

李 胜,李军文,范超军 等.综放沿空留巷顶板下沉规律与控制[J].煤炭学报,2015,40(9):1989-1994. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.1625

Li Sheng, Li Junwen, Fan Chaojun et al. Roof subsidence laws and control technology for gob-side entry retaining in fully-mechanized top-coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 1989-1994. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1625

综放沿空留巷顶板下沉规律与控制

李 胜 李军文 范超军 罗明坤 韩永亮

(辽宁工程技术大学 矿业学院 辽宁 阜新 123000)

摘 要:针对综放沿空留巷顶板下沉控制困难问题,揭示了综放沿空留巷顶板下沉规律,建立了顶板下沉力学模型,结合损伤力学和能量守恒理论,推导出了顶板下沉量的理论公式,在此基础上对其影响因素进行了分析,提出了综放沿空留巷顶板下沉控制对策,并进行了工程应用。结果表明:顶板下沉量理论计算公式与现场实测值基本一致;各因素对顶板下沉影响程度依次为:巷旁支护体宽度、直接顶有效弹性模量、基本顶给定载荷、关键块破断位置、巷旁支护体有效弹性模量、巷内支护阻力、巷道宽度、顶煤有效弹性模量。顶板下沉控制对策应围绕关键性影响因素进行,据此提出“锚网索+高强度墩柱+木垛”耦合支护方式,即采用锚杆+锚索+高强度钢筋网进行巷内耦合支护,巷旁采用高强度墩柱支护,并用木垛进行巷旁加强支护。工程应用表明,综放沿空留巷围岩变形稳定,顶板下沉得到了有效控制。

关键词:综放工作面;沿空留巷;顶板下沉规律;力学模型;控制对策

中图分类号:TD322;TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2015)09-1989-06

Roof subsidence laws and control technology for gob-side entry retaining in fully-mechanized top-coal caving face

LI Sheng, LI Jun-wen, FAN Chao-jun, LUO Ming-kun, HAN Yong-liang

(College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to overcome the difficult problems associated with the roof subsidence control of gob-side entry retaining in fully-mechanized top-coal caving face (GERFTCF), the authors have investigated and found the roof subsidence laws for GERFTCF. A damage mechanics model for GERFTCF roof subsidence was established based on energy conservation and damage mechanics theories, and a calculation formula of roof subsidence was deduced. The factors of roof subsidence were analyzed. Therefore, the authors proposed some control countermeasures for GERFTCF roof subsidence and applied them in a case study. Results show that the theoretical roof subsidence calculation formula is in consistency with the roof subsidence measured in the field. The order of most sensitive factors of roof subsidence is as follows: supporting body width, immediate roof effective elastic modulus, basic roof given loading, key block broken location, supporting body effective elastic modulus, inner support resistance, roadway width, and top-coal effective elastic modulus. Roof subsidence control countermeasures should be taken according to the key influence factors. The control countermeasure of “bolt-net-anchor + high strength pier + pigsty” coupling support is put forward based on the research result. In other words, the bolt-net-anchor is used to support inside roadway and the high strength pier is used to support side roadway and the pigsty is used to strengthen the support on side roadway. The case study demonstrates that the surrounding rock deformation at GERFTCF is stable, and the roof subsidence has been effectively controlled.

收稿日期:2014-11-26 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51004063);辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助项目(LJQ2011029)

作者简介:李胜(1976—),男,四川资中人,教授,博士生导师。Tel:0418-3350473, E-mail:13941811946@139.com。通讯作者:李军文(1986—),男,河南林州人,博士研究生。E-mail:lijunwen178@139.com

Key words: fully-mechanized top-coal caving face; gob-side entry retaining; roof subsidence; mechanics model; control countermeasures

综合机械化放顶煤开采(综放)工作面实施沿空留巷,将原有巷道沿着采空区边缘保留下来,最大限度减少煤炭资源损失。采用Y形通风方式,可有效防治工作面瓦斯积聚与超限问题^[1]。综放沿空留巷是厚煤层开采无煤柱护巷技术的重要发展方向,控制围岩变形尤其顶板下沉是综放沿空留巷成功的关键,研究综放沿空留巷顶板下沉规律具有重要意义。

张东升等^[2]分析了沿空留巷基本顶破断位置与形状、不同支护方式对顶板活动的影响以及巷旁充填技术参数的确定;谢文兵、王继承、康红普^[3-5]等分析不同影响因素对综放沿空留巷围岩稳定的作用和效果;朱川曲等^[6]应用工程结构可靠性理论,建立了综放沿空留巷支护结构可靠性分析模型;马立强、SMART^[7-8]研究了不同地质条件下巷旁支护体的支护阻力计算公式;陈勇、卢小雨、王卫军^[9-11]等研究了沿空留巷在给定变形下直接顶、顶煤的受力变形,探讨了顶板下沉量与巷内、巷旁支护阻力等的关系。

这些研究将围岩看作完全弹性体或刚体,鉴于综放沿空留巷围岩变形具有明显损伤特点,本文在分析顶板下沉规律基础上,结合能量守恒和损伤力学理论,建立了综放沿空留巷顶板下沉力学模型,推导出了顶板下沉量的计算公式,根据此公式分析了对顶板下沉有重要作用的影响因素,提出了顶板下沉控制对策,并在五阳煤矿进行了工程应用。

1 综放沿空留巷顶板下沉规律

综放工作面推过之后,基本顶在沿空留巷煤壁侧上方破断,在巷道上方形成稳定的关键块结构,并以给定变形的方式作用在其下的直接顶、顶煤、煤壁及巷旁支护体之上^[12-13],给定变形从破断位置由0逐渐增大,形成角度为 θ 的回转(图1)。关键块破断位置到煤壁侧的距离为极限平衡区^[14],关键块以上的覆岩结构称为沿空留巷“大结构”,其下的直接顶、顶煤、煤帮、巷旁支护体称为沿空留巷“小结构”,“小结构”的变形破坏受制于“大结构”的作用。

与普通巷道不同,综放沿空留巷巷道采空区侧是巷旁支护体,且巷道顶部为强度较低的顶煤,留巷顶板下沉同时受制于基本顶和巷道上部松软的直接顶、顶煤的回转下沉运动,巷道顶板下沉量较大、下沉不均,采空区侧顶板下沉量较煤帮侧大,顶板下沉控制十分困难。

巷道周围煤岩体和巷旁支护体的力学性质对围

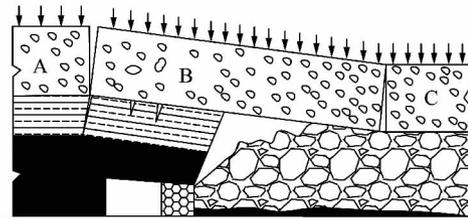


图1 综放沿空留巷顶板下沉结构模型

Fig. 1 Structural model of roof subsidence for GERFTCF

岩变形有重要影响,煤岩体经受了漫长的地质构造运动,其内部存在许多的微裂隙、层理、节理等初始损伤,采动引起初始损伤不断地扩展和演化,形成新的损伤。采用损伤力学将比经典连续介质力学描述其力学行为更符合实际。根据Lemaitre应变等效假设^[15]:受损煤岩体的变形行为可以通过有效应力来体现,巷道周围煤岩体的损伤本构关系为

$$\tilde{\sigma} = \varepsilon E(1 - D) = \varepsilon \tilde{E} \quad (1)$$

式中, $\tilde{\sigma}$ 为有效应力,MPa; E 为煤岩体的有效弹性模量,GPa; \tilde{E} 为有效弹性模量,GPa; D 为损伤变量,表示煤岩体的损伤程度。

2 顶板下沉量计算

根据顶板下沉规律,建立综放沿空留巷顶板下沉力学模型(图2)。模型中,假设煤帮、巷旁支护体、直接顶、顶煤为可变形体,煤层底板为刚体,将直接顶、顶煤、煤帮、巷旁支护体视为一个力学系统,直接顶发生回转变形,顶煤随直接顶回转变形,对巷旁支护体和煤帮产生压缩。忽略顶煤和直接顶在采空区的破断角,模型上边界为施加给定变形边界,左右边界为自由边界,下边界受到实煤体支撑力 f_s 、巷旁支护

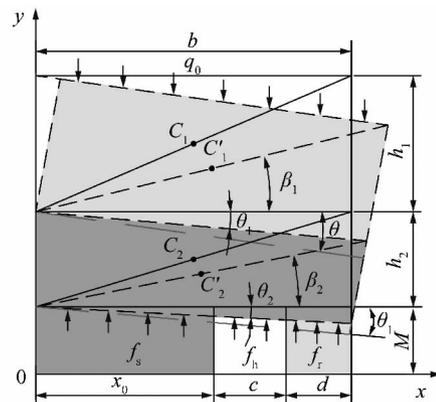


图2 综放沿空留巷顶板下沉力学模型

Fig. 2 Mechanical model of roof subsidence for GERFTCF

阻力 f_r 和巷内支护阻力 f_h 的作用。

模型在 z 方向可视为无限长, 可视为平面应变, 根据材料力学应变能计算公式^[16] 为

$$W = \iint \frac{1}{2} \varepsilon^2 E ds \quad (2)$$

直接顶在关键块 B 给定变形作用下产生变形, 得直接顶应变能 W_1 为

$$W_1 = \iint \frac{1}{2} \left[\frac{x(\tan \theta - \tan \theta_1)}{h_1} \right]^2 \tilde{E}_z ds = \int_0^b \frac{x^3 (\tan \theta - \tan \theta_1)^3}{2h_1^2} \tilde{E}_z dx = \frac{\tilde{E}_z b^4 (\tan \theta - \tan \theta_1)^3}{8h_1^2} \quad (3)$$

式中 θ 为关键块回转角 ($^\circ$); θ_1 为直接顶回转角 ($^\circ$); h_1 为直接顶厚度, m; \tilde{E}_z 为直接顶有效弹性模量, GPa; b 为直接顶宽度, m $b = x_0 + c + d$; c 为巷道宽度, m; x_0 为关键块破断位置, m; d 为巷旁支护体宽度, m。

同理, 顶煤应变能 W_2 、巷旁支护体应变能 W_3 、煤壁应变能 W_4 分别为

$$\begin{cases} W_2 = \tilde{E}_m b^4 (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)^3 / (8h_2^2) \\ W_3 = \tilde{E}_c [b^4 - (x_0 + c)^4] \tan^3 \theta_2 / (8M^2) \\ W_4 = \tilde{E}_m x_0^4 \tan^3 \theta_2 / (8M^2) \end{cases} \quad (4)$$

式中 θ_2 为顶煤回转角 ($^\circ$); \tilde{E}_m 为煤体有效弹性模量, GPa; \tilde{E}_c 为巷旁支护体有效弹性模量, GPa; M 为采高, m; h_2 为顶煤厚度, m。

沿空留巷的巷内支护阻力可视为向上的均布载荷 f_h , 则巷内支护所做功 W_5 为

$$W_5 = \int_{x_0}^{0+c} f_h x \tan \theta_2 dx = \frac{1}{2} f_h [(x_0 + c)^2 - x_0^2] \tan \theta_2 \quad (5)$$

关键块 B 因自重和上覆岩层作用而施加到直接顶上的给定载荷集度 q_0 , 关键块对直接顶做功 W_6 为

$$W_6 = \int_0^b q_0 x \tan \theta dx = \frac{1}{2} q_0 b^2 \tan \theta \quad (6)$$

直接顶回转后对角线与回转前下边界线的夹角为 β_1 , 则直接顶重心产生的垂直位移 Δc_1 为

$$\Delta c_1 = \frac{1}{2} h_1 - \frac{1}{2} b \tan \beta_1 \quad (7)$$

从几何知:

$$\tan (\theta + \beta_1) = \frac{h_1}{b} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得

$$\Delta c_1 = \frac{(h_1^2 + b^2) \tan \theta}{2(h_1 \tan \theta + b)} \quad (9)$$

忽略岩层破断角的影响, 直接顶重力势能做功 W_7 为

$$W_7 = \gamma_z h_1 b \Delta c_1 = \frac{\gamma_z h_1 b (h_1^2 + b^2) \tan \theta}{2(h_1 \tan \theta + b)} \quad (10)$$

式中 γ_z 为直接顶容重, MN/m³。

同理, 顶煤重力势能做功 W_8 为

$$W_8 = \frac{\gamma_m h_2 b (h_2^2 + b^2) \tan \theta_1}{2(h_2 \tan \theta_1 + b)} \quad (11)$$

因 $\theta, \theta_1, \theta_2$ 较小, 令 $\tan \theta \approx \theta, \tan \theta_1 \approx \theta_1, \tan \theta_2 \approx \theta_2$, 由能量守恒, 得

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 = W_6 + W_7 + W_8 \quad (12)$$

即:

$$\frac{\tilde{E}_z b^4 (\theta - \theta_1)^3}{8h_1^2} + \frac{\tilde{E}_m b^4 (\theta_1 - \theta_2)^3}{8h_2^2} + \frac{\tilde{E}_m x_0^4 \theta_2^3}{8M^2} + \frac{\tilde{E}_c [b^4 - (x_0 + c)^4] \theta_2^3}{8M^2} + \frac{f_h [(x_0 + c)^2 - x_0^2] \theta_2}{2} = \frac{q_0 b^2 \theta}{2} + \frac{\gamma_z h_1 b (h_1^2 + b^2) \theta}{2(h_1 \theta + b)} + \frac{\gamma_m h_2 b (h_2^2 + b^2) \theta_1}{2(h_2 \theta_1 + b)} \quad (13)$$

假设煤岩体为无损伤的弹性材料, 工作面采深远大于顶煤和直接顶厚度, 因此, 忽略顶煤和直接顶的重力作用, 顶煤和直接顶所受应力相等, 得

$$\frac{b \tan (\theta_1 - \theta_2)}{h_2} \tilde{E}_m = \frac{b \tan (\theta - \theta_1)}{h_1} \tilde{E}_z \quad (14)$$

即:

$$\theta_1 = \frac{\theta h_2 \tilde{E}_z + \theta_2 h_1 \tilde{E}_m}{h_2 \tilde{E}_z + h_1 \tilde{E}_m} = \alpha \theta + (1 - \alpha) \theta_2 \quad (15)$$

其中 $\alpha = h_2 \tilde{E}_z / (h_2 \tilde{E}_z + h_1 \tilde{E}_m)$ 。

沿空留巷巷旁支护体侧顶板下沉量 Δd 为

$$\Delta d = (x_0 + c) \tan \theta_2 = (x_0 + c) \theta_2 \quad (16)$$

将式(15)、(16)代入式(13), 可得

$$\frac{\tilde{E}_z b^4}{8h_1^2} (1 - \alpha)^3 \left(\theta - \frac{\Delta d}{x_0 + c} \right)^3 + \frac{\tilde{E}_m b^4}{8h_2^2} \alpha^3 \left(\theta + \frac{\Delta d}{x_0 + c} \right)^3 + \frac{\tilde{E}_z x_0^2}{8M^2} \left(\frac{\Delta d}{x_0 + c} \right)^3 + \frac{\tilde{E}_c b^4 - \tilde{E}_c (x_0 + c)^4}{8M^2} \times \left(\frac{\Delta d}{x_0 + c} \right)^3 + \frac{f_h (x_0 + c)^2 - f_h x_0^2}{2} \frac{\Delta d}{x_0 + c} = \frac{q_0 b^2 \theta}{2} + \frac{\gamma_z h_1 b \theta (h_1^2 + b^2)}{2(h_1 \theta + b)} +$$

$$\frac{\gamma_m h_2 b (h_2^2 + b^2) \left[\alpha \theta + (1 - \alpha) \frac{\Delta d}{x_0 + c} \right]}{2 \left[\alpha \theta h_2 + (1 - \alpha) \frac{\Delta d}{x_0 + c} h_2 + b \right]} \quad (17)$$

式(17)是关于 Δd 的一元四次方程,解该方程即可得到顶板下沉量 Δd 。

五阳煤矿 7602 综放工作面位于 76 采区南部,标高 430 ~ 510 m,地面标高 898 ~ 909 m,煤层赋存稳定,平均厚 6.00 m,工作面长度为 260 m,走向长度为 1 508 m,可采长度 1 460 m。工作面回风平巷断面为矩形,采用沿空留巷技术将其保留下来,以形成 Y 形通风,解决工作面瓦斯超限问题。在试验初期,巷内采用锚网支护,巷旁采用低强度墩柱支护。根据实际情况,取 $\tilde{E}_z = 30 \text{ GPa}$, $\tilde{E}_m = 15 \text{ GPa}$, $\tilde{E}_c = 10 \text{ GPa}$, $f_0 = 0.8 \text{ MPa}$, $f_h = 0.3 \text{ MPa}$, $\gamma_z = 0.025 \text{ MN/m}^3$, $\gamma_m = 0.014 \text{ MN/m}^3$, $M = 3 \text{ m}$, $h_1 = 4 \text{ m}$, $h_2 = 3 \text{ m}$, $\rho = 2.5 \text{ m}$, $d = 2.2 \text{ m}$, $x_0 = 4 \text{ m}$, $\theta = 5^\circ$ 。代入式(17)利用 Matlab 编程计算,去掉结果中的 2 个虚根和 1 个负根,得到巷道顶板下沉量 Δd 为 695.8 mm。试验初期现场实测巷道中部顶板下沉平均为 360.4 mm,靠巷旁支护体侧顶板下沉平均为 654.3 mm,理论计算值与现场实测值基本一致,误差约 6.34%,说明理论计算公式是较准确的。

3 顶板下沉影响因素分析

影响综放沿空留巷顶板下沉的因素较多,本文仅考虑对下沉量影响较大的 8 个因素。结合煤系地层中煤岩体力学性质、开掘巷道尺寸及支护强度等情况,以 7602 综放工作面实际为基准值,确定出各影响因素 q_0 , f_h , \tilde{E}_z , \tilde{E}_m , \tilde{E}_c , x_0 , ρ , d 的基准值和变化范围分别为 0.8, 0.4 ~ 1.2 MPa; 0.3, 0 ~ 0.8 MPa; 30, 15 ~ 45 GPa; 15, 1 ~ 30 GPa; 10, 1 ~ 30 GPa; 4, 1 ~ 7 m; 2.5, 1 ~ 5 m; 2.2, 1 ~ 5 m。若某几个参数同时发生变化,顶板下沉量变化情况会更加符合实际,但势必带来计算和分析的困难,为便于分析,在保持其他参数不变的基础上,讨论某一因素在变化范围内与顶板下沉量的关系,可为顶板下沉控制提供依据(图 3 ~ 5)。

基本顶给定载荷、巷内支护阻力与顶板下沉之间关系如图 3(a) 所示,采用最小二乘法进行拟合,顶板下沉量与基本顶给定载荷、巷内支护阻力成线性关系。顶板下沉量随巷内支护阻力的增加而减小,变化范围为 114.2 mm,曲线斜率较小,对下沉影响较小,仅依靠提高巷内支护并不能有效降低顶板下沉,巷内

支护应结合巷旁支护进行。顶板下沉量随基本顶给定载荷的增加而增加,曲线斜率较大,变化量为 252.1 mm。基本顶给定载荷是覆岩“大结构”对沿空留巷“小结构”产生作用的综合反映,与采动应力、采深及覆岩结构有关,可通过现场监测得到。低采动应力、小采深、“大结构”稳定的留巷条件,可降低基本顶给定载荷,使顶板下沉量大幅降低。

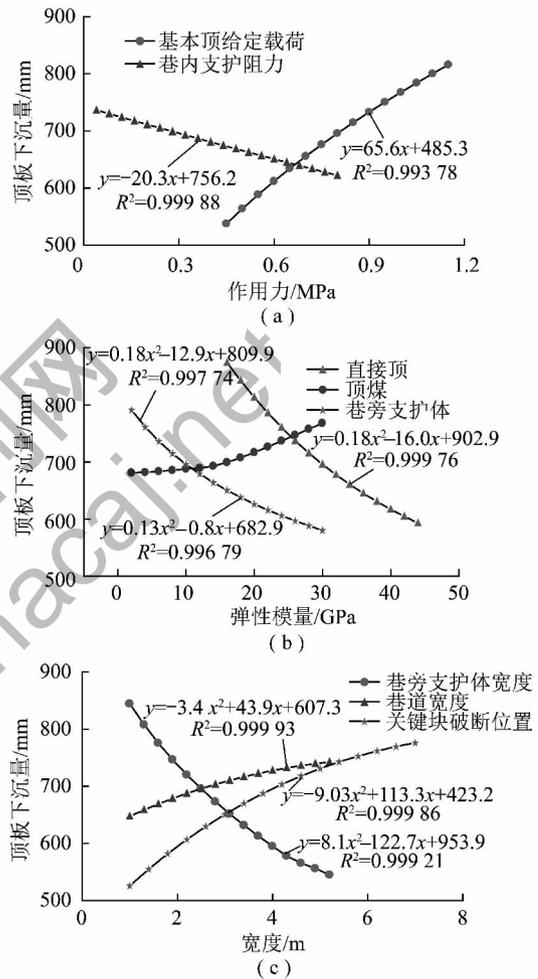


图 3 作用力、有效弹性模量、几何尺寸与顶板下沉的关系
Fig. 3 Relationship between roof subsidence and force, effective elasticity modulus, geometric size

直接顶、顶煤和巷旁支护体的有效弹性模量与顶板下沉量成二次方关系(图 3(b))。顶板下沉量随直接顶和巷旁支护体的有效弹性模量增大而减小,变化量分别为 280.6, 210.7 mm; 随顶煤有效弹性模量增大而增大,变化量为 87 mm。直接顶、顶煤、巷旁支护体 3 者的有效弹性模量具有耦合关系,大部分顶板下沉量由有效弹性模量较小者吸收。直接顶有效弹性模量越大,顶煤有效弹性模量越小,顶板下沉量越小,有利于巷道维护;巷旁支护体的强度越小,顶板下沉量越大,不利于巷道维护。

顶板下沉量与巷旁支护体宽度、巷道宽度、关键

块破断位置成二次方关系(图3(c))。随巷旁支护体宽度的增加而减小,变化量为313.4 mm,曲线斜率逐渐变小,当巷旁支护体宽度在1~3 m时,顶板下沉量受巷旁支护体宽度影响较大,增加其宽度可显著降低顶板下沉量,而当宽度大于3 m后,顶板下沉变化速率逐渐降低,此时继续增加支护体宽度对降低顶板下沉量作用不大。顶板下沉量随巷道宽度、关键块破断位置的增加而增加,变化量分别为95.4、250.3 mm;关键块破断位置对顶板下沉有重要作用,提高巷旁支护强度,可减小关键块破断长度和回转角,使关键块破断位置靠近巷旁煤壁,有效减小顶板下沉。

根据顶板下沉量变化范围的大小,各因素对顶板下沉影响程度依次为:巷旁支护体宽度、直接顶有效弹性模量、基本顶给定载荷、关键块破断位置、巷旁支护体有效弹性模量、巷内支护阻力、巷道宽度、顶煤有效弹性模量。

4 控制对策与工程应用

4.1 控制对策

研究表明,不同因素对顶板下沉影响程度不同,合理的措施应围绕顶板下沉关键性影响因素进行,才能有效控制巷道顶板下沉量,实现经济最优。

据此提出“锚网索+高强度墩柱+木垛”顶板下沉控制对策如下:①采用锚杆+高强度钢筋网耦合支护,增加巷内支护阻力,提高支护整体性,防止破碎顶煤掉落。②在“锚网”支护基础上,增加高强度低松弛预应力锚索支护,加固直接顶,提高直接顶有效弹性模量,提高巷内支护阻力。③采用“巷旁墩柱”支护+“巷旁木垛”加强支护,墩柱的支护阻力提高快、有效弹性模量高,墩柱外侧的木垛架设方便,增加巷旁支护体宽度,以控制顶板下沉,并减缓顶板来压时冒落矸石对墩柱的冲击。④端头不放顶煤,顶煤和直接顶垮落后发生碎胀,支撑上覆岩层,使关键块破断位置靠近采空区,降低基本顶给定载荷,沿空留巷的覆岩“大结构”更加稳定。

4.2 工程应用

在五阳煤矿7602综放工作面沿空留巷试验后期,将试验初期的“锚网+低强度墩柱”支护方式改为“锚网索+高强度墩柱+木垛”支护方式,采用端头不放顶煤长度5 m。具体如下:

(1)顶板和煤帮锚杆直径为22 mm,长度为2.4 m,间排距为0.9 m×0.9 m,树脂全长锚固;金属网采用10号铁丝,网孔规格50 mm×50 mm,网片规格5.4 m×1.0 m。

(2)锚索直径为22 mm,长度为7.3 m,锚固长度

为4.3 m,采用三花布置,每2排锚杆打3根锚索,排间距0.9 m×1.8 m。

(3)巷旁采用混凝土泡沫填充钢墩柱支护,直径为0.9 m,其最大承载能力约为5 MN,墩柱与顶、底板之间用木料背紧,两墩柱间距0.4 m;墩柱外侧搭构木垛,保证木垛与顶板接触良好,巷旁支护体宽度由2.2 m增加为3 m。巷旁支护与沿空留巷效果如图4所示。



(a) 巷旁支护 (b) 沿空留巷效果

图4 巷旁支护与沿空留巷效果

Fig. 4 Supporting body and GERFTCF effect

基本顶来压后,距离工作面40 m左右时,巷道围岩位移变化如图5所示。可见,在“锚网索+高强度墩柱+木垛”支护作用下,巷道变形开始趋于稳定,沿空留巷顶板下沉得到了较好的控制。沿空留巷外侧顶底板移近量最大值为853 mm,中部顶底板移近量最大值为725 mm,其中底臃量约占60%,两帮移近量最大值为660 mm,沿空留巷最小断面高度2.5 m、宽度2 m,围岩控制效果较好。

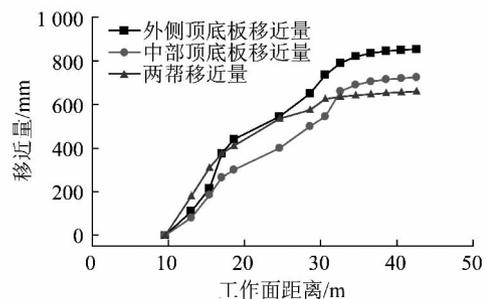


图5 沿空留巷围岩移近量

Fig. 5 Deformation of surrounding rock of GERFTCF

5 结 论

(1)根据综放沿空留巷顶板下沉规律,推导出顶板下沉量理论计算公式,与现场实测值基本一致,可用于影响因素分析。

(2)在覆岩层给定变形条件下,巷内支护对顶板下沉的控制有限,应结合巷旁支护进行;低采动应力、小采深、“大结构”稳定的留巷条件,可降低基本顶给定载荷,使顶板下沉量大幅降低。

(3) 直接顶、顶煤、巷旁支护体 3 者的有效弹性模量具有耦合关系,大部分顶板下沉量由有效弹性模量较小者吸收;当巷旁支护体宽度在 1~3 m 时,增加巷旁支护体宽度可显著降低顶板下沉量,而当巷旁支护体宽度大于 3 m 后,增加支护体宽度对降低顶板下沉量作用不大。

(4) 关键块破断位置对顶板下沉有重要作用,提高巷旁支护强度和留一段端头顶煤,可减小关键块破断长度和回转角,使关键块破断位置靠近巷旁煤壁,有效减小顶板下沉。

(5) 合理的综放沿空留巷顶板下沉控制对策应围绕关键性影响因素进行,在此基础上提出了“锚网索+高强度墩柱+木垛”顶板下沉控制对策,结果表明:留巷围岩变形稳定,顶板下沉得到了有效控制。

参考文献:

- [1] 华心祝. 我国沿空留巷支护技术发展现状及改进建议[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(12): 78-81.
Hua Xinzhū. Development status and improved proposals on gob-side entry retaining support technology in China [J]. Coal science and Technology, 2006, 34(12): 78-81.
- [2] 张东升, 缪协兴, 茅献彪. 综放沿空留巷顶板活动规律的模拟分析[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(3): 261-264.
Zhang Dongsheng, Miao Xiexing, Mao Xianbiao. Simulation on roof activities of gob-side entry retaining in fully-mechanized top-coal caving face [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2001, 30(3): 261-264.
- [3] 谢文兵, 笪建原, 冯光明. 综放沿空留巷围岩控制机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(4): 657-661.
Xie Wenbing, Da Jianyuan, Feng Guangming. Mechanism of controlling surrounding rock around gob-side entry retaining in top-coal caving mining face [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2004, 35(4): 657-661.
- [4] 王继承, 茅献彪, 朱庆华, 等. 综放沿空留巷顶板锚杆剪切变形分析与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 34-39.
Wang Jicheng, Mao Xianbiao, Zhu Qinghua, et al. Analysis of shearing deformation of roof support bolt and its control in gob-side entry retaining fully-mechanized caving face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 34-39.
- [5] 康红普, 牛多龙, 张镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1977-1987.
Kang Hongpu, Niu Duolong, Zhang Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining deep coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1977-1987.
- [6] 朱川曲, 张道兵, 施式亮, 等. 综放沿空留巷支护结构的可靠性分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 141-144.
Zhu Chuanqu, Zhang Daobing, Shi Shiliang, et al. Reliability analysis on support structure of gob-side entry retaining in fully-mechanized caving face [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 141-144.
- [7] 马立强, 张东升, 陈涛, 等. 综放巷内充填原位沿空留巷充填体支护阻力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 544-550.
Ma Liqiang, Zhang Dongsheng, Chen Tao, et al. Study on packing body supporting resistance of enter-in packing for in-situ gob-side entry retaining in fully-mechanized top-coal caving mining face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 544-550.
- [8] Smart B G D, Davies D O. Application of the roof-strata-tilt approach to pack design in an arch-shaped roadway [J]. Mining Engineering, 1982, 144(9): 91-187.
- [9] 陈勇. 沿空留巷围岩结构运动稳定机理与控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [10] 卢小雨, 华心祝, 赵明强. 沿空留巷顶板下沉量计算及分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 34-38.
Lu Xiaoyu, Hua Xinzhū, Zhao Mingqiang. Calculation and analysis of immediate roof subsidence in gob-side entry retaining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 34-38.
- [11] 王卫军, 侯朝炯, 柏建彪, 等. 综放沿空巷道顶煤受力变形分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 209-211.
Wang Weijun, Hou Chaojiong, Bai Jianbiao, et al. Mechanical deformation analysis of the roof coal of road driving along next goaf in sublevel caving face [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 209-211.
- [12] 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, 2003.
- [13] 高峰, 钱鸣高, 缪协兴. 基本顶给定变形下直接顶受力变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 145-148.
Gao Feng, Qian Minggao, Miao Xiexing. Mechanical analysis of the immediate roof subjected to given deformation of the main roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 145-148.
- [14] 于远祥, 洪兴, 陈方方. 回采巷道煤体荷载传递机理及其极限平衡区的研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1630-1636.
Yu Yuanxiang, Hong Xing, Chen Fangfang. Study on load transmission mechanism and limit equilibrium zone of coal-wall in extraction opening [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1630-1636.
- [15] 代高飞, 尹光志, 皮文丽. 单轴压缩荷载下煤岩的弹脆性损伤本构模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 986-989.
Dai Gaofei, Yin Guangzhi, Pi Wenli. Research on damage constitutive model and evolution equation of coal under uniaxial compression [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(8): 986-989.
- [16] 单辉祖. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.