文章编号：1673-3363-(2015)06-0877-06

冲沟地貌下浅埋煤层开采矿压规律及顶板控制技术

王方田，屠世浩，张艳伟，宋启，闫瑞龙，段超华

(中国矿业大学矿业工程学院，深部煤炭资源开采教育部重点实验室，江苏 徐州 221116)

摘要 神东煤田高头窑矿区具有冲沟发育、坡体变化大等地貌特征，在沟谷下浅埋煤层进行长壁开采容易诱发顶板切冒、支架压毁等灾害。结合色连一号矿首采工作面地质条件，建立了冲沟下“支架-围岩”作用关系模型，确定了背沟开采时合理支架工作阻力为 11 000 kN。分析了 4.0 m 和 3.2 m 采高时煤壁塑性区发育、顶板压力和下沉量变化规律，得到矿压显现剧烈程度呈现“背沟段>向沟段>沟底段>正常开采段”的特征。工作面矿压实时监测表明，冲沟下开采顶板来压期间支架最大工作阻力及来压动载系数均有明显增大。现场应用加强矿压监测预报、局部降低采高、工作面快速推进等措施，确保了冲沟下浅埋煤层安全高效开采。

关键词 浅埋煤层；冲沟地貌；支架阻力；动载矿压；安全高效开采

中图分类号 TD 323 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.06.002

Ground pressure rules and roof control technology for the longwall mining of shallow seam beneath the gully topography

WANG Fangtian，TU Shihao，ZHANG Yanwei，SONG Qi，YAN Ruilong，DUAN Chaohua

(School of Mines，Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining，Ministry of Education，China University of Mining & Technology，Xuzhou，Jiangsu 221116，China)

Abstract Gaotouyao Mine Area, located in the Shendong Coal Field, has typical topography features of developmental gully and large change for the slopes, thence many accidents, such as roof slice type caving and hydraulic support being iron-bound, are inclined to happen during the longwall mining of the shallow coal seams beneath the gully topography. According to the field conditions of the first longwall panel, Selian No. 1 Coal Mine, a “support-surrounding rock” relationship model has been established, and the reasonable support working resistance has been determined to be 11 000 kN in the back-gully mining period. The coal wall plastic zone development, roof pressure and roof deflection have been analyzed while the mining height are 4.0 m and 3.2 m respectively. And the strata pressure behavior degree presents a characteristic of “back-gully mining period > toward-gully mining period > bottom-gully mining period > normal mining period”. The real-time monitoring results indicate that the max support working resistance and the roof weighting dynamic factor of the gully period are larger than these of the

收稿日期：2015-04-06
基金项目：国家自然科学基金项目(51304202)；江苏省自然科学基金项目(BK20130190)；江苏省高校优势学科建设项目；中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014XT01)；中国矿业大学青年科技基金项目(2013QNA28)
作者简介：王方田(1985—)，男，河南省永城市人，博士，讲师，从事浅埋煤层、薄煤层采矿方法、矿山压力与岩层控制方面的研究。
E-mail：wangfangtian111@163.com **Tel**：13605202425

normal mining period. Many roof control measures, including enhancement mine pressure monitoring and forecasting, regional lower mining height and rapid advance speed, are implemented in the field, hence safe and efficient mining of shallow seam beneath the gully topography has been guaranteed.

Key words shallow coal seams；gully topography；support working resistance；dynamic mine pressure；safe and efficient mining

神东煤田地貌具有植被稀疏、地表水蚀严重、冲沟纵横、坡体产状变化大及地形支离破碎(高差多在 40 m 以上)等特征。其中鄂尔多斯东北部高头窑矿区属高原半沙漠地貌特征，多侵蚀性丘陵。

在起伏变化大的沟谷下浅埋煤层进行长壁开采，由于覆岩被侵蚀后不易形成稳定的砌体梁结构，在现场发生多起来压强度大、来压迅速的动载矿压灾害，易产生顶板切冒、煤壁片帮、支架压毁等，严重威胁工作面安全高效生产。国内外学者对浅埋煤层开采矿压显现规律、涌水溃沙等进行了大量的研究，为指导矿山安全高效开采及地表生态环境提供了有力支持[1-7]。但以上研究多忽略了地形地貌对煤层开采的影响，而针对冲沟下煤层开采矿压显现规律的研究较少。王旭锋等[8-10]以背沟开采为主要方式对基岩型和沙土质型采动坡体下煤层开采顶板结构进行了研究，建立了冲沟坡体下基本顶初次来压破断模型，并指出了冲沟深度、坡角对工作面矿压显现的影响特征。张志强等[11-12]结合神东矿区活鸡兔井沟谷地形下煤层条件，通过对不同坡角、沟深模拟实验得出：沟谷坡角越大矿压显现越强烈，当坡角小于 15°时工作面矿压显现一般不明显；沟深越大工作面在沟谷上坡段动载矿压显现相应越强烈，反之，块体结构不易形成稳定的砌体梁结构，矿压显现强度不大。

冲沟发育区域浅埋煤层采动覆岩结构特征对合理确定工作面液压支架工作阻力，防止发生顶板切冒、严重煤壁片帮等灾害具有重要影响。为此，本文结合高头窑矿区色连一号矿 8101 工作面地质条件，建立了冲沟下煤层开采覆岩结构模型，分析了覆岩运动规律及正常开采与冲沟下开采工作面矿压规律，并提出了针对性的顶板控制技术，实现了冲沟发育地貌下浅埋煤层安全高效开采。

1 现场地质条件

色连一号矿 8101 综采工作面走向长度 1 780 m，倾向长度 280 m。地面标高为 1 384~1 442 m，所采 2-2 上煤层底板标高为 1 250~1 264 m，煤层埋深约为 170 m。煤厚 2.5~5.0 m，平均 4.0 m，煤层倾角 1°~3°。煤层综合柱状如图 1 所示。

井田内地表起伏较大，有冲沟发育，其中淖沟深度约为 38 m。

层号	厚度/m	埋深/m	岩性描述
1	8.2	8.2	沙土及砂砾石
2	22.5	30.7	砂质泥岩夹细砂岩
3	6.9	37.6	中~粗砂岩
4	9.7	47.3	砾岩
5	76.3	123.6	砂质泥岩与粉砂岩互层
6	27.0	150.6	中、粗砂岩泥岩互层
7	14.4	165.0	砂质泥岩
8	3.0	168.0	中~细粒砂岩
9	0.6	168.6	浅灰色泥岩
10	4.0	172.6	2-2上煤层
11	3.1	175.7	砂质泥岩
12	10.0	185.7	中粒砂岩

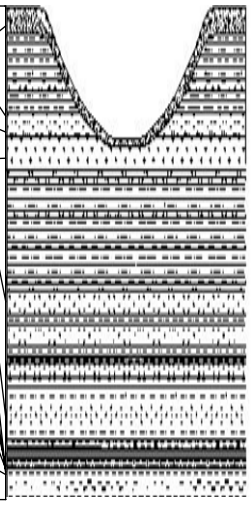


图 1 浅埋煤层综合柱状图

Fig.1 Comprehensive histogram of shallow coal seam

2 冲沟下浅埋煤层开采覆岩结构特征

2.1 理论分析

浅埋煤层开采长壁工作面周期来压顶板结构稳定性分析结果表明[3]，工作面来压时基本顶岩块主要失稳方式为滑落失稳，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。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[1-3]。借鉴前人研究成果[2-4]，可得到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[10]。根据以往研究成果可知，背沟开采比向沟开采冲沟对支架支护阻力的影响更大，要求支护阻力更高，为此结合 8101 工作面地表冲沟条件建立背沟段浅埋煤层开采覆岩结构如图 2 所示。

工作面周期来压时，按控制顶板结构滑落失稳考虑，其简化“支架-围岩”关系模型如图 3 所示。

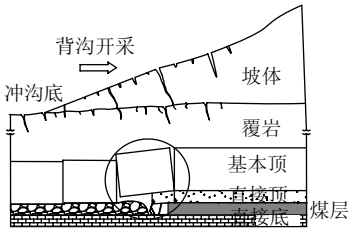


图 2　背沟段煤层开采覆岩结构

Fig.2　Overlying strata structure during the back-gully mining period

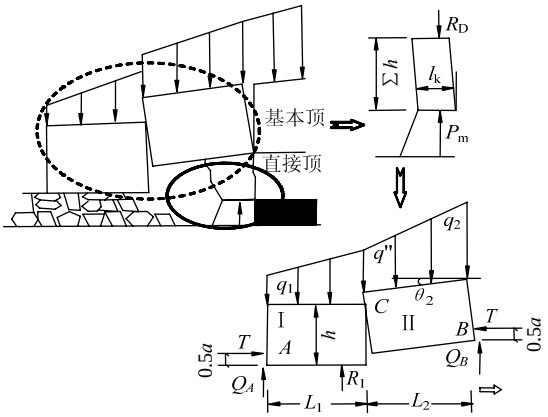


图 3　工作面来压期间“支架-围岩”关系模型

Fig.3　The “support-surrounding rock” relationship model while roof weighting

液压支架支护阻力包括直接顶岩柱重量及基本顶滑落失稳传递给直接顶的压力，因此，得到液压支架所需的支护阻力 P_m 为

$$P_m = l_k b\sum h\gamma_2 + \frac{i-2\sin\theta_{2max}+\sin\theta_2-2k\tan\beta}{i-2\sin\theta_{2max}+\sin\theta_2}bP \quad (1)$$

式中：θ_{2max} 为岩块Ⅱ最大回转角，3.5º，θ_2=1.5º；$k=(2q''+q_2)/[3(q''+q_2)]$，$k$=0.4；$P$ 为作用于关键块的载荷，$P=hL_2\gamma+K_G\left(h_1'+L_2\tan(\alpha-\theta_{2max})\right)L_2\gamma_1$。

根据色连一号矿 8101 工作面地质生产条件，h 为基本顶厚度，14.4 m；h_1' 为载荷层厚度，45 m；l_k 为控顶距，4.21 m；b 为支架宽度，1.75 m；γ，γ_1，γ_2 分别为基本顶、载荷层、直接顶容重；L_2 为岩块长度，13.5 m；i 为岩块块度，1.03；α 为坡角，20º；$\tan\beta$ 为岩块间的摩擦因数，取 0.5；K_G=K_tK_r，K_t 为载荷传递的时间因子，0.7；K_r 为周期来压时载荷传递因子，0.42。

将以上参数代入式(1)即可求得工作面过沟谷时所需要的支架阻力 P_{02}=8822 kN。该支护阻力是支架提供给顶板的有效支护阻力，考虑到支架的支护效率 μ=0.88，因此工作面支架的支护阻力为

$$P_G = P_{02}/\mu = 10025\ \text{kN} \quad (2)$$

结合邻近矿区开采实践，考虑到一定的富裕系数，确定色连一号矿 8101 工作面配套的液压支架为 ZY11000-25/50D 型掩护式液压支架，额定工作阻力为 11 000 kN。

2.2　数值模拟

为研究不同采高时冲沟下煤层开采矿压特征和顶板变形情况，采用 UDEC 离散元程序建立了数值计算模型。模型长度为 250 m，高度为 175 m，冲沟深 38 m，当工作面向着冲沟推进时称为向沟开采，相应的背离冲沟推进时称为背沟开采。

采高为 4.0 m 时工作面不同开采段煤壁塑性区范围变化如图 4 所示。

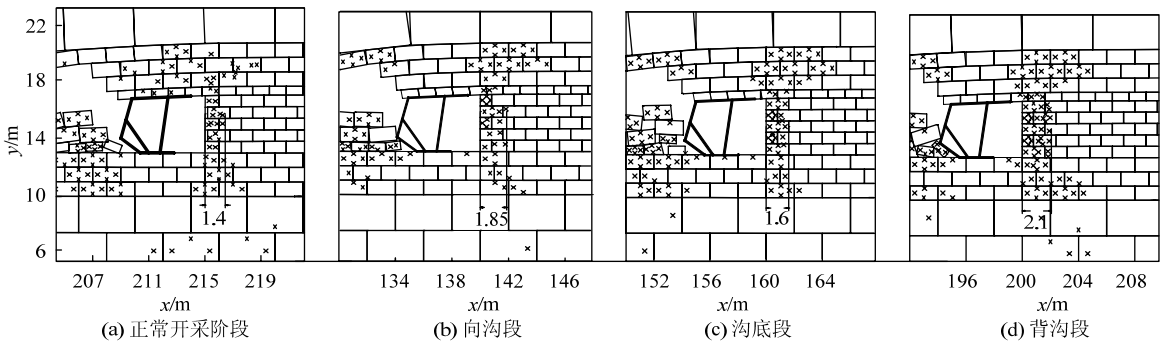


图 4　不同开采阶段工作面煤壁塑性区发育特征

Fig.4　Coal wall plastic zone development characteristics in different mining period

由图 4 可知：正常开采阶段煤壁塑性区宽度为 1.4 m 左右，向沟段塑性区宽度 1.85 m，沟底段塑性区宽度 1.6 m，背沟段塑性区宽度最大达到 2.1 m。从塑性区发育特征可知，工作面过冲沟段塑性区发育宽度明显高于正常开采阶段，煤壁压力较大，矿压显现相对较为剧烈，且矿压显现剧烈程度呈现“背沟段>向沟段>沟底段>正常开采段”的特征。

针对采高 3.2 m 和 4.0 m 这 2 种开采条件进行了数值模拟，随工作面推进顶板压力和下沉量变化如图 5，6 所示。

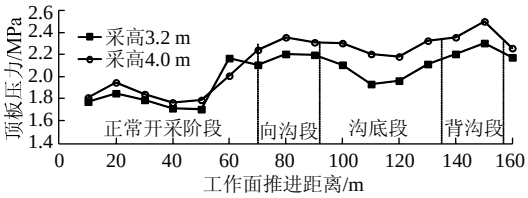


图 5 不同采高条件下工作面顶板压力分布

Fig.5 Roof pressure distribution in different mining height

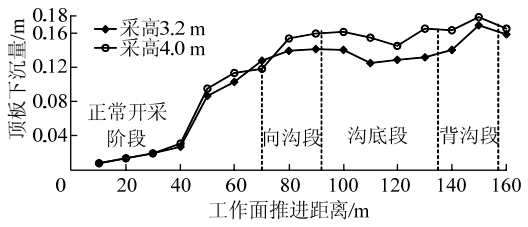


图 6 不同采高条件下工作面顶板下沉量分布

Fig.6 Roof deflection distribution in different mining height

由图 5，6 可知：当采高由 4.0 m 降低到 3.2 m 时，工作面顶板压力和顶板下沉量均呈现出不同程度的减小。当工作面处于向沟段时，支架压力和顶板下沉量较正常开采阶段增大；随着工作面的推进，当处于沟底段时顶板压力和下沉量较向沟段减小，但仍然高于正常开采阶段；当工作面由沟底段进入背沟段时，顶板压力和下沉量逐渐增加。采高为 3.2 m 时，顶板压力最大值为 2.3 MPa，顶板下沉量达到 169 mm；采高为 4.0 m 时，顶板压力最大达到 2.49 MPa，下沉量为 179 mm。由此知降低采高后，工作面顶板压力和顶板下沉量均得到了减小，工作面过冲沟时通过合理控制采高有利于顶板安全管理。

3 现场实测分析

在 8101 工作面开采期间，采用 KJ653-F2 矿用本安型顶板压力无线监测分站在线监测系统进行了实时矿压监测分析。图 7 为正常开采与冲沟下开采工作面 85#液压支架工作阻力变化曲线。

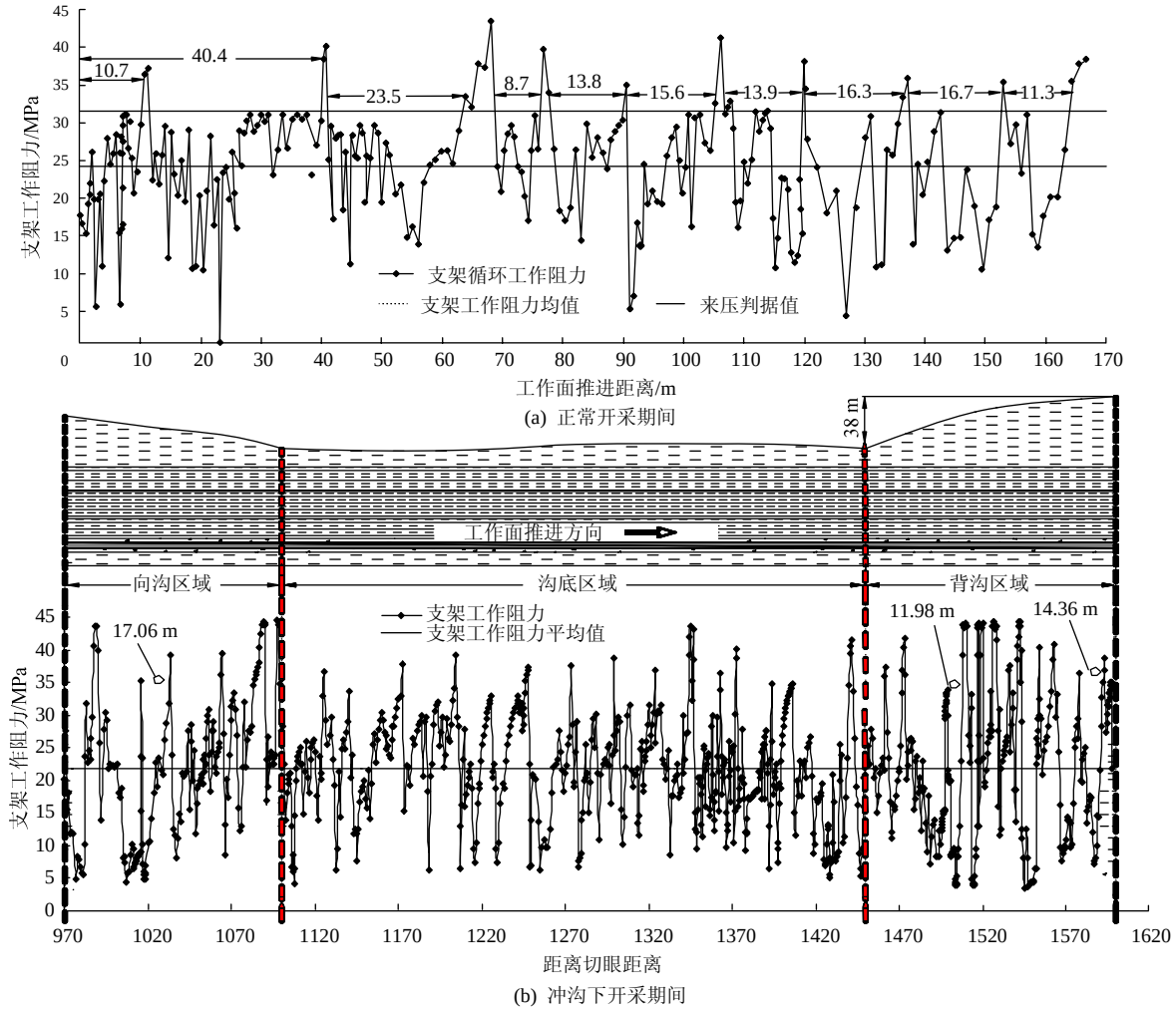


图 7 正常及冲沟下开采工作面支架工作阻力变化曲线

Fig.7 Support working resistance curves during normal and beneath gully mining period

现场实测表明：① 背沟段顶板平均来压步距为 13.88 m，向沟段平均来压步距为 17.93 m，背沟段来压步距值小于向沟段。② 冲沟下开采支架平均工作阻力为 22.1 MPa，与正常开采相当。但是来压期间支架最大工作阻力较正常开采有较大增幅，超过支架额定工作阻力(43.8 MPa)的远远多于正常开采段，其中背沟段出现 12 次、向沟段出现 10 次，而正常开采期间只出现过 1 次。③ 冲沟下开采来压期间支架安全阀频繁开启，而且伴随支架上方顶板破断响声，支架工作阻力整体呈“背沟开采>向沟开采>沟底”分布，相应的顶板来压动载系数总体呈“背沟段(1.85)>向沟段(1.71)>沟底段(1.58)>正常开采段(1.55)”的特征。

在冲沟下开采期间未出现支架压死事故，表明考虑冲沟坡体运动载荷影响的液压支架工作阻力确定方法是合理的，为冲沟下浅埋煤层开采合理支架阻力计算提供了有益参考。

4　顶板控制技术

1) 加强矿压监测预报。工作面安装了 KJ653-F2 矿用本安型顶板压力无线监测分站在线监测系统，实时监测液压支架压力变化，准确预报了工作面在冲沟下开采时顶板来压规律，当来压剧烈时出现报警，为工作人员及时发现矿压异常并采取针对性措施提供了依据。

2) 局部降低采高。在冲沟下进行开采时，适当降低采高可减小覆岩的变形运动空间，有利于基本顶形成较为稳定的砌体梁结构，从而减轻覆岩破坏程度。此外，2-2 上煤层上方的泥岩伪顶及中细粒砂岩直接顶强度低，而煤层相对硬度大韧度高，借鉴神东矿区实践经验，保留 0.5 m 以上厚度的护顶煤，有利于顶板管理、提高煤质和工作面快速推进。因此，工作面“向沟开采—沟底—背沟开采”这一区间考虑采用降低采高为 3.2 m 的措施，即从向沟开采边坡逐渐降低采高为 3.2 m，沟底保持采高 3.2 m，在背沟开采出背沟边坡 10 m 采高逐渐升到 4.0 m。

3) 工作面快速推进。加快工作面推进速度在提高工作面单产的同时，对工作面围岩应力分布及其稳定性也具有重要影响。8101 工作面配备了 KTC101 自动控制系统，配合 ZY11000-25/50D 型液压支架电液控制系统的左右邻架/隔架移架和成组自动控制、7LS6C 型采煤机的记忆割煤和远程遥控，自动化控制装备为实现工作面快速推进提供了保障。

4) 带压移架和及时支护。为防止顶板发生冒漏和煤壁严重片帮问题，制定了相应的措施：① 在移架的过程中带压移架，确保对顶板保持一定的支撑力；② 移架过程中间隔移架，无法接顶的支架在移架过程中先移架，确保能够接顶；③ 顶板冒落严重区域提前移架；④ 确保移架后支架有足够的初撑力；⑤ 煤壁片帮和顶板冒落严重区域移架后及时打开二级护帮板支护煤壁。在现场移架过程中，通过以上措施实现了顶板安全管理，保证了工作面的安全高效生产。

5　结　论

1) 结合高头窑矿区冲沟地貌下浅埋煤层地质条件，为防止发生顶板切冒、支架压毁事故，建立了冲沟坡体下浅埋煤层开采周期来压期间的“支架-围岩”作用关系模型，并解算了背沟开采时合理支架工作阻力，确定配套 ZY11000-25/50D 型掩护式液压支架。

2) 采用数值模拟分析了 4.0 m 和 3.2 m 这 2 种采高时煤壁塑性区发育、顶板压力和下沉量变化规律，表明矿压显现剧烈程度呈现“背沟段>向沟段>沟底段>正常开采段”的特征。

3) 现场矿压在线监测表明，受冲沟坡体运动载荷影响，与工作面正常开采时相比，顶板来压期间支架最大工作阻力及来压动载系数均有明显增大。

4) 为防止冲沟下浅埋煤层开采发生顶板切冒、支架压毁等事故，现场采用加强矿压监测预报、局部降低采高、工作面快速推进、带压移架和及时支护等措施，确保了冲沟发育地貌下浅埋煤层安全高效开采。

参考文献：

[1] 黄庆享．浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]．岩石力学与工程学报，2002，21(8)：1174-1177．
HUANG Qingxiang．Ground pressure behavior and definition of shallow seams[J]．Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2002，21(8)：1174-1177．

[2] 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，2000：28-51．

[3] 黄庆享．浅埋煤层长壁开采顶板结构理论与支护阻力确定[J]．矿山压力与顶板管理，2002，19(1)：70-72．
HUANG Qingxiang．Roof structural theory and the determination of support resistance for the longwall mining of shallow seams[J]．Ground Pressure and Strata Control，2002，19(1)：70-72．

[4] 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．

[5] 屠世浩，窦凤金，万志军，等．浅埋房柱式采空区下近距离煤层综采顶板控制技术[J]．煤炭学报，2011，36(3)：366-370．
TU Shihao，DOU Fengjin，WAN Zhijun，et al．Strata control technology of the fully mechanized face in shallow coal seam close to the above room-and-pillar gob[J]．Journal of China Coal Society，2011，36(3)：366-370．

[6] 王方田，屠世浩，李召鑫，等．浅埋煤层房式开采遗留煤柱突变失稳机理研究[J]．采矿与安全工程学报，2012，29(6)：770-775．
WANG Fangtian，TU Shihao，LI Zhaoxin，et al．Mutation instability mechanism of the room mining residual pillars in the shallow depth seam[J]．Journal of Mining & Safety Engineering，2012，29(6)：770-775．

[7] YANG Weifeng，XIA Xiaohong，ZHAO Guorong，et al．Overburden failure and the prevention of water and sand inrush during coal mining under thin bedrock[J]．Mining Science and Technology，2011，21(5)：733-736．

[8] 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，2008．

[9] 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．

[10] 王旭锋，张东升，张炜，等．沙土质型冲沟发育区浅埋煤层长壁开采支护阻力的确定[J]．煤炭学报，2013，38(2)：194-198．
WANG Xufeng，ZHANG Dongsheng，ZHANG Wei，et al．Support resistance determination for shallow coal seam longwall mining in sand-soil gullies overlaying mining area[J]．Journal of China Coal Society，2013，38(2)：194-198．

[11] 张志强，许家林，朱卫兵，等．沟谷坡角对浅埋煤层开采矿压的影响规律研究[J]．采矿与安全工程学报，2011，28(4)：560-565．
ZHANG Zhiqiang，XU Jialin，ZHU Weibing，et al．Influencing laws study of gully slope angle on dynamic strata pressure of working face in shallow coal seams[J]．Journal of Mining & Safety Engineering，2011，28(4)：560-565．

[12] 张志强，许家林，刘洪林，等．沟深对浅埋煤层工作面矿压的影响规律研究[J]．采矿与工程学报，2013，30(4)：501-505．
ZHANG Zhiqiang，XU Jialin，LIU Honglin，et al．Influencing laws study of depth of gully on dynamic strata pressure of working face in shallow coal seams[J]．Journal of Mining & Safety Engineering，2013，30(4)：501-505．

“2015 科学采矿论坛”暨
“第十八届矿压理论与实践研讨会”召开

2015 年 11 月 7—8 日，由《采矿与安全工程学报》编辑部主办，煤炭资源与安全开采国家重点实验室、国家自然科学基金委员会协办，煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室、重庆市煤炭学会承办的“2015 科学采矿论坛”暨“第十八届矿压理论与实践研讨会”在重庆市隆重召开。美国国家工程院院士、西弗吉尼亚大学采矿工程系彭赐灯（Syd S. Peng）教授，重庆大学党委副书记肖铁岩教授，中国矿业大学副校长、《采矿与安全工程学报》编委会主任、主编缪协兴教授，湖南科技大学正校督导冯涛教授，河南理工大学副校长周英教授，西安科技大学副校长李树刚教授，国家自然科学基金委员会工程与材料科学部工程科学一处安全工程流动编制项目主任张俊文及相关负责同志出席会议。来自全国相关领域的知名专家学者、工程技术人员共计 160 余人参加会议。

在会议开幕式上，肖铁岩教授、缪协兴教授分别致辞。

在研讨会上，缪协兴教授全面系统介绍了钱鸣高院士有关煤炭资源科学开采、科学利用和科学管理的理念，受到与会代表的热烈欢迎和积极评价。曹胜根教授宣读了《采矿与安全工程学报》刊登的论文进入 F5000 中国精品科技期刊顶尖学术论文获得者名单，张俊文主任分析了矿业工程领域自然科学基金的资助情况，卢义玉教授向各位参会专家介绍了重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室。

这次会议继续发扬了科学采矿论坛及矿压理论与实践研讨会的一贯传统，共有三十多位专家学者做了大会发言，对煤炭开采中的各种科学问题进行了广泛而深入的探讨。彭院士在会上系统介绍了世界煤矿岩层控制技术的发展历程并对下一步的研究工作指明了方向，我国采矿安全领域的著名专家学者就煤炭资源绿色开采的理论与方法、充填采煤方法与岩层运动控制技术、煤矿采场巷道矿压理论与技术、采动煤岩动力灾害与监控技术等方面进行了深入的探讨，各单位矿业学院的院长们还分别介绍了各自采矿学科的情况，一大批年轻的科技工作者也展示了他们各自的最新研究成果。