

露天-井工联合开采下关键层模型的应用^{*}

朱建明¹ 侯跃华² 吴剑平²

(1. 北方工业大学; 2. 北京航空航天大学)

摘 要 依据先露采后井工联合开采的特点,确定煤层顶板中某一坚硬的岩层为关键层,并将关键层看作弹性地基上的梁,利用组合梁原理计算关键层梁的上部荷载,通过对关键层梁应力和变形的计算,得到其关键岩梁断裂在下部煤层中的应力分布规律,提出以边坡下巷道稳定为判断准则,确定井工开采工作面合理的停采线位置。利用该方法成功地解决了平朔矿区边坡下大巷稳定的问题。

关键词 露井联采 关键层 边坡下巷道 停采线位置

Application of Key Strata Model to the Combination of Opencast-Underground Mining

Zhu Jianming¹ Hou Yuehua² Wu Jianping²

(1. North China University of Technology; 2. Beihang University, Beijing)

Abstract According to the characteristics of open pit mining firstly and the opencast-underground mining secondly, the most hard rock strata in coal seam is determined to be the key strata of mine, and the key stratum is considered as the beam of elastic foundation. The theories of combination girder are used to calculate the upper loads of key stratum. Based on the calculation of stress and deformation of key strata, the stress distribution rule in underlying coal seam in fracture of key strata is obtained, and the slope roadway stability is used as the criterion to set the reasonable position of terminal mining line at underground. By this method, the issues of large roadway stability under slope in Pingshuo mining area can be successfully resolved.

Keywords Opencast-underground mining, Key strata, Roadway under slope, Position of terminal mining line

岩层控制中的关键层理论是将采场矿压、岩层移动和地表沉陷 3 方面研究有机结合的纽带。因此,自从钱鸣高院士《岩层控制中的关键层理论研究》一文^[1]在对采场砌体梁结构的关键块分析的基础上,建立起关键层理论的初步框架以来,引起了学术界和工程界的广泛关注^[2]。

所谓关键层,是指采场上覆岩层中,存在着厚度大,强度高,对采场矿压显现及上覆岩层的变形和破坏起主要控制作用的坚硬岩层,关键层的断裂将导致全部或相当部分的上覆岩层产生整体运动^[3]。

建立岩层控制的关键层理论的目标就是在十分复杂的采动岩体结构中,确定在诸层活动中起主要控制作用的岩层——关键层,研究其活动特征,岩体结构运动的主要规律,为采动岩体控制提供依据。关键层理论的提出实现了矿山压力、岩层移动与地表沉陷、采动煤岩体中水与瓦斯流动研究的有机统一,为更全面、深入地解释采动岩体活动规律与采动损害现象,为煤矿开采技术研究提出了新的理论平台^[4]。

在浅埋煤层资源开发中,一般采用露天开采,随着井工开采技术的提高,我国山西、内蒙、辽宁等地的浅埋煤层资源开采开始采用露天和井工联合开采(简称露井联采)。露井联采一般根据煤层赋存倾角分为 2 类^[5]:倾斜煤层露井联采和缓倾斜煤层露井联采。本研究主要针对缓倾斜煤层开采条件下的露井联采。该类型露井开采存在 2 个问题^[6]:露天边坡稳定及井工开采停采线确定。上述 2 个技术问题均涉及到露井联采的边界参数确定,而露井联采之间的关键层稳定是边界参数确定的主要因素。因此,开展对露井联采关键层稳定的研究对露井联采边界参数确定具有十分重要的理论指导意义。

1 露井联采关键层模型

1.1 露井联采关键层模型的建立

图 1 是典型的露井联采矿井,岩层中存在对其

^{*} 国家自然科学基金项目(编号:50479001)。

朱建明(1963—),北方工业大学建筑工程学院,副教授,博士,100041 北京市石景山区晋元庄路 5 号。

上覆岩层起控制作用的关键层。关键层一端为采空区,另一端为露天矿边坡,当井工开采逐渐向露天边坡侧推进时,采空区岩层发生断裂,断裂后的关键层梁将形成悬臂梁结构,对未断裂的关键层部分产生作用力。

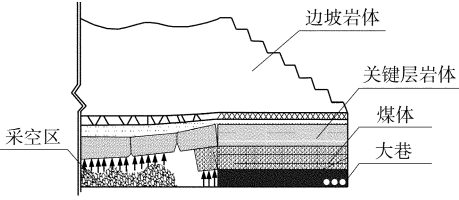


图1 露井联采关键层模型

这里将关键层看作地基上的梁,采用地基梁的分析方法对大巷上部的关键层进行研究,通过对该关键层梁的应力及变形计算,分析大巷煤柱的应力及其变形情况。

1.2 关键层位置的判别

由于露井联采矿井在岩层分布特征上相对单一井工矿并不具有特殊性,因此可以采用井工矿判别关键层位置的方法进行关键层位置的判别。对于单一井工矿关键层位置的判别已经有了比较成熟的方法,有些学者甚至编写了相关软件来判别井工矿关键层的位置^[7]。根据关键层的定义与变形特征,判别关键层位置的基本原则为满足关键层所要求的刚度条件和强度条件^[8]

$$q_{n+1} < q_n, \tag{1}$$
$$l_i < l_{i+1}, (i = 1, 2, \dots, k) \tag{2}$$

式中,

$$q_{n+1} = \frac{E_1 h_1^3 \sum_{i=1}^{n+1} h_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^{n+1} E_i h_i^3},$$

q_{n+1}, q_n 分别为计算到第 $n+1$ 层与第 n 层时,第1层关键层所受荷载; l_i 为第 i 层的破断距; h_i, γ_i, E_i 分别为第 i 层的厚度、密度和弹性模量。

式(1)其实为关键层的刚度(变形)判别条件,即上一层岩层的挠度小于下一层岩层的挠度。式(2)为关键层的强度判别条件,即下一层的破断距应小于上一层的破断距。

1.3 露井联采下关键层的弹性地基梁模型

文克尔(Winkler)地基上梁的计算方法考虑了地基和基础的相互作用,以静力平衡条件和变形协调条件为基础,适用于不同基础与地基刚度比,荷载分布及地基条件,在工程实践中应用较为广泛。文克尔弹

性地基梁模型建立在文克尔地基假定的基础之上,特征是把岩土体视为一系列侧面无摩擦的土柱和彼此独立的弹簧与梁连接,在荷载作用区域土体的沉降与该点的压力成正比。根据力的平衡条件及其连续的变形协调条件,求出梁的内力及其变形^[9]。

采用文克尔地基假定,取关键层作为直梁,其底部煤岩层共同作为文克尔地基;梁右端为露天矿边坡,此处可以作为自由端考虑,梁左端为工作面,已破断的关键层岩块在采空区形成砌体梁结构,并对其产生弯矩和剪力,由于大巷上部对应为阶梯状边坡,则其荷载近似为三角形分布,分析模型如图2所示。

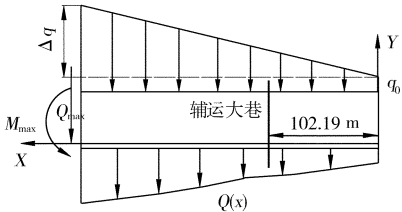


图2 弹性地基梁模型

1.4 模型中关键层受力分析

取从露天边坡端到井工采场工作面端的关键层部分进行分析,关键层梁底部受地基反力作用,上部受露天矿边坡岩层的作用,其受力可根据组合梁原理进行计算,即

$$q_{\max} = \frac{E_1 h_1^3 (r_1 h_1 + r_2 h_2 + \dots + r_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3},$$

式中, q_{\max} 为关键层所受上部岩层的作用力; E_i 为上覆岩层的弹性模量; h_i 为上覆岩层厚度; r_i 为上覆岩层的体积力。

由于计算大巷煤柱的稳定性时主要考虑煤柱最大应力,故这里对梁左端受到的弯矩和剪力采用最大弯矩与最大剪力计算。最大弯矩和最大剪力发生在梁即将破断时,此时剪力可根据组合梁原理考虑破断前关键层梁上部岩层受力来计算。

其周期破断距按悬臂梁计算为

$$L_1 = h \sqrt{\frac{2R_T}{q}},$$

式中, R_T 为梁的最大抗拉强度; q 为关键层上部荷载。

相应的最大剪应力及弯矩为

$$Q_{\max} = qL_1,$$
$$M_{\max} = \frac{qL_1^2}{2}.$$

右端为露天采场边坡的台阶,故右端边界受力

为 0。

将梁的边界条件代入,可以得出对于线性荷载如图 2 的弹性地基梁模型,地基变形、反力及其梁截面弯矩、最大主应力分布如下:

$$y = \left(\frac{q_0}{k} + \frac{2\alpha Q_{\max} \varphi_{4l} - 4\alpha^2 M_{\max} \varphi_{3l}}{(\varphi_{2l} \varphi_{4l} - 2\varphi_{3l}^2)k} \right) \varphi_1 + \left(\frac{\Delta q}{kl} - \frac{4Q_{\max} \alpha^2 \varphi_{3l} - 4M_{\max} \alpha^3 \varphi_{2l}}{(\varphi_{2l} \varphi_{4l} - 2\varphi_{3l}^2)k} \right) 2\alpha + \frac{\Delta q}{kl} \left(x - \frac{\varphi_2}{2\alpha} \right) + \frac{q_0}{k} (1 - \varphi_1), \quad (3)$$

$$P = \left(q_0 + \frac{2\alpha Q_{\max} \varphi_{4l} - 4\alpha^2 M_{\max} \varphi_{3l}}{\varphi_{2l} \varphi_{4l} - 2\varphi_{3l}^2} \right) \varphi_1 + \left(\frac{\Delta q}{l} - \frac{4Q_{\max} \alpha^2 \varphi_{3l} - 4M_{\max} \alpha^3 \varphi_{2l}}{\varphi_{2l} \varphi_{4l} - 2\varphi_{3l}^2} \right) 2\alpha + \frac{\Delta q}{k} \left(x - \frac{\varphi_2}{2\alpha} \right) + q_0 (1 - \varphi_1), \quad (4)$$

$$M = \left[q_0 + \frac{2\alpha Q_{\max} \varphi_{4l} - 4\alpha^2 M_{\max} \varphi_{3l}}{\varphi_{2l} \varphi_{4l} - 2\varphi_{3l}^2} \right] \frac{\varphi_3}{2\alpha^2} + \left(\frac{\Delta q}{l} - \frac{4Q_{\max} \alpha^2 \varphi_{3l} - 4M_{\max} \alpha^3 \varphi_{2l}}{(\varphi_{2l} \varphi_{4l} - 2\varphi_{3l}^2)} \right) 4\alpha^3 - \frac{\Delta q}{4\alpha^3 l} \varphi_4 - \frac{q_0}{2\alpha^2} \varphi_3, \quad (5)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{800} + \left[q_0 + \frac{2\alpha Q_{\max} \varphi_{4l} - 4\alpha^2 M_{\max} \varphi_{3l}}{(\varphi_{2l} \varphi_{4l} - 2\varphi_{3l}^2)} \right] \frac{\varphi_3}{2\alpha^2} + \left(\frac{\Delta q}{l} - \frac{4Q_{\max} \alpha^2 \varphi_{3l} - 4M_{\max} \alpha^3 \varphi_{2l}}{(\varphi_{2l} \varphi_{4l} - 2\varphi_{3l}^2)} \right) 4\alpha^3 - \frac{\Delta q}{4\alpha^3 l} \varphi_4 - \frac{q_0}{2\alpha^2} \varphi_3, \quad (6)$$

式中, y, p, M, σ_{\max} 分别表示弹性地基梁的变形、地基反力、截面弯矩及最大主应力; k 为地基基床系数; α 为弹性特征长度, $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$; q_0 为图 2 模型中梁最右端初始受力; $\Delta q = \frac{\Delta q_{\max}}{l_0} l$, Δq_{\max} 为梁左端最大受力; M_{\max} 和 Q_{\max} 分别为断裂后和破断时已经断裂的岩块对梁作用的弯矩和最大剪应力; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 为克雷洛夫函数,

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \operatorname{ch} \alpha x \cdot \cos \alpha x, \\ \varphi_2 &= \operatorname{ch} \alpha x \cdot \sin \alpha x, + \operatorname{sh} \alpha x \cdot \cos \alpha x, \\ \varphi_3 &= \operatorname{sh} \alpha x \cdot \sin \alpha x, \\ \varphi_4 &= \operatorname{ch} \alpha x \cdot \sin \alpha x - \operatorname{sh} \alpha x \cdot \cos \alpha x. \end{aligned}$$

将上述各项参数代入式(3)至式(6),通过计算,可以求出不同推进距离下的关键层的下沉量、地

基反力、弯矩及其应力。

2 工程应用与分析

2.1 工程背景

平朔矿区是我国典型的露井联合采矿区,安家岭露天矿开采后,安家岭 2 号井工矿在其北帮边坡下 4 号煤层布置了辅运、主运、回风 3 条大巷,根据西安煤矿设计院提供的设计,4 号煤层开采工作面停采线距最近的辅运大巷的最短距离为 60 m,矿方实际开采 B400 工作面停采线为 57 m, B401 工作面停采线为 59 m,开采结果导致上述 3 条大巷出现了严重的变形、顶板离层、煤层水平错动、局部塌方以及交叉点较大范围的冒顶^[10]。为此合理确定工作面停采线位置对矿井大巷稳定显得十分重要,本研究通过利用上述露井联合采下的关键层分析方法,对 4 号煤层巷道的稳定性进行了研究,从而确定合理的停采线位置。

如图 3 所示,安家岭 2 号井工矿 4 号煤层上部岩层参数如表 1。由表可知,4 号煤层关键层位置比较明显,该关键层右端为安家岭露天矿北帮,左边界为工作面前端,其关键层右边界(即安家岭露天矿北帮)到辅运大巷的水平距离为 102.19 m,根据表 1,并结合公式(1)、(2)可确定 4 号煤层关键层位置为厚度 39.7 m 的砂岩。

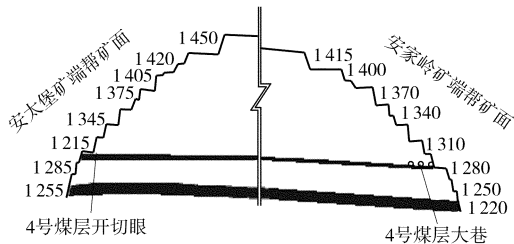


图 3 露天-井工联合开采关系

表 1 4 号煤层上覆岩层参数

岩 性	分层厚度 /m	密度 d / (kg/m^3)	弹 模 E/MPa	泊松比 μ
黄 土	42	1 960	15	0.42
风化砂岩	14	2 300	2 000	0.36
砂 岩	39.7	2 380	4 200	0.32
粗砂岩	13.8	2 350	4 000	0.34
中粗砂岩	13	2 400	4 100	0.33
细砂岩	0.9	2 400	4 500	0.33
粘土矿	3	2 355	2 015	0.23

根据现场实际情况,求得 4 号煤层关键层相关参数如下:

$$q_{\max} = 1\,975.2 \text{ (kN/m}^2\text{)};$$

荷载按三角形分布,

$q = 7.365 \text{ l (kN)};$

其周期破断距按悬臂梁计算为

$$L_1 = h \sqrt{\frac{2R_T}{q}} = 40 \sqrt{\frac{6 \times 10^5}{7.365 \text{ l}}};$$

相应的最大剪应力及弯矩为

$$Q_{\max} = qL_1,$$

$$M_{\max} = -\frac{qL_1^2}{2};$$

基床系数 $k = 100 \text{ MN/m}$;弹性特征长度 $\alpha = 0.032 \text{ 5}$;

均布荷载 $q_0 = 209.4 \text{ kN/m}$;

左端最大荷载 $\Delta q_{\max} = 1\,887.8 \text{ kN/m}$;

初始梁长 $l_0 = 268.2 \text{ m}$;

荷载按三角形分布,可得 $\Delta q = 7.039 \text{ l kN}$.

将上述参数,代入到式(3)至式(6),求得两煤层不同推进距离下的关键层的下沉量、应力、弯矩及其地基反力。

2.2 计算结果分析

2.2.1 梁内最大主应力分析

图 4 为工作面推进到不同关键层长度时关键层梁截面的应力分布,拉应力超过抗拉强度的梁段将进入塑性区,关键层梁的稳定性受到削弱。当工作面推进到距辅运大巷 78 m 左右时,距离辅运大巷上部右侧 6 m 左右处的关键层梁将可能会断裂,断裂后的关键层岩块回转下沉,使辅运大巷左侧煤柱作为地基承受较大的支承压力,同时造成对下部岩层和煤柱的侧向挤压,使煤柱产生水平方向的变形。工作面继续推进,则关键层梁的断裂范围将达到大巷的右端,此时大巷将彻底破坏。为保证关键层梁的断裂回转不对大巷造成破坏性影响,应使梁的断裂范围控制在辅运大巷的左侧。因此,4 号煤层工作面的停采线与辅运大巷的距离应大于 78 m 才能保证辅运大巷的稳定。

2.2.2 梁底支承压力分析

根据巷道围岩应力分布的一般规律,一般巷道周围 20 m 左右的点是应力达到峰值的点,为此选取距辅运大巷左侧 20 m 的点为例,分析梁底支承压力随工作面推进距离的变化情况。

图 5 和图 6 分别为工作面推进过程中距辅运大巷 20 m 处点的垂直应力以及应力集中系数的变化情况。可以看出,当 4 号煤层工作面推进到距辅运大巷 78 m 后,左侧 20 m 处点的支承压力有了明显的增加,支承压力的增加速率也不断增大。同时,随着工作面的推进,支承压力与原岩应力的比值(应

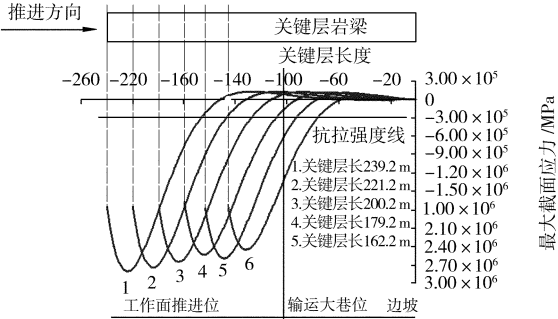


图 4 推进过程中梁截面应力分布

力集中系数)逐渐增大。由于辅运大巷左侧煤柱的垂直应力是关键层梁的支承压力与煤柱上部岩层自重的叠加。因此,相应煤柱的应力也会呈现相同的趋势。

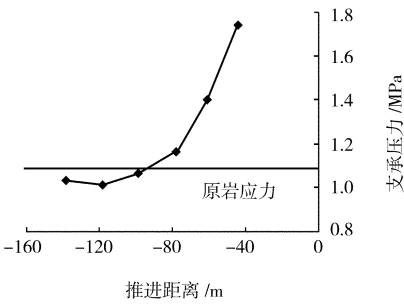


图 5 推进过程中距辅运大巷 20 m 处点的垂直应力变化

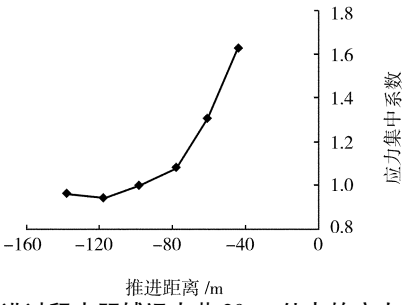


图 6 推进过程中距辅运大巷 20 m 处点的应力集中系数

2.2.3 梁垂直变形分析

图 7 为工作面不同推进距离下关键层梁各点的下沉量曲线。

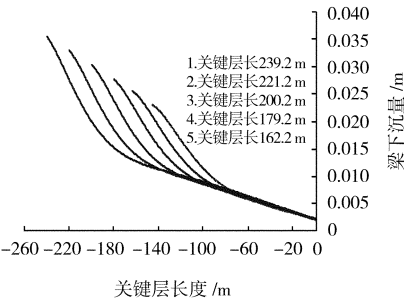


图 7 推进过程中梁的下沉量

(下转第 53 页)

左右时,精矿 Fe 技术指标最佳。此时铁精矿产率 45% 左右,TFe 品位 57.50% ~ 58.00%,TiO₂ 含量 9.10% 左右,TFe 回收率 86% 左右,TiO₂ 回收率 87% 左右。

3.3 磁场强度试验

在磨矿细度 -0.074 mm 占 80% 左右的条件下,改变磁场强度进行磁选试验。其中 1 次精选磁场强度为粗选磁场强度的 0.9 倍。试验结果见图 4。

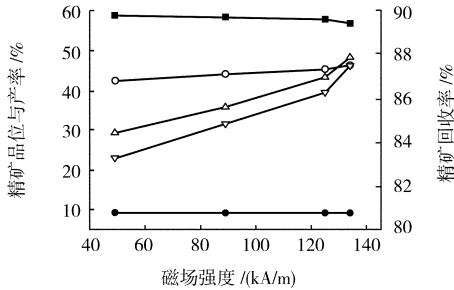


图 4 弱磁选磁场强度对精矿指标的影响

■—精矿 Fe 品位;●—精矿 TiO₂ 品位;○—精矿产率;
▽—精矿 Fe 回收率;△—精矿 TiO₂ 回收率

从图 4 可见,在磨矿细度 -0.074 mm 占 80%, 1 次粗选、1 次精选磁场强度分别为 125.0 kA/m, 111.5 kA/m 左右时,最佳指标为精矿 TFe 品位 58.04%,回收率 86.27%,TiO₂ 含量 9.20%,TiO₂ 回收率 87.00%。

(上接第 33 页)

从图 7 可见,随着工作面的推进,梁上同一点处的下沉量逐渐增加,由于梁与地基保持变形协调,因此地基变形的趋势与梁一致。可以看出,煤柱的沉降量也随着工作面的推进而不断增加,增速也明显变大。安家岭 2 号井工矿根据本研究理论计算的数值确定了合理的停采线位置,大巷没有继续发生大的变形破坏,保证了 2 号井工矿的安全生产。

3 结 论

(1)本研究根据露井联采的特点,建立了特殊开采条件下露井联采关键层模型,进一步拓展了关键层理论的使用范围。

(2)所建立的关键岩层分析模型,成功地解决实际工作面停采线问题,表明该模型符合实际工程条件,具有重要的指导意义。

(2)采用文克尔地基梁方法所建立的露井联采关键层模型较好地分析了边坡下井工矿大巷的受力和破坏,提出了井工矿合理的停采线位置,满足了露天边坡与井工开采大巷两者的稳定,解决了露井和谐开采的关键技术问题。

4 结 论

(1)印度尼西亚某含铁海滨砂矿 TFe 品位为 30.52%,TiO₂ 品位为 4.78%,矿样中磁铁矿自然单体解离度高,半自型-他型颗粒,有 15% 的磁铁矿有不同程度的赤铁矿化,褐铁矿占铁矿物的 1%,脉石矿物结晶度好。

(2)此海滨铁砂矿属于易选矿石,在磨矿细度 -0.074mm 占 80.0%,1 次粗选、1 次精选磁场强度分别为 125.0 kA/m,111.5 kA/m 时,可以获得产率 45.00%,TFe 品位 58.04%,回收率 86.27% 的铁精矿,铁精矿中 TiO₂ 含量 9.20%,TiO₂ 回收率 87.00%。

(3)本项目的研究结果为此类海滨铁砂矿资源的开发提供了可靠的依据。

参 考 文 献

[1] 龙运波,张裕书,周满赓. 印尼某海滨砂矿利用探索试验研究 [R]. 成都:矿产综合利用研究所,2008.
[2] 向延松,于景龙,高玉德,等. 海滨砂矿精选新工艺的研究 [J]. 广东有色金属学报,1996(2):81-87.
[3] 陈平,吕宪俊,邱俊,等. 印度尼西亚某海滨铁砂矿选矿试验研究 [J]. 金属矿山,2009(8):39-41.

(收稿日期 2010-06-28)

参 考 文 献

[1] 钱鸣高,缪协兴,许家林. 岩层控制中的关键层理论研究 [J]. 煤炭学报,1996,21(3):225-230.
[2] 缪协兴,钱鸣高. 采动岩体的关键层理论研究新进展 [J]. 中国矿业大学学报,2000,29(1):25-29.
[3] 许家林. 岩层移动与控制的关键层理论及其应用 [D]. 徐州:中国矿业大学,1999.
[4] 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.
[5] 王振伟,王来贵,王建国. 井采影响下排土场边坡下采动沉陷规律研究 [J]. 矿业研究与开采,2009(4):13-15.
[6] 朱建明,刘宝宽. 露井联采技术 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2009.
[7] 许家林,钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法 [J]. 中国矿业大学学报,2000,29(5):463-467.
[8] 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.
[9] 龙驭球. 弹性地基梁的计算 [M]. 北京:高等教育出版社,1983.
[10] 刘宝宽,吴吉南. 安家岭二号井 B402 工作面终采线位置合理确定 [J]. 煤炭科学技术,2008(12):12-15.

(收稿日期 2010-07-22)