



推荐阅读:

冲击地压

[煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构](#)

[煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展](#)

[煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用](#)

[煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究](#)

[考虑区域地应力特征的裂隙煤岩流固耦合特性实验](#)

[冲击地压应力波作用机理](#)

[浅埋煤层群采场周期来压顶板结构及支架载荷](#)

[我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术](#)

[急倾斜煤层开采覆岩联动致灾特征分析](#)

[深井煤岩瓦斯动力灾害模拟实验系统](#)

煤矿火灾防治

[煤矿热动力灾害及特性](#)

[羟基\(—OH\)对煤自燃侧链活性基团氧化反应特性的影响](#)

[煤氧化特性的 STA-FTIR 实验研究](#)

[浸水过程对长焰煤自燃特性的影响](#)

[采空区煤自燃预测的随机森林方法](#)

[基于等效氧化暴露时间理论的褐煤自燃特性研究](#)

[\[BMIM\]\[BF₄\]对不同变质程度煤自燃热行为的影响研究](#)

[煤炭自然发火介尺度分析:从表征体元宏观模型到孔隙微观模型](#)

瓦斯治理

[煤与瓦斯共采三维大尺度物理模拟实验系统的研制与应用](#)



推荐阅读:

[高压气液两相射流多级脉动破煤岩特性及致裂机理](#)

[我国煤矿瓦斯爆炸抑爆减灾技术的研究进展及发展趋势](#)

[直接法瓦斯含量测定结果准确性实验研究](#)

[裂隙煤体注浆浆液扩散规律及变质量渗流模型研究](#)

[基于热-流-固体系参数演变的煤与瓦斯突出能量演化](#)

[三轴加载煤体瓦斯渗流速度-温度联合响应特征](#)

[煤体结构与甲烷吸附/解吸规律相关性实验研究及启示](#)

[基于 CT 三维重建煤骨架结构模型的渗流过程动态模拟研究](#)

[CH₄、CO₂ 和 N₂ 多组分气体在煤分子中吸附热力学特性的分子模拟](#)

[粉尘通风](#)

[基于风量特征的矿井通风系统阻变型单故障源诊断](#)

[煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想](#)

[湍流状态下竖直管道内甲烷-煤尘预混特征及爆炸过程数值模拟](#)

[工作面与采空区漏风交换风量测算方法](#)

[综采工作面滚筒旋流风对截割煤尘侧向逸散规律的影响](#)

[出口直径对内混式空气雾化喷嘴雾化特性及降尘性能的影响](#)



移动阅读

王爱文,王岗,代连朋,等. 基于临界应力指数法巷道冲击地压危险性评价[J]. 煤炭学报,2020,45(5):1626-1634. doi:10.13225/j.cnki.jccs.DY20.0259

WANG Aiwen, WANG Gang, DAI Lianpeng, et al. Evaluation on the rock burst risks of roadway using critical stress index method[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5):1626-1634. doi:10.13225/j.cnki.jccs.DY20.0259

基于临界应力指数法巷道冲击地压危险性评价

王爱文^{1,2}, 王岗¹, 代连朋³, 陈建强⁴, 施天威¹, 吕祥锋⁵, 蔡荣宦³

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 冲击地压研究院, 辽宁 阜新 123000; 3. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 4. 神华新疆能源有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830027; 5. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:冲击危险性评价的目的是确定待采掘区域的冲击地压危险等级及范围,是冲击地压防治工作的基础。建立了“应力-围岩-支护”巷道冲击地压力学模型,发现了巷道冲击地压发生的临界应力、临界阻力区深度与煤体单轴抗压强度、巷道支护强度、巷道几何参数以及冲击能指数4者之间的内在关系。冲击能指数直接影响巷道围岩系统结构失稳的临界应力与临界阻力区的大小,阻力区深度增加导致冲击地压发生的临界载荷增加,实际阻力区深度与应力环境是影响冲击地压发生的重要因素。给出了考虑了煤体的实际应力环境、煤体冲击倾向性、巷道结构属性及实际围岩状态4个因素的临界应力指数计算方法。提出采用临界应力指数评价巷道冲击地压危险性的方法,将相似条件下已经发生过冲击地压区域的临界应力指数,作为待评价区域的冲击地压发生指标 K_{fer} ,把临界应力指数在 $[0, K_{\text{fer}}]$ 区间以 $0.25K_{\text{fer}}$ 为间隔,划分为4个数值区间,由低到高分别对应无冲击危险、弱冲击危险、中等冲击危险和强冲击危险4个危险等级,依据临界应力指数在4个区间的分布情况判定待评价区域的危险等级。以某矿303工作面实际工程为案例,介绍了包含10个步骤的冲击危险性评价流程,评价结果表明:该工作面存在中等冲击危险区域5个,强冲击危险区域7个。钻屑法监测数据表明评价结果与现场实际相符。与综合指数法评价结果相比,临界应力指数法的评价结果更趋于量化。

关键词:巷道;冲击地压;支护;临界应力指数;冲击危险性评价

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2020)05-1626-09

Evaluation on the rock burst risks of roadway using critical stress index method

WANG Aiwen^{1,2}, WANG Gang¹, DAI Lianpeng³, CHEN Jianqiang⁴, SHI Tianwei¹,
LÜ Xiangfeng⁵, CAI Ronghuan³

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Research Institute of Rock Burst, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 4. Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumchi 830027, China; 5. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Rock burst hazard evaluation refers to the confirmation of the rock burst hazard grades and dangerous areas, which is the foundation of rock burst prevention. The “stress-surrounding rock-support” model for roadway rock burst

收稿日期:2020-02-25 修回日期:2020-05-08 责任编辑:常明然

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804205);国家自然科学基金面上资助项目(51974150);2018年新疆维吾尔自治区天池百人计划(柔性人才)支撑计划资助项目

作者简介:王爱文(1982—),男,辽宁建昌人,副教授,硕士生导师。E-mail:waw_lnt@126.com

was established. Based on the rock burst theory of disturbance response instability, the internal relationships among the critical stress, the depth of critical resistance zone, the uniaxial compressive strength of coal mass, the support strength of roadway, the geometric parameters of roadway and the impact energy index were found. The impact energy index directly affects the size of the critical stress and critical resistance zone of the roadway surrounding rock system. The increase of the depth of the resistance zone leads to the increase of the critical load of the rock burst. The actual depth of the resistance zone and the stress environment are the important factors affecting the rock burst. The calculation method of the critical stress index considering the in-situ stress environment, the outburst proneness of the coal mass, the structural property of the roadway and the actual surrounding rock state was given. The critical stress index at the area where the rock burst occurred with similar conditions was taken as the rock burst occurrence index K_{fer} of the area to be evaluated, and the critical stress index is divided into four numerical intervals with $0.25 K_{fer}$ as the interval in $[0, K_{fer}]$, corresponding to the four risk grades of no hazard, weak hazard, medium hazard and strong hazard, respectively. The rock burst hazard of the area to be evaluated is determined according to the distribution of the critical stress index in the four intervals. Taking the 303 working face of a mine as an example, this paper introduces the process of rock burst hazard evaluation which includes 10 steps. The evaluation result shows that there are 5 areas with medium hazard and 7 areas with strong hazard in this working face. Compared with the comprehensive index method, the evaluation results of critical stress index method tend to be more quantitative, and the monitoring data of the drilling bits method show that the evaluation results are consistent with the results of field monitoring.

Key words: roadway; rock burst; support; critical stress index; rock burst hazard evaluation

随着煤矿开采深度与开采强度的不断增加,煤矿巷道冲击地压灾害愈发频繁,造成巷道和硐室破坏、人员伤亡、设备损坏,给煤矿安全生产带来巨大的威胁^[1-3]。冲击危险性评价是冲击地压防治工作的重要环节,只有在冲击危险性评价的基础上,才能对冲击地压危险区域采取相应的防治措施。长期以来,国内外众多学者从不同角度提出了多种冲击危险性评价方法。窦林名、齐庆新等提出了综合指数法,能够宏观的确定所评价区域的冲击危险程度^[4-6],在我国广泛使用。张宏伟、荣海等提出了以断裂构造形式、煤岩特性与岩体应力状态等为主要判别指标的地质动力区划法^[7]。姜福兴等将冲击地压的主要影响因素分为自重应力、采动应力、构造应力以及回采过程中上覆岩层运动引起的采动应力,并提出了基于应力叠加的回采工作面冲击危险性评价方法^[8-9]。曹安业等通过 CT 反演技术对工作面回采期间冲击危险性进行分析,总结了工作面回采期间的应力演化规律,为工作面安全回采做出有效的指导^[10-12]。陈凡等通过分析不同区域内冲击地压影响因素种类及其权重,提出一种基于区域划分与主控因素辨识的冲击危险性评价方法^[13]。文献^[14]针对矿井复杂多样的地质和开采环境,提出根据外部应力与巷道围岩相互作用后的围岩结构稳定性及其冲击倾向性,对围岩的冲击危险性和类型进行了分类。刘少虹、潘俊锋等利用地震波和电磁波 CT 联合探测的方法,开展了采掘巷道冲击危险性评价^[15-16],得到较好应用效果。上

述方法对于冲击危险煤层的安全采掘起到了积极推动作用。但在复杂多变的采掘及地质条件下,趋于量化的评价方法较少。冲击地压是高应力下的煤岩体动力失稳现象,考虑采场周围的应力情况、煤层冲击倾向性、巷道支护情况等对冲击地压的影响程度,进而评价冲击危险性,更具有合理性,潘一山给出了冲击地压发生的临界应力计算公式^[17],但未考虑利用临界应力进行冲击危险性评价。

笔者提供一种基于临界应力指数法的煤矿冲击地压危险性评价方法,通过分析待评价采掘区域实际煤体应力状态与临界应力的比值,结合实际阻力区与临界阻力区的对比关系,判断可能发生冲击地压的危险等级,进而指导冲击地压防治工作实施。

1 巷道冲击地压发生的临界应力

根据弹塑性理论,地下深部巷道可简化为半无限大平面内的孔洞问题,将巷道简化为一半径为 a 的圆形硐室,对于其他形状巷道,可通过保角变换得到当量半径后按圆形巷道处理。将支护作用简化为巷道表面的支护应力为 p_s ,在半径为 b 的远场受应力 P 作用。沿巷道轴线方向取单位宽度进行分析,则为轴对称平面应变问题,其力学模型如图 1 所示。

根据稳定性理论,当支护与围岩组成的煤岩体变形系统达到非稳定平衡状态时,在顶板断裂、断层错动或爆破等外界扰动下,非稳定平衡状态失稳发生冲

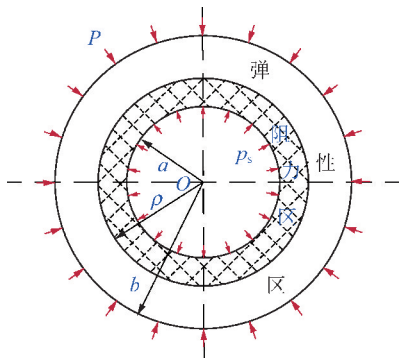


图1 “应力-围岩-支护”巷道冲击地压力学模型

Fig. 1 Mechanical model of “stress-surrounding rock-support” for rock burst in roadway

击地压。将使支护与围岩组成的煤岩体变形系统达到非稳定平衡状态的应力称为临界应力。参考文献[17],取煤岩内摩擦角为 30° ,可得到考虑支护应力条件下圆形巷道发生冲击地压的为临界应力 P_{cr} 为

$$P_{cr} = \frac{\sigma_c}{2} \left(1 + \frac{1}{K} \right) \left(1 + \frac{4p_s}{\sigma_c} \right) \quad (1)$$

其中, σ_c 为煤的单轴抗压强度; K 为煤岩冲击倾向性指数(在数值上等于冲击能指数); p_s 为支护应力,对于锚杆(索)支护巷道 $p_s = T/(S_1 S_c)$, T 为锚杆(索)的屈服强度, S_1, S_c 分别为锚杆(索)的间距与排距。采用U型棚或液压支架等其他支护时,支护应力可简化为 $p_s = F/S$,其中 F 为按照巷道设计支护参数与支护形式取计算面积内各个支护构件支护阻力之和, S 为所取的计算支护面积。

临界应力作用下巷道周边形成的塑性软化区,在冲击地压发生时吸收冲击能,阻止冲击发生,称为临界阻力区,参考文献[17]可得到临界阻力区深度 R_{cr} 为

$$R_{cr} = na \sqrt{1 + \frac{1}{K} \left(1 + 2 \frac{P_s}{\sigma_c} \right)} \quad (2)$$

其中, n 为巷道形状变异系数,对于圆形巷道取1.0,半圆拱形巷道取1.1~1.3,矩形巷道取1.3~1.5,梯形巷道取1.5~1.8; a 为巷道半径。

式(1),(2)给出了巷道冲击地压发生的临界应力、临界阻力区与煤体单轴抗压强度、巷道支护强度、巷道几何参数以及冲击能指数4者之间的内在关系。其中,冲击能指数由煤岩的力学性质决定,直接影响围岩系统结构失稳的临界应力与临界阻力区的大小,开采过程中巷道实际应力越接近临界应力,发生冲击地压危险性就越高。需要指出的是式(2)给出的临界阻力区半径的理论计算公式并未考虑煤层卸压等措施的影响。实际条件下,冲击地压煤层巷道开挖后,通常采用煤体爆破卸压或大直径钻孔卸压,使支

承压压力发生改变,应力峰值向煤体深部转移,从而在煤层卸压区范围形成更大的阻力区。当实际应力大于或等于临界应力时,冲击地压发生与否,除了需要外界扰动外,还要看实际阻力区(塑性软化区)是否小于临界阻力区,如果小于临界阻力区,那么发生冲击危险的可能性很大,如果实际阻力区(塑性软化区)大于临界阻力区,即使是实际应力高于临界载荷也不一定发生冲击地压。这与“三因素”理论和应力控制理论的基本认知具有相似之处。此外,提高巷道支护应力,能够提高支护对围岩体系的控制作用,从而改善围岩受力状态,增加巷道冲击地压发生临界应力和临界阻力区,使支护-围岩系统不易达到冲击地压发生的临界应力条件。

2 基于临界应力指数法的冲击地压危险性评价方法

冲击危险性影响因素主要包括:采深、地质构造、煤层力学性能等地质因素以及开采方法、巷道布置、煤柱尺寸、巷道断面及支护等开采技术因素。由式(1),(2)可以看出冲击地压发生的本质因素可以归结为应力条件、冲击倾向性条件、支护条件及巷道几何属性等4类。因此,冲击地压危险性评价方法要有全局观,应在煤岩冲击倾向性的基础上,根据冲击地压发生机理,分析采矿地质条件和开采技术状况,确定受采矿影响的实际煤体应力,通过分析待评价采掘区域实际煤体应力状态与临界应力的比值以及巷道实际阻力区与临界阻力区的比值,判断可能发生冲击地压的危险等级。

2.1 临界应力指数法

如前所述,冲击地压发生与否,除了看实际应力与临界应力的比值,还应考虑实际阻力区深度(塑性软化区)是否小于临界阻力区深度,如果小于临界阻力区深度,那么发生冲击的可能性很大,如果实际阻力区深度(塑性软化区)大于临界阻力区深度,即使是实际应力高于临界应力也不一定发生冲击地压。因此,进行冲击危险性评价时,应同时考虑临界应力大小与临界阻力区深度2个指标与实际值的对比情况。式(3)给出了临界应力指数的计算方法。该方法结合理论与实际,综合考虑了煤层的实际应力环境、煤层冲击倾向性、巷道自身结构属性及实际围岩状态4个因素。

$$K_{cr} = \frac{P}{P_{cr}} \frac{R_{cr}}{R} \quad (3)$$

其中, K_{cr} 为临界应力指数; P 为待评价区域的实际应力; P_{cr} 为理论计算得到的临界应力; R_{cr} 为理论计

算得到的临界阻力区深度; R 为实际测量或类似条件下估算得到的待评价区域实际阻力区深度。根据钻屑法的基本原理,对于掘进工作面及回采巷道或硐室可采用钻屑法所测得钻屑量峰值位置距离巷道煤壁的距离。

由式(3)可以看出,当 $\frac{P}{P_{cr}} < 1, \frac{R_{cr}}{R} < 1$ 时,即实际应力小于临界应力,实际阻力区深度大于临界阻力区深度时,发生冲击地压的可能性很小;当 $\frac{P}{P_{cr}} > 1, \frac{R_{cr}}{R} > 1$ 时,即实际应力大于临界应力、实际阻力区深度小于临界阻力区深度时,发生冲击地压的可能性很高;当 $\frac{P}{P_{cr}} > 1, \frac{R_{cr}}{R} < 1$, 而 $K_{cr} < 1$ 时,即实际应力大于临界应力,但是实际阻力区深度远大于临界阻力区深度,发生冲击地压的可能性较低,此时发生冲击地压需要更高的应力条件或扰动强度,这合理的解释了软煤弱冲击倾向性条件下,实际应力大于理论计算的临界应力并未发生冲击地压,其原因是软煤条件下巷道周围的阻力区深度远大于理论计算的临界阻力区深度,所以冲击地压很难发生,只有当实际应力高到一定程度,在强扰动下才有可能发生冲击地压,例如红阳三矿千米深井软煤冲击地压问题。当 $\frac{P}{P_{cr}} > 1, \frac{R_{cr}}{R} < 1$, 但 $K_{cr} > 1$ 时,即实际应力大于临界应力,但实际阻力区深度大于临界阻力区深度,随着开采条件的变化实际应力继续增加或是顶板断裂等动载荷的瞬间叠加,就可能发生冲击地压;当 $\frac{P}{P_{cr}} < 1, \frac{R_{cr}}{R} > 1$, 而 $K_{cr} < 1$ 时,即实际应力低于临界应力,实际阻力区深度与临界阻力区深度较接近时,发生冲击地压的可能性较低;在具有强冲击倾向性的硬煤条件下,当 $\frac{P}{P_{cr}} < 1, \frac{R_{cr}}{R} > 1$, 而 $K_{cr} > 1$ 时,即实际应力小于临界应力,实际阻力区小于临界阻力区时,虽然发生冲击地压的可能性较低,但是在不当的采掘条件下造成实际应力增加到一定程度或是突然的强动载扰动仍然会发生冲击地压,如山西担水沟煤矿发生的冲击地压事故。

2.2 冲击危险等级及指标的确定

临界应力指数的大小表征了在给定条件下发生冲击地压的可能性,但还无法给出具体的冲击危险等级及等级划分指标。大量的实践案例表明:不同矿区、不同地质条件下冲击地压发生的临界应力指数也不同,因此在确定冲击危险等级时应结合矿井或是煤层的具体条件综合考虑。对于已经发生过冲击地压

的矿井或煤层,根据历次冲击地压发生的情况,包括冲击地压发生的位置,构造及开采条件、应力集中程度等,参考文献[7]按照应力叠加法,初步估算各次冲击地压发生的近似实际应力,结合发生位置的巷道断面尺寸、支护形式及实际的阻力区大小等按照式(1)~(3)给出的公式计算出与待评价区域条件相似,已发生过的冲击地压事故对应的临界应力指数作为冲击地压发生指标 K_{fer} 。若待评价区域的煤层未发生过冲击地压,可采用工程类比法,参照类似工程条件下,具有相同冲击倾向性、发生过冲击地压的煤层的冲击地压发生指标 K_{fer} 。

确定冲击地压发生指标后,进行临界应力指数法的冲击危险等级分类。根据文献[18]的研究结果发现冲击地压发生的危险性与煤岩体受载的应力水平呈近似线性关系,本文将 $\frac{R_{cr}}{R}$ 视为对 $\frac{P}{P_{cr}}$ 的修正因子,参考综合指数法等其他评价方法^[5-6,18-20],把临界应力指数在 $[0, K_{fer}]$ 区间以 $0.25K_{fer}$ 为间隔,划分为4个数值区间,由低到高分别对应无冲击危险、弱冲击危险、中等冲击危险和强冲击危险4个危险等级,然后依据临界应力指数在4个区间的分布情况判定待评价区域的危险等级,即当 $0 < K_{cr} < 0.25K_{fer}$ 时评价为无冲击危险;当 $0.25K_{fer} \leq K_{cr} < 0.5K_{fer}$ 时评价为弱冲击危险;当 $0.5K_{fer} \leq K_{cr} < 0.75K_{fer}$ 时评价为中等冲击危险;当 $K_{cr} \geq 0.75K_{fer}$ 时评价为强冲击危险,见表1。该指标在具体实际工程应用中,可进一步根据实际冲击地压显现情况或监测数据分析结果进一步优化调整。

表1 基于临界应力指数法的冲击危险等级分类

Table 1 Classification of rock burst hazard grades based on critical stress index method

冲击危险等级	临界应力指数 K_{cr} 取值区间
无冲击危险	$0 < K_{cr} < 0.25K_{fer}$
弱冲击危险	$0.25K_{fer} \leq K_{cr} < 0.5K_{fer}$
中等冲击危险	$0.5K_{fer} \leq K_{cr} < 0.75K_{fer}$
强冲击危险	$K_{cr} \geq 0.75K_{fer}$

2.3 冲击危险性评价流程

采用临界应力指数法进行冲击地压危险性的具体评价流程如图2所示。

(1)按照国家标准 GB/T 25217.2—2010 在实验室内测试煤体单轴抗压强度与冲击能指数。

(2)依据待评价区域巷道支护形式与支护参数计算支护应力。

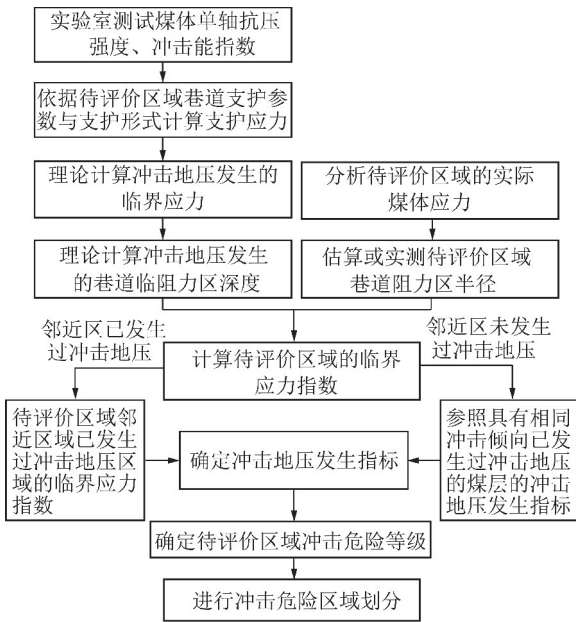


图 2 基于临界应力指数法的冲击地压危险性评价流程

Fig. 2 Hazard evaluation process of rock burst based on critical stress index method

(3) 按照式(1)计算冲击地压发生的临界应力。

(4) 按照式(2)计算冲击地压发生的巷道临界阻力区深度。

(5) 估算或实测待评价区域巷道实际阻力区深度。

(6) 按式(3)计算待评价区域邻近区域已发生过冲击地压区域的临界应力指数 K_{cr} ，作为冲击地压发生指标 K_{fer} ，若待评价区域的煤层未发生过冲击地压，可参照具有相同冲击倾向性、发生过冲击地压的煤层的冲击地压发生指标 K_{fer} 。

(7) 确定待评价区域冲击危险等级及分类标准。

(8) 分析待评价区域的实际煤体应力。对于煤层及采区的区域冲击危险性评价，首先依据地应力测

试结果，根据煤层或采区的地质条件，考虑断层、褶曲、煤层厚度变化、采空区分布等进行地应力反演，得出煤层或采区的煤体应力分布云图，然后提取应力云图各个点的应力值作为煤层或采区的实际应力。对于采掘工作面冲击危险性评价，实际应力在地应力测试的基础上考虑邻近煤层遗留煤柱、临近采空区、区段煤柱、巷道交叉影响等开采条件引起的采动应力增量，参考文献[5,7]按照应力叠加原则只取各个因素引起的应力增量与地应力之和计算某一点的实际应力。

(9) 按照式(3)计算待评价区域的临界应力指数。

(10) 将待评价区域的临界应力指数与冲击危险等级及分类标准进行对照，确定待评价区域的冲击危险等级以及进行冲击危险等级划分。

3 临界应力指数法评价巷道冲击危险性的应用

3.1 工程概况

某矿 303 工作面为正在回采工作面，回风巷长度为 2 854 m，回风巷长度为 2 911 m，开切眼长度为 240 m，回采煤层厚度平均为 7.0 m，煤层倾角平均为 13° ，工作面为实体煤工作面，其采掘工程平面图如图 3 所示。回风巷和运输巷均为矩形断面，宽度为 5.4 m，高 3.5 m，巷道采用锚杆+锚索+金属网支护，支护参数见表 2。根据该矿煤层冲击倾向性鉴定结果，取煤样单轴抗压强度均值为 10.17 MPa，冲击能量指数均值为 0.84。煤层顶板粉砂岩、泥岩岩组，抗压强度为 30~60 MPa，底板为中、细砂岩岩组为主，抗压强度为 40~60 MPa。经计算，工作面顶板岩层厚度特征参数为 82.1。

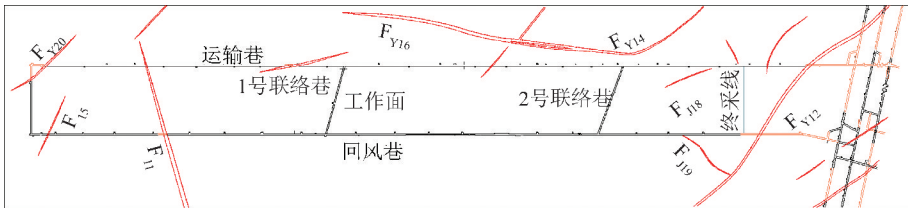


图 3 303 工作面采掘工程平面

Fig. 3 Plane view of 303 working face

表 2 巷道支护参数

Table 2 Support parameters of roadway

支护材料	排距/m	间距/m	支护力/kN
锚杆	1	0.8	180
锚索	1	2.0	450

3.2 评价流程及结果

采用临界应力指数法的评价方法对 303 工作面回风巷和运输巷回采过程中的冲击危险性进行评价，具体步骤如下：

(1) 取煤层的单轴抗压强度均值为 10.17 MPa，冲击能指数为 0.84。

(2)按照巷道支护参数计算支护应力。取巷道单位走向长度计算,则计算范围内有7根锚杆、3根锚索,由此计算支护应力 $p_s = \frac{F}{S}$

$$\frac{7 \times 180 \text{ kN} + 3 \times 450 \text{ kN}}{1 \text{ m} \times 5.4 \text{ m}} = 0.48 \text{ MPa}。$$

(3)计算冲击地压发生的临界应力 $P_{cr} = 13.24 \text{ MPa}。$

(4)计算冲击地压发生的巷道临阻力区深度。取巷道形状变异系数 $n = 1.5$,巷道半径 $a = 2.7 \text{ m}$,代入煤层单轴抗压强度与冲击能指数计算得到, $R_{cr} = 1.5 \times 2.7 \text{ m} \times \sqrt{1 + \frac{1}{0.84} \left(1 + 2 \frac{0.48 \text{ MPa}}{10.17 \text{ MPa}} \right)} \approx 6.0 \text{ m}。$

(5)采用钻屑法实测303工作面运输巷与回风巷阻力区半径 R 均为 $15 \text{ m}。$

(6)按式(3)计算待评价区域邻近区域已发生过冲击地压区域的临界应力指数 K_{cr} ,作为冲击地压发生指标 K_{fer} 。该矿历次冲击地压发生位置及应力情况见表3。鉴于301工作面与本工作相邻,开采与地质条件相似,因此取301工作面发生冲击地压时的临界应力作为发生指标。

表3 历次冲击地压发生位置及应力情况

Table 3 Location of rock burst and its stress estimation in the coal mine

埋深/m	自重应力/MPa	应力集中系数	近似实际应力/MPa	发生位置
870	21.75	受巷道群、断层影响取1.4	28.28	采区上下及联络巷
940	23.63	超前支承压力影响取1.5	35.45	301工作超前影响范围
1 070	26.75	双掘进工作面支承压力取1.4	37.45	实体煤掘进巷道

则冲击地压发生指标为

$$K_{fer} = \frac{P}{P_{cr}} \frac{R_{cr}}{R} = \frac{35.45 \text{ MPa}}{13.24 \text{ MPa}} \times \frac{6 \text{ m}}{15 \text{ m}} = 1.07$$

(7)确定待评价区域冲击危险等级,见表4。

表4 303工作面临界应力指数法的冲击危险等级分类

Table 4 Classification of rock burst hazard of 303 working face based on critical stress index method

冲击危险等级	临界应力指数 K_{cr} 取值区间
无冲击危险	$0 < K_{cr} < 0.27$
弱冲击危险	$0.27 \leq K_{cr} < 0.54$
中等冲击危险	$0.54 \leq K_{cr} < 0.8$
强冲击危险	$K_{cr} \geq 0.8$

(8)参考文献[5]分析待评价区域的实际煤体应

力,限于篇幅原因,仅以303工作面回风巷为例(运输巷与此类似),给出煤体实际应力计算过程与结果,如下:

①上覆岩层自重应力。

303工作面回风巷剖面图如图4所示。

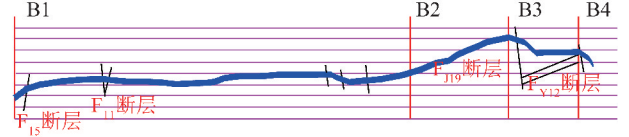


图4 303工作面回风巷剖面

Fig. 4 Sectional drawing of track tunnel of 303 working face

可将303工作面回风巷分为3阶段,见表5(以B1点为原点)。

表5 303工作面回风巷赋存情况

Table 5 Occurrence of the track tunnel of 303 working face

阶段	距离/m	埋深/m	自重应力/MPa
B1-B2	2 008.45	1 015.8(平均)	25.40
B2-B3	494.50	1 015.8~980.7	25.40~24.52
B3-B4	351.07	980.7~997.2	24.52~24.93

经计算得到回风巷各阶段自重应力为

$$[25.4 \quad (0 \leq x < 2\,008.45)]$$

$$\sigma_{zg} = \begin{cases} -0.0018x + 28.974 & (2\,008.45 \leq x < 2\,502.95) \\ [0.0012x + 21.597 \quad (2\,502.95 \leq x < 2\,854)] & (4) \end{cases}$$

②断层构造应力。

303工作面回风巷主要断层及具体参数见表6。对于断层构造处,煤岩体应力以构造应力为主,在断层附近形成应力升高区。文献[7]对断层上盘应力分布状态进行分析,则断层上盘附近应力状态可用下列分段函数表示:

$$P_y = \begin{cases} \frac{2(k-1)\gamma h}{L}x + \gamma h & (0 < x \leq L/2) \\ \frac{2(1-k)\gamma h}{L}x + (2k-1)\gamma h & (L/2 < x < L) \\ \gamma h & (x \geq L) \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_y 为断层上盘附近的应力; k 为应力集中系数; γ 为岩层容重; h 为埋深; L 为应力峰值点距离断层面的距离。

根据式(5)断层附近应力分段函数以及表6断层落差与应力集中系数和影响范围的关系,得到303工作面回风巷4个断层的应力分布分段函数如下(以B1为坐标原点):

表 6 303 工作面回风巷断层产状参数

Table 6 Parameters of the geological faults in the track tunnel of 303 working face

断层名称	倾角/(°)	落差 H/m	影响程度	应力集中系数 k	单侧影响范围/m
F ₁₅	65	3	较大	1.2	100
F _{J19}	60~65	3.2~3.5	较大	1.2	100
F ₁₁	42	6	较大	1.2	100
F _{Y12}	42~60	25	较大	1.4	100

$$P_{F15} = \begin{cases} 0.1016x + 29.464 & (0 \leq x < 10) \\ -0.1016x + 31.496 & (10 \leq x < 50) \\ 0.1016x + 19.304 & (50 \leq x < 100) \\ -0.1016x + 41.656 & (100 \leq x < 150) \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{F11} = \begin{cases} 0.102x - 12.192 & (370 \leq x < 420) \\ -0.102x + 73.152 & (420 \leq x < 470) \\ 0.102x - 22.352 & (470 \leq x < 520) \\ -0.102x + 83.312 & (520 \leq x < 570) \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{FJ19} = \begin{cases} 0.069x - 133.394 & (2300 \leq x < 2370) \\ -0.156x + 399.91 & (2370 \leq x < 2402) \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{FY12} = \begin{cases} 0.199x - 468.784 & (2476 \leq x < 2526) \\ -0.196x + 529.13 & (2526 \leq x < 2576) \\ 0.199x - 488.41 & (2576 \leq x < 2626) \\ -0.197x + 551.4 & (2626 \leq x < 2676) \end{cases} \quad (9)$$

③ 基本顶初次来压时煤体应力分布。

工作面回采过程中,上覆岩层逐渐往下垮落,工作面在 0~240 m 初始推采过程中,取基本顶来压时的应力集中系数为 1.6。基本顶初次来压的影响范围和程度可表示为

$$P_{cg} = 1.6\sigma_{zg} \quad (0 \leq x \leq 240) \quad (10)$$

④ 工作面见方时煤体应力分布。

303 工作面斜长约 240 m,工作面第 1 次见方对工作面回采巷道的影 响最大,影响范围约 150 m,其中,见方位置前 70 m,见方位置后 80 m,因此当工作面回采到 170~320 m 时,为工作面见方期。覆岩空间结构运动易造成工作面来压,并诱发两侧顺槽附近区域发生冲击地压。工作面初次见方时的影响范围和程度可表示为

$$P_{qg} = 1.7P_{zg} \quad (170 \leq x \leq 320) \quad (11)$$

⑤ 工作面过联络巷时煤体应力分布。

当工作面推采到联络巷前方一定距离时,联络巷、运输巷、回风巷与推采线构成一个“孤岛”,采空区上覆岩层重量转移到“孤岛”上,造成“孤岛”应力

高度集中,容易诱发冲击地压。根据该矿类似条件的 301 工作面,取工作面前影响范围约 110 m,工作面过联络巷时的应力集中系数为 1.7。工作面过联络巷时的影响范围和程度表示为

$$P_{lg2} = 1.7P_{zg} \quad (928 \leq x \leq 1038) \quad (12)$$

$$P_{lg1} = 1.7P_{zg} \quad (1890 \leq x \leq 2000) \quad (13)$$

式(4)和式(6)~(13)即为回风巷各影响因素实际应力函数。

(9)计算待评价区域的临界应力指数 K_{cr} 。由式(3)结合步骤(8)得到的回风巷各影响因素应力函数与临界应力指数分布规律。同理,可以得到运输巷的临界应力指数分布规律。

(10)将回风巷和运输巷的临界应力指数与表 4 给出的冲击危险等级及分类标准进行对照,确定回风巷和运输巷各区域的冲击危险等级,将冲击危险区域绘制在 303 工作面采掘工程平面图上,如图 5 所示。值得说明的是:当强冲击危险区域与弱冲击危险区域相间时,考虑安全因素,同时也便于冲击地压危险区域的统一管理,若弱冲击危险区域小于 100,则将其定为强冲击危险区域。

3.3 评价结果验证与对比分析

(1) 评价结果验证

工作面两巷掘进期间,采用钻屑法监测巷道冲击危险性。强冲击危险区域,单孔钻屑量最大值在 9~11 kg/m,峰值位置距离煤壁 13~16 m,且打钻过程中频繁出现卡钻、顶钻、钻杆跳动等动力现象;中等危险区域,单孔钻屑量最大值在 7~9 kg/m,峰值位置距离煤壁 12~15 m,打钻过程中偶尔存在卡钻、顶钻等动力现象。不同危险区域的最大钻屑量及其距离煤壁位置与打钻时的动力现象明显不同,这证实了临界应力指数法评价冲击危险性的合理性。

初采初放期间,该工作面以强冲击危险等级的评价结果为导向,严格落实各项冲击地压防治措施。在巷道顶板每单位走向长度增加 4 根 $\phi 21.6$ mm, L7 300 mm 高强预应力锚索,巷道超前 150 m 范围内采用双排单元支架支护,经计算加强支护后巷道支护

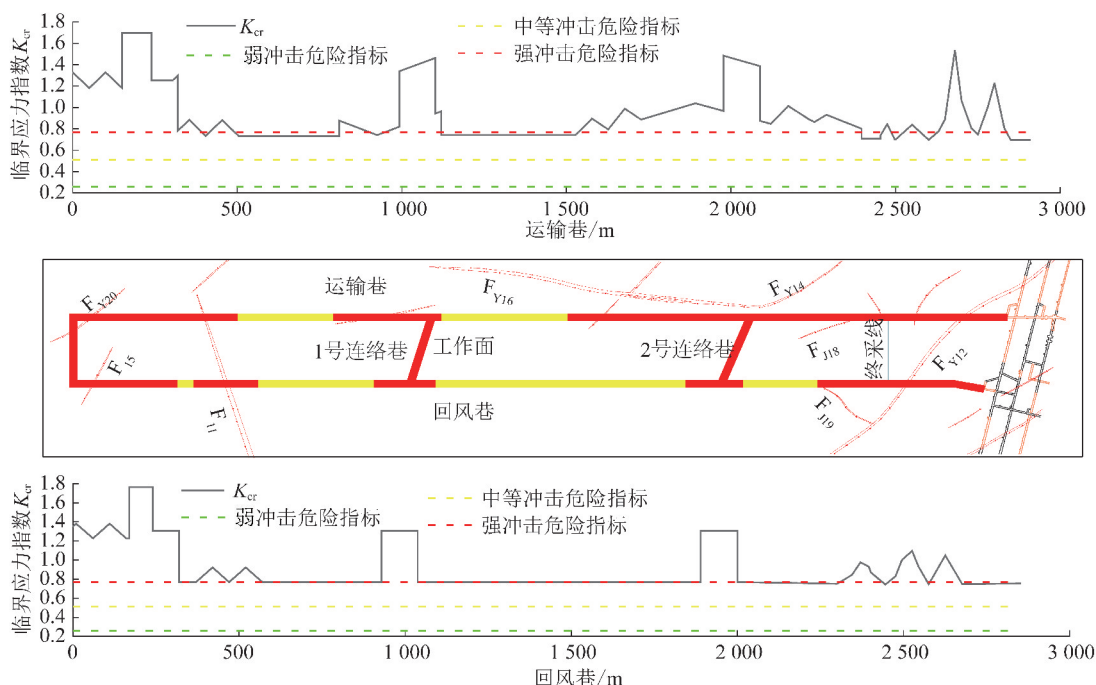


图5 基于应力指数法的303工作面冲击危险区域划分结果

Fig. 5 Rockburst hazard zones around the 303 working face based on critical stress index method

应力为 1.87 MPa。卸压钻孔直径 150 m, 间距 1.0 m, 孔深 30 m, 单排布置。按照式(1)计算加强支护后的临界应力为 23.18 MPa, 取巷道卸压后的实际阻力区深度为 30 m, 按照式(3)计算出临界应力指数为 0.3, 即采取防冲措施后评价区域冲击危险等级降为弱冲击危险。自 2019 年 10 月至 12 月, 303 工作面累计推采 84.5 m, 工作面已完成基本顶的初次来压。期间, 该工作面影响区域内共监测到大于 10 J 的微震能量事件次数 2 099 次, 微震频次较均匀, 仅在来压期间出现 5 次大于 10^4 J 的微震事件, 最大能量为 7.8×10^4 J, 尚无单个大于 10^5 J 的大能量事件。钻屑法监测结果: 在孔深 10 ~ 15 m, 单孔钻屑量最大值在 4 ~ 5 kg/m, 无明显峰值位置, 打钻过程中极少出现卡钻、顶钻、钻杆跳动等动力现象。微震与钻屑数据表明工作面冲击危险性较低与采取防治措施后为评价结果相符。

(2) 评价结果与综合指数法对比

根据 303 工作面的地质条件分析, 主要影响因素为煤层埋深、煤体的冲击倾向性、构造应力、顶板岩层特征参数等。采用综合指数法确定在地质因素影响下的冲击地压危险性指数 $W_{11} = 0.71$, 具有中等冲击危险。

根据 303 工作面的开采技术条件分析, 主要影响因素为工作面的断层及掘进期间留设的底煤影响。在开采技术因素影响下的冲击地压危险性指数 $W_{12} = 0.41$, 具有弱冲击危险。

综上, 303 工作面冲击危险指数 $W_1 = \max\{W_{11}, W_{12}\} = 0.71$, 冲击危险等级评价为中等, 地质因素与开采技术因素相比, 起主要作用。可见, 综合指数法对该工作面冲击危险性评价结果是区域性的, 与综合指数法评价结果相比, 临界应力指数评价法的评价结果更趋于量化。

需要指出的是本文采用的临界应力指数法评价巷道冲击地压危险性, 是基于准静态条件得出的, 而对于一些低应力条件下强动载或是纯动载条件下的巷道冲击地压危险性评价的适应性还需进一步探讨。

4 结 论

(1) 基于“应力-围岩-支护”巷道冲击地压力学模型, 给出了临界应力指数计算方法, 提出通过对比分析巷道围岩实际应力与临界应力的比值, 结合巷道实际阻力区与临界阻力区的比值, 进行巷道冲击危险性评价。

(2) 以某矿 303 工作面案例, 介绍了具体的评价流程, 评价结果表明该工作面存在中等冲击危险区域 5 个, 强冲击危险区域 7 个。

(3) 钻屑法监测数据表明评价结果与现场实际相符, 验证了临界应力指数法评价结果的合理性。与综合指数法评价结果对比, 临界应力指数法的评价结果更趋于量化。

参考文献 (References):

[1] 潘一山. 煤矿冲击地压[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 486-522.

- [2] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等. 我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.
 QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: Establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [3] WEI Chunchen, ZHANG Chengguo, CANBULAT Ismet, et al. Evaluation of current coal burst control techniques and development of a coal burst management framework [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 129-143.
- [4] 齐庆新, 窦林名. 冲击矿压理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [5] 窦林名, 何学秋. 煤矿冲击矿压的分级预测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 717-722.
 DOU Linming, HE Xueqiu. Technique of classification forecasting rock burst in coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(6): 717-722.
- [6] 窦林名, 牟宗龙, 贺虎, 等. 一种冲击矿压的综合指数评估方法: 中国, CN103362551A [P]. 2013-10-23.
- [7] 张宏伟, 荣海, 陈建强. 等. 近直立特厚煤层冲击地压的地质动力条件评价[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(6): 1053-1060.
 ZHANG Hongwei, RONG Hai, CHEN Jianqiang, et al. Geo-dynamic condition evaluation method for rockburst in suberect and extremely thinnk coal seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(6): 1053-1060.
- [8] 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.
- [9] 姜福兴, 冯宇, 刘晔. 采场回采前冲击危险性动态评估方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2101-2106.
 JIANG Fuxing, FENG Yu, LIU Ye. Dynamic evaluation method for rockburst risk before stopping [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2101-2106.
- [10] 曹安业, 王常彬, 窦林名, 等. 临近断层孤岛面开采动力显现机理与震动波 CT 动态预警 [J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 411-417.
 CAO Anye, WANG Changbin, DOU Linming, et al. Dynamic manifestation mechanism of mining on the island coalface along fault and dynamic pre-warning of seismic waves with seismic tomography [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 411-417.
- [11] 蔡武, 窦林名, 李振雷, 等. 矿震震动波速度层析成像评估冲击危险的验证[J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 252-262.
 CAI Wu, DOU Linming, LI Zhenlei, et al. Verification of passive seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment [J]. Chinese journal of Geophysics, 2016, 59(1): 252-262.
- [12] CAO Anye, DOU Linming, CAI Wu, et al. Case study of seismic hazard assessment in underground coal mining using passive tomography [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 78: 1-9.
- [13] 陈凡, 曹安业, 窦林名, 等. 基于区域划分与主控因素辨识的冲击危险性评价方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 607-615.
 CHEN Fan, CAO Anye, DOU Linming, et al. The method of coal burst hazard assessment based on region division and identification of main impact factors [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 607-615.
- [14] 姜福兴, 刘懿, 翟明华, 等. 基于应力与围岩分类的冲击地压危险性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1041-1052.
 JIANG Fuxing, LIU Yi, ZHAI Minghua, et al. Evaluation of rock burst hazard based on the classification of stress and surrounding rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1041-1052.
- [15] 刘少虹, 潘俊锋, 王洪涛, 等. 基于冲击启动过程的近场围岩冲击危险性电磁波 CT 评估方法 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 384-396.
 LIU Shaohong, PAN Junfeng, WANG Hongtao, et al. Electromagnetic wave CT evaluation method for rock burst hazard in nearfield based on rock burst start-up process [J]. Journal of China Society, 2019, 44(2): 384-396.
- [16] 刘少虹, 潘俊锋, 王洪涛, 等. 基于地震波和电磁波 CT 联合探测的采掘巷道冲击危险性评价方法 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 2980-2991.
 LIU Shaohong, PAN Junfeng, WANG Hongtao, et al. Assessment of rock burst risk in roadway based on the combination of seismic and electromagnetic wave CT technology [J]. Journal of China Society, 2018, 43(11): 2980-2991.
- [17] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2091-2098.
 PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2091-2098.
- [18] 刘少虹, 潘俊锋, 王洪涛, 等. 基于冲击启动过程的近场围岩冲击危险性电磁波 CT 评估方法 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 384-396.
 LIU Shaohong, PAN Junfeng, WANG Hongtao, et al. Electromagnetic wave CT evaluation method for rock burst hazard in near field based on rock burst start-up process [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 384-396.
- [19] 窦林名, 姜耀东, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载的“应力场-震动波场监测预警技术” [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 803-811.
 DOU Linming, JIANG Yaodong, CAO Anye, et al. Monitoring and pre-warning of rock burst hazard with technology of stress field and wave field in underground coalmines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 803-811.
- [20] 潘俊锋, 秦子晗, 王书文, 等. 冲击危险性分源权重综合评价方法 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2327-2335.
 PAN Junfeng, QIN Zihan, WANG Shuwen, et al. Preliminary study on early warning method based on weight comprehensive and differentload sources of coal bump [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2327-2335.