



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

基于地应力反演的褶曲区煤层冲击危险性评价研究

徐隽松 潘鹏志 陈建强 赵善坤 吴振华 刘旭东

引用本文:

徐隽松, 潘鹏志, 陈建强, 等. 基于地应力反演的褶曲区煤层冲击危险性评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 35–45.
XU Junsong, PAN Pengzhi, CHEN Jianqiang. Study on burst risk assessment of coal seam in folded area based on pre-mining stress back analysis[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 35–45.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2022-0827>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

急倾斜煤层综放工作面冲击危险性评价研究

Study on rock burst risk assessment of fully-mechanized top coal caving mining face in steep coal seam
煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c5a182a4-6aa4-40f7-8019-08596b8827ca>

近直立煤层冲击危险静态评价方法研究

Static-dynamic rockburst risk assessment method in near-vertical coal seams
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 24–34 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1256>

矿井煤层冲击危险性多层次综合评价研究

Research on multi-level comprehensive evaluation of coal seam rockburst risk in underground mine
煤炭科学技术. 2020, 48(8): 82–89 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e07e7cae-990c-4e34-88ad-71bdb68f9bb8>

急倾斜特厚煤层冲击地压防治探索与总结

Exploration and summary of prevention and control of rock burst in steeply inclined and ultra-thick coal seam
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 84–94 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1700>

基于动静应力分析的复杂工作面冲击危险评价

Rock burst risk evaluation based on dynamic-static stress analysis in complex working face
煤炭科学技术. 2019(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bb777328-20e0-4f29-9e8f-fd7f50234c8c>

煤矿冲击危险性的定性与定量评价研究

Qualitative and quantitative evaluation of impact risk in underground mine
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 12–19 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

徐隽松, 潘鹏志, 陈建强, 等. 基于地应力反演的褶曲区煤层冲击危险性评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 35–45.

XU Junsong, PAN Pengzhi, CHEN Jianqiang, *et al.* Study on burst risk assessment of coal seam in folded area based on pre-mining stress back analysis[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 35–45.

基于地应力反演的褶曲区煤层冲击危险性评价研究

徐隽松^{1,2}, 潘鹏志^{1,2}, 陈建强³, 赵善坤⁴, 吴振华^{1,2}, 刘旭东³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家能源集团新疆能源有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013)

摘要: 为科学评价褶曲区急倾斜特厚煤层的冲击危险性, 并给冲击地压的防治提供理论指导, 以乌东煤矿南采区的冲击地压防控为背景, 建立了包含褶曲构造的数值模型; 借助多元线性回归方法以及 CASRock 工程岩体破裂过程计算软件, 进行了乌东矿褶曲区急倾斜特厚煤层地应力场的反演; 以其中的 B1+2 煤层为研究对象, 提取煤层、顶板和底板中的应力数据, 绘制应力-埋深变化曲线, 探究地应力场分布特征, 确定地应力相关的危险性评价指标; 根据地应力反演数据和前人的研究成果, 从地质因素与开采条件等方面确定了冲击危险性评价指标; 运用层次分析法, 分别求出 7 项地质因素类指标和 5 项开采条件类指标的静态权重; 将静态权重代入动态权重计算公式, 并结合传统的综合指数法, 对乌东矿南采区+500 m 水平 B1+2 工作面进行危险性评估, 对照冲击地压危险状态分级表可知, 该工作面的冲击危险性为中等, 与地质报告结论一致, 验证了方法的合理性; 运用该方法对不同埋深范围的煤层进行冲击危险性预估; 同时设置对照组, 运用传统的综合指数法评价相同区域的冲击危险性, 结果显示该方法获得的危险性评分均高于传统方法获得的评分, 说明该方法突出了评价指标中的危险性因素, 克服了其他指标因素相互干扰引起的评估误差。

关键词: 地应力反演; 冲击地压; 危险性评价; 动态权重; 急倾斜特厚煤层; 综合指数法

中图分类号: TD324; TU45

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)09-0035-11

Study on burst risk assessment of coal seam in folded area based on pre-mining stress back analysis

XU Junsong^{1,2}, PAN Pengzhi^{1,2}, CHEN Jianqiang³, ZHAO Shankun⁴, WU Zhenhua^{1,2}, LIU Xudong³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., National Energy Group, Urumqi 830000, China; 4. Safety Branch, Coal Science and Technology Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the impact risk of steeply inclined extra-thick coal seam in folded area and provide theoretical guidance for the prevention and control of rock burst, a numerical model including folds is established in this paper based on the prevention and control of rock burst in south mining area of Wudong Coal Mine. With the help of multiple linear regression and CASRock engineering software, the back analysis of ground stress field of steeply-inclined extra-thick coal seam in folded area of Wudong Mine is carried out. Taking B1+2 coal seam as the research object, the stress data in coal seam, roof and floor are extracted, the stress-cover depth variation curve is plotted, the distribution characteristics of pre-mining stress field are explored, and the risk assessment index related to pre-mining stress is determined. According to the back analysis data of in-situ stress and previous research results, the evaluation indexes of burst risk are determined from the aspects of geological factors and mining conditions. The static weights of 7 geological factors and 5 mining conditions are obtained by Analytic Hierarchy Process. By substituting the static weight into the dynamic weight calculation for-

收稿日期: 2022-06-30

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.12438/cst.2022-0827

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52125903)

作者简介: 徐隽松(1996—), 男, 湖北武汉人, 硕士。E-mail: 841661613@qq.com

通讯作者: 潘鹏志(1976—), 男, 福建永春人, 研究员, 博士。E-mail: pzpan@whrsm.ac.cn

mula and combining with the traditional comprehensive index method, the risk assessment of B1+2 panel at +500 m level in the south area of Wudong Mine is carried out. According to the rockburst risk classification table, the burst risk of this panel is medium, which is consistent with the conclusion of the geological report, and the rationality of the method was verified. This method is used to estimate the burst risk of coal seam with different depths. Control group is chosen, using the traditional comprehensive risk index method to evaluate the burst of the same area, the results show that the method to obtain the risk ratings were higher than the traditional methods, approach of this paper highlights the risk factors in the evaluation index, overcoming the other indicators evaluation error caused by the interference factors.

Key words: pre-mining stress back analysis; rock burst; risk assessment; dynamic weight; steeply inclined extra-thick coal seam; composite index method

0 引言

冲击地压是指在复杂的地应力场作用下, 矿井和采掘工作面围岩将积蓄的弹性能量瞬间释放而造成破坏的矿井动力现象^[1-2]。随着煤矿开采深度的增加, 地应力场的分布趋于复杂, 发生冲击矿压的危险性增大^[3]。实践证明, 冲击地压动力灾害事故的发生与煤矿深井地应力场的分布密切相关。因此, 针对煤矿开采区域的地应力场分布特征和煤矿开采的特点, 进行冲击地压危险性评价是科学提出冲击地压灾害防治对策的基础^[4-7]。

关于冲击地压的危险性评价方法, 诸多学者对其进行了广泛而深入的研究。窦林名等^[8-9]在冲击地压研究中提出了综合指数法, 曲孔典等^[10]利用数值模拟分析, 结合综合指数法得到了采空区域宽度的评价指数参数的修正方法。陈建强等^[11]根据一般综合指数法对各指标进行调整, 采用层级分析法对各要素的权重进行确认, 提出了适用于急倾斜煤层的冲击地压危险性评价方法。文献^[12-14]基于冲击地压评价指标的不确定性, 构建了模糊综合判定的冲击地压危险性评价模型, 确定了冲击地压危险性评价指标。张宏伟等^[15]运用地质动力区划法, 分析了急倾斜特厚煤层的原始应力, 对乌东井田产生冲击地压的地质动力环境进行了评价。邓志刚^[16]应用三维地应力场反演技术进行相关研究, 综合考虑结构应力、采动影响等, 实现了对采集区域的冲击危险评价。姜福兴等^[17]根据自重应力场的分布特征, 提出了叠加各冲击危险性因素的冲击危险性评价方法, 量化了开采工作面的冲击危险性评价。结合模糊综合判断理论和动态权重思想, 秦子晗^[18]提出了一种提高评价客观公正性的冲击危险性评价方法。何学秋等^[19]提出了近直立煤层的冲击地压发生机理及监测预警机制。

国内常用的综合指数法、地质动力区划法等能够较为准确的评价煤层冲击危险性, 但大部分针对的是近水平煤层及缓倾斜煤层, 且传统的综合指数

法受人工打分带来的主观影响较大。因此, 针对急倾斜特厚煤层, 有必要综合考虑相应评价指标的适用性。另外, 在前人的工作中, 地应力场相关的评价指标直接的信息来源基本上是极为有限的地应力场实测数据, 因此难以综合全面反应研究区域的地应力场分布特征, 从而造成危险性评价结果的不准确。

在前人研究的基础上, 将动态权重方法与综合指数法结合, 并基于乌东煤矿南采区的地应力场反演, 提出了适用于褶曲构造区急倾斜特厚煤层的冲击危险性评价方法。

1 基于地应力场反演的冲击危险性动态权重综合指数评价方法

1.1 研究思路

基于地应力场反演的褶曲构造区特厚煤层冲击危险性评价方法的研究思路如下: ①根据地质资料, 建立研究区域的地质模型, 基于多元线性回归方法, 反演研究区域地应力场; ②根据地应力场分布特征, 确定综合指数法的相关指标及其参数划分范围; ③选取评价主控因素, 计算指标自然权重和危险等级权重; ④计算动态综合权重, 并对实际工况进行危险性评估, 验证方法的准确性; ⑤对不同区域的冲击危险性进行评估。

1.2 地应力场反演方法概述

地应力场反演方法——多元线性回归方法建立在获得实测地应力值的基础上, 以研究区域的地形、地貌和地质构造为条件, 其计算过程可分 5 步进行:

1) 根据岩体的地质构造、山体地形条件及实测资料, 建立三维数值计算模型。

2) 采用三维数值计算模型, 开展 6 种初始基本工况的计算: ①自重应力状态; ② X 向水平均匀挤压构造运动; ③ Y 向水平均匀挤压构造运动; ④ XY 向均匀剪切构造运动; ⑤ YZ 向均匀剪切构造运动; ⑥ XZ 向均匀剪切构造运动。通过数值模拟获得每个应力测点处的 6 个应力分量计算值。

3) 根据各个测点的应力分量计算值和地应力实

测值,用最小二乘法进行回归分析,得出各个作用因素对地应力场的影响权重系数,并进行各因素的回归显著性检验,剔除回归效果不显著的因素。

4)重新根据显著影响地应力场分布的作用因素进行回归分析,计算得出各个作用因素对地应力场的影响权重系数。

5)将各因素的权重分别与对应的荷载相乘而得到综合荷载,并将其施加到数值计算模型上,计算分析得出岩体初始地应力场分布及各测点应力值。

1.3 评价主控因素的选取

冲击地压危险性评价结果的可靠程度取决于评价指标选取的科学性及其与具体工程实践结合的紧密程度。在遵循通用的冲击地压危险性评价方法的选取原则下,根据褶皱区急倾斜特厚煤层的特点以及前人的研究工作,选取的评价主控因素如下:开采深度^[11]、煤层倾角^[20]、上覆硬厚岩层与煤层的距离^[11]、煤岩的冲击倾向性^[19]、最大主应力、遗留煤柱的水平距离^[11]、工作面与邻近采空区的关系^[21]、采煤方法^[19]、工作面与断层的距离^[21]和至八道湾向斜煤层走向逆转区距离^[11]。

其中地应力是比较复杂的主控因素,是引起矿井动力现象的根本作用力,其大小和方向对冲击地压具有显著影响^[11]。

1.4 动态权重的确定

指标的综合属性权重 $W^{[18]}$ 为

$$W = [w_1 w_2 w_3 \cdots w_k \cdots w_n] \tag{1}$$

$$W_k = \frac{\sqrt{w'_k w''_k}}{\sum_{k=1}^n \sqrt{w'_k w''_k}} \tag{2}$$

式中: w'_k 、 w''_k 分别为第 k 个指标的属性权重和等级权重; n 为指标个数。

综上所述,在获得各指标的综合权重后,结合等级评价指数表,确定各地质量因素对冲击地压危险性的影响程度,计算得到冲击地压危险性的综合指数 W_i 。

$$W_i = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i W_i}{W_{i,max}} \tag{3}$$

式中: W_i 为冲击地压危险性综合指数; α_i 为第 i 个因素的综合权重; $W_{i,max}$ 为第 i 项评价指标中的最大评价指数值; W_i 为第 i 项评价指标的实际评价指数; n 为因素的数目。基于式(3),可分别求出地质因素对应的危险性综合指数 W_{i1} 和开采条件所对应的危险性指数 W_{i2} 。根据 W_i 指数的大小,针对不同区域的危险状态,制定相应的防治措施。

2 乌东矿褶皱区急倾斜特厚煤层的地应力场反演

2.1 乌东矿南采区工程概况

乌东煤矿南区位于八道湾向斜南翼,如图 1 所示。受强烈的地质运动作用,八道湾向斜南北两翼倾角分别约为 87°和 45°。其中开采的 B1+2 煤层和 B3+6 煤层为近直立特厚煤层组,地层倾角为 87°,两煤层组之间为近直立岩层。其中 B1+2 煤取样点煤岩柱状图和 B3+6 煤取样点煤岩柱状图分别如图 2 和图 3 所示。采用水平分段开采方法,综合机械化放顶煤开采工艺,采深为 350 m 时,矿井出现动力现象,诸如冲击地压、矿震、围岩大变形、矿压显现剧烈等,矿井开采+500 水平分层时于 2013 年 2 月 27 日和 7 月 2 日发生 2 次较大冲击地压显现现象,同时造成下分层+475 水平准备工作面两回采巷道大变形破坏,影响范围巷道超过 100 m。

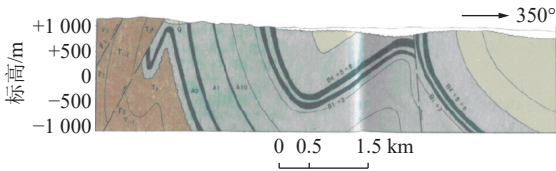


图 1 乌东矿区构造^[22]

Fig.1 Structural of Wudong Mining Area^[22]

地质时代	系	统	柱状 1:1 000	层厚/m	岩性	岩性描述
侏罗系	三	工 河 组		21.11	泥质砂岩	层状, 泥质胶结-泥钙质胶结
				8.89	粉砂岩	较硬、灰白色、层状、节理发育
				10.2	B1 煤	黑色, 半暗半亮
				20.8	B2 煤	黑色, 半暗半亮
	西	山 窑 组		14.98	粉砂岩	灰白色、层状、节理发育
				16.01	泥质砂岩	层状, 泥质胶结-泥钙质胶结

图 2 乌东煤矿 B1+2 煤取样点煤岩柱状图^[23]

Fig.2 Coal rock column of sampling point B1+2 in Wudong Coal Mine^[23]

2.2 地应力场反演模型

地应力场反演中的数值模拟采用工程岩体破裂过程细胞自动机分析软件 CASRock^[24], 该软件避免







地质时代		柱状 1:1 000	层厚/m	岩性	岩性描述
系	统				
侏罗系	西山窑组		19.00	泥质砂岩	微细粒状结构, 块状构造, 深灰色
			11.00	粉砂岩	含薄层煤线, 质地坚硬
			20.00	B3 煤	黑色, 沥青光泽, 半暗半亮
			23.00	B6 煤	黑色, 沥青光泽, 半暗半亮
			10.11	粉砂岩	细粒粒状结构, 块状构造, 灰白色
			20.03	粉砂岩	粉砂质结构, 灰白色, 泥质胶结

图 3 乌东煤矿 B3+6 煤取样点煤岩柱状图^[23]

Fig.3 Coal rock column of sampling point B3+6 in Wudong Coal Mine^[23]

了传统方法需求解大型线性方程组及其带来的复杂性,可以对煤岩体的稳定性进行较大规模的数值仿真。根据乌东矿地质资料,利用 Ansys 建模软件建立乌东矿褶皱构造区模型,沿巷道走向的长度为 2 000 m,垂直于走向的长度约为 1 500 m,高度约为 1 350 m。模型整体按照四面体单元自由划分,单元总数接近 700 万。将模型导入 CASRock 计算软件,如图 4 所示,其中不同颜色表示区分不同的地质材料。其中模型各材料的力学参数^[22]见表 1。

2.3 多元线性回归地应力场反演

1)建立模型后,约束模型各一侧的 X、Y 和 Z 法向位移,分别单独施加重力场、X 法向挤压的单位位移、Y 法向挤压的单位位移、XY 切向单位位移、YZ 切向单位位移和 XZ 切向单位位移,如图 5 所示。

2)分别提取每种加载条件下 6 个地应力测点对应位置的应力状态信息,将所得到的计算值与通过

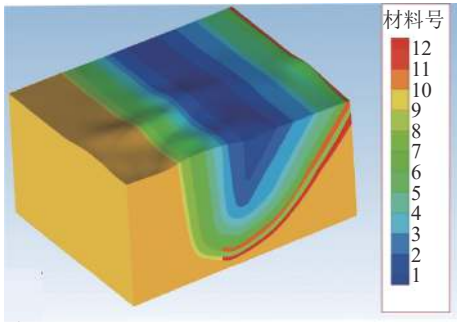


图 4 地应力场反演模型

Fig.4 Inversion model of geostress field

地应力测量得到的实测值做线性回归处理,其中多元线性回归数学模型如下:

$$\sigma_{jk}^0 = C_0 + C_1\sigma_{jk}^1 + C_2\sigma_{jk}^2 + C_3\sigma_{jk}^3 + C_4\sigma_{jk}^4 + C_5\sigma_{jk}^5 + C_6\sigma_{jk}^6 + \varepsilon_k \quad (4)$$

式(4)可简写为

$$\sigma_{jk}^0 = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i\sigma_{jk}^i + \varepsilon_k \quad (5)$$

式中: σ_{jk}^0 为地应力测点显示的实测值; $C_i(i=1、2、3 \cdots)$ 为各个子构造应力场分量对应的回归系数; σ_{jk}^i 为相应的子构造应力场分量的计算值; ε_k 为观测误差。

3)将结果代入地应力场反演回归模型,得到如下表达式:

$$\sigma_d = 2.04156\sigma_x + 2.22444\sigma_y + 0.86412\sigma_z - 0.07205\sigma_{xy} + 3.04371\sigma_{yz} - 2.68659\sigma_{xz} + e \quad (6)$$

式中: σ_d 为地应力分量回归值; σ_x 为 X 向水平构造应力场; σ_y 为 Y 向水平构造应力场; σ_{xy} 为 XY 切向构造应力场; σ_z 为自重应力场; σ_{yz} 为 YZ 切向构造应力场; σ_{xz} 为 XZ 切向水平构造应力场,e 为误差。

4)将 6 个单位位移加载值分别乘以对应的回归系数,并将其一起施加在模型上,来模拟乌东矿褶皱区的初始地应力场。根据线性叠加原理调整回归系数,最终得到地应力多元线性回归表达式:

表 1 煤岩物理及力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal rock

岩层	Mat(材料号)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
B1底板	10	25.05	16.50	2 570	22.59	37.20	2.90
B2顶板	9	32.50	24.37	2 894	33.54	30.32	2.40
B3底板	9	31.03	22.31	2 486	30.20	30.60	3.13
B6顶板	1、2、3、4、5、6	18.52	12.19	2 750	30.16	29.40	4.00
B1+2煤	8、12	12.88	5.77	1 313	13.20	25.40	0.68
B3+6煤	7、11	12.76	5.38	1 299	15.80	23.80	1.30

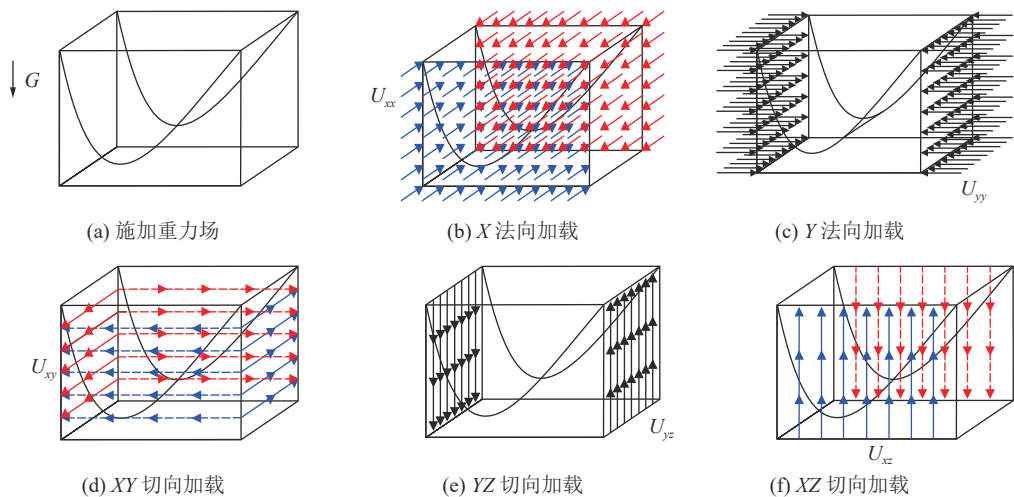


图 5 地应力反演单位加载步骤

Fig.5 Loading procedure of multiple linear regression inversion

$$\sigma_{d1} = 0.99317\sigma_x + 0.81482\sigma_y + 2.27280\sigma_z - 0.16107\sigma_{xy} + 0.07609\sigma_{yz} - 2.68659\sigma_{xz} + e \quad (7)$$

相应的地应力测点计算值与实测值的数据比较

见表 2。
5)由表 2 分析可知, 计算值与实测值的误差范围基本上在 30% 以内, 故可以认为地应力反演结果是合理的^[25]。

表 2 地应力测点计算值与实测值

Table 2 Calculated and measured values of in-situ stress measurement points

应力分量	地应力计算值/MPa						地应力实测值/MPa					
	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6
σ_x	-12.23	-12.74	-14.69	-19.40	-11.18	-9.538	-14.06	-13.16	-14.27	-15.26	-21.63	-20.13
σ_y	-13.47	-13.73	-13.50	-13.58	-12.74	-12.79	-11.00	-10.25	-10.98	-12.02	-11.84	-12.62
σ_z	-8.538	-9.062	-10.26	-14.10	-9.268	-8.146	-9.186	-8.699	-9.997	-8.903	-11.62	-12.25
σ_{xy}	1.728	1.921	1.800	1.786	1.732	1.880	1.573	1.525	2.486	2.083	4.178	3.778
σ_{yz}	-0.296	-0.924	-0.059	-0.177	-1.318	-1.473	0.3379	-2.044	1.640	0.366	-0.963	-4.368
σ_{xz}	5.079	3.941	6.565	8.553	5.900	4.721	6.567	4.334	7.371	7.115	-7.681	0.495

3 褶皱构造区急倾斜煤层冲击地压危险性评估

3.1 地应力场特征指标分析

依据地应力场反演结果, 分别在位于同一水平的底板、B1+2 煤层及其两侧的煤岩边界、顶板上等距各取一点, 并沿褶皱翼部产状在埋深 100~1 300 m 选取 5 条测线(图 6)。

绘制应力分量及其相关系数随深度的变化曲线, 结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 越靠近顶板岩层(岩柱), 地应力水平越高, 变化越剧烈, 并且随着深度的增加, 不同的曲线呈现出相似的变化趋势。根据地应力反演结果, 通过引入应力差异系数^[11], 划分煤矿开采深度范围; 将最大主应力纳入评价指标, 并根据最大主应力的

变化情况, 对最大主应力的范围进行评级。通过引入应力差异系数 $\alpha=(\sigma_H-\sigma_v)/\sigma_H$ (其中 σ_H 为最大水平

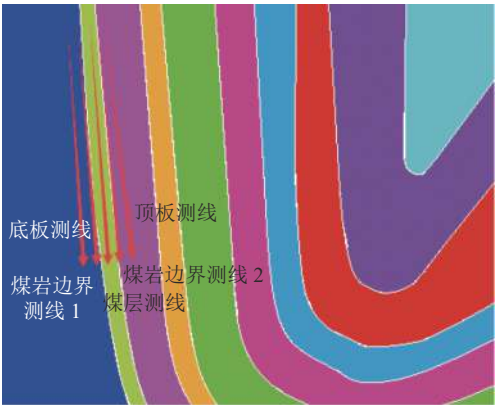


图 6 乌东矿近直立煤层模型测线布置

Fig.6 Survey line arrangement of near vertical coal seam model in Wudong Mine

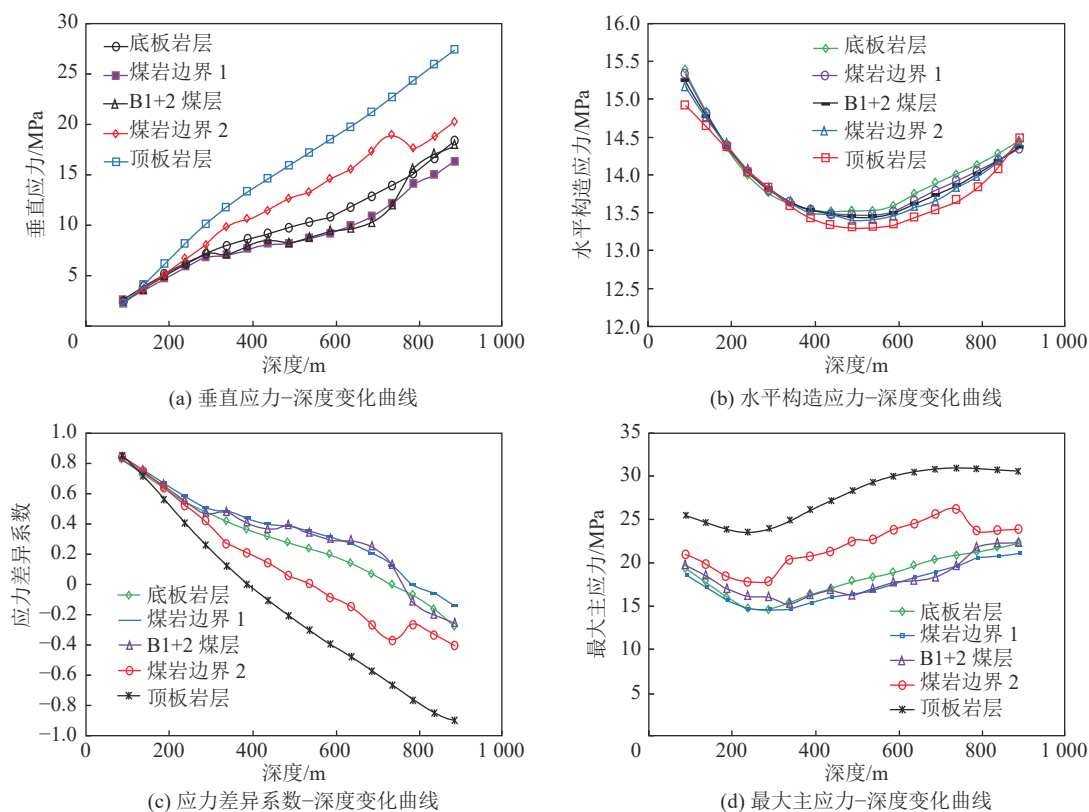


图 7 应力分量及其相关系数随深度的变化曲线

Fig.7 Variation curves of stress components and their correlation coefficients with depth

应力; σ_v 为垂直应力), 绘制应力差异系数随深度的变化曲线。根据应力差异系数变化曲线, 如图 7c 所示, 在深度为 380 m 处, 顶板岩层处的应力差异系数降为 0, 即地应力场的主导应力发生变化; 在深度约为 530 m 处, 煤层与顶板岩层边界处的应力场差异系数降为 0, 表示边界处垂直应力大于水平应力分量, 地应力场分布特征再次发生改变。结合冲击地压最浅发生水平^[11], 对上述结果进行调整, 确定开采深度范围划分, 即 <200 m, [200, 350) m, [350, 500) m 和 ≥ 500 m。

最大主应力表现为挤压应力, 且在乌东矿褶皱区急倾斜特厚煤层的产状形成中起到主要作用, 也是引起矿井动力现象的根本原因之一。由图 7d 可知, B1+2 煤层附近的地层中最大主应力的范围为 15 ~ 30 MPa。其中除开岩柱中最大主应力的变化情况, 煤层及底板中的最大主应力变化范围为 15 ~ 25 MPa。因此可将最大主应力范围划分为 <15 MPa, [15, 20) MPa, [20, 25) MPa, ≥ 25 MPa。

3.2 乌东矿南采区急倾斜煤层+500 m 水平标高各指标的危险性评分

根据前人的研究成果^[11,19-20] 和相关规范^[21], 结合乌东矿区急倾斜煤层的地质产状、煤岩性质、地应

力场分布特征和施工条件, 从地质因素和开采条件两方面选取评价主控因素及相应参数。其中地质因素包括开采深度^[11]、煤层倾角^[20]、煤层及顶底板的冲击倾向性^[19]、上覆硬厚岩层与煤层距离^[11] 和最大主应力; 开采条件包括遗留煤柱的水平距离^[11]、工作面与邻近采空区的关系^[21]、采煤方法^[19]、工作面与断层的距离^[21] 和至八道湾向斜煤层走向逆转区距离^[11]。由此确定褶皱区急倾斜特厚煤层冲击地压的评价指标分级表, 见表 3。

依据表 3 对乌东矿南采区+500 m 水平 B1+2 煤层工作面各指标进行评估: 已知其深度在 300 m 左右, 采用水平分段综采顶煤开采, 顶底板坚硬岩层至煤层距离在 10 m 以内; 经试验测定, 煤层煤样以及顶底板岩样冲击倾向性均为弱。+500 m 水平 B1+2 工作面开采时, B3+6 工作面已开采完毕, 故 B1+2 工作面所处位置为一侧采空。结合综合指数法, 匹配每项评价指标的危险等级与指数得分(表 4), 最终得到地质因素以及开采条件的各个指标的评估得分, 见表 5。

3.3 各危险性评价指标的动态权重计算

根据层次分析法^[14], 分别对地质因素评价指标和开采条件评价指标进行重要性比较, 分别得到相

表 3 急倾斜特厚煤层冲击地压的评价指标分级表

Table 3 Evaluation index classification table of rock burst of steeply inclined extra-thick coal seam

一级指标	二级指标	各级指标评价			
		I	II	III	IV
地质因素	开采深度 C_{11}/m	$h<200$	$200\leq h<350$	$350\leq h<500$	$h\geq 500$
	煤层倾角 $C_{12}/(^{\circ})$	$h\leq 5$	$5<h\leq 25$	$25<h\leq 45$	$h>45$
	煤层冲击倾向性 C_{13}	无	弱	—	强
	顶板冲击倾向性 C_{14}	无	弱	—	强
	底板冲击倾向性 C_{15}	无	弱	—	强
	上覆硬厚岩层与煤层距离 C_{16}/m	—	$d<60$	$30<d\leq 60$	$d\leq 30$
	最大主应力 C_{17}/MPa	$\sigma_1<15$	$15\leq \sigma_1<20$	$20\leq \sigma_1<25$	$\sigma_1\geq 25$
开采条件	遗留煤柱的水平距离 C_{21}/m	$h_z\geq 60$	$30\leq h_z<60$	$0\leq h_z<30$	$h_z<0$
	工作面与邻近采空区的关系 C_{22}	实体煤工作面	一侧采空	两侧采空	两侧以上采空
	采煤方法 C_{23}	长壁综放	长壁综采	水平分段综放	—
	工作面与断层的距离 C_{24}/m	$L_d\geq 100$	$60\leq L_d<100$	$30\leq L_d<60$	$L_d<30$
	至八道湾向斜煤层走向逆转区距离 C_{25}/km	$d_z>18$	$12<d_z\leq 18$	$6<d_z\leq 12$	$d_z\leq 6$

表 4 等级评估指数

Table 4 Grade evaluation index

危险等级	I	II	III	IV
危险得分	0	1	2	3

应的评价指标重要性比较矩阵。其中地质因素评价指标重要性比较矩阵如下：

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 2 & 1 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 2 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1/2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

通过计算得到该矩阵的特征向量 [0.197,0.132,0.073,0.108,0.089,0.161,0.240]^T，即对应为表 3 中地质因素评价指标的属性权重。经检验，结果的一致性符合要求。另外开采条件评价指标重要性比较矩阵如下所示：

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1/4 \\ 1/2 & 2 & 2 & 1 & 1/2 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

同理可得开采条件评价指标属性权重的向量形式：[0.305,0.135,0.076,0.179,0.305]^T。

为求得评价指标等级权重，根据评价指标危险等级 I ~ IV 的顺序，列出指标等级重要性比较矩阵，

表 5 乌东矿南采区+500 m 水平 B1+2 工作面各因素影响的冲击地压危险评估指数

Table 5 Rockburst risk assessment index of working face B1+2 at +500 m level in south area of Wudong Mine affected by various factors

一级指标	二级指标	评估指数
地质因素	开采深度/m	1
	煤层倾角/(°)	3
	煤层冲击倾向性	1
	顶板冲击倾向性	1
	底板冲击倾向性	1
	上覆硬厚岩层与煤层距离/m	3
	最大主应力/MPa	1
开采条件	遗留煤柱的水平距离/m	0
	工作面与邻近采空区的关系	1
	采煤方法	2
	工作面与断层的距离/m	3
	至八道湾向斜煤层走向逆转区距离/km	2

如下所示：

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 2 & 1 & 1/2 \\ 2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

同理可得指标等级属性权重的向量形式：[0.138,0.195,0.276,0.391]^T。

根据式(1)、(2)和(3)，求解得到各指标的综合权重，结果见表 6。

表 6 乌东矿南采区+500 m 水平 B1+2 综放工作面评价指标权重计算值

Table 6 Weight calculation value of evaluation index of B1+2 fully mechanized caving working face at +500 m level in south area of Wudong Mine		
一级指标	二级指标	综合权重
地质因素	开采深度/m	0.148
	煤层倾角/(°)	0.172
	煤层冲击倾向性	0.090
	顶板冲击倾向性	0.110
	底板冲击倾向性	0.100
	上覆硬厚岩层与煤层距离/m	0.190
	最大主应力/MPa	0.163
开采条件	遗留煤柱的水平距离/m	0.192
	工作面与邻近采空区的关系	0.152
	采煤方法	0.136
	工作面与断层的距离/m	0.248
	至八道湾向斜煤层走向逆转区距离/km	0.272

根据式(3)求得深度 300 m 处地质因素和开采条件的综合指数得分分别为 0.566 和 0.571, 对照冲

击地压危险状态分级^[11], 见表 7, 可知该工作面属于中等冲击危险性, 并与神新能源公司乌东煤矿冲击地压相关的研究结果作比较^[26], 发现二者结论吻合, 故验证了该判别方法的准确性。

表 7 冲击地压危险状态分级		
Table 7 Classification of rockburst danger state		
冲击地压危险等级	冲击地压危险性	冲击地压危险得分
A	无	<0.3
B	弱	0.3~0.5
C	中	0.5~0.75
D	强	>0.75

3.4 乌东矿南采区急倾斜煤层不同水平标高的冲击危险性预测

根据前文所述方法对乌东矿南采区急倾斜煤层不同水平标高的 B1+2 工作面进行危险性预测, 由此可得乌东矿南采区不同水平 B1+2 工作面各因素影响的冲击地压危险评估指数, 见表 8。

根据表 6 和式(1)、式(2), 计算得到各指标的综合权重, 其结果见表 9。

表 8 乌东矿南采区不同水平 B1+2 工作面各因素影响的冲击地压危险评估指数
Table 8 Rockburst risk assessment index of different levels B1+2 working face of south area of Wudong Mine affected by various factors

一级指标	二级指标	不同标高水平评估指数				
		+425 m	+325 m	+225 m	+125 m	+25 m
地质因素	开采深度/m	2	2	3	3	3
	煤层倾角/(°)	3	3	3	3	3
	煤层冲击倾向性	1	1	1	1	1
	顶板冲击倾向性	1	1	1	1	1
	底板冲击倾向性	1	1	1	1	1
	上覆硬厚岩层与煤层距离/m	3	3	3	3	3
	最大主应力/MPa	1	1	1	1	2
开采条件	遗留煤柱的水平距离/m	0	0	0	0	0
	工作面与邻近采空区的关系	1	0	0	0	0
	采煤方法	2	2	2	2	2
	工作面与断层的距离/m	3	3	3	3	3
	至八道湾向斜煤层走向逆转区距离/km	2	2	2	2	2

结合表 9 和式(3), 计算得到不同深度处工作面的地质因素和开采条件的综合指数得分, 按照冲击地压危险状态分级, 可知乌东矿南采区不同水平 B1+2 综放工作面危险评级均为中等冲击危险性, 见表 10。同时设置对照组, 运用传统的综合指数法再次评价煤层的危险性, 通过比较 2 种方法所取得的

结果, 可知新方法能有效削弱危险因素中和所带来的影响, 相应的危险性变化曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, 相较于传统的综合指数法基于动态权重的新方法更能突出危险性因素, 相应的危险性评分更高, 并能有效区分地质因素与开采条件在不同埋深下的主导作用。

表 9 乌东矿南采区不同水平 B1+2 综放工作面评价指标权重计算值

Table 9 Weight calculation values of evaluation indexes of B1+2 fully-mechanized top-coal caving working face at different levels in south area of Wudong Mine

一级指标	二级指标	综合权重				
		+425 m	+325 m	+225 m	+125 m	+25 m
地质因素	开采深度/m	0.152	0.152	0.203	0.203	0.197
	煤层倾角/(°)	0.177	0.177	0.166	0.166	0.161
	煤层冲击倾向性	0.093	0.093	0.087	0.087	0.085
	顶板冲击倾向性	0.113	0.113	0.106	0.106	0.103
	底板冲击倾向性	0.102	0.102	0.096	0.096	0.093
	上覆硬厚岩层与煤层距离/m	0.195	0.195	0.183	0.183	0.178
	最大主应力/MPa	0.168	0.168	0.158	0.158	0.183
开采条件	遗留煤柱的水平距离/m	0.192	0.197	0.197	0.197	0.197
	工作面与邻近采空区的关系	0.152	0.131	0.131	0.131	0.131
	采煤方法	0.136	0.139	0.139	0.139	0.139
	工作面与断层的距离/m	0.248	0.254	0.254	0.254	0.254
	至八道湾向斜煤层走向逆转折区距离/km	0.272	0.279	0.279	0.279	0.279

表 10 乌东矿南采区不同水平 B1+2 综放工作面评价结果

Table 10 Evaluation results of B1+2 fully-mechanized top-coal caving face at different levels in south area of Wudong Mine

水平标高/m	深度/m	地质因素危险得分	开采条件危险得分	冲击地压危险性
+500	300	0.566	0.616	中
+425	375	0.632	0.616	中
+325	475	0.632	0.579	中
+225	575	0.701	0.579	中
+125	675	0.701	0.579	中
+25	775	0.752	0.579	高

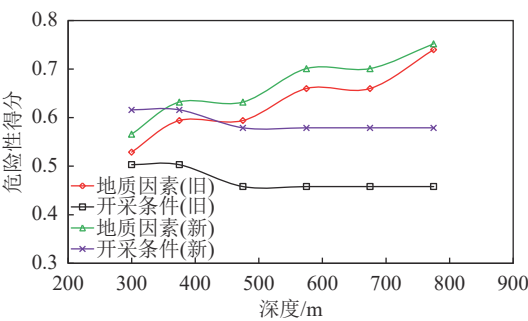


图 8 危险性得分随开采深度的变化

Fig.8 Variation of risk score with mining depth

4 结 论

1)根据乌东煤矿南采区地质特性和冲击危险动态加权综合指数评价方法,依据地应力反演结果,确定了急倾斜特厚煤层冲击危险评价指标,并将评价指标分级,形成了急倾斜特厚煤层动态加权评价法的计算体系。与传统的评估方法相比,动态加权方

法降低了其他指标元素相互干扰所引起的评估误差,提高了评估结果的精度。

2)对乌东煤矿南采区+500 m 水平 B1+2 作业面评价冲击危险性的结果,该作业面冲击危险等级为Ⅲ级,被评价为中等冲击危险等级。

3)运用上述方法评估待开采的乌东煤矿南采区不同水平 B1+2 作业面,预测性评价结果为中等及以上的冲击危险性。

参考文献(References):

[1] 齐庆新, 窦林名. 冲击地压理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 32–38.

[2] LU Caiping, LIU Guangjian, LIU Yang. Microseismic multi-parameter characteristics of rock-burst hazard induced by hard roof fall and high stress concentration[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 24(2): 18–32.

[3] 兰天伟, 张宏伟, 李 胜, 等. 矿井冲击地压危险性预测的多因素模式识别[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(3): 33–38.

LAN Tianwei, ZHANG Hongwei, LI Sheng, et al. Multi-factor

- pattern recognition method for predicting mine rock burst risk[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(3): 33-38.
- [4] 金佩剑,王恩元,刘晓斐,等.冲击地压危险性综合评价的突变级数法研究[J].*采矿与安全工程学报*, 2013, 30(2): 256-261.
- JIN Peijian, WANG Enyuan, LIU Xiaofei, *et al.* Catastrophe progression method on comprehensive evaluation of rock burst[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(2): 256-261.
- [5] 曲效成,姜福兴,于正兴,等.基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J].*岩石力学与工程学报*, 2011, 30(11): 2346-2351.
- QU Xiaocheng, JIANG Fuxing, YU Zhengxing, *et al.* Rockburst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(11): 2346-2351.
- [6] 聂百胜,何学秋,王恩元,等.电磁辐射法预测煤矿冲击地压[J].*太原理工大学学报*, 2000, 31(6): 609-611.
- NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, *et al.* Forecasting rockburst with the electromagnetic emission method in coalmine[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2000, 31(6): 609-611.
- [7] 齐庆新,李首滨,王淑坤.地音监测技术及其在矿压监测中的应用研究[J].*煤炭学报*, 1994, 19(3): 221-232.
- QI Qingxin, LI Shoubin, WANG Shukun. Application of AE method technique in monitoring ground pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(3): 221-232.
- [8] 窦林名,贺虎,何江,等.冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法[J].*煤炭学报*, 2018, 43(2): 328-332.
- DOU Linming, HE Hu, HE Jiang, *et al.* New method of rockburst risk assessment using relative stress concentration factor superposition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 328-332.
- [9] 窦林名,曹晋荣,曹安业,等.煤矿矿震类型及震动波传播规律研究[J].*煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 23-31.
- DOU Linming, CAO Jinrong, CAO Anye, *et al.* Research on types of coal mine tremor and propagation law of shock waves[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 23-31.
- [10] 曲孔典,马文强,刘钊,等.冲击地压综合指数法中采空区宽度评价指数修正[J].*煤炭技术*, 2016, 35(5): 93-95.
- QU Kongdian, MA Wenqiang, LIU Fan, *et al.* Evaluation index modification of gob width in comprehensive index method about rock-burst[J]. *Coal Technology*, 2016, 35(5): 93-95.
- [11] 陈建强,闫瑞兵,刘昆轮.乌鲁木齐矿区冲击地压危险性评价方法研究[J].*煤炭科学技术*, 2018, 46(10): 26-29.
- CHEN Jianqiang, YAN Ruibing, LIU Kunlun. Study on evaluation method of rock - burst danger in Urumqi Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(10): 26-29.
- [12] 秦忠诚,陈光波,李谭,等.基于集对分析-区间三角模糊数的冲击地压耦合评价模型及应用[J].*山东科技大学学报:自然科学版*, 2019, 38(1): 16-24.
- QIN Zhongcheng, CHEN Guangbo, LI Tan, *et al.* Evaluation model and application of rock-burst coupling based on set pair analysis and interval triangular fuzzy number[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Nature Science)*, 2019, 38(1): 16-24.
- [13] 尹永明,张兴凯,周建新,等.基于模糊综合评判的冲击地压危险性分区预评价技术研究[J].*中国安全生产科学技术*, 2017, 13(3): 180-184.
- YIN Yongming, ZHANG Xingkai, ZHOU Jianxin, *et al.* Study on zoning pre-evaluation technology of rock - burst risk based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(3): 180-184.
- [14] 曾繁慧,张晶,汪北方,等.煤矿冲击地压危险性模糊综合评价[J].*辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(1): 205-209.
- ZENG Fanhui, ZHANG Jing, WANG Beifang, *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation of rock -burst risk in coal mine[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2018, 37(1): 205-209.
- [15] 张宏伟,荣海,陈建强,等.基于地质动力区划的近直立特厚煤层冲击地压危险性评价[J].*煤炭学报*, 2015, 40(12): 2756-2761.
- ZHANG Hongwei, RONG Hai, CHEN Jianqiang, *et al.* Risk assessment of rockburst based on geo-dynamic division method in suberect and extremely thick coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(12): 2756-2761.
- [16] 邓志刚.基于三维地应力场反演的宏观区域冲击危险性评价[J].*煤炭科学技术*, 2018, 46(10): 78-82.
- DENG Zhigang. Danger evaluation of pressure bump in macro area based on 3D geostress field inversion[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(10): 78-82.
- [17] 姜福兴,舒湊先,王存文.基于应力叠加回采工作面冲击危险性评价[J].*岩石力学与工程学报*, 2015, 34(12): 2428-2435.
- JIANG Fuxing, SHU Couxian, WANG Cunwen. Impact risk appraisal of stope working faces based on stress superimposition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(12): 2428-2435.
- [18] 秦子晗.沿空工作面冲击危险性动态权重评价方法研究[J].*煤矿开采*, 2014, 19(1): 87-90.
- QIN Zihan. Dynamic weight evaluation method for rock-burst dangerin mining face along gob[J]. *Coal Mining Technology*, 2014, 19(1): 87-90.
- [19] 何学秋,陈建强,宋大钊,等.典型近直立煤层群冲击地压机理及监测预警研究[J].*煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 13-22.
- HE Xueqiu, CHEN Jianqiang, SONG Dazhao, *et al.* Study on mechanism of rock burst and early warning of typical steeply inclined coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 13-22.
- [20] GB 50197—2015,煤炭工业露天矿设计规范[S].
- [21] 杨小朋.急倾斜煤层冲击地压危险性评价[D].绵阳:西南科技大学, 2019.
- YANG Xiaopeng. Steep seam impact ground pressure hazard evaluation [D]. Mianyang: Southwest university of science and technology, 2019.
- [22] 张宏伟,李胜,韩军,荣海/乌东煤矿冲击地压地质动力区划研究[R].乌鲁木齐:国家能源集团新疆能源公司, 2015.
- [23] 潘俊锋,杜涛涛,张营.乌东煤矿南采区地应力测量[R].乌鲁木齐:国家能源集团新疆能源公司, 2020.

- PAN Junfeng, DU Taotao, ZHANG Ying. In-situ stress measurement in south mining area of Wudong Coal Mine [R]. Urumqi: Xinjiang Energy Company of State Energy Group, 2020.
- [24] PANP Z, FENG X T, HUDSON J A. Study of failure and scale effects in rocks under uniaxial compression using 3D cellular automata[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 674–685.
- [25] 侯俊领. 煤矿深井地应力场反演及应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
- HOU Junling. Inversion and application of in-situ stress field in deep coal mine [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014.
- [26] 康 震. 向斜构造对乌东煤矿冲击地压的影响研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
- KANG Zhen. Syncline structure for the east coal mine bumps research [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016.