

综放沿空巷道顶煤受力变形分析

Mechanical deformation analysis of the roof coal of road driving along next goaf in sublevel caving face

王卫军¹, 侯朝炯², 柏建彪², 张习美²

(1. 湘潭工学院 资源工程系, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘要: 根据砌体梁理论, 老顶以给定变形方式作用于综放沿空巷道围岩, 应用能量原理分析了巷道围岩的变形机理, 建立了巷道顶煤的力学模型, 运用变分法对老顶给定变形下顶煤的变形进行了初步求解, 并对顶煤下沉量与支护阻力、煤体弹性模量、巷道宽度的关系进行了探讨。

关键词: 综放沿空巷道; 巷道顶煤; 变分方法; 顶煤下沉量

中图分类号: TD 824.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2001)02-0209-03

作者简介: 王卫军, 男, 1965 年生, 1990 年获贵州工业大学硕士学位, 现为湘潭工学院副教授, 中国矿业大学博士研究生, 主要从事矿山系统工程和巷道围岩控制等方面的教学和研究工作。

WANG Wei-jun¹, HOU Chao-jiong², BAI Jian-biao², ZHANG Xi-mei²

(1. Xiangtan Polytechnic University, Xiangtan 411201, China; 2. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: According to the voussoir beam theory, the main roof applies a given deformation on the surrounding rock of roadway driving along next goaf in sublevel caving face. The deformation mechanism of surrounding rock is analyzed by the energy principle, and the mechanical model of roadway roof coal is established. The mechanical problem of the roadway roof coal under a given deformation is solved by the variation approach, and the relationship among the subsidence of the roadway roof coal, the support resistance, the height and elastic modulus of roof coal, and the width of the roadway are further discussed.

Key words: road driving along next goaf in sublevel caving face; roadway roof coal; variation approach; subsidence of roadway roof coal

1 引言^y

综放沿空掘巷的围岩变形量往往大于实体煤巷道, 而两帮变形量又大于顶底板移近量, 有关文献大多集中于两帮变形的研究^[1], 关于巷道支护强度与围岩变形量的关系目前仍停留在经验性的定性分析上, 尤其关于顶煤力学环境、变形与支护强度的研究甚少, 因此顶煤支护强度往往只能依靠经验来确定。从现场观测和分析可知, 综放沿空巷道的顶煤下沉量除了与老顶和直接顶的活动规律有关以外, 还与支护强度、顶煤厚度及其力学性质有关。为此, 本文在分析综放沿空掘巷顶煤力学环境的基础上, 运用能量变分理论求解顶煤混合边界条件问题, 并简要探讨了支护阻力、顶煤厚度、顶煤力学特性、巷道宽度和顶煤下沉量的关系。对选择综放沿空掘巷顶煤的支护参数有一定的指导意义。

2 顶煤力学模型的建立及求解

2.1 顶煤受力状况分析

从文献[2, 3]可知, 上工作面采完后, 老顶发生断裂, 并在采空侧形成稳定的砌体梁结构, 如图 1 所示。

砌体梁中关键块 B 以给定变形方式作用于煤体,

给定变形从煤体边缘往里线性减少至 0, 因而在煤体边缘形成破碎区和塑性区。现场实测及数值模拟均证实, 在这种情况下, 煤体塑性区一般呈倒梯形分布, 宽 2~4 m。

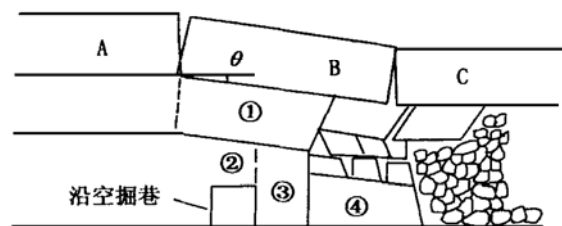


图 1 沿空掘巷整体力学模型

Fig. 1 Global mechanical model of road driving along next goaf

从文献[4]可知, 根据岩石降压破碎过程的能量分析, 对于地下工程, 在最大主应力减小过程中, 由于岩体内变形能小于其储存能量的能力, 而不会对岩体造成破坏; 当最大主应力超过其单轴抗压强度, 在最小主应力降低过程中由于岩体内的变形能超过其储存能量的能力, 可使岩体破坏。

由于老顶以给定变形作用于关键块 B 下方的煤

^y 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59734090)

收稿日期: 2000-07-22

体,最大主应力 σ_1 接近铅垂方向,因煤体边缘塑性区的形成,最小主应力 σ_3 接近煤体侧向方向。因此巷道的开掘对顶煤来说是造成最大主应力降低,对煤体则是最小主应力降低。因而,将造成煤柱较大范围的破坏而对顶煤无大的影响,顶煤仍可视弹性体。

2.2 力学模型的建立

从上述分析可知,顶煤左边界可视为固定边界,右边界为弹性区与塑性区的交界面,简化为窄煤柱上方煤体作用于顶煤的横向阻力 p_2 ,由于直接顶的刚度远大于煤体,因此上边界为施加给定变形的边界,下边界受到锚杆支护阻力 p_1 的作用,这样可建立顶煤力学模型如图2所示。

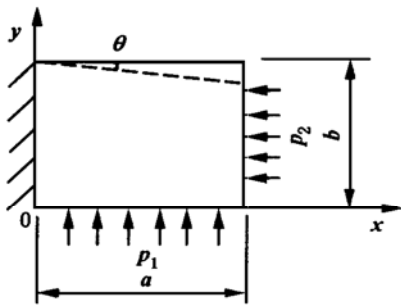


图2 顶煤力学模型

Fig. 2 Mechanical model of roadway roof coal

2.3 位移变分法

顶煤在 Z 方向可视为无限长,为平面应变问题,在一般应变状态下,弹性体储存的形变势能为

$$U = \frac{1}{2} \iint \sigma \epsilon ds \tag{1}$$

采用位移分量可表示为

$$U = \frac{E}{2(1+\mu)} \iint \left[\frac{\mu}{1-2\mu} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right|^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \tag{2}$$

假设弹性体位移分量 u, v 发生了位移边界条件所允许的微小变化分别为 $\delta u, \delta v$, 则得到拉格朗日位移变分方程为

$$\delta U = \iint (X \delta u + Y \delta v) dx dy + \iint (\bar{X} \delta u + \bar{Y} \delta v) ds \tag{3}$$

式中 X, Y 为体力分量; \bar{X}, \bar{Y} 为面力分量。

取位移分量为

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \sum_m A_m u_m \\ v &= v_0 + \sum_m B_m v_m \end{aligned} \tag{4}$$

式中 A_m, B_m 为互不依赖的系数(待定常数); u_0, v_0 为设定的函数,它们的边值等于边界上的已知位移; u_m, v_m 为在边界上等于 0 的函数。

将式(4)代入式(3)得

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial A_m} &= \iint X u_m dx dy + \int \bar{X} u_m ds \\ \frac{\partial U}{\partial B_m} &= \iint Y v_m dx dy + \int \bar{Y} v_m ds \end{aligned} \tag{5}$$

2.4 问题求解

根据顶煤力学模型,确定边界条件如下:

$$\begin{aligned} \text{体力分量} & \quad X = 0, Y = -\rho g \\ \text{面力边界条件} & \quad x = a, \bar{X} = -p_2, \bar{Y} = 0 \\ & \quad y = 0, \bar{X} = 0, \bar{Y} = p_1 \\ \text{位移边界条件} & \quad x = 0, u = v = 0 \\ & \quad y = b, v = -x\theta \end{aligned}$$

则位移分量表达式可构造为

$$\begin{aligned} u &= Ax \\ v &= -x\theta + Bx(b-y) \end{aligned} \tag{6}$$

式(6)显然满足位移边界条件,可以用瑞兹法求解,将式(6)代入式(2)得顶煤应变能为

$$U = \frac{E}{2(1+\mu)} \left[\frac{\mu ab}{1-2\mu} \left(A^2 + \frac{3}{2} B^2 a^2 \right) + \frac{ab}{2} \theta^2 - B\theta + \frac{Bb^2}{2} \right] - \frac{2ABab}{1-2\mu} \tag{7}$$

则

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial A} &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} (\mu ab + A - 2\mu - 2Bab) \\ \frac{\partial U}{\partial B} &= \frac{E}{1+\mu} \left[3Ba^2 \left(\frac{\mu ab}{1-2\mu} + 1 \right) - \frac{ab\theta}{2} + \frac{ab^2}{2} - \frac{2Aab}{1-2\mu} \right] \end{aligned} \tag{8}$$

根据式(5)和边界条件得

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial A} &= -p_2 ab \\ \frac{\partial U}{\partial B} &= \frac{a^2 b}{2} (p_1 - \rho g b) \end{aligned} \tag{9}$$

将式(9)代入式(8)得求解 A, B 的方程组为

$$\frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} (\mu ab + A - 2\mu - 2Bab) = -p_2 ab \tag{10}$$

$$\begin{aligned} & \frac{E}{1+\mu} \left[3Ba^2 \left(\frac{\mu ab}{1-2\mu} + 1 \right) - \frac{ab\theta}{2} + \frac{ab^2}{2} - \frac{2Aab}{1-2\mu} \right] \\ &= \frac{a^2 b}{2} (p_1 - \rho g b) \end{aligned} \tag{11}$$

利用式(10) (11)可得 A, B 的表达式,代入式(6)可求得位移分量。

3 结果分析

在综放沿空掘巷时,顶板(煤)下沉量在窄煤柱侧达到最大,因此,以下所讨论的下沉量均为顶板窄煤柱一帮 ($x = a$) 的下沉量。

根据某矿实际条件, 取 $a = 3.5 \text{ m}$, $\theta = 2.5^\circ$, $Q_g = 14.5 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$, $b = 3 \sim 6 \text{ m}$, $\mu = 0.3$, $E = 1707 \text{ MPa}$, $p_1 = 0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}$, $p_2 = 0.05 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 。(计算方法见文献[3]), 为方便起见, 将某些参量取为定值, 顶板下沉量与支护阻力、顶煤厚度、顶煤弹性模量、巷道宽度之间的关系如下:

(1) 支护阻力、顶煤厚度与顶煤下沉量的关系

$$b = 3 \text{ m} \quad v = 0.208 - 0.316p_1$$

$$b = 5 \text{ m} \quad v = 0.175 - 0.201p_1$$

$$b = 6 \text{ m} \quad v = 0.154 - 0.186p_1$$

(2) 顶煤下沉量与弹性模量的关系

取 $p_1 = 0.3 \text{ MPa}$, $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$, $b = 5 \text{ m}$,

则 $v = 0.113 - 148.9/E$

(3) 顶煤下沉量与巷道宽度的关系

取 $p_1 = 0.3 \text{ MPa}$, $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$, $b = 5 \text{ m}$,

则 $v = 0.0287 + 0.003a + 0.0048a^2$

从图 3 看出, 巷道顶煤下沉量与顶煤厚度成反比, 顶煤厚度越大, 下沉量越小。随顶煤高度的增加, 支护阻力对顶煤下沉量的影响越小, 主要是顶煤高度的增加增大了本身的承载能力和储存形变势能的能力。

从图 4 看出, 顶煤下沉量与顶煤弹性模量成反比,

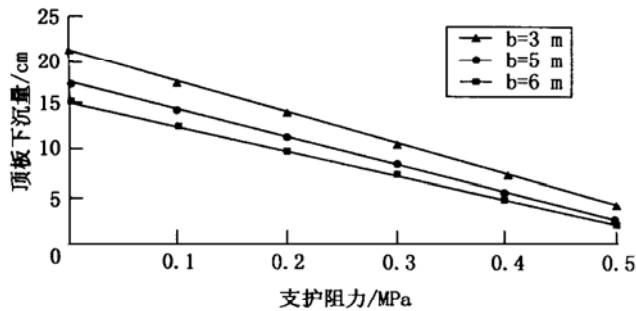


图 3 支护阻力与顶煤下沉量关系

Fig. 3 Relation between support resistance and roof subsidence

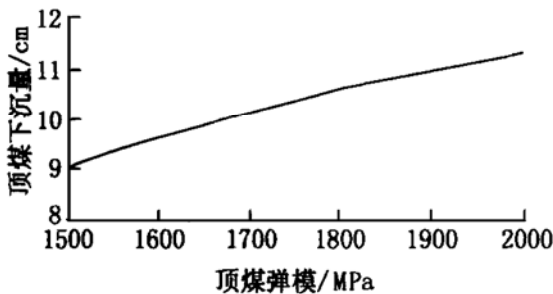


图 4 顶煤弹性模量与顶煤下沉量关系

Fig. 4 Relation between elastic modulus of roof coal and roof subsidence

主要是随弹性模量的增加, 顶煤储存形变势能的能力降低, 而顶煤弹性模量小, 可以更多地吸收老顶给定的变形。

从图 5 看出, 顶煤下沉量与巷道宽度成加速增长的关系, 巷道宽度越大, 顶煤下沉量增长幅度越大。

该矿沿空掘巷宽度为 3.5 m, 顶煤厚度 3 m, 顶煤采用高强螺纹钢锚杆加钢筋梯子梁支护, 支护阻力 0.13 MPa, 掘进期间顶煤下沉量为 16 mm, 与理论计算基本一致。由于综放沿空掘巷服务时间一般只有几个月到 1 a 左右, 顶煤下沉量允许达 20~ 25 mm^[5], 因此该支护方案偏于保守, 从图 1 可看出, 顶煤支护强度可减少至 0.8 MPa 左右。

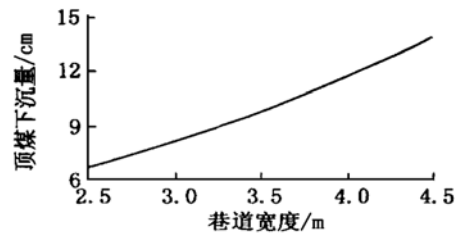


图 5 巷道宽度与顶煤下沉量

Fig. 5 Relation between the width of roadway and roof subsidence

4 结 论

(1) 沿空掘巷的开掘对巷道顶煤和窄煤柱的影响不同, 分别减小了煤柱的最小主应力和顶煤的最大主应力, 因此, 对煤柱的破坏程度较大而对顶煤的破坏较小。

(2) 将顶煤视为弹性体, 用位移变分法求解给定变形下顶煤的下沉量, 并探讨了顶煤下沉量与支护阻力、弹性模量、顶煤厚度、巷道宽度之间的关系, 所得结果与现场实测基本相符, 在理论上为沿空掘巷顶煤支护参数的选择提供了依据。

参考文献:

- [1] 柏建彪, 王卫军, 侯朝炯, 等. 综放沿空巷道围岩控制机理及锚杆支护技术研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(4): 343~ 347.
- [2] 高峰, 钱鸣高, 缪协兴. 老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.
- [3] 李学华. 综放沿空掘巷围岩大小结构稳定性的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000.
- [4] 华安增, 孔园波, 李世平. 岩块降压破碎的能量分析[J]. 煤炭学报, 1995, 20(4): 389~ 392.
- [5] 侯朝炯, 郭励生, 勾攀峰. 煤巷锚杆支护[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999. 28~ 31.