

# 沿空巷道底鼓力学原理及控制技术的研究\*

王卫军

(湘潭工学院岩土工程研究所 湘潭 411201)

侯朝炯

(中国矿业大学能源学院 徐州 221008)

**摘要** 应用数值模拟方法对沿空巷道围岩的应力分布和底鼓过程进行了分析,认为沿空巷道靠近采空区的底板中无水平应力的影响,底板岩层在实体煤帮高应力的作用下向巷道内和采空区运动形成底鼓,而窄煤柱在底鼓过程中起到了抑制作用。同时介绍了沿空巷道的底鼓控制技术及其在工程实践中的应用。

**关键词** 采矿工程, 沿空巷道, 底鼓, 力学原理, 控制技术

**分类号** TD 803

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2004)01-0069-06

## STUDY ON MECHANICAL PRINCIPLE AND CONTROL TECHNIQUE OF FLOOR HEAVE IN ROADWAY DRIVEN ALONG NEXT GOAF

Wang Weijun<sup>1</sup>, Hou Chaojiong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Xiangtan Polytechnic University, Xiangtan 411201 China)

<sup>2</sup>China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008 China)

**Abstract** The mechanical situation of the roadway is different from that of average gateway. On one side of the roadway is the relative integrated coal seam and on the other side is the narrow pillar in which plastic deformation has occurred. The high abutment pressure zone on the integrated coal beside the roadway will occur due to superposition of the advancing abutment pressure in front of working face and the concentration stress of the goaf side in the course of extraction. The stress on the integrated coal is much greater than that on any side of the average gateway. The stress distribution in surrounding rocks and floor heave process of roadway driven along next goaf is analyzed by numerical simulation. It is supposed that when the roadway is near the next goaf, the floor is not affected by the horizontal stress, and the floor heave is formed because the floor rock moves into the interior of the roadway along next goaf under high stress on coal mass side. The narrow coal pillar may control elevation of the floor. The control technique of floor heave is introduced and applied to engineering practice.

**Key words** mining engineering, roadway driven along next goaf, floor heave, mechanical principle, control technique

### 1 引言

底鼓是回采巷道经常发生的动力现象之一,国内外专家学者对回采巷道的底鼓力学原理及其控制技术作了大量的研究,取得了长足的进展。然而,综放沿空掘巷的力学环境不同于一般的回采巷道,

巷道的一帮为已进入塑性状态的窄煤柱,另一帮为实体煤。由于采空侧支撑压力和工作面超前支撑压力的叠加,实体煤帮的应力集中系数远大于一般回采巷道的任何一帮。从现场看到,沿空巷道的底鼓与窄煤柱的宽度有关,当窄煤柱宽度较小时,巷道底鼓严重;而当煤柱宽度较大时,底鼓量较小。这是回采巷道底鼓研究面临的又一个新的课题。本文

2002年1月30日收到初稿,2002年4月15日收到修改稿。

\* 湖南省自然科学基金(01JJY3020)资助项目。

作者 王卫军 简介:男,37岁,博士,1990年毕业于贵州工学院,现任教授,主要从事巷道围岩控制方面的研究。E-mail: wjwang@xtpu.org.cn。

通过 FLAC<sup>3.3</sup> 数值计算软件的数值模拟分析及现场实践, 对沿空掘巷的底鼓力学原理进行了较深入的研究, 并提出了有效的底鼓控制技术。

## 2 沿空掘巷应力环境分析

根据关键层理论<sup>[1]</sup>和综放面采空侧上覆岩层活动规律可知, 上区段工作面推过后, 关键顶板在下区段煤体内断裂形成侧向砌体梁结构, 即所谓“大结构”<sup>[2]</sup>, 与此同时, 侧向集中应力向下区段深部煤体转移, 大结构下部煤岩处于应力降低区, 沿空巷道即布置在此应力降低区内, 下区段回采时, 在超前支承压力区(工作面前方 10~30 m), 在巷道实体煤帮, 超前支承压力与侧向支承压力叠加, 如图 1 所示。

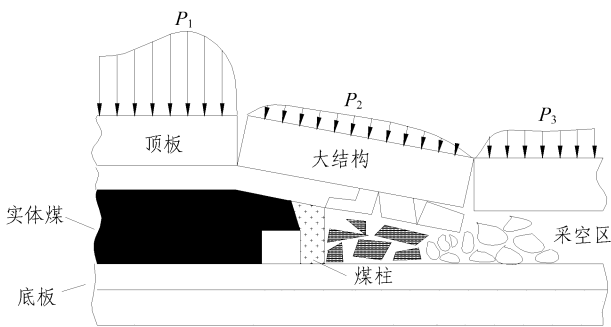


图 1 沿空掘巷力学模型

Fig.1 Mechanical model of the roadway driving along next goaf

由于大结构以给定变形方式作用于采空侧煤体<sup>[3]</sup>, 在煤体边缘形成一定宽度(2~4 m)的塑性区

和破碎区。沿空掘巷一般留 2~5 m 护巷煤柱, 因此, 巷道掘出后煤柱基本进入塑性状态。回采期间, 在巷道实煤体侧, 工作面超前支承压力与原有集中应力叠加, 形成高支承压力; 窄煤柱则由于大结构发生二次回转而进入破碎状态, 承载能力进一步降低<sup>[4]</sup>。

## 3 沿空巷道两帮支承压力分布

以潞安矿务局王庄矿 1307 工作面开采条件为例, 模拟沿空掘巷两帮底板支承压力分布。开采条件为: 采深 300 m, 工作面长 145 m, 回风巷道断面为矩形, 宽×高为 3.5 m×3 m, 沿煤层底板掘进, 巷道顶底板岩性如表 1 所示。

图 2(a), (b), (c), (d)为煤柱宽度为 5, 4, 3 和 2 m 时巷道两帮底板上支承压力分布。图中 0 点为巷道实体煤帮, 0~4 m 为巷道宽度, 4~9, 4~8, 4~7, 4~6 m 为煤柱宽度, 0~-15 m 为实体煤。

从图 2 中看到, 随着煤柱宽度的变化, 窄煤柱和实体煤底板上支承压力分布也有所不同, 见表 2。

从表 2 中可知, 实体煤帮底板上的支承压力远远高于窄煤柱帮, 并且随着煤柱尺寸的减小, 实体煤帮的支承压力逐渐增大, 窄煤柱帮的支承压力逐渐降低。

## 4 底板岩层运动规律

### 4.1 沿空巷道底板岩层位移分布

图 3 为窄煤柱宽度为 2 m 时沿空巷道底板岩层

表 1 煤层及顶底板岩石力学性质

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rocks

序号	岩层	厚度/m	密度/g · cm <sup>-3</sup>	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1	泥岩	5.06	2.30	18.9	6.5	2.5	30
2	砂质泥岩	2.86	2.35	20.0	7.5	3.2	31
3	细砂岩	5.93	2.60	45.0	15.0	5.0	35
4	泥岩	4.02	2.30	18.9	6.5	2.5	30
5	细砂岩	1.91	2.60	45.0	15.0	5.0	35
6	砂质泥岩	1.93	2.35	20.0	7.5	3.2	31
7	泥岩	1.15	2.30	18.9	6.5	2.5	30
8	煤层	6.50	1.60	18.5	1.4	1.3	27
9	泥岩	2.40	2.30	17.8	4.5	2.2	28
10	细砂岩	2.23	2.60	38.0	13.0	4.5	34
11	砂质泥岩	5.94	2.35	20.0	7.5	3.2	31

表 2 沿空巷道两帮应力分布  
Table 2 Stress distribution on sides of roadway

煤柱宽度/m	实体煤帮		窄煤柱帮	
	应力峰值/MPa	集中系数	应力峰值/MPa	集中系数
5	34.78	4.64	12.72	1.70
4	35.68	4.76	8.90	1.19
3	35.98	4.80	5.40	0.72
2	36.70	4.89	3.20	0.43

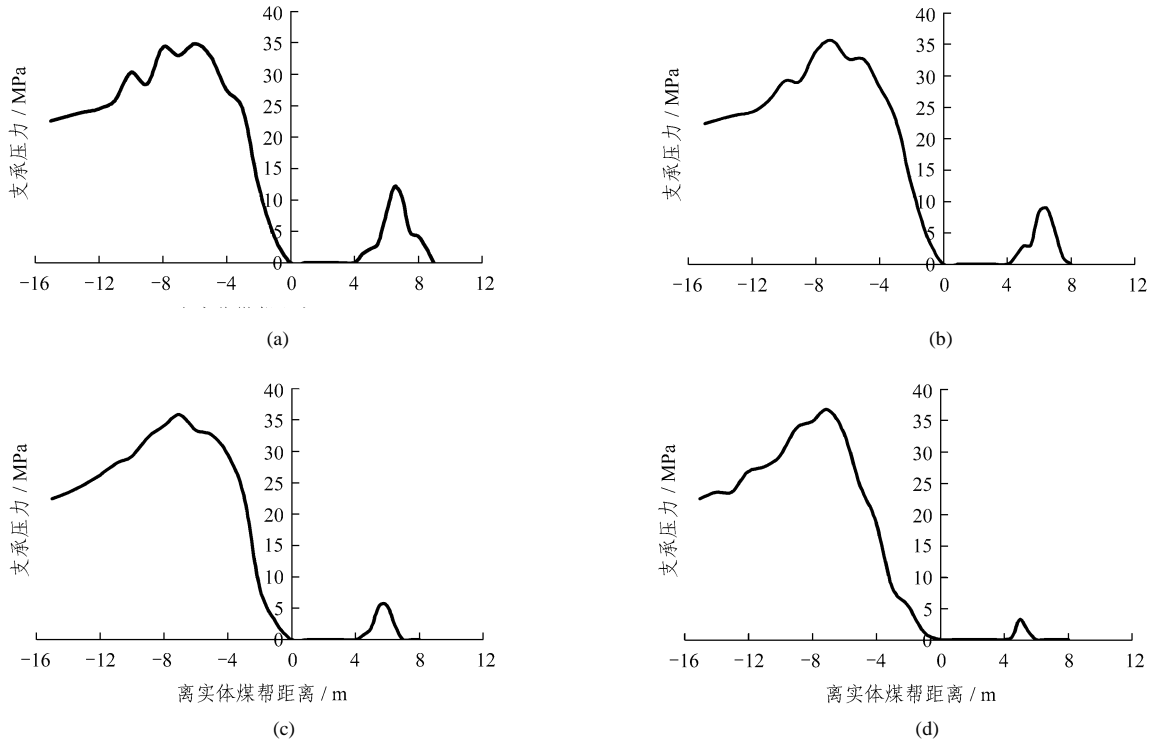


图 2 不同煤柱宽度沿空巷道煤两帮支承压力分布  
Fig.2 Abutment pressure distribution of roadway sides

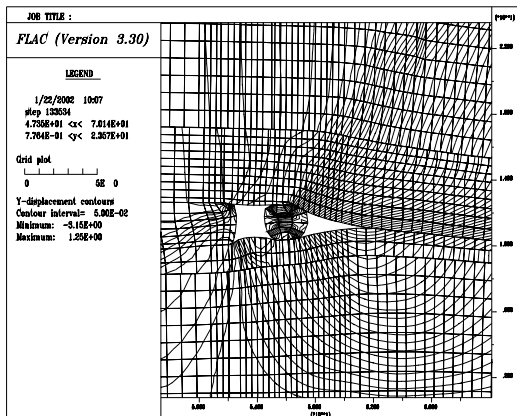


图 3 底板岩层位移等值线分布  
Fig.3 Distribution isolines of floor strata displacement

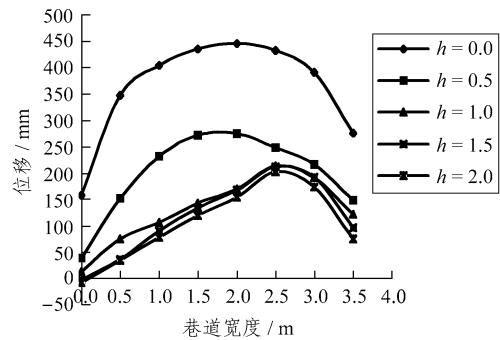


图 4 底板岩层位移曲线  
Fig.4 Displacement curves of floor strata

位移等值线图。图 4 为沿空巷道底板 1~2 m 深的岩层的位移曲线。

从图 3, 4 可知, 沿空巷道底鼓呈明显的不对称性, 窄煤柱帮底鼓量较大, 实体煤帮底鼓量较小, 并且在 2 m 深处的岩体产生下沉。煤柱宽度为 2 m 时, 巷道中部的底鼓量为 445.1 mm, 大于相同条件

下实体煤巷道的底鼓量 387.7 mm。

### 4.2 沿空巷道底板岩层的运动规律

图 5 为窄煤柱 2 m 时底板岩层的运动方向。图 6 为窄煤柱 5 m 时底板岩层的运动方向。

从图 5, 6 看到, 沿空巷道底板岩层整体向采空区运动。当窄煤柱宽度为 2 m 时, 窄煤柱底板岩层向上运动; 当窄煤柱宽度为 5 m 时, 窄煤柱底板则略有下沉。原因主要是, 当煤柱宽度较小时, 承载能力较低, 在支承压力的作用下, 煤柱全部进入破碎状态, 即作用于底板上的反力较小, 因而底板上升; 而当煤柱较大时, 具备一定的承载能力, 可将部分支承压力的传递到底板, 因而底板下沉。由于窄煤柱的另一侧为采空区, 采空区底板岩层的应力已被释放, 在实体煤帮高应力的作用下, 底板岩层整体向采空区移动。

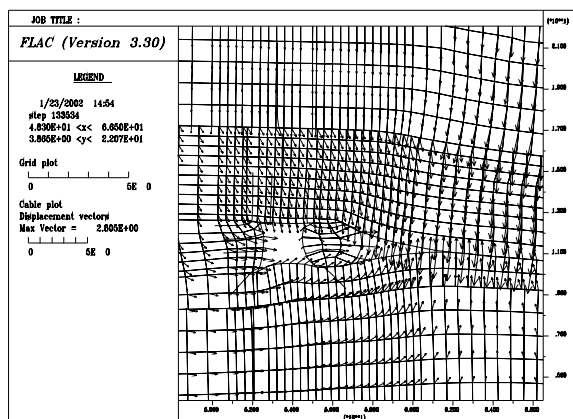


图 5 煤柱宽度 2 m 巷道底板岩层位移方向

Fig.5 Displacement direction of floor strata when width of the pillar is 2 m

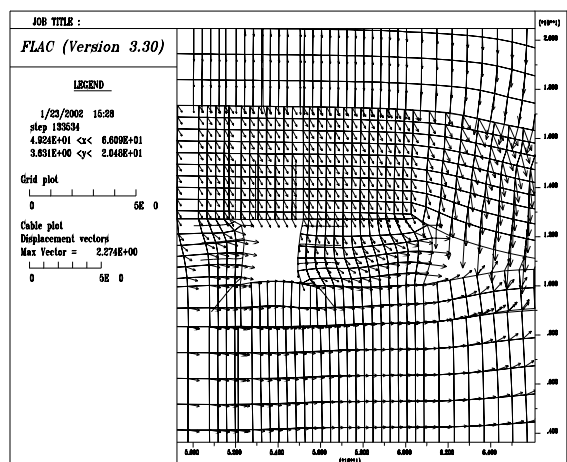


图 6 煤柱宽度 5 m 巷道底板岩层位移方向

Fig.6 Displacement direction of floor strata when width of the pillar is 5 m

实体煤巷道的底鼓来自两帮煤体下底板向巷道内的运动, 因而实体煤帮的下沉对巷道底鼓有重要影响。与实体煤巷道不同, 沿空巷道的底鼓主要是实体煤帮高应力的影响, 在高应力作用下底板岩层向巷道及采空区移动, 与此同时实体煤帮下沉, 而窄煤柱实际上起着抑制底鼓的作用, 因而, 窄煤柱的下沉有利于控制底板岩层向上运动, 有利于减小底鼓。

### 4.3 底鼓量与煤柱宽度的关系

为分析煤柱与底鼓量的关系, 不妨将煤柱宽度的选择范围扩大。在研究过程中, 模拟了煤柱宽度为 2~15 m 的巷道的底鼓量, 如图 7 所示。

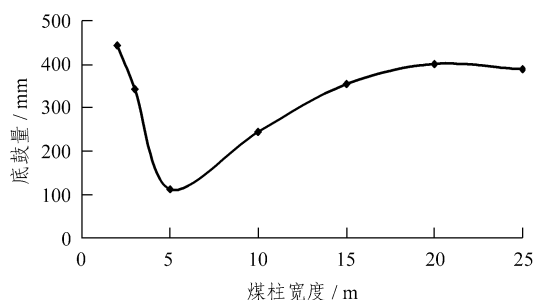


图 7 煤柱宽度与底鼓量的关系

Fig.7 Relationship between width of pillar and heave

从图 7 可知, 当煤柱宽度从 2 m 增加到 5 m 时, 底鼓量迅速减小; 当煤柱宽度从 5 m 增加到 15 m 时, 底鼓量又迅速增加; 煤柱宽度大于 20 m 以后, 底鼓量缓慢减小, 直至接近实体煤巷道的底鼓量。

从前述沿空巷道两帮的应力分布和底板岩层运动规律可知, 当煤柱宽度为 2~5 m 时, 煤柱传递给底板的压力起着抑制底鼓的作用。随着压力的增大, 煤柱底板上升量逐渐减小, 底鼓量亦随之减小; 当煤柱宽度为 5~20 m 时, 随着煤柱宽度的增加, 煤柱传递给底板的应力继续增加, 逐渐阻止底板岩层向采空区运动, 煤柱底板部分岩体转而在巷道内运动, 因而底鼓量不断增加; 当煤柱宽度超过 20 m 时, 煤柱上应力有所降低, 接近实体煤巷道两帮的应力, 因而底鼓量也接近实体煤巷道。

综上所述, 由于沿空巷道的应力环境与实体煤巷道不同, 底鼓呈现出一些不同的特点。一是由于巷道两帮应力不同, 造成底鼓明显的不对称性; 二是由于邻近工作面的开采, 其底板的应力得到释放, 在本工作面开采时, 在实体煤帮高应力的作用下, 只是巷道底板岩体向采空区移动, 而不是两帮煤体下底板同时向巷道内移动; 三是底鼓的强烈程度与煤柱的宽度密切相关, 煤柱宽度不同, 煤柱上的应

力集中程度以及对底板的作用不同，煤柱宽度在 5 m 左右时底鼓量最小。

### 5 沿空巷道底鼓控制

由于沿空巷道底鼓主要是由于实体煤帮高应力的作用，使底板岩层向巷道内和采空区运动而引起的，从巷道围岩的应力、塑性区分布可知，巷道底角是应力集中的部位，塑性区最先发展的地方。高应力作用下底板岩体向巷道及采空区的塑性流动首先从巷道底角开始。因此，实体煤帮及底角的支护是沿空巷道底鼓控制的关键；同时窄煤柱的宽度及其承载能力对沿空巷道底鼓有着重要的影响，因此沿空巷道的底鼓控制技术主要从上述两方面考虑。

(1) 由于沿空巷道的底鼓对煤柱宽度极为敏感，因而当巷道底板特别松软时，可留设较大的煤柱控制底鼓；

(2) 提高窄煤柱的支护强度，增加窄煤柱的承载能力，提高其对底板岩层的抑制作用，达到底鼓控制的目的；

(3) 加固帮角控制底鼓<sup>[5]</sup>。对于沿空巷道主要是加固实体煤帮和底角，可采用高强锚杆，或注浆，或两种措施同时采用。

采用两种措施加固底角，可增加实体煤帮底板的承载能力，阻止实体煤帮底板向采空区方向移动，同时减少实体煤帮的下沉，达到控制底鼓的目的。

如图 8 为控制前巷道变形模拟结果，支护参数为：两帮 4 根锚杆，顶板 5 根锚杆加锚索。图 9 为加固控制后巷道变形状况模拟结果，支护参数为：实煤体帮 5 根锚杆，巷道底角加固，底角锚杆的排距为帮锚杆的 1/2，窄煤柱帮 6 根锚杆。顶板支护与图 8 相同。

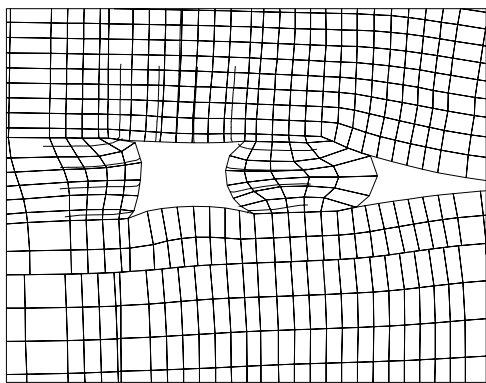


图 8 控制前巷道围岩变形状况  
Fig.8 Deformation of surrounding rocks before control

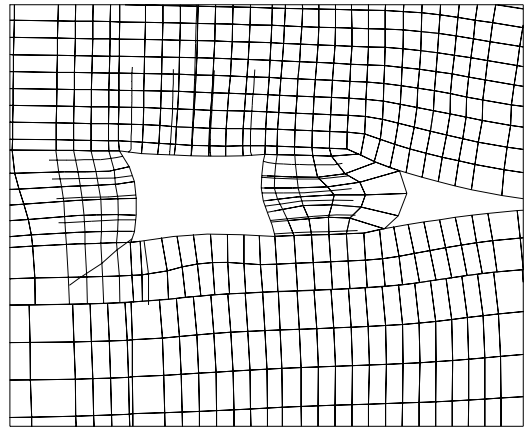


图 9 控制后巷道围岩变形状况  
Fig.9 Deformation of surrounding rocks after control

加固前，巷道底鼓量为 344 mm，实体煤帮下沉量为 176 mm，煤柱底板上升为 235 mm。加固后，巷道底鼓量为 110.8 mm，实体煤帮下沉量 56 mm，煤柱底板上升 78 mm。

### 6 工程实例

以 1307 风巷为加固实例，予以讨论。该窄煤柱宽度为 3 m，采用高强锚杆支护，全长锚固，支护方案如图 10 所示。回采期间，在距离工作面 30 m 长度内，巷道底鼓量为 386~412 mm(数值计算为 344 mm，相差 12~20%)，严重影响巷道的正常生产和安全。

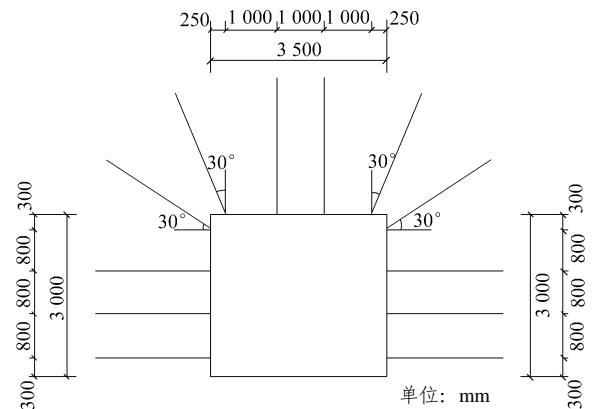


图 10 第一条巷道支护方案  
Fig.10 Supporting scheme of the first roadway

根据上述底鼓力学原理及控制技术，在第 1309 风巷掘进时，留设煤柱 4 m，支护方式相同，但对煤柱与底角进行了加强支护，增加了实体煤帮的底角锚杆，底角锚杆的排距为帮锚杆的 1/2，窄煤柱增加 1 根锚杆，见图 11。从现场看到，采取了这些

控制技术后, 巷道底鼓量最大为 118 mm, 底鼓量降低了 71%, 巷道底鼓基本得到控制。

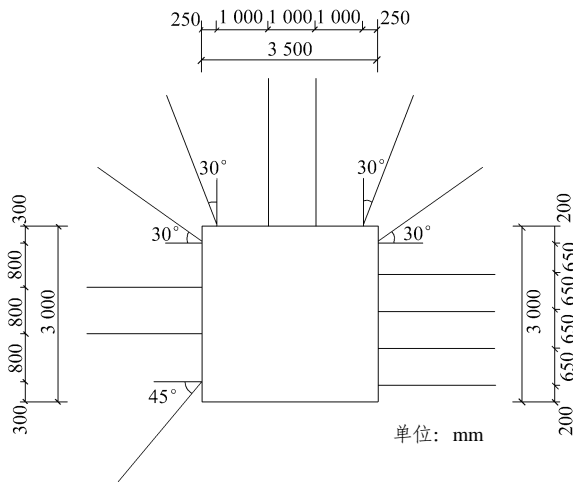


图 11 第二条巷道支护方案

Fig.11 Supporting scheme of the second roadway

## 7 结 论

沿空巷道的应力环境不同于实体煤巷道, 因而

其底鼓力学原理也不尽相同。沿空巷道因靠近采空区, 采空区底板岩层的应力已被释放, 基本不存在水平应力的影响。因此, 巷道底板岩层在实体煤帮高应力的作用下, 向巷道内和采空区运动, 这是沿空巷道底鼓的根本原因。在沿空巷道底鼓过程中, 窄煤柱实际上起着控制底鼓的作用。因此, 加强实体煤帮底角和窄煤柱支护是底鼓控制的关键, 此外, 煤柱宽度对沿空巷道底鼓也产生重要影响。

## 参 考 文 献

- 1 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
- 2 侯朝炯, 李学华. 综放沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理[J]. 煤炭学报, 2002, 26(1): 1~7
- 3 王卫军, 侯朝炯. 综放沿空巷道底板受力变形分析及底鼓力学原理[J]. 岩土力学, 2002, 22(3): 319~322
- 4 Chaojiong Hou, Yanan He. A new method to control heave in heterogeneous strata[A]. In: Proc. of Ninth International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997, 1 519~1 522

## 首届全球华人岩土工程论坛 2003 年 8 月在同济大学举行

由同济大学、香港理工大学、台湾中华大学、日本佐贺大学和法国路桥大学等单位联合发起举办的“首届全球华人岩土工程论坛(1st World Forum of Chinese Scholars in Geotechnical Engineering—GEO-WCS2003)于 2003 年 8 月 20~21 日在上海同济大学举行。本届论坛由同济大学主办, 河海大学、浙江大学、中国矿业大学、清华大学、东南大学、南京大学协办。

本届论坛已得到了许多海内外学者的积极响应, 来自美国、日本、法国、德国、英国、加拿大、澳大利亚、新加坡和中国的 120 多位代表出席了会议, 其中中国大陆以外的知名华人学者 20 多名, 大陆学者 100 多名。尤其值得一提的是, 不少与会代表是目前国际岩土工程学术界权威和精英人士。

经审阅收入本次会议论文集的学术论文共 62 篇。论文内容涉及岩土及地下工程的理论模型、数值分析、室内和现场试验研究以及工程应用, 反映了岩土本构新理论、边坡与隧道的渐进性破坏、环境岩土工程、岩土工程新技术和岩土工程信息化技术等当前国际岩土工程界的热点研究领域和最新研究成果。

会议期间还召开了“全球华人岩土工程学者”联谊活动。经讨论一致同意 2005 年由河海大学承办举行第 2 届全球华人岩土工程论坛会议, 河海大学校长助理徐卫亚教授愉快地接受了委托。联谊会上成立了华人岩土工程学者联谊会, 并一致推举会长单位为本届论坛主办单位同济大学, 副会长单位为下届论坛主办单位河海大学。联谊会会长单位和副会长单位将动态变换。会议期间与会代表们还对筹备华人岩土工程英文刊物提出了设想与初步计划, 并对全球华人岩土工程论坛的今后工作提出了很多宝贵的意见和建议。

“首届全球华人岩土工程论坛”组委会秘书处供稿

2003 年 8 月 21 日