

超长大采高综采工作面过大落差断层技术及应用

杨科^{1,2}, 王志根³, 华心祝^{1,2}, 朱若军³, 李志华^{1,2}

(1. 安徽理工大学 特殊开采研究所, 安徽 淮南 232001; 2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001;
3. 国投新集能源股份有限公司, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了确保超长大采高工作面顺利过大落差正断层, 采用相似材料模拟和数值模拟试验, 分析了大落差正断层及不同采高、不同工作面长度条件下综采工作面围岩力学特征。试验结果分析表明, 大落差断层的存在是影响工作面顶板下沉不连续、支承压力演化不均匀的主要因素, 而工作面采高和长度的增加对支承压力分布的影响小于对顶板下沉的影响, 工作面顶板最大下沉量与采高呈指数关系、与工作面长呈对数关系。提出了整体从上盘留顶破底调斜推进、局部辅助爆破破顶过F18断层的方法与技术方案, 采用具有良好控顶护帮功能的ZZ13000-27/60液压支架, 采取超高段巷道提前接顶、破碎区注浆加固等技术措施, 实现了超长大采高综采面安全、快速过大落差断层, 工程应用效果良好。

关键词: 大落差断层; 俯斜综采; 大采高; 超长工作面; 矿压控制

中图分类号: TD823.9

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)06-0089-05

Technology and application of overlong high cutting fully-mechanized coal mining face passed through overlarge drop fault

Yang Ke^{1,2}, Wang Zhigen³, Hua Xinzhu^{1,2}, Zhu Ruojun³, Li Zhihua^{1,2}

(1. Research Institute of Special Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Province and MOE Joint Key Lab of Mine Safety and High Efficient Mining, Huainan 232001, China; 3. SDIC Xinji Energy Company Limited, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to ensure overlong high cutting fully-mechanized coal mining face successfully pass through the high drop normal fault, the paper analyzed the surrounding rock mechanics features of the fully mechanized coal mining face under the high drop normal fault, different mining height and different coal mining face length. The test analysis showed that the high drop fault existed was the major factors influenced to the discontinuous subsidence of the roof above the coal mining face and the inhomogeneous evolution of the support pressure, but the mining height and face length increased of the coal mining face would have a less influence to the support pressure distribution than the roof subsidence, the max subsidence value of the roof above the coal mining face would be an exponential relationship to the mining height and would be a logarithm relationship to the length of the coal mining face. A method and technical plan was provided that the coal mining face at the top wall would keep the roof and break the floor, would be pushed forward with the inclination adjustment and would pass through F18 fault locally with an auxiliary blasting of the roof. With an application of ZZ13000-27/60 hydraulic powered support with good roof control and sidewall protection functions, the technical measures of the advance roof control of the mine ultra high section roadway, the grouting reinforcement of the broken section of the mine roadway and others were conducted, the overlong high cutting fully mechanized coal mining face was realized to safely and rapidly pass through the high drop fault and excellent engineering application results were obtained.

Key words: high drop fault; oblique fully-mechanized mining; high cutting; overlong coal mining face; mine strata pressure control

收稿日期: 2016-04-01; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.06.014

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374011)

作者简介: 杨科(1979—), 男, 四川叙永人, 教授, 博士。Tel: 0554-6668081, E-mail: keyang@aust.edu.cn

引用格式: 杨科, 王志根, 华心祝, 等. 超长大采高综采工作面过大落差断层技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 89-93, 116.

Yang Ke, Wang Zhigen, Hua Xinzhu et al. Technology and application of overlong high cutting fully-mechanized coal mining face passed through overlarge drop fault[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 89-93, 116.

0 引言

大采高综采已成为我国开采缓倾斜厚煤层(3.5~7.0 m)的主要开采方法之一,随着开采技术和装备水平的提高,采高与工作面长度也在不断增大^[1-3]。长期以来,针对深部开采条件下采高、工作面长度等开采参数变化对大采高综采工作面支承压力分布特征、煤壁片帮机理、支架-围岩关系及矿压控制技术等^[4-7],众多学者作了大量工作,推动了该技术的发展^[8-11]。

在断层等地质构造复杂的厚煤层,常由于断层或断层区的存在限制了大采高综采工作面的应用^[12-15]。针对这一问题,众多学者分析了采动作用下断层区围岩应力演化、变形及诱发动力灾害的机理,并提出了过断层的方法和技术^[16-18]。

上述研究促进了复杂条件大采高综采工作面参数设计与矿压控制技术的发展,提高了大采高综采对复杂地质条件的适应性。但针对工作面长度超过250 m、断层落差大于10 m直接推过断层的技术及矿压控制机理等研究较少。因此,根据刘庄煤矿西部采区13-1煤层赋存特征,开展超长采高综采工作面过大落差断层的矿压控制技术研究。

1 工程背景

刘庄煤矿西三采区171303工作面,所采13-1煤层厚度5.1~6.4 m,煤层倾角 $5^{\circ}\sim 9^{\circ}$,普氏系数为0.85~1.17。受F8断层($260^{\circ}\sim 280^{\circ}$, $\angle 67^{\circ}$, $H=4\sim 36$ m)影响,171303工作面为倾斜长壁刀把式布置,短工作面长168 m、加长工作面长280 m,推进长度1 066 m,工作面开采标高为-548.2~-696.6 m;F18正断层(305° , $\angle 55^{\circ}\sim 65^{\circ}$, $H=7.5\sim 16.5$ m)与工作面斜交(图1),为张性断层,F18正断层及其伴生断层影响工作面回采,沿倾斜方向长度达218 m。171303工作面顶板为复合顶板(图2)。

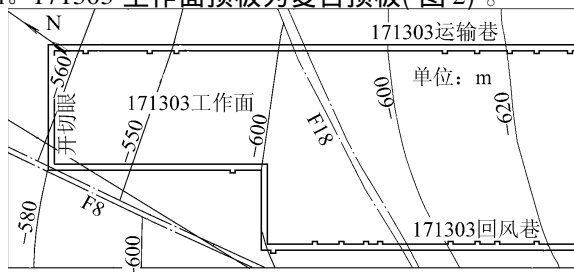


图1 171303工作面布置

Fig. 1 No. 171303 mining face layout

岩层柱状	层厚/m	岩石	岩性描述
	1.50	细砂岩	灰白色,成分以石英为主,长石次之
	1.97	砂质泥岩	灰色,致密,性脆含砂质
	0.38	碳质页岩	黑色,页片状,含炭质,质轻
	8.39	砂质泥岩	灰色,致密,性脆,分布均匀,下部含砂质。
	0.80	细砂岩	灰白色,成分以石英及长石为主
	0.19	煤	黑色,块状,由暗煤,亮煤组成
	1.22	粉砂岩	灰色,致密,较硬,含白云母碎片。
	3.76	砂泥岩互层	灰色,以细砂岩为主,细砂岩成分以石英为主矿物及白云母碎片,分选滚圆中等,泥~硅质胶
	2.99	细砂岩	浅灰~灰白色,主要成分为石英、长石
	1.22	泥岩	灰色,致密,性脆,含砂质
	5.1~6.4	13~1煤	黑色,以块状及片状为主,少量粒状,顶板以下0.6 m左右发育一层稳定的夹矸,夹矸多为炭质泥岩
	9.29	泥岩	深灰~灰色,含植物根部化石碎片
	1.79	砂质泥岩	灰色,含菱铁结核

图2 171303工作面综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of No. 171303 mining face

2 围岩力学特征试验分析

综合考虑171303工作面工程地质条件,拟采用工作面直接推过F18断层的方法过断层,不另掘开切眼。为了分析采高、采深、工作面长度变化及断层对工作面围岩力学特征的影响,分别采用相似模拟和FLAC^{3D}数值模拟模型^[19]进行了模拟试验分析。

2.1 断层区围岩变形特征

分析相似材料模拟试验结果(图3)可得:开采引起了断层上、下盘出现相对移动,受断层影响,工

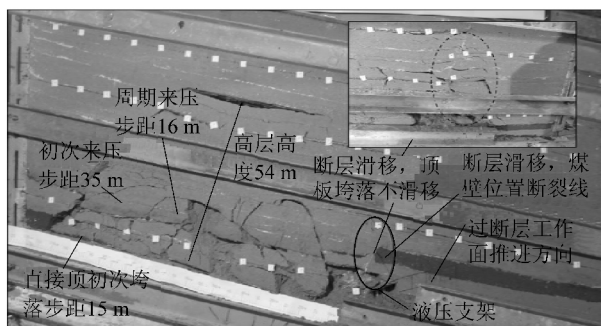


图3 工作面过断层围岩变形特征

Fig. 3 Strata behaviors during advancing in fault

工作面进入下盘后,以断层面为界,顶板下沉呈现不连续性;直接顶初次垮落步距为 15 m,基本顶初次来压步距为 35 m,周期来压步距 16 m;推进到下盘后工作面离层高度为 54 m,约为采高的 10 倍;工作面后方岩石垮落线与水平面夹角约为 48° ,工作面前方岩层垮落线与水平面夹角约为 65° 。

2.2 侧向支承压力与采高和工作面长度的关系

当工作面采高从 2 m 增加到 6 m 时,工作面前方 15 m 位置的侧向支承压力峰值随之增大(除采高 3 m 外),6 m 采高时工作面内侧向支承压力峰值约为 2 m 采高的 1.3 倍,达到 35 MPa(图 4)。

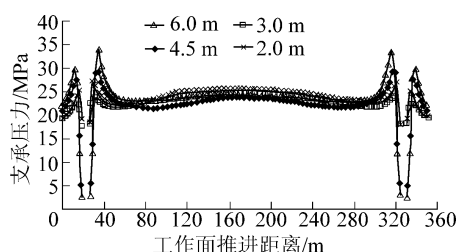


图 4 不同采高工作面侧向支承压力曲线

Fig. 4 Curves of side abutment pressure with different mining heights

当工作面长度从 150 m 增加到 350 m 时,工作面前方 15 m 位置的侧向支承压力峰值增加不明显,仅当工作面长度为 300 m 时支承压力峰值达到最大(图 5)。受应力叠加影响,工作面内支承压力峰值远大于巷道侧。

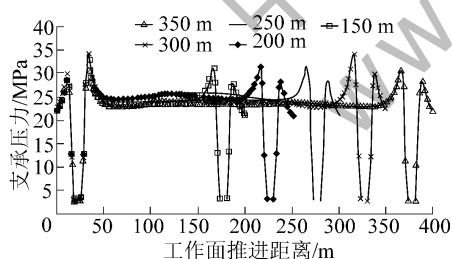


图 5 不同长度工作面侧向支承压力曲线

Fig. 5 Curves of side abutment pressure with different panel widths

2.3 顶板下沉量与采高和工作面长度的关系

工作面处顶板下沉近似为对称性,采高和工作面长度越大,顶板下沉量增加幅度越大(图 6—图 7),工作面中部顶板下沉量随采高的增加而急剧增加;随着工作面长度的增加,采场顶板下沉量逐渐增大,但在工作面两端头顶板下沉量随工作面长度的增加基本保持不变。

由回归分析可得:顶板最大下沉量(S)与采高($M=2\sim 6$ m)呈指数非线性增长关系,与工作面长度($L=150\sim 350$ m)呈对数非线性增长关系。

$$S = 247.51e^{0.1905M} \quad R^2 = 0.9652 \quad (1)$$

$$S = 647.79\ln L - 2911.4 \quad R^2 = 0.9858 \quad (2)$$

试验分析结果表明:断层在工作面回采期间沿断层面有一定程度的滑移,但矿压显现剧烈程度不高;而工作面采高和面长的增加对支承压力分布的影响小于对顶板下沉的影响。因此,支架选型除考虑初撑力和工作阻力外,还得考虑支架的可缩量 and 护帮控顶能力。

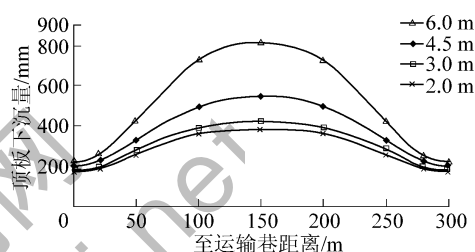


图 6 不同采高工作面顶板下沉曲线

Fig. 6 Curves of roof displacement with different mining heights

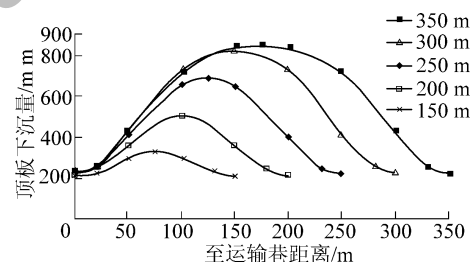


图 7 不同长度工作面顶板下沉曲线

Fig. 7 Curves of roof displacement with different panel width

3 过断层技术分析

3.1 方案比较

根据 F18 断层及其伴生断层储存特征和 171303 工作面开采特点,提出 2 种过 F18 正断层的方案。

1) 方案一:新掘开切眼跳采过断层。优点为:减少断层对工作面的影响,保护综采设备。缺点为:新掘开切眼,增加了巷道掘进工程量;工作面必须停产,且增加了原工作面收作、新装工作面初采初放等工作,影响产量和效率;留设断层保护煤柱,煤炭资源损失增加。

2) 方案二:爆破法直接过断层。优点为:减少

了巷道掘进量,较方案一缩短1个月左右工期,提高了煤炭资源采出率。缺点为:过断层时由于断层交接面处顶板岩石破碎,很容易造成工作面冒顶,而且挑顶挖底很容易损坏采煤机、带式输送机等机电设备。

综合试验结果分析和大采高综采工艺特点,从提高资源采出率、减少采掘干扰、减轻接续压力的角度考虑,选择方案二。为了综采工作面快速、安全地通过断层,保持工作面的高产高效,必须消除或减弱断层影响区的影响,尽量减少端面冒顶的发生。由于该工作面直接顶部分为砂岩,当综采工作面从断层的上盘向下盘推进时,主要采用割底板泥岩留部分顶煤并以一定的仰角爬坡的方法推进到断层下盘。

3.2 过断层技术方案

1) 当工作面推进距开切眼338 m时,运输巷侧开始进入F18断层影响区,当推进556 m时,回风巷侧过F18断层影响区,工作面受F18断层影响的倾斜长度达218 m。因此,在断层影响区内每隔30 m绘制断层影响区地质预想图,并根据工作面实际情况调整、完善断层地质图,做好超强地质预报工作。

2) 由于F18断层为正断层,加之13-1煤层顶板为砂岩、底板为泥岩,故在断层上盘需及时调整坡度破煤层底板留顶煤顺坡过渡到断层面下盘煤层。

3) 当断层距工作面上、下端头位置50 m时,可适当减小过断层调整坡度,工作面过断层调整坡度不大于 15° 。

4) 工作面过断层时,工作面推进方向按两巷底板为准进行调整,沿两巷底板进行移架,并在回风、运输巷较高处提前接顶。

5) 工作面过断层时,局部区域如需要破顶板砂岩,在采煤机割不动的情况下,采用放炮松动、破矸。

6) 为了减少丢煤和破底量,在工作面链板机及支架能够调整的情况下,尽量加大调架力度,沿煤顶推进(图8),并适当降低采高。

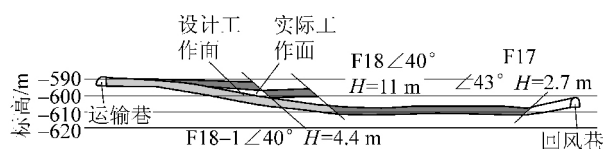


图8 沿工作面及其巷道方向剖面图

Fig. 8 Sections along headentry, tailentry and panel

4 液压支架选型与设备配套

基于试验分析,为了减小煤壁片帮深度和避免煤壁片帮,提出了控制支架失稳要坚持以“防”为

主,以“调”为辅的原则。因此,171303工作面选用ZZ13000-27/60支撑掩护式液压支架,该支架护帮板可实现“三级”伸缩护帮功能。工作面其他设备主要有ZT13800/29/55端头支架、SL500采煤机、SGZ1000/3×1000刮板输送机、SZZ-1200/700转载机、PLM-3500/250B破碎机等,运输巷超前加强支护选用ZT2×3200/18/35A自移式液压支架。

5 过断层区顶板控制与工作面管理

5.1 顶板控制

1) 当工作面位于托顶煤和断层影响区时,采煤机割煤后及时用液压支架护帮板、伸缩梁护住帮顶,在不需要挑顶段及时拉超前支架。工作面局部出现的漏冒,如果仅使用液压支架护帮板、伸缩梁及移超前架等措施仍无法控制,则采取超前插圆钢、打托棚或架棚的办法进行支护处理。

2) 工作面回风巷和运输巷在F18断层面附近因回采需要进行起底,巷道出现一段超高区域,其中回风巷高度在F18断层处达11 m。为了保证工作面开采至该处时液压支架的稳定性及支撑强度,当工作面推进至距超高区域50 m前,对其进行套棚接顶加强支护;同时,对断层面附近工作面侧松软煤体注瑞米II进行加固,防止片漏发生。

5.2 工作面管理

为了适应F18断层及其伴生断层不断变化的特点,在设备允许的范围内及时对工作面状态进行调整。采取控制仰、俯采角度及工作面断层面附近坡度的方法适应煤层,减少破矸量。该次过断层期间,工作面最大破矸段长度105 m(60架支架),正常破矸段长度80 m(46架支架)。

由于回风巷在过F18断层时局部破顶掘进,导致工作面机尾处回采过程中也局部破顶,故采用放炮破顶技术推过断层。

6 工程实践效果

基于上述分析,171303工作面采用由F18断层上盘向断层卧底推进的方法通过该断层,用85 d推过218 m断层影响区,平均每天推进2.6 m左右。每米推进煤量1360.8 t、矸石量903.8 t、损失煤量533.6 t。研究成果的应用有效提升了在过断层期间的安全和管理,保障了171303工作面安全高效开采,工作面最高日产31524 t、最高月产494140 t,取得了良好的安全、经济、技术效益。

7 结 论

1) 研究了大采高综采工作面过 16.5 m 落差正断层时矿山压力特征及支承压力、顶板下沉量与采高和工作面长度的关系,即工作面顶板最大下沉量与采高呈指数关系,与工作面长度呈对数关系。

2) 基于试验数据分析,提出了超长采高俯斜综采工作面过 F18 及其伴生断层的方法,即整体从上盘留顶破底调斜推进、局部辅助爆破破顶过 F18 断层的方法与技术方案。

3) 实施了工作面过断层区围岩稳定性控制技术,如超高段巷道提前接顶、破碎区注浆加固等,保障了超长采高综采面安全、快速过大落差断层,取得了良好工程应用效果。

参考文献(References):

- [1] 弓培林,靳钟铭. 大采高采场覆岩结构特征及运动规律研究[J]. 煤炭学报 2004 29(1): 7-11.
Gong Peilin, Jin Zhongming. Study on the structure characteristics and movement laws of overlying strata with large mining height[J]. Journal of China Coal Society 2004 29(1): 7-11.
- [2] 谢广祥. 采高对工作面及围岩应力壳的力学特征影响[J]. 煤炭学报 2006 31(1): 6-10.
Xie Guangxiang. Influence of mining thickness on mechanical characteristics of working face and surrounding rock stress shell[J]. Journal of China Coal Society 2006 31(1): 6-10.
- [3] 王家臣. 极软厚煤层煤壁片帮与防治机理[J]. 煤炭学报, 2007 32(8): 785-788.
Wang Jiachen. Mechanism of the rib spalling and the controlling in the very soft coal seam[J]. Journal of China Coal Society 2007 32(8): 785-788.
- [4] 弓培林,靳钟铭. 大采高综采顶板控制力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报 2008 27(1): 193-198.
Gong Peilin, Jin Zhongming. Mechanical model study on roof control for fully-mechanized coal face with large mining height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 193-198.
- [5] 代贵生,周海丰. 年产 1400 万 t 大采高工作面关键技术研究[J]. 煤炭科学技术 2014 42(12): 120-124.
Dai Guisheng, Zhou Haifeng. Study on key technology of high cutting coal mining face with annual coal production of 14 million tons[J]. Coal Science and Technology 2014 42(12): 120-124.
- [6] 王兆会,杨敬虎,孟浩. 大采高工作面过断层构造煤壁片帮机理及控制[J]. 煤炭学报 2015 40(1): 42-49.
Wang Zhaohui, Yang Jinghu, Meng Hao. Mechanism and controlling technology of rib spalling in mining face with large cutting height passing through fault[J]. Journal of China Coal Society, 2015 40(1): 42-49.
- [7] 王庆雄. 5m 大采高工作面过断层矿压显现规律研究[J]. 煤炭科学技术 2015 43(5): 22-25.
Wang Qing-xiong. Study on mine strata pressure behavior law during 5 m high cutting coal mining face passing through fault[J]. Coal Science and Technology 2015 43(5): 22-25.
- [8] 杨俊哲. 7m 大采高综采工作面导水断裂带发育规律研究[J]. 煤炭科学技术 2016 44(1): 61-66.
Yang Junzhe. Study on development law of water conducted zone in fully-mechanized mining face with 7m mining height[J]. Coal Science and Technology 2016 44(1): 61-66.
- [9] 伊茂森. 神东矿区浅埋煤层大采高综采工作面长度的选择[J]. 煤炭学报 2007 32(12): 1253-1257.
Yin Maosen. Selection of mechanized working face length by great height mining under shallow coal-seam in Shendong coal district[J]. Journal of China Coal Society 2007 32(12): 1253-1257.
- [10] 谢广祥,王磊. 采场围岩应力壳力学特征的工作面长度效应[J]. 煤炭学报 2008 33(12): 1336-1340.
Xie Guangxiang, Wang Lei. Effect of longwall length on mechanical characteristics of surrounding rock stress shell in mining face[J]. Journal of China Coal Society 2008 33(12): 1336-1340.
- [11] 杨永康,李建胜,康天合,等. 浅埋厚基岩松软顶板综放采场矿压特征工作面长度效应[J]. 岩土工程学报 2012 34(4): 709-716.
Yang Yong-kang, Li Jiansheng, Kang Tianhe, et al. Effect of working face length on underground pressure characteristics by fully-mechanized top-coal caving mining under shallow-buried thick bedrock loose roof[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2012 34(4): 709-716.
- [12] 李志华,华心祝,杨科,等. 超长采高工作面矿压特征影响因素分析[J]. 中国煤炭 2013 39(1): 51-54.
Li Zhihua, Hua Xinzhu, Yang Ke, et al. Influencing factors of strata behavior characteristics in super-long large mining height working face[J]. China Coal 2013 39(1): 51-54.
- [13] 李志华,冀林名,陈国祥,等. 采动影响下断层冲击矿压危险性研究[J]. 中国矿业大学学报 2010 39(4): 490-495, 545.
Li Zhihua, Dou Linming, Chen Guoxiang, et al. The risk of fault induced rockburst during mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology 2010 39(4): 490-495, 545.
- [14] 姜耀东,王涛,赵毅鑫. 采动影响下断层活化规律的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报 2013 42(1): 1-5.
Jiang Yaodong, Wang Tao, Zhao Yixin. Numerical simulation of fault activation pattern induced by coal extraction[J]. Journal of China University of Mining & Technology 2013 42(1): 1-5.
- [15] 蒋金泉,武泉林,曲华. 硬厚覆岩正断层附近采动应力演化特征[J]. 采矿与安全工程学报 2014 31(6): 881-887.
Jiang Jinquan, Wu Quanlin, Qu Hua. Evolutionary characteristics of mining stress near the hard-thick overburden normal faults[J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2014 31(6): 881-887.
- [16] 蒋金泉,武泉林,曲华. 硬厚岩层下逆断层采动应力演化与

(下转第 116 页)

- [20] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids [M]. New York: Oxford University Press, 1959: 510.
- [21] 蒋静宇, 程远平, 王亮, 等. 巨厚火成岩对下伏煤层煤与瓦斯突出事故控制作用[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 42-47.
Jiang Jingyu, Cheng Yuanping, Wang Liang, *et al.* Control of the coal and gas outburst accident in the coal and gas outburst of the giant thick igneous rock [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(1): 42-47.
- [22] Baker C E, Pawlewicz M J. Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak temperatures. A comparison of methods [J]. Fuel & Energy Abstracts, 1995, 36(4): 242.
- [23] 张晓磊. 巨厚岩体下煤层瓦斯赋存特征及其动力灾害防治技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015: 44.
- [24] 虞继舜. 煤化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 44-47.
- [25] 王亮, 程远平, 蔡春城, 等. 岩浆岩热事件对煤层变质程度和吸附-解吸特性的影响 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1275-1282.
Wang Liang, Cheng Yuanping, Cai Chuncheng, *et al.* Effect of magmatite thermal event desorption characteristics of coal metamorphism degree and adsorption [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1275-1282.
- [26] Anderson S B. Outbursts of methane gas and associated mining problems experienced at Twistdraai Colliery [C] // Proceedings of the Int. Symposium Cum Workshop on Management & Control of High Gas Emissions & Outbursts, Wollongong, 1995: 423-434.
- [27] 赵明鹏, 王宇林, 梁冰, 等. 煤(岩)与瓦斯突出的地质条件研究: 以阜新王营矿为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(1): 14-19.
Zhao Mingpeng, Wang Yulin, Liang Bing, *et al.* The study on the relationship between coal (rock) and gas outburst: taking Wangying Mine in Fuxin Area as an example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(1): 14-19.
- [28] 裴印昌, 龚邦军, 杨志. 大兴井田火成岩活动与瓦斯突出的关系 [J]. 煤炭技术, 2007, 26(5): 71-73.
Pei Yinchang, Gong Bangjun, Yang Zhi. Relation of igneous rock move and gas outburst in Daxing Well Field [J]. Coal Technology, 2007, 26(5): 71-73.
- [29] Saghati A, Pinetow K L, Grobler P G, *et al.* CO₂ storage potential of South African coals and gas entrapment enhancement due to igneous intrusions [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73(1): 74-87.
- [30] Peng S J, Xu J, Yang H W, *et al.* Experimental study on the influence mechanism of gas seepage on coal and gas outburst disaster [J]. Safety Science, 2012, 50(4): 816-821.
- [31] 程远平. 煤矿瓦斯防治理论与工程应用 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012: 203.
- [32] Xu Chao, Cheng Yuanping, Ren Ting, *et al.* Gas ejection accident analysis in bed splitting under igneous sills and the associated control technologies: a case study in the Yangliu Mine, Huabei Coalfield, China [J]. Natural Hazards, 2014, 71(1): 109-134.
- (上接第93页)
- 断层活化特征 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 267-277.
Jiang Jinquan, Wu Quanlin, Qu Hua. Characteristic of mining stress evolution and activation of the reverse fault below the hard-thick strata [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 267-277.
- [17] 王涛, 王翌华, 姜耀东, 等. 开采扰动下断层滑移过程围岩应力分布及演化规律的实验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(4): 588-592, 683.
Wang Tao, Wang Zhaohua, Jiang Yaodong, *et al.* Experimental study of stress distribution and evolution of surrounding rock under the influence of fault slip induced by mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(4): 588-592, 683.
- [18] 代进, 蒋金泉. 上下盘开采顺序对断层煤柱采动应力的影响 [J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 35-41.
Dai Jin, Jiang Jinquan. Influence of mining sequence of hanging wall and foot wall on mining-induced stress of fault coal pillar [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1): 35-41.
- [19] 祁连光. 超长采高俯斜矿压显现规律研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.