

浅埋近距煤层群开采扰动载荷传递作用分析

曹建涛^{1,2}, 来兴平^{1,2}, 葛睿智^{1,2}

(1. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对陕北浅埋近距煤层下层煤层开采顶板来压剧烈的问题, 采用物理相似模拟实验以及理论分析的方法, 对浅埋近距煤层薄顶板载荷传递作用进行了分析, 深入研究了浅埋煤层长壁开采的矿压显现规律、顶板破坏机理与载荷传递之间的规律。研究表明, 浅埋近距煤层矿压显现的基本特点是载荷传递作用明显, 来压强度剧烈, 超前应力峰值主要集中在工作面前方 20 m 左右, 超前支承压力显著影响距离为 40 m 左右, 一般在 6~10 MPa, 应力集中系数范围在 2~3.3。薄顶板破断首先在煤壁前方老顶上部产生拉裂隙, 薄顶板所受荷载较大且破坏严重, 顶板周期性破断形成微弧层状岩板, 层状岩板回转可形成铰接结构, 出现“二次成拱”现象。经过计算得出载荷传递因子为 4.66。通过声发射监测得出, 信号以高频率高能量信号为主, 声发射信号由小突然增大, 或是在连续增加时突然减小, 表明岩层发生明显荷载传递作用。

关键词: 浅埋近距煤层; 薄顶板; 载荷传递

中图分类号: TU 11

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0215-05

Analysis of mining disturbance loading transmission in shallow close coal seams group

CAO Jiantao^{1,2}, LAI Xingping^{1,2}, GE Rui zhi^{1,2}

(1. Energy School, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2. Key Laboratory of Western Mines and Hazard Prevention, Ministry
of Education of China, Xi'an 710054, China)

Abstract: The study on loading transmission of thin coal roof in shallow contiguous coal seams was applied by physical simulation experiments in order to solve the problem of severe roof weighting. Traits of underground pressure and relationships between roof fracture and loading transmission were clear. It indicated that strata behaviors in the study area were salient definitely and pressure intensity was violent in general. The distance between working face and stress peak zone is about 20 m while the distance of abutment pressure significantly affect is about 40m. The value of stress is generally 6 ~ 10 MPa and the range of stress concentration factor is 2 to 3.3. The same vein main roof was apt to cause tension cracks in the front of the working face. Periodic pressure resulted in bedded rock plates being differential arc which would rotate to form hinge structure ebringing about the phenomena of re-arch. The load-transmitting factor is 4.63 by calculating. According to acoustics emission (AE) monitoring, high frequency and energy signals were dominant. Furthermore, strata caused obvious loading transmission when AE signals increased abruptly or decreased after continuously raising.

Key words: shallow contiguous coal seams; thin coal roof; loading transmission

在我国西部浅埋煤层赋存较为广泛, 其储量占到全国探明储量的 1/3 左右, 浅埋煤层开采适用范围广泛。但浅埋煤层开采时矿山压力显现剧烈, 具有十分明显的动力载荷传递现象。浅埋近距煤层群的长壁大规模开采使采动影响范围巨大, 裂隙可直接贯通地表, 导致井工开采活动对地表环境的影响极为敏感, 极易引起煤层自燃、水体流失与地表植物死亡等安全与环境灾害, 且浅埋

近距煤层开采所引起的力学现象和岩层控制问题具有特殊性, 掌握浅埋近距煤层薄顶板载荷传递作用过程是解决上述难题的重要基础, 具有重要的理论和实际意义^[1-5]。

浅埋近距煤层薄顶板的破断和来压时, 并非其全重量都作用于关键层, 存在载荷传递效应。因此, 有必要研究采动破坏规律, 确定载荷传递因子, 揭示顶板动压机理, 为正确建立顶板关键

收稿日期: 2016-01-20

修改稿日期: 2017-03-20

基金项目: 国家重点基础研究计划(973)基金资助项目(2015CB251600); 国家自然科学基金重点资助项目(U1361206);

作者简介: 曹建涛(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事采空区动力灾害预报与控制研究。E-mail: 463583050@qq.com.

层动态结构控制理论奠定基础. 薄基岩顶板关键层的运动将直接影响到地表沙土层的塌陷, 基岩关键层的结构不仅是解决工作面顶板支护控制的关键, 也是地表沙土层及其隔水层裂缝形成和塌陷控制的基础, 文献[6-14]研究成果为浅埋近距煤层群开采扰动载荷传递作用的研究提供了基础.

1 开采技术条件

矿井赋存有2#煤层和4#煤层, 煤层呈层状平均倾角为2°, 2#煤层平均埋深100 m, 最浅处埋深仅为30 m, 具有浅埋煤层特点, 2#煤层平均厚度2.4 m, 4#煤层平均厚度4.2 m, 2#煤层和4#煤层平均间距18 m, 具有近距煤层特点, 结构简单层位稳定. 盘区内2#煤层已开采完毕, 存在1201和1202工作面开采后留下的采空区, 目前正在开采4#煤层, 已开采完毕1401工作面, 正在进行1402工作面开采和1403工作面巷道的掘进工作, 1402工作面正上方是已开采的2#煤层1201工作面采空区及煤柱, 且间距仅有18 m薄顶板, 左侧是1401工作面采空区, 中间间隔有20 m煤柱, 右侧是1403掘进工作面, 间隔有53 m煤柱. 1402工作面所处位置特殊, 应力传递现象明显, 巷道矿压显现猛烈, 两帮片帮破坏严重, 由于顶板较薄, 局部区域发生冒顶事故, 煤层开采后与地表贯穿, 与地表水体沟通及漏风引发风化严重煤体发生自燃, 对安全生产造成重大影响. 1402工作面与其他掘进、回采工作面及采空区位置关系如图1所示.

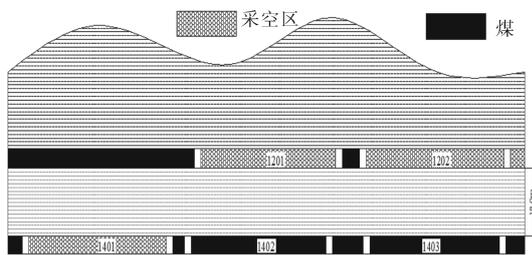


图1 工作面及采空区位置关系

Fig. 1 Spatial relations between working face and mined-out areas

2 浅埋近距煤层薄顶板载荷传递实验

2.1 实验模型建立

以冯家塔煤矿1201和1402工作面为开采模拟对象, 模拟两个工作面长度分别为240 m和270 m, 采高分别为3.1 m和4.0 m, 进行单一走向长

壁开采后, 研究地表和2#与4#煤层之间岩层的移动变形规律以及工作面覆岩结构及力学传递特性. 实验的几何相似比为1:100, 容重相似比为1:1.6. 模拟区域4#煤层的平均埋深为120.0 m, 其中黄土层厚度约4.5 m, 岩层总厚度为115.5 m, 2#与4#煤层之间岩层仅为18.0 m, 煤层剖面图如图2所示.

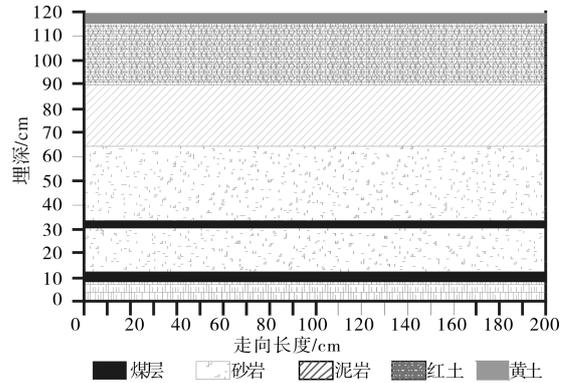


图2 2m平面物理相似模拟实验

Fig. 2 Schematics of 2m plate physical simulation experiments

2.2 实验监测设备布置

采用压力传感器分析开采过程中应力传递规律, 声发射监测仪监测开采扰动产生的围岩损伤特征, 采用全站仪监测覆岩移动与变形规律.

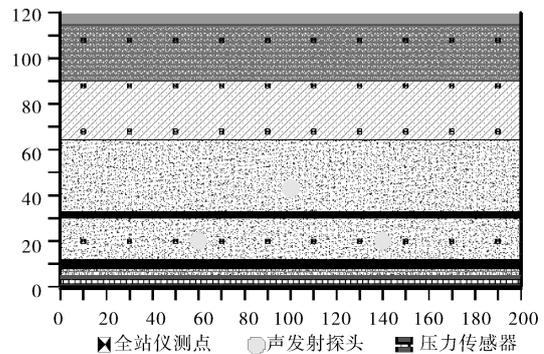


图3 应力、变形及声发射测点布置

Fig. 3 Layout of "S-AE-D" measurement points

试验中岩层移动测点共布置4排, 水平间距20 cm, 竖直方向上分别距4#煤层底板18 cm、60 cm、80 cm以及100 cm; 应力传感器布置于试验台底部, 共40个; 布置3个声发射传感器, 呈等腰三角形, 1和2传感器布置在2#与4#煤层薄顶板中, 距左右边界各0.60 m处, 监测2#和4#煤层开采中对薄顶板的影响. 3传感器布置厚基岩距2#煤层上方0.10 m处, 监测2#与4#煤层开采过程中对主关键层的影响. 测点布置示意图如图3所示.

2.3 岩层破坏特征

(1) 工作面的初次来压

如图4所示,工作面推进40 cm时,基本顶暴露长度到达极限跨距,基本顶岩层断裂形成初次垮落,发生初次来压,压力约为6 MPa,矿压显现剧烈。

(2) 周期来压时期基本顶的“层状”破坏

如图5所示,当工作面推进至64 cm时,工作面发生第一次周期来压,基本顶岩层呈“层状”破坏形成离层带,周期来压步距为24 cm,顶板断裂长度为64 cm,垮落高度为26 cm。工作面压力约为6.2 MPa,工作面的压力由暴露直接顶以及基本顶转移的附加荷载构成。



图4 工作面初次来压破坏

Fig. 4 Initial strata behaviors after excavation

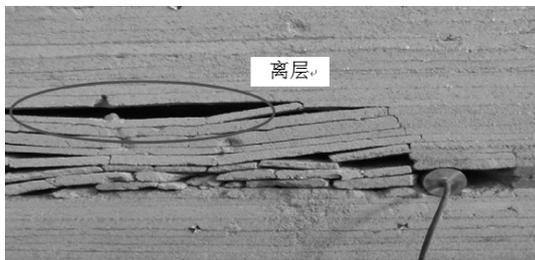


图5 周期性“层状”破坏

Fig. 5 Periodic strata behaviors as bedded form

(3) 充分采动下形成的“平拱”状破坏

工作面开挖至充分采动的距离,薄基岩基本顶岩层断裂冒落形成“平拱”结构,如图6所示。薄顶板从工作面煤壁向后方形成80°弧线破坏,同时煤壁上方在拉应力作用下产生垂直向下形成贯通性裂缝。冒落基本顶的岩块宽度和顶板周期垮落步距相当,工作面继续推进到102.5 m时,基本顶断裂产生第二次周期来压,压力约为8 MPa。由于来压强度更为猛烈,工作面压力瞬间急剧增大,压力达到9 MPa,导通了2#煤层与4#煤层18 m薄基岩,将2个采空区垮落叠加。

(4) 近距围岩的“二次成拱”现象

周期来压期间,在近距顶板岩块的回转运动作用下,两个破断岩块上的弧形岩柱内形成二次

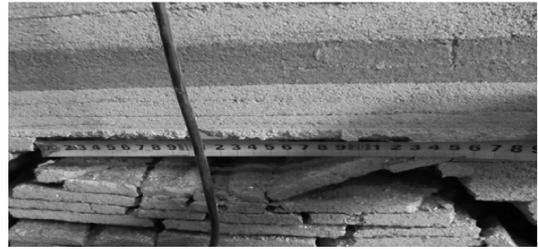


图6 4#煤层顶板塌陷形成的悬顶距离

Fig. 6 Hanging distance after roof collapse in 4# coal seams

“卸荷拱”,出现“二次成拱”现象。

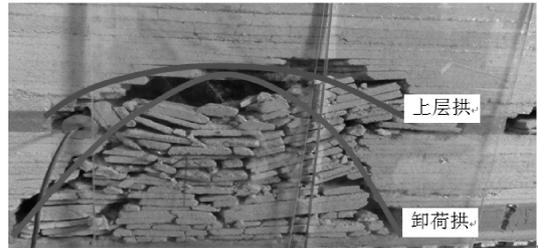


图7 塔形岩柱内形成“卸荷拱”

Fig. 7 Unloading arch in pyramid-shaped rock pillar

采上层煤时第一次所形成“平拱”,拱高较低,跨度较大,影响高度较小,载荷传递作用较小,当开采完第二层煤时,中间薄顶板破坏,形成拱高较大,跨度较小的“卸荷拱”,载荷传递作用明显,通过图7可以发现,顶板结构关键承载力向下转移,体现出载荷传递特征。

3 岩层载荷传递作用

3.1 载荷传递卸压拱力学模型

未经开采前,煤层中的垂直应力为原岩应力 F_1 ,即:

$$F_1 = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1)$$

式中: γ_i 表示上覆岩层各个分层的容重, h_i 表示各分层的高度。

随着煤层的开挖,从老顶初次垮落到顶板出现离层状态,工作面顶板压力不断发生变化,经过充分采动,上层顶板逐渐形成小的卸荷拱,由于是近水平煤层,假设形成拱为理想拱曲线,主要在垂直方向上收到均匀分布的载荷,由于其稳定,拿出右半部分进行分析,可以得出右拱脚的水平分力 F_h 以及垂直分力 F_v ,如图8所示。

$$\sum F_x: T - F_h = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_y: \frac{1}{2}ql - F_v = 0 \quad (3)$$

$$\sum M_{x=0,y=0} : \frac{1}{8}ql^2 - \frac{1}{2}F_v l + F_h = 0 \quad (4)$$

式中： T 表示左半拱的推力； q 表示拱上承受的均布载荷； l 为拱长； h 为拱高。

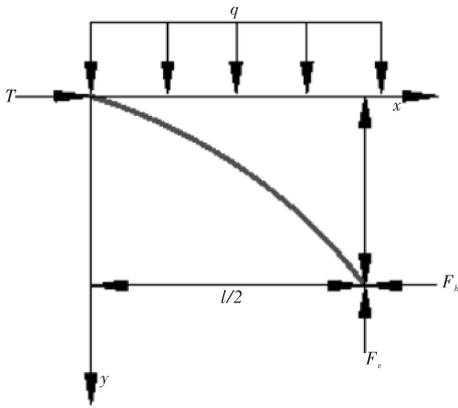


图 8 卸荷拱力学模型

Fig. 8 Mechanical model of unloading arch

应用工程力学知识得出：

$$F_v = \frac{1}{2}ql \quad (5)$$

$$T = F_h = \frac{ql^2}{8h} \quad (6)$$

同理可知，当开采煤层贯通上层工作面时，其拱脚的垂直压力联立式(1)和式(5)可得出卸荷拱的垂直压力传递因子 k ：

$$k = ql / (2 \sum_{i=1}^n y_i h_i) \quad (7)$$

3.2 应力变化及传递分析

图 9 所反映出的是随着下层工作面的向前推进，工作面煤壁前方超前压力变化规律。实验显示，支承压力的超前应力峰值主要集中在工作面前方 20 m 左右(预计在 10~13 m 范围内比较强烈)，应力降低区处于 50~120 m 范围。超前支承压力的影响范围大致为 0~60 m，显著影响距离为 40 m 左右；支承压力大小一般在 6~10 MPa，相应的应力集中系数范围在 2.0~3.3，相比于上层煤的开采，下层薄顶板的影响体现在超前支撑压力的影响范围较小，但支承压力值会有所增加。工作面正上方存在 8 m 左右的应力降低区，再此区域中的煤壁上方直接顶存在的拉应力会导致直接顶和老顶被拉裂，大大增加了顶板大面积切落危害的可能性，如果在采空区范围内出现切落，将可能会发生压坏支架和其带来的一系列重大安全事故。

图 10 分析了工作面开采过程中工作面压力随着开采距离之间增加时所发生的变化规律，从

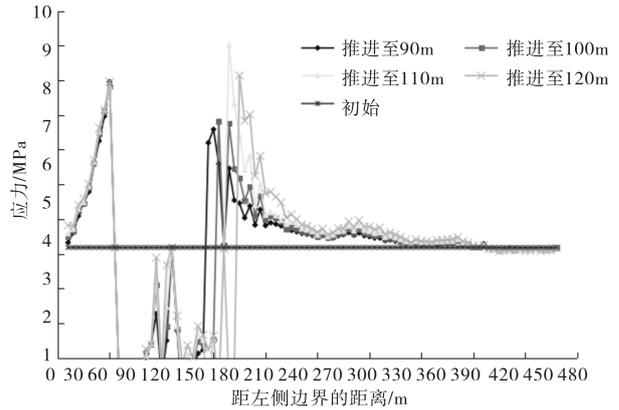


图 9 周期来压应力分布曲线

Fig. 9 Distribution curve of periodic pressure

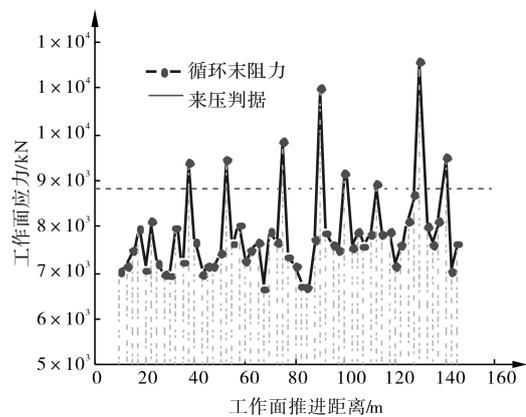


图 10 工作面压力与工作面推进距离的关系

Fig. 10 Relationship between pressure and distance

而给出了周期来压的判据。实验表明，当工作面压力超过 8 800 kN 时，工作面压力发生突增，推断出此时是由于上下两层煤之间的距离较短，下层较薄的老顶产生的周期断裂的动压会直接导通上煤层的采空区，工作面应力发生传递，经过计算可以得出传递因子

$$k = \frac{102.5 \times 1\ 562 \times 10}{2 \times (1\ 562 \times 18 + 812.5 \times 3.1 + 1\ 562 \times 90.4)} = 4.66$$

可以看出，下煤层开采时，由于浅埋的两层煤间距较小，下煤层的薄顶板断裂极易导通上煤层开采过后的采空区，工作面由于上方压力传递会对下方工作面产生高压，可能会出现支架突然压死等现象，为了防止此类现象出现，可以适当提高开采速度，增加支架的工作阻力。

3.3 声发射能量传递分析

随着多次开采扰动作用岩体内部应力不断集中，塑性区内裂隙不断萌生且持续延伸扩展。随着上覆薄顶板能量的不断积聚，薄顶板的破裂速度不断加快、破裂范围不断扩大。通过分析此过程的声发射信号，第一阶段为模型内的原生裂隙开始扩展阶段，能率约为 30，第二阶段为能量累

积阶段, 能量开始积聚, 声发射由小骤增, 以高频率高能量信号为主, 能率约为 150 左右, 第三阶段为能量传递阶段, 能率增加到 195 以上时或是在连续增加时突然减小, 此过程能量发生了传递. 如图 11 所示.

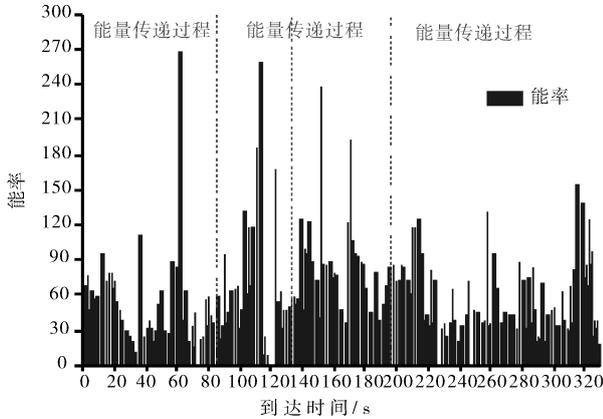


图 11 声发射能率与到达时间关系特征

Fig. 11 Traits of energy rate and arrival time from AE

3.4 岩层移动分析

当工作面推进 65 m 时, 直接顶岩层瞬间垮落, 垮落高度为 5 m, 随着工作面的推进, 顶板岩层逐步冒落范围不断扩大, 当基本定岩层断裂且冒落后岩块被压实, 引发地表下沉, 当工作面推进到 100 m 距离时离层发育, 当工作面推进到 160 m 时, 顶板岩层垮落导致地表岩层大范围移动, 达到最大下沉值, 最大下沉量为 4.7 cm. 如图 12 所示.

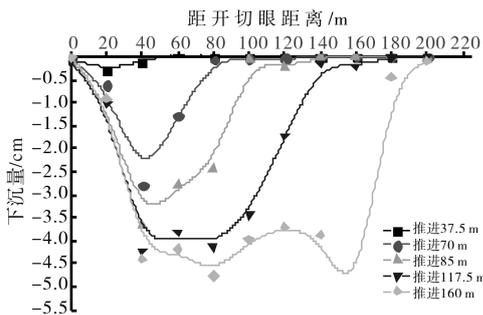


图 12 全过程下沉曲线

Fig. 12 Subsidence plots in the experiments

4 结论

通过物理相似模拟实验, 运用理论计算及声发射、压力传感器等监测手段, 对浅埋近距煤层薄顶板移动和破坏规律以及上下煤层之间的载荷传递作用进行了分析, 研究了浅埋近距薄顶板煤层长壁开采的顶板破坏、矿压显现和载荷传递之间规律. 通过分析得到以下结论:

(1)浅埋近距薄顶板煤层矿压显现的基本特点为工作面薄顶板荷载较大、来压剧烈、破坏严重, 有较明显的载荷传递现象, 剧烈的来压下岩层运动直接波及地表.

(2)基本顶岩层呈“层状”破坏形成离层带, 薄基岩老顶断裂形成“金字塔”状破坏, 形成二次“卸荷拱”体现出载荷传递特征.

(3)超前应力峰值主要集中在工作面前方 20 m 左右, 影响范围大致为 0~60 m, 压力大小为 6~10 MPa, 应力集中系数为 2~3.3, 应力传递因子 $K=4.66$.

参考文献 References

[1] 侯忠杰, 谢胜华, 张杰. 地表厚土层浅埋煤层开采模拟实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2003, 23(4): 357-360.
 HOU Zhong jie, XIE Sheng hua, ZHANG Jie. Simulation test studying in shallows seam mining under thick soil of the earths surface [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(4): 357-360.

[2] 侯忠杰, 张杰. 地表厚土层浅埋煤层开采模拟实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2004, 23(5): 577-580.
 HOU Zhong jie, ZHANG Jie. Criterion of broken and limit stride calculation in shallow coal seam covered with thick loose layer [J]. Journal of Lianning Technical University(Natural Science Edition), 2004, 23(5): 577-580.

[3] 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.
 HUANG Qing xiang. Study on roof structure and ground control in shallow seam long wall mining [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000.

[4] 黄庆享, 钱鸣高, 石平五. 浅埋煤层采场老顶周期来压结构分析[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 581-585.
 HUANG Qing xiang, QIAN Ming gao, SHI Ping wu. Structural analysis of main roof stability during periodic weighting in long wall face[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 581-585.

[5] 张杰. 地表厚土层浅埋煤层开采模拟实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 161-164.
 ZHANG Jie. Influence of mining height of main roof on broken length [J]. Journal of Lianning Technical University(Natural Science Edition), 2009, 28(2): 161-164.

[6] 杨鹏, 冯武林. 神府东胜矿区浅埋煤层涌水溃砂灾害研究[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(S): 65-69.
 YANG Peng, FENG WU lin. Research on disaster of water inrush and sand inrush in shallow seam of Shen fu Dong sheng mining area [J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(S): 65-69.

- time substructuring testing system [J]. *Engineering Structures*, 2012 (41): 258-269.
- [3] CHAE Y, RICLES J M, SAUSE R. Large-scale real-time hybrid simulation of a three-story steel frame building with magneto-rheological dampers [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, 43(13): 1915-1933.
- [4] NAKASHIMA M, KATO H, TAKAOKA E. Development of real-time pseudo dynamic testing [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21(1): 79-92.
- [5] 王倩颖, 吴斌, 欧进萍. 考虑作动器时滞及其补偿的实时子结构实验稳定性分析[J]. *工程力学*, 2007, 24(2): 9-14.
WANG Qian ying, WU Bin, OU Jin ping. Stability analysis of real-time substructure testing considering actuator delay and compensation [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(2): 9-14.
- [6] AHMADIZADEH M, MOSQUEDA G, REINHORN A M. Compensation of actuator delay and dynamics for real-time hybrid structural simulation[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2008, 37(1): 21-42.
- [7] CHEN C, RICLES J M. Tracking error-based servo hydraulic actuator adaptive compensation for real-time hybrid simulation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(4): 432-440.
- [8] LAMARCHE C P, TREMBLAY R, LEGER P, et al. Comparison between real-time dynamic substructuring and shake table testing techniques for nonlinear seismic applications [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2010; 39(12): 1299-1320.
- [9] 许国山, 吴斌. 采用等效力控制方法的非线性结构实时子结构试验[J]. *振动工程学报*, 2010, 23(3): 237-242.
XU Guo shan, WU Bin. Real-time substructure testing of nonlinear structures with equivalent force control method [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2010, 23(3): 237-242.
- [10] 王菲, 姜南. 土-结构三维动力分析的线性-非线性混合子结构法[J]. *工程力学*, 2012, 29(1): 155-160.
WANG Fei, JIANG Nan. 3d dynamic analysis of soil-structure interaction system based on mixed linear-nonlinear substructure method [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(1): 155-160.
- [11] 郭珺, 唐贞云, 陈适才等. 试件-加载系统相互作用对实时子结构试验系统稳定性影响[J]. *工程力学*, 2016, 33(11): 59-67.
GUO Jun, TANG Zhen yun, CHEN Shi cai. The influence of specimen-transfer-system interaction on the stability of real-time substructuring system [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(11): 59-67.
- [12] RICHARD C, ROBERT H. *Modern Control Systems*. 11th ed. [M]. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall, 2008; 356-465-586-59.

(编辑 沈波)

(上接第 219 页)

- [7] 魏秉亮, 范立民, 杨宏科. 浅埋近水平煤层采动地面变形规律研究[J]. *中国煤田地质*, 1999, 11(3): 44-47.
WEI Bing liang, FAN Limin, YANG HONGke. On the surface deformation of coal mining in shallow coal seam[J]. *Coal Geology of China*, 1999, 11(3): 44-47.
- [8] 侯忠杰. 浅埋煤层关键层研究[J]. *煤炭学报*, 1999, 24(4): 359-363.
HOU Zhongjie. Study on key stratum in shallow seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(4): 359-363.
- [9] 侯忠杰. 组合关键层理论的应用研究及其参数确定[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(6): 611-615.
HOU Zhongjie. Study on application of combinatorial key stratum theory and parameters determining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(6): 611-615.
- [10] 侯忠杰. 地表厚松散层浅埋煤层组合关键层的稳定性分析[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(2): 127-131.
HOU Zhongjie. Analysis of combinatorial key strata stability in shallow coal seam with thick loose bed [J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(2): 127-131.
- [11] 赵宏珠. 浅埋采动煤层工作面矿压规律研究[J]. *矿山压力与顶板管理*, 1996(2): 23-27.
ZHAO Hongzhu. Study on strata behavior regularity in the face of superficial coal mine [J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 1996(2): 23-27.
- [12] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2000, 29(5): 463-467.
XU Jialin, QIAN Minggao. Distinguishing method of position of overlying key stratum [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2000, 29(5): 463-467.
- [13] 来兴平, 吴学明, 高喜才, 等. 基于 MTS-AE 单轴压缩下的煤岩损伤特征[J]. *西安科技大学学报*, 2008, 28(2): 375-377.
LAI Xingpin, WU Xueming, GAO Xicai, et al. Characteristics analysis of coal-rock damage based on MTS-AE uniaxial compression [J]. *Journal of Xi'an University of Science & Technology*, 2008, 28(2): 375-377.
- [14] 黄庆厚. 厚砂土层在顶板关键层上的载荷传递因子研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(6): 672-676.
HUANG Qingxiang. Studies on load transmitting factor of thick sandy soil layer on key roof stratum in shallow seam mining [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(6): 672-676.

(编辑 沈波)