

文章编号:0253-9993(2013)S2-0267-05

薄煤层超高水材料充填开采相似模拟试验研究

贾凯军^{1,2},冯光明^{1,2},李华健³,李杰^{1,2}

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116;3. 山东能源淄博矿业集团有限责任公司,山东 淄博 255120)

摘要:以山东某矿煤岩赋存条件为原型,取线性比 $C_l = 1/150$ 、时间比 $C_t = 1/150$ 、强度比 $C_R = 1.43 \times 10^{-3}$ 进行了薄煤层(厚度 1.2 m)超高水材料充填开采相似模拟试验研究。设计了试验参数及超高水材料在模型采空区的充填方法,揭示了薄煤层超高水材料充填开采采场覆岩及地表活动规律,并与类似条件下的垮落法开采进行了对比。结果表明:与垮落法开采相比,超高水材料充填开采时工作面超前支撑压力的影响范围缩小且峰值明显降低,工作面后方上覆岩层稳定时间缩短,没有出现垮落带与明显断裂带;该技术能将地表移动和变形控制在要求规定的范围内,提高充填率有助于降低覆岩活动与地表变形程度。

关键词:超高水材料;充填开采;相似模拟试验;薄煤层;覆岩;地表

中图分类号:TD821

文献标志码:A

Research on superhigh-water material filling mining in thin coal seam through similar simulation experiment

JIA Kai-jun^{1,2}, FENG Guang-ming^{1,2}, LI Hua-jian³, LI Jie^{1,2}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Shandong Energy Zibo Mining Group, Zibo 255120, China)

Abstract: Using the coal rock occurrence conditions of a coal mine in Shandong Province as the prototype, linear ratio $C_l = 1/150$, time ratio $C_t = 1/150$ and strength ratio $C_R = 1.43 \times 10^{-3}$, similar simulation test was conducted to research on superhigh-water material backfill mining in thin coal seam (1.2 m thick). Test parameters and the model's gob filling methods for superhigh-water material was designed, activity rules of overburden strata and surface in conditions of superhigh-water material filling mining in thin coal seam was revealed and was compared with the traditional caving mining under similar conditions. The results show that compared with caving mining, when superhigh-water material backfill mining technology is used, scope of influence and peak value of lead abutment pressure reduce, stable time of overburden strata for mined-out area shorten, and no caving zone and obvious fissure zone appear. This technology can control the surface movement and deformation in the required range, and the degree of overburden strata's activity and surface deformation could be reduced if filling ratio is improved.

Key words: superhigh-water material; filling mining; similar simulation experiment; thin coal seam; overburden strata; surface

超高水材料矿山充填开采技术^[1]是近几年发展起来的一种充填开采新技术。鉴于新技术的推广要求,该技术于2008年首次在邯郸矿业集团陶一煤矿^[2]进行了采空区充填试验,之后在临沂矿业集团田庄矿^[3]、永煤集团城郊矿^[4]、瑞丰煤业井陘三矿^[5]

等矿获得了推广应用。试验表明,该材料能够适应采空区充填需要,充填开采后覆岩及地表能够得到良好控制,而且具有初期投资低、充填成本相对较低、机械化程度高、采空区密闭效果好等优点,发展前景广阔。

然而,尽管该技术目前已经在河北、山东、河南、

山西等地煤炭充填开采中初步取得成功试验与应用,相关设备及技术参数也已根据现场应用情况做了部分改进,但因现场试验成本高,其充填开采的覆岩控制机理尚需以实验室相似材料模拟试验等手段进行深入研究。笔者以山东某矿薄煤层工作面超高水材料充填开采实践为背景,进行了薄煤层超高水材料充填开采相似模拟试验研究,以揭示该种情况下采场覆岩及地表的应力和位移变化规律,为超高水材料充填开采采场覆岩及地表活动规律提供了理论依据,同时为超高水材料充填开采的实验室研究积累了经验,对该技术的发展具有重要意义。

1 试验参数的选取

1.1 模型基本条件及相似比

试验模型以山东某矿煤系地质条件为原型,该矿在本试验所涉及范围内由下至上各煤岩层的赋存情况见表1。试验采用平面应力模型,按各岩层抗压强度分为28(煤)、168(灰岩)、22(泥岩)、110(粉砂岩)、100(细砂岩)、50 MPa(黏土岩)进行试验设计,取线性比 $C_l = 1/150$,时间比 $C_t = 1/150$ ^[6],即1 h开采15 cm(实际为3.6 m/d),容重比 $C_\gamma = 0.64$,强度比 $C_R = 1.43 \times 10^{-3}$ 。

表1 试验原型各岩层层位及厚度

Table 1 The strata horizon and thickness of the prototype

岩层编号	岩层名称	平均厚度/m	岩层编号	岩层名称	平均厚度/m
D1	泥岩	5.14	M10	粉砂岩	3.13
M	16 _上 煤	1.20	M11	细砂岩	2.66
M1	10 _下 灰	5.40	M12	泥岩	6.00
M2	泥岩	19.00	M13	粉砂岩	2.50
M3	粉砂岩	3.50	M14	细砂岩	2.54
M4	细砂岩	11.00	M15	黏土岩	1.92
M5	15 _上 煤	0.90	M16	粉砂岩	10.65
M6	粉砂岩	5.55	M17	细砂岩	7.10
M7	细砂岩	6.54	M18	五灰	0.97
M8	八灰	2.60	M19	表土层	157.20
M9	泥岩	4.35			

1.2 模型几何尺寸

(1)模型长度。为了能全面准确地掌握充填开采条件下采空区上覆岩层活动和地表移动变形发展规律,开采范围应能达到充分采动。由此,沿工作面走向方向应大于或等于充分采动长度,即采空区长度和宽度均应达到 $(1.2 \sim 1.4)H_0$ ^[7](H_0 为平均采深)。

该矿充填工作面主采16_上煤,煤层底板标高为-164~-212 m,地面标高为+41 m,由此可算得 H_0 在205~253 m,平均229 m。模型建立时采空区宽度

可视为无穷大^[8]。因此,仅考虑达到充分采动时采空区长度要在274.8~320.6 m。据此确定采空区长度不低于320.6 m。

该工作面煤层倾角 $\alpha = 8^\circ$,覆岩移动角^[9]为:下山移动角 $\beta = 85.5^\circ - \alpha = 77.5^\circ$,上山移动角 $\gamma = 76^\circ$,走向移动角 $\delta = 76^\circ$,表土松散层移动角 $\psi = 45^\circ$ 。表土层厚度为167.2 m,由此可算得采空区上方地表移动影响范围为681.17 m。

模型建立时,其长度在上述基础上再加两边界煤柱宽度^[10]共计60 m,则原型长度应为741.2 m,实际取750 m。按照线性比,试验模型长度为5 m。

(2)模型高度。该工作面埋深在205~253 m,平均229 m。考虑到模拟地表充分采动要求、边界影响及底板岩层厚度^[11](平均25 m),将试验原型高度确定为255 m,此时对应的试验模型高度 H_m 为1.7 m。

(3)模型宽度。平面模型宽度只要能保持模型横向稳定即可,一般为 $(1/8 \sim 1/5)H_m$,从而可得该模型宽度应在0.25~0.40 m。综合考虑实验室模型条件,取模型宽度为0.30 m。

(4)模型最终参数。综上所述,确定模型几何尺寸为:长×宽×高=5 m×0.3 m×1.7 m,煤层倾角 8° ,模型上工作面推进长度为2.1 m。开采范围为距模型左侧1.5 m开始开采,至距模型右侧1.4 m结束,推进速度为15 cm/h。

2 测点布置

采用压力盒和位移计对充填开采过程中的采场上覆岩层应力、位移及地表变形情况进行观测。应力及位移测点布置^[12]如图1所示(应力测点A~E与位移测点1~5在图中重合)。

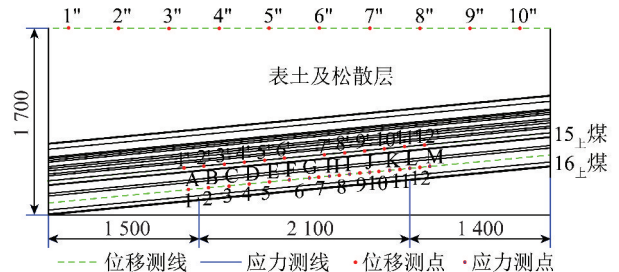


图1 模型测点布置

Fig. 1 Monitoring point arrangement on model

压力盒埋设于16_上煤层顶板以上10 cm(实际煤层以上15 m)处的泥岩中,从模型左边140 cm起开始布置,间隔20 cm,到模型右侧120 cm止,共13个。

在16_上煤层以上10,30 cm及地表处布设了位移观测点,各测点位置为

(1)煤层以上10 cm处:从采空区左侧水平距离

10 cm 开始向右,每隔 20 cm 设 1 个测点,共设 6 个;然后从采空区右侧水平距离 10 cm 开始向左,每隔 20 cm 设 1 个测点,共设 6 个。

(2) 煤层以上 30 cm 处:从采空区左侧水平距离 15 cm 开始向右,每隔 20 cm 设 1 个测点,共设 6 个;然后从采空区右侧水平距离 15 cm 开始向左,每隔 20 cm 设 1 个测点,共设 6 个。

(3) 地表处:从距左边界 20 cm 起,每隔 50 cm 设 1 个测点,共布置 10 个。

(4) 补充位移观测点:利用模型上墨线网格进行量测。

3 充填材料配制与充填方法

3.1 充填材料配制

充填材料配制要符合物理模拟强度相似条件,且各龄期强度要与实际充填材料各龄期强度按相似条件匹配^[13]。现场取样测得水灰比为 7 : 1 时超高水充填材料固结体 2, 8 h 和 1, 3, 7, 28 d 的抗压强度^[14]平均值分别为 0.06, 0.17, 0.45, 0.66, 0.89, 1.00 MPa。

模拟选取时间比 $C_t = 1/150$, 强度比 $C_R = 1.43 \times 10^{-3}$ 。模型开采进度为 15 cm/h, 相当于实际 6 d 的推进度 (22.5 m)。这就要求模拟中充填材料 9.6, 28.8, 67.2 min 和 4.5 h 的抗压强度平均值分别为 0.64, 0.86, 1.14 和 1.43 kPa。

为了使充填材料的强度尽量符合试验要求且充填方法与实际相符,本试验专门配制了基本符合该条件的超高水材料进行试验,材料水灰比取为 11 : 1, 通过外加剂的调配,材料初凝时间为 10 ~ 20 min, 各龄期强度虽有点偏高,但基本能够满足试验要求。

3.2 充填方法

为使物理模拟与现场生产实际相符,模拟时每循环开挖完毕后,立即用挡浆板将模型上形成的采空空间前后封闭,防止浆液从前后溢出。封闭完毕后即采用漏斗与导管向采空区实施充填,当充填浆体注满采空空间时停止充填。挡浆板由 PVC 门框杆材制成,配合黏缝剂来封闭采空区。等时间距上次开挖 1 h 时,继续下一次循环,即进行开挖、布置挡板、充填等,如此往复,直至开采完毕。

4 试验结果分析

充填开采过程中,对上覆岩层应力及位移进行了观测,将所得数据整理后按相似比反演至实际情况,得到覆岩活动与地表变形规律。

4.1 采空区覆岩应力变化规律

覆岩各测点处应力随时间的变化规律如图 2 所示。

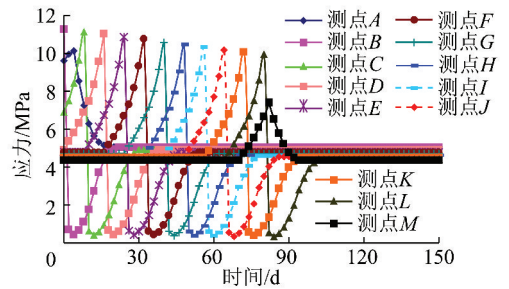


图 2 覆岩应力变化曲线

Fig. 2 Change curves of overburden strata stress

根据图 2 中各点应力变化并结合模型开挖与充填实际情况,可得出:

(1) 充填开采时,各测点在煤壁前方的应力峰值约为 $2.2\gamma H$, 根据附近工作面垮落法开采矿压观测可知,其值显著小于垮落法开采时的 $3.1\gamma H$ 。可见,充填开采时超前支承压力的应力集中程度显著降低。

(2) 充填开采时,工作面超前支承压力在煤壁前方 70 m 左右达到了稳定,显著小于垮落法开采时超前支承压力的影响范围^[15-16],说明超前支承压力向煤壁前方的传递范围显著缩小。

(3) 充填开采时,采空区上覆岩层应力在工作面后方逐渐增大,在煤壁后方 50 m 左右达到了稳定,应力值略小于原岩应力,稳定范围明显小于垮落法开采时的情况。可见采空区充填后,采空区覆岩活动受到了限制,工作面后方支承压力影响范围缩小。

4.2 采空区覆岩位移变化规律

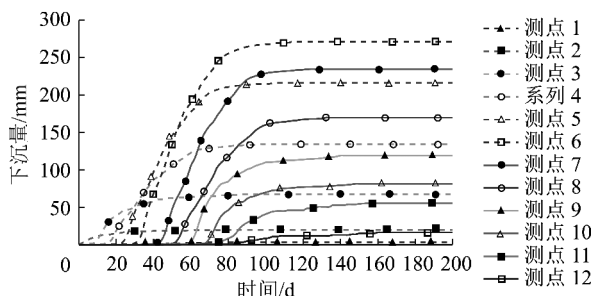
4.2.1 采空区覆岩位移变化规律

16_上煤上方 15, 45 m 处顶板岩层各测点下沉量如图 3 所示。由曲线可知:① 充填开采后,煤层上方 15, 45 m 的岩层活动分别在工作面采后 40 和 80 d 左右趋于稳定,最大下沉量分别为 269 和 203 mm;② 越靠近采空区中部,覆岩位移量越大,各测点最大位移量发生在采空区中部偏下方的测点 6(6') 处,与采空区覆岩的一般活动规律一致。

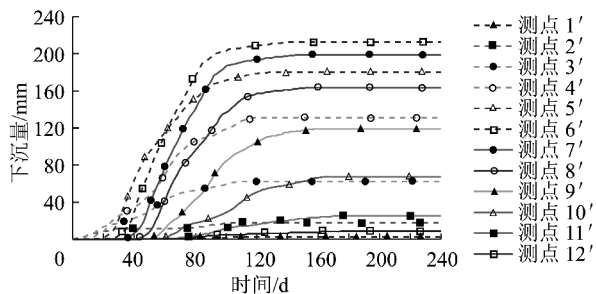
4.2.2 充填开采与垮落法开采覆岩位移量对比

在 16_上煤充填开采结束且覆岩与地表活动稳定后,又对该煤层上方 40 m 左右的 15_上煤进行了垮落法开采,采厚为 0.9 m,并对开采过程中覆岩的位移值进行了记录。两种情况下同一岩层 (16_上煤上方 45 m 处覆岩) 中各测点的最终位移值如图 4 所示。

由图 4 可看出,在 16_上煤充填开采时,采厚 1.2 m,其最大位移量为 203 mm,而在 15_上煤垮落法



(a) 采空区上方 15 m



(b) 采空区上方 45 m

图3 16_上煤充填开采覆岩下沉量变化曲线

Fig. 3 Change curves of overlying strata subsidence for 16-up coal seam filling mined

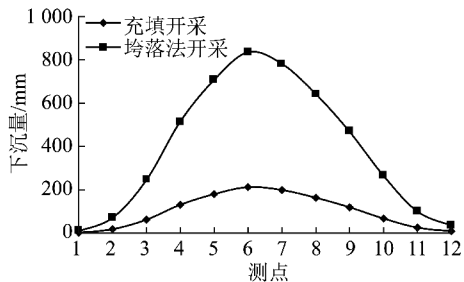


图4 充填开采与垮落法开采覆岩下沉量对比

Fig. 4 Overlying strata subsidence for filling mining and caving mining

开采时,采厚 0.9 m,其最大位移量却达到了 835 mm。可见,相对于垮落法开采,充填开采时采空区覆岩位移量显著减小,能够有效控制上覆岩层的变形与位移。

4.3 覆岩活动实照分析

为了直观研究煤层充填开采后覆岩活动规律,在

模拟研究过程中,对不同阶段模型进行了图像拍摄对比。图 5,6 分别为 16_上煤充填开采和 15_上煤垮落法开采实照。



(a)



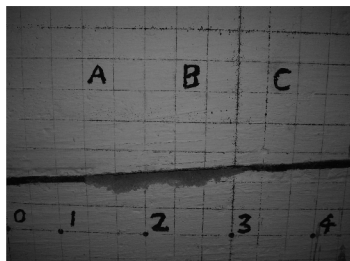
(b)

图5 16_上煤充填开采试验模型

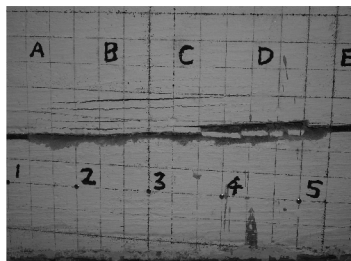
Fig. 5 Test model for 16-up coal seam filling mined

由图 5 可以看出:充填开采时,当充填率较高时,覆岩活动不明显,仅在个别地方显现密集的纵向裂隙,如图 5(a)所示;当充填率较低时,覆岩出现较明显的层间离层,如图 5(b)所示。

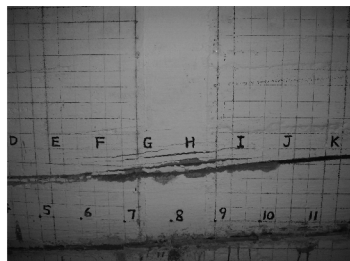
由图 6 可以看出:垮落法开采时,随着工作面推进长度增加,上覆岩层活动逐渐加剧,下部覆岩发生垮落,逐渐向上发展形成断裂带和弯曲下沉带。由于模型中煤层采高较小且岩层结构均匀致密,最下部覆岩没有出现明显的垮落现象,而是形成垮落与裂隙相互溶合的情形,个别地方出现整体离层;随着工作面的推进,覆岩活动逐渐向上传递,当下部覆岩接触到采空区底板时,下部覆岩的离层在上方岩层的压力下逐渐弥合,而上覆岩层的活动则逐渐发展到地表,并造成地表的明显移动和变形。可见,充填开采后覆岩活动程度显著降低,没有出现垮落带与明显的断裂



(a)



(b)



(c)

图6 15_上煤垮落法开采试验模型

Fig. 6 Test model of 15-up coal seam caving mined

带,地表变形得到了有效控制。

4.4 地表变形规律

通过试验,得到两种开采方式下地表各测点最终位移量,如图7所示。

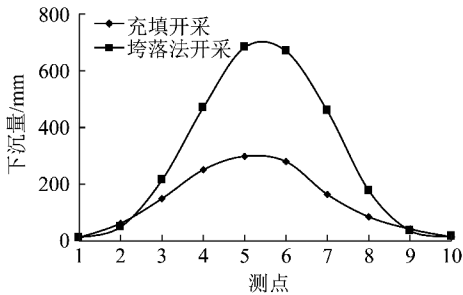


图7 充填开采与垮落法开采地表下沉量对比

Fig.7 Surface subsidence for filling mining and caving mining

结合试验的实际情况及图7曲线可得知:①与垮落法开采相比,充填开采后地表移动和变形在150 d左右达到稳定,能较快稳定下来。②靠近采空区中部上方的地表位移量较大,地表各测点中位于采空区中部偏下方的6"测点位移量最大,符合地表活动的一般规律。③15_上煤垮落法开采后地表下沉量最大值为682 mm;16_上煤采用超高水材料充填开采技术回采后地表最大下沉量为198 mm,显著低于15_上煤垮落法开采后引起的地表位移量。可见,充填开采能显著控制上覆岩层活动,将地表移动和变形控制在规定要求的范围内。

5 结 论

(1)与垮落法开采相比,充填开采时工作面超前支承压力的影响范围缩小且峰值明显降低,应力集中程度明显减缓,工作面后方上覆岩层稳定时间缩短,覆岩活动程度明显减缓,没有出现垮落带与较明显的断裂带。

(2)相似模拟试验中,充填开采与垮落法开采时,上覆岩层与地表位移量最大值都位于采空区中部偏下方,符合一般开采时覆岩及地表活动规律。

(3)超高水材料充填开采能有效控制上覆岩层活动及地表变形,将地表移动和变形控制在规定要求的范围内。

(4)提高充填率有助于降低覆岩活动与地表变形程度。

参考文献:

[1] 冯光明. 超高水充填材料及其充填开采技术研究与应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.
 [2] 冯光明,孙春东,王成真,等. 超高水材料采空区充填方法研究[J]. 煤炭学报,2010,35(12):1963-1968.

Feng Guangming, Sun Chundong, Wang Chengzhen, et al. Research on goaf filling methods with superhigh-water material[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1963-1968.
 [3] 周振,冯光明,王成真,等. 近水平浅埋煤层超高水材料充填工艺与方法[J]. 山西焦煤科技, 2011(1): 21-24.
 Zhou Zhen, Feng Guangming, Wang Chengzhen, et al. Research on goaf filling mining with superhigh-water material for nearly flat shallow seam[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2011(1): 21-24.
 [4] 殷术明,冯光明,顾威龙,等. 城郊煤矿超高水材料充填系统设计研究与应用[J]. 煤炭工程, 2012(4): 13-15.
 [5] 李春生,安勇焯,于健浩. 瑞丰煤业超高水材料充填技术研究与应用[J]. 煤炭工程, 2012(9): 40-41.
 [6] 顾大钊. 相似材料和相似模型[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1995.
 [7] 徐永圻. 采矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2003.
 [8] 杜蜀宾. 济宁太平煤矿建筑物下条带开采与充填开采比较研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
 [9] 王利,张修峰. 巨厚覆岩下开采地表沉陷特征及其与采矿灾害的相关性[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1048-1051.
 Wang Li, Zhang Xiufeng. Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under super-thick overlying strata[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1048-1051.
 [10] 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1988.
 [11] 王崇革,王莉莉,宋振骥,等. 浅埋煤层开采三维相似材料模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S2): 4926-4929.
 Wang Chongge, Wang Lili, Song Zhenqi, et al. Testing study on 3D similar material simulation for shallow coal seam mining[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 4926-4929.
 [12] 查剑锋. 研石充填开采沉陷控制基础问题研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2008.
 [13] 王磊. 固体密实充填开采岩层移动机理及变形预测研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2012.
 [14] 丁玉,冯光明,王成真. 超高水充填材料基本性能试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1087-1092.
 Ding Yu, Feng Guangming, Wang Chengzhen. Experimental research on basic properties of superhigh-water packing material[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1087-1092.
 [15] 王家臣,杨胜利,杨宝贵,等. 长壁研石充填开采上覆岩层移动特征模拟实验[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1256-1262.
 Wang Jiachen, Yang Shengli, Yang Baogui, et al. Simulation experiment of overlying strata movement features of longwall with gangue backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1256-1262.
 [16] 何希霖,金焕章,杨洪伟,等. 薄煤层综采工作面顶板运动规律及其控制技术[J]. 山东科技大学学报, 2009, 28(2): 32-36.
 He Xilin, Jin Huanzhang, Yang Hongwei, et al. Research on movement rule and control technology of roof in fully mechanized working face of thin seam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2009, 28(2): 32-36.