

# 矿井冲击地压信息识别与预报方法的研究进展

顾士坦<sup>1</sup>,王春秋<sup>1</sup>,顾士彬<sup>1,2</sup>,谭云亮<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510; 2. 济宁阳城煤矿, 山东 济宁 272502)

**摘要:**随着煤炭工业的快速发展,煤矿采深逐年加大,矿井冲击地压对煤炭工业安全生产的威胁越来越严重,研究冲击地压监测前兆信息识别与预测方法对于防治矿井自然灾害具有重要意义。对冲击地压的发生机理、传统局部监测、现代地球物理系统区域监测方法与信息识别、预报等进行了总结,展望了今后的研究热点与方向。

**关键词:**冲击地压;信息识别;预报方法;研究进展

中图分类号:TD324.2

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)02-0009-05

## Study Progress on Identification and Prediction of Rock Burst Information in Mines

GU Shitan<sup>1</sup>, WANG Chunqiu<sup>1</sup>, GU Shibin<sup>1,2</sup>, TAN Yunliang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Ministry of Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China; 2. Yangcheng Coal Mine of Jining, Jining, Shandong 272502, China)

**Abstract:** Along with the rapid development of coal industry, coal mining activities have deepened year by year and the mine rock burst is imposing an increasingly serious threat on safe production in coal industry, so, the research on information identification and prediction method of rock burst monitoring for preventing the mine disasters are of great significance. The authors summarized the occurrence mechanism of rock bursts, the traditional local monitoring, the regional monitoring methods with modern geophysical system and, the information identification and forecasting, etc. and also pointed out the research thrusts and directions.

**Key words:** rock burst; information identification; prediction method; study progress

煤炭是我国的主要能源,在我国能源结构中占有70%左右的份额。在煤炭生产过程中要与很多自然灾害作斗争,冲击地压就是较为普遍又十分严重的矿井自然灾害之一。它以突然、急剧、猛烈的形式释放煤岩体变形能,抛出煤岩体,造成支架损坏、片帮冒顶、人员伤亡,并产生巨大的响声和岩体震动。到2010年,我国发生冲击地压的矿井已达80多个。我国煤矿开采深度以每年约10m的深度不断增加,冲击地压灾害将越来越严重。冲击地压已成为制约我国矿山生产安全的主要灾害之一<sup>[1-2]</sup>。

目前,国内能进行冲击地压灾害监测的矿井只有部分国有大中型煤矿,数量上也非常有限。同时,监测预警的装备少,手段单一,预测准确率低,预测预报技术很不完善。要防治与减少冲击地压灾害,必须深入研究其发展的机理,深刻了解其发生的条件,并对监测数据信息进行准确地识别、预警与监测,然后有的放矢地采取防治措施。因此,开展煤矿冲击地压监测预报基础研究,保障煤炭工业安全生产,具有重要的理论意义与现场应用价值。

## 1 冲击地压的研究现状

强度较高的煤(岩)层,构造运动和开采形成的高度应力集中是冲击地压发生的根本原因。若没有采取

收稿日期:2011-01-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(“973”计划)子课题(2010CB226805);中国博士后科学基金项目(20100471561)。

作者简介:顾士坦(1978—),男,山东济宁人,讲师,博士,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。E-mail:tsgst@163.com.

释放应力和能量的措施,在高应力集中部位进行采掘工程,将有可能发生冲击地压。冲击地压共有的显现特征为突发性、瞬时震动性及破坏性。我国煤矿冲击地压的突出特点为多类型、条件复杂、随采深增加发展趋势严重等。

### 1.1 冲击地压机理研究的现状

冲击地压是岩石动力学的重大难题之一,对于冲击地压发生机理的认识,各国学者在对冲击地压现场调查及实验室研究的基础上从不同角度相继提出了一系列的重要理论,如强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向性理论、三准则理论和失稳理论等<sup>[1]</sup>。20 世纪 70 年代末,林天键将 Thom 创立的突变论引入岩石力学后,潘岳<sup>[3]</sup>、尹光志等<sup>[4]</sup>建立了岩体结构失稳的突变模型,对围岩压力、刚度和煤岩损伤扩展耗散能量进行分析,定性地解释了发生冲击地压的机理。目前,多采用尖角突变模型,建立岩体的势函数,分析分叉集,得出突变判据。突变理论发展了刚度理论和强度理论,但离解决实际问题还有一定距离。谢和平院士<sup>[5]</sup>将分形几何引入冲击地压的研究,形成了冲击地压分形特征与机理的相关理论。齐庆新等<sup>[6]</sup>在研究冲击地压的发生与煤岩体摩擦滑动破坏的关系时提出了“三因素”理论,该理论将岩体的内在因素、力源因素和结构因素作为导致冲击地压发生的最主要因素。认为岩体破坏是滑动破坏,其滑动形式分为稳定性滑动和粘性滑动两种。岩层受力过程中的瞬时粘滑过程,是岩层满足剪切强度准则的突然滑动并在滑动过程中伴有变形能释放的动力过程。裴广文、纪洪广<sup>[7]</sup>根据深部开采过程中构造型冲击地压的发生规律,提出并建立了“开采扰动势”概念,对冲击地压的能量特征与开采量、开采深度及开采活动距控制性构造的位置之间的定量关系进行了分析。

### 1.2 冲击地压信息识别与预测预报方法的研究现状

#### 1.2.1 冲击地压信息识别与监测方法的研究现状

基于对冲击地压机理的认识,目前冲击地压的预测预报是围绕冲击地压发生的强度理论和能量条件进行的,预测方法除了以往的经验类比法外,大致还有两类:①传统的局部监测方法,以钻屑法为基础,包括煤岩体变形观察(顶板动态、围岩变形)、煤岩体应力测量等<sup>[1]</sup>,主要用于监测采、掘工作面局部区段的冲击危险程度;②区域系统监测方法,包括声发射、微震系统、电磁辐射监测等采矿地球物理方法,根据连续记录煤岩体内出现的动力现象,预测冲击地压危险状态。

钻屑法是通过在煤层中钻小直径钻孔(直径 42~50 mm),根据钻孔时在不同深度排出的煤粉量及其变化规律以及有关动力现象判断冲击危险的一种方法<sup>[1]</sup>。在煤体中打钻至一定深度后,钻孔周围煤体将逐渐达到极限应力状态,如图 1 所示。孔壁部分煤体可能突然挤入孔内,并伴有不同程度的响声和微冲击;煤层中的应力愈大,煤的脆性破碎愈占优势,煤体钻孔力学模型如图 2 所示,基于钻孔应力增量、钻屑量及钻孔过程动力现象等定量、定性指标对冲击危险区域进行预测<sup>[8]</sup>。钻屑法是局部小范围的定性监测,需要工程经验去评价监测结果,这也是该方法现场应用的局限性。

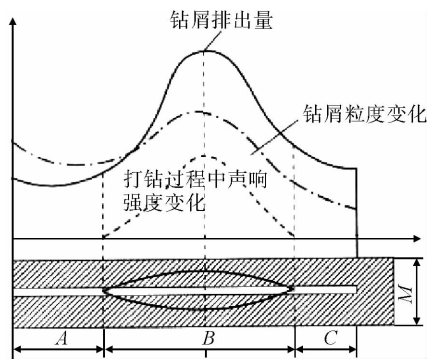


图 1 钻孔效应示意图

Fig. 1 Drilling effect schemes

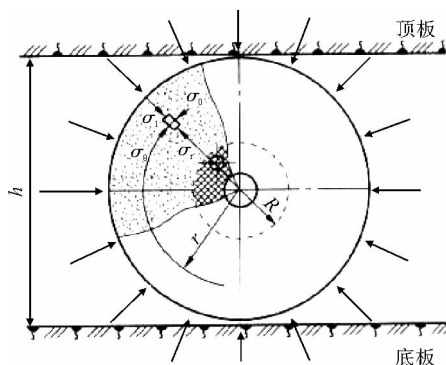


图 2 钻孔力学模型图

Fig. 2 Drilling mechanics model

在声发射冲击地压监测预报方面,煤炭科学研究总院重庆分院、西安分院研制成功了声发射系统。随着

大容量、高性能计算机系统的引入和声接收技术的发展,用声发射技术进行冲击地压预测可望取得重要突破<sup>[8]</sup>。在岩石声发射规律、冲击地压岩层破裂发展规律与现场监测应用等方面取得了一系列成果<sup>[9-12]</sup>,对推动冲击地压的区域性监测预警起到了积极促进作用。

在电磁辐射冲击地压监测预报方面,基于物理试验、电磁学和煤岩的细观力学,研究煤岩流变过程中产生电磁辐射的原理,结合加载煤岩体破坏过程中的电磁辐射规律,成功研制出非接触电磁辐射监测仪并在煤矿现场冲击地压监测中的应用<sup>[13-14]</sup>。

目前,微地震监测的研究是冲击地压监测预警的热点之一,国外微震冲击地压监测应用主要集中在顶板垮落时的微震前兆信息<sup>[15]</sup>、硬岩矿井冲击地压前兆的微震事件<sup>[16]</sup>等方面。国内,冲击地压微震监测研究主要集中在准确定位上覆顶板破断位置及形式、微震波的传播特征、不同地质因素条件下的微震信息识别、煤体的破裂形态及其与应力场分布的关系、不同影响因素导致冲击微震事件的分布特征与力学机理等方面<sup>[17-23]</sup>。

冲击地压的声发射、电磁辐射与微震监测各有优势,但应用单一监测手段获取的冲击地压前兆信息往往不够准确,这也是矿井冲击地压灾害监测预警技术发展缓慢的一个重要原因。

在多手段监测前兆信息及其他分析手段方面,基于红外热像、声发射、应变等监测手段<sup>[24]</sup>,对比研究煤样单体及煤、岩组合体失稳破坏,不同加载条件下的声发射、红外热像的前兆信息是下一步煤矿冲击地压监测发展的一个方向。

### 1.2.2 冲击地压预测预警方法的研究现状

窦林名等<sup>[25-26]</sup>通过加载煤体的声电试验,提出了临界值法与动态趋势法相结合的冲击地压预警方法。Frid等<sup>[27]</sup>利用电磁辐射以及微声发射监测顶板的垮落过程,发现顶板垮落前超过1h监测到异常高频的电磁辐射信号,较低频微声发射信号提供了明显的时间优势,可据此进行预警。Lurka<sup>[28]</sup>利用层析成像技术研究了长壁工作面顶板破断的冲击地压危险性及其危险区域,发现P波波速与区域的矿震危险性呈正相关。李洪<sup>[29]</sup>以冲击煤层的大量实测信息为基础,提出了冲击地压混沌性预测模型及模式识别方法。Unander<sup>[30]</sup>从理论方面研究了声发射测量中 $b$ 值的衰减作用, $b$ 值随耗散增加而减小,也随着声源强度增加而减小,在空间声源分布里介质的各向异性是 $b$ 值变化的主要原因。在前兆信息识别等方面,潘一山等<sup>[31]</sup>提出了在一定的尺度内预测预报冲击地压发生的方法。谭云亮、潘立友等<sup>[32-33]</sup>通过试验、数值模拟与现场实测等方法,研究了冲击地压前兆信息的识别理论与方法。

冲击地压预测预警方法与技术方面的研究,在很大程度上是基于某一种监测手段获取的监测结果而进行的,由于单一监测手段的监测结果带有片面性,不能够较全面准确地反应矿井深部岩体的失稳断裂发展规律,因而其预测预警也就不能较好地反应工程实际情况,预测预警结果与工程实际有较大的差距。

## 2 矿井冲击地压信息识别与预报方法存在的问题

总体看来,对于冲击地压机理、信息识别与监测方法及预测预警等方面的研究,已经积累了一定的研究成果,但还远远没有实现对冲击地压机理正确认识、有效监测与及时有效治理的程度。对于我国煤矿生产现实情况来讲,特别是对于深井构造复杂条件下的煤矿生产,冲击地压的发生往往带有突发性和巨大破坏性,给煤矿安全生产带来巨大的生命、财产损失,冲击地压已经成为制约我国煤炭工业安全高效生产的严重瓶颈问题。

随着煤矿开采深度的逐年增加与各种复杂构造煤层的影响,矿井冲击地压前兆信息的表现形式也趋于多样化,由于煤岩冲击地压的随机性和破坏形式的多样性,单一研究其中的一种监测数据信息及其前兆模式识别、预警的思路可能会有较大的偏差,不能够较准确地监测冲击地压的前兆信息并采取有效措施,在很大程度上制约着我国煤炭工业的安全高效生产。

## 3 冲击地压信息识别与预报方法的研究展望

基于目前我国煤矿深部生产冲击地压监测预警与防治的现实问题,需要综合考虑利用分析以钻屑法、支

(架)柱压力、岩层离层等为基础的局部监测法与声发射、微震等地球物理系统监测方法获取的监测数据与前兆信息,也就是将上述多种监测方法有机结合进行综合监测与综合数据识别,进行冲击地压灾害危险区域监测预报与局部预报相结合,早期预报与及时预报相结合、传统监测方法与现代地球物理监测方法相结合的综合监测预警研究。综合数据监测与综合前兆信息识别是今后冲击地压预测预警的重点研究方向,具体的研究工作主要围绕以下几个方面:

1)煤岩体试样岩石力学实验室室内试验的声发射、微震等现代地球物理综合前兆信息识别。如实验室室内研究小尺寸(标准试样)条件下的煤岩试样在各种荷载下的声发射、微震等的前兆信息发展变化规律,室内试验条件可以人为设定,以满足不同工况下的试验条件。

2)煤矿生产现场冲击地压声发射、微震等现代地球物理监测综合前兆信息识别与预警研究。即在煤矿现场生产实践过程中进行冲击地压声发射、微震监测的现场试验(实测)研究,多渠道捕捉煤岩体冲击地压发生前的各种前兆信息,实现对各种前兆信息的准确识别并在此基础上研究确定相应的预警机制与方法。

3)煤矿现场钻屑法与支(架)柱压力、岩层离层监测等的综合前兆信息识别与预警机制研究。综合采用钻屑法、支护阻力与岩层离层等传统的监测方法,获取煤、岩层冲击的前兆信息,充分运用矿压理论与技术,对前兆信息进行准确有效识别并及时预警,该方法在实现常规矿压监测的同时,基本不需太多人力、财力投入即可实现对冲击地压的监测,综合前兆信息的准确识别与正确运用是下一步的研究重点。

4)煤矿现场局部钻屑监测与声发射、微震等现代地球物理监测综合前兆信息识别研究。以声发射、微震等为代表的冲击地压现代地球物理区域性监测手段可实现整个采区乃至整个矿井的冲击前兆信息监测,而且是一种无损监测,具有明显的优势;局部冲击危险强烈区域采用钻屑法加强监测。准确获取监测信息并综合正确处理运用多种前兆信息对于煤矿较大区域的冲击地压监测预警意义重大。

5)支(架)柱压力、岩层离层监测与声发射、微震等现代地球物理监测综合前兆信息识别研究。常规支(架)柱压力、岩层离层矿压监测手段与声发射、微震等冲击地压现代地球物理监测有机结合,在实现对常规矿压监测目的的同时,与声发射、微震等获取的前兆信息综合处理运用,将更有利于矿井冲击地压准确及时预测预警。

6)深井冲击地压危险性分级与冲击地压危险性评价方法和技术研究。矿井冲击地压不同危险程度的科学界定与合理分级标准、冲击危险性的评价方法与技术是冲击地压监测、预警、防治研究工作的基础,也是下一步冲击地压研究工作的重点方向。

#### 参考文献:

- [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.
- [2]潘一山, 李忠华. 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. Study on rock burst distribution, types, mechanism and prevention in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [3]潘岳. 矿井断层冲击地压的折叠突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 43-48.  
PAN Yue. Cusp catastrophe model of mine fault rock burst folding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 43-48.
- [4]尹光志. 岩石微裂纹演化的分叉混沌与自组织特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 635-639.  
YIN Guangzhi. Evolution of bifurcate chaos and self-organized characteristic of rock micro cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 635-639.
- [5]XIE H. Fractal character and mechanism of rock bursts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(40): 343-350.
- [6]齐庆新, 史元伟, 刘天泉. 冲击矿压粘滑失稳机制的实验研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(2): 144-148.  
QI Qingxin, SHI Yuanwei, LIU Tianquan. Experiment study of rock-burst stick-slip instability mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(2): 144-148.
- [7]裴广文, 纪洪广. 深部开采过程中构造型冲击地压的能量级别预测[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(7): 48-51.  
PEI Guangwen, JI Hongguang. Energy level forecasting of deep mining process tectonic type rock burst[J]. Coal Science and

Technology,2002,30(7):48-51.

- [8]王平,姜福兴. 冲击地压的应力增量预报方法[J]. 煤炭学报,2010,35(S):5-9.  
WANG Ping,JIANG Fuxing. The stress incremental forecasting method of rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(S):5-9.
- [9]TANG C A. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression-part 1:effect of heterogeneity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2000,37(1):555-569.
- [10]TANG C A. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2000,37(2):655-659.
- [11]KOU S Q,TANG C A. Numerical simulation of the cutting of inhomogeneous rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999,36(4):711-717.
- [12]TANG C A. Coupled analysis of flow, stress and damage in rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999,36(2):352-356.
- [13]WANG E Y, HE X Q, NIE B H. Regularity of distribution of EMR in workings of coal mines[C]//First Mine Environment and Ventilation Symposium. Dhanbad, India, September,2000:129-135.
- [14]LIU Z T, HE X Q, WANG E Y. The fractal rule of AE during the deformation and fracture of coal or rock[J]. Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej,2000,2(46):561-568.
- [15]SHEN B, KING A, GUO H. Displacement, stress and seismicity in roadway roofs during mining-induced failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2007,45(5):672-688.
- [16]BRADY B, LEIGHTON F. Seismicity anomaly prior to a moderate rock burst:a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1977,14(3):127-132.
- [17]成云海,姜福兴,张兴民. 微震监测揭示的C型采场空间结构及应力场[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(1):102-107.  
CHENG Yunhai,JIANG Fuxing,ZHANG Xingmin. C stope space structure and stress field revealed by seismic monitoring [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(1):102-107.
- [18]姜福兴,宋广东. 微地震波在煤矿岩层中的传播特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2674-2679.  
JIANG Fuxing, SONG Guangdong. Research on spread characteristics of micro-seismic wave in mine strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(S1):2674-2679.
- [19]李全晓,姜福兴. 微震监测结果在矿图上的定位合成及应用[J]. 采矿与安全工程学报,2007,24(2):165-168.  
LI Quanzhao,JIANG Fuxing. Location synthesis of micro-seismic monitoring results on mining maps and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2007,24(2):165-168.
- [20]王存文,姜福兴. 煤柱诱发冲击地压的微震事件分布特征与力学机理[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1169-1173.  
WANG Cunwen,JIANG Fuxing. Microseismic events distribution characteristics and mechanical mechanisms of rock bursting induced by a coal pillar[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(9):1169-1173.
- [21]王存文,姜福兴. 基于覆岩空间结构理论的冲击地压预测技术及应用[J]. 煤炭学报,2009,34(2):150-155.  
WANG Cunwen,JIANG Fuxing. The forecasting method of rock-burst and the application based on overlying multi-strata spatial structure theory[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(2):150-155.
- [22]姜福兴,苗小虎. 构造控制型冲击地压的微地震监测预警研究与实践[J]. 煤炭学报,2010,35(6):899-902.  
JIANG Fuxing, MIAO Xiaohu. Predicting research and practice of tectonic-controlled coal burst by microseismic monitoring [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(6):899-902.
- [23]孔令海,姜福兴. 基于高精度微震监测的特厚煤层综放面支架围岩关系[J]. 岩土工程学报,2010,32(3):401-407.  
KONG Linghai,JIANG Fuxing. Relationship between support and strata in extra-thick coal seam fully-mechanized sublevel caving mining based on high precision microseismic monitoring technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(3):401-407.
- [24]赵毅鑫,姜耀东. 煤岩组合体变形破坏前兆信息的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(2):339-346.  
ZHAO Yixin,JIANG Yaodong. Experiment study on predictive information of coal rock assemblages deformation and failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(2):339-346.