

韦韬,李博,王中美,等.基于尖点突变模型的煤层底板突水危险性评价[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(1):23-29. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.004

Wei T, Li B, Wang Z M, et al. Risk Assessment of Water Inrush from Coal Floor based on Cusp Catastrophe Model [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35 (1): 23-29. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.004

基于尖点突变模型的煤层底板突水 危险性评价

韦韬¹,李博^{2,3*},王中美¹,王先庆¹,张文平¹

(1.贵州大学 资源与环境工程学院,贵州 贵阳 550000;2.贵州大学 国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室,贵州 贵阳 550000;
3.中国矿业大学(北京) 国家煤矿水害防治工程技术研究中心,北京 100083)

摘要:煤矿突水事故是制约煤炭开采的重要因素之一,准确预测煤矿突水对指导煤矿安全开采具有重要意义.煤层在开采后,当底板承受的水压超过自身强度时,会发生不连续突变,即煤层底板岩层失稳破坏形成底板突水,其破坏模式为一种突变现象,符合突变理论中的尖点突变理论描述,利用突变模型对煤层底板突水进行预测具有可行性.本文结合典型工程案例,选取单位水压岩层底板厚度和底板导水因子作为控制变量,通过求解状态变量实现了煤层底板突水危险性评价,在此基础上,将基于突变模型的煤层底板突水危险性评价结果和传统突水系数法的评价结果进行了对比,证明了突变模型评价过程更加符合突水发生机理且评价结果更加准确.

关键词:煤层底板;突水;突变;预测;尖点突变模型

中图分类号:TD745 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)01-0023-07

Risk Assessment of Water Inrush from Coal Floor Based on Cusp Catastrophe Model

Wei Tao¹, Li Bo^{2,3}, Wang Zhongmei¹, Wang Xianqing¹, Zhang Wenping¹

(1. College of resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550000, China;

2. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550000, China;

3. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling,
China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Coal mine water inrush accident is one of the important factors restricting coal mining, accurate prediction of coal mine water inrush is of great significance to guide safe coal mining. After coal mining, when the water pressure on the floor exceeded its own strength, discontinuous catastrophe occurred, that is, the instability and failure of the coal floor rock formation led to water inrush from the floor. The failure mode was a catastrophe phenomenon, which conformed to the description of cusp catastrophe theory in catastrophe theory. The catastrophe model was used to predict water inrush from the coal floor. It was feasible. Combined with typical

收稿日期:2018-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41702270;41572222);贵州省科技计划联合基金资助项目(黔科合 LH 字[2017]7284 号);贵州省科技计划资助项目(黔科合平台人才[2017]5788 号);贵州省教育厅青年科技人才成长项目资助(黔教合 KY 字[2018]113)

*通信作者,E-mail:libo1512@163.com

engineering cases, the floor thickness of unit hydraulic pressure of coal seam floor and floor water conductivity factor were chosen as control variables, and the risk assessment of water inrush from coal seam floor was realized by solving state variables. On this basis, the risk assessment result of water inrush from coal seam floor based on catastrophe model and the evaluation result of traditional water inrush coefficient method were combined. The results show that the catastrophe model is more consistent with the mechanism of water inrush and the evaluation results are more accurate.

Keywords: coal seam floor; water inrush; catastrophe; prediction; cusp catastrophe model

我国煤田水文地质条件复杂,矿井突水事故近些年虽然呈现下降趋势,但水害威胁依旧严重,因此,客观准确地对矿井突水进行预测预报具有重要意义.目前煤矿底板突水预测方法主要分为两大类:一是突水机理预测法,二是数学与计算机模型预测法^[1].代表性的如突水系数法^[2]、岩水应力关系法,即阻水系数法^[3]、D-S 证据理论^[4],这些方法主要是根据底板隔水层厚度、底板隔水层岩体承受的水压和力学特征等因素与突水之间的关系,建立突水判据.二是数学与计算机模型预测法,代表性的如多源信息融合法^[5]、模糊综合评判法^[6]、变权理论法^[7-10]、灰色理论^[11-12]、模糊神经理论^[13]等,这类方法主要是在考虑各种突水影响因素的基础上对各因素赋予相对应的权重,建立突水预测模型.上述煤层底板突水预测方法为解决突水预测难题提供了有效思路.但煤矿突水属于一种突变现象,这类预测方法并不能很好反应煤层底板突水由裂隙发展到突水过程中的突变性.煤层底板突水是一种受控于多因素影响且具有非常复杂形成机理的非线性动力现象^[14],影响底板突水的主要作用力有:煤层底板下伏含水层的水头压力、矿山压力、地应力等.煤矿开采前矿山处于应力平衡状态,在开采过程中,底板隔水层动压力引起的多次扰动下,会引起围岩累积性损伤的加剧与局部应力环境的恶化,当底板承受的矿压和水压超过自身强度时,会发生不连续突变,产生裂纹的大规模瞬时动力扩展,继而失稳破坏形成突水^[15].从突水过程来看,这是一种由渐进到突变的过程.根据煤层底板突水的上述特征,本文根据突变理论中的尖点突变模型建立了突水危险性预测模型,对典型工程实例进行了应用,并与传统的突水系数法进行了对比,证明了突水突变模型更能体现煤矿突水过程中的突变特征,从另一角度探求煤层底板突水的预测预报方法.

1 研究区概况

1.1 交通位置

显德汪矿位于河北省邢台市西南部 35 km 处,南部与邯郸地区武安市相接,东距京广铁路裕钡车站 25 km,属于邢台地区沙河市与邯郸地区武安市的接壤地带.交通极为方便,井田大部分属沙河市白塔镇管辖,只有东南小部分属武安市邑城乡管辖.

1.2 自然地理

显德汪矿区位于太行山东麓山前地带,被北西向次一级分水岭分割,全区地势西高东低,起伏较大,最高标高 339.6 m,最低标高 194.10 m.按地貌成因类型划分,本区为冰碛台地地形.自下而上依次为漫滩及一级台地、二级台地和三级台地.本区属大陆性季风气候,多年平均降水量 497.0 mm,雨季多集中在 7 月~8 月,年平均气温 13 ℃,多年平均蒸发量 1 719 mm.井田内地表水系不发育,仅有季节性小溪 3 条,雨季有水,旱季断流,均属北洛河支流.

1.3 地质条件

显德汪矿被新生界第四系松散沉积层覆盖,且与下伏各地层呈不整合接触.研究区发育的地层自下而上依次为奥陶系中统马家沟组(O_2m)、峰峰组(O_2f),石炭系中统本溪组(C_2b)、石炭系上统太原组(C_3t),二叠系下统山西组(P_1s)、二叠系下统下石盒子组(P_1x)、二叠系上统上石盒子组(P_2s)、新生界第四系(Q).

矿区内较大褶曲为东部的显德汪向斜、南部的栾卸向斜,以及西部的李石岗向斜和李石岗背斜.向斜形态比较清晰完整,宽缓开阔,略显波状起伏.背斜形态不明显,常成鼻状.区内大、中型断层大多呈 NNE 或 NW 向斜列,与褶皱轴向基本平行,反映区内构造主应力方向来自北西、南东.

1.4 水文条件

根据岩性、结构、富水特征及其对开采煤层的影响程度,参考区域含水岩组情况,矿区含水层划分如下:(1)新生界松散类孔隙潜水含水组;(2)二叠系砂岩裂隙承压含水组;(3)石炭系岩溶裂隙承压含水组;(4)奥陶系灰岩岩溶裂隙承压含水层.研究区奥陶系灰岩含水层富水性极不均一,具有明显的分带性,研究区水文地质结构图见图 1.煤系地层下伏的奥陶系灰岩,厚度大、裂隙发育,水量丰富,单位涌水量值在 0.002 77~10.090 00 L/s·m,渗透系数在 0.053~16.050 m/d,富水性极不均一.矿区主采煤层 9[#]煤下伏的铝土质泥岩和铝土质砂岩为底板隔水层,平均厚度为 36.51 m,薄厚不均,极易遭受奥陶系水害威胁,是本次评价的目标煤层.

地层时代	含隔水层	柱状图	厚度/m	距离/m
太原组	隔水层	6.0~29.5	平均厚度 36.51
	岩溶裂隙含水层	.....	1.50~8.73
	8煤	.....	0.0~2.8
	隔水层	.....	0.5~15.0
	目标煤层	.....	9煤 0.78~14.71
本溪组	隔水层	5~24	平均厚度 36.51
	10煤	.....	0~8
奥陶系	岩溶裂隙含水层	4.0~20.5	平均厚度 36.51
	岩溶裂隙含水层	.....	> 300

图 1 水文地质结构

2 煤层底板突水突变模型

突变理论由法国数学家勒内·托姆于 20 世纪 70 年代初期创立,勒内·托姆将系统内部状态的整体性“突跃”称为突变,其特点是过程连续而结果不连续^[16].而近年来突变理论在铁路系统安全评价、边坡稳定性评价^[17]和隧道底板安全评价等各领域中均有应用^[18-20].在文献[16]中认为人类活动或者自然界中的事物都是有稳定态和非稳定态 2 种情况,没有受到外界影响或在细微的扰动下仍能保持原平衡状态的事物称为稳定态,而在细微扰动下迅速离开原平衡状态的事物认为是非稳定态.突变的发生就是一个稳定态向另一个稳定态转换的现象.煤层底板突水属于一种突变现象,煤矿开采前煤层底板岩体处于平衡状态,因开采扰动使其处于非稳定状态,一旦突水发生则转换成了另一种稳定状态.本文利用突变理论中运用最广泛的模型——尖点突变模型进行煤层底板突水危险性评价.

水压是煤层底板破裂的诱发因素,水压的大小对煤层底板突水起着控制作用.煤层底板厚度是指下覆含水层到煤层间的距离,对突水起着抑制作用,煤层底板厚度越大则突水可能性越小,厚度小的地方突水危险性大.底板导水裂隙是煤层底板的突水路径,也是底板破坏程度的一个量化指标,而导水裂隙带是否贯通煤层和含水层是突水直接判据,也是发生突变的前后 2 个状态.图 2 给出尖点突变模型分析示意图,结合图 2 分析尖点突变理论在煤层底矿突水中的应用.在煤矿底板突水危险性的评估中,以底板水压,底板隔水层厚度,还有底板隔水层裂隙带高度作为主要因素.以尖点突变模型描述煤层底板突水情况时,用 z 轴表

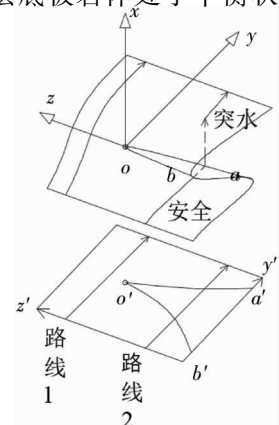


图 2 尖点突变模型分析

示单位水压底板岩层厚度,即煤层底板厚度除以煤层底板水压,用其值 R 表示; y 轴为底板裂隙发育条件,用 h_1 表示底板裂隙带高度; x 轴表示煤层底板发生突水的危险性,是模型中的状态变量用 I_p 表示.假定 R 值较大,即单位水压煤层底板厚度的值沿 z 轴远离坐标原点,那么突水的危险性 I_p 值单调且缓慢地随着 h_1 的发育缓慢增加(如图2中的路线1);当 R 值在分支曲线 $b'o'a'$ 的范围中时,便会出现性质不一样的现象,在这种现象下,随着 h_1 逐渐增加, I_p 会出现一个跳跃增长(例如图2中路线2,沿着路线2前进到 $o'a'$ 曲线处发生跳跃).图3中,平衡曲面的上叶为“突水区”,是随着 h_1 值的增大而导致 I_p 发生跳跃所达到的区域.即当水压较大,煤层底板厚度较小时,当底板裂隙带发展到某一个高度时就会发生突水.反之,煤层底板裂隙高度较小时, I_p 值处在平衡曲线下叶的“安全区”.

尖点突变模型的势函数一般由式(1)表达.

$$V(x) = x^4 + ux^2 + vx. \quad (1)$$

式中: x 为状态变量; u, v 为控制变量.

在数学角度来评定一个系统是否处于稳定状态,需要求出其函数的极值,求势函数 $V(x)$ 求一阶导数,并令其为 0^[21].

$$V'(x) = 0. \quad (2)$$

得到平衡曲线方程 M 为

$$4x^3 + 2ux + v = 0. \quad (3)$$

对于奇点的稳定性,可以由 $V(x)$ 的二阶导数确定,求势函数 $V(x)$ 的二阶导数,并令其为 0.

$$V''(x) = 12x^2 + 2u = 0. \quad (4)$$

曲面的奇点要同时满足式(3)和式(4),故联立两式解得分支曲线方程:

$$8u^3 + 27v^2 = 0. \quad (5)$$

将控制变量 O, P 和状态变量 I_p 代入式(5),经空间坐标转换得到该煤层底板突水突变模型^[22].

$$(I_p - 1)^3 + [(O + P) / \sqrt{2} - 3] I_p - \sqrt{2} O + 1 = 0. \quad (6)$$

式中: I_p 为状态变量; P 为突水阻抗因子是单位水压煤层底板高度 R 与系数 M 之积; O 为导水裂隙发展因子是底板导水裂隙带深度 h_1 与系数 N 之积; M, N 为正系数.

式(6)即为状态变量 I_p 随突水阻抗因子 P 和导水裂隙发展因子 O 的变化而变化的规律模型.由该式可以求得状态变量 I_p , 当 $I_p > 1$, 表示突水, $I_p < 1$ 表示不突水.

模型中的正系数 M, N 是修订突水因素 R 和 h_1 在突水中贡献的参数,通过大量突水数据统计所得:当煤层底板厚度 ≤ 30 m 时:

$$M = 0.153\ 2, N = 0.030\ 75.$$

当煤层底板厚度在 30~60 m 时:

$$M = 0.176\ 8, N = 0.015\ 72.$$

3 评价效果及对比

用上文提到的尖点突变煤层底板突水模型,对显德汪矿9煤的底板突水危险性进行评价,由于篇幅所限,本文以 zk700 钻孔为例进行计算说明. zk700 钻孔煤层底板水压为 0.58 MPa, 煤层底板厚度为 26.57 m; 单位水压底板厚度 $R = 26.57/0.58 = 45.81$; 根据《显德汪矿承压水上近距煤层开采的底板破坏规律研究》中提供数据其煤层底板裂隙带高度为 14.3 m, 其中因为其底板厚度小于 30 m, 故 M 取 0.153 2, N 取 0.030 75, 则突水阻抗因子 $P = 0.153\ 2 \times 45.81 = 7.02$, 底板裂隙发展因子 $O = 0.030\ 75 \times 14.3 = 0.44$, 再代入式(6)得

$$(I_p - 1)^3 + [(0.030\ 75 \times 14.3 + 0.153\ 2 \times 26.57/0.58)] \times I_p - \sqrt{2} \times 0.030\ 75 \times 14.3 + 1 = 0. \quad (7)$$

由式(7)求得 $I_p = 0.126$, 同理可求得其他钻孔的状态变量 I_p , 根据计算的状态变量(见表1), 其中钻孔 zk504, zk507, zk700, zk703, zk802, zk815, zk1004, zk1200, zk1103 的 I_p 值小于 1, 其他钻孔大于 1, 由式(6)的判断标准, I_p 值大于 1 表示突水, I_p 值小于 1 表示不突水. 由此判断依据做出显德汪矿9煤的底板

突水危险性评估图如图 3.

表 1 显德旺煤矿 9 号煤底板突水评价

钻孔	9 煤底板厚度/m	水压/MPa	单位水压地板厚度	突水阻抗因子 P	底板裂隙发展因子 O	I_p
zk700	26.57	0.58	45.81	7.02	0.44	0.126
zk703	29.46	1.47	20.00	3.06	0.44	0.629
zk707	34.04	2.52	13.51	2.39	0.22	2.370
zk709	34.33	2.82	12.20	2.16	0.22	2.338
zk710	34.32	2.54	13.51	2.39	0.22	2.237
zk712	46.41	4.13	11.24	1.99	0.22	2.404
zk802	32.77	1.38	23.81	4.21	0.22	0.112
zk807	33.59	3.33	10.10	1.79	0.22	2.478
zk815	39.96	1.60	25.00	4.42	0.22	0.106
zk1004	42.04	1.93	21.74	3.84	0.22	0.126
zk1008	36.95	3.33	11.11	1.96	0.22	2.413
zk1019	26.65	2.93	9.09	1.39	0.44	2.592
zk1020	28.84	1.62	17.86	2.74	0.44	2.054
奥观 13	25.80	3.38	7.63	1.17	0.44	2.660
zk507	36.80	1.25	29.44	4.51	0.44	0.210
zk504	38.77	1.51	25.68	3.93	0.44	0.260
zk1200	42.58	2.62	16.25	2.49	0.22	0.221
zk1103	38.40	2.31	16.62	2.55	0.22	0.169
zk1213	43.70	5.24	8.33	1.28	0.44	2.640

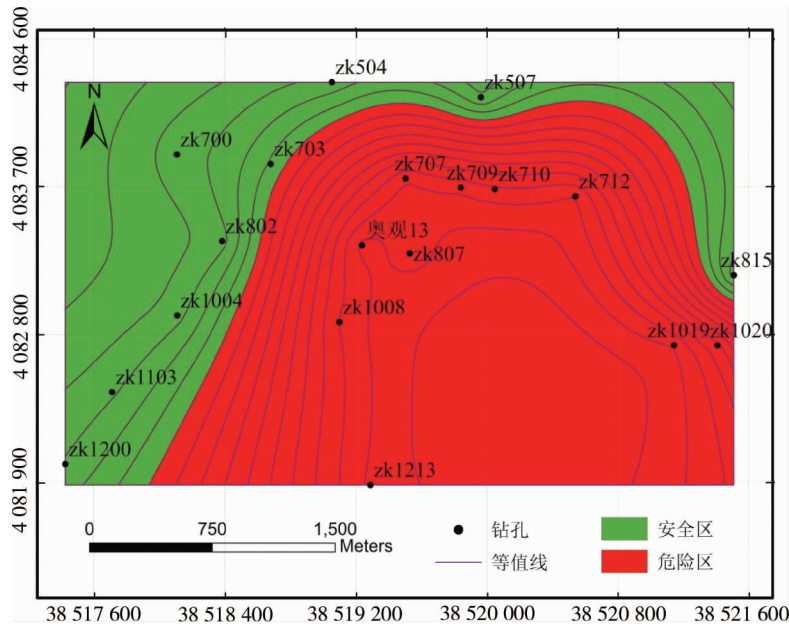


图 3 突变突水模型煤层底板突水危险性评价

从显德旺矿 9 煤的底板突水危险性评估图来看主要分为 2 个区域,西部以及北部的一小部分为安全区,其余的地方为突水危险区,且越往东南部越危险.其原因是突水危险区对应的是奥陶系水文地质复杂区,该区富水性好水压大,单位水压煤层底板厚度小,所以根据该区域计算结果,评价为突水危险区.

观察表中状态变量 I_p 与传统的突水系数 T_s ,状态变量 I_p 的值主要分为 2 组,一组为小于 0.3 的小值,另一组为大于 2 的大值;而突水系数的范围为 0.02~0.13,数据分布较为均匀没有明显变化.为了便于对比,将 2 组数据归一化处理后,按升序排列得到图 4.

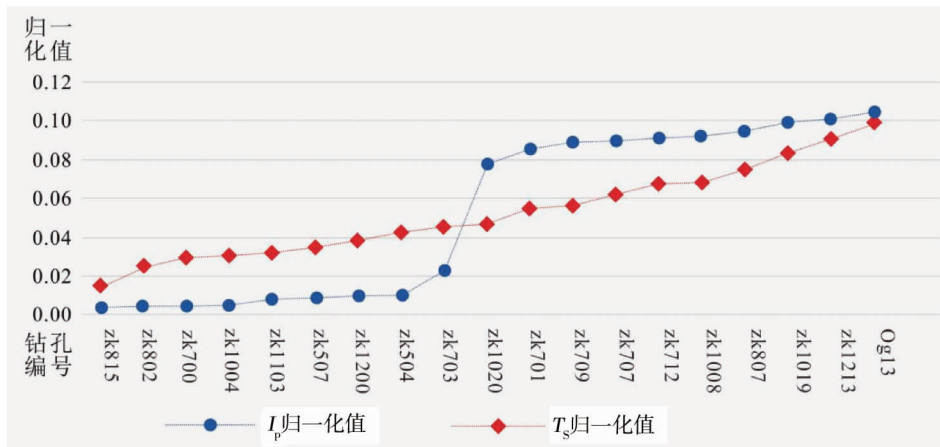


图4 突水危险性评价指标对比

由图4明显看出在同样的条件下突水系数 T_s 在走势上为一条连续的线,而状态变量 I_p 的走势在zk703~zk1020时候发生“跳跃”.从表1可知,突变模型和突水系数法的评价结果中zk703均为安全,而zk1020均为危险,证明发生“跳跃”的位置是突水的临界点.从状态变量 I_p 值的散点分布特征来看,其散点主要分布在0.00~0.02和0.08~1.00这2个区间,近似的可以看作两条平缓的线.而这2个区间符合煤层底板突水前后的2个稳定态的特征.从以上对比中可以知道突变模型能够有效地反映煤层底板突水的突变特征,评价过程更加合理.

对两种方法的评价数值区间做对比:状态变量 I_p 的数值范围在0.106~2.660区间,突水系数 T_s 的数值范围在0.020~0.131区间.显然状态变量 I_p 的取值区间范围要大于突水系数 T_s 的取值范围,这一特点说明用尖点突变模型对煤层底板危险性进行评价时,其评价结果的层次性要优于突水系数法,评价结果集中或重合情况少.例如钻孔zk707和钻孔zk710的 T_s 值都为0.074,但钻孔zk707的 I_p 值为2.370,钻孔zk710的 I_p 值为2.237.虽然评价的突水危险性一致,但是用尖点突变模型评价时,更能体现2个点间存在的差异.所以尖点突变模型相比突水系数法在煤层底板突水危险性的评价中更加精确.

4 结论

1)从煤层底板突水的发生过程来看,煤矿开采前煤层底板岩体处于平衡状态,因开采扰动使底板岩体处于非稳定状态,突变理论能够较好地反映煤层底板突水的上述特征,评价过程更加符合突水发生规律.

2)本文应用基于尖点突变模型的煤层底板突水危险性预测模型,并对典型研究区进行了评价,评价结果与传统突水系数法对比显示:突水系数评价值 T_s 在一定范围内均匀分布,而状态变量 I_p 在安全区到危险区之间的过渡区存在明显的跳跃,评价过程更加符合突水发生机理.另外,从2种方法的评价分区图的对比中可以发现,突水系数法的评价结果偏于保守,而基于突变理论的煤层底板突水评价模型评价结果更加准确,安全的区域更安全,危险的区域更危险,更加符合现场开采的实际情况.

3)从评价结果取值区间的角度来看,尖点突变模型在对煤层底板危险性评价结果上,与传统突水系数法比较,其取值区间相对较大,则该方法评价结果的分选性要优于突水系数法,评价结果能更加避免不同评价单元的评价因素不同而结果一致的现象.所以尖点突变模型相比突水系数法在煤层底板突水危险性的评价中更加符合煤层底板突水特征.

参考文献:

- [1] 吴慧蕾,梁艳坤,王文学,等.煤矿突水预测方法综述[J].能源技术与管理,2011(3):105-107.
- [2] 申秀顺.含煤地层中断层突水机理探讨[J].西安科技大学学报,2013,33(3):259-264.
- [3] 范天吉.煤矿防治水综合技术手册[M].长春:吉林音像出版社,2003.

- [4] Qiu M, Han J, Zhou Y, et al. Prediction Reliability of Water Inrush Through the Coal Mine Floor[J]. Mine water and the environment, 2017, 36(2): 217-225.
- [5] 管恩太, 武强, 冀焕军, 等. 煤矿底板突水的多源地学信息复合模型研究——以焦作演马庄矿为例[J]. 工程勘察, 2001(4): 18-20.
- [6] 李博, 郭小铭, 徐爽, 等. 基于模糊评判-综合赋权的煤层底板突水危险性评价[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(1): 6-11.
- [7] 李博, 武强. 煤层底板突水危险性变权评价理论及其工程应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(3): 500-508.
- [8] 李博, 武强. 煤层底板突水变权脆弱性评价模型参数灵敏度分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 911-917.
- [9] 武强, 李博. 煤层底板突水变权评价中变权区间及调权参数确定方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2143-2149.
- [10] 武强, 李博, 刘守强, 等. 基于分区变权模型的煤层底板突水脆弱性评价——以开滦蔚州典型矿区为例[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1516-1521.
- [11] 李博. GRA—FAHP 模型的煤层底板突水危险性评价[J]. 地质论评, 2015, 61(5): 1128-1134.
- [12] 李博. 灰色关联-层次分析法的煤层顶板突水危险性评价模型[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 333-338.
- [13] 孙明, 张文泉, 郭启忠, 等. 基于模糊神经理论的深井煤层底板突水因素研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011, 26(4): 5-10.
- [14] 尹尚先, 武强. 煤层底板陷落柱突水模拟及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(15): 2551-2556.
- [15] 左宇军, 李术才, 秦泗凤, 等. 动力扰动诱发承压水底板关键层失稳的突变理论研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2361-2366.
- [16] 雷内·托姆. 结构稳定性与形态发生学[M]. 成都: 四川教育出版社, 1992.
- [17] Wang Y, Weidmann U A, Wang H. Using catastrophe theory to describe railway system safety and discuss system risk concept [J]. Safety Science, 2017, 91: 269-285.
- [18] 张浩, 崔永杰, 赵亚强. 尖点突变理论模型在岩质边坡的应用研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 223-226.
- [19] 吴文慧. 基于神经网络和突变理论的边坡稳定性评价[J]. 公路与汽运, 2018(3): 87-90.
- [20] Yang X, Xiao H. Safety thickness analysis of tunnel floor in karst region based on catastrophe theory[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(9): 2364-2372.
- [21] 王连国, 宋扬, 缪协兴. 基于尖点突变模型的煤层底板突水预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(4): 573-577.
- [22] 王怀文, 丁鹏, 马泉池. 突变理论方法预测煤层底板突水危险性[J]. 山西建筑, 2018, 44(12): 65-66.