您可能感兴趣的文章、专题:

- 盘点《煤炭学报》2020年热点论文
 - 《煤炭学报》2021年第1期
 - "新锐科学家"专题

1

- "深部岩体力学与开采理论"专题
- "煤加工与洁净化工技术"专题
- "黄河流域矿区生态保护与可持续发展"专题
- "煤矿热动力灾害防控技术与装备"专题
- "煤矿快速智能掘进理论与技术"专题
- "煤系天然气聚集理论与勘探开发技术"专题
- "低品质煤浮选过程强化"专题

煤矿冲击地压与冒顶复合灾害研究

潘一山1,2,3,代连朋1,李国臻3,李忠华3

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室,辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁大学 环境学院,辽宁 沈阳 110036; 3. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

摘 要:随着煤矿向深部发展,矿井动力灾害既表现出冲击地压的部分特征,又表现出冒顶的部分 特征。2种典型的灾害打破以往冒顶与冲击地压的发生具有一种互为逆向性的认知规律,在深部 高应力煤巷,特别是留顶煤巷道中出现了相互诱导、复合发生的新灾害类型。在总结山东、山西和 新疆矿区典型巷道冲击致顶板(顶煤)动力灾害特征的基础上,提出了深部巷道冲击地压与冒顶复 合灾害的概念、机理与分类,指出复合灾害机理关键点在于揭示巷道整体系统和破碎区子系统的稳 定原理及其2者间的相互影响。建立了巷道发生复合灾害的力学模型,根据扰动响应失稳判据,提 出并得到了巷道发生复合灾害的临界应力 P_{er}、临界软化区半径 ρ_{er}和最大容许采扰应力增量 σ_{max}, 厘清了灾害发生的主控因素,分析了煤岩冲击倾向指数 K、支护强度 p_s、巷道半径 ρ₀、煤岩强度 σ_e 等对灾害发生的影响规律,同时阐明了围岩塑性软化、破碎深度随地应力增加的发育规律。研究结 果表明,破碎发育巷道的动力失稳主体为弹性区、软化区与破碎区构成的不稳定系统,垮落主体为 破碎区;稳定的破碎区提升了巷道冲击启动临界值,使其启动难度增大,但破碎区的发育又易引起 顶煤垮落;巷道稳定支护是解决复合灾害的关键,科学合理支护既能有效调控围岩破碎防冒,又能 提升冲击启动临界值。通过理论研究,揭示了巷道冲击地压与冒顶复合灾害的发生机理,阐明了巷 道软化与破碎区及其稳控支护对深部破碎发育巷道动力灾害防治的重要性。

关键词:冲击地压;复合灾害;巷道冒顶;深部开采;煤层巷道;扰动失稳

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2021)01-0112-11

Study on compound disaster of rock burst and roof falling in coal mines

PAN Yishan^{1,2,3}, DAI Lianpeng¹, LI Guozhen³, LI Zhonghua³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 3. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: With the development of coal mine to the deeper zone, the dynamic disaster of coal mines not only shows some characteristics of rock burst, but also shows some characteristics of roof falling. The two typical disasters break the previous cognitive law that the occurrence of roof fall and rock burst is mutually converse. These two type of disasters are mutually induced and compounded in deep coal roadway with high stress, especially coal roadway with thick top coal. On the basis of summarizing the characteristics of roof (top coal) accidents caused by rock burst of typical roadways in Shandong, Shanxi and Xinjiang mining areas, the concept, mechanism and classification of the compound disaster of rock burst and roof fall in deep roadway were proposed. It is pointed out that the key point of compound dis-

引用格式:潘一山,代连朋,李国臻,等.煤矿冲击地压与冒顶复合灾害研究[J].煤炭学报,2021,46(1):112-122.

PAN Yishan, DAI Lianpeng, LI Guozhen, et al. Study on compound disaster of rock burst and roof falling in coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1):112-122.



移动阅读

作者简介:潘一山(1964—),男,辽宁丹东人,教授,博士生导师。E-mail:panyishan@lnu.edu.cn

通讯作者:代连朋(1992—),男,河北唐山人,博士研究生。E-mail:dailp_0825@163.com

aster mechanism is to reveal the stability principle of the whole roadway system, the subsystem of the fracture area and their interaction. In this paper, the mechanical model of compound disaster in roadway was established. According to the criterion of disturbance response instability, the critical load, the radius of critical softening zone and maximum allowable disturbance stress increment were obtained, the main control factors of the disaster were clarified and the influence of rock burst tendency index, support strength, roadway radius and uniaxial compressive strength on the occurrence of the disaster was analyzed. In addition, the development law of the surrounding rock softening and fracture depth along the increase of the ground stress was clarified. The results show that the main body of dynamic instability of roadway is an unstable system composed of elastic zone, softening zone and fracture zone, and the main body of falling is fracture area. The stable fracture area increases the critical value of rock burst start-up, which makes it more difficult to start, but the development of fracture area is easy to cause roof fall. Roadway stability support is the key to solve the compound disaster. Scientific and reasonable support can not only effectively control the surrounding rock fracture and roof falling-resistant, but also improve the critical value of rock burst start-up. The occurrence mechanism of the compound disaster of rock burst and roof fall is revealed with theoretical study, and the significance of the softening and fracture area and its stability control for the prevention and control of the dynamic disaster in the deep roadway is clarified.

Key words:rock burst; compound dynamic disaster; roadway roof fall; deep mining; roadway in coal seam; disturbance and instability

冲击地压和冒顶灾害是煤矿中常遇的2种典型的灾害。冲击地压^[1-4]指井巷或工作面周围岩体,由于弹性变形能的瞬时释放而产生突然剧烈破坏的动力现象,常伴有煤岩体抛出、巨响及气浪等现象。巷道冒顶^[5-9]指矿井开挖、衬砌过程中因开挖或支护不当,顶部大面积垮塌的现象。

在浅部开采时,通常认为,煤矿冒顶与冲击地压 的发生具有一种明显的互为逆向的特征,即易于冒顶 处很少发生冲击地压,易于发生冲击地压的巷道较少 发生冒顶,原因在于煤层顶板破碎时易于漏冒,不易 于在煤体中积聚大量弹性能量,较低应力集中区域不 易发生冲击地压动力灾害^[10-14]。两者通常表现为单 一的成灾模式^[15-17],国内外学术界也通常将巷道冲 击地压与冒顶作为2个独立的方向平行开展研究,并 取得了一定的成果。

然而近年来,我国煤矿以8~25 m/a 的速度向深 部发展,深部煤层冲击危险巷道处于原岩应力场、采 动应力场与覆岩空间运动引起随机扰动应力波的复 杂地质力学环境^[18-21]。深部煤层巷道在高应力作用 下松动圈发育,使得冲击地压与冒顶2种危险并存且 在孕育过程中相互影响。比如顶板或顶煤局部较破 碎的巷道、不良地质体或断层构造带附近巷道,支护 巷道围岩的锚网索锚固基础力学性质劣化严重,频发 扰动冲击致顶煤垮落、锚杆索脱锚拉断致巷内冲击型 冒顶的动力灾害现象和工程问题。深部煤层巷道冲 击地压动力灾害特征不同于浅部巷道冲击地压特征, 其发生伴有巷内冲击型冒顶,巷内冒顶的发生往往又 可能助推了冲击地压的发生,灾害总体表现为冲击地 压与冒顶灾害的复合发生特征。例如,2017年中煤 担水沟煤业有限公司"1·17"冲击地压致顶板事故、 2018年龙郓煤矿"10·20"冲击地压事故等均具此 典型的巷道冲击与冒顶的复合灾害特征。

随着煤炭开采向深部发展,冲击地压和冒顶灾害 引起国内外学者的广泛关注,对2种灾害的相互影响 进行了初步探讨。王官宝^[22]分析了顶板大面积垮落 垮塌引发冲击地压发生前、后的显现特征,探讨了石 膏矿山发生的采空区顶板大面积垮落诱发冲击地压 事故的失稳机理、监测及防治对策;马念杰等^[23]基于 巷道蝶形塑性区理论,研究了蝶叶塑性区穿透特性与 巷道冒顶机理,并进一步提出了煤层巷道蝶型冲击地 压发生机理的猜想,从蝶叶塑性区扩展特征上分别研 究了巷道冒顶与冲击地压的发生机理;陆菜平和窦林 名等^[24]研究了煤矿顶板断冒引发冲击地压的微震事 件频谱演化规律,为冒顶导致冲击地压灾害监测预警 奠定基础;满福有^[25]基于防治冲击地压的目的探讨 了局部冒顶的预测与防治措施。

现有的冒顶诱发冲击地压灾害研究多数集中在 工作面采空区位置,鲜有揭示深部煤层巷道冲击地压 与冒顶灾害的复合发生机理,缺乏巷道冲击地压与冒 顶灾害复合发生的系统研究。因此,笔者提出了深部 煤层巷道冲击地压与冒顶复合灾害的概念与分类,总 结分析了煤层巷道冲击地压与冒顶复合灾害显现特 征,建立了复合灾害发生的解析模型,得到了复合灾 害的临界发生条件,揭示了煤层巷道冲击地压、冒顶

| 4 | 煤 | 炭 | 学 | 报 | 2021 年第 46 卷 |
|---|---|---|---|---|--------------|
| | | | | | |

与支护相互影响机制,巷内灾害复合发生机理及主控因素。

1 典型煤矿动力灾害案例

1.1 山东某矿动力灾害案例

该矿主采 3 号煤层,煤层平均厚度 7.03 m,倾角 13°,平均埋深 984 m,断层构造发育。1303 工作面回



⁽a)顶板冲击下沉实照

采巷道高4.0 m,沿底板托3 m 顶煤掘进,巷道采用 锚网索支护。2018-10-20,巷道掘进贯通期间,发生 冲击冒顶灾害,灾后巷高5.999~6.125 m,垮落高 2.025~2.099 m。巷道两帮移近、可见底臌、附近有 震源点,巷内破坏具有明显的冲击地压特征,冲击冒 顶长度约200 m,造成大面积顶煤冲击垮落,致21 人 死亡。巷内顶板冲击冒顶实照与素描如图1所示。



(b)巷道变形素描

图1 山东某矿巷道围岩冲击冒顶破坏

Fig. 1 Characteristic of burst and falling damage of roadway in Shandong Province

1.2 山西某矿动力灾害案例

2017年1月,山西某矿203综采工作面运输巷发 生了较为严重的动力灾害事故,造成10人遇难,支护 设施损坏严重。4203工作面运输巷沿煤层底板掘进, 煤层平均厚5.68m,煤层倾角5°,掘进断面为3.3m× 5.4m(宽×高)的矩形,顶板采用锚网索带联合支护。

灾害显现后,巷内出现顶底板大幅度移近、严重 底臌、锚杆锚索大量拉断、超前支护范围内单体支柱 压弯、临近垮落区的3组离层仪钢丝被岩层剪断等典 型动力破坏特征,如图2所示。



图 2 山西某矿巷道围岩冲击冒顶破坏 Fig. 2 Characteristic of burst and falling damage of roadway in Shanxi Province

1.3 新疆某矿动力灾害案例

新疆某矿 I010203 综采放顶煤工作面位于一采 区西翼 B2 煤层中, B2 煤层顶板具有强冲击倾向性, 煤层具有弱冲击倾向性。巷道断面为圆弧拱形, 掘进 宽度为4 700 mm, 巷道断面中心掘进高度3 700 mm 巷道采用锚杆+锚网+锚索+钢带的联合支护方式。 顶板属于坚硬顶板, 开采过程中有较长时间没有进行 放顶工作,导致顶板在工作面后方形成悬顶,造成冲击地压事故灾害。巷内严重破坏段为40 m,两帮内收敛1.2 m,顶板煤体出现垮落现象,垮落高度最大为2.6 m,宽度最大为3.4 m。由于顶煤发生大面积垮落,导致顶板锚索梁呈现不同形式的扭曲变形,有的锚索梁发生开裂现象,如图3 所示。



图 3 新疆某矿巷道围岩冲击冒顶破坏 Fig. 3 Characteristic of burst and falling damage of roadway in Xinjiang Province

2 冲击地压与冒顶复合灾害特征

2.1 冲击地压破坏特征

冲击地压是以弹性势能参与为主的、以巷道四周 围岩抛出为主要特征的动力破坏。通过冲击地压巷道 的破坏特征调研分析,从巷道冲击地压与冒顶破坏特 征相对比的角度,巷道冲击地压主要有如下破坏特征:

(1)从巷内四周破坏部位来看,冲击地压致灾巷 道,巷内顶底、两帮的四周围岩均具有明显的冲击破 坏特征。巷内顶部煤岩体表现出明显的冲击整体下 沉破坏,巷内两帮有典型的冲击帮鼓、煤体破碎抛出

114

潘一山等:煤矿冲击地压与冒顶复合灾害研究

现象,底板有明显的底臌式冲击破坏现象。

(2)从巷内围岩破坏抛掷特征来看,发生冲击地 压灾害的巷道,巷内顶部、两帮煤岩体破坏具有明显 的抛掷特征。由于冲击地压为煤岩体的弹性能释放, 冲击地压的发生使得巷道浅表煤岩体受冲破碎后产 生较大的抛掷动能。

(3)从巷内围岩支护的破坏特征来看,巷内顶 部、两帮支护体均有明显破坏。支护破坏部位的方向 性不明显;冲击破坏后锚杆索多呈现锚杆索拉断、锚 索梁开裂现象,锚杆产生较强弯曲、拉扭破坏特征,支 护受损严重。

(4)从巷道破坏释放能量的来源来看,冲击地压 致灾巷道,微震系统通常能够定位到较强的震源信 号。重力势能是冲击地压释放能量的次要能量来源, 而煤岩弹性能量的剧烈释放是冲击地压能量参与的 主体,因此冲击地压发生通常引起采场周围环境甚至 地面产生较为明显的震感。

2.2 冒顶破坏显现特征

巷道冒顶通常是以重力势能参与为主的、以顶部 煤岩离层垮落为主要特征的静力破坏。通过对发生 冒顶的巷道破坏特征进行调研,并从巷道冒顶破坏与 冲击地压破坏特征相对比的角度,巷道冒顶主要有如 下破坏特征。

(1)从巷内四周破坏部位来看,发生冒顶灾害的 巷道,一般仅巷内顶部煤岩具有明显的破坏特征。巷 内顶部煤岩体表现出明显的漏冒式破坏特征,破坏垮 落的围岩呈散体特征,锚杆索失去脱锚基础而悬空失 效,垮落后的围岩一般具有较为光滑的分界面。

(2)从巷内围岩破坏抛掷特征来看,发生冒顶灾 害的巷道,巷内顶部煤岩体垮落破坏具有明显受重力 下沉漏冒特征,无水平煤岩抛掷现象。由于冒顶灾害 主要是巷道顶部煤岩体的重力势能的释放,冒顶使得 巷道浅部煤岩体受采动劣化后在重力的作用下产生 垂向漏冒特征。

(3)从巷内围岩支护的破坏特征来看,发生冒顶 灾害的巷道,巷内仅顶部支护体有明显破坏,顶部支 护部位垂向破坏特征明显。冒顶后锚杆索支护失效 多呈现2种模式:一种为锚杆索拉断、巷内顶部煤岩 垮落;另一种为锚杆索锚固基础劣化松散垮落,锚杆 索失去脱锚基础,冒顶后锚杆索悬吊在顶板。

(4)从巷道破坏释放能量的来源来看,发生巷道 冒顶时,附近无明显的动载震源及震感。重力势能是 巷道冒顶释放能量的主要能量来源,有限的重力势能 一般不能产生明显的震源。

2.3 冲击地压与冒顶复合灾害显现特征

深埋冲击地压巷道处于原岩应力场、采动应力场 与覆岩空间运移引起的随机扰动冲击波的复杂地质力 学环境,尤其在留顶煤掘进的厚煤层巷道中,巷道围岩 锚网索锚固基础采动损伤、力学性质劣化,频发扰动冲 击锚杆索脱锚致巷内顶部煤岩体失稳漏冒。因此,深 部煤层巷道表现出冲击地压与冒顶相互诱发、复合显 现的灾害特征,具有"采动致煤岩损伤、支护劣化失效、 冲击地压与冒顶复合发生"的连锁效应。

此类动力灾害既具有明显的巷内冲击帮鼓、顶底 移近、煤体抛掷等典型冲击地压特征,又具有巷内顶 部煤岩重力垮落、冒后围岩界面分明、锚杆索竖向破 断的典型冒顶特征,灾害总体表现为冲击地压与冒顶 灾害的复合发生特征,如图4所示。

顶煤下沉



 (d) 固石方区較坏弃面
 图 4 复合灾害发生巷道破坏特征
 Fig. 4 Characteristic of impact damage caused by the compound disaster

学

报

炭

煤

深部煤层巷道动力灾害表现出冲击地压与冒顶 灾害的复合发生特征,直接原因在于:一方面,深部厚 煤层冲击地压巷道处于原岩应力场、采动应力场与覆 岩空间运移引起的随机性扰动冲击波的高应力复杂 力学环境,为巷道系统动力失稳提供了力源条件;另 一方面,煤层巷道围岩为强度较低、易软化破碎的煤 体介质,为锚固基础劣化、顶板(顶煤)垮落提供了介 质属性条件。因此,复杂高应力环境下的深部煤层巷 道,锚固围岩采动损伤性能劣化,导致锚网索锚固围 岩体大量脱锚失效,极易发生巷道顶板(顶煤)冲击 冒顶、整体结构动力失稳。由此可知,深部煤层冲击 即、整体结构动力失稳。由此可知,深部煤层冲击 能压巷道动力失稳既有浅部巷道冲击失稳在力源环 境上的共性条件,亦有"煤岩介质损伤-锚固基础劣 化-巷道冲击冒顶"机制的个性特征。

3 冲击地压与冒顶复合灾害发生机理

3.1 冲击-冒顶复合动力灾害分类

深部巷道冲击地压与冒顶复合灾害一般为:高应 力环境下松动圈发育的深部煤巷,煤岩弹性能瞬时释 放导致巷内顶煤冲击漏冒或巷内支护失效内扰巷道 导致弹性能有害释放的围岩突然剧烈破坏动力现象。 从系统的角度分析,巷道弹性、塑性软化与松软破碎 煤岩构成了冲击地压与冒顶复合灾害发生的不稳定 系统,松软破碎区煤岩为巷道冒顶的失稳主体,弹性 与软化区煤岩为冲击地压的失稳主体深部巷道冲击 地压与冒顶复合灾害系统分析模型,如图5所示。



图 5 深部巷道冲击地压与冒顶复合灾害系统分析模型 Fig. 5 Analysis model of compound disaster system of rock burst and roof falling in deep roadway

简而言之,巷道冲击地压与冒顶复合灾害是围岩 弹性区、塑性软化区与破碎区的"三分区"系统的稳 定与非稳定平衡的演化过程。从分区子系统失稳的 诱发起因角度,复合灾害可分为"冒顶致冲"型复合 灾害和"冲击致冒"型复合灾害。其中,"冒顶致冲" 为破碎区失稳诱发系统失稳的孕灾致灾过程,"冲击 致冒"为系统受扰冲击启动而诱发破碎区巷内垮落 的孕灾致灾过程。

巷道冲击地压与冒顶复合灾害的发生机制与特征,既不同于单一冲击地压灾害,也不同于单一冒顶 灾害,其兼具2者的部分特征,深部巷道冲击地压与 冒顶复合灾害中松软破碎区的存在降低了巷道系统 的失稳临界值,即在较小扰动下即易产生巷内冲击漏 冒失稳现象,弹性与软化区煤岩的冲击失稳又使得巷 道冒顶具有明显的冲击破坏特征,3者复合关系如图 6 所示。



Fig. 6 Complex of rock burst and roof falling disaster relation map

综上,深部巷道冲击地压与冒顶复合灾害的发生 机理研究关键点在于揭示巷道整体系统的稳定原理 和松软破碎区子系统的稳定原理及其2者间的相互 影响,深部巷道冲击地压与冒顶复合灾害防治研究关 键点在于探究支护系统对松软破碎区子系统稳控机 理、破碎区调控巷道稳定性的防冲机理。

3.2 "冒顶致冲"型复合灾害及其发生机理

此类复合灾害为巷道冒顶诱发冲击地压的复 合灾害类型,该类型多发生于深部厚煤层高应力采 动损伤巷道,此类灾害以支护失效、冒顶破坏为先 导,以冲击地压造成巷道整体破坏为特征。巷内浅 表采动破碎围岩与支护体构成巷道破碎区子系统, 浅部破碎区子系统与深部塑性软化区、弹性区煤岩 构成巷道整体系统,子系统与系统产生复合作用并 处于相对平衡状态,如图7(a)所示;巷道破碎区成 为了巷道失稳的薄弱点,易发生漏冒失稳、支护失 效,如图7(b)所示。

当巷道发生冒顶、支护失效,巷道系统动力失稳 临界值下降,支护破坏构成系统内扰动,因此易诱发 巷道整体系统冲击失稳,最终形成冒顶致冲的复合致 灾链式反应,如图7(c)所示。因此,易发生此类复合 灾害的巷道应侧重防冒的工程设计。强调高强度、高 刚度与耦合改性支护围岩,确保静压巷道支护设计的 合理性与有效性。

3.3 "冲击致冒"型复合灾害及其发生机理

此类复合灾害为巷道冲击地压诱发冒顶的复合 灾害类型,其以冲击地压显现为先导,以巷内冒顶破 潘一山等:煤矿冲击地压与冒顶复合灾害研究

坏为主要特征。巷道破碎区子系统与深部塑性软化 区、弹性区煤岩构成的巷道整体系统,处于相对平衡 状态,如图 8(a)所示;巷道破碎区在支护作用下能够 保持静压环境中的稳定性,但当系统发生冲击失稳 时,低能级冲击即可造成巷道破碎区冲击冒顶致灾。 巷道破碎区成为了巷道薄弱点,易成为巷内冲击下围 岩破坏的主要显现点,发生支护失效、冲击冒顶,形成 冲击致冒的复合致灾链式反应,如图8(b)所示。



图 7 复合灾害的"冒顶致冲"灾变过程









因此,易发生此类型复合灾害的巷道应侧重防冲 的工程设计。强调防冲吸能的支护技术,综合采用应 力调控的主动防冲工程措施,确保动压巷道支护设计 的合理性与有效性。

4 巷道冲击地压与冒顶复合灾害解析分析

4.1 力学模型与假设

深部巷道破碎区作为巷内最表层围岩,是支护作 用的直接载体,是冒顶主体,也是冲击启动后动力抛 出的主体,因此,建立考虑破碎区的巷道复合灾害发 生模型对灾害的定量分析尤为重要。

如图 5 模型所述,针对深部巷道冲击地压与冒顶 复合灾害系统模型,设均质、连续、各向同性的圆形巷 道半径为 ρ_0 ,巷道所处远场应力为 P,巷道内支护应 力为 p_s 。围岩出现塑性软化区与破碎区,产生的破碎 区半径为 ρ_f ,塑性软化区半径为 ρ 。取单位长度进行 计算,巷道周围煤体破坏采用摩尔-库仑屈服破坏准 则,视其为静水压力状态的轴对称平面应变问题。

煤岩本构关系如图9所示,峰值强度前简化为线

性弹性变形,弹性模量为 E,煤的单轴抗压强度为 σ_e ,对应的应变为 $\varepsilon_e \circ \varepsilon'_e$ 为残余强度对应的应变; ε_u 为完全损伤状态下煤岩应变。峰值强度后,假设峰后 煤岩呈现双线性应变软化,降模量分别为 λ_1 和 $\lambda_2 \circ$ 定义煤岩冲击倾向指数 $K = \lambda_1 / E$,煤岩残余强度 $\sigma'_e = \xi \sigma_e$,其中, ξ 为残余强度系数。超过峰值强度后为 2 段线性各向同性损伤演化。



4.2 力学行为

煤岩在单轴压缩下的一维损伤演化方程为

$$\begin{bmatrix} 0 & (\varepsilon < \varepsilon_{c}) \\ D = \left\{ \frac{\lambda_{1}}{\sigma_{c}} \left(\overline{\varepsilon} - \varepsilon_{c} \right) & (\varepsilon_{c} < \varepsilon < \varepsilon_{c}') \\ \left[1 - \left[\alpha \left(1 - \overline{\varepsilon} / \varepsilon_{c}' \right) + \xi \overline{\varepsilon} / \varepsilon_{c}' \right] & (\varepsilon > \varepsilon_{c}') \\ \end{bmatrix} \right]$$
(1)

式中, D 为损伤变量; $\overline{\varepsilon}$ 为三维情况下的等效应变; α 为中间变量, 无实际意义, $\alpha = \lambda_2 / E + (1-\xi)\lambda_2 / \lambda_1 + \xi_0$

由弹性理论,结合在弹性与软化区交界处满足莫 尔库伦准则 $\sigma_{\theta}(\rho) = m\sigma_{r}(\rho) + \sigma_{e}$ 。因此,弹性区径 向应力 σ_{r} 、环向应力 σ_{θ} 为

$$\sigma_{r} = P - \left(P - \frac{2P - \sigma_{c}}{m+1}\right)\frac{\rho^{2}}{r^{2}}$$

$$\sigma_{\theta} = P + \left(P - \frac{2P - \sigma_{c}}{m+1}\right)\frac{\rho^{2}}{r^{2}}$$
(2)

式中, $m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}; \varphi$ 为煤岩内摩擦角; r 为半径。

塑性软化区内 ($\rho_{f} < r < \rho$) 材料损伤的情况下, 有效应力分量为 $\widetilde{\sigma}_{r} = \frac{\sigma_{r}}{1 - D}$, $\widetilde{\sigma}_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{1 - D}$ 。将莫尔-库 仑屈服准则中的应力用有效应力代替,得

$$\frac{\sigma_{\theta}}{1-D} = m \frac{\sigma_r}{1-D} + \sigma_c \tag{3}$$

在软化区内,由几何方程和体积不可压缩假设, 得软化区内等效应变 ε 为

$$\frac{-}{\varepsilon} = \frac{\rho^2}{r^2} \varepsilon_c \tag{4}$$

因此,软化区内损伤演化方程为

$$D = \frac{\lambda_1 \left(\rho^2 - 1 \right)}{E \left(r^2 - 1 \right)}$$
(5)

不考虑体积力,将 $\sigma_{\theta} = m\sigma_r + (1 - D)\sigma_c$ 代人平 衡方程可得

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_r}{\mathrm{d}r} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0 \tag{6}$$

设破碎区与塑性软化区交界处应力为 *p*_f,结合 边界条件,得径向应力分量为

$$\sigma_{r} = \left[p_{f} - \frac{\lambda_{1}}{E} \frac{\sigma_{c}}{m+1} \frac{\rho^{2}}{\rho_{f}^{2}} + \left(1 + \frac{\lambda_{1}}{E}\right) \frac{\sigma_{c}}{m-1} \right] \times \left(\frac{r}{\rho_{f}}\right)^{m-1} + \frac{\lambda_{1}}{E} \frac{\sigma_{c}}{m+1} \frac{\rho^{2}}{r^{2}} - \left(1 + \frac{\lambda_{1}}{E}\right) \frac{\sigma_{c}}{m-1}$$
(7)

在巷道破碎区范围内 ($\rho_0 < r < \rho_f$),有效应力 满足莫尔-库伦准则:

$$\frac{\sigma_{\theta}}{1-D} = q \frac{\sigma_r}{1-D} + \sigma_c \tag{8}$$

式中, $q = \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'}, \varphi'$ 为损伤煤岩内摩擦角。

在破碎区内,由几何关系和体积不可压缩条件, 得破碎区内等效应变 ε 为

$$\frac{-\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\rho_{\rm f}^2}{r^2} \varepsilon_{\rm c}^{\prime} \tag{9}$$

破碎区内损伤演化方程为

$$D = 1 - \left(1 - \frac{\rho_{\rm f}^2}{r^2}\right) \left[\frac{\lambda_2}{E} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}(1 - \xi) + \xi\right] - \frac{\xi \rho_{\rm f}^2}{r^2}$$
(10)

代入平衡微分方程得

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_r}{\mathrm{d}r} + \frac{(1-q)\sigma_r}{r} - (1-D)\frac{\sigma_c}{r} = 0 \qquad (11)$$

结合边界条件 $\sigma_{r=\rho_0} = p_s$, 当 $r = \rho_f$, 得破碎区对 塑性软化区的作用应力 p_f 为

$$p_{\rm f} = p_{\rm s} \left(\frac{\rho_{\rm f}}{\rho_0}\right)^{q-1} + \left(\frac{a}{1-q}\right) \left[1 - \left(\frac{\rho_{\rm f}}{\rho_0}\right)^{q-1}\right] + \left(\frac{b}{1+q}\right) \left[1 - \left(\frac{\rho_{\rm f}}{\rho_0}\right)^{q+1}\right]$$
(12)

式中, *a* 和 *b* 为中间变量, 无实际意义; *a* = $\sigma_c \times \left[\frac{\lambda_2}{E} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}(1-\xi) + \xi\right]; b = \sigma_c \left[\frac{\lambda_2}{E} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}(1-\xi)\right]_{\circ}$

4.3 系统失稳临界条件

综上解析,由 $r = \rho$ 径向应力连续条件,得巷道系 统方程:

$$\frac{P}{\sigma_{\rm e}} = \frac{m+1}{2} \left[\frac{p_{\rm f}}{\sigma_{\rm e}} + \left(1 + \frac{\lambda_{\rm 1}}{E} \right) \frac{1}{m-1} - \frac{\lambda_{\rm 1}}{E} \frac{1}{m+1} \left(\frac{\rho}{\rho_{\rm f}} \right)^2 \right] \times \left(\frac{\rho}{\rho_{\rm f}} \right)^{m-1} - \left(1 + \frac{\lambda_{\rm 1}}{E} \right) \frac{1}{m-1}$$
(13)

考虑远场扰动,提出扰动响应失稳判据 $\frac{dP}{d\rho}$ =0,

判据的物理意义在于,在应力增量 dP 的作用下(诸 如,顶板断裂、断层错动或爆破振动等形式的采动应 力增量),塑性区半径增量 dp 发生极大扩展,即表征 了巷道冲击地压本质是围岩塑性区边界非线性增速 失稳扩展及其带来的一系列的宏观响应。

因此,进一步得到巷道动力失稳的临界软化区半 径 $\rho_{\rm er}$ 为

$$\rho_{\rm cr} = \rho_0 \sqrt{\frac{p_{\rm s}(q-1) + a}{b}} \sqrt{(1-\xi) \frac{E}{\lambda_1} + 1}$$
(14)

得巷道动力失稳的临界应力 Per 为

$$\frac{P_{cr}}{\sigma_{c}} = \frac{m+1}{2} \left[\frac{p_{f}}{\sigma_{c}} + \left(1 + \frac{\lambda_{1}}{E} \right) \frac{1}{m-1} \right] \left[(1-\xi) \frac{E}{\lambda_{1}} + 1 \right]^{\frac{m-1}{2}} - \frac{\lambda_{1}}{2E} \left[(1-\xi) \frac{E}{\lambda_{1}} + 1 \right]^{\frac{m+1}{2}} - \left(1 + \frac{\lambda_{1}}{E} \right) \frac{1}{m-1}$$

$$(15)$$

临界应力 $P_{\rm er}$ 是巷道系统达到临界条件而动力 失稳启动时的外部环境载荷水平,载荷来源包括原岩 地应力 $\sigma_{\rm in-situ}$ 和采动应力 $\sigma_{\rm mining}$ 。因此,巷道动力失 稳的临界发生条件为

$$P_{\rm cr} = \sigma_{\rm in-situ} + \sigma_{\rm mining} \tag{16}$$

其中,按加载的应变率效应,采动应力主要有集中静 载和低频动载2种表现形式。为定量说明特定地应 力条件下,巷道抵抗静载应力增量或动载加荷增量而 受扰失稳的能力,提出最大容许采扰应力增量 σ_{max} 指标为

$$\sigma_{\rm max} = P_{\rm cr} - \sigma_{\rm in-situ} \tag{17}$$

为统一考虑动静载荷叠加致灾效应,此处采用应 力增量法将动载等效为扰动应力增量。由此可知,巷 道所处的地应力一定时,临界应力越高,其抵抗采动 扰动应力增量的能力越强,灾害越不易发生。

5 冲击冒顶复合灾害主控因素及影响规律

深部巷道复合动力灾害发生的临界条件式(14) 表明,冲击倾向指数 K、巷内支护强度 p_s 、巷道开挖半 径 ρ_0 、煤岩强度 σ_c 及其残余性质等参数对巷道复合 灾害 启 动 临 界 条 件 具 有 重 要 影 响; 式 中 的 $\sqrt{(1-\xi)E/\lambda_1+1}$ 项体现了煤岩冲击倾向性质对巷 道稳定性的影响, $\sqrt{[p_s(q-1)+a]/b}$ 项体现了易 冒破碎区围岩残余性质及其有效支护对巷道系统稳 定性的影响,共同构成了冲击地压与冒顶复合灾害发 生的临界条件。

5.1 冲击倾向指数 K 对临界条件的影响

降模量与弹性模量之比 $K = \lambda_1 / E$,可以反映煤岩体的脆性, λ_1 / E 越大,煤岩越脆, λ_1 / E 越小,煤岩的脆性越弱。在应力-应变曲线中, λ_1 / E 与冲击能量指数 $K_E^{[10]}$ 近似相等,因此, λ_1 / E 可以作为判别煤岩冲击倾向性的指标,定义为冲击倾向指数。取 $\rho_0 = 2.5 \text{ m}, \sigma_c = 15 \text{ MPa}, \varphi = 30^\circ, \lambda_2 / \lambda_1 = 0.05, \varphi' = 20^\circ, \xi = 0.4, p_s = 0.6 \text{ MPa},则不同 <math>\lambda_1 / E$ 下围岩软化与破碎深度随地应力发育规律如图 10(a)所示,冲击启动的临界软化区半径、临界应力规律如图 10(b)所示, 由图 10 可知,冲击倾向性越强,巷道失稳临界值越小,破碎区出现的应力门槛值越低,在扰动条件下越容易发生冲击与冒顶复合动力灾害。因而对煤岩进行"改性降倾"将有利于灾害防治,但应以有效支护稳控围岩软化区与破碎区为前提。

5.2 支护强度 p_s 对临界条件的影响

取 $\rho_0 = 2.5 \text{ m}, \sigma_e = 12 \text{ MPa}, \varphi = 30^\circ, \xi = 0.23, \lambda_1 / E = 0.9, \lambda_2 / \lambda_1 = 0.01, 则不同支护强度 <math>p_s$ 下围岩软化



图 10 冲击倾向指数 K 对临界条件、破碎与软化区发育 的影响规律

Fig. 10 Influence of burst tendency index on critical condition and fracture zone

与破碎深度随地应力发育规律如图 11(a)所示,支护 强度和临界软化区半径、临界应力关系如图 11(b)所 示,由图 11 可知,支护强度越大,巷道失稳临界值越 高,一定地应力条件下,最大容许采扰应力增量越大, 灾害越不易发生,同时围岩出现软化、破碎区的最小 应力增大,并有效减缓软化、破碎区扩展发育速度。 支护质量与强度无疑对煤岩破碎区变形与离层具有 重要调控作用,科学合理支护既能有效调控围岩软化 破碎防冒,又能提升冲击启动临界值。因此,软化区 与破碎区作为支护的直接载体,其稳定支护是解决复 合灾害的关键。进一步,考虑到破碎区明显的扩容效 应,吸能让位对于深部巷道稳定性具重要意义。

5.3 巷道半径 ρ_0 对临界条件的影响

取 $\sigma_e = 15$ MPa, $\varphi = 30^\circ$, $\xi = 0.2$, $p_s = 0.5$ MPa, $\lambda_1/E = 0.80$, $\lambda_2/\lambda_1 = 0.02$,则不同巷道半径 ρ_0 下围岩 软化、破碎深度随地应力发育规律如图 12(a)所示, 巷道半径 ρ_0 和临界软化区半径、临界应力关系如图 12(b)所示,可知,冲击启动临界应力值随巷道半径 呈常数,即宽巷掘进不能提高巷道失稳的临界应力, 不能改变巷道出现破碎区的最小载荷,但加快了破碎





区的形成速度,实现应力转移、同时对支护要求更高, 巷道维护难度增加。因此,实现有效支护的宽巷掘进 将有利于冲击启动后围岩破碎耗能,最大限度保有巷 内逃生空间,降低致灾程度。

5.4 单轴抗压强度 σ_c 对临界条件的影响

 $\mathbb{I}_{\chi} \rho_0 = 2.5 \text{ m}, \varphi = 30^\circ, \xi = 0.28, p_s = 0.4 \text{ MPa}, \lambda_1 / \lambda_2$ $E=1.1, \lambda_2/\lambda_1=0.01,$ 则不同单轴抗压强度 σ_c 下围 岩软化与破碎深度随地应力发育规律如图 13(a) 所 示,单轴抗压强度 σ_{e} 和临界软化区半径、临界应力关 系如图 13(b)所示,可知,煤岩单轴抗压强度越低,临 界应力越低,越易发生动力失稳,同时其巷道易出现 软化破碎发育,这就增加了巷道冒顶的可能性,对巷 道支护提出了更高的要求。因此,煤质越软弱的煤 岩,越需加大巷内支护的力度。

5.5 3 起灾害煤巷的临界指标计算

基于以上理论分析,得到复合动力灾害发生的临 界应力、临界软化区半径和最大容许采扰应力增量等 的解析表达式,结合上述山东、山西和新疆的典型冲 击地压和冒顶复合灾害多发煤矿巷道的地质力学条 件,进行相关临界指标值计算分析见表1,可知:

(1)根据山东某矿的煤岩力学参数统计值与巷



影响规律

内基本参数,计算得到该矿典型巷道的临界软化区 深度达 18.58 m, 破碎区深度 11.67 m, 临界应力为 33.85 MPa。整体来说,巷内围岩临界软化半径较 大,临界应力高,冲击不易发生。但同时巷内有3m 厚顶煤不稳定结构,即在较低临界条件下亦会诱发 顶煤结构参与的冲击冒顶灾害,与现场破坏特征相 一致。

(2)根据山西某矿巷内基本参数,计算得到该矿 典型巷道的临界软化区深度达 12.41 m,破碎区深度 9.38 m,临界应力为 34.27 MPa。整体来说,巷内围 岩临界软化半径较大,临界应力高,冲击发生前后围 岩巷道破碎发育、锚杆索易拉拔失效,形成高应力集 中的冲击冒顶灾害,与现场相一致;且巷道底板强度 较低,易形成底臌显现,与现场中的明显冲击底臌相 吻合。

(3)根据新疆某矿巷内基本参数,计算得到典型 巷道的临界软化区深度为 8.21 m, 破碎区深度 7.36 m,临界应力为 17.44 MPa。整体来说, 围岩临 界软化半径较前两者小,临界应力较低,冲击发生前 后围岩破碎发育范围对锚固区影响明显,支护易失

25

26

18

15

12

9

6

42

临界软化区半径/m



图 13 单轴抗压强度 σ_{0} 对临界条件、破碎与软化区发育的 影响规律

Fig. 13 Influence of UCS of coal mass on critical condition and fracture zone

效,与现场中的锚固基础劣化、围岩破裂界面分明、锚 杆索脱锚失效现象相吻合。

表 1 典型矿区巷道复合灾害主控参量及其临界指标值 Table 1 Main control parameters and critical values of rock

| | | 1 | | | |
|-------|---------|--------|------------|-------------|--|
| burst | roadway | system | in typical | mining area | |

| 矿区 | 山东某矿 | 山西某矿 | 新疆某矿 |
|---------------------------------------|-------------|-----------------|---------------|
| 煤岩冲击倾向性 指数 K | 0.67 | 1.14 | 2.70 |
| 煤岩单轴抗压 强度 $\sigma_{ m c}/{ m MPa}$ | 12.70 | 20. 14 | 19.10 |
| 煤岩弹性模量 E/GPa | 3.12 | 3. 52 | 2.85 |
| 内摩擦角 φ/(°) | 30 | 30 | 30 |
| 残余降模量 λ_2 /MPa | 18 | 34 | 40 |
| 残余强度系数ξ | 0.28 | 0.30 | 0.19 |
| 支护强度 p _s /MPa | 0.33 | 0. 29 | 0.34 |
| 巷道当量半径 $ ho_0/m$ | 2.50 | 2.45 | 2.40 |
| 地应力值 P ₀ /MPa | 27.80~31.43 | 28. 20 ~ 31. 91 | 12. 8 ~ 13. 9 |
| 临界软化深度 l ₁ /m | 18.58 | 12.41 | 8.21 |
| 临界破碎深度 l ₂ /m | 11.67 | 9.38 | 7.36 |
| 临界应力 P _{er} /MPa | 33. 85 | 34. 27 | 17.44 |

基于扰动响应失稳理论计算结果,工程实践中应 进一步考虑巷道特定地质力学结构的综合效应。

6 结 论

(1)调研深部煤层巷道冲击冒顶事故,总结巷道 动力灾害显现特征,提出巷道冲击地压与冒顶复合灾 害概念、机理与分类体系,分别明确了冲击致冒、冒顶 致冲2种类型复合灾害的发生机理与显现过程。

(2)巷道冲击地压与冒顶复合灾害既具有明显 的巷内冲击帮鼓、顶底移近、煤体抛掷等典型冲击地 压特征,又具有巷内顶部煤岩重力垮落、冒后围岩界 面分明、锚杆索竖向破断的典型冒顶特征,灾害总体 表现为冲击地压与冒顶灾害的复合发生特征。

(3)从系统稳定性理论出发,建立巷道发生复合 灾害的扰动响应失稳模型,得到复合灾害发生的主控 因素,厘清了影响规律。深部煤层巷道的动力失稳主 体为弹性区、软化区与破碎区构成的不稳定系统,冒 顶垮落主体为破碎区。

(4)稳定的破碎区提升了巷道冲击启动临界值, 使其启动难度增大,但破碎区的发育又易引起顶煤垮 落。因此,巷道稳定支护是解决复合灾害的关键,科 学合理支护既能有效调控围岩破碎防冒,又能提升冲 击启动临界值。

(5) 深部巷道冲击地压与冒顶复合灾害防治进 一步的研究关键点在于探究支护系统对松软破碎区 子系统稳定性的控制机理和对巷道整体系统稳定性 的稳控防冲机理,应从复合灾害危险巷道中支护系统 稳定性及其稳控破碎区围岩、稳控巷道整体系统方面 入手,研发更加适合深部厚煤层巷道安全开采的巷道 支护方法与关键技术。

参考文献(References):

- [1] COOK N G W, HOEK E, PRETORIUS J P G, et al. Rock mechanics applied to the study of rockbursts [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1965, 66 (10):435-528.
- [2] 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报,1987,6(3):197-204.
 ZHANG Mengtao. Instability theory and mathematical model for coal/rock bursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987,6(3):197-204.
- [3] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].岩石力学与工程学报,2003(11):1844-1851.
 PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(11):1844-1851.
- [4] 齐庆新,陈尚本,王怀新,等.冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1852-1858.

QI Qingxin, CHEN Shangben, WANG Huaixin, et al. Study on the

学

报

煤

relations among coal bump, rockburst and mining tremor with numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11):1852-1858.

- [5] 康红普,范明建,高富强,等. 超千米深井巷道围岩变形特征与 支护技术[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(11):2227-2241.
 KANG Hongpu,FAN Mingjian,GAO Fuqiang, et al. Deformation and support of rock roadway at depth more than,1000 meters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(11): 2227-2241.
- [6] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的有效途径[J]. 中国矿业大学学报,2017,46(3):467-473.

HOU Chaojiong. Effective approach for surrounding rock control in deep roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3):467-473.

- [7] 马念杰,冯吉成,吕坤,等. 煤巷冒顶成因分类方法及其支护对策研究[J]. 煤炭科学技术,2015,43(6):34-40.
 MA Nianjie,FENG Jicheng,LÜ Kun, et al. Study on cause classification method and support countermeasures of roof falling in coal drift
- [8] 柏建彪,侯朝炯. 深部巷道围岩控制原理与应用研究[J]. 中国 矿业大学学报,2006(2):145-148.
 BAI Jianbiao, HOU Chaojiong. Control principle of surrounding rocks

[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 34-40.

in deep roadway and its application [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2006(2):145-148.

[9] 王卫军,董恩远,袁超,等.非等压圆形巷道围岩塑性区边界方 程及应用[J].煤炭学报,2019,44(1):105-114.

WANG Weijun, DONG Enyuan, YUAN Chao, et al. Boundary equation of plastic zone of circular roadway in non-axisymmetric stress and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 105-114.

[10] 潘一山.煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J].煤炭学报,2018,43(8):2091-2098.

PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rock burst in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43 (8): 2091–2098.

[11] 齐庆新,李宏艳,邓志刚,等. 我国冲击地压理论、技术与标准体系研究[J]. 煤矿开采,2017,22(1):1-5.
 QI Qingxin,LI Hongyan, DENG Zhigang, et al. Studying of standard

system and theory and technology of rock burst in domestic [J]. Coal Mining Technology ,2017 ,22(1) :1–5.

[12] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.
 JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J].

Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.

- [13] 潘俊锋,宁宇,毛德兵,等.煤矿开采冲击地压启动理论[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):586-596.
 PAN Junfeng, NING Yu, MAO Debing, et al. Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(3):586-596.
- [14] DAI Lianpeng, PAN Yishan, WANG Aiwen, et al. Experimental study on the self-protection performance of anchor bolts with ener-

gy-absorbing tails [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53:2249-2263.

- [15] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的关键技术研究[J]. 中国矿业大 学学报,2017,46(5):970-978.
 HOU Chaojiong. Key technologies for surrounding rock control in deep roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2017,46(5):970-978.
- [16] WU Wenda, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Numerical study of failure mechanisms and control techniques for a gob-side yield pillar in the Sijiazhuang Coal Mine, China [J]. Rock Mech. Rock Eng., 2019(52):1231-1245.
- [17] 毛德兵,尹希文,张会军. 我国煤矿顶板灾害防治与监测监控技术[J]. 煤炭科学技术,2013,41(9):105-108,121.
 MAO Debing, YIN Xiwen, ZhANG Huijun. Technology of prevention roof disasters and monitoring and controlling in China coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2013,41(9):105-108,121.
- [18] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭 学报,2015,40(1):1-10.
 XIE Heping,GAO Feng,JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(1):1-10.
- [19] 何满潮,钱七虎.深部岩体力学基础[M].北京:科学出版社, 2010.
- [20] 潘一山.煤矿冲击地压[M].北京:科学出版社,2018.
- [21] SHEN B. Coal mine roadway stability in soft rock: A case study [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(6):2225-2238.
- [22] 王官宝.石膏矿冒顶引发冲击地压机理及防治措施研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
 WANG Guanbao. Study on rock burst induced by roof falling and its control methods in gypsum mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2006.
- [23] 马念杰,郭晓菲,赵志强,等. 均质圆形巷道蝶型冲击地压发生 机理及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(11):2679-2688.
 MA Nianjie, GUO Xiaofei, ZHAO Zhiqiang, et al. Occurrence mechanisms and judging criterion on circular tunnel butterfly rock burst in hom-ogeneous medium[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(11):2679-2688.
- [24] 陆菜平,窦林名,吴兴荣,等.煤岩冲击前兆微震频谱演变规律的试验与实证研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3): 519-525.

LU Caiping, DOU Linming, WU Xingrong, et al. Experimental and empirical research on frequency-spectrum evolvement rule of rockburst precursory microseimic signal of coal-rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3):519–525.

[25] 满福有.基于防冲击地压的局部冒顶事故的预测与防范[J].
 黑龙江科学,2014,5(3):154.
 MAN Fuyou. Prediction and prevention of local roof fall accident based on prevention of rockburst[J]. Heilongjiang Science,2014,

5(3):154.