



移动扫码阅读

张俊文,董续凯,柴海涛,等.地质异常区域多工作面开采结构演化及冲击地压防治[J].煤炭科学技术,2023,51(2):95-105.

ZHANG Junwen, DONG Xukai, CHAI Haitao, *et al.* Structure evolution and rockbursts prevention in multi-face mining in geological anomaly area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 95-105.

地质异常区域多工作面开采结构演化及冲击地压防治

张俊文¹,董续凯¹,柴海涛²,杨磊³,赵善坤²,王黔⁴,吕玉磊⁴,贾乐乐⁵,白俊杰⁴,郑波²,李小明²,景岩峰²

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013; 3. 陕西彬长大佛寺矿业有限公司, 陕西 咸阳 712000; 4. 乌审旗蒙大矿业有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017307; 5. 国家卫生健康委职业安全卫生研究中心, 北京 102308)

摘要:针对某矿地质异常体区域多工作面开采覆岩空间结构多变、致灾因素复杂现象,以该矿实际地质赋存条件和开采技术条件为工程背景,采用理论分析、数值模拟等方法,研究了地质异常体区域覆岩空间运移结构变化规律和支承压力分布特征,以单层弯曲薄板为例建立了不同开采阶段板的力学模型,揭示了不同开采阶段板结构弯曲能量释放特征,基于结构调控理论提出了减小厚硬岩层垮断跨度的初末采冲击地压防治措施,主要得到以下结论:①随着多工作面依次开采,在地质异常体区域依次经历了“一”字形→“S”形→短“Ω”形→不规则“Ω”形→长“Ω”形→“O”形覆岩空间结构演变,丰富了覆岩空间结构的类型;②受地质异常体影响,多工作面开采过程中承受了更多次的初次来压和“见方”来压,该区域顶板垮断动载扰动与支承压力分布更加复杂多变,容易造成工作面宽煤柱整体失稳性冲击危险;③基于单层弯曲薄板力学模型,得到了不同板结构弯曲能随边长呈指数或线性增大,且相对于固支边,自由边对弯曲能影响更大的结论;④对防冲预卸压及解危措施进行了效果检验,在工作面开采过程中没有出现微震大能量事件且煤体应力维持稳定,结构调控措施基本保障了地质异常体区域多工作面开采初末采冲击地压防治效果。

关键词:地质异常体;覆岩空间结构;多工作面开采;冲击地压防治;结构演化

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)02-0095-11

Structure evolution and rockbursts prevention in multi-face mining in geological anomaly area

ZHANG Junwen¹, DONG Xukai¹, CHAI Haitao², YANG Lei³, ZHAO Shankun², WANG Qian⁴, LYU Yulei⁴, JIA Lele⁵, BAI Junjie⁴, ZHENG Bo², LI Xiaoming², JING Yanfeng²

(1. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Shaanxi Binchang Dafosi Mining Co., Ltd., Xianyang 712000, China; 4. Wushenqi Mengda Mingxing Co., Ltd., Ordos 017307, China; 5. National Center for Occupational Safety and Health, Beijing 102308, China)

Abstract: Aimed at the phenomenon of variable overburden spatial structures and complex disaster factors in multi-face mining in a geological anomaly area of a mine, taking the actual geological occurrence conditions and mining technology conditions as the engineering background, this paper studied the changes rule of overburden spatial migration structures and the distribution characteristics of abutment pressure in the geological anomaly area by theoretical analysis and numerical simulation. Taking single-layer bending thin plate as an example, mechanical models of plates at different mining stages were established, and the characteristics of bending energy release of plates at different mining stages were revealed. Based on the structural regulation theory, the prevention measures of rock burst at the beginning and end of mining were proposed to reduce the collapse span of thick and hard rock strata. The main conclusions were as follows: ①With the successive mining of multiple faces working, the overburden spatial structure evolution of “一” → “S” → short “Ω” → irregular “Ω” → long “Ω” → “O” → shaped overburden spatial structures has been experienced in the area of geological anomalies successively, enriching

收稿日期:2022-09-10 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1468

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52034009,51974319);越崎杰出学者资助项目(2020JCB01)

作者简介:张俊文(1977—),男,内蒙古凉城人,教授,博士生导师。E-mail: zhangjw@cumtb.edu.cn

通讯作者:董续凯(1995—),男,山东东营人,博士研究生。E-mail: dong@student.cumtb.edu.cn

the types of overburden spatial structure; ②Due to the influence of geological anomalies, more initial pressure and “square” pressure are borne in the mining process of multiple faces working. The dynamic load disturbance and abutment pressure distribution of roof collapse in this area were more complex and changeable, which were easy to cause the risk of overall instability rock bursts of wide coal pillar; ③Based on the mechanical model of single-layer bending thin plate, it was concluded that the bending energy of different plate structures increased exponentially or linearly with the length of the side, and the free edge had a greater influence on the bending energy than the fixed edge; ④The effect test of the pre-pressure relief and danger relief measures showed that there were no big micro-seismic energy events in the working face mining process and the coal body stress remained stable. The structural control measures basically guaranteed the prevention effect of rock burst at the beginning and end of the multi-working face mining in the geological abnormal area.

Key words: geological anomaly body; overburden spatial structure; multiple face mining; rock burst prevention and control; structure evolution

0 引 言

清晰辨识采空区顶板运移规律和合理控制覆岩垮落步距是矿山冲击地压防治的重要前提。井下工程活动引起上覆岩层破断运移,进而向上发展导致了覆岩空间结构和应力场的演化^[1],井下不同的工程地质、采掘活动及巷道布置方式等导致了覆岩空间结构种类复杂多变。采掘活动造成的覆岩动态演化是工作面矿山压力显现的重要影响因素,覆岩空间结构的剧烈运动可能诱发冲击地压灾害^[2]。由于特殊的地质条件,某矿 3-1 盘区存在地质异常体,内部发育致密断层,该地质异常体尺寸为 550 m×570 m,将对围绕其布置的多个工作面的安全生产造成巨大影响。根据《防治煤矿冲击地压细则》:冲击地压煤层采掘工作面邻近地质构造(幅度在 30 m 以上、长度在 1 km 以上的褶曲,落差大于 20 m 的断层)、采空区、煤柱及其它应力集中区附近时,必须制定防冲专项措施。因此,围绕地质异常体展开研究,分析覆岩空间结构演变规律及致灾因素,并制定针对性的防冲措施。

多工作面开采顶板岩层由低位向高位逐层垮落,在地质异常体影响区域将形成具有不同特征的覆岩空间结构。随着回采工作面的不断推进,采空区面积逐渐增大,采场覆岩结构在时间和空间上均将发生复杂变化。由于断层、巷道切割及该矿井具有的高地压、强扰动、强冲击顶板等特征,该地质异常体及其影响范围内煤岩体将面临严重冲击地压灾害风险。

为更好地掌握工作面开采上覆岩层运动规律,众多学者开展了相关研究:姜福兴等^[3-5]基于采场边界条件提出了“O”“S”“C”“θ”型覆岩空间结构,并对相应结构的致灾因素、监测方法和灾害防治进行了研究;窦林名等^[6-7]根据工作面上覆岩层边界状态的不同,将覆岩空间结构分为“OX”“F”与“T”型 3 类,并研究了“OX-F-T”演化特征、震源分布规律

和防治措施;齐庆新等^[8]研究了井间“非对称 T 形”覆岩空间结构和应力转移诱冲机制,针对巨厚砾岩诱冲机制提出了井间弱链增耗防冲技术;蒋金泉等^[9]认为厚硬关键层下岩层组合失稳运移离层空间由“月牙”形向“一”字形转变,并且覆岩下沉形态先后呈“V”形、“√”形及“U”形;刘金海等^[10]指出了迎采动隔离煤柱推采工作面覆岩空间结构经历了由“C”向“U”形演变;刘畅等^[11]指出了覆岩破断形成梯形台形态的机制、梯形台与关键层理论的关系,并分析了工作面长度对覆岩破断规律的影响;鞠金峰等^[12]研究了覆岩由下向上运移发展 5 阶段岩移特征,并拟合形成了覆岩超前运移的“类指数”岩移边界线;张培鹏等^[13]指出单层硬厚岩层初次破断前、周期破断阶段分别形成“梯”形、“T”形覆岩结构;苏超等^[14]指出深井临空巷道覆岩会经历由长臂“F”形→短臂“F”形→双短臂“F”形悬顶结构的演化过程。上述学者对井下采煤工作面顺序开采和跳采形成的覆岩空间结构、可能诱发的矿山灾害以及防治方法进行了研究,得到了丰硕的成果。但是,由于地质异常体的存在,该区域有着不同于一般工作面开采的覆岩运移结构和支承压力分布特征,造成该区域有潜在的冲击风险。

鉴于此,基于地质异常体赋存特征,从揭示多工作面开采的覆岩结构演化规律出发,探索该特殊区域的冲击地压灾害致灾因素,基于结构调控理念^[15]对该类型冲击地压灾害进行有效防治,研究成果将丰富采场覆岩空间结构类型且可为该矿井及其他相似条件矿井冲击地压灾害防治提供理论基础及技术参考。

1 工程概况

某矿目前所采 3-1 煤层具有弱冲击倾向性,其顶板为强冲击倾向性,煤层上方分布有多层坚硬厚砂岩,覆岩运动规律以及破断激发的动载荷直接影响采掘空间的冲击显现。其中 31103 工作面曾发生动

力事件,最高能量达 5×10^5 J。一般影响冲击地压发生的岩层多为煤层上方 100 m 范围内岩层,其中岩体强度高、厚度大(>10 m)的砂岩起主要作用。

该矿 3-1 煤层上方存在多层厚硬岩层,见表 1,冲击倾向性鉴定结果见表 2。由于断层等异常构造影响,3-1 盘区的 31103 和 31104 工作面中部发现有 330 m×350 m 的椭圆状断裂构,因此留有 550 m×570 m 的地质异常体(图 1)。靠近地质异常体段煤层底板及煤厚变化大,煤层完全断开,31103、31104 工作面被分别切割成 2 个工作面,形成跳采,给工作面连续

推进带来严重影响。且 31103、31104 工作面受地质异常体断层、煤层厚度变化、采空区煤柱、巷道交叉等因素耦合作用影响,对冲击地压产生较大影响,可能会诱发冲击地压,不利于冲击地压的防治。同时,该地质异常体将直接影响覆岩的正常垮断,使得 3-1 煤覆岩结构演化特征更加复杂,导致该工作面临更强烈的冲击地压潜在危险,尤其是围绕地质异常体布置的工作面初采和回撤期间,同时对接续工作面的安全回采也产生同样影响,地质异常体区域多工作面开采平面布置如图 1 所示。

表 1 地质异常体顶板取心特性
Table 1 Geological anomaly body roof core columnar

序号	岩性	层厚/m	累深/m	岩层特性
10	中粒砂岩	25.19	421.44	浅灰绿色,半坚硬
9	细粒砂岩	31.22	452.66	浅灰白色,半坚硬
8	砂质泥岩	7.33	459.99	灰色,水平纹理,半坚硬
7	粉砂岩	29.14	489.13	灰白色,平行层理,半坚硬
6	砂质泥岩	19.92	509.05	灰色,水平纹理,半坚硬
5	煤	0.35	509.40	黑色,黑褐色条痕,半坚硬
4	泥岩	2.67	512.07	深灰色,致密,半坚硬
3	砂质泥岩	6.90	518.97	深灰色,半坚硬
2	粉砂岩	17.13	536.10	灰白色,半坚硬
1	泥岩	5.20	541.30	深灰色,致密,半坚硬

表 2 煤岩层冲击倾向性鉴定结果
Table 2 Identification result of bursting liability of coal and rock strata

性质	类别	动态破坏时间 D_T /ms	冲击能量指数 K_E	弹性能量指数 W_{ET}	单轴抗压强度 R_c /MPa
煤层	3-1上	342	3.383	3.410	18.853
	3-1下	294	1.101	4.194	14.623

注：煤层综合评价结果为弱；顶板弯曲能量指数530.451 kJ，综合评价结果为强；底板弯曲能量指数112.267 kJ，综合评价结果为弱。

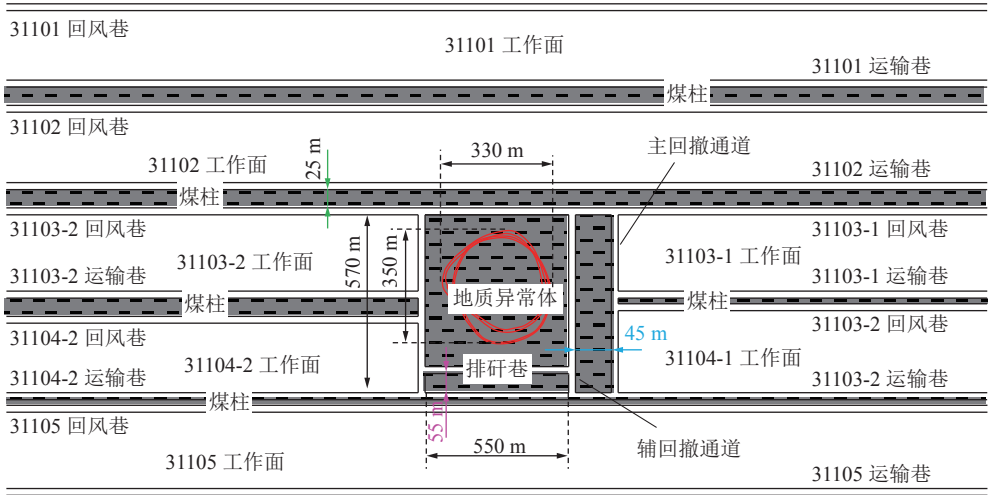


图 1 地质异常体区域多工作面开采平面示意
Fig.1 Schematic of multi-face mining plane in geological anomaly area

2 覆岩空间结构演变及致灾因素分析

2.1 覆岩空间结构运动扰动特征

随着工作面的推采和覆岩空间结构不断演化,煤壁前方受到静动载荷影响^[16],容易诱发冲击地压灾害。如图2所示:触矸线和断裂线附近形成静载应力集中区,如图2a所示;高位岩层的断裂对煤体产生的动载影响,如图2b所示。因此,正确识别覆岩空间结构可以有效预测冲击地压灾害的发生,从而及时采取针对性的防治措施。

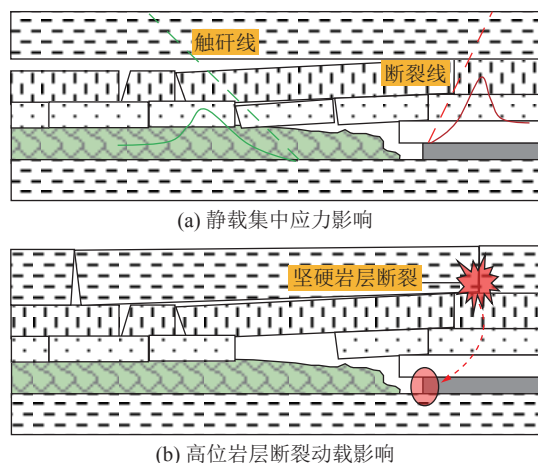


图2 覆岩空间结构演化扰动示意

Fig.2 Schematic of evolution disturbance of overburden spatial structure

2.2 地质异常体整体失稳型冲击危险分析

整体失稳型^[17]冲击地压是指弹性承载区在高压作用下的冲击失稳,处于三向应力状态的弹性核区域煤体拥有较强的承载能力和集聚弹性能力,一旦发生冲击失稳释放的能量和破坏性远大于局部冲击地压。3-1煤层平均煤厚6 m,地质异常体周边、内部分别布置双回撤通道和排矸巷,如图1所示。受工作面巷道、联络巷及排矸巷的切割,在地质异常体区域形成多个孤立煤体,易发生整体失稳性冲击地压灾害^[18-19]。

围绕地质异常体存在宽55、45、25 m煤柱(图1):多工作面开采前期采用宽煤柱布置,留有25 m煤柱,在31104-1、31105工作面更改为小煤柱护巷工艺,留有宽6 m小煤柱;且在此区域工作面末采期间采用双回撤通道回撤工作面设备,主回撤通道与辅回撤通道留有宽度45 m煤柱,受联络巷切割,形成多个孤立煤体;在地质异常体内部掘进排矸巷,造成31104工作面回采巷道、排矸巷、开切眼和回撤通道共同将其切割为宽度55 m孤立煤体。综上,45、55 m煤柱形成多个孤立煤体,受高应力集中和采场

覆岩动态演变影响,存在发生整体失稳型冲击风险;同时,开采前期工作面间25 m煤柱将对覆岩空间结构运动造成重要影响。

2.3 地质异常体区域多工作面开采覆岩空间结构演化特征

地质异常体区域多工作面开采顺序依次为31101、31102、31103-1、31103-2、31104-1、31104-2和31105工作面。围绕多工作面进行开切眼、回撤通道和巷道掘进和扩刷的扰动已使地质异常体产生损伤;在工作面依次开采时,地质异常体及其控制的采场覆岩将发生结构演变和岩层运移,造成多工作面发生多次应力转移和重新分布。此时,若卸压手段或者卸压参数不够合理,将诱发强烈的冲击地压灾害。地质异常体区域多工作面开采覆岩空间结构演化过程复杂多变,按照开采过程将其分为6个阶段进行分析,如图3所示(将工作面开采分为初采、正常开采和末采3个时期):

①单面采空的“一”字形覆岩空间结构,如图3a所示。31102工作面推采通过地质异常体一直到整个工作面结束;地质异常体一侧为采空区,一侧部分为实体煤,形成“一”字形覆岩空间结构,靠近采空区侧的煤体应力较大,31103-1工作面末采和31103-2工作面初采期间易发生冲击事件。②双面采空的“S”形覆岩空间结构,如图3b所示。随着31103-1工作面推采结束,在地质异常体区域完成了“一”字形到“S”形覆岩空间结构的演变,并使靠近采空区的地质体煤体应力集中程度增大,成为31104-1工作面推采至回撤通道时诱发冲击地压灾害的重要因素。③三面采空的短“Ω”形覆岩空间结构,如图3c所示。31103-2工作面初采过后形成双面采空的“S”形覆岩空间结构并一直伴随着该工作面推采结束,地质异常体周边经历了“S”形到短“Ω”形覆岩结构的演变,31103-2工作面初采期间发生冲击地压灾害的风险将大幅提升,并且为31104-2工作面初采期间的矿山压力控制带来极大困难。④四面采空的不规则“Ω”形覆岩空间结构,如图3d所示。在31104-1工作面末采期间完成了地质异常体附近短“Ω”到一边长一边短的不规则“Ω”形覆岩空间结构的演变,造成了31104-1工作面末采期间和31105工作面推采过程中由31104-1采空区进入地质异常体实体煤期间冲击危险性增大。⑤五面采空的长“Ω”形覆岩空间结构,如图3e所示。31104-2工作面初采时期,地质异常体经历了一边长一边短的不规则“Ω”形到长“Ω”形覆岩空间结构的演变,这也造成了31105工作面推采过程中由31104-1采空区进入地质异常体实体

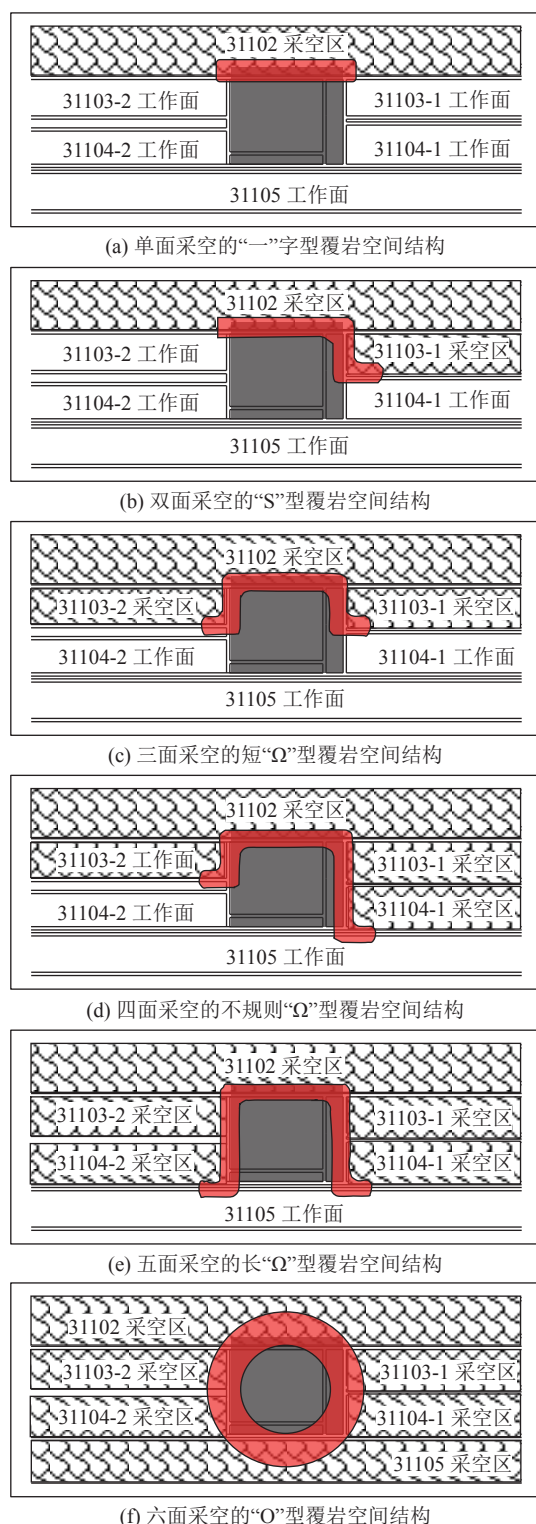


图3 地质异常区域多工作面开采覆岩空间结构演示意
Fig.3 Demonstration intention of overburden spatial structure
in multi-face mining in geological anomaly area

煤时期,进而由实体煤进入31104-2采空区时期的冲击风险。⑥六面采空的“O”形覆岩空间结构,如图3f所示。在31105工作面推采过地质异常体之后,最终在地质异常体周围形成了“O”形覆岩空间结构。

综上,在地质异常体周围经历了多次覆岩空间结构的演变,一方面造成了靠近采空区附近地质异常体的损伤;另一方面,应力向深部煤体转移,形成了高应力集中区。并且,3-1煤层属于厚硬煤层,地质异常体附近顶板大多为厚硬顶板,造成了煤体积累能量的能力较大,更易受到较大扰动。因此,此区域容易诱发频繁冲击地压事件,需要制定针对性的防治措施。

2.4 采动期间顶板垮断与支承压力分析

由于地质异常体的存在,造成了部分影响区域的顶板未能及时垮落,使得该区域处于非充分采动状态,多工作面开采过程中经历了多次的初次来压和“见方”来压,采场覆岩结构演变、应力转移及支承压力的形成过程趋于更加复杂,造成了较高的集中应力和强烈的动载荷形成。因此,由于地质异常体的存在,增加了多工作面开采冲击地压载荷发生的危险程度。

工作面“见方”时,采空区顶板的垮落高度及支承压力基本达到了本工作面最大值。工作面“见方”致使该区域的应力场极不稳定,容易诱发工作面异常来压现象^[20]。图4为对生产过程影响较为严重的多工作面开采部分见方点。由于地质异常体的存在,该多工作面开采发生了多次不同大小的“见方”,使已掘巷道和生产工作面面临较高的冲击地压灾害风险。特别是此区域存在多层更易积聚弹性能的厚硬岩层(表1),该种条件下的厚硬顶板突然断裂垮落会形成较高的动载荷。多工作面开采基本都已达到“双面”见方的阶段或已超过“双面”见方阶段。以“双面”见方为例^[21]计算该阶段支承压力峰值位置距煤壁约为45 m,支承压力峰值约为55 MPa,影响范围约为90 m。地质异常体应力集中程度大于 $2[\sigma_c]$ 。因此,判定地质异常体周围煤岩体应力集中程度已达到发生冲击地压的应力水平。图5为四周采空的地质异常体,由于地质异常体右侧工作面形成了四次见方,其顶板垮落高度更高,两侧工作面采空造成地质异常体周围区域的应力集中。随着31105工作面的继续开采最终形成多工作面采空区,地质异常体逐渐发展为多工作面开采结束后的四面临空特殊支撑体,此时的地质异常体四周应力高度集中,冲击地压灾害危险性进一步增加。为此,需对该区域制定针对性冲击地压灾害防治措施。

2.5 上覆岩层力学模型及动载扰动分析

地质异常体上覆岩层多为厚硬岩层,由于厚硬岩层厚度大、强度高、距离煤层近等特点,厚硬岩极

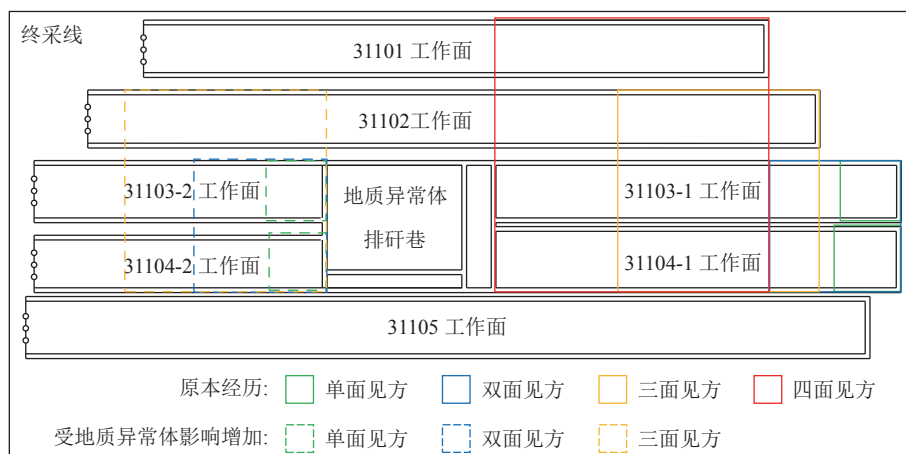


图 4 多工作面开采部分见方位置示意

Fig.4 Multi - working face mining part square position

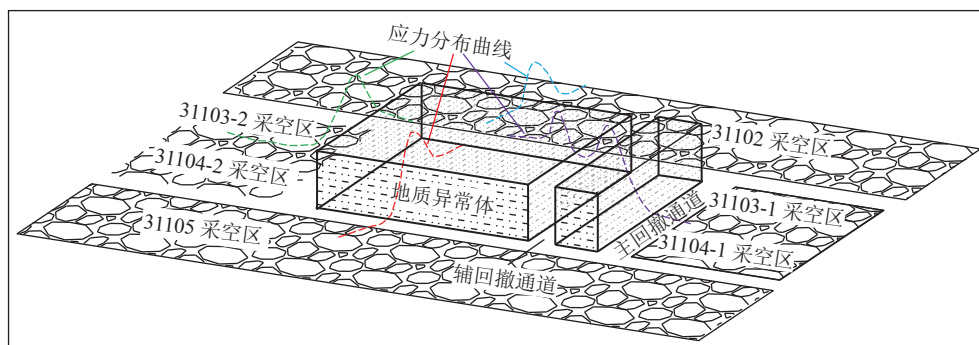


图 5 地质异常体周围采空应力分布示意

Fig.5 Schematic of mined-out stress distribution around geological anomaly area

易悬顶并聚积大量弹性能,突然垮落时容易释放大
量弹性能,极易产生强烈动载,诱发冲击地压灾害。
由于上覆关键岩层形成的结构厚度小,面积大,因此
采用弯曲薄板结构^[22]分析各阶段的力学状态。根据
多工作面的开采接续,以单层板为例,围绕地质异常
体区域的多工作面开采过程中可将上覆岩层板结构
分为 3 种情况:四边固支板结构(图 6a)对应图 3c 中
31103-2 工作面、图 3e 中 31104-2 工作面初采时期;
三边固支板结构(图 6b)对应图 3a 中 31102 工作面、
图 3b 中 31103-1 工作面、图 3d 中 31104-1 工作面正
常开采和末采时期;临边固支板结构(图 6c)对应
图 3f 中 31105 工作面过地质异常体时期。图 6 及公
式中, q 为板所受的均布载荷; h 为板厚度; λ 为任
一点到中性层的距离; ν 为该板材料的泊松比; a 、 b
为板的边长; M_{ij} 为固支边的弯矩; ω_{ij} 为自由边的
挠度; k 为薄板弯曲产生的位移。

在均布载荷作用下弯曲薄矩形板的挠曲面方
程为

$$\nabla^4 \omega = \frac{1}{D}(D\lambda^2 \omega + q) \quad (1)$$

D 为板的抗弯刚度:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

其中, E 为弹性模量; ∇ 为梯度因子,代表式为

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (3)$$

(ξ, η) 为薄板上任一点,则:

1) 四边固支板理论计算。边界条件为

$$\omega_{\xi=0,a} = \omega_{\eta=0,b} = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial \omega}{\partial \xi} \right)_{\xi=0,a} = \left(\frac{\partial \omega}{\partial \eta} \right)_{\eta=0,b} = 0 \quad (5)$$

在图 6a 中应用功的互等定理,则得出四边固支
薄板任一点的挠度为

$$\omega(\xi, \eta) = \int_0^a \int_0^b q \omega'(x, y; \xi, \eta) dx dy + \int_0^a M_{y0} \omega'_{y0} dx + \int_0^b M_{x0} \omega'_{x0} dy - \int_0^a M_{yb} \omega'_{yb} dx - \int_0^b M_{xa} \omega'_{xa} dy \quad (6)$$

2) 三边固支板理论计算。边界条件为

$$\left(\frac{\partial \omega}{\partial \xi} \right)_{\xi=0,a} = \left(\frac{\partial \omega}{\partial \eta} \right)_{\eta=0} = 0 \quad (7)$$

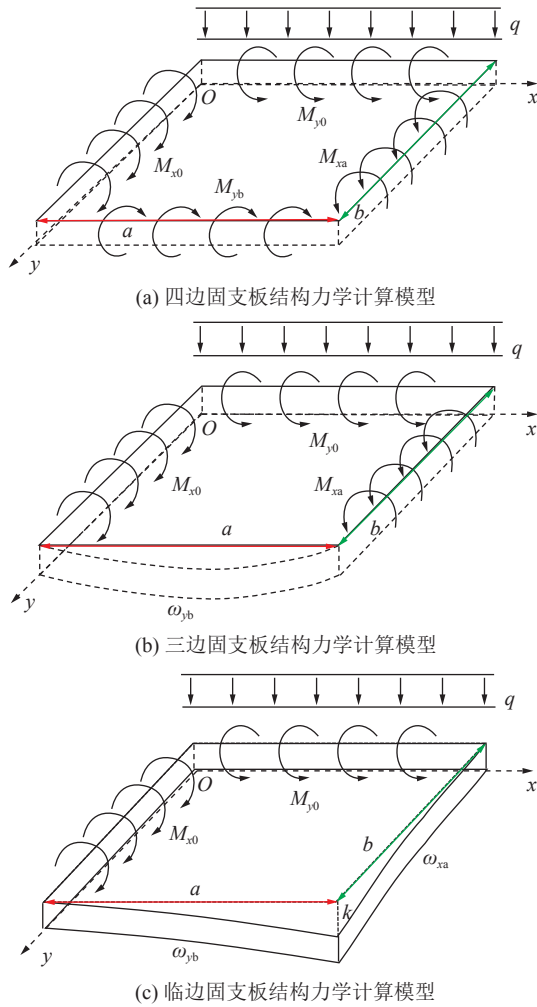


图 6 板结构力学计算模型

Fig.6 Mechanical calculation model of plate structure

$$\omega_{\xi=0} = \omega_{\xi=a} = \omega_{\eta=0} = 0 \quad (8)$$

$$\left[\frac{\partial^3 \omega}{\partial \eta^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 \omega}{\partial \xi^2 \partial \eta} \right] = 0 \quad (9)$$

在图 6b 中应用功的互等定理,则得出三边固支薄板任一点的挠度为

$$\omega(\xi, \eta) = \int_0^a \int_0^b q \omega'(x, y; \xi, \eta) dx dy + \int_0^a M_{y0} \omega'_{y0} dx +$$

$$\int_0^b M_{x0} \omega'_{x0} dy - \int_0^a V'_{yb} \omega_{yb} dx - \int_0^b M_{xa} \omega'_{xa} dy \quad (10)$$

V_{yb} 为式(10)基本解的边界值, $-V_{yb}dx$ 代表 $y=b$ 边任意一点 x 处发生单位位移时对 (ξ, η) 点挠度的贡献, 则 $-\int_0^a V'_{yb} \omega_{yb} dx$ 代表 ω_{yb} 在 (ξ, η) 点的挠度贡献。

3) 临边固支板理论计算。边界条件为

$$\left(\frac{\partial \omega}{\partial \xi} \right)_{\xi=0} = \left(\frac{\partial \omega}{\partial \eta} \right)_{\eta=0} = \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial \xi \partial \eta} \right)_{\xi=a, \eta=b} = 0 \quad (11)$$

$$\omega_{\xi=0} = \omega_{\eta=0} = 0 \quad (12)$$

$$\left[\frac{\partial^3 \omega}{\partial \eta^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 \omega}{\partial \xi^2 \partial \eta} \right] = 0 \quad (13)$$

$$\left[\frac{\partial^3 \omega}{\partial \xi^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 \omega}{\partial \xi \partial \eta^2} \right] = 0 \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial \eta^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial \xi^2} \right)_{\eta=b} = \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial \xi^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial \eta^2} \right)_{\xi=a} = 0 \quad (15)$$

在图 6c 中应用功的互等定理, 则得出临边固支薄板任一点的挠度为

$$\omega(\xi, \eta) = \int_0^a \int_0^b q \omega'(x, y; \xi, \eta) dx dy + \int_0^a M_{y0} \omega'_{y0} dx + \int_0^b M_{x0} \omega'_{x0} dy - \int_0^a V'_{yb} \omega_{yb} dx - \int_0^b V'_{xa} \omega'_{xa} dy + R'_{ab} k \quad (16)$$

R_{ab} (角点力)为两自由边交点的支反力。

在求出弯曲薄板上某一点 (ξ, η) 的挠度后, 便可以求出薄板挠过程中的弯曲弹性能, 可近似表示为

$$U = \frac{D}{2} \int_0^x \int_0^y \{ (\nabla^2 w)^2 + 2(1-\nu) - [(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y})^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}] \} dx dy \quad (17)$$

根据式(17)计算并得出在相同条件下不同薄板结构弯曲能量特征, 如图 7 所示: 四边固支型板结构的边长与弯曲能均呈指数关系, 并且当边长相等时能量最大, 这也就解释了“见方”期间冲击危险性大的原因, 如图 7a 所示; 三边固支型板结构的弯曲能

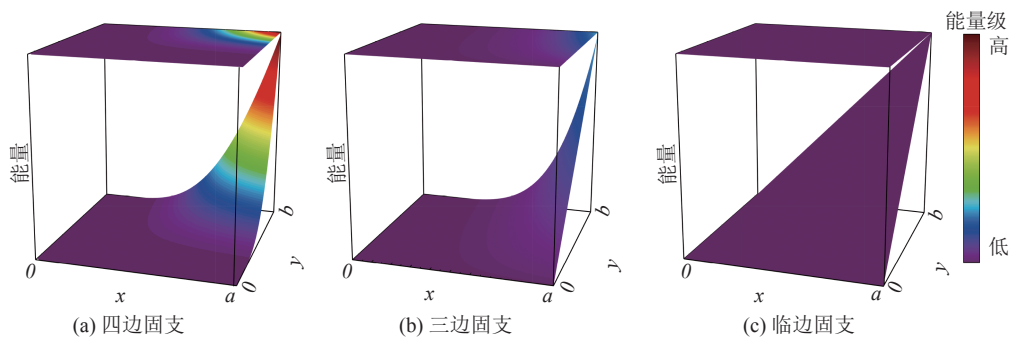


图 7 不同薄板结构弯曲能量分布特征

Fig.7 Bending energy distribution characteristics of different thin plate structures

与固支边呈指数关系,与自由边呈线型关系,且当自由边与固支板边长相等时,自由边对弯曲能的影响梯度大,如图7b所示;临边固支板结构的弯曲能与边长都呈线性关系,如图7c所示。

综上,不同板结构的弯曲能都随着固支边和自由边的边长呈指数或线性增大,且相对于固支边,自由边对弯曲能的影响更大。因此,若要减弱或消除厚硬岩层垮断动载扰动对生产的影响,需从减小厚硬岩层的垮断跨度方面进行研究。

3 多工作面开采覆岩空间结构数值模拟及冲击地压防治措施

3.1 覆岩空间结构演化规律数值模拟验证

不同类型覆岩空间结构演化过程中,顶板岩层的应力、塑性区、位移的分布具有明显的不同。因此,利用FLAC^{3D}软件建立地质异常体区域多工作面开采的覆岩空间结构演化过程。以该矿地质异常体区域地应力测试报告结果为依据,在数值模型X-X方向施加13.2 MPa的均布载荷,在Y-Y方向施加6.1 MPa的均布载荷,模型顶部至地表间岩层重力通过施加14 MPa均布载荷代替(埋深560 m)。建立长×宽×高=1 000 m×700 m×60 m,煤厚6 m的厚煤层模型,施加上述边界条件并使其初始应力平衡,提取顶板岩层应力、位移和塑性区分布进行分析,如图8所示。因为工作面顶板具有超前断裂和侧向断裂的性质,顶板岩层的塑性区超出工作面范围分布,如图8a所示;顶板发育塑性区区域承载能力大幅降低,造成应力向四周转移,如图8b所示;同时,顶板的位移也随着顶板的超前和侧向断裂发生区域性变化,如图8c所示。综上,通过数值模拟验证,地质异常体区域多工作面开采过程中依次经历了“一”字型→“S”型→短“Ω”型→不规则“Ω”型→长“Ω”型→“O”型覆岩空间结构演变,为制定冲击地压防治措施奠定了基础。

3.2 冲击地压防治措施

结构调控^[15]理念认为煤岩体结构变化是导致围岩应力场演化的根源,防治冲击地压灾害应立足于调控煤岩体结构,系统结构变化是引起应力变化及转移的根本原因,应力是系统结构变化的外在显现形式。因此,对地质异常体区域多工作面开采过程采取一系列措施,改变煤岩体系统结构,使其不具备应力集中条件。煤层上方低位存在厚硬岩层顶板是诱发冲击地压灾害的重要影响因素^[21],顶板及煤层预卸压措施能够缩小侧向悬顶长度、高位岩层及时

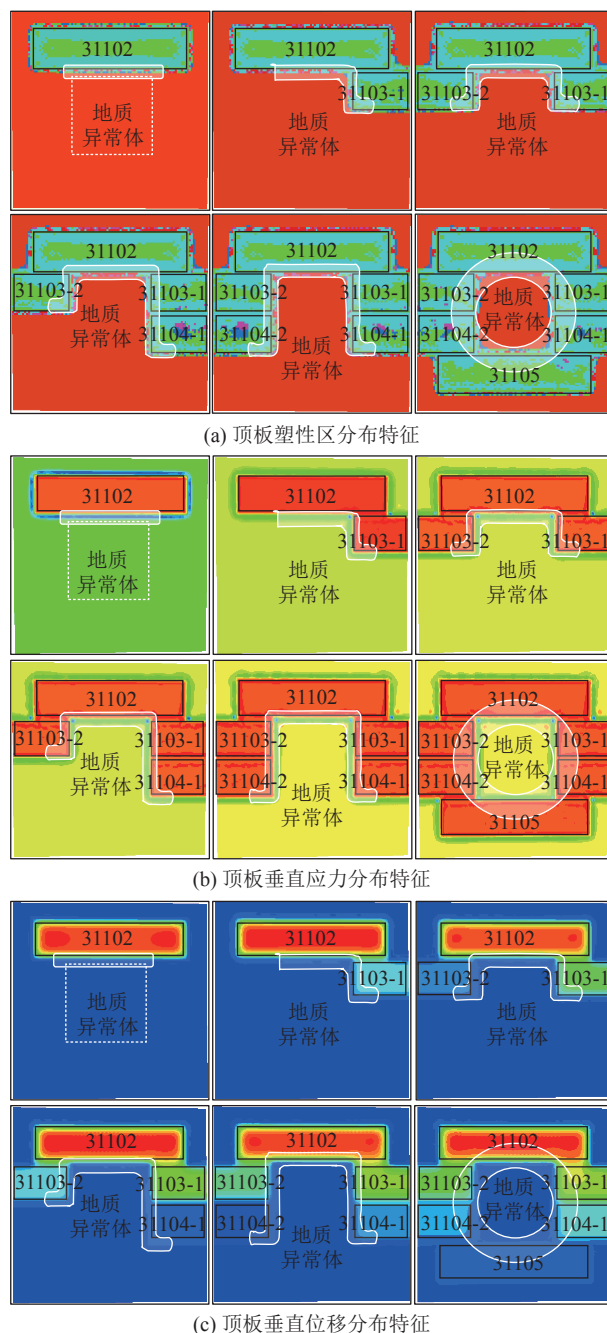


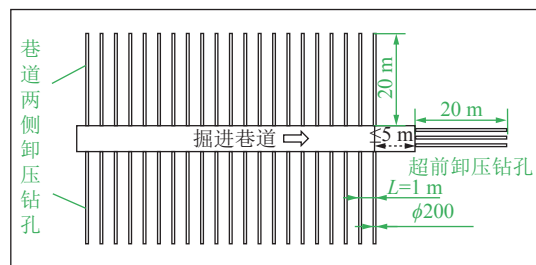
图8 覆岩空间结构演化规律数值模拟
Fig.8 Numerical simulation of overburden spatial structure evolution law

垮落及缩减煤柱侧高应力集中静载。为保证多工作面的安全回采,在开采前采取了煤层钻孔卸压、顶板水力压裂、爆破切顶以及井下长钻孔预处理高位顶板的卸压解危措施。

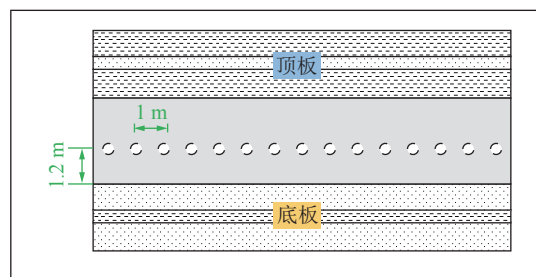
3.2.1 预卸压措施

1)煤层大直径卸压钻孔措施。在掘进工作面回掘进前方以及两帮施工超前大直径卸压钻孔,如图9所示。超前大直径钻孔参数为:孔深不小于20 m,直径200 mm,工作面掘进时应预留10 m卸压保护带

进行第 2 轮超前卸压工作；两帮进行大直径钻孔卸压参数为：孔深 20 m，孔间距 1 m，直径 200 mm，两帮大直径钻孔卸压滞后推进工作面不超过 5 m，距离底板 1.2 m。



(a) 大直径卸压钻孔布置平面图



(b) 大直径卸压钻孔布置截面

图 9 大直径卸压钻孔布置示意

Fig.9 Layout of large diameter pressure relief borehole

2) 水力压裂与爆破切顶措施。对于低位厚硬岩层，采用井下倾斜钻孔水力压裂和爆破措施，如图 10 所示。在主回撤通道向地质异常体施工高低位爆破孔联合切顶，高低位炮孔间距 1 m，排距 10 m，高位爆破孔角度 60°，长度 55 m，装药长度 30 m，封孔长度大于 18 m；低位爆破孔角度 45°，长度 35 m，装药长度 15 m，封孔长度大于 12 m。在辅回撤通道向主回撤通道方向采用水力压裂切顶措施，孔距 10 m，角度 40°，长度 40 m，分两段压裂，孔底和孔中各压裂一次。在开切眼向工作面推进方向施工水力压裂钻孔，孔距 10 m，角度 60°，长度 40 m，分两段压裂，孔底和孔中各压裂一次。

3) 长钻孔预处理顶板措施。通过井下长钻孔定向水力压裂技术对煤层上方 70 m 的粉砂岩进行预裂，如图 11 所示，提前使其产生裂隙，在工作面推采过程中及时垮落，缩短悬臂长度，从而降低工作面应力集中程度和减小动载扰动。

3.2.2 解危措施

在采掘工程中，若出现预警或动力性现象，采取大直径钻孔及煤层水力压裂联合措施对预警区域进行解危工作，如图 12 所示：若大直径卸压钻孔变形严重，卸压孔周围裂隙发育良好，则在两卸压孔之间补打大直径钻孔，直至预警解除；若大直径钻孔突然塌孔或裂隙发育较差，则采取煤层水力压裂措施，促

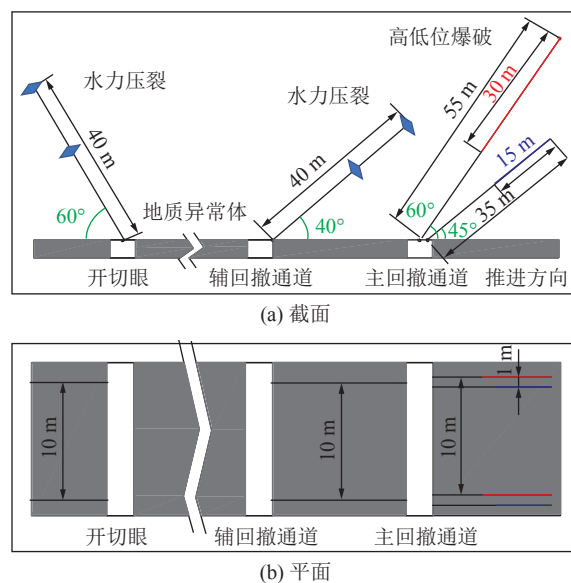


图 10 水力压裂与爆破切顶措施示意

Fig.10 Schematic of hydraulic fracturing and blasting cutting measures

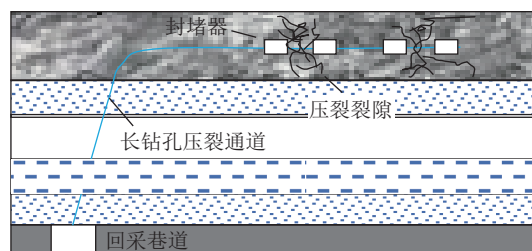
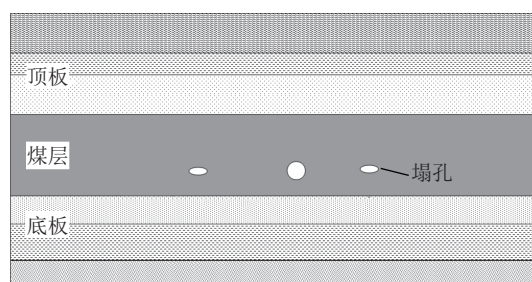
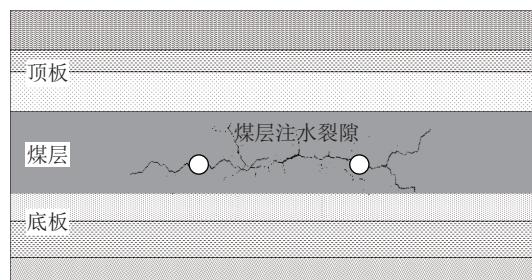


图 11 长钻孔预处理顶板示意

Fig.11 Schematic of pretreated roof of long hole



(a) 大直径卸压钻孔解危措施



(b) 煤层水力压裂解危措施

图 12 预警区域解危措施示意

Fig.12 Schematic of emergency measures in early warning area

使煤层裂隙发育。

3.2.3 效果检验

对地质异常体区域多工作面实施了卸压措施,以正在末采期间的31104-1工作面为例,提取该工作面距离主回撤通道200 m到目前开采位置(图13中红色区域)的微震和应力数据进行分析:工作面微震事件维持在 10^4 J级及以下,没有出现严重的微震集中事件,相对高能量事件主要集中在工作面后方采空区和邻采空区区域,如图13所示;末采期间工作面应力维持稳定,没有出现应力预警事件,如图14所示。

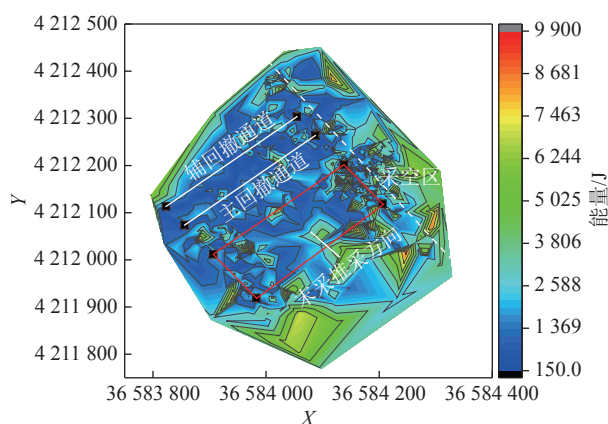


图13 工作面微震事件分布平面

Fig.13 Distribution plan of microseismic events at working face

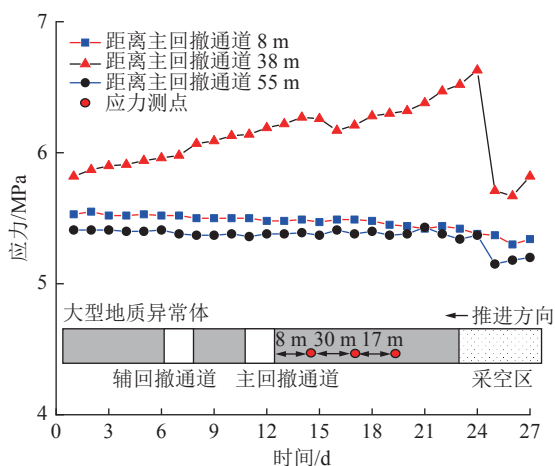


图14 工作面末采应力变化

Fig.14 Change of final mining stress of working face

综上,在地质异常体区域多工作面采取卸压措施后,保障了该区域多工作面的正常采掘工程。

4 结 论

1)随着多工作面依次开采,在地质异常体区域依次经历了“一”字型→“S”型→短“Ω”型→不规则

“Ω”型→长“Ω”型→“O”型覆岩空间结构演变,丰富了覆岩空间结构的类型。

2)受地质异常体影响,多工作面开采过程中承受了更多次的初次来压和“见方”来压,该区域顶板垮断动载扰动与支承压力分布更加复杂多变,容易造成工作面宽煤柱整体失稳性冲击危险。

3)基于单层弯曲薄板力学模型,得到了不同板结构弯曲能随边长呈指数或线性增大,且相对于固支边,自由边对弯曲能的影响更大的结论。

4)基于结构调控理念提出了防冲预卸压及解危措施并进行效果检验,在工作面开采过程中没有出现微震大能量事件且煤体应力维持稳定,保障了地质异常体区域多工作面开采初末采冲击地压防治效果。

参考文献(References):

- [1] 文志杰,景所林,宋振骥,等.采场空间结构模型及相关动力灾害控制研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):52-61.
WEN Zhijie, JING Suolin, SONG Zhenqi, et al. Study on coal face spatial structure model and control related dynamic disasters[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 52-61.
- [2] 张玉军,张志巍.煤层采动覆岩破坏规律与控制技术研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(11):85-97.
ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei. Research progress of mining overlying strata failure law and control technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 85-97.
- [3] 姜福兴,张兴民,杨淑华,等.长壁采场覆岩空间结构探讨[J].岩石力学与工程学报,2006,25(5):979-984.
JIANG Fuxing, ZHANG Xingmin, YANG Shuhua, et al. Discussion on overlying strata spatial structures of longwall in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 979-984.
- [4] 姜福兴.采场覆岩空间结构观点及其应用研究[J].采矿与安全工程学报,2006,23(1):30-33.
JIANG Fuxing. Viewpoint of spatial structures of overlying strata and its application in coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 30-33.
- [5] 史红,姜福兴.基于微地震监测的覆岩多层空间结构倾向支承压力研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S1):3274-3280.
SHI Hong, JIANG Fuxing. Study on abutment pressure rule of overlying strata spatial structures based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3274-3280.
- [6] 窦林名,贺虎.煤矿覆岩空间结构OX-F-T演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):453-460.
DOU Linming, HE Hu. Study of OX-F-T spatial structure evolution of overlying strata in coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 453-460.
- [7] 徐学锋,窦林名,曹安业,等.覆岩结构对冲击矿压的影响及其微震监测[J].采矿与安全工程学报,2011,28(1):11-15.
XU Xuefeng, DOU Linming, CAO Anye, et al. Effect of overlying

- ing strata structures on rock burst and micro-seismic monitoring analysis[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(1): 11–15.
- [8] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 矿井群冲击地压发生机理与控制技术探讨[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 141–150.
- QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, *et al.* Discussion on the mechanism and control of coal bump among mine group[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 141–150.
- [9] 蒋金泉, 王 普, 武泉林, 等. 上覆高位岩层岩下离层空间的演化规律及其预测[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(10): 1769–1779.
- JIANG Jinquan, WANG Pu, WU Quanlin, *et al.* Evolution laws and prediction of separated stratum space under overlying high-position magmatic rocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(10): 1769–1779.
- [10] 刘金海, 曹允钦, 魏振全, 等. 深井厚煤层采空区迎采动隔离煤柱合理宽度研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 4269–4277.
- LIU Jinhai, CAO Yunqing, WEI Zhenquan, *et al.* Research on reasonable width of partition pillar close to goaf heading mining in thick seam of deep shaft[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 4269–4277.
- [11] 刘 畅, 刘正和, 张俊文, 等. 工作面长度对覆岩空间结构演化及大采高采场矿压规律的影响[J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 691–698.
- LIU Chang, LIU Zhenghe, ZHANG Junwen, *et al.* Effect of mining face length on the evolution of spatial structure of overlying strata and the law of underground pressure in large mining height face[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 691–698.
- [12] 鞠金峰, 许家林, 刘阳军, 等. 关键层运动监测及岩移五阶段规律研究: 以红庆河煤矿为例[J/OL]. *煤炭学报*: 1–12[2022-03-04]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C44YLTIOAiTRKibYIV5Vjs7iJTKGjg9uTdeTsOI_ra5_Xd9cBfanZ-ETxzu0Ed0OPghWIHOUBRf9t3dY7d794G9Hs&uniplatform=NZKPT.
- JU Jinfeng, XU Jialin, LIU Yangjun, *et al.* Key strata movement monitor during the underground coal mining and its 5-stage movement law inversion: A case study in Hongqinghe mine[J/OL]. *Journal of China Coal Society*: 1–12[2022-03-04]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C44YLTIOAiTRKibYIV5Vjs7iJTKGjg9uTdeTsOI_ra5_Xd9cBfanZ-ETxzu0Ed0OPghWIHOUBRf9t3dY7d794G9Hs&uniplatform=NZKPT.
- [13] 张培鹏, 蒋力帅, 刘绪峰, 等. 高位硬厚岩层采动覆岩结构演化特征及致灾规律[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(5): 852–860.
- ZHAGN Peipeng, JIANG Lishuai, LIU Xufeng, *et al.* Mining-induced overlying strata structure evolution characteristics and disaster-triggering under high level hard thick strata[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(5): 852–860.
- [14] 苏 超, 弓培林, 康红普, 等. 深井临空高应力巷道切顶卸压机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(6): 1104–1113.
- SU Chao, GONG Peilin, KANG Hongpu, *et al.* Mechanism of roof cutting and pressure relief in gob-side and high-stress roadway in deep coal mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(6): 1104–1113.
- [15] 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.
- [16] 王存文, 姜福兴, 孙庆国, 等. 基于覆岩空间结构理论的冲击地压预测技术及应用[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(2): 150–155.
- WANG Cunwen, JIANG Fuxing, SUN Qingguo, *et al.* The forecasting method of rock-burst and the application based on overlying multi-strata spatial structure theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(2): 150–155.
- [17] 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 rock-bursts in China coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3667–3677.
- [18] 王高昂, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 高应力厚煤层大巷孤立煤体蠕变失稳冲击机理及防治研究[J/OL]. *岩土工程学报*: 1–11[2022-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20220107.1743.009.html>.
- WANG Gaoang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, *et al.* Creep instability rock burst mechanism and pre-vention technology of isolated coal mass in roadway of high stress thick coal seam [J/OL]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1–11[2022-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20220107.1743.009.html>.
- [19] 王高昂, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 千米深井大巷孤立煤体整体失稳冲击机理及防治研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(5): 968–976.
- WANG Gaoang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, *et al.* Mechanism of rock burst induced by overall instability of isolated coal and its prevention in large well at thousands-kilometer underground[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(5): 968–976.
- [20] Henryk Gil. 岩层力学理论[M]. 张玉卓, 译. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- Henryk Gil. *Rock mechanics theory* [M]. Translated by ZHANG Yuzhuo. Beijing: Science and Technology of China Press, 2001.
- [21] 张俊文, 董续凯, 柴海涛, 等. 厚煤层一次采全高低位厚硬岩层垮落致冲机理与防治[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 734–744.
- ZHANG Junwen, DONG Xukai, CHAI Haitao, *et al.* Mechanism and prevention of rock burst caused by the collapse of low-level thick hard rock strata at full-height mining face in thick coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 734–744.
- [22] 付宝连. 弯曲薄板功的互等新理论[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- FU Baolian. *New reciprocal theory of work in bending plates* [M]. Beijing: Science Press, 2003.