

· 综述 · (22) 126-132

煤矿冲击地压理论与工程应用研究的进展

周晓军 鲜学福

TD324

(重庆大学资源及环境工程学院, 重庆, 400044; 第一作者 28 岁, 男, 博士生)

摘要 总结和论述了近几十年来国内外在研究煤岩体系发生冲击地压理论方面的进展, 探讨了在冲击机理方面研究的趋势, 并对国内外现今所采用的预测和防治措施进行了分析, 展望了今后在预测预报工作和防治措施研究及实践方面的发展方向。

关键词 冲击地压; 突变; 分形; 分叉; 混沌动力学; 预测预报

中国图书资料分类法分类号 TD324

0 引言

煤矿

煤矿冲击地压 (Rockburst, Pressure bump in collieries) 是指在一定条件的高地应力作用下, 井巷或回采工作面周围的煤岩体由于弹性能的瞬时释放而产生破坏的矿井动力现象, 常伴随有巨大的声响、煤岩体被抛向采掘空间和气浪等现象。它往往造成采掘空间中支护设备的破坏以及采掘空间的变形, 严重时造成人员伤亡和井巷的毁坏, 甚至引起地表塌陷而造成局部地震^[1~4]。

1 对国内外煤矿冲击地压灾害及其理论研究现状的评述

1.1 国内外煤矿冲击地压灾害评述

煤矿冲击地压和岩爆是一个世界性的灾害现象。从 1738 年英国的南史塔福煤田发生世界上第一次冲击地压以来, 已有 260 年的历史了。其间在世界上发生冲击地压的国家除我国外, 还有英国、波兰、法国、德国、俄罗斯、乌克兰、南非、美国、日本等 23 个国家和地区^[1,4~10]。

我国最早记录的冲击地压是 1933 年在抚顺胜利矿发生的。从 1933~1996 年的 60 多年间, 全国共有 36 个矿井累计发生过 4 000 余次破坏性的冲击地压, 造成 400 多人死亡, 200 多人受重伤, 破坏巷道 20 km 之多, 其经济损失十分严重。

1.2 冲击地压理论研究现状的评述

南非于 1915 年就建立了南非矿山冲击委员会, 对煤和金属矿的冲击地压进行研究^[6,7,9]。西德于 20 世纪 50 年代初就开始冲击地压的研究工作, 并且成功地采用了钻孔卸压

* 收文日期 1997-03-17

煤炭工业部、四川省科委共同资助项目

措施来防治煤矿井下发生的冲击地压^[7,9]。前苏联的全苏矿山测量科学研究所也制定了《有冲击地压危险煤层的矿井的采矿工程施工安全规程》^[9]。在美国主要采用的方法有煤层掏槽、钻孔卸压、卸压爆破和煤层注水等^[7,9]。

我国对冲击地压的研究是从 60 年代才开始的,主要是由一些有严重冲击地压的局矿在生产实践中加以探索。第一次比较系统地进行煤矿冲击地压的研究工作是由重庆大学和煤科总院重庆分院于 1978 年在天池煤矿进行的^[6]。全国性的煤矿冲击地压调研工作于 1985 年完成。此后,煤炭部于 1987 年颁布实施由煤科院北京开采所和阜新矿业学院联合起草的我国第一部《冲击地压煤层安全开采暂行规定》^[11]。通过广大科技工作者和研究人员的共同努力,已使我国对冲击地压机理和防治措施的研究有了较大的进展,其中煤体注水与深孔松动爆破方法相结合的综合防治措施以及冲击地压的非线性有限元数值模拟、煤岩体地应力场的测试和有限元计算分析、声发射技术、微震监测系统在防治冲击地压的研究与应用方面已达到国际先进水平。

对煤、岩体冲击地压和岩爆机理的研究,国内外曾提出了多种理论。按现代力学观点来看,主要有以下几种。

1.2.1 刚度理论

Cook 和 Hodgeim 于 60 年代提出当煤岩体受力屈服后的刚度 $|K_R|$ 大于顶底板和支架的刚度 $|K_C|$ 时,便发生冲击地压^[12]。而当 $|K_R| < |K_C|$ 时,煤岩体处于稳定状态,不发生任何冲击动力现象。

1.2.2 强度理论

强度理论是由 G. Bräner 提出的。该理论认为煤体处于顶底板的夹持之中,夹持特性决定了煤-围岩体系的力学特性。当煤体和围岩的交界处达到极限平衡条件时,煤体便失稳而发生冲击地压^[1,6,7,10,13,14]。

1.2.3 能量理论

Cook 等人在 60 年代对南非 15 年来冲击地压的防治情况总结后指出:当煤-围岩体系在其力学平衡状态遭破坏其所释放出的能量大于所消耗的能量时,就发生冲击地压。随后 Dunk House 给出了能量平衡的方程式,佩图霍夫对产生冲击地压的能量结构作了分析^[6~9]。

1.2.4 冲击倾向理论

针对不同的煤层,其发生冲击地压的强弱程度各不相同这一事实,国内外提出了煤、岩体的冲击倾向理论^[2,6,8,9,11,15~18]。该理论认为当煤岩体的冲击倾向度 K_E 大于它的临界值 K_C 时,便发生冲击地压。国内外已提出的以衡量煤岩体冲击倾向指标概括起来主要表现在煤岩体的能量、破坏时间、变形大小和刚度四个方面^[6~9,11]。

能量指标,弹性变形(应变)能指标 W_{ET} ;冲击能指标 W_{CF} ;有效冲击能指标 η_E ;弹性能量指标 P_{ES} ;

时间指标,动态破坏时间 ΔT ;

形变指标,弹性变形指标 D_E ;

刚度指标,脆性系数 K_B ;刚度比指标 K_{CF} 。

1.2.5 “三准则”理论

该理论是我国学者在总结了强度理论、能量理论和冲击倾向理论之后所提出来的^[1,7,8]。其基本观点是将上述三种理论结合起来,并且认为强度准则是煤岩体的破坏准则,

而能量准则和冲击倾向准则是煤岩体突然破坏准则,只有当三个准则同时满足时,才能发生冲击地压。

1.2.6 变形系统失稳理论

煤岩体变形系统失稳理论提出了煤岩体系统发生冲击地压的失稳判据,即^[6,9,19]

$$\delta\pi = 0 \quad \text{和} \quad \delta^2\pi < 0 \quad (1)$$

式中 π ——煤岩系统的总势能泛函; $\delta\pi$ ——总势能泛函 π 的变分。

它揭示了冲击地压是由于采掘空间中煤岩体结构稳定性不够而发生的失稳破坏过程。

1.2.7 突变理论

煤岩体的突变理论是从1972年Thom创立的突变论(Catastrophe Theory)而发展起来的一种较新的理论^[18~21]。该理论主要从建立煤岩体的尖点突变模型(Cusp model)出发,对影响煤岩体的主要控制因素,即顶底板压力、刚度和煤岩的损伤扩展耗散能量的定量分析,来定性地解释发生冲击地压的机理。

1.2.8 分形理论

该理论是利用分形几何学(Fractal Geometry)的方法来研究冲击地压发生的机理和预测预报手段,主要对冲击地压和岩爆的分形特征及微震活动的时空变化的分形特征进行了试验研究^[22,23]。这一理论目前的主要研究成果是,在冲击地压和岩爆发生时,微震活动均匀地分布在高应力区,这时分形维数值较高,而临近冲击地压发生时,微震活动集聚,其分形维数值较低,也即分形维数值随岩石微断裂的增多而减小,最低的分形维数值则出现在临近冲击地压发生时。

1.2.9 “三因素”理论

冲击地压的“三因素”理论^[1,24]认为冲击地压发生的过程是煤岩地层受力的瞬间粘滑过程,是煤岩层满足剪切强度准则以突然滑动并在滑动过程中伴随着动能释放的动力过程。由此而得到了“三因素”机理模型,即内在因素(煤岩的冲击倾向性)、力源因素(高度的应力集中或高变形的贮存与外部的动态扰动)和结构因素(具有软弱结构面和易于引起突变滑动的层状介面)是导致冲击地压发生的最主要因素。

2 对冲击地压理论研究的展望

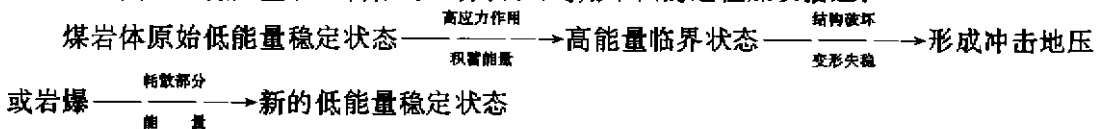
实际上,上述这些理论都是相互关联的,“三准则”理论是对强度理论、刚度理论和能量理论的综合;变形系统失稳理论是对强度、刚度和能量理论的更深入总结和发展,用这两种理论可以对冲击地压发生的条件进行数值模拟,但“三准则”理论不具备可操作性,变形系统失稳理论在必要条件上还不够具体;突变理论本质上也是对能量、强度和刚度理论的进一步发展,但对冲击地压发生的充要条件还解释不够;分形理论只是一种可预测性和相关性的研究尚未上升到机理上的认识;“三因素”理论不是独立的理论,它是冲击倾向理论和能量理论的综合与发展。总之,在目前的各种理论当中,强度、能量和冲击倾向理论是最根本性的理论,其余的均是这三种理论的总结和发展。

由于目前对煤、岩体在受外荷载作用下发生微观断裂和破坏的机理认识不深,同时也

对煤岩体内部微裂纹的扩展与冲击过程之间的关系还不明确,所以现今还未能确切地掌握冲击地压发生的机理。此外,煤岩体在外载荷作用下所发生的流变特性也是导致其发生破坏和形成冲击动力现象的一个主要影响因素。实际上,煤矿井下层状煤岩体受到集中应力的作用,在某一时期内,这种应力状态是相对稳定的,使煤岩体发生稳定蠕变,不会导致其破坏和形成冲击地压。而在另一时期,由于受采掘活动的影响改变了煤岩体的受力状态,使其发生非稳定或亚稳定蠕变,并经过一定时间的加速蠕变而失稳破坏形成冲击地压。因此,研究煤岩体发生的冲击地压也应当从煤岩体发生的流变特别是蠕变损伤这一角度来开展工作,况且国内外在这方面的研究并不多见。

近年来,虽然现代数学中的分叉理论(Bifurcation Theory)和混沌动力学(Chaotic Dynamics)已在生物、化工和其它学科领域当中得到广泛的应用,但用于研究和分析井下煤岩体发生冲击地压和岩爆这一动力现象的却不多见。煤岩体的断裂破坏可视为其内部微观裂纹扩展、分叉和失稳扩展的动态演化过程,裂纹分叉与失稳是紧密相关的,裂纹经过无限多次的分叉便导致整个系统的失稳,这种失稳可以比拟为一类非线性微分方程的倍周期分叉而出现的混沌运动现象。混沌的起点对应于裂纹失稳扩展的临界点,从而有可能分析出冲击地压和岩爆的混沌特征。既反映出冲击地压和岩爆的发生具有对初始条件(充分必要条件)的敏感依赖性,同时也应当具有在表现形式上的随机性和无序性,在无序中孕育着发生的周期性。可见,利用非线性分叉理论和混沌动力学来研究煤岩体发生的冲击地压和岩爆应当成为今后主要的攻关方向,也必将为预测预报探索新的途径,以便能对冲击地压和岩爆的机理认识有一个质的飞跃。

此外,煤矿冲击地压和岩爆现象是煤岩体系统在变形过程中的一个稳定态积蓄能量、非稳定态释放能量的非线性动力学过程(Nonlinear dynamic process),是其外部荷载环境、内部结构、构造及其物理力学性质的综合反映,这一性质可以视为是具有冲击倾向的煤岩体要尽可能保持其原始低能量状态属性的一种表现,可用下面的过程加以描述:



在这个动力学运动过程当中,最基本的现象就是煤岩体结构的破坏和稳定性的丧失。因此研究冲击地压和岩爆发生的机理与条件还应当从微观结构和宏观动力学的微分运动和混沌运动特性等诸方面开展工作。

3 对国内外煤矿冲击地压防治措施及预测预报研究现状的评述

3.1 冲击地压防治措施的基本原理

国内外学者共同的观点认为要防治煤矿冲击地压和岩土工程中的岩爆,必须从改变煤岩体的应力状态和它们本身的物理力学性质上着手。从能量的角度出发,煤岩体发生冲击的条件为

$$E_c + E_r \geq E_b + E_m + E_s + E_p \quad (2)$$

式中 E_c, E_r ——煤和岩体所释放出的形变势能;

- E_d ——破坏煤岩体所需的能量;
 E_m ——移动煤岩体所需的能量;
 E_e ——地震耗散的能量;
 E_a ——被破坏地点所吸收的能量。

众所周知,煤岩体所积蓄的形变势能 $E_{e,r}$ 是与其所受的应力大小及其物理力学性质有关,即

$$E_{e,r} = [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] / 2E \quad (3)$$

根据式(3)可知,要改变煤岩体的形变势能 $E_{e,r}$ 必须从改变其三向受力状态,即($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)出发,同时改变其物理力学性质,这就是国内外采取各种防治措施的基本原理。

3.2 冲击地压的防治措施

结合冲击地压发生的机理和防治措施的基本原理,国内外提出和实践了众多的防治煤岩体发生冲击地压和岩爆的措施^[4,6,8,11,15,18,25~30]。这些措施的实质就是利用各种技术途径,人为地改变煤岩体中的应力状态和其物理力学性质,进而达到防治冲击发生或减少发生的次数及强度的目的。

在波兰,主要利用煤层注水、震动爆破、卸压钻孔和松动爆破等方法来防治冲击地压^[8,9]。美国煤矿冲击地压的防治主要用煤层掏槽、卸压钻孔、卸压松爆和煤体注水等方法^[9]。德国采用的防治措施有开采保护层、煤层注水、钻孔卸压、卸载爆破等^[9]。其它如俄罗斯、英国、日本、法国等国家也基本上如此。煤层注水是我国最早采用的措施之一,此外还采用了在煤体中开槽卸压、诱导爆破和钻孔卸压等防治措施^[5,6,8,12,29]。但大多数矿井都是在结合本矿的技术和开采条件而采用综合的防治措施^[8,12]。目前国内外防治冲击地压的措施主要有煤岩体注水、钻孔卸压、深孔松动爆破、卸载诱导爆破、煤岩体掏槽卸压、顶板预断裂、巷道切槽卸压、加固软煤层、加强采掘支护、开采保护层、合理选择开采方法和安排采掘设计及工艺进度等。

相对而言,煤层注水是目前防治冲击地压行之有效的方法,在条件允许的情况下应优先采用。必须指出的是,综合防治措施的采用一般要根据本矿区煤层赋存的地质条件和现有的技术水平来确定。对矿区区域性冲击地压进行防治时,应当从合理安排采掘设计、选择合理的开采方法、开采保护层、顶底板处理和煤层预注水等方面考虑。而对局部性的冲击地压应以松动爆破、对煤岩体作开槽卸压、钻孔卸压、加固软分层等方面入手。建议在一般情况下,应先对煤层进行深孔松动爆破,再用已加润湿剂的水溶液对煤层作反复的间歇性的高压或静压注水,再辅以其它局部的解危措施。

3.3 冲击地压的预测预报

概括起来,预测预报煤岩体发生冲击地压或岩爆工作的方法可分为人工法和地球物理法两大类^[2,3,5,6,8,9,15,26~28,30,31]。

在人工预测法中常用的有钻屑量法、煤岩体冲击倾向性鉴定、顶板及围岩压力和位移变化观测法。地球物理预测法可靠性较高,其中声发射(AE)、微震监测、地应力及煤岩体应力监测和地电、地磁监测及地层层析成像分析是目前用来监测冲击地压或岩爆的重要方法,也是国内外今后开展预测预报工作的主要方向。

4 结 语

尽管世界各国对冲击地压的研究已有 80 多年的历史,并提出了众多的冲击地压机理模型和预测预报及防治措施,但这些机理模型都还只能是实际的一种近似,也只能从某一角度来解释冲击地压发生的机理。由于影响冲击地压和岩爆的因素复杂多样,从而导致冲击地压和岩爆的机理研究滞后于预测预报和防治工作。这表明机理模型的建立必须不断地与生产实际相结合,才能使其得到不断发展和完善。

要想从根本上解决冲击地压问题,需要研究和探索的问题还很多,首先对冲击地压和岩爆机理的深入研究是极为必要的。实际上也只有从机理研究入手,搞清楚煤岩体发生冲击地压和岩爆的内在机制,才能做到准确预测预报和防治,进而从根本上降低冲击地压的危害程度。其次,应当继续加强对冲击地压矿区地应力场、煤围岩体中原岩应力测量与数值计算方法的研究,以便能对整个矿区范围内煤岩体发生冲击的危险区域做出准确的划分。此外,还要加强对监测技术和新的探测设备的开发与研究工作,主要是针对局部地质异常区域、煤体支承压峰值影响区进行探测,掌握采掘工作面空间中煤围岩体的动态平衡状态,及时采取必要的防范措施,以破坏煤岩体发生冲击地压和岩爆的充要条件,达到安全生产的目的。

参 考 文 献

- 1 齐庆新. 层状煤岩体结构破坏的冲击矿压理论与实践研究(博士学位论文). 煤炭科学研究总院北京开采研究所, 1996. 23~38
- 2 佩图霍夫 И М. 突出和冲击地压危险煤层的开采. 煤炭工程师, 1984(5): 41~44
- 3 安志雄. 区域性冲击地压预测装置. 煤矿安全, 1994(6): 48~50
- 4 Kuksendo V.S. Inzhevatkin, Manzhikov. Physical and Methodical Principles of Rockburst Prediction. Soviet Mining Science, 1987, 11(23): 6~7
- 5 张万斌, 吴耀昆, 王淑坤. 中国煤矿冲击地压预测和防治研究. 矿山压力与顶板管理, 1990(1): 43~46
- 6 煤炭部冲击地压科技情报分站. 冲击地压机理研究与防治经验文集(全国冲击地压会议资料). 四川省德阳市天池煤矿, 1985, 11: 155~285
- 7 金立平. 冲击地压的发生条件及预测方法的研究(博士学位论文). 重庆大学, 1992. 2~28
- 8 赵本均, 滕学军. 冲击地压及其防治. 北京: 煤炭工业出版社, 1995. 428~436
- 9 冲击地压科技情报分站. 冲击地压译文集. 1985. 10~46
- 10 Romashov A N, Tsygankov S. Generalized model of rockbursts. Fiziko-Tekhnicheskie Problemy. Razrabotki Polezhykh Iskopaemykh, 1992(5): 29~33
- 11 煤炭工业部. 冲击地压煤层安全开采暂行规定. 1987(煤生字第 337 号文)
- 12 张万斌, 王淑坤, 滕学军. 我国冲击地压研究与防治的进展. 煤炭学报, 1992, 17(2): 29~35
- 13 周瑞忠. 岩爆发生的规律和断裂力学机理分析. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 111~117
- 14 Shemyaki, Kurlenya, Kulakov. Classification of Rock Burst. Soviet Mining Science, 1987, 7(22): 329~336
- 15 赵阳生. 矿山岩石流体力学. 北京: 煤炭工业出版社, 1994. 20~42
- 16 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值模拟计算. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197~204
- 17 JHA P C, Chovhan R. Long Range Rockburst Prediction: A Seismological Approach. Int. J. Rock Mech, 1994, 31(1): 71~77
- 18 Aitomatov I T, Kozhogulov K, Pugacheva T. The method of geomechanical analogues for predicting the rock-

- burst hazard of veined steeply-dipping deposits. Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razraotki Poleznykh Iskopuemyk, 1991(5):26~30
- 19 徐曾和,徐小荷,陈忠辉. 孤立煤柱岩爆的尖点突变与时间效应. 西部探矿工程,1996,8(4):1~5
 - 20 费鸿祿,徐小荷,唐春安. 地下硃室岩爆的突变理论研究. 煤炭学报,1995,20(1):29~33
 - 21 李玉,赵国景. 煤层突出的突变模式. 北京科学大学学报,1995,17(1):5~9
 - 22 谢和平,Pariseau W G. 岩爆的分形特征及机理. 岩石力学与工程学报,1993,12(1):28~37
 - 23 李玉,黄梅,廖国华. 冲击地压发生前微震活动时空变化的分形特征. 北京科技大学学报,1995,17(1):10~13
 - 24 齐庆新,刘天泉,史元伟. 冲击地压的摩擦滑动失稳机理. 矿山压力与顶板管理,1995(3,4):174~177
 - 25 李世龙. 浅谈冲击地压发生的主要因素及防治方法. 徐煤科技,1994(2):46~47
 - 26 梁冰,章梦涛. 采区冲击地压的数值预测. 矿山压力与顶板管理,1995(2):12~16
 - 27 齐庆新,李首滨,王淑坤. 地音监测技术及其在矿区监测中的应用研究. 煤炭学报,1994,19(3):221~231
 - 28 尹光志,鲜学福. 冲击地压的区域危险性预测. 重庆大学学报,1996,19(2):90~94
 - 29 张廷松. 湿润剂提高煤层注水效果的机理研究. 力学与实践,1995,17(3):54~57
 - 30 王维纯,段克信. 煤矿冲击地压的防治. 煤炭科学技术,1994,22(4):6~8
 - 31 张如官. 岩爆现象. 煤炭科学技术,1981(6):40~43

Research Advance on Rockburst Theory and Its Engineering Application in Collieries

Zhou xiao jun Xian Xue fu

(College of Resources and Environment Engineering, Chongqing University)

ABSTRACT This paper summarizes and describes the progress in coal-rockmass outburst theory in resent decades both at home and abroad, discusses the tendency of mechanism of rockburst, and gives a fullier review about the presently adopted prediction methods and preventive measures, simultaneously looks into the prospective development on the study of prediction and preventive measures and its practical applications.

KEYWORDS rockburst; catastrophe; fractal; bifurcation; chaotic dynamics; forecasting & prediction