

上行开采层间岩层控制的关键位置判定

冯国瑞¹, 闫旭¹, 王鲜霞², 康立勋¹, 翟英达¹

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 理学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对历史原因或复杂地质条件等导致曾经遗弃的可采煤层上行开采问题, 提出上行开采的关键技术是岩层控制, 而岩层控制的突破点在于其关键位置的确定。考虑到上行开采层间岩层关键层的结构最终演化为面接触块体结构, 并且该结构中的块体强度高、刚度大, 块体间摩擦面近似平面, 结构面贯穿块体, 结构的失稳源于块体沿着接触面的剪切滑移, 故借鉴块体理论的思想, 用矢量分析法建立上行开采层间岩层关键层结构中块体的参量矩阵并计算相应的判别矩阵, 判定层间岩层关键层结构的可动块体, 进而通过虚设切向“净滑动力”的方法探索上行开采层间岩层控制关键位置的具体判定方法, 为上行开采层间岩层结构以及上行开采技术体系的进一步深入研究奠定理论基础。

关键词: 采矿工程; 上行开采; 层间岩层结构; 控制; 关键位置

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增2 - 3721 - 06

DETERMINATION OF KEY POSITIONS OF STRATA CONTROLLING IN ROCKS BETWEEN COAL SEAMS FOR UPWARD MINING

FENG Guorui¹, YAN Xu¹, WANG Xianxia², KANG Lixun¹, ZHAI Yingda¹

(1. Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Institute of Sciences, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: In accordance with upward mining for left-over coal owing to some historical reasons or complex geological conditions, the key technology in upward mining was proposed to control the strata, and its breakthrough point was to determine key position in rocks between strata. Because key strata structure among coal seams in upward mining has evolved to face-contacted block structure, appropriate parameter matrix was established based on block theory and its discrimination matrix is figured out in view of which the block in face-contacted block structure had high intensity and stiffness. The friction face among blocks was similar to a plane, and the structural face run through the block, and structural instability was caused by the shear slip of the block along contact faces. Vector analysis method was employed to determine the mobile block in key strata structure between coal seams in upward mining. Furthermore, the specific determination method for key position in rocks of strata controlling between coal seams for upward mining was explored by means of virtual tangential net slipping force, which provides a solid foundation for further exploration of strata structure between coal seams and technology system of upward mining.

Key words: mining engineering; upward mining; strata structure between coal seams; strata controlling; key position

收稿日期: 2009 - 02 - 20; **修回日期:** 2009 - 07 - 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50704024); 山西省青年科技研究基金资助项目(2007021024); 太原市技术创新计划资助项目(0803003); 太原理工大学矿业启明星计划资助项目

作者简介: 冯国瑞(1976 -), 男, 博士, 1999年毕业于太原理工大学建筑工程专业, 现任讲师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: fguorui@163.com

1 引言

随着我国现代化建设进程的加快,资源能源紧缺的问题日益凸现。许多由于历史原因或复杂地质条件等导致的曾经遗弃的可采煤层引起了工程技术人员、专家学者的一致关注,这其中有相当一部分煤层回收是需要进行上行开采的^[1]。如何安全高效的上行开采回收这些资源,关键在于岩层控制,而岩层控制的突破点在于其关键位置的确定。

上下煤层层间岩层受成岩作用和不同时期不同性质构造运动影响而成层状结构。随着下部煤层的采出,层间岩层会出现离层破断等现象,形成典型的“砌体梁”结构^[2],随着时间的推移,岩层进一步变形移动,加上上行开采时该岩梁承受载荷的增加,最终传递到层间岩层的关键层^[3],其“砌体梁”的铰接处由于应力集中加剧会发生岩块破断而最终过渡到另一新的力学平衡状态——面接触块体结构。受采动影响该结构再次失稳主要归因于剪切滑移破坏,而其充分条件是关键接触面先失稳,从而导致采场覆岩的连锁破坏^[4]。所以从工程安全角度考虑,必须先对关键接触面采取措施^[5]。那么上行开采层间岩层控制的关键位置就是该结构中的关键接触面。因此,该问题的解决可以借鉴块体的稳定性分析方法,目前国内外常用的方法有 DDA(非连续变形分析方法)、离散元方法、关键块理论等^[5, 6],前两者作为数值模拟方法在块体的结构面产状不能确定的情况下能较好的描述块体非连续大变形,但对非连续问题中的连续情况不能妥善处理,而后者作为解析法,在结构面产状确定的情况下可以克服前者的不足,获得客观的解析解,比前者更接近实际情况。考虑到该结构中的块体强度高、刚度大,块体间摩擦面近似平面,结构面贯穿块体、产状明确,结构的失稳源于块体沿着接触面剪切滑移,所以借鉴块体理论的思想,本文用矢量分析法建立了上行开采层间岩层关键层结构块体的参量矩阵并计算了相应的判别矩阵,判定了层间岩层关键层结构的可动块体,进而通过虚设切向“净滑动力” F 的方法探索确定了上行开采层间岩层控制关键位置,为上行开采的岩层控制技术提供了理论指导与技术支持。

2 有限块体可动性判定定理

上行开采层间岩层面接触块体结构中涉及到

的块体属于块体理论中的裂隙块体,并是被结构面和临空面完全切割成孤立体的块体,即为有限块体。有限块体又包含可动块体和不可动块体,上行开采层间岩层控制的关键位置必然在可动块体甚至是其某一结构面上。可见确定上行开采层间岩层控制的关键位置必须先确定可动块体。

据块体理论^[6]可知,若由结构面和临空面共同组成的块体为有限,而仅由结构面构成的裂隙块体为无限,则该块体为可动。即下式同时成立的 BP 为可动块体

$$\left. \begin{aligned} JP \neq \Phi \\ EP \cap JP = \Phi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: JP 为裂隙锥, EP 为开挖锥。

3 上行开采层间岩层结构关键接触面的判定方法

对于式(1)的判定,赤平投影判别法当块体种类较多,产状复杂时绘图较多、线条较繁,不易辨别^[7, 8]。本文尝试用矢量分析法判定块体可动性^[6-8],并进而分析判定层间岩层结构的关键接触面。

首先,确定块体各组结构面 P_i 向上的单位法线矢量 \hat{n}_i :

$$\hat{n}_i = \{A_i, B_i, C_i\} = \{\sin \alpha_i \sin \beta_i, \sin \alpha_i \cos \beta_i, \cos \alpha_i\} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

式中: A_i 为结构面 P_i 向上的单位法线矢量 \hat{n}_i 用直角坐标表示的横坐标值, B_i 为结构面 P_i 向上的单位法线矢量 \hat{n}_i 用直角坐标表示的纵坐标值, C_i 为结构面 P_i 向上的单位法线矢量 \hat{n}_i 用直角坐标表示的竖坐标值, α_i 为结构面 P_i 的倾角, β_i 为结构面 P_i 的倾向。

两相交结构面法向矢量的叉积为各结构面的交线矢量即棱矢量:

$$\hat{I}_{ij} = \bar{n}_i \times \bar{n}_j = \begin{bmatrix} x & y & z \\ A_i & B_i & C_i \\ A_j & B_j & C_j \end{bmatrix} = \{(B_i C_j - B_j C_i), (A_j C_i - A_i C_j), (A_i B_j - A_j B_i)\} \quad (3)$$

建立各结构面的方向参量矩阵:

$$I_k^{ij} = \text{sign}[(\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \hat{n}_k] \quad (i \neq j) \quad (4)$$

令

$$F = (\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \hat{n}_k$$

当 $\text{sign}(\mathbf{F}) = -1$ 时, 二矢量点积小于 0, 即棱矢量 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 与某法向矢量 $\hat{\mathbf{n}}_k$ 的夹角为钝角, 因 $\hat{\mathbf{n}}_k$ 为结构面 \mathbf{P}_k 的向上法线, 所以 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 必在 \mathbf{P}_k 的下半空间; 当 $\text{sign}(\mathbf{F}) = 1$ 时, 二矢量点积大于 0, 即棱矢量 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 与某法向矢量 $\hat{\mathbf{n}}_k$ 的夹角为锐角, 因 $\hat{\mathbf{n}}_k$ 为 \mathbf{P}_k 的向上法线, 所以 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 必在 \mathbf{P}_k 的上半空间; 当 $\text{sign}(\mathbf{F}) = 0$ 时, 二矢量点积等于 0, 即棱矢量 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 与某法向矢量 $\hat{\mathbf{n}}_k$ 的夹角为直角, 因 $\hat{\mathbf{n}}_k$ 为 \mathbf{P}_k 的向上法线, 所以 $\hat{\mathbf{I}}_{ij}$ 必在界面 \mathbf{P}_k 上。

计算相应的有限判别矩阵:

(1) 写出块体的符号编号矩阵:

$$[\mathbf{D}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} I(a_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I(a_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I(a_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

(2) 建立块体的判别矩阵:

$$[\mathbf{T}]_{C_n^2 \times n} = [\mathbf{I}]_{C_n^2 \times n} \cdot [\mathbf{D}]_{n \times n} \quad (6)$$

(3) 用判别矩阵判别是否 $\mathbf{JP} \neq \Phi$ 。

由式(6)判别矩阵 $[\mathbf{T}]$ 相应 \mathbf{I}_{ij} 的某行元素的值与棱的关系。

当判别矩阵 $[\mathbf{T}]$ 相应 \mathbf{I}_{ij} 的某行元素全为“0”和“+1”时, \mathbf{I}_{ij} 为其真实棱; 当判别矩阵 $[\mathbf{T}]$ 相应 \mathbf{I}_{ij} 的某行元素全为“0”和“-1”时, $-\mathbf{I}_{ij}$ 为其真实棱; 其他情况下, \mathbf{I}_{ij} 不是该 BP 的真实棱。

只要出现一条棱是真实棱, 则 $\mathbf{JP} \neq \Phi$, 否则计算结束。结构面和临空面共同构成的方向参量矩阵:

$$\mathbf{I}_k^{ij} = \text{sign}[(\hat{\mathbf{n}}_i \times \hat{\mathbf{n}}_j) \cdot \hat{\mathbf{n}}_k] \quad (i \neq j) \quad (7)$$

计算块体可动判别矩阵并根据节 1 中的定理判定块体可动性, 考虑临空面重复以上判别矩阵的计算, 只要有一条棱是该块体锥 BP 的真实棱, 则说明 $\mathbf{BP} = \mathbf{EP} \cap \mathbf{JP} \neq \Phi$, 从而不为可动块体, 计算到此结束。若没有 BP 的真实棱, 即 $\mathbf{BP} = \Phi$, 则该块体为可动块体。

用矢量分析法分析确定关键接触面: 在可动块体各接触面上虚设切向净滑动力 \mathbf{F} , 通过不同块体结构组合分析其力的平衡方程:

$$\bar{\mathbf{r}} + \sum_l N_l \hat{\mathbf{v}}_l - \sum_l N_l \tan \varphi_l \hat{\mathbf{s}} - \mathbf{F} \hat{\mathbf{s}} = 0 \quad (8)$$

式中: N_l 为作用于滑动面 l 上的法向反作用力, 假定结构面不具有抗拉强度, 即 $N_l \geq 0$; $\hat{\mathbf{v}}_l$ 为结构面 l

的指向块体内部的单位法线矢量; φ_l 为结构面的内摩擦角; $\hat{\mathbf{s}}$ 为块体的运动趋势方向; $\bar{\mathbf{r}}$ 为块体的主动力合力。

通过对式(8)中各接触面上的 \mathbf{F} 进行分析比较, 其中“净滑动力” \mathbf{F} 最大者即为上行开采层间岩层面接触块体结构中的关键接触面。

4 上行开采层间岩层控制关键位置的具体判定

上行开采层间岩层结构中常见的块体结构有两种类型, 如图 1 所示。第一种为图 1(a)所示由 3 对互相平行的结构面 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$ (包括临空面 \mathbf{P}_1) 切割而成的块体; 第二种为图 1(b)所示的由 3 对互相平行的结构面 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_4$ (包括临空面 \mathbf{P}_1) 切割而成的块体。由这些结构面和临空面切割而成的三维块体分别如图 1(b), (d)所示。这 2 种块体锥结构面和临空面的产状分别列于表 1 中。

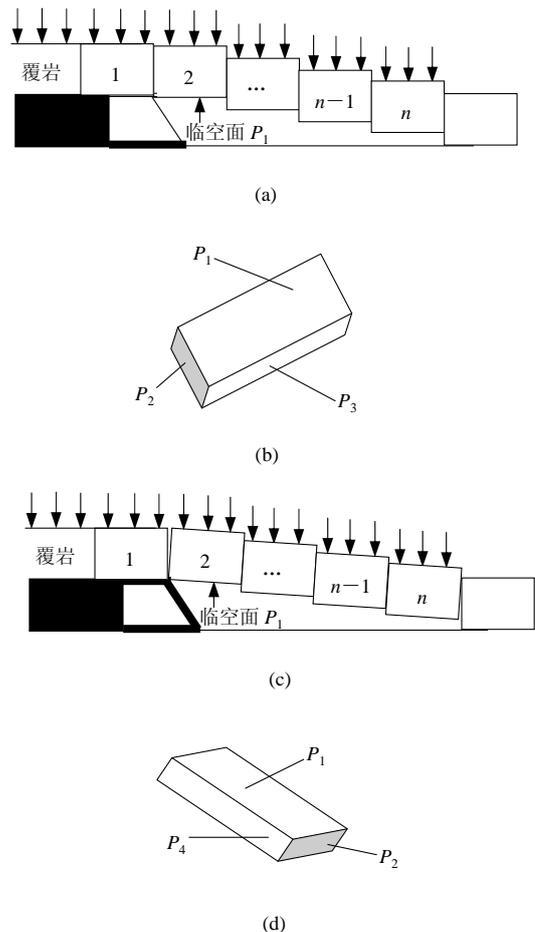


图 1 上行开采层间岩层面接触块体结构
Fig.1 Face-contacted blocks structures of strata between coal seams for upward mining

表1 块体锥结构面产状

Table1 Strike-dip of structural surfaces of block pyramid

块体锥类型	结构面	倾角 $\alpha(^{\circ})$	倾向 $\beta(^{\circ})$
第一种	P_1	0	0
	P_2	90	0
	P_3	90	90
第二种	P_1	0	0
	P_2	90	0
	P_4	$90-\beta$	90

4.1 上行开采层间岩层结构可动块体的判定

判定图 1(b)块体 3332 的可动性, 先计算各结构面的单位法线矢量:

$$\begin{Bmatrix} \hat{n}_1 \\ \hat{n}_2 \\ \hat{n}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 \sin \beta_1 & \sin \alpha_1 \cos \beta_1 & \cos \alpha_1 \\ \sin \alpha_2 \sin \beta_2 & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 & \cos \alpha_2 \\ \sin \alpha_3 \sin \beta_3 & \sin \alpha_3 \cos \beta_3 & \cos \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

计算结构面 i 和 j 的单位交线矢量, 即棱矢量:

$$\begin{Bmatrix} \hat{I}_{12} = (-1, 0, 0) \\ \hat{I}_{13} = (0, 1, 0) \\ \hat{I}_{23} = (0, 0, -1) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

计算除临空面外的各结构面的方向参量矩阵:

$$\mathbf{I} = \{0, 0\} \quad (11)$$

计算相应的有限判别矩阵, 块体的数字编号为 3332, 符号编号为 $D_s = [\pm 1, \pm 1]$, 相应的块体符号编号矩阵为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \pm 1 & 0 \\ 0 & \pm 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

相应的判别矩阵按 $[\mathbf{T}] = [\mathbf{I}][\mathbf{D}]$ 计算(见表 2), 可见棱 I_{23} 为其真实棱, 故 $JP \neq \Phi$ 。

表2 有限块体判别矩阵表

Table 2 Matrix table to identify limited block

ij	$k=2$	$k=3$
23	0	0

计算结构面和临空面共同构成的方向参量矩阵:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

计算块体 3332 的可动判别矩阵, 符号编号为 $D_s = [\pm 1, \pm 1, \pm 1]$, 相应的块体符号编号矩阵为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \pm 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \\ 0 & 0 & \pm 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

相应的判别矩阵按 $[\mathbf{T}] = [\mathbf{I}][\mathbf{D}]$ 计算(见表 3)。

表3 块体 3332 判别矩阵计算表

Table 3 Matrix table to identify mobility of block 3332

ij	$k=1$	$k=2$	$k=3$
12	0	0	± 1
13	0	± 1	0
23	± 1	0	0

$[\mathbf{T}]$ 中各行皆含“+”和“-”项, 所以 BP 为空集, 即 $EP \cap JP = \Phi$ 。根据可动性定理可知, $BP3332$ 为可动块体; 同理可以判定图 1(d)中块体具有可动性。

4.2 上行开采层间岩层控制关键位置的判定

从第 2 块开始逐步隔离第 2~ n 块、第 3~ n 块、第 4~ n 块, ..., 第 $n-1$ ~ n 块, 进行整体受力分析。在上述各块体的整体左接触面上虚设切向“净滑动力” F , 建立作用于第 2~ n 块、第 3~ n 块、第 4~ n 块, ..., 第 $(n-1)$ ~ n 块各整体上的力的平衡方程:

$$\vec{r} + \sum_l N_l \hat{v}_l - \sum_l N_l \tan \varphi_l \hat{s} - F \hat{s} = 0$$

即

$$F \hat{s} = \vec{r} + \sum_l N_l \hat{v}_l - \sum_l N_l \tan \varphi_l \hat{s} \quad (15)$$

把式(15)在接触面切向方向上投影。因为对于面接触块体结构, 结构面 1 指向块体内部的单位法线矢量与作用于接触面上的法向反作用力的点积仍是垂直于接触面的一矢量, 所以 $\sum_l N_l \hat{v}_l$ 在接触面切向上投影为 0; 作用于接触面 l 上的法向反作用力 N_l 实际上就是面接触块体结构中各接触面上的挤压力 T 值。 \hat{s} 的方向和接触面的切向方向一致,

块体的主动力合力 \bar{r} 的方向与接触面的切向方向夹角为 β , 所以式(9)在接触面切向方向上投影结果为

$$F = \bar{r} \cos \beta - T \tan \varphi_1 \quad (16)$$

对于第 2~ n 块, 第 3~ n 块, 第 4~ n 块, …, 第 $(n-1)$ ~ n 块各整体进行分析比较, 发现第 2~ n 块的 T 值最小; 第 2~ n 块的块体的主动力合力 \bar{r} 值最大; 结构面的内摩擦角 φ_1 、回转角 β 对于图 1(c) 面接触块体结构中各个块体都相等。所以第 2~ n 块的净滑动力 F 最大, 可见第 2~ n 块整体的左接触面就是图 1(c)面接触块体结构中的关键接触面。同理可以判定图 1(a)面接触块体结构中的关键接触面也是其第 2~ n 块整体的左接触面。

所以上行开采层间岩层控制的关键位置应该是层间岩层面接触块体结构的第 2~ n 块整体的左接触面(见图 1)。

5 结 论

(1) 上行开采煤层间岩层受成岩作用和不同时期不同性质构造运动影响而成层状结构。下部煤层采出后, 层间岩层会形成典型的“砌体梁”结构, 随着时间的推移, 岩层进一步变形移动, 再加上上行开采时该岩梁承受载荷的增加, “砌体梁”的铰接处由于应力集中加剧会发生岩块破断而过渡到另一新的力学平衡状态——面接触块体结构。

(2) 上行开采层间岩层面接触块体结构中的块体都是坚硬的工程裂隙岩体, 其块体强度高、刚度大, 块体间摩擦面近似平面, 结构面贯穿块体, 结构的失稳源于块体沿着接触面剪切滑移, 其特点与块体理论的基本假定吻合, 所以上行开采层间岩层结构的关键接触面分析可以借鉴块体理论的思想。

(3) 矢量分析法有严密的数学基础, 准确可靠, 简单易行, 上行开采层间岩层面接触块体结构中所涉及到的块体的产状容易确定, 用矢量分析法可以方便地确定上行开采层间岩层控制的关键位置。

(4) 针对目前上行开采的研究多集中于可行性分析、矿压观测等而很少关注岩层结构实质的现状^[9~15], 本文从岩层结构的角度提出上行开采的关

键在于岩层控制, 而岩层控制的突破点在于其关键位置的确定。通过对可动块体接触面虚设切向净滑动力 F 的矢量分析法进行力的平衡方程的分析比较, 确定了层间岩层结构中的关键接触面, 从而确定了上行开采层间岩层控制的关键位置, 为上行开采层间岩层面接触块体结构和上行开采岩层控制深入研究奠定了理论基础。

参考文献(References):

- [1] 汪理全, 李中颀. 煤层群上行开采技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.(WANG Liquan, LI Zhonghang. Technique of ascending mining in coal seams[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1995.(in Chinese))
- [2] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.(QIAN Minggao, SHI Pingwu. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.(in Chinese))
- [3] 钱鸣高. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.(QIAN Minggao. Theory of key stratum in ground control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.(in Chinese))
- [4] 冯国瑞. 残采区上行开采基础理论及应用研究[博士学位论文][D]. 太原: 太原理工大学, 2009.(FENG Guorui. Study on the theory and its application of the upward mining of the left-over coal[Ph. D. Thesis][D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009.(in Chinese))
- [5] 杨庆, 杨钢, 王忠昶, 等. 块体理论在荒沟抽水蓄能电站地下厂房系统硐室群围岩稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1 618 - 1 624.(YANG Qing, YANG Gang, WANG Zhongchang, et al. Application of block theory to surrounding rock stability of underground caverns in Huanggou pumped storage station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1 618 - 1 624.(in Chinese))
- [6] 刘锦华, 吕祖珩. 块体理论在工程岩体稳定分析中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.(LIU Jinhua, LU Zuheng. Application of block theory to engineering rock mass stability[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1988.(in Chinese))
- [7] 莫里斯·克莱因. 古今数学思想[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.(KLINE M. Ancient and modern mathematical thoughts[M].

- Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1979.(in Chinese))
- [8] 康立勋, 杨双锁, 钱鸣高. 大同综采工作面直接顶端面块体失稳与平衡分析[J]. 煤炭学报, 1999, 24(3): 247 - 251.(KANG Lixun, YANG Shuangshuo, QIAN Minggao. Study on the destabilization and equilibrium of the block at the end face of the fully-mechanized face in Datong[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(3): 247 - 251.(in Chinese))
- [9] 韩万林, 汪理全, 周劲锋. 平顶山四矿上行开采的观测与研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 267 - 270.(HAN Wanlin, WANG Liquan, ZHOU Jinfeng. Observation and investigation of ascending mining of seams in Pingdingshan mine No.4[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(3): 267 - 270.(in Chinese))
- [10] SINGH A K, SINGH R, SARKAR M, et al. Inclined slicing of a thick coal seam in ascending order: a case study[J]. CIM Bulletin, 2002, 95(3): 124 - 128.
- [11] 张东升, 马立强, 冯光明, 等. 综放巷内充填原位沿空留巷技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1 164 - 1 168.(ZHANG Dongsheng, MA Liqiang, FENG Guangming, et al. The technique of gob-side entry retaining with entry-in packing on its original position in fully-mechanized coalface with top-coal caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1 164 - 1 168.(in Chinese))
- [12] 沈五名. 近距离薄煤层上行低综开采实践[J]. 煤炭技术, 2005, 24(10): 50 - 52.(SHEN Wuming. Practice on uphill low support synthesis mechanization extraction of near distance thin coal bed[J]. Coal Technology, 2005, 24(10): 50 - 52.(in Chinese))
- [13] 马立强, 汪理全, 张东升, 等. 近距离煤层群上行开采可行性研究与工程应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(4): 1 - 5.(MA Liqiang, WANG Liquan, ZHANG Dongsheng, et al. Application and study on feasibility of near distance coal seam group ascending mining[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science), 2007, 22(4): 1 - 5.(in Chinese))
- [14] 李红涛. 放顶煤条件下上行开采机制及应用研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.(LI Hongtao. Study on mechanism and practice of ascending mining in condition of top-coal caving[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.(in Chinese))
- [15] 马立强, 汪理全, 乔京利, 等. 平四矿近距离煤层上行开采研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 357 - 360.(MA Liqiang, WANG Liquan, QIAO Jingli, et al. Study of ascending mining of short-range-seams in Pingdingshan coal mine No.4[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(3): 357 - 360.(in Chinese))