

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201712071

煤矿断层错动型冲击地压研究现状与发展趋势

李 鹏^{1,2,3}, 蔡美峰^{1,2,3}, 郭奇峰^{1,2,3}, 鲁细根^{1,2,3}, 颜丙乾^{1,2,3}

(1.北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083;2.金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室(北京科技大学),
北京 100083;3.城市与地下空间工程北京市重点实验室(北京科技大学),北京 100083)

摘 要:为深入认识断层错动型冲击地压复杂的致灾机制、降低采矿过程中冲击事故的发生率,通过梳理国内外文献,系统总结和分析了国内外在断层错动型冲击地压方面的研究进展及成果.介绍了国内外一些矿山发生断层错动型冲击地压的严峻形势,并汇总了国内部分煤矿该类型冲击地压实例;从断层活化机制及其判别准则、断层错动型冲击地压理论、发生条件及其孕育过程等4个方面着重分析了断层错动型冲击地压的致灾机制;总结了断层错动型冲击地压的监测预警方法,并介绍了一些具有代表性的可用于断层错动型冲击地压预测预报的监测预警技术及其工程应用情况,包括断层错动型冲击地压监测预警与防治体系、BMS-II型微地震监测系统、多参量实时联合监测预警系统和深部钻孔应变观测技术;论述了断层错动型冲击地压防控技术,包括区域性防御措施和局部解危措施等;在分析以上问题的同时,又提出了一些新的理论观点、见解和建议.最后,指出了当前断层错动型冲击地压研究存在的一些不足,并对该类型冲击地压未来研究的发展趋势进行了多方面展望.

关键词:采矿工程;断层活化;断层错动型冲击地压;致灾机制;监测预警技术;防控技术

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)03-0001-17

Research situations and development tendencies of fault slip rockburst in coal mine

LI Peng^{1,2,3}, CAI Meifeng^{1,2,3}, GUO Qifeng^{1,2,3}, LU Xigen^{1,2,3}, YAN Bingqian^{1,2,3}

(1.School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines (University of Science and Technology Beijing),
Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering
(University of Science and Technology Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To understand the disaster-causing mechanism of fault slip rockburst and reduce incidence of rockburst during mining process, the research progress and achievements of the rockburst are summarized and analyzed by combing literatures at home and abroad. Firstly, severe situations and some cases of the rockburst are presented and analyzed. Secondly, the disaster-causing mechanism of the rockburst is analyzed from the mechanism and criteria of fault reactivation, fault slip rockburst theories, produced conditions and generation process of the rockburst. Thirdly, the monitoring and early warning methods of the rockburst are summarized, and the monitoring and controlling technology system of the rockburst, BMS-II type microseismic monitoring system, multi-parameter monitoring and early warning system, and deep borehole strain observation technology are presented. Fourthly, the preventing and controlling technologies for the rockburst are summarized, including regional defense measures and local relief measures. Finally, some shortcomings of the current research on the rockburst are pointed out, and the development tendencies of future research on the rockburst are prospected in many aspects.

Keywords: mining engineering; fault reactivation; fault slip rockburst; disaster-causing mechanism; monitoring and early warning technology; prevention and control technology

冲击地压是一种由采矿活动引发的动力学现象,是采矿开挖形成的扰动能量在煤岩体中聚集、演化和在一定诱因下突然释放的动力过程,已成为世

界性的采矿工程重大灾害之一.在冲击地压类型中,断层错动型冲击地压是其中典型的一类.断层错动型冲击地压,又称矿震,是由于采矿活动引起断层的突然相对错动而猛烈释放能量的现象^[1].断层错动型冲击地压是非常复杂的动力地质灾害现象,其影响因素众多,涉及到地质构造、断层性质、开采环境及地应力等多重因素作用,因而其致灾机制十分复杂,不同矿井的致灾机制也不尽相同.其特殊性在于断层带的强度一般弱于上下盘煤岩体,在开

收稿日期:2017-12-12

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0600801,2016YFC0600703);
中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-16-017A3)

作者简介:李 鹏(1987—),男,博士研究生;
蔡美峰(1943—),男,教授,博士生导师,中国工程院院士
通信作者:蔡美峰,caimeifeng@ustb.edu.cn

采扰动下易产生错动滑移。断层活化不仅能引起断层区域煤岩系统结构失稳而诱发冲击地压,同时还可能会衍生煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸、矿井突水等共(伴)生灾害。与其他类型冲击地压相比,断层错动型冲击地压具有释放能量多、震级高的特点,其破坏性更强、发生更突然且影响范围更大^[2-3],因而造成的人员伤亡、设备损坏及巷道破坏等情况也更加惨重,这已严重制约了煤炭资源的安全高效开采。

断层作为煤矿井下普遍存在的一种地质构造形态,是井下开采不可忽略的地质因素,对煤矿安全生产构成了巨大威胁。现场实践表明,断层构造带直接或间接地控制着采掘工作面冲击地压的发生,冲击地压的空间分布明显受控于区域内大的断裂构造。当采掘工作面临近断层时,工作面或巷道发生冲击地压的概率将明显增加^[4],尤其是在井下断裂带交叉的情况下,强冲击地压发生的概率更高。据统计,超过 70% 的冲击地压是发生在断裂构造带附近^[5]。例如,辽宁老虎台煤矿的断层错动型冲击地压灾害也较为严重,在每年发生的数百起冲击地压灾害中,有 90% 是发生在矿区断层和褶曲所切割的范围之内; -630 主副巷处于断层间的交叉部位,在不到 300m 区段内,就发生了多达 25 次震级在 2.0 级以上的冲击地压事故^[6]。辽宁龙凤煤矿曾发生过多次冲击地压事故,随机分析其发生的 50 次冲击地压事故的致灾原因时,发现有 36 次与断层的作用直接相关,如图 1 所示^[7]。

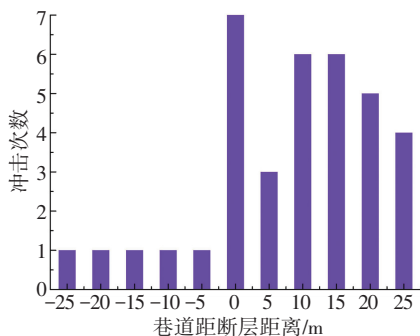


图 1 龙凤煤矿冲击地压发生频次与断层距离的关系^[7]

Fig.1 Relationship between rockburst frequency and fault distance in Longfeng coal mine^[7]

随着浅部资源逐渐枯竭,世界范围内的煤炭资源深部开采已进入常态化阶段。开采深度和开采强度不断增加的同时,断层错动型冲击地压矿井分布范围越来越广,其发生的频度和强度也在不断上升,危害性也日益突出。不同矿井的地质构造条件和开采环境等千差万别,加上断层构造区域复杂多变的应力场特征,也增加了断层错动型冲击地压问题研究的难度。解决煤炭开采过程中的断层错动型冲击

地压问题已成为国内外十分迫切的现实需求。近年来,国内外采矿界加大了对断层错动型冲击地压的研究力度,在断层活化机制、断层错动型冲击地压致灾机理、影响因素、演化规律、监测预警及安全防护技术等方面取得了一系列可喜的成绩,为该类灾害的基础理论研究及工程应用奠定了基础,但仍存在很多关键性科学难题亟待解决。本文通过查阅大量近年来公开发表的相关文献,系统总结和分析了有关断层错动型冲击地压多方面的研究进展,并对未来的研究发展趋势作出展望,以期能为今后该领域的研究提供参考。

1 断层错动型冲击地压实例

作为一种特定类型的冲击地压,断层错动型冲击地压在国内外很多矿山均有发生的记录。国际上,苏联的诺里尔矿冶公司 2 号矿井中在距断层面不远处的巷道内出现岩石剥落、弹射等冲击现象^[8]。美国的 Lucky Friday 矿床在开采深度 2 000 m 时的地质断裂构造十分复杂,断层活化导致该矿区多次发生震级为 2.0~4.0 级的冲击地压^[8]。加拿大的舒德布利镍铜矿在 1984 年期间发生了两次较大的冲击地压灾害,事故调查结果认为这两起冲击地压是由于岩体沿大断层的滑动引起的^[9]。南非的 Witwaterstand 金矿发生了千次以上震级达 5.0 级的断层错动型冲击地压^[10]。

在国内,由于中国比世界其他煤国的煤田地质构造条件要复杂得多,断层构造带广泛发育,多数冲击地压矿井位于断层活动带内^[11],因而煤矿断层错动型冲击地压灾害形势更加严峻。据不完全统计,河南、山东、辽宁、黑龙江、河北、北京等多个省(市)的一些矿井在生产中曾发生过断层错动型冲击地压灾害,最大震级超过了 4.0 级,造成了重大损失。以河南义马矿区为例,F16 大型逆冲断层是该矿区的主控断层,矿区内的千秋煤矿、跃进煤矿等多个矿井在采掘过程中受到 F16 断层活化的影响而发生了多次不同程度的冲击地压灾害,冲击地压一般都发生在 F16 断层附近(图 2)^[12]。其中,千秋煤矿在 2011 年 11 月 3 日发生的冲击地压震级达到了 4.1 级(能量为 3.5×10^8 J)^[13],这是目前国内记录到的震级最大的断层错动型冲击地压案例。图 3^[14]为跃进煤矿于 2010 年 8 月 11 日发生的断层错动型冲击地压事故,造成支架变形与破坏、巷道底鼓等严重问题。国内部分煤矿发生断层错动型冲击地压灾害的实例概况见表 1,此外,河北唐山矿、北京门头沟矿、吉林西安矿及黑龙江七台河桃山矿等矿井也发生过该类型冲击地压事故。

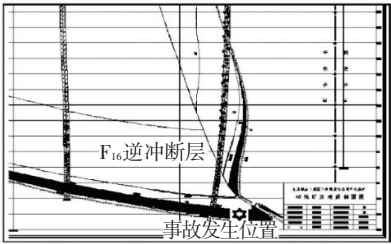


图 2 千秋矿断层错动型冲击地压发生位置^[12]

Fig.2 Location of fault slip rockburst in Qianqiu coal mine^[12]



(a) 巷道底鼓 (b) 支架变形破坏

图 3 跃进煤矿断层错动型冲击地压实例^[14]

Fig.3 Example of fault slip rockburst in Yuejin coal mine^[14]

表 1 中国部分煤矿断层错动型冲击地压实例

Tab.1 Examples of fault slip rockburst in China

煤矿名称	冲击发生时间	冲击发生位置	震级/能量	主控断层	破坏状况	备注
辽宁台吉煤矿	1977 年 6 月 28 日	—	3.8 级	—	约有 2 000 m ² 的范围破坏烈度达到 7 度,井下生产设施遭到严重破坏.	文献[8]
山东济三煤矿	2004 年 12 月 16 日	6303 工作面	强烈	SF28 断层	引发多次小规模冲击地压.	文献[15]
北京木城涧煤矿	2005 年 4 月 26 日	东一壁工作面	强烈	F3-1 和 F3-2 断层	造成人员伤亡,巷道多处片帮严重和堵塞.	文献[15]
辽宁孙家湾煤矿	2005 年	海州立井	强烈	—	引发瓦斯爆炸事故,造成 214 人死亡.	文献[16]
山东华丰煤矿	2006 年 9 月 9 日	1410 上平巷掘进头	2.2×10 ⁷ J	F9 断层	造成 2 人死亡,2 人重伤.	文献[17]
山东鲍店煤矿	2008 年 8 月 1 日	十采区 103 _上 02 工作面	强烈	XF-20 断层	顶板掉渣,煤尘飞扬.	文献[15]
辽宁老虎台煤矿	2009 年 2 月 11 日	55002 [#] 掘进面	2.1 级	F7-1 断层	造成顶底板收缩 0.4~0.8 m,棚搭接处收缩 0.3~0.9 m.	文献[18]
河南跃进煤矿	2010 年 8 月 11 日	25110 工作面下巷	2.7 级	F16 断层	造成 74 架防冲支架不同程度的损坏.	文献[7]
河南千秋煤矿	2011 年 11 月 3 日	21221 下平巷	4.1 级	F16 断层	造成 10 人遇难,60 余人受伤,部分巷道完全合拢.	文献[13]
黑龙江峻德煤矿	2013 年 3 月 15 日	三水平北层一段一分层	—	F1、F7 和 L1 断层	造成 4 人死亡.	文献[17]
山东星村煤矿	2013 年 8 月 5 日	3302 运输顺槽掘进面	4.4×10 ⁵ J	F22 断层	造成 4 人受伤,巷道遭到不同程度破坏.	文献[19]
山东古城煤矿	—	2106 工作面	—	F9 和 DF4 断层	造成巷道变形严重,部分地段巷道失稳.	文献[15]

国内外矿山断层错动型冲击地压灾害的破坏状况让人触目惊心,且近年来其在各类型冲击地压中所占的比例有上升的趋势. 由于断层错动型冲击地压问题极为复杂,国内外目前尚未建立比较符合实际的该类型灾害发生及破坏过程的理论,其预测预报及防控还不完备,因此,加强这些方面的研究已经刻不容缓.

2 断层错动型冲击地压研究

2.1 断层错动型冲击地压致灾机制研究

2.1.1 断层活化机制及其判别准则研究

断层活化是诱发断层错动型冲击地压的直接动因. 在煤矿开采过程中,由于开采扰动的影响,断层区域煤岩体内的应力状态发生变化,可能导致断层

的上、下盘因受力不平衡而发生活化,进而诱发冲击地压等动力灾害. 了解断层活化机制及其判别准则是认识和预防断层错动型冲击地压灾害的必要前提. 早期的断层活化理论或假说是基于地震学知识建立的^[20-25],这对认识断层的滑动行为具有很好的借鉴意义. 虽然采矿过程中的断层活化与天然地震中的断层活动本质上是一致的,但其影响因素是有差异的,前者主要是由于采矿活动的影响造成的,不是纯自然的地质现象. 因而,对采矿过程中断层的活化机制研究应以实际的工程条件为基础.

潘一山等^[1]较早开展了断层冲击地压的理论研究与试验研究,提出了断层活化的扰动响应准则,该准则从扰动位移与响应位移之间关系的角度较好地解释了断层活化机理,为采矿过程中断层活化机理研究奠定了基础. 王学滨等^[26]采用应变梯度塑性理论及能量准则,建立了断层岩爆的失稳判据的解析解,该判据与岩石材料的本构参数及岩石结构的几何尺寸有关. 陈法兵^[6]基于摩尔-库伦准则研究了断层活化机理,认为断层活化与超前支承压力、断层倾角、侧压系数和断层面内聚力有关. 吕进国等^[7]基于逆断层成因机理构建了由构造应力为主导的圆弧形断层面简化力学模型,进而建立了断层上盘逆冲滑动临界角度的数学模型,据此计算了煤层沿断层逆冲滑动的临界角度. 李振雷等^[27]以位于断层接触面上的一单位厚度的三角形微元体为研究对象,建立了断层区闭锁与解锁滑移的力学模型,认为当微元体所受的全反力位于断层摩擦角形成的锥形区域内时微元体稳定而形成闭锁,否则,微元体解锁并发生滑移. 蔡武^[10]提出了断层活化的动静载作用机理,认为断层附近发生微破裂的力学作用机制是静载作用下断层面围岩的等效劈裂破坏和动载作用下断层面超低摩擦效应下的断层活化. 下面总结了以下几种典型的断层活化判别准则.

1) 扰动响应准则^[1],表达式为

$$\frac{\Delta u}{\Delta a} = \frac{\frac{G}{L}}{\frac{G}{L} + \frac{1}{l} f' \left(P, \frac{u}{l} \right)}. \quad (1)$$

式中: Δu 为响应位移; Δa 为扰动位移; G 为围岩剪切弹性模量; L 为围岩宽度; l 为断层带宽度; P 为压应力; u 为剪切位移; $f' \left(P, \frac{u}{l} \right)$ 为断层带介质非线性本构关系.

2) 断层活化的临界开采深度准则^[6],表达式为

$$H_0 = \frac{2C}{K_0 \gamma (1 - \lambda) \sin 2\alpha - [1 + \lambda - (1 - \lambda) \cos 2\alpha] \tan \varphi}. \quad (2)$$

式中: H_0 为临界开采深度; C 为粘聚力; K_0 为最大应力集中系数; γ 为上覆岩层平均容重; λ 为侧压系数; α 为断层倾角; φ 为内摩擦角.

3) 静载应力场作用下的断层活化准则^[10],表达式为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{slip}} = \frac{2(c + \sigma_3 \tan \varphi_f)}{(1 - \tan \varphi_f \cot \delta) \sin 2\delta}. \quad (3)$$

式中: σ_1 、 σ_3 为主应力; c 为断层粘结力; φ_f 为断层摩擦角; δ 为断层倾角.

4) 断层闭锁与解锁滑移准则^[27],表达式为

$$F_x = [\cos \theta \sin \theta (\lambda - 1) \pm \tan \varphi_f (\lambda \sin^2 \theta + \cos^2 \theta)] s \sigma_v. \quad (4)$$

式中: F_x 为微元体所受 x 方向合外力; θ 为断层倾角; λ 为侧压系数; φ_f 为断层摩擦角; s 为微元体与断层面的接触面积; σ_v 为微元体所受的垂直应力.

在煤矿开采中,遇到的断层类型主要以正断层和逆断层为主,工作面无论是在正断层还是逆断层的上下盘推进,断层大多是沿断层面发生破坏滑移. 从已有的相关文献中不难发现,目前在研究断层活化时一般也是以正断层、逆断层为研究对象,研究方法一般是在断层面上取一个微小单元体或直接对断层面建立平面力学模型,通过分析微小单元体或断层面的受力状态来判断断层是否会发生活化以及建立相应的断层活化判别准则.

前人对断层活化的机理、活化诱因、形式等进行了大量研究,这对预防因断层活化而诱发的矿井灾害具有积极的指导作用,但目前尚未建立具有普适性的断层活化力学模型,人们至今也未完全弄清楚断层滑动的动态行为,仍有一些问题有待解决和进一步完善. 由于确定断层面的物理力学性质相当困难,目前已提出的多种模拟剪切滑移动态特性的摩擦模型,如静-动态摩擦模型、速度相关模型、滑移弱化模型和速率相关与状态相关模型等^[28],这些模型从某一角度或许可以较好地解释断层活化的原因,但由于在矿山压力及开采活动作用下,断层活化是多因素共同作用的结果,要考虑许多物理现象、断层性质、工程实际条件及开采扰动等多方面的影响,且尺寸效应对断层物理性质的影响具有不确定性,因而,基于单一理论的活化机理难以准确阐释断层活化的本质. 此外,目前关于断层活化机理的研究大多仍停留在早期经典的静力学范畴,断层活化的动力学研究相对较少. 不可否认的是静力学理论在断层活化机理研究中的作用是非常重要的,但其局限性也是显而易见的,现有的断层活化理论还不能对一些重要的断层活化问题作出合理的解释. 断层活化不仅仅是断层带对采矿活动引起的应力变异结

果的响应,更可能是对整个矿井开采过程及其结果的综合响应,而这种响应已经超出了静力学的范畴,当前所建立的判别断层活化的力学模型有一定局限性,因而对断层活化机理的动力学研究有待加强。

2.1.2 断层错动型冲击地压理论研究

断层错动型冲击地压机理研究是揭露断层与冲击地压之间的内在作用机制,确定断层错动型冲击地压发生的原因、影响因素和条件以及对其进行有效监测预警和控制的理论基础,也是国内外采矿界的重要研究内容。国内外发展起来的冲击地压机理理论多种多样,其中具有代表性的主要有刚度理论、强度理论、能量理论、失稳理论、冲击倾向性理论、“三准则”理论、断裂理论、损伤理论、分形理论、突变理论及动力学理论等^[10,29-30]。这些理论从不同角度解释了冲击地压的发生机理,为冲击地压预测提供了理论依据。但由于冲击地压灾害发生形式、地点的复杂性,相关预测的理论和方法尚无统一的认识,多数还停留理论假设或经验的阶段。而且对于不同类型的冲击地压,其理论也是有差异的,需要针对具体冲击地压类型来分析。

由于复杂多变的断层构造的影响作用,使得传统的冲击地压理论难以很好地解释断层错动型冲击地压的致灾机制。对于断层错动型冲击地压理论方面的研究,潘岳等^[31]提出了均匀围压条件下的断层冲击地压的突变理论,并将其推广到非均匀围压条件下,得到了相应的力学关系式。李志华等^[9]建立了断层滑移失稳诱发煤岩冲击的黏滑-黏弹脆性体突变模型,据此分析了断层冲击地压的破坏机理,并将断层滑移诱发煤岩冲击矿压的机理分为“动态”和“稳态”两种。Ji等^[32]根据库仑破坏应力判据,建立了动态库仑破坏应力增量模型,可以对断层附近的开采扰动效应进行定量评估。王涛^[33]建立了以流变模型为基础的断层失稳滑动数学模型来拟合采动影响下断层滑动的过程。赵扬锋等^[34]基于剪切梁层间失效模型分析了断层冲击地压发生时各种几何参数和力学参数之间的解析关系,为研究断层冲击地压的定量关系奠定了基础。蔡武^[10]分析了冲击地压的动静载叠加作用机理,并提出了断层错动型冲击地压动静载作用机理概念模型。可以看出,关于断层错动型冲击地压理论的研究呈现出百花齐放、百家争鸣的局面,有力推动了该类型冲击灾害预报预测及防控技术的发展。但目前的断层错动型冲击地压理论还不成熟,对断层错动型冲击地压机理的解释还存在一定的局限性,大多忽略了地应力场、开采扰动的影响。

北京科技大学蔡美峰团队一直致力于地应力、

矿山开采动力灾害等方面的研究,通过对矿震灾害孕育的外部环境及应力-能量机理的大量研究,提出了“开采扰动势”概念^[35-37]。开采扰动势的含义是在矿井中某一位置开采时,由于开采行为而引发的对邻近构造环境所产生的扰动影响,可以综合反映开采量、开采深度、开采位置及构造应力环境等多种因素对冲击地压诱发的影响(图4)^[36-37]。通过分析冲击地压灾源体与区域构造、应力环境以及矿井开采深度、开采量、开采强度等多因素之间的定量关系,建立了冲击地压能量释放预测的开采扰动势数学模型^[35]为

$$\sum E = \text{const } \theta \left(\frac{H\Delta V}{L} \right)^D k_0 \quad (5)$$

式中: θ 为反映采矿方法诱发矿震的影响因子; H 为开采深度; ΔV 为开采量(体积或重量); L 为开采位置到控制性构造(断层)之间的垂直距离; D 为常数; k_0 为区域构造应力不均衡系数。

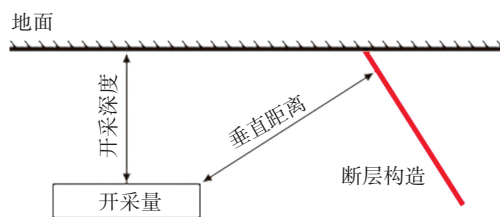


图4 开采扰动势的物理意义^[36-37]

Fig.4 The physical meaning of mining disturbance potential^[36-37]

由式(5)得到,开采扰动势的大小与深度、开采量(体积、重量等)成正比,与开采位置到邻近控制性断层构造的垂直距离成反比。通过对老虎台矿历年矿震记录及其与之在时间上相对应的采矿数据记录的系统分析,建立了矿震能量和开采扰动势之间的能量关系,并采用回归分析等方法确定了老虎台矿由开采扰动势计算矿震能量的公式,根据公式计算得到的冲击地压能量与老虎台煤矿冲击地压实际释放的能量具有很好的一致性(图5)^[35],为矿震发展趋势、震级预测等提供了依据。

在前期研究成果的基础上,经过长期的实践探索和理论研究,蔡美峰团队对断层错动型冲击地压理论又有了更深入的认识并提出了新的理论观点:由于断层附近煤岩体不同部位吸收、贮存和释放应变能的能力不同,致使不同部位位移场改变量的差异性,且断层接触面是非均匀的,在开采扰动影响下,断层附近将出现应力集中现象;煤矿在接近断层开采时,断层附近的应力集中以断层为核心呈非对称分布,并由此引起能量聚集的非对称分布,接近或者达到断层的临界平衡状态;在新的开采扰动下,非对称分布的能量达到断层活化的临界状态时,将导致工作面所在的断层上盘或下盘发生较大规模的剪

切错动并伴随能量的突然大量释放,从而在工作面或巷道产生冲击地压,这一过程是在地应力的主导下完成的.该观点深化了对断层错动型冲击地压理论根本内涵的认识,很好地解释了开采活动如何对断层产生扰动、断层受扰动后为何活化及其活化后如何致灾等问题.

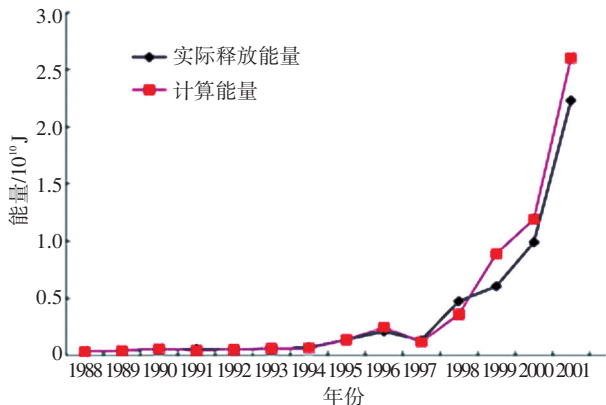


图5 老虎台煤矿开采扰动势计算的能量与实际的冲击地压能量比较^[35]

Fig.5 Comparison between calculated energy according to mining disturbance potential and that actually released by mine tremors in Laohutai coal mine^[35]

2.1.3 断层错动型冲击地压发生条件研究

煤矿断层错动型冲击地压的发生是受多方面条件因素所制约的,概括起来可分为内因条件和外因条件,下面对其进行具体分析.

1) 内因条件. 内因条件主要包括煤岩体性质、地应力、断层性质等. 煤岩体的物理力学性质主要是由其自身有机显微组分的力学性质、含量及分布决定的,其显微硬度和显微脆度较大时易发生冲击,而其显微组分分布较简单且原始损伤较小时发生冲击的可能性较低^[38-39]. 煤岩体的冲击倾向性是其能否发生冲击破坏的固有属性,一般经验认为,煤岩体较干燥、完整且坚硬时往往具有冲击倾向性,尤其是在高地应力条件下,岩体中容易出现高应力集中,产生较大变形而积聚应变能,大量聚集的应变能在煤岩体由于高应力作用出现破裂或遇到断层等情况下突然释放,就可能形成冲击地压. 细观方面的研究认为,煤的冲击倾向性与其细观结构特征密切相关,冲击危险性与微晶参数值呈正相关关系,此外,煤体冲击倾向性与煤体中的镜质组最大与最小反射率的差值也是有一定关系的^[39-40].

断层作为软弱结构面,其性质对断层活化及冲击地压诱发的作用机制的研究是揭示断层错动型冲击地压机理的关键. 毛德兵和陈法兵^[41]分析认为断层带围岩的弹性模量较小时,一般表现为塑性特征,强度较低,这类断层的活化特征常表现为连续蠕滑

式,应力的变化也比较平缓,断层活化时释放的能量较少,发生冲击地压的可能性较小;断层带围岩的弹性模量较大时,整体强度较高,应力增加到峰值后会突然下降,断层破裂速度快,活化特征表现为黏滑式,突然释放的能量较大,容易诱发冲击地压. 李守国等^[42]研究了逆断层不同倾角条件对采场冲击地压的基本作用规律,认为无论上盘或下盘开采,断层区域弹性能及垂直应力都随着断层倾角的增加而增加,且断层倾角对下盘开采影响比上盘大. 此外,也有学者对断层延展长度、落差、走向及强度等性质对断层活化诱发冲击地压的影响机制进行研究.

断层类型与冲击地压的诱发紧密相连,它们之间的相互作用机制结果表明,工作面过正断层时发生冲击地压的可能性较小,为减压型;而工作面过逆断层时发生冲击地压的可能性较大,为增压型,这一研究结论为解释河南义马、山东鲍店等矿区逆冲构造引发强烈冲击地压的原因提供了科学依据^[13].

2) 外因条件. 外因条件主要包括开采深度、岩体应力变化、工作面布置方式等. 开采深度与断层错动型冲击地压的诱发是有一定关系的,潘一山和章梦涛^[43]认为,只有开采深度达到一定值并产生足够大的正应力时,才可能引发断层冲击地压. 赵扬锋等^[34]认为开采深度较浅时一般不易发生断层冲击地压,只有当开采深度大于某一临界值时,断层冲击地压才频繁发生. 陈法兵^[6]基于库仑准则建立的包含“开采临界深度”的断层活化临界状态数学模型表明,在其他条件不变的情况下,若断层附近的煤层实际开采深度大于计算得到的临界深度,则断层就会活化. Sainoki^[44]经数值模拟计算得到,地震矩、断层滑动过程释放的能量、断层最大剪切位移及滑动速率等归一化值随着深度的增加而增大(图6),其中断层滑动过程中释放的能量增加最显著.

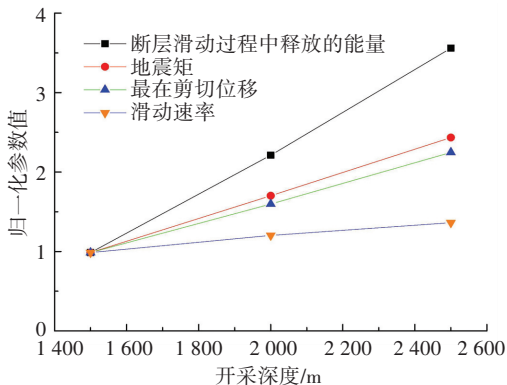


图6 断层行为与开采深度的关系^[44]

Fig.6 Relation between behaviors of fault and depth^[44]

开采活动会引起断层-煤岩系统应力重新分布,但这不一定引发冲击地压,只有断层区域煤岩体

应力达到临界应力时,才可能会诱发断层活化而造成冲击失稳. Islam 和 Shinjo^[45]研究了孟加拉巴拉普库利亚煤矿断层周围的应力特征和变形,认为开采引起的应力重新分布导致断层内部和周围都存在明显的变形,断层受水平应力和垂直应力影响,且高应力集中在断层两端附近. 宋义敏等^[46]研究了断层冲击地压的失稳瞬态过程,认为断层冲击地压的发生与侧向压力值密切相关,侧向压力值达到一定的条件时才可能诱发断层冲击地压. 王涛等^[47]研究采动影响下采场覆岩的运动规律和断层应力演化特征时发现,工作面靠近断层时,其正应力和剪应力迅速增大,断层滑移的概率增加. 李成成^[48]认为,随着工作面不断接近断层,支承压力的集中程度会不断上升,有发生冲击地压的可能. 罗浩等^[49]对耿村煤矿多个工作面在向断层推进过程中围岩水平应力场和垂直应力场的演化规律进行了模拟分析,认为冲击地压的发生与断层区域围岩的应力集中程度有关,工作面不断靠近断层,应力集中程度增加,增大了断层下盘的冲击危险性. 断层附近煤岩体因工作面回采形成复杂的构造应力集中现象,随着工作面向断层方向的不断推进,一旦断层结构面上的支承压力能够克服断层结构面的摩擦阻力,并使断层产生相对错动,这就为冲击地压的发生创造了条件.

工作布置方式对断层活化也有重要影响, Ji 等^[32]比较了同一断层附近两种可能的工作面布置的扰动效应,认为工作面垂直于断层推进时对断层的扰动效应远要小于工作面平行于断层推进时对断层的扰动效应,前者诱发动力灾害的风险较低. 李志华等^[15, 50]分别模拟了济三煤矿工作面布置在断层下盘和布置在断层上盘两种情况下工作面向断层推进时断层面上正应力、剪应力及工作面支承压力的变化规律及断层滑移量情况(图7),发现工作面布置在断层下盘时发生冲击地压的危险性较高. 工作面分别从上盘和下盘推进时覆岩内的应力分布特征的差异性造成工作面从下盘回采更容易诱发冲击地压的主要原因,这一认识对断层区域工作面回采实践具有重要指导意义.

综上所述,断层错动型冲击地压发生的内因和外因条件可以在一定程度上直观描述其成灾原因,但其成灾条件归根结底还是由于开采影响下断层附近应力场和能量场的改变造成的. 断层错动型冲击地压是在地应力的主导下完成的,采矿开挖引起地应力向开挖空间释放,形成“释放荷载”,导致断层附近煤岩体变形和应力集中,产生扰动能量. 当煤岩体中聚集的扰动能量达到足够高的水平,并且在断层出现活化的情况

下突然释放,就易产生冲击破坏. 这是对断层错动型冲击地压机理认识的一个重大突破. 基于这一认识,本文认为断层错动型冲击地压的发生应满足两个必要条件:一是断层-煤岩系统必须具有储存高应变能的能力并且在断层活化时具有较强的冲击性;二是断层附近必须具有形成高应力集中和高应变能聚集的应力环境. 这也是进行煤矿断层错动型冲击地压预测的基本准则.

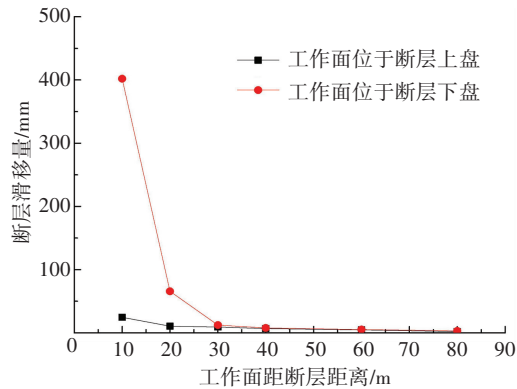


图7 济三煤矿断层滑移量比较^[15]

Fig.7 Comparison of fault slip displacement in Jisan coal mine^[15]

2.1.4 断层错动型冲击地压孕育过程研究

断层活化不是一蹴而就的,其发展演化需要经历一个过程. 从断层区域受到开采扰动的影响开始,断层附近煤岩体的应力场与能量场将一直处于动态演化与发展的过程中,这一过程势必会为断层活化乃至冲击地压的孕育、发生和发展提供条件,并将持续一定时间,体现出了断层错动型冲击地压的孕育过程具有“缓慢性”的特点.

断层错动型冲击地压是一个动力学过程,其孕育过程的研究是揭示其致灾机理的一个新突破口. 学者们从不同角度对其孕育过程进行了研究,陈法兵^[6]基于理论分析将断层活化过程分为孕育过程(蓄能)、断层失稳过程(放能)和应力分配和介质适应性调节运动过程(散能)3个阶段,这3个阶段持续的时间相差很大. 王爱文等^[51]将煤层开采诱发巨型逆冲断层冲击灾变过程划分为高应力集中区形成、覆岩空间结构失稳与断层活化及断层滑移释放能量3个阶段. 张科学等^[52]根据相似模拟试验结果将断层活化过程分为失稳期、滑移期和活化期. 可见,虽然断层错动型冲击地压的孕育过程是极其复杂的,但仍表现出了一定的规律性. 不同矿井的现场微震监测结果^[41, 53-54]也表明,工作面过断层期间微震事件数量和能量变化具有一定的规律性,断层活化是一个逐渐发展的过程,并表现为周期性特征,这一周期性特征与断层区域能量的动态演化过程(积聚、释放)相对应. 图8^[54]为新巨龙矿井2301N

工作面过断层期间微震事件特征。断层区域微震活动很不稳定,当工作面接近断层时,微震释放的总能量值和频率稳步增加,最大能量峰值也有迅速增长的趋势;强震发生前,有一个弱震活动期,弱震活动表现为强震的能量积累,可以用来预测冲击地压的危险性。

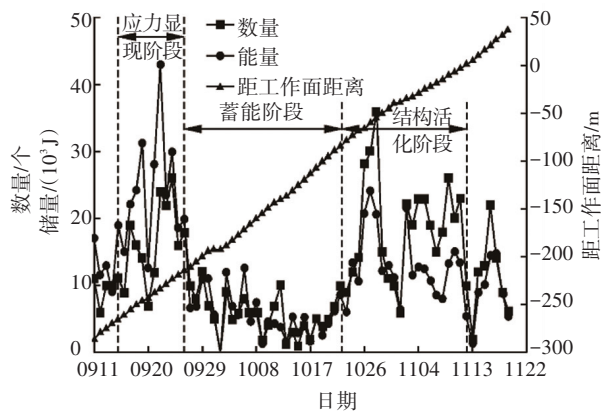


图 8 新巨龙矿井 2 301 N 工作面过断层期间微震事件特征曲线^[54]

Fig.8 Distribution curves of microseismic events during working face passing through fault in the Xinjulong coal mine (2 301 N section)^[54]

断层错动型冲击地压是能量驱动下的一种断层-煤岩系统状态失稳的动力现象,其复杂的孕育过程最终可以用能量的驱动效应来描述。姜耀东等^[13,30]认为冲击地压是一种能量释放在时间上非稳定、在空间上非均匀的过程,断层错动型冲击地压亦是如此,即时间上,若断层-煤岩系统中能量释放速率大于能量消耗速率,则系统的破坏失稳是非稳定的;空间上,断层-煤岩系统各点处的能量释放量构成了空间上的能量释放梯度,当不同点的能量释放梯度呈非均匀分布时,则可能形成冲击地压。从能量的动态演化过程来看,原始状态未开挖之前,断层-煤岩系统中贮存一定的势能和应变能,处于动态稳定状态,在开采扰动作用下,系统内能量快速积聚,远大于能量耗散,局部能量迅速达到失稳激活能量,系统过渡到非平衡态,进一步的扰动将加剧能量释放而诱发冲击灾害,积聚的能量得以释放后,断层滑动停止,断层-煤岩系统变形也趋于稳定进入新的动态平衡状态,这一过程如图 9 所示。

基于断层错动型冲击地压孕育过程中能量的演化,断层错动型冲击地压发生的能量判据为

$$E_v = E_s - E_c \quad (6)$$

式中: E_s 为释放能; E_v 为转化为动能的剩余能量; E_c 为克服断层摩擦阻力消耗的能量及产生的热能等。

如果 $E_v > E_{\min}$ ($E_{\min}$ 为断层-煤岩系统发生冲

击地压所需的最小能量),则将可能发生冲击地压, $E_v - E_{\min}$ 的值越大,冲击危险性就越大。断层滑动过程中释放的能量是评价断层活化程度的一个重要指标,对能量演化的深入了解,可为深部煤矿开采过程中煤岩动力灾害的危险性预测提供一定参考。

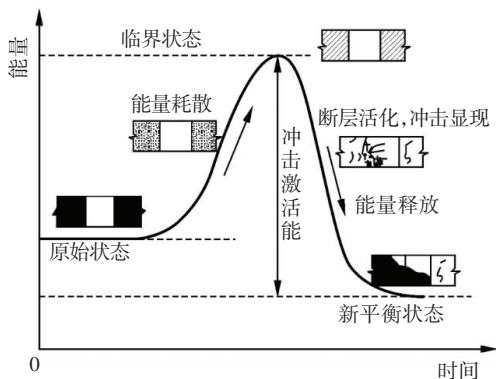


图 9 断层错动型冲击地压孕育过程中的能量演化(据姜耀东等^[13]修改)

Fig.9 Energy evolution of formation process of fault slip rockburst (modified after Jiang et al^[13])

开展断层错动型冲击地压致灾机制的研究将有助于大幅度提升煤矿冲击灾害防灾减灾的理论认知水平,实现从“被动救灾”向“主动防灾”的重大转变,突破制约中国矿产资源可持续安全开发的一大技术瓶颈,这对保障中国能源安全与实现中国能源的可持续发展及树立中国矿山安全生产的国际新形象具有重大的现实意义和社会经济效益。由现有的相关研究可知,由于矿区的地质结构比较复杂,采矿活动引起的应力变化向断层附近区域转移时,不仅有弹性变形,还有蠕变过程,造成煤岩体和地质结构不连续地破裂,从而致使二次应力非均匀地重新分布在巷道和断层周围煤岩体中。此外,断层在空间分布上错综复杂,断层面不是一个平面,具有不规则特性,断层的活化机制与断层面的粗糙度密切相关,以及断层滑动的前兆信息不明显等,上述诸多因素使得断层滑动机理及断层错动型冲击地压致灾机制的研究比较困难,从而造成了断层错动型冲击地压发生的随机性和难预测性。从当前的研究情况来看,断层错动型冲击地压致灾机制研究已经取得了显著进展,但成果比较分散,应将已有的研究成果通过科学手段进行整合统一,以一个科学理论体系统领,用来指导预警防控技术的研发。

2.2 断层错动型冲击地压的监测预警技术研究

断层错动型冲击地压的监测预警是为该类型冲击地压防治工作确定其发生的可能性、时间、地点、震级等信息。目前该类型冲击地压预测的方法大致可以分为 4 大类:1) 根据先验信息和某种或多种判

据(强度、能量、综合指标等),判断煤岩体固有的冲击倾向性;2)基于对断层性质的了解及相应的理论分析,建立断层活化判据和准则和冲击地压失稳理论的数学模型,判断断层活化及其诱发冲击地压的可能性;3)采用相似模拟、数值模拟等手段分析采动影响下断层活化及冲击显现规律,为预判冲击危险性提供理论依据;4)通过现场监测开采过程中断层附近煤岩体内的某些特征参数的变化及出现的前兆现象(应力、应变、微震、声发射、电磁辐射等),为断层错动型冲击地压发生的可能性和震级进行预警和评估。

目前普遍采用现场监测技术对断层错动型冲击地压进行预测预报,这些监测方法主要分为直接接触式监测法和地球物理法两大类。直接接触式监测法主要有钻屑法、钻孔应力(应变)测量法、顶板动态监测法及矿压观测法等,这类方法主要用来监测冲击地压发生前围岩变形、顶板活动及煤岩体内应力变化等特征;地球物理法主要包括电磁辐射法、地音法、声发射(AE)法、微震法、地震法及电荷感应监测等^[6,7,10,17,55-56]。这两类方法可以对工程现场进行实时的监测和预报。此外,还有学者提出大地层析成像法、地质雷达、红外线观测法等,但目前在国内外应用的实例尚不多见,目前对冲击地压的预测主要是根据微震监测数据的采集和分析进行的。下面介绍一些具有代表性的可用于煤矿断层错动型冲击地压预测预报的监测预警技术及其在工程中的具体应用情况,可为今后断层错动型冲击地压的预测预报提供有益借鉴。

2.2.1 断层错动型冲击地压监测预警与防治体系

建立一套有效的冲击地压“时间-空间-强度”预测系统一直是各国采矿界追求的目标。就断层错动型冲击地压而言,若能建立一套较为完善的针对煤矿断层区域冲击地压灾害的监测预警与防治体系,则可以在很大程度上降低冲击地压风险,达到保障矿山安全开采的目的。

目前,断层错动型冲击地压防治体系的建立一般是根据具体矿山的实际地质条件及开采条件等方面的情况而定的。蔡武^[10]根据甘肃宝积山煤矿705工作面发生冲击地压的实际情况,建立了适用于该矿Fa断层区域的冲击地压监测与防治技术体系(图10)。采用钻屑+矿压监测来联合监测煤体应力和顶板的活动性,并采用大直径钻孔+煤体爆破+注水的方法进行联合卸压。钻屑、矿压可以进行应力即时监测预警,为冲击危险性预测提供依据。该体系在现场应用效果良好,可为具有断层错动型冲击地压威胁的类似矿井提供参考。

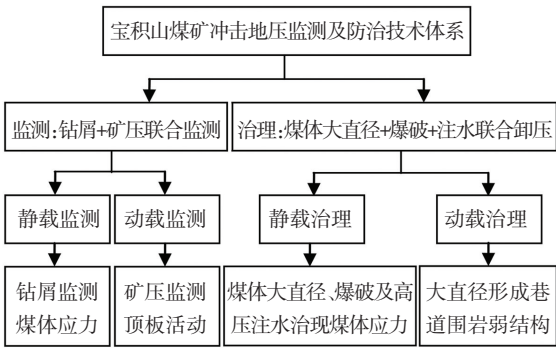


Fig.10 Monitoring and controlling technology system of rockburst in Baojishan coal mine^[10]

2.2.2 BMS-II 型微地震监测系统

微地震监测技术在近几年获得了快速发展,国内外生产的微地震监测设备也层出不穷,如 ARAMIS、SOS、ESG 及 BMS 型微震监测系统等在国内外得到了非常广泛地推广应用^[57-61]。目前很多微地震监测设备已经可以实现对目标的远距离、三维、动态、实时监测,提高了预测结果的准确性。以 BMS-II 型微地震监测系统(图11)为例,其结构为集中-分布式,具体表现为区内集中式、区间分布式,集合了集中式和分布式两种结构的优点。该系统分为地面和井下两部分,地面设备主要有数据采集主机、数据存储及处理服务器;井下设备主要有 UTC 控制器、BMS-SAT 分站及震动传感器等。在井下布置多个监测区域,每个测区安设 8~12 个不同类型的检波器,多个测区间同步作业,可以实现对开采工作面冲击地压和全矿井震动的同时监测并自动记录微地震的原始波形^[60-61],具有监测精度高、范围大的特点。

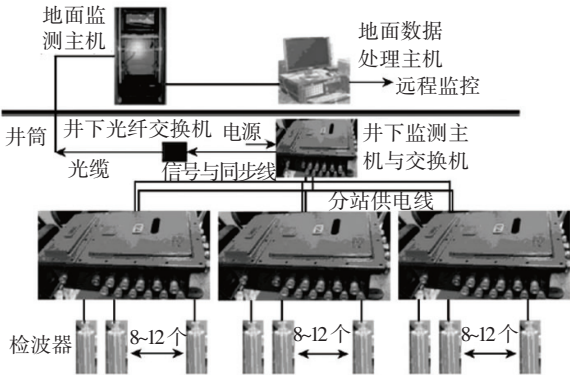


Fig.11 BMS-II type microseismic monitoring system^[60]

姜福兴等^[60]将该系统应用于山东朝阳煤矿构造控制型冲击地压的监测预警中,在井下应用时,结合相应的微震应用软件,对微震事件在断层附近的分布特性进行动态展示,以及分析微震事件的能量耗散特性,进而确定冲击危险区,为制定相应的防冲

措施提供了依据,保证了工作面的安全回采。

2.2.3 多参量实时联合监测预警系统

断层错动型冲击地压的影响因素有很多,采用单一的监测设备往往容易出现预报可靠性差、灾源定位精度低等问题,难以达到精准监测的效果。多参量实时、在线联合监测则是今后断层错动型冲击地压监测预警的发展方向。

有学者已经进行了这方面的实践,Liu 等^[62]提出了包括电磁辐射、声发射及微震监测的多参量实时联合监测预警系统(图 12)。该系统可以对井下断层滑动面附近的煤岩体应力、能量和破坏程度进行信号模式识别,其预测和监测预警方式为:对断层滑动面附近电磁辐射信号的变化来判断断层滑动型冲击地压的危险性,通过分析断层滑动面的声发射频率和能量估算岩体的稳定性,通过分析断层滑动面的微震资料确定岩石的破坏程度,最后通过多参量的综合分析,判断是否具有发生断层错动型冲击地压的风险,实现重点区域冲击危险分析预测与实时监测预警相结合的目标。该系统在山东华丰煤矿进行了现场应用,效果显著,为该矿断层错动型冲击地压的早期预警和防控措施的实施提供了依据。

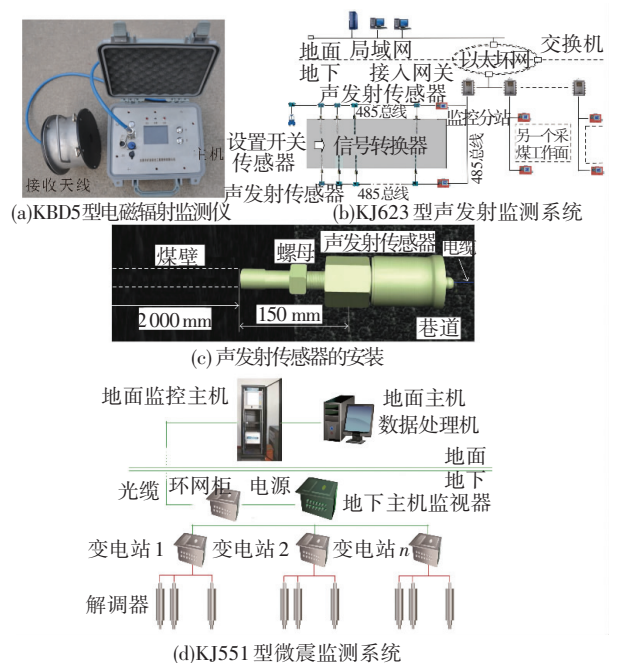


图 12 华丰煤矿多参量监测预警系统^[62]

Fig.12 Multi-parameter monitoring and early warning system in Huafeng coal mine^[62]

2.2.4 深部钻孔应变观测技术

断层错动型冲击地压与天然构造地震具有一些类似的地方,天然构造地震也大都都是断层错动型的。天然构造地震的能量来自于地球的构造运动,矿山断层错动型冲击地压的能量来自于采矿开挖扰动,其本质都是弹性应变能在某些区域较长时间的积累

和应力、应变逐渐演化的结果。钻孔应变观测技术已被广泛应用于天然地震前兆及强度预测等方面的研究,钻孔应变观测具有频带宽、量程大、精度高($10^{-9} \sim 10^{-10}$)的特点,可连续、实时观测地层内部应变状态随时间的变化过程。

近年来,钻孔应变观测技术已逐步应用于矿山冲击地压等动力灾害的监测预警研究。张月征等^[63]采用中国地质科学院地质力学研究所研发的 TRY-4 型钻孔分量式应变仪(图 13)在甘肃华亭煤田矿区进行了冲击地压现场监测。该设备可以在地下 2 000 m 以内的深度范围进行监测,其中观测探头主要由通讯舱、应变仪及孔隙压计等组成。在采动影响下,冲击地压孕育过程中相关区域的应力场是在不断调整变化的,该设备可以直接、准确地对冲击地压发生前后相关区域地层中岩体应变的微动态变化过程进行记录,为研究开采对相关区域应力场的扰动效应和冲击地压孕育形成过程提供基础数据资料。钻孔应变观测技术也可应用于观测断层区域煤岩体因开采活动而引起的应力、应变变化,探求开采扰动作用下断层活化与周边区域钻孔应变效应变化之间的相关性,进而实现对断层错动型冲击地压的预测预报。

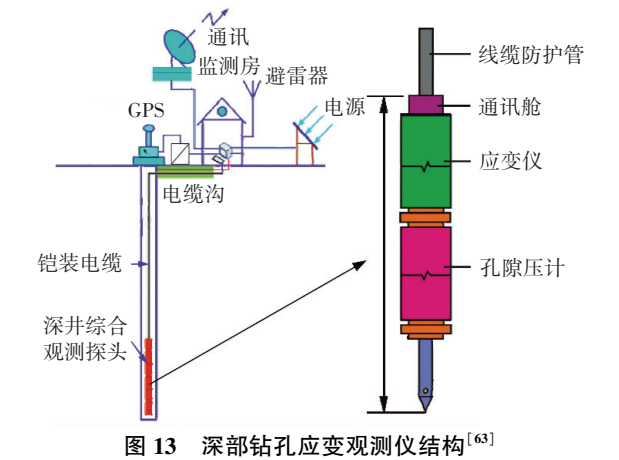


图 13 深部钻孔应变观测仪结构^[63]

Fig.13 Structure of deep borehole strain observation instrument^[63]

断层错动型冲击地压的预测预报是一项世界级难题。虽然断层错动型冲击地压的监测预警技术已经取得了重要突破,监测设备的类型也发展成多种多样,但目前还没有一种方法被证明是十分可靠的,成功的例子仍然很少。对断层错动型冲击地压发生的可能性、其显现地点及显现形式的预测仍然是比较粗放的,其原因是缺少对断层错动型冲击地压机理的正确认识和对未来开采断层错动型冲击地压发展趋势的合理预测。当前主要问题是断层错动型冲击地压监测和实时预报还缺少成熟的技术,准确的冲击地压短期和临震预报还做不到。因此,一方面,需要依据断层错动型冲击地压的诱发机理,尽早开

发出智能化可视化的冲击地压精准探测与预报技术及设备。另一方面,必须在超前理论预测的基础上,采用现有的声波监测、微震监测、三维数字图像扫描等多种手段,并开发创新的监测技术,精准监测深部开采过程中断层附近煤岩体能量聚集、演化、煤岩体破裂、损伤和能量动力释放的过程,特别是做到对能量释放过程的精准监测,才能为该类型冲击地压的实时预测预报提供可靠依据。

2.3 断层错动型冲击地压防控技术研究

断层错动型冲击地压的防控,是煤矿开采岩层控制的关键问题之一。断层错动型冲击地压的防控技术的研究内容主要集中在两个方面,一方面是研究如何通过改变断层错动型冲击地压发生的内因和外因条件来防止和控制灾害的发生;另一方面是对无法避免的断层错动型冲击地压研究采取何种防护措施来保证生产安全。

针对断层错动型冲击地压,释放能量主体为断层上下盘错动,其防控的核心在于减少煤柱内的高应力集中和高扰动能量聚集以及弱化断层超低摩擦效应。目前针对该类型灾害的主要防控措施概括起来可大致分为两类:区域性防御措施和局部解危措施。区域性防御措施主要有:采用合理的开拓布置和开采方式(如巷道错层位布置、尽量避开断层布置采煤工作面等)、优化开采布局和开采顺序(如无法避开断层时,采取在断层开始回采措施等)、提高采煤工作面装备水平等。局部解危措施主要有:松动破碎煤体、控制工作面推进速度、大钻孔卸压、卸压爆破、煤体高压注水等。这些措施在煤矿现场往往被联合采用来防治断层错动型冲击地压灾害,对降低冲击灾害的发生率和发生强度起到了一定的积极作用,但是要从根本上解决断层错动型冲击地压的危害,还有很长的路要走。

井下开采是一个非常复杂的开挖过程,其开挖不是一次完成,而是分多次完成的。每次开挖都是一次地应力的局部释放过程,也就是一次形成“释放荷载”的加载过程。由于煤岩体的非线性,不同的巷道和采场布置,不同的开挖过程、开采顺序,不同的支护结构和施工时间等,这种“释放荷载”的加载过程和路径就不同,就会产生不同的应力-应变路径和不同的最终力学效应,出现最终不同的断层-煤岩系统稳定性状态。所以,施工因素对断层-煤岩系统的稳定性和地下岩层控制具有重大影响。因此,在断层错动型冲击地压的防控技术研究方面,要充分考虑施工因素的影响,应主要从优化采矿方法、开采布局和开采顺序,并采取适当的支护措施入手,避免断层区域煤岩体中的应力集中和过量位移,从

而减小和控制开采扰动能量的聚集及其对断层的扰动作用,减轻和控制断层错动型冲击地压的发生。

断层活化主要包括断层蠕滑(稳定滑动)和瞬间错动(非稳定滑动)两种形式,断层蠕滑是缓慢释放能量的过程,这种情况可能会发生小范围煤爆或小型冲击失稳,甚至不发生动力灾害;而断层瞬间错动则是瞬间释放大量能量的过程,容易诱发高能级冲击地压灾害。因此,除了采取避免断层区域煤岩体中的应力集中和过量位移的措施外,也应考虑到无法阻止断层活化甚至是主动引导断层活化来解除高应力集中的情况。此时就有必要采取相应的防御措施,做到能主动、有效地控制断层的滑移,使断层活化时最好能进行稳定滑动,缓慢释放其积聚的能量,达到控制断层冲击地压的目的。

3 断层错动型冲击地压研究发展趋势及展望

3.1 断层错动型冲击地压研究存在的不足

学者们为弄清单层错动型冲击地压的致灾机理进行了诸多尝试,在其诱发机理及其预测理论和技术研究方面已经取得了重要突破;在断层错动型冲击地压的监测预警与防控方面,无论是理论、技术还是设备,也都取得了实质性进展。但由于断层错动型冲击地压影响因素多样且致灾机制复杂,截至目前,断层的活化机制及其动态滑移行为还未完全弄清楚,断层错动型冲击地压实时监测和预报技术还不够成熟,准确的灾源定位及短期和临震预报还做不到,现有的防护技术、开采工艺仍难以有效抑制灾害的发生。具体来看,当前研究存在的不足主要体现在以下几个方面:1)断层的动态活化机制尚未完全搞清楚,断层错动型冲击地压理论还不成体系,在研究断层错动型冲击地压机理时,采矿活动的影响、断层的特征参数、断层区域各物理场之间的耦合作用等因素考虑较少,对机理的解释还存在一定的局限性。2)从本质上来讲,断层错动型冲击地压等动力灾害都是在地应力的主导下完成的,但从地应力角度对断层错动型冲击地压致灾机理的研究还较少,未充分分析断层构造所处的原始应力分布特征,不同断层构造条件及不同工程环境下断层区域的地应力场与能量场之间的转化机制还有待进一步研究。3)目前构建的模拟工作面过断层期间断层活化及诱发冲击地压的数值模型往往比较粗糙简单,主要表现为地质构造条件过于简化、选择的本构模型大多是摩尔-库伦准则、一般将断层面简单地认为是均质的平面、断层面弱化参数的选取缺乏有力依据等,这与实际情况相差较大,模拟结果的可靠性有待商榷。4)断层错动型冲击地压监测的基础理论和

技术设备还不完善,例如微震震源精准定位、关键力源有效识别等基础理论方面还缺乏系统深入的研究. 断层错动型冲击地压灾害的监测信息(包括应力、应变、微震、电磁辐射等)与孕灾环境和诱发条件的相关性及其临界判别准则还不是很清楚,对监测信息的分析以及基于监测信息对灾害的预测预报方面还缺乏理论依据,准确的冲击灾害短期和临震预报还做不到. 5) 断层错动型冲击地压灾害发生的同时往往易引发其他次生灾害而形成复合型动力灾害,而目前有关复合型动力灾害之间的相互作用机制、复合型动力灾害发生机理与相应理论、成灾模式、一体化预测与防控技术等方面的研究还较少,还未形成完善的一体化防治理论体系. 6) 整体来看,断层错动型冲击地压灾害的防控技术手段仍比较单一,且防控效果不甚理想,没有系统地建立起与高应力环境相适应的、有利于控制该类型冲击灾害的采矿方法和工艺措施.

3.2 断层错动型冲击地压研究发展趋势前瞻

通过上述对断层错动型冲击地压灾害领域的国内外研究现状、现行研究成果的不足之处的总结与分析,从确保煤炭资源的安全高效开采及国家安全生产重大需求的角度出发,从如下几个方面对未来该领域的研究重点与发展趋势进行展望.

3.2.1 深化研究断层错动型冲击地压孕育诱发机理

断层错动型冲击地压的孕育、诱发与区域地应力场条件、开采条件及断层构造条件等密切相关. 认为深化断层错动型冲击地压孕育诱发机理研究应着重从以下几个方面入手: 1) 要充分考虑煤矿地质条件、断层构造条件及开采条件,建立断层错动型冲击地压孕育发生物理过程的断层-煤岩变形动力系统的灾变模型,探索影响断层-煤岩变形系统演化的根本内涵. 2) 分析并确定不同断层构造条件及不同开采环境下断层区域能量场的时空分布特征,研究断层活化前后应力场与能量场之间的内在作用规律和转化机制、应力与能量的传播途径,揭示开采扰动影响下断层错动型冲击地压发生的动力学过程. 建立开采扰动作用下断层-煤岩系统能量场的时空四维动态分布模型,探索系统边界的能量输入及系统内部的能量积聚-迁移-耗散规律,对未来开采诱发断层错动型冲击地压的发展趋势及其“时间-空间-强度”规律作出预测. 3) 加强开采活动与断层区域应力场及断层-煤岩系统外部的岩体应力(采动应力)之间的耦合效应、地应力变化与断层活化之间的交互作用机制等方面的研究. 通过监测和分析开采扰动作用下断层区域应力效应及其主导下的多场因素的变化过程,获得开采扰动作用下不同尺度

区域内煤岩体应力-应变及相关场参数的变化,探索开采扰动作用与断层区域构造应力场耦合作用下不同尺度范围内煤岩体“力链结构”机制以及应力、能量、孔隙水压力等因素的变化特征与协同机制,揭示多场耦合作用对断层活化扰动效应的动力学机制及断层错动型冲击地压灾害灾源孕育过程的冲击诱发机理. 4) 加强断层界面属性对滑移的影响机制研究. 断层界面属性(如断层面摩擦系数、断层泥粘聚力、断层面煤岩体颗粒粗糙度等)对其自身的滑移具有重要影响. 一方面,通过多种岩性煤岩组合结构的双面剪切摩擦实验,研究不同属性的接触面滑动性质的差异及不同断层界面属性与断层滑移速率、滑移形式及滑移轨迹的关系,探索不同界面性质条件下断层失稳滑动的产生条件,并建立断层滑移全过程的力学模型. 另一方面,通过开展不同断层界面属性的相似模拟和数值模拟实验研究,分析不同属性接触面的断层滑移特性、位移演化规律及滑移过程中所产生的地球物理信息特征等,建立接触面失稳滑动的判据,揭示断层界面属性对滑移的影响机制及断层滑移诱发机制.

3.2.2 研发深部地应力精确测量装备和技术

对断层错动型冲击地压准确的理论预测离不开对现场地应力的精确测量,因此首先需要解决的关键技术之一就是现场地应力精确测量与反演建模技术. 基于对地层浅部、深部地应力场分布特征变异性的基本认识,并充分考虑深部煤岩体的非线性特征,进一步发展适合深部地应力测量的新理论、新技术. 由于煤岩体线弹性假设为前提的当前地应力测量理论在深部岩体地应力测量中将产生较大偏差,因此有必要在现有地应力测量理论上发展基于煤岩体非线性特征的地应力测量的理论. 并在此理论指导下考虑深部煤岩体高应力、高温条件下度应力-应变非线性和强度非线性特征及应力损伤发展规律,对现有空心包体应变计地应力测量法进行改进,使应变仪在测量的精确性、便捷性、稳定性和长期性方面的性能得到极大提高,实现空心包体应变计数字化,从而实现对断层区域煤岩体应力场的实时、长期连续和精准监测. 通过多点地应力现场实测,获得深部三维地应力状态的空间分布规律,研究确定包括构造运动、自重引力、断层构造、温度变化等影响地应力分布的主要因素以及地应力场与断层结构的关系等. 在此基础上,探索矿区复杂三维地应力场模型的精细化反演和构建方法,并依据现场多点地应力实测数据,反演重建建立矿区三维地应力场模型,进而可以获得断层区域应力场在工作面回采过程中的动态变化特征,一旦发现断层附近出

现应力集中趋势,应尽快采取相应的解危防护措施进行卸压疏导。

3.2.3 加强采动诱导断层滑移的大型数值仿真研究

数值仿真技术在指导煤矿安全生产中发挥着越来越重要的作用,其与理论解析、试验分析、现场监测成为当前断层错动型冲击地压研究的主要手段。但目前通常构建简化的数值模型来模拟工作面过断层期间断层滑移及其诱发冲击地压的情况,难以可靠地反映真实复杂地质构造条件下的断层滑移特征和冲击显现特征,模拟结果的可信度较低。尤其是对于煤矿结构形态复杂、规模较大的断层(群)活化的大型精细化数值模拟还难以很好地实现。随着计算机处理器和并行技术的发展,大型三维数值仿真计算已成为可能。针对断层错动型冲击地压,未来应加强采动诱导断层滑移的大型数值仿真研究,使之更符合实际的断层滑移情况。在充分掌握地质资料的基础上,建立区域-矿区-采场等多尺度的大型三维断层滑移模拟系统,实现应力、采深、温度、地下水等多物理场影响因素的耦合模拟计算。在此基础上研究多物理场、多种条件(不同的断层形式、回采方式等)作用下断层从受采动影响开始到发生活化失稳的全过程,尤其是重点研究断层活化启动机制、滑移特征、滑移过程中的周边区域地压显现规律以及各物理场之间的相互作用关系,揭示断层滑移过程中的能量耗散和释放规律以及由能量主导的断层活化响应机制和触发条件,建立断层滑移过程的能量场可视化模型,为断层错动型冲击地压的预测预报以及为围岩支护设计调整提供直接依据。为保证大型数值仿真计算结果的可靠性和准确性,需要做到以下几点:1)正确选取符合断层面滑移特性的本构关系、矿区初始地应力场和相应的力学计算参数;2)要充分考虑影响模拟结果的技术问题,如数值计算边界条件的合理确定、数值计算方法的正确选取、数值计算网格的精确划分、工程地质条件的合理概化等;3)需要结合现场工程实际条件和相关专业理论,对仿真计算结果进行精准解译;4)利用现场实际的观测数据对仿真计算结果进行验证。

3.2.4 构建智能化可视化的精准监测与预警体系

断层错动型冲击地压能不能预报,关键在于能不能“看到”冲击活动从孕育到发生的整个过程,这其中—个重要的研究方向就是要开发出智能化可视化的断层错动型冲击地压精准监测与预报技术及设备。准确的断层错动型冲击地压短期和临震预报离不开现场监测,现有的应力、应变、微震、声发射、电磁辐射及三维数字图像扫描等监测方式都是反映开采扰动能量积聚和释放的一种手段,尚不能满足断

层错动型冲击地压的精准预报。未来首先必须研究断层滑移全过程的应力、地球物理等前兆信息特征,找出敏感预警指标。然后构建监测各敏感预警指标所需的多级、多维联合监测网络(如微震、声发射、电磁辐射和压力等联合监测方式),将采场结构分析、开采过程分析和监测结果分析相结合,克服定位不准、测试误差大、信号解释不清等难题,实现从矿区级监测、采场尺度监测、巷道尺度及灾源目标的多尺度监测的统一。随着计算机软硬件技术的革新、大规模并行计算方法及大数据云计算技术的发展,利用现代互联网技术整合开采过程中应力、应变、微震、声发射、电磁辐射及热辐射等数据,挖掘与断层错动型冲击地压有关的现象,揭示断层错动型冲击地压孕育过程和诱发前的异常响应特征及超前响应模式,确定冲击灾害的震源位置、启动方式、显现位置及显现方式。此外,还要研究高密度观测下断层错动型冲击地压参数计算方法,创建大数据下断层错动型冲击地压预测新理论,结合最新的矿山数字化技术,实现断层错动型冲击地压预测的精细化、智能化和可视化。同时还要结合当前科学技术发展的前沿,应用多学科交叉思维,创造性的将当前新的理论和技术应用于断层错动型冲击地压的预测当中。

3.2.5 加强复合动力灾害一体化防治体系研究

煤炭资源浅部开采时,煤矿断层错动型冲击地压多表现为单一的灾害形式。随着开采深度不断增加,断层错动型冲击地压的显现形式呈现出复杂与复合发生的特点,其复杂性表现为影响冲击灾害发生的因素多样化,如构造应力场、断裂带活动性、瓦斯、地下水、地温等因素的影响作用均不可忽略,各影响因素之间互相作用、相互耦合,表现出多参量、多相、多场的复杂特征。复合发生即发生断层错动型冲击地压时可能会同时诱发煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸、顶板突水等一种或多种动力灾害的复合发生。复合动力灾害往往比单一的断层错动型冲击地压灾害的破坏能力更强大,其致灾机制也更加复杂,发生复合动力灾害的矿井数量也呈增长趋势,如何实现对与断层错动型冲击地压相关的复杂与复合动力灾害的有效预测与防控是今后应重点解决的一项难题。当前对复合动力灾害的综合治理研究尚属探索和尝试阶段,未来应加强复合动力灾害的一体化防治体系研究。根据复合动力灾害的类型和特点,进一步研究其发生的统一机理,弄清楚各类型灾害相互作用的内在机制及成灾模式,从而建立多参量、多指标评估模型来确定危险等级及划定危险区,并将多种动力灾害防治措施进行有机结合,建立有效的一体化综合防治体系,最终达到多种灾害共同防治的目的。

3.2.6 研发能够有效吸能、抗冲击的防护技术

防护技术的发展是防治断层错动型冲击地压的关键。有关煤矿井下支护的相应技术及装备层出不穷,然而从当前的情形来看,现有的技术及设备对工作面开采、巷道掘进及服务期间发生的断层错动型冲击地压的防护效果并不理想,一些防护手段只是在一定程度上缓解了断层错动型冲击地压发生的强度,并未能有效根治冲击灾害。其根本原因在于现有的支护材料不能有效吸收围岩在冲击力作用下瞬间释放的变形能及抵抗冲击荷载,这就致使断层错动型冲击地压发生时井下支护设施常常遭到严重变形乃至破坏而失去承载防护能力。因此,应针对断层错动型冲击地压释放能量多、破坏性强的特点,开发能够在强冲击下快速吸收冲击能量并稳定地变形的防护体系,防护体系应具备能安全控制断层错动型冲击地压发生全过程的功能。具体来讲,防护体系的功能应至少包括两个方面的内容:1)对于具有活化倾向的断层,根据断层滑移过程的能量释放特征,防护体系允许断层产生一定的滑移且能够对其滑动速度做到安全可控,主动释放其内部积聚的能量,同时降低断层-煤岩系统中的高应力集中水平,使应力集中区向煤岩体深部转移,这样就有利于降低断层错动型冲击地压发生的可能性或者大大减轻其发生强度,从而阻止或控制因断层被活化而诱发冲击地压等动力灾害。2)当断层错动型冲击地压发生时,防护体系通过自身的吸能让位能力来适应断层活化时滑动煤岩体的冲击大变形,在控制冲击能量安全释放的同时能够保持恒定的支护阻力,并确保支护体系不被冲击所损坏,最重要的是能够最大程度地减轻断层错动型冲击地压造成的破坏。有效吸能、抗冲击的防护技术的研发,一方面需要研发能快速吸能、抗冲击的支护新材料,另一方面要结合地下采矿实际构建能有效吸能的工程结构体系。

3.2.7 发展有利于控制冲击灾害的采矿方法

针对断层错动型冲击地压的特点,可以优化现有的采矿方法和工艺,研究和采用与高应力环境相适应的、有利于减小和控制断层区域煤岩体能量积聚和释放的采矿方法和工艺措施,从而实现深井矿床安全、经济、高效开采。未来还应该发展非传统的采矿方法和工艺,本着少扰动的原则,着重智能化精细化开采,实现生产操作的智能化。遥控智能化无人采矿不仅对煤矿断层错动型冲击地压等动力灾害的防控具有重要意义,而且是实现采矿安全高效最大化的必由之路。深部无人采矿关键工程科技等方面的战略研究将推动中国在深部采矿领域取得具有国际领先水平的重要突破,使中国成为未来世界的

采矿强国。

4 结 论

1)针对当今煤矿断层错动型冲击地压灾害的严峻形势,通过梳理国内外文献,系统总结和分析了断层错动型冲击地压致灾机制(包括断层活化机制及其判别准则、断层错动型冲击地压理论、发生条件及其孕育过程)、监测预警技术和防控措施等方面的研究进展及成果。在分析以上问题的同时,又提出了一些新的理论观点、见解和建议,进一步提高了断层错动型冲击地压灾害防治的理论认知水平。

2)指出了当前有关断层错动型冲击地压方面的研究还存在一些不足,如断层活化机制尚未完全清楚、断层错动型冲击地压理论还不成体系、数值模拟计算与真实的地质构造条件相差较大、从地应力角度对断层错动型冲击地压致灾机理的研究较少、断层错动型冲击地压监测的基础理论和技术设备还不完善、与断层错动型冲击地压相关的复杂与复合动力灾害还未形成完善的一体化防治理论体系、没有系统地建立起与高应力环境相适应的且有利于控制该类型冲击灾害的采矿方法和工艺措施等。

3)对未来断层错动型冲击地压领域的研究重点与发展趋势进行了展望,指出今后应深化研究断层错动型冲击地压孕育诱发机理、研发深部地应力精确测量装备和技术、加强采动诱导断层滑移的大型数值仿真研究、构建智能化可视化的断层错动型冲击地压精准监测与预警体系、加强与断层错动型冲击地压相关的复杂与复合动力灾害一体化防治体系研究、研发能够有效吸能与抗冲击的防护技术以及发展有利于控制断层错动型冲击地压的采矿方法和工艺等。

4)总的来看,关于断层错动型冲击地压灾害在理论研究、技术研发及现场应用等方面的研究均取得了实质性进展,取得了良好的效果。但应清醒地认识到,断层错动型冲击地压的有效监测预警、综合控制及安全防护等方面的状况依然不容乐观,这些问题仍是严重制约中国深部煤矿安全高效开发的关键性技术瓶颈之一。尽快破解煤矿深部开采中断层错动型冲击地压研究方面所面临的一系列关键科学技术难题,实现对这类动力灾害的安全防护和有效控制及提升中国矿山的安全生产技术与管理水平已迫在眉睫。

参考文献

- [1] 潘一山,王来贵,章梦涛,等.断层冲击地压发生的理论与试验研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6):642-649.
PAN Yishan, WANG Laigui, ZHANG Mengtao, et al. The theoretical and testing study of fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642-649.

- [2]姜耀东,王涛,陈涛,等.“两硬”条件正断层影响下的冲击地压发生规律研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(Sup2):3712-3718.
JIANG Yaodong, WANG Tao, CHEN Tao, et al. Features of coal bumps influenced by normal faults in coal mining with hard roof and hard coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup2): 3712-3718.
- [3]杨随木,张宁博,刘军,等.断层冲击地压发生机理研究[J].煤炭科学技术,2014,42(10):6-9. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2014.10.002.
YANG Suimu, ZHANG Ningbo, LIU Jun, et al. Research on mechanism of fault rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 6-9. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2014.10.002.
- [4]蒋金泉,武泉林,曲华.硬厚岩层下逆断层采动应力演化与断层活化特征[J].煤炭学报,2015,40(2):267-277. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0156.
JIANG Jinquan, WU Quanlin, QU Hua. Characteristic of mining stress evolution and activation of the reverse fault below the hard-thick strata[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 267-277. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0156.
- [5]王存文,姜福兴,刘金海.构造对冲击地压的控制作用及案例分析[J].煤炭学报,2012,37(增刊2):263-268. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2012.s2.030.
WANG Cunwen, JIANG Fuxing, LIU Jinhai. Analysis on control action of geologic structure on rock burst and typical cases[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(Sup2): 263-268. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2012.s2.030.
- [6]陈法兵.断层活化规律及其对冲击地压的影响[D].北京:煤炭科学研究总院,2012.
CHEN Fabing. Study on laws of fault activation and its influence to rock burst[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2012.
- [7]吕进国.巨厚坚硬顶板条件下逆断层对冲击地压作用机制研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
LYU Jinguo. Influence mechanism research of coal bump induced by thrust fault based on huge thick and hard roof[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, Beijing, 2013.
- [8]赵善坤,刘军,李钢锋.断层影响下冲击地压多参量预测预报研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2012,31(2):145-149. DOI:10.16186/j.cnki.1673-9787.2012.02.022.
ZHAO Shankun, LIU Jun, LI Gangfeng. Research of fault rockburst prediction with multi-parameter[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2012, 31(2): 145-149. DOI:10.16186/j.cnki.1673-9787.2012.02.022.
- [9]李志华,窦林名,曹安业,等.采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理[J].煤炭学报,2011,36(增刊1):68-73. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2011.s1.024.
LI Zhihua, DOU Linming, CAO Anye, et al. Mechanism of fault slip induced rockburst during mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Sup1): 68-73. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2011.s1.024.
- [10]蔡武.断层型冲击矿压的动静载荷叠加诱发原理及其监测预警研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
CAI Wu. Fault rockburst induced by static and dynamic loads superposition and its monitoring and warning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [11]韩军.煤矿冲击地压地质动力环境研究[J].煤炭科学技术,2016,44(6):83-88.
HAN Jun. Study on geologic dynamic environment of mine strata pressure bump[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 83-88.
- [12]吕进国,姜耀东,南存全,等.深部逆断层圆弧形断面诱发煤岩动力灾害的力学分析[J].重庆大学学报,2016,39(1):113-119. DOI:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.01.015.
LYU Jinguo, JIANG Yaodong, NAN Cunquan, et al. Mechanical analysis of underground dynamic disasters induced by thrust faults of an arc fault plane[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(1): 113-119. DOI:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.01.015.
- [13]姜耀东,赵毅鑫.我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2188-2204. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2015.1076.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2015.1076.
- [14]LI Z L, DOU L M, CAI W, et al. Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 70(9): 192-200.
- [15]李志华,窦林名,陆振裕,等.采动诱发断层滑移失稳的研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(4):499-504.
LI Zhihua, DOU Linming, LU Zhenyu, et al. Study of the fault slide destabilization induced by coal mining[J]. Journal of mining and safety engineering, 2010, 27(4): 499-504.
- [16]夏永学,王金华,毛德兵.断层活化的地应力判别准则及诱发冲击地压的典型微震特征[J].煤炭学报,2016,41(12):3008-3015. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0528.
XIA Yongxue, WANG Jinhua, MAO Debing. Analysis of fault activation induced rock burst risk based on in-situ stress measurements[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3008-3015. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0528.
- [17]张宁博.断层冲击地压发生机制与工程实践[D].北京:煤炭科学研究总院,2014.
ZHANG Ningbo. Mechanism and engineering practice of fault rockburst[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014.
- [18]孙晓元,杨威,张飞,等.老虎台矿55002#掘进面通过F7-1断层前后微震事件的时空特征分析[J].中国安全生产科学技术,2011,7(4):71-74.
SUN Xiaoyuan, YANG Wei, ZHANG Fei, et al. Space-time characteristics analysis of microearthquake events before & after F7-1 fault on 55002 heading face in Laohutai colliery[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(4): 71-74.
- [19]山东煤矿安全监察局.关于星村“8.5”冲击地压事故的通报[DB/OL].(2013-09-03)[2017-12-01].http://www.sdcoal.gov.cn/articles/ch00193/201309/b2389f4e-3d70-40f6-aa3f-5db32d005bea.shtml.
- [20]WALLACE R E. Geometry of shearing stress and relation to faulting[J]. Journal of Geology, 1951, 59(2): 118-130. DOI:10.1086/625831.
- [21]BOTT M H P. The mechanics of oblique slip faulting[J]. Geological Magazine, 1959, 96(2): 109-117. DOI:10.1017/S0016756800059987.
- [22]BRACE W F, BYERLEE J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes[J]. Science, 1966, 153(3739): 990-992. DOI:10.1126/science.153.3739.990.
- [23]BRACE W F. Laboratory studies of stick-slip and their application to earthquakes[J]. Tectonophysics, 1972, 14(3): 189-200. DOI:10.1016/0040-1951(72)90068-6.

- [24] PERFETTINI H, SCHMITTBUHL J, COCHARD A. Shear and normal load perturbations on a two-dimensional continuous fault: 2. Dynamic triggering[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B9): 2409. DOI:10.1029/2002JB001805.
- [25] JOHNSON P A, JIA X P. Nonlinear dynamics, granular media and dynamic earthquake triggering[J]. *Nature*, 2005, 437(7060): 871–874. DOI:10.1038/nature04015.
- [26] 王学滨, 潘一山, 海龙. 基于剪切应变梯度塑性理论的断层岩爆失稳判据[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(4): 588–591. WANG Xuebin, PAN Yishan, HAI Long. Instability criterion of fault rockburst based on gradient-dependent plasticity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 588–591.
- [27] 李振雷, 窦林名, 蔡武, 等. 深部厚煤层断层煤柱型冲击地压机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(2): 333–342. LI Zhenlei, DOU Linming, CAI Wu, et al. Fault-pillar induced rock burst mechanism of thick coal seam in deep mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 333–342.
- [28] SAINOKI A, MITRI H S. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 66(1): 19–29. DOI:10.1016/j.ijrmms.2013.12.003.
- [29] 张曦. 采动影响下断层错动型冲击地压发生的机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2016. ZHANG Xi. Mechanism study on the occurrence of fault coal burst under the influence of mining[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [30] 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. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0024. 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. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0024.
- [31] 潘岳, 解金玉, 顾善发. 非均匀围压下矿井断层冲击地压的突变理论分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(3): 310–310. PAN Yue, XIE Jinyu, GU Shanfa. Catastrophe theory analysis of mining fault rockburst under nonuniform surrounding pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(3): 310–310.
- [32] JI H G, MA H S, WANG J A, et al. Mining disturbance effect and mining arrangements analysis of near-fault mining in high tectonic stress region[J]. *Safety Science*, 2012, 50(4): 649–654.
- [33] 王涛. 断层活化诱发煤岩冲击失稳的机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012. WANG Tao. Mechanism of coal bumps induced by fault reactivation[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, Beijing, 2012.
- [34] 赵扬锋, 潘一山, 于海军. 基于剪切梁层间失效模型的断层冲击地压分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(8): 1571–1576. DOI:10.16285/j.rsm.2007.08.001. ZHAO Yangfeng, PAN Yishan, YU Haijun. Analysis of fault rockburst based on shear beam model for interface failure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(8): 1571–1576. DOI:10.16285/j.rsm.2007.08.001.
- [35] CAI M F, JI H G, WANG J A. Study of the time-space-strength relation for mining seismicity at Laohutai coal mine and its prediction[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(1): 145–151. DOI:10.1016/j.ijrmms.2004.08.001.
- [36] 纪洪广, 王金安, 蔡美峰. 冲击地压事件物理特征与几何特征的相关性与统一性[J]. *煤炭学报*, 2003, 28(1): 31–36. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2003.01.007. JI Hongguang, WANG Jin'an, CAI Meifeng. Relativity and unity of physical and geometrical characteristics of rockbursting events[J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(1): 31–36. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2003.01.007.
- [37] 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. DOI:10.13199/j.cst.2002.07.50.peigw.016. PEI Guangwen, JI Hongguang. Prediction on energy classification of structure type pressure bump during deep mining operation[J]. *Coal Science and Technology*, 2002, 30(7): 48–51. DOI:10.13199/j.cst.2002.07.50.peigw.016.
- [38] 赵毅鑫, 姜耀东, 张雨. 冲击倾向性与煤体细观结构特征的相关规律[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(1): 64–68. DOI:10.3321/j.issn:0253-9993.2007.01.014. ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, ZHANG Yu. The relationship between bump-prone property and microstructure characteristics of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(1): 64–68. DOI:10.3321/j.issn:0253-9993.2007.01.014.
- [39] 姜耀东, 赵毅鑫, 何满潮, 等. 冲击地压机制的细观实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 901–907. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2007.05.005. JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, HE Manchao, et al. Investigation on mechanism of coal mine bumps based on mesoscopic experiments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 901–907. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2007.05.005.
- [40] 赵毅鑫. 煤矿冲击地压机制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2006. ZHAO Yixin. Investigation on the mechanisms of coal mine bumps[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, Beijing, 2006.
- [41] 毛德兵, 陈法兵. 采动影响下断层活化规律及其诱发冲击地压的防治[J]. *煤矿开采*, 2013, 18(1): 73–76, 65. DOI:10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2013.01.013. MAO Debing, CHEN Fabing. Faultactivation rules influenced by mining and prevention of rock-burst[J]. *Coal Mining Technology*, 2013, 18(1): 73–76, 65. DOI:10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2013.01.013.
- [42] 李守国, 吕进国, 姜耀东, 等. 逆断层不同倾角对采场冲击地压的诱导分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(6): 869–875. DOI:10.13545/j.issn1673-3363.2014.06.007. LI Shouguo, LYU Jinguo, JIANG Yaodong, et al. Coal bump inducing rule by dip angles of thrust fault[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(6): 869–875. DOI:10.13545/j.issn1673-3363.2014.06.007.
- [43] 潘一山, 章梦涛. 冲击地压失稳理论的解析分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(增刊1): 504–510. PAN Yishan, ZHANG Mengtao. The exact solution for rockburst in coal mine by unstability rockburst theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(Sup1): 504–510.
- [44] SAINOKI A. Dynamic modelling of mining-induced fault-slip[D]. Montreal: McGill University, 2014.
- [45] ISLAM M R, SHINJO R. Mining-induced fault reactivation associated with the main conveyor belt roadway and safety of the Barapukuria coal mine in Bangladesh: constraints from BEM simulations[J]. In-

- ternational Journal of Coal Geology, 2009, 79(4): 115-130.
- [46]宋义敏,马少鹏,杨小彬,等.断层冲击地压失稳瞬态过程的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):812-817. SONG Yimin, MA Shaopeng, YANG Xiaobin, et al. Experimental investigation on instability transient process of fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 812-817.
- [47]王涛,姜耀东,赵毅鑫,等.断层活化与煤岩冲击失稳规律的实验研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(2):180-186. DOI:10.13545/j.issn1673-3363.2014.02.003. WANG Tao, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, et al. Experimental research on fault reactivation and relating coal bumps[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(2): 180-186. DOI:10.13545/j.issn1673-3363.2014.02.003.
- [48]李成成.综放开采断层应力分布特征与冲击危险评价研究[D].青岛:山东科技大学,2010. LI Chengcheng. Research on the impact of risk assessment and the distribution characteristics of fault stress during fault mechanized sublevel caving mining[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [49]罗浩,李忠华,王爱文,等.深部开采临近断层应力场演化规律研究[J].煤炭学报,2014,39(2):322-327. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2013.2016. LUO Hao, LI Zhonghua, WANG Aiwen, et al. Study on the evolution law of stress field when approaching fault in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 322-327. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2013.2016.
- [50]李志华.采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2009. LI Zhihua. Research on rockburst mechanism induced by fault slip during coal mining operation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [51]王爱文,潘一山,李忠华,等.断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研究[J].岩土力学,2014(9):2486-2492. DOI:10.16285/j.rsm.2014.09.020. WANG Aiwen, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Similar experimental study of rockburst induced by mining deep coal seam under fault action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(9): 2486-2492. DOI:10.16285/j.rsm.2014.09.020.
- [52]张科学,何满潮,姜耀东.断层滑移活化诱发巷道冲击地压机理研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2):12-20. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.02.003. ZHANG Kexue, HE Manchao, JIANG Yaodong. Mechanism research of roadway pressure bump induced by fault slip and activation[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 12-20. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.02.003.
- [53]CHEN X, LI W, YAN X. Analysis on rock burst danger when fully-mechanized caving coal face passed fault with deep mining[J]. Safety Science, 2012, 50(4): 645-648.
- [54]朱斯陶,姜福兴, KOUAME K J A, 等.深井特厚煤层综放工作面断层活化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(1):50-58. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.1574. ZHU Sitao, JIANG Fuxing, KOUAME K J A, et al. Fault activation of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep shaft[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 50-58. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.1574.
- [55]王恩元,何学秋,刘贞堂,等.煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用[J].煤炭学报,2003,28(4):366-369. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2003.04.007. WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, et al. Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 366-369. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2003.04.007.
- [56]何学秋,聂百胜,王恩元,等.矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警技术[J].煤炭学报,2007,32(1):56-59. DOI:10.3321/j.issn:0253-9993.2007.01.012. HE Xueqiu, NIE Baisheng, WANG Enyuan, et al. Electromagnetic emission forecasting technology of coal or rock dynamic disasters in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 56-59. DOI:10.3321/j.issn:0253-9993.2007.01.012.
- [57]夏永学,潘俊峰,王元杰,等.基于高精度微震监测的煤岩破裂与应力分布特征研究[J].煤炭学报,2011,36(2):239-243. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2011.02.014. XIA Yongxue, PAN Junfeng, WANG Yuanjie, et al. Study of rule of surrounding rock failure and stress distribution based on high-precision microseismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 239-243. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2011.02.014.
- [58]陆菜平,窦林名,王耀峰,等.坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应[J].地球物理学报,2010,53(2):450-456. DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.024. LU Caiping, DOU Linming, WANG Yaofeng, et al. Microseismic effect of coal materials rockburst failure induced by hard roof[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 450-456. DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.024.
- [59]张群.采动诱发断层活化的数值模拟及微震监测研究[D].焦作:河南理工大学,2011. ZHANG Qun. The numerical simulation and seismic monitoring research of mining induced fault activation[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.
- [60]姜福兴,苗小虎,王存文,等.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):900-903. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2010.06.008. JIANG Fuxing, MIAO Xiaohu, WANG Cunwen, et al. Predicting research and practice of tectonic-controlled coal burst by microseismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 900-903. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2010.06.008.
- [61]苗小虎,姜福兴,王存文,等.微地震监测揭示的矿震诱发冲击地压机理研究[J].岩土工程学报,2011,33(6):971-976. MIAO Xiaohu, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. Mechanism of microseism-induced rock burst revealed by microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 971-976.
- [62]LIU X S, TAN J, TAN Y L, et al. Pattern recognition of signals for the fault-slip type of rock burst in coal mines[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015(6): 1-8. DOI:10.1155/2015/806969.
- [63]张月征,纪洪广,向鹏,等.基于矿山钻孔应变观测数据时程分形特征的冲击地压前兆分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊1):3222-3231. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2015.0958. ZHANG Yuezheng, JI Hongguang, XIANG Peng, et al. Analysis of precursor of rock burst based on the fractal characteristics of the mine borehole strain observation data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup1): 3222-3231. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2015.0958.