

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.12

基于尖点突变模型的采空塌陷地表裂缝形成机理

于秋鸽^{1,2}, 张华兴^{1,2}, 邓伟男^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院开采研究分院, 北京 100013;

2. 天地科技股份有限公司开采设计事业部, 北京 100013)

摘要: 地表裂缝的形成主要与上覆岩层移动规律有关, 为了研究浅埋单一关键层煤层开采造成的地表塌陷型裂缝形成机理, 本文通过建立关键层断裂的固支梁和“砌体梁”力学模型, 利用尖点突变理论, 从力学平衡和能量平衡的角度解释了关键层断裂的原因, 推导出了关键层的初次断裂步距和周期断裂步距, 分析了关键层断裂与地表裂缝形成之间的关系, 利用文中推导出的公式求得大柳塔煤矿 12208 工作面关键层的周期断裂步距为 14.9 m, 与现场矿压实测周期来压步距 12~15 m 以及裂缝平均间距 13.7 m 相符。研究结果表明: 关键层断裂是造成地表塌陷裂缝的主要原因, 关键层断裂步距决定了裂缝间距。这对于研究类似采矿地质条件下的地表塌陷裂缝形成机理具有一定借鉴意义。

关键词: 浅埋单一关键层; 塌陷型裂缝; 尖点突变理论; 固支梁模型; “砌体梁”模型; 关键层断裂步距

中图分类号: TD327

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)02-0073-05

Mechanism of collapsing ground fissure formation based on cusp catastrophe model

YU Qiuge^{1,2}, ZHANG Huaxing^{1,2}, DENG Weinan^{1,2}

(1. Coal Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Coal Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: The formation of ground fissure had significantly relation with the movement of overburden strata. To analyse the formation mechanism of collapsing ground fissure caused by coal mining on the conditions of shallow-burden and single critical layer, the models of clamped beam and voussoir beam model were built. Using the cusp catastrophe theory, failure reasons of the critical layer were revealed from the view of mechanical equilibrium and energy balance. At the same time, the study deduced the equations on first and periodic broken lengths of critical layer, and analysed the relationship between critical layer failure and ground fissure. By using the equations, the broken length of 12208 working face in Daliuta Colliery was predicted. The periodic result was 14.9 m, which matched the results of field measurement. The study shows that (a) the broken of critical layer is the main reason for the formation of ground fissure, and (b) the broken length of critical layer has greatly influenced the distance between the two adjacent ground fissure.

Keywords: shallow-burden and single critical layer; collapsing ground fissure; the cusp catastrophe theory; clamped beam model; voussoir beam model; the broken length of critical layer

收稿日期: 2017-05-26; 修订日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604151)

第一作者: 于秋鸽(1989-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 主要从事矿山开采沉陷的研究。E-mail: 418909128@qq.com

0 引言

深部煤层开采,当基岩采厚比 >30 时,地表一般呈现连续变形特点^[1];随着我国东部煤炭资源枯竭,煤炭开采重心逐步向西部转移,西部煤层开采具有浅埋深大采高特点,开采强度较大,采动影响容易直接波及到地表,造成地表裂缝。地表裂缝是造成土地生产能力下降、引起山区滑坡的主要原因之一,是采煤沉陷对地表环境损害最直观的表现形式^[2-3]。为了研究不同地质采矿条件下地表裂缝形成的机理及其规律,吴侃通过建立实用裂缝深度发育模型,从理论上推导出了裂缝发育的深度^[4];胡振琪等^[5]研究发现风积沙区地表裂缝分为永久裂缝和动态裂缝,动态裂缝具有自我修复功能;李永树等^[6]通过土体剪切实验分析了厚冲击层条件下的地表裂缝形成机理得到裂缝宽度与水平变形之间的关系;胡青峰等^[7]通过现场实测研究了厚煤层开采时地表裂缝形成的机理,发现厚硬基岩对采动引起的应力应变传递具有消减作用。

工作面上覆岩层由基岩和松散层两部分组成,在

开采过程中,随着工作面的推移,靠近工作面的上方软弱岩层直接断裂垮落,比较坚硬岩层产生弯曲下沉,支撑上方岩层的大部分重量,在坚硬岩层断裂之前,地表下沉值比较小,当工作面推进长度达到一定值后,坚硬岩层突然发生断裂,地表下沉急剧增加,当松散层厚度无法消减地表不均匀沉降时,将会在地表产生裂缝。本文把断裂前的关键层近似为固支弹性梁,把断裂后的岩层近似为“砌体梁”,建立地表沉降的尖点突变模型,研究了地表塌陷型裂缝与关键层断裂步距之间的关系。

1 尖点突变理论

突变思想是在 1972 年由法国数学家 Thom 提出的,后来由英国数学家 Zeeman 将其定义为“突变理论”。突变理论提出以后很快应用到各个学科,如生物学、岩石力学、心理学等,并很好的解释了自然中的各种突变现象。突变理论的特点是控制变量连续变化而结果不连续。在我们所处的四维时空中,当控制变量小于等于 4 时,最多有 7 种突变形式^[8-9](表 1)。

表 1 突变形式分类表

Table 1 Classification of catastrophe type

突变类型	突变核	状态变量/数量	控制变量/余维数	势函数
折叠	x^3	$x/1$	$u/1$	$V(x) = x^3 + ux$
尖点	x^4	$x/1$	$(u, v)/2$	$V(x) = x^4 + ux^2 + vx$
燕尾	x^5	$x/1$	$(u, v, w)/3$	$V(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$
蝴蝶	x^6	$x/1$	$(u, v, w, t)/4$	$V(x) = x^6 + tx^4 + ux^3 + vx^2 + wx$
双曲脐点	$x^3 - xy^2$	$(x, y)/2$	$(u, v, w)/3$	$V(x) = x^3 + y^3 + wxy + ux + vy$
椭圆脐点	$x^3 + y^3$	$(x, y)/2$	$(u, v, w)/3$	$V(x) = x^3 - xy^2 + w(x^2 + y^2) + ux + vy$
抛物脐点	$x^2y + y^4$	$(x, y)/2$	$(u, v, w, t)/4$	$V(x) = x^4 + x^2y + wx^2 + ty^2 + ux + vy$

在这七种突变形式中最常用的为尖点突变模型,见图 1。

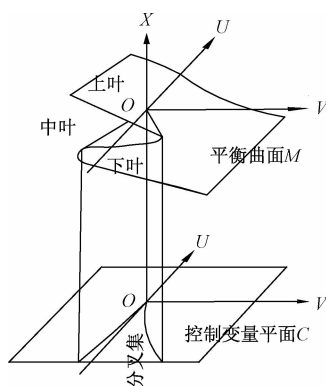


图 1 平衡曲面和控制变量平面

Fig. 1 The equilibrium curved surface and control variable plane

应用尖点突变模型处理工程问题时的步骤为:

- (1) 根据工程结构建立力学模型,进行受力分析;
- (2) 根据工程结构变形情况,求出系统的总势能,并将其转化为尖点突变模型的标准势函数形式:

$$V(x) = x^4 + ux^2 + vx \quad (1)$$

- (3) 对 $V(x)$ 求导,得到平衡曲面 M 的方程:

$$\frac{dV}{dx} = 4x^3 + 2ux + v = 0 \quad (2)$$

- (4) 对平衡曲面 M 的方程进行求导,从图 1 中可以看出:当 $u \leq 0$ 时,平衡曲面 M 分为上、中、下三叶。在上叶、下叶上有 $12x^2 + 2u > 0$;在中叶上有 $12x^2 + 2u < 0$ 。在平衡曲面上作出 M 的所有垂直切线,与控制变量平面 C 相交,相交得到的点集为分叉集。平衡曲面 M 上能够垂直向下作切线的点集满足方程:

$$\frac{d(dV/dx)}{dx} = 12x^2 + 2u = 0 \quad (3)$$

联立(2)、(3)式消去 x 得到控制变量平面上的分叉集方程:

$$8u^3 + 27v^2 = 0 \quad (4)$$

由上述分析可知:在平衡曲面 M 的上叶和下叶上,势函数 $V(x)$ 取极小值,系统处于平衡状态;在中叶上,势函数 $V(x)$ 取极大值,处于不稳定状态。当系统处于上叶和中叶过渡位置时,稍微受外界扰动,系统平衡位置就会立即变到下叶的某一处,使系统重新处于新的平衡状态。系统由上叶的平衡状态转为下叶的平衡时,会在中叶处产生一个尖点,这也是尖点突变的由来,同时可以得到系统发生尖点突变的充分条件应满足式(4)。

2 关键层断裂突变模型

2.1 关键层初次断裂突变模型

煤层采出以后,工作面上方软弱岩层直接垮落,在关键层断裂前,关键层可以近似看成宽度为单位1的固支梁^[10]。固支梁上部承受上覆岩层重量,相当于均布载荷 $q = \gamma H_0$;下部由于软弱岩层已经垮落,不在承受力的作用;固支梁两端承受水平压力 F_s ,垂直向上的支撑力 F_r 。坚硬岩层所承受的水平压力主要来自于上覆岩层重力产生侧向压力,虽然坚硬岩层下方岩石已垮落,坚硬岩层下方岩层中的原岩应力受到破坏,但是在坚硬岩层断裂前,坚硬岩层及其上方覆岩中的应力没有得到释放,可近似认为坚硬岩层两端的水平压力是由上方岩层重力产生的侧向应力引起,受力示意图如图2所示。

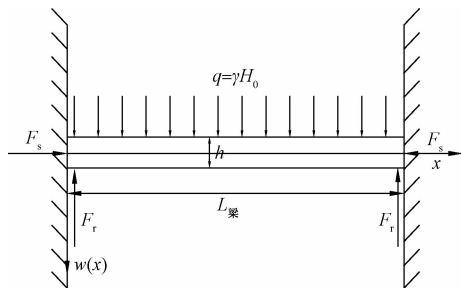


图2 固支梁模型

Fig. 2 Clamped beam model

根据受力平衡,可知:

$$\begin{cases} F_s = \lambda \gamma H_0 h \times 1 \\ F_r = \frac{1}{2} \gamma H_0 L_{\text{梁}} \times 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_s ——水平挤压力/kN;

F_r ——垂直向上支撑力/kN;

λ ——侧压系数;

H_0 ——坚硬岩层所处深度/m;

h ——坚硬岩层厚度/m;

γ ——坚硬岩层上方岩层的平均容重/(kN · m⁻³)。

在力的作用下,固支梁将产生弯曲,梁弯曲的挠线方程可近似为^[11]:

$$w(x) = \delta \sin^2\left(\frac{\pi}{L_{\text{梁}}}x\right) \quad (6)$$

式中: $L_{\text{梁}}$ ——梁长/m;

δ —— $x = L_{\text{梁}}/2$ 处的挠度。

在尖点突变理论中需要建立模型的总势能函数,根据弹性力学中应变能和梁的弯曲理论的相关知识,推导出梁弯曲的应变能^[12]为:

$$U = \frac{1}{2} EI \int_0^{L_{\text{梁}}} \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 \times \left[1 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \right\} dx = \frac{EI\pi^6}{4L_{\text{梁}}^5} \delta^4 + \frac{EI\pi^4}{L_{\text{梁}}^3} \delta^2 \quad (7)$$

式中: E ——岩梁弹性模量/Pa;

I ——惯性矩/m⁴。

水平挤压力 F_s 做功为:

$$W_1 = -\frac{1}{2} F_s \int_0^{L_{\text{梁}}} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx = -\frac{F_s \pi^2}{4L_{\text{梁}}} \delta^2 \quad (8)$$

垂直向上的支撑力 F_r 做功为:

$$W_2 = F_r \times w \Big|_{x=0}^{x=L_{\text{梁}}} = 0 \quad (9)$$

均布载荷 q 做功为:

$$W_q = -\int_0^{L_{\text{梁}}} q w dx = -\frac{\gamma H_0 L_{\text{梁}}}{2} \delta \quad (10)$$

从而可以得到岩梁弯曲总的势能函数为:

$$V = U + W_1 + W_2 + W_q = \frac{EI\pi^6}{4L_{\text{梁}}^5} \delta^4 + \left(\frac{EI\pi^4}{L_{\text{梁}}^3} - \frac{F_s \pi^2}{4L_{\text{梁}}} \right) \delta^2 - \frac{\gamma H_0 L_{\text{梁}}}{2} \delta \quad (11)$$

在尖点突变理论中,系统的标准势函数满足(1)式,从而得到:

$$\begin{cases} x = \left(\frac{EI\pi^6}{4L_{\text{梁}}^5} \right)^{\frac{1}{4}} \delta \\ u = \left(\frac{EI\pi^4}{L_{\text{梁}}^3} - \frac{\pi^2 F_s}{4L_{\text{梁}}} \right) \left(\frac{EI\pi^6}{4L_{\text{梁}}^5} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ v = -\frac{\gamma H_0 L_{\text{梁}}}{2} \left(\frac{EI\pi^6}{4L_{\text{梁}}^5} \right)^{-\frac{1}{4}} \end{cases} \quad (12)$$

根据(4)式得到关键层初次断裂的充分条件为:

$$8\left(\frac{EI\pi^4}{L_{\text{梁}}^3} - \frac{\pi^2 F_s}{4L_{\text{梁}}}\right)^3 \left(\frac{EI\pi^6}{4L_{\text{梁}}^5}\right)^{-\frac{3}{2}} + 27\left(\frac{\gamma H_0 L_{\text{梁}}}{2}\right)^2 \left(\frac{EI\pi^6}{4L_{\text{梁}}^5}\right)^{-\frac{1}{2}} = 0 \quad (13)$$

2.2 关键层周期性断裂突变模型

当关键层初次断裂后,断裂岩块与未断裂岩层互相关接,随着工作面推进,关键层周期性断裂,形成“形如梁而实质为拱”的“砌体梁”结构(图3)。

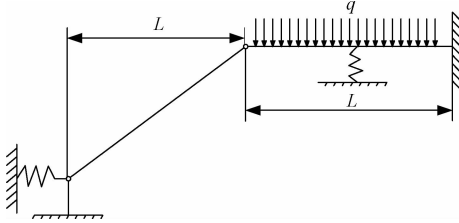


图3 “砌体梁”模型

Fig.3 Voussoir beam model

根据尖点突变理论求出砌体梁结构失稳的充分条件为^[13]:

$$L = \frac{3\gamma h^2}{|8K' - 3K|} \quad (14)$$

式中:K——岩块挤压变形刚度系数;

K'——冒落矸石变形刚度系数;

h——岩块厚度/m。

3 地表裂缝与关键层断裂步距之间关系

对于浅埋厚煤层而言,工作面上覆岩层结构简单,关键层的断裂将引起关键层上方岩层的整体垮落,在地表形成塌陷型裂缝。塌陷型裂缝与关键层断裂之间的关系见图4。

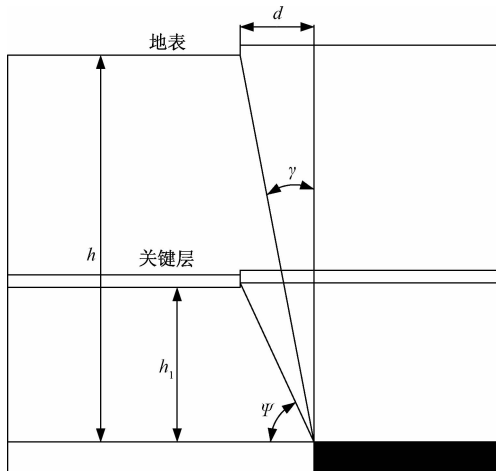


图4 塌陷型裂缝与关键层断裂示意图

Fig.4 Diagram of relationship between collapsing ground fissure and failure of critical layer

根据图4可知裂缝滞后距d和滞后角γ满足:

$$\begin{cases} d = \frac{h_1}{\tan\psi} \\ \gamma = \arctan\left(\frac{d}{h}\right) = \arctan\left(\frac{h_1}{h \tan\psi}\right) \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知:由于岩层破断角的影响,塌陷型裂缝一般滞后于工作面一定距离,随着关键层的周期性断裂,也周期性形成塌陷型裂缝,裂缝间距为关键层周期性垮落步距;关键层距煤层距离越大,塌陷型裂缝滞后距越大,滞后角γ越大。

4 实例验证

神华集团大柳塔矿12208工作面平均埋深37.5 m,煤层倾角1°~3°,工作面走向长度1 538 m,倾斜长度154 m,采高7 m,平均日进尺10 m。工作面上覆岩层分别为:泥岩、砂质泥岩组成的伪顶,平均厚度0.21 m;泥岩、粉砂岩组成的直接顶,平均厚度5.5 m;细粒砂岩为基本顶,平均厚度11.2 m;地表松散层厚度为7.2 m。煤层开采过程中,在工作面中部地表产生塌陷型裂缝,裂缝滞后角为0.38°^[14](图5)。

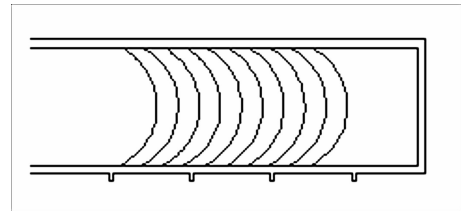


图5 12208工作面地表裂缝分布图

Fig.5 Distribution of collapsing ground fissures above face 12208 of Daliuta colliery

根据文献[15]判定细粒砂岩为关键层,关键层下方岩层垮落碎胀系数取1.2,由于 $1.2 \times (0.21 + 5.5) = 6.852 < (0.21 + 5.5 + 7) = 12.71$,可知岩层垮落后不能充满采空区,故而公式(14)中 $K' = 0$ 。

根据文献[13]K取70 kPa,代入公式(14)求得周期断裂步距为14.9 m,据现场矿压观测,周期来压步距为12~15 m,在工作面中间位置,裂缝平均间距为13.7 m,与利用尖点突变理论计算所得周期断裂步距相差不大,说明采用尖点突变分析关键层初次断裂步距和周期断裂步距是合理的。

5 结论

(1)关键层断裂是造成地表塌陷型裂缝的主要原因,关键层断裂步距决定了塌陷型裂缝之间距离。

(2)地表塌陷型裂缝滞后于工作面一定距离,关键层距煤层距离越大,塌陷型裂缝滞后距越大,滞后角越大。

(3)利用尖点突变理论得到关键层断裂步距,与现场矿压实测关键层断裂步距及地表裂缝间距相符。

参考文献:

- [1] 邓喀中,张冬至,张周权. 深部开采条件下地表沉降预测及控制探讨[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(1):52-55.
DENG Kazhong, ZHANG Dongzhi, ZHANG Zhouquan. Study on prediction and control of surface subsidence in deep mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2000,29(1):52-55.
- [2] 郭文兵. 煤矿开采损害与保护[M]. 北京:煤炭工业出版社,2013.
GUO Wenbing. Coal mining damages and protection [M]. Beijing: China Coal Industry Press, 2013.
- [3] 刘辉,刘小阳,邓喀中,等. 基于 UDEC 数值模拟的滑动型地裂缝发育规律[J]. 煤炭学报,2016,41(3):625-632.
LIU Hui, LIU Xiaoyang, DENG Kazhong, et al. Developing law of sliding ground fissures based on numerical simulation using UDEC [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(3):625-632.
- [4] 吴侃,周鸣,胡振琪. 开采引起的地表裂缝深度和宽度预计[J]. 阜新矿业学院学报,1997,16(6):649-652.
WU Kan, ZHOU Ming, HU Zhenqi. The prediction of ground fissure depth and width by mining[J]. Journal of Fuxin Mining Institute,1997,16(6):649-652.
- [5] 胡振琪,王新静,贺安民. 风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发育规律[J]. 煤炭学报,2014,39(1):11-17.
HU Zhenqi, WANG Xinjing, HE Anmin. Distribution characteristic and development rules of ground fissure due to coal mining in windy and sandy region [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(1):11-17.
- [6] 李永树,王金庄,周竹军. 厚冲积层条件下开采沉陷地区地表裂缝形成机理[J]. 河北煤炭,1996(2):8-9.
LI Yongshu, WANG Jinzhuang, ZHOU Zhujun. The mechanism of urface crack under condition of thick alluvium in mining subsidence area[J]. Hebei Coal, 1996(2):8-9.
- [7] 胡青峰,崔希民,袁德宝,等. 厚煤层开采地表裂缝形成机理与危害性分析[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(6):864-869.
HU Qingfeng, CUI Ximin, YUAN Debao, et al. Formation mechanism of surface crack caused by thick seam mining and hazard analysis [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2012,29(6):864-869.
- [8] 高谦,杨志强,杨志法. 地下大跨度采场围岩突变失稳风险预测[J]. 岩土工程学报,2000(5):523-527.
GAO Qian, YANG Zhiqiang, YANG Zhifa. Instability forecast and risk evaluation of surrounding rock masses for a large space stope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2000(5):523-527.
- [9] 白晨光,黎良杰,于学馥. 承压水底板关键层失稳的尖点突变模型[J]. 煤炭学报,1997,22(2):149-154.
BAI Chenguang, LI Liangjie, YU Xuefu. Cusp catastrophe model for instability of key stratum in floor with water intrush [J]. Journal of China Coal Society, 1997,22(2):149-154.
- [10] 杨桂通. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.
YANG Guitong. Elastic mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press,1998.
- [11] 穆成林,裴向军,黄润秋,等. 基于尖点突变理论的层状围岩失稳判据研究[J]. 煤矿安全,2016,47(11):36-40.
MU Chenglin, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Study on instability criterion of layered rock mass failure based on cusp mutation theory [J]. Safety in Coal Mines,2016,47(11):36-40.
- [12] 中国生,江文武,徐国元. 底板突水的突变理论预测[J]. 辽宁工程技术大学学报,2007,26(2):216-218.
ZHONG Guosheng, JIANG Wenwu, XU Guoyuan. Prediction of water intrush from floor based on catastrophe theory [J]. Journal of Liaoning Technical University,2007,26(2):216-218.
- [13] 尹光志,王登科,黄滚. 突变理论在开采沉陷中的应用[J]. 矿山压力与顶板管理,2005,22(4):94-96.
YIN Guangzhi, WANG Dengke, HUANG Gun. The application of catastrophe theory in mining subsidence [J]. Ground Pressure and Strata Control,2005,22(4):94-96.
- [14] 刘辉,何春桂,邓喀中,等. 开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(3):380-384.
LIU Hui, HE Chungui, DENG Kazhong, et al. Analysis of forming mechanism of collapsing ground fissure caused by mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2013,30(3):380-384.
- [15] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010.
QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mining pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.