

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 06 - 0681 - 04

# 综放沿空巷道顶部锚杆剪切变形分析

缪协兴, 茅献彪, 朱川曲, 刘卫群

(中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

**摘 要:** 针对煤矿大量采用的小煤柱锚网支护, 尤其是综放沿空巷道锚网支护, 在巷道围岩大变形过程中, 锚杆可能会承受较大的剪切变形情况, 从理论上分析了综放沿空巷道顶部全长锚固锚杆承受剪切变形的机理, 并用数值模拟的方法计算出了其锚杆上的剪切力分布、最大剪切力和最大剪切应力。计算分析表明: 在围岩大变形情况下, 综放沿空巷道顶部锚杆上的最大剪切应力有可能接近或超过其材料的许用剪切应力, 此时锚杆的剪切作用效应将不可忽视。

**关键词:** 综放沿空巷道; 锚杆支护; 剪切变形; 锚杆剪断分析

**中图分类号:** TD353.6 **文献标识码:** A

## Analysis on shearing deformation of roof support bolt in gob-side entry of fully-mechanized caving face

MIAO Xie-xing, MAO Xian-biao, ZHU Chuan-qu, LIU Wei-qun

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The bolt probably supports larger shearing deformation in the course of huge deformation of roadway surrounding rock, for instance the cable bolts-metal mesh reinforcement of small pillar adopted largely in coal mine, especially that in gob-side entry of fully-mechanized caving face (FCF), the mechanism that the full-column roof support bolt sustains shearing deformation in gob-side entry of FCF was analyzed by theoretical research, and the shearing stress distribution, the maximum shearing force and the maximum shearing stress in bolts were obtained with the help of numerical simulation. It is indicated that the maximum shearing stress of the roof support bolt in gob-side entry of FCF will approach or exceed the allowable shearing stress of bolt materials in condition of large deformation in surrounding rock, and here, the shearing effect of bolt is not to be neglected.

**Key words:** gob-side entry of fully-mechanized caving face; bolt support; shearing deformation; bolt snip analysis

随着煤巷锚杆支护技术的成熟和普及<sup>[1~3]</sup>, 综放沿空巷道 (包括沿空掘巷<sup>[4]</sup>和沿空留巷<sup>[5]</sup>) 也大多采用锚、索、网联合支护技术。大多数综放沿空巷道都采用沿底掘进, 煤柱或充填巷帮宽仅为 3~5 m, 也就是综放沿空巷道具有顶板为煤层、煤柱小、断面大等显著特征。实践证明, 综放沿空锚杆支护巷道受采动影响时, 一般具有大变形动压特征。尤其对于巷道顶板来说, 由于煤柱小 (充填体宽度更小), 受动压影响时, 顶板会向采空区侧发生显著倾斜, 即类似于悬臂梁式的弯曲下沉变形。受这种显著弯曲变形作用的顶部锚杆, 特别是全长锚固支护锚杆, 其变形已不再是简单的拉伸状态, 而是拉、剪、弯组合变形状态。如果锚杆支护方位参数设计不合理, 锚杆可能会受显著剪切力作用, 甚至可能会发生剪切断裂, 因而

收稿日期: 2005-04-01

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (50225414); 国家自然科学基金重大资助项目 (50490270); 国家自然科学基金资助项目 (50374065)

作者简介: 缪协兴 (1959-), 男, 江苏江阴人, 教授, 博士生导师。E-mail: xxmiao@cumt.edu.cn

失去锚杆原有的拉紧支护功能. 本文针对综放沿空巷道矿压特征, 从理论和数值模拟两个方面分析综放沿空巷道顶部锚杆的剪切变形机理.

## 1 综放沿空巷道的矿压模型

图 1 为综放沿空巷道的矿压模型. 图中黑色部分为煤层, 如果是综放沿空留巷, 则图 1 中巷道右侧巷帮为充填体. 一般情况下, 煤层上方为直接顶, 直接顶上方为老顶. 由于老顶岩层受采空区一侧矿压影响而发生超前断裂, 从平面图中则显示为破断岩块. 此破断的老顶岩块会发生向采空区一侧的转动变形, 其转动角为  $\alpha$ . 则巷道顶板也要受此转动变形 (也称“给定变形”<sup>[6]</sup>) 的影响, 发生向采空区一侧的倾斜.

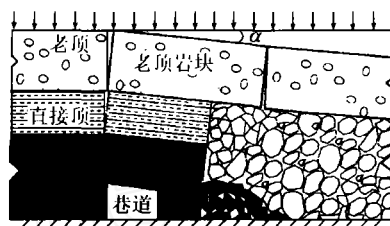


图 1 综放沿空巷道矿压模型

Fig. 1 The strata model of gob-side entry of fully-mechanized caving face

## 2 综放沿空巷道顶部锚杆的受力特征

由图 1 可知, 直接顶和顶煤在“给定变形”的作用下, 必然向采空区侧倾斜变形与运动, 这也是综放沿空巷道直接顶和顶煤变形的特点之一. 另一方面, 由于受本区段工作面采动影响, 沿空巷道直接顶 (包括顶煤) 在支承压力的作用下, 层理和裂隙会不断发育, 除了原生裂隙、构造裂隙外, 将产生大量的压裂裂隙. 裂隙面的抗剪能力往往很弱, 当沿裂隙面方向有不均匀变形时, 将发生相对裂隙面的错动. 平行于层面裂隙的错动变形将严重影响巷道顶板的稳定性, 这是使沿空巷道顶板锚杆受剪切作用的直接原因.

根据综放沿空巷道顶板锚杆的作用与围岩的变形特征, 取某一锚杆为单元, 对其进行力学分析, 则锚杆受力有 (图 2): 横向分布力  $q$ 、轴向分布力  $p$  (假定为全长锚固) 及锚杆端部的作用力  $P$ . 锚杆的剪切变形主要由横向分布力  $q$  引起, 而弯曲变形则由  $q$ 、 $p$ 、 $P$  共同作用产生. 基于上述分析, 可将锚杆的作用视为两端自由的弹性地基梁. 其中  $q$  由锚杆周围煤岩体垂直于锚杆方向的作用引起,  $q$  取决于垂直于锚杆方向的变形 (挠度) 及围岩的岩性;  $p$  为作用于锚杆的轴向阻力. 显然, 锚杆任意截面的剪力  $Q$  和轴力  $N$  分别为

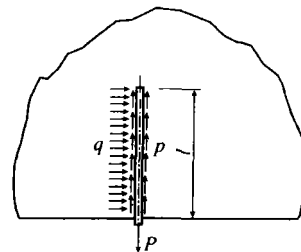


图 2 锚杆的受力特点

Fig. 2 The stress property of bolt

$$Q(x) = \int_0^x q dx, N(x) = \int_0^x p dx \quad (1)$$

根据锚杆的平衡条件, 有

$$\int_0^l q dx = 0, \int_0^l p dx = P \quad (2)$$

式 (2) 表明, 锚杆两端的剪力均为 0, 锚杆剪力的最大值位于锚杆中部某一位置.

图 2 锚杆的变形如图 3 所示,  $v(x)$  为锚杆任意截面垂直于杆轴线方向的位移;  $v_0$  为锚杆  $O$  端垂直于锚杆方向的位移;  $v_A$  为锚杆  $A$  端垂直于锚杆方向的位移. 设锚杆的抗弯刚度为  $EI$ , 并假设锚杆的轴向力  $p$  和端部作用力  $P$  对截面弯矩的影响相对于横向力  $q$  可略去不计, 取

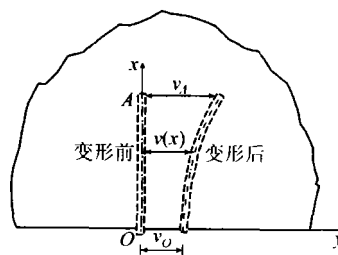


图 3 锚杆变形前、后的形状

Fig. 3 Shape of bolt before and after deformation

$$v(x) = v(x) - v_0 - \frac{v_A - v_0}{l} x, \quad (3)$$

式中,  $v(x)$  近似为锚杆的挠度.

锚杆的挠曲微分方程可表示为

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} = q \tag{4}$$

锚杆任意截面的剪力为

$$Q = EI \frac{d^3 v}{dx^3} = EI \frac{d^3 v}{dx^3} \Big|_0^x = \int_0^x q dx \tag{5}$$

由式 (5) 可知，只要已知锚杆垂直于轴线方向各点的位移，即锚杆围岩的变形，则可求得锚杆各截面的剪力、剪应力，并考察其剪切强度。

需要指出的是，由于受巷道顶板层间剪切错动变形的影响， $v(x)$  是分段连续函数，一般很难直接给出其表达式，但可以用数值分析方法确定。事实上，横向分布力  $q$  的取值主要取决于直接顶和顶煤沿水平方向的不均匀变形，特别是沿空巷道直接顶和顶煤水平方向层理的相对错动变形。

### 3 综放沿空巷道顶部锚杆剪切变形的数值模拟

采用数值模拟方法系统分析了某矿区综放沿空留巷顶板锚杆具体剪切力的分布情况和极值。数值分析软件为 ANSYS Multiphysics，数值模拟的建模依据为图 1 所示的矿压模型。针对其模型作了大量的数值模拟分析，这里仅介绍与本文理论分析所对应的一些重要计算结果。

模拟综放沿空留巷的埋深为 400 m，巷道断面宽为 4.5 m，高为 2.8 m，顶煤厚度为 3 m。巷道顶部布置 3 根长为 2.4 m 的锚杆，分别垂直安装在巷道顶板中间和左、右距巷道两帮各为 1 m 处。模拟随老顶岩块转角变化时巷道顶部左、中、右 3 根锚杆上的剪力分布，的变化分别为 2, 4, 6, 8, 10, 12°。根据数值模拟得到，当老顶岩块的转角分别为 2, 4, 6, 8, 10, 12 时，巷道顶部左、中、右 3 根锚杆上的最大剪切力  $Q_{max}$  和最大剪应力  $\sigma_{max}$  见表 1。当老顶岩块转角为 12 时，3 根锚杆上的剪切力分布如图 4 所示。

由表 1 和图 4 可知，在老顶岩块转动过程中，左锚杆所受剪力始终是 3 根锚杆中最大的，这与该锚杆

表 1 巷道顶部锚杆上的最大剪力和最大剪应力随老顶岩块转动时的变化

Table 1 The maximum shearing force and the maximum shearing stress change of roof support bolt in entry with rock turning of main roof

老顶岩块 转角 / (°)	左锚杆		中锚杆		右锚杆	
	$Q_{max} / N$	$\sigma_{max} / MPa$	$Q_{max} / N$	$\sigma_{max} / MPa$	$Q_{max} / N$	$\sigma_{max} / MPa$
2	374	0.98	327	0.86	328	0.86
4	810	2.13	744	1.96	897	2.36
6	5 879	15.47	1 056	35.20	7 360	19.37
8	24 947	65.65	8 766	23.07	22 042	58.01
10	39 082	102.85	23 145	60.91	33 495	88.15
12	50 681	133.37	37 870	99.66	44 273	116.51

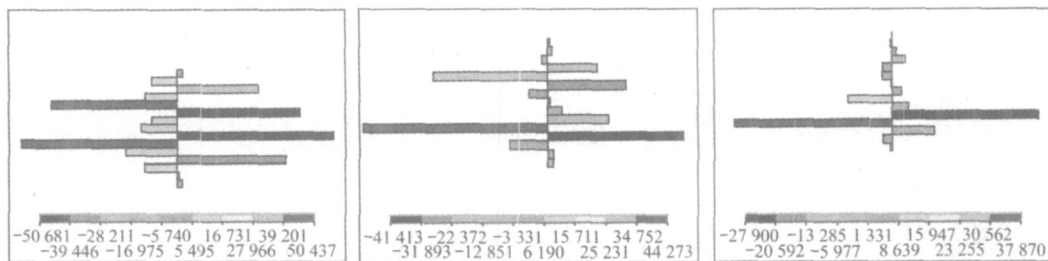


图 4 老顶岩块转动 12 时左、中、右 3 根锚杆上的剪力分布

Fig. 4 Shearing stress distribution of three bolts on left, middle and right side while the rock tum angle is 12 in main roof

所处位置的顶煤和直接顶完整性较好有关。中锚杆与左锚杆相比,其所处位置的顶煤和直接顶破碎程度加大,煤岩向锚杆传递力的能力降低,因而锚杆的剪力下降,而且由于中锚杆所处位置为顶板中部,在垂直方向变形空间大,因此其所受剪力是3根锚杆中最小的。右锚杆所处位置的顶煤和直接顶的破碎程度进一步加大,但由于受充填体的作用,锚杆的剪力比中锚杆大,但比左锚杆小。由表1还可以看出,随着老顶岩块转角的加大,锚杆的最大剪力逐渐增加,这将导致锚杆的剪切变形加大。

由图4可知,由于老顶岩块转动对顶煤和直接顶产生挤压破坏作用。左侧锚杆位于顶板靠实体煤帮侧,其顶煤和直接顶完整性相对较好,所以锚杆的剪力分布具有一定的规律(由于文章篇幅所限,没有把与老顶岩块对应转角的剪力分布图全部给出。如全部给出,此规律更加直观)。右侧锚杆位于顶板靠充填体侧,其顶煤和直接顶完整性较差,要承受的老顶给定变形较大,因此锚杆的剪力分布规律较差。中间锚杆的剪力分布规律介于左、右侧锚杆之间。

由表1可见,当老顶岩块转角达 $12^\circ$ 时,左锚杆中的最大剪切应力 $\sigma_{\max} = 133.37 \text{ MPa}$ 这一值已与普通碳素钢屈服极限值相当接近,即使用屈服极限值的0.8倍来计算剪切许用应力,考虑到锚杆受拉、剪、弯复合应力作用,此时锚杆的剪切作用效应将十分严重。

上述数值模拟表明:模拟加载为给定位移,即老顶岩层的转角变化;模拟介质为层状连续,处于弹塑性状态,并考虑层理变化;巷道围岩处于复杂应力状态,锚杆采用梁单元。

#### 4 结 语

受采动影响,煤矿小煤柱沿空巷道围岩必将发生大变形矿压显现,如其采用的是锚杆支护,则锚杆可能会承受较大的剪切变形,因而可能失去锚杆应承担拉伸应力的最佳作用功能。通过综放沿空巷道顶部全长锚固锚杆受力的理论分析,揭示了在大变形状态下其锚杆承受剪切变形的机理。由于巷道顶部岩层(或煤层)在发生较大弯曲下沉过程中会产生较大的水平错动,因而锚杆必将承受较大剪切变形。数值模拟表明,锚杆承受这种剪切变形而引起的剪切应力可能接近或超过锚杆的许用剪切应力。因而,在这类巷道的锚杆支护设计中,应该合理选择锚杆支护的方向,尤其是顶部锚杆的支护方向,避免锚杆发生剪切破坏,尽量发挥锚杆的最大支护效能。

#### 参考文献:

- [1] 侯朝炯,郭宏亮.我国煤巷锚杆支护技术的发展方向[J].煤炭学报,1996,21(2):113~118
- [2] 杨新安,陆士良.中国煤矿的锚杆支护[J].中国煤炭,1995,21(3):5~8
- [3] 侯朝炯,柏建彪,张农,等.困难复杂条件下的煤巷锚杆支护[J].岩土工程学报,2001,23(1):84~88
- [4] 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
- [5] 张东升,茅献彪,马文顶.综放沿空留巷围岩变形特征的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):331~334
- [6] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003