



奥灰承压水上采场底板沿工作面倾向破坏特征分析

王兴明 刘英锋 南生辉 郭康 尚荣

引用本文:

王兴明, 刘英锋, 南生辉, 等. 奥灰承压水上采场底板沿工作面倾向破坏特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 206–214.

WANG Xingming, LIU Yingfeng, NAN Shenghui. Analysis of inclined failure characteristics of floor along working face in Ordovician limestone confined water stope[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 206–214.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020-1573>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

邯邢矿区承压水上充填采煤底板渗流规律研究

The seepage law of confined water in floor of backfilling working face in Hanxing Mining Area
煤炭科学技术. 2023, 51(4): 140–148 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0770>

层状岩石逆倾向与顺倾向剪切破坏特征的差异性研究

Differences between reverse and normal shear in failure characteristics of layered rocks
煤炭科学技术. 2024, 52(7): 37–47 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0222>

大埋深高承压水双层结构底板破坏机理及应用研究

Study on failure mechanism and application of double-layer structure floor with large buried depth and high confined water
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 207–219 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1485>

大采高工作面煤壁片帮拉-剪破坏共存机制研究

Study on co-existence mechanism of tensile-shear failure of rib spalling in large mining height working face
煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1d58aa3e-293f-4917-88cf-23881adcd4c>

煤层底板采动破坏机制的岩性效应研究

Study on lithologic effect of mining-induced failure mechanism of coal seam floor
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 166–178 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0309>

承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究

Study on mining water inrush mechanism of buried fault under coal seam floor above confined water body
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 283–291 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1698>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王兴明, 刘英锋, 南生辉, 等. 奥灰承压水上采场底板沿工作面倾向破坏特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 206–214.

WANG Xingming, LIU Yingfeng, NAN Shenghui, *et al.* Analysis of inclined failure characteristics of floor along working face in Ordovician limestone confined water stope[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 206–214.

奥灰承压水上采场底板沿工作面倾向破坏特征分析

王兴明^{1,2}, 刘英锋^{1,2}, 南生辉^{1,2}, 郭 康^{1,2}, 尚 荣^{1,2}

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077)

摘 要: 准确预测承压水上采场底板最大破坏深度是预防煤矿底板突水的一个重要环节。为研究沿工作面倾向底板破坏特征的问题, 基于矿山压力与岩层控制理论, 考虑了采场底板受采动产生的支承压力、采空区压实后对底板的作用力以及承压水的共同作用, 建立承压水上采场底板倾向力学计算模型, 采用带有拉伸破坏的 Mohr-Coulomb 屈服准则对采场底板破坏进行判定。结果表明: 周期来压时, 采场底板沿工作面倾向破坏形态近似“倒马鞍形”, 且最大破坏深度为 12 m; 工作面两侧底板破坏深度较大, 采空区底板破坏深度较小。数值模拟计算结果表明: 靠近工作面边缘弹塑性交界处底板最大破坏深度为 13 m, 破坏形式主要为剪切破坏; 位于采空区卸压区段, 采场底板破坏深度较小, 破坏形式主要为剪切破坏及拉伸破坏。这与通过理论分析得到的承压水上采场底板破坏特征几乎一致。通过现场实测得到董家河煤矿 22516 工作面底板最大破坏深度为 13.52 m, 这与理论分析得到的 12 m 和数值模拟计算得到的 13 m 相比结果非常接近, 验证了理论模型建立的合理性以及数值模拟分析的正确性。研究方法为分析承压水上采场底板破坏特征提供了新参考。

关键词: 承压水; 工作面倾向; 剪切-拉伸破坏; FLAC^{3D}; 破坏特征

中图分类号: TD32

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2022)12-0206-09

Analysis of inclined failure characteristics of floor along working face in Ordovician limestone confined water stope

WANG Xingming^{1,2}, LIU Yingfeng^{1,2}, NAN Shenghui^{1,2}, GUO Kang^{1,2}, SHANG Rong^{1,2}

(1. Xi'an Research Institute (Group) Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China;

2. Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Prevention and Control Technology in Shaanxi Province, Xi'an 710077, China)

Abstract: Accurate prediction of the maximum failure depth of the stope floor on confined water is an important part of preventing water inrush from the coal mine floor. In order to study the failure characteristics of the inclined floor along the working face, the author based on the mine pressure and rock strata control theory, considered the combined action of the inclined bearing pressure of the stope floor, established a mechanical calculation model for the inclined floor of the stope above the confined water, and used the Mohr Coulomb yield criterion with tensile failure to judge the failure of the stope floor. The results show that: under periodic pressure, the failure pattern of the stope floor along the dip of working face tends to be similar to an “inverted saddle shape”, and the maximum failure depth is 12 m; the floor failure depth on both sides of the working face is greater, and the failure depth of the gob floor is small. Numerical simulation calculation results show that the maximum failure depth of the floor near the elastoplastic boundary of the working face is 13 m, and the failure mode is mainly shear failure. Located in the pressure relief section of the gob, the failure depth of the stope floor is small, and the main failure forms are shear failure and tensile failure. This is almost consistent with the failure mode of the stope floor on confined water obtained through theoretical analysis. The maximum failure depth of the floor of 22516 working face in Dongjiahe Coal Mine is 13.52 m, which is relatively close to the 12 m calculated by the author through theoretical analysis and 13 m calculated by numerical simulation. The rationality of the author's theoretical model establishment and the correctness of the numerical simulation analysis are verified. The re-

收稿日期: 2022-04-20

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2020-1573

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508462)

作者简介: 王兴明(1996—), 男, 陕西西安人, 助理研究员。E-mail: wangxingming@cctegxian.com

search method provides a new reference for analyzing the failure characteristics of the confined water stope floor.

Key words: confined water; working face inclined; shear-tension failure; FLAC^{3D}; failure characteristics

0 引言

承压水上采煤底板突水是我国矿井主要的水文工程地质问题,严重影响煤矿的安全生产。开展矿井突水机理分析,有效遏制矿井突水事故的发生,一直是煤矿工业急需解决的难题^[1]。由于我国煤炭产业近几十年来的日益扩大,大部分埋深浅的煤炭资源已经接近枯竭,导致煤炭开采深度逐年增加,煤矿底板突水问题变得愈发严重^[2]。准确预测承压水上采场底板最大破坏深度是预防煤矿底板突水的一个重要环节。因此,研究承压水上采场底板沿工作面倾向破坏特征具有重要意义。

孙健等^[3]采用弹性薄板理论,分析了倾斜隔水关键层的力学特性,揭示了底板倾斜隔水关键层在其长边中点偏下的位置最容易出现拉伸屈服破坏;孟祥瑞等^[4]建立采场底板弹性力学计算模型,给出了底板岩体破坏的判据,结合数值模拟分析得出底板破坏影响带范围;王连国等^[5]建立了综合考虑工作面走向与倾向受力特点的空间半无限体模型,计算出了不同深度处底板的应力分布情况;郑纲等^[6]通过定水头压水试验测得底板最大破坏深度,阐明了准格尔煤田底板奥灰强渗通道耦合底板破坏的突水机理;刘伟韬等^[7]根据弹性力学中的半无限体理论推导建立了沿煤层倾斜方向底板应力求解力学模型,计算了倾斜煤层采动底板内任一点处的水平应力、剪应力大小;宋文成等^[8]理论推导计算底板应力分布和破坏形态,并利用数值模拟和原位测试技术进一步探讨开采后沿工作面倾向底板力学破坏特征和应力分布特点;李春元等^[9]根据卸荷力学理论,研究了深部开采卸荷对底板扰动破坏的影响,划分了底板卸荷扰动分区;董书宁等^[10]通过构建 17 组数值模拟方案,系统分析采深、采宽和采高 3 因素对底板扰动破坏深度的影响程度。

上述学者提出了不同的分析思路,取得了一批理论成果,促进了矿业工程的发展^[11-15]。但是在实践中仍然存在许多问题,并不能达到预期的效果。因此,在总结前人研究的基础上,笔者以董家河煤矿为研究背景,基于矿山压力与弹性力学理论,通过建立承压水上采场底板倾向力学计算模型,对底板破坏特征进行分析。并将现场实测结果与理论分析及数值模拟计算结果进行比较,研究方法为分析承压水上采场底板倾向破坏特征提供了新参考。

1 工程概况

董家河煤矿位于渭北石炭二叠纪煤田澄合矿区中部,主要可采煤层为 5 号煤和 10 号煤,其中 5 号煤为董家河煤矿主要开采煤层。22516 工作面位于二采皮带下山西部,煤层埋深为 350 m。煤层平均厚度为 4 m,倾角为 3°~7°,属近水平煤层。工作面倾向长度为 140 m,走向长度为 960 m,自西向东开采。工作面选用走向长壁式开采方法,采用全部垮落法管理顶板。

根据已有勘探资料,22516 工作面水文地质条件比较复杂,属于承压开采。5 号煤下伏含水层为 K₂ 灰岩含水层和奥灰含水层, K₂ 灰岩含水层上距 22516 工作面 15~18 m,奥灰含水层上距 5 号煤层 28~39 m。威胁 22516 工作面安全高效回采最重要的充水水源是奥灰含水层,底板奥灰水压力实测约为 1.2 MPa,工作面底板随时存在突水的可能性。煤层顶底板综合柱状图如图 1 所示。

2 采场底板破坏理论分析

2.1 采场底板力学模型建立

工作面回采过程中围岩应力将重新分布,两侧煤体由于受到剧烈采动应力的影响而产生支承压力,随着工作面的推进,基本顶在采空区边缘弹塑性交界处发生破断形成关键块,其以一定的角度向采空区回转下沉并与相邻岩块形成铰接结构^[16]。工作面回采后,采空区上方直接顶及时垮落,上覆软弱岩层也会同步垮落,随着垮落高度的增加,采空区逐渐被矸石填充。

根据矿山压力与岩层控制理论可知,在不考虑水平应力对底板影响的情况下,采场底板受采动产生的支承压力、采空区被矸石充填后重新压实对底板产生的作用力以及底板承压水的共同作用。周期来压时,承压水上采场底板沿工作面倾向受力示意如图 2 所示。其中 I 为减压区、II 为增压区、III 为原岩应力区。

为了计算方便,对煤壁两侧应力增高区载荷以及应力降低区载荷进行线性简化,并对工作面后方采空区载荷以及承压水层水压按均布载荷进行分析。以工作面倾向左侧煤壁为原点,垂直底板向下为 x 轴正方向,沿工作面水平向右为 y 轴正方向,建立直角坐标系。设原岩应力为 γH ,支承压力峰值为 $k\gamma H$,

| 岩性 | 柱状 | 厚度/m | 岩性描述 |
|--------------------|----|------|----------------------------|
| 粉砂岩 | | 17.8 | 灰黑色, 含黄铁矿结核及少量植物化石 |
| 中粒砂岩 | | 10.3 | 灰白色, 成分以长石、石英为主, 硅泥质胶结 |
| 细粒砂岩 | | 8.1 | 褐灰色, 层面含有大量白云片, 裂隙较发育 |
| 5号煤层 | | 0.4 | 黑色, 镜亮煤, 条带清晰, 局部为炭质泥岩 |
| 砂质泥岩 | | 5.7 | 灰黑色, 片状, 含白云母及黄铁矿结核 |
| 5号煤层 | | 3.6 | 黑色, 镜煤条带清晰, 含黄铁矿结核, 夹矸2~3层 |
| 石英砂岩 | | 2.2 | 灰黑色块状, 局部相变为砂质泥岩 |
| 细砂岩 | | 3.8 | 浅灰色, 成分为长石、石英为主, 含少量植物化石 |
| 6号煤层 | | 0.6 | 黑色, 裂隙较发育 |
| 砂质泥岩 | | 2.6 | 灰黑色片状, 黄铁矿结核成条带状分布 |
| 石英砂岩 | | 0.3 | 灰白色, 致密坚硬, 含黄铁矿结核 |
| 砂质泥岩 | | 1.2 | 灰黑色块状, 含黄铁矿结核、植物化石碎片 |
| 7号煤层 | | 0.4 | 黑色薄煤层 |
| 细粉砂岩 | | 2.3 | 灰黑色, 含黄铁矿结核及少量植物化石 |
| 8号煤层 | | 0.4 | 黑色薄煤层 |
| 细粉砂岩 | | 0.6 | 灰黑色, 含少量植物化石 |
| 9号煤层 | | 0.3 | 黑色, 块状, 暗淡型 |
| K ₂ 含水层 | | 7.2 | 坚硬致密, 富水性弱~中等的岩溶裂隙承压含水层 |
| 泥岩 | | 0.3 | 深灰色, 块状, 含大量植物根部化石 |
| 10号煤层 | | 1.6 | 黑色, 镜亮煤条带清晰, 含厚黄铁矿结核 |
| 铝质泥岩 | | 6.4 | 灰褐色, 块状具滑感, 可塑性强 |
| 奥灰岩 | | | 浅灰色, 裂隙发育, 富水强的岩溶裂隙承压含水层 |

图1 煤层顶底板综合柱状图

Fig.1 Composite bar chart of roof and floor of coal seam

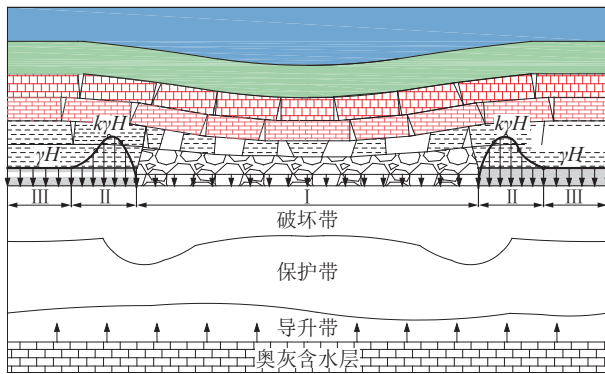


图2 承压水上采场底板沿工作面倾向受力示意图

Fig.2 Schematic diagram of the force on the bottom of the confined water stope along the inclination of the working face

工作面后方采空区载荷为 γH_m , 其中 k 为煤体应力集中系数; γ 为上覆岩层平均重度; H 为煤层埋深; H_m 为顶板垮落带高度, $H_m = (100 \sum M/1.6 \sum M + 3.6) \pm 5.6$, 奥灰承压水层承压水层上边界与采场底板的距

离为 h , 承压含水层水压为 P 。周期来压时, 采场底板倾向力学计算模型如图3所示。

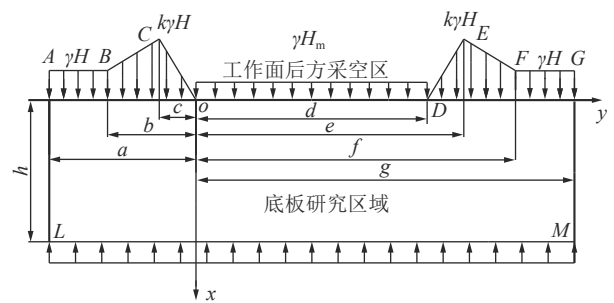


图3 采场底板倾向力学计算模型

Fig.3 Mechanics calculation model of stope floor inclination

2.2 采场底板应力分布规律

在直角坐标系中, 各段线性载荷在采场底板岩体中任一点的应力分量分别为:

AB段载荷在采场底板岩体中引起的应力分量:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{x1} &= \frac{\gamma H}{\pi} \left[\arctan \frac{y+a}{x} - \arctan \frac{y+b}{x} + \frac{x(y+a)}{x^2 + (y+a)^2} - \frac{x(y+b)}{x^2 + (y+b)^2} \right] \\
 \sigma_{y1} &= \frac{\gamma H}{\pi} \left[\arctan \frac{y+a}{x} - \arctan \frac{y+b}{x} - \frac{x(y+a)}{x^2 + (y+a)^2} + \frac{x(y+b)}{x^2 + (y+b)^2} \right] \\
 \tau_{xy1} &= -\frac{\gamma H}{\pi} \left[\frac{x^2}{x^2 + (y+a)^2} - \frac{x^2}{x^2 + (y+b)^2} \right]
 \end{aligned} \quad (1)$$

BC 段载荷在采场底板岩体中引起的应力分量：

$$\begin{aligned}\sigma_{x2} &= \frac{\gamma H}{\pi(b-c)} \left\{ \frac{(k-1)x^3 + x(y+b)[(k-1)y + (kb-c)]}{x^2 + (y+b)^2} - \frac{(k-1)x^3 + x(y+c)[(k-1)y + (kb-c)]}{x^2 + (y+c)^2} + \right. \\ &\quad \left. [(k-1)y + (kb-c)] \left(\arctan \frac{y+b}{x} - \arctan \frac{y+c}{x} \right) \right\} \\ \sigma_{y2} &= \frac{\gamma H}{\pi(c-b)} \left\{ \frac{(k-1)x^3 + x(y+b)[(k-1)y + (kb-c)]}{x^2 + (y+b)^2} - \frac{(k-1)x^3 + x(y+c)[(k-1)y + (kb-c)]}{x^2 + (y+c)^2} - \right. \\ &\quad \left. [(k-1)y + (kb-c)] \left(\arctan \frac{y+b}{x} - \arctan \frac{y+c}{x} \right) + (k-1)x \ln \frac{x^2 + (y+b)^2}{x^2 + (y+c)^2} \right\} \\ \tau_{xy2} &= \frac{\gamma H}{\pi(c-b)} \left[\frac{(b-c)x^2}{x^2 + (y+b)^2} - \frac{(b-c)kx^2}{x^2 + (y+c)^2} + (k-1)x \left(\arctan \frac{y+b}{x} - \arctan \frac{y+c}{x} \right) \right] \quad (2)\end{aligned}$$

CO 段载荷在采场底板岩体中引起的应力分量：

$$\begin{aligned}\sigma_{x3} &= -\frac{k\gamma H}{\pi c} \left[\frac{x^3 + xy(y+c)}{x^2 + (y+c)^2} - \frac{x^3 + xy^2}{x^2 + y^2} + y \left(\arctan \frac{y+c}{x} - \arctan \frac{y}{x} \right) \right] \\ \sigma_{y3} &= -\frac{k\gamma H}{\pi c} \left[\frac{x^3 + xy^2}{x^2 + y^2} - \frac{x^3 + xy(y+c)}{x^2 + (y+c)^2} - y \left(\arctan \frac{y}{x} - \arctan \frac{y+c}{x} \right) - x \ln \frac{x^2 + (y+c)^2}{x^2 + y^2} \right] \\ \tau_{xy3} &= \frac{k\gamma H}{\pi c} \left[x \left(\arctan \frac{y+c}{x} - \arctan \frac{y}{x} \right) - \frac{cx^2}{x^2 + (y+c)^2} \right] \quad (3)\end{aligned}$$

OD 段载荷在采场底板岩体中引起的应力分量：

$$\begin{aligned}\sigma_{x4} &= \frac{\gamma H_m}{\pi} \left[\arctan \frac{y}{x} - \arctan \frac{y-d}{x} + \frac{xy}{x^2 + y^2} - \frac{x(y-d)}{x^2 + (y-d)^2} \right] \\ \sigma_{y4} &= \frac{\gamma H_m}{\pi} \left[\arctan \frac{y}{x} - \arctan \frac{y-d}{x} - \frac{xy}{x^2 + y^2} + \frac{x(y-d)}{x^2 + (y-d)^2} \right] \\ \tau_{xy4} &= -\frac{\gamma H_m}{\pi} \left[\frac{x^2}{x^2 + y^2} - \frac{x^2}{x^2 + (y-d)^2} \right] \quad (4)\end{aligned}$$

DE 段载荷在采场底板岩体中引起的应力分量：

$$\begin{aligned}\sigma_{x5} &= \frac{k\gamma H}{\pi(d-e)} \left[(y-d) \left(\arctan \frac{y-e}{x} - \arctan \frac{y-d}{x} \right) + \frac{x^3 + x(y-d)(y-e)}{x^2 + (y-e)^2} - \frac{x^3 + x(y-d)^2}{x^2 + (y-d)^2} \right] \\ \sigma_{y5} &= \frac{k\gamma H}{\pi(d-e)} \left[(y-d) \left(\arctan \frac{y-e}{x} - \arctan \frac{y-d}{x} \right) - \frac{x^3 + x(y-d)(y-e)}{x^2 + (y-e)^2} + \frac{x^3 + x(y-d)^2}{x^2 + (y-d)^2} - x \ln \frac{x^2 + (y-e)^2}{x^2 + (y-d)^2} \right] \\ \tau_{xy5} &= \frac{k\gamma H}{\pi(d-e)} \left[x \left(\arctan \frac{y-d}{x} - \arctan \frac{y-e}{x} \right) + \frac{(d-e)x^2}{x^2 + (y-e)^2} \right] \quad (5)\end{aligned}$$

EF 段载荷在采场底板岩体中引起的应力分量：

$$\begin{aligned}\sigma_{x6} &= -\frac{\gamma H}{\pi(f-e)} \left\{ \frac{(k-1)x^3 + x(y-e)[(k-1)y - (kf-e)]}{x^2 + (y-e)^2} - \frac{(k-1)x^3 + x(y-f)[(k-1)y - (kf-e)]}{x^2 + (y-f)^2} + \right. \\ &\quad \left. [(k-1)y - (kf-e)] \left(\arctan \frac{y-e}{x} - \arctan \frac{y-f}{x} \right) \right\} \\ \sigma_{y6} &= -\frac{\gamma H}{\pi(f-e)} \left\{ \frac{(k-1)x^3 + x(y-f)[(k-1)y + (kf-e)]}{x^2 + (y-f)^2} - \frac{(k-1)x^3 + x(y-e)[(k-1)y - (kf-e)]}{x^2 + (y-e)^2} + \right. \\ &\quad \left. [(k-1)y - (kf-e)] \left(\arctan \frac{y-e}{x} - \arctan \frac{y-f}{x} \right) - (k-1)x \ln \frac{x^2 + (y-e)^2}{x^2 + (y-f)^2} \right\} \\ \tau_{xy6} &= \frac{\gamma H}{\pi(f-e)} \left[\frac{(f-e)x^2}{x^2 + (y-f)^2} - \frac{(f-e)kx^2}{x^2 + (y-e)^2} + (k-1)x \left(\arctan \frac{y-e}{x} - \arctan \frac{y-f}{x} \right) \right] \quad (6)\end{aligned}$$

FG 段载荷在采场底板岩体中引起的应力分量：

$$\begin{aligned}\sigma_{x7} &= \frac{\gamma H}{\pi} \left[\arctan \frac{y-f}{x} - \arctan \frac{y-g}{x} + \frac{x(y-f)}{x^2+(y-f)^2} - \frac{x(y-g)}{x^2+(y-g)^2} \right] \\ \sigma_{y7} &= \frac{\gamma H}{\pi} \left[\arctan \frac{y-f}{x} - \arctan \frac{y-g}{x} - \frac{x(y-f)}{x^2+(y-f)^2} + \frac{x(y-g)}{x^2+(y-g)^2} \right] \\ \tau_{xy7} &= -\frac{\gamma H}{\pi} \left[\frac{x^2}{x^2+(y-f)^2} - \frac{x^2}{x^2+(y-g)^2} \right]\end{aligned}\quad (7)$$

LM段荷载在采场底板岩体中引起的应力分量:

$$\begin{aligned}\sigma_{x8} &= \frac{P}{\pi} \left[\arctan \frac{y+a}{x} - \arctan \frac{y-g}{x} + \frac{x(y+a)}{x^2+(y+a)^2} - \frac{x(y-g)}{x^2+(y-g)^2} \right] \\ \sigma_{y8} &= \frac{P}{\pi} \left[\arctan \frac{y+a}{x} - \arctan \frac{y-g}{x} - \frac{x(y+a)}{x^2+(y+a)^2} + \frac{x(y-g)}{x^2+(y-g)^2} \right] \\ \tau_{xy8} &= -\frac{P}{\pi} \left[\frac{x^2}{x^2+(y+a)^2} - \frac{x^2}{x^2+(y-g)^2} \right]\end{aligned}\quad (8)$$

基于应力叠加原理,将各线性载荷作用下在采场底板岩体中引起的应力分量对应相加,得到沿工作面倾向底板岩体内任意一点的垂直应力、水平应力和剪切应力表达式^[17]为:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sigma_{x4} + \sigma_{x5} + \sigma_{x6} + \sigma_{x7} + \sigma_{x8} \\ \sigma_y = \sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3} + \sigma_{y4} + \sigma_{y5} + \sigma_{y6} + \sigma_{y7} + \sigma_{y8} \\ \tau_{xy} = \tau_{xy1} + \tau_{xy2} + \tau_{xy3} + \tau_{xy4} + \tau_{xy5} + \tau_{xy6} + \tau_{xy7} + \tau_{xy8} \end{cases}\quad (9)$$

计算采场底板任一点的最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 时,可以用材料力学中有关主应力与法向应力及剪应力间的关系式计算,即:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

根据董家河煤矿 22516 工作面矿压规律、围岩特性、地质环境等条件。取应力集中系数 $k=2.0$;岩层重度 $\gamma=23 \text{ kN/m}^3$;工作面采深 $H=350 \text{ m}$;承压含水层水压 $P=1.2 \text{ MPa}$;工作面倾向长度 $d=140 \text{ m}$;周期来压时,工作面两侧煤体塑性区宽度取 6 m ;弹性区宽度取 12 m ;为了使计算结果更加贴近实际,在煤体两帮各考虑 30 m 原岩应力区;承压水层上边界与采场底板距离 $h=33 \text{ m}$ 。

2.3 采场底板破坏分析

前面笔者已经基于弹性理论得出了采场底板的应力分量表达式,当采场底板某点的应力达到或超过其强度极限时,该点将会出现屈服破坏^[18]。为求出采场底板破坏深度,以下将采用带有拉伸破坏的 Mohr-Coulomb 准则对底板破坏进行分析。带有拉伸破坏的 Mohr-Coulomb 屈服准则强度包线如图 4 所示,其中 σ_t 为抗拉强度,MPa; σ_c 为抗压强度,MPa。判别式如式(11)、式(12)所示:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (11)$$

$$\sigma_3 = -\sigma_t \quad (12)$$

式中: c 为采场底板岩体的黏聚力,MPa; φ 为采场底板岩体的内摩擦角,°; σ_t 为采场底板岩体的抗拉强度,MPa。

根据董家河煤矿 22516 工作面矿压规律、围岩特性、地质环境等条件。取采场底板岩体内摩擦角 $\varphi=30^\circ$,黏聚力 $c=4 \text{ MPa}$,抗拉强度 $\sigma_t=0.6 \text{ MPa}$ 。根据图 3 建立的采场底板直角坐标系,将底板按 1 m 间隔区域离散分开,对每一个离散点采用式(10)确定出采场底板任一点的最大、最小主应力,再运用式(11)、式(12)对采场底板进行判定是否发生拉伸破坏或剪切破坏,判断时优先判定拉伸破坏^[19],计算结果如图 5 所示。

根据图 5 分析可知,周期来压时,采场底板沿工作面倾向破坏形态近似“倒马鞍形”,且最大破坏深

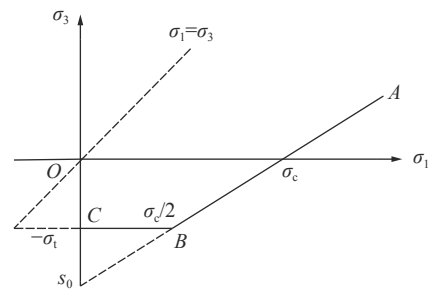


图 4 带有拉伸破坏的 Mohr-Coulomb 屈服准则强度包线

Fig.4 Mohr-Coulomb yield criterion strength envelope with tensile failure

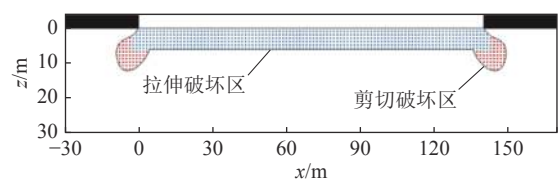


图 5 采场底板破坏形态

Fig.5 Destruction pattern of stope floor

度为 12 m。工作面两侧底板破坏深度较大,采空区底板破坏深度较小。由于工作面两侧煤体受支撑压力的作用,在工作面边缘煤体弹塑性交界处主要发生剪切破坏,且破坏深度达到最大;位于采空区卸压区段,采场底板主要发生拉伸破坏,破坏深度相对较小。

3 采场底板破坏数值模拟分析

3.1 数值模型建立

采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对董家河煤矿 22516 工作面回采过程中采场底板破坏进行数值计算分析。模型设计为 240 m (X 轴)×150 m (Y 轴)×120 m (Z 轴)。其中取工作面宽度为 140 m,两侧保护煤柱宽度为 50 m。模拟过程中,采用 Mohr-Coulomb 模型,开启大应变模式。模型上表面采用应力边界条件,上表面按上覆岩层的自重计算,施加相对应的垂直应力 8.1 MPa,水平应力 9.6 MPa,底面固定,4 个侧面限制水平位移。为了模拟采场底板承压水的作用,在模型下方施加大小为 1.2 MPa 的固定水压。计算过程中,用 fish 语言模拟回采工作面每次推进距离为 10 m,依次循环,直到工作面推进结束。煤层顶底板力学参数见表 1,数值计算模型建立如图 6 所示。

表 1 煤层顶底板力学参数

| 岩性 | 体积模 量/GPa | 切变模 量/GPa | 黏聚力/ MPa | 抗拉强 度/MPa | 内摩擦 角/(°) | 密度/ (kg·m ⁻³) |
|-------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|------------------------------|
| 粉砂岩 | 4.67 | 4.34 | 4.67 | 1.34 | 39 | 2 670 |
| 中粒砂岩 | 3.38 | 3.32 | 5.00 | 1.10 | 40 | 2 650 |
| 细粒砂岩 | 4.22 | 4.03 | 3.98 | 1.11 | 39 | 2 620 |
| 砂质泥岩 | 3.65 | 3.28 | 2.25 | 1.55 | 38 | 2 640 |
| 5号煤 | 1.43 | 0.44 | 1.52 | 0.10 | 28 | 1 400 |
| 石英砂岩 | 4.54 | 4.31 | 4.72 | 1.21 | 40 | 2 660 |
| 细砂岩 | 4.20 | 4.15 | 4.58 | 1.24 | 39 | 2 640 |
| 6号煤 | 1.43 | 0.44 | 1.52 | 0.10 | 28 | 1 400 |
| 砂质泥岩 | 3.65 | 3.28 | 2.25 | 1.55 | 38 | 2 640 |
| 细粉砂岩 | 3.38 | 3.32 | 5.00 | 1.10 | 40 | 2 650 |
| K ₂ 灰岩 | 22.6 | 11.10 | 3.65 | 1.71 | 37 | 2 090 |
| 10号煤 | 1.43 | 0.44 | 1.00 | 0.10 | 25 | 1 400 |
| 铝质泥岩 | 4.86 | 4.78 | 4.71 | 1.51 | 30 | 2 620 |
| 奥灰岩 | 8.78 | 5.23 | 4.32 | 1.32 | 37 | 2 770 |

3.2 模拟结果分析

通过 FLAC^{3D} 数值模拟分析得到董家河煤矿 22516 工作面回采过程中采场底板岩体破坏特征。

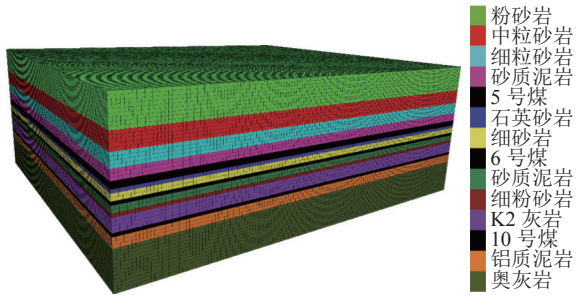


图 6 数值计算模型建立

Fig.6 Establishment of numerical calculation model

随着工作面的推进,原岩应力平衡状态被打破,底板发生破坏变形,取采场底板走向中部塑性区切片进行分析,承压水上采场底板倾向塑性区分布如图 7 所示。采场倾向不同位置处底板深度与垂直应力关系如图 8 所示,由于工作面沿倾向具有对称性,故只对工作面中间左侧底板进行分析。

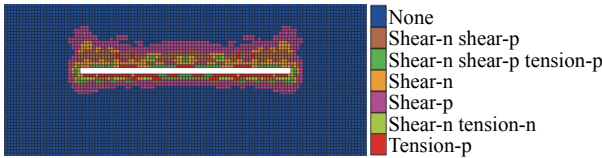


图 7 采场底板倾向塑性区分布

Fig.7 Distribution of inclined plastic zone of stope floor

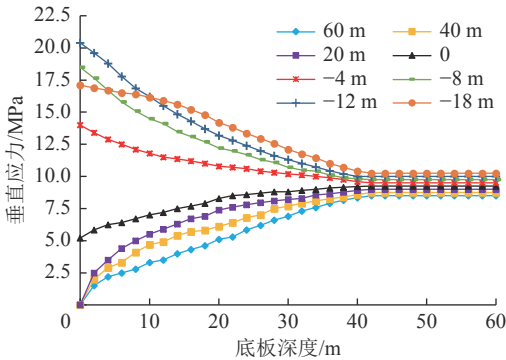


图 8 采场底板深度与垂直应力关系

Fig.8 Relationship between depth of stope floor and vertical stress

根据图 7 分析可知,数值模拟得到采场底板沿工作面倾向塑性区分布近似“倒马鞍形”,且靠近工作面边缘弹塑性交界处底板最大破坏深度为 13 m,破坏形式主要为剪切破坏。位于采空区卸压区段,采场底板破坏深度较小,破坏形式主要为剪切破坏及拉伸破坏。这与通过理论分析得到的承压水上采场底板破坏特征几乎一致。根据图 8 分析可知,底板深度为 0~20 m 受工作面采动影响程度最大,在采空区底板中,垂直应力随着底板深度的增加而增

大,在工作面两侧煤壁底板中,垂直应力随着底板深度的增加而减小。底板深度为20~40 m受工作面采动影响程度较小。底板深度大于40 m时,垂直应力基本达到原岩应力状态。

4 现场实测

4.1 实测设备及方案

利用双端封堵测漏装置对采场底板破坏深度进行现场实测,因该装置具有操作方便、观测结果准确等优点被现场水文地质测试广泛应用。该装置可以在井下选取合适的位置,任意调节注水角度,然后进行分段注水测试。通过钻孔内注水漏失量来判定采场底板的最大破坏深度^[20]。

观测位置选在下区段运输巷处,如图9所示。在采场底板共布置3个观测钻孔,其中钻孔1为采前孔,此时底板岩层为工作面回采前未受到扰动时的状态,起对照作用,钻孔2和钻孔3为采后孔,钻孔参数见表2。通过钻孔在不同位置处漏水情况,对采场底板岩体裂隙分布状况进行推断,从而得到采场底板岩体的最大破坏深度。

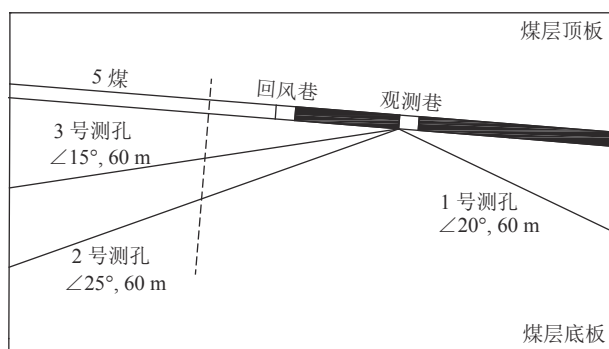


图9 钻孔布置剖面图

Fig.9 Sectional view of drilling arrangement

表2 钻孔参数

Table 2 Drilling parameters

| 孔号 | 钻孔名称 | 孔径/mm | 倾角/(°) | 孔深/m | 突变点深度/m | 破坏深度/m |
|----|------|-------|--------|------|---------|--------|
| 1 | 采前孔 | 89 | 20 | 64 | — | — |
| 2 | 采后孔 | 89 | 25 | 64 | 32 | 13.52 |
| 3 | 采后孔 | 89 | 15 | 64 | 52 | 13.46 |

4.2 实测结果分析

对现场测试数据进行整理,绘制钻孔1~3的钻孔深度与钻孔漏失量关系如图10所示。

根据图10分析可知:

1)1号测孔在钻孔深度为20 m处发生漏水现象,但是其漏水量为1.1 L/min,相对较小,这可能是岩体

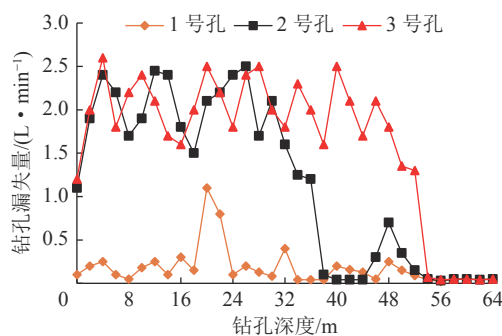


图10 钻孔1~3的钻孔深度与钻孔漏失量关系

Fig.10 Relationship between drilling depth of drilling holes 1 to 3 and the drilling leakage

原生裂隙或测试误差等因素引起的。1号测孔在其他钻孔深度处漏水量集中在0~0.4 L/min,表明采场底板岩体比较完整,裂隙发育情况不显著。

2)2号测孔在钻孔深度为0~30 m时,漏水量集中在1.5~2.5 L/min,整体漏水量大于1号测孔。在钻孔深度为32 m时,漏水量明显下降,出现突变点。钻孔深度为34~64 m时,除钻孔深度48 m处漏水量为0.7 L/min外,其他钻孔深度处漏水量均趋于0。因此,根据漏水量突变点32 m和测孔倾角25°可以确定2号测孔底板最大破坏深度为13.52 m。

3)3号测孔在钻孔深度为0~50 m时,漏水量集中在1.7~2.6 L/min。在钻孔深度为52 m时,漏水量明显下降,出现突变点。钻孔深度为54~64 m时,漏水量均趋于0。因此,根据漏水量突变点52 m和测孔倾角15°可以确定3号测孔底板最大破坏深度为13.46 m。

综上所述可得,通过现场实测得到董家河煤矿22507工作面底板最大破坏深度为13.52 m,这与笔者通过理论分析得到的12 m和数值模拟计算得到的13 m相比,结果比较接近,相对误差分别为11.2%和3.8%。验证了笔者理论模型建立的合理性以及数值模拟分析的正确性。

5 结论

1)基于矿山压力与岩层控制理论,考虑了采场底板受采动产生的支承压、采空区压实后对底板的作用力以及承压水的共同作用,构建了采场底板倾向力学计算模型,根据弹性力学理论对底板破坏特征进行分析。

2)针对董家河煤矿地质背景,采用带有拉伸破坏的Mohr-Coulomb屈服准则对采场底板破坏进行判定。结果表明:周期来压时,采场底板沿工作面倾向破坏形态近似“倒马鞍形”,且最大破坏深度为

12 m。工作面两侧底板破坏深度较大, 采空区底板破坏深度较小。

3) 数值模拟计算得到采场底板沿工作面倾向塑性区分布近似“倒马鞍形”, 且靠近工作面边缘弹性交界处底板最大破坏深度为 13 m, 破坏形式主要为剪切破坏。位于采空区卸压区段, 采场底板破坏深度较小, 主要破坏形式为剪切破坏及拉伸破坏。

4) 通过现场实测得到董家河煤矿 22516 工作面底板最大破坏深度为 13.52 m, 这与笔者通过理论分析得到的 12 m 和数值模拟计算得到的 13 m 相比, 结果比较接近, 验证了笔者理论模型建立的合理性以及数值模拟分析的正确性。研究方法为分析承压水上采场底板破坏特征提供了新参考。

参考文献(References):

- [1] 鲁海峰, 沈 丹, 姚多喜, 等. 断层影响下底板采动临界突水水压解析[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 888–895.
LU Haifeng, SHEN Dan, YAO Duoxi, *et al.* Analytical solution of the critical water inrush pressure from floor mining under the influence of faults[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(6): 888–895.
- [2] 王兴明. 渭北奥灰承压水矿区采场底板破坏特征及突水机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
WANG Xingming. Study on failure characteristics and water inrush mechanism of stope floor in Ordovician Limestone confined water mining area, Weibei [D]. Xi 'an: Xi 'an University of Science and Technology, 2021.
- [3] 孙 建, 王连国. 采场底板倾斜隔水关键层的失稳力学判据[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2276–2285.
SUN Jian, WANG Lianguo. The instability mechanics criterion of the sloping water-proof key layer of the stope floor[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2276–2285.
- [4] 孟祥瑞, 徐铨辉, 高召宁, 等. 采场底板应力分布及破坏机理[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1832–1836.
MENG Xiangrui, XU Chenghui, GAO Zhaoning, *et al.* Stress distribution and failure mechanism of stope floor[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1832–1836.
- [5] 王连国, 韩 猛, 王占盛, 等. 采场底板应力分布与破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 317–322.
WANG Lianguo, HAN Meng, WANG Zhansheng, *et al.* Research on the stress distribution and failure law of stope floor[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3): 317–322.
- [6] 郑 纲, 徐小兵, 何 渊, 等. 厚煤层放顶煤开采底板突水机理及水害探查技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(S1): 7–13.
ZHENG Gang, XU Xiaobing, HE Yuan, *et al.* Floor water inrush mechanism and water hazard detection technology for top coal caving mining in thick coal seams[J]. Coal Geology and Exploration, 2019, 47(S1): 7–13.
- [7] 刘伟韬, 穆殿瑞, 谢祥祥, 等. 倾斜煤层底板采动应力分布规律及破坏特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 756–764.
LIU Weitao, MU Dianrui, XIE Xiangxiang, *et al.* Stress distribution and failure characteristics of inclined coal seam floor mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(4): 756–764.
- [8] 宋文成, 梁正召, 赵春波. 承压水上开采沿工作面倾向底板力学破坏特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2131–2143.
SONG Wencheng, LIANG Zhengzhao, ZHAO Chunbo. Mechanical failure characteristics of inclined floor along working face in confined water mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2131–2143.
- [9] 李春元, 张 勇, 彭 帅, 等. 深部开采底板岩体卸荷损伤的强扰动危险性分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 3957–3968.
LI Chunyuan, ZHANG Yong, PENG Shuai, *et al.* Strong disturbance hazard analysis of unloading damage of floor rock mass in deep mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 3957–3968.
- [10] 董书宁, 王 皓, 张文忠. 华北型煤田奥灰顶部利用与改造判别准则及底板破坏深度[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2216–2226.
DONG Shuning, WANG Hao, ZHANG Wenzhong. Criteria for utilization and reconstruction of Ordovician Ash in North China coalfield and floor destruction depth[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2216–2226.
- [11] 王厚柱, 鞠远江, 秦坤坤, 等. 深部近距离煤层开采底板破坏规律实测对比研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 553–561.
WANG Houzhu, JU Yuanjiang, QIN Kunkun, *et al.* Comparative study on floor failure law of deep close coal seam mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(3): 553–561.
- [12] 赵春虎. 孤岛工作面底板破坏深度微震测试与模拟分析[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 110–116.
ZHAO Chunhu. Microseismic test and simulation analysis of floor failure depth of Gudao working face[J]. Coal Geology and Prospecting, 2019, 47(4): 110–116.
- [13] 鲁海峰, 孟祥帅, 颜 伟, 等. 采煤工作面层状结构底板采动稳定及破坏深度的圆弧滑动解[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 166–174.
LU Haifeng, MENG Xiangshuai, YAN Wei, *et al.* Arc slip solution of stability and failure depth of stratified structure floor in coal mining face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 166–174.
- [14] 邵良杉, 周 玉. 基于 PSO-ELM-Boosting 模型的底板破坏深度预测[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(4): 24–29.
SHAO Liangshan, ZHOU Yu. Prediction of floor damage depth based on PSO-ELM-Boosting model[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(4): 24–29.
- [15] 黄琪嵩, 程久龙. 软硬互层岩体采场底板的应力分布及破坏特征研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S1): 36–42.
HUANG Qisong, CHENG Jiulong. Study on stress distribution and failure characteristics of stope floor of soft and hard interbedded rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 36–42.
- [16] 郭金钢, 王伟光, 何富连, 等. 大断面综放沿空巷道基本顶破断结构与围岩稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3):

- 446–454,464.
- GUO Jingang, WANG Weiguang, HE Fulian, *et al.* Analysis of basic roof fracture structure and surrounding rock stability of large-section fully mechanized caving roadway[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2019, 36(3): 446–454,464.
- [17] 孙卓越, 孟宪志, 郝登云, 等. 带压开采工作面长度对底板破坏深度的影响[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(7): 22–27.
- SUN Zhuoyue, MENG Xianzhi, HAO Dengyun, *et al.* The influence of the length of working face under pressure on the depth of floor failure[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(7): 22–27.
- [18] 鲁海峰, 姚多喜, 胡友彪, 等. 水压影响下煤层底板采动破坏深度弹性力学解 [J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 452–458.
- LU Haifeng, YAO Duoxi, HU Youbiao, *et al.* Elastic mechanics solution of coal floor mining failure depth under the influence of water pressure[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2017, 34(3): 452–458.
- [19] 刘启蒙, 刘 瑜, 张缓缓. 基于损伤变量的煤层底板采动破坏深度计算[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 123–128,138.
- LIU Qimeng, LIU Yu, ZHANG Suwan. Calculation of coal seam floor mining failure depth based on damage variables[J]. *Coal Geology and Prospecting*, 2017, 45(6): 123–128,138.
- [20] 马雄德, 严 戈, 冀瑞君, 等. 渭北煤田地下水特征及保水采煤研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 109–116.
- MA Xiongde, YAN Ge, JI Ruijun, *et al.* Groundwater characteristics of Weibei coalfield and research progress of water-preserving coal mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 109–116.