

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0726-07

# 硬厚岩层破断机理薄板分析及控制技术

秦广鹏<sup>1</sup>, 蒋金泉<sup>1</sup>, 张培鹏<sup>2</sup>, 孙中永<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学资源与土木工程系, 山东 泰安 271019; 2. 山东科技大学矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 徐州矿业集团夏阔坦矿业有限责任公司, 新疆 库车 842000)

**摘要** 以某矿 1007 工作面直接顶缺失上覆硬厚砂岩岩层条件为工程背景, 建立了硬厚岩层两临边固支一边简支一边自由薄板力学模型, 研究了薄板应力分布特征, 得到了直接顶缺失一侧采空硬厚岩层破断步距计算公式。薄板拉应力最大点在倾向固支边( $x=0$ ,  $y=13b/10\pi$ )处和走向固支边与自由边交角点( $x=a$ ,  $y=b$ )处, 实际应力最大点位置受覆岩悬跨系数  $k$  影响。对双层硬厚砂岩岩层实施下位硬厚岩层旋转扇形深孔预裂弱化和上位硬厚岩层拉槽截断深孔爆破综合弱化技术, 上位硬厚岩层运动步距降低 25.7%, 下位硬厚岩层实现由基本顶向直接顶的转化, 降低了工作面因大面积暴露顶板突然运动引燃隅角积聚瓦斯的风险。

**关键词** 硬厚岩层; 薄板; 破断步距; 预裂弱化

**中图分类号** TD 315

**文献标志码** A

## Thin plate analysis of hard thick strata failure mechanism and its control technology

QIN Guangpeng<sup>1</sup>, JIANG Jinqun<sup>1</sup>, ZHANG Peipeng<sup>2</sup>, SUN Zhongyong<sup>3</sup>

(1. Department of Resource and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an, Shandong 271019, China; 2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. Xiakuotan Mining Co Ltd, Xuzhou Mining Group, Kuche, Xinjiang 842000, China)

**Abstract** In view of the conditions of double hard-thick sandstone strata without immediate roof above coal seam in Working Face 1007 of one mine, an elastic thin plate model with two adjacent clamped edges, one simply supported edge, and one free edge was established as the mechanical model of hard thick strata. Stress distribution within the thin plate was then studied, and fracture step calculation formula of hard thick strata was obtained. The results show that the maximum point of tensile stress is located at ( $x=0$ ,  $y=13b/10\pi$ ) of the inclination clamped edge and the intersection of strike direction clamped edge and free edge where ( $x=a$ ,  $y=b$ ), while the actual position of maximum stress is affected by strata spanning modulus  $k$ . The pre-split weaken technology was carried out for the double hard-thick sandstone strata, that is, the lower hard thick stratum was weakened by fan-shaped rotation deep pre-split holes, and the upper hard thick stratum was weakened by ultramultiple-hole longhole blasting, which makes the movement step of the upper hard thick stratum decrease 25.7%, and the lower hard thick stratum changes from main roof to immediate roof. Thus, the accumulated gas ignition risk at the work face corner due to the suddenly movement of large area hanging strata has been reduced.

收稿日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374139); 山东省自然科学基金项目(ZR2013EEM018)

作者简介: 秦广鹏(1980—), 男, 黑龙江省嫩江县人, 博士, 讲师, 从事矿山压力与岩层控制、矿山工程力学方面的研究。

E-mail: friendqgp@163.com

Tel: 0538-3076067

**Key words** hard thick strata; thin plate; fracture step; pre-split weaken

坚硬顶板多指厚度较大、强度高、整体性好的煤层顶板岩层，是我国生产矿井较为常见的一种开采地质条件，在山西大同，河南永城，新疆艾维尔沟、阿艾等矿区均有分布。当煤层开采后，工作面坚硬顶板(一般以基本顶居多)通常大面积暴露，不易自然垮落，而一旦出现垮落，容易导致突发性灾害事故<sup>[1-3]</sup>。

我国学者在采场岩层破断规律等方面开展了大量的研究工作：钱鸣高院士等<sup>[4-5]</sup>研究了关键层的变形破断规律，形成了关键层理论和砌体梁理论；蒋金泉等<sup>[6]</sup>采用弹性地基梁研究了基本顶的破断参数，采用薄板理论分析了基本顶的破断形式；黄耀光等<sup>[7]</sup>利用塑性极限法求得多种边界的顶板极限载荷，分析了极限载荷随工作面推进距离与工作面长度之比的变化规律；王平、姜福兴等<sup>[8]</sup>对对边固支、对边简支的矩形弹性薄板进行了研究，得到极限垮落步距的计算方法；王亮等<sup>[9]</sup>通过纳维解法计算得到四边固支板的挠度解析表达式，并反推得到巨厚硬岩的破断步距。目前，对四边固支、对边固支对边简支、两临边固支两临边简支等条件薄板应力分布及破断规律进行了研究，但两临边固支一边简支一边自由条件下的研究极少。

因此，如何能够比较准确地确定具体采动条件下硬厚岩层的运动形式与来压步距，进而实现对硬厚岩层运动的有效控制，是现场十分关心的问题。以徐州矿业集团夏阔坦煤矿 1007 综放工作面为工程背景，以薄板理论为理论支撑，研究工作面上覆双层硬厚含石英砂岩的破断规律，实现对硬厚岩层运动的有效控制，具有十分重要的意义。

1 工程背景

夏阔坦煤矿 1007 工作面开采下 10 煤层，煤层平均厚度 5.5 m，采用综合机械化放顶煤开采方法。工作面斜长 150 m，走向长度 862 m，回风平巷相邻 1005 工作面采空区，区段煤柱宽度 12 m，运输平巷相邻接续 1009 工作面。已回采 1005 工作面顶板为 7.2 m 细粒砂岩、8.3 m 砂砾岩、3 m 粉砂岩及 2.9 m 石英砂岩；接续 1009 工作面顶板为 6.7 m 细粒砂岩、13.64 m 石英砂岩；1007 工作面直接顶缺失，下位硬厚岩层为 6.85 m 细粒砂岩，石英成分含量高，钙-泥质胶结，坚硬，无明显分层；上位硬厚岩层为 13.9 m 石英砂岩，石英成分含量高，局部为石英脉石，非常坚硬。两层岩层均为坚硬难冒落顶板。1007 工作面下 10 煤顶板岩层情况见表 1 所示。

表 1 1007 工作面顶板岩层情况  
Table 1 Strata conditions of 1007 work face roof

岩层	岩性	容重/(MN·m <sup>-3</sup> )	厚度/m	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	说明
1(下位硬厚岩层)	细粒砂岩	0.026	6.85	27.24	3.49~5.45	钙泥质胶结，坚硬，石英成分高
2(上位硬厚岩层)	石英砂岩	0.027	13.9	31.65	8.50~10.30	石英成分高，局部为石英脉石，十分坚硬
3	砂质泥岩	0.026	11.19	22.45	1.72~2.44	砂泥质，局部含砂量高，夹粉砂岩层互层
4	细粒砂岩	0.026	2.85	28.67	2.45~5.50	细粒结构，钙、泥质胶结
5	砂砾岩	0.027	3.73	29.86	4.43~6.20	含砾，石英含量高，较坚硬

1007 工作面回采前在开切眼进行了顶板截断爆破，但工作面推进过程中上下端头仍经常出现大范围悬顶，在工作面推采到 55 m 左右时，采空区顶板垮冒引燃上隅角瓦斯，导致工作面停产。工作面恢复生产后，又发生了数次顶板垮冒引燃上隅角瓦斯事故，给工作面的安全生产带来极大安全隐患，迫切需要对上覆硬厚岩层的运动规律进行研究，并采用技术手段将硬厚岩层的运动控制在确保工作面安全生产范围之内。

2 硬厚含石英砂岩层运动力学模型

2.1 双层硬厚石英砂岩的运动特征

工作面基本顶由 2 层硬厚岩层组成，2 层岩层是离层运动还是形成复合顶板同步运动，对于后续顶板运动力学模型建立、顶板运动控制方式及参数的选择起着重要的作用。利用基本顶岩层梁所承受载荷法<sup>[4]</sup>分析两硬厚岩层运动特征。

1) 下位硬厚岩层运动特征

下位硬厚岩层独立运动所承受的载荷

$$(q_1)_1 = \gamma_1 h_1 = 0.19 \text{ MN/m}^2 \quad (1)$$

式中:  $\gamma_1$  为下位硬厚岩层的容重,  $0.026 \text{ MN/m}^3$ ;  $h_1$  为下位硬厚岩层的厚度,  $6.85 \text{ m}$ 。

假如上位硬厚岩层与下位硬厚岩层同步运动, 所承受的载荷

$$(q_2)_1 = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3} = 0.068 \text{ MN/m}^2 \quad (2)$$

式中:  $\gamma_2$  为上位硬厚岩层的容重,  $0.027 \text{ MN/m}^3$ ;  $h_2$  为上位硬厚岩层的厚度,  $13.9 \text{ m}$ ;  $E_1$ ,  $E_2$  分别为下位硬厚岩层与上位硬厚岩层的弹性模量, 分别为  $27.24 \text{ GPa}$  和  $31.65 \text{ GPa}$ 。

由于  $(q_2)_1 < (q_1)_1$ , 说明下位硬厚岩层独立于上位硬厚岩层运动。

## 2) 上位硬厚岩层运动特征

上位硬厚岩层独立运动所承受荷载

$$(q_2)_2 = \gamma_2 h_2 = 0.375 \text{ MN/m}^2 \quad (3)$$

考虑第 3 层岩层对上位硬厚岩层(第 2 层)的作用:

$$(q_3)_2 = \frac{E_2 h_2^3 (\gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3)}{E_2 h_2^3 + E_3 h_3^3} = 0.486 \text{ MN/m}^2 < (q_2)_2 \quad (4)$$

考虑第 4 层岩层对上位硬厚岩层(第 2 层)的作用:

$$(q_4)_2 = \frac{E_2 h_2^3 (\gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3 + \gamma_4 h_4)}{E_2 h_2^3 + E_3 h_3^3 + E_4 h_4^3} = 0.551 \text{ MN/m}^2 < (q_2)_2 \quad (5)$$

第 5 层岩层及其以上多为层厚较薄、弹性模量较小的岩层, 岩性以砂质泥岩和细粒砂岩为主, 不再具有类似上位硬厚石英砂岩厚度大又非常坚硬的岩层, 高位岩层将随上位硬厚岩层的破断而随动破断。

## 2.2 力学模型建立

将工作面上覆硬厚岩层看作弹性薄板<sup>[10]</sup>, 其破断问题看作是弹性矩形薄板小挠度问题进行求解。

根据工作面采掘情况, 将工作面划分为 2 个区段, 分析上覆硬厚岩层的边界支承状态。

1) 第 1 区段: 1007 工作面从开切眼开始推进至 1005 工作面开切眼区域, 由于在工作面开切眼进行顶板截断爆破, 2 条回采巷道相邻区域均为实体煤, 该区段上覆硬厚岩层简化为三边固支一边自由弹性薄板。文献[11]中给出了该条件下板挠度计算的精确计算公式, 本文不再分析。

2) 第 2 区段: 1007 工作面推采进入 1005 工作

面采空区范围并初次来压后, 上覆硬厚岩层在本工作面采空区方向已经断裂, 由于采空区内缺失直接顶垮落形成的垫层, 硬厚岩层运动空间大, 因此将硬厚岩层在采空区方向看作自由边; 硬厚岩层在 1005 工作面采空区内部已经断裂但受工作面间留设区段煤柱支承作用影响。该区段上覆岩层可简化为两临边固支一边简支一边自由弹性薄板。

以硬厚岩层中性面为基准面, 建立两临边固支一边简支一边自由的薄板力学模型, 如图 1 所示。其中:  $x$  为工作面沿走向推进方向,  $y$  为工作面沿倾斜方向;  $a$  为硬厚岩层走向暴露长度,  $b$  为硬厚岩层沿工作面长的暴露长度;  $q$  为硬厚岩层所受均布载荷,  $M_x$ ,  $M_y$  为固定边界弯矩。

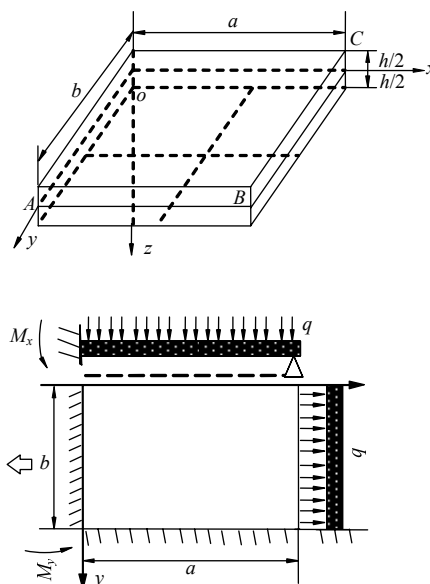


图 1 两临边固支一边简支一边自由薄板力学模型

Fig.1 Mechanical model of two adjacent clamped edges one simply supported edge one free edge thin plate

## 3 硬厚石英砂岩周期性破断力学解析

薄板的小挠度弯曲问题通常都按照位移法进行求解, 取挠度  $w=w(x, y)$  作为基本未定函数<sup>[12]</sup>。对于矩形弹性薄板来说, 求解同时满足挠度曲面微分方程以及对应边界条件的精确解比较困难, 一般利用瑞利-里兹法建立精确满足边界条件的挠度方程, 对挠度曲面微分方程的满足给以放松, 从而得到问题的近似解<sup>[13]</sup>。

随硬厚岩层暴露面积的不断增大, 岩层自重及上覆岩层重量影响在板内部产生的弯矩和扭矩在板的微小弯曲变形上做的功, 转化为储藏在板内部的弯曲变形能<sup>[14]</sup>。

$$V = \frac{1}{2} D \iint \left\{ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\mu) \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (6)$$

由变分法最小势能原理, 薄板的总势能为板的变形能与荷载对板所做功之差, 即

$$L = \iint q w dx dy \quad (8)$$

$$I = V - L \quad (7) \quad \text{有}$$

式中:  $I$  为薄板的总势能,  $J$ ;  $V$  为薄板的变形能,  $J$ ;

$$I = \iint \left\{ \frac{D}{2} \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\mu) \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right] - q w \right\} dx dy \quad (9)$$

当板处于稳定平衡状态时, 其势能最小, 由变分方程  $\delta I = 0$  确定。

对于文中选定的两临边固支一边简支一边自由弹性薄板, 与板的上、下板面相比, 板边是次要

的边界面, 因此在板边可以应用圣维南原理, 把应力边界条件替换为内力边界条件, 并将内力边界条件用板的挠度来表达<sup>[14]</sup>, 则该板的边界条件为:

$$\begin{aligned} w|_{x=0} = 0, \frac{\partial w}{\partial x}|_{x=0} = 0; \quad w|_{y=b} = 0, \frac{\partial w}{\partial y}|_{y=b} = 0; \quad w|_{y=0} = 0, \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)|_{y=0} = 0; \\ -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = M_x - D \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right]_{x=a} = V_x \end{aligned} \quad (10)$$

纳维在求解此类问题时把挠度  $w$  的表达式取为重三角级数, 在计算精度可以满足要求的条件下, 为了计算简便, 选择重三角级数的首项建立挠度  $w$  表达式:

$$w(x, y) = A y \sin^2 \frac{\pi x}{4a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \quad (11)$$

所选挠度表达式  $w$  在  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $y=b$  上满足边界条件。

将式(11)代入式(9), 并令  $\partial I / \partial A = 0$ , 得到

$$A = \frac{1536 q a^4 b^3 (\pi - 2)^2 (\pi + 2)}{D \pi^4 [16(2\pi^2 + 15)(3\pi - 8)a^4 + 8(2\pi^2 - 3)(\pi - 4\mu)a^2 b^2 + 3\pi(2\pi^2 - 15)b^4]} \quad (12)$$

将  $A$  代入式(6), 则挠度  $w$  表达式为

$$w(x, y) = \frac{1536 q a^4 b^3 (\pi - 2)^2 (\pi + 2)}{D \pi^4 [16(2\pi^2 + 15)(3\pi - 8)a^4 + 8(2\pi^2 - 3)(\pi - 4\mu)a^2 b^2 + 3\pi(2\pi^2 - 15)b^4]} \sin^2 \frac{\pi x}{4a} \cos^2 \frac{\pi y}{2b} \quad (13)$$

$$D = E h^3 / 12 (1 - \mu^2) \quad (14) \quad h \text{ 为硬厚岩层的厚度, m; } \mu \text{ 为泊松比。}$$

式中:  $q$  为硬厚岩层所承载荷, MPa;  $D$  为硬厚岩层抗弯刚度, N/m;  $E$  为硬厚岩层的弹性模型, MPa;

由胡克定律:

$$\sigma_x = -\frac{E z}{1 - \mu^3} = \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right], \quad \sigma_y = -\frac{E z}{1 - \mu^3} = \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \quad (15)$$

求得:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{12 M_x}{h^3} z = \frac{12 D A z}{h^3} \left[ \frac{\pi^2 y}{8 a^2} \cos \frac{\pi x}{2 a} \cos^2 \frac{\pi y}{2 b} + \mu \sin^2 \frac{\pi x}{4 a} \left( \frac{\pi}{b} \sin \frac{\pi y}{b} + \frac{\pi^2 y}{2 b^2} \cos \frac{\pi y}{b} \right) \right] \\ \sigma_y &= \frac{12 M_y}{h^3} z = \frac{12 D A z}{h^3} \left[ \sin^2 \frac{\pi x}{4 a} \left( \frac{\pi}{b} \sin \frac{\pi y}{b} + \frac{\pi^2 y}{2 b^2} \cos \frac{\pi y}{b} \right) + \mu \frac{\pi^2 y}{8 a^2} \cos \frac{\pi x}{2 a} \cos^2 \frac{\pi y}{2 b} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

应力在板内部分布如图2所示。

经计算分析可知, 硬厚岩层破断前在固支边岩

层的上表面( $z = -h/2$ )形成负弯矩区, 产生拉应力, 其最大拉应力为:

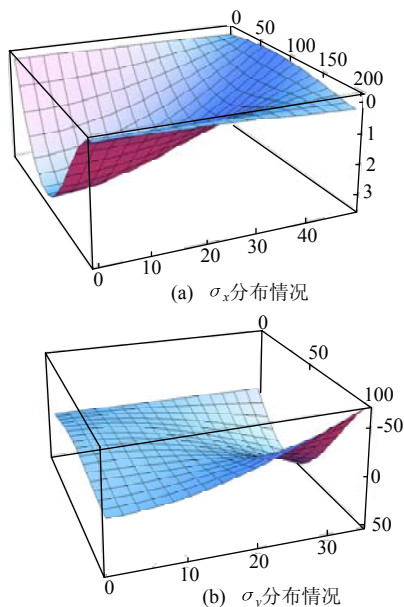


图 2 两边固支一边简支一边自由薄板应力分布  
Fig.2 Stress distribution of two adjacent clamped edges one simply supported edge one free edge thin plate

$$(1) \text{ 当 } x=0, y=\frac{13b}{10\pi} \text{ 时, } \sigma_{x\max} = \frac{247AD\pi b}{400h^2a^2};$$

$$(2) \text{ 当 } x=a, y=b \text{ 时, } \sigma_{y\max} = \frac{3AD\pi^2}{h^2b}。$$

$$\frac{\sigma_{x\max}}{\sigma_{y\max}} = \frac{247}{1200\pi} \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (17)$$

定义  $k=b/a$ , 为覆岩悬跨系数。

当  $k=3.78$  时,  $\sigma_{x\max}=\sigma_{y\max}$ , 薄板应力最大点位于倾向固支边内部和走向固支边-自由边交角点处;

当  $k>3.78$  时,  $\sigma_{x\max}>\sigma_{y\max}$ , 薄板内最大应力点位于倾向固支边内部;

当  $k<3.78$  时,  $\sigma_{x\max}<\sigma_{y\max}$ , 薄板内最大应力点位于走向固支边-自由边交角点。薄板的破断形式为偏 O-X 型破断<sup>[4-5]</sup>。

岩体的强度特性是  $\sigma_t < \tau < \sigma_c$ <sup>[15]</sup> ( $\sigma_t$ ,  $\tau$ ,  $\sigma_c$  分别为岩体抗拉强度、抗剪强度、抗压强度), 因此, 当薄板某点处应力值超过其抗拉强度时, 薄板将在该应力最大值点处出现张拉裂隙, 进而发生破坏<sup>[16]</sup>。

当  $\sigma_{x\max} < \sigma_t$  时:

$$a = \sqrt{\frac{-8(2\pi^2 - 3)(\pi - 4\mu)b^2 + \frac{23712qb^4(\pi - 2)^2(\pi + 2)}{25h^2\pi^3\sigma_t} - b^2 \sqrt{\left[8(2\pi^2 - 3)(\pi - 4\mu) - \frac{23712qb^2(\pi - 2)^2(\pi + 2)}{25h^2\pi^3\sigma_t}\right]^2 - 192\pi(4\pi^4 - 225)(3\pi - 8)}}{32(2\pi^2 + 15)(3\pi - 8)}} \quad (18)$$

当  $\sigma_{y\max} < \sigma_t$  时:

$$a = \sqrt{\frac{-8(2\pi^2 - 3)(\pi - 4\mu)b^2 - b^2 \sqrt{64(2\pi^2 - 3)^2(\pi - 4\mu)^2 - 12\pi(12\pi^2 - 15) \left[16(2\pi^2 + 15)(3\pi - 8) - \frac{4608qb^2(\pi - 2)^2(\pi + 2)}{h^2\pi^2\sigma_t}\right]}}{32(2\pi^2 + 15)(3\pi - 8) - \frac{9216qb^2(\pi - 2)^2(\pi + 2)}{h^2\pi^2\sigma_t}}} \quad (19)$$

利用式(18)和(19)计算得到相邻 1005 工作面上覆硬厚岩层周期断裂步距为 11.3~12.5 m, 与现场监测平均来压步距 14.6 m 基本接近。1007 工作面下位硬厚细粒砂岩层抗拉强度为 3.49~5.45 MPa, 由式(18)和式(19)计算其最小断裂步距为 14.2~18.0 m; 上位硬厚石英砂岩层抗拉强度为 8.5~10.3 MPa, 计算得到其最小断裂步距为 20.2~22.6 m, 当硬厚岩层抗拉强度增大时, 硬厚岩层的最小断裂步距将进一步增大。

#### 4 硬厚岩层运动控制技术

由上节计算分析结果可以看出, 两层硬厚岩层周期性断裂步距都比较大, 随工作面推采, 硬厚岩层逐渐暴露, 在达到断裂步距之前, 在采空区特别

是端头区域形成悬顶, 易致使瓦斯积聚, 成为岩层运动引燃瓦斯的必要条件; 另外, 工作面岩石破坏、断裂面摩擦释放热量、温度升高是普遍现象, 坚硬岩层如石英砂岩发生破坏时释放的热量更甚。由于下 10 煤层直接顶缺失, 硬厚岩层石英含量高, 煤层采出后留给岩层的运动空间大, 硬厚岩层运动加速距离增加, 岩块间摩擦速度增大, 含大量石英成分顶板砂岩摩擦错动释放大热量甚至产生火花, 成为引燃采空区瓦斯的充分条件。因此, 对硬厚岩层运动的控制重点一是降低硬厚岩层的运动步距, 在采场范围内不留瓦斯积聚的空间条件; 二是确保下位硬厚岩层的及时、充分垮落, 岩层运动所释放热量不足以引燃瓦斯。

结合 1007 工作面生产实际条件及顶板运动状

况,工作面中部顶板垮落较好,端头区域悬顶严重,因此重点对端头区域硬厚岩层进行处理。利用工作面回采巷道,对下位硬厚细粒砂岩实施步距式扇形旋转深孔超前预裂弱化,实现下位细粒砂岩的及时垮落;对上位硬厚石英砂岩实施拉槽截断爆破,改变硬厚石英砂岩的边界支承条件,减小硬厚岩层的运动步距。理论计算下位硬厚岩层最小断裂步距为14.2 m,结合矿井正常生产工序的安排,下位硬厚岩层深孔爆破弱化步距确定为15 m。硬厚岩层运动控制弱化方案见图3。

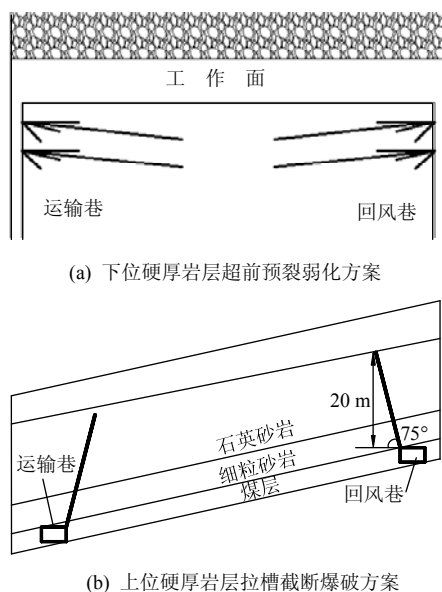


图3 硬厚岩层运动控制弱化方案

Fig.3 Control and weaken program of hard thick strata

通过实施硬厚岩层综合弱化方案,并且随着现场工业性试验进行对爆破参数进行优化调整,上下隅角下位硬厚顶板已可以做到随采随冒,隅角采空区不再存在悬顶,而被垮落的硬厚岩层填满。通过对工作面进行的矿压监测显示,下位硬厚细粒砂岩在旋转扇形深孔预裂爆破作用下以实现了随采随冒,不再具有周期来压的特性,实现了由基本顶向直接顶的转化;上位石英砂岩岩层在旋转扇形深孔和拉槽截断深孔预裂爆破的共同作用下,其周期破断步距为周期来压步距由理论分析的最小20.2 m缩短为15 m左右,来压步距减小了25.7%,上位硬厚石英砂岩层的及时断裂回转运动,即降低了基本顶岩层运动对工作面的冲击,又促使下位细粒砂岩岩层进一步碎裂。工作面液压支架工作阻力监测结果见图4。工作面在后续推采过程中,未再出现覆岩运动引燃采空区瓦斯事故。

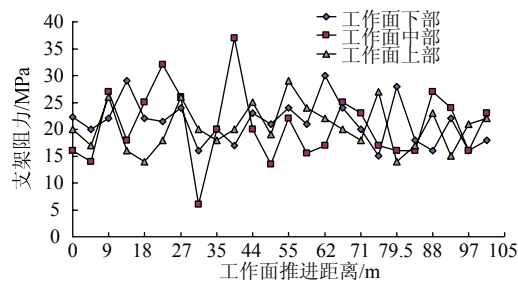


图4 工作面液压支架工作阻力

Fig.4 Hydraulic support working resistance of work face

## 5 结 论

1) 建立了硬厚岩层两临边固支一边简支一边自由弹性薄板力学模型,采用变分法和最小势能原理,推导出硬厚岩层挠度函数近似解析式,得到硬厚岩层破断步距的计算式。

2) 对于两临边固支一边简支一边自由弹性薄板,破断前 $x$ 方向最大应力点在倾向固支边( $x=0$ ,  $y=13b/10\pi$ )处, $y$ 方向最大应力点在固支边与自由边交角点( $x=a$ ,  $y=b$ )处。当 $b/a=3.78$ 时,薄板将从倾向固支边内部和走向固支边-自由边交角点处断裂;当 $b/a>3.78$ 时,薄板将首先从倾向固支边内部断裂;当 $b/a<3.78$ 时,薄板将首先从走向固支边-自由边交角点断裂。

3) 双层硬厚岩层运动控制设计方案应以实现下位硬厚岩层充分弱化、上位硬厚岩层有效截断为主,合理的弱化参数可以保证硬厚岩层运动控制的实施效果。

## 参考文献:

- [1] 靳钟铭,徐林生. 煤矿坚硬顶板控制[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1994: 14-20.
- [2] 宋永津. 注水压裂弱化控制煤层坚硬难冒顶板技术[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2002: 31-35.
- [3] 史元伟. 采煤工作面围岩控制原理和技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2003: 18-27.
- [4] 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: 44-49.
- [5] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2003: 27-32.
- [6] 蒋金泉. 采场围岩应力与运动[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1993: 15-21.
- [7] 黄耀光,浦海. 不同边界下的坚硬顶板极限承载分析及破断距确定[J]. 煤矿开采, 2012, 17(2): 12-16.  
HUANG Yaoguang, PU Hai. Analysis of roof limit load and broken pace under different boundary conditions[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(2): 12-16.

- [8] 王平, 姜福兴, 冯增强, 等. 高位厚硬顶板断裂与矿震预测的关系探讨[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 618-623.  
WANG Ping, JIANG Fuxing, FENG Zengqiang, et al. Relationship between fracture of high-position thick and hard roof and mine quake forecast[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 618-623.
- [9] 王晓亮, 窦林名, 李凤荣, 等. 采空区上方巨厚硬岩破断的力学分析[J]. 煤炭科技, 2009, 34(2): 13-15.  
WANG Xiaoliang, DOU Linming, LI Fengrong, et al. Mechanical analysis of huge thick hard strata fracture over goaf[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2009, 34(2): 13-15.
- [10] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 12-17.
- [11] 岳建勇, 曲庆璋. 三边固定一边自由矩形板的精确解[J]. 青岛建筑工程学院学报, 1999, 20(1): 16-21.  
YUE Jianyong, QU Qingzhang. The precise solution of rectangular plate with three edges built in and the fourth edge free[J]. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, 1999, 20(1): 16-21.
- [12] 刘人怀. 板壳力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 33-36.
- [13] 许琪楼, 姜锐, 唐国明, 等. 四边支承矩形板弯曲统一求解方法: 兼论纳维叶解与李维解法的统一性[J]. 工程力学, 1999, 16(3): 90-99.  
XU Qilou, JIANG Rui, TANG Guoming, et al. Unified solution method on rectangular plate bending with four edges supported: discussion on unification of the Navier Solution and Levy Solution[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(3): 90-99.
- [14] 贾喜荣. 岩石力学与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 18-25.
- [15] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006: 47-51.
- [16] 谭云亮, 吴士良, 尹增德, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009: 22-24.

(上接第 725 页)

- LI Qiusheng, BIAN Gang, YIN Dongchen. Study on new combined hydraulic support of suspension roof timber[J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(5): 118-119.
- [9] 章之燕. 大倾角综放液压支架稳定性动态分析和防倒防滑措施[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 705-709.  
ZHANG Zhiyan. Dynamic analysis on stability of hydraulic powered support in deep inclined fully-mechanized wall and prevention slips measures[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 705-709.
- [10] LI Xuehua. Deformation mechanism of surrounding rocks and key control technology for a roadway driven along goaf in fully mechanized top-coal caving face[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2003, 9(1): 28-32.
- [11] 田敬海, 苏茂秋, 李国臣. 软底碎顶大倾角工作面支护技术探讨[J]. 矿山压力与顶板管理, 2000, 17(3): 17-19.
- TIAN Jinghai, SUN Maoqiu, LI Guochen. Technology of face support in soft broken bottom mining face[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000, 17(3): 17-19.
- [12] 马文顶, 刘长友, 邹永华, 等. 大倾角仰采工作面顶板控制的实验研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1996, 13(4): 18-21.  
MA Wending, LIU Changyou, ZOU Yonghua, et al. Experimental study of roof control at highly inclined up-dip longwall face[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1996, 13(4): 18-21.
- [13] 赵洪亮, 袁永, 张琳. 大倾角松软煤层综放面矿压规律及控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 345-348.  
ZHAO Hongliang, YUAN Yong, ZHANG Lin. Strata behavior in fully mechanized top coal caving face of steep soft coal seams and its control[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 345-348.