

文章编号: 1673-3363-(2012)06-0770-06

浅埋煤层房式开采遗留煤柱突变失稳机理研究

王方田, 屠世浩, 李召鑫, 屠洪盛, 陈芳

(中国矿业大学矿业工程学院, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 神东煤田浅埋煤层存在大量房式遗留煤柱, 受下方煤层采动影响可能突然失稳垮落, 造成冲击式动力灾害, 遗留煤柱稳定性对下方煤层安全开采具有重要影响。针对乌兰集团石圪台煤矿地质生产条件, 基于突变理论建立了房式煤柱稳定性尖点突变模型, 分析了浅埋煤层房式开采遗留煤柱突变失稳规律。结果表明煤柱发生突变失稳的必要条件为煤柱单侧屈服带宽度介于煤柱宽度的 0.33~0.43 倍时将发生突变失稳, 现场观测验证了计算结果。

关键词 浅埋煤层; 房式开采; 遗留煤柱; 突变理论; 煤柱稳定性

中图分类号 TD 323 **文献标识码** A

Mutation Instability Mechanism of the Room Mining Residual Pillars in the Shallow Depth Seam

WANG Fang-tian, TU Shi-hao, LI Zhao-xin, TU Hong-sheng, CHEN Fang

(School of Mines, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Shendong Mine Area is mining in the shallow depth seams and the room mining method results in a lot of residual pillars, which incline to be instability and caving suddenly induced by the nether seam mining, and cause shock type dynamic disasters, hence the stability of the residual pillars have significant implications for the nether seam mining safely. According to the geological and production conditions of Shigetai Mine, Wulan Group, we applied mutation theory to establish a cusp mutation model for studying the room mining residual pillars' stability, and discussed the mutation instability rules of the room mining residual pillars in the shallow depth seam. The necessary condition for pillar mutation is that when the hemi-yield width in the scope of 0.33~0.43 of the overall width, the pillar will be mutation instability. Finally the calculation results have conformed to the observations.

Key words shallow depth seams; room mining; residual pillar; mutation theory; coal pillar stability

典型的浅埋煤层具有埋藏浅 ($\leq 100\sim 150\text{ m}$), 基岩薄 ($\leq 30\sim 50\text{ m}$), 上覆厚松散砂土的赋存特征, 广泛分布在我国西北部, 在开采初期多采用房式或刀柱式采煤方法。以神东矿区为例, 2000 年之

前有 50% 以上的矿井采用落后的房式炮采工艺, 生产技术装备水平低, 遗留有大量煤柱, 顶板未能及时垮落, 随着回采范围的扩大, 各煤矿不同程度地出现了采空区大面积空顶的隐患^[1]。房式开采主要

收稿日期: 2012-03-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2012AA062101); 江苏省研究生科研创新计划项目 (CX10B_148Z); 江苏省高校优势学科建设工程项目

作者简介: 王方田 (1985-), 男, 河南省永城市人, 博士, 从事浅埋煤层开采方法与岩层控制方面的研究。

E-mail: wangfangtian111@163.com

Tel: 13605202425

形成以下难题：① 遗留煤柱发生流变，回采过程中突然失稳垮落，造成顶板瞬时剧烈来压；② 当煤层埋深较浅时，煤柱垮落可能造成地表突然塌陷，对地表建筑物造成损害，采空区大面积垮落甚至造成矿震现象；③ 上煤层房式开采遗留煤柱形成应力集中，对下煤层顶板支护极为不利；④ 采空区漏风造成遗留煤柱及煤房浮煤自然发火，严重影响下方煤层的安全开采；⑤ 采空区煤柱垮落波及含水层及地表，造成水土流失，不利于生态保护。房式残留煤柱、条带开采煤柱、巷道保护煤柱等煤柱的稳定性分析一直是国内外采矿领域极为关注的研究课题，先后提出了一系列煤柱屈服区宽度的理论分析依据。Salamon M D G 等^[2-3]进行了煤柱强度的综合分析，研究成果在南非得到了普遍应用，使得目前南非井工开采仍存在大量房柱式开采。Wilson A H^[4]提出了煤柱渐进破坏理论，并从实验得出屈服区宽度 Y 与采深 H ，采厚 M 存在关系式 $Y=0.00492MH$ ，同时对符合库仑准则的三向应力状态下的煤柱极限强度进行了简化处理：① 将煤体内摩擦角取固定值 36° ；② 舍去煤体内聚力相关项，从而得出简化后的极限强度 $\sigma_1 \approx 4\gamma H$ (γ 为覆岩体积力； H 为采深)，该简化制约了其通用性。王旭春等^[5]通过三维物理模拟及 FLAC 数值计算对厚 9 m，宽 80 m 条带煤柱进行分析，实验得出 $Y=0.00635MH$ ，并对煤柱极限强度影响因素的敏感度进行分析。刘贵等^[6]采用 FLAC^{3D} 模拟分析了不同开采条件下煤柱塑性区宽度，得出了其与采深、采厚及采出率的关系。郭文兵、邹友峰等^[7-9]应用突变理论建立了条带煤柱突变失稳的突变模型，认为地下水对煤柱稳定性主要具有软化煤柱弹性核区强度、降低核区刚度进而导致走向条带煤柱的稳定性恶化等影响。翟所业等^[10]运用广义米赛斯屈服准则推导出了煤柱中部弹性区的临界宽度公式。

若在房式采空区下近距离煤层进行长壁综采，房式遗留煤柱受集中支承压力作用，可能突然失稳垮落，造成冲击式动力灾害，而针对浅埋煤层房式开采条件下的遗留煤柱稳定性机理研究较少。为此，本文采用突变理论、FLAC^{3D} 模拟计算等方法，研究浅埋煤层房式开采遗留煤柱的破坏规律，为研究房式开采煤柱稳定性规律提供新的途径。

1 工程背景

房式采煤法只采煤房，不回收煤柱，用遗留煤柱支撑上覆岩层，煤房宽度一般取决于采高、煤体

强度、煤层埋深、倾角及顶底板稳定性等因素^[11]。该采煤方法具有设备投资低，采掘合一、建设期短、出煤快等优点。但同时存在以下缺点：① 资源浪费严重，房式炮采煤炭回收率均在 30% 以下；② 由于设计开采不规范，易造成顶板冒落事故，工人作业安全保障低；③ 设备简陋，机械化程度低，工人劳动强度大。

为确保矿井安全生产和脆弱的沙漠生态环境免遭破坏，乌兰集团石圪台煤矿采用房式开采 3-1-1 煤层，基本按采 6 m 留 6 m 方式布置，经多年房式开采现已基本采空，残留大量煤柱。3-1-1 煤层及 3-1-2 煤层具有埋深浅（约 60~70 m），基岩薄（ ≤ 45 m），上覆厚松散砂土（约 18 m）的赋存特征，属典型浅埋煤层，其中 3-1-1 煤层平均厚 2.72 m。3-1-2 煤层平均厚 3.0 m，采用长壁综采，距 3-1-1 煤层间距在 0.2~13.4 m 之间，平均为 6.0 m，属近距离煤层群。煤岩层综合柱状图如图 1 所示。

层号	厚度/m	埋深/m	岩性描述	柱状图
1	18.0	18.0	风积沙表土层	
2	13.0	31.0	细砂及砂砾岩	
3	8.1	39.1	砂泥与细砂互层	
4	0.7	39.8	2-1煤层	
5	0.9	40.7	砂泥岩	
6	0.6	41.3	2-2煤层	
7	2.6	43.9	砂泥岩	
8	0.4	44.3	煤层	
9	15.8	60.1	砂岩	
10	2.7	62.8	3-1-1煤层	
11	6.0	68.8	砂泥与细砂互层	
12	3.0	71.8	3-1-2煤层	
13	27.0	98.8	砂泥与细砂互层	

图 1 煤层综合柱状图

Fig.1 Geological column of the coal seams

2 煤柱稳定性尖点突变模型

2.1 突变理论分析

1) 煤柱承受载荷

实际煤柱受力及其应力分布十分复杂，煤柱上支承压力的大小与煤层埋藏深度、煤柱煤房尺寸、顶底板岩性、煤层倾角、邻近煤层开采情况等因素有关，煤层埋藏越深压力越大，煤层倾角越小，顶板压力作用在煤柱的竖直分力越大，工程研究中仅要求利用简化的力学模型计算出煤柱所承受的平均载荷。由于房式开采中回采宽度较小，在回采完

毕后, 经过一定的时间采空区除直接顶出现部分冒落外, 基本顶一般不发生冒落。且冒落的矸石未能接顶, 因此房式采空区矸石不具有承载性。按煤柱承载最危险状态考虑, 即采空区域上覆岩层的重量全部作用在所留煤柱宽度上, 如图 2 所示。

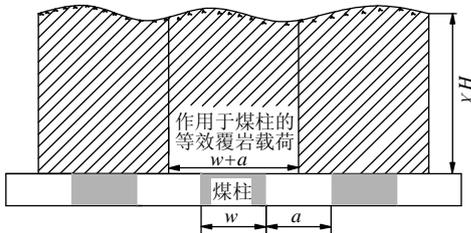


图 2 房式遗留煤柱承受载荷示意图

Fig. 2 Room mining residual pillar loads diagram

以均布载荷形式作用在煤柱上的平均应力为:

$$\sigma_s = \gamma H / (1 - \rho) = \gamma H (w + a)^2 / w^2 \quad (1)$$

式中: w, a 为遗留煤柱宽度及采出煤房宽度, m; σ_s 为煤柱应力, MPa; γ 为覆岩体积力, 25 kN/m³; H 为开采深度, m; ρ 为采出率, $\rho = (a^2 + 2aw) / (a+w)^2$ 。

当房式遗留煤柱的有效支撑面积减小到一定程度时将导致突发性的破坏失稳, 可认为是典型的远离平衡态的非线性过程, 宜采用非线性理论分析房式遗留煤柱的失稳机理^[12]。突变理论以拓扑学、奇点理论为数学工具, 将各种现象归纳到不同类别的拓扑结构中, 研究在各类临界点附近的非连续特性, 特别是当参数在一定条件下改变系统性能产生突变的情况, 其中尖点突变模型具有 1 个状态变量和 2 个控制变量, 在煤柱稳定性中应用最广^[13-14]。

2) 房式煤柱破坏失稳的尖点突变模型

房式采空区煤柱应力主要受上覆岩层载荷影响, 由于采动导致应力重新分布, 顶板集中载荷作用在煤柱上, 在煤柱边缘形成屈服破坏带, 其宽度为 Y , 煤房、煤柱宽度分别为 a, w , 煤柱弹性变形核区的宽度为 $y=w-2Y$, 如图 3 所示。

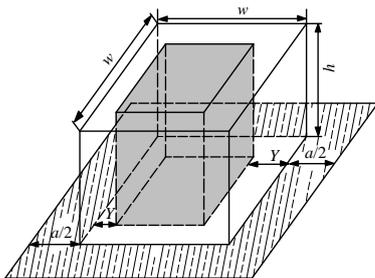


图 3 煤柱弹性核及塑性分区

Fig.3 Coal pillar's elasticity and plasticity zones

由式 (1) 可知, 煤柱所承受的支承压力为

$$p = \gamma H \cdot (w + a)^2 \quad (2)$$

煤柱弹性核区与屈服区的本构关系不同, 前者呈线性关系, 而后者具有软化性质的非线性关系, 煤柱应力 σ 与应变 ε 及损伤变量 D 之间存在关系^[7]:

$$\sigma = E\varepsilon \cdot (1 - D) \quad (3)$$

式中: $D = 1 - e^{-\varepsilon/\varepsilon_0}$, ε_0 为常数; E 为弹性模量。

在煤柱屈服带内, 对于煤柱高度为 h , 式 (3) 可表示为载荷 (p_s) 与变形 (u) 之间的关系:

$$p_s = EA \frac{u}{h} e^{-\frac{u}{u_0}} = \frac{4Eu}{h} (w - Y) Y e^{-\frac{u}{u_0}} \quad (4)$$

式中: u_0 为峰值载荷下的变形值。

煤柱弹性核面积为 $(w-2Y)^2$, 对应的载荷为:

$$p_e = E\varepsilon A = \frac{Eu}{h} (w - 2Y)^2 \quad (5)$$

因此, 房式遗留煤柱在屈服带范围内的应变能与弹性核区内的弹性势能分别为:

$$V_s = \frac{1}{2} p_s \cdot u = 2(w - Y) Y \frac{Eu^2}{h} e^{-\frac{u}{u_0}} \quad (6)$$

$$V_e = \frac{1}{2} p_e \cdot u = (w - 2Y)^2 \cdot \frac{Eu^2}{2h}$$

上覆岩层的自重势能, 即压缩煤柱产生的势能

$$V_p = H \cdot \gamma \cdot u(a + w)^2 \quad (7)$$

图 3 所示力学模型中系统的总势能函数为:

$$V = V_s + V_e - V_p \quad (8)$$

将式 (6), (7) 代入式 (8), 并对 V 求一阶导数, 并令其为 0, 可求得平衡曲面 M 的方程为:

$$V' = 2(w - Y) Y \frac{Eu}{h} e^{-\frac{u}{u_0}} \left(2 - \frac{u}{u_0} \right) + (w - 2Y)^2 \cdot \frac{Eu}{h} - H \cdot \gamma (a + w)^2 = 0 \quad (9)$$

式 (9) 即力学模型的平衡条件。为建立尖点突变模型, 对平衡曲面方程 V 继续求导, 且令二阶导数 $V''=0$, 求得有意义的解 $u = u_1 = (3 - \sqrt{3})u_0$, 在

该处进行 Taylor 展开, 取三次项化简后得:

$$V' = H \cdot \gamma (a + w)^2 + (w - 2Y)^2 \cdot \frac{(3 - \sqrt{3})Eu_0}{h} + (w - Y) Y \frac{4(2\sqrt{3} - 3)Eu_0}{h} e^{(\sqrt{3}-3)} + \frac{(w - 2Y)^2 E + 4(1 - \sqrt{3})(w - Y) Y E e^{(\sqrt{3}-3)}}{h} (u - u_1) + \frac{2\sqrt{3}e^{(\sqrt{3}-3)}(w - Y) Y E}{3u_0^2 h} (u - u_1)^3 = 0 \quad (10)$$

令无量纲量 x 为状态变量, p, q 为控制变量

$$x = u - u_1 \tag{11}$$

$$p = \frac{\sqrt{3}e^{(\sqrt{3}-\sqrt{5})}u_0^2[(w-2Y)^2 - 4(\sqrt{3}-1)(w-Y)Ye^{(\sqrt{3}-3)}]}{2(w-Y)Y} \tag{12}$$

$$q = \frac{\sqrt{3}e^{(\sqrt{3}-\sqrt{5})}u_0^2}{2(w-Y)YE} \left[(3-\sqrt{3})(w-2Y)^2 Eu_0 + 4(2\sqrt{3}-3)(w-Y)YEu_0e^{(\sqrt{3}-3)} + H \cdot h \cdot \gamma(a+w)^2 \right] \tag{13}$$

联立式 (10) ~ (13) 可得出以 x 为状态变量, 以 p, q 为控制变量的尖点突变模型的平衡方程标准形式为:

$$x^3 + px + q = 0 \tag{14}$$

对式 (14) 求一阶导数得系统的奇点值方程为:

$$3x^2 + p = 0 \tag{15}$$

联立式(14)及(15)可得系统的分叉集方程为

$$4p^3 + 27q^2 = 0 \tag{16}$$

考虑 $p = u_0^2 \left[-2(3-\sqrt{3}) + \frac{\sqrt{3}(w-2Y)^2 e^{(\sqrt{3}-\sqrt{5})}}{2(w-Y)Y} \right]$,

可令
$$\begin{cases} C = -2(3-\sqrt{3}) \\ k = \frac{\sqrt{3}(w-2Y)^2 e^{(\sqrt{3}-\sqrt{5})}}{2(w-Y)Y} \end{cases} \tag{17}$$

则

$$\begin{cases} p = u_0^2(C+k) \\ q = \frac{\sqrt{3}-3}{2}u_0^3 \cdot (C+2k) \end{cases} \tag{18}$$

将式 (18) 中 p, q 代入 $\Delta = 4p^3 + 27q^2 = 0$, 化简得:

$$\Delta = 4(-6+2\sqrt{3}+k)^3 + \frac{27}{4}(\sqrt{3}-3)^2(-6+2\sqrt{3}+2k)^2 = 0 \tag{19}$$

当 $\Delta=0$ 时, 煤柱处于平衡的临界状态; 当 $\Delta<0$ 时, 煤柱才能越过分叉集发生突变。因此, 系统发生突变的必要条件为 $\Delta<0$, 求解该不等式并取有意义的解, 可得:

$$0.33w < Y < 0.43w \tag{20}$$

即当单侧屈服带宽度 $Y>0.33w$ 时 (弹性核区面积少于煤柱截面的 34% 时), 煤柱将发生突变失稳。结合石圪台煤矿 3-1-1 煤层房式开采煤柱宽度为 6.0 m, 可知煤柱发生突变失稳需要煤柱弹性核区宽度介于 0.8~2.0 m。

2.2 房式煤柱突变失稳机理分析

根据房式煤柱突变过程可建立其平衡曲面如

图 4 所示, 平衡曲面的折痕在控制变量 poq 平面上的投影为系统的分叉集, 在 o 点有一个尖点, 分叉集将控制变量平面划分为 2 个区域。平衡曲面分为上、中、下叶 3 部分, 其中, 下叶代表煤柱失稳的准备阶段, 即弹性能不断增加, 上叶代表煤柱失稳后进入稳定状态, 而中叶为从弹性状态到失稳过程中的不稳定状态。

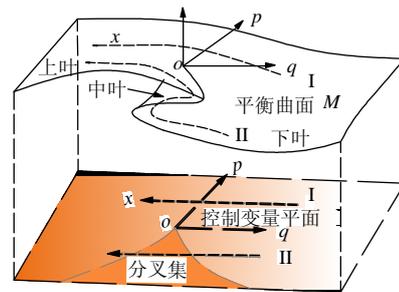


图 4 平衡曲面及突变过程

Fig.4 Equilibrium profile and mutation process

当控制变量沿路径 I 变化时, 房式煤柱的失稳破坏遵循渐进破坏理论。而当控制变量按照路径 II 变化时, 越过分叉集而出现尖点突变, 即房式煤柱的破坏失稳遵循突变理论, 是从下叶到上叶的跳跃突变过程。

在满足式 (19) 时, 房式煤柱的失稳破坏过程按照路径 II 变化, 从下叶变化到上叶过程中, 在分叉集左分支处控制变量的微小变化就会引发整个系统状态的突变。由式 (20) 可得煤柱突变失稳的判别式, 即当煤柱屈服带宽度大于煤柱截面的 66% 时, 可能引发煤柱突变失稳。煤柱的弹性核区越大, 相应的屈服带宽度将越小, 煤柱稳定性也越好。

此外, 房式煤柱是否发生突变失稳还与其所处的应力环境有关, 在进行近距离下煤层开采时, 超前采动支撑压力对煤柱具有重要影响, 可能引起煤柱在短时间内从弹性稳定状态到突变失稳状态。

3 煤柱稳定性数值模拟分析

结合石圪台煤矿 3-1-1 煤层房式开采及其下方 3-1-2 煤层长壁开采条件, 采用 FLAC^{3D} 程序建立数值计算模型。由于煤层倾角仅 1°~3°, 模型按水平煤层计算。模型中 3-1-1 煤层采用房式开采方法, 煤柱及煤房尺寸均为 6 m×6 m。在模型 x 方向上两侧各留设 40 m 煤柱以减小边界影响; 在模型 y 方向上取走向长的一部分; 由于开采煤层为典型的浅埋煤层, 模型上边界至地表。模型尺寸为长×宽×高=200 m×200 m×82 m, 模型结构如图 5 所示。

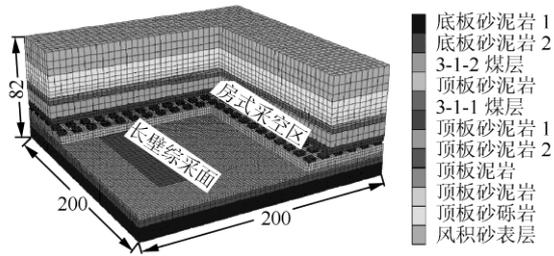


图 5 房式开采模型

Fig.5 Room mining numerical model

在 3-1-1 煤层埋深约 60 m，采高 2.3 m 时，房式开采后煤柱垂直应力及塑性区发育模拟计算结果如图 6。在房式采空区下方 3-1-2 煤层进行长壁开采时，煤柱垂直应力及塑性区发育计算结果如图 7。

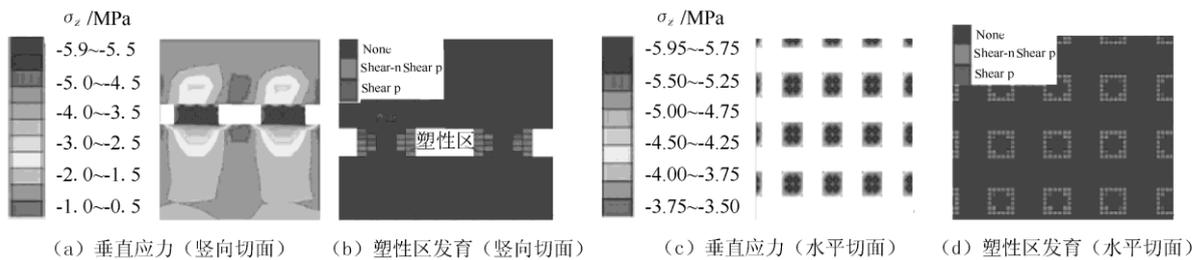


图 6 房式煤柱应力分布及塑性区发育特征

Fig.6 Stress distribution and plastic zone development in the room mining pillars

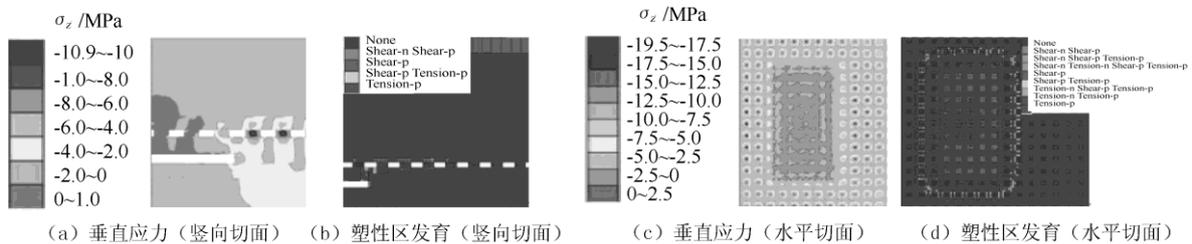


图 7 受采动影响房式煤柱应力及塑性区发育特征

Fig.7 Stress distribution and plastic zone development in the room mining pillars induced by the nether seam mining

数值模拟结果表明房式开采设计采用采 6 m 留 6 m 方案可以保证房式煤柱稳定性，但在下方煤层开采时，由于超前采动支承压力影响，在工作面前方煤柱发生应力集中现象，导致煤柱突然失稳，可能造成冲击式动力灾害，不利于下方煤层开采，这也验证了前述突变理论分析结论。

在首采工作面 131201 综采面开采之前，工作人员安全进入 3-1-1 煤层房式采空区进行了实地勘察，绘出了遗留煤柱尺寸及位置，并简要统计分析了煤柱稳定性与煤房煤柱宽度及煤柱高度的关系规律。并在切眼前 45 m 范围两顺槽对应上方遗留煤柱内各安装了 3 块压力传感器，监测煤柱在开采时应力变化规律。工作面推进 12 m 时，直接顶开

由图 6, 7 可知煤柱稳定性具有以下特点：

1) 房式开采浅埋煤层后，垂直应力主要集中在煤柱内部，煤柱最大垂直应力约为 5.9 MPa，应力集中系数为 4.0。煤柱边缘由于处于单向应力状态，出现剪切屈服，屈服后应力降低，峰值向煤柱内部转移，煤柱核心基本处于弹性状态。

2) 受下方近距离煤层采动超前支承压力影响，在工作面前方一定范围内房式残留煤柱垂直应力较大，在煤柱内部达到 10.9 MPa，应力集中系数在 7.3 以上，煤柱基本处于屈服状态，表明煤柱由于受超前采动支承压力作用，突然屈服破坏，发生煤柱失稳。

始垮落，靠近工作面的压力传感器（煤壁前 15 m）开始报警（报警值设为 5.0 MPa），而当工作面推进 22 m 时，其余 4 块传感器全部报警，表明煤柱已从之前的稳定状态突变失稳破坏。现场勘测结果与前述理论分析及数值模拟结果基本一致。

为防止煤柱大面积失稳破坏造成冲击式动力灾害，现场采取了以下措施：① 合理控制 3-1-2 煤层采高，在老顶初次来压前控制在 2.0 m 左右，之后逐步增大至 2.6 m；② 加强工作面矿压监测预报，采用 KJ110N 型矿压在线监测系统，实时预报顶板来压显现强度，防止发生冲击式动力灾害；③ 适当加快工作面推进速度，从而提高围岩结构的稳定性及自承能力，有利于顶板管理。

4 结 论

1) 当房式遗留煤柱的有效支撑面积减小到一定程度时将导致突发性的失稳破坏, 采用突变理论研究房式煤柱失稳机理, 建立了尖点突变模型, 推导出煤柱系统发生突变的必要条件为 $0.33w < Y < 0.43w$, 即当单侧屈服带宽度介于煤柱宽度的 33%~43% 时煤柱将发生突变失稳。

2) 采用 FLAC^{3D} 模拟分析表明, 在埋深为 60 m, 采高为 2.3 m, 煤房煤柱宽度皆为 6 m 时, 煤柱呈现中心处于弹性变形状态, 煤柱外侧处于塑性屈服状态, 整体稳定性较好。在下方煤层采动影响下, 工作面前方房式煤柱出现突变失稳。

3) 在房式采空区下方煤层开采前, 绝大多数煤柱处于稳定状态, 而当下方煤层开采时, 前方煤柱依次发生突变失稳, 验证了理论分析及数值模拟结果的正确性。

参考文献:

- [1] 于健, 王永申. 房柱式采煤法采空区危害及其对策[J]. 水力采煤与管道运输, 2009(2): 18-19.
YU Jian, WANG Yong-shen. Damage and counter-measures of room and pillar mining goaf[J]. Hydraulic Coal Mining & Pipeline Transportation, 2009(2): 18-19.
- [2] SALAMON M D G, MUNRO A H. A study of the strength of coal pillars[R]. Transvaal and Orange Free State Chamber of Mines, 1966.
- [3] SALAMON M D G, MUNRO A H. A study of the strength of coal pillars[J]. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 1967, 68(2): 55-67.
- [4] WILSON A H. A hypothesis concerning pillar stability[J]. Mining Engineering, 1972, 131: 409-417.
- [5] 王旭春, 黄福昌, 张怀新, 等. A. H. 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 Xu-chun, HUANG Fu-chang, ZHANG Huai-xin, et al. Discussion and improvement for A. H. Wilsons coal pillar design[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(6): 604-608.
- [6] 刘贵, 张华兴, 徐乃忠. 深部厚煤层条带开采煤柱的稳定性[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1086-1091.
LIU Gui, ZHANG Hua-xing, XU Nai-zhong. Coal pillar stability of deep and high seam strip-partial mining[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1086-1091.
- [7] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 条带煤柱的突变破坏失稳理论研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 77-81.
GUO Wen-bing, DENG Ka-zhong, ZOU You-feng. Study on failure and instability of strip coal pillar by catastrophic theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(1): 77-81.
- [8] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 走向条带煤柱破坏失稳的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(121): 1996-2000.
GUO Wen-bing, DENG Ka-zhong, ZOU You-feng. Cusp catastrophic model of instability of strip coal pillar along strike[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(121): 1996-2000.
- [9] 邹友峰, 柴华彬. 我国条带煤柱稳定性研究现状及存在问题[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 141-145.
ZOU You-feng, CHAI Hua-bin. Research status of strip coal pillar stability and its main problems in China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 141-145.
- [10] 翟所业, 张开智. 煤柱中部弹性区的临界宽度[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20(4): 14-16.
ZHAI Suo-ye, ZHANG Kai-zhi. The critical width of middle elastic area of the coal pillar to safeguard working[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003, 20(4): 14-16.
- [11] 徐永圻, 王悦汉. 短壁开采技术[M]. 徐州: 中国矿业学院出版社, 1987.
- [12] 谢和平, 段法兵, 周宏伟, 等. 条带煤柱稳定性理论与分析方法研究进展[J]. 中国矿业, 1998, 7(5): 37-41.
XIE He-ping, DUAN Fa-bing, ZHOU Hong-wei, et al. Recent developments of theory and analysis methods of strip pillar stability[J]. China Mining Magazine, 1998, 7(5): 37-41.
- [13] 张勇, 潘岳, 王志强. 突变理论在岩体系统动力失稳中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [14] THOM R. Structural stability and morphogenesis[M]. Benjamin W A, 1975.