



基于开采深度与构造应力的冲击地压危险性评价子指标取值方法

李震 吴冠洋 司尚金 高鑫 刘勋 张冬冬 张呈祥 刘家琛

引用本文：

李震, 吴冠洋, 司尚金, 等. 基于开采深度与构造应力的冲击地压危险性评价子指标取值方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 38–47.

LI Zhen, WU Guanyang, SI Shangjin. Valuation method for sub-indicators of rock burst risk based on mining depth and tectonic stress[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 38–47.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0542>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于地应力反演的褶曲区煤层冲击危险性评价研究

Study on burst risk assessment of coal seam in folded area based on pre-mining stress back analysis
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 35–45 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-0827>

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>

动静载作用下煤岩多场耦合冲击危险性动态评价技术

Multi-field coupling dynamic evaluation method of rockburst hazard considering dynamic and static load
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 121–132 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.015>

近直立煤层冲击危险静动态评价方法研究

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>

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-fd7f50234e8c>

煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构

Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine
煤炭科学技术. 2022, 50(2): 27–36 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/832c1706-c116-49d3-ab3e-b9e69c7f8f2e>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李震, 吴冠洋, 司尚金, 等. 基于开采深度与构造应力的冲击地压危险性评价子指标取值方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 38-47.

LI Zhen, WU Guanyang, SI Shangjin, et al. Valuation method for sub-indicators of rock burst risk based on mining depth and tectonic stress[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 38-47.

基于开采深度与构造应力的冲击地压危险性评价 子指标取值方法

李震^{1,2}, 吴冠洋¹, 司尚金³, 高鑫⁴, 刘勋⁴, 张冬冬⁴, 张呈祥³, 刘家琛^{1,5}

(1. 河南理工大学 土木学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003; 3. 山东能源集团西北矿业有限公司, 陕西 西安 710018; 4. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014; 5. 华杰工程咨询有限公司 中南分公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 深部工程岩体复杂赋存环境致使其力学特性不同于浅部, 在煤矿开采扰动下时常诱发冲击地压灾害, 冲击地压危险性评价在煤矿动力灾害防控中起着重要作用。然而, 考虑构造应力影响因素 W_5 的综合指数法子指标计算中, 正常应力值并无明确的取值依据。针对此问题, 首先, 理清了我国煤矿开采深度现状与地应力分布规律, 确定了数值研究中自变量(采深、地应力)的存在范围, 基于室内试验结果建立了数值模型并开展了地下岩体开挖数值模拟, 分析了破坏体积演化特征与规律, 揭示了高地应力显现点对应的临界地应力比随采深的演化规律, 建立了高应力显现临界地应力比的定量表达及高应力显现条件判据, 最终提出了一种新的基于开采深度与构造应力的冲击地压危险性评价子指标。结果表明: 冲击地压危险性表现为矿压显现与煤岩体动力失稳, 可将高应力显现与强破坏特征判定为“深部”条件; 地下岩体破坏体积随地应力比和埋深的增大而增加, 破坏体积曲线演化特征随岩性不同表现出差异性; 高地应力显现点对应的地应力比随埋深增加而呈指数形式减小, 当埋深趋于无穷大时, 高应力显现临界地应力比趋于0.6; 当地应力比大于等于高地应力显现点对应的临界地应力比时, 出现高地应力显现特征; 正常应力值可取为高地应力显现点对应的最大水平地应力。提出的子指标可以准确地评价不同开采深度、不同构造应力条件下的冲击危险性, 也体现了防冲工作的个性化特点。

关键词: 深部; 冲击地压; 危险性评价; 高地应力; 开采深度; 构造应力

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)12-0038-10

Valuation method for sub-indicators of rock burst risk based on mining depth and tectonic stress

LI Zhen^{1,2}, WU Guanyang¹, SI Shangjin³, GAO Xin⁴, LIU Xun⁴, ZHANG Dongdong⁴,
ZHANG Chengxiang³, LIU Jiachen^{1,5}

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China; 3. Shandong Energy Group Xibei Mining Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 4. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 5. Zhongnan Branch, CHELBI Engineering Consultants, Inc., Wuhan 430000, China)

Abstract: The mechanical properties of deep rocks differ from those of the shallow layers due to the complex environment. Rock burst disasters are often induced under the disturbance of coal mining. The rock burst risk assessment plays an important role in the prevention of dynamic disasters. However, in the calculation of the sub-indicators for the comprehensive index method considering the influence of geostress factor W_5 , there is no clear basis for determining the normal stress value. To address this issue, the current situation of coal mining depth and the distribution law of geostress in China were firstly clarified. The range of the mining depth and geostress in the numerical

收稿日期: 2024-04-25 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2024-0542

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51704097); 河南省“双一流”学科创建工程资助项目(AQ20230727)

作者简介: 李震(1986—), 男, 山东泰安人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: zhenli@hpu.edu.cn

通讯作者: 刘家琛(1998—), 男, 河南驻马店人, 硕士。E-mail: 754118468@qq.com

research was then determined. Based on laboratory test results, a numerical model was established and simulations of underground excavation were carried out. The evolution law of the failure volume was analysed, revealing the evolutionary relationship between the stress ratio near high geostress manifestation points and mining depth. A quantitative expression for the critical crustal stress ratio and a criterion for high geostress manifestations were established. Finally, a new sub-indicator of rock burst risk index based on mining depth and geostress was proposed. The results are as follows. Firstly, the high geostress behavior and dynamic instability of coal-rocks are generally obvious in the rock burst. In this case, high geostress manifestations and strong failure characteristics can be identified as “deep” conditions. Secondly, the failure volume of the underground rock increases with the increasing crustal stress ratio and buried depth, with variations in the failure volume curves depending on the rock type. Thirdly, the critical crustal stress ratio, which corresponds to the limit of high geostress, decreases exponentially with the increase of buried depth. When the buried depth tends to the infinity, the critical geostress ratio tends to 0.6. Fourthly, when the crustal stress ratio is greater than or equal to the critical crustal stress ratio, the characteristics of high geostress manifestations occur. Lastly, the value of the normal stress can be defined as the maximum horizontal crustal stress corresponding to the occurrence point of high geostress manifestation. The proposed sub-indicators accurately evaluate rock burst risks under different mining depths and tectonic stress conditions, highlighting the personalized characteristics in the prevention of rock burst.

Key words: deep; rock burst; risk evaluation indicator; high in-situ stress; mining depth; tectonic stress

0 引言

浅部能源日益枯竭致使煤矿的开采向深部进军,深部煤岩体处于复杂的“三高”环境之中,在地质条件与开采技术等因素的影响下冲击地压动力灾害频繁发生,对煤矿的安全开采提出了严峻挑战。冲击地压已经成为我国最严重的煤矿动力灾害,为避免冲击地压动力灾害,众多学者从形成机理、监测预警等方面进行了深入研究,形成了多种理论与技术,为冲击地压的防治奠定了基础。冲击地压煤矿动力灾害产生的原因较为复杂,一般归因于地质因素和开采因素的共同作用。关于冲击地压并未形成统一的分类标准,不同学者从不同的角度将冲击地压进行分类。潘一山等^[1]对我国冲击地压的区域、深度及时间分布进行总结,并基于此将冲击地压分为3种类型,即煤体压缩型、顶板断裂型和断层错动型。窦林名等^[2]根据冲击地压位置及影响因素的不同,将冲击地压分为煤柱型、坚硬顶板型、褶曲构造型和断层型等4种基本类型。谭云亮等^[3]根据深部煤岩体赋存环境、力学性质和冲击地压等主要影响因素,将深部开采冲击地压分为应变型、断层滑移型和坚硬顶板型3类。潘俊锋等^[4]在界定材料破坏、结构破坏基础上,将深部冲击地压分为深部动静载叠加型、深部高静载加载型、深部高静载卸荷型3种。齐庆新等^[5]针对煤矿冲击地压特点同时考虑冲击地压发生机理、位置、力源及周围条件4个因素,将我国煤矿冲击地压分为煤层材料失稳型、煤层结构失稳型、顶板断裂型、断层滑移错动型等4种类型。上述学者对冲击地压类型的分类依据多从地质因素及深部岩体赋存环境等方面考虑,这种共识充分说明了地质因素和应力条件对冲击地压的影响不容忽视。

目前的防冲体系中,冲击倾向性鉴定后,对于有冲击倾向性煤层进行冲击倾向性评价与冲击危险区域划分(静态预测),进一步对冲击危险区域采取动态预警与防冲措施^[6]。其中,采掘过程中的动态预警防冲监测系统通常由点检测、局部监测、区域监测组成,其代表方法有钻屑法、应力监测法、电磁辐射法、微震监测法等^[7]。与之对应,冲击地压危险性静态预测方法广泛应用于煤层采掘前的冲击危险评估,其代表方法包括综合指数法、可能性指数诊断法、地质动力划分法等。其中,基于地质因素和开采技术因素的综合指数法,综合各子指标的影响权重对冲击地压危险性进行赋分,被《防治煤矿冲击地压细则》确定为优先采用的评价方法。

综合指数法考虑的影响冲击地压的地质因素主要有:开采深度、地质构造、顶板坚硬岩层、应力集中、煤层冲击倾向性等。然而,在进行考虑地质条件的冲击危险性评价时,“开采区域内构造引起的应力增量与正常应力值之比”中的“正常应力值”并未明确指出如何获取,通常将竖直应力的1.3倍作为正常应力值。但是,随着开采深度的增加,岩体的赋存环境更为复杂,高地应力特征愈发明显,仍将正常应力与竖直应力之比取为固定的1.3倍关系是值得商榷的。另外,目前仍存在开采深度与冲击灾害不直接相关的问题,如低采深条件下也会出现冲击地压现象。因此,应梳理开采深度、构造应力与冲击危险性的关系,提出更为精确的考虑地质因素的冲击地压危险性评价子指标取值方法。

笔者针对上述取值方法问题展开研究,首先对我国煤矿开采深度现状及地应力分布规律进行梳理,在此基础上,结合数值模拟方法分析了不同埋深、不同应力比下巷道开挖响应规律,得到了高地应力显

现条件判据,同时提出了基于地质因素的冲击地压危险性评价子指标的取值方法,最后对该取值方法的合理性与应用流程进行了探讨。

1 开采深度、构造应力及与冲击地压的关系

1.1 我国煤矿开采深度与地应力的现状

1.1.1 开采深度现状

随着浅部资源的日益枯竭,煤矿的开采不断向深部进军。煤矿的开采深度体现了开采技术的优劣和采区赋存环境的复杂程度,通过对国内煤矿开采深度分析,可以初步判断煤矿采区地应力的存在区间,进而为煤矿的安全开采及数值计算提供基础。1995年我国重点煤矿开采深度集中在500 m附近,近年来我国千米深井逐渐增多,开采深度超过千米的煤矿已达50余座^[8]。根据《煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十三五”规划》,开采深度超过800 m的矿井达到200余座。目前,我国中东部矿区以每年10~25 m的速度向深部开采,现已有数座煤矿开采深度超过1 500 m(例如大屯能源公司孔庄煤矿、新汶矿业孙村煤矿等),未来5~10 a还将新建千米矿井30余座,深井数量和最大开采深度将逐渐增加。

随着开采深度的不断增加,存在某一深度致使冲击地压动力灾害频繁发生,该临界深度称为冲击地压临界深度。潘一山等^[1]对3个矿区发生冲击地压时的开采深度进行统计,指出冲击地压存在一个开始频繁发生的临界深度。对于冲击临界深度没有统一的界定,不同学者得出的冲击地压发生临界深度有所不同^[9-10]。路凯旋等^[11]研究了我国矿井的冲击地压临界深度分布规律,同时提出冲击地压临界深度量化公式。基于路凯旋等^[11]的统计结果,制成如图1所示冲击地压临界深度分布图。从图中可以观察到,发生冲击地压的临界深度集聚在400~800 m。需要注意的是,图中千米以上开采深度发生冲击地压的煤矿数量急剧减少,不代表千米以上发生冲击地压难度增大,该统计规律应与深部煤矿数量相对浅部较少有关,导致发生冲击地压的深部煤矿数量有限。可以预见的是,随着我国开采深度和规模继续增加,冲击地压灾害风险将逐渐增大。

1.1.2 地应力分布规律

地应力分布规律对煤矿开采、巷道支护、冲击地压防控等至关重要,众多学者基于地应力实测数据,从不同角度分析了地应力随深度分布规律。王艳华等^[12]建立了侧压系数随深度变化的关系式,进而对国内实测地应力数据进行了回归分析。李鹏等^[13]基于中国煤矿实测地应力数据,分析中国煤矿矿区地

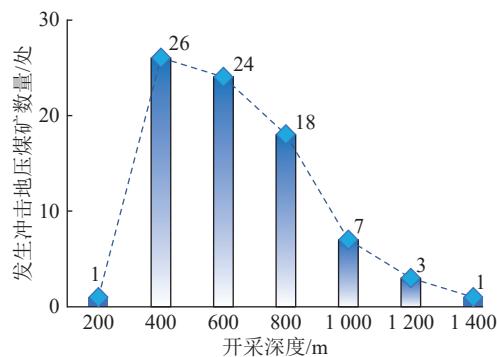


图1 冲击地压临界深度分布趋势
Fig.1 Distribution trend of critical depth of rock burst

应力场随深度的总体分布特征。康红普等^[14]绘制了中国煤矿矿区地应力分布图,分析了我国煤矿井下地应力分布特征和主要影响因素。陈世达等^[15]系统分析了我国主要煤层气勘探开发区块地应力随深度的总体分布特征,并建立了不同应力参数随深度的变化曲线。

为便于分析我国地应力分布规律,将地应力参数回归公式总结于表1。表1中, K_{\max} 为最大水平地应力与竖直地应力之比; K_{\min} 为最小水平地应力与竖直地应力之比; H 为测点深度,m。

表1 地应力参数回归公式

Table 1 In-situ stress parameter regression formula

序号	K_{\max} 计算公式	K_{\min} 计算公式
1	$K_{\max} = 250/H + 0.92$ ^[12]	$K_{\min} = 160/H + 0.56$ ^[12]
2	$K_{\max} = 115.14/H + 1.31$ ^[13]	$K_{\min} = 67.81/H + 0.74$ ^[13]
3	$K_{\max} = 160.35/H + 0.801$ ^[14]	$K_{\min} = 99.86/H + 0.405$ ^[14]
4	$K_{\max} = 190.3/H + 1.039$ ^[16]	$K_{\min} = 97.7/H + 0.670$ ^[16]

将表1中公式曲线化处理,如图2所示,图中红色虚线表示 K_{\max} 的存在范围。

由图2可以发现水平地应力与竖直应力之比随深度呈双曲线分布,并且在开采深度较浅时 K_H 的取值范围较大。同时可以观察到不同学者拟合的结果并不相同,这是由于不同学者基于不同地区的实测地应力数据不同而导致的。景峰等^[16]收集了国内多个地区的地应力实测数据,并基于筛选后的数据研究了我国地应力分布规律。该地应力分布规律已经被广泛应用到一些工程中,具有较高的适用性^[17],因此,在后续地应力分析中借鉴了该实测结果及规律。

1.2 冲击地压与“深部”的联系

一般情况下,埋深工程岩体复杂的赋存和应力环境致使其力学特性不同于浅埋工程,损伤与破坏范围增加,为冲击地压孕育提供了先天性条件,对

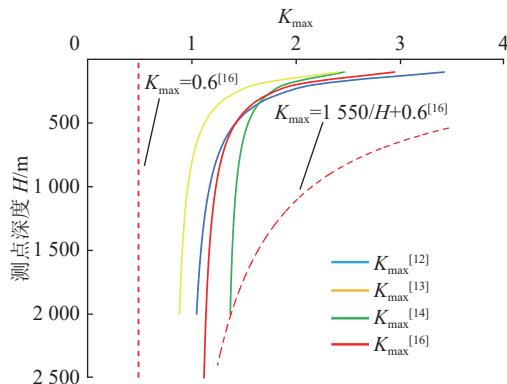


图 2 K_{\max} 随 H 分布
Fig.2 Variation of K_{\max} with H

生命和财产安全存在巨大隐患。然而,“大理深”或“大采深”并非与“深部”直接对应。关于煤矿开采“深部”的界定,多从地应力特征、开采引发的灾害程度、岩体力学状态等角度考虑。张建民等^[18]对深部开采界定方法进行了探讨,并提出了深部煤炭开采的定义。深部岩体具有非线性的力学特性,复杂的赋存环境导致煤矿冲击地压动力灾害频繁发生。冲击地压是由于煤矿开采活动造成围岩应力集中,积聚在采场周围煤岩体中的弹性变形能突然释放而造成的,常伴有煤岩体抛出、巨响及气浪等,具有很强的破坏性,是煤矿重大灾害之一^[19-20]。

冲击地压危险性表现为矿压显现与煤岩体动力失稳,与深部赋存条件存在一定相关性。通常,随着深度增加,高应力显现特征愈加明显,伴随出现岩心饼化、洞壁剥离、冲击地压、岩质基坑底部隆起等工程问题。但是,大理深并非高应力显现的关键,愈发极端的地应力赋存条件才是高应力显现的根本原因。例如,埋深不大但构造应力明显时,也会出现高应力显现。如无特殊说明,本文将具有高应力显现的岩体指代为深部岩体。因此,高地应力显现条件的研究对冲击危险性的评价和深部动力灾害防控而言非常重要。

2 深部高应力显现特征及判据

2.1 地下岩体开挖数值模拟

上覆岩体对冲击地压的影响是不容忽略的,有较多学者将煤层上覆岩体作为冲击地压划分的重要考虑因素。考虑煤矿中普遍存在的砂岩地层,文中以红砂岩与黑砂岩作为代表提出新指标的取值方法。本文中的红砂岩和黑砂岩以砂岩的颜色命名,属于常见砂岩地层的岩石介质。数值模拟力学模型参考建立的与岩土介质力学特征相符的应变软化模型^[21],红砂岩与黑砂岩的物理力学参数见表 2。

表 2 数值模拟参数

Table 2 Numerical simulation parameters

岩石种类	红砂岩	黑砂岩
弹性模量/GPa	10.119	14.458
泊松比	0.287	0.263
峰值黏聚力/MPa	17.707	28.265
残余黏聚力/MPa	4.374	0.308
峰值内摩擦角/(°)	28.225	33.135
残余内摩擦角/(°)	33.472	35.25
密度/(kg·m ⁻³)	2 700	2 700

为了验证模型参数是否符合脆性随围压增加而逐渐降低的试验规律,采用有限差分软件对红砂岩及黑砂岩分别进行了不同围压下($\sigma_2=\sigma_3=0, 10, 20, 30, 40, 50$ MPa)的三轴试验模拟,基于模拟结果获取了全应力-应变曲线。为进行常规三轴模拟试验,将模拟试样制成高 10 cm, 直径 5 cm 的标准圆柱,在试样底面施加固定约束,同时在顶部施加 10^{-7} m/s 的速度约束以模拟轴向加载,并在试样顶部设置监测单元以获取试样的加载数据。将模拟结果与试验结果^[22]进行对比,如图 3 所示。

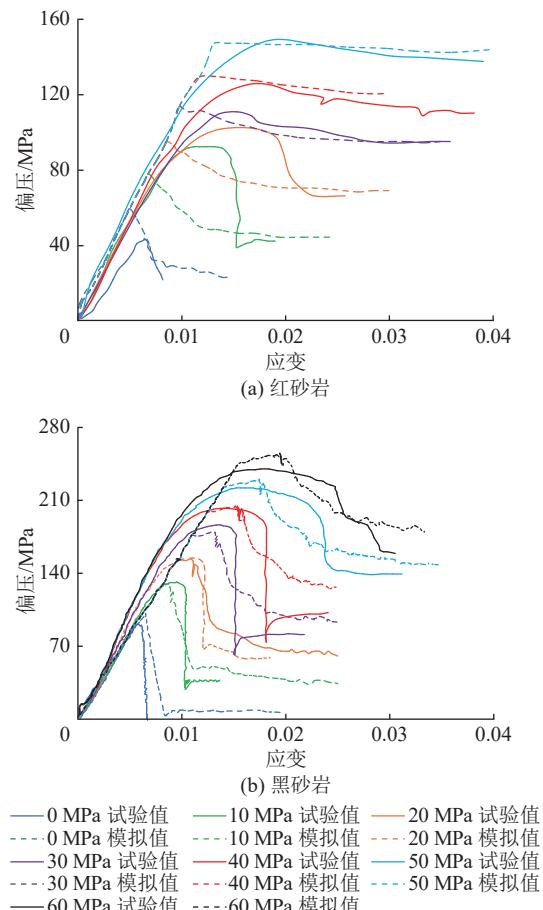


图 3 2 种岩石的试验曲线与模拟曲线对照
Fig.3 Comparison between test curves and simulated curves of two rocks

从模拟结果来看,模拟曲线可以很好地表达了砂岩峰前应变硬化和峰后应变软化特征,以及随围压增大由强脆性向弱脆性转变的过程,峰后曲线随围压增大逐渐变缓,且总体上峰值强度、残余强度、弹性模量以及特征应变与试验结果较为一致,这证明了数值模型的可靠性。

基于上述数值模拟参数,进行了不同深度、不同应力比下的巷道开挖模拟,进而得到围岩破坏演化规律。考虑到边界效应、网格密度、计算机性能的要求,模型的横向与纵向方向均取为30 m,单元共划分为288 053个。根据我国煤矿开采深度现状及未来趋势,从400~1 800 m开采深度范围内每隔200 m设置为1个模拟深度。由于巷道的跨径在3~7 m时,跨径对巷道稳定性的影响很小,考虑简化分析,模拟中巷道形状为圆形且直径为3 m,跨径为6 m,数值模型如图4所示。

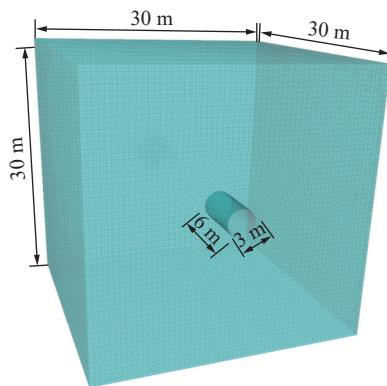


图4 数值模型及尺寸

Fig.4 Numerical model and dimensions

本文以景峰等^[16]统计的我国地应力分布规律为依据,得到每一开采深度下最大水平地应力与竖直应力之比 K_{\max} (以下简称“地应力比”)的范围,见表3。表3中, σ_v 为竖直应力, σ_{\min} 为最小水平地应力, σ_{\max} 为最大水平地应力, $\sigma_{\max,\max}$ 为最大水平地应力的取值上限, $\sigma_{\max,\min}$ 为最大水平地应力的取值下限,单位均为MPa。地应力取值时,竖直应力与最小水平地应力依据回归方程取得;最大水平地应力 σ_{\max} 设置若干组,下限取为最小水平地应力的1.1倍,上限由回归方程取得。

模型边界的竖直应力与水平应力按表3取值,施加方式如图5所示。需要注意的是,每一模拟深度对应的应力比存在范围并不相同。本次模拟的模型开挖进尺为6 m,开挖方式为全断面开挖,当模型达到平衡状态后通过程序内置语言提取当前脆性破坏区体积并进行后续分析。

表3 地应力组合方案

Table 3 Combined scheme of ground stress

取值顺序	待定参数	取值方法
1	埋深/m	任取一埋深值H
2	竖直应力/MPa	$\sigma_v = 0.0271H$
3	最大水平地应力/MPa	$\sigma_{\max,\min} = 1.1\sigma_{\min}$ $\sigma_{\max,\min} < \sigma_{\max} < \sigma_{\max,\max}$ 时,按需取值 $\sigma_{\max,\max} = (1550/H + 0.6)\sigma_v$

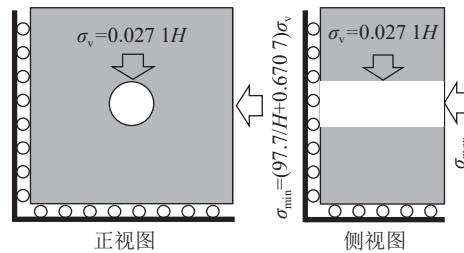


图5 应力边界条件

Fig.5 Stress boundary conditions

2.2 不同地应力比下围岩破坏特征演化规律

不同埋深与地应力比下围岩的破坏单元体积如图6所示,图中绿色曲线为景峰等统计的不同深度下平均最大水平地应力与竖直应力之比^[16]。可以明显发现开挖岩体无论为红砂岩或黑砂岩,破坏单元体积均随地应力比与埋深的增大而逐渐增加。但当黑砂岩作为开挖岩体时,破坏单元体积的变化趋势将更加平缓,且破坏单元体积远大于红砂岩,因此两者的高地应力显现判据应区别分析。

观察红砂岩的破坏单元体积变化规律可以发现存在2个明显的阶段,即低地应力区与高地应力区,分别表现为破坏体积平缓变化与破坏体积快速增长,因此可以将2个阶段的临界值视为红砂岩地层高地应力显现的评判准则(图6a中红色曲线)。当最大水平地应力与竖直应力之比小于临界值时,工程尚未表现出高地应力显现,地应力比的增加对围岩破坏的影响较小且工程支护效果较好;当最大水平地应力与竖直应力之比大于临界值时,破坏单元体积会随着地应力比的增大快速增长,实际施工过程中有可能会出现支护效果减小甚至失效进而产生冲击地压等动力灾害问题。对比景峰等^[16]统计的平均回归曲线(图6a中绿色曲线)可以发现,当埋深小于1 400 m时模拟得到的地应力比临界值(图6a中红色曲线)大于景峰得到的平均地应力比统计值(图6a中绿色曲线),这说明即使地应力比大于平均应力比时也不一定会发生高地应力显现(图6a中A_i-A区域),这与传统认知存在一定偏差。但是,当埋深处于

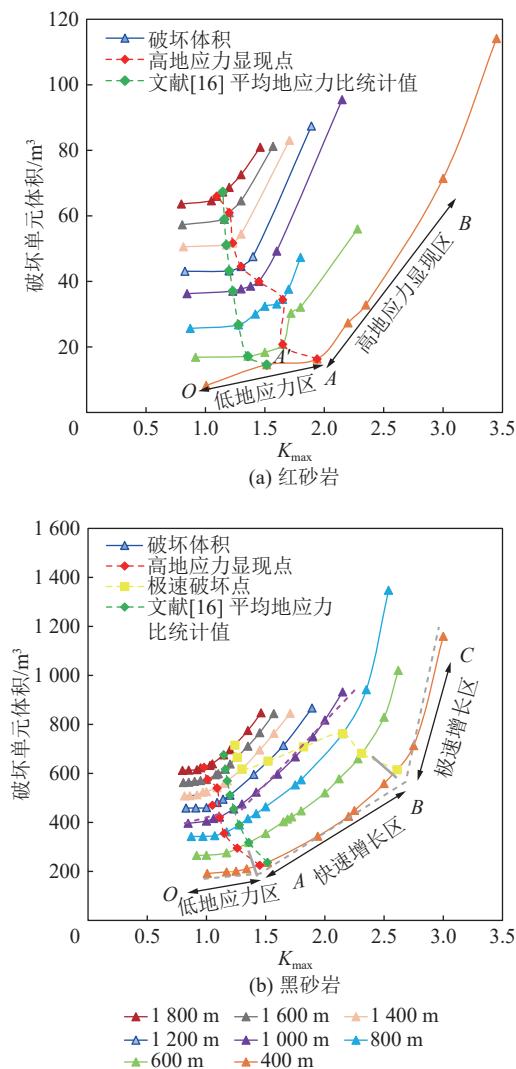


图 6 不同埋深与应力比下的破坏单元体积

Fig.6 Volume of failure unit under different burial depths and stress ratios

1 400~1 800 m 时, 随着埋深的增加两者之间的差距将会逐渐减少。

观察黑砂岩的破坏单元体积变化规律可以发现(图 6b), 黑砂岩的变化趋势比较平稳, 没有明显的特征点可以当作临界点, 因此, 采用如下方法将黑砂岩分为低地应力区、快速增长区、极速增长区: 首先, 基于曲线变化特征粗略划分为 3 个阶段(OA 、 AB 、 BC); 然后, 基于这 3 个阶段做出不同埋深下 OB 段拟合线(拟合线为例如 400 m 埋深曲线中的浅灰色虚线, 图 6b)的角平分线(角平分线即图 6b 中的灰色实线), 该角平分线与破坏体积曲线的交点即为 OB 段的分界点(图 6b 中红色曲线); 同理, 可以做出 BC 段的角平分线, 其与破坏体积曲线的交点即为 BC 段的分界点(图 6b 中黄色曲线)。最后, 考虑到千米以深快速增长区与急速增长区变化

并不明显, 特别将埋深千米作为埋深临界点(图 6b 中粉红色虚线)。

至此, 根据角平分线得到与 OA 、 AB 、 BC 三个阶段分别对应的低地应力区、快速增长区、极速增长区, 各区域临界值定义为高地应力显现点、极速破坏点。千米以浅范围内, 当最大水平地应力与竖直应力之比小于高地应力显现点时, 破坏体积随地应力比的增大而缓慢变化; 当最大水平应力与竖直应力之比大于高地应力显现点而小于极速破坏点时, 破坏体积随地应力比的增大快速增加; 当最大水平应力与竖直应力之比大于极速破坏点时, 破坏体积随地应力比的增大而极速增加。千米以深范围内, 快速增长区与急速增长区相较于千米以浅变化并不明显。因此, 将地应力比大于高地应力显现点的区域划分为高地应力显现区, 即快速增长区与极速增长区。

2.3 高地应力显现条件判据

由上述围岩破坏特征演化规律可知, 当最大水平地应力与竖直应力之比大于高地应力显现点对应的地应力比时, 围岩破坏体积将会随着地应力比的增加而快速增大, 致使支护手段失效进而引发工程动力灾害。因此, 可以根据不同地应力比与埋深组合下围岩的脆性破坏单元体积变化规律, 将高地应力显现点对应的最大水平地应力与竖直应力之比作为临近地应力比, 得到高地应力显现时临界地应力比的定量表达, 进而建立高地应力显现的条件判据。需要注意的是, 引入的破坏单元体积目的不在于表示冲击危险性, 而在于描述“深部高地应力显现及等级划分”。

根据图 6 可以做出红砂岩与黑砂岩临界地应力比的回归曲线(图 7)。需要注意的是, 根据景峰等^[16]的地应力统计规律, 最大水平地应力与竖直应力的比值 K_{\max} 随埋深 H 变化存在取值范围的上下限(即式(1)), 由此推知当埋深 H 趋于无穷大时 K_{\max} 逼近于 0.6, 高地应力显现临界地应力比也应趋于 0.6。因此, 图 7 中纵坐标采用临界地应力比与 0.6 之差的形式。

$$0.6 \leq K_{\max} \leq 1550/H + 0.6 \quad (1)$$

基于以上拟合结果, 可以分别得到红砂岩地层与黑砂岩地层的高地应力显现临界地应力比:

$$G_{r1} = 1.69397e^{-0.000684H} + 0.6 \quad (2)$$

$$G_{r2} = 0.907739e^{-0.000505H} + 0.6 \quad (3)$$

式中: G_{r1} 为红砂岩高地应力显现时最大水平地应力与竖直应力的比值; G_{r2} 为黑砂岩高地应力显现时最

大水平地应力与竖直应力的比值。

因此,由式(1)和式(2),可以得到高地应力显现条件判据:

$$K_{\max} \geq G_r, G_r = ae^{bH} + 0.6 \quad (4)$$

式中: G_r 为高地应力显现时最大水平地应力与竖直应力的比值。 a 和 b 均为常数,对于本研究中的红砂岩地层, $a=1.693\ 97$, $b=-0.000\ 684$;对于本研究中的黑砂岩地层, $a=0.907\ 739$, $b=-0.000\ 505$ 。

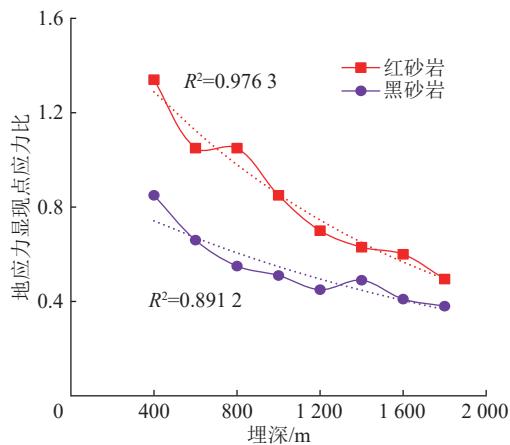


图 7 临界应力比回归曲线

Fig.7 Critical stress ratio regression curve

3 基于开采深度与构造应力的冲击地压危险指数子指标

《防治煤矿冲击地压细则》推荐综合指数法用于评价冲击地压危险性等级,其中,考虑地质条件评价冲击地压危险性等级的因素包括同一水平煤层冲击地压发生历史、开采深度、上覆裂隙带内坚硬厚层岩层距煤层的距离、开采区域内构造引起的应力增量与正常应力值之比、煤的单轴抗压强度等。对这些影响因素分别按照标准打分,并进行加权计算,得到地质因素影响下的冲击危险指数。由于综合指数法切合工程实际且考虑因素全面,因而被广泛应用于煤矿冲击地压危险性评价。

值得注意的是,考虑构造应力影响因素 W_5 时采用综合指数法的子指标进行打分,打分方法见表 4。表 4 中, σ 为正常应力值,然而目前并未有明确的正常应力值的取值依据。在实际应用中,通常将正常应力值取为竖直应力的 1.3 倍,即计算 σ 时地应力比取 1.3。

根据考虑构造应力影响因素 W_5 的综合指数法子指标打分方法(表 4),当 σ_{\max} 大于 σ 且两者差值越大时,冲击危险性越高。另一方面,基于图 6 分析结

果,当 σ_{\max} 大于高地应力显现点对应的最大水平地应力时,破坏单元体积会随着地应力比的增大快速增加,可能会出现支护失效诱发的动力灾害问题。需要注意的是,黑砂岩正常应力 σ 取用高地应力显现点,而并非极速破坏点。若选择“极速破坏点”为高应力显现点则将使临界应力比变大,进而导致评价指标偏低,不利于冲击地压动力灾害的防治。综合以上分析,正常应力值 σ 与高地应力显现点对应的最大水平地应力的涵义相同。因此,可以将正常应力值 σ 取为高地应力显现点对应的最大水平地应力。

表 4 冲击地压危险性评价子指标

Table 4 Sub-indicators for evaluating the impact pressure

影响因素	因素说明	因素分类	危险指数
W_2	$H \leq 400\text{ m}$	0	
	$400\text{ m} < H \leq 600\text{ m}$	1	
	$600\text{ m} < H \leq 800\text{ m}$	2	
	$800\text{ m} < H$	3	
W_5	$\gamma \leq 10\%$	0	
	开采区域内构造引起的 应力增量与正常应力值 之比 $\gamma = (\sigma_{\max} - \sigma)/\sigma$	$10\% \leq \gamma \leq 20\%$	1
		$20\% \leq \gamma \leq 30\%$	2
		$30\% \leq \gamma$	3

σ 可表达为

$$\sigma = G_r \sigma_v \quad (5)$$

基于以上分析,考虑构造应力影响因素 W_5 的综合指数法子指标可以表达为

$$\gamma = (\sigma_{\max} - G_r \sigma_v) / G_r \sigma_v \quad (6)$$

根据式(4),将 G_r 的表达式(6)代入,可将式(6)进一步写为

$$\gamma = [\sigma_{\max} - (ae^{bH} + 0.6)\sigma_v] / (ae^{bH} + 0.6)\sigma_v \quad (7)$$

式(7)即为新提出的冲击地压危险指数子指标,该指标同时考虑了开采深度与地应力比的影响,可以准确地评价不同开采深度、不同构造应力条件下的冲击危险性。

4 讨 论

以陕西、内蒙古、山东等地冲击地压矿井为例,基于式(7)和黑砂岩力学参数,计算考虑构造应力影响因素 W_5 的综合指数法子指标,并与传统方法得到的子指标进行对比(图 8)。

图 8 中,工作面序号 1—6 分别代表陕西某矿

ZF2801工作面、内蒙古某矿33109工作面、山东某矿8206工作面、山东某矿4307工作面、陕西某矿204工作面、山东某矿5303工作面,现场地应力报告表明最大水平地应力分别为13.99、28.87、31.9、38.62、44.87、36.82 MPa。从图8可以看出,与传统方法相比,小于600 m采深时新方法得到的子指标偏小,约600 m采深时2种方法得到的子指标近似相等,大于600 m采深时新方法得到的子指标偏大。其中,工作面4和工作面6均使考虑 W_5 的危险指数增加1,可能影响到最终评价结果。

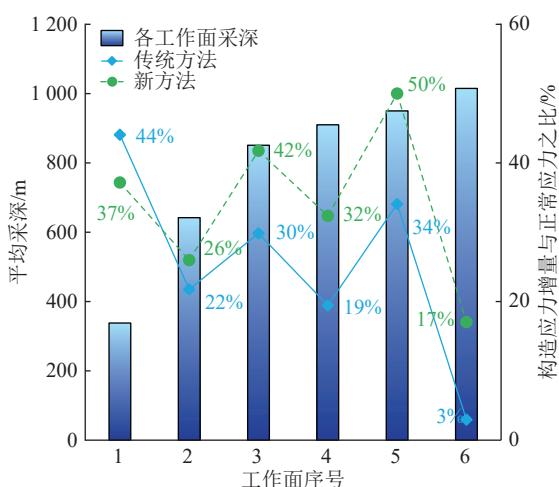


图8 新旧取值方法在冲击地压矿井中的计算实例

Fig.8 Case study of old and new valuation methods in rock burst mines

为进一步探讨新取值方法与传统方法的差异性,在400、600、800 m等不同埋深条件下分别计算考虑构造应力影响因素 W_5 的冲击地压危险性评价子指标。根据式(6)计算子指标时,新取值方法采用式(4)表达 G_r ,传统方法采用 $G_r=1.3$ 的方案。基于式(6),给定不同水平的构造应力增量($\sigma_h-G_r\sigma_v$),分别采用新取值方法和传统方法,对红砂岩和黑砂岩计算构造应力增量与正常应力之比,即得到考虑构造应力影响因素 W_5 的冲击地压危险性评价子指标随构造应力、埋深和岩性的影响规律(图9)。由图9可见,新取值方法存在以下特点:

- 1) 同等埋深条件下,随着构造应力增加,构造应力增量增大,考虑 W_5 的子指标增大;
- 2) 在低埋深情况下,根据传统取值方法计算正常应力值并将地应力比取1.3时,得到的 γ 值比实际值偏大,进而对冲击地压危险性的评价过于保守,从而导致经济性降低,反之,在埋深较大情况下,根据传统取值方法得到的 γ 比实际值偏小,会导致安全性降低,这将对深部工程冲击地压防治工作和安全保

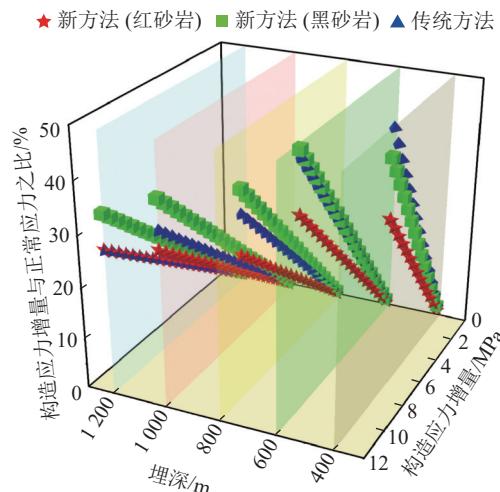


图9 新旧取值方法对评价指标的影响

Fig.9 Influence of new and old valuation methods on evaluation indicators

障十分不利;

3) 传统方法采用 $G_r=1.3$ 的方案得到的子指标不受岩性的影响,新取值方法考虑了不同的岩石力学特性而得到不同的 G_r 表达函数,新取值方法反映了岩性因素。

综上所述,新取值方法计算子指标时考虑了构造应力、埋深和岩性的影响,而传统方法将“正常应力值”取为“竖直应力的1.3倍”仍值得商榷。

冲击地压危险性评价是一项复杂的系统工程,涉及的诱冲影响因素多,应结合具体工程对象将其作为个性问题对待。新的子指标针对不同岩性同时考虑了采深与地应力比,表达式中的参数具有个性化的特点,也贴合了现场实际情况,基于传统方法的融合新方法的冲击地压处理流程如图10所示。

首先,引入能够突出不同煤岩单轴条件下脆性跌落差别的统一脆延性指标^[6]进行冲击倾向性鉴定,对于有冲击倾向性煤层进行冲击危险性评价,即结合新的子指标开展考虑地质因素及开采技术因素的冲击危险性等级划分,进一步在冲击危险性区域划定及防冲设计时,将统一脆延性指标^[6]嵌入数值程序评估多轴条件下冲击程度及卸压范围(图11)。另外,本文将普遍存在的砂岩作为对象进行了分析,考虑工程复杂性,未来仍需进一步结合具体工程验证与应用。

5 结 论

1) 地下岩体破坏体积随地应力比和埋深的增大而增加,破坏体积曲线演化特征随岩性不同表现出差异性,红砂岩破坏体积曲线可划分为平缓变化的低地

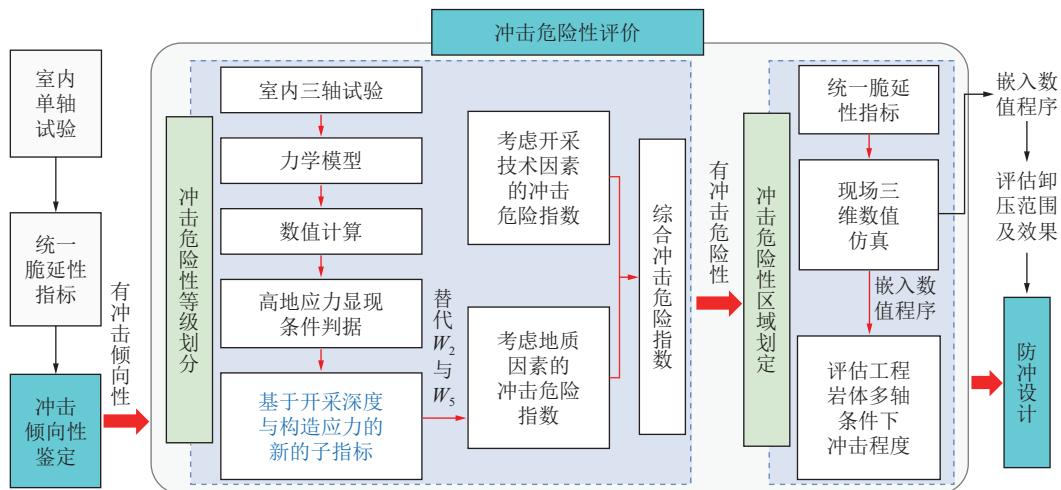


图 10 融合新方法的冲击地压处理流程

Fig.10 Flowchart of rock burst treatment incorporating new methods

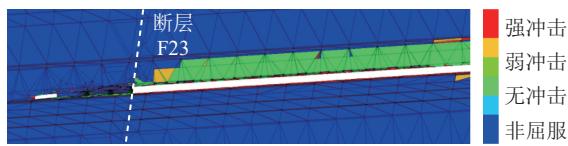


图 11 某工作面末采阶段冲击程度范围评价

Fig.11 Evaluation of rock burst range during final mining stage of a working face

应力区与快速增长的高地应力区,而黑砂岩破坏体积曲线可划分为低地应力区、快速增长区、极速增长区。

2)高地应力显现点对应的临近地应力比随埋深增加而呈指数形式减小,当埋深趋于无穷大时,高应力显现临界地应力比趋于0.6。当最大水平地应力与竖直应力之比大于等于高地应力显现点对应的临近地应力比时,出现高地应力显现特征。

3)考虑正常应力值 σ 与高地应力显现点对应的最大水平地应力的涵义相同,将正常应力值 σ 取为高地应力显现点对应的最大水平地应力,提出了一种新的考虑构造应力影响因素 W_s 的冲击地压危险性评价子指标及取值方法。

4)考虑构造应力影响因素 W_s 的冲击地压危险性评价子指标随构造应力增加而增大,随埋深和岩性不同而变化,新取值方法反映了构造应力、埋深和岩性的影响,可以准确地评价不同开采深度、不同构造应力条件下的冲击危险性。

参考文献(References):

- [1] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].*岩石力学与工程学报*,2003,22(11):1844-1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11) : 1844-1851.

Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11) : 1844-1851.

- [2] 窦林名,李振雷,张敏.煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J].*煤炭科学技术*,2016,44(7):41-46.
DOU Liming, LI Zhenlei, ZHANG Min. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(7): 41-46.
- [3] 谭云亮,郭伟耀,辛恒奇,等.煤矿深部开采冲击地压监测解关键技术研发[J].*煤炭学报*,2019,44(1):160-172.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 160-172.
- [4] 潘俊锋,齐庆新,刘少虹,等.我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术[J].*煤炭学报*,2020,45(1):111-121.
PAN Junfeng, QI Qingxin, LIU Shaohong, et al. Characteristics, types and prevention and control technology of rock burst in deep coal mining in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 111-121.
- [5] 齐庆新,潘一山,李海涛,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J].*煤炭学报*,2020,45(5):1567-1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haizhao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [6] 李震,史文豪,高鑫,等.基于煤岩冲击与大变形特征的统一脆性指标研究[J].*煤炭科学技术*,2022,50(10):19-27.
LI Zhen, SHI Wenhao, GAO Xin, et al. Study on unified brittleness index based on burst tendency and large deformation of coal-rock[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(10): 19-27.
- [7] 潘俊锋,冯美华,卢振龙,等.煤矿冲击地压综合监测预警平台研究及应用[J].*煤炭科学技术*,2021,49(6):32-41.
PAN Junfeng, FENG Meihua, LU Zhenlong, et al. Research and application of comprehensive monitoring and early warning platform for coal mine rock burst[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 32-41.
- [8] 黄炳香,张农,靖洪文,等.深井采动巷道围岩流变和结构失稳大

- 变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 911–926.
- HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911–926.
- [9] 李利萍, 潘一山, 王晓纯, 等. 开采深度和垂直冲击荷载对超低摩擦型冲击地压的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3225–3230.
- LI Liping, PAN Yishan, WANG Xiaochun, et al. Influence analysis of exploit depth and vertical impact load on anomalously low friction rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3225–3230.
- [10] 李铁, 蔡美峰, 纪洪广. 抚顺煤田深部开采临界深度的定量判别[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 363–367.
- LI Tie, CAI Meifeng, JI Hongguang. Quantitative discrimination of critical depth in deep exploitation in Fushun coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 363–367.
- [11] 路凯旋, 徐连满. 我国矿井冲击地压临界深度研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(5): 31–33.
- LU Kaixuan, XU Lianman. Study on critical depth of rock burst in mines in China[J]. Coal Technology, 2020, 39(5): 31–33.
- [12] 王艳华, 崔效锋, 胡幸平, 等. 基于原地应力测量数据的中国大陆地壳上部应力状态研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3016–3027.
- WANG Yanhua, CUI Xiaofeng, HU Xingping, et al. Study on the stress state in upper crust of China mainland based on *in situ* stress measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 3016–3027.
- [13] 李鹏, 苗胜军. 中国煤矿矿区地应力场特征与断层活动性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 319–329.
- LI Peng, MIAO Shengjun. Analysis of the characteristics of *in situ* stress field and fault activity in the coal mining area of China[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 319–329.
- [14] 康红普, 伊丙鼎, 高富强, 等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 23–33.
- KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground *in situ* stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23–33.
- [15] 陈世达, 汤达祯, 陶树, 等. 煤层气储层地应力场宏观分布规律统计分析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 57–63.
- CHEN Shida, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Statistic analysis on macro distribution law of geostress field in coalbed methane reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 57–63.
- [16] 景锋, 盛谦, 张勇慧, 等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2056–2062.
- JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2056–2062.
- [17] 王钱款, 邱士利, 程瑶, 等. 基于GIS的深埋超长隧道岩爆等级评估方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2572–2587.
- WANG Qiankuan, QIU Shili, CHENG Yao, et al. Method of evaluation of rock burst classification based on GIS for deeply-buried ultra-long tunnels[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2572–2587.
- [18] 张建民, 李全生, 张勇, 等. 煤炭深部开采界定及采动响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1314–1325.
- ZHANG Jianmin, LI Quansheng, ZHANG Yong, et al. Definition of deep coal mining and response analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1314–1325.
- [19] 姜福兴, 张翔, 朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 203–213.
- JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203–213.
- [20] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205–213.
- JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205–213.
- [21] 李震, 赵洪波, 刘尚各, 等. 考虑围压效应和塑性演化机制的中密砂力学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2610–2620.
- LI Zhen, ZHAO Hongbo, LIU Shangge, et al. Mechanical model for medium dense sand considering confining pressure effect and plastic evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2610–2620.
- [22] ZHOU H, CHEN J, LU J J, et al. A new rock brittleness evaluation index based on the internal friction angle and class I stress-strain curve[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(7): 2309–2316.