

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.02.24

矿井冲击危险性影响因素及其评价模型

李宝富^{1,2} 刘永磊²

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 哈密职业技术学院, 新疆 哈密 839000)

摘要: 煤岩体冲击倾向性和矿井冲击危险性研究是煤矿灾害防治领域重要研究课题之一。本文综合考虑煤岩体变形过程中的能量效应和时间效应,提出了有效冲击能量释放速度指数(W_{DT})的煤岩体冲击倾向性指标,在此基础上,利用多元统计分析方法,考虑有效冲击能量释放速度指数 W_{DT} 和煤层埋深 H 、上覆厚硬岩层影响系数 K 、应力集中系数 λ 四个因素,建立了矿井冲击危险性评价数学模型 $W_{ij}(X)$,数学模型把矿井冲击危险性分为强冲击、中等冲击和弱冲击3个危险等级。通过样品回判和待判样品判别结果验证了该数学模型的准确性和可操作性,研究结果可为相关决策人员提供技术指导和理论依据。

关键词: 冲击地压;有效冲击能量释放速度指数;多元统计分析;数学模型

中图分类号: TD324

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)02-0137-05

Influence factors and evaluation model of rock burst risk in coal mine

LI Baofu^{1,2} LIU Yonglei²

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;
2. Hami Vocational and Technical College, Hami, Xinjiang 839000, China)

Abstract: Coal rock burst tendency and shock risk has been one of important research issue in coal mine hazard control and prevention field. Combined with energy and time effects in deformation process of coal and rock, this paper put forward the effective impact energy release rate index (W_{DT}) as to assess the coal rock burst tendency. Besides, by means of above research and multivariate statistical analysis, the mine shock assessment mathematical model $W_{ij}(X)$ is established with the consideration of impact factors, such as effective impact energy release rate index (W_{DT}), coal seam occurrence H , ratio of overlying thick and hard strata K and stress concentration factor λ . Furthermore, the mathematical model classifies the mine shock risk as three levels that are strong shock, medium shock and weak shock. The judge result of samples proves the accuracy and operability of the mathematical model, and the research result could provide technical guidance and theoretical basis of relative decision makers.

Keywords: rock burst; effective impact energy release rate index; multivariate statistical analysis; mathematical model

0 引言

冲击地压是一个世界性的煤矿动力灾害,自从1738年英国南斯塔福煤田世界上第一次发生冲击地压后,德国、英国、前苏联、南非、波兰、加拿大以及中国

等二十多个国家和地区都有冲击地压现象的记录^[1]。中国是世界第一采煤大国,随着采深的增大,冲击地压灾害事故逐渐增多^[2]。仅2000年之后发生的重大伤亡事故40余起,伤亡几千余人。如三河尖煤矿2000年“4.17”冲击地压事故,使工作面材料道和降低材料

收稿日期: 2014-03-27; 修订日期: 2014-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1304517)

第一作者: 李宝富(1977-),男,河北秦皇岛人,硕士,讲师,从事矿山压力与岩层控制方面的研究工作。E-mail: libf@hpu.edu.cn

道超前 15 ~ 65 m 范围基本堵实,地面有明显震感,震级达 ML3.0^[3]。

中国自 20 世纪 70 年代末开始直面冲击地压问题,已经在冲击地压理论研究和卸压解危技术方面有了长足的进步^[4]。但冲击地压问题还远没有解决,最近几年冲击地压灾害的频繁发生更证明了这一点。冲击地压的发生从根本上来分析包括两方面的因素,即煤岩体的冲击倾向性和煤岩体中集聚的能量^[5]。

冲击地压的发生是一个过程问题,因此煤岩体冲击倾向性评价除考虑能量效应外,还应该综合考虑时间效应^[6]。煤岩体中集聚的有效冲击能量在较短的时间内以较快的速度得以释放,这样破坏的动态效应才强烈;反之,煤岩破坏过程中有效冲击能量在较长时间内缓慢释放,煤岩则不会发生较强烈的冲击式破坏。本文在综合考虑有效冲击能量和释放时间两个因素的基础上提出了有效冲击能量释放速度指数。

同时,矿井冲击危险性预测不能把冲击倾向性鉴定和煤岩体所处的采矿与地质条件分开。研究发现,即便冲击危险倾向较高的煤层在浅埋和简单地质条件下也难以发生冲击危险。因此论文以有效冲击能量释放速度指数作为主要因素之一,综合考虑煤层埋深 H 、上覆厚硬岩层影响系数 K 和应力集中系数 λ 四个因素,利用多元统计分析方法建立了冲击地压危险性预测数学模型,以期指导相关技术人员做出正确的决策。

1 有效冲击能量释放速度指数

1.1 数学表达式

综合考虑冲击能量效应和时间效应,笔者提出有效冲击能量释放指数的煤岩体冲击倾向性指标,定义为有效冲击能量与冲击时间的比值,其数学表达式为:

$$W_{DT} = (W - W_x) / DT \quad (1)$$

其中, W 指煤岩体中聚集的总能量; W_x 指煤岩体破坏过程中消耗的能量(包括煤岩体破坏消耗能量 W_p 、冲击产生的光、热和声能 W_z 以及煤岩体塑性变形所吸收的能量 W_s); DT 指动态破坏时间。 $W - W_x$ 即有效冲击能量 W_y , 它最大限度的表述了煤岩体破坏过程中能量转变和能量贮存的性质。

1.2 参数的获得

有效冲击能量和能量释放时间可通过煤岩体单轴压缩力学试验获得。

(1) 有效冲击能量 W_y 的获得

文献[7]中指出冲击能量为煤岩试件在单轴压缩状态下,应力应变全过程曲线中峰值前积蓄的变形能。但笔者认为该指标未考虑峰值前煤样塑性变形能的损耗,利用该指标作为煤层冲击倾向性的判别会造成结果偏高。

图 1 为煤样单轴压缩全程应力—应变曲线,其中峰值前积聚的变形能为 $W_{12} + W_{22}$ 部分, W_3 为峰值后耗损变形能。根据式(1)中参数概念,可知: W_{12} 对应煤岩体塑性变形所吸收的能量 W_s ; W_3 对应煤岩体破坏消耗能量 W_p 与冲击产生的光、热和声能 W_z 的和,即 $W_3 = W_p + W_z$; 那么 W_{22} 即为有效冲击能量 W_y 。因为 $W_{12} + W_{22}$ 和 W_3 容易求得,因此问题转变为如何合理估算煤样的峰值前塑性变形所消耗的能量 W_{12} 。

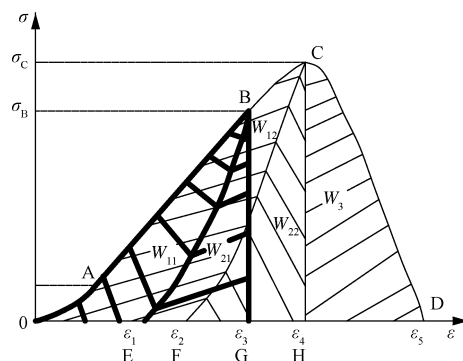


图 1 煤样单轴压缩全程应力—应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of coal sample uniaxial compressive tests

将图 1 中煤样单轴压缩全程应力—应变曲线进行以下两方面的合理简化和假设:①将加载曲线 OABC 简化为直线 OC,也就是假设峰值前的加载曲线以线弹性阶段为主;②煤样在峰值前弹塑性段卸载曲线简化为与原来塑性应变 ε_1 和 ε_2 相等的直线,且从 B 点和峰值点 C 点的卸载曲线 BE 和 CF 斜率相等,假设煤样在进入塑性阶段后,煤样产生的不可逆的塑性变形随应力和应变的增加而成正比增加。简化后的模型见图 2。

根据简化后的煤岩体单轴压缩全程应力—应变曲线,可得以下关系式:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_4 \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} \quad (2)$$

式中, ε_2 为煤样达到峰值应力时的塑性应变; ε_4 为煤样达到峰值应力时的总应变; ε_1 为煤样在峰值前应力达到 σ_B (平均破坏载荷的 75% ~ 85%) 时的塑性应变; ε_3 为应力为 σ_B 时的总应变。

根据式(2)求出峰值前的总塑性应变 ε_2 , 就可以

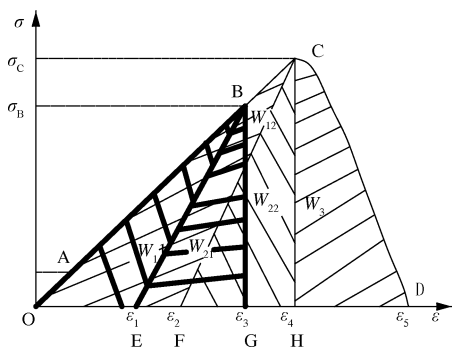


图 2 煤样塑性变形消耗能量计算模型
Fig. 2 Plastic deformation consumption energy computation model of coal sample

较准确的估算出峰值前煤样塑性变形消耗的能量 W_{12} , 即图 2 中曲线 OABCF 所包围的面积。

(2) 动态破坏时间 DT 的获得

动态破坏时间 DT 是指煤试件在单轴压缩状态下, 从极限强度到完全破坏所经历的时间, 单位 ms。可采用参考文献 [7] 中推荐的磁带记录仪测定系统测得。

2 矿井冲击危险性评价数学模型

2.1 影响因素分析及样品收集

冲击地压危险综合指数法把冲击地压影响因素分为地质因素和开采技术因素, 但从根本考虑冲击地压发生的原因可归结为煤岩体的冲击倾向性和煤岩体所处应力场的环境。因此论文综合考虑有效冲击能量释放速度指数 W_{DT} 和煤层埋深 H 、上覆厚硬岩层影响系数 K (岩层厚度与该岩层到煤层距离的比值)、应力集中系数 λ 四个因素, 利用多元统计分析方法建立了冲击地压危险性评价的数学模型, 收集的 10 组全国各矿发生冲击地压的已知样品参数如表 1 所示 [8-12]。

表 1 不同冲击地压危险性类型样品参数
Table 1 Sample Parameters of rock burst in varying degrees

序号	样品名称	W_{DT}	H/m	K	λ	冲击危险性
样品 1	华亭煤矿 2501 采区	26.32	700	5.0	3	强冲击
样品 2	三河尖煤矿 7110 材料道	18.05	609	10.0	4	强冲击
样品 3	义马跃进 25080 工作面	25.10	900	6.5	3.5	强冲击
样品 4	赵各庄 3237 工作面	30.22	1045	6.0	4	强冲击
样品 5	义马千秋煤矿 21201 下巷	22.45	800	5.5	4	强冲击
样品 6	三河尖煤矿 7204 材料道	18.49	750	7.0	2	中等冲击
样品 7	赵各庄煤矿 2337 工作面	16.11	845	4.0	3	中等冲击
样品 8	三河尖煤矿 7123 运输巷	8.80	568	3.5	2	弱冲击
样品 9	桃山煤矿 93 煤层	13.20	700	2.5	2.5	弱冲击
样品 10	济三煤矿 6303 工作面	14.15	610	3.0	2	弱冲击

2.2 数学模型建立

将表 1 中 10 组数据作为已知样品, 利用多个总体距离判别法, 建立冲击地压危险性线性判别函数, 运用判别函数对已发生冲击地压类型进行回判, 分析判别函数的准确可靠性, 从而确定出各种因素对冲击地压危险性影响的判别式, 建立起冲击地压危险性等级评定判别式 $W_{ij}(X)$:

$$W_{ij}(X) = \frac{1}{2} [D^2(X, G_j) - D^2(X, G_i)]$$

$$= [X - \frac{1}{2}(\mu^{(i)} + \mu^{(j)})]' \Sigma^{-1}(\mu^{(i)} - \mu^{(j)})$$

$$i, j = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

式中, $D^2(X, G_i)$ 和 $D^2(X, G_j)$ 分别为待判样品实测指标 $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$ 距不同冲击类型的总体 G_i 和 G_j 的距离; $\mu^{(i)}$ 、 $\mu^{(j)}$ 和 Σ 分别为总体 G_i 和 G_j 的均值向量和协差阵。相应的数学判别准则为:

当 $W_{ij}(X) > 0$, 对一切 $j \neq i, X \in G_i$; 若有某一个 $W_{ij}(X) = 0$, 待判。

表 1 中共有强、中等和弱冲击危险性 3 个总体, 各总体样品数量分别为 $n_1 = 5$ 、 $n_2 = 2$ 和 $n_3 = 3$, 每个样品指标个数 $P = 4$ 。

求得线性判别函数 $W_{ij}(X)$ 为:

$$W_{12}(X) = 4.418x_1 - 0.112x_2 + 1.148x_3 + 25.867x_4 - 89.316$$

$$W_{13}(X) = 5.54x_1 - 0.118x_2 + 3.111x_3 + 30.377x_4 - 120.436$$

$$W_{23}(X) = 1.123x_1 - 0.006x_2 + 1.963x_3 + 4.51x_4 - 31.121$$

该冲击危险性评价模型是在对 10 个不同冲击地压强度样品分析, 并综合考虑有效冲击能量和释放时间两个因素的基础上建立的, 可对具有潜在冲击危险的矿井或区域进行冲击危险性等级进行划分, 分为强冲击、中等冲击和弱冲击倾向性 3 个等级, 有助于矿井相关技术人员针对防冲减灾制定相应的措施。

2.3 冲击类型判别归类

分别将每个样品的 4 个指标代入判别函数 $W_{ij}(X)$, 利用判别准则对已知样品进行回判和待判样品进行判别归类: 若 $W_{ij}(X) > 0$, 则对一切 $j \neq i, X \in G_i$; 若 $W_{ij}(X) < 0$, 对一切 $j \neq i, X \in G_j$ 。以样品 1 为例, 其判别函数值 $W_{12}(X)$ 和 $W_{13}(X)$ 大于 0, 则判归为总体 1, 即强冲击危险; 而 $W_{23}(X) > 0$, 则判归为总体 2, 即中等冲击危险, 但 $W_{12}(X) > 0$, 表明样品 1 距总体 1 比总体 2 更近, 最终将样品 1 归为总体 1, 即具

有强冲击危险,其它样品同理,计算和判别结果见表 2。

表 2 判别函数判归类别结果
Table 2 Discriminant results by the discrimination function

序号	判别函数 $W_{12}(X)$ 值	判别函数 $W_{13}(X)$ 值	判别函数 $W_{23}(X)$ 值	原类别	判归类别
样品 1	31.96530	49.59	17.62	强	强
样品 2	37.22439	60.42	23.20	强	强
样品 3	18.85048	39.12	20.27	强	强
样品 4	37.60164	64.03	26.43	强	强
样品 5	30.11973	48.29	18.18	强	强
样品 6	-31.79070	-23.84	7.95	中等	中等
样品 7	-30.51390	-27.18	3.34	中等	中等
样品 8	-58.25000	-66.97	-8.72	弱	弱
样品 9	-41.79890	-46.07	-4.27	弱	弱
样品 10	-39.88990	-43.83	-3.94	弱	弱

由表 2 判别结果可知,10 个样品回判类别与原统计类别完全相同,表明冲击地压危险等级判别式 $W_{ij}(X)$ 准确可靠,同时验证了该数学模型的可操作性。

2.4 千秋煤矿 21141 工作面冲击危险性评价

千秋煤矿生产主要集中在 21 采区下山盘区,开采 2 号煤层,煤层标高 +65 ~ -300 m,开采深度约为 600 ~ 900 m。21141 综放工作面平均埋深 684 m,工作面掘进和回采期间冲击地压事件频发。

根据千秋煤矿地质资料和 21141 工作面 2 号煤层煤样冲击倾向性测试试验,得出有效冲击能量释放速度指数计算结果及相关参数,并根据冲击危险性评价数学模型对其进行判别,结果见表 3。

由冲击危险性评价数学模型判别结果可看出 21141 工作面 2 号煤层具有强冲击倾向性,与现场实际情况相一致,表明该评价模型对于冲击地压的预测预报具有准确可靠性。

表 3 21141 工作面 2 号煤层判别结果
Table 3 Discriminant results of 2# coal seam with 21141 work face

W_{DT}	H/m	K	λ	$W_{12}(X)$ 值	$W_{13}(X)$ 值	$W_{23}(X)$ 值	判归类别
29.43	785	2.0	2.75	26.28	39.87	13.59	强冲击

3 结论

(1)冲击地压是制约我国煤矿向深部开采的重大难题之一,冲击地压危险性评价需要综合考虑煤岩体的冲击倾向性和其所处的应力场环境,而煤岩体的冲击倾向性需要综合考虑能量效应和时间效应。

(2)建立了有效冲击能量释放速度指数的煤岩体冲击倾向评价指标 W_{DT} 。

(3)利用多元统计分析方法建立了冲击地压危险性评价的数学模型,该数学模型在综合考虑有效冲击能量和释放时间两个因素的条件下,针对具有冲击倾向性的矿井或区域进行冲击危险性划分,有助于防冲减灾措施决策。

参考文献:

[1] 方新秋, 窦林名, 柳俊仓, 等. 大采深条带开采坚硬顶板工作面冲击地压治理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5): 602-606.
FANG Xinqiu, DOU Linming, LIU Juncang, et al. Manage of rock burst in mine with great mining depth partial extraction and strong roof face [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(5): 602-606.

[2] 唐治, 潘一山, 李忠华, 等. 深部强冲击地压易发矿区厚煤层开采解放层卸压效果数值模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 128-132.
TANG Zhi, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Numerical simulation on destressing effects of the deep thick coal seam with high burst liability after mining liberated seams [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1): 128-132.

[3] 窦林名, 曹胜根, 刘贞堂, 等. 三河尖煤矿坚硬顶板对冲击地压的影响分析[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 388-392.
DOU Linming, CAO Shengen, LIU Zhentang, et al. Influence of key roof on rock burst in Sanhejian mine [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 388-392.

[4] 高明仕. 冲击地压巷道围岩稳定性控制研究进展及展望[A]: 煤炭开采新理论与新技术论文集[C]. 中国煤炭学会开采专业委员会, 2012: 185-193.
GAO Mingshi. Rock-burst roadway surrounding rock stability control research progress and prospects: symposium of coal mining in new theory and new technology [C]. Mining Professional Committee of China Coal Society, 2012: 185-193.

[5] 窦林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 冲击地压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5): 690-694.
DOU Linming, LU Caiping, MOU Zonglong, et al. Intensity weakening theory for rock-burst and its

- application[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(5):690-694.
- [6] 潘一山,耿琳,李忠华. 煤层冲击倾向性与危险性评价指标研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12):1975-1978.
- PAN Yishan, GENG Lin, LI Zhonghua. Research on evaluation indices for impact tendency and danger of coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12):1975-1978.
- [7] MT/T 174-1987 煤层冲击倾向性分类及指数的测定方法[S].
- MT/T 174-1987 Classification and laboratory test method on bursting liability of coal[S].
- [8] 张志镇,高峰,许爱斌,等. 冲击地压危险性的集对分析评价模型[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3):379-384.
- ZHANG Zhizhen, GAO Feng, XU Aibin, et al. Model for estimating rock burst risk in a coal mine based on set pair analysis[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3):379-384.
- [9] 陆菜平,窦林名,吴兴荣. 煤炭动力灾害的弱化控制机理及其实践[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3):301-305.
- LU Caiping, DOU Linming, WU Xingrong. Controlled weakening mechanism of dynamic catastrophe of coal and rock and its practice[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(3):301-305.
- [10] 张玉亮,徐元强,李俊,等. 华亭煤矿冲击地压监测及防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(9):20-24.
- ZHANG Yuliang, XU Yuanqiang, LI Jun, et al. Monitoring and measuring of mine pressure bumping and prevention and control technology in Huating Mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(9):20-24.
- [11] 刘文岗,姜耀东,单晓云,等. 赵各庄矿深部巷道冲击地压诱发因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(11):60-66.
- LIU Wengang, JIANG Yaodong, SHAN Xiaoyun, et al. Analysis on induced factors of pressure bump occurred in deep mine roadway of Zhaogezhuang Mine[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(11):60-66.
- [12] 赵玉林,毛卫民,刘晓斐,等. 桃山煤矿薄煤层开采冲击地压预测与防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(6):6-9.
- ZHAO Yulin, MAO Weimin, LIU Xiao fei, et al. Prediction and prevention technology of mine pressure bumping in thin seam mining of Taoshan Mine[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(6):6-9.

会议报道:2015 年地质灾害与防治战略学术论坛

2015 年 4 月 25 日至 27 日,以“城市化与地质灾害防治”为主题的地质灾害与防治战略学术论坛在甘肃省兰州市举办。本次论坛由中国地质学会地质灾害研究分会、兰州大学、甘肃省国土资源厅、兰州市人民政府、甘肃省地质矿产勘查开发局主办,兰州大学西部环境教育部重点实验室、兰州大学资源环境学院、长安大学、甘肃省地质环境监测院、兰州市国土资源局承办。

与会代表现场考察了碧桂园开发性建设与地质灾害综合防治工程情况、徐家湾项目现场、北环路特大型滑坡灾害情况。兰州是我国地质灾害最为严重的省会城市,围绕兰州市城市建设规划、兰州市城市建设与地质灾害防治主题,专家学者结合现场考察兰州市开发性建设与地质灾害综合防治工程、旧城改造与地质灾害防治工程,开展了兰州城市建设与地质灾害问题及防治对策的讨论。

王思敬、汤中立、卢耀如、郑颖人、陈祖煜两院院士,就地质灾害与防治更好地服务于城市化建设,城市化建设必须以地质环境安全为保障,共同推动防灾减灾科技进步等内容开展深入研讨与现场交流。

(本刊编辑部)