

超大采高工作面覆岩断裂结构及稳定性控制技术

庞义辉^{1,2}, 王国法¹, 张金虎¹, 刘化立³

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 102211;
3. 陕西未来能源化工有限公司 金鸡滩煤矿, 陕西 榆林 719000)

摘要:针对超大采高工作面超大空间、强扰动岩层运动带来的围岩稳定性控制难题,以金鸡滩煤矿 8.0 m 大采高开采实践为基础,采用理论分析、数值模拟等方法分析了超大采高工作面顶板岩层破坏的应力路径效应,提出了超大采高工作面顶板岩层断裂的“悬臂梁+砌体梁”结构及稳定性控制技术,并进行了超大采高工作面矿山压力实测分析。研究表明,不同层位顶板岩层的峰值应力、差应力及强度-应力比存在较大差异,直接影响顶板岩层的断裂状态及破断结构形式。金鸡滩煤矿 8 m 大采高工作面顶板岩层易形成“悬臂梁+砌体梁”结构,通过开发 ZY21000/38/82D 型超大采高液压支架、提高液压支架的强度及支架与围岩的组合刚度,实现了 8 m 大采高工作面的安全高效开采。

关键词:超大采高工作面;顶板断裂结构;围岩稳定性控制;矿山压力

中图分类号:TD323 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)11-0045-06

Overlying strata fracture structure and stability control technology for ultra large mining height working face

PANG Yihui^{1,2}, WANG Guofa¹, ZHANG Jinhui¹, LIU Huali³

(1. Coal Mining & Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Groundwater Protection and Utilization by Coal Mining, Beijing 102211, China; 3. Jinjitan Mine, Shanxi Future Energy & Chemicals Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: According to the surrounding rock stability control problems of ultra large mining height working face from super-large space and strong perturbation of rock formation, the roof damage stress path effect of ultra large mining height working face was analyzed by theoretical analysis and numerical modeling method based on the mining practice of Jinjitan Mine with 8 m ultra large mining height working face. The “cantilever beam + voussoir beam” fracture structure of roof and surrounding rock stability control technology were put forward for ultra large mining height working face. The mine ground pressure was measured and analysis for ultra large mining height working face. The results showed that the peak stress, differential stress and strength-stress ratio of sandstone in different horizons had very great difference, which influenced the roof fracture state and fracture structure form directly. The roof strata were easily form “cantilever beam + voussoir beam” fracture structure of 8 m large mining height working face in Jinjitan Mine. Through developing ZY21000/38/82D hydraulic support, improving the strength of hydraulic and the composite stiffness between hydraulic support and rock, the safety, efficiency and high exploitation rate were realized in 8 m large mining height working face of Jinjitan Mine.

Key words: ultra large mining height working face; roof fracture structure; surrounding rock stability control; strata pressure

0 引 言

厚及特厚煤层是我国井工煤矿高产、高效开采的主体煤层,广泛分布于内蒙、陕西、山西等大型矿

区,具有煤层赋存稳定、埋深较浅、硬度较大等特征,采用综采放顶煤开采技术存在顶煤冒放性差、回采率低、易自然发火等问题,非常适宜采用大采高及超大采高一次采全厚开采方法^[1-2]。

收稿日期:2017-09-30;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.11.008

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC060305);国家自然科学基金重点资助项目(U1610251);青年创新基金资助项目(2016QN007)

作者简介:庞义辉(1985—),男,河北保定人,博士研究生。Tel:010-84262167, E-mail:pangyihui@tdkcsj.com

引用格式:庞义辉,王国法,张金虎,等. 超大采高工作面覆岩断裂结构及稳定性控制技术[J]. 煤炭科学技术,2017,45(11):45-50.

PANG Yihui, WANG Guofa, ZHANG Jinhui, et al. Overlying strata fracture structure and stability control technology for ultra large mining height working face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 45-50.

由于工作面机采高度增加,导致上覆围岩开采扰动范围增大,围岩的自稳定性降低,围岩断裂失稳后的运动空间增大,极易诱发动载矿山压力及煤壁片帮冒顶等安全事故。文献[3-5]基于铰接岩块假说和预成裂隙假说提出了工作面上覆岩层的“砌体梁”力学模型及“关键层”理论,为工作面围岩稳定性控制奠定了理论基础;文献[6-7]通过分析4~5 m大采高工作面围岩的断裂、垮落过程,得出了中等坚硬、坚硬顶板岩层条件下液压支架合理工作阻力的计算方法;文献[8-9]基于“关键层”理论分析了大采高工作面覆岩破断结构及运动特征,得出了顶板断裂带高度的确定方法及围岩稳定性控制措施;文献[10-11]基于损伤力学理论分析了大采高工作面顶板岩层的断裂位置及断裂结构,得出了大采高液压支架合理工作阻力确定方法;文献[12-14]分析了超大采高工作面液压支架与围岩的强度、刚度、稳定性耦合关系,得出了大采高液压支架对围岩稳定性控制的6个参数,提出了基于支架与围岩耦合关系的液压支架适应性评价方法;文献[15-16]分析了“两硬”条件下大采高工作面顶板岩层的初次断裂特征及断裂结构,合理解释了大采高工作面分段、分期、迁移来压的现象;文献[17-18]分析了神东矿区7.0 m大采高工作面矿山压力显现特征,研究得出了大采高工作面顶板岩层断裂结构、液压支架压架事故类型及防治措施。

上述研究成果较全面的分析了大采高工作面(采高小于7.0 m)顶板岩层的断裂结构、运动特征、矿山压力显现规律及控制措施,推动了我国大采高开采技术与装备的发展进步,但尚未进行7.0 m以上大采高工作面围岩稳定性控制技术的研究。笔者以金鸡滩煤矿 2^{-2L} 煤层8.2 m大采高工作面开采实践为基础,分析了8.2 m大采高工作面顶板岩层破断的应力路径效应、断裂结构及控制方法,力图丰富和发展我国厚煤层大采高一次采全厚开采技术。

1 工程概况

金鸡滩煤矿位于陕西省榆林市榆阳区境内,主要开采侏罗系中统延安组 2^{-2L} 煤层,煤层厚度3.0~9.4 m,平均8.53 m。 2^{-2L} 108工作面位于一盘区西翼,煤层厚度5.5~8.4 m,局部含1~2层夹矸,煤层普氏系数 $f=2.6\sim 3.1$,平均 $f=2.8$,属于中等偏硬煤层,煤层倾角小于 1° ,煤层平均

埋深约为238 m。

基于工作面内JKY1号钻孔揭露情况, 2^{-2L} 煤层直接顶板为粉粒砂岩,平均厚度2.91 m;基本顶板为以细砂岩为主的粉、细砂岩互层,平均厚度19.55 m;底板为浅灰色细砂岩,平均厚度4.04 m,底板为4.04 m厚的粉砂岩。 2^{-2L} 煤层上覆基岩层厚度较大,平均厚度约为190 m,上覆松散沙土载荷层约为48 m,基载比约为3.95,不同于西部矿区典型的薄基岩、厚松散载荷层条件。

由于金鸡滩煤矿 2^{-2L} 煤层具有煤层厚度较大、煤质坚硬、埋深较浅等特征,采用传统的综采放顶煤开采方法存在顶煤冒放性差、回采率低、效率低等问题,非常适宜采用超大采高一次采全厚开采方法。基于金鸡滩煤矿一盘区西翼 2^{-2L} 煤层赋存条件,确定工作面最大采高8.0 m,倾斜长度300 m,走向长度5 538 m。

2 上覆岩层破断的应力路径效应分析

应力路径是指在外力作用下煤岩体中某一点的应力变化过程在应力坐标系中的轨迹^[19],工作面不同层位上覆岩层的应力路径将直接影响岩层的破断状态及最终破坏形式。工作面煤层开挖导致顶板岩层应力重新分布,在工作面前方岩体出现应力集中形成超前支承压力,而工作面后方顶板岩层则出现应力释放,法向载荷逐渐减小并趋于零,切向载荷逐步增加,岩层的承载能力逐渐降低。顶板岩层的破断状态及最终破坏形式不仅与岩层的材料属性、强度等有关,还受到原岩应力、采动应力及支护应力三场耦合的加、卸载方式影响。

为了分析超大采高工作面顶板岩层破断的力学机理,基于金鸡滩煤矿 2^{-2L} 煤层赋存条件及工作面开采技术参数,采用FLAC^{3D}有限差分软件建立煤层开挖的三维数值计算模型,以顶板细砂岩为例,对煤层上方不同层位细砂岩的三向主应力(σ_1 、 σ_2 、 σ_3)进行监测,将各测点的应力值连接,便可得顶板细砂岩由工作面前方的原岩应力区至工作面后方采动影响破坏区的应力路径变化,测点布置(三维网格切片)及监测结果如图1所示。

通过对图1中不同层位顶板细砂岩的应力路径曲线进行分析,顶板细砂岩的应力路径总体表现出最大主应力(σ_1 ,垂直方向)先增大后急剧降低,并且细砂岩的层位越低,其应力峰值越大,但工作面后方的应力值则越小,即应力变化幅度越大;中间主应

力(σ_2 ,水平方向)则呈现持续降低,但其降低的幅度呈现出先增加后减小;最小主应力(σ_3 ,水平方

向)则呈现先减小后增大,整体变化幅度不大,但层位越低,其变化幅度越大,且最终应力值越小。

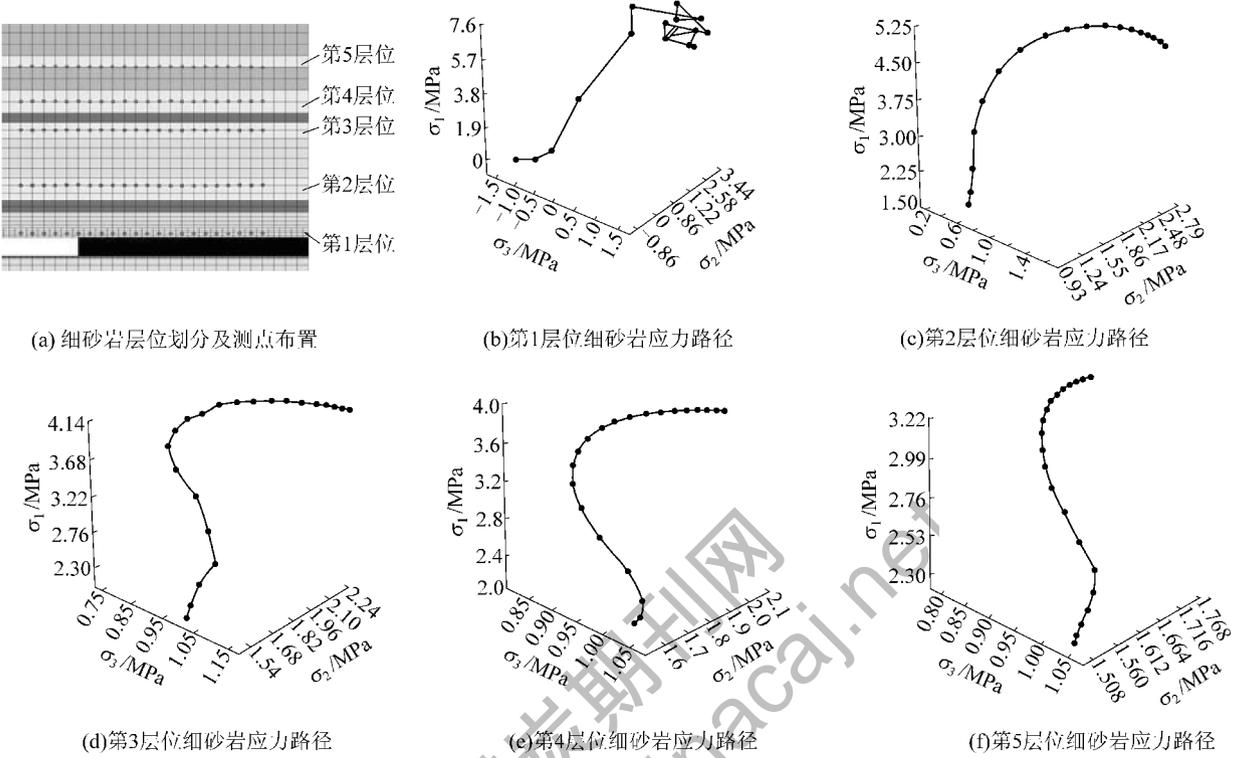
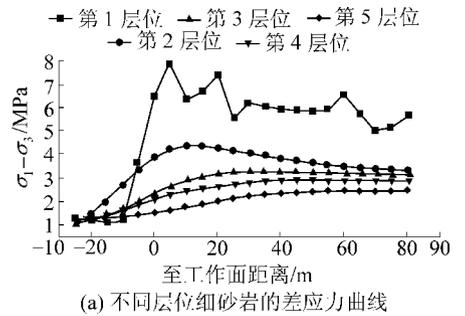


图1 不同层位顶板细砂岩的应力路径

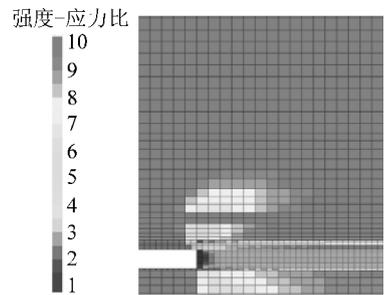
Fig. 1 Roof sandstone stress path in different horizons

由于第1层位细砂岩距离工作面非常近,在采动应力作用下细砂岩已经发生明显的塑性破坏,其应力路径比较复杂,其他层位细砂岩的应力路径则均呈现出比较规则的“C”形或“S”形。基于断裂力学理论,岩石发生破坏不仅与岩石受到的峰值应力有关,还主要受到差应力的影响,不同层位顶板细砂岩的差应力($\sigma_1 - \sigma_3$)及强度-应力比如图2所示。

通过对图2进行分析,顶板细砂岩的层位越低(距离工作面的垂直距离越小),受工作面采动影响越大,其峰值应力与差应力值也越大,而细砂岩的强度-应力比则越小,即顶板细砂岩越容易发生破坏,由此导致破坏后的块度也越小;顶板细砂岩的层位越高(距离工作面的垂直距离越大),受工作面采动影响越小,其峰值应力与差应力值也越小,并且细砂岩的强度-应力比越大,即顶板细砂岩越不容易发生破坏,由此导致岩层破断后的块度越大,破断后更容易形成自承载结构。



(a) 不同层位细砂岩的差应力曲线



(b) 不同层位岩层的强度-应力比

图2 不同层位顶板细砂岩的差应力及强度-应力比

Fig. 2 Differential stress and strength-stress ratio of sandstone in different layers

上述顶板岩层破断的应力路径效应分析结果较好的解释了低层位岩层(距离工作面垂直距离较近的岩层)更容易发生破坏,且破坏后的块度较小,难以形成自承载结构;高层位岩层则相对不容易发生破坏,需要满足一定的峰值应力、差应力、强度应力比等条件,由此导致高位岩层的垮距较大,相对较容易形成自承载结构。

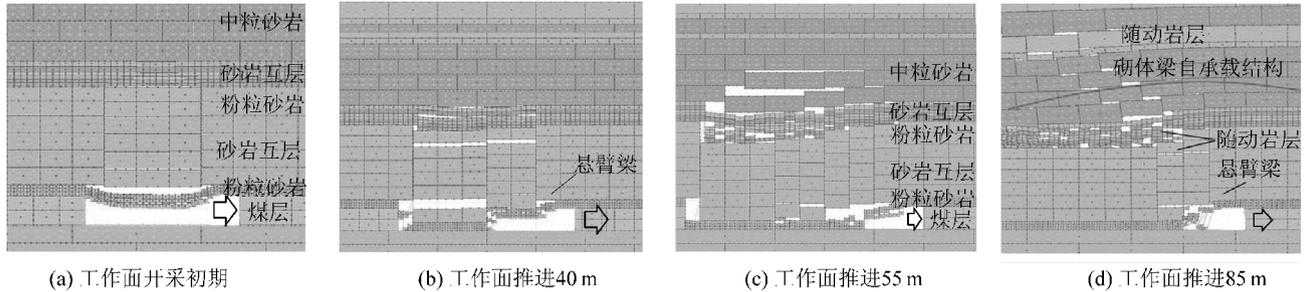


图3 “悬臂梁+砌体梁”断裂结构

Fig. 3 Fracture structure of cantilever beam + voussoir beam

在工作面开采初期,煤层开挖导致距离工作面最近的直接顶板岩层在较高的峰值应力和差应力作用下发生破坏、冒落,如图3a所示。由于工作面开采高度达到8.0 m,而直接顶板厚度仅为2.91 m,直接顶板岩层冒落后对采空区充填不充分,导致上部平均厚度为19.55 m的粉、细砂岩互层(基本顶板)断裂后难以形成承载结构。当工作面推进至40 m时,基本顶板岩层在较大的峰值应力及差应力作用下发生断裂,由于破断块度较小,采空区冒落空间较大,破断块体易发生滑落失稳,呈现出“悬臂梁”结构状态,如图3b所示。基本顶板上方厚度不大且强度较小的粉粒砂岩及砂岩互层与基本顶板同时发生破坏,此岩层形成基本顶板的随动岩层。由于采高较大,导致采动影响范围很大,上部中砂岩的下位岩层发生离层、破断。由于该岩层强度大、厚度大、距离工作面相对较远,其峰值应力及差应力相对较小,随着工作面持续推进,在该岩层中积聚的峰值应力及差应力逐渐增大,该岩层自底向上逐渐发生断裂失稳,如图3c所示。当工作面推进至85 m时,该岩层全部发生断裂,由于该岩层断裂块度较大,该岩层断裂后形成了较稳定的“砌体梁”自承载结构,如图3d所示。

由于基本顶板(砂岩互层)受到的峰值应力及差应力较大,其断裂块度小、冒落空间大,该岩层发生周期性断裂只是诱发了其上部的粉粒砂岩及砂岩互层(随动岩层)发生断裂失稳,对工作面形成的矿

3 顶板岩层断裂结构及控制技术

3.1 超大采高工作面顶板岩层断裂结构分析

基于上述顶板岩层断裂的应力路径效应分析结果,采用 UDEC 离散元程序进行了金鸡滩煤矿 8 m 大采高工作面煤层开挖过程模拟,期望得到顶板岩层断裂垮落过程及结构(图3)。

山压力相对较小。当上部中粒砂岩发生整体断裂失稳并导致下部基本顶板岩层同时发生断裂失稳时,将形成较大的矿山压力,即基本顶板及随动岩层周期性断裂形成了强度较小、垮距较小的周期来压,而中粒砂岩断裂并促使基本顶板岩层断裂则形成了强度较大、垮距较大的周期来压。模拟结果显示,工作面小周期来压步距平均约为15 m,大周期来压步距平均约为30 m。

3.2 工作面围岩稳定性控制技术

综采液压支架是工作面支护顶板、防护煤壁、隔绝采空区矸石的主要支护设备,其对围岩的适应性及可靠性直接影响工作面围岩稳定性控制效果。为了防止工作面初次来压时形成较大的冲击动载荷,工作面自开切眼向前推进6.4 m时进行了初次放顶。

基于2⁻²108超大采高工作面顶板岩层断裂的“悬臂梁+砌体梁”结构,研发了ZY21000/38/82D型超大采高液压支架,设计采用了缸径为530 mm的增容缓冲抗冲击双伸缩立柱及支架立柱高压自动补偿系统,有效提高液压支架的强度及工作面“底板+液压支架+直接顶板”的组合刚度。基于超大采高工作面支架与围岩的刚度耦合关系^[20],利用支架立柱高压自动补偿系统可有效提高工作面“底板+液压支架+直接顶板”的组合刚度,从而影响上覆顶板岩层断裂线与液压支架的相对位置,即通过提高支架与围岩的组合刚度,促使顶板岩层断裂线相对

液压支架向采空区方向移动,从而降低顶板岩层断裂失稳对液压支架形成的冲击载荷大小及作用时间。

为了适应超大采高工作面动载矿山压力对液压支架的冲击,支架立柱首次采用了4 000 L/min 先导式大流量安全阀,同时配套500 L/min 安全阀。当工作面动载矿压较小且持续时间较短时,配套的500 L/min 安全阀开启卸压;当工作面出现载荷较大、持续时间较长的动载矿压时,配置的4 000 L/min 先导式大流量安全阀开启卸压,液压支架及时进行让压与保压,维护工作面安全作业空间。

ZY21000/38/82D 型超大采高液压支架设计采用护帮高度超过4.0 m 的三级协动护帮装置,维护工作面煤壁的稳定性;设计最大抬底力达988 kN 的抬底座装置,提高支架对底板的适应性;设计采用超大流量电液控制快速移架系统及三进三回环形供液系统,提高工作面推进速度,将矿压甩入采空区。

4 超大采高工作面围岩控制效果分析

金鸡滩煤矿 $12^{-2\pm}108$ 超大采高工作面于2016年6月开始井下调试及试生产,工作面开切眼位置煤层相对较薄,随着工作面推进,工作面采高逐渐增大至8.0 m。在工作面开采初期,由于采高相对较小,工作面矿山压力显现不太明显,当工作面推进至38 m 时,基本顶板发生断裂来压,随着采高增大,工作面矿山压力显现逐渐加剧,当工作面推进至98 m 时,上覆中粒砂岩层发生断裂失稳,在工作面形成了较大的冲击压力,液压支架安全阀开启让压。

由于开采初期煤层厚度较薄,仅为5.8~6.5 m,随着工作面推进煤层厚度逐渐增大至8.0 m,因此选择工作面推进至1 600~3 000 m 期间的矿山压力实测数据及工作面控制效果,如图4所示。

$12^{-2\pm}108$ 超大采高工作面矿山压力总体呈现中部压力较大、两端压力较小的规律,并随着采高增加工作面动载矿山压力显现加剧。工作面平均周期来压步距约为18.56 m,工作面存在大小周期来压及动载矿压现象,大周期来压步距约为28.7 m,小周期来压步距约为15 m,其矿山压力观测结果符合“悬臂梁+砌体梁”破断结构特征。

研发的ZY21000/38/82D 型超大采高液压支架及围岩稳定性控制技术能够较好的适应 $2^{-2\pm}$ 煤层赋存条件, $12^{-2\pm}108$ 超大采高工作面达到日产5.7万t、月产150万t以上水平,实现了8.0 m 大采高

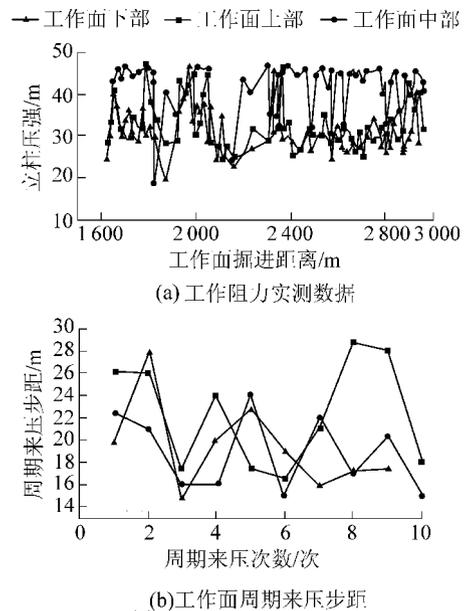


图4 工作面矿山压力实测分析及控制效果
Fig.4 Mine pressure analysis and control effect

工作面安全高效开采。

5 结 论

1) 工作面上覆细砂岩的应力路径总体呈现C形或S形,并且细砂岩层位越低,其峰值应力及差应力越大,而强度-应力比则越小,导致距离工作面越近的岩层越易发生破坏,且破坏块度越小,越难以形成承载结构。

2) 金鸡滩煤矿 $2^{-2\pm}$ 煤层超大采高工作面顶板岩层易形成“悬臂梁+砌体梁”断裂结构,工作面最危险情况为上部“砌体梁”结构失稳,并诱发下部“悬臂梁”岩层同时断裂,对支架形成较大的冲击动载荷。

3) 研发了ZY21000/38/82D 型超大采高液压支架,设计采用 $\phi 530$ mm 大缸径增容缓冲抗冲击双伸缩立柱、立柱高压自动补偿系统、4 000 L/min 先导式大流量安全阀等围岩稳定性控制措施,有效提高液压支架的强度及支架与围岩的组合刚度。

4) $12^{-2\pm}108$ 超大采高工作面矿山压力实测结果符合“悬臂梁+砌体梁”破断结构特征,开发的超大采高液压支架及围岩稳定性控制技术实现了8.0 m 大采高工作面的安全高效开采。

参考文献 (References):

- [1] 王东东,邵龙义,刘海燕,等.超厚煤层成因机制研究进展[J].煤炭学报,2016,41(6):1487-1497.

- WANG Dongdong, SHAO Longyi, LIU Haiyan, *et al.* Research progress in formation mechanisms of super-thick coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1487-1497.
- [2] 孟宪锐, 王鸿鹏, 刘朝晖, 等. 我国厚煤层开采方法的选择原则与发展现状[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(1): 39-44.
- MENG Xianrui, WANG Hongpeng, LIU Chaohui, *et al.* Selection principle and development status of thick seam mining methods in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(1): 39-44.
- [3] 钱鸣高, 缪协兴. 采场上覆岩层结构的形态与受力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1995, 14(2): 97-106.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing. Theoretical analysis on the structural form and stability of overlying strata in longwall mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(2): 97-106.
- [4] 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.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(3): 225-230.
- [5] 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.
- [6] 赵宏珠. 大采高支架的使用及参数研究[J]. *煤炭学报*, 1991, 16(1): 32-38.
- ZHAO Hongzhu. Application of support with great mining height and study of its parameters[J]. *Journal of China Coal Society*, 1991, 16(1): 32-38.
- [7] 赵宏珠, 宋秋爽. 特大采高液压支架发展与研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, 24(3): 265-269.
- ZHAO Hongzhu, SONG Qiushuang. Development of hydraulic support for super great mining height[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 24(3): 265-269.
- [8] 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.
- [9] 弓培林, 靳钟铭. 大采高综采采场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.
- [10] 郝海金. 长壁大采高开采上覆岩层结构及采场支护参数的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.
- [11] HAO Haijin, ZHANG Yong. Stability analysis of coal wall in full-seam cutting work face with fully-mechanized in thick seam[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2005, 24(4): 489-491.
- [12] 王国法, 庞义辉, 李明忠, 等. 超大采高工作面液压支架与围岩耦合作用关系[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 518-526.
- WANG Guofa, PANG Yihui, LI Mingzhong, *et al.* Hydraulic support and coal wall coupling relationship in ultra large height mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 518-526.
- [13] 王国法, 庞义辉. 基于支架与围岩耦合关系的支架适应性评价方法[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(6): 1348-1353.
- WANG Guofa, PANG Yihui. Shield-roof adaptability evaluation method based on coupling of parameters between shield and roof strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1348-1353.
- [14] 庞义辉, 王国法. 基于煤壁“拉裂-滑移”力学模型的支架护帮结构分析[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(8): 1941-1950.
- PANG Yihui, WANG Guofa. Hydraulic support protecting board analysis based on spalling “tensile cracking-sliding” mechanical model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(8): 1941-1950.
- [15] 王家臣, 张剑, 姬刘婷. “两硬”条件大采高综采老顶初次垮落力学模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(S1): 5037-5042.
- WANG Jiachen, ZHANG Jian, JI Liuting, *et al.* Study on mechanics model of the first cave in main roof for the large cutting height fully mechanized mining under the two hard conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 21(S1): 5037-5042.
- [16] 王家臣, 王兆会. 浅埋薄基岩高强度开采工作面初次来压基本顶结构稳定性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(2): 175-181.
- WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Stability of main roof structure during the first weighting in shallow high-intensity mining face with thin bedrock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32(2): 175-181.
- [17] 许家林, 鞠金峰. 特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(8): 1547-1556.
- XU Jialin, JU Jinfeng. Structural morphology of key stratum and its influence on strata behaviors in fully-mechanized face with super-large mining height[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(8): 1547-1556.
- [18] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵. 浅埋特大采高综采工作面关键层“悬臂梁”结构运动对端面漏冒的影响[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(7): 1197-1204.
- JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Influence of key strata cantilever structure motion on end-face fall in fully-mechanized face with super great mining height[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 39(7): 1197-1204.
- [19] 孙奇. 复杂应力路径下饱和砂土动力特性试验研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2015.
- [20] 王国法, 庞义辉. 液压支架与围岩耦合关系及应用[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 30-34.
- WANG Guofa, PANG Yihui. Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 30-34.