

工作面过断层煤壁失稳“溃决”机理与控制

崔治国 原红波 崔璐玮

(山西兰花科技创业股份有限公司望云煤矿分公司)

摘 要:针对工作面过断层易发生煤壁失稳、煤岩碎粒“溃决”问题,以望云煤矿 15106 工作面过断层为工程背景,将煤层分为原生煤和构造煤,分析了煤壁所受水平应力分布特征,建立煤壁梁-柱力学模型,分析了护帮板、顶底板黏聚力力偶及水平应力对煤壁挠度的影响,确立了煤壁稳定性判据。研究表明,断层构造煤对原生煤煤壁水平应力分布函数形式取决于参数 k_0 ;煤壁稳定性与煤壁抗弯刚度、顶底板压力、开采高度有关;实践证明,煤壁超前预注浆+俯采过断层对于煤壁抗弯刚度提升明显、利于煤壁稳定。

关键词:断层构造煤;“溃决”式失稳;梁-柱煤壁模型;俯采过断层

断层构造区内原生煤体结构变化、物性劣化较为严重的碎粒状构造煤体,孔隙和微裂隙十分发育,强度极低,甚至可徒手捏碎,碎粒间黏聚力较小^[1-3]。工作面揭露断层构造区煤层时,煤壁片帮破坏并伴随着大量的煤岩碎粒“溃决”、冒顶漏顶现象,严重威胁生产安全。

在煤壁稳定性及片帮破坏机理研究方面,国内众多学者开展了一系列研究:文献^[4-5]等采用压杆理论,建立煤壁压杆受力模型,分析了煤壁的挠度特征;刘柄良^[6]等考虑煤壁劣化损伤特征,建立煤壁薄板模型,推导出煤壁变形挠度方程;庞义辉^[7]等认为

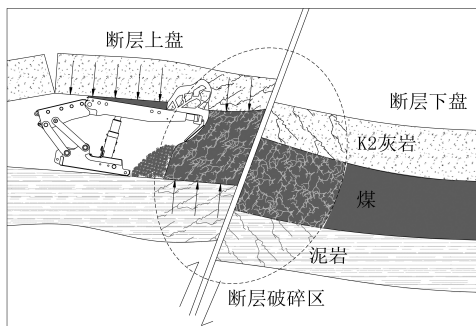
煤壁片帮过程为拉裂破坏与滑移失稳两个阶段,建立了煤壁片帮拉裂-滑移力学模型,推导出了煤壁的拉裂破坏判据及拉裂破坏深度、宽度与煤体强度、采高之间的关系;黄庆享^[8]等根据煤壁片帮失稳特征,建立了煤壁片帮的条柱模型,分析得出煤壁最容易发生片帮的位置。

以上研究成果应用不同理论、力学分析模型揭示煤壁片帮破坏机理,本文基于构造煤结构特点及煤壁受载应力分布特征,应用弹性稳定理论^[9],建立梁-柱煤壁力学模型,开展断层破碎区煤壁片帮机理研究。

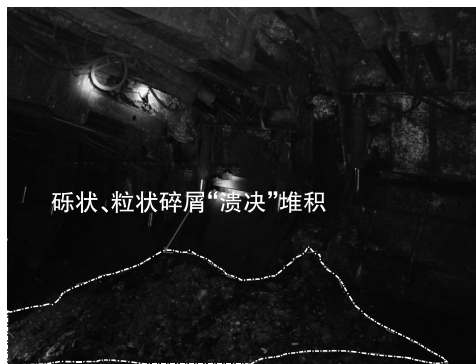
1 工作面过断层片帮分析

1.1 断层煤壁破坏“溃决”现象

15106工作面所采煤层15#煤位于太原组下部K2灰岩之下,基本顶为K2灰岩,厚度7.5 m,直接底为铝土质泥岩,厚度为7.15 m,工作面推采至运输顺槽255 m左右,遇F36逆断层,走向N3°E,倾角75°,落差2.5 m左右。工作面斜交揭露断层时,出现煤壁片帮并伴有大量的煤岩碎粒“溃决”、冒顶漏顶现象。



(a)



(b)

图1 断层区煤壁片帮及煤岩碎粒“溃决”

1.2 煤壁所受水平应力求解

断层构造形成过程中,最小主应力是垂直应力,最大主应力是与断层迹线垂直的水平应力,中间主应力是平行于断层迹线的水平应力^[10-12]。如图2所示。当断层停止活动地层稳定时,断层盘面所受应力处于平衡状态^[13],则有:

$$\sigma_h(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) = \sigma_v(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \quad (1)$$

$$\sigma_v / \sigma_h = \tan(\alpha - \varphi) \quad (2)$$

式中: σ_v —垂直应力,MPa; σ_h —与断层迹线垂直的水平应力,MPa; α —断面法线方向与最大主应力方向夹角,°; φ —断面摩擦角,°; μ —断层上下盘滑动时摩擦系数, $\mu = \tan \varphi$ 。

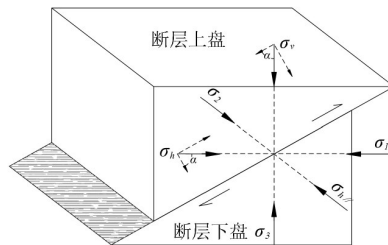


图2 断层应力状态及应力平衡图

根据图1(a)假设在煤层中存在一界面OE为原生煤和构造煤的分界面(如图3所示),即区域ODCE为构造煤,区域OABE为原生煤,当工作面即将揭露断层时,采动载荷 q 不断挤压构造煤体使其有沿断层面CD滑动的趋势,并对原生煤壁OABE施加非均匀水平应力,为分析水平应力分布特征,距顶板OD高度为 h 处取一厚度为 dh 直角梯形微元体,微元体上侧受垂直应力 σ_v ,底面受垂直向上的应力 $\sigma_v + d\sigma_v$,左侧受 σ_h 和 τ_{hv} ,右侧受到 σ_α 和 τ_α ,以及体力 df 。

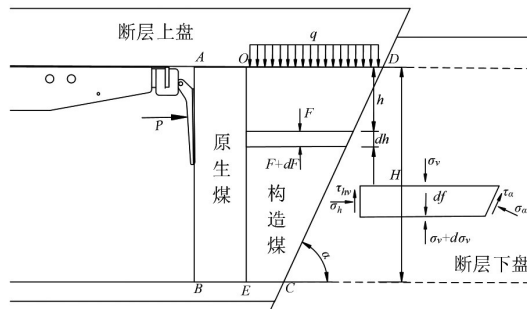


图3 断层构造煤与原生煤示意图

根据直角梯形微元体在水平、竖直方向的受力平衡条件,可得

$$\sigma_h dh + \tau_\alpha dh \cot \alpha - \sigma_\alpha dh = 0 \quad (3)$$

$$(H - h) \sigma_v \cot \alpha + df - (H - h - dh)(\sigma_v + d\sigma_v) \cot \alpha -$$

$$\tau_{hv} dh - \tau_{\alpha} dh - \sigma_{\alpha} dh \cot \alpha = 0 \quad (4)$$

$$df = dh(H-h) \cot \alpha \rho g - \frac{dh^2 \cot \alpha}{2} \rho g \quad (5)$$

$$\begin{cases} \tau_{hv} = \sigma_h \tan \phi \\ \tau_{\alpha} = \sigma_{\alpha} \tan \varphi \end{cases} \quad (6)$$

将公式(6)代入(3)可得

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_v \frac{\cot(\alpha - \varphi) \tan \phi}{(1 - \tan \varphi \cot \alpha)} \quad (7)$$

联立公式(2)~(7)化简并略去高阶微量可得

$$\frac{d\sigma_v}{dh} = \frac{\sigma_v [1 - \tan \alpha \cot(\alpha - \varphi) (\tan \phi + \cot(\alpha - \varphi))]}{(H - h)} + \rho g \quad (8)$$

式中 ϕ 为煤体内摩擦角, $^{\circ}$; α —断层倾角, $^{\circ}$; φ —断层盘面摩擦角, $^{\circ}$; ρg —煤体容重, N/m^3 。

将(8)中部分内容作以下替换

$$k = 1 - k_0$$

$$k_0 = \tan \alpha \cot(\alpha - \varphi) (\tan \phi + \cot(\alpha - \varphi))$$

则有

$$\frac{d\sigma_v}{dh} - \frac{k}{(H - h)} \sigma_v = \rho g \quad (9)$$

式(9)为一阶非齐次线性方程,运用常数变易法可求解其通解:

$$\sigma_v = \left(-\frac{1}{k+1} \rho g (H-h)^{k+1} + C \right) (H-h)^{-k} \quad (10)$$

根据OD边界上的边界条件:当 $h=0$ 时, $\sigma_v=q$, 可以求解出通解式(10)中的待定系数 C , 并化简可得

$$\sigma_v = \left(q - \frac{\rho g H}{(2 - k_0)} \right) \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{k_0-1} - \frac{\rho g H}{2 - k_0} \left(1 - \frac{h}{H} \right) \quad (11)$$

再联立式(2)(6)(11)可得

$$\sigma_h = \cot(\alpha - \varphi) \left[\left(q - \frac{\rho g H}{(2 - k_0)} \right) \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{k_0-1} - \frac{\rho g H}{2 - k_0} \left(1 - \frac{h}{H} \right) \right] \quad (12)$$

$$\tau_{hv} = \tan \phi \cot(\alpha - \varphi) \left[\left(q - \frac{\rho g H}{(2 - k_0)} \right) \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{k_0-1} - \frac{\rho g H}{2 - k_0} \left(1 - \frac{h}{H} \right) \right] \quad (13)$$

1.3 水平应力函数分布形式

式(12)、(13)为原生煤与构造煤的分界面上的应力分布函数,参数 k_0 是决定函数形式的关键。为简化分析,以某矿 15106 工作面为例,取基础参数:煤体内摩擦角 $\phi=10^{\circ}$, 断层倾角 $\alpha=75^{\circ}$, 断层盘面摩擦角 $\varphi=5^{\circ}$, 煤体容重 $\rho g=13\,500\,N/m^3$, 煤层厚度 $H=4\,m$, 采动应力 $q=6\,300\,000\,Pa$, 运用 MATLAB 计算不同参数下应力分布函数。

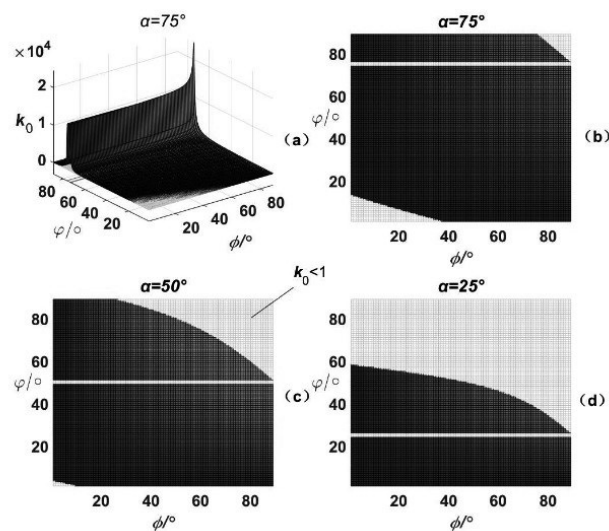


图4 参数 k_0 变化规律

如图4所示参数 k_0 的数值大小取决于煤体内摩擦角、断层盘面摩擦角和断层倾角,从(a)可以看出断层倾角为 75° 时,当断层盘面摩擦角越趋近于 75° , k_0 越大增大且增速亦越大,断层盘面摩擦角为 75° 时 k_0 趋近于无穷,在俯视图中表现为平行于 ϕ 轴的“沟壑”,(b)(c)(d)灰色区域中 $k_0 < 1$,彩色区域 $k_0 \geq 1$;随着断层倾角的增大,(d)中上半灰色区域($k_0 < 1$)渐渐减少,左下角逐渐出现灰色区域。

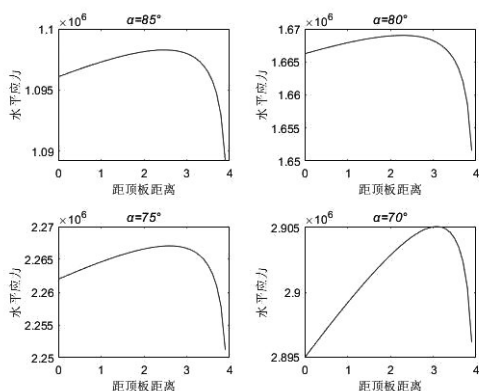


图5 参数 $k_0 < 1$ 时水平应力分布特征

参数 $k_0 < 1$ 时水平应力 σ_h 分布函数为负指数幂函数如图5所示,煤壁所受水平应力先增大后减小,峰值位于煤壁中下部;断层倾角越小所受水平应力越大。

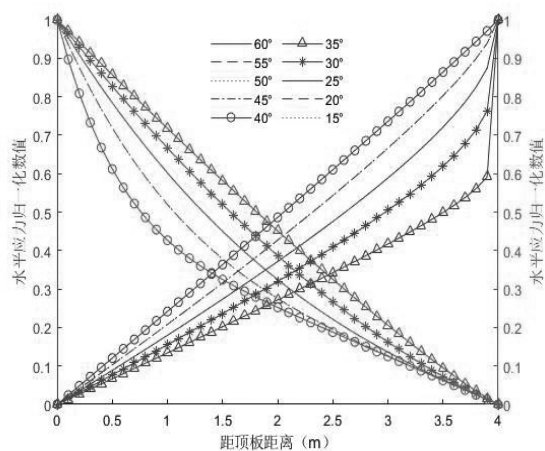


图6 参数 $k_0 \geq 1$ 时水平应力分布特征

参数 $k_0 \geq 1$ 时水平应力 σ_h 分布函数为正指数幂函数,同样地,断层倾角越小煤壁所受水平应力越大,将不同倾角时水平应力分布函数进行归一化处理如图6所示,可见在距煤层顶板0~4 m范围内水平应力函数为单调函数,煤层倾角 $\alpha < \pi/2 - \phi$ 时单调减小,反之单调增加。

2 梁-柱煤壁模型的建立

2.1 模型简化

为了进一步计算断层破碎区煤壁在水平应力作用时的挠度,建立模型时进行了以下简化处理:

(1)将煤壁在OE截面所受水平应力 σ_h 视为常量。基于安全角度,计算时 σ_h 的取值为式(12)取在煤壁高度范围内的最大值 σ_{hmax} 确立煤壁稳定依据。

(2)忽略煤壁在OE截面所受剪切应力 τ_{hv} 的影响。由图3及式(13)可看出OE截面上所受的剪切应力极小且垂直于煤壁弯曲变形方向,为了便于计算分析,这里忽略其对煤壁挠度的影响。

(3)忽略煤壁体积力的影响。认为在一定范围内煤壁的体积力对其挠度影响可以忽略不计,为简化分析不考虑其对煤壁挠度的影响。

(4)其他方面的简化。沿工作面倾向取单位长度的煤壁;顶底板压力等效为一对对称分布的载荷 q ;顶底板与煤壁间黏聚力等效为一对大小相等、方向相反的力偶。

基于以上几方面简化,煤壁在顶底板压力及水平应力作用下的挠度分析模型可视为均布水平应力与集中荷载共同作用的两端固定梁-柱模型(图8)。

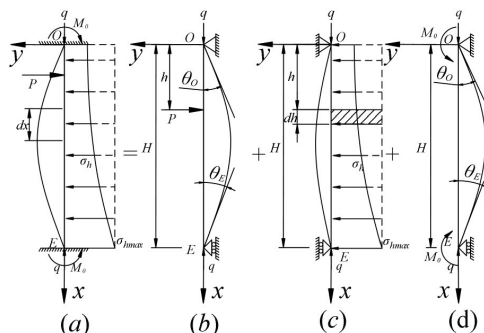


图7 煤壁梁-柱力学模型图

2.2 基本微分方程

当煤壁同时承受垂向和水平应力作用时如图8所示,其弯矩、剪力及应力与所产生的挠度相关,梁-柱承受垂向压力 q 和强度为 σ_h 的水平应力, σ_h 为 x 的函数,为了推导梁-柱构件挠度的基本方程,从上图中截取一长度为 dx 微段,如图所示,在微

段内水平应力的强度 σ_h 可视为常量,其方向与y轴正向(向左)相同为正,并假定图中所示作用在微段两侧剪力 F_s 和弯矩 M 为正方向。

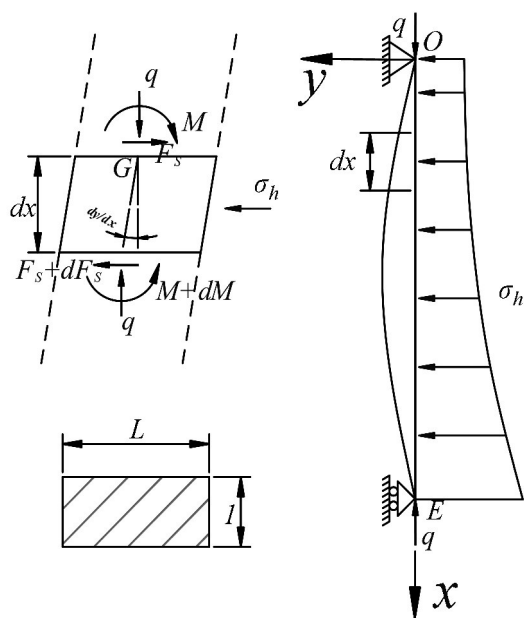


图8 煤壁水平应力、剪力及弯矩关系图

由微段在y轴方向平衡关系可得

$$\sigma_h dx + (F_s + dF_s) = F_s \text{ 或 } \sigma_h = -\frac{dF_s}{dx} \quad (14)$$

假设梁-柱轴线与竖直线间夹角足够小,对点G取矩、略去高阶微量并化简可得

$$F_s = \frac{dM}{dx} - q \frac{dy}{dx} \quad (15)$$

在不考虑剪切变形与梁轴线缩短的情况下,梁轴线的曲率表达式为

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M \quad (16)$$

联立(14)(15)(16)可得梁轴线的微分方程

$$F_s = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} - q \frac{dy}{dx} \text{ 或 } \sigma_h = EI \frac{d^4 y}{dx^4} + q \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (17)$$

式中 EI 为煤壁梁-柱在弯曲平面 xoy 平面内的弯曲刚度; E 为原生煤弹性模量; $I=L^3/12$ 为煤壁梁-柱惯性矩; L 为原生煤煤壁宽度。

3 煤壁稳定性分析

3.1 护帮板支护力的影响

在顶底板压力作用下,护帮板支护力对煤壁挠度影响问题为梁-柱超静定问题,顶底板压力所产生的弯矩需要由一定的边界条件才能求解,过程如下:

如图中集中载荷 P 到原点 O 的距离为 h ,在梁-柱上、下分段的弯矩分别为:

$$\begin{cases} M = \frac{Ph}{H}x + Py, (0 \leq x \leq H-h) \\ M = \frac{P(H-h)}{H}(H-x) + Py, (H-h \leq x \leq H) \end{cases} \quad (18)$$

联立(16)、(18)并求解所得微分方程通解有:

$$\begin{cases} w_p(x) = A_1 \cos \lambda x + B_1 \sin \lambda x - \frac{Ph}{qH}x \\ w_p(x) = A_2 \cos \lambda x + B_2 \sin \lambda x - \frac{P(H-h)(H-x)}{qH} \end{cases} \quad (19)$$

式中 $\lambda = \sqrt{q/EI}$, A_1, A_2, B_1, B_2 为积分常量。

根据边界条件:梁-柱上下两端挠度为零;在支护力 P 作用点处挠度曲线连续,即上下两段挠度曲线在该点挠度相同且共切线。确定积分常量并代入(19)可得上下两段挠度曲线方程:

$$\begin{cases} w_p(x) = \frac{P \sin \lambda h}{q \lambda \sin \lambda H} \sin \lambda x - \frac{Ph}{qH}x, (0 \leq x \leq H-h) \\ w_p(x) = \frac{P \sin \lambda (H-h) \sin \lambda (H-x)}{q \lambda \sin \lambda H} - \frac{P(H-h)(H-x)}{qH}, (H-h \leq x \leq H) \end{cases} \quad (20)$$

当护帮板作用点位于煤壁中部时,煤壁顶底板处转角,可对式(20)求导并将 $h=H/2, x=0$ 代入

$$\theta_{p_o} = -\theta_{p_E} = \left(\frac{dw_p(x)}{dx} \right)_{h=H/2, x=0} = \frac{PH^2(\sec u - 1)}{8EIu^2} \quad (21)$$

式中 $u=\lambda H/2$

由式(20)可看出当护帮板作用点位于煤壁中部时,抵抗煤壁弯曲变形的效果最佳,此时挠度为

$$w_{p\max} = w_p(x) \Big|_{x=h=\frac{H}{2}} = \frac{PH^3}{48EI} \frac{3(\tan u - u)}{u^3} \quad (22)$$

3.2 水平应力的影响

如图7(c)所示,水平应力 σ_h 是关于 h 的某一函数,在煤壁高度范围内对 σ_h 取最大值 $\sigma_{h\max}$,那么水平应力作用下的挠度曲线,可视为距O点 h 的无限小的载荷微元 $\sigma_{h\max}dh$ 累加所得。由式(20)可得水平应力下梁-柱挠度曲线:

$$w_{\sigma_{h\max}}(x) = \frac{\sin \lambda x}{q\lambda \sin \lambda H} \int_0^{H-x} \sigma_{h\max} \sin \lambda h dh - \frac{x}{qH} \int_0^{H-x} \sigma_{h\max} h dh + \frac{\sin \lambda(H-x)}{q\lambda \sin \lambda H} \int_{H-x}^H \sigma_{h\max} \sin \lambda(H-h) dh - \frac{(H-x)}{qH} \int_{H-x}^H \sigma_{h\max} (H-h) dh \quad (23)$$

积分并化简可得

$$w_{\sigma_{h\max}}(x) = \frac{\sigma_{h\max} H^4}{16EIu^4} \left[\frac{\cos(2ux/H - u)}{\cos u} - 1 \right] - \frac{x(H-x)H^2 \sigma_{h\max}}{8EIu^2} \quad (24)$$

点O、E转角通过式(24)挠曲线方程求导可得

$$\theta_{\sigma_{h\max}O} = -\theta_{\sigma_{h\max}E} = \left(\frac{dw_{\sigma_{h\max}}(x)}{dx} \right)_{x=0} = \frac{H^3 \sigma_{h\max}}{8EI} \left(\frac{\tan u - u}{u^3} \right) \quad (25)$$

水平应力作用下煤壁中部挠度为

$$w_{\sigma_{h\max}\max} = w_{\sigma_{h\max}}(x) \Big|_{x=\frac{H}{2}} = \frac{5\sigma_{h\max} H^4}{384EI} \left[\frac{12(-u^2 + 2 \sec u - 2)}{5u^4} \right] \quad (26)$$

3.3 顶底板黏聚力的影响

在煤壁受水平应力影响下,顶底板岩层间黏聚力作用效果等效为一对对称力偶,这对力偶对煤壁挠度作用效果,可先求解一侧力偶作用下的挠度曲线,再根据对称性求解另一侧力偶作用的挠度曲线,并将两个曲线叠加。从图7(b)可看出集中载荷作用点越接近原点O力矩 h 越小,而集中载荷 P 越大,当力矩 h 趋近于0时,存在一集中载荷 P 与力矩 h 的乘积与力偶 M_0 相等,此时 $\sin \lambda h$ 与 λh 等价,将 $\sin \lambda h = \lambda h$, $Ph = M_0$ 代入式(20)并由对称性可得顶底板

对称力偶作用下煤壁挠度曲线方程

$$w_{M_0}(x) = \frac{M_0 H^2}{4EIu^2} \left[\cos \left(\frac{2u}{H} x - u \right) \sec u - 1 \right] \quad (27)$$

点O、E转角通过式(22)挠曲线方程求导可得

$$\theta_{M_0O} = -\theta_{M_0E} = \left(\frac{dw_{M_0}(x)}{dx} \right)_{x=0} = \frac{M_0 H}{2EI} \left(\frac{\tan u}{u} \right) \quad (28)$$

顶底板黏聚力作用下煤壁中部挠度为

$$w_{M_0\max} = w_{M_0}(x) \Big|_{x=H/2} = \frac{M_0 H^2}{8EI} \frac{2(\sec u - 1)}{u^2} \quad (29)$$

3.4 煤壁稳定性判据

煤壁在水平应力 $\sigma_{h\max}$ 和顶底板压力 q 共同作用下发生弯曲变形,护帮板提供一个抵抗煤壁弯曲变形的集中载荷 P ,顶底板岩层间黏聚力提供一对对称力偶抵抗煤壁弯曲变形,依据叠加原理,煤壁中点位置有以下变形平衡关系:

$$w_{\sigma_{h\max}\max} = w_{M_0\max} + w_{P\max} \quad (30)$$

将式(22)(26)(29)代入式(30)可得:

$$\frac{5\sigma_{h\max} H^4}{384EI} \left[\frac{12(-u^2 + 2 \sec u - 2)}{5u^4} \right] = \frac{M_0 H^2}{8EI} \frac{2(\sec u - 1)}{u^2} + \frac{PH^3}{48EI} \frac{3(\tan u - u)}{u^3} \quad (31)$$

根据边界条件:

$$\theta_{\sigma_{h\max}O} = \theta_{Po} + \theta_{M_0O} \quad (32)$$

可得

$$M_0 = \frac{H^2 \sigma_{h\max}}{4} \left(\frac{\tan u - u}{u^2 \tan u} \right) - \frac{PH}{4u \tan u} (\sec u - 1) \quad (33)$$

将式(33)代入(31)可得

$$\sigma_{h\max} H \left[\left(\frac{-u^2 + 2(\sec u - 1)}{(\sec u - 1)} \right) - \left(\frac{\tan u - u}{\tan u} \right) \right] = 2P \left[\left(\frac{\tan u - u}{(\sec u - 1)} \right) - \frac{(\sec u - 1)u}{\tan u} \right] \quad (34)$$

式(34)为断层构造煤水平应力和采动应力 q 共同作用下原生煤煤壁稳定性判别式,式中弹性模量 $E=1.23 \times 10^9$ Pa,惯性矩 $I=L^3/12$,其余参数仍为某矿

15106工作面相关参数,运用 MATLAB 计算不同参数间的变化关系。

图9(a)为不同开采高度条件下,不同宽度煤壁保持稳定所需的护帮板支护力,从图中可看出当煤壁宽度为1.0 m时,开采高度分别为4.0、3.5、3.0 m,煤壁保持稳定所需的护帮板支护力分别为2.69、1.92、1.31 MPa,随着煤壁宽度增加煤壁保持稳定所需支护力越小。图9(b)为不同顶底板压力下,不同宽度煤壁保持稳定所需的护帮板支护力,从图中可看出当煤壁宽度为1.0 m时,顶底板压力分别为6.3、7.3、8.3 MPa,煤壁保持稳定所需的护帮板支护力分别为2.69、3.54、4.06 MPa,同样地,随着煤壁宽度增加煤壁保持稳定所需支护力越小。

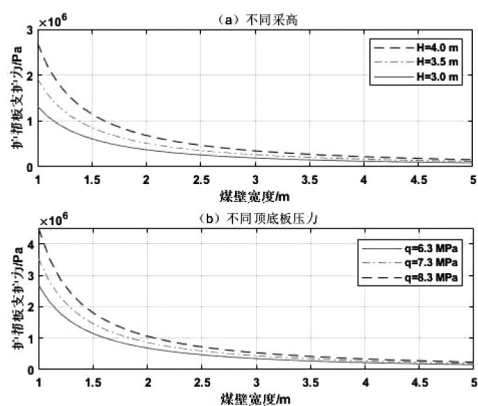


图9 煤壁稳定性影响因素

4 煤壁稳定性控制及工程实践

4.1 煤壁稳定性控制

从煤壁梁-柱的挠曲线微分方程及煤壁稳定性判别式可以看出:煤壁稳定性与顶底板压力、煤壁梁-柱抗弯刚度(弹性模量及煤壁宽度)、开采高度及护帮板支护力有关,因而,要保持煤壁稳定,控制手段有:(1)降低开采高度;(2)提高液压支架工作阻力;(3)增加护帮板对煤壁支护力;(4)增加稳定煤壁宽度。

4.2 工程实践

基于以上控制手段,某矿为确保15106工作面

安全、顺利穿越断层,特制定“调坡俯采推进”和“煤壁超前注浆”的综合过断层防片帮措施:

(1)降低开采高度,工作面揭露断层破碎煤体前,将采高从4.0 m降低至3.5 m以下,所需的护帮板支护力也随之减小。

(2)调坡俯采推进,以煤机截割为主、爆破为辅实施破岩,俯斜 9° 推进,此时,煤壁由矩形断面变为梯形断面,煤壁宽度有所增加,煤壁梁-柱抗弯刚度随之增加,即煤壁为矩形截面的变截面梁-柱(如图10所示),有利于抵抗煤壁中下部较高水平的水平应力(如图5所示)。

(3)煤壁超前注浆,在液压支架架间位置距离顶板0.5 m处,以 15° 仰角、孔径42.0 mm钻孔,钻孔采用三花布置,间、排距均为1.5 m,钻孔深度5.0 m,每4.0 m注浆一次(注浆5.0 m,推进5个循环);注浆有利于增强构造煤碎粒间黏聚力、增大煤体弹性模量,提升煤壁梁-柱抗弯刚度。

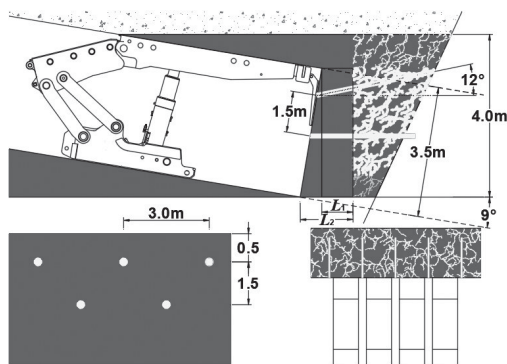


图10 煤壁超前注浆与俯采过断层

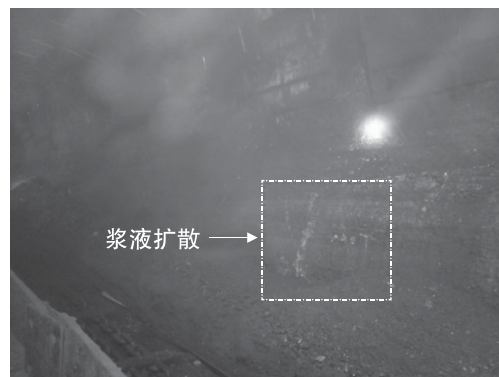


图11 现场施工效果图

从图 11 中可见浆液扩散至煤壁中下部,煤壁注浆效果较好,仅在煤壁表面少量碎粒剥落,煤壁较为稳定,工作面推进正常。

5 结论

1) 15106 工作面推进遇断层时,受采动应力影响煤壁破坏后断层构造煤大量碎粒“溃决”,断层构造煤对原生煤壁的水平应力分布函数形式取决于由煤体内摩擦角、断层盘面摩擦角和断层倾角共同确定的参数 k_0 , 当 $k_0 \geq 1$ 时水平应力 σ_h 分布函数为正指数幂函数; 当 $k_0 < 1$ 时水平应力分布函数为负指数幂函数。

2) 开采高度越大,煤壁保持稳定所需的护帮板支护力越大;煤壁宽度越大煤壁保持稳定所需支护力越小;顶底板压力越大,煤壁保持稳定所需的护帮板支护力越大。

3) 工作面过逆断层时,从断层上盘俯采推进,有利于提升煤壁梁-柱抗弯刚度、抵抗煤壁中下部较高水平的水平应力;煤壁超前预注浆,注浆有利于增强构造煤碎粒间黏聚力、增大煤体弹性模量,提升煤壁梁-柱抗弯刚度。

参考文献:

- [1] 李子全,张东明,张林玉等. 高阶原生煤与构造煤的孔隙及分形特征研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(08): 39-44. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2023.08.008.
- LI Ziquan, ZHANG Dongming, ZHANG Linyu, et al. Study on pore structure and fractal characteristics of high-rank intact coal and tectonic coal[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(8): 39-44.
- [2] 付江伟,傅雪海,李鹏等. 构造煤煤层的概念及分类探析[J]. 煤矿安全, 2022, 53(08): 155-160. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2022.08.025.
- FU Jiangwei, FU Xuehai, LI Peng, et al. Discussion on concept

and classification of tectonic coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(8): 155-160.

- [3] 李文善,张浩,金智新. 原位构造煤加载力学特性测定[J]. 煤矿安全, 2022, 53(06): 69-74. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2022.06.011.

LI Wenshan, ZHANG Hao, JIN Zhixin. Determination of loading mechanical characteristics of in-situ tectonic coal [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(6): 69-74.

- [4] 李立,于雷,张世青等. 大采高大倾角工作面煤壁片帮机理分析[J]. 煤炭工程, 2020, 52(12): 102-107.

LI Li, YU Lei, Shi-qing, et al. Spalling mechanism of coal wall in large-angle and high-cutting coal mining face [J]. COAL ENGINEERING, 2020, 52(12): 102-107.

- [5] 尹希文,闫少宏,安宇. 大采高综采面煤壁片帮特征分析与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2008(02): 222-225.

YIN Xi-wen, YAN Shao-hong, AN Yu. Characters of the Rib Spalling in Fully Mechanized Caving Face with Great Mining Height [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008(02): 222-225.

- [6] 刘柄良,王占宝. 大采高工作面煤壁片帮力学机制与深度研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(S1): 14-17. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2018.S1.004.

LIU Bingliang, WANG Zhanbao. Study on Rib Spalling Mechanism and Depth of Working face with Large Mining Height [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(S1): 14-17.

- [7] 庞义辉,王国法. 基于煤壁“拉裂-滑移”力学模型的支架护帮结构分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(08): 1941-1950. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1696.

PANG Yihui WANG Guofa. Hydraulic support protecting board analysis based on rib spalling “tensile cracking-sliding” mechanical model [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(08): 1941-1950.

- [8] 黄庆享,刘建浩. 浅埋大采高工作面煤壁片帮的柱条模型分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(02): 187-191. DOI:10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.003.

HUANG Qingxiang, LIU Jianhao. Vertical slice model for coal wall spalling of large mining height longwall (下转第 23 页)

全生产的重要环节,切实落实各项安全措施,保障矿工的生命安全和企业的稳定发展。

参考文献:

[1]杨志峰.煤矿地质测量的应用及优化策略分析[J].冶金与材料,2024,44(09):175-177.

[2]高洋.煤矿地质测量工作的重要性分析[J].能源与节能,2024,(08):45-47+320.

[3]尹丽光.地质测量在煤矿生产中的作用[J].能源与节能,2024,(08):48-50.

[4]陈凯,申红兵.煤矿地质测量工作在煤矿生产中的作用[J].矿业装备,2024,(06):78-80.

(上接第11页)

face in shallow seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(02):187-191.

[9](美)铁摩辛科(S.Timoshenko)著.弹性稳定理论[M].科学出版社,1958.1-18.

[10]陈绍杰,张鑫源,石瑞明等.煤系逆断层形成过程及其对采动灾害的影响规律[J/OL].煤炭学报:1-15[2023-08-21].DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.0969.

CHEN Shaojie, ZHANG Xinyuan, SHI Ruiming, et al. Formation process of coal-bearing series reverse fault and its influence on mining disaster[J/OL]. Journal of China Coal Society:

1-15[2023-08-21].

[11]周睿.逆断层区域煤体应力分布规律[J].煤炭科学技术, 2022, 50(08):159-165.DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-1667.

ZHOU Rui. Coal stress distribution law in reverse fault area [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50 (8) :159-165.

[12]孙宗顺,张国报,张景和.在地质断层构造中地应力状态演变研究[J].石油勘探与开发, 2000(01):125-128+11+21.

