



移动扫码阅读

姜聚宇, 路 焱, 曹兰柱, 等. 动-静载作用下端帮开采支撑煤柱参数设计方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 53-62.

JIANG Juyu, LU Ye, CAO Lanzhu, *et al.* Parameter design of coal pillar in highwall mining under action of dynamic-static load[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 53-62.

动-静载作用下端帮开采支撑煤柱参数设计方法

姜聚宇¹, 路 焱¹, 曹兰柱¹, 付天光², 王 东¹, 王来贵¹, 蔡明祥³, 李 磊²

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中煤科工能源科技发展有限公司, 北京 100013; 3. 国家能源集团新疆能源公司 准东露天煤矿, 新疆 昌吉 831799)

摘 要: 应用端帮采煤机开采工艺回收端帮压覆滞留煤资源时, 支撑煤柱合理宽度的确定是影响其安全、高效推广应用的一个关键性要素, 尤其是考虑爆破振动效应对支撑煤柱稳定性的影响。以平朔安太堡露天矿南端帮为工程背景, 采用现场测振试验、理论分析、数值计算研究边坡三角载荷和爆破振动作用下端帮开采支撑煤柱稳定性及其参数设计方法。基于极限平衡理论和尖点突变理论, 运用 Mohr-Coulomb 屈服准则, 分析了煤柱弹塑性区分布规律; 建立了受采高、采宽、上覆岩层载荷应力、煤柱黏聚力与内摩擦角等因素影响下的煤柱极限强度函数表达式; 建立了不同安全储备系数条件下煤柱最大允许塑性屈服区宽度及煤柱留设宽度计算式。建立了支撑煤柱三维简谐振动响应模型, 研究了单响药量、高程差、爆心水平距等爆破参数对煤柱瞬时最大动应力响应影响规律, 揭示了爆破动载效应对支撑煤柱塑性区宽度和稳定性的影响机制, 提出了爆破动载作用下支撑煤柱参数设计方法。研究表明: 爆破振动对支撑煤柱稳定性影响较大, 爆破动载作用下煤柱瞬时最大动应力响应与单响药量呈正相关关系、与高程差和水平距离呈负相关关系。随煤柱瞬时最大动应力响应增加, 煤柱塑性区宽度呈正比例增大, 煤柱安全系数以近似线性规律衰减。确定动-静载下煤柱留设宽度为 5 m, 经工程实践, 验证了其合理性。

关键词: 露天开采; 动静载荷; 端帮开采; 支撑煤柱; 参数设计

中图分类号: TD824 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)05-0053-10

Parameter design of coal pillar in highwall mining under action of dynamic-static load

JIANG Juyu¹, LU Ye¹, CAO Lanzhu¹, FU Tianguang², WANG Dong¹, WANG Laigui¹, CAI Mingxiang³, LI Lei²

(1. School of Mines Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. China Coal Science & Engineering Energy Technology Development Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Zhundong Open-pit Coal Mine of China Energy Group Xinjiang Energy Company, Changji 831799, China)

Abstract: In view of the application of end slope shearer mining technology to recover a large amount of residual coal, the determination of reasonable width of supporting coal pillar is a key factor whether it can be safely and efficiently popularization and application, especially considering the influence of blasting vibration on the stability of supporting coal pillar. Based on the southern end slope at the open-pit coal mine of Pingshuo, field vibration test, theoretical analysis and numerical calculation were used to study the web pillar stability in open-pit highwall mining and its parameter design under the action of triangular load and blasting vibration on the side slope. Based on the theory of limit balance and the mutation theory, the stress distribution at the coal pillar was analyzed, combined with Mohr-Coulomb failure criterion. Besides, the ultimate strength function expression of coal pillar under the influence of mining height, mining width, load stress of overlying strata, cohesion and internal friction angle of coal pillar is established. The calculation formula of the maximum allowable plastic zone width and rational width of web pillar under different safety reserve factor conditions are established. The three-dimen-

收稿日期: 2023-02-03 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0125

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204136, 52204135); 辽宁省自然科学基金计划资助项目(2022-BS-327)

作者简介: 姜聚宇(1989—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 讲师, 硕士生导师, 博士。E-mail: jy_lntu@163.com

通讯作者: 路 焱(1995—), 男, 山西阳泉人, 硕士研究生。E-mail: luye_186@163.com

sional simple harmonic vibration response model of the supported coal pillar was established, and the blasting parameters such as the amount of single shot, elevation difference and horizontal distance of the blast center were studied on the response of the maximum instantaneous dynamic stress of the coal pillar, which revealed the influence mechanism of the blasting dynamic load effect on the width and stability of the plastic zone of the supported coal pillar and proposed the design method of the parameters of the supported coal pillar under the blasting dynamic load. The results show that the blasting vibration has a greater influence on the stability of coal pillar, and the instantaneous maximum dynamic stress response of coal pillar under the blasting dynamic load is positively correlated with the amount of single shot, and negatively correlated with the elevation difference and horizontal distance. With the increase of the maximum instantaneous dynamic stress response of coal pillar, the width of plastic zone of coal pillar increases proportionally, and the safety factor of coal pillar decays in an approximately linear pattern. The width of coal pillar under dynamic-static load is determined to be 5 m, and its reasonableness is verified by engineering practice.

Key words: open-pit mining; dynamic and static loads; highwall mining; coal pillar; parameter design

0 引言

我国山西、陕西、内蒙古、新疆等地区存在大量大型适宜露天开采的浅埋煤田,由于采区境界、边坡稳定性、合理剥采比及开采工艺限制等原因,露天开采后必然会在边坡下部形成大量压覆资源-滞留煤无法回收。滞留煤无法回收带来重大资源与经济损,同时还可能导致煤自燃、滑坡等安全及环境隐患^[1-3]。端帮开采工艺为应用端帮采煤机对露头煤进行打洞开采,开采过程中洞室与洞室之间留设煤柱支撑上覆岩层。若支撑煤柱发生失稳,会造成洞室顶板垮落发生压埋设备事故,甚至边坡滑坡等一系列工程灾害。合理的设计端帮开采支撑煤柱参数,对煤柱失稳机理进行研究,是端帮开采安全、高效应用的前提。工程实际中,支撑煤柱不单一受边坡静载荷作用,生产爆破在露天开采过程中始终进行。生产爆破具有爆破炸药量大、爆破频繁、爆破点多的特点,对支撑煤柱产生反复、持久作用,进而影响煤柱稳定性。因此,有待研究动-静载作用下端帮开采支撑煤柱稳定性。

对于端帮开采支撑煤柱稳定性研究,国内外学者做了大量有益探索。国外都是以煤柱强度经验公式对留设煤柱尺寸进行设计。国内陈彦龙等^[4]基于尖点突变理论与极限分析法对煤柱的失稳判据进行了推导。王东等^[5]综合采用理论分析、蠕变试验、数值模拟与工程实施等手段,研究了端帮采煤机打洞回采条件下的边坡支撑煤柱稳定性,提出了煤柱参数设计方法。吴豪帅^[6]利用有限元软件 ANSYS,对支撑煤柱的留设宽度进行设计,分析了车辆运动载荷对支撑煤柱稳定性的影响。ADHIKARY 等^[7]利用局部矿山刚度理论,并结合数值模拟,研究了某露天矿端帮开采煤柱的稳定性。目前,相关学者们的研究未考虑爆破振动作用对煤柱稳定性的影响,且煤柱合理留设宽度与采高、采宽、煤柱强度和煤柱稳

定性系数之间的关系并不明确和直观,尚未有明确的数学描述,不利于实际工程煤柱参数设计。尤其对于一些矿山爆破作业较多的露天煤矿,爆破振动产生的动载效应较大,若在此基础上进行端帮开采,其对煤柱稳定性的影响巨大,不利于煤柱的长期稳定。若按以往静载荷条件下的设计方案,忽略爆破振动作用,很可能造成所留煤柱宽度较小,导致煤柱的破坏失稳。

鉴于此,笔者兼顾动-静载作用对煤柱稳定性影响,建立了煤柱三维简谐振动系统模型,研究了爆破振动作用下煤柱塑性区宽度及其极限应力变化规律,确立了基于尖点突变理论的煤柱失稳判据,提出了动-静载作用下端帮开采支撑煤柱设计方法,为我国端帮采煤机工艺的推广应用奠定了坚实基础。

1 静载条件下支撑煤柱稳定性及参数设计

1.1 支撑煤柱应力分布分析

支撑煤柱发生破坏失稳的主要原因是煤柱所承受的载荷大于其极限强度,在煤柱两侧形成塑性区。在静载作用下煤柱所受到的载荷为上覆岩层载荷^[8]。根据 WILSON^[9]提出的两区约束理论,煤柱分为塑性区和弹性核区,其中弹性区被塑性区所包围,并受到塑性区的约束。

假设采洞宽度为 L_c , 两采洞间煤柱宽度为 L_q , h 为上覆岩层平均厚度,容重为 γ_0 , 开采煤层厚度为 H , 则煤柱所承受的上覆岩层的载荷如图 1 所示,采洞处未开挖前原煤所受应力向两侧煤柱转移,根据有效区域理论^[10],煤柱所受载荷可等效为

$$P = \gamma_0 h(L_c + L_q)/L_q \quad (1)$$

上覆荷载使煤柱产生两边大中部小的竖向应力分布区,当内应力超过煤体强度,煤柱内部产生塑性区,并由两侧逐渐向中部发展^[11],煤柱的破坏失稳是典型的非线性过程,作为非线性理论分支的尖点突变理论分析法与煤柱的失稳演化过程更加接近^[12-13]。

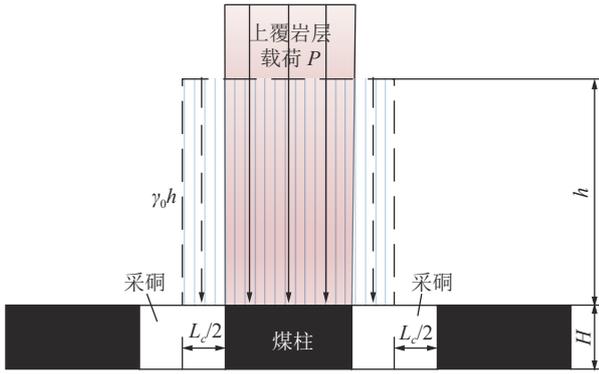


图 1 端帮开采煤柱承载示意

Fig.1 Diagram of the bearing model of coal pillar during highwall mining

根据尖点突变理论,煤柱临界失稳时,煤柱所受最大垂直应力,其值等于煤柱极限强度 σ_{zl} 。由陈彦龙推导公式^[4]可知,煤柱发生突变失稳临界条件为

$$\Delta = 2 \left[\frac{(L_q - 2X_q)e^2}{2X_q} - 1 \right]^3 + 9 \left[\frac{(L_q - 2X_q)e^2}{2X_q} - \frac{e^2}{4X_q\sigma_{zl}} PL_q + 1 \right]^2 = 0 \quad (2)$$

端帮开采后,煤柱两侧为邻空区,煤体必然由顶底板岩层向两侧挤出,在煤柱与顶板接触面产生剪应力。依据 Mohr-Coulomb 屈服准则^[11],应用于端帮开采中,可用直线代替摩尔强度包络线,其基础表达式可变换得到:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

其中: σ_1 为煤柱所受垂直应力, MPa; σ_3 为煤柱所受水平应力, MPa; c 为煤体的黏聚力, MPa; φ 为煤体的内摩擦角, (°)。

基于采矸和煤柱的应力分布的对称性,建立煤柱一侧力学分析模型(图 2),设煤层未开采前所受垂直应力为 $\gamma_0 h$,煤层侧压力系数为 λ ,煤柱水平应力由外向内逐渐增大,在塑性区与弹性区交界处达到最大值^[14],大小为 $\lambda \gamma_0 h$,对应的煤柱最大垂直应力 $\sigma_{1,max}$ 可表示为

$$\sigma_{1,max} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \lambda \gamma_0 h + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

在煤柱 x 轴方向上取一微单元体(图 3)进行受力分析,建立 x 轴方向上力平衡方程为

$$H\sigma_3 - H\left(\sigma_3 + \frac{\partial \sigma_3}{\partial x} dx\right) + [2c_0 + (2\sigma_1 + \gamma H) \tan \varphi_0] = 0 \quad (5)$$

式中, c_0 为煤柱与顶底板间接触面的黏聚力, MPa; φ_0 为接触面的内摩擦角, (°); γ 为所开采煤层容重, MN/m^3 。

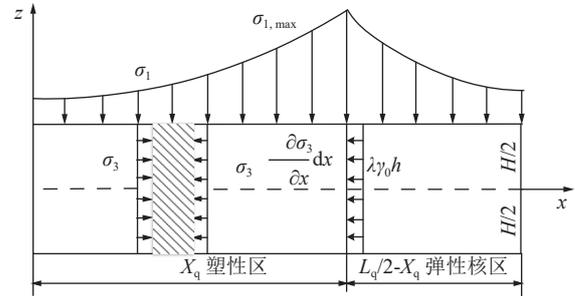


图 2 煤柱力学分析模型

Fig.2 Mechanical analysis model of web pillar

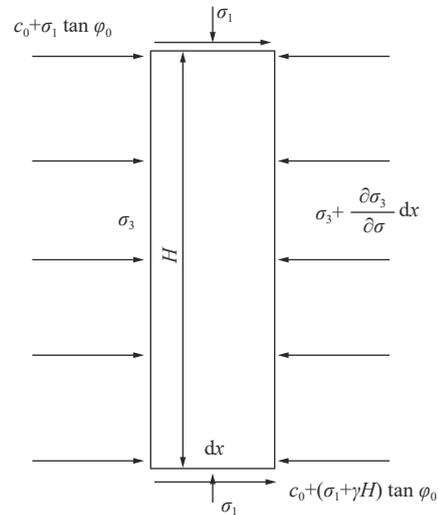


图 3 煤柱微元力学分析模型

Fig.3 Micro mechanical model of web pillar

联立式 (2) 和式 (5), 并代入边界条件: $x=0$ 煤柱边界处水平应力 $\sigma_3=0$ 进行求解, 获得煤柱塑性区内水平应力和垂直应力表达式:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_3^p &= \left[\frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} + \frac{\gamma H (1 - \sin \varphi)}{2(1 + \sin \varphi)} + \frac{c_0 (1 - \sin \varphi)}{\tan \varphi_0 (1 + \sin \varphi)} \right] e^{\frac{2 \tan \varphi_0 (1 + \sin \varphi)}{H(1 - \sin \varphi)} x} - \left(\frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} + \frac{\gamma H (1 - \sin \varphi)}{2(1 + \sin \varphi)} + \frac{c_0 (1 - \sin \varphi)}{\tan \varphi_0 (1 + \sin \varphi)} \right) \\ \sigma_1^p &= \left(\frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{c_0}{\tan \varphi_0} + \frac{\gamma H}{2} \right) e^{\frac{2 \tan \varphi_0 (1 + \sin \varphi)}{H(1 - \sin \varphi)} x} - \left(\frac{c_0}{\tan \varphi_0} + \frac{\gamma H}{2} \right) \\ 0 &\leq x \leq X_q \end{aligned} \right. \quad (6)$$

依据弹性核区应力分布规律和边界条件^[15], 在弹性区内, 垂直应力沿 x 轴方向上应力变化为

$$\sigma_1^e = \gamma_0 h \left[1 - \left(\frac{X_q}{x} \right)^2 \right] + \sigma_1^p(x=X_q) \left[\left(\frac{X_q}{x} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$X_q \leq x \leq \frac{L_q}{2}$$

1.2 支撑煤柱参数设计研究

端帮开采后煤柱支承应力重新分布,采矸载荷由两侧支撑煤柱平均分担,则:

$$\int_0^{X_q} (\sigma_1^p - \sigma_0) dx + \int_{X_q}^{L_q/2} (\sigma_1^e - \sigma_0) dx = \frac{1}{2} L_c \sigma_0 \quad (8)$$

令 $Y=2(1+\sin \varphi) X_q \tan \varphi_0 / (1-\sin \varphi) H$, 联立式 (6), 化简式 (8) 得:

$$\left(\frac{2c \cos \varphi}{1-\sin \varphi} + \frac{c_0}{\tan \varphi_0} + \frac{\gamma H}{2} \right) \times \left(e^Y + Y e^Y - \frac{2X_q}{L_q} Y e^Y - 1 \right) - 2 \left(\gamma_0 h - \frac{\gamma_0 h X_q}{L_q} + \frac{c_0}{\tan \varphi_0} + \frac{\gamma H}{2} \right) Y + \left(\frac{c_0}{\tan \varphi_0} + \frac{\gamma H}{2} \right) \frac{2X_q}{L_q} Y = \frac{L_c \gamma_0 h (1+\sin \varphi) \tan \varphi_0}{(1-\sin \varphi) H} \quad (9)$$

联立式 (6) 和式 (9), 化简得到关于煤柱极限强度 σ_{z1} 的函数表达式 M 和 N :

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 1 + 2 \tan \varphi (\sigma_{z1} - \sigma_{z1} \sin \varphi - 2c \cos \varphi) / \\ [4c \cos \varphi \tan \varphi_0 + 2c_0 (1 - \sin \varphi) + \\ \gamma H \tan \varphi_0 (1 - \sin \varphi)] \\ N = -2 + \frac{L_q}{X_q} = -2 + [(2\sigma_{z1} - 2\gamma_0 h) \ln(M)] / \\ \left[(1 + \ln(M)) \sigma_{z1} - \left(\frac{c_0}{\tan \varphi} + \frac{5\gamma_0 h}{2} \right) \ln(M) - \right. \\ \left. \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} - \frac{L_c \gamma_0 h (1 + \sin \varphi) \tan \varphi_0}{(1 - \sin \varphi) H} \right] \end{array} \right. \quad (10)$$

代入到式 (2), 获得煤柱极限强度 σ_{z1} 表达式:

$$9 \left[1 + \frac{e^2}{2} N - \frac{e^2 \gamma_0 h}{4 \sigma_{z1}} \times \left(2 + N + \frac{2(1 + \sin \varphi) \tan \varphi_0 L_c}{(1 - \sin \varphi) H \ln(M)} \right) \right]^2 + 2 \left(\frac{e^2}{2} N - 1 \right)^3 = 0 \quad (11)$$

根据强度理论, 端帮开采非均布载荷条件下煤柱安全储备系数 F_s 可表示为其极限强度 σ_{z1} 与所承受应力之比:

$$F_s = \frac{\sigma_{z1}}{\sigma_{1, \max}} \quad (12)$$

根据以往端帮开采工程实际应用经验, 一般要求支撑煤柱安全储备系数在 1.3 以上^[10]。将式 (12) 代入式 (6), 则可得到不同安全储备系数条件下煤柱塑性区最大允许宽度表达式:

$$X_q = \frac{H(1 - \sin \varphi)}{2(1 + \sin \varphi) \tan \varphi_0} \times \ln \left\{ \frac{1 + 2 \tan \varphi_0 (\sigma_{z1} - \sigma_{z1} \sin \varphi - 2c F_s \cos \varphi) / [4c F_s \cos \varphi \tan \varphi_0 + 2c_0 F_s (1 - \sin \varphi) + \gamma H F_s \tan \varphi_0 (1 - \sin \varphi)]}{1} \right\} \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (9) 中, 获得煤柱在不同安全储备系数条件下合理留设宽度计算公式:

$$L_q = \frac{e^Y Y^2 A}{I e^Y + S Y e^Y - G} \quad (14)$$

式中:

$$A = \frac{(\sigma_{z1} - F_s \gamma_0 h) H (1 - \sin \varphi)^2}{(1 + \sin \varphi) \tan \varphi_0};$$

$$I = \sigma_{z1} (1 - \sin \varphi) - \frac{L_c F_s (1 + \sin \varphi) \tan \varphi_0 \gamma_0 h}{H} + \frac{(2F_s c_0 + F_s \gamma H \tan \varphi_0) (1 - \sin \varphi)}{2 \tan \varphi_0};$$

$$S = \sigma_{z1} (1 - \sin \varphi) - 2F_s (1 - \sin \varphi) \gamma_0 h - \frac{(2F_s c_0 + F_s \gamma H \tan \varphi_0) (1 - \sin \varphi)}{2 \tan \varphi_0};$$

$$G = \sigma_{z1} (1 - \sin \varphi) + \frac{(2F_s c_0 + F_s \gamma H \tan \varphi_0) (1 - \sin \varphi)}{2 \tan \varphi_0};$$

$$Y = \ln \left[1 + \frac{2 \tan \varphi (\sigma_{z1} - \sigma_{z1} \sin \varphi - 2c F_s \cos \varphi)}{2c F_s (1 + \sin \varphi) + \gamma H F_s \tan \varphi (1 - \sin \varphi)} \right].$$

2 爆破振动作用对煤柱稳定性影响及参数设计

2.1 爆破地震波传播衰减规律

因爆区距端帮开采区域较远, 爆破冲击波衰减为地震波作用于支撑煤柱, 产生瞬时动应力效应^[16], 受频繁爆破地震波作用, 煤柱可能发生失稳。依据国家爆破安全规程 (GB6722—2014) 和工程经验, 采用瞬时最大振动速度和主振频率表征爆破地震波的破坏力^[17]。煤柱在爆破地震波作用下产生的振动响应, 受爆源与煤柱高程差的影响较大^[18]。若应用经典萨道夫斯基公式对煤柱内质点的振动响应速度进行预测, 将产生极大的误差, 与工程实际不符。

蒋楠^[19]、路世伟^[20]研究了考虑高程差影响的露天转地下开采条件下爆破振动的传播特性, 优化了萨道夫斯基公式。据此, 在端帮开采相似工程条件下, 忽略地震波的反射和折射影响, 考虑爆心距、高程差、单响爆破装药量的爆破振动速度衰减规律公式可表示为

$$v = k \left(\frac{\sqrt{Q}}{R} \right)^{\beta_1} \left(\frac{Z}{R} \right)^{\beta_2} \quad (15)$$

式中: v 为测点因爆破荷载作用引起的瞬时最大振动响应速度, cm/s; R 为测点与爆源间的水平距离, m; Z 为测点与爆源之间的垂直距离, m; Q 为微差爆破下单响装药量, kg; k 为场地影响系数; β_1, β_2 分别为不

同影响因素下的衰减系数。

2.2 爆破振动作用下支撑煤柱动力响应模型建立

爆破地震波作用下煤柱的振动响应是瞬时、随机、不断衰减的过程,爆破作用于煤柱上的振动激励是有限的,且煤柱整体结构的动态特性如质量、阻尼、刚度等不受爆破参数和时间的影响而发生改变,因此,支撑煤柱整体结构系统可视为线性不变的系统,其振动响应符合傅里叶变换和拉氏变换分析的条件^[21]。在此基础上,将煤柱视为具有黏性阻尼的线弹性物体,忽略其振动过程中造成的局部损伤与地震波的折射与反射,煤柱的振动响应过程可简化为线性、简谐振动下的受迫振动响应分析^[22]。

将最大硐深处煤柱单元作为研究对象,建立爆破动载下煤柱力学响应模型(图4),将煤柱单元划分为多个条状单元体进行分析,各微元单元体在爆破动载下的瞬时最大动应力响应^[23]可表示为

$$\sigma_f = \rho a H \quad (16)$$

式中: a 为爆破作用下煤柱内质点振动加速度最大值, m/s^2 ; ρ 为煤柱的密度, 10^6 kg/m^3 。

其中,煤柱内质点振动加速度最大值 a ,可通过主振频率和式(15)求解得到的瞬时最大振动速度响应进行预测:

$$a = \frac{2\pi f v}{100} \quad (17)$$

式中: f 为煤柱内质点主要振动频率,Hz。

邓冰杰^[24]基于概率论,建立了对爆破主振频率的预测公式:

$$f = K Q^{\alpha_1} \sqrt{R^2 + Z^2}^{\alpha_2} \quad (18)$$

式(18)由所参考文献得出,爆破振动主振频率主要与单段最大炸药量和爆心距有关。在此基础上,考虑高程差的影响,通过爆源和测点间水平距离和高程差关系式来表示爆心距。式中: K 为场地影响系

数; α_1, α_2 为主振频率衰减系数。

煤柱条块在不同爆心距、高程差、单响爆破装药量下的瞬时最大动应力响应可表示为:

$$\sigma_f = \frac{2\pi\rho H k K Q^{\frac{\beta_1}{3} + \alpha_1} Z^{\beta_2} (R^2 + Z^2)^{\frac{\alpha_2}{2}}}{100 R^{\beta_1 + \beta_2}} \quad (19)$$

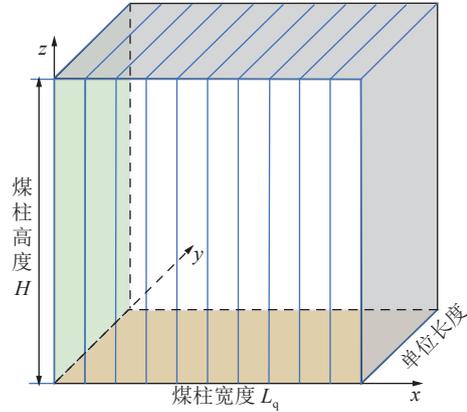


图4 煤柱离散单元分析模型

Fig.4 Discrete element analysis model of coal pillar

2.3 爆破动载下煤柱参数设计

应用拟静力法确定爆破动载下煤柱支承应力变化规律,建立考虑爆破动载影响下煤柱合理留设宽度计算公式。通过拟静力法^[25-26],可将爆破振动作用下煤柱产生的动应力响应,简化为等效静力施加于煤柱上,将动载荷问题视为静载荷问题进行分析,其计算公式^[23]为:

$$\sigma_e = \beta \sigma_f \quad (20)$$

式中: σ_e 为爆破动荷载转化为静应力的等效值,MPa; β 为动力折减系数,《采矿手册》中的取值范围在0.1~0.3^[27]。

朱晓玺^[28]通过研究分析得到,动力折减系数 β 的取值与质点瞬时最大振动速度 v 的大小有关。参考各行业规范中拟静力法的计算规定^[29],动力折减系数取值范围见表1。

表1 爆破动力折减系数

Table 1 Dynamic reduction factor of blasting

瞬时最大振动速度 $v/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	≤ 1.5	1.5 ~ 5.5	5.5 ~ 11	> 11
β	1/4	1/7	1/10	1/12

在爆破振动作用下,煤柱应能承受的极限应力的大小,应在静载条件下煤柱所受最大应力的基础上,考虑爆破作用引起的支撑煤柱动应力响应变化。即,爆破振动作用下,基于拟静力法,煤柱所受到的瞬时最大垂直应力应为

$$\sigma_{1,\max}^* = \sigma_{1,\max} + \sigma_e \quad (21)$$

根据强度理论,由煤柱极限强度和煤柱所受最大应力之比可得爆破振动下煤柱安全系数 F_s^* 为

$$F_s^* = \frac{\sigma_{z1}}{\sigma_{1,\max}^*} = \frac{\sigma_{z1}}{\sigma_{1,\max} + \sigma_e} \quad (22)$$

式中: $\sigma_{1,\max}$ 为依据式(12)求得的静载下无爆破动载影响时煤柱承受的最大应力,MPa。

结合之前所述,煤柱发生突变失稳的必要条件的基础上,考虑安全储备系数,将式(22)代入式(13)中,求解得到动载条件下煤柱的塑性区宽度 X^* 及待定参数 Y^* 值,并结合式(14),得到考虑爆破振动作用下,煤柱合理留设宽度为

$$L_q^* = \frac{1}{\&} \frac{e^{Y^*} Y^{*2} A}{I e^{Y^*} + S Y^* e^{Y^*} - G} \quad (23)$$

式中, $\&$ 为待定系数,可表示为

$$\& = \frac{\sigma_{z1} - F_s \gamma_0 h}{\sigma_{z1} - F_s \gamma_0 h - \sigma_c F_s} \times \left[1 - \frac{(1 - \sin \varphi)(e^{Y^*} + Y e^{Y^*} - 1) \sigma_c F_s}{I e^{Y^*} + S Y^* e^{Y^*} - G} \right] \quad (24)$$

3 煤柱稳定性计算与实例分析

3.1 工程背景与现场测振试验

应用 EML340 型端帮采煤机回采平朔安太堡露天矿南帮 4 号煤层滞留煤,南帮岩层至上而下为黄

土、泥砂岩互层组、4 煤、泥砂岩互层组、9 煤、砂岩(图 5)。端帮开采高度为 5 m,宽度为 3.3 m,煤层最大埋深为 98.6 m。煤岩层物理力学参数见表 2。

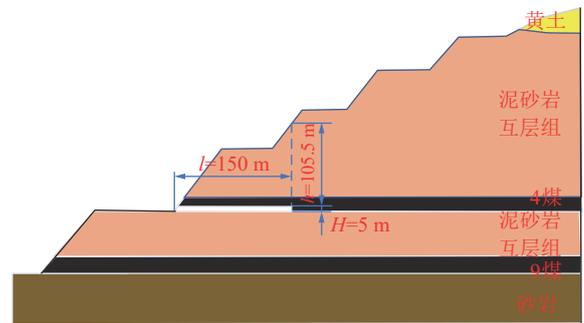


图 5 端帮开采模型示意

Fig.5 Model of highwall mining

现场测振:振动监测点的布设如图 6 所示,1~2 号监测点布设在煤柱前方,间距为 80 m;3~4 号监测点位于煤柱上方的平盘上,间距为 40 m;5~6 号监测点位于端帮上部的平盘上,间距为 40 m。

表 2 煤岩层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of coal and rock

岩性	平均层厚/m	最大矿深处岩层厚度/m	容重 γ (kN·m ⁻³)	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ	黏聚力 C /MPa	内摩擦角 φ (°)
黄土	36	0	19.5	8.6	0.31	0.028	22
泥砂岩互层组	133	98.6	24.6	2 850	0.28	0.87	33
4煤	11.9	11.9	14.1	1 500	0.31	0.36	36.8
泥砂岩互层组	36.5	36.5	24.6	2 850	0.28	0.87	33
9煤	12.8	12.8	15.1	1 500	0.31	0.36	36.8
砂岩	100	100	25.2	5 425	0.2	1.1	35

基于图 6 所示布设的 6 个监测点,对不同爆源位置和爆破参数下的爆破数据进行采集,采集数据见表 3。其中,爆破方式采用多排逐孔微差爆破,共统计了 4 次爆破作业的采集信息,共计 24 组有效数

据,主要对垂直重力方向上的振动速度响应进行分析,其随爆破参数的变化如图 7 所示。

采用软件 origin 对监测数据结合式(18)进行数学拟合,得到该工程实况下推荐的瞬时最大振动速度预测模型为

$$\begin{cases} v_x = 227.93 \left(\frac{\sqrt{Q}}{R} \right)^{1.764} \left(\frac{Z}{R} \right)^{-0.401} \\ v_y = 196.37 \left(\frac{\sqrt{Q}}{R} \right)^{1.732} \left(\frac{Z}{R} \right)^{-0.319} \\ v_z = 269.1 \left(\frac{\sqrt{Q}}{R} \right)^{1.8112} \left(\frac{Z}{R} \right)^{-0.4533} \end{cases} \quad (25)$$

同样,拟合得到该工程背景下爆破主振频率预测模型为

$$\begin{cases} f_x = 517 Q^{0.054} \sqrt{R^2 + Z^2}^{-0.562} \\ f_y = 498 Q^{0.047} \sqrt{R^2 + Z^2}^{-0.522} \\ f_z = 482 Q^{0.057} \sqrt{R^2 + Z^2}^{-0.572} \end{cases} \quad (26)$$

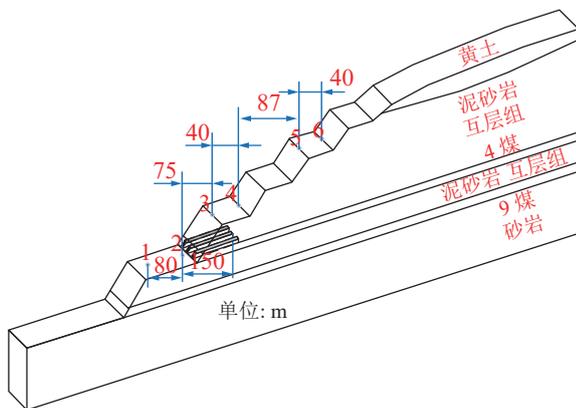


图 6 监测点布设示意

Fig.6 Schematic of monitoring point layout

表3 测振数据统计
Table 3 Data statistics of vibration

序号	Q/kg	Z/m	R/m	$v_x/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	f_x/Hz	$v_y/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	f_y/Hz	$v_z/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	f_z/Hz
1	396	120	1 210.6	0.070 7	13.2	0.059 3	16.2	0.068 0	11.7
2	396	120	1 290.6	0.064 8	12.7	0.054 2	15.7	0.062 2	11.3
3	396	220	1 365.6	0.047 1	12.4	0.041 2	15.2	0.043 8	10.9
4	396	220	1 405.6	0.045 2	12.2	0.039 6	15.0	0.040 2	10.7
5	396	283	1 492.6	0.037 7	11.7	0.033 6	14.5	0.038 1	10.4
6	396	283	1 532.6	0.036 3	11.6	0.032 3	14.3	0.030 2	10.2
7	484	90	866.6	0.140 8	16.1	0.117 1	19.5	0.137 4	14.3
8	484	90	946.6	0.124 9	15.3	0.103 4	18.6	0.121 2	13.6
9	484	190	1 021.6	0.083 4	14.7	0.073 1	17.9	0.082 0	13.0
10	484	190	1 061.6	0.079 2	14.4	0.069 3	17.5	0.077 6	12.7
11	484	253	1 148.6	0.063 4	13.8	0.056 6	16.8	0.062 3	12.2
12	484	253	1 188.6	0.060 8	13.5	0.053 9	16.5	0.059 4	11.9
13	440	150	1 094	0.077 3	14.1	0.067 8	17.2	0.076 9	12.5
14	440	150	1 174	0.071 7	13.5	0.061 3	16.6	0.069 6	12.0
15	440	250	1 249	0.051 7	13.1	0.047 7	16.0	0.052 5	11.5
16	440	250	1 289	0.051 3	12.8	0.045 7	15.8	0.050 2	11.3
17	440	313	1 376	0.043 5	12.4	0.039 2	15.2	0.042 0	10.9
18	440	313	1 416	0.041 4	12.2	0.037 4	15.0	0.040 4	10.7
19	72	41	820	0.067 9	15.0	0.058 3	18.3	0.064 0	13.2
20	72	41	900	0.059 8	14.2	0.047 3	17.5	0.056 1	12.6
21	72	141	975	0.032 7	13.6	0.028 5	16.8	0.031 4	12.0
22	72	141	1 015	0.030 9	13.3	0.027 0	16.4	0.029 6	11.7
23	72	204	1 102	0.023 8	12.7	0.021 4	15.7	0.022 9	11.2
24	72	204	1 142	0.022 7	12.5	0.020 3	15.4	0.021 8	11.0

注： Q 为单段最大装药量； Z 为测点与爆源间垂直距离； R 为测点与爆源间水平距离； v_x 和 f_x 分别为沿煤柱走向方向上测点振动的最大瞬时振动速度和主振频率； v_y 和 f_y 分别为沿煤柱倾向方向上测点振动的最大瞬时振动速度和主振频率； v_z 和 f_z 分别为重力垂直方向上测点振动的最大瞬时振动速度和主振频率。

将现场测振数据代入式(19)，通过计算得到采硐深最大处煤柱产生的瞬时最大动应力响应值与单药量呈正比例关系，与煤柱与爆源间水平距离和高程差呈反比例关系(图8)。

3.2 安太堡露天矿支撑煤柱设计

根据建立的端帮开采支撑煤柱应力分布模型，对基于不同安全储备系数要求下，煤柱的塑性区宽度与煤柱合理留设宽度进行计算和设计，计算步骤如下：

1) 计算煤柱受到的极限应力与强度。根据表2数据，煤体黏聚力和内摩擦角，分别与顶底板交界面黏聚力和内摩擦角均取相同值，代入式(8)中得到此露天煤矿端帮开采采高5 m时，支撑煤柱极限应力与塑性区宽度关系式为

$$\sigma_{1\max} = 1.953 6e^{1.2x_q} - 0.515 8 \quad (27)$$

依据煤柱突变失稳判据，令 $|\lambda| \approx 0$ ，代入式(11)可知，煤柱强度 $\sigma_{z1} = 9.547 \text{ MPa}$ ，代入式(14)，得到静载荷下煤柱留设宽度 L_q 为3.21 m时，最大采深处的煤柱处于临界失稳状态。

2) 对比分析动静载条件下煤柱合理留设宽度。煤柱安全系数 F_s 取1.3时，由式(12)得到支撑煤柱所受最大应力 $\sigma_{1\max} = 7.344 \text{ MPa}$ 。分别代入式(13)与式(14)求解，则有不考虑爆破振动影响下，煤柱极限应力平衡时塑性区总宽度 $2X_q = 2.33 \text{ m}$ ，煤柱合理留设宽度 L_q 应至少为4.32 m。

依据式(22)，在爆破动载作用下，煤柱塑性区宽度和稳定性随煤柱条块受到的等效动应力响应的变化规律如图9所示，可见，随着爆破动载效应

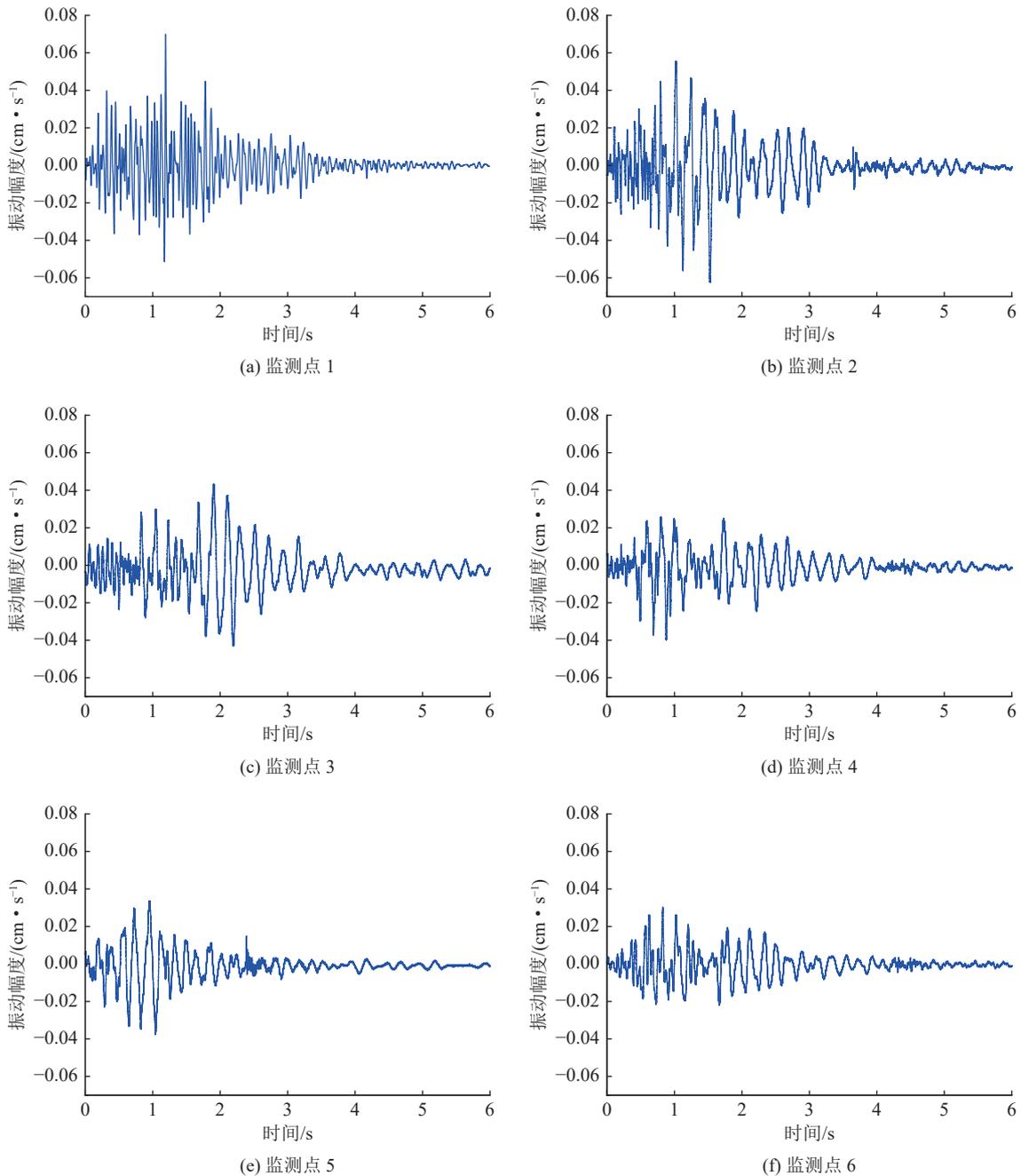


图7 1~6号测点在垂直重力方向上振动监测数据

Fig.7 Vibration monitoring data of measuring points in vertical gravity direction

的增加,煤柱塑性区宽度逐渐增大,稳定性呈线性下降趋势。若不考虑爆破动载影响,进行煤柱参数设计,将导致煤柱留设宽度较小,增加煤柱发生失稳的风险。通过计算可得,若不考虑爆破动载作用的影响,煤柱设计留设宽度取4.32 m,当煤柱受到爆破等动载作用影响时,煤柱的稳定性将降低至1.3以下,低于端帮开采下支撑煤柱安全储备系数规范要求,不利于煤柱的长期稳定,有发生失稳破坏的风险。

基于现场爆破作业情况,通过推导计算可得,煤

柱宽度设计留设5 m,当最大单响药量小于85 t,高程差大于15 m,爆心直线距大于100 m,即爆破动载等效静载应力不超过0.35 MPa时,煤柱稳定性系数均能满足1.3的要求。

安太堡露天煤矿,按照采高5 m、采宽3.3 m、留设宽5 m煤柱的参数设计,已进行端帮开采半年以上。工程实践表明:端帮采煤机在回采过程中没有发生压埋事故,煤柱的整体稳定性良好(图10),可保证端帮机进行正常回采工作,验证了边坡留设支撑煤柱宽度的合理性。

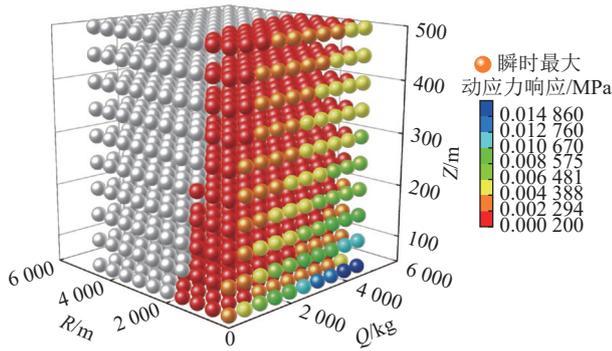


图8 煤柱受到瞬时最大动应力响应与爆破参数间关系

Fig.8 Relationship between instantaneous maximum dynamic stress response of coal pillar and blasting parameters

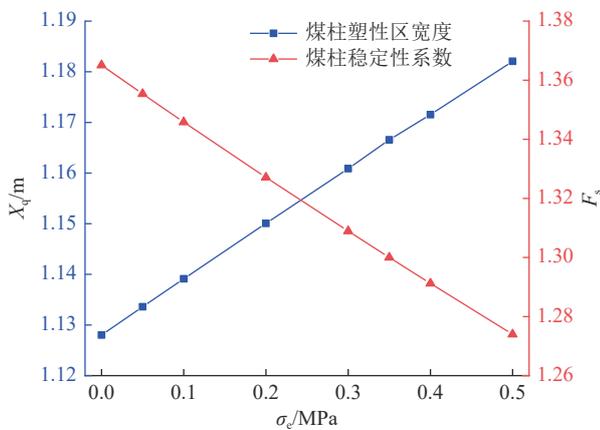


图9 煤柱稳定性及塑性区宽度随爆破动载变化规律

Fig.9 Variation law of stability and plastic zone width of coal pillar with blasting dynamic load

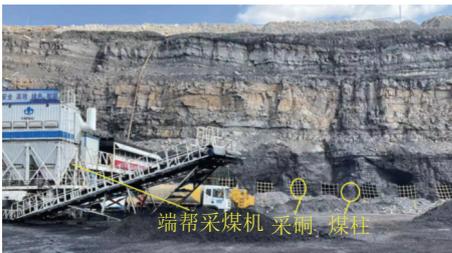


图10 端帮开采工艺现场应用

Fig.10 Field application of highwall mining

4 结 论

1) 根据极限平衡理论,对煤柱的支承应力与极限强度进行分析计算,兼顾安全储备系数要求,得出了煤柱最大允许塑性屈服区宽度及煤柱留设宽度理论表达式。

2) 建立了支撑煤柱三维简谐振动响应模型,研究表明:爆破振动对支撑煤柱稳定性影响较大,爆破动载作用下煤柱瞬时最大动应力响应与单响药量呈正相关关系、与高程差和水平距离呈负相关关系;随

煤柱瞬时最大动应力响应增加,煤柱塑性区宽度呈正比例增大,煤柱安全系数以近似线性规律减小。

3) 提出了动-静载作用下端帮开采支撑煤柱参数设计方法,据此设计了平朔安太堡露天煤矿支撑煤柱留设宽度,经工程实践,按此宽度留设支撑煤柱,能确保 EML340 端帮采煤机实现安全、高效回采,验证了支撑煤柱参数设计方法的合理性。

参考文献(References):

- [1] 郝玉成,胡存虎,罗怀廷.露天煤矿端帮开采技术的研究与探讨[J].露天采矿技术,2012(S2):27-30.
HAO Yucheng, HU Cunhu, LUO Huaiting. Research and discussion on end-side mining technology of open-pit coal mine[J]. *Opencast Mining Technology*, 2012(S2): 27-30.
- [2] HARTCHER, P. & CASE, G. The experience of Addcar in high-wall mining operations, 2019.
- [3] VERMA C P, PORATHUR J L, THOTE N R, *et al.* Empirical approaches for design of web Pillars in Highwall Mining: review and analysis[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32: 587-599.
- [4] 陈彦龙,吴豪帅.露天矿端帮开采下的支撑煤柱突变失稳机理研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(5):859-865.
CHEN Yanlong, WU Haoshuai. Catastrophe instability mechanism of rib pillar in open-pit highwall mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(5): 859-865.
- [5] 王东,姜聚宇,韩新平,等.褐煤露天矿端帮开采边坡支撑煤柱稳定性研究[J].中国安全科学学报,2017,27(12):62-67.
WANG Dong, JIANG Juyu, HAN Xinping, *et al.* Stability of supporting coal pillar for slope highwall mined in lignite surface mine[J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(12): 62-67.
- [6] 吴豪帅.动静载荷下端帮开采中的条带支撑煤柱的稳定性研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
WU Haoshuai. Stability analysis of rib pillar in highwall mining under dynamic and static loads[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [7] 王旭春,黄福昌,张怀新,等. AH威尔逊煤柱设计公式探讨及改进[J].煤炭学报,2002,27(6):604-608.
WANG Xuchun, HUANG Fuchang, ZHANG Huaixin, *et al.* Discussion and improvement for A. H. Wilsons coal pillar design[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(6): 604-608.
- [8] 谭毅,郭文兵,赵雁海.条带式Wongawilli开采煤柱系统突变失稳机理及工程稳定性研究[J].煤炭学报,2016,41(7):1667-1674.
TAN Yi, GUO Wenbing, ZHAO Yanhai. Engineering stability and instability mechanism of strip Wongawilli coal pillar system based on catastrophic theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1667-1674.
- [9] ZIPF R K, MARK C. Ground control for highwall mining in the United States[J]. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2005, 19(3): 188-217.
- [10] JOHN L PORATHUR, S KAREKAL, P PALROY. Web pillar design approach for Highwall Mining extraction[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 64: 73-83.
- [11] 施高萍,祝江鸿,李保海,等.矩形巷道孔边应力的弹性分

- 析[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2587-2593.
- SHI Gaoping, ZHU Jianghong, LI Baohai, *et al.* Elastic analysis of hole-edge stress of rectangular roadway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(9): 2587-2593.
- [12] JIANG Juyu, LU Ye, WANG Dong, *et al.* Slope stability calculation method for highwall mining with open-cut mines[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 209.
- [13] JIANG Juyu, ZHANG Zhuowei, WANG Dong, *et al.* Web pillar stability in open-pit highwall mining[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2022, 9: 464.
- [14] 郭 仓, 谭志祥, 李培现, 等. 基于FLAC^{3D}的条带开采煤柱稳定性分析[J]. *现代矿业*, 2012, 27(2): 5.
- GUO Cang, TAN Zhixiang, LI Peixian, *et al.* Stability analysis of strip mining coal pillar based on FLAC3D[J]. *Modern Mining*, 2012, 27(2): 5.
- [15] 吴立新, 王金庄. 煤柱区宽度计算及其影响因素分析[J]. *煤炭学报*, 1995, 20(6): 625-631.
- WU Lixin, WANG Jinzhuang. Calculation of yield zone width of coal pillar and analysis of influencing factors[J]. *Journal of China Coal Society*, 1995, 20(6): 625-631.
- [16] 马 力, 涂宇航, 马成卫, 等. 露天台阶深孔大孔距小排距爆破参数优化[J]. *中国科技论文*, 2019, 14(5): 506-509.
- MA Li, TU Yuhang, MA Chengwei, *et al.* Blasting parameters optimization for larger hole spacing and smaller burden of deep hole bench for surface coal mine[J]. *China Sciencepaper*, 2019, 14(5): 506-509.
- [17] 陈光辉, 李夕兵, 董陇军, 等. 排土场与爆破载荷共同作用下的露天矿边坡稳定性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(5): 113-118.
- CHEN Guanghui, LI Xibing, DONG Longjun, *et al.* Stability analysis for open-pit mine slope under waste dump and blasting load[J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(5): 113-118.
- [18] 孟祥甜. 露天矿边坡动载响应特性的数值模拟研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
- MENG Xiangtian. Research on the slope dynamic response characteristics of numerical simulation[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2015.
- [19] 蒋 楠. 露天转地下开采边坡爆破动力特性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- JIANG Nan. Study on blasting dynamic characteristics of open pit to underground mining slope[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [20] 路世伟. 露天转地下开采边坡爆破振动传播特性及安全判据研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
- LU Shiwei. Propagation characteristics of blasting vibration in slopes subjected to open-pit to underground mining and safety criterion[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [21] 刘习军, 贾启芬, 张素侠. 振动理论及工程应用(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 239-047.
- LIU Xijun, JIA Qifen, ZHANG Suxia. Theory of Vibration with Applications(Second Edition) [M]. Beijing: Machinery industry press, 2017: 239-047.
- [22] MAURICE Petyt. Introduction to finite element vibration analysis[M]. New York: Cambridge Vniversity Press, 1990.
- [23] TERZAGHI K. Mechanisms of landslides, engineering geology (Berdey) volume[M]. US, Geological Society of America, 1950.
- [24] 邓冰杰, 王林峰, 李 振, 等. 基于概率论的爆破振动傅里叶主频预测[J]. *振动与冲击*, 2017, 40(12): 46-54.
- DENG Bingjie, WANG Linfeng, LI Zhen, *et al.* Fourier frequency prediction of blasting vibration based on the probability theory[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 40(12): 46-54.
- [25] DP ADHIKARY, B SHEN, MED FAMA. A study of highwall mining panel stability[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39(5): 643-659.
- [26] PORATHUR J L, SRIKRISHNAN S, VERMA C P, *et al.* Slope stability assessment approach multiple seams Highwall Mining extractions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70: 444-449.
- [27] YOSHIDA N, KOBAYASHI S, SUETOMI I, *et al.* Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(3): 205-222.
- [28] 朱晓玺. 爆破振动作用下边坡稳定性分析[D]. 唐山: 华北理工大学, 2015.
- ZHU Xiaoxi. Research on the stability of slope under the action of blasting vibration[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2015.
- [29] SASAOKA T, KARIAN T, HAMANAKA A, *et al.* Application of highwall mining system in weak geological condition[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2016, 3: 311-321.