

我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题

曹安业^{1,2}, 窦林名¹, 白贤栖¹, 刘耀琪¹, 杨科³, 李家卓³, 王常彬⁴

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001; 4. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:随着我国煤矿开采深度和开采强度不断增加, 煤矿矿震以前所未有的频度和强度展现出来, 引起政府部门和社会民众的广泛关注。在政府倡导及科研人员积极探索下, 我国在矿震致灾机理研究与工程治理实践方面取得了一系列重要进展, 在正确认识矿震现象与矿震灾害防控方面取得了长足进步。总结了矿震发生现状, 基于我国煤矿矿震研究成果, 系统阐述了矿震发生机理、破坏效应、防治技术等方面研究进展与主要难题。结论如下: 矿震发生条件复杂, 诸多学者从不同角度给出了矿震的定义与分类, 总结前人研究后笔者从狭义和广义方面提出了矿震定义, 根据矿震发生后的现象及发生机理对矿震进行了分类; 矿震致灾现象普遍存在于矿山开采活动中, 世界主要采矿国家均有记录, 矿震灾害的专业预防与治理已刻不容缓; 我国矿震的专业治理起步较晚, 但近年来国家部委、省市以及地方管理机关陆续颁布关于矿震防范的规章制度, 有力提升了我国矿震灾害治理和应急处置能力; 总结了我国煤矿矿震宏观触发机制包括煤柱失稳诱发矿震、顶板破断运动诱发矿震以及断层错动滑移诱发矿震, 矿震微观破裂机制包括震源张拉破裂、震源内爆破裂以及震源剪切破裂; 从矿震震源参量、震动波传播衰减规律以及震动波扰动情况等方面探讨了矿震的致灾效应, 归纳了矿震对井上下的扰动致灾评估方法; 以源头防控为宗旨, 以精准预防为方针, 概括了我国煤矿矿震治理现状与难题。当前, 我国煤矿矿震依然存在“震源找不准、灾害控不住”等难题, 亟待深入研究矿震孕育发生机理、破坏效应及防控技术方法, 以保障煤炭绿色安全高效开采, 支撑国家深部资源开发和能源安全战略。

关键词: 煤矿矿震; 发生机理; 破坏效应; 震源破裂机制; 治理技术

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2023)05-1894-25

State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines

CAO Anye^{1,2}, DOU Linming¹, BAI Xianxi¹, LIU Yaoqi¹, YANG Ke³, LI Jiazhao³, WANG Changbin⁴

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of Deep Coal Mine Excavation Response & Disaster Prevention and Control, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 4. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

收稿日期: 2023-02-28 修回日期: 2023-04-17 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0278

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3004603); 国家自然科学基金资助项目 (52274098, U21A20110)

作者简介: 曹安业 (1982—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士。E-mail: caoanye@163.com

通讯作者: 窦林名 (1963—), 男, 青海平安人, 教授, 博士。Tel: 0516-83995904, E-mail: lmdou@126.com

引用格式: 曹安业, 窦林名, 白贤栖, 等. 我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1894-1918.

CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianxi, et al. State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1894-1918.



移动阅读

Abstract: With an increasing mining depth and intensity in Chinese coal mines, unprecedented frequency and intensity of mining tremors are attracting extensive attention from the government and society. Under the initiatives from the government and the intensive investigations, significant progress has been made in the research and engineering practice, which greatly enhances the understanding and hazard control of the mining tremors. This paper reviewed the state-of-the-art occurrence mechanism, damage characteristics and control of the mining tremors in Chinese coal mines and demonstrated their main challenges. The conclusions are as follows: due to the complicated occurrence conditions of mining tremors, various definitions and classifications of mining tremors have been proposed from different aspects. This paper has summarized these definitions and classifications and defines mining tremors from special and general aspects, respectively, which classify mining tremors in terms of phenomena and occurrence mechanisms. Because mining tremors are widespread in all mining countries in the world, targeted mining tremor hazards prevention and control are urgently needed. Although the research started late in China, the hazard control of mining tremors and the emergency dealing capacity have been significantly enhanced in recent years due to the implementation of the regulations and rules from the government for mining tremors prevention and control. It has been summarized that from the macro view, the triggering of mining tremors is mainly induced by the coal pillar failure, roof breakage and movement and fault slip, and from the micro view, the triggering of mining tremors mainly includes tension rupture, implosion rupture and shear rupture. The mining-tremor-induced hazards have been surveyed in terms of source parameters, seismic wave attenuation and seismic wave disturbances, and the methods for evaluating surface and underground damage triggered by mining tremors have been also concluded. To achieve hazard source control and precise prevention, the current situation of mining tremors treatment in Chinese coal mines has been outlined. At present, Chinese coal mines, it is still far away to achieve accurate hazard source identification and full hazard control. Therefore, to support the national strategy of deep resources development and energy security, future studies should focus on investigating the hazard-forming mechanism, damage effect and prevention and control technologies of mining tremors.

Key words: mining tremors; occurrence mechanism; failure effect; focal mechanism; prevention and control technologies

矿震是指矿山采掘活动诱发的非天然地震现象^[1]。矿震在各类诱发地震中危害性最大,观测与研究时间最长,通常伴随弹性能迅速释放,并以震动波的形式向外传播能量,造成地下工程结构或地面建(构)筑物的损坏^[2-3]。矿震会加剧原处于高应力状态的岩体产生动态失稳;矿震能量越大,越容易造成地下工程空间结构的瞬时失稳,形成矿井冲击地压、岩爆、煤与瓦斯突出、突水、顶板冒落等矿震灾害,瞬间摧毁大范围采掘和巷道空间、破坏通风系统、损毁机电设备,造成大量人员伤亡^[4-5]。如2019-06-09吉林龙家堡煤矿发生冲击地压事故(矿震灾害),震级2.3级,9人死亡^[6];2019-08-02河北唐山煤矿发生2.0级矿震灾害,7人死亡^[7];2020-02-22山东龙垆煤矿发生2.5级矿震灾害,4人死亡^[8]。此外,2021年来,山东星村、东滩,陕西金鸡滩、崔家沟,内蒙古石拉乌素、红庆河等煤矿陆续发生2.0级以上的矿震事件,虽未造成井下人员伤亡,但地面震感强烈,社会影响恶劣^[9]。

可见部分矿震不仅会诱发井下冲击地压、煤与瓦斯突出等次生灾害,还导致地面震感强烈、建筑物损毁等严重后果,使得矿震问题由采矿安全问题演化为公共安全问题^[10]。目前,矿震问题已引起国家有关部

门和诸多学者的广泛关注,是行业内的研究热点和前沿问题。因此,深入揭示矿震发生机理、研究矿震破坏效应以及提高矿震治理水平是亟待解决的现实问题。

经过长期研究,我国学者在矿震研究领域与工程实践方面成果显著。在矿震发生机理及致灾效应方面,陆续提出了矿震宏观触发机制^[2,11]、矿震震源破裂机制^[12-13]、矿震传播衰减规律及致灾效应^[14-15]等,对研究人员科学评价、理性认识矿震与矿震灾害具有指导意义。同时,在矿震监测技术与装备研发方面,我国具有世界领先的微震监测技术^[16],在结合矿震发生机理的基础上升级改造了井地联合矿震监测系统,并逐渐装备到受矿震威胁较为严重的矿井。在矿震治理方面以“有震消灾”、“有震减灾”、“有震无灾”、“无震无灾”为目的^[17],从源头防控入手,以精准预防为切入点,通过区域防范与风险调控、风险预测与实时预警及卸压控制与主动防护等技术手段,有效防治矿震灾害发生。

笔者从矿震发生现状、煤矿矿震机理研究现状、煤矿矿震破坏效应研究现状、煤矿矿震灾害防治研究现状等方面对已有研究成果和发展历程进行归纳,对其中关键科学及技术问题进行提炼,并结合目前研究

发展趋势与方向对煤矿矿震灾害治理主要难题进行展望,为进一步提高我国矿震灾害治理水平提供思路。

1 矿震发生现状

1.1 矿震定义及分类

国际上关于矿震的定义较为统一,认为矿震是采矿诱发地震,但此定义较为广泛,未体现出矿震的工程背景、发生机理以及破坏形式等。矿震在矿区内常被称为“矿山震动”、“坍塌地震”、“微震”、“煤炮”、“煤爆”、“岩爆”、“冲击地压”等^[18],英文名词也包含 mine earthquake、mining tremor、shock bump、mine seismicity、ore earthquake、microearthquake、microquake、microseismic 等,这反映了研究人员对“矿震”术语界定还存在一定认知差异。

外界人士大多认为矿震就是矿塌,即坍塌地震^[18]。部分研究者将岩爆、冲击地压统称为矿震,认为岩爆又称冲击地压、矿震,是采矿、隧道及水利水电等开挖活动诱发的地震^[19]。张少泉等^[20]将由地面或几百米浅层和上千米深层的矿山开采引起的地震活动,统称为采矿诱发地震,简称矿山地震。张兆平等^[21]认为矿震属于矿体-围岩系统在其力学平衡状态被破坏并且释放出大于消耗能量的瞬间震动。吴淑才等^[22]将矿震定义为,发生在矿区范围内,在一定地质背景和地质构造条件下,既与区域应力场有某种相关,又与矿区构造运动相关联的各种矿山动力现象,并受矿山开采规模和开采方式影响而发生的震动。朱佩武^[23]、惠乃玲等^[24]认为矿震是矿区内在区域应力场和采矿活动作用影响下,使采区及周围应力处于失调不稳的异常状态,在局部地区积累了一定能量后以冲击或重力等作用方式释放出来而产生的岩层振动。李铁等^[25]将地下资源开采扰动导致岩体破裂,释放弹性能可被微震设备检测到弹性波的微震事件全集称为矿震。刘金海等^[26]认为矿震是一种由采矿活动诱发的矿井地震,与地震相比矿震多是被诱发的一种微地震。姜福兴等^[27]认为矿震是指矿区范围内有震感的动力现象。姜耀东等^[28]根据全国科学技术名词审定委员会审定公布认为,矿震是指井巷或工作面周围煤岩体中突然在瞬间发生伴有巨响和冲击波的震动但不发生煤岩抛出的弹性变形能释放现象。朱建波等^[2]认为矿震是伴随地下固体资源开发的因开采扰动岩体快速释放弹性能所造成的震动现象,具有广泛性、震动性与致灾性。

根据矿震所处矿井类型不同可将矿震分为煤矿矿震、钾盐矿矿震和金属矿矿震等^[20]。目前较为普遍的观点是把煤矿矿震分为 2 类:第 1 类矿震发生在开

采工作面或邻近开采工作面数十至数百米,与开采活动直接相关;第 2 类矿震发生在远离开采工作面数百至数千米区域已存在的软弱带或地质间断面,与开采活动间接相关^[29]。HOMER 等^[30]和 HASEGAWA 等^[31]根据围岩破坏形式和矿震发生地点,将矿震分为顶板冒落型、煤柱内爆型、顶板张拉破坏型、顶板正断层滑移型、底板俯冲断层型以及顶板近水平的浅俯冲断层型。张少泉等^[20]根据巷道周围构造和开采环境应力将其分为顶板冒落型、顶板开裂型、矿柱冲击型以及断层活动型 4 类矿震。潘一山等^[32]根据煤岩体失稳机理将煤矿矿震划分为煤柱压缩型、顶板断裂型以及断层错动型。齐庆新等^[33]依据矿震的致灾性将其划分为典型灾害型矿震和非典型灾害型矿震。童迎世等^[34]根据矿震形成机制将其划分为矿山构造型、矿山塌陷型和矿山岩(煤)爆型三大类。SCOTT 等^[35-36]根据矿震最大震级、峰值振幅与岩石突出量将震级大于 0.5 级或峰值振幅大于 30 mm、岩石突出量大于 1 t 的矿震划分为大矿震事件或岩爆,反之定义为微震或小震动事件。李铁等^[37]综合考虑矿震的发生原因(机制)、作用力、介质物理力学性质及岩层结构、发生部位及破坏特征等方面的因素,提出了一种基于矿震机制的层级分类方法,将矿震分为 5 个层级 16 种类型。窦林名等^[11]综合分析矿震震动能量、波形特征、震源位置等信息,将矿震分为采动破裂型、巨厚覆岩型和高能震动型 3 种类型。OHTSU^[38]、笔者^[12]等根据矿震震源的破裂机制,将矿震分为张拉型、剪切型、压剪混合型、拉剪混合型、内爆型;朱建波等^[2]在此基础上,将煤矿矿震分为张拉型矿震与剪切型矿震。CAI 等^[39]将震动事件按波动频率分类,把矿震事件分为声发射、微震、岩爆、地震等不同现象的震动事件,如图 1 所示。

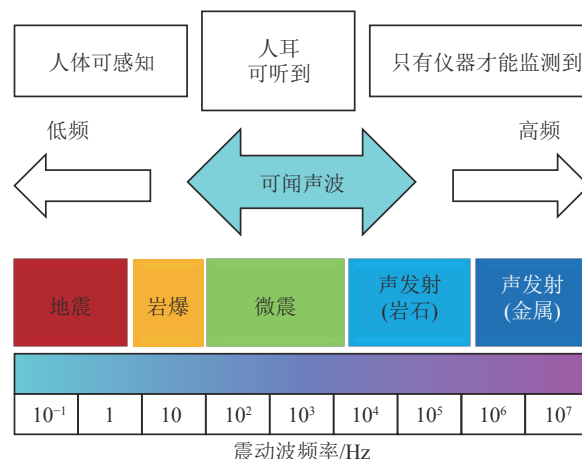


图 1 震动事件频谱^[39]

Fig.1 Seismic motion frequency spectrum^[39]

以上研究成果均从不同角度给出了矿震的定义与分类,但随着科技的进步,人们对矿震的认识已从肉眼的宏观考察发展到借助现代设备的微观物理观测。因此,笔者在总结前人研究成果的基础上,提出矿震定义与分类。

矿震,又称采矿诱发地震、矿山地震。狭义上可定义为矿区范围内人体可感知的有震感的动力现象;广义上可定义为发生在矿区范围内,因地下资源开采扰动导致煤岩体快速释放弹性能所造成的震动现象,并被监测设备监测到的微震事件全集。

根据矿震发生后的现象,笔者从有无震感及致灾两方面将矿震分为有感矿震、无感矿震以及灾害型矿震、非灾害型矿震;根据矿震的宏观发生机理将矿震分为煤体失稳型矿震、顶板运动型矿震以及断层错动型矿震;根据矿震震源的微观破裂机制将矿震划分为剪切破裂型矿震、张拉破裂型矿震以及内爆破裂型矿震。具体如图2所示。

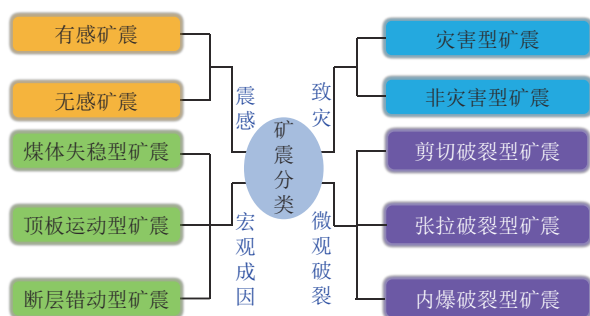


图2 煤矿矿震分类

Fig.2 Classification of mining tremors

1.2 矿震与冲击地压的关系

近年来,我国煤矿矿震现象表现出前所未有的频度、强度和复杂性,众多不同领域的学者投入了大量时间和精力。已有的矿震定义多是根据某一研究角度提出的,并且地震、诱发地震、矿震和冲击地压等某些方面具有相近的特征^[40],导致上述定义在释义和使用上容易出现混淆。针对地震、诱发地震、矿震之间的关系争议较小,普遍认为地震可分为天然地震和诱发地震^[2],矿震属于诱发地震的一种,GILLIAN等^[41]研究得到,采矿诱发地震约占诱发地震的38%。随着对煤矿矿震与冲击地压的深入认识,正确界定煤矿矿震与冲击地压,厘清两者的区别与联系,是提高矿震与冲击地压治理水平的重要前提。

冲击地压是聚集在巷道和采场周围煤岩体中的能量突然释放,将煤岩抛向巷道,同时发出强烈声响,造成煤岩体震动和破坏,支架与设备损坏,人员伤亡,部分巷道垮落破坏等的动力现象^[42],破坏性是判断冲

击地压发生的重要标志。矿震狭义与广义上的定义不同,其与冲击地压的关系也有一定的区别。

根据矿震狭义上定义,震动性是矿震的首要特征,很多学者将矿震看作诱发冲击地压的动载来源之一,研究了矿震扰动诱发冲击地压机理^[17]。狭义上的矿震与冲击地压的关系可概括为:强烈的冲击地压能够引起矿震,矿震可能诱发冲击地压。例如2020-02-22山东龙垆煤矿发生冲击地压事故,造成4人死亡120 m巷道损坏严重,并引起地面强烈震动;2019-06-19吉林龙家堡煤矿放顶煤断层活化发生2.3级矿震,造成强烈的冲击地压事故,导致井下9人遇难,220 m巷道破坏。根据矿震广义上的定义可知,矿震具有广泛性,只要进行地下资源开采,一定会有矿震产生。广义上的矿震与冲击地压的关系为:冲击地压是矿震的子集,在矿震全集的占比较小,冲击地压的发生都与矿震有关,但并非每一次矿震都会引发冲击地压。综上,将地震、诱发地震、矿震与冲击地压之间的关系概况为图3。

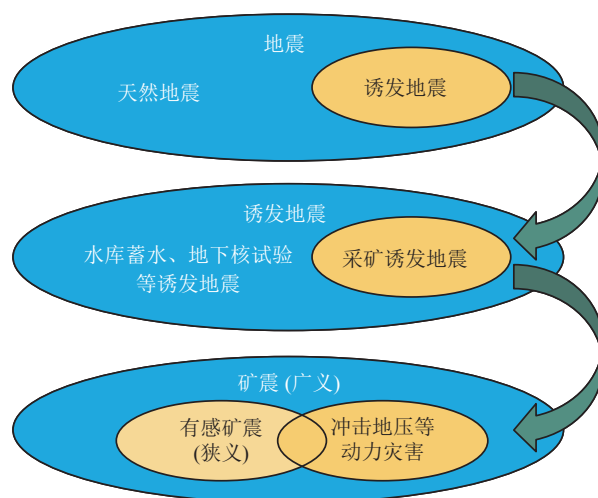


图3 地震、诱发地震、矿震与冲击地压的关系

Fig.3 Relationship diagram of earthquake, induced earthquake, mining tremors and rock burst

1.3 矿震发生情况

矿震普遍存在于矿山开采活动中,是采掘活动必然出现的动力现象。1738年英国南斯坦福煤田首次记录有矿震现象^[43],1872年捷克斯洛伐克的克拉德诺(Kladno)煤矿提供了第1篇采矿诱发地震的文字记录^[2],1908年德国鲁尔煤田的博卡(bochcum)矿区建立了第1个矿震监测台站^[44]。统计1908—2022年全球范围内矿震发生情况如图4所示,世界范围内共发生有记录的2.0级以上矿震320余起,中国、俄罗斯、南非、美国、加拿大、澳大利亚以及欧洲等国矿震事件最为频繁。

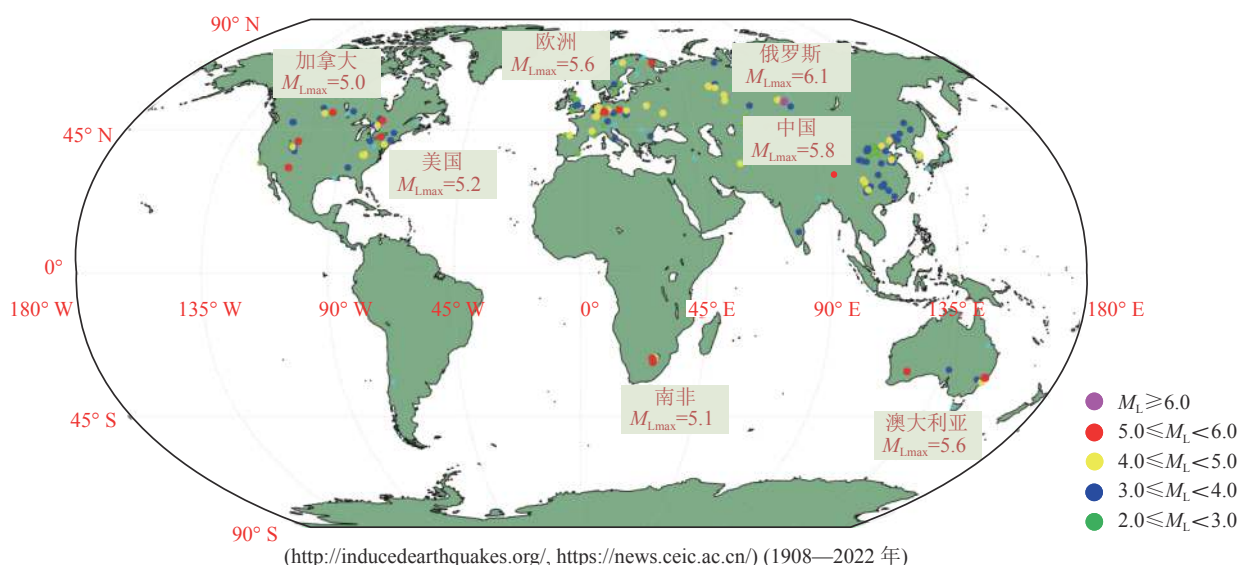


图 4 全球矿震分布情况

Fig.4 Global distribution of mine earthquakes

其中,俄罗斯巴恰茨基 (Bachatsky) 露天煤矿开采矿震事件频发,2013-06-18 发生世界最大震级 6.1 级的矿震,地表建筑物损毁严重^[45];南非威特沃特斯兰德盆地 (Witwatersrand Basin) 强矿震活动在世界范围最为著名,1994-10-30 发生最大震级 5.6 级的矿震,地表震感强烈^[46];美国犹他 (Utah)、爱达荷州 (Idaho)、怀俄明州 (Wyoming) 等区域的矿震活动频繁,1995-02-03 怀俄明州发生最大 5.2 级煤矿塌陷矿震^[47];加拿大的矿震活动已涉及钾矿、煤矿、金属矿等多个硬岩和软岩矿井,1964 年加拿大赖特哈格里夫斯矿开采过程中发生最大震级 5.0 级的强矿震,导致该矿关闭^[48];澳大利亚新南威尔士纽卡斯尔 (Newcastle) 煤田开采矿震事件显著,1989-12-27 纽卡斯尔煤矿发生主震级 5.6 级的矿震^[49]。欧洲德国^[50]、波兰^[51]、捷克斯洛伐克^[52]、英国^[53]等国家矿震活动频繁,德国钾盐矿 (Potash)1989-03-13 发生最大震级 5.6 级的矿震,地表震感强烈^[54];捷克斯洛伐克俄斯特拉发 (Ostrava-Karviná) 煤田 1983-04-27 发生一起能量达 10^{10} J、震级约 4.5 级的煤矿矿震,地表震感强烈,并诱发了井下冲击地压灾害^[52]。根据文献记载,我国发生的矿震最大震级为 2019-06-17 四川长宁县 5.8 级,该矿震为盐矿开采长期注入流体引起的诱发地震^[55]。

在我国,矿震的相关监测起步较晚,但矿震灾害情况同样相当严重。特别是煤矿矿震,在北京、抚顺、北票、鹤岗、新汶、呼吉尔特、义马、大同、华亭、七台河、阜新、徐州、平顶山等主要产煤矿区均有相关记录。

北京门头沟煤矿自 1947 年首次出现 3.8 级矿震

以来,矿震频度和能量均随开采深度的增加而增加,1994-05-19 发生最大震级 4.2 级的矿震,地面震感强烈,井下巷道破坏达 530 m^[33]。

抚顺矿区老虎台煤矿已有近百年的开采历史,是矿震灾害较严重的煤矿,仅 1998—2003 年就发生了震级大于 3.0 级的矿震 62 次,其中最大震级为 2002-01-26 发生的 3.7 级矿震,市区有感范围 200 km²,井下 900 m 左右采区严重破坏^[56]。

辽宁北票的台吉煤矿采深超 700 m,位于南天门断层与尖山子断层之间,矿井自建井以来其有感矿震多在 1.0 级以上,仅 1971—1986 年共发生 1.0 级以上矿震 154 次,最大震级为 1977-04-28 发生的 3.8 级矿震,有感范围 1 200 km²,井下约 2 100 m 巷道遭受不同程度的破坏^[57]。

鹤岗矿区 1998 年起矿震开始增多,多数 2.5 级以上的矿震地表有震感,在 1998—2003 年共发生 3.0 级以上矿震 13 次,最大震级为 2001-02-01 鹤岗南山煤矿的 3.7 级矿震^[58]。

新汶矿区开采深度达 700~1 000 m,下属华丰、孙村、协庄、良庄、潘西等煤矿均发生过不同程度的矿震现象,其中华丰煤矿 1992 年以来共发生 1.5 级以上矿震 490 余次,最大震级为 1996-04-27 发生的 2.9 级矿震,地表震感强烈,井下约 120 m 巷道严重受损^[59]。

近年来,随着煤炭资源开采逐渐向西部转移,内蒙古呼吉尔特矿区矿震问题开始凸显,仅 2021 年就先后发生 7 次 2.0 级以上矿震事件,最大震级为 2021-06-11 红庆河煤矿 3.0 级矿震,虽未造成井下破

坏,但地面震感强烈,导致矿震成为敏感话题甚至引起社会恐慌^[8,60]。

全国典型矿区矿震统计情况见表 1,发生在工作面前方断层附近的矿震对于井下巷道的影响较大,容

易诱发冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害,造成巷道损坏及人员伤亡;而发生在采空区后方的矿震对于地面及井下的影响较小,大多表现为地面有震感、井下巷道无变化。

表 1 全国典型矿区矿震统计
Table 1 Statistical table of mine tremors in typical mining areas in China

序号	所属地	矿井名称	时间	震级	发生位置	现场情况
1	北京	门头沟煤矿	1994-05-19	4.2	—	地面震感强烈,井下巷道破坏530 m
2		北票台吉煤矿	1977-04-28	3.8	F ₁₀ 号断层处	地面震感范围1 200 km ² ,井下2 100 m 巷道破坏
3		抚顺老虎台煤矿	1998-06-12	3.6	F ₇₋₁ 与F ₁₈ 断层交汇处	地面震感强烈,井下150 m巷道损坏
4		抚顺老虎台煤矿	2002-01-26	3.7	F ₁ 与F ₂₅ 断层附近	地面有感范围超200 km ² ,井下900 m 采区严重破坏
5	黑龙江	鹤岗南山煤矿	2001-02-01	3.7	—	地表民房受损,井下巷道局部出现冒顶、底板上凸等现象
6	江苏	徐州三河尖煤矿	2000-04-17	3.0	7204工作面前方240 m,断层附近	地面有震感,工作面超前两条材料道 90 m破坏
7	河南	义马千秋矿	2011-11-03	4.0	落差50~500 m的F16逆断层附近	地面震感强烈;井下380 m巷道严重破坏,10人遇难
8	吉林	龙家堡煤矿	2019-06-09	2.3	305工作面前方200 m,F13断层处	地面有震感;井下约220 m巷道损坏严重,9人死亡
9	河北	开滦唐山煤矿	2019-08-02	2.0	F5009采空区前方约50 m风井煤柱区,F _√ 断层处	地面有震感;井下F5010联络巷、F5009运料巷损坏严重,7人死亡
10	山东	华丰煤矿	1996-04-27	2.9	1407工作面前方120 m,采区间隔离煤柱内	地表震感强烈,井下约120 m巷道严重受损
11		东滩煤矿	2016-05-30	2.5	63 _上 04工作面后方418 m	地面有震感,井下巷道无变化
12		东滩煤矿	2018-01-10	2.7	63 _上 05工作面后方507 m	地面有震感,井下巷道无变化
13		东滩煤矿	2019-04-07	2.0	63 _上 03工作面后方189 m	地面有震感,井下巷道无变化
14		东滩煤矿	2021-04-22	2.5	63 _上 06工作面后方116 m	地面有震感,井下巷道无变化
15		星村煤矿	2020-12-23	2.4	3302采空区岩层垮落	地面轻微震感,井下巷道无异常
16		龙垌煤矿	2020-02-22	2.5	2305S工作面前方90 m,FD8断层附近	地面有震感;井下约120 m巷道损坏,4人死亡
17	陕西	金鸡滩煤矿	2020-12-15	2.6	104回采工作面距开切眼2 300 m位置,顶板来压	地表出现裂缝,井下无异常情况
18		神木崔家沟煤矿	2021-03-11	3.2	采空区坍塌	地表有坍塌裂隙,井下无异常
19	内蒙古	石拉乌素煤矿	2020-03-24	2.9	1201采空区后方约426 m	地面有震感,井下巷道无变化
20		石拉乌素煤矿	2021-02-06	2.9	1203采空区后方约361 m	地面有震感,井下巷道无变化
21		石拉乌素煤矿	2021-08-20	2.9	1208采空区后方约218 m	地面有震感,井下巷道无变化
22		石拉乌素煤矿	2021-08-29	2.8	1208采空区后方约264 m	地面有震感,井下巷道无变化
23		石拉乌素煤矿	2021-10-30	2.5	1203采空区后方约338 m	地面有震感,井下巷道无变化
24		石拉乌素煤矿	2021-12-20	2.6	侧向1206采空区164 m,1208采空区后方约70 m	地面有震感,井下巷道无变化
25		红庆河煤矿	2021-04-02	2.3	距侧向103采空区126 m	地面有震感,井下巷道无变化
26		红庆河煤矿	2021-06-11	3.0	105工作面前方215 m,NF37断层附近	地面有震感,井下巷道无变化

1.4 矿震法律法规建设

我国关于矿震的法律法规较少,尚未形成完善的矿震防治法律法规框架体系。笔者对近几年国家、省

市以及地方发布的一些关于矿震防范的规章制度进行了梳理,为增强我国矿震治理法规建设水平与有力推动矿震预防治理标准化提供参考。

2018 年 2 月, 国家安全监管总局、中国地震局发布了《关于进一步做好地震灾害风险防范工作的通知》(安监总应急〔2018〕32 号)^[61], 提出加强矿山、尾矿库等企业周边震情监测和预警水平, 及时通报地震震情灾情信息 (包括监测能力范围内的塌陷、疑爆等), 通过信息共享提升应急响应能力。

2020 年 5 月, 国家煤矿安监局、中国地震局发布了《关于建立冲击地压矿井地震信息共享机制的通知》^[62], 要求省级地震台网在监测到冲击地压矿区范围内发生 2.0 级及以上冲击地压、塌陷等地震事件后, 立即启动地震信息发送等措施。2020 年 7 月, 河北煤矿安监局、河北省地震局、河北省应急管理厅联合印发了《河北省建立冲击地压矿井地震信息共享机制实施办法》^[63], 标志着河北省冲击地压矿井地震信息共享机制正式运行。

2021 年 3 月, 袁亮院士在十三届全国人大四次会议上提出《关于加强我国煤矿矿震灾害预防和治理的建议》^[64]: 首先, 将煤矿矿震灾害程度及治理能力作为核定煤矿产能的决定因素之一; 其次, 进一步提升和完善矿井设计政策标准; 最后, 加强矿震灾害防治科技创新和专业人才培养。2021 年 10 月, 国家应急管理部就袁亮代表提出的建议给予了回复^[65], 并肯定了该建议对提升我国矿山安全生产水平、提升我国煤炭资源开采矿震灾害预防和治理具有重要意义。

2021 年 9 月, 内蒙古煤矿安全监察局鄂尔多斯监察分局、鄂尔多斯市能源局发布了《关于进一步加强冲击地压煤矿矿震事件防范与处置工作的通知》(鄂煤安字〔2021〕76 号)^[66], 该地方性规章进一步加强了冲击地压煤矿矿震的防治工作和应急处理能力, 有效减轻了矿震对安全生产、经济发展和公共安全的不利影响。

2022 年 4 月, 应急管理部、中国地震局共同发布了《关于印发“十四五”国家防震减灾规划的通知》(应急〔2022〕30 号)^[67], 提出要完善煤矿等专用监测台网, 提升非天然地震事件的监测能力。

2 煤矿矿震机理研究现状

矿震发生机理是通过不断深入研究和认识, 简明深刻的概括和阐述其发生的内外在原因。自从矿震现象出现以来, 诸多学者就开始了对于矿震机理的探索和研究。针对目前我国煤矿矿震发生机理的研究, 主要从矿震宏观触发机制以及震源微观破裂机制两方面进行梳纳总结。

2.1 矿震宏观触发机制

早期矿震机理的研究大多从煤体稳定性、顶板结

构破断以及断层构造影响等几方面阐述矿震发生的过程, 一定程度指导了矿震防治工作。

2.1.1 煤体失稳型矿震

煤体失稳型矿震是指井巷或工作面周围煤岩体在开挖过程中, 煤岩体内应力集中程度达到临界值后, 煤岩体内部裂纹不断扩展、贯通, 弹性能瞬间释放而产生的震动现象。煤体失稳型矿震如图 5 所示。

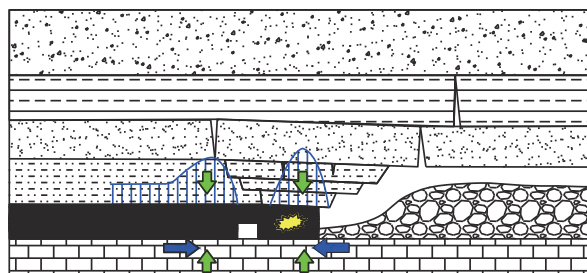


图 5 煤体失稳诱发矿震的概念模型

Fig.5 Conceptual model of coal mass instability induced mining tremors

大量研究表明, 煤体失稳型矿震是由采矿活动引起的煤岩体局部应力集中诱发^[68]。郭文豪等^[69]研究得到临空宽煤柱受多个支承压力叠加影响, 应力集中程度较高, 煤柱失稳破坏是诱发门克庆“4·8”矿震的主要原因。王高昂等^[70]通过研究新疆硫磺沟煤矿矿震频发机理, 得出采空区遗留煤柱支撑顶板形成“煤柱-关键层”结构, 其煤柱结构失稳容易诱发矿震和冲击地压灾害。王联合等^[71]详细分析了褶皱构造区典型强矿震的特征, 得到褶皱构造区内的矿震主要是构造应力和采动应力共同影响诱发的。CAI 等^[72]研究发现断层构造影响区也容易形成应力集中, 采动应力引起断层应力场的局部调整从而诱发矿震。赵同彬等^[73]揭示了煤层厚度变化对区域应力的影响机制, 发现煤层厚度变薄区构造应力较大, 容易诱发矿震现象。笔者^[74]发现覆岩厚度变化区同样存在构造应力异常集中的情况, 在坚硬顶板较厚区矿震事件频发。

以上研究表明临空宽煤柱、采空区遗留煤柱、褶皱、断层构造区以及煤层厚度变化、顶板厚度变化等相变构造区均存在异常应力集中情况, 在异常应力集中区容易诱发煤体失稳型矿震。因此, 矿井采掘过程中如何准确识别煤岩体的异常应力集中情况, 对于防治煤体失稳型矿震具有重要的参考意义。

2.1.2 顶板运动型矿震

煤层采出后, 采空区周围原有的应力平衡状态受到破坏, 引起应力的重新分布, 顶板岩层发生变形、破裂、垮落等, 从而诱发顶板运动型矿震^[75]。顶板破断运动的发展过程大致为: 随着工作面自开切眼开始推

进,顶板暴露达到极限跨距时,顶板在弯距最大点处断裂,即在顶板伸入煤壁的上边缘最薄弱处首先产生断裂;随着工作面的继续推进,梁端弯距逐渐向中部转移,顶板中部下边缘最薄弱处拉开断裂,大量弹性能释放,发生初次来压,如图6(a)所示。随着回采工作面的继续推进,顶板岩梁结构发生变化,顶板暴露到一定面积后发生周期性的断裂和失稳,形成周期破断,如图6(b)所示。顶板破断后岩块互相挤压有可能形成三铰拱式的平衡结构,当剪应力大于摩擦力时,平衡结构被打破,岩块会形成滑移失稳,顶板岩层越厚,结构抗滑移失稳能力越弱^[76],如图6(c)所示。顶板结构除滑移失稳形式外,在一定条件下还可能导致岩块随着回转而形成变形失稳,该失稳过程中同样会伴随着震动的出现和能量的释放,如图6(d)所示,图6中, F 、 T 、 R 分别为拉应力、压应力、剪应力。

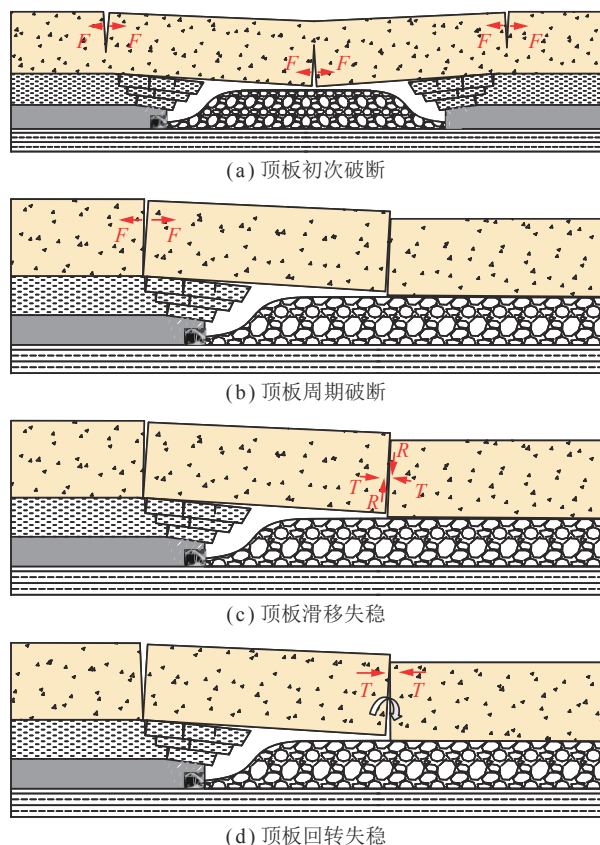


图6 顶板破断运动诱发矿震的概念模型

Fig.6 Conceptual model of mining tremors induced by overlying strata fracturing and movement

大量现场实践表明,顶部运动型矿震是我国深部开采面临的主要矿震类型,顶板结构的初次破断、周期性破断、滑移破坏以及回转失稳均容易诱发矿震事件。杨耀等^[77]通过分析顶板岩层破断特征及逐层破断演化规律,发现巨厚覆岩初次破断是诱发强矿震的主要原因。陈学华等^[78]通过研究高位硬岩与矿震之

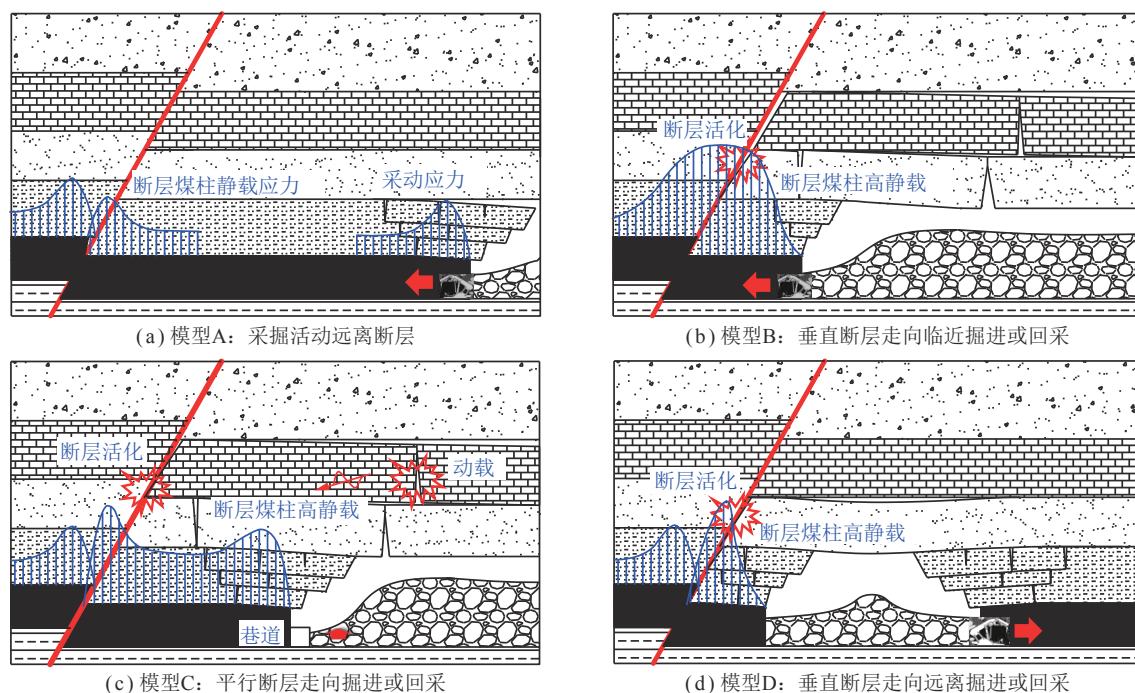
间的关系,发现矿震具有明显的周期性,坚硬顶板周期性破断容易诱发强矿震。WU等^[79]研究得到坚硬红层的滑移破坏与回转失稳容易诱发地面有震感的矿震。朱斯陶等^[80]研究发现煤层上方关键层在不同运动状态下均可能诱发矿震,并根据关键层的运动模式将其分为关键层断裂型、关键层回转型和关键层滑移型3类矿震。白贤栖等^[60]结合高位巨厚覆岩的运移情况,得到高位巨厚覆岩层发生“O-X”型初次破断、滑移以及周期性破断易诱发强矿震事件。

以上研究成果对于认识煤矿顶板运动型矿震具有重要意义,但顶板运动型矿震因顶板岩层复杂、赋存条件不明、运动方式众多等,导致其发生机理复杂,如何准确获取顶板岩层活动规律是揭示顶板运动型矿震发生机理的基础。

2.1.3 断层错动型矿震

断层作为煤层采掘过程中普遍存在的一种地质构造,其独特不连续结构控制着煤岩变形、破坏及力学性质,该结构与煤层采掘活动之间的相互作用是断层活化的关键^[81]。根据现场调研和总结,煤层采掘活动引起断层活化可归纳为如下4种概念模型(图7):模型A断层活化可能性较小,但可能由开采活动引起的远场矿震触发断层局部变形或瞬间错动诱发断层错动型矿震;模型B断层煤柱高静载应力与采动应力叠加形成应力集中,主要由采动应力主导断层活化诱发矿震;模型C断层附近静载应力保持恒定,主要由煤岩、顶板破裂等产生的矿震动载诱发断层活化产生矿震;模型D断层煤柱上的采动应力呈水平采空侧完全卸载和竖直方向加载的特性,与断层附近高静载应力叠加形成应力集中,容易引起断层应力场的局部调整而解锁活化,从而诱发矿震。

大量研究表明,断层活化是诱发矿震的重要原因^[82]。潘一山等^[83]较早的把矿震看成是断层带介质和围岩组成的系统在采动诱发下的变形失稳问题。李志华^[84]对工作面过断层时的矿震活动规律进行了分析,发现采动影响下工作面接近断层时,断层发生“活化”,矿震活动频繁。王浩等^[85]研究了开采扰动对逆断层活化的影响,得到断层诱发矿震需满足断层产生滑动失稳且滑动表现为黏滑2个条件。张宁博等^[86]研究发现开采引起裂隙扩展并与断层带贯通是逆冲断层活化产生矿震的直接原因。朱广安等^[87]研究了应力波扰动作用下断层滑移失稳的动力学响应规律,得到采深、应力波强度等对断层滑移的影响较大,越大越容易诱发断层错动型矿震。吴振华等^[88]研究了地堑构造区矿震活动规律,表明两断层的局部滑移错动导致楔形体滑移下沉是导致断层错动型矿震

图7 煤层采掘活动引起断层活化的概念模型^[81]Fig.7 Conceptual model of fault activation caused by coal mining activities^[81]

的主要原因。笔者^[89]分析了山东龙垆煤矿临地堑开采诱发矿震机理,得出大区域构造应力叠加开采扰动,导致地堑区断层滑移,容易诱发灾害型矿震。王宏伟等^[90-91]研究了断层与顶板耦合失稳的突变效应,并总结了断层构造失稳的多物理场互馈机制研究进展,发现岩层运动与断层滑移的耦合作用容易诱发断层滑移型矿震。

上述文献研究了开采扰动、应力波以及地堑构造等对断层活化诱发断层错动型矿震的影响,但工程实践中断层构造分布较为复杂,且各断层的形成条件不同,因此特定条件下各断层活化诱发断层错动型矿震仍需引起研究人员的重视。

2.2 矿震震源微观破裂机制

矿震震源机制是描述震源在矿震发生时力学过程的物理量,与岩体破裂特征密切相关^[92]。震源破裂机制研究在地震学中已有数十年历史,针对不同类型或条件下的地震,形成了相对成熟的地震震源机制分析方法^[93]。煤矿矿震震源的破裂形式较为复杂,一般分为张拉型、剪切型、拉剪混合型、压剪混合型以及内爆型^[94],但基本可分为张拉破裂型矿震、内爆破裂型矿震以及剪切破裂型矿震3类。并且矿震宏观触发机制与震源微观破裂机制也存在较强的对应关系,如顶板初次破断、周期性破断、回转失稳等顶板运动型矿震以张拉破裂为主;煤柱、褶曲等高应力集中造成的煤体失稳型矿震大多为内爆型破裂;而顶板剪切滑移、断层错动型矿震主要以剪切破裂为主。

(1) 张拉破裂型矿震。

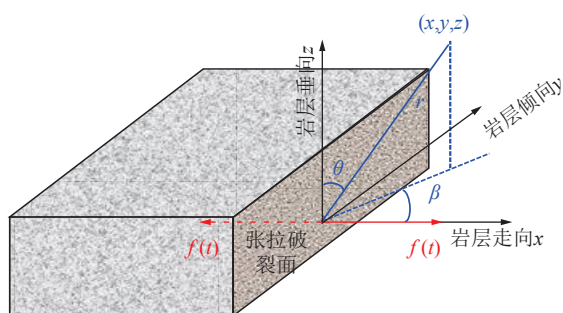
张拉破裂型矿震主要由煤岩体张拉失稳破坏导致,伴随着大量弹性能释放,并以震动波向外传递的震动现象。其等效力矩为一对作用在介质相邻两部分上方向相反、合力为0的水平拉力,如图8(a)所示。震动波的辐射位移场以震源为原点,在破裂面方向呈左右对称分布。P波的最大位移振幅位于 x 方向上,并向外逐渐减小,如图8(b)所示;S波的最大位移振幅在与 x 轴成 $\pm 45^\circ$ 方向上,如图8(c)所示,图8中, $f(t)$ 为矿震点源作用力, β 、 θ 、 r 分别为围岩中一点相对震源点的方位角、倾角与径向距离。

(2) 内爆破裂型矿震。

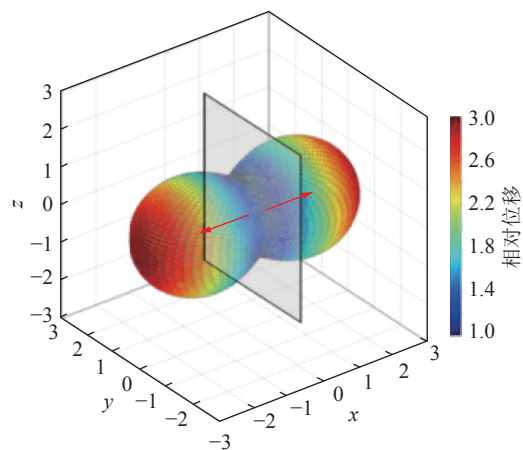
内爆破裂型矿震主要由煤岩体受压产生破裂导致,矿井煤柱区受压破裂产生的小能量矿震大多属于内爆型破裂^[12]。其破坏过程可等效为在垂直方向上施加一对方向相反、合力为0的垂直压力,如图9(a)所示。同时顶板冒落、离层等同样会产生一对垂直方向的压力,即会对顶板上部施加一个后座力、冒落物又会对底板施加一个冲撞力^[20],因此亦可视为内爆破裂型矿震。其震动波辐射花样与张拉破裂相似,沿破裂面方向上下对称分布,具体如图9(b)、(c)所示。

(3) 剪切破裂型矿震。

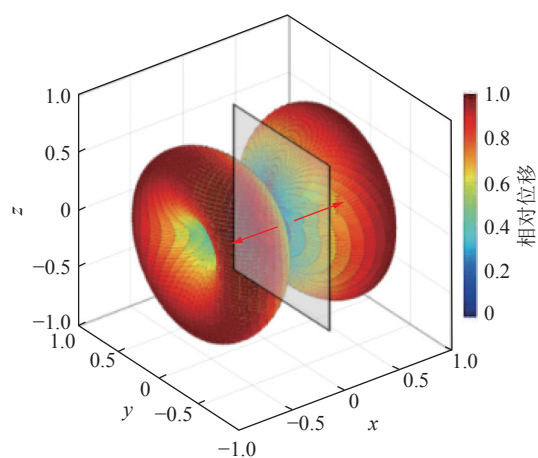
剪切破裂型矿震主要由开采扰动导致地质弱面发生剪切滑移破坏,并以震动波的形式向外传递能量的震动现象。其等效力矩为2对相互正交的双力偶点源模型,一对双力偶是由2个共平面的大小相等但



(a) 张拉型矿震的点源作用力



(b) P波辐射花样



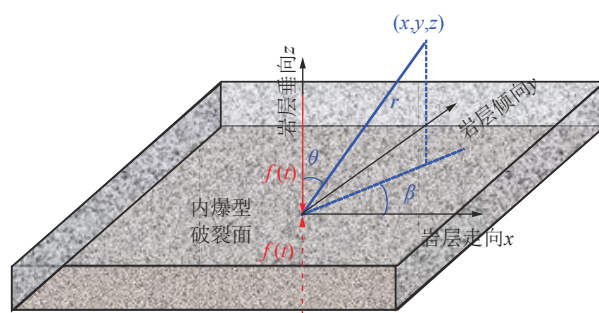
(c) S波辐射花样

图8 震源张拉破裂示意

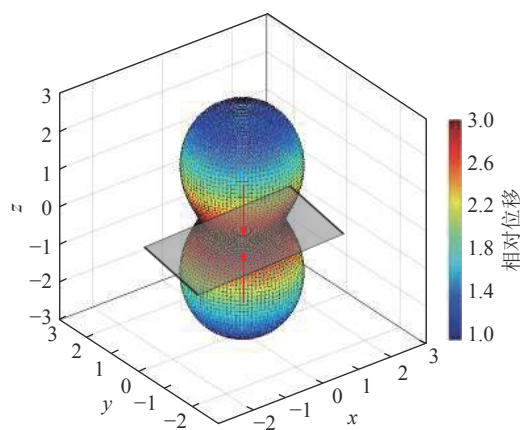
Fig.8 Source tension rupture

方向相反的单力偶组成(图10(a))。震动波的辐射位移场因剪切面的方位不同而具有明显差异。以近水平岩层错动为例,P波的震动位移场辐射花样如图10(b)所示,最大位移振幅与滑动面成 $\pm 45^\circ$;S波的最大振幅在滑动面及其法向面上达到最大值,而与滑动面成 $\pm 45^\circ$ 时振幅为0,如图10(c)所示。

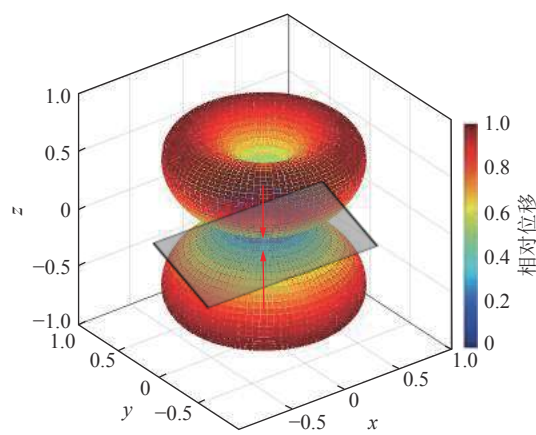
针对采场诱发煤岩体震源破裂机制的研究,国内外学者做了较多积极的探索,GIBOWICZ等[95]通过研究波兰煤矿的矿震震源机制,发现矿山煤岩破裂与天然地震的震源机制具有一定的相似性,高能级矿震事件主要由断层面剪切滑移破裂引起;MCGARR等[96]



(a) 内爆型矿震的点源作用力



(b) P波辐射花样

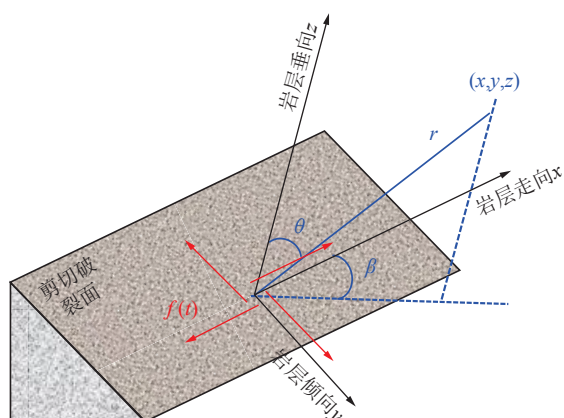


(c) S波辐射花样

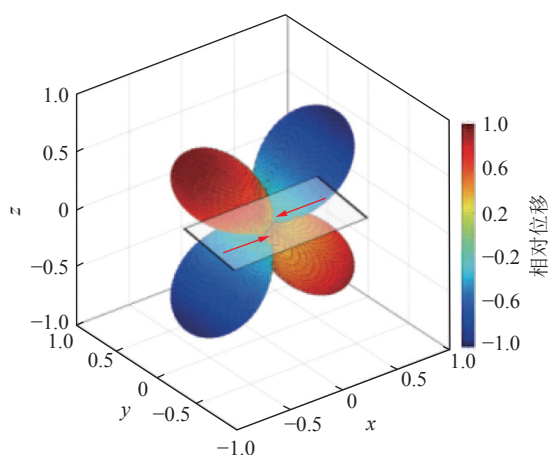
图9 震源内爆破裂示意

Fig.9 Source implosion rupture

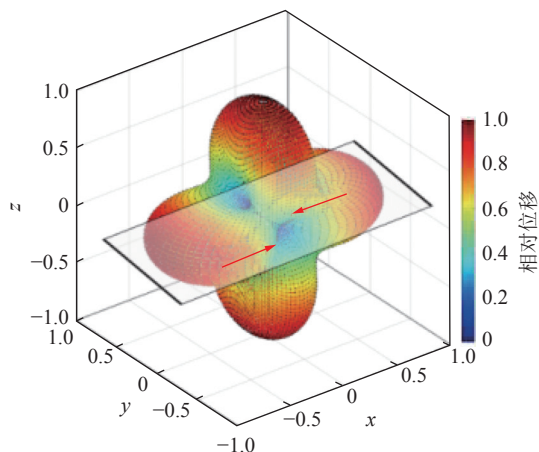
通过进一步研究采场附近的矿震事件,认为拉伸、内爆等非剪切破裂方式与板状矿山开采更为密切相关;张凤鸣等[58]对鹤岗煤矿开采诱发地震进行了研究,发现具有“内爆型”特征的矿震与采空区顶板冒落有关;李铁等[97]以老虎台煤矿为研究背景,反演了81个2.7级以上的矿震震源机制,发现约87%的矿震属于剪切滑移破裂;井广成等[98]研究了视北煤矿褶皱构造区矿震震源破裂机制,发现褶皱构造区受水平挤压应力影响震源破裂机制主要为张拉破裂;陈栋等[99]基于矩张量反演方法,认为千秋煤矿受断层滑动影响矿震



(a) 剪切型矿震的点源作用力



(b) P波辐射花样



(c) S波辐射花样

图 10 震源剪切破裂示意

Fig.10 Source shear rupture

破裂机制表现为剪切、剪切张拉、剪切挤压破裂。HE 等^[100]研究发现不同位置处矿震的震源破裂机制有明显差别,工作面中部采空区顶板破断极易发生张拉破裂。

通过分析矿震震源机制情况,可以深入了解震源破裂的类型以及滑动破裂过程,提高对矿震孕育和发生机理的认识。

3 煤矿矿震破坏效应研究现状

在煤矿中,矿震与矿震灾害不能一概而论,并不是所有矿震都具有危险性^[11]。少量矿震发生后可能造成井下冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害,有时甚至导致地面晃动、建(构)筑物损毁等。同时,矿震的震级大小与井下煤岩体的破坏程度无明显的对应关系,震级较大的矿震不一定会造成井下煤岩体破坏,震级较小的矿震同样可能诱发井下煤岩体破坏甚至造成灾害。因此,需正确、理性的认识矿震与矿震灾害。

煤矿矿震台网记录的震动波信息是矿震震源破裂、震动波传播衰减以及监测设备响应共同作用的结果。因此研究矿震震源参量、震动波传播衰减规律以及震动波扰动情况,是探究煤矿矿震诱发灾害的基础;同时,对矿震诱发井下煤岩体破坏以及地面建(构)筑物损伤的评估,是合理治理矿震的前提。

3.1 矿震震源力学参量

矿震震源力学参量主要包括地震矩、辐射能量、震源半径、视体积、视应力、应力降等,各个参量从不同角度描述了震源的破裂强度、扰动规模以及破裂面周围煤岩体应力调整的情况^[101]。近年来,随着国内矿井微震台网布置进一步完善,记录的矿震波形准确性不断提高,为我国矿震震源力学参量研究提供了数据基础。目前国内关于煤矿矿震震源力学参量的研究相对匮乏,各个震源力学参量对于矿震致灾风险的影响程度及各自的相关性极为不明确。在矿震致灾风险评价时,往往忽略了其他关键震源力学参量的影响作用。因此,研究矿震震源力学参量与其致灾风险的关系显得尤为重要。

监测系统监测到的震源辐射能量以及根据震源力偶模型定义的地震矩可用来表征煤岩体震源破裂强度;震源半径与视体积可用来描述煤岩体破裂影响范围,是表征震源扰动规模的参量^[102]。王生文^[103]研究表明,视应力、应力降和拐角频率等震源力学参量的变化可反映监测区域应力水平的变化。陈栋等^[104]基于 Brune 模型,分析了千秋煤矿矿震与天然地震震源力学参量的差别,发现灾害型矿震的拐角频率和应力降均小于天然地震。笔者^[8]研究发现特定条件下不同破裂模式的震源力学参量有所差异,通过求解不同条件下矿震震源的力学参量可为矿震灾害的预测预报提供依据。张冬阳^[105]按照常规能量标准区分危险性矿震时发现,灾害型矿震与非灾害型矿震之间的震源力学参数具有明显差异,在震源破裂强度方面,2者出现跨量级的差距,而震源半径、视体积和视应力对于不同矿震的敏感性较弱,如图 11 所示。

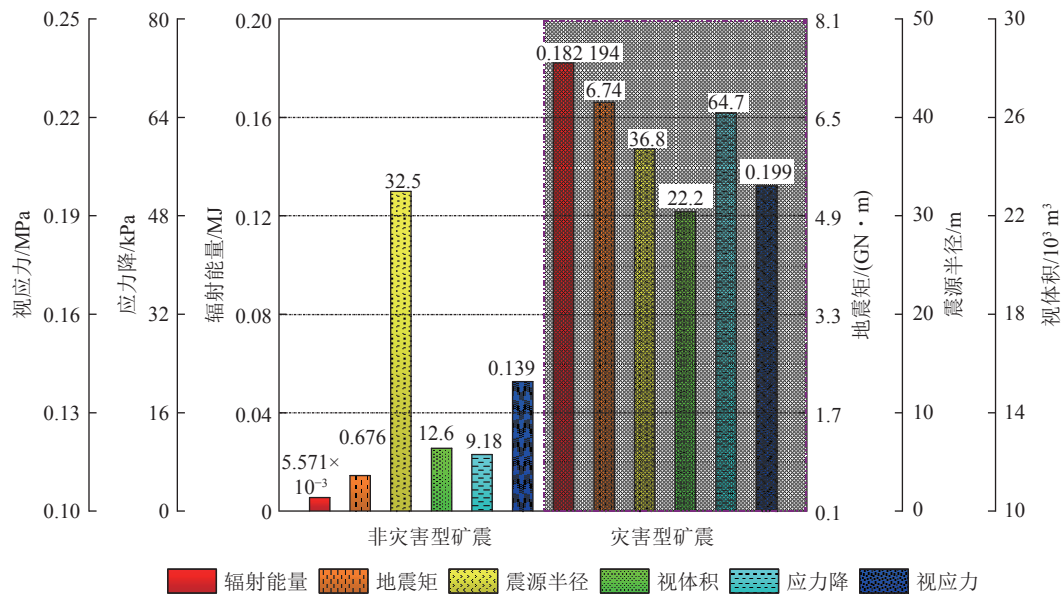


图 11 矿震震源力学参量

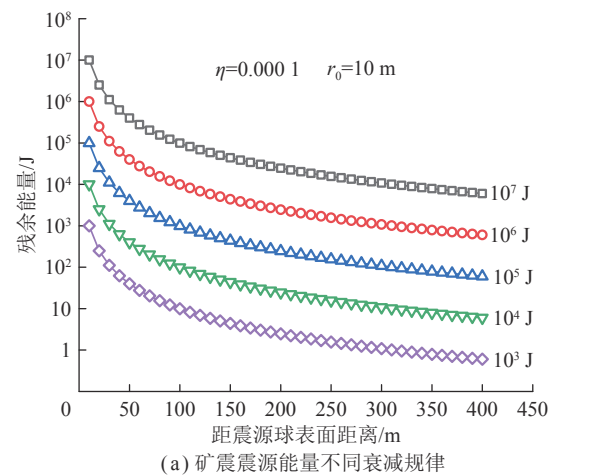
Fig.11 Source mechanics parameters of mining tremors

3.2 震动波传播衰减规律

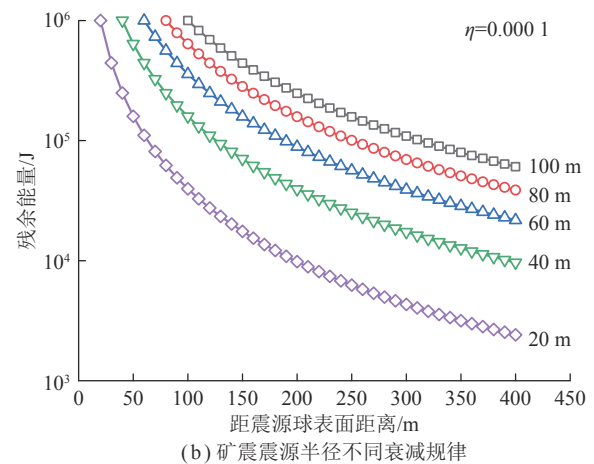
采动诱发矿震对周围煤岩体的破坏效应,除受震源破裂类型及震源力学参数影响外,矿震震动波在煤岩体介质中的传播衰减同样影响着矿震荷载对周围煤岩体及地表建(构)筑物的损伤破坏。因此,分析矿震震动波在煤岩体介质中的传播衰减规律,对研究矿震的震动破坏效应具有重要的理论意义。

目前,关于震动波传播衰减的研究主要采用爆破震动试验以及数值模拟方法。笔者^[106]研究表明爆破震源因激发传播的震动波具有各向同性特征,其能量、位移场的传播衰减不受震源破裂机制的影响,更适合用来分析震动波的传播衰减规律。陈剑杰等^[107]采用小比例化爆破模拟实验研究了爆破应力波对洞室围岩的破坏效应,发现应力波传播随距离的变化呈非线性变化。叶根喜等^[108]对爆破信号进行原位采集试验,发现震动波振幅随传播距离的增大呈幂级衰减,并且穿层传播的衰减率更大。高明仕等^[14]通过地面不同场地介质的爆破试验,得到震动波能量沿传播距离呈乘幂关系衰减,并且不同场地介质中震动波传播衰减指数存在差异。图 12 为不同因素对矿震震动波能量衰减的影响(图 12 中, η 为能量衰减系数; r_0 为震源半径),震动波的残余能量随震源能量、震源半径的增加而增加,但由于震动波固有性质以及井下传播环境的不同,不同能级矿震事件的能量衰减系数差异较小^[109]。

在煤矿中,常用来模拟震动波衰减的数值模拟方法包括有限差分法、离散元法以及有限元法,其中有限差分法软件有 FLAC^{2D}、FLAC^{3D},离散元法软件有



(a) 矿震震源能量不同衰减规律



(b) 矿震震源半径不同衰减规律

图 12 不同因素对震动波能量衰减的影响

Fig.12 Effect of different factors on the energy attenuation of shock wave

PFC、UDEC 等,有限元软件包括 LS-DYNA、ABAQUS 以及 AUTODYN 等^[110]。例如,陈国祥等^[111]采用 FLAC^{2D} 中的动力模块模拟了震动波在不同加载水平、挠动波强度以及频率影响下对巷道煤岩体的扰动作用;高明仕等^[14]采用 FLAC^{3D} 模拟了顶板破断诱发矿震对下伏采掘空间影响的远近场效应;SARRACINO^[112]为了更好的模拟震动波对围岩裂隙、节理的扩展影响,采用 PFC^{3D} 研究了震动波的动力响应特征;窦林名等^[11]通过 UDEC 模拟再现了震动波在节理岩层中的传播衰减过程。MA 等^[113]使用 LS-DYNA 研究了自由面距离、节理面以及地应力等对震动波传播扰动的影响;SAZID 和 SINGH^[114]为确定震动波的传播路径,采用 Abaqus/CAE 软件模拟了爆破震动波的传播衰减过程;ZHU 等^[115]利用 AUTODYN 软件研究发现耦合介质、边界条件、震源位置等对震动波传播衰减具有显著影响。

3.3 矿震震动波扰动效应

震动波扰动下煤岩体内部裂纹时刻经历着萌生、扩展、贯通等过程,造成煤岩体损伤程度急剧增加,当损伤程度达到临界条件时裂纹相互贯通,产生宏观破坏。距矿震震源中心不同区域的煤岩体损伤情况存在较大的差异^[116],在近场区域内矿震震动波几何扩散及固有衰减,更容易使裂纹迅速扩展,进而引发煤岩体宏观破坏;而远场区域矿震扰动效应主要体现为多次扰动直至煤岩体强度的整体降低,即对煤岩体的累积损伤。矿震的远近场区域如图 13 所示,图 13 中, R 为震源距台站距离; d 为震源距巷道距离。

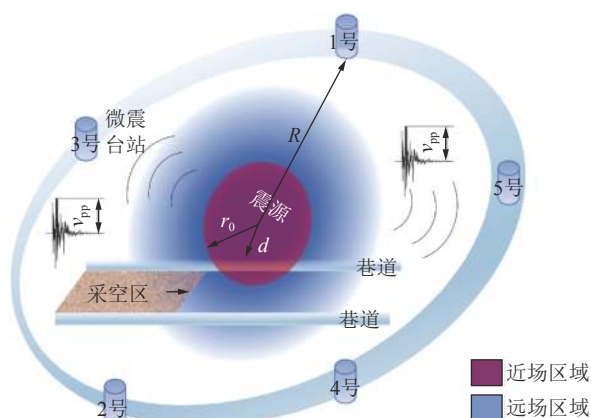


图 13 震源远近场区域示意

Fig.13 Schematic diagram of source near and far field area

目前,矿震震动波远近场扰动研究方面,最常采用的有震动波能量衰减扰动、质点峰值震动速度(v_{pp})扰动以及动应力叠加扰动等。例如,马克等^[117]直接采用矿震震源半径来确定震源的远近场范围,并提出了基于矿震能量反演岩体损伤模型,初步实现了

考虑矿震损伤效应的边坡稳定性分析。周朝等^[118]基于矿震视体积求解了岩体单元的损伤半径,并采用能量耗散理论建立了近场岩体的累计损伤劣化模型。高明仕等^[119]统计表明厚硬覆岩层与灾害型矿震存在明显的远近场效应,近场矿震的 v_{pp} 较大,巷道将收到明显的扰动破坏。WANG 等^[120]将 v_{pp} 转化为动应力,进一步研究矿震震源的远近场效应对于巷道围岩的扰动影响,发现低强度的动应力主要由远场矿震引起,中高强度的动应力由近场矿震引起(图 14),近场矿震可能直接引发临界应力煤岩体失稳破坏,远场矿震对巷道围岩的动应力影响较小。

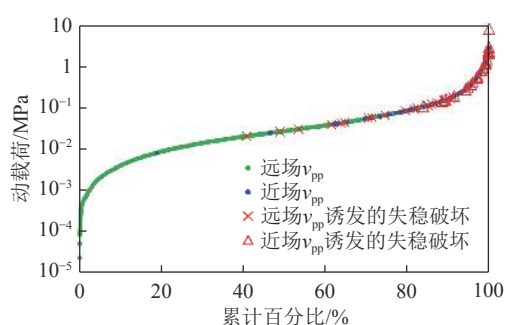


图 14 矿震扰动对巷道的等效动应力

Fig.14 Equivalent dynamic stress of roadway induced by mine seismic disturbance

3.4 矿震致灾损伤评估

煤矿矿震的致灾损伤评估是提前制定安全防护措施的基础,其目的是对开采后矿震可能发生的位置、能级进行模拟预测,并基于震动波传播等理论对井下巷道、设备等以及地表建筑的损伤程度进行评估。矿震对井上下的扰动效应如图 15 所示。

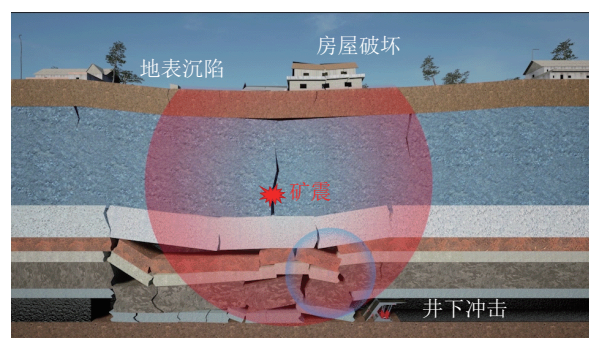


图 15 井上下矿震扰动情况示意

Fig.15 Schematic diagram of seismic disturbance up and down the well

3.4.1 井下致灾评估

矿震诱发井下致灾的研究较多,目前最常见的为动静载叠加扰动致灾评估,当煤岩体中的静载应力与矿震形成的动载应力叠加超过了煤岩体破坏的临界

应力,煤岩体就会发生瞬间破坏^[121]。姜福兴等^[122]提出了矿震作用下,震动附加应力计算方法。朱斯陶等^[80]基于矿震附加应力和震动损害边界的概念,建立了关键层断裂型矿震诱发井下致灾的评估模型。CAI等^[123]阐述了矿震动载作用包括通过震动波衰减累积重构的动载应力与瞬间增加的动载荷,其对井下煤岩体的破坏等价于循环加载或施加一瞬间应力增量,并以此建立了动静组合应力分析的井下致灾评估方法。WANG等^[120]研究得到累计矿震扰动会导致叠加最大应力增加与抵抗最小应力减低,矿震对井下巷道致灾程度影响与累计强矿震 v_{pp} 频次密切相关。

KAISER^[124]基于现场测量和数值模拟,得到应力水平与地面运动强度和频率呈线性相关,因此可以估算出巷道开挖破坏区范围。因此,笔者提出了一个基于矿震震动效应的巷道破坏潜力评价方法,假定巷道的破坏潜力与历史矿震事件引起的矿震运动频率 f 成正比。将巷道长度离散为若干小区段(间隔 10 m),在每个区段 i 内,根据式(1)、(2)计算强矿震频率 $f(i)$:

$$f(i) = \sum_{j=p}^q y(j) \quad (1)$$

$$y(j) = \begin{cases} 1 & (v_{ppj} \geq v_{ppk}) \\ 0 & (v_{ppj} < v_{ppk}) \end{cases} \quad (2)$$

其中, v_{ppk} 为区分强矿震的临界值; v_{ppj} 为第 j 个矿震事件引起的矿震动; p 为采矿开始后记录的第 1 个矿震事件; q 为记录的最后一个矿震事件。 v_{ppk} 的确定应基于当地记录的矿震运动的百分位数,例如从第 75~90,而不是一个固定值。

由于笔者仅考虑工作面前方巷道中经历强矿震扰动的区段。假设某一天,工作面前方有 m 个矿震,识别当天预测破坏区域的阈值 $f_{\text{threshold}}$ 设为这 m 个强矿震频率的平均值:

$$f_{\text{threshold}} = \sum_{i=1}^m f(i) / m \quad (3)$$

图 16 为井下矿震扰动致灾评估的一个实例,根据历史地震动数据,预测当前工作面前方 200 m 范围内的巷道为潜在破坏区,检测到比阈值更大的强地震动频率。冲击地压事故发生后,对井下实际破坏区域进行了测量,与预测方法较为吻合。

3.4.2 地表损害评估

由于专业学科的限制,煤矿矿震引起地表建(构)筑物的安全问题具有其特殊性,开采诱发矿震的问题主要涉及采矿工程学、岩体力学、开采沉陷学等属于

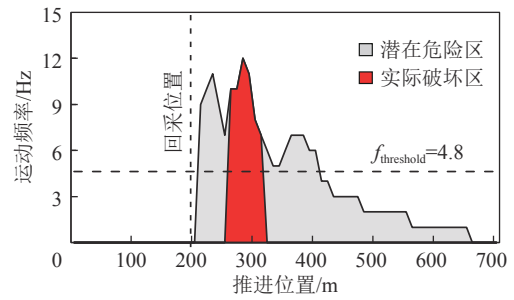


图 16 矿震井下扰动致灾评估

Fig.16 Evaluation of underground disturbance caused by mining tremors

矿山工程领域;而地表建筑物的动力学问题主要涉及结构动力学、地震工程、工程结构抗震等学科,属于土木工程领域^[125]。因此,目前针对矿震引起地表建(构)筑物损伤的研究尚处于起步阶段。

在地震领域,我国常采用震动速度来作为震动强度的判据,基本能够满足工程需要。针对煤矿矿震引起地面损伤评估,质点安全(允许)震动速度取值较为复杂,姜福兴等^[17]综合相关研究成果和标准^[126],以质点震动速度为标准将矿震对地面建(构)筑物和人体的影响划分为 4 级。张明等^[127]将质点震动速度作为震动损害的主要评价指标,结合关键层破断及能量传播衰减规律,提出了矿震诱发地面破坏的“震动损害边界”观点。朱斯陶等^[80]以质点振动速度为标准,将顶板运动型矿震诱发地面损伤程度划分为 3 个标准,并确定了矿震诱发地面损害的临界条件。

以上研究均表明矿震引起的地表质点峰值速度越大,越容易引发地表损伤。因此,本文采用质点峰值速度来衡量矿震烈度:

$$\lg v_{pp} = cI + d \quad (4)$$

其中, I 为震动烈度; c 和 d 为统计回归得到的系数。其中质点峰值速度在地层中传播呈幂率衰减特征。

质点峰值速度与矿震能量及传播距离的关系为

$$v_{ppR} = v_{pp0} R^{-\alpha} \quad (5)$$

$$E = E_0 R^{-\alpha} \quad (6)$$

$$v_{pp} \propto \varepsilon_B \propto \sqrt{E} \quad (7)$$

式中, v_{ppR} 为距离震源 R 位置处的质点峰值速度; v_{pp0} 为理想震源处的质点峰值速度; E 为距离震源 R 位置处衰减后的能量; E_0 为理想震源能量; α 为地层衰减系数; ε_B 为应变。

进一步依据关系式(5)~(7)可推得用于评估矿震对地表造成的损伤危险系数 I_{Ai} :

$$I_{Ai} = \sum_{j=1}^n (\sqrt{E_j} R_{ij}^{-a/2}) \quad (8)$$

式中, E_j 为编号为 j 的震源能量; R_{ij} 为编号为 j 的震源距地表的距离。

图 17 为采用式 (8) 计算的归一化后的地表矿震损伤危险系数。在矿震中心 300 m 范围有较强震感, 矿震中心 1 500 m 范围内有轻微震感, 1 500 m 范围外无震感, 与现场实际情况较为吻合。

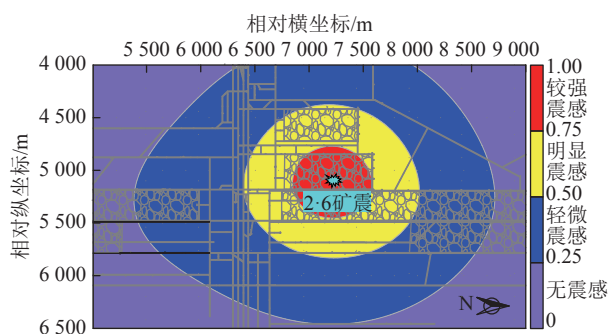


图 17 矿震地面扰动致灾评估

Fig.17 Evaluation of ground disturbance caused by mining tremors

4 煤矿矿震灾害防治研究现状

我国的矿震防治理论与技术起步较晚, 尚未形成成套技术体系与装备。经笔者粗略总结, 矿震防治的核心思想为全生命时期治理, 具体从源头防控入手, 以精准预防为切入点, 最终实现井上下安全, 矿震防治核心思想与技术体系如图 18 所示。矿震防治的不同阶段须采用不同技术途径, 共分为区域防范与风险调控、风险预测与实时预警及卸压控制与主动防护。

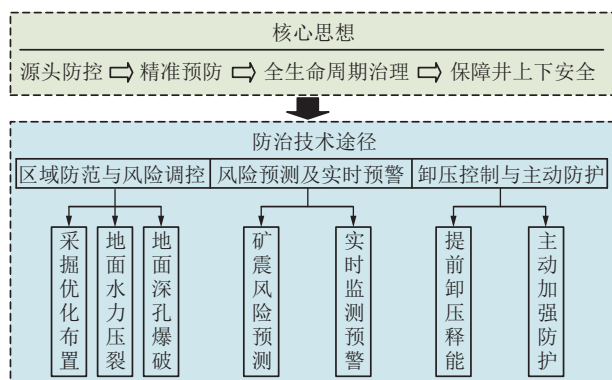


图 18 矿震防治核心思想与技术体系

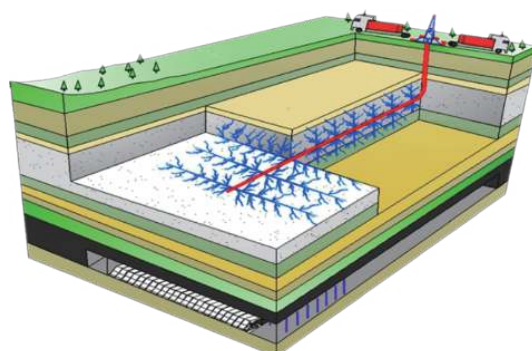
Fig.18 Core ideas and technical system of mining tremors prevention

4.1 区域防范与风险调控

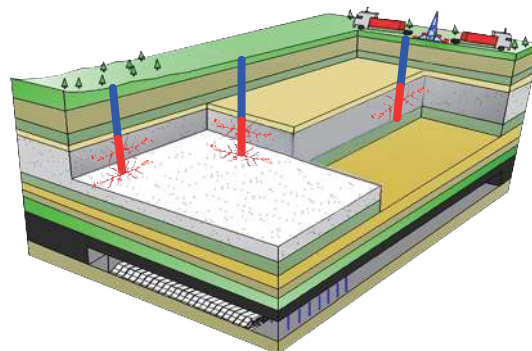
区域防范与风险调控的目的是在矿井设计和生产规划阶段进行的矿震防治方法, 主要手段有矿井采

掘优化布置、地面水力压裂与地面深孔爆破等。区域防范可从保护层开采、巷道错层布置、开拓优化布置、开采顺序、工作面参数、煤柱留设等方面进行优化设计。尤其针对顶板型矿震治理, 顶板离层注浆^[128]、(局部) 充填开采^[129]、条带开采^[130]、房柱式开采^[131]等技术也是值得探索的新途径。风险调控的主要手段有地面水力压裂和地面深孔爆破。

地面水力压裂在矿井中高位岩层钻孔 (井) 中预制定向裂缝, 在较短时间内采用高压水将顶板岩体沿预先切割的定向裂缝破裂分解岩体。近期东滩煤矿 6306 工作面开展了地面直井压裂巨厚关键层的现场试验^[80], 基本实现了矿震关键层的全厚压裂, 为地面水力压裂治理顶板型矿震积累了宝贵经验。地面深孔爆破是在地面进行深孔钻进直接将巨量炸药送至目标岩层, 一次起爆以完成对厚硬岩层的致裂。内蒙古石拉乌素煤矿初步开展了煤矿地面深孔预裂爆破工程, 爆破后综合分析发现可对白垩系巨厚砂岩组起到预裂效果, 为解决鄂尔多斯地区大采深井工煤矿矿震制约难题提供了新途径^[132]。地面水力压裂和地面深孔爆破治理矿震如图 19 所示。



(a) 地面水力压裂治理矿震示意



(b) 地面深孔爆破治理矿震示意

图 19 地面水力压裂和地面深孔爆破治理矿震

Fig.19 Ground hydraulic fracturing and ground deep hole blasting for mining tremors control

4.2 风险预测与实时预警

矿震风险预测的内涵是使用理论或者数据的方

法分析强矿震发生前的信息规律,构建合适的预测预警指标对强矿震进行预警。朱斯陶等^[80]建立了基于“关键层运动状态”的顶板运动型矿震预测模型,提出了关键层断裂型、回转型与滑移型矿震能量预测方法。CAI等^[133]提出了强矿震风险预测的冲击变形能方法。丛利等^[134]建立了一种动静载叠加的强矿震综合预警方法。然而目前的研究多基于不同的物理模型与假设,不同应用条件下方法的适用性须经进一步验证;并且物理模型中涉及诸多参数在应用时难以合理确定。针对此困境,陈结等^[135]提出基于物理及数据的“双驱动”预警架构,笔者^[136]尝试将深度学习方法应用于矿震风险的预测,建立了物理指标与数据特征融合驱动的强矿震时序预测方法。但是基于数据的预测方法同样存在面向不同煤矿预测模型迁移、小样本数据情况下的机器学习模型构建以及多源异构数据融合等关键问题需进一步攻关。

实时监测预警方面,在国家和煤炭企业的大力推动下,监测预警方法由传统的矿压监测和钻屑法监测等发展到采动应力监测、地音监测、电测辐射、微震监测等方法。微震监测法监测范围广、实时性强,近年来在矿井强矿震及冲击地压危险监测方面得到迅速发展。然而,由于顶板型矿震震源往往位于高位岩层中,受限于微震台网近水平布置,导致对强矿震事件垂向定位误差大、震源能量计算不准确等问题凸显。为克服这一难题,华亭、彬长、鄂尔多斯等矿区已积极开展井地联合微震系统以及监测技术的研发试用(图20),拟通过井上台站和井下拾震器的联合布置提高矿震震源垂向定位精度,但井上下拾震器和地面台站和联合布置原理及传感器配比优化设计、全地层速度模型确立和动态调整方法、基于传感器优化配比的

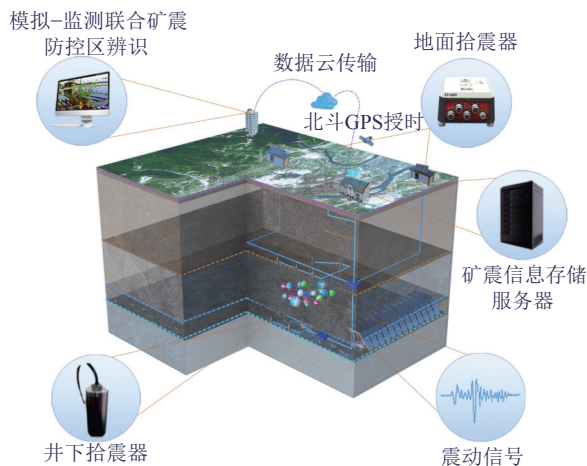


图20 井地联合矿震系统示意

Fig.20 Schematic diagram of the combined well-ground mining tremors system

震源定位算法、震源破裂参数的实时反演成像等问题有待深入研究。

4.3 卸压控制与主动防护

根据矿震诱发井下冲击破坏以及地表建筑物损坏的机制,可从卸压控制与主动防护两方面进行矿震防治。卸压控制的理念是采取卸压手段提前释放转移应力、降低矿震释放的能量,主动防护的目的是提高巷道及建筑物的抗冲击或抗震能力。

卸压控制方面,可通过钻孔、压裂、注水、爆破等手段将应力向煤岩体深部转移或者降低应力水平。主动防护方面,井下可通过加强巷道支护增强巷道稳定性。一方面可从提升锚杆力学属性、优化支护参数、联合或复合支护等方面提升支护强度和刚度:如大变形锚杆^[137]、恒阻大变形锚杆^[138](NPR锚杆)、超高强度高冲击韧性锚杆^[139](CRMG700锚杆)等吸能锚杆和具备吸能构件或吸能缓冲装置的系列防冲吸能支架(柱),部分吸能支架或装备如图21所示。另一方面发展具备抵抗强动载的主动和被动支护相结合、刚柔耦合的吸能强力支护系统(图22),如三级吸能支护系统^[140],具体指:①一级支护。锚杆索支护,可抵抗 10^5 J动载;②二级支护。“锚杆+O型棚”联合支护,可缓冲 10^6 J动载;③三级支护。“锚杆+O型棚支护+液压支架”,可消耗 10^7 J能量。然而,由于目前矿震致灾机理尚不明晰,受矿震动载威胁的巷道支护形式与参数选择标准尚未建立,巷道支护结构抗震能力评估方法尚不完善,是今后亟待解决的重要问题。



图21 超前支护防冲支架

Fig.21 Advance support anti-impact support

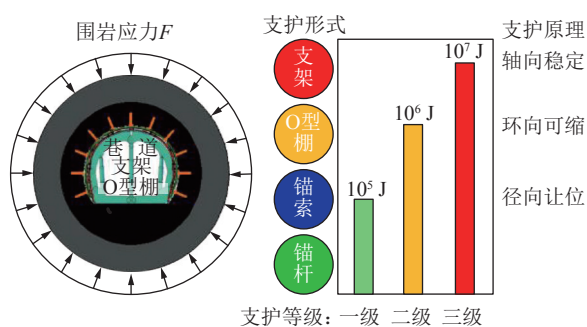


图 22 三级支护原理示意

Fig.22 Schematic principle of three-stage support

井上地表建筑物的防护可从增强抗震等级,使建筑具有抵抗区域内最强矿震的能力;将建筑构建在矿震可引起地表损害的边界之外;定期对建筑的抗震稳定性进行评估等方面进行。

5 煤矿矿震灾害治理主要难题

5.1 矿震孕育致灾全过程演化机理

矿震伴随开采活动而产生,为开采诱发的一种动力现象,煤柱失稳内爆、顶板破断运移以及断层活化是矿震典型类型。矿震的破坏致灾效应可大致归纳为 2 类:一是矿震可导致应力分布和围岩结构迅速调整,如顶板型矿震发生时坚硬厚层顶板大范围破断垮落与空间结构失稳;二是矿震发生向外释放震动波,震动波作用下导致煤岩体内部裂隙扩展、围岩属性持续劣化以及围岩应力迅速调整。

目前矿震的致灾机理研究虽取得一定成果,但仍有以下问题需要继续深入:① 深地多场多相孕灾环境与工程活动耦合作用下矿震灾害演化过程的试验仪器或现场监测手段不足,难以掌握矿震孕育致灾应力、能量、结构全过程耦合演化规律;② 矿震震源破裂及震源力学参量演化过程不清,缺乏深刻揭示震源动态破裂的内在机理;③ 矿震震动波传播衰减机制及规律不清,难以量化矿震扰动对围岩及地表建筑物的扰动破坏效应;④ 支护体及巷道围岩结构对震动波的响应损伤机制不明,难以量化表征矿震的累积损伤效应;⑤ 覆岩空间结构失稳与矿震演化的互馈机制不清,难以深刻揭示顶板型矿震触发机制及条件。如图 23 所示。

5.2 深部地质信息透明化保障

矿震灾害防治的前提是深部地层信息透明化保障。深部开采采掘地层条件更为复杂,多场耦合作用过程极为繁杂,灾害演化信息的充分掌握是推动矿震灾害机理与防治研究定量化、精细化的重要基础。深部地层透明化保障,旨在综合矿井静载地质信息、多

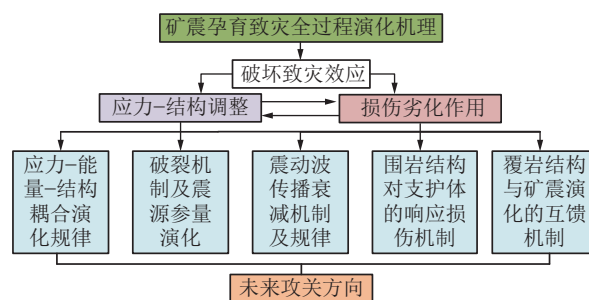


图 23 矿震孕育致灾全过程演化机理难题

Fig.23 Difficult problem of evolution mechanism of the whole process of disaster-induced by mining tremors

灾害智能监测信息、采掘动态演化信息等,采用数字孪生、虚拟现实等技术建立矿井透明化地质模型,实时掌握矿井采掘多维动态响应信息。

目前在国家“双碳”发展战略和智能精准开采建设背景下,与智能化建设相匹配的煤矿地质透明化理论与方法建设尚处于起步阶段,有如下问题亟待攻关:① 研制大尺度、长距离、高精度的震、电、磁、声、光等物理参数主被动双源结合动态探测与成像技术及装备;② 地质调查、钻探、物探、GIS 等多种地质参数信息融合处理及模型动态可视化技术;③ 井上下复合信息监控平台建设及时空四维连续动态监控技术;④ 综合利用物联网、云平台、大数据等技术构建矿井全生命周期智能化管理系统。如图 24 所示。

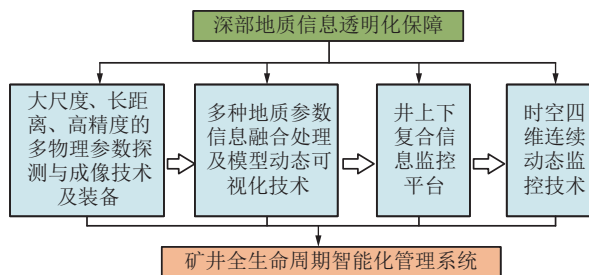


图 24 深部地质信息透明化保障难题

Fig.24 Difficult problem of guarantee the transparency of deep geological information

5.3 矿震监测空间定位精度提升

矿震在煤矿采掘过程中无法避免且波及范围较广。从矿震孕育致灾监测预警的角度来看,矿震孕震区的精确监测以及震源的高精度定位是矿震灾害预警及防治的基础。

矿井全生命周期开采区域覆岩结构与应力场是矿震孕育过程监测的重要一环,正处于由“点-面”向“场”的过渡阶段,无法实现大范围、长距离、多尺度的长期连续监测,存在关键力源有效识别难、精准监测效果差等难题,三向应力场岩层破断形态的精准监测技术及装备的研发是未来主要攻关方向。针对矿

震震源的高精度定位,目前国内外大多数矿井仍使用传统微震系统进行监测分析,其特点是微震台网主要布置于井下采掘区域周围,无法对矿井空间包围布置,导致震源水平定位精度尚可接受(误差一般不大于20 m),而垂向定位精度较低(误差大于50 m),导致对覆岩型矿震监测效果较差。目前,井地联合监测系统已开始在部分矿井得到应用,使震源垂向定位精度得到极大改善。而井地一体微震台网联合优化布置方法、矿井复杂采掘布置及非均匀各向异性地层速度模型构建及动态优化方法、微震台网动态挪移及局部稀疏布置条件下震源定位方法等问题需要攻克,如图25所示。

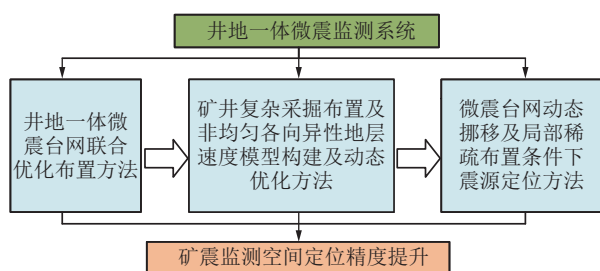


图25 矿震监测空间定位精度提升难题

Fig.25 Difficult problem of improve the spatial positioning accuracy of mining tremors monitoring

5.4 矿震致灾源头全方位解释成像与预警

矿震的孕育致灾是时空动态演化过程,是煤岩体内部结构与物性、异常地质构造和外部力源扰动综合作用的结果,围岩裂隙演化与覆岩结构调整是其典型结构特征,多物理场影响下动静载荷叠加互馈是典型应力响应特征,传统的监测预警方法难以从应力、能量、结构等方面透明量化矿震致灾源头的演化特征。矿震致灾源头全方位解释成像预警,旨在掌握灾源多物理场动静载荷演化规律,实现矿震风险源头与防控关键区的智能预警与识别。

针对矿震防控“致灾源找不准,预警效能不高”难题,有以下难题需要研究:①基于煤岩体多物理场透明解析理论,分析危险源灾变过程中应力场、变形场、震动场、能量场和裂隙场等的相互影响机制,揭示矿震危险源头孕育—触发—致灾的前兆信息响应规律,实现灾变过程多场耦合作用机理的量化表征;②研发应力场、能量场、裂隙场等多场信息快速反演方法,构建矿震孕育致灾等多场信息协同成像方法,实现矿震灾源多物理场动静载荷响应特征的透明推演;③研究多物理场与岩层结构及采场布置的联合建模方法,构建基于多物理场信息与覆岩结构运移演化联合建模的成像模型,实现矿震灾源演化的实时成像;④透明量化分析矿震灾源灾变多物理场耦合作用机理,厘清

矿震灾源孕育—启动—发生全过程的主控因素,结合全场可视化技术,透明量化解析强矿震发生的时间、位置和量级,实现矿震灾害的孕灾—致灾全过程的透明推演;⑤建立全场动静态危险源头精准判识与矿震危险性全时空(4D)智能预警模型,形成矿震风险区源头致灾前兆信息与防控关键区域全时空识别技术,实现矿震风险区的全时空智能评估与致灾源头的精准预警。如图26所示。

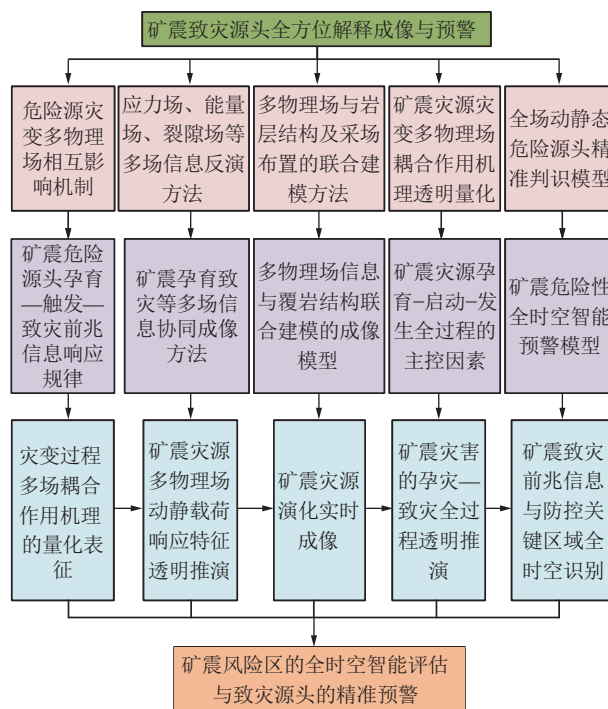


图26 矿震致灾源头全方位解释成像与预警难题

Fig.26 Difficult problem of comprehensive interpretation imaging and early warning of mining tremors source

5.5 矿震远距离防控及效果评价

部分矿震可诱发井下冲击地压、煤与瓦斯突出以及井上地表晃动、建筑物损坏等严重后果,厚硬岩层破断、隐蔽性构造活化是诱发矿震的主要原因。为充分降低厚硬破断、构造活化等诱发的矿震风险,需提前对相关区域进行大范围卸压改性工程,传统卸压手段在采掘巷道内执行,难以对高位巨厚覆岩、无巷道布置的构造区进行有效处理。

矿震远距离防控技术成为未来发展的主要方向。近期高位厚硬岩层大范围压裂的地面水压致裂技术得到推广使用,但危险源头厚硬主控层位精准判识、区域压裂缝网演化特征、厚层顶板压裂改性的实时动态评价、井地协同区域应力控制技术等问题亟待解决;同时地面巨量炸药爆破技术也在解决大范围压裂岩层中得到有效试验,值得推广,但装药量、爆破层位、炸药起爆方式等参数确定方法,爆破卸压的有效性评

估方法等亟待攻关。煤矿井下远距离定向长钻孔顶板压裂技术也得到迅速发展,但压裂钻孔层位选取、压裂工艺流程、压裂效果动态评估等问题亟待深入研究。具体如图 27 所示。

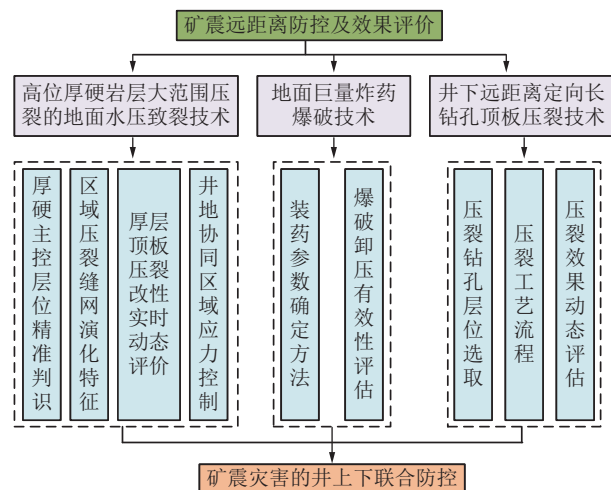


图 27 矿震远距离防控及效果评价难题

Fig.27 Difficult problem of remote control and effect evaluation of mining tremors

6 结 论

(1) 矿震发生情况复杂,不同领域的学者从不同角度给出了矿震的定义与分类,笔者总结了前人研究成果,从狭义和广义方面提出了人们普遍接受的矿震定义,根据矿震发生后的现象及发生机理对矿震进行了分类。

(2) 矿震普遍存在于矿山开采活动中,是采掘活动必然出现的动力现象,世界各个采矿大国均有矿震现象的记录,我国近年来陆续颁布了一些关于矿震防范的规章制度,有力提升了我国矿震的预防治理和应急处理能力。

(3) 矿震发生机理是通过不断深入研究和认识,概括和阐述其发生的内、外在原因,从矿震宏观触发机制以及震源微观破裂机制两方面概括了我国煤矿矿震的发生机理。

(4) 矿震与矿震灾害不能一概而论,不是所有矿震都具有危险性,从矿震震源参量、震动波传播衰减规律以及震动波扰动情况等方面探讨了矿震的致灾能力,研究了矿震对井上下的扰动致灾评估方法。

(5) 在矿震治理方面,从源头防控入手,以精准预防为切入点,最终实现井上、下安全开采,矿震治理手段包括区域防范与风险调控、风险预测与实时预警、卸压控制与主动防护。

近年来,我国煤矿矿震现象表现出前所未有的频

度、强度和复杂性,需要科学评价、理性认识矿震与矿震灾害。矿震灾害治理目前仍然存在“震源找不准、灾害控不住”等难题,亟待深入研究矿震孕育发生机理、破坏效应及防控技术方法,以支撑国家深部资源开发和能源安全战略,保障国家繁荣发展与社会长治久安。

参考文献(References):

- [1] SLAWOMIR J G, ANDRZEJ K. 矿山地震学引论[M]. 北京:地震出版社,1998.
- [2] 张少泉,关杰,刘力强,等. 矿山地震研究进展[J]. 国际地震动态,1994(2): 1-6.
ZHANG Shaoquan, GUAN Jie, LIU Liqiang, et al. Progress in research on mine earthquakes[J]. Progress in Earthquake Sciences, 1994(2): 1-6.
- [3] 朱建波,马斌文,谢和平,等. 煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱冲初探[J]. 煤炭学报,2022,47(9): 3396-3409.
ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. The differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3396-3409.
- [4] 蔡美峰,EDWIN T Brown. 深部矿产资源开采与利用中的挑战[J]. Engineering, 2017, 3(4): 9-12.
CAI Meifeng, EDWIN T Brown. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources[J]. Engineering, 2017, 3(4): 9-12.
- [5] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报,2020,45(5): 1557-1566.
YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557-1566.
- [6] 吉林省安全生产委员会. 关于吉林省龙家堡矿业有限责任公司“6·9”冲击地压事故的通报[EB/OL].[2019-06-12]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_3660578.
- [7] 河北煤矿安全监察局. 唐山矿业分公司“8.2”较大冲击地压事故调查处理报告[EB/OL].[2019-08-04]. <https://www.hebmaj.gov.cn/plus/view.php?aid=2217>.
- [8] 山东煤矿安全监察局. 山东新巨龙能源有限责任公司“2.22”冲击地压事故调查报告[EB/OL].[2020-04-21]. <http://www.sdcoal.gov.cn/articles/ch00190/202004/47b8a7d9-f749-4c33-a32b-df6791e258f7.shtml>.
- [9] 曹安业,陈凡,刘耀琪,等. 冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参量响应规律[J]. 煤炭学报,2022,47(2): 722-733.
CAO Anye, CHEN Fan, LIU Yaoqi, et al. Response characteristics of rupture mechanism and source parameters of mining tremors in frequent coal burst area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 722-733.
- [10] 徐志双,高小跃,李志强,等. 矿震和水库地震等非天然地震的公共服务需求调查研究[J]. 中国地震,2020,36(3): 630-638.
XU Zhishuang, GAO Xiaoyue, LI Zhiqiang, et al. Investigation on public service demand of earthquakes induced by human activities

- including mining and reservoir impoundment[J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(3): 630–638.
- [11] 窦林名, 曹晋荣, 曹安业, 等. 煤矿矿震类型及震动波传播规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 23–31.
DOU Linming, CAO Jinrong, CAO Anye, et al. Research on types of coal mine tremor and propagation law of shockwaves[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 23–31.
- [12] 曹安业. 采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
CAO Anye. Research on seismic effort of burst and failure of coal-rock mass associated with mining and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2009.
- [13] 李铁, 蔡美峰, 左艳, 等. 采矿诱发地震的震源机制特征——以辽宁省抚顺市老虎台煤矿为例[J]. *地质通报*, 2005, 24(2): 136–144.
LI Te, CAI Meifeng, ZUO Yan, et al. Features of focal mechanisms of mining-induced earthquakes——A case study of the Fushun Laohutai coal mine, Liaoning Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(2): 136–144.
- [14] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 岩土介质中冲击震动波传播规律的微震试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1365–1371.
GAO Mingshi, DOU Linming, ZHANG Nong, et al. Experimental study on earthquake tremor for transmitting law of rockburst in geomaterials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1365–1371.
- [15] 曹安业, 范军, 牟宗龙, 等. 矿震动载对围岩的冲击破坏效应[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(12): 2006–2010.
CAO Anye, FAN Jun, MU Zonglong, et al. Burst failure effect of mining-induced tremor on roadway surrounding rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 2006–2010.
- [16] 窦林名, 王盛川, 巩思园, 等. 冲击矿压风险智能判识与监测预警云平台[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2248–2255.
DOU Linming, WANG Shengchuan, GONG Siyuan, et al. Cloud platform of rock-burst intelligent risk assessment and multi-parameter monitoring and early warning[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2248–2255.
- [17] 姜福兴, 张翔, 朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 203–213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in the prevention and control system of coal mine rock-burst[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 203–213.
- [18] 李世愚, 和雪松, 潘科, 等. 矿山地震、瓦斯突出、煤岩体破裂——煤矿安全中的科学问题[J]. *物理*, 2007(2): 136–145.
LI Shiyu, HE Xuesong, PAN Ke, et al. Relationship between mining seismicity and gas outburst in coal mine—Some scientific questions of mining safety[J]. *Physics*, 2007(2): 136–145.
- [19] 马少鹏, 王来贵, 章梦涛, 等. 加拿大岩爆灾害的研究现状[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1998(3): 107–112.
MA Shaopeng, WANG Laigui, ZHANG Mengtao. Study on blasting hazard in Canada[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998(3): 107–112.
- [20] 张少泉, 张诚, 修济刚, 等. 矿山地震研究述评[J]. *地球物理学进展*, 1993, 8(3): 69–85.
ZHANG Shaoquan, ZHANG Cheng, XIU Jigang, et al. Review of mines seismicity[J]. *Progress in Geophysics*, 1993, 8(3): 69–85.
- [21] 张兆平, 关杰, 张少泉, 等. 矿井微震与冲击地压危险评价的研究现状[J]. *中国地震*, 1988, 4(2): 125–126.
ZHANG Zhaoping, GUAN Jie, ZHANG Shaoquan, et al. Research status of mine microseismic and rock burst risk assessment[J]. *Earthquake Research in China*, 1988, 4(2): 125–126.
- [22] 吴淑才, 覃子建. 浅析贵州矿山地震活动[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 1994, 12(1): 50–59.
WU Shucai, QIN Zijian. The analysis of seismic activities occurred in mine areas in Guizhou[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences)*, 1994, 12(1): 50–59.
- [23] 朱佩武. 辽源矿震的探索和研究[J]. *东北地震研究*, 1986, 2(2): 29–41.
ZHU Peiwu. Exploration and research of mining earthquake in Liaoyuan[J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, 1986, 2(2): 29–41.
- [24] 惠乃玲, 刘耀权, 杨明皓, 等. 抚顺老虎台煤矿矿震震源机制的研究[J]. *地震地磁观测与研究*, 1998, 19(1): 41–47, 59.
HUI Nailing, LIU Yaoquan, YANG Minghao, et al. Study on source mechanism of mine earthquake in Fushun Laohutai coal mine[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 1998, 19(1): 41–47, 59.
- [25] 李铁, 张建伟, 吕毓国, 等. 采掘活动与矿震关系[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(12): 2127–2132.
LI Tie, ZHANG Jianwei, LÜ Yuguo, et al. Relationship between mining and mining-induced seismicity[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(12): 2127–2132.
- [26] 刘金海, 姜福兴, 张宗文, 等. 超前离层诱发矿震的机理及其微震特征[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 26(1): 28–32.
LIU Jinhai, JIANG Fuxing, ZHANG Zongwen, et al. Mechanism of mine earthquake induced by lead separation and its micro-seismic characteristics[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2011, 26(1): 28–32.
- [27] 姜福兴, 魏全德, 姚顺利, 等. 冲击地压防治关键理论与技术分析[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(6): 6–9.
JIANG Fuxing, WEI Quande, YAO Shunli, et al. Key theory and technical analysis on mine pressure bumping prevention and control[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(6): 6–9.
- [28] 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.
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.
- [29] GIBOWICZ S J, KIJKO A. An introduction to mining seismology[M]. New York: Academic Press, 1994: 1–399.
- [30] HOMER R B, HASEGAWA H S. The seismotectonics of southern Saskatchewan[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1978, 15: 1341–1355.
- [31] HASEGAWA H S, WETMILLER R J, GENDZWILL D J. Induced seismicity in mines in Canada—an overview[J]. *Pure & Applied Geophys*, 1989, 129: 423–453.
- [32] 潘一山, 贾宝新, 王帅, 等. 矿震震波传播规律的三维模型及其应

- 用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1810–1814.
- PAN Yishan, JIA Baoxin, WANG Shuai, et al. Three-dimension of model and its application mines seismic wave propagation[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1810–1814.
- [33] 齐庆新, 陈尚本, 王怀新, 等. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1852–1858.
- QI Qingxin, CHEN Shangben, WANG Huaixin, et al. Study on the relations among coal bump, rockburst and mining tremor with numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1852–1858.
- [34] 童迎世, 童敏, 洪迅. 湖南矿山地震类型及特征分析[J]. 华南地震, 2003(3): 49–56.
- TONG Yingshi, TONG Min, HONG Xun. The mine earthquake types in Hunan and the characteristic analysis[J]. South China Journal of Seismology, 2003(3): 49–56.
- [35] SCOTT D F. Relationship of geologic features to seismic events, Lucky Friday Mine, Mullan, Idaho[C]//Proc. the 2nd Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990: 401–405.
- [36] SCOTT D F, WILLIAMS T J, FRIEDEL M J. Investigation of a rock-burst site, Sunshine Mine, Kellogg, Idaho[C]//Proc. the 4th Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997: 311–315.
- [37] 李铁, 蔡美峰, 蔡明. 采矿诱发地震分类的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3679–3686.
- LI Tie, CAI Meifeng, CAI Ming. A discussion on classification of mining-induced seismicity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3679–3686.
- [38] OHTSU M. Acoustic emission theory for moment tensor analysis[J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 1995, 6(3): 169–184.
- [39] CAI M, KAISER P K. Numerical simulation of acoustic emission and its application to stability monitoring of large-scale underground excavations[R]. Sudbury, Ontario: Laurentian University, 2003.
- [40] 张秀兰, 李卫, 许长江. 京西矿震活动特征及其与天然地震关系初探[J]. 国际地震动态, 1998(1): 14–17.
- ZHANG Xiulan, LI Wei, XU Changjiang. Preliminary approach to the relationship between natural earthquakes and the characteristics of coal mine earthquake activities in the western part of Beijing[J]. Progress in Earthquake Sciences, 1998(1): 14–17.
- [41] GILLIAN R F, MILES P W, JON G G, et al. Global review of human-induced earthquakes[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 178: 438–514.
- [42] 窦林名, 何学秋, 王恩元, 等. 冲击矿压与震动的机理及预报研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, 16(3/4): 199–203, 239.
- DOU Linming, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. The mechanism of rock burst and seismic waves and its prevention[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 16(3/4): 199–203, 239.
- [43] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 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, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844–1851.
- [44] RIEMER KL, DURRHEIM RJ. Mining seismicity in the Witwatersrand Basin: Monitoring, mechanisms and mitigation strategies in perspective[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2012, 4: 228–249.
- [45] EMANOV A F, EMANOV A A, FATEEV A V, et al. Mining-induced seismicity at open pit mines in Kuzbass (Bachatsky earthquake on June 18, 2013)[J]. *Journal of Mining Science*, 2014, 50: 224–228.
- [46] DURRHEIM R. Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South Africa: 100 years of research[C]//In Extracting the Science: A century of mining research, J. Brune(editor), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 2010: 156–171.
- [47] WHYATT J K, BLAKE W, WILLIAMS T J. Classification of large seismic events at the Lucky Friday Mine[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry, 1997, 106: A148–A162.
- [48] HEDLEY D G F, UDD J E. The Canada-Ontario industry rockburst project[J]. Seismicity in Mines, 1989, 129: 661–672.
- [49] KLOSE CD. Geomechanical modeling of the nucleation process of Australia's 1989 M5.6 Newcastle earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 256: 547–553.
- [50] BISCHOFF M, CETE A, FRITSCHEN R, et al. Coal mining induced seismicity in the Ruhr Area, Germany[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2010, 167: 63–75.
- [51] SZCZERBOWSKI Z. High-energy seismic events in Legnica-Głogów Copper District in light of ASG-EUPOS data[J]. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 2019, 107: 25–40.
- [52] JECH J. Seismic tomography in the Ostrava-Karviná mining region[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1989, 129: 597–608.
- [53] WILSON M P, DAVIES R J, FOULGER G R, et al. Anthropogenic earthquakes in the UK: A national baseline prior to shale exploitation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 1–17.
- [54] KLOSE C D. Mechanical and statistical evidence of the causality of human-made mass shifts on the Earth's upper crust and the occurrence of earthquakes[J]. *Journal of Seismology*, 2013, 17: 109–135.
- [55] LI Wei, SIDO Ni, ZANG Chong, et al. Rupture directivity of the 2019 M_w 5.8 Changning, Sichuan, China, earthquake and implication for induced seismicity[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, 110(5): 2138–2153.
- [56] 李永靖, 张向东, 袁世君, 等. 抚顺老虎台矿震活动趋势研究[J]. 中国矿业, 2004, 13(11): 65–67.
- LI Yongjing, ZHANG Xiangdong, YUAN Shijun, et al. Study of Fushun Laohutai mineral earthquake activity trend[J]. China Mining Magazine, 2004, 13(11): 65–67.
- [57] 卢建康, 于正春, 高承. 北票台吉矿震成因的探讨[J]. 煤炭科学技术, 1987(10): 36–38, 63–64.
- LU Jiankang, YU Zhengchun, GAO Cheng. Discussion on cause of earthquake in Beipiaotaiji Mine[J]. Coal Science and Technology, 1987(10): 36–38, 63–64.

- [58] 张凤鸣, 余中元, 许晓艳, 等. 鹤岗煤矿开采诱发地震研究[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 139–143.
ZHANG Fengming, YU Zhongyuan, XU Xiaoyan, et al. Research on induced earthquakes by coal mining in Hegang[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(1): 139–143.
- [59] 百度文库. 华丰煤矿冲击地压治理情况[EB/OL]. [2007-04-17]. https://wenku.baidu.com/view/bde9143ff41fb7360b4c2e3f5727a5e9856a27a9.html?_wkt_s_1676446959936, 2006.
- [60] 白贤栖, 曹安业, 杨耀, 等. 高位巨厚覆岩运移规律及矿震触发机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 10–20.
BAI Xianxi, CAO Anye, YANG Yao, et al. Study on movement law of extremely thick strata and triggering mechanism of mine earthquakes[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 10–20.
- [61] 《关于进一步做好地震灾害风险防范工作的通知》(安监总应急〔2018〕32号)[Z]. 北京: 国家安全监管总局, 中国地震局, 2018.
- [62] 《关于建立冲击地压矿井地震信息共享机制的通知》[Z]. 北京: 国家煤矿安监局, 中国地震局, 2020.
- [63] 《河北省建立冲击地压矿井地震信息共享机制实施办法》[Z]. 河北: 河北煤矿安监局, 河北省地震局, 河北省应急管理厅, 2020.
- [64] 科学网. 关于加强我国煤矿矿震灾害预防和治理的建议[EB/OL]. [2021-03-07]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2021/3/454093.shtm>.
- [65] 《关于加强我国煤炭资源开采矿震灾害预防和治理的建议》的答复[Z]. 北京: 应急管理部, 2021.
- [66] 《关于进一步加强冲击地压煤矿矿震事件防范与处置工作的通知》(鄂煤安字〔2021〕76号)[Z]. 鄂尔多斯: 内蒙古煤矿安全监察局鄂尔多斯监察分局. 鄂尔多斯市能源局, 2021.
- [67] 《关于印发“十四五”国家防震减灾规划的通知》(应急〔2022〕30号)[Z]. 北京: 应急管理部, 中国地震局, 2022.
- [68] 陆莱平, 窦林名, 曹安业, 等. 深部高应力集中区域矿震活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2302–2308.
LU Caiping, DOU Linming, CAO Anye, et al. Research on micro-seismic activity rules in deep high-stress concentration district[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2302–2308.
- [69] 郭文豪, 曹安业, 温颖远, 等. 鄂尔多斯矿区典型厚顶宽煤柱采场冲击地压机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 720–729.
GUO Wenhao, CAO Anye, WEN Yingyuan, et al. Mechanism of mockburst in stopes with typical thick roof and wide coal pillars in Onlos mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 720–729.
- [70] 王高昂, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 倾斜厚煤层综放工作面煤柱-关键层结构失稳型矿震机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2289–2299.
WANG Gaoang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Seismic mechanism of coal pillar-key layer structure in fully mechanized caving face of inclined thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2289–2299.
- [71] 王联合, 武光辉, 苏振国, 等. 褶曲构造带附近掘进巷道矿震规律研究[J]. 煤矿安全, 2015, 46(2): 40–42.
WANG Lianhe, WU Guanghui, SU Zhenguo, et al. Research on mine earthquake law for tunneling roadway in folded region[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(2): 40–42.
- [72] CAI Wu, DOU Linming, SI Guangyao, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses[J]. Engineering, 2021, 7(5): 687–700.
- [73] 赵同彬, 郭伟耀, 谭云亮, 等. 煤厚变区开采冲击地压发生的力学机制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1659–1666.
ZHAO Tongbin, GUO Weiyao, TAN Yunliang, et al. Mechanics mechanism of rock burst caused by mining in the variable region of coal thick-ness[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1659–1666.
- [74] 曹安业, 白贤栖, 蔡武, 等. 覆岩厚度变化应力异常机制及冲击矿压诱发机理[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 512–520.
CAO Anye, BAI Xianxi, CAI Wu, et al. Inducing mechanism of stress abnormal and coal burst in roof strata thickness variation zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 512–520.
- [75] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [76] 钱鸣高, 张顶立, 黎良杰, 等. 砌体梁的“S-R”稳定及其应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 1994, 11(3): 6–11.
QIAN Minggao, ZHANG Dingli, LI Liangjie, et al. “S-R” stability for the voussoir beam and its application[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1994, 11(3): 6–11.
- [77] 杨耀, 曹安业, 白贤栖, 等. 深井巨厚覆岩临空采动强矿震孕育发生机理[J/OL]. 煤炭科学技术: 1–12 [2023-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230208.1712.014.html>.
YANG Yao, CAO Anye, BAI Xianxi, et al. Occurrence mechanism of strong mining tremors under mining near goaf in deep mine with extremely thick strata[J/OL]. Coal Science and Technology: 1–12 [2023-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230208.1712.014.html>.
- [78] 陈学华, 吕鹏飞, 宋卫华. 高位硬岩运动诱导矿震活动规律与传播响应特征[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 71–76.
CHEN Xuehua, LÜ Pengfei, SONG Weihua. Activity characteristics and transmission characteristics of high-position hard strata movement induced mine earthquake and its response[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 71–76.
- [79] WU Kunbo, ZOU Junpeng, JIAO Yuyong, et al. Focal mechanism of strong ground seismicity induced by deep coal mining[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56: 779–795.
- [80] 朱斯陶, 刘金海, 姜福兴, 等. 我国煤矿顶板运动型矿震及诱发灾害分类、预测与防控[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3667–3677.
ZHU Sitao, LIU Jinhai, JIANG Fuxing, et al. Types, occurrence mechanism and prevention of overall instability induced rock-bursts in China coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3667–3677.
- [81] 蔡武, 窦林名, 王桂峰, 等. 煤层采掘活动引起断层活化的力学机制及其诱冲机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1193–1202.
CAI Wu, DOU Linming, WANG Guifeng, et al. Mechanism of fault reactivation and its induced coalburst caused by coal mining activities[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1193–1202.
- [82] 郭晓强, 窦林名, 陆莱平, 等. 采动诱发断层活化的微震活动规律研究[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 26–29.

- GUO Xiaoqiang, DOU Linming, LU Caiping, et al. Research on the microseismic activity of fault reaction induced by coal mining[J]. *Safety in Coal Mines*, 2011, 42(1): 26–29.
- [83] 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): 42–649.
- 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): 42–649.
- [84] 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 & Technology, 2009.
- [85] 王浩, 赵毅鑫, 牟宗龙, 等. 综放工作面采动诱发逆断层张剪失稳特征及矿震活动规律分析[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2573–2581.
- WANG Hao, ZHAO Yixin, MU Zonglong, et al. Characteristics of seismic activity and tensile-slip features of fault under stress and displacement disturbance in full-mechanized workplace[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2573–2581.
- [86] 张宁博, 赵善坤, 邓志刚, 等. 动静载作用下逆冲断层力学失稳机制研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(6): 1186–1192.
- ZHANG Ningbo, ZHAO Shankun, DENG Zhigang, et al. Mechanical instability mechanism of thrust fault under static and dynamic loading[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(6): 1186–1192.
- [87] 朱广安, 蒋启鹏, 伍永平, 等. 应力波扰动作用下断层滑移失稳的数值反演[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(2): 370–379.
- ZHU Guangan, JIANG Qipeng, WU Yongping, et al. Numerical inversion of dynamic behavior of fault slip instability induced by stress waves[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(2): 370–379.
- [88] 吴振华, 潘鹏志, 潘俊锋, 等. 地堑构造区冲击地压发生机制及矿震活动规律[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2225–2238.
- WU Zhenhua, PAN Pengzhi, PAN Junfeng, et al. Analysis of mechanism of rock burst and law of mining induced events in graben structural area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2225–2238.
- [89] 曹安业, 刘耀琪, 蒋思齐, 等. 临地堑开采冲击地压发生机制及主控因素研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(1): 36–44, 53.
- CAO Anye, LIU Yaoqi, JIANG Siqu, et al. Occurrence mechanism and main control factors of coal burst near graben mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(1): 36–44, 53.
- [90] 王宏伟, 田政, 王晴, 等. 采动诱发断层覆岩耦合失稳的突变效应研究[J/OL]. *煤炭学报*: 1–14[2023–02–09]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1158>.
- WANG Hongwei, TIAN Zheng, WANG Qing, et al. Investigation on the mutation effect induced by the coupled destabilization of fault and overburden rock strata during coal seam mining[J/OL]. *Journal of China Coal Society*. 1–14[2023–02–09]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1158>.
- [91] 王宏伟, 王晴, 石瑞明, 等. 煤矿冲击地压与断层构造失稳的多物理场互馈机制研究进展[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 762–790.
- WANG Hongwei, WANG Qing, SHI Ruiming, et al. A review on the interaction mechanism between coal bursts and fault structure instability from the perspective of multi-physical field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 762–790.
- [92] DRZEWIECKI J, KABIESZ J. Dynamic events in roof strata-occurrence and prevention[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2008: 55–57.
- [93] GILBERT F. Excitation of the normal modes of the Earth by earthquake sources[J]. *Geophysical Journal International*, 1971, 22(2): 223–226.
- [94] ZHAO Yong, YANG Tianhong, ZHANG Penghai, et al. Inversion of seepage channels based on mining-induced microseismic data[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 126: 104180.
- [95] GIBOWICZ S J. The mechanism of large mining tremors in Poland[C]// *Rockbursts and seismicity in mines*, Gay N C and Wainwright E H eds. Johannesburg: Balkema, 1984: 17–28.
- [96] MCGARR A. An implosive component in the seismic moment tensor of mining induced tremor[J]. *Geophysical Research Letters*, 1993(19): 1579–1582.
- [97] 李铁, 蔡美峰, 孙丽娟, 等. 基于震源机制解的矿井采动应力场反演与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(9): 1747–1753.
- LI Tie, CAI Meifeng, SUN Lijuan, et al. Inversion of mining-induced stress field and its application based on focal mechanism solution[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(9): 1747–1753.
- [98] 井广成, 曹安业, 窦林名, 等. 煤矿褶皱构造区冲击矿压震源机制[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 203–211.
- JING Guangcheng, CAO Anye, DOU Lingming, et al. Focal mechanism of rockburst in folded region in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 203–211.
- [99] 陈栋, 王恩元, 李楠. 千秋煤矿微震震源参数特征以及震源机制分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(7): 2011–2019.
- CHEN Dong, WANG Enyuan, LI Nan. Analysis of microseismic source parameters and focal mechanism in Qianqiu Coal Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 2011–2019.
- [100] HE Zhilong, LU Caiping, ZHANG Xiufeng, et al. Numerical and field investigations of rockburst mechanisms triggered by thick-hard roof fracturing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(11): 6863–6886.
- [101] 潘颖. 糯扎渡水库地区地震活动和震源参数特征研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2015.
- PAN Ying. Study on characteristics of seismic activity and source parameters in Nuozhadu Reservoir Region[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2015.
- [102] 陈凡. 煤矿矿震破裂机制及其震源力学参量响应规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- CHEN Fan. Failure mechanism of mining induced tremor and response law of its source mechanics parameters [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [103] 王生文. 震源力学参数在震后趋势判定中的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2014.
- WANG Shengwen. A study on application of focal mechanical

- parameters to seismic tendency prediction after strong earthquakes[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2014.
- [104] 陈栋. 煤矿微震震源参数反演及震源破裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- CHEN Dong. Study on the source parameters and rupture mechanism of micro-earthquakes in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [105] 张冬阳. 大屯矿区冲击矿压主控因素与危险性矿震判识研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- ZHANG Dongyang. Study of main controlling factors of datun mining area and identifying dangerous mining induced tremors[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2021.
- [106] 曹安业, LUO Xun, 窦林名, 等. 采动煤岩体中冲击震动波传播的微震效应试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(4): 530–535.
- CAO Anye, LUO Xun, DOU Linming, et al. Experimental study on microseismic effect of shock wave propagation in mining coal and rock mass[J]. *Chinese Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(4): 530–535.
- [107] 陈剑杰, 孙钧, 林俊德. 深埋岩石洞室受爆炸应力波作用的破坏效应[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2001, 20(4): 402–404.
- CHEN Jianjie, SUN Jun, LIN Junde. Failure of deepburied rock openings under blast stress wave[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2001, 20(4): 402–404.
- [108] 叶根喜, 姜福兴, 郭延华, 等. 煤矿深部采场爆破地震波传播规律的微震原位试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(5): 1053–1058.
- YE Genxi, JIANG Fuxing, GUO Yanhua, et al. Experimental research on seismic wave attenuation by field microseismic monitoring in a deep coal mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(5): 1053–1058.
- [109] 刘耀琪, 曹安业, 王崧玮, 等. 基于微震群震动波能量衰减特性的冲击地压危险预测方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(4): 1523–1533.
- LIU Yaoqi, CAO Anye, WANG Songwei, et al. Prediction method of coal burst based on attenuation characteristics of seismic cluster energy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1523–1533.
- [110] MIAO Shuting, KONICEK Petr, PAN Pengzhi, et al. Numerical modelling of destress blasting – A state-of-the-art review[J]. *Journal of Sustainable Mining*, 2022, 21(4): 278–297.
- [111] 陈国祥, 窦林名, 高明仕, 等. 动力扰动对回采巷道冲击危险的数值模拟[J]. *采矿与安全工程学报*, 2009, 26(2): 153–157.
- CHEN Guoxiang, DOU Linming, GAO Mingshi, et al. Numerical simulation of dynamic vibration affecting rock burst in mining gateway caused by tremor[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(2): 153–157.
- [112] SARRACINO R. Modeling of shock-and gas-driven fractures induced by a blast using bonded assemblies of spherical particles[C]//International Symposium on Rock fragmentation by blasting. 1996.
- [113] MA GW, AN XM. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(6): 966–975.
- [114] SAZIDM, SINGH T N. Two-dimensional dynamic finite element simulation of rock blasting[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6: 3703–3708.
- [115] ZHU Zheming, XIE Heping, MOHANTY Bibhu. Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(2): 111–121.
- [116] KAISER P K. Canadian rockburst support handbook[M]. Canada: Geomechanics Research Centre, 1996.
- [117] 马克. 开挖扰动条件下岩质边坡灾变孕育机制、监测与控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- MA Ke. Study on the potential failure mechanism, monitoring and controlling methods of rock slope under excavation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [118] 周朝, 尹健民, 周春华, 等. 考虑累积微震损伤效应的荒沟电站地下洞室群围岩稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(5): 1011–1022.
- ZHOU Chao, YIN Jianmin, ZHOU Chunhua, et al. Stability analysis of surrounding rock mass of underground caverns at Huanggou hydropower station considering cumulative microseismic damage effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(5): 1011–1022.
- [119] 高明仕, 徐东, 贺永亮, 等. 厚硬顶板覆岩冲击矿震影响的远近场效应研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 215–226.
- GAO Mingshi, XU Dong, HE Yongliang, et al. Study on near and far-field effect of rock shock in thick and hard roof[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(2): 215–226.
- [120] WANG Changbin, SI Guangyao, ZHANG Chengguo, et al. Ground motion characteristics and their cumulative impacts to burst risks in underground coal mines[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(1): 39.
- [121] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.
- [122] 姜福兴, 舒涛先, 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 working faces based on stress superimposition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(12): 2428–2435.
- [123] CAI Wu, BAI Xianxi, SI Guangyao, et al. A monitoring investigation into rock burst mechanism based on the coupled theory of static and dynamic stresses[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5451–5471.
- [124] KAISER P K. Rock mechanics considerations for construction of deep tunnels in brittle rock[C]//Rock Mechanics In Underground Construction: (With CD-ROM). World Scientific, 2006.
- [125] 魏晓刚, 麻凤海, 刘书贤. 煤矿采动建筑地震动力灾变与防控研究的现状与发展趋势[J]. *地震研究*, 2015, 38(4): 674–688.
- WEI Xiaogang, MA Fenghai, LIU Shuxian. Current situation and development trend of seismic dynamic disaster and prevention research of buildings in coal mine goaf[J]. *Journal of Seismological*

- Research, 2015, 38(4): 674–688.
- [126] GB 6722—2014, 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [127] 张明, 姜福兴, 李克庆, 等. 基于厚硬关键层破断的地面震动损害边界研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 514–520, 536.
ZHANG Ming, JIANG Fuxing, LI Keqing, et al. A study of surface seismic damage boundary based on the break and movement of extremely thick key stratum[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 514–520, 536.
- [128] 窦林名, 许家林, 陆莱平, 等. 离层注浆控制冲击矿压危险机理探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 145–149.
DOU Linming, XU Jialin, LU Caiping, et al. Study of controlling rock burst with grouting bed separation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 145–149.
- [129] 张强, 杨康, 张吉雄, 等. 固体充填开采直接顶位态控制机制及工程案例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 47(3): 1043–1054.
ZHANG Qiang, LIU Yong, ZHANG Jixiong, et al. Influencing factors and control methods of mechanism interference in the autonomous compaction process of solid intelligent filling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1043–1054.
- [130] 蓝航, 韩科明, 韩震. 深部条带煤柱蠕变影响下地表残余沉降及煤柱稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 1–12.
LAN Hang, HAN Keming, HAN Zhen. Surface residual subsidence and coal pillar stability influenced by coal creep in deep strip mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 1–12.
- [131] 屠世浩, 窦凤金, 万志军, 等. 浅埋房柱式采空区下近距离煤层综采顶板控制技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 366–370.
TU Shihao, DOU Fengjin, WAN Zhijun, et al. Strata control technology of the fully mechanized face in shallow coal seam close to the above room-and-pillar gob[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 366–370.
- [132] 国家矿山安全监察局内蒙古局. 内蒙古鄂尔多斯市吴盛能源石拉乌素煤矿圆满完成世界首例煤矿地面深孔预裂爆破工程[EB/OL]. <https://zyzny.org.cn/newsinfo/2901135.html>.
- [133] CAI W, DOU L, SI G, et al. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst fore-casting in underground coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104086.
- [134] 丛利, 曹安业, 周远宏, 等. 基于动静载冲击地压危险叠加的综合预警方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 767–776.
CONG Li, CAO Anye, ZHOU Yuanhang, et al. The comprehensive pre-warning method of rock burst hazard based on theory of dynamic and static combined loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 767–776.
- [135] 陈结, 杜俊生, 蒲源源, 等. 冲击地压“双驱动”智能预警架构与工程应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 791–806.
CHEN Jie, DU Junsheng, PU Yuanyuan, et al. “Dual-driven” intelligent pre-warning framework of the coalburst disaster in coal mine and its engineering application[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 791–806.
- [136] 曹安业, 刘耀琪, 杨旭, 等. 物理指标与数据特征融合驱动的冲击地压时序预测方法[J/OL]. 煤炭学报, 1–16. [2023–06–06] doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.0680.
CAO Anye, LIU Yaoqi, YANG Xu, et al. Physical index and Data Fusion-Driven method for coal burst prediction in time sequence[J]. Journal of China Coal Society, 1–16. [2023–06–06] doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.0680.
- [137] ZHAO T, XING M, GUO W, et al. Anchoring effect and energy-absorbing support mechanism of large deformation bolt[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28: 572–581.
- [138] 李晨. NPR锚杆冲击拉伸动力学特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
LI Chen. Study on impacting and elongation dynamic mechanical characteristics of NPR bolt[D]. Beijing: China University of Mining and Technology–Beijing, 2016.
- [139] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护–改性–卸压协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 845–864.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolt-ing-modification–destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 845–864.
- [140] 潘一山, 齐庆新, 王爱文, 等. 煤矿冲击地压巷道三级支护理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1585–1594.
PAN Yishan, QI Qingxin, WANG Aiwen, et al. Theory and technology of three levels support in bump-prone roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1585–1594.