimental study on dynamic response of coal and gas outburst fluid with multiple physical parameters[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 159–168.
- [13] 杨雪林. 巷道煤与瓦斯突出抛出物动力学特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- YANG Xuelin. Study on dynamic characteristics of coal and gas outburst ejecta in roadway[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [14] 刘伟. 煤与瓦斯突出的煤粉池机理探讨[J]. *煤炭技术*, 2014, 33(8): 21–23.
- Liu Wei. Discussion on coal powder pool mechanism for coal and gas outburst[J]. *Coal Technology*, 2014, 33(8): 21–23.
- [15] 周斌, 许江, 彭守建, 等. 突出过程中煤层及巷道多物理场参数动态响应[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(4): 1385–1397.
- ZHOU Bin, XU Jiang, PENG Shoujian, *et al.* Dynamic response of coal seam and roadway during coal and gas outburst[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1385–1397.
- [16] 许江, 程亮, 周斌, 等. 突出过程中煤-瓦斯两相流运移的物理模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(10): 1945–1953.
- XU Jiang, CHENG Liang, ZHOU Bin, *et al.* Physical simulation of coal-gas two-phase flow migration in coal and gas outburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(10): 1945–1953.
- [17] 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.
- [18] 曹偲, 孙海涛, 戴林超, 等. 煤与瓦斯突出动力效应的模拟研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 113–120, 154.
- CAO Jie, SUN Haitao, DAI Linchao, *et al.* Simulation research on dynamic effect of coal and gas outburst[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 113–120, 154.
- [19] 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. Study on formation mechanism and disaster characteristics of high pressure pulverized coal-gas two-phase flow in coal and gas outburst[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [20] 王锐, 修毓, 王刚, 等. 基于颗粒流理论的煤与瓦斯突出数值模拟研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(4): 52–61.
- WANG Rui, XIU Yu, WANG Gang, *et al.* Numerical simulation of coal and gas outburst based on particle flow theory[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2016, 35(4): 52–61.
- [21] ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, XU Jiang, *et al.* A new method for coal and gas outburst prediction and prevention based on the fragmentation of ejected coal[J]. *Fuel*, 2021, 287: 119493.
- [22] 王凯, 周爱桃, 魏高举, 等. 直巷道中突出冲击气流的形成及传播特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(4): 559–563.
- WANG Kai, ZHOU Aitao, WEI Gaoju, *et al.* Study of formation and propagation characteristics of shock wave and gas flow of outburst at straight roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(4): 559–563.
- [23] 周爱桃, 王凯, 吴则琪, 等. 瓦斯风压诱导矿井风流灾变规律研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(6): 1011–1018.
- ZHOU Aitao, WANG Kai, WU Zeqi, *et al.* Research on air-flow catastrophic law induced by gas pressure in mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(6): 1011–1018.
- [24] 苗法田, 孙东玲, 胡千庭. 煤与瓦斯突出冲击波的形成机理[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(3): 367–372.
- MIAO Fatian, SUN Dongling, HU Qianting. The formation mechanism of shock waves in the coal and gas outburst process[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(3): 367–372.
- [25] 程五一, 陈国新. 煤与瓦斯突出冲击波的形成及模型建立[J].

- 煤矿安全, 2000, 31(9): 23–25.
- CHENG Wuyi, CHEN Guoxin. Formation and modeling of coal and gas outburst shock wave[J]. Safety in Coal Mines, 2000, 31(9): 23–25.
- [26] 刘义, 石必明, 张煜, 等. 煤与瓦斯突出冲击气流传播特征研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(11): 94–96.
- LIU Yi, SHI Biming, ZHANG Yu, *et al.* Study on propagation characteristics of coal and gas outburst impact airflow[J]. Coal Technology, 2021, 40(11): 94–96.
- [27] Otuonye F, Sheng J. A numerical simulation of gas flow during coal/gas outbursts[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 1994, 12(1): 15–34.
- [28] XUE Haiteng, LI Xijian, LIU Zhu, *et al.* Law of countercurrent energy dissipation of fresh air by coal and gas outburst shock waves[J]. Shock and Vibration, 2022: 856741.
- [29] WANG Kai, ZHOU Aitao, ZHANG Jianfang, *et al.* Real-time numerical simulations and experimental research for the propagation characteristics of shock waves and gas flow during coal and gas outburst[J]. Safety Science, 2012, 50(4): 835–841.
- [30] 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]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(6): 1423–1433.
- [31] 许江, 程亮, 彭守建, 等. 巷道结构对突出流体冲击特性的影响性试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 238–250.
- XU Jiang, CHENG Liang, PENG Shoujian, *et al.* Experimental study on the influence of roadway structure on outburst fluid impact characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 238–250.
- [32] 刘星魁, 赵志梅. 直角拐角与障碍物对巷道瓦斯突出冲击波传播的影响[J]. 煤矿安全, 2016, 47(6): 178–181.
- LIU Xingkui, ZHAO Zhimei. Influence of right angle corners and obstructions on gas shock propagation in roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(6): 178–181.
- [33] 张超林, 王奕博, 王恩元, 等. 煤与瓦斯突出煤粉在巷道内运移分布规律试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 11–19.
- ZHANG Chaolin, WANG Yibo, WANG Enyuan, *et al.* Experimental study on the migration and distribution law of pulverized coal in roadway during coal and gas outburst[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 11–19.
- [34] ZHANG Chaolin, WANG Yibo, WANG Enyuan, *et al.* Influence of coal seam gas pressure on the propagation mechanism of outburst two-phase flow in visual roadway[J]. Fuel, 2022, 322: 124296.
- [35] 程亮, 许江, 周斌, 等. 不同瓦斯压力对煤与瓦斯突出两相流传播规律的影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2619–2626.
- CHENG Liang, XU Jiang, ZHOU Bin, *et al.* The influence of different gas pressures on the propagation law of coal and gas outburst two-phase flow[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2619–2626.
- [36] 王亮. 突出煤粉-瓦斯固气两相流动力学演化规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
- WANG Liang. Dynamic evolution law of solid-gas two-phase flow in coal and gas outbursts[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2020.
- [37] 耿加波. 煤与瓦斯突出灾变时空演化及其煤-瓦斯两相流运移特性物理模拟试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- GENG Jiabo. Physical simulation on evolution of coal and gas outbursts and coal-gas two-phase flow transport characteristics[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [38] 蒋安飞, 孙东玲, 刘延保, 等. 瓦斯压力对煤与瓦斯突出冲击波传播的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(2): 18–22.
- JIANG Anfei, SUN Dongling, LIU Yanbao, *et al.* Study on the influence of gas pressure on the propagation of coal and gas outburst shock wave[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(2): 18–22.
- [39] 孙东玲, 胡千庭, 苗法田. 煤与瓦斯突出过程中煤-瓦斯两相流的运动状态[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 452–458.
- SUN Dongling, HU Qianting, MIAO Fatian. Motion state of coal-gas flow in the process of outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 452–458.
- [40] 唐巨鹏, 于宁, 陈帅. 瓦斯压力对煤与瓦斯射流突出能量的影响[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(3): 943–948.
- TANG Jupeng, YU Ning, CHEN Shuai. Influence of gas pressure on coal and gas jet outburst energy[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(3): 943–948.
- [41] 蒋安飞, 孙东玲, 刘延保, 等. 煤粉粒径对突出冲击波传播特征的影响[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(5): 13–16.
- JIANG Anfei, SUN Dongling, LIU Yanbao, *et al.* Influence of coal fine particle size on propagation characteristics of outburst shock wave[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(5): 13–16.
- [42] 唐巨鹏, 张昕, 潘一山, 等. 深部巷道煤与瓦斯突出及冲击演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1081–1092.
- TANG Jupeng, ZHANG Xin, PAN Yishan, *et al.* Experimental study on outburst and impact evolution characteristics of coal and gas in deep roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1081–1092.
- [43] 唐巨鹏, 杨森林, 王亚林, 等. 地应力和瓦斯压力作用下深部煤与瓦斯突出试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2769–2774.
- TANG Jupeng, YANG Senlin, WANG Yalin, *et al.* Experiment of coal and gas outbursts under ground stress and gas pressure in deep mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2769–2774.
- [44] 唐巨鹏, 任凌冉, 潘一山, 等. 高地应力条件煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 113–121.
- TANG Jupeng, REN Lingran, PAN Yishan, *et al.* Simulation test study on coal and gas outburst under conditions of high in-situ stress[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 113–121.
- [45] 张超林. 深部采动应力影响下煤与瓦斯突出物理模拟试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- ZHANG Chaolin. Experimental study on physical simulation of coal and gas outburst under the influence of deep mining

- stress[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [46] 高布桐, 韦善阳, 曲日红, 等. 煤与瓦斯突出气体逆流影响模式研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(4): 98–105.
- GAO Butong, WEI Shanyang, QU Rihong, *et al.* Study on influence mode of gas counter flow in coal and gas outburst[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(4): 98–105.
- [47] 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.
- [48] 李全贵, 邓羿泽, 胡千庭, 等. 煤岩水力压裂物理实验研究的综述及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 62–72.
- LI Quanguai, DENG Yize, HU Qianting, *et al.* Review and prospect of coal rock hydraulic fracturing physical experimental research[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 62–72.
- [49] 韩 颖, 吕 帅, 张飞燕, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验研究进展及展望[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 1–8.
- HAN Ying, LYU Shuai, ZHANG Feiyan, *et al.* Research progress and prospect of coal and gas outburst simulation experiments[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2022, 41(1): 1–8.
- [50] 魏连江, 李 胜, 魏宗康, 等. 煤与瓦斯突出对矿井通风系统的影响研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 100–105.
- WEI Lianjiang, LI Sheng, WEI Zongkang, *et al.* Research status and prospects of the influence of coal and gas outburst on ventilation system[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(3): 100–105.
- [51] 李宗翔, 王雅迪, 高光超. 基于有源风网的瓦斯突出3D矿井灾变通风仿真[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(8): 43–49.
- LI Zongxiang, WANG Yadi, GAO Guangchao, *et al.* Simulation of 3D mine ventilation system after gas outburst based on source-containing ventilation network[J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(8): 43–49.
- [52] 彭守建, 许 江, 张超林, 等. 煤与瓦斯突出灾变过程中人-机-环受损模拟试验方法[P]. 中国, 107389859B, 2019-06-21.
- PENG Shoujian, XU Jiang, ZHANG Chaolin, *et al.* Simulation test method of man-machine-environment damage in the process of coal and gas outburst disaster[P]. China, 107389859B, 2019-06-21.
- [53] Mahdevari S, Shahriar K, Esfahanipour A. Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 488/489: 85–99.