



动载扰动下深井护巷煤柱失稳破坏机理

邢闯闯 王俊 宁建国 沈圳

引用本文：

邢闯闯, 王俊, 宁建国, 等. 动载扰动下深井护巷煤柱失稳破坏机理[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 29–36.
XING Chuangchuang, WANG Jun, NING Jianguo. Instability failure mechanism of coal pillar in deep mine under dynamic disturbance[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 29–36.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1667>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑动载扰动作用的窄煤柱巷道底板失稳机制

Instability mechanism of narrow coal pillar roadway floor considering dynamic load disturbance
煤炭科学技术. 2022, 50(2): 56–64 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4531ea84-2048-4804-adca-2ab6dce7799f>

动载扰动下深部大断面硐室围岩“帮-顶”联动失稳机理

Mechanism of connected instability of “rib-roof” in deep large section chamber under dynamic disturbance
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 23–33 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0c72ddac-ff77-4acd-9f23-80b6644eb38b>

二次采动影响下区段煤柱破坏机制及围岩控制技术

Study on coal pillar failure mechanism and surrounding rock control technology under influence of secondary mining
煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8d4eb05e-7552-462a-9fc8-ad037cdb81d0>

动静载作用下端帮开采支撑煤柱参数设计方法

Parameter design of coal pillar in highwall mining under action of dynamic–static load
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 53–62 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0125>

冲击倾向性煤岩动静载下破坏机理及声发射特性研究

Study on failure mechanism and acoustic emission characteristics of outburst proneness coal rock under dynamic and static loading
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 57–63 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.03.006>

煤矿地下水库煤柱坝体失稳机理及前兆信息

Research on instability mechanism and precursory information of coal pillar dam of underground reservoir in coal mine
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 36–49 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1906>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

邢闯闯,王俊,宁建国,等.动载扰动下深井护巷煤柱失稳破坏机理[J].煤炭科学技术,2023,51(3):29-36.
XING Chuangchuang, WANG Jun, NING Jianguo, et al. Instability failure mechanism of coal pillar in deep mine under dynamic disturbance[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 29-36.

动载扰动下深井护巷煤柱失稳破坏机理

邢闯闯^{1,2},王俊^{1,2},宁建国^{1,2},沈圳^{1,2}

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:深部矿井护巷煤柱常处于“三高一扰动”的复杂环境,护巷煤柱稳定性对煤矿通风、运输与行人起着关键作用。针对动载扰动下深井护巷煤柱已发生突变失稳的问题,以新河煤矿-980 m水平3煤层6302工作面南部集中大巷保护煤柱为工程背景,基于FLAC^{3D}模拟软件研究了动载扰动下深部护巷煤柱破坏失稳演化过程,分析了动载强度、煤柱尺度对煤柱动力破坏演化的影响规律,进而建立了护巷煤柱动力失稳尖点突变失稳模型和判别式,揭示了动载作用下深井护巷煤柱破坏特征及突变失稳机理。研究表明:①增大护巷煤柱尺寸能够提高稳定性,减小其失稳破坏的几率;②外部动载冲击强度越大,护巷煤柱易发生整体失稳破坏;③基于护巷煤柱承载力学模型,利用尖点突变模型和弹性薄板理论推演了与外部动载强度、煤柱尺寸等因素有关的煤柱稳定性判别式,提出了动载扰动下深井护巷煤柱失稳破坏判别方法,并进行了工程验证。研究成果丰富了煤柱失稳类冲击地压的预防和控制理论体系,为现场工作面采护巷煤柱的留设及维护提供可靠的理论指导。

关键词:保护煤柱;煤柱破坏;动载冲击;围岩控制;失稳判别式

中图分类号:TD322 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)03-0029-08

Instability failure mechanism of coal pillar in deep mine under dynamic disturbance

XING Chuangchuang^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, NING Jianguo^{1,2}, SHEN Zhen^{1,2}

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The coal pillar of roadway protection in deep mine is often in the complex environment of three high and one disturbance, the stability of coal pillar plays a key role in coal mine ventilation, transportation and pedestrians. Aiming at the problem of sudden instability of coal pillar in deep roadway protection under dynamic load disturbance, based on the engineering background of the southern concentrated roadway protection coal pillar in 6302 working face of No.3 coal seam in -980 m level of Xinhe Coal Mine, the failure and instability evolution process of coal pillar in deep roadway protection under dynamic load disturbance is studied based on FLAC^{3D} simulation software. The influence of dynamic load intensity and coal pillar scale on the dynamic failure evolution of coal pillar is analyzed, and then the dynamic instability cusp catastrophe instability model and discriminant of coal pillar in deep roadway protection are established. The failure characteristics and catastrophe instability mechanism of coal pillar in deep roadway protection under dynamic load are revealed. The results show that: ① Increasing the size of coal pillar can improve the stability and reduce the probability of instability failure; ② The greater the impact strength of external dynamic load, the overall instability of coal pillar is easy to occur; ③ Based on the bearing capacity model of coal pillar, the discriminant of coal pillar stability related to external dynamic load strength and coal pillar size is deduced by using cusp catastrophe model and elastic thin plate theory, the discriminant method of instability failure of coal pillar in deep mine under dynamic load disturbance is put forward and verified by engineering. The research results enrich the theoretical system of prevention and control of rock burst caused by coal pillar instability, provide reliable theoretical guidance for the retention and maintenance of coal pillars

收稿日期:2022-09-06 责任编辑:朱恩光 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2022-1667

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51904163);国家自然科学基金面上资助项目(52074170)

作者简介:邢闯闯(1990—),男,河南商丘人,硕士研究生。E-mail:15275284207@139.com

通讯作者:王俊(1988—),男,山东济宁人,副教授,博士。E-mail:wangjunsdkj@126.com

in the field working face, and provide theoretical basis for the safe and efficient mining of deep working face.

Key words: protective coal pillar; numerical simulation; dynamic load impact; theoretical model; instability discriminant

0 引言

近年来,煤柱型冲击地压灾害事故频率不断增加,严重威胁矿井的生产安全^[1-2]。例如2016年8月15日0时33分,山东能源肥矿集团梁宝寺能源有限责任公司发生了煤柱型冲击地压事故,造成2人死亡。2019年8月2日12时24分,开滦(集团)有限责任公司唐山矿业分公司也发生了煤柱型冲击地压事故,造成了12人伤亡,直接经济损失高达614.024万元。实践表明,煤柱型冲击地压一般具有隐蔽性强、无明显前兆特征等特点,造成设备破坏、巷道变形和人员伤亡等事故,给矿井的安全生产带来严重威胁。因此,有必要开展煤柱动力失稳机理研究,以期对煤柱型冲击地压预警与防治提供理论依据。

国内学者针对煤柱稳定性问题进行了大量的研究。部分学者从静力学角度进行了大量的试验。殷志强等^[3]通过分离式霍普金森压杆试验,分析了不同静载下煤样的动态力学特性,得出峰值应力随静载增大而增大,峰值应变随静载增大而减小的结论。何永琛^[4]通过对煤岩组合体试件进行单轴压缩试验,获得了不同煤岩组合体试件的破坏形态及峰值应变等变化特征。艾迪昊等^[5]通过对不同粒度的型煤进行单轴压缩试验,得出型煤的破坏可分为压实,初始破裂,加速破裂和卸压4个阶段。李成武等^[6]通过室内试验和现场试验研究了煤体静载破坏中低频磁场时、频谱特征,并结合微震信号提出了低频磁信号的产生机制。

也有学者从动力学的角度,探讨了煤柱稳定性问题。徐青云等^[7]采用理论分析、数值模拟和现场实测等方法,指出窄煤柱在受到剧烈采动影响时,主要在其中上部区域发生变形破坏。姜学伟^[8]通过分析房采区煤柱在采动影响下围岩受力、煤柱破坏变形状态等得出了煤柱保持稳定性所必须的弹性区宽度计算公式,并作为判断煤柱是否破坏失稳的依据。李峰等^[9]基于LS-DYNA有限元分析软件的HJC本构模型,模拟不同动载强度下煤柱的动态损伤过程。结果表明,应变率相同时,煤柱受动载荷越大,破坏越严重。王方田等^[10]将动载荷以应力波的形式作用在煤体上,来分析不同动载荷烈度下煤柱坝体的动力响应机制,发现巷道围岩塑性区发育面积及深度显著增加,竖向应力积聚强度增大,并与动载荷烈度

成正比。丛利等^[11]通过数值模拟对相邻工作面回采中和回采后3次高强度开采扰动对煤柱内应力变化情况的研究,得出煤柱内布置的联络巷会加剧巷道围岩的高应力集中,在外部动载扰动下,极易达到冲击载荷并诱发冲击的结论。因煤柱在外部动载扰动下的破坏失稳机理极其复杂,当前的理论研究和实践仍需进一步完善。因此针对不同尺寸深井护巷煤柱在外部动载扰动下的破坏特征和突变失稳机制开展了详细研究。

首先,采用数值模拟分析了动载冲击下煤柱失稳特征;其次,建立了动载作用下高静载煤柱突变失稳力学模型,推导了煤柱稳定性判别准则,揭示了动载作用下深井煤柱突变失稳机理,以期对煤柱稳定性控制提供参考。

1 深井护巷煤柱数值模型的建立

1.1 模型建立与参数选择

利用FLAC^{3D}软件建立“顶板-煤柱-底板”数值计算模型,模型宽高比分别设置为4、6、8和10,煤层高度保持为3 m。图1为宽高比为10的数值计算模型,模型共计9层,7种岩性,模型尺寸为34 m×34 m×39 m,共划分62 820个单元网格。参考相关数值计算经验^[12-13],顶底板岩层采用各向同性弹性模型,煤层采用应变软化模型。煤层节理、裂隙发育,室内试验获得的煤样物理力学参数很难直接用于数值计算。因此,采用试错法拟合煤柱强度公式以校核煤柱力学参数。相关学者提出了多种煤柱强度公式^[14],其中Salamon公式能够准确描述宽高比为2~20时的煤柱强度,计算结果精确度能够满足现场要求,可用于计算现场保护煤柱的强度^[15]。因此,采

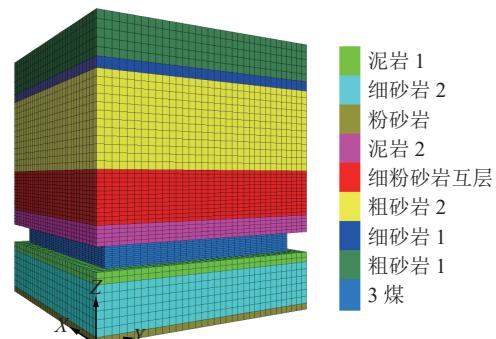


图1 数值计算模型
Fig.1 Numerical calculation model

用 Salamon 公式校正数值模型计算结果。

$$S_p = 7.716 \frac{W^{0.46}}{H^{0.66}} \quad (1)$$

式中: S_p 为保护煤柱强度, MPa; W 为保护煤柱宽度, m; H 为保护煤柱高度, m。

采用试错法时,首先建立“顶板-煤柱-底板”数值计算模型;其次,在模型顶部施加速度边界条件以模拟单轴压缩,获得煤柱单轴压缩强度;再者,通过调整煤层各项力学参数,使数值计算获得煤柱单轴压缩强度与 Salamon 公式匹配。图 2 为数值计算获得的煤柱强度与 Salamon 公式对比图,由图 2 可知,数值计算获得的煤柱强度与 Salamon 公式基本保持一致,因此,采用表 1 所示的岩性参数模拟煤柱的应变软化行为。

表 1 煤柱模拟参数

Table 1 Simulation parameters of protective coal pillar

岩性	粗砂岩	细砂岩	细粉砂岩互层	泥岩	3煤	粉砂岩
体积模量/GPa	13.56	8.5	14	3	2.59	16
剪切模量/GPa	8.2	5.6	8.7	1.3	1.22	10
抗拉强度/MPa	5.7	4.7	3.4	1.5	5.1	2.3
黏聚力/MPa	8.9	5.52	4.3	1.7	4.2	2.4
内摩擦角/(°)	31	35	34	29	34	32

1.2 边界条件及模型方案

以新河煤矿 6302 工作面南部轨道集中巷, 6301 运输巷和 6302 轨道巷之间的保护煤柱为研究对象。煤层埋深 980 m, 煤的容重为 24 kN/m³, 故上覆岩层的自重应力为 24 MPa。

数值计算分为 2 步。①在模型顶板施加恒定载荷, 展开静载计算; ②待静载计算平衡后, 在模型顶板施加速度边界条件以模拟动载。

静载计算时, 模型顶部设置为应力边界, 上覆岩层自重采用均布荷载代替, 底部为固定边界, 顶部垂直应力取上覆岩层的自重应力 (24 MPa)。在静载条件下, 模型达到平衡状态, 再在动载条件下展开计算。动力学计算时, 数值模型顶部边界自由, 底部设置为固定边界。

为了模拟动载扰动, 假设上覆顶板岩层断裂产生含有多种子波的压缩波, 而任何复杂的波形都可以由正弦波、余弦波或三角波合成。为简化动载扰动, 选择正弦应力波作为输入波形。DUBINSKI^[16]等现场监测发现应力波 PPV 为 0.03 m/s。而 HADJIGEORGIOU 等^[17]通过使用炸药诱发岩体振动所记录的应力波 PPV 不能大于 3.3 m/s, 因此, 为了模

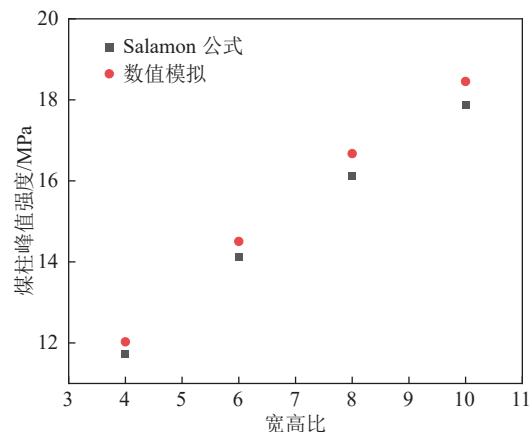


图 2 数值模拟和 Salamon 公式计算峰值强度对比

Fig.2 Comparison of peak strength between numerical simulation and Salamon formula calculation

拟不同震动强度的应力波, 振幅设定为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 m/s。

2 动载扰动下煤柱失稳破坏变化规律

选取宽高比分别为 4、6、8、10 四种模型, 静载应力下平衡后, 在煤柱模型的顶部分别施加振幅为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 m/s 的应力波(以应力波振幅表示动载强度), 当模型再次达到平衡后, 研究应力波输入保护煤柱破坏失稳规律。

2.1 煤柱尺寸对煤柱动力失稳的影响

由图 3 可知, 动载冲击后煤柱塑性区由表及里向深部扩展最终导致煤柱整体失稳。相比而言, 随着煤柱尺寸增加, 煤柱发生整体失稳所需的动载冲击强度具有一定的差异。以应力波振幅为 0.6 m/s 的模拟结果为例, 以阐述此种差异。

煤柱宽高比为 6 时, 静载作用后, 塑性区宽度为 7~8 m, 内部存在弹性核心。受到振幅为 0.6 m/s 应力波冲击后, 煤柱弹性核心完全破坏, 塑性区贯穿整个煤柱, 意味着煤柱整体失稳。相比而言, 煤柱宽高比增加至 8 与 10 时, 煤柱塑性区仅向深度扩展, 内部依旧存在稳定的弹性核心, 且弹性核心所占整个

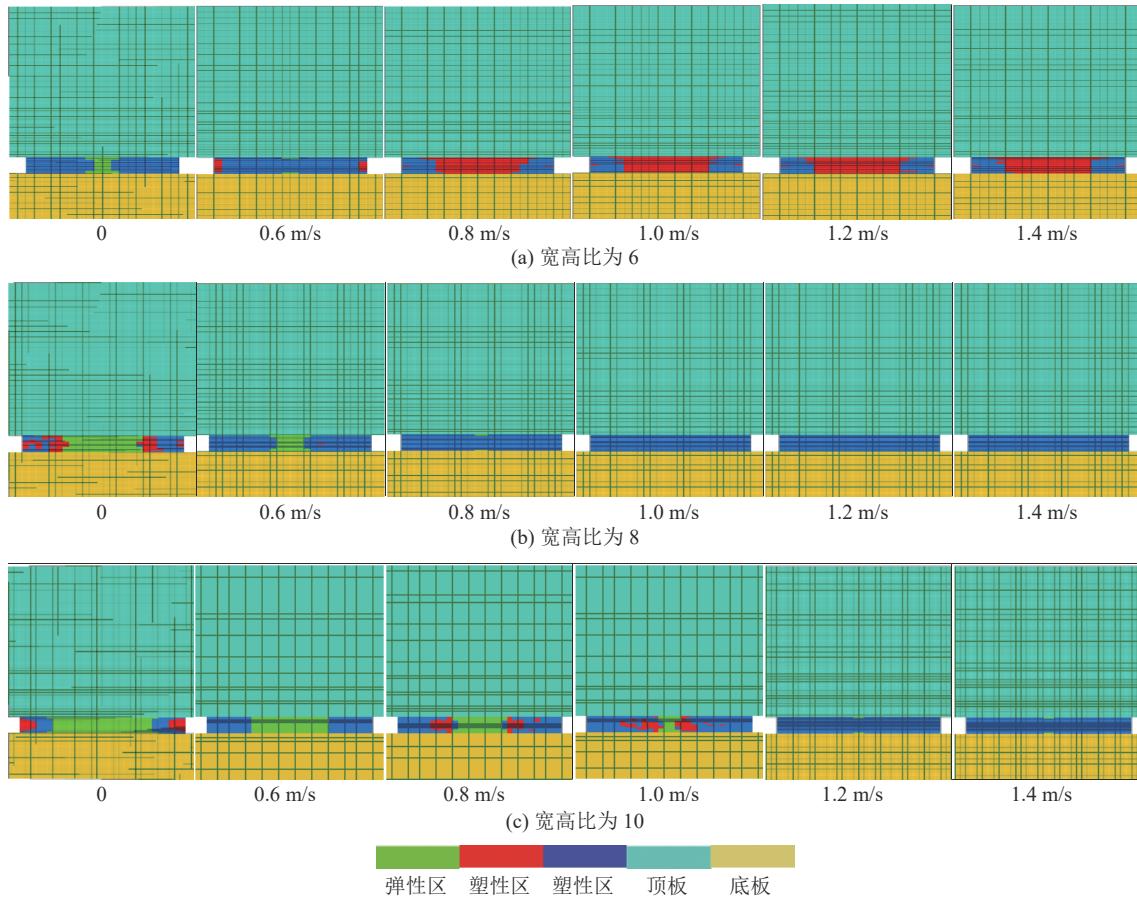


图3 不同应力波振幅及不同尺寸保护煤柱塑性区分布规律

Fig.3 Distribution law of plastic zone of protective coal pillars with different sizes and different stress wave amplitudes

煤柱的比例由 21% 增加至 47%。此外,对比发现,在相同静载作用下,不同尺寸的煤柱失稳启动所需的动载强度亦不同。模拟发现,随着煤柱宽高比由 6 增加至 10 时,煤柱破坏失稳所需的动载冲击强度(以应力波振幅表征)由 0.6 m/s 增加至 1.2 m/s,提高了 1 倍。由此说明,增加煤柱尺寸有助于提高煤柱的稳定性,减少动力失稳的几率。

2.2 动载冲击强度对煤柱动力失稳的影响

以煤柱宽高比为 10 为例,分析动载冲击强度为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 m/s 时,煤柱失稳破坏特征。如图 3c 所示,当应力波振幅从 0.6 m/s 增加至 1.0 m/s,煤柱塑性区由浅部逐步向着中部扩展,范围由 8 m 增加至 13.5 m,煤柱内部弹性核区逐步减少。当动载冲击强度增加至 1.2 m/s 时,煤柱整体产生塑性破坏,意味着煤柱整体失稳。由此说明,动载冲击强度越大,煤柱发生失稳破坏的概率也相对提高。

通过对比不同振幅应力波 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 m/s 作用下,煤柱的失稳破坏特征,发现煤柱的稳定性与煤柱尺寸和动载冲击强度有关。相同条件下,尺寸越大,煤柱发生失稳破坏的几率越小;动载强度越大,

煤柱破坏范围及程度越大,即保护煤柱失稳概率越大。

3 动载作用下煤柱突变失稳机制

3.1 煤柱承载力学模型

一般而言,煤柱载荷主要来源于上覆岩层重量和动载扰动。上覆岩层重量作为静载,使煤柱产生塑性区和弹性核区^[18],而后续动载冲击使塑性区向煤柱深处扩展,导致煤柱发生整体性破坏,内部弹性区减小而发生失稳,煤柱承载力学模型如图 4 所示。

煤柱埋深为 H ,上覆岩层容重为 γ ,煤柱高度为 H_m ,煤柱宽度为 B 。假设外部动载 q_0 均匀施加至煤柱,动荷载在某一时刻的运动状态可简化为静荷载^[19],动载简化系数可以表示为 k_d ,则煤柱承受的载荷为:

$$p = (\gamma H + k_d q_0) B \quad (2)$$

煤柱塑性区与弹性区本构关系有所不同,弹性区媒体呈线弹性关系,塑性区内呈非线性关系,具有应变软化特征,煤柱塑性区内本构关系可以表示为

$$\sigma = E \varepsilon \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: E 为煤柱的初始弹性模量; ε 为应变; ε_0 为极限应变。

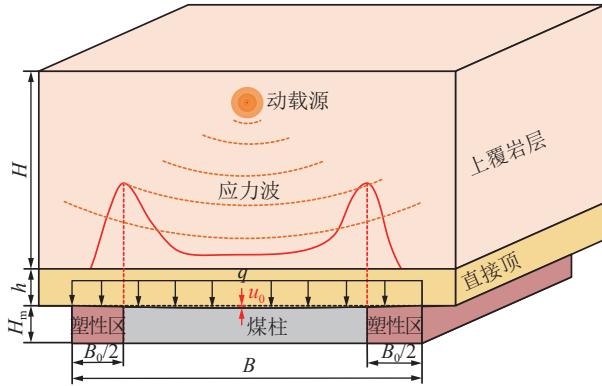


图 4 煤柱承载力学模型

Fig.4 Coal pillar bearing mechanical model

假设煤柱塑性区宽度为 B_0 , 则煤柱塑性区内载荷 p_s 与煤柱压缩量 u 的关系可以表示为

$$p_s = \frac{B_0 E u}{H_m} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{u}{u_0} \right)^2} \quad (4)$$

式中: u_0 为煤柱最大压缩量, m 。

弹性区内, 媒体载荷 p_t 与煤柱压缩量 u 的关系为

$$p_t = \frac{(B - B_0) E u}{H_m} \quad (5)$$

3.2 煤柱失稳的尖点突变模型

整个煤柱系统的总势能由煤柱自身的应变能和外部载荷所做的功组成。由式(4)可得煤柱塑性区应变能 $V_1(u)$ 为

$$V_1(u) = \frac{B_0 E}{H_m} \int_0^u u e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{u}{u_0} \right)^2} du \quad (6)$$

由式(5)可得煤柱弹性区应变能 $V_2(u)$ 为

$$V_2(u) = \frac{(B - B_0) E}{H_m} \int_0^u u du \quad (7)$$

上覆岩层静载重力势能和外部动载荷做功的势能函数 $V_3(u)$ 为

$$V_3(u) = p u = (\gamma H + k_d q_0) B u \quad (8)$$

根据上述力学模型的分析, 动载作用下煤柱系统的总势能函数 $V(u)$ 可以表示为

$$V(u) = \frac{B_0 E}{H_m} \int_0^u u e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{u}{u_0} \right)^2} du + \frac{(B - B_0) E}{H_m} \int_0^u u du - (\gamma H + k_d q_0) B u \quad (9)$$

以 u 为状态变量进行突变理论分析, 对 $V(u)$ 求导得:

$$u = u_1 = \sqrt{3} u_0 \quad (10)$$

引入无量纲常量 x , 令 $x = u - u_1$, 求解得:

$$x^3 + \left[\frac{e^{\frac{3}{2}} (B - B_0) u_0^2}{4 B_0} - \frac{u_0^2}{2} \right] x + \frac{\sqrt{3} u_0^3}{4} \left[1 + \frac{e^{\frac{3}{2}} (B - B_0)}{B_0} \right] - \frac{B H_m u_0^2 (\gamma H + k_d q_0) e^{\frac{3}{2}}}{4 E B_0} = 0 \quad (11)$$

进一步简化, 令:

$$\begin{cases} m = \left[\frac{e^{\frac{3}{2}} (B - B_0) u_0^2}{4 B_0} - \frac{u_0^2}{2} \right] \\ n = \frac{\sqrt{3} u_0^3}{4} \left[1 + \frac{e^{\frac{3}{2}} (B - B_0)}{B_0} \right] - \frac{B H_m u_0^2 (\gamma H + k_d q_0) e^{\frac{3}{2}}}{4 E B_0} \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)则有:

$$x^3 + mx + n = 0 \quad (13)$$

以 x 为状态参量, m 、 n 为控制参量。由尖点突变理论可知, 当 m 、 n 满足分叉集方程时, 顶板-煤柱系统处于临界平衡状态。联立上式与其拐点方程 $3x^2 + m = 0$, 消去状态参量 x , 得到分叉集方程:

$$\Delta = 4m^3 + 27n^2 = 0 \quad (14)$$

由突变理论可知, 当 $\Delta > 0$ 时, 系统处于稳定状态, 煤柱不会失稳; 当 $\Delta = 0$ 时, 系统处于临界状态, 受到微小扰动会发生失稳; 当 $\Delta < 0$ 时, 是系统发生失稳的充要条件。将式(12)代入式(14)得:

$$\Delta = 4 \left[\frac{e^{\frac{3}{2}} (B - B_0) u_0^2}{4 B_0} - \frac{u_0^2}{2} \right]^3 + 27 \left\{ \frac{\sqrt{3} u_0^3}{4} \left[1 + \frac{e^{\frac{3}{2}} (B - B_0)}{B_0} \right] - \frac{B H_m u_0^2 (\gamma H + k_d q_0) e^{\frac{3}{2}}}{4 E B_0} \right\}^2 \quad (15)$$

煤柱失稳则方程(13)有解, 必须满足 $\Delta \leq 0$, 由此得到煤柱失稳的必要条件为:

$$\Delta = 4 \left[\frac{e^{\frac{3}{2}} (B - B_0) u_0^2}{4 B_0} - \frac{u_0^2}{2} \right]^3 + 27 \left[\frac{\sqrt{3} u_0^3}{4} \left(1 + \frac{e^{\frac{3}{2}} (B - B_0)}{B_0} \right) - \frac{B H_m u_0^2 (\gamma H + k_d q_0) e^{\frac{3}{2}}}{4 E B_0} \right]^2 \leq 0 \quad (16)$$

3.3 煤柱最大压缩量计算

煤柱失稳判别式 Δ 中还含有一个与煤柱相关的未知量 u_0 (煤柱最大压缩量), 下面对煤柱最大压缩量 u_0 进行求解。

煤柱的最大压缩量是由顶板的最大下沉量决定,

如图5a和5b所示。考虑到煤柱的尺寸较大,拟采用弹性薄板理论研究顶板的最大下沉量^[20-21]。图5c所示为直接顶-煤柱弹性薄板模型,其中,2a为煤柱

长度,2b为煤柱宽度,q为直接顶上覆动静载等效均布载荷。直接顶可以视为四边固支的矩形板,其力学模型如图5d所示。

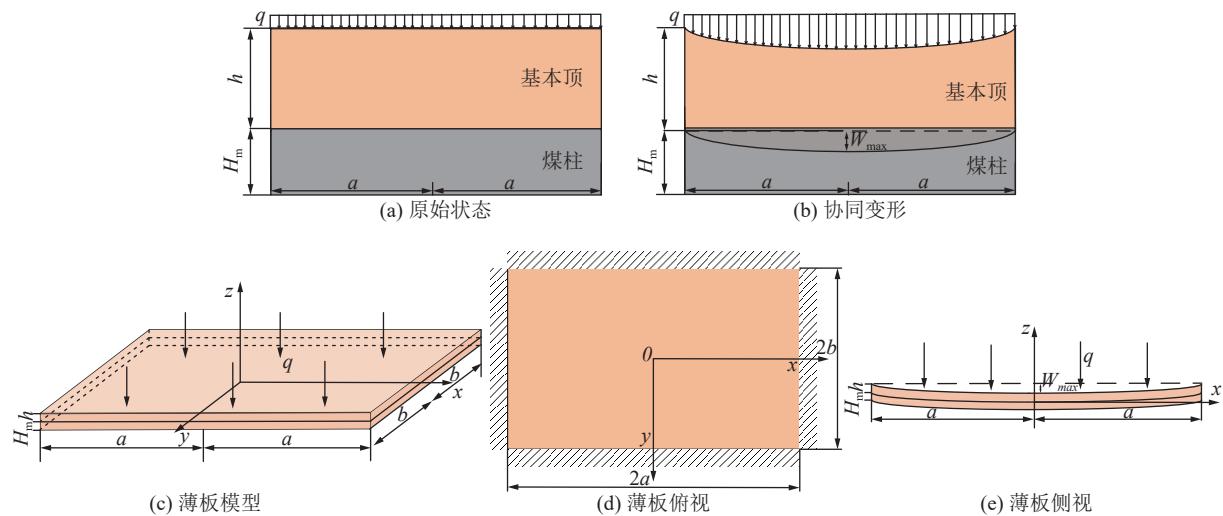


图5 顶板-煤柱协同变形

Fig.5 Theoretical process evolution diagram of elastic thin plate

该模型满足以下边界条件:

$$\begin{cases} W|_{x=-a} = W|_{x=a} = 0, \frac{\partial W}{\partial x}|_{x=-a} = \frac{\partial W}{\partial x}|_{x=a} = 0 \\ W|_{y=-b} = W|_{y=b} = 0, \frac{\partial W}{\partial y}|_{y=-b} = \frac{\partial W}{\partial y}|_{y=b} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

根据弹性力学中的伽辽金解法,将板的挠度展开为以下表达式:

$$W = \sum_{i=1}^{\infty} A_i f_i(x, y) \quad (18)$$

式中:W为直接顶挠度;A_i为挠度系数;f_i(x,y)为挠度函数,要求能满足薄板挠曲面的形状和几何边界条件,而且是连续的。

为便于计算,取一级近似函数:

$$W = A_1 f(x, y) = A_1 (x^2 - a^2)^2 (y^2 - b^2)^2 \quad (19)$$

显然该式能满足薄板挠曲面的形状和所有几何边界条件。根据伽辽金法对上式进行求解,得到挠度的表达式:

$$W = \frac{7q}{128D(a^4 + b^4 + \frac{4}{7}a^2b^2)} (x^2 - a^2)^2 (y^2 - b^2)^2 \quad (20)$$

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

式中,D为板的抗弯刚度,D = $\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$,ν为泊松比;h为直接顶高度。

对挠度方程求极值,在板的中心处取到挠度的最大值:

$$W_{\max} = W(0, 0) = \frac{7qa^4b^4}{128D(a^4 + b^4 + \frac{4}{7}a^2b^2)} \quad (21)$$

煤柱最大压缩量等于直接顶最大挠度,如图5e所示,即u₀ = W_{max},至此得到了煤柱失稳的最终判别式:

$$\Delta = 4 \left[\frac{e^{\frac{3}{2}}(B - B_0)W_{\max}^2}{4B_0} - \frac{W_{\max}^2}{2} \right]^3 + 27 \times \left[\frac{\sqrt{3}W_{\max}^3}{4} \left(1 + \frac{e^{\frac{3}{2}}(B - B_0)}{B_0} \right) - \frac{BH_mW_{\max}^2(\gamma H + k_d q_0)e^{\frac{3}{2}}}{4EB_0} \right]^2 \quad (22)$$

4 深井煤柱稳定性判别

4.1 深井煤柱稳定性判别方法

通过现场调研获得煤柱的物理力学参数,计算煤柱塑性区范围。

$$B_0 = \frac{H_m A}{\tan \varphi_0} \ln \left(1 + \frac{kH \tan \varphi_0}{c_0} \right) \quad (23)$$

式中:k为应力集中系数;c₀为黏聚力;φ₀为内摩擦角;A为侧压系数。

计算煤柱最大压缩量:

$$u_0 = W_{\max} = \frac{7qa^4b^4}{128D(a^4 + b^4 + \frac{4}{7}a^2b^2)} \quad (24)$$

最后,利用式(21)计算Δ值,进行稳定性判别。

4.2 工程背景

新河煤矿位于山东省济宁市唐口勘探区西南部边缘, 目前开采水平为-980 m 延伸水平, 延伸水平位于矿井的东南部, 东西宽 2 km, 南北长 2.4 km。新河煤矿正在开采 6302 工作面, 集中大巷分布在 6302 工作面以南, 大巷之间的煤柱对大巷的稳定起到支撑保护作用。利用前文建立的煤柱稳定性判别方法, 对新河煤矿 6302 工作面南部轨道集中巷, 6301 运输巷和 6302 轨道巷之间的煤柱进行稳定性进行判别, 如图 6 所示。



图 6 煤柱位置示意

Fig.6 Position diagram of coal pillar

1) 计算煤柱塑性区范围: 煤柱高 2.9 m, 黏聚力 1.7 MPa, 内摩擦角 29°, 埋深 980 m, 容重 24 kN/m³, 侧压系数 1.12, 应力集中系数 1.97。将煤柱参数带入煤柱塑性区范围计算公式:

$$B_0 = \frac{H_m A}{\tan \varphi_0} \ln \left(1 + \frac{k_y H \tan \varphi_0}{c_0} \right) = 16.4 \text{ m}$$

2) 计算煤柱最大压缩量: 大巷保护煤柱长度 46 m, 宽度 32 m, 等效荷载 $3.75 \times 10^7 \text{ N}$, 泥岩弹性模量 6.5 GPa, 泊松比 0.4, 顶板厚度 6.63 m。

$$u_0 = W_{\max} = \frac{7qa^4b^4}{128D \left(a^4 + b^4 + \frac{4}{7}a^2b^2 \right)} = 0.4732$$

3) 利用尖点突变模型计算 Δ 值, 并进行煤柱稳定性判别:

$$\Delta = 4 \left[\frac{e^{\frac{3}{2}}(B - B_0)W_{\max}^2}{4B_0} - \frac{W_{\max}^2}{2} \right]^3 + 27 \times \left[\frac{\sqrt{3}W_{\max}^3}{4} \left(1 + \frac{e^{\frac{3}{2}}(B - B_0)}{B_0} \right) - \frac{BH_m W_{\max}^2 (\gamma H + k_d q_0) e^{\frac{3}{2}}}{4EB_0} \right]^2 = 1.58$$

根据煤柱稳定性判别公式可知, $\Delta = 1.58 > 0$, 该煤柱能保持稳定。

5 结 论

1) 数值模拟研究表明, 煤柱受到外部动载扰动后, 塑性区向中部扩展, 弹性核心占比减小, 导致煤柱破坏失稳。煤柱动力失稳与煤柱尺寸和外界动载冲击强度有关。增大煤柱的宽度能够提高煤柱的稳定性, 减小煤柱破坏失稳的概率。相同条件下, 煤柱破坏失稳的几率随着动载强度的增大而增大。

2) 基于弹性薄板理论, 建立了直接顶-煤柱弹性薄板模型, 推导了直接顶的挠度方程, 获得了煤柱的最大压缩量表达式。基于尖点突变理论, 建立了煤柱尖点突变模型, 推导了主要受塑性区宽度和煤柱压缩量影响的煤柱突变失稳判别式, 为煤柱突变失稳提供了力学判据。

3) 基于煤柱突变失稳判别式, 对新河煤矿 6302 工作面南部轨道集中巷, 6301 运输巷和 6302 轨道巷之间的保护煤柱进行了验证。结果表明, 新河煤矿 6302 工作面南部集中大巷保护煤柱能够保持稳定, 与工程现场结果一致。

参考文献(References):

- [1] 薛成春, 曹安业, 牛风卫, 等. 深部不规则孤岛煤柱区冲击地压机理及防治[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 479-486. XUE Chengchun, CAO Anye, NIU Fengwei, et al. Mechanism and prevention of rock burst in deep irregular isolated coal pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(3): 479-486.
- [2] 杨书浩, 王俊, 宁建国, 等. 动载扰动下深部大断面硐室围岩“帮-顶”联动失稳机理[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 23-33. YANG Shuhao, WANG Jun, NING Jianguo, et al. Mechanism of connected instability of “rib-roof” in deep large section chamber under dynamic disturbance[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 23-33.
- [3] 殷志强, 王建恩, 张卓, 等. 静载对节理煤岩体动态力学特性和应力波传播的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(2): 3152-3162. YIN Zhiqiang, WANG Jianen, ZHANG Zhuo, et al. Influence of static load on dynamic mechanical properties and stress wave propagation of jointed coal rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(2): 3152-3162.
- [4] 何永琛. 类煤岩材料组合体静载破裂能量耗散与裂隙演化耦合特征研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021: 20-37. HE Yongchen. Study on the coupling characteristics of static fracture energy dissipation and fracture evolution of coal-like material combination [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021: 20-37.
- [5] 艾迪昊, 李成武, 赵越超, 等. 煤体静载破坏微震、电磁辐射及裂

- 纹扩展特征研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2043–2051.
- AI Dihao, LI Chengwu, ZHAO Yuechao, et al. Investigation on microseismic, electromagnetic radiation and crack propagation characteristics of coal under static loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2043–2051.
- [6] 李成武, 付帅, 解北京, 等. 媒体静载破坏中低频磁场变化特征及产生机制研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 481–488.
- LI Chengwu, FU Shuai, JIE Beijing, et al. Characteristics and generation mechanism of low-frequency magnetic field generated during the damage of coal under static load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 481–488.
- [7] 徐青云, 黄庆国, 张广超. 综放剧烈采动影响煤巷窄煤柱破裂失稳机理与控制技术[J]. 采矿与安全工程学, 2019, 36(5): 941–948.
- XU Qingyun, HUANG Qingguo, ZHANG Guangchao. Fracture and instability mechanism and control technology of a narrow coal pillar in an entry in fully mechanized caving mining under intense effect mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(5): 941–948.
- [8] 姜学伟. 房采集中煤柱诱发动载矿压机理及防治技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020: 9–13.
- JIANG Xuewei. Research on the mechanism and prevention and control of coal column induced active load ore in room collection [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020: 9–13.
- [9] 李峰, 方书昊, 毕明鑫, 等. 煤岩体在动载下的动态损伤数值模拟[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 167–169.
- LI Feng, FANG Shuhao, BI Mingxin, et al. Numerical simulation of dynamic damage of coal and rock mass under dynamic load[J]. Coal Technology, 2017, 36(11): 167–169.
- [10] 王方田, 梁宁宁, 李钢, 等. 复杂应力环境煤柱坝体损伤破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1145–1152.
- WANG Fangtian, LIANG Ningning, LI Gang, et al. Failure evolution mechanism of coal pillar dams in complex stress environment[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1145–1152.
- [11] 丛利, 翁明月, 秦子晗, 等. 坚硬顶板三次强扰动临空宽煤柱诱冲机制及防治[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 125–134.
- CONG Li, WENG Mingyue, QIN Zihan, et al. Instability mechanism and prevention of wide coal pillar with three strong stress disturbances under hard roof [J]. Journal of China Coal Society. 2022, 47(S1): 125–134.
- [12] WANG Jun, QIU Pengqi, NING Jianguo, et al. A numerical study of the mining-induced energy redistribution in a coal seam adjacent to an extracted coal panel during longwall face mining: a case study[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8: 817–835.
- [13] 余大军, 杨张杰, 郭运华, 等. 基于FLAC^{3D}横观各向同性模型的煤矿井田初始地应力场反演方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3427–3434.
- YU Dajun, YANG Zhangjie, GUO Yunhua, et al. Inversion method of initial ground stress field in coal mine based on FLAC3D transverse isotropic model[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3427–3434.
- [14] IANNACCHIONE A T, MARK C. Evaluating coal pillar mechanics through field measurements[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Ground Control in Mining. Wollongong: University of Wollongong, 1992: 38–47.
- [15] DU X, LU J, MORSY K, PENG SS. Coal pillar design formulae review and analysis[C]//Proceedings of the 27th international conference on ground control in mining. Morgantown: West Virginia University, 1992: 153–160.
- [16] DUBINSKI J, MUTKE G. Characteristics of mining tremors within the near-wave field zone[J]. Pure and Applied Geophysics, 1996, 147(2): 249–261.
- [17] HADJIGEORGIOU J, POTVIN Y. Overview of dynamic testing of ground support[C]//Proceedings of 4th International Seminar on Deep and High Stress Mining. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2007: 349–371.
- [18] 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: 12–14.
- WU Haoshuai. Stability Analysis of Rib Pillar in Highwall Mining under Dynamic and Static Loads[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018: 12–14.
- [19] 李玉飞. 机械施工荷载作用下采空区顶板突变失稳判据[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019: 11–27.
- LI Yufei. Criterion of sudden instability of goaf roof under mechanical construction loading[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019: 11–27.
- [20] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987.
- [21] 郑建. 基于弹性薄板理论的地表下沉预计研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020: 12–63.
- ZHENG Jian. Prediction of surface subsidence based on elastic thin plate theory[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2022: 12–63.