

采矿与井巷工程

多层坚硬顶板综放开采矿压规律及控制技术研究

朱志洁¹, 王洪凯², 张宏伟¹, 汤国水¹, 兰天伟¹, 高明¹

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000; 2. 铁法能源有限责任公司小青煤矿, 辽宁调兵山 112700)

摘要:针对特厚煤层和多层坚硬顶板赋存条件下, 工作面易出现液压支架压死、煤壁片帮和沿空巷道围岩变形严重、矿压显现强烈的问题, 以同忻煤矿特厚煤层综放工作面为工程背景, 对回采巷道和工作面进行矿压显现监测, 分析多层坚硬顶板作用下的围岩应力和变形规律。研究表明: 工作面开采引起的采动应力影响范围较大, 多层坚硬顶板作用下覆岩形成了大结构, 在其作用下围岩应力和变形表现为“上升突变”和“下降突变”交替出现。研究结果说明了特厚煤层大采出空间和多层坚硬顶板的共同作用是综放工作面强烈矿压显现的主要原因, 据此提出了坚硬预裂爆破切顶和沿空巷道恒阻大变形锚杆吸能支护控制技术, 可对强矿压进行有效防治。

关键词:特厚煤层; 多层坚硬顶板; 矿压显现; 覆岩大结构

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)07-0001-06

Study on rock pressure law and control technology under multi-layer hard roof in fully-mechanized top coal caving face

Zhu Zhijie¹, Wang Hongkai², Zhang Hongwei¹, Tang Guoshui¹, Lan Tianwei¹, Gao Ming¹

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Xiaoqing Coal Mine, Tiefsa Energy Company, Diaobingshan 112700, China)

Abstract: Geological conditions of thick coal seam and multi-layer hard roof tend to result in the hydraulic support being crushed and rib spalling at the working face, as well as serious deformation of surrounding rock of the gob-side roadway together with dramatic strata behavior. The focus was laid on the fully-mechanized top coal caving mining face at Tongxin Mine, where the stress and deformation of surrounding rocks under the influence of multi-layer hard roof were monitored and analyzed. The results show that the mining stress generated by mining face has a large influence range. Under the impact of multi-layer overlying hard roof, the large overburden structure is formed, and the stress and deformation of the surrounding rock are “abruptly ascending” and “abruptly descending”, alternately. The synergy of the large coal mining space and the multi-layer hard roof are the main reason for the serious deformation in the fully-mechanized top coal caving face. The control technology of energy dissipation and bracing with constant resistance and large deformation of anchor in hard and long-stay tunnel with hard pre-fracturing blasting is proposed, which can effectively prevent and control the strong mining pressure.

Key words: extra-thick seam; multi-layer hard roof; strata behavior; overburden large structure

0 引言

坚硬顶板是指在煤矿开采中, 赋存于煤层或直接顶上具有强度高、厚度大、整体性强、节理裂隙不发育等特点的厚而稳定坚硬的砂岩、砾岩或石灰岩

等岩层, 在煤层开采后采空区大面积暴露、短期内不易自然垮落的顶板。在坚硬顶板条件下, 工作面矿压显现更为剧烈, 基本顶的突然断裂和动载作用易对工作面支架产生较大的冲击载荷, 易发生压架事故, 严重影响井下人员的生命安全, 阻碍矿井的正常

收稿日期: 2017-02-17; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.07.001

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674135, 51604139)

作者简介: 朱志洁(1986—), 男, 辽宁调兵山人, 讲师, 博士。Tel: 0418-3350473, E-mail: zhuzhijie036@qq.com

引用格式: 朱志洁, 王洪凯, 张宏伟, 等. 多层坚硬顶板综放开采矿压规律及控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 1-6.

Zhu Zhijie, Wang Hongkai, Zhang Hongwei, et al. Study on rock pressure law and control technology under multi-layer hard roof in fully-mechanized top coal caving face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 1-6.

生产^[1-2]。

一些学者对坚硬顶板的矿压显现特征进行了研究。郭卫彬等^[3]基于大采高综采工作面覆岩结构特征,对大采高坚硬顶板综采工作面支架工作阻力进行了估算。王金安等^[4]建立了表征采空区内矿柱支撑顶板的弹性基础板力学模型,研究顶板不同阶段的破断模式与突变失稳的力学过程。崔磊^[5]针对晋煤集团坚硬顶板控制存在的突出问题,系统研究了坚硬顶板矿压显现规律,确定了直接顶和基本顶的初次和周期垮落步距。李迎富等^[6]研究了坚硬顶板上提工作面覆岩破断特征,建立了覆岩结构力学模型,确定了压架失稳判据。于洋^[7]得到了特厚煤层双硬顶板破断方式和垮落步距,指出特厚煤层低位双硬顶板破断失稳呈现下位“悬臂梁”与上位“砌体梁”结构。庞绪峰^[8]建立了孤岛工作面坚硬顶板的薄板力学模型,研究了孤岛工作面坚硬顶板的破断前后的能量变化特征。魏锦平等^[9]基于现场实测数据建立了综放工作面的坚硬顶板悬臂梁计算模型,提出了工作面支架工作阻力的计算方法。史红^[10]利用两端嵌固梁考虑体积力的力学模型对厚层坚硬顶板的破断规律进行了系统研究,提出了厚层坚硬岩层3种破坏方式的力学判断方法,为厚层坚硬岩层的控制提供了理论依据。王开等^[11]基于坚硬顶板长壁工作面初次垮落步距大、周期断裂悬顶长等特点,系统研究了工作面顶板初次断裂的3种控制放顶方式和周期断裂的合理悬顶长度。

上述研究取得了一定成果,并且现场应用效果较好,但对特厚煤层多层坚硬顶板条件下的矿压显现规律研究较少。基于此,笔者以同忻煤矿为例,通过锚杆(索)应力、煤体应力监测和工作面支架工作阻力监测,对多层坚硬顶板条件下的矿压显现特征进行深入分析,以期为矿井的安全高效生产提供理论指导。

1 工程地质概况

同忻煤矿开采石炭二叠系3-5号煤层,煤层倾角为 $1^{\circ}\sim 4^{\circ}$,平均为 2° 。8105工作面和8104工作面为相邻工作面(图1),工作面之间留设有38 m宽的区段煤柱。工作面采用综合机械化放顶煤开采,采用全部垮落法管理顶板。工作面走向长度一般1 700~1 900 m,倾向长度200~210 m,埋深440~450 m,煤层厚度平均16~18 m。5404巷和5105巷分别为8104工作面、8105工作面的回风巷,巷道断

面为矩形断面,断面尺寸为宽 \times 高=5 000 mm \times 3 700 mm。2104巷、2105巷分别为8104工作面和8105工作面的运输巷,巷道断面为矩形断面,断面尺寸为宽 \times 高=5 600 mm \times 3 400 mm。



图1 8104和8105工作面布置平面

Fig. 1 Layout plane of No.8104 and No.8105 mining face

工作面基本顶为含砾粗砂岩及粉砂岩,直接顶为砂质泥岩,直接底为高岭质泥岩。工作面上部赋存有侏罗系多个煤层的采空区和煤柱,与上部侏罗系煤层间覆岩存在3层厚硬岩层,分别为顶板3.2 m处5.3 m厚的K3砂岩、顶板32.4 m处14.3 m厚的细粒砂岩和顶板143 m处12 m厚的细粒砂岩(表1)。

表1 3-5号煤层及岩层分布

Table 1 Distribution of rock formation and No.3-5 coal seam

编号	厚度/m	埋深/m	岩性	关键层
1	18.0	448.0	3-5煤	
2	3.2	444.8	砂质泥岩	
3	5.3	439.5	K3砂岩	亚关键层 I
4	7.7	431.8	中粒砂岩	
5	2.1	429.7	细粒砂岩	
6	5.3	424.4	粉砂岩	
7	2.1	422.3	4煤	
8	2.4	419.9	粉砂岩	
9	4.3	415.6	粗粒砂岩	
10	14.3	401.3	细粒砂岩	亚关键层 II
11	12.9	388.4	砾岩	
12	3.5	384.9	粗粒砂岩	
13	12.0	372.9	砾岩	
14	13.7	359.2	中粒砂岩	
15	3.2	356.0	粉砂岩	
16	10.7	345.3	细粒砂岩	
17	4.6	340.3	砾岩	
18	10.3	330.1	细粒砂岩	
19	10.5	319.6	粉砂岩	
20	6.9	312.7	砂质泥岩	
21	5.1	307.6	砾岩	
22	2.9	304.7	砂质泥岩	
23	12.0	292.7	细粒砂岩	主关键层
24	—	—	侏罗系采空区	

各工作面上部对应上覆为侏罗系9号、11号、12号、14号和15号煤层采空区,其中对应侏罗系14号煤层为永定庄矿多个纵横交错的巷间煤柱,与工作面间距为139~147 m。

由于煤层厚度大,开采强度高,加之覆岩多层坚硬顶板的影响。工作面经常出现液压支架压死、煤壁片帮等来压显现。覆岩破坏高度大,采动支承应力影响范围广、影响程度剧烈,尤其是沿空巷道围岩变形严重,顶底板移近量在超前30 m范围达到1.5 m,维护难度大。为此,通过对工作面和回采巷道进行矿压显现监测,对强烈矿压显现的本质进行深入研究。

2 回采巷道矿压显现规律实测

2.1 监测方案与测点布置

矿压监测内容包括:①采用MCS-400矿用本安型锚杆(索)测力计对巷道锚杆(索)承载力进行监测;②采用GMC20应力传感器对钻孔应力进行监测。2012年10月26日—2013年1月12日,监测邻近的8105工作面从开采至推进至540 m的回采过程中(开采初期),5104巷道围岩的应力和变形情况。共2个监测断面,1号监测断面距8104工作面开切眼335 m,2号监测断面距8104工作面开切眼535 m。各断面进行锚杆应力和钻孔应力监测。

2.2 工作面开采对沿空巷道矿压显现的影响

5104巷道1号和2号监测断面随着邻近8105工作面回采的钻孔应力变化曲线,如图2所示。图中各初次来压和周期来压位置是根据工作面矿压显现观测得到。随着8105工作面推进,监测断面钻孔应力持续升高,在工作面部分周期来压位置,钻孔应力发生突变。1号监测断面在8105工作面初次来压、第6次周期来压和第10次周期来压后,压力突然降低,在第4次周期来压和第8次周期来压时,钻孔应力突然升高,8105工作面推过监测断面300 m后,钻孔应力变化趋于缓和,8105工作面后方压力显现范围为300 m。类似地,由2号断面可以看出,8105工作面的前方压力显现范围为300 m。

5104巷道1号—2号监测断面随8105工作面开采的锚杆应力变化曲线,如图3所示,不同断面锚杆应力变化规律与钻孔应力变化相似。1号断面锚杆应力在8105工作面初次来压、第4次周期来压、第6次周期来压、第8次周期来压和第10次周期来压,锚杆应力突变,由此推断8105工作面后方影响

范围达到300 m;2号断面锚杆应力在8105工作面初次来压发生了较小的波动,在8105工作面第4次周期来压、第6次周期来压、第8次周期来压和第10次周期来压,锚杆应力变化明显,由此推断8105工作面前方影响范围达到300 m。

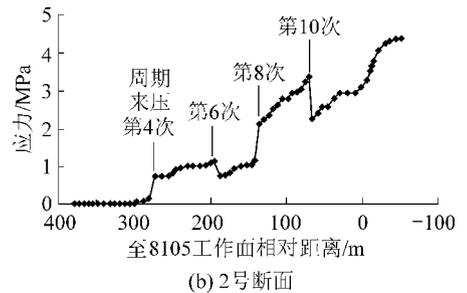
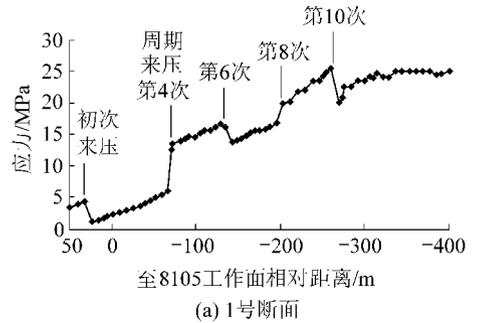
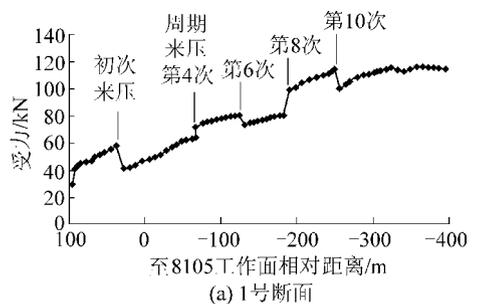


图2 5104巷各断面钻孔应力变化曲线

Fig. 2 Curves of borehole stress of each monitoring section in No.5104 roadway



— 顶锚杆 — 煤柱帮锚杆 — 实体煤帮锚杆

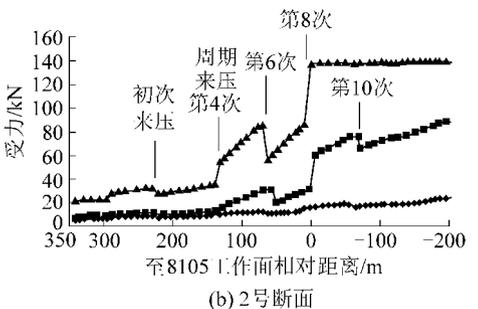


图3 5104巷各断面锚杆(索)受力变化曲线

Fig. 3 Curves of bolt (cable) stress of each monitoring section in No.5104 roadway

综合1号—2号断面钻孔应力和锚杆(索)应力监测结果可知:

1)在工作面开采初期,由于煤层开采形成的巨大采出空间和顶板赋存多层厚硬难垮落顶板,使得工作面开采引起的采动应力影响范围大,工作面前方显现影响范围为200~350 m,工作面后方为250~300 m。

2)沿空巷道的围岩变形和应力表现出一定的周期性和动载特性。受到多层坚硬顶板结构的影响,每间隔60~100 m围岩的应力和变形变化速度发生一次突变,突变位置对应于工作面周期来压。

3)沿空巷道受动载影响,围岩应力和变形表现为“上升突变”和“下降突变”交替出现。在工作面上方形成了由坚硬岩层岩板和壳形围岩空间组成的覆岩大结构如图4所示。“下降突变”是覆岩大结构失稳,围岩应力降低引起的;“上升突变”是结构体下部坚硬岩层的周期破断引起覆岩大结构尺度增大引起的,覆岩大结构的周期形成和失稳是围岩应力突变的根源^[12-13]。

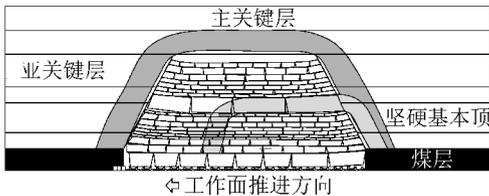


图4 综放工作面覆岩大结构演化过程

Fig.4 Evolution of overburden large structure in fully-mechanized caving mining face

3 工作面矿压显现规律实测

为研究侏罗系开采条件下工作面矿压显现特征,采用的ZVDC-1型综采支架计算机监测系统对8105工作面支架的载荷进行实时监测。从9号支架开始每间隔10个支架布置一组监测设备,分别在9号、19号、29号、39号、49号、59号、69号、79号、89号、99号、109号支架上,具体布置如图5所示。

3.1 支架工作阻力分布规律

从9号支架开始每间隔10个支架布置一组监测设备。8105工作面支架平均工作阻力的变化曲线,如图6所示,工作面基本顶初次来压和周期来压步距大、强度高。工作面初次来压步距为97 m,周期来压呈强弱交替大压、小压来压特征,周期大压步距为40~60 m,周期小压步距为20~30 m。

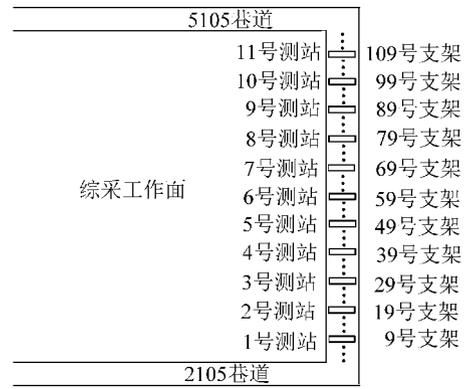


图5 8105工作面矿压观测测站布置

Fig.5 Layout of mine pressure observation station in No. 8105 mining face

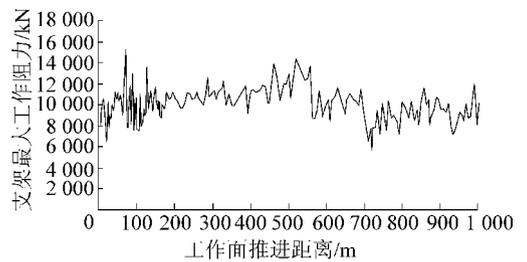
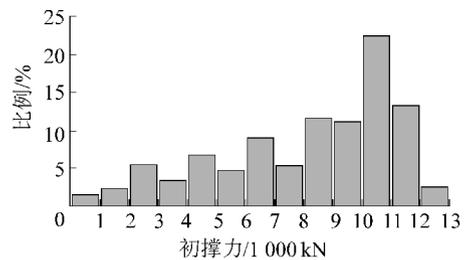


图6 8105工作面支架平均工作阻力变化曲线

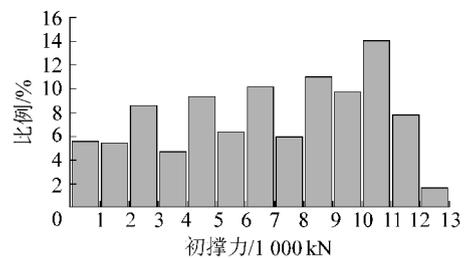
Fig.6 Curve of average support resistance change in No. 8105 mining face

3.2 工作面支架初撑力统计分析

工作面支架初撑力分布情况如图7所示,由图7可知:



(a) 支架前柱



(b) 支架后柱

图7 8105工作面支架初撑力分布

Fig.7 Support initial load distribution histogram of No. 8105 mining face

1)工作面支架前后柱初撑力为8 000~11 000

kN 的分布频率较大。现场支柱初撑力要求不小于 9 766 kN, 则前后柱初撑力合格率为分别为 40.49% 和 24.94%。合理支架初撑力与额定工作阻力之比应为大于 80%, 应加强支架前后柱的初撑力, 保证支架在初始状态时受力均匀, 提高支架维护顶板的能力, 也有利于顶煤破碎, 确保放煤效果。

2) 综放采场采空区内形成的自由空间相对较大, 上覆岩块的回转空间也相应地增大, 坚硬顶板使得悬臂梁结构的尺度更大, 悬臂梁的挠曲变形加剧了支架后部顶煤的破碎, 导致支架后部接顶不充分, 造成了后柱初撑力合格率偏低。

3.3 支架工作阻力与初撑力关系分析

各工作面所测支架初撑力 P_0 与循环最大工作阻力 P_M 的散点分布如图 8 所示, 两者近似呈线性关系, 各工作面最终确定两者的回归分析式分别为

$$P_M = 1.376 6P_0 - 369.9 \quad (1)$$

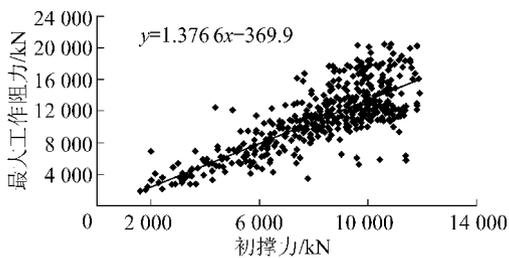


图 8 8105 工作面初撑力与最大工作阻力关系

Fig. 8 Relationship between initial load and maximum working resistance of No.8105 mining face

初撑力与最大工作阻力的线性关系说明工作面顶板岩层破断后形成悬臂梁结构, 岩梁的破断与下沉导致支架工作阻力随初撑力的增长而持续升高。

4 矿压显现特征与防治

4.1 矿压显现特征综合分析

特厚煤层采出空间大引起上覆岩层运动范围大, 以及上覆坚硬顶板结构厚度大完整性好等作用导致了煤层开采过程中上覆岩层结构断裂运动、垮落失稳异常, 从而形成不同与常规综放工作面的矿压显现特征。

1) 在工作面开采初期, 可将覆岩简化为多关键层的拱结构模型, 结构的形成、失稳与沿空巷道的压力显现相对应, 大结构的失稳决定了工作面前后采动的影响广远。沿空巷道在工作面前方 150~300 m 开始加速变形, 一直持续到工作面后方 250~300 m。

2) 受到上覆多层坚硬顶板的影响, 工作面的围

岩变形和应力表现出一定的周期性和动载特性。工作面在高低位坚硬顶板破断的作用下, 呈现周期大压和周期小压交替出现。沿空巷道在周期大压位置围岩的应力和变形变化速度发生一次突变。

3) 沿空巷道动载破坏特征显著。煤层上方赋存有多层坚硬顶板, 由于其强度和厚度大、悬顶距离长, 在工作面后方破断失稳产生的动载作用于下位沿空巷道围岩, 导致沿空巷道在采空区后方 250~300 m 表现出强烈的动载破坏特征: 围岩瞬时变形、巷道底鼓严重、锚杆(索)等支护结构遭到严重破坏。

4) 在工作面后方形成了悬臂梁结构, 综放采场采空区内形成的自由空间相对较大, 坚硬顶板使得悬臂梁结构的尺度更大, 悬臂梁的挠曲变形加剧了支架后部顶煤的破碎, 导致支架后部接顶不充分。

4.2 强矿压防治对策

针对上述矿压显现特征, 应从坚硬顶板治理和沿空巷道加强支护入手, 对强矿压显现进行防治。具体防治对策如下:

1) 坚硬顶板弱化。可在工作面运输巷和回风巷, 每间隔 50 m, 向工作面内侧沿工作面倾向在坚硬顶板岩层范围设置若干组爆破孔, 对坚硬顶板进行预裂。随着工作面的回采坚硬顶板可及时垮落, 不易形成覆岩大结构, 降低工作面 and 沿空巷道的围岩应力, 削弱多层坚硬顶板破断动载对沿空巷道的影

2) 沿空巷道吸能支护。针对强烈动载导致锚杆断裂失效。可采用恒阻大变形锚杆^[14-15]对沿空巷道围岩进行支护, 该锚杆能提供恒定的工作阻力和稳定变形量, 不仅具有较强的延展性, 而且具有较强的支护能力。

5 结 论

1) 特厚煤层大采出空间和上覆多层坚硬顶板共同作用使得上覆岩层结构断裂运动、垮落失稳异常, 形成了不同与常规综放面的矿压显现特征。

2) 工作面覆岩形成了多关键层的拱结构, 覆岩结构失稳的影响范围达到工作面前方 150~350 m 和工作面后方 250~300 m。

3) 受到上覆多层坚硬顶板的影响, 工作面的围岩变形和应力表现出一定的周期性和动载特性。工作面呈现周期大压和周期小压交替出现, 受动载影响沿空巷道围岩的应力和变形变化产生瞬时突变。

4) 针对多层坚硬覆岩下矿压显现特征, 提出了坚硬顶板破裂切顶和沿空巷道恒阻大变形锚杆吸能支护的强矿压防治技术。

参考文献 (References) :

- [1] 朱德仁, 钱鸣高, 徐林生. 坚硬顶板来压控制的探讨[J]. 煤炭学报, 1991, 16(2): 11-20.
Zhu Deren, Qian Minggao, Xu Linsheng. Discussion on control of hard roof weighting[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(2): 11-20.
- [2] 李长洪, 张吉良, 蔡美峰, 等. 煤矿冲击性灾害类型实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 1-9.
Li Changhong, Zhang Jiliang, Cai Meifeng, et al. Simulating test research of impacting disasters in coal mines[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(1): 1-9.
- [3] 郭卫彬, 刘长友, 吴锋锋, 等. 坚硬顶板大采高工作面压架事故及支架阻力分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1212-1219.
Guo Weibin, Liu Changyou, Wu Fengfeng, et al. Analyses of support crushing accidents and support working resistance in large mining height workface with hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1212-1219.
- [4] 王金安, 尚新春, 刘红, 等. 采空区坚硬顶板破断机理与灾变塌陷研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 850-855.
Wang Jinan, Shang Xinchun, Liu Hong, et al. Study on fracture mechanism and catastrophic collapse of strong roof strata above the mined area[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 850-855.
- [5] 崔磊. 寺河矿二号井15号煤层坚硬顶板采场矿压控制研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [6] 李迎富, 华心祝, 杨科, 等. 坚硬顶板上提工作面临界支护阻力计算与压架预防[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(5): 801-807.
Li Yingfu, Hua Xinzhu, Yang Ke, et al. Critical support resistance calculation in the working face of improving upper limit with hard roof and prevention countermeasures of support crushing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(5): 801-807.
- [7] 于洋. 特厚煤层坚硬顶板破断动载特征及巷道围岩控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [8] 庞绪峰. 坚硬顶板孤岛工作面冲击地压机理及防治技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- [9] 魏锦平, 靳钟铭, 汤洪. 坚硬顶板综放采场台阶式悬梁结构控制及其数值分析[J]. 湘潭矿业学院学报, 2002, 17(4): 15-19.
Wei Jinping, Jin Zhongming, Tang Yi. Numerical analysis of control of hard roof's stepped cantilever structure for longwall mining with sublevel caving[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2002, 17(4): 15-19.
- [10] 史红. 综采放顶煤采场厚层坚硬顶板稳定性分析及应用[D]. 青岛: 山东科技大学, 2005.
- [11] 王开, 康天合, 李海涛, 等. 坚硬顶板控制放顶方式及合理悬顶长度的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2320-2327.
Wang Kai, Kang Tianhe, Li Hai, et al. Study of control caving methods and reasonable hanging roof on hard roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2320-2327.
- [12] 钱鸣高, 石平武, 许家林, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [13] 魏东, 贺虎, 秦原峰, 等. 相邻采空区关键层失衡诱发矿震机理研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1957-1962.
Wei Dong, He Hu, Qin Yuanfeng, et al. Study on mechanism of mining tremor induced by key strata instability in the gob beside the working face[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1957-1962.
- [14] 何满潮, 郭志彪. 恒阻大变形锚杆力学特性及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1297-1308.
He Manchao, Guo Zhibiao. Mechanical property and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1297-1308.
- [15] He M C, Gong W L, Wang J, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67(1): 29-42.