

DOI: 10.11779/CJGE2016S2047

基于顶板切落的浅埋煤层开采支架工作阻力研究

杨登峰, 陈忠辉, 朱帝杰, 张凌凡, 刘 鑫

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对浅埋煤层开采周期来压过程中顶板沿煤壁切落时支架工作阻力的确定方法进行研究。根据直接顶岩体在支承压力作用下破坏失稳的非线性变化特征, 建立了由基本顶-直接顶-支架-矸石组成的系统力学模型, 应用突变理论和岩石动力学相关分析方法, 分别推导了系统失稳前静荷载和失稳后冲击动荷载作用下的支架压缩量表达式, 获得了切顶过程中支架荷载的计算式, 分析了其主要影响因素。通过对切顶时支架荷载的研究确定了其工作阻力的计算式。结果表明: 直接顶的失稳破坏造成了顶板的切落, 直接顶岩体的突跳量决定了冲击荷载的大小, 系统失稳时的支架荷载除了与基本顶的周期来压步距、上覆岩层荷载、直接顶厚度有关外, 还与支架和直接顶岩体的刚度比、直接顶岩体性质等因素相关。结合工程实例, 验证了理论推导的合理性。理论研究成果对于分析切顶发生时的支架工作阻力大小, 合理选择支架具有重要的工程意义。

关键词: 浅埋煤层; 切顶; 支架工作阻力; 突变理论; 动荷载

中图分类号: TU43; TD353

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0286-07

作者简介: 杨登峰(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事矿山压力与支架-围岩关系方面的研究工作。E-mail: kdydf@126.com。

Support capacity at roof cutting in mining of shallow coal seam

YANG Deng-feng, CHEN Zhong-hui, ZHU Di-jie, ZHANG Ling-fan, LIU Xin

(School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the support capacity at roof cutting during periodic weighting in mining of shallow coal seam, according to the nonlinear variation characteristics of immediate roof under unstable failure of abutment pressure, a systematic mechanical model composed of upper roof-immediate roof support-waste rock is established. The expressions for support compression quantities under the static and dynamic loading before and after the system instability are derived by using the correlation analysis methods of catastrophic theory and rock dynamics. The formula for calculation the support capacity at roof cutting is obtained and the main factors for the support capacity are analyzed. The results show that the unstable failure of immediate roof leads to the roof cutting. The jump value of the displacement of immediate roof rock directly determines the amount of dynamic loading. The support capacity relates to the cyclic weighting interval, upper load, thickness of immediate roof, stiffness ratio of immediate roof and support and material parameters when the system fails. The rationality of the theoretical derivation is verified by engineering example. The test results are of great significance to the support capacity at roof cutting and the selection of support types.

Key words: shallow coal seam; roof cutting; support capacity; catastrophic theory; dynamic load

0 引 言

中国西北部地区富含大量浅埋煤层, 其具有浅埋深、薄基岩和上覆厚松散沙层的典型特征^[1]。煤层开采过程中顶板易出现顶板沿煤壁的台阶下沉, 矿压显现更加强烈且复杂。据统计资料, 仅神东矿区就先后发生了十多起严重的压架事故, 给矿山企业造成了巨大的经济损失。近年来, 国内学者针对浅埋煤层“围岩-支架”关系方面进行了卓有成效的研究工作。然而随着煤矿开采装备水平的不断提高, 顶板事故仍然不

断发生。只有弄清切顶发生的力学机理, 才能有针对性的采取防范措施, 减小损失。

国内众多学者将突变理论应用于顶板安全分析^[2-5], 他们的研究集中在分析工作面推进过程中顶板由准静态的缓慢变形到突变失稳破断的过程。但是对于顶板突变失稳后的作用过程分析较少。在基本顶失稳之前

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(“973”计划)项目(2013CB227903); 国家自然科学基金项目(U1361209, 51234005-1)
收稿日期: 2016-05-19

支架主要承受直接顶的荷载作用,随着工作面的推进,直接顶承受的荷载作用不断增大,造成直接顶岩体的变形突跳失稳,使基本顶及上覆岩层突然切落,造成对直接顶的突加荷载,并通过直接顶作用到支架上。基本顶以一定的能量冲击到直接顶上,对直接顶施加的荷载是突然的,对直接顶和支架产生冲击动荷载作用。切顶过程中支架受力是由静荷载作用到动荷载作用的过程,两者共同作用造成了支架的压缩变形失稳。因此,可以根据动静荷载联合作用的分析方法研究顶板切落过程中支架工作阻力。中国学者较多的将动载分析方法应用于冲击地压方面的研究^[6-9],而在动载诱发切顶压架方面的研究还较少,王家臣^[10]教授应用能量法分析了顶板切落过程中的支架受力,但是他没有对切顶发生前的支架变形荷载进行分析。因此,研究切顶灾害发生过程中动静荷载联合作用下的支架变形进而确定支架荷载,确定切顶发生时的支架合理的工作阻力具有重要意义。

本文以直接顶为研究对象,建立由基本顶-直接顶-支架-架后矸石所组成的力学系统,根据系统突变失稳时直接顶的变形突跳机制,分析系统突变前的支架荷载;结合岩石动力学相关理论,分析系统失稳后基本顶冲击动荷载作用下的支架荷载,进而将系统失稳前后的动、静荷载作用相结合,研究整个切顶过程中支架的受力情况,确定合理的支架工作阻力。

1 突变理论分析

1.1 力学模型

浅埋煤层顶板在上覆厚砂土层作用下呈现整体下沉而不是离层运动,基本顶所承受的载荷集度大,垮落步距较小,来压前在煤壁前方大多形不成完全破断,而是形成剪切破断,表现为整体的台阶切落,带来巨大的安全隐患^[11](见图1)。

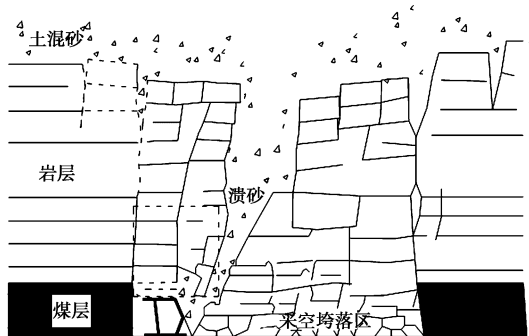


图1 典型的顶板切落式结构^[22]

Fig. 1 Tension-induced collapse of roof^[22]

针对顶板沿煤壁切落这一最不利情况,将支架上方一定厚度岩体视为直接顶,用 Q_d 表示,直接顶上部

直至上覆厚砂土层为基本顶,用 Q_L 表示,基本顶及上覆厚砂土层荷载集度用 q 表示,将起支撑作用的支架和架后矸石视为可压缩的弹性体,支架刚度为 k_1 ,架后矸石刚度设为 k_2 ,建立如图2所示的简化的力学模型。基本顶自重及上覆砂层荷载通过基本顶传递给直接顶及架后矸石,造成直接顶、矸石和支架的压缩变形,当直接顶变形量增至某临界值时发生突跳失稳,使上覆岩层沿煤壁产生大面积切落。为了研究切顶发生时的支架工作阻力,建立由浅埋煤层工作面基本顶、直接顶、支架和架后矸石组成的力学系统,基本顶一端由于破断裂缝存在,简化为与前方岩体的铰支连接,直接顶、支架及矸石承受上覆岩土重和梁自重的荷载。基于突变理论研究方法进行力学分析。

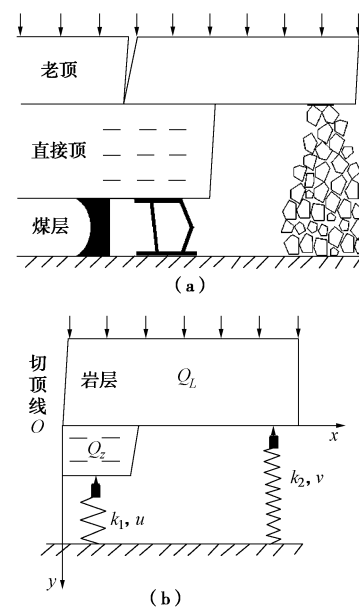


图2 简化的力学模型

Fig. 2 Simplified mechanical model

设直接顶岩体压缩量为 u , 支架压缩量为 w , 支架-直接顶全位移为 a ; 矸石压缩量为 v , 支架刚度为 k_1 ; 矸石刚度为 k_2 。根据简化力学模型中梁的边界条件设挠曲线方程为

$$y = \frac{1}{EI} \left(\frac{qx^4}{24} - \frac{qlx^3}{12} + \frac{ql^3x}{24} \right) + \frac{v-a}{l}x + a \quad (1)$$

直接顶岩体的本构关系是具有软化性质的非线性关系^[12], 对截面为 A , 高为 H 的直接顶岩体, 可表示为荷载 R 与变形量 u 的关系:

$$R = \lambda u e^{-u/u_0} \quad (2)$$

式中, $\lambda = EA/H$, 为岩体的初始刚度, u_0 为峰值荷载时对应的应变值, 式(2)的非线性曲线在应变 $u_1 = 2u_0$ 处有一拐点, 对应的斜率的绝对值为 $\lambda_1 = \lambda e^{-2}$ 。

1.2 突变分析

由基本顶、直接顶、支架和矸石组成的力学系统总势能为^[12-13]

$$V(x) = W_L + U_E + U_S = -\int_0^l qy dx + \frac{1}{2} \int_0^l EI(y'')^2 dx + \int_0^u \lambda u e^{-u/u_0} du + \frac{1}{2} k_1 (a-u)^2 + \frac{1}{2} k_2 v^2, \quad (3)$$

其中, 外力对系统做的功为 $W_L = -\int_0^l qy dx$; 支架和矸石的弹性势能为 $U_E = U_j + U_s$; 直接顶和基本顶的应变能为 $U_S = U_z + U_L$ 。

以直接顶岩体压缩量 u 为状态变量, 根据尖点突变理论 $V'=0$ 得平衡曲面 M , 而平衡曲面 M 在尖点处满足 $V''=0$, 可求得尖点:

$$V''_u = (2 - \frac{u}{u_0}) \frac{\lambda}{u_0} e^{-u/u_0} = 0. \quad (4)$$

在尖点处有: $u=2u_0=u_1$, 尖点即是岩体本构曲线的拐点。在尖点处进行泰勒级数展开, 截取前三项:

$$-\frac{ql}{2} - k_1(a-u_1) + \lambda u_1 e^{-u_1/u_0} + \left[k_1 + \lambda \left(1 - \frac{u_1}{u_0} \right) e^{-u_1/u_0} \right] (u-u_1) - \frac{\lambda}{u_0^2} e^{-u_1/u_0} \left(2 - \frac{u_1}{u_0} \right) (u-u_1)^2 \frac{1}{2!} - \frac{\lambda}{u_0^3} e^{-u_1/u_0} \left(3 - \frac{u_1}{u_0} \right) (u-u_1)^3 \frac{1}{3!} = 0. \quad (5)$$

设 $x = \frac{u-u_1}{u_1}$, 将式 (5) 化简可得尖点突变标准形式的平衡曲面方程:

$$x^3 + px + q = 0, \quad (6)$$

式中 $p = \frac{3}{2}(K-1)$; $q = \frac{3}{2}(-\frac{ql}{2\lambda u_1 e^{-2}} + k\xi - 1)$;

$$K = \frac{k_1}{\lambda e^{-2}} = \frac{k_1}{\lambda_1}; \quad \xi = \frac{a-u_1}{u_1}.$$

当系统发生突变失稳时, 根据解得的式 (6) 的三个实根可求得当跨越分歧点集时状态变量 x 发生突跳所对应的系统失稳前后直接顶的突跳压缩量:

$$\Delta u = u_1(x_3 - x_1) = 3\sqrt{2}u_0(1-K)^{1/2}. \quad (7)$$

将 p, q 带入系统突变的分叉集方程: $4p^3 + 27q^2 = 0$, 化简可求得全位移参数 ζ :

$$\xi = \frac{1}{K} \left[1 + \frac{ql}{2\lambda u_1 e^{-2}} \pm \frac{\sqrt{2}}{3} (1-K)^{3/2} \right]. \quad (8)$$

由 $\xi = \frac{a-u_1}{u_1}$ (ξ 取较大值) 得

$$a = [1 + \frac{1}{K} [1 + \frac{ql}{2\lambda u_1 e^{-2}} + \frac{\sqrt{2}}{3} (1-K)^{3/2}]] 2u_0. \quad (9)$$

突跳时支架的压缩量 w 是全位移 a 与直接顶压缩量 $2u_0$ 的差值, 即

$$w = a - 2u_0 = \frac{1}{K} \left[1 + \frac{ql}{2\lambda u_1 e^{-2}} + \frac{\sqrt{2}}{3} (1-K)^{3/2} \right] 2u_0. \quad (10)$$

由支架压缩量 w 的表达式 (10) 可知, 支架的压缩量主要与上覆岩层荷载 ql , 刚度比 K 及直接顶岩体物理力学性质相关。当上覆岩层荷载越大, 周期来压步距越大时, 支架压缩量越大, 系统越容易失稳。由于刚度比 K 是支架刚度 k_1 与直接顶岩体应力应变曲线在拐点处的斜率 λ_1 之比, 所以刚度比 K 只与系统内部性质相关。当支架刚度 k_1 一定时, 因为直接顶是由层理结构面及节理裂隙组成的岩体, 所以直接顶岩体越完整, 刚度 λ_1 越大, 刚度比 K 越小, 支架的压缩量越大, 越容易造成基本顶切落压架; 直接顶岩体破碎, 刚度越小, 其弹性模量越小, 刚度比 K 越大, 支架压缩量越小, 系统越稳定。当直接顶岩体材料参数一定时, 合理增加支架工作阻力, 有利于系统稳定。

2 支架工作阻力确定

直接顶岩体在静荷载作用下压缩变形, 当变形达到一定程度后发生突跳失稳, 形成对直接顶及支架的突加荷载, 冲击作用时间极短, 并伴有声、热等能力耗散与传导。冲击动荷载在系统中的作用实质上是应力波在岩体内的传导与衰减过程, 造成了剧烈的动压现象并透过直接顶岩体作用到支架上, 造成了直接顶岩体的破坏和支架在荷载作用下的压缩变形 (见图 3)。因此, 分析应力波在直接顶岩体内的传播过程, 进而确定作用到支架上的冲击动荷载, 对于选取合理的支架工作阻力具有重要意义。

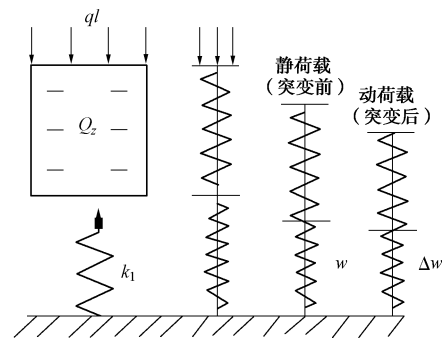


图 3 系统突变前后的围岩-支架力学模型

Fig. 3 Mechanical model for surrounding rock and supports before and after system instability

由于冲击动荷载造成的应力波直接作用于直接顶上表面, 应力波的主体一般为体波 (P 波), 因此, 仅讨论体波 (P 波) 作用下的质点振动速度, 利用应力波 (P 波) 的透射规律来研究支架所受的冲击动荷载作用。由于直接顶岩体突跳失稳, 使基本顶及上覆岩层突然切落, 其势能降低, 动能增加, 并以一初速度 V_0 冲击直接顶岩体, 根据动量守恒原理, 可得到直接顶岩体表面的质点振动速率 v [14]:

$$v = \frac{A_0 \rho_0 C_0}{A_0 \rho_0 C_0 + A_a \rho_a C_a} V_0 \quad (11)$$

式中 A_0 为基本顶岩体碰撞端的横截面积; ρ_0 为基本顶岩体密度; C_0 为基本顶岩体中传播的应力波波速; A_a 为直接顶岩体横截面面积; ρ_a 为直接顶岩体密度; C_a 为直接顶岩体中传播的应力波波速。

假设切落过程中没有能量损失, 根据能量守恒定律, 冲击过程中的基本顶及上覆厚砂土层荷载在直接顶岩体突跳失稳中的势能降低量全部转化为冲击作用的动能, 因此有

$$\frac{1}{2} m V_0^2 = mg \Delta u \quad (12)$$

带入突跳量表达式 (7), 整理得冲击时的基本顶岩体速率为

$$V_0 = \sqrt{\frac{2 \Delta u}{g}} = \sqrt{\frac{6 \sqrt{2} u_0 (1-K)^{1/2}}{g}} \quad (12)$$

因此冲击作用时的直接顶岩体表面的质点振动速度可表示为

$$v = \frac{A_0 \rho_0 C_0}{A_0 \rho_0 C_0 + A_a \rho_a C_a} \sqrt{\frac{6 \sqrt{2} u_0 (1-K)^{1/2}}{g}} \quad (13)$$

应力波作用在直接顶表面上的初始应力为

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \rho_a C_a v \\ &= \frac{A_0 \rho_0 C_0 \rho_a C_a}{A_0 \rho_0 C_0 + A_a \rho_a C_a} \sqrt{\frac{6 \sqrt{2} u_0 (1-K)^{1/2}}{g}} \end{aligned} \quad (14)$$

因此作用在直接顶上的冲击动荷载为

$$\begin{aligned} F &= A_a \sigma_0 \\ &= A_a \rho_a C_a v \\ &= \frac{A_0 \rho_0 C_0 A_a \rho_a C_a}{A_0 \rho_0 C_0 + A_a \rho_a C_a} \sqrt{\frac{6 \sqrt{2} u_0 (1-K)^{1/2}}{g}} \end{aligned} \quad (15)$$

代入一维应力波在岩体中的衰减公式:

$\sigma = \sigma_0 e^{-ah}$, 可得应力波通过直接顶岩体时的应力衰减为

$$F' = \frac{A_0 \rho_0 C_0 A_a \rho_a C_a}{A_0 \rho_0 C_0 + A_a \rho_a C_a} \sqrt{\frac{6 \sqrt{2} u_0 (1-K)^{1/2}}{g}} e^{-ah} \quad (16)$$

其中, a 为衰减系数; h 为应力波传播距离。

当应力透过直接顶岩体到支架上时, 代入应力波透射公式: $\sigma_T = \frac{A_1}{A_2} T' \sigma_i$, 可求得则支架所受冲击动荷载为

$$\begin{aligned} F_Z &= \frac{A_1}{A_2} T' F' \\ &= \frac{2 \rho_z C_z A_0 \rho_0 C_0 A_a \rho_a C_a}{e^{ah} (\rho_z C_z + \rho_a C_a) (A_0 \rho_0 C_0 + A_a \rho_a C_a)} \sqrt{\frac{6 \sqrt{2} u_0 (1-K)^{1/2}}{g}} \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $T' = \frac{2 \rho_z C_z A_z}{\rho_z C_z A_z + \rho_a C_a A_a}$, 为透射系数, 由于直接

顶宽度和支架控顶距长度一致, 因此有 $A_z = A_a$,

$$T' = \frac{2 \rho_z C_z}{\rho_z C_z + \rho_a C_a}.$$

冲击过程中, 支架的压缩变形符合胡克定律, 即:

$F_z = k_1 \Delta w$, 带入式 (17) 可计算冲击过程中的支架压缩量:

$$\begin{aligned} \Delta w &= \frac{F_z}{k_1} \\ &= \frac{2 \rho_z C_z A_0 \rho_0 C_0 A_a \rho_a C_a}{k_1 e^{ah} (\rho_z C_z + \rho_a C_a) (A_0 \rho_0 C_0 + A_a \rho_a C_a)} \sqrt{\frac{6 \sqrt{2} u_0 (1-K)^{1/2}}{g}} \end{aligned} \quad (18)$$

系统失稳过程中支架荷载包括两部分, 失稳前的压缩量 w 和失稳时冲击动荷载造成的压缩量 Δw , 因此, 支架压缩量 S 可表示为

$$\begin{aligned} S &= w + \Delta w \\ &= \frac{1}{K} \left[1 + \frac{ql}{2 \lambda u_1 e^{-2}} + \frac{\sqrt{2}}{3} (1-K)^{3/2} \right] 2 u_0 + \\ &\quad \frac{2 \rho_z C_z A_0 \rho_0 C_0 A_a \rho_a C_a}{k_1 e^{ah} (\rho_z C_z + \rho_a C_a) (A_0 \rho_0 C_0 + A_a \rho_a C_a)} \sqrt{\frac{6 \sqrt{2} u_0 (1-K)^{1/2}}{g}} \end{aligned} \quad (19)$$

考虑到应力波传播过程中的折射和反射作用, 引入折减系数 $\mu (\mu < 1)$ 来表示能量的衰减, 则系统突变过程中支架所受荷载为

$$\begin{aligned} P_m &= \mu k_1 S \\ &= 2 \mu \lambda_1 u_0 \left[1 + \frac{ql}{2 \lambda u_1 e^{-2}} + \frac{\sqrt{2}}{3} (1-K)^{3/2} \right] + \\ &\quad \frac{2 \mu \rho_z C_z A_0 \rho_0 C_0 A_a \rho_a C_a}{e^{ah} (\rho_z C_z + \rho_a C_a) (A_0 \rho_0 C_0 + A_a \rho_a C_a)} \sqrt{\frac{6 \sqrt{2} u_0 (1-K)^{1/2}}{g}} \end{aligned} \quad (20)$$

由以上分析可知, 当基本顶-直接顶-支架-矸石组成的力学系统突变失稳时, 支架的荷载由两部分组成, 系统突变前的静荷载和失稳时的冲击动荷载。

分析支架荷载表达式 (20) 可知, 静荷载作用下, 支架荷载主要跟上覆岩层重量 q , 周期来压步距 l , 支架与直接顶岩体的刚度比 K 及直接顶岩体的物理力学性质相关。冲击动荷载作用下, 支架荷载除了与支架、直接顶、基本顶的物理力学性质相关外, 还跟直接顶岩体的节理、裂隙的发育程度及直接顶厚度 h 相关。直接顶岩体的突跳量 Δu 大小, 决定了质点的振动速度 v 的大小, 其他参数一定时, 当直接顶岩体峰值荷载时对应的应变值 u_0 , 刚度比 K 越大, 突跳量越大, 质点的振动速度越大, 冲击动荷载也就越大; 直接顶

的节理、裂隙发育程度决定了应力波衰减系数 a 的大小, 直接顶越破碎, 应力波在岩体中传播的速度越慢, 衰减越快, 应力波衰减系数 a 也就越大, 作用到支架上的冲击动荷载也就越小。而直接顶厚度 h , 决定了应力波的传递距离的大小, 直接顶厚度越大, 应力波传播的距离越大, 其衰减也越大, 作用到直接顶上的冲击动荷载也就越小, 直接顶厚度越小, 应力波传播的距离越小, 应力波衰减越小, 作用到直接顶上的冲击动荷载也就越大。解释了厚直接顶时不容易发生压架事故, 薄直接顶易发生切顶的工程实际情况。

3 参数分析及现场应用

结合神东矿区凯达煤矿 3603[±] 综采工作面的具体工程地质情况, 对表达式 (20) 中支架荷载与主要影响因素关系进行分析深入, 图 4~6 分别为上覆岩层荷载 q , 基本顶周期来压步距 l , 直接顶厚度 h 与支架荷载的关系曲线。

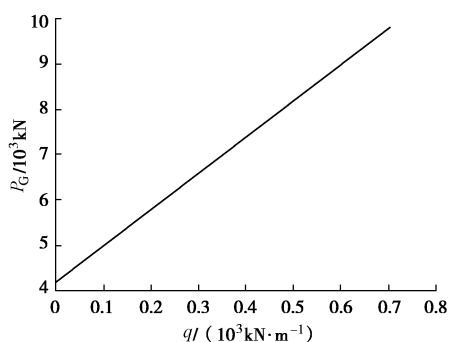


图 4 外荷载与支架荷载关系曲线

Fig. 4 Relationship between support capacity convergence and load

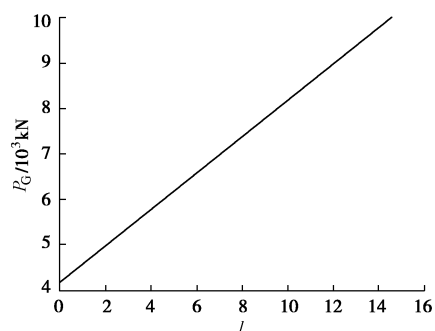


图 5 周期来压步距与支架荷载关系曲线

Fig. 5 Relationship between support capacity and weighting step of roof

分析曲线图 4, 5 可知, 随着外荷载和周期来压步距的增大, 支架荷载表现出直线关系增大趋势, 表明周期来压步距和上覆岩层荷载对支架荷载有较大影响

作用。通过控制高强度开采的条件, 即选取合理的开采速度、开采高度和工作面长度对减小支架荷载防止顶板切落失稳具有重要意义。由曲线图 6 可知, 随直接顶厚度 h 增大, 系统失稳切顶导致的支架荷载呈指数型曲线的单调递减。由于直接顶厚度 h 决定了应力波的传递距离的大小, 直接顶厚度增大时, 应力波衰减越迅速, 冲击动荷载也就越小。另外直接顶的岩体的节理、裂隙的发育程度也对应力波传播有重要的影响。因此, 可通过对直接顶的控制来减少压架事故。

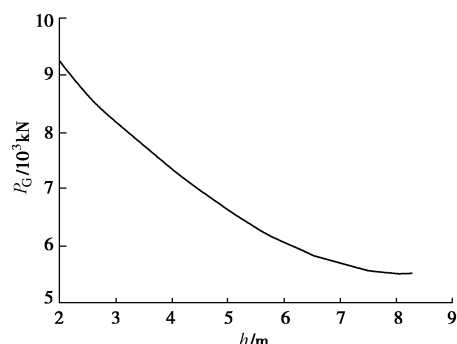


图 6 直接顶厚度与支架荷载关系曲线

Fig. 6 Relationship between support capacity and thickness of roof

凯达煤矿 3603[±] 综采工作面煤层平均厚度为 1.79 m, 埋深平均 60.5 m, 其中, 基岩层重度 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, 松散层厚度为 $h_0 = 7.2 \text{ m}$, 平均重度 $\gamma_0 = 20 \text{ kN/m}^3$, 直接顶厚度 $h_1 = 3.75 \text{ m}$, 平均重度 $\gamma_1 = 25 \text{ kN/m}^3$, 基本顶周期来压步距为 9.85 m, 采用 ZY6800/11-22 型掩护式支架, 根据观测, 基本顶周期来压过程中岩层表现出明显的台阶下沉现象, 下沉量平均约 $0.59 \text{ m}^{[15]}$ 。由式 (20) 计算得支架工作阻力为 9548.6 kN, 因此支架选型不能满足支护要求, 易造成压架事故。

根据统计资料, 凯达煤矿 3603[±] 综采工作面于 2012 年 7 月 16 日下午发生切顶事故, 来压期间工作面支架压力急剧增大, 达到 40 MPa 以上, 来压来压猛烈时间较短, 导致部分支架损坏、立柱胀裂, 工作面所对应地表出现明显台阶下沉, 如图 7 所示。

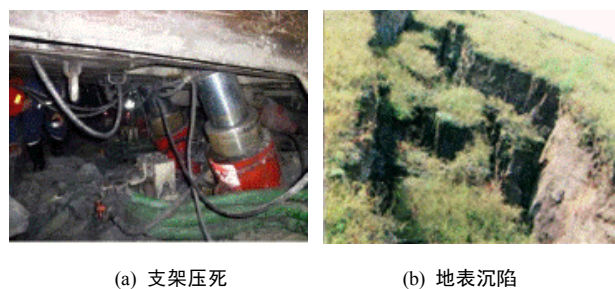


图 7 凯达煤矿 3603[±] 工作面发生切顶时工作面及地表状态
Fig. 7 States of working face and the surface at roof cutting of working face No. 3603 of Kaida coal mine

4 结 论

(1) 本文针对浅埋煤层工作面周期来压过程中顶板沿煤壁切落压架的实际情况, 建立了由基本顶、直接顶、支架及架后矸石组成的力学模型。运用突变理论及岩石动力学的相关分析方法, 导出了切顶发生时支架荷载的计算公式。对于揭示浅埋煤层顶板的切落机制、研究切顶时支架荷载的大小具有积极的意义。

(2) 发生切顶时的支架荷载可分系统突变前的静荷载和系统突变后的冲击动荷载两部分, 直接顶的突跳失稳造成了顶板的切落, 直接顶岩体的突跳量决定了冲击荷载的大小, 系统失稳时的支架荷载除了与基本顶、直接顶和支架的物理力学性质相关外, 还与上覆岩层荷载 q , 基本顶的周期来压步距 l , 直接顶厚度 h 等因素有关。在对支架荷载的影响作用进行分析时, 往往会因为没有考虑双因素或者多种因素 (特别是正相关和反相关因素) 的协同影响作用, 造成分析结果不够全面, 甚至是相悖, 因此在分析中应慎重考虑。

(3) 利用理论分析结论, 对神东矿区凯达煤矿 3603[±] 综采工作面的切顶压架事故进行了计算分析, 计算结果表明支架不能满足支护要求, 顶板来压时, 易造成切顶压架事故, 证明了理论推导的合理性。

参考文献:

- [1] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000. (HUANG Qing-xiang. Study on roof structure and ground control in shallow seam longwall mining[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [2] 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, **22**(5): 523 - 527. (GAO Qian, YANG Zhi-qiang, YANG Zhi-fa. Instability forecast and risk evaluation of the surrounding rock masses for a large space stope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(5): 523 - 527. (in Chinese))
- [3] 赵常洲, 李占强, 魏风华, 等. 地下工程中支架和围岩相互作用的突变模型[J]. 岩土力学, 2005, **26**(增刊): 17 - 20. (ZHAO Chang-zhou, LI Zhan-qiang, WEI Feng-hua, et al. Catastrophe model of support and surrounding rock of underground engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(S0): 17 - 20. (in Chinese))
- [4] 秦四清, 何怀锋. 狭窄煤柱冲击地压失稳的突变理论分析[J]. 水文地质与工程地质, 1995, **18**(5): 17 - 20. (QIN Si-qing, HE Huai-feng. The study of rockburst on narrow coal pillar by the catastrophe theory[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1995, **18**(5): 17 - 20. (in Chinese))
- [5] 杨治林, 余学义, 郭何明, 等. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(12): 1763 - 1766. (YANG Zhi-lin, YU Xue-yi, Guo He-ming, et al. Study on catastrophe mechanism for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1763 - 1766. (in Chinese))
- [6] 齐庆新, 窦林名. 冲击地压理论与技术[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2008: 32 - 38. (QI Qing-xin, DOU Lin-ming. Theory and technology of rockburst[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2008: 32 - 38. (in Chinese))
- [7] 窦林名, 何 江, 曹安业, 等. 动载诱发冲击机理及其控制对策探讨[C]// 中国煤炭学会成立五十周年高层学术论坛论文集. 北京, 2012: 294 - 299. (DOU Lin-ming, HE Jiang, CAO An-ye, et al. Mechanism and prevention methods discussion on coal mine rockburst induced by dynamic load[C]// Proceedings of the 50th Anniversary of the Founding of China Coal Society. Beijing, 2012: 294 - 299. (in Chinese))
- [8] 潘一山, 吕祥锋, 李忠华, 等. 高速冲击载荷作用巷道动态破坏过程试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1281 - 1286. (PAN Yi-shan, LÜ Xiang-feng, LI Zhong-hua, et al. Experimental study of dynamic failure process of roadway under high velocity impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1281 - 1286. (in Chinese))
- [9] 刘少虹. 动静加载下组合煤岩破坏失稳的突变模型和混沌机制[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(2): 292 - 300. (LIU Shao-hong. Nonlinear catastrophe model and chaotic dynamic mechanism of compound coal-rock unstable failure under coupled static dynamic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(2): 292 - 300. (in Chinese))
- [10] 王家臣. 厚煤层开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 186 - 190. (WANG Jia-chen. Theory and technology of thick seam mining[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 2009: 186 - 190. (in Chinese))
- [11] 石平五, 侯忠杰. 神府浅埋煤层顶板破断运动规律[J]. 西安矿业学院学报, 1996, **16**(3): 203 - 207. (SHI Ping-wu, HOU Zhong-jie. Law of roof breaking movement of shallow seams in Shenfu CMA of shallow seams in Shenfu CMA[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1996, **16**(3): 203 - 207. (in Chinese))

- [12] 唐春安. 岩石破裂过程失稳的尖点灾变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(2): 100 - 107. (TANG Chun-an, XU Xiao-he. A cusp catastrophic model of rock unstable failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9(2): 100 - 107. (in Chinese))
- [13] 陈忠辉, 唐春安, 傅宇方. 岩石失稳破裂的变形突跳研究[J]. 工程地质学报, 1997, 5(2): 143 - 149. (CHEN Zhong-hui, TANG Chun-an, FU Yu-fang. Study on sudden jump of deformation in unstable failure of rocks [J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(2): 143 - 149. (in Chinese))
- [14] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 49 - 66. (LI Xi-bin. Rock dynamics fundamentals and application[M]. Beijing: Science Press, 2014: 49 - 66. (in Chinese))
- [15] 李正杰. 浅埋煤层薄基岩综采面覆岩破断机理及与支架关系研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014: 23 - 37. (LI Zheng-jie. Research on the overlying strata breakage mechanism and the relationship between supports and surrounding strata in shallow-buried and thin bedrock working face[D]. Beijing: China Coal Research Institute CCRI, 2014: 23 - 37. (in Chinese))

(责任编辑 黄贤沙)