

文章编号:0253-9993(2013)02-0194-05

# 沙土质型冲沟发育区浅埋煤层长壁开采支护阻力的确定

王旭锋<sup>1,2,3</sup>,张东升<sup>1,2,4</sup>,张 炜<sup>5</sup>,许猛堂<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116;3. 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;4. 新疆大学 地质与矿业工程学院,新疆 乌鲁木齐 830046;5. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心,江苏 徐州 221008)

**摘 要:**基于沙土质型冲沟坡体下浅埋煤层长壁开采顶板结构承受非均匀载荷的基本特征,采用理论分析与现场实测的方法,以工作面背沟推进为主要方式,将冲沟坡体及其形态纳入顶板结构控制当中,结合冲沟坡体下开采基本顶初次破断与周期破断时的顶板结构力学模型,按给定失稳载荷状态,分析了工作面来压期间的“支架-围岩”作用关系模型,得到了控制顶板结构滑落失稳的支护阻力。结合具体工作面地质条件,分析了支架工作阻力随工作面推进的变化特征,给出了支架支护阻力算例,针对该工作面支架支护阻力进行的现场实测结果验证了该方法的可靠性。

**关键词:**浅埋煤层;冲沟坡体;长壁开采;支护阻力;顶板结构

**中图分类号:**TD823.2;TD353 **文献标志码:**A

## Support resistance determination for shallow coal seam longwall mining in sand-soil gullies overlaying mining area

WANG Xu-feng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Dong-sheng<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Wei<sup>5</sup>, XU Meng-tang<sup>1</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, Xuzhou 221116, China; 4. College of Geology and Exploration Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830046, China; 5. IoT/Perception Mine Research Center, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Based on the main roof bearing asymmetrical loads when longwall mining under a sand-soil gully slope in shallow coal seam, theory analysis and field observation methods were used, the gully slope and its shape were considered, a roof structure mechanical model was established when the longwall working face backward-gully mining in first and periodic weighting, and a “support and surrounding rock” relation model was analyzed under given instability loads. Furthermore, the support resistance which could control the roof structure sliding instability was obtained. The support resistance changing features were analyzed along the working face advancement combined with practical geological conditions, and the rational support resistance calculation example was provided. The field observation result demonstrated the reliability of the method.

**Key words:** shallow coal seam; gully slope; longwall mining; support resistance; roof structure

我国西北矿区煤炭资源开发规模和强度的进一步增加使得在地表冲沟发育区进行浅埋煤层开采的工程实践将愈为普遍,由于该区煤层赋存条件的特殊性引起矿压显现的变化而给矿井安全高效生产带来

的不利影响将不容忽视。我国学者以典型浅埋煤层为对象,研究采动覆岩的活动规律及其控制机理并指导工程实践,如对典型浅埋煤层顶板破断特征、支护阻力确定、工作面矿压显现规律等进行了深入研

收稿日期:2012-03-30 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51004101);中国矿业大学青年科研基金资助项目(2009A001);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:王旭锋(1980—),男,河南郑县人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail:wangxufeng@cumt.edu.cn

究<sup>[1-8]</sup>,取得了丰硕的成果,为本文的研究提供了有益借鉴。受地表冲沟活动影响,该区井下工作面经常出现因支架阻力不能适应覆岩活动而影响矿井正常生产的现象。目前,已有的浅埋煤层支架阻力计算方法中多数还未考虑冲沟坡体的影响。已有研究表明,冲沟坡体下开采工作面推进方向不同引起冲沟坡体的活动方式不同,且背沟推进时工作面矿压显现比向沟推进时更为强烈<sup>[9]</sup>。

因此,笔者以东胜煤田冲沟发育区浅埋煤层地质条件为基础,以工作面背沟推进为主要方式,将冲沟坡体形态等因素引入到顶板控制当中,分析沙土质型冲沟坡体下浅埋煤层长壁开采覆岩的活动特征及顶板结构载荷形式的变异特性,结合相应的顶板结构力学模型,研究工作面液压支架合理支护阻力的确定方法。

## 1 煤层赋存特征

东胜煤田大部分被第四系覆盖,受水流风蚀等影响,区内沟谷纵横交错,相对高差大,属典型的高原侵蚀丘陵地貌,冲沟坡体形态多样,产状变化大。根据初步研究,按照物质组成,可将冲沟坡体分为沙土质型和基岩型两类,鉴于基岩型冲沟坡体下开采已有一定研究<sup>[10-11]</sup>,笔者主要针对沙土质型冲沟坡体下开采顶板控制展开研究。

沙土质型冲沟坡体上部为第四系风积沙,呈松散状态,强度较低,易于流动;下部为沙质黄土层。该类坡体多分布于沟谷两侧,由于受风蚀、水蚀作用的影响,强度降低,一般坡高30~60 m,最高达100 m左右。自然坡度20°~70°不等,在重力作用下易形成剥落、滑塌。

伊泰矿区属东胜煤田,区内冲沟发育,地表起伏变化大,其形态如图1所示。煤层赋存主要特征有:①煤层厚度2~6 m,平均约4 m,倾角1°~3°,赋存条件简单;②基岩厚度较小,一般在50~60 m以下;③基岩中一般只赋存一层对覆岩运动起控制作用的厚硬岩层,且位于断裂带下部或垮落带内;④冲沟切割深度较大;⑤埋深一般在100 m以内。该区目前采用的开采方法主要为长壁综合机械化开采<sup>[12]</sup>。

## 2 顶板结构力学模型的建立

### 2.1 采动覆岩活动特征

(1)顶板破断特征。结合东胜煤田伊泰矿区某矿典型沙土质型冲沟坡体下开采的具体地质条件,建立相似材料模型,得到基本顶初次破断情况如图2所示,由图可知,沙土质型冲沟坡体下浅埋煤层开采时,受冲



图1 沙土质型冲沟坡体形态

Fig. 1 Shape of sand-soil-gully slopes

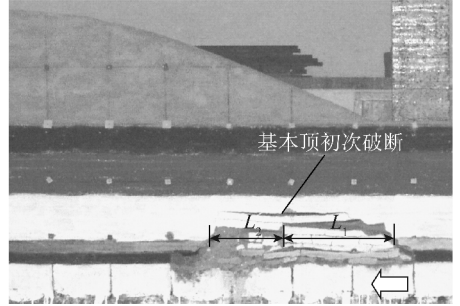


图2 基本顶初次破断特征

Fig. 2 Broken features of main roof first breaking

沟切割影响,覆岩厚度变化较大,基本顶初次破断时呈现不对称的特点(推进侧短,开切侧长,即 $L_1 > L_2$ )<sup>[9,13]</sup>。

(2)地表变形特征。由于煤层埋藏较浅,采动裂缝能够发育至地表,图3为现场实拍沿工作面走向地表裂缝的发育形态,实测采动裂缝宽度普遍小于0.1 m,采动裂缝沿走向间距一般为1~2 m。因此,可将沙土质型冲沟坡体作为载荷层考虑。



图3 地表采动裂缝发育特征

Fig. 3 Mining induced fractures features in surface

### 2.2 顶板结构力学模型

由以上分析可知,浅埋煤层沙土质型冲沟坡体下开采时,可认为顶板结构承受非均匀载荷,这是区别于常规浅埋煤层顶板结构载荷形式最为主要的特征。参照已有研究成果<sup>[1,9-15]</sup>,以工作面背沟推进为开采方式,结合冲沟坡体形态(主要考虑坡角),将基本顶以上岩层简化为与采动坡体形状相似的载荷,分别得到冲沟坡体下开采基本顶初次破断(基本顶岩块触矸前、触矸后)、周期破断时顶板结构力学模型,如图4所示。

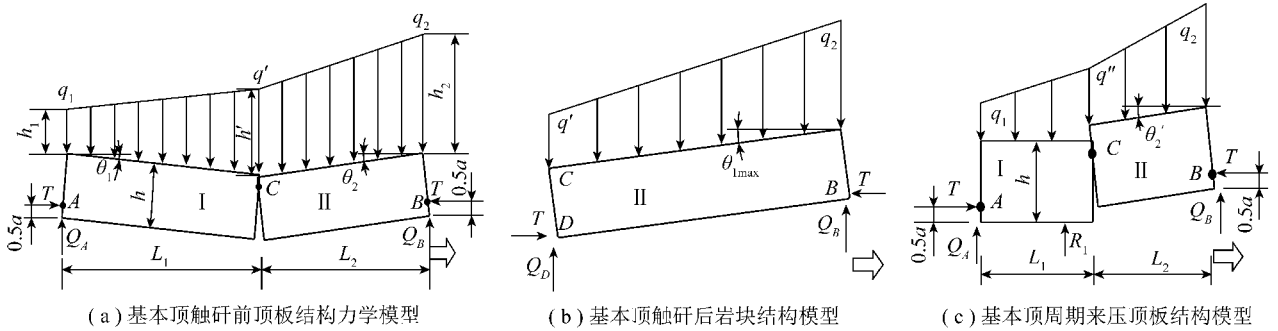


图4 冲沟坡体下开采基本顶初次、周期破断顶板结构力学模型

Fig. 4 Structure mechanical models of main roof first &amp; periodic breaking mining under sand-soil-gully slope

$q_1, q', q'', q_2$ —一块体承受的载荷集度;  $Q_A, Q_B$ — $A, B$ 接触铰上铅直剪力;  $Q_B, Q_D$ — $B, D$ 接触铰上铅直剪力;  $\theta_1, \theta_2$ —I, II块体的转角;  $\theta_{1max}$ —触研后II块体的最大转角;  $\theta'_2$ —一周来压时II块体的转角;  $a$ —接触面高度;  $T$ —铰接点处的水平力;  $L_1, L_2$ —I, II岩块长度;  $h$ —基本顶岩块厚度;  $h_1, h_2, h'$ —对应于  $q_1, q_2, q'$ 的覆岩厚度;  $R_1$ —I块体的支撑反力

基本顶初次破断时,基本顶岩块存在触研前和触研后两种状态。基本顶岩块触研前的顶板结构可视为非对称的三铰拱结构,该结构为动态平衡结构,其模型如图4(a)所示;基本顶岩块触研后,推进侧(工作面侧)岩块逆向回转是基本顶触研后的最危险状态,其形态如图4(b)所示,此时,岩块触研点水平力  $T$  由岩块与研石的摩擦阻力提供。基本顶周期破断时,假设基本顶岩块形成“梁”式铰接状态,得到的模型如图4(c)所示。

### 3 支架支护阻力的确定

冲沟坡体下浅埋煤层开采长壁工作面初次来压和周期来压顶板结构稳定性分析结果表明,工作面来压时基本顶岩块主要的失稳方式是滑落失稳,工作面支架须提供合理的支护力才能防止基本顶结构的滑落失稳,此时,支架与顶板结构共同维持顶板的稳定,支架处于“给定失稳载荷”状态<sup>[1,9,16]</sup>。根据文献[1, 15-16]中的结构模型,得到沙土质冲沟坡体下浅埋煤层开采工作面来压期间的“支架-围岩”作用关系模型如图5所示。

分析表明,工作面初次来压时控制顶板结构不发生滑落失稳的支护力应按基本顶岩块结构触研前状态考虑,结合覆岩的载荷传递作用,得到初次来压期间控制顶板所需的支护阻力  $P_{m0}$  为

$$P_{m0} \geq l_k b \sum h \gamma_2 + b \gamma \left[ \frac{1+K}{2} - \frac{K}{2(i - \sin \theta_2)} \right] h L_2 + b K_{C0} \gamma_1 \left[ \frac{(1+K)h'}{2} + \frac{(1+K)(2-K)}{6} L_2 \tan \alpha - \frac{3Kh' + K(1-K)L_2 \tan \alpha}{6(i - \sin \theta_2)} \right] L_2 \quad (1)$$

其中,  $l_k$  为控顶距;  $b$  为支架宽度;  $\gamma, \gamma_1, \gamma_2$  为基本顶、载荷层、直接顶容重;  $K$  为  $L_1$  与  $L_2$  的比值;  $i$  为岩块

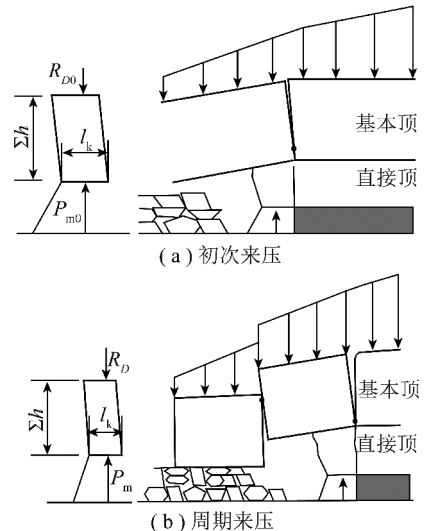


图5 工作面来压期间“支架-围岩”关系模型

Fig. 5 "Support and surrounding rock" relation models of the working face first &amp; periodic weighting

$\Sigma h$ —直接顶厚度;  $R_{D0}, R_D$ —初次来压、周期来压时基本顶结构滑落失稳所传递的压力;  $P_{m0}, P_m$ —控制顶板初次来压、周期来压时的支护力;  $K_{C0}$  为按太沙基土压力计算原理近似估算的载荷传递系数,  $K_{C0} = K_n K_0$ ,  $K_n$  为载荷传递岩性因子,  $K_0$  为载荷传递的时间因子。若载荷层内摩擦角为  $\varphi$ , 载荷层侧应力系数为  $\lambda$ , 载荷层高度为  $h_1$ , 关键块长度为  $L_2$ , 则可近似认为  $K_{C0} = L_2 K_0 / [(2h_1 + L_2 \tan \alpha) \lambda \tan \varphi]$ 。

工作面周期来压时,按控制顶板结构滑落失稳考虑,得到所需的支护阻力  $P_m$  为

$$P_m \geq l_k b \sum h \gamma_2 + \frac{i - 2 \sin \theta'_{2max} + \sin \theta_2 - k}{i - 2 \sin \theta'_{2max} + \sin \theta_2} b P_{02} \quad (2)$$

式中,  $\theta'_{2max}$  为岩块II最大回转角;  $P_{02}$  为作用于关键块的载荷,  $P_{02} = h L_2 \gamma + K_C (h'_1 + 1/2 L_2 \tan \alpha) L_2 \gamma_1$ ,  $k =$

$$(2q'+q_2)/[3(q'+q_2)]。$$

上述支护阻力主要指支架提供给顶板的有效支护阻力,若要确定支架工作阻力还必须考虑支架的支护效率 $\mu$ 。因此,工作面支架的工作阻力为

$$P_C = P_m/\mu \quad (3)$$

综合分析初次来压和周期来压时的支护力,取其最大值作为顶板支护阻力确定的依据。

### 4 应用实例

#### 4.1 工作面地质条件

伊泰集团某煤矿 1405 工作面走向长 630.8 m,倾斜长 143.2 m,煤层倾角  $1^\circ \sim 3^\circ$ 。综合井上下对照图和实测结果,地表冲沟坡体角度在  $10^\circ \sim 30^\circ$ ,平均  $25^\circ$ 。工作面地表起伏形态及岩性描述见图 6、表 1。

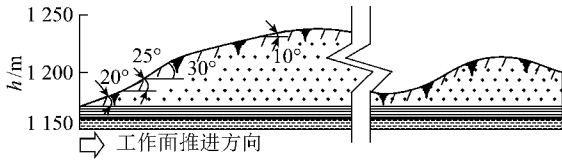


图 6 1405 工作面地表起伏形态

Fig. 6 Surface undulate shape of working face 1405

#### 4.2 支架支护阻力的计算

根据现场实际条件,基本顶厚度  $h = 12.5 \text{ m}$ ,基

表 1 工作面综合地质柱状

Table 1 Synthesis geological histogram of working face

序号	岩性	层厚/m	序号	岩性	层厚/m
1	沙土质松散层	19.00 ~ 80.00	7	细砂岩	12.50
2	灰白色细砂岩	6.31	8	粉砂岩	4.20
3	灰黑色泥岩	3.64	9	泥岩	7.10
4	浅灰白色粉砂岩	3.05	10	煤层	3.00
5	灰白色粗砂岩	3.21	11	泥岩或页岩	11.20
6	灰色粉砂质泥岩	8.40	12	灰白色细砂岩	14.20

岩容重  $\gamma = 0.024 \text{ MN/m}^3$ , 载荷层厚度  $h_1 = 43.7 \text{ m}$ , 载荷层平均容重  $\gamma_1 = 0.02 \text{ MN/m}^3$ , 直接顶平均容重  $\gamma_2 = 0.0185 \text{ MN/m}^3$ , 平均倾角  $\alpha' = 25^\circ$ , 采高  $m = 3 \text{ m}$ , 支架宽度  $b = 1.5 \text{ m}$ , 控顶距  $l_k = 4 \text{ m}$ , 直接顶(泥岩、粉砂岩)厚度  $\Sigma h = 11.3 \text{ m}$ 。取两柱掩护式支架效率  $\mu = 0.95$ , 基本顶抗拉强度  $R_t = 4 \text{ MPa}$ 。按式(1)~(3)计算工作面支架支护阻力的结果见表 2、3。

结合冲沟坡体下开采工作面周期来压步距与载荷传递系数的变化关系,随工作面逐渐远离沟底至进入非冲沟区域,支架阻力逐渐减小并趋于稳定<sup>[9]</sup>,对比初次来压与周期来压支架阻力的计算结果,确定该地质条件下支架所需的最大工作面阻力为 6 563 kN/架。该工作面选用的支架类型为两柱支掩护式,额定工

表 2 初次来压液压支架支护阻力计算

Table 2 Powered support resistance calculation in working face first weighting

初次来压步距 $L_{Tr}/\text{m}$	$K$	推进侧岩块长度/m	岩块块度 $i$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	侧应力系数 $\lambda$	初始回转角/(\circ)	载荷传递时回因子 $K_{i0}$	载荷传递系数 $K_{C0}$	$P_{m0}/(\text{kN} \cdot \text{架}^{-1})$	$P_{C0}/(\text{kN} \cdot \text{架}^{-1})$
34.5	1.05	16.8	0.74	27	0.65	3	0.7	0.322	5 942	6 255

表 3 周期来压液压支架支护阻力计算

Table 3 Powered support resistance calculation in working face periodic weighting

周期来压次数	周期来压步距/m	周期来压平均步距/m	岩块最大回转角/(\circ)	岩块回转角/(\circ)	$P_{ml}/(\text{kN} \cdot \text{架}^{-1})$	$P_{Cl}/(\text{kN} \cdot \text{架}^{-1})$
1	12.3				6 235	6 563
2	11.9	12	3.5	1.75	6 168	6 493
3	11.5				6 126	6 448

注:  $P_{C0}$  为控制顶板初次来压支架的支护阻力;  $P_{ml}$  和  $P_{Cl}$  分别为控制顶板周期来压的支护力及支架的支护阻力,  $l=1, 2, 3$ 。

作阻力 6 800 kN, 额定初撑力 5 064 kN, 支护强度  $0.98 \sim 1.10 \text{ MPa}$ 。

#### 4.3 支架工作阻力的实测

采用 KBJ-60 III-1 综采支架工作阻力连续记录仪对工作面上、中、下部支架工作阻力进行监测。工作面初次来压与周期来压时支架阻力均呈现“中部较大、两端较小”的特点。工作面初次来压时,中部

测区压力显现明显, 支架最大工作阻力 6 444 kN ( $42.4 \text{ MPa}$ ), 是额定工作阻力的 95%。第 1 次周期来压时支架工作阻力最大达 6 625 kN, 是额定工作阻力的 97.4%; 工作面两端支架最大工作阻力 4 880 kN, 是额定工作阻力的 71.8%。

统计第 1 次周期来压至第 3 次周期来压期间工作面中部、端部支架平均最大工作阻力变化情况如图

7所示,由图可知,随工作面推进,支架工作阻力有减小趋势,上述实测结果与计算结果基本吻合。初次来压和第1次周期来压期间支架阻力富裕量偏小,应在以后的支架选型中予以提高。

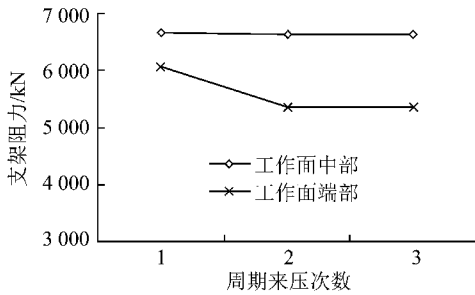


图7 周期来压工作面中部、端部支架平均最大工作阻力变化特征

Fig. 7 Average maximum resistance changing features of supports in the working face middle & ends parts in periodic weighting

## 5 结 论

(1)分析了沙土质型冲沟坡体下浅埋煤层长壁开采顶板破断特征和地表变形特征,提出了顶板结构荷载形式的非均匀性。结合冲沟坡体形态、顶板结构力学模型和“支架-围岩”相互作用关系,得出了控制顶板结构滑落失稳的支护阻力。

(2)结合典型矿区浅埋煤层具体地质条件,基于背沟开采条件下工作面由沟底至非冲沟区域推进时支架阻力逐渐减小并趋于稳定的变化特征,确定了工作面支架的支护阻力,并在现场实测中得到了较好验证。

## 参考文献:

[1] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2000.

[2] 李凤仪,梁冰,董尹庚. 浅埋煤层工作面顶板活动及其控制[J]. 矿山压力与顶板管理,2005(4):78-79,83.  
Li Fengyi, Liang Bing, Dong Yingeng. Roof activity and its controlling in shallow buried seam[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005(4):78-79,83.

[3] 杨治林. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层的不稳定性态[J]. 煤炭学报,2008,33(12):1341-1345.  
Yang Zhilin. Instability behavior for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12):1341-1345.

[4] 侯忠杰,吴文湘,肖民. 厚土层薄基岩浅埋煤层“支架-围岩”关系实验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2007,22(1):9-12.  
Hou Zhongjie, Wu Wenxiang, Xiao Min. Research on relation of “support and surrounding-rock” in shallow seam covered with thick soil stratum and thin basic rock[J]. Journal of Hunan University of

Science & Technology (Natural Science Edition), 2007, 22(1):9-12.

[5] 桂祥友,马云东. 浅埋工作面矿山压力显现规律模拟研究[J]. 中国矿业,2004,13(6):69-71.  
Gui Xiangyou, Ma Yundong. Numerical simulation on movement rule of shallow coal seam[J]. China Mining Magazine, 2004, 13(6):69-71.

[6] 侯忠杰. 断裂带老顶的判别准则及在浅埋煤层中的应用[J]. 煤炭学报,2003,28(1):8-12.  
Hou Zhongjie. The criterion on determining main roof in breaking zone and its application to the shallow seam[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1):8-12.

[7] 赵晓东,王海龙. 梯形荷载下的采场顶板岩层运动及支架承载计算研究[J]. 煤炭学报,2012,37(5):731-736.  
Zhao Xiaodong, Wang Hailong. Calculation of rock strata movement and support resistance in working face due to trapezoidal loads[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5):731-736.

[8] 黄庆享,钱鸣高,石平五. 浅埋煤层采场老顶周期来压的结构分析[J]. 煤炭学报,1999,24(6):581-585.  
Huang Qingxiang, Qian Minggao, Shi Pingwu. Structural analysis of main roof stability during periodic weighting in longwall face[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6):581-585.

[9] 王旭锋. 冲沟发育矿区浅埋煤层采动坡体活动机理及其控制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.

[10] Wang Xufeng, Zhang Dongsheng, Fan Gangwei, et al. Underground pressure characteristics analysis in back-gully mining of shallow coal seam under a bedrock gully slope[J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(1):23-27.

[11] Wang Xufeng, Zhang Dongsheng, Zhai Deyuan, et al. Analysis of activity characteristics of mining-induced slope and key area of roof controlling under bedrock gully slope in shallow coal seam[A]. Proceedings of 2010 International Conference on Mine Hazards Prevention and Control[C]. Paris: Atlantis Press, 2010:90-97.

[12] 王旭锋,张东升,卢鑫,等. 浅埋煤层沙土质冲沟坡体下开采矿压显现特征[J]. 煤炭科学技术,2010,38(6):18-22.  
Wang Xufeng, Zhang Dongsheng, Lu Xin, et al. Strata behavior features of shallow depth thin seam mining under sand-soil gully slope[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(6):18-22.

[13] 钟新春. 山体浅埋煤层采场覆岩活动规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2007.

[14] 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.

[15] 钱鸣高,缪协兴,何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报,1994,19(6):557-563.  
Qian Minggao, Miao Xiexing, He Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6):557-563.

[16] 黄庆享,胡火明,刘玉卫,等. 浅埋煤层工作面液压支架工作阻力的确定[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(3):304-307.  
Huang Qingxiang, Hu Huoming, Liu Yuwei, et al. Determination of proper support resistance in working face of shallowly buried coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3):304-307.