

三维应力条件下煤层底板采动破坏规律实验研究^{*}

康钦容^{1,2}, 张卫中², 韩佩博¹, 张电吉²

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 武汉工程大学
资源及土木工程学院, 武汉 430073)

摘 要:以川煤集团白胶煤矿2481工作面地质资料为基础,利用自行研制的“多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统”,进行了三维采动应力条件下的三维模拟开采实验。通过应力监测、测量统计、色素示踪、照相素描等方法,对采动后的底板岩层破坏规律进行了研究。研究结果表明:底板岩层表现出“采前增压-采后卸压-压实回升”的动态受力特征;根据裂隙发育特征,可将底板裂隙带在走向上分为“开切眼裂隙发育区”、“采空区中部压实区”和“工作面裂隙发育区”,在竖直方向上分为“底板破断裂隙带”和“底板弯曲离层带”;确定底板最大破坏深度为14 m,为上保护层开采中被保护煤层瓦斯抽采的设计及优化提供了依据。

关键词: 三维模拟; 开采实验; 底板裂隙; 弯曲变形; 最大破坏深度

中图分类号: TD 325

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)03-0612-07

Experimental Study of Mine-Induced Underlying Strata Failure Regularity in Three Dimensional Stress Condition

Kang Qinrong^{1,2}, Zhang Weizhong², Han Peibo¹, Zhang Dianji²

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R. China; 2. School of Resources and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430070, P.R. China)

Abstract: Based on geological data of 2481 working face in Baijiao coal mine of Sichuan Coal Industry Co. Ltd., using self-developed “Multi-field coupling of coal mine dynamic disaster simulation test system” to simulate excavating experiment in three-dimensional mine-induced stress condition. By means of stress monitoring, measurement statistics, pigment tracer and photographic sketch, underlying strata failure characteristics was revealed. Results indicate that: (1) the floor strata stress shows a dynamic characteristic of increase before excavating-relief after excavating-rise again during compacting; (2) according to the evolution of fracture, the underlying strata fracture belt can be divided into open-off-cut fracture zone, central goaf compaction zone and working-face fracture zone on strike, and floor crack fracture zone and floor separation zone in vertical; (3) the maximum failure depth of floor reaches 14m.

Keywords: three-dimensional simulation; excavating experiment; floor fracture; bending deformation; maximum failure depth

^{*} 收稿日期: 2016-12-01(修改稿)

作者简介: 康钦容(1980-), 女, 博士, 重庆人, 讲师, 主要从事矿山压力与控制研究方面的工作。

E-mail: kang801118@163.com

通讯作者: 张卫中(1977-), 男, 博士, 河南人, 副教授, 主要从事矿山开采工艺研究方面的工作。

E-mail: wzzhang1120@126.com

基金项目: 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室访问学者课题资助(2011DA105287-KF201308); 武汉工程大学人才专项经费资助项目(K201321); 湖北省中低品位磷矿资源开发利用协同创新中心开放基金(P201120); 国家自然科学基金(51474159)

0 引言

在采矿活动中,煤层的开采对底板岩层造成扰动,引起底板应力重新分布,导致底板裂隙发育和岩层弯曲变形,形成底板采动破裂导气带。在上保护层开采方式中,煤层采动能使被保护煤层透气性增大,煤层瓦斯沿底板裂隙场涌入保护层采空区,从而实现被保护煤层瓦斯的卸压抽采。

许多学者对于煤层底板采动变形破坏规律进行了研究。李白英^[1]和施龙青^[2]在矿井底板突水灾害的防治方面分别提出了采动煤层底板的“下三带”和“下四带”划分理论。张金才等^[3]及施龙青等^[4-5]分别提出了煤层采动底板破坏深度的理论计算公式。朱术云等^[6]运用解析计算的方法,对煤层底板应力分布规律进行了分析。弓培林^[7]、肖远见^[8]、姜耀东^[9]等分别通过室内相似模拟实验的方法,对煤层开采中底板变形破坏规律、应力分布、位移变化及底板岩层分带特征进行了研究。张蕊^[10]、关英斌^[11]、张勇^[12]、田坤云^[13]等分别通过 FLAC3D、有限元、UDEC 等数值模拟方法,并结合现场实测数据,对底板采动破坏规律、底板最大破坏深度等进行了研究。这些研究成果为煤层底板采动破坏规律研究提供了理论基础。

然而对底板采动破坏规律的实验研究多局限于二维平面模拟实验及数值模拟方法,对于模拟煤层开采的真实情况有局限性^[14-15]。本文利用自主研发的多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统,通过三维应力条件下的物理相似模拟试验,对煤层底板的裂隙发育及底板弯曲变形特征进行研究,并确定了底板采动破坏深度,为上保护层开采中被保护煤层瓦斯抽采的设计及优化提供了依据。

1 实验方法

为研究煤层开采中底板岩层的采动破坏规律,本实验以川煤集团白胶煤矿 2481 工作面为地质原型,进行了三维应力条件下的模拟开采实验,对底板的应力变化、裂隙分布及底板弯曲变形进行了统计研究。原型工作面位于开采煤层一煤层(C_1)内,一煤层(C_1)作为上保护层,下方与被保护层二煤层(B_4)距离为 16.5~27 m,平均为 22 m,底板各层以砂质泥岩、细砂岩和粘土为主,采区内无明显断层结构。以此为地质原型进行三维相似模拟开采实验,地质原型及实验模型的力学参数如表 1。

实验在“多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试

验系统”上进行(图 1)。该加载系统机架上架定了位置相应的 9 套加载液压缸,从而实现“三向四级”加载方式:垂直方向 4 个 1 000 kN 加载缸分布在试件的上面,可同时加载,也可分别加载,用于模拟地下开挖中煤岩层不同垂直应力水平;水平方向 4 个 1 000 kN 加载缸分布在试件侧面,可同时加载,亦可分别加载,用于模拟煤岩层内不同水平侧向应力;水平后向用 1 个 2 000 kN 液压缸来完成煤岩层水平纵向应力模拟;同时,由固定底座、侧壁和反力架提供反力。各压力轴或各压板之间的动作互不干涉,可进行独立动作实现不同试验条件下多级多向加载。

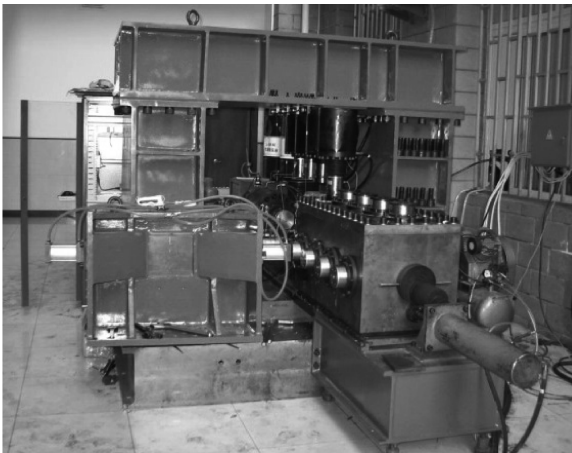


图 1 多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统
Fig. 1 Multi-field coupling of coal mine dynamic disaster simulation testing system



图 2 相似模拟模型实物图
Fig. 2 The similar simulation model

试件尺寸为 1 140 mm×590 mm×550 mm(图 2),模型几何相似比为 1:100,并以此换算出模拟材料的厚度、容重、抗压强度等,(表 1),确定相似材料的配比,进行模型制作;其中,第 6、8 层底板及一煤层(C_1)直接顶配比为 6:4:1(砂:水泥:石

膏),其余岩层配比为 6:3:1(砂:水泥:石膏)。顶、底板岩层使用相似材料进行浇筑成型,压实后均匀铺撒云母粉作为层理面进行分层。模型顶板分 5 层,总厚度为 110 mm,模型上部模拟到顶板 11m 处;底板分 10 层,总厚度为 220 mm,下部模拟到煤层底板 22 m 处;煤层厚度为 30 mm,模拟开挖煤层两端留设 80 mm 保护煤柱,采用通电加热片熔化石蜡的方法来模拟煤层开采过程。实验前,制

作多个纵向条带状石蜡,铺满相应岩层,实验时,逐条依次通电使其熔化,石蜡条带间预留有空隙以储存熔化后的石蜡,避免实验中对受力产生干扰。于煤层底板下方 60 mm 处自开切眼每隔 150 mm 布设应力传感器,实验进行时使用 ASMD3 电阻应变仪进行应力数据监测。各向应力以力控制方式提供,达到目标应力后使其保持恒定,之后开始进行开挖实验。

表 1 岩层分布及实验模型力学参数
Table 1 Strata distribution and model physical parameters

岩层	岩性	岩层厚度 /m	岩层容重 /(kN·m ⁻³)	岩层抗压 强度/MPa	模型厚度 /cm	模型容重 /(kN·m ⁻³)	模型抗压 强度/MPa
老顶	飞仙关页岩	85	2.40	24	2.5×4	2.00	0.20
直接顶	介壳灰岩	1.2	2.60	58	1.2	2.17	0.48
一煤层(C ₁)	煤	2.0	1.35	18	一煤层(C ₁)用石蜡层进行模拟		
第 1 层底板	粘土岩	1.0	2.30	38	1.0	1.92	0.32
第 2 层底板	砂质泥岩	4.4	2.50	44	4.4	2.08	0.37
第 3 层底板	砂质泥岩	2.1	2.50	46	2.1	2.08	0.38
第 4 层底板	粘土岩	1.6	2.30	38	1.6	1.92	0.32
第 5 层底板	砂质泥岩	2.9	2.50	44	2.9	2.08	0.37
第 6 层底板	细砂岩	2.5	2.60	60	2.5	2.17	0.50
第 7 层底板	砂质泥岩	3.2	2.50	44	3.2	2.08	0.37
第 8 层底板	细砂岩	2.5	2.60	60	2.5	2.17	0.50
第 9 层底板	砂质泥岩	1.8	2.50	42	1.8	2.08	0.35
二煤层(B ₄)	煤	1.3	1.35	18	二煤层(B ₄)未作模拟		

2 采动过程中底板应力监测及特征

在煤层底板下方 6 m 于开切眼前方 10 m、25 m、40 m、55 m 和 70 m 处布置应力传感器,监测应力如图 3 中通道 TD1-5 所示。由图可知,当模拟工作面由开切眼推进到 10 m 时,TD1 应力下降明显,发生快速卸压,而工作面前方的 TD2、TD3 测点应力呈上升趋势,出现应力集中。工作面推进到 30 m 时,TD2、TD3 测点应力开始突降,这是由于 TD2、TD3 位置的采动卸压,使底板所受支承应力减小所致;而采空区 TD1 位置处应力逐渐回升,说明上覆岩层的垮落、下沉使采空区开始压实;同时随着工作面的推进,工作面前方的 TD4 测点应力在超前应力影响下开始逐渐升高。工作面推进至

55 m 处时,TD4 应力发生卸压下降;而 TD1 应力趋于稳定,说明随着工作面推进,TD1 位置采空区已基本压实;工作面前方 TD5 测点开始产生应力集中,应力开始上升。当工作面推进到 70 m 后,TD5 发生卸压下降,采空区中部的 TD2-4 位置逐渐压实使得支承应力上升,而 TD1 由于已基本压实,因此所受影响较小。

根据采动过程中的应力曲线规律分析,在采动发生前,工作面前方形成应力集中区,底板支承应力升高;采动后底板处于卸压状态,应力明显降低;随着工作面向前推进和顶板的垮落、充填,采空区逐渐压实,底板支承应力随之产生一定程度的回升。因此,回采工作面呈现“采前增压—采后卸压—压实回升”的动态受力特征,并随着工作面的

推进这种状态反复出现;处于增压区和卸压区之间的底板岩体容易产生剪切变形而发生破坏,产生纵向破断裂隙,而卸压区底板岩体因弯曲变形而产生离层裂隙。

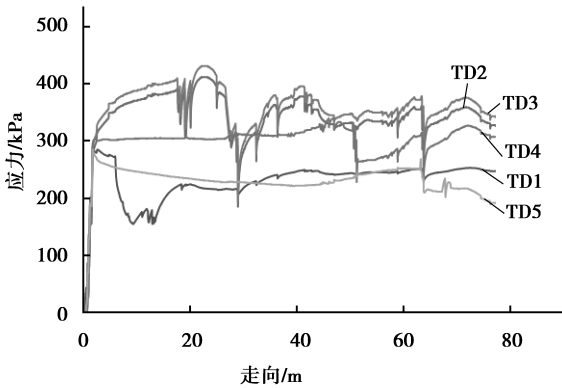


图3 开采过程中底板应力变化

Fig. 3 Floor rock stress variation during excavating process

3 采动底板岩层裂隙分布及变形特征

在采动应力影响下,开采后采场底板岩层中形成穿层破断裂隙和层间离层裂隙。开采实验结束后,通过对底板进行逐层开切,对各水平开切面内破断裂隙进行统计和图像素描处理,研究穿层破断裂隙分布情况;通过测量统计和色素示踪,研究离层裂隙分布特征;同时,对水平开切面进行拉网式垂直高度测量统计,研究底板弯曲变形规律;并通过岩层平行层面的弯曲变形特征及竖直开切面裂隙统计,分析离层裂隙分布情况。

3.1 底板纵向破断裂隙分布特征

由于煤层采动影响,开采后采场底板岩层应力将进行重新分布,根据底板应力分布情况,将煤层底板沿走向划分为:原始应力区、集中应力区、应力降低区、应力恢复区^[16](图4);根据底板裂隙动态发育特征,将底板破坏过程分为:超前压缩阶段—过渡阶段—卸压膨胀阶段—重新压实阶段。在压缩阶段,底板岩层应力集中处于压缩状态,所受的垂直应力和水平应力都很高;经历过渡阶段,垂直应力急剧卸荷而水平应力基本不变,同时由于底板岩体前后受力相差悬殊,因而容易剪切变形而发生破坏,有利于底板层内纵向破断裂隙的产生和发育;直至膨胀阶段时,底板垂直应力降至消失甚至在水

平应力的挤压下产生一定的拉应力,底板岩层发生膨胀、弯曲变形;最后至重新压实阶段,垂直应力逐渐恢复回升,底板裂隙发生一定程度上的压实、闭合。

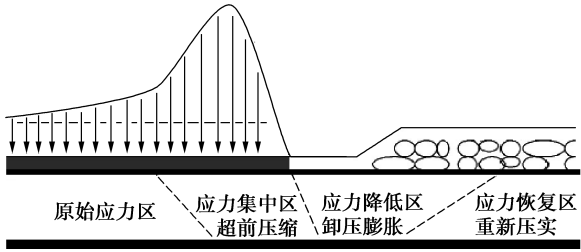


图4 底板走向应力分区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of floor rock stress partition

开采实验后对煤层底板岩层水平切面进行拍照并绘制素描图,如图5和图6所示。图5是煤层下方3 m处的水平切面照片和素描图,可见,在开切平面上采动裂隙形成了一个明显的“圆角矩形”形态,纵向破断裂隙在其周边发育明显,纵向贯通程度高,有利于其与层间离层裂隙相连通,形成裂隙网,从而形成瓦斯流动通道。图6是煤层下方5 m处的水平切面照片和素描图,可以看出此层位的纵向破断裂隙“圈状”特征不明显,裂隙发育程度较其上方岩层较低,裂隙的纵向贯通程度也较低,因而不利于使纵向破断裂隙与层间离层裂隙的贯通。事实上,由此层位往下的底板岩层中,纵向破断裂隙发育程度极低甚至消失,因此纵向破断裂隙的发育深度为煤层下0~7 m。

3.2 底板岩层弯曲变形特征

开采试验后对各平行切平面进行拉网式垂高测量统计:倾向方向自风巷每70 mm测一点,走向方向自开切眼每100 mm测一点,共80点。统计各切平面弯曲变形量,得底板各层走向位置的弯曲变形量统计图(图7)。

由底板弯曲变形统计图得出:在走向上,距开切眼40 m及70 m处底板的弯曲变形量最大,而距开切眼50 m附近的采空区中部位置变形量明显较小,呈现出鼓起后被压实的形态,从而表现出中间低(压实)、两边高(鼓起)的特征。在竖直方向上,随着底板岩层深度的增加,其弯曲变形量随之减小,这说明距离煤层越远,底板岩体受到的开采扰动影响就越小。再统计最大位移点的倾向位置,计

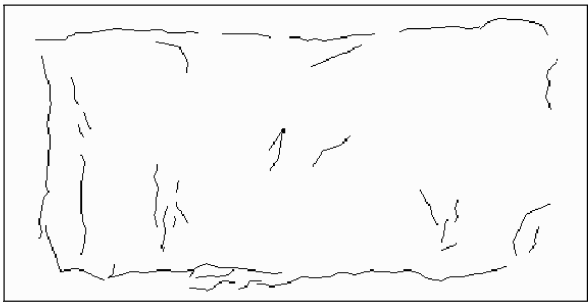
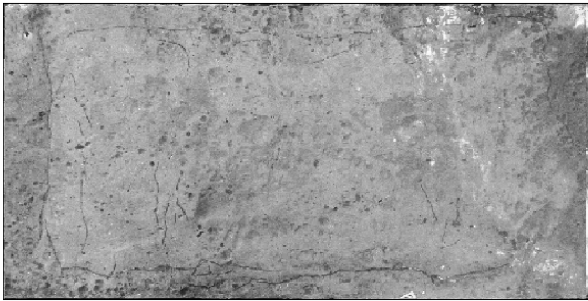


图 5 煤层下方 3 m 处水平切面照片、素描图

Fig.5 Photo and sketching in horizontal section of floor rock 3 m below



图 6 煤层下方 5 m 处水平切面照片、素描图

Fig. 6 Photo and sketching in horizontal section of floor rock 5 m below

算各层最大位移点的平均倾向位置,得表 2。由表 2 可知,各层的最大位移点在倾向上位于中部位置(中点为 280 mm 处)附近,即在倾向上,底板弯曲变形表现出“中间高、两边低”的特点。

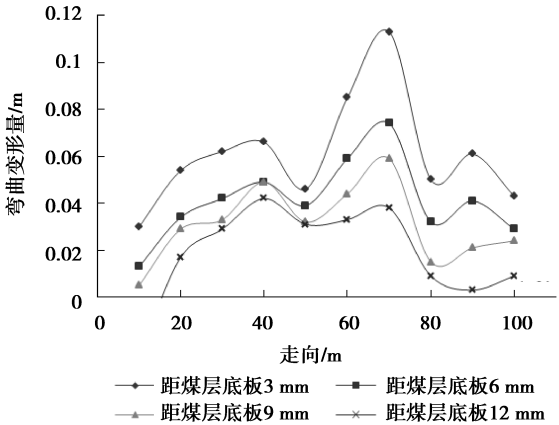


图 7 底板走向弯曲变形量统计

Fig. 7 Statistics of bottom plate deformation

表 2 最大位移点倾向位置统计

Table 2 Dip-direction position of maximal deformation point

岩层位置/m	最大位移点平均 倾向位置/mm
距煤层底板 3	301
距煤层底板 6	365.5
距煤层底板 9	276.5
距煤层底板 12	297.5
各层平均	310.1

3.3 底板离层裂隙分布特征

受煤层采动影响,开采后采空区下方底板岩层出现卸压区,在水平应力的挤压作用下,底板岩体向上膨胀发生弯曲变形;但由于各岩层的受力和抗弯刚度不同,引起的变形量有差异,从而导致离层裂隙出现,因此,可以通过各平行层面的弯曲变形特征来研究底板离层裂隙的发育情况。通过计算底板相邻岩层变形量之差,得底板离层量统计图(图 8)。

结合煤层开采中测点应力的变化及试件竖直开切面的裂隙统计,由图得出:自开切眼附近范围内,底板离层裂隙开始发育,且开切眼区域内有纵向破断裂隙的分布;随着工作面推进,距开切眼 20 m 处的采空区内底板开始压实,30~50 m 处的采空区中部区域为完全压实区,底板支承压力回升,岩层弯曲变形量减小(图 6),离层裂隙发生闭合;60 m 附近区域部分压实,采空区底板被压实程度减

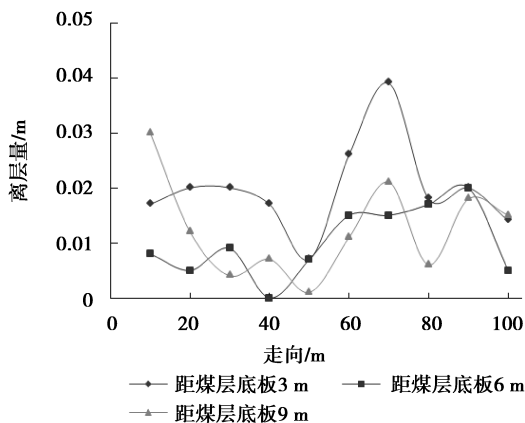


图 8 底板走向离层量统计图

Fig. 8 Statistics of floor separation value in strike

弱,离层裂隙呈现出上部压实、下部发育的特征,其前方为工作面离层裂隙区,其中 70 m 处离层裂隙最为发育,裂隙离层量最大;同时由于工作面前后底板应力差的剪切作用,此区域内纵向破断裂隙也较为发育。由此可见,在走向上可将煤层底板裂隙带分为“开切眼裂隙发育区”、“采空区中部压实区”、“工作面裂隙发育区”,在开切眼及工作面区域(0~7 m 深度内),底板纵向破断裂隙与离层裂隙相连通,共同形成了瓦斯流动的通道。

4 底板裂隙带划分及最大破坏深度

底板最大破坏深度,是指底板岩体在采动作用下所发生剧烈扰动变形距煤层的最大深度^[17]。通过对模拟开采实验底板裂隙分布及变形特征的分析可以得到:在煤层下方 0~7 m 范围内,岩层膨胀变形明显,纵向破断裂隙与层间离层裂隙共同发育,从而形成相互贯通的裂隙网,有利于下部煤层瓦斯向上涌出并进入上保护层采空区。在煤层下方 7~14 m 范围内,岩层发生弯曲变形,产生离层裂隙,但纵向破断裂隙分布极少,无法形成连通的气体流动通道,因此,必须通过建立人工导向通道来实现对下部煤层瓦斯的抽放。

可见,煤层底板裂隙在垂直方向上呈现出分带性。因此,根据底板裂隙发育程度可将底板岩层划分为“底板破断裂隙带”和“底板弯曲离层带”,共同组成了煤层底板裂隙带。其中,破断裂隙带和弯曲离层带分别位于煤层下方 0~7 m 和 7~14 m 范围内,并由此确定底板最大破坏深度为 14 m。

5 结论

通过三维应力下的煤层开采三维相似模拟实验,研究了底板岩层的采动破坏规律,得到以下结论:

(1)底板支承压力受采动影响而变化,表现出“采前增压—采后卸压—压实回升”的动态受力特征。

(2)底板岩层发生弯曲变形,在走向上表现为“中间低(压实)、两边高(鼓起)”,而在倾向上表现为“中间高、两边低”,且弯曲变形量随底板深度的增加而减小。

(3)根据裂隙分布特征,可将底板裂隙带在走向上分为“开切眼裂隙发育区”、“采空区中部压实区”和“工作面裂隙发育区”,在垂直方向上分为“底板破断裂隙带”和“底板弯曲离层带”,并得出底板最大破坏深度为 14 m。

参考文献(References)

[1] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J]. 山东矿业学院学报(自然科学版), 1999,8(4):11-18. (Li Baiying. “Down three zones” in the prediction of the water-inrush from coal bed floor aquifer theory, development and application[J]. Journal of Shandong Mining Institute (Natural Science), 1999, 18(4):11-18. (in Chinese))

[2] 施龙青, 韩进. 开采煤层底板“四带”划分理论与实践[J]. 中国矿业大学学报, 2005,34(1):16-23. (Shi Longqing, Han Jin. Theory and practice of dividing coal mining area floor into four-zone [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(1):16-23. (in Chinese))

[3] 张金才, 刘天泉. 论煤层底板采动裂隙带的深度及分布特征[J]. 煤炭学报, 1990,15(2):46-55. (Zhang Jincai, Liu Tianquan. Discussion on the coal seams floor destroyed depth and distributing character [J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(2):46-55. (in Chinese))

[4] 高延法, 施龙青. 底板突水规律与突水优势面[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1999. (Gao Yanfa, Shi Longqing. Floor water inrush law and water inrush advantage surface [M]. Xuzhou: China University of

- Mining and Technology Press, 1999. (in Chinese))
- [5] 施龙青, 朱鲁, 韩进, 等. 矿山压力对底板破坏深度监测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(6): 20-23. (Shi Longqing, Zhu Lu, Han Jin, et al. Monitor study on broken floor depth caused by underground pressure [J]. Coal geology & Exploration, 2004, 32(6): 20-23. (in Chinese))
 - [6] 朱术云, 姜振泉, 姚普, 等. 采场底板岩层应力的解析法计算及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 191-194. (Zhu Shuyun, Jiang Zhenquan, Yao Pu. Application of analytic method in calculating floor stress of a working face [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(2): 191-194. (in Chinese))
 - [7] 弓培林, 胡耀青, 赵阳升, 等. 带压开采底板变形破坏规律的三维相似模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4396-4402. (Gong Peilin, Hu Yaoqing, Zhao Yangsheng, et al. Three-dimension simulation study on law of deformation and breakage of coal floor on mining above aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4396-4402. (in Chinese))
 - [8] 肖远见, 李美海, 周定武. 开采层底板岩层的应力分布实验及探讨[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(5): 28-31. (Xiao Yuanjian, Li Meihai, Zhou Dingwu. Experiment and study of stress distribution on floor rock stratum of extracting seam [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2005, 32(5): 28-31. (in Chinese))
 - [9] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 等. 承压水上开采工作面底板破坏规律相似模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1571-1578. (Jiang Yaodong, Lü Yukai, Zhao Yixin. Similar simulation test for breakage law of working face floor in coal mining above aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1571-1578. (in Chinese))
 - [10] 张蕊. 大采深厚煤层底板采动破坏深度[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 67-72. (Zhang Rui. Study on the failure depth of thick seam floor in deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 67-72. (in Chinese))
 - [11] 关英斌, 李海梅, 路军臣. 显德汪煤矿 9#煤层底板破坏规律的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 121-125. (Guan Yingbin, Li Haimei, Lu Junchen. Research of No.9 coal seam floor's fracture regularity in Xiandewang coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 121-125. (in Chinese))
 - [12] 张勇, 张春雷, 赵甫. 近距离煤层群开采底板不同分区采动裂隙动态演化规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 786-792. (Zhang Yong, Zhang Chunlei, Zhao Fu. Dynamic evolution rules of mining-induced fractures in different floor area of short-distance coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 786-792. (in Chinese))
 - [13] 田坤云, 唐现奇, 刘志源, 等. 上保护层开采的保护效果及裂隙带分析[J]. 煤炭工程, 2014, 46(4): 71-73. (Tian Kunyun, Tang Xianqi, Liu Zhiyuan. Analysis on protection effect of upper protective seam mining and fractured zone [J]. Coal Engineering, 2014, 46(4): 71-73. (in Chinese))
 - [14] 高召宁, 孟祥瑞, 郑志伟. 采动应力效应下的煤层底板裂隙演化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 90-95. (Gao Zhaoning, Meng Xiangrui, Zheng Zhiwei. Research on Evolution Rules of Coal Seam Floor Crack under Mining Stress Effect [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 90-95. (in Chinese))
 - [15] 刘新荣, 鲜学福. 煤层瓦斯与煤层厚度及其变化关系的测试[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(8): 69-70, 74. (Liu Xinrong, Xian Xuefu. Test on relationship between seam gas, seam thickness and variation [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(8): 69-70, 74. (in Chinese))
 - [16] 翟成. 近距离煤层群采动裂隙场与瓦斯流动场耦合规律及防治技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008. (Zhai Cheng. Research on coupling laws between fracture field and gas flow field of short-distance coal seam group and preventive technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008. (in Chinese))
 - [17] 段宏飞. 煤矿底板采动变形及带压开采突水评判方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012. (Duan Hongfei. Study on mining deformation of floor and evaluation method of water inrush mining above confined aquifer [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2012. (in Chinese))