

采矿科学与工程



移动扫码阅读

张修峰, 陈 洋. 煤柱型冲击地压类型、发生机理与防治对策研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 1-11.
ZHANG Xiufeng, CHEN Yang. Research on the type and occurrence mechanism and prevention of coal pillar rockbursts[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 1-11.

煤柱型冲击地压类型、发生机理与防治对策研究

张修峰¹, 陈 洋^{1,2}

(1. 山东能源集团有限公司 冲击地压防治研究中心, 山东 济南 250014; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:煤柱型冲击地压是近年我国煤炭开采过程中发生的典型冲击地压类型, 如何总结煤柱型冲击地压的工程尺度破坏特征、揭示冲击失稳发生机理以及制定科学精准的防冲对策, 成为煤矿科技工作人员面临的难题。采用现场调查、理论分析、现场监测等方法对我国煤矿 3 类典型煤柱型冲击地压事故的工程特征和冲击显现特征进行分析, 将当前我国煤柱型冲击地压分为应力叠加型冲击地压、切割蠕变型冲击地压和整体失稳型冲击地压 3 类。分别建立了 3 类煤柱型冲击地压发生机理的力学模型, 揭示了 3 类煤柱型冲击地压的发生机理, 提出了 3 类煤柱型冲击危险的评估方法和防治对策。其中应力叠加型冲击地压的发生机理为施加在煤柱上的叠加应力超过煤体发生冲击失稳的临界值, 煤柱在细微扰动或无条件扰动下发生冲击失稳; 整体失稳型冲击地压的发生机理为煤柱弹性承载区煤体承担的载荷超过了其极限承载能力, 弹性承载区煤体引发冲击并导致煤柱浅部煤体发生大面积破坏; 切割蠕变型冲击地压的发生机理为煤柱在长期高应力状态下支撑能力缓慢降低导致载荷向弹性承载区转移, 当弹性承载区煤体载荷超过发生冲击失稳临界值时, 将发生大范围煤体冲击失稳。由于我国矿井开采条件复杂, 实际生产期间还会遇到很多具有隐蔽性的煤柱型冲击类型, 因此在现场冲击地压防治工作中, 需要加强对这些隐蔽性煤柱型冲击风险的判识和防治工作。

关键词:冲击地压; 煤柱; 应力叠加; 整体失稳; 切割蠕变

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)10-0001-11

Research on the type and occurrence mechanism and prevention of coal pillar rockbursts

ZHANG Xiufeng¹, CHEN Yang^{1,2}

(1. Research Center for Rock Burst Control, Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Coal pillar rockburst is a typical type of rockburst occurring in coal mining in China in recent years. How to summarize the engineering scale damage characteristics of coal pillar rockburst, reveal the mechanism of rockburst instability and formulate scientific and accurate anti-burst measures has become a difficult problem for coal mine science and technology personnel. The engineering characteristics and burst manifestation characteristics of three types of typical coal pillar burst accidents in China's coal mines are analyzed using field investigation, theoretical analysis and field monitoring, and the current coal pillar type burst in China is classified into three types: ground pressure superimposed type, cut creep type and overall destabilization type. The mechanical models of the occurrence mechanism of the three types of coal pillar burst are established respectively, the evaluation methods and prevention countermeasures of the three types of coal pillar burst hazards are proposed, and the occurrence mechanism of the three types of coal pillar burst is revealed. The mechanism of

收稿日期: 2023-01-03 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0017

基金项目: 山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY02); 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1314200)

作者简介: 张修峰(1970—), 男, 山东菏泽人, 正高级工程师。

通讯作者: 陈 洋(1988—), 男, 山东泰安人, 高级工程师, 博士。E-mail: chenyang-812006@163.com

superimposed ground pressure type is that the superimposed stress applied to the coal pillar exceeds the critical value of the coal mass for burst instability, and the coal pillar is destabilized by minor or unconditional perturbation; the mechanism of overall instability burst is that the load borne by the coal body in the elastic bearing zone of the coal pillar exceeds its ultimate bearing capacity, and the coal body in the elastic bearing zone triggers the burst and causes the coal body in the shallow part of the coal pillar to fail extensively. The mechanism of cut creep rock burst is that the load transfers to the elastic bearing area due to the slow decrease of supporting capacity of coal pillar under long-term high stress, and when the load of the coal body in the elastic bearing area exceeds the critical value of burst, a large-scale coal body impact destabilization will occur. Due to the complex mining conditions in China, there are many hidden types of coal pillar bursts encountered during field production, therefore, in the prevention and control of bursts, it is necessary to strengthen the identification and prevention of these hidden coal pillar burst risks.

Key words: rockbursts; coal pillar; stress superposition; overall instability; cut creep

0 引言

冲击地压是威胁煤矿安全高效生产的主要动力灾害之一。随着矿井开采规模、开采深度和开采强度的进一步增大,冲击地压灾害呈现更加严重的发展态势^[1-3]。如何科学有效地对冲击地压进行分类、通过冲击地压显现分析其内在机理、提出针对性的防控措施成为煤炭行业科技和现场管理人员亟需解决的科学难题。

我国学者对冲击地压机理和防控进行了大量的研究工作,取得了丰硕的研究成果。李振雷等^[4]从围岩体结构和应力状态分析了孤岛煤柱冲击机制,认为高静载应力与动载应力叠加超过冲击临界应力诱发冲击;王春秋等^[5]运用微地震和电磁辐射实测孤岛综放工作面动压显现事件,获得了冲击前后能量积聚与释放特征及相应监测数据变化规律,提炼了冲击地压微震和电磁辐射监测的前兆信息;何江等^[6]分析了急倾斜特厚煤层覆岩运动和煤层应力分布的内在关联,认为覆岩运动施加的冲击动载与工作面底煤集中静载叠加是诱发夹持型冲击地压的力源;魏全德等^[7]建立下山煤柱区覆岩空间结构模型和走向支承压力估算模型,认为支承压力动态前移是诱发下山煤柱区巷道冲击的主要原因;杜学领^[8]研究了厚硬坚硬地层冲击地压发生机理,提出了利用上巷取代工艺巷+充填采空区的冲击地压防治方法;翟明华等^[9]分析了巨厚坚硬岩层下冲击地压的发生规律,指出此类矿井冲击地压存在“关键工作面效应”“震动诱冲效应”“冲击震动效应”,提出了基于覆岩空间结构理论、地表沉陷观测、微震和应力监测数据的辨识关键工作面的方法,阐述了巨厚坚硬岩层冲击地压矿井综合防冲方法;朱斯陶等^[10]分析了整体失稳型冲击地压的工程特征和冲击显现特征,提出了整体失稳型冲击危

险的评估方法和防治对策;张俊文等^[11]提出了冲击地压灾害防治的结构调控理念,指出灾害防治应从调控煤岩体结构出发,采用水力压裂或深孔预裂爆破防治煤柱型及工作面冲击;赵善坤等^[12]分析了底板型冲击危险巷道底板受力特征,提出了深孔断底爆破防冲方案;夏永学等^[13]开发了扩槽孔和排渣孔分离的双孔布置掏槽技术,有效提高了煤层水力扩孔掏槽效果。

以上研究成果提出了针对性的防控措施,但没有围绕冲击地压孕灾和能量释放的主体——煤柱(区域煤体)开展针对性研究:冲击地压发生机理方面,尚未系统开展特定地层和开采技术条件下施加在煤柱上的基础静应力、动载应力和煤柱自身物性特征对煤柱冲击危险的影响机制研究工作,缺乏煤柱冲击危险量化评价方法;冲击地压防控方面,尚未建立涵盖煤柱留设、监测预警、预卸压和解危卸压等方面的防冲技术体系。

1 煤柱型冲击地压的定义

冲击地压的发生是地质因素和开采技术因素综合作用的结果。实际生产中存在以下情形:①同一矿区煤层赋存条件相似的邻近矿井,有的发生多起严重冲击地压事故,有的却从来没有发生过;②同一矿井自投产后十几年甚至几十年来,地质条件基本不变,突然发生冲击地压事故。究其原因,采掘活动引起的覆岩空间结构演化及应力场重新分布是诱发冲击地压的主控因素。

随着采深不断增加和开采条件日益复杂,煤矿开采期间冲击地压多集中在巷道切割、采空区隔离或断层夹持等形成煤柱区域(笔者定义为“煤柱型冲击地压”)。与常见的冲击地压分类方法强调特定生产技术因素(超强度组织生产、生产过度集中、采掘布局不合理、生产造成的地质构造活化、孤岛采煤和

防冲措施不合理等)诱发冲击地压机理不同,煤柱型冲击地压侧重分析自重应力、构造应力和采动应力等叠加后的总应力和煤柱支撑能力与煤柱冲击危险的内在联系,从应力场角度出发,探索冲击地压发生的共性问题。煤柱型冲击地压是指受巷道切割、采空区隔离或断层夹持形成的煤柱在高应力作用下的冲击失稳。

笔者在分析多起煤柱型冲击地压事故案例的基础上,采用理论分析、现场调研和现场监测等方法,根据工程特征和冲击地压显现特点,对煤柱型冲击地压进行分类,研究各类煤柱型冲击地压的发生机制,并提出防控措施,为煤矿煤柱型冲击地压防控提供理论指导和经验借鉴。

2 煤矿煤柱型冲击地压事故案例

2.1 应力叠加型冲击地压事故概况

新巨龙煤矿 2305S 工作面为-810 m 水平二采区南翼第 5 个工作面,东为待采区,南为-980 m 边界下山保护煤柱,西为 2304S 采空区,北为-980 m 延伸下山保护煤柱,煤厚 9.2 m,平均采深 1 004 m。经鉴定,-980 m 水平 3 煤层及其顶板具有弱冲击倾向性,3 煤层单轴抗压强度 17.4 MPa。2305S 工作面倾斜长度 263.5 m,走向长度 1 904 m,采用走向长壁后退式综采放顶煤采煤法。

2020 年 2 月 22 日 6 时 17 分,2305S 工作面推进至 253 m,上平巷发生一起冲击地压事故,造成 4 人死亡,破坏巷道约 486 m,直接经济损失 1 853 万元。事故区域自上平巷上端头 10 m 处开始至 420 m 处止,巷道明显变形,部分单元支架损坏,帮部部分锚索梁断裂,其中上平巷超前 100~218 m 段,巷道破坏严重,巷道堵塞,人员无法通行;3 号联络巷自交叉口向内 66 m 范围内巷道破坏严重,其中 3 号联络巷上口 24~40 m 段巷道破坏最为严重,两帮内缩移近量大,顶板锚索梁断裂下沉,底板底鼓,巷道断面最小处仅剩 1 m² 空间,冲击破坏如图 1 所示。

应力叠加型冲击地压主要特征:煤柱受采空区转移应力、构造应力等多种应力叠加影响,煤体载荷超过其极限承载能力而诱发冲击破坏,破坏部位集中在煤柱形状突出部位或叠加应力峰值区域,周边采空面积大、采掘活动扰动强、构造发育、巷道或断层密集切割是这类型冲击地压的常见影响要素。

2.2 整体失稳型冲击地压事故概况

赵楼煤矿 1305 工作面位于矿井一采区,北靠宽

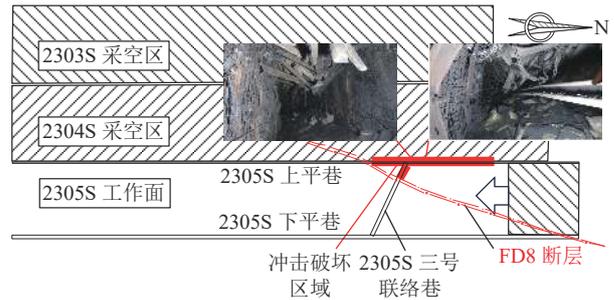


图 1 2305S 工作面冲击位置示意

Fig.1 Impact position diagram of No.2305S working face

215 m 的 1304 采空区,南邻宽 410 m 的 1306—1307 采空区,属于典型的孤岛工作面。1305 工作面采深 871~1 006 m,平均 988 m;工作面设计倾向长 137 m,推进长度 574 m,采用走向长壁后退式综采放顶煤采煤法。开采煤层厚度 2.8~9.0 m,平均 6.1 m;煤层倾角 1°~11°,平均 8°。煤层分叉线穿过开切眼和轨道巷交叉口附近,分岔区内 3_L 煤层厚 0.7~1.2 m,平均 0.9 m;3_R 煤层厚 2.7~6.4 m,平均 4.8 m;分岔间距 0.7~14.6 m,平均 6.8 m。直接顶为粉砂岩,厚度 1.2~8.4 m,平均 2.8 m;基本顶为中砂岩,厚度 4.6~20.4 m,平均厚度 8.3 m。经煤岩冲击倾向性鉴定,煤层具有强冲击倾向性,顶板具有弱冲击倾向性,底板冲击倾向性未鉴定^[14]。

2015 年 7 月 29 日 2 时 49 分,1305 工作面初采时发生了一起严重的冲击地压事故,如图 2 所示,具体破坏特征:①轨道巷侧自工作面煤壁向外 15 m 范围顶板出现网兜,并有部分漏冒,部分单体支柱歪斜;向外 15~60 m 范围两帮移近量开始增大,最大移近量 3 m,单体支柱部分弯曲歪斜,底鼓 0.5~1.0 m;60 m 向外,存在底鼓现象;其中 30~70 m 范围受冲击挤压影响严重,十字梁棚支设单体液压支柱全部

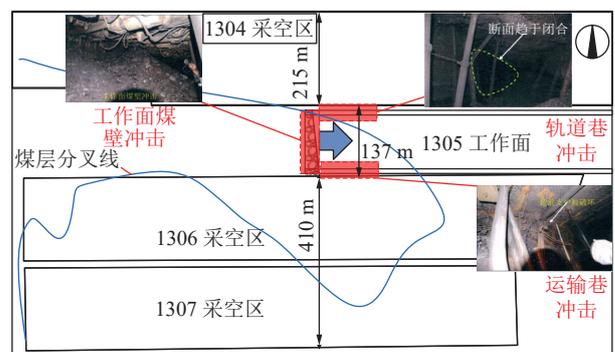


图 2 1305 工作面整体失稳冲击示意

Fig.2 Overall destabilization impact diagram of No.1305 working face

歪斜,折断14棵;②运输巷侧自工作面煤壁向外40 m范围内13架钢棚掉落、38棵单体液压支柱弯曲折断、崩断锚杆(索)12根、部分让压环挤压变形损坏、卸压钻孔多数塌孔;③工作面前部刮板输送机受冲击翻向支架侧,损坏支架前梁和护帮板千斤顶32个,刮板输送机及支架内积煤严重,冲击后煤尘逆风扬起糊到支架立柱上形成厚2 mm煤尘,造成工作面支架栽头、后立柱压力普遍超30 MPa,60~80号支架向后位移,最大1.0 m左右,煤壁煤块大量抛入架内,整个工作面支架全部被埋,至今无法回收,损失惨重^[15];④事故造成3人受伤,24人涉险,直接经济损失93.87万元。

整体失稳型冲击地压主要特征:煤柱承载能力和能量集聚能力随煤柱尺寸增大而增加,处于极限平衡状态的煤柱煤体受外界扰动时,极易发生冲击破坏,破坏面积大、冲击显现强烈、冲击前静载荷水平高是整体失稳型冲击地压显著的特点。

2.3 切割蠕变型冲击地压事故概况

梁宝寺煤矿35000回风集中巷、35000运输集中巷和35000轨道集中巷均布置在煤层中,3条巷道分别与35000轨回集中一联巷交汇将煤体切割成多个井字形煤柱,埋深1 027 m,煤厚6.5 m。经冲击倾向性鉴定,煤层具有强冲击倾向性,顶板具有弱冲击倾向性,煤体单轴抗压强度18 MPa。

2016年8月15日0时33分,35000采区发生一起冲击地压事故,造成2人死亡,破坏巷道约300 m,直接经济损失324万元。微震监测系统分析震源位于35000采区集中轨道上山和集中运输上山之间,震源位置与最近的35000工作面距离为379 m,人员伤亡地点与35001工作面相距324 m,事故位置如图3所示。

切割蠕变型冲击地压主要特征:煤柱在高静载应力的长期作用下,发生塑性破坏的煤体范围自边缘塑性区开始向内部扩展,煤柱的实际支撑能力逐渐降低,在轻微扰动或无明显扰动条件下,处于极限平衡状态的煤体突然发生冲击破坏,冲击前静载荷水平高、煤柱形成时间长、前兆信息敏感性差是切割蠕变型冲击地压的典型特点,大巷煤柱是发生切割蠕变型冲击地压的重点管控区域。

根据上述3起典型煤柱型冲击地压的工程特征和冲击显现特征,可将当前我国煤柱型冲击地压分为应力叠加型冲击地压、整体失稳型冲击地压和切割蠕变型冲击地压3类。

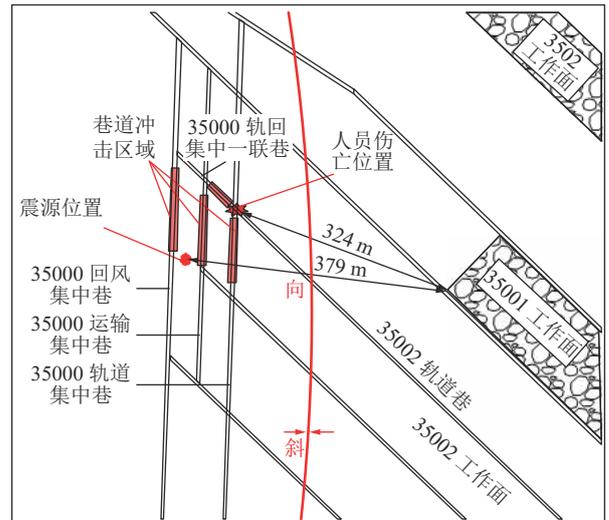


图3 35000采区冲击位置示意

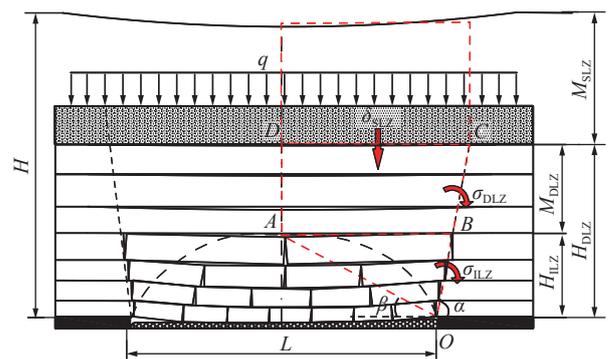
Fig.3 No.35000 mining area impact location diagram

3 三类煤柱型冲击地压发生机理

3.1 应力叠加型冲击地压发生机理

3.1.1 应力叠加型冲击地压危险性评估

应力叠加型冲击地压发生的主要原因是覆岩空间结构转移到煤柱上的叠加应力超过了煤柱发生冲击失稳的临界应力。根据“载荷三带”理论^[16-17],地层结构和顶板离层高度是决定采空区覆岩转移应力分布特征的主要影响因素,建立顺序开采条件下采空区转移的静应力估算模型^[18],如图4所示。



H_{ILZ} —即时加载带高度; M_{DLZ} —延时加载带厚度;
 q —静载带岩层自重

图4 采空区转移静应力估算模型

Fig.4 Estimation model for transfer static stress in mining area

由图4可知,采空区覆岩将1/4即时加载带载荷以及1/2延时加载带载荷传递到周边煤岩体,其中延时加载带载荷不仅包含自重,还包括上覆静载带岩层的重力。

建立采空区转移静应力估算模型:

$$\sigma_j = \begin{cases} \frac{L\gamma \tan^2 \alpha}{10h} x + \frac{2\gamma \tan \alpha [L \tan \alpha (H_{DLZ} - 10h + M_{SLZ}) + H_{DLZ}^2 - 100h^2 + 2H_{DLZ} M_{SLZ}]}{(H_{DLZ} + 10h)^2} x & \left(0, \frac{5h}{\tan \alpha}\right) \\ L\gamma \tan \alpha - \frac{L\gamma \tan^2 \alpha}{10h} x + \frac{2\gamma \tan \alpha [L \tan \alpha (H_{DLZ} - 10h + M_{SLZ}) + H_{DLZ}^2 - 100h^2 + 2H_{DLZ} M_{SLZ}]}{(H_{DLZ} + 10h)^2} x & \left(\frac{5h}{\tan \alpha}, \frac{10h}{\tan \alpha}\right) \\ \frac{2\gamma \tan \alpha [L \tan \alpha (H_{DLZ} - 10h + M_{SLZ}) + H_{DLZ}^2 - 100h^2 + 2H_{DLZ} M_{SLZ}]}{(H_{DLZ} + 10h)^2} x & \left(\frac{10h}{\tan \alpha}, \frac{H_{DLZ} + 10h}{2 \tan \alpha}\right) \\ \frac{2\gamma (LH \tan \alpha + H_{DLZ}^2 + 2H_{DLZ} M_{SLZ} - 100h^2 - 10Lh \tan \alpha)}{H_{DLZ} + 10h} & \\ \frac{2\gamma \tan \alpha [L \tan \alpha (H_{DLZ} - 10h + M_{SLZ}) + H_{DLZ}^2 - 100h^2 + 2H_{DLZ} M_{SLZ}]}{(H_{DLZ} + 10h)^2} x & \left(\frac{H_{DLZ} + 10h}{2 \tan \alpha}, \frac{H_{DLZ} + 10h}{\tan \alpha}\right) \\ \gamma H & \left(\frac{H_{DLZ} + 10h}{\tan \alpha}, \infty\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中： σ_j 为采空区转移的静应力； L 为采空区短边长度； γ 为顶板岩石容重； α 为采空区顶板岩层移动角； h 为煤层开采高度； H_{DLZ} 为延时加载带高度； M_{SLZ} 为静载带厚度； H 为煤层开采深度。

$$\sigma_z = \sigma_0 + \sum_{i=1}^n \sigma_{ji} + \sum_{i=1}^n \sigma_{Di} + \sum_{i=1}^n \sigma_{Fi} \quad (2)$$

式中： σ_z 为煤柱上的总应力； σ_0 为自重应力； $\sum_{i=1}^n \sigma_{ji}$ 为周边采空区转移的静应力之和； $\sum_{i=1}^n \sigma_{Di}$ 为煤柱周边顶板断裂或回转施加的动应力之和； $\sum_{i=1}^n \sigma_{Fi}$ 为煤柱周边地质构造转移的构造应力之和。

3.1.2 新巨龙煤矿 2305S 工作面应力叠加型冲击危险性分析

根据新巨龙煤矿 2305S 工作面实际条件，取 $H_{ILZ}=127$ m, $H_{DLZ}=411$ m, $M_{DLZ}=284$ m, $M_{SLZ}=593$ m, $H=1\ 004$ m, $q=7.95$ MPa, $L=263.5$ m, $\gamma=25$ kN/m³, $\alpha=76^\circ$, $h=9.2$ m, 将上述参数代入式(1)中，计算得到 2305S 采空区超前静态支承压力 $\sigma_{J-2305S}$ ：

$$\sigma_{J-2305S} = \begin{cases} 0.68x & (0, 32) \\ 16 + 0.18x & (32, 64) \\ 0.43x & (64, 67) \\ 57.54 - 0.43x & (67, 134) \end{cases}$$

同理，可得 2304S 采空区侧向静态支承压力

$\sigma_{J-2304S}$ ：

$$\sigma_{J-2304S} = \begin{cases} 0.966x & (0, 25) \\ 22.8 + 0.054x & (25, 50) \\ 51 - 0.51x & (50, 100) \end{cases}$$

巷道开挖转移的支承压力、断层两侧应力分布和覆岩结构运动施加的动载荷受地质和开采技术条件影响，在工程尺度上，可用应力转移系数 k 来近似

表达。

巷道切割煤体后，原先由巷道开挖煤体支撑的载荷向巷道两侧转移形成围岩支承应力场 σ_{J-sc} ，可用下式表示：

$$\sigma_{J-sc} = \begin{cases} \frac{2k_1\gamma H}{l_1} x & (0, 0.5l_1) \\ 2k_1\gamma H - \frac{2k_1\gamma H}{l_1} x & (0.5l_1, l_1) \end{cases}$$

式中： k_1 为巷道开挖引起的静态支承压力峰值与原岩应力的比值； l_1 为巷道开挖引起的静态支承压力峰值距巷帮的距离。

断层附近煤岩体集聚了大量能量，构造应力分布形态跟断层的落差成正相关关系，将断层两侧应力分布形态近似为等腰三角形，可得断层两侧应力分布表达式：

$$\sigma_{G-FD8} = \begin{cases} \frac{2k_2\gamma H}{l_2} x & (0, 0.5l_2) \\ 2k_2\gamma H - \frac{2k_2\gamma H}{l_2} x & (0.5l_2, l_2) \end{cases}$$

式中： k_2 为断层单侧构造应力峰值； l_2 为断层单侧构造应力峰值距断层面的距离。

采空区覆岩结构运移对工作面煤体施加的动载荷受发生破断或回转岩层的岩性、厚度、层位和距煤壁的距离等因素影响，为便于量化计算，可在采空区覆岩转移的静态支承压力影响范围内按照渐变载荷进行简化处理：

$$\sigma_D = k_3\gamma H - \frac{k_3\gamma H}{l_3} x \quad (0, l_3)$$

式中： k_3 为覆岩运移对煤体施加的动应力峰值； l_3 为覆岩运移对煤体施加的动应力峰值距工作面煤壁的距离。

根据 2305S 工作面实际条件，取 $k_1=1.1$, $l_1=15$ m,

$k_2=1.4, l_2=80 \text{ m}, k_3=1.2, l_3=134 \text{ m}$, 新巨龙煤矿 2305S 工作面支承压力叠加, 如图 5 所示, 图中曲线 1 代表 2305S 工作面超前静态支承压力, 曲线 2 代表 2303S-2304S 采空区侧向静态支承压力, 曲线 3 代表两巷开挖转移的静态支承压力, 曲线 4 代表联络巷开挖转移的静态支承压力, 曲线 5 代表断层构造转移的构造应力。

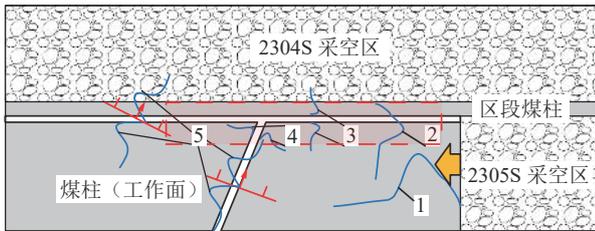


图 5 2305S 工作面支承压力叠加示意

Fig.5 No.2305S Working Face support pressure superimposed diagram

由图 5 可知, 受采空区超前支承压力、采空区侧向支承压力、巷道开挖转移支承压力、断层构造应力等叠加影响, 2305S 工作面上平巷侧应力集中程度较高, 尤其是上平巷与联络巷、FD8 断层夹持形成的孤立煤体区域, 如图 5 中红色虚线方框所示, 叠加后的支承压力最大值达到 69.36 MPa, 达到工作面煤体单轴抗压强度(17.4 MPa)4.0 倍。

3.1.3 应力叠加型冲击地压发生机理

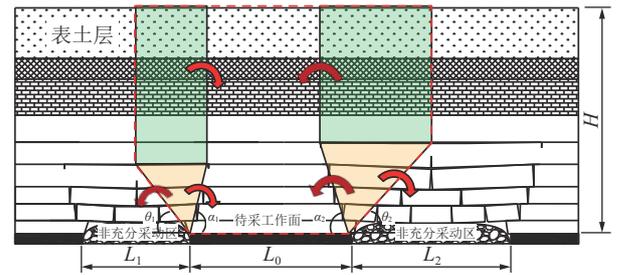
根据上述分析可知, 煤体在自重应力、采空区和巷道转移应力、构造应力等叠加作用下应力高度集中, 当叠加应力超过煤体发生冲击失稳的临界值时, 煤体将在细微扰动或无扰动条件下发生冲击失稳。

3.2 整体失稳型冲击地压发生机理

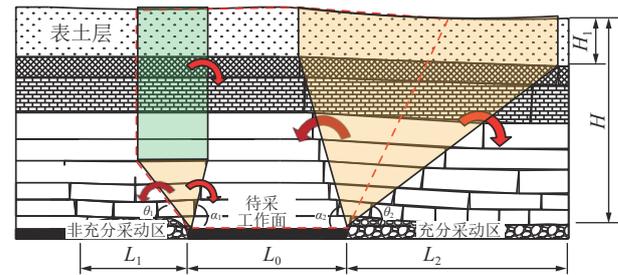
3.2.1 孤立煤体覆岩结构特征

整体失稳型冲击地压是指覆岩空间结构转移的载荷超过了孤立煤体的极限承载能力, 导致孤立煤体发生整体冲击失稳。周边采空区覆岩空间结构类型决定了向孤立煤体传递的载荷大小, 根据采动情况, 将覆岩空间结构划分为两侧非充分采动、一侧非充分采动一侧充分采动、两侧充分采动 3 类, 如图 6 所示。

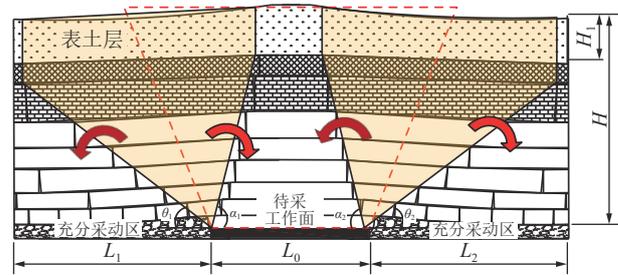
开采前, 孤立煤体承担两侧采空区覆岩转移过来的静态载荷, 如图 6 中红色虚线方框所示, 其中非充分采动侧地层中部分关键层保持完整并仍承担自身及上覆岩层的载荷, 孤立煤体承担这部分载荷的一半。对于充分采动侧地层中所有关键层均发生破断, 为便于估算, 设立 2 个假设: ①达到充分采动条件, 岩层裂隙和离层刚发育到基岩顶端; ②上覆岩层



(a) 孤立煤体两侧非充分采动



(b) 孤立煤体一侧非充分采动、一侧充分采动



(c) 孤立煤体两侧充分采动

L_1, L_2 —孤立煤体两侧采空区宽度; L_0 —孤立煤体宽度; H —采深; H_1 —表土层厚度; α_1, α_2 —采空区岩层移动角; θ_1, θ_2 —两侧采空区岩层触研角

图 6 孤立煤体覆岩结构类型示意

Fig.6 Schematic diagram of the overburden structure type of isolated coal body

厚度和强度相差不大, 没有赋存巨厚岩层, 孤立煤体仅承担采空区边缘侧悬臂端岩梁结构自重及其上覆岩层载荷的一半。

3.2.2 孤立煤体支承压力估算

孤立煤体承担的载荷 Q 由煤层至地表的自重 Q_0 和两侧采空区转移载荷 Q_1, Q_2 三部分组成, 即

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

当孤立煤体两侧均为非充分采动时, 顶板裂隙发育高度为约为采空区短边长度的一半, 孤立煤体承担载荷可用下式进行估算:

$$Q_1 = \gamma \left(\frac{L_1}{2 \tan \alpha_1} + \frac{L_1}{2 \tan \theta_1} \right) \left(H - \frac{3L_1}{4} \right) \quad (4)$$

$$Q_2 = \gamma \left(\frac{L_2}{2 \tan \alpha_2} + \frac{L_2}{2 \tan \theta_2} \right) \left(H - \frac{3L_2}{4} \right) \quad (5)$$

孤立煤体自重受两侧采空区覆岩结构类型影响,

可用下式表示

$$Q_0 = L_0 H \gamma - \frac{L_1 \gamma (4H - L_1)}{8 \tan \alpha_1} - \frac{L_2 \gamma (4H - L_2)}{8 \tan \alpha_2} \quad (6)$$

两侧均为非充分采动时，孤立煤体承担的载荷：

$$Q = \gamma \left(L_0 H - \frac{L_1^2}{4 \tan \alpha_1} - \frac{L_2^2}{4 \tan \alpha_2} + \frac{4L_1 H - 3L_1^2}{8 \tan \theta_1} + \frac{4L_2 H - 3L_2^2}{8 \tan \theta_2} \right) \quad (7)$$

当孤立煤体为一侧非充分采动、一侧充分采动顶板结构时，充分采动侧主关键层发生破断，顶板裂隙发育高度达到最大值并保持不变，孤立煤体承担的自重为

$$Q'_0 = L_0 H \gamma - \frac{L_1 \gamma (4H - L_1)}{8 \tan \alpha_1} - \frac{H_1 \gamma (H - H_1)}{2 \tan \alpha_2} \quad (8)$$

非充分采动侧覆岩转移载荷与式(4)相同，充分采动侧覆岩空间结构传递载荷 Q_2 为

$$Q_2 = \frac{\gamma(H + 3H_1)}{4} \left(\frac{H - H_1}{2 \tan \alpha_2} + \frac{H - H_1}{2 \tan \theta_2} \right) \quad (9)$$

一侧非充分采动、一侧充分采动顶板结构的孤立煤体承担的载荷为

$$Q' = L_0 H \gamma - \frac{\gamma L_1^2}{4 \tan \alpha_1} + \frac{4\gamma(H - H_1)^2}{8 \tan \alpha_2} + \quad (10)$$

$$\frac{\gamma L_1 (4H - 3L_1)^2}{8 \tan \theta_1} + \frac{\gamma(H^2 + 2HH_1 - 3H_1^2)}{8 \tan \theta_2}$$

当两侧均为充分采动覆岩结构时，孤立煤体承担的载荷为

$$Q'' = L_0 H \gamma + \frac{\gamma(H - H_1)^2}{8 \tan \alpha_1} + \frac{\gamma(H - H_1)^2}{8 \tan \alpha_2} + \frac{\gamma(H^2 + 2HH_1 - 3H_1^2)}{8 \tan \theta_1} + \frac{\gamma(H^2 + 2HH_1 - 3H_1^2)}{8 \tan \theta_2} \quad (11)$$

3.2.3 孤立煤体整体冲击失稳危险性评估

孤立煤体承受的载荷超过自身承载能力极限时，孤立煤体整体具备发生冲击失稳的可能，建立孤立煤体应力分布简化模型，如图7所示。

巷道掘进和工作面回采前实施大直径钻孔卸压工程，破坏了煤柱的整体性和完整性，降低了工作面煤体边缘区域的有效承载能力，导致应力向工作面煤体深处转移，建立孤立煤体应力冲击系数 λ 判别式：

$$\lambda = \frac{Q}{2l_d \sigma_d + \eta l_e [\sigma_c]} \quad (12)$$

式中： $[\sigma_c]$ 为煤体单轴抗压强度； η 为弹性承载区煤体承载能力跟煤体单轴抗压强度的比值，一般取 3~5^[19]。

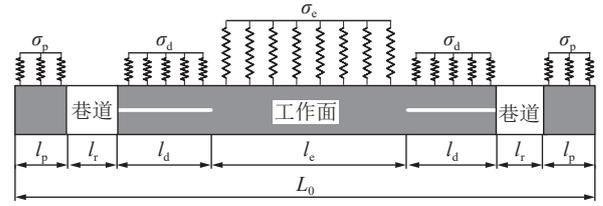


图7 孤立煤体应力分布简化模型
 σ_p —区段煤柱煤体承载能力； σ_d —卸压区煤体承载能力； σ_c —弹性承载区煤体承载能力； l_p —区段煤柱宽度； l_r —巷道宽度； l_d —卸压区宽度； l_e —弹性承载区宽度；

Fig.7 Simplified model of stress distribution in isolated coal bodies

当作用在孤立煤体上的应力总和大于工作面煤体的整体承载能力时，孤立煤体具有发生整体冲击地压危险的可能性。当作用在孤立煤体上的应力总和介于 0.6~0.8 倍孤立煤体的承载能力之间时，具有弱整体冲击危险；当作用在孤立煤体上的应力总和介于 0.8~1.0 倍孤立煤体的整体承载能力之间时，具有中等整体冲击危险；当作用在孤立煤体上的应力总和大于 1.0 倍工作面煤体的整体承载能力时，具有强整体冲击危险。孤立煤体整体冲击失稳危险等级划分见表1。

表1 孤立煤体整体冲击危险判别方法

Table 1 Isolated coal body overall impact hazard discrimination method

整体冲击危险等级	孤立煤体应力冲击系数 λ
无冲击危险	[0,0.6)
弱冲击危险	[0.6,0.8)
中等冲击危险	[0.8,1.0)
强冲击危险	[1.0,+∞)

3.2.4 赵楼 1305 整体冲击失稳危险性分析

根据地表沉降观测情况，1305 工作面两侧采空区均处于非充分采动阶段^[10]，即 1305 工作面覆岩结构类型与图 6a 一致，根据工作面地质和开采技术条件，取 $H=988$ m, $L_0=137$ m, $L_1=215$ m, $L_2=410$ m, $l_p=5$ m, $l_r=4$ m, $l_d=20$ m, $l_e=79$ m, $[\sigma_c]=22$ MPa, $\eta=4$, $\alpha_1=83^\circ$, $\theta_1=83^\circ$, $\gamma=25$ kN/m³，将上述数据代入式(7)和式(12)，计算得到 1305 工作面应力冲击系数 $\lambda=1.14$ ，由表 1 可知，1305 工作面发生整体冲击失稳危险指数 $\varphi=1$ ，即 1305 工作面回采前已经具备发生整体冲击失稳的应力条件。

3.2.5 孤立煤体整体失稳型冲击地压发生机理

根据上述分析，孤立煤体整体失稳型冲击地压发生机理为：两侧采空区覆岩结构向孤立煤体转移

的载荷加上孤立煤体煤层至地表地层自重的总和超过了孤立煤体的实际承载能力,掘进巷道和施工大直径钻孔卸压工程进一步减弱了孤立煤体的有效支撑面积,导致工作面弹性承载区煤体集聚了大量的弹性变形能,在遇到采掘活动或顶板运动等轻微扰动时,极易诱发孤立煤体整体冲击失稳,一旦发生冲击,将造成工作面煤壁及两巷煤体大范围、高强度的冲击破坏。

3.3 切割蠕变型冲击地压发生机理

3.3.1 切割蠕变型冲击危险性评估

切割蠕变型冲击地压发生的主要原因是外部高静态应力作用下的煤岩体发生“应力腐蚀”导致煤体有效承载能力降低,促使巷道局部区域应力集中程度进一步增加,此时应力水平已接近冲击临界载荷,当受到采掘活动施加的微小扰动应力增量或煤体“应力腐蚀”持续进行时,煤岩体载荷超过了发生冲击失稳的临界应力,如图8所示。

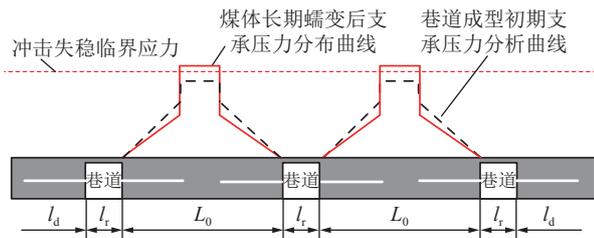


图8 切割蠕变型冲击地压示意

Fig.8 Schematic diagram of cut creep type impact ground pressure

由图8可知,巷道开挖前,三条大巷间煤体的总应力 Q_3 可用下式表示:

$$Q_3 = (2L_0 + l_r)k\gamma H \quad (13)$$

式中: k 为大巷间开挖前煤柱的应力集中程度。

巷道开挖并实施大直径钻孔卸压工程后,3条大巷间煤体的总应力 Q_4 可用下式表示:

$$Q_4 = 2(L_0 - l_d)\xi\gamma H \quad (14)$$

式中: ξ 为大巷间弹性承载区煤体的应力冲击系数。

根据总载荷不变的原则,联立式(13)、(14)可得

$$\xi = \frac{(2L_0 + l_r)k}{2(L_0 - l_d)} \quad (15)$$

建立煤柱发生切割蠕变型冲击失稳可能性的判别公式

$$\omega = \frac{\xi\gamma H}{\mu\eta[\sigma_c]} = \frac{(2L_0 + l_r)k\gamma H}{2(L_0 - l_d)\mu\eta[\sigma_c]} \quad (16)$$

式中: ω 为煤柱发生切割蠕变型冲击失稳危险系数;

μ 为煤柱强度衰减系数,跟煤柱强度、尺寸、周边扰动和时间有关,取值0~1。

根据工程实践^[14],当 ω 小于0.5时,煤柱具有无切割蠕变型冲击失稳风险;当 $0.5 \leq \omega < 1.0$ 时,煤柱具有弱切割蠕变型冲击失稳风险;当 $1.0 \leq \omega < 1.5$ 时,煤柱具有中等切割蠕变型冲击失稳风险;当 $\omega \geq 1.5$ 煤柱具有强切割蠕变型冲击失稳风险,煤柱发生切割蠕变型冲击危险等级划分见表2。

表2 煤柱发生切割蠕变型冲击危险判别方法

Table 2 Method for identifying the risk of cutting creep type impact in coal pillars

切割蠕变冲击危险等级	切割蠕变型冲击失稳危险系数 ω
无冲击危险	[0,0.5)
弱冲击危险	[0.5,1.0)
中等冲击危险	[1.0,1.5)
强冲击危险	[1.5,+∞)

3.3.2 梁宝寺煤矿35000采区大巷切割蠕变冲击危险性分析

根据梁宝寺35000采区工况,取 $H=1\,027\text{ m}$, $[\sigma_c]=18\text{ MPa}$, $\gamma=25\text{ kN/m}^3$, $L_0=50\text{ m}$, $l_r=4.5\text{ m}$, $l_d=15\text{ m}$, $\eta=4$,考虑到埋深、褶曲构造、大巷服役年限等因素,取 $k=2.0$, $\mu=0.7$ 。上述参数代入到式(16),计算得到煤柱发生切割蠕变型冲击失稳危险系数 $\omega=1.72$ 。

3.3.3 切割蠕变型冲击地压发生机理

高静态应力为切割蠕变型冲击地压发生提供了基础应力条件,巷道不合理切割、褶曲构造发育或断层夹持导致煤体有效支撑能力降低从而进一步增大了应力集中程度,当集中应力超过弹性承载区煤体极限承载能力时,煤柱将发生切割蠕变型冲击失稳。大埋深、远离采掘工作面、巷道或断层密集分布是发生切割蠕变型冲击地压的典型特征。

4 三类煤柱型冲击地压防治对策

4.1 应力叠加型冲击地压防治对策

根据应力叠加型冲击地压发生机理可知,将施加在煤柱上的动静应力之和降低到诱发冲击失稳的临界应力之下,是防治应力叠加型冲击地压的根本原则。

4.1.1 优化煤柱留设宽度

在采空区覆岩达到稳沉状态后,采空区支撑力分布范围及峰值位置基本确定,区段煤柱留设宽

度决定了沿空巷道的支承压力水平；另一方面，巷道侧向压力影响范围一般为巷高的3.5倍，巷道布置间距过小，巷道侧向支承压力将发生叠加，巷间煤体发生冲击失稳的可能性进一步增大。为保障沿空巷道的防冲安全，煤柱留设应遵循以下原则：采空区应不留或少留煤柱；隔离煤柱留设尺寸尽量小；保护煤柱尺寸尽量大。

一般情况下，薄及中厚煤层隔离煤柱0~4 m，保护煤柱100~150 m；在具备采用“负煤柱”巷道布置条件的矿井，可以将沿空巷道布置到上区段采空区内，此时厚及特厚煤层隔离煤柱3~6 m；保护煤柱200~300 m。

4.1.2 控制工作面推采速度

按照能量守恒理论，回采前煤层储存的弹性变形能和顶板势能相等；回采后，顶板势能一部分通过顶板破断、回转和震动等形式释放，另一部分转化为弹性变形能储存于临近煤层。工作面匀速推采时，顶板达到其极限跨距后发生初次破断，随后顶板将产生周期性破断，此时工作面推采速度和顶板周期破断步距之间成正相关关系。

从能量角度分析，当工作面快速推采时，顶板周期性破断步距随之增大，顶板因不能及时垮落导致释放的顶板势能比重减小，相应地，转化成弹性变形能储存于煤层的顶板势能增大，发生冲击失稳的风险随之增加。当工作面非匀速推采时，煤层中弹性变形能集中释放，而顶板运动表现出断裂步距离散性大的特点，通过顶板运动释放顶板势能的速率不均衡，导致工作面前方煤层中集聚的弹性变形能急剧增加，发生冲击失稳的风险增大。

从应力角度分析，当回采工作面快速推进时，低位岩梁悬臂端长度增加、应力峰值增量增大，嵌入端长度减小、应力峰值位置距煤壁距离减小、增压载荷影响范围减小^[20]，低位岩梁运动向煤体施加的动载跟推采速度呈正相关。根据“载荷三带”理论^[15-16]可知，工作面推采过“见方”位置后，采空区覆岩裂隙发育高度（即时加载带岩层厚度）达到最大，覆岩空间结构向煤体施加的静载基本不变。综上所述，在覆岩空间结构不变的情况下，保持工作面低速、匀速推进，可减小低位岩梁运动对煤体施加的动载降低，覆岩空间结构施加到煤体的叠加应力，有利于降低工作面煤体尤其是开采扰动区域煤体的冲击危险性。

4.1.3 对工作面顶板进行预裂爆破

顶板不能及时垮落时，顶板与煤层或矸石间存

在离层空间，隔断了载荷垂直顶板向下传递的路径，导致载荷向顶板岩梁嵌固端或触矸端转移，这为煤层集聚弹性变形能提供了力源。对工作面顶板进行预裂爆破，人为降低顶板破断步距和悬顶长度，降低了顶板运动施加给煤层的动载荷，增加了顶板运动释放顶板势能的频率和比重，转移到煤层中的弹性变形能比重随之减小，降低了煤层的静载应力水平。

4.2 整体失稳型冲击地压防治对策

整体失稳型冲击地压的本质是弹性承载区煤体承载的载荷超出了其极限承载能力，防治此类冲击地压围绕降低煤柱承载的载荷和提高其极限承载能力两方面开展工作。

4.2.1 施工大直径卸压钻孔

对于宽度较小的孤立煤体，可在工作面煤壁或两巷回采帮实施深孔大直径钻孔，消除弹性承载区或促使弹性承载区往远离采掘作业地点的方向转移。对于宽度较大的孤立煤体，可在工作面煤壁或两巷回采帮实施“密浅孔+稀深孔”的大直径钻孔施工方案，在消除孤立煤体弹性承载区的基础上保留其一定的承载能力。

4.2.2 优化工作面宽度设计

在进行开采设计时，应考虑采空区宽度对覆岩稳沉的影响，尽量避免留设孤岛煤柱。当必须留设孤立煤体时，应根据周边采空区地表沉降观测结果研究是否达到充分采动，并计算开采孤立煤体能否导致主关键层发生破断，辨识诱发冲击危险性发生突变的防冲关键工作面。在兼顾其他灾害防控和矿井生产条件的前提下，若采空区地表未达到充分沉降，应尽可能增大接续工作面的宽度。

4.3 切割蠕变型冲击地压防治对策

4.3.1 优化巷道层位布置

加强切割蠕变型冲击地压主要与巷间宽度和煤岩体的承载能力有关。为了采掘接续，将大巷布置在煤层中并增大煤巷间距虽有利于防冲，但将造成大量煤炭资源浪费。通过掘岩巷或半煤岩巷来变相增加巷道煤柱宽度或尽可能保留其完整性，可有效降低巷间煤体发生蠕变的程度和范围，尽可能降低应力集中程度，减小发生切割蠕变型冲击失稳的风险。

4.3.2 煤柱监测预警

巷间煤体在长期服役期间存在“应力腐蚀”效应，这种现象随周边采掘条件变化和断层构造活化等情况发生缓慢地、隐蔽性的变化。在具有冲击危险的巷间煤柱布设应力在线监测或开展CT反演等监测

预警措施,可有效掌握巷间煤体的应力状态,当发现应力集中现象时,及时采取卸压解危措施。

5 结论与探讨

1)通过3起典型煤柱型冲击地压工程案例分析,将当前我国煤柱型冲击地压分为应力叠加型冲击地压、整体失稳型冲击地压和切割蠕变型冲击地压3类。

2)分别建立了3类煤柱型冲击地压发生机理的力学模型,揭示了3类煤柱型冲击地压的发生机理,提出了3类煤柱型冲击危险的评估方法和防治对策。

3)由于我国矿井开采深度和规模愈来愈大,实际生产中还会遇到很多具有隐蔽性的煤柱型冲击地压类型,在现场生产中需要加强对这些隐蔽性煤柱型冲击风险的辨识和防治工作。

笔者以3类煤柱型冲击地压案例为背景,揭示了3类煤柱型冲击地压的发生机理和防治对策。实际生产条件十分复杂,煤柱可简化定义为对顶板具有一定支撑能力的、部分区域产生应力叠加的煤体,这样定义可将很多隐蔽性的冲击地压囊括进来,目的是重点研究上覆岩层载荷和煤柱自身特性对煤柱冲击危险的影响。实际生产中,应因地制宜地运用现有研究手段,注重对隐蔽性冲击地压风险的排查、判别和防治。

参考文献(References):

[1] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, *et al.* Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.

[2] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, *et al.* Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.

[3] 康红普,徐刚,王彪谋,等.我国煤炭开采与岩层控制技术发展40a及展望[J].采矿与岩层控制工程学报,2019,1(2):7-39.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, *et al.* Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 7-39.

[4] 李振雷,窦林名,王桂峰,等.坚硬顶板孤岛煤柱工作面冲击特征及机制分析[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):519-524.
LI Zhenlei, DOU Linming, WANG Guifeng, *et al.* Rock burst char-

acteristics and mechanism induced within an island pillar coalface with hard roof[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(4): 519-524.

- [5] 王春秋,蒋邦友,顾士坦,等.孤岛综放面冲击地压前兆信息识别及多参数预警研究[J].岩土力学,2014,35(12):3523-3530.
WANG Chunqiu, JIANG Bangyou, GU Shitan, *et al.* Study of precursor information recognition and multi-parameter early warning before rock burst of island fully mechanized caving face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3523-3530.
- [6] 何江,窦林名,曹晋荣,等.急倾斜特厚煤层水平分段综放开采冲击矿压机理[J].煤炭学报,2020,45(5):1701-1709.
HE Jiang, DOU Linming, CAO Jinrong, *et al.* Mechanism of rock burst in steep and extremely thick coal seam using horizontal section top-coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1701-1709.
- [7] 魏全德,姜福兴,姚顺利,等.特厚煤层下山煤柱区巷道冲击危险性实时监测预警研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(4):530-536.
WEI Quande, JIANG Fuxing, YAO Shunli, *et al.* Real-time monitoring and early warning of rock burst risk in dip coal pillar area of extra-thick coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(4): 530-536.
- [8] 杜学领,王涛.厚层坚硬煤层地层冲击地压机理及防治研究[M].徐州:中国矿业大学出版社,2016.
- [9] 翟明华,姜福兴,朱斯陶,等.巨厚坚硬岩层下基于防冲的开采设计研究与应用[J].煤炭学报,2019,44(6):1707-1715.
ZHAI Minghua, JIANG Fuxing, ZHU Sitao, *et al.* Research and application of mining design based on prevention of rock burst under giant thickness hard strata[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1707-1715.
- [10] 朱斯陶,姜福兴,刘金海,等.我国煤矿整体失稳型冲击地压类型、发生机理及防治[J].煤炭学报,2020,45(11):3667-3677.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, LIU Jinhai, *et al.* Types, occurrence mechanism and prevention of overall instability induced rockbursts in China coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3667-3677.
- [11] 张俊文,宋治祥,刘金亮,等.煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J].煤炭科学技术,2022,50(2):27-36.
ZHANG Junwen, SONG Zhixiang, LIU Jinliang, *et al.* Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 27-36.
- [12] 赵善坤,黎立云,吴宝杨,等.底板型冲击危险巷道深孔断底爆破防冲原理及实践研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(4):636-642.
ZHAO Shankun, LI Liyun, WU Baoyang, *et al.* Theory and application of deep hole floor-break blasting in floor rock burst coal mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(4): 636-642.
- [13] 夏永学,鞠文君,苏士杰,等.冲击地压煤层水力扩孔掏槽防冲试验研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(01):84-91.
XIA Yongxue, JU Wenjun, SU Shijie, *et al.* Experimental study on hydraulic reaming of gutters in coal seam with impact pres-

- sure[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2020, 2(01): 84–91.
- [14] 赵楼煤矿“7.29”冲击地压事故调查组. 兖煤菏泽能化有限公司赵楼煤矿“7.29”冲击地压事故调查报告[R]. 山东: 山东煤矿安全监察局鲁西监察分局, 2015.
- [15] 朱斯陶. 特厚煤层开采冲击地压机理与防治研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- ZHU Sitao. Mechanism and prevention of rockburst in extra-thick coal seams mining[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [16] 姜福兴, 刘 懿, 张益超, 等. 采场覆岩的“载荷三带结构”模型及其在防冲领域的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(12): 2398–2409.
- JIANG Fuxing, LIU Yi, ZHANG Yichao, *et al.* The three zone structure loading model of overlying strata and its applications on rockburst prevention[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2398–2409.
- [17] 刘 懿. 采场覆岩载荷三带结构模型及其在冲击危险辨识中的应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- LIU Yi. A three-zone structure loading model of overlying strata and its application on rockburst evaluation[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [18] 陈 洋. 深井条带充填开采冲击地压发生机理与防治研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- CHEN Yang. Mechanism and control techniques of rockburst disasters in isolated working face with backfilling[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [19] 杨永杰, 宋 杨, 陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(2): 150–153.
- YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie. Test study of coal strength and deformation characteristics under triaxial compression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(2): 150–153.
- [20] 冯龙飞, 窦林名, 王晓东, 等. 回采速度对坚硬顶板运动释放能量的影响机制[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3329–3339.
- FENG Longfei, DOU Linming, WANG Xiaodong, *et al.* Mechanism of mining advance speed on energy release from hard roof movement[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3329–3339.