

文章编号: 1673-3363-(2014)01-0049-06

基于薄板理论的急倾斜工作面 顶板初次变形破断特征研究

屠洪盛, 屠世浩, 陈芳, 王沉, 冯宇峰

(中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 根据急倾斜煤层工作面顶底板地质赋存条件以及冒落矸石对工作面中下部采空区的充填特征, 利用弹性薄板小挠度理论, 建立了急倾斜工作面顶板的受力力学模型, 研究了顶板在上覆岩层和下方充填矸石作用下顶板挠曲变形特征, 得到急倾斜工作面下部采空区充填带宽度的理论计算公式和顶板变形挠度方程, 结合龙煤集团七台河新铁煤矿工作面实际开采参数, 分析出急倾斜工作面中上部顶板受力变形较大, 下部顶板变形较小, 最大挠度点距工作面上端头 24 m 处, 最大变形量为 320 mm, 工作面中上部前方煤壁和后方煤壁处、上部顶板和中下部冒落矸石接触处将首先出现拉伸或剪切破坏, 最后将形成“U”字型破断。研究结果与实际顶板受力变形相符。

关键词 急倾斜; 基本顶; 破断形式; 力学模型; 薄板理论

中图分类号 TD 323

文献标志码 A

Study on the deformation and fracture feature of steep inclined coal seam roof based on the theory of thin plates

TU Hongsheng, TU Shihao, CHEN Fang, WANG Chen, FENG Yufeng

(School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Based on the geological occurrence conditions of roof and floor steep coal working face and the characteristics of middle and lower caving gangue filling of goaf, the force model of steep coal working face is established by using theory of elastic thin plate, flexure deformation characteristics under overlying strata and inferior goaf filling gangue are studied, and the theoretical calculation formula of goaf filling width and deflection equation of roof deformation is obtained. In light of the field parameter at Xintie mine of Long Mine group in Qitaihe branch, the study have shown that in the steep inclined working face, there is a larger deformation in the roof in the upper part and less deformation in the lower part; maximum deflection is 24 m away from working face end, with maximum deformation 320 mm; In the working surface of coal wall in the front and rear upper coal wall, roof and upper part of caving rock contact office will first appear to stretch or cause shear failure, finally will form an “U” type breaking. Research results conform to actual roof deformation.

Key words steep seam; main roof; fracture mode; mechanical model; theory of elastic thin plate

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA062101); 江苏省高校优势学科建设工程项目; 江苏省研究生培养创新工程项目(CXZZ12_0950)

作者简介: 屠洪盛(1985-), 男, 江苏省泰州市人, 博士, 从事采煤方法与岩层控制方面的研究。

E-mail: 13852086048@163.com

Tel: 13852086048

急倾斜工作面基本顶的变形破断特征将影响到工作面的矿压显现^[1-5]、工作面设备防滑防倒、巷道支护设计,因此研究急倾斜工作面基本顶变形破坏特征对急倾斜煤层围岩控制具有积极意义。

急倾斜煤层($45^\circ \sim 90^\circ$)由于煤层倾角大,顶板受力具有明显的不对称性^[6-9],导致其顶板变形破坏特征与水平煤层、缓倾斜煤层不同。对于急倾斜工作面顶板变形规律方面学者们主要从顶板的二维梁式受力模型到三维的板受力模型,从顶板的均布载荷分布到更符合实际的梯形载荷分布。

殷露中^[10]从顶板受均布载荷出发分析了顶板变形与工作面开采参数之间的关系;杨帆^[11]利用薄板理论的变分原理分析了急倾斜工作面顶板的挠度计算公式;张嘉凡^[12]利用 Kirchhoff 薄板理论中的能量法得到急倾斜顶板挠度的解析表达式,探讨了基本顶变形特征;尹光志^[13]利用薄板理论分析得到了急倾斜工作面顶板挠度以及最大挠度点的计算公式。

现场实测表明,急倾斜工作面开采过程中直接顶会随着工作面的推进冒落,冒落矸石对工作面中下部采空区进行充填,充填矸石的支撑作用会对急倾斜工作面顶板变形产生一定影响,此外对于水平煤层、缓倾斜煤层顶板呈现“O-X”型破断,然而对于急倾斜煤层顶板将呈现何种破断形式,国内外学者还没有给出具体的结论。

本文在前人研究的基础上,将顶板上方载荷分解为横向和纵向分布载荷,同时考虑冒落充填矸石对顶板的支撑作用,建立基本顶变形挠曲函数,得到基本顶主应力分布规律,确定急倾斜工作面基本顶变形特征。

1 采空区冒落特征

急倾斜工作面开采过程中冒落直接顶会对采空区下部进行充填,造成工作面下部顶板冒落岩层高度减小,采空区上部冒落岩层高度变大,当工作面上方基本顶的极限跨距大于基本顶的悬空宽度时,基本顶、充填矸石和工作面上部区段煤岩柱三者之间形成平衡的压力拱结构,因此工作面中下部的充填矸石对急倾斜工作面顶板的变形有一定影响。

从上覆岩层的岩性及现场观察看,基本顶下部的直接顶可分为极易冒落岩层和滞后冒落岩层,由于急倾斜煤层工作面采用自下而上移架方式,极易冒落岩层随移架很快冒落,上部极易冒落矸石的充填作用阻止了工作面下部滞后冒落岩层的冒落,工

作面上部滞后冒落岩层随着工作面的推进冒落并对工作面中下部采空区进行充填。根据工作面顶板冒落充填和矸石的碎胀特点,可以得到工作面中下部充填带宽度计算式:

$$\begin{aligned} bh_1k_1 + (b-L)h_2k_1 &= L(M+h_1) \\ L &= \frac{b(h_1+h_2)k_1}{M+h_1+h_2k_1} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: L 为工作面中下部采空区充填带宽度; b 为工作面长度; h_1 为极易冒落岩层厚度; h_2 为滞后冒落岩层厚度; M 为煤层采高; k_1 为冒落岩石碎胀系数。

2 顶板变形破断特征

薄板理论认为当板的厚度与最小宽度之比大于 $1/100 \sim 1/80$ 小于 $1/8 \sim 1/5$ ^[14]时可以看成是薄板。对于工作面顶板厚度与工作面倾向长度或顶板断裂步距满足此条件的煤层都可以用薄板理论进行分析。

2.1 急倾斜顶板受力分析

分析可知急倾斜工作面基本顶主要受上覆岩层作用和采空区中下部充填矸石的支撑力作用而产生变形,同时由于急倾斜工作面煤层倾角大于 45° ,上覆岩层作用力沿煤层倾向的分量大于沿煤层法向分量,此时倾向分力作用不可忽略,因而确定急倾斜工作面顶板的变形是由横向载荷和纵向载荷共同作用下产生的变形。

为了问题的求解过程中积分项能够从坐标原点开始,建立如图 1 所示的直角坐标系,顶板沿 x 轴方向宽度(顶板断裂长度)为 a ,沿 y 轴方向宽度(工作面倾斜长度)为 b ,图中上覆岩层作用力为 q ,呈梯形分布, H_1 为工作面上端头煤层埋深, H_2 为工作面下端头煤层埋深,工作面上端头作用力 $q_1 = \gamma H_1$,工作面下端头作用力 $q_2 = \gamma H_2$, γ 为岩层平均体积力,因此上覆岩层作用载荷 $q = q_2 - (q_2 - q_1)y/b$,其横向分量 $q_{11} = q \cos \theta$,纵向分量 $q_{12} = q \sin \theta$, θ 为煤层倾角。

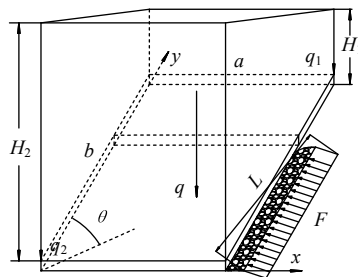


图 1 工作面基本顶受力模型

Fig.1 Working face force model of main roof

急倾斜工作面采空区下方自溜充填矸石的压缩变形过程也是体现上覆岩层运动的过程，上覆岩层和矸石支撑体是一种协调作用系统，上覆岩层的下沉变形越大矸石的压实程度越高，其承载作用越大，矸石能够提供对顶板的作用力越大。

通过对充填体试件的力学试验研究表明，矸石充填体在三轴受压条件下同样具有弹性变形、屈服、塑性变形和塑性破坏 4 阶段，其应力状态沿充填体的宽度方向上呈现非均匀分布^[15]。当板的挠度较小时(薄板小挠度理论)，可采用温克尔-齐母门假设，即弹性地基上单位面积的反力与该点的挠度成正比，因此冒落自溜充填矸石承受的载荷可表示：

$$F = kw \quad (2)$$

式中：\$F\$ 为矸石提供的作用力，MPa；\$k\$ 为矸石体的等效弹性系数，MPa/m；\$w\$ 为上覆基本顶的挠度，m。

假设 \$q_{11}\$ 对顶板产生的挠度为 \$w_1\$，\$q_{12}\$ 产生的挠度为 \$w_2\$，\$F\$ 产生的挠度为 \$w_3\$，由挠度叠加原理可知顶板的总挠度 \$w=w_1+w_2+w_3\$。

2.2 顶板变形特征

由薄板理论可知，薄板在仅有纵向载荷作用下薄板产生的变形较小，可以忽略；薄板在横、纵向载荷共同作用下纵向载荷产生的变形不可忽略，对于横向和纵向载荷共同作用时纵向载荷产生的变形可认为是先作用横向载荷产生变形 \$w_1, w_3\$ 后再在纵向载荷作用下产生变形 \$w_2\$。顶板在横向载荷和纵向载荷作用下薄板变形的静力平衡微分方程为^[14]：

$$D\nabla^4 \omega = q_r + N_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \quad (3)$$

式中：\$D=Eh^3/12(1-\nu^2)\$，称为薄板的抗弯刚度；\$E\$ 为弹性模量；\$h\$ 为薄板厚度；\$\nu\$ 为泊松比；\$w\$ 为薄板挠曲函数；\$q_r\$ 为作用于薄板的横向载荷；\$N_x, N_y, N_{xy}\$

为作用于薄板中面内力，其中 \$N_x=h\sigma_x, N_y=h\sigma_y, N_{xy}=h\tau_{xy}\$，据前面分析 \$w_1, w_2, w_3\$ 间的变形关系有^[14]：

$$D\nabla^4 \omega_2 = q_{r1} + q_{r3} + N_x \frac{\partial^2 \omega_2}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 \omega_2}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 \omega_2}{\partial y^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{式中：} \quad q_{r1} &= N_x \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial y^2} \\ q_{r3} &= N_x \frac{\partial^2 \omega_3}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 \omega_3}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 \omega_3}{\partial y^2} \end{aligned}$$

问题的求解首先应求得横向载荷产生的变形 \$w_1\$ 和 \$w_3\$。根据经典薄板解法(纳维解法)，可假设 \$w_1\$ 的挠曲函数形式为：

$$\omega = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{n\pi y}{b} \quad (5)$$

式中：\$A_{mn}\$ 为未知的待定系数，\$m, n\$ 为任意正整数，可根据级数的收敛程度和工程实际需求精度取不同数据。对于初采急倾斜工作面其顶板四周为固支边界，四边固支边界条件为：\$(\omega)_{x=0,a} = \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)_{x=0,a} = 0\$，

$$(\omega)_{y=0,b} = \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)_{y=0,b} = 0$$

所设挠度方程式(5)显然满足固支边界条件。当只有横向载荷 \$q_{11}\$ 作用时 \$N_x=0, N_y=0, N_{xy}=0\$，将式(5)代入式(3)中求解可得：

$$\begin{aligned} \omega_1 &= A_{mn} \sum_{m=1,2,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{n\pi y}{b} \\ A_{mn} &= \frac{(q_1 + q_2) \cos \theta}{\pi^4 D \left(\frac{3m^4}{a^4} + \frac{2m^2 n^2}{a^2 b^2} + \frac{3n^4}{b^4} \right)} \end{aligned} \quad (6)$$

式(2)中充填矸石产生的变形即为横向载荷 \$q_{11}\$ 产生的挠度，因此同理可求得充填矸石作用力 \$F\$ 对顶板产生的挠度为：

$$\begin{aligned} \omega_3 &= C_{mn} \sum_{m=1,2,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{n\pi y}{b} \\ C_{mn} &= - \frac{3(q_1 + q_2)k \cos \theta}{64\pi^9 n D^2 \left(\frac{3m^4}{a^4} + \frac{2m^2 n^2}{a^2 b^2} + \frac{3n^4}{b^4} \right)^2} \left(\frac{12Ln\pi}{b} - 8 \sin \frac{2Ln\pi}{b} + \sin \frac{4Ln\pi}{b} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

由板的受力变形特征可知横向载荷产生的变形较纵向载荷产生的变形要大得多^[10,13]，因此式(4)中右边的前 2 项比后 3 项大得多，后 3 项可省略，式(4)可化简为：

$$D\nabla^4 \omega_2 = q_{r1} + q_{r3} = q_{r2} \quad (8)$$

根据图 1 中建立的坐标系统和薄板的受力变形特征可知，中面位移不受 \$x\$ 方向和薄板上表面的边

界条件约束，因此可以得到中面内力为：

$$\begin{aligned} N_x &= h\sigma_x = 0 \\ N_y &= h\sigma_y = -q_{12}y = \left(q_2 - \frac{q_2 - q_1}{b} y \right) \sin \theta \\ N_{xy} &= h\tau_{xy} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

因此有：

$$q_{r2} = N_y \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial y^2} + N_y \frac{\partial^2 \omega_3}{\partial y^2} = N_y (A_{mn} + C_{mn}) \sum_{m=1,2,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \frac{2\pi^2 n^2}{b^2} \cos \frac{2n\pi y}{b} \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{n\pi y}{b} \quad (10)$$

采用前面挠曲变形解法同理可以得到:

$$\begin{aligned} \omega_2 &= B_{mn} \sum_{m=1,2,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{n\pi y}{b} \\ B_{mn} &= \frac{3a^8 b^8 \cos(q_1 + q_2) \sin 2\theta ((-15 + 8n^2 \pi^2) + (15 + 4n^2 \pi^2))}{32768\pi^{14} n^2 D^3 (3b^2 m^4 + 2a^2 b^2 m^2 n^2 + 3a^2 n^4)^3} \times \\ &\quad (4n\pi(-9a^4 b^3 kL + 8D(3b^2 m^4 + 2a^2 b^2 m^2 n^2 + 3a^2 n^4)\pi^4) - 3a^4 b^4 k \left(-8\sin \frac{2Ln\pi}{b} + \sin \frac{4Ln\pi}{b} \right)) \end{aligned} \quad (11)$$

对于采矿工程问题,当 m 取 1, n 取 1 时完全可以满足现场顶板变形精度要求,因此可得急倾斜工作面顶板的挠曲函数方程为:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = \\ & (A_{mn} + B_{mn} + C_{mn}) \sum_{m=1,2,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{n\pi y}{b} \end{aligned} \quad (12)$$

根据急倾斜工作面顶板受力特征,沿工作面走向顶板受力关于走向中线对称,倾向受力具有不对称性,因此将 $x=a/2$ 代入式(12)并对式中 y 进行求导可以得到挠度最大点的位置。

3 实例分析

3.1 工程概况

黑龙江龙煤矿业集团共有 62 个急倾斜生产矿井,占生产矿井总数的 45.5%。七台河分公司(主要开采黑龙江东部的勃利煤田)隶属于龙煤集团,共 12 对生产矿井,急倾斜煤层可采储量为 26 835 万 t。新铁矿在急倾斜煤层开采技术方面处于国内先进水平,新铁矿 50%以上的煤层为急倾斜煤层(储量为 9 557 万 t),矿井目前主要开采一水平五采区的 49[#]急倾斜煤层,分为 49[#]_上和 49[#]_下2 层,层间距平均 1 m,地面标高+211 m,井下标高-141~-215 m,工作面煤层赋存稳定、结构简单,49[#]_下平均厚 1.7 m,49[#]_上平均厚 0.9 m,硬度 0.8,倾角 58°~62°,平均 60°,沿倾向布置走向推进,回采工作面倾向长 84 m,走向长 551 m,自上而下回采。直接顶由粉砂岩和细砂岩组成,平均厚度 4.3 m,基本顶为粗细砂岩互层,平均厚度 5.1 m,老底为粉细互层,平均厚度 6.5 m。工作面采用 MG2×125/580-WD 采煤机割煤, ZQY3600/12/26 型液压支架管理顶板和 SGZ-730/320 刮板输送机运输。

3.2 顶板受力特征

新铁矿急倾斜工作面直接顶中滞后冒落岩层厚度 2.4 m,极易冒落岩层厚度 1.9 m,当工作面长度为 84 m,采高为 1.7 m 时,根据式(1)计算得出工作面顶板冒落煤矸石能够对中下部 67 m 范围内采空区进行充填。

新铁矿急倾斜工作面实测工作面基本顶初次来压步距为 50 m,煤层平均倾角 60°,工作面上端头埋深 352 m,下端头埋深 426 m,基本顶厚度为 5.1 m,岩层平均体积力 γ 取 25 kN/m³,泊松比 ν 取 0.25,等效弹性系数 k 取 30 MPa/m^[16]。结合薄板变形与应力分布的关系可得出正应力与剪切应力的分布关系为:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y &= -\frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xy} &= -\frac{E}{1+\nu^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (13)$$

将上述参数代入式(12)并结合式(13)可得出急倾斜工作面顶板应力分布如图 2 所示。

从图 2 可以看出:急倾斜工作面顶板中水平应力沿工作面倾斜方向分布具有明显的不对称性,沿走向方向水平应力关于顶板走向中线对称分布,工作面采空区中下部由于矸石的充填作用水平应力较小,工作面中上部由于采空区的悬顶作用水平应力较大,沿走向(x 轴方向)的水平应力比沿倾向(y 轴方向)大,水平应力最大值位于工作面上部悬空顶板的中部,工作面中上部走向煤壁处(工作面前方煤壁处和工作面后方采空区煤壁处)出现拉应力作用;剪切应力呈现区域集中分布,沿工作面倾斜方向呈对称分布,最大点位于各剪切应力集中区的中部。

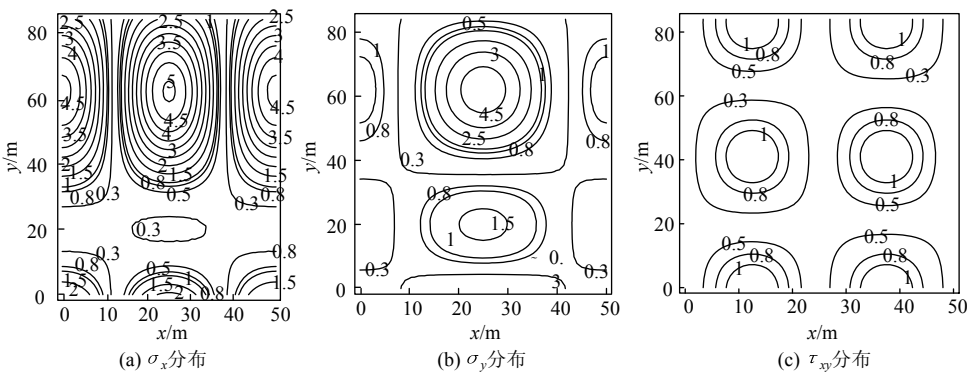


图 2 顶板应力分布规律 (MPa)

Fig.2 Stress distribution law of main roof

3.3 顶板变形破断特征

强度准则规定材料的破断首先出现在最大主应力点处，主应力与水平应力存在如下关系：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} \\ \sigma_{\min} \end{aligned} \right\} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2} \quad (14)$$
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

急倾斜工作面顶板最大主应力和最大剪切应力分布规律如图 3、4 所示，图中负值表示作用方向与主应力方向相反。

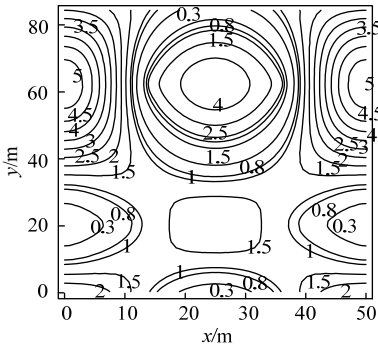


图 3 最大主应力 (MPa)

Fig.3 Maximum principal stress

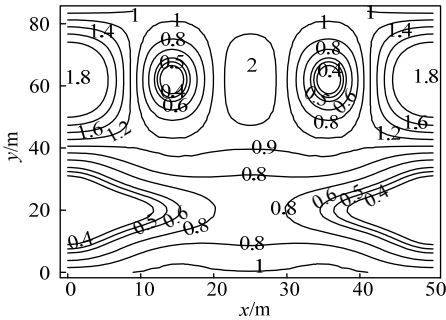


图 4 最大剪切应力 (MPa)

Fig.4 Maximum shear stress

由此可看出：急倾斜工作面中上部(悬顶空间)前方煤壁和工作面后方煤壁为最大主应力集中区，且为拉应力，工作面中上部(悬顶空间)前方煤壁和工作面后方煤壁、中上部顶板和中下部冒落矸石接触处为最大剪切应力集中区。

由于岩石的抗拉强度远小于岩石的抗压强度，同时岩石的抗拉强度和抗剪强度不确定，结合上述应力分布特征，确定急倾斜工作面中上部顶板工作面前方煤壁和工作面后方煤壁、中上部顶板和中下部冒落矸石接触处将可能先出现拉伸或剪切破坏，3 处破断裂纹贯通后将形成“U”字型破断，自下而上扩展，如图 5 所示。

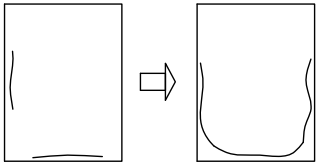


图 5 顶板破断形式

Fig.5 Fracture form of main roof

从图 6 可看出，新铁矿 49#下右 6 片急倾斜工作面顶板变形在走向方向上关于走向中线对称分布，沿工作面倾向顶板变形位于工作面中上部，距工作面上端头 24 m 左右，最大变形量为 320 mm 左右。

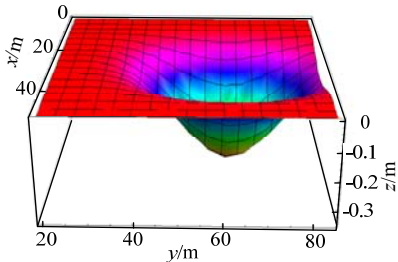


图 6 顶板挠度曲线

Fig.6 Deflection curve of main roof

为了验证顶板变形特征,现场实测了工作面液压支架受力分布,沿工作面倾斜方向共布置了 3 个测站,分别命名为工作面上部、中部、下部测站,每个测站安装 4 个压力表,进行近 1 个月的矿压数据观测(工作面推进 124 m),如图 7 所示。

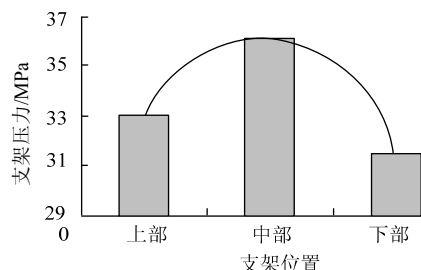


图 7 沿工作面倾向压力分布

Fig.7 Pressure distribution along tilt direction of working face

液压支架受力实测表明:支架受力最大为工作面中部,次之为工作面上部,最小为工作面下部,其压力值基本和泵站压力相等,理论分析顶板受力变形特征和现场支架受力分布规律一致。

4 结 论

1) 根据急倾斜工作面煤层赋存特征和工作面直接顶冒落难易程度,将直接顶分类为极易冒落和滞后冒落 2 类,分析得到了急倾斜工作面中下部采空区冒落矸石充填带宽度的计算公式。

2) 利用弹塑性薄板小挠度理论建立了急倾斜工作面顶板受力模型,研究得出急倾斜工作面顶板受到上覆岩层及工作面采空区充填矸石的共同作用下顶板挠曲变形方程。

3) 急倾斜工作面中下部顶板处于应力较低水平,工作面中上部顶板应力水平较高。急倾斜工作面中上部(悬顶空间)工作面前方煤壁和工作面后方煤壁处、中上部顶板和中下部冒落矸石接触处出现较大的拉伸应力和剪切应力,理论分析顶板应力分布特征和工作面支架受力实测相符。

4) 急倾斜工作面初次开采时中上部顶板可能出现“U”字型破断,自下而上扩展。

5) 在理论分析的基础上结合新铁矿 49[#]下右 6 片急倾斜工作面实际开采参数得出:顶板挠度最大点位于工作面中上部,距工作面上端头 24 m 处,最大变形量为 320 mm。

参考文献:

[1] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003:187-201.

[2] 丁德民,马凤山,张亚民,等. 急倾斜矿体分布充填开采对地表沉陷的影响[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(2):249-254.
DING Demin, MA Fengshan, ZHANG Yamin, et al. Effect of multi step back filling of steep orebody on ground surface subsidence[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(2): 249-254.

[3] 查文华,谢广祥,罗勇. 急倾斜煤层锚网索巷道围岩活动规律研究[J]. 采矿与安全工程学报,2006,23(1):99-102.
ZHA Wenhua, XIE Guangxiang, LUO Yong. Moving rule of surrounding rock of steep seam roadway supported by bolt-mesh-anchor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 99-102.

[4] 黄庆享,董伯林,陈国红,等. 急倾斜软煤巷道破坏机理及锚网支护设计[J]. 采矿与安全工程学报,2006,23(3):333-336.
HUANG Qingxiang, DONG Bolin, CHEN Guohong, et al. Failure mechanism of entry in steep soft seam and bolting design[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(3): 333-336.

[5] 高延法,洪益清,黎灵,等. 急倾斜厚煤层开采水煤体溃泄机理研究[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(1):15-19.
GAO Yanfa, HONG Yiqing, LI Ling, et al. Mechanism of water-coal mixture burst in exploiting steeply-inclined thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 15-19.

[6] 伍永平,解盘石,任世广. 大倾角煤层开采围岩空间非对称结构特征分析[J]. 煤炭学报,2010,35(2):182-184.
WU Yongping, XIE Panshi, REN Shiguang. Analysis of asymmetric structure around coal face of steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 182-184.

[7] 尹光志,代高飞,皮文丽. 俯伪斜分段密集支柱采煤法缓和急倾斜煤层矿压显现不均匀现象的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(9):1483-1488.
YIN Guangzhi, DAI Gaofer, PI Wenli. Study on the uneven ground pressure in pitching oblique underhand mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1483-1488.

[8] 范晓刚,王宏图,胡国忠,等. 急倾斜煤层俯伪斜下保护层开采的卸压范围[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(3):380-385.
FAN Xiaogang, WANG Hongtu, HU Guozhong, et al. Pressure-relief scope for the exploiting of steep-inclined oblique under-protecting strata[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(3): 380-385.

(下转第 59 页)