

煤矿采空区的地震动力灾变及安全防控的研究进展与挑战*

魏晓刚¹, 麻凤海², 刘书贤³

(1. 郑州航空工业管理学院 土木建筑工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622;
3. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对煤矿采空区的地震安全及矿区地下结构抗震研究不足的问题, 通过分析国内外专家学者对地下结构的地震动力灾变与防控的相关研究成果, 分别从煤矿采空区灾害的特征与形成原因、煤矿采空区动力灾害研究的紧迫性与严峻性、地下结构抗震研究领域的已有优秀研究成果以及煤矿采空区地震动力灾变研究的不足及发展趋势等方面进行了分析探讨, 在分析地下结构抗震研究成果的基础上指出了煤矿采空区地震动力灾变与安全防控迫切需要解决的问题, 系统凝练了地震作用下煤矿采空区及地下结构的地震损伤力学机制与灾变控制的核心学术问题, 初步揭示了煤矿采空区的地震动力响应、煤矿地下结构的地震破坏模式迫切需要解决的技术难题, 为煤矿采空区的地震动力稳定性及煤矿采空区地下结构的地震灾变防控提供参考和借鉴意义。

关键词: 煤矿采空区; 灾变防控; 开采沉陷; 地震作用; 动力稳定性; 岩层移动

中图分类号: TV311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2015)03-0495-13

0 引言

我国矿区由于煤炭资源持续高效的开采形成了大量形式各异、大小不一、纵横交错、立体分布的煤矿采空区(何满潮, 钱七虎, 2010; 何国清, 杨伦, 1994; 王来贵等, 2007; 朱旺喜等, 2003; 谭志祥, 邓喀中, 2006), 而随着土地资源的日益紧张及工程建设的迅猛发展, 越来越多的建筑物、桥梁、输电塔以及隧道等各类基础设施不可避免的要建在煤矿采空区场地上, 但是煤矿采空区场地的稳定性能否满足建造建筑物的条件值得商榷, 并且由于煤矿采空区岩层的移动变形导致地表塌陷以及地面建筑损伤倒塌现象异常严峻。

煤层开采过程中不可避免的要面临各种扰动荷载的动力破坏效应, 但矿山建设设计中较少考虑地震等各种动力灾害对矿区地下工程结构的影响及破坏(王金庄, 郭增长, 2002; 来兴平, 2004; 王来贵等, 2002; 吴启红, 2010)。我国有80%以上的矿区处于在强地震区, 但却没有专门细致化的矿山地下结构抗震计算方法及抗震设计规

范标准(胡聿贤, 2006; 姜耀东等, 2005; 许增会等, 2004)。地震作用下煤矿采空区的稳定性, 煤矿巷道结构与周围介质、采空区与地面建筑动力响应的相互影响是研究煤矿采空区地震安全不可回避的问题。笔者针对煤矿采空区的地震安全问题, 通过分析国内外专家学者对地下结构的地震灾变与防控的相关研究成果, 分别从煤矿采空区灾害的特征与形成原因、煤矿采空区动力灾害研究的紧迫性与严峻性、地下结构抗震研究的优秀研究成果以及煤矿采空区地震动力灾变研究的不足及发展趋势等方面进行了分析探讨, 并对煤矿采空区的动力灾变及安全防控迫切需要解决的问题进行了归纳总结, 在此基础上对煤矿采空区的动力灾变所面临的挑战性问题进行了展望。

1 煤矿采空区灾害的破坏特征及形成原因

煤矿采空区的存在是矿区安全及工程建设的重大安全隐患, 不仅直接威胁着矿区的安全, 而且煤矿采空区在失稳破坏的过程中还会衍生出各

* 收稿日期: 2015-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助(51474045, 51174038), 辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2012111), 中国煤炭工业协会科研项目(MTKJ2014-192, MTKJ2012-319)和辽宁工程技术大学市场调研基金(SCDY2012010)联合资助.

种各样的动力灾害；通过分析国内外相关文献（何满潮，钱七虎，2010；何国清，杨伦，1994；王来贵等，2007；朱旺喜等，2003；谭志祥，邓喀中，2006；王金庄等，2002；来兴平，2004；王来贵等，2002；吴启红，2010）发现煤矿采空区所导致的次生（动力）灾害主要存在着以下四大特征：（1）影响范围广，尺度大；（2）变形速率大，动力学特征明显；（3）危害范围大，突发性强；（4）社会负面效应大，经济损失严重。

煤矿采空区次生灾害的四大特征导致其成为威胁矿区安全的重大安全隐患，造成煤矿采空区及上覆岩层（围岩）结构体系发生失稳的原因既有自然因素，也有人为因素，主要涉及到：（1）不同矿区的工程地质水文地质条件差异较大，由此导致不同煤矿采空区失稳破坏坍塌的原因也较多，其主要原因是由于地下煤炭资源的开采活动，破坏了围岩的应力平衡状态，导致煤矿采空区附近的围岩发生应力重分布现象，进而导致岩层（体）发生了不同程度的损伤破坏，造成煤矿采空区成为各种灾害灾难衍生的源泉；（2）地下采煤工作面不可避免的要形成断层（或者地下断层原先就存在），断层在外力扰动荷载作用下容易引发岩层的移动变形，从而造成断层附近容易发生坍塌失稳破坏现象；（3）多频次、高强度、大规模的开采活动会直接引发（附近已有的）煤矿采空区发生失稳破坏；（4）地下煤炭资源的开采方案不合理，特别是煤矿巷道的保安（护）煤柱留设的不合理以及煤柱支撑体系的物理力学性能的损伤劣化，极易造成煤柱失稳进而引发煤矿采空区的失稳破坏；（5）地下煤炭资源不规范的过度开采：由于煤矿开采管理体制的不完善，目前还存在着小煤矿的私采偷采行为，由于小煤矿的生产技术设备落后、数量多而杂以及开采方案极不合理，导致所产生的煤矿采空区分布杂乱无章，在外界扰动荷载的影响下不同煤矿采空区的失稳破坏会相互影响，造成更大的破坏；（6）外界自然环境的影响：矿区的工业环境恶劣并且复杂多变，其生态环境极其脆弱，如果出现灾害性的恶劣自然环境，就会为煤矿采空区的失稳破坏引发次生灾害提供孕育发展的条件。

2 煤矿采空区地震安全问题研究的严峻性

煤炭开采后所形成的大量煤矿采空区以及废

弃矿井巷道不仅严重降低了矿区的安全性，而且还会产生各种各样的衍生灾害，对矿山城市造成巨大的严重威胁（钱鸣高等，1994；谢和平，2003）。最近几年我国由于煤矿采空区所引发的灾害事故频发，造成了巨大的财产损失和人员伤亡（表1）。

由于煤矿巷道结构所处的工程地质环境比较复杂，矿井的高温环境、高地应力、高水压以及高浓度的瓦斯等均会引发各种不可控的突发性灾害事故的发生，对煤炭资源的开发是严峻的挑战和考验（何满潮，钱七虎，2010；谢和平，2003）：各种煤矿动力灾害（如冲击地压、煤与瓦斯突出、矿震、顶板大面积来压）发生的频度和强度呈现出增加的趋势，而且其动力发生灾害范围较广，由此而带来巨大的人员伤亡和经济损失（图1）。

对于矿区地下工程结构的抗震研究国内外的专家学者涉足相对较少（马行东，2005；马行东等，2006；孙有为，2006，2011；刘向峰，2005；刘刚，2011；唐礼忠等，2012；吕涛，2008；张玉敏，2010；谷宁，2011；汪海波，2013；张彦宾，2012；言志信等，2013；崔臻等，2013；赵宝友，2009；余诗刚，董陇军，2013），现有的抗震理论无法适应矿区地下结构的抗震防灾设计。对于以煤炭资源为主要能源的国家，发生地震后矿井巷道的围岩介质容易发生失稳破坏，其承载能力会严重降低，此时矿区巷道结构的基本使用功能已经完全破坏丧失，如何合理的解决我国矿井巷道结构的抗震设计问题及煤矿沉陷区的地面建筑的抗震安全问题也是迫在眉睫、亟需解决的工程科学问题。

3 煤矿采空区地震安全性研究的紧迫性

我国处于欧亚大陆地震带和环太平洋地震带世界两大地震带之间（胡聿贤，2006），也是世界上强震活动区之一，区域地震活动极其频繁活跃。根据我国目前现行地震烈度区划图可知，我国地域面积的60%以上处于基本地震烈度6度以上（胡聿贤，2006）。由于我国有80%以上的矿区处于在强地震区（刘书贤等，2013），所以地震作用下矿区工程结构的动力灾变控制及煤矿巷道结构的地震安全评价方法的研究就十分重要。

表 1 煤矿采空区衍生灾害的实际案例

Tab. 1 Actual cases of the derivative disaster in coal mining area		
日期	地点	灾害表现形式及损失
	山东省济宁市	由于煤矿采空区所引起的地表移动变形导致大量的企业被迫停产搬迁，并且在山东省济宁高新技术产业园区的煤矿采空区出现了大量的新建建筑，煤矿采空区能否建造建筑物值得商榷，所以煤矿采空区存在着巨大的安全隐患。
	陕西省榆林市	目前存在的煤炭采空区面积大约为 499.41 km ² ，并且煤矿采空区每年都大约新增 70 ~ 80 km ² ；其中煤矿采空区已经发生坍塌沉陷的面积约为 118.14 km ² ，并且每年也在以 30 ~ 40 km ² 的速度在扩大。
	山西省	山西省目前累计形成的煤矿采空区达到 63 × 10 ⁹ m ³ ，其面积已经达到 5 115 km ² ，煤矿采空区所引起的地表沉陷面积达 2 978 km ² ，由于煤矿采空区的地层沉陷所产生的地面裂缝、地层塌陷、山体滑坡、崩塌高达 2 146 处，由此造成了 42.6 km ² 的林地以及 1 082 km ² 的耕地被破坏，涉及到 3 309 个村庄、66 万人口，其危害之大、影响范围之广令人惊讶，加之山西省所处的地震带有活跃的趋势，一旦发生地震，山西省如此大面积煤矿采空区的危害后果不堪设想。
2007 年 8 月 29 日	陕西省神木县孙家岔镇的边不拉煤矿	神木县孙家岔镇的边不拉煤矿采空区由于坍塌导致了 M _L 3.3 地震，造成了大量的矿区建筑倒塌破坏。
2010 年 12 月 28 日 23 时 18 分	陕西省榆林市神木县	煤矿采空区的突然沉陷坍塌造成了 M _L 3.0 地震，煤矿采空区附件的居民建筑出现了裂缝破坏现象。
2012 年 9 月 7 日 11 时 19 分	云南省昭通市彝良县	云南省昭通市彝良与贵州省毕节地区威宁彝族回族苗族自治县交界的煤矿采空区发生了 5.7 级地震。新闻报道以《彝良地震之痛：夺命煤矿采空区》为题报道了该地区农民自建房屋 95% 以上都不具备抗震的条件，煤矿企业开采形成的煤矿采空区，更加剧了地震的破坏性，造成大量的村民无家可归。
2013 年 2 月 7 日	河南省平顶山矿区	由于煤矿采空区的突然垮落沉陷，导致煤矿采空区的崩塌方量达到 52 × 10 ⁴ m ³ ，滑坡方量达到 2 × 10 ⁸ m ³ ，由此造成 1 395 间房屋开裂破坏、72 间房屋完全倒塌破坏、1 400 余亩耕地损毁，所造成的直接经济损失高达 9 530 万元。目前平顶山矿区已经形成了 97 个煤矿采空区，其中有 13 个属于影响范围大并且严重的区域，形成了面积已经达到 155.19 km ² 的煤矿采煤沉陷区域。
2013 年	郑州煤炭工业集团李粮店煤矿	煤矿采空区的部分岩层为流砂层，主矿井被掩埋、地表塌陷严重，并且高铁路线穿过该采空区，导致行至该区域的高铁被迫减速通过，由此造成了李粮店煤矿近 20 亿元的工程基础设施报废。
2014 年 3 月 19 日	徐州矿务局	中央电视台以《消失的黑洞》报道了徐州矿务局煤矿采空区所造成的土地荒漠化、建筑损伤破坏等现象，指出了煤矿采空区是各种灾难衍生的黑洞。
2015 年 4 月 1 日	辽宁省沈阳市康平县	发生 3.3 级地震，该地震是由矿震引起的，震源深度 0 km。



图 1 动力灾害对矿井巷道结构的破坏

(a) 岩块弹射断裂；(b) 采煤机冲击破坏；(c) 煤矿巷道变形破坏

Fig. 1 The damage of roadway structure in the mine caused by dynamic disasters

(a) rock ejection and fracture; (b) impact damage of coal winning machine; (c) deformation and failure of coal mine roadway

国内外的专家学者关于地下结构的工程抗震研究存在以下不足(胡聿贤, 2006): (1) 关于地下结构具有较强的抗震性能并且地震作用下不容易发生损伤破坏的认识是缺乏充分的震害数据依据的; (2) 目前关于地下结构抗震设计的理论、方法还不能较好的反映地下结构地震动力响应的实际力学行为; (3) 当前关于地下结构的强震致灾机理及防控手段依然相对缺乏; (4) 目前关于地下结构的抗震设计的相关理论及方法还不够成熟, 尚无法满足蓬勃发展的地下结构工程防灾减灾的需要。

目前关于煤矿采空区的研究更多的是关注静力荷载作用下的煤矿采空区稳定性及地表移动变形, 较少考虑动荷载对煤矿采空区的影响和破坏。在地下煤炭资源开采的过程中, 存在大量的不可控的扰动荷载(岩爆、地震、矿震、开采扰动、爆破开采等), 扰动荷载对煤矿采空区的稳定性构成较大的威胁和破坏。1976年7月28日发生的唐山 $M_L 7.8$ 地震造成了大量的地下工程结构(煤矿巷道、地下通道以及人防工程)的破坏(胡聿贤, 2006)。矿区由于工程地质条件复杂, 往往存在着断层以及断裂带, 一旦发生地震, 其后果不堪设想。目前国内外专家学者(刘向峰, 2005; 刘刚, 2011; 张彦宾, 2012; 王辉, 2003; 钱七虎, 陈士海, 2004; 席道瑛等, 1996; 李欢秋等, 2003; 杨军等, 2001; 王明洋等, 2001; 单仁亮等, 2003; 魏晓刚, 2011, 2015)对于地下隧道结构、地铁结构以及地下厂房结构开展了一些研究工作, 也取得了一定的研究成果, 但是对于矿区地下巷道结构的地震动力稳定性的研究则相对较少。

矿区地下巷道结构的安全问题已经成为矿区工程建设安全问题重要的组成部分。由于学科专业领域的限制, 土木工程领域的专家学者较少涉足煤矿巷道结构的地震灾变研究。由于采矿工程领域的研究人员对土木工程领域抗震知识的缺乏, 对于煤矿巷道结构的地震动力响应也较少关注, 再加上矿区地下结构的震害案例缺乏, 相关的试验研究也相对较少, 因此对于地震作用下矿区地下工程结构(煤柱、煤矿巷道及围岩介质)体系的损伤劣化机理、损伤演化规律和抗震性能的研究还很不全面深入, 尤其是缺乏对煤矿地下巷道结构的地震损伤力学机制与灾变控制深入细致的

探讨研究。如何合理揭示煤矿采空区的地震动力响应、煤矿巷道结构的地震破坏模式及控制策略是研究煤矿采空区的地震安全迫在眉睫的问题。目前, 缺乏合理的地下结构抗震设计方法与理论, 尤其是矿区地下巷道结构方面缺乏相对应的抗震设计规范是限制煤矿采空区的地震安全研究发展的主要原因。

近几年来在国家自然科学基金委以及国家科技部相关科研基金的支持下(见表2国内部分专家学者所承担的国家自然科学基金项目及国家重点基础研究发展计划项目), 煤矿采空区稳定性及地表移动变形的成灾机制等相关的科研项目得到了相关科研基金的支持, 由此大大促进了煤矿采空区失稳成灾机制研究的发展。

通过分析表2与国内煤矿采空区灾变研究相关的部分国家自然科学基金及国家重点基础研究发展计划项目(973项目)可以发现: 煤矿采空区成灾机制的相关研究正在逐渐得到国家以及相关专家学者的关注和重视, 近三年(2012~2015年)直接与煤矿采空区相关的国家自然科学基金科研项目迅速增加; 从2007年以中国矿业大学缪协兴教授为首席科学家所承担的973项目《煤矿突水机理与防治基础理论研究》为标志, 煤矿开采所引发的各种动力灾害开始引起国内专家的重视, 之后国家科技部在采矿工程领域多次对与煤炭开采的各种动力灾害破坏现象进行973项目立项, 如2013年的《西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究》以及2015年的《我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究》。973科研项目的成功立项充分说明了国家对煤炭开采所引发的各种动力灾害越来越重视; 尤其是2015年以中南大学周子龙教授为首席科学家所承担的973项目《复杂采空区大规模坍塌的灾害孕育机理研究》、以中国科学院武汉岩土力学研究所盛谦教授为首席科学家所承担的973项目《强震区重大岩石地下工程地震灾变机理与抗震设计理论》以及北京交通大学袁大军教授为首席科学家所承担的973项目《高水压越江海长大盾构隧道工程安全的基础研究》的成功立项, 标志着煤矿采空区灾害的成灾机制与防控以及地下结构的抗震安全研究将会成为我国学术界及工程界关注的热点和亟需解决的科学问题和工程问题。

表2 煤矿采空区灾变研究的部分国家自然科学基金

Tab. 2 Part of National Natural Science Foundation of research on disaster of coal mining area

时间	单位	主持人	项目名称
2001 年	山东科技大学	姜福兴	采动空间结构及其与应力场的动态关系研究
2003 年	辽宁工程技术大学	王来贵	复杂环境作用下大面积采动地层演化规律研究
2004 年	中国矿业大学	贺永年	深部采动覆岩移动规律及巷道稳定性控制研究
2006 年	辽宁工程技术大学	刘向峰	大面积采动地层结构地震动力稳定性研究
2007 年	大连理工大学	唐春安	采动煤岩地质环境劣化诱发矿山动力灾害机理研究
2007 年	辽宁工程技术大学	杨帆	多频次采动矿山地层沉陷致灾机理研究
2007 年	中国矿业大学	陈占清	采动岩体蠕变-渗流耦合动力学行为的试验和理论基础研究
2008 年	青岛理工大学	于广明	采动条件下结构化岩体破坏的缺陷协同演化力学模型
2008 年	中国矿业大学	刘卫群	基于流-固蚀损裂隙演化和非 Darcy 渗流突变的采动岩体稳定性理论
2010 年	河南理工大学	郭文兵	采动影响下高压输电线路协同变形理论及应用研究
2010 年	中国地质环境监测院	程国明	煤矿采动条件下浅埋输气管线变形机理研究
2010 年	辽宁工程技术大学	王学滨	基于梯度增强拉格朗日元法的采动条件下三维煤岩层状结构的 应变局部化及稳定性研究
2011 年	中国矿业大学	王旭锋	冲沟发育矿区浅埋煤层采动覆岩失稳机理及其控制研究
2012 年	中国科学院地质与地球物理研究所	滕吉文	煤矿灾害事件与地震槽波波场特征示范研究——煤层厚度变异 与断裂构造和采空区探测
2012 年	煤炭科学研究总院	欧阳振华	浅埋深薄基岩煤层采动覆岩破断特性与机理研究
2012 年	中国矿业大学	张凯	采动下深部巷道煤岩屈服破坏动态演化机制及巷道安全性分析
2012 年	中国矿业大学	陈忠辉	采动煤岩体主控裂隙演化规律及协同效应研究
2012 年	中国矿业大学	窦林名	采动动载对煤巷锚网支护结构稳定性损伤机理研究
2012 年	中国矿业大学	许家林	浅埋煤层重复采动关键层结构失稳致灾机理研究
2012 年	四川大学	谢和平	浅埋深薄基岩采动岩体破断及渗流基础
2013 年	燕山大学	王树仁	采空区层状顶板变形破坏特征试验研究
2013 年	中国矿业大学	邓喀中	废弃柱式采空区塌陷风险性评价理论和应用研究
2013 年	中国矿业大学	王连国	采动环境下深部软岩巷道围岩破裂演化及锚注支护机理研究
2013 年	安徽理工大学	孟祥瑞	急倾斜厚煤层综采工作面采动围岩破坏演化规律与成灾机理研究
2013 年	辽宁工程技术大学	赵 娜	大面积采动地层长期稳定性研究
2014 年	北京科技大学	宋卫东	多场耦合作用下深部硬岩矿山采空区损伤演化机理及稳定性研究
2014 年	煤炭科学技术研究院有限公司	滕永海	大型建（构）筑物采动损坏与防护技术研究
2014 年	华北水利水电学院	胡青峰	煤柱群下重复采动覆岩与地表沉陷机理与预测模型研究
2014 年	中国矿业大学	左建平	不同开采方式下采动岩层的动态破损机理及稳定性研究
2014 年	青岛理工大学	于广明	基于采动覆岩离层异速生长的开采沉陷预测模型研究
2014 年	大连大学	麻凤海	地震作用下煤矿采动区岩层动力失稳与建筑安全控制研究
2007 年	中国矿业大学	缪协兴	煤矿突水机理与防治基础理论研究（973 项目）
2013 年	中国矿业大学	缪协兴	西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究（973 项目）
2015 年	中南大学	周子龙	复杂采空区大规模坍塌的灾害孕育机理研究（973 项目）
2015 年	中国矿业大学	张东升	我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究（973 项目）
2015 年	北京交通大学	袁大军	高水压越江海长大盾构隧道工程安全的基础研究（973 项目）
2015 年	中国科学院武汉岩土力学研究所	盛 谦	强震区重大岩石地下工程地震灾变机理与抗震设计理论（973 项目）

4 矿区地下巷道结构动力灾变的研究进展

煤矿采动会导致采区岩体结构发生损伤,引起煤矿巷道结构的力学性能劣化、完整性被破坏,从而对煤矿巷道结构的安全稳定性造成极大的威胁。但是由于学科专业领域的限制,目前对于煤矿地下巷道结构尚没有相应完善的抗震设计理论和方法。煤炭巷道结构由于其复杂的岩(土)体,地震荷载的随机性、不确定性和后验性,对于地震作用下煤矿巷道结构的损伤破坏演化尚不明晰,而且对于煤矿采动所引起的巷道结构的次生损伤在发生动力灾害荷载时如何演化发展尚不清楚,并且矿区的地下巷道结构形式复杂以及所形成的煤矿采空区也是纵横交错分布,一旦出现损伤破坏其修复难度大,还可能导致发生大规模的坍塌事故,所以地震灾害荷载作用下矿区地下结构的安全防灾问题是一个迫在眉睫的问题。目前国内的专家学者对于地下洞室的地震动灾变与防控已经取得了一定的研究成果。

李海波等(2005, 2006)通过研究西部强震区地震波的不同参数对地下洞室的动力响应的影响发现:地震波的入射方向、空间不均匀性对地下洞室的动力响应的影响主要与地下洞室的埋置深度、地应力等因素有关,所取得的研究成果对于分析水利工程领域的地下洞室的抗震问题具有较好的借鉴意义;孙有为(2006, 2011)在研究地下洞室岩石松动圈的影响因素及与地下洞室几何形状对岩石松动圈的影响的基础上,重点分析了地震作用下地下洞室岩石松动圈、衬砌结构的动力响应,提出了地下洞室松动圈动力荷载作用下的初步判定准则与方法,所取得的研究成果可以为地下工程结构的抗震研究提供一定的参考依据;刘向峰(2005)主要基于有限元分析软件 ANSYS 对矿区地层结构及煤矿巷道结构的地震动动力响应进行了初步的研究与探讨,指出煤矿采动损伤地层的动力响应区别于普通的地层场地条件,所取得的研究成果可以为矿区的地下工程结构的动力破坏防护提供参考与借鉴。

刘刚(2011)研究了矿区条带开采后所形成

的煤柱在静力荷载及动力荷载的稳定性,重点分析了不同地震波作用下煤柱的动力失稳演化过程,所取得的研究成果对于提高煤矿采空区条带煤柱抵抗动荷载的稳定性具有较好的借鉴意见;唐礼忠等(2012)通过有限差分数值分析软件 FLAC3D 研究爆破地震波对煤矿采空区及充填后的采空区围岩的破坏作用,研究结果表明爆炸地震波作用下煤矿采空区围岩的塑性变形及位移增加,对煤矿采空区进行填充后可有效控制煤矿采空区及围岩的动力响应;吕涛(2008)基于溪洛渡水电站的工程背景,通过对比分析地震作用下二维和三维地下洞室模型的动力响应,建立了地下洞室的地震安全评价方法,与地下洞室的其他地震评价方法相比较,该评价方法的评价结果是偏于安全的;张玉敏(2010)通过岩石的动三轴力学试验得到岩石的损伤本构方程,在此基础上利用有限元分析软件 FLAC3D 系统研究了地震作用下水电站的地下洞室群动力响应规律及特征,指出地震波的频谱特征、自振周期岩体的物理力学性能对地下洞室群的内力(加速度、位移、应力等)响应影响较大;谷宁(2011)通过有限元数值计算软件对静力荷载和动力荷载分别作用下水电站的地下厂房洞室结构的力学响应的研究,利用强度折减方法分析了地震作用下地下洞室结构的稳定性,并得到了地下洞室结构的安全系数,可以为溪洛渡水电站左岸地下洞室群的地震稳定性分析提供参考和借鉴;汪海波(2013)基于小波包变换理论和小波包变换理论,采用 Matlab 数值计算软件对钻眼爆破法产生的爆破地震波的组成进行了分析,并分析爆破动荷载作用下煤矿巷道结构及支护结构的变形及内力响应,提出了控制爆破地震动的灾害能量的方法,对于控制灾害爆破能量对煤矿巷道结构及支护结构的破坏具有较好的借鉴意义;张彦宾(2012)基于突变理论建立了条带煤柱在动静载荷组合作用下的突变力学判据,指出了在外力扰动荷载作用下条带煤柱的失稳条件以及影响条带煤柱稳定性的各种影响因素,在此基础上利用有限元数值计算软件 FLAC3D 分析了地震作用下条带煤柱的动力稳定性,为条带煤柱的设计提供了新的设计建议;言志信等(2012)基于工程结构波动理论,利用摩尔-库伦强度准则

研究了地震作用下岩体的动力响应,得到了岩体地震动力破坏的影响因素,初步得到了水平地震作用下岩体的破坏机理;崔臻等(2013)系统分析总结了地震作用下地下洞室的动力响应及动力灾变的重要问题,并根据国内外专家学者关于地下洞室的地震动力灾变的相关研究进展进行了深入的分析与总结,指出了地下洞室(群)研究未来的发展方向以及需要解决的关键问题,可以为地震作用下地下洞室(群)结构的动力响应与灾变相关研究提供参考和借鉴。

矿区巷道地下结构与一般的隧道结构、水电站地下洞室结构有所区别,因为煤炭开采过程中在地层所产生(遗留)的大面积的、纵横分布的煤矿采空区域是孕育各种矿山动力灾害的不可忽略的隐患。矿区地下巷道结构的地质环境复杂多变,加之围岩在采矿活动影响下发生了一定程度的损伤破裂现象,在上覆岩层的影响下地下煤矿巷道结构的动力学响应发生了较大的变化。地下煤炭开采过程中会在矿区的地层中形成大量的纵横交错的煤矿采空区及地下结构,如果矿区地下工程结构的几何尺寸远远小于地震波的波长时,地下结构的存在对地震波的传播及地表动力响应的影响较小(赵宝友,2009)。如果矿区地下结构的几何尺寸与地震波的波长处于同一数量级别的时候,煤矿采空区则对地表地震动力响应以及地震波的传播产生较大的影响。目前矿山动力灾害的发生除了人为因素之外,其动力灾变的孕育、演化过程及致灾机理尚不明晰,无法切实有效的预测矿山动力灾害是重要的原因之一(余诗刚,董陇军,2013)。

综上所述,外力扰动荷载作用下煤矿采动区孕育次生灾害发生的机理尚不明晰是导致矿山采空区各种灾难性事故发生的重要原因之一;加之我国矿区多采用机械化的采煤技术,开采过程中采场围岩结构体系的应力场变化剧烈,容易引起高应力集中现象;并且国内外专家学者对于扰动荷载产生的应力波诱发煤矿采空区次生灾害的机制认识不够充分,煤矿采空区引发的次生灾害控制相对较难,所以研究扰动荷载作用下煤矿采空区及围岩结构体系的成灾过程、动力响应的演化过程是保证煤矿安全生产的关键问题之一。

5 矿区复杂场地地震动力响应的研究进展

煤矿采动区域的复杂的地质力学条件(岩体稳定性差、矿岩破碎、高地应力、煤矿采动应力扰动等)导致煤矿井下巷道结构和采场覆岩结构损伤破坏现象严重。煤矿采动损害影响下的覆岩可视为一种特殊的固体介质(结构),在煤矿采动之前上覆岩层具有分层性,而且其天然构造中存在着裂隙;在采动之后矿区上覆岩(土)层会发生移动、破断和变形。

煤矿采动区域的岩土层主要由煤系地层和岩石结构组成:(1)煤系地层多为沉积地层,各沉积层的岩性不同,其中包含软弱岩层;(2)天然的岩石结构是一种极其复杂的介质,岩石内部的节理、裂隙和断层等不连续(弱)结构面大量存在。岩土(石)结构体系复杂的微观结构决定了宏观上的不连续性和非均匀性的明显性,煤矿开采过程中采矿活动的各种天然动力灾害荷载(冲击地压、粉尘爆炸、天然地震、矿震、岩爆、煤与瓦斯突出等)在岩石介质中的传播均以应力波的形式进行。

应力波在岩石介质的传播问题是一个多因素耦合问题(余诗刚,董陇军,2013):(1)传播介质的非均匀、非线性特征明显;(2)煤矿巷道结构、岩层移动导致传播介质的外貌特征、尺度大等边界条件复杂;(3)采动活动会引起巷道结构和岩层发生次生损伤,该损伤在应力波的传播下会继续发展演化;(4)裂隙、节理和断层等以一定的方向性存在于岩石内部,从而导致煤岩宏观上呈现力学性质非连续性、各向异性等特点;(5)采场煤岩的力学特征方向性差异较大,导致应力波在传播过程中会由于煤岩本身的各向异性而呈现出方向性。

以上影响因素导致应力波在煤矿采动复杂场地的传播与衰减规律以及所引起的煤矿采动地下结构的损伤破坏的研究十分困难和复杂,煤矿采场复杂区域应力波传播衰减问题的研究,对于采矿活动所引起的各种矿井动力灾害的防治具有重要的现实意义和学术价值,煤矿采动复杂场地应

力波在岩土介质中的传播衰减规律涉及到土木工程、采矿工程和地震工程等学科领域：在地震工程领域，可以掌握地震波传播对岩土层、地面建（筑）物的损伤破坏效应；在地下工程领域，分析应力波的传播衰减效应，可以效应控制各种灾害荷载（矿震、岩爆、爆炸波等）所引起的应力波对地下工程结构的破坏。

5.1 复杂场地地层应力波传递的研究进展

煤矿强烈的开采活动（机械开采、爆破开采等）导致围岩发生损伤破裂，在岩层发生损伤破裂的过程中不可避免的要与外界环境进行能量交换。当出现动力灾害荷载时，动力灾害荷载对裂隙岩体的破坏作用主要是由灾害荷载产生的应力波引起岩层（体）能量耗散（积聚）所导致的。通过分析应力波在煤矿采动损伤岩层传播过程中引起的能量积聚与耗散机制，可以为解释和揭示地震作用下煤矿采空区及地下巷道一围岩结构体系的动力灾变过程提供参考和借鉴。

矿区岩层（体）总是不可避免的存在各种各样不规则的结构弱面（孔隙、裂缝、空洞等），加之煤炭环境中的岩（地）层是成层分布的，而且不同岩层（砂岩、石灰岩、玄武岩、煤矸石等）的物理力学性能差别较大，其内部孔隙率也差别较大（孔隙率基本上在 5% ~ 35% 之间）。不同的孔隙率导致岩层内部的孔隙结构（孔隙的尺寸大小、几何形态、连通性能）差别较大，所以扰动荷载作用下不同岩层的耗能能力不同，故可以根据不同岩层具有不同的能量耗散（集聚）能力分析岩体的能量演化致灾过程来研究岩层的动力灾变。由于岩石介质及矿区地下结构的复杂性，很多问题的研究还处于初始阶段，需要从理论和实践上做进一步的探讨。目前对于应力波在岩土介质的传播规律，地震对地下工程结构的破坏效应、复杂场地（如地下洞室群）的地震响应，国内外的专家学者已经进行了大量的研究工作。

Xia 等（2007）采用数值计算和声波实验相结合的方法，分析了爆炸荷载作用下的岩体的损伤演化趋势；王辉（2003）在理论分析的基础上，通过有限元数值计算探讨了爆炸冲击波在岩体内的传播衰减规律；钱七虎和陈士海（2004）、Wang 和 Qian（1995）根据岩石的断层、节理裂隙带的

空间几何关系，重点研究了爆炸应力冲击波在通过岩石节理裂隙带时的传播衰减规律；Ju 等（2006）在 SHPB 试验的基础上，采用分形方法研究了应力在岩石复杂节理结构的传播与能量演化的关系，定量地分析了不规则节理面结构对应力波的传播衰减和能量耗散的影响；席道瑛等（1996）采用低频共振方法，探讨了应力波在不同饱和条件下的大理岩砂岩中的传播衰减规律；Wang 等（2003）通过花岗岩的系列化爆破试验，研究了爆炸应力波在自由场的传播衰减规律；李欢秋等（2003）采用爆炸模拟的实验结果和有限元数值计算方法相结合的方法，对应力波在地下复合结构介质中的传播进行的分析研究，探讨了爆炸应力波在复合岩石介质中的传播衰减规律；Lu 和 Hustrulid（2002）在柱面波理论、子波理论和的应力波场理论分析的基础上，建立了爆破应力波影响下的质点峰值振动速度衰减公式，并通过实验研究和数值计算验证了该衰减公式的合理性；杨军等（2001）在冲击试验的基础上，建立了考虑能量耗散的岩石爆破损伤模型，较好的解释了爆破冲击波作用在岩石结构的传播衰减规律；王明洋等（2001，2010）从微观物理力学理论着手，从微观角度研究了爆炸应力波在岩体（结构）中的能量演化，初步建立了微观物理角度的动力本构模型；单仁亮等（2003）在大理岩和花岗岩冲击试验的基础上，建立了考虑应变率效应的岩石黏弹性损伤模型。

目前对于应力波在岩土介质中衰减传播的研究多集中于冲击荷载或爆破荷载作用，所取得科研成果也较多；对于地震波在岩土（石）介质的传播衰减，尤其是地震波在煤矿采动损伤场地的传播衰减却相对较少，而对于复杂场地（如地下洞室群）的地震动力学响应方面的研究已经进行了一定的研究工作。

5.2 复杂场地地层地震响应的研究进展

矿区煤层由于各种自身和外界自然因素（煤层形成的历史条件、沉积条件、孔隙结构、煤层中的气液相参与）的影响，以及煤炭开采过程中的外力扰动作用煤矿采动区采场的土层会发生一定的扰动损伤，再加上采场土层物性参数的随机性、离散性明显，所以煤炭开采明显改变了巷道

周围的地震波动场,煤矿采动(损伤)复杂场地地震波的传播衰减就与一般场地明显不同,而且煤矿采动与地震联合作用下地下工程结构的动力灾变过程尚不明晰,因此开展煤矿采动损伤地层的地震动力响应分析就显得尤为重要。

陈健云等(2001)基于阻尼影响抽取法,通过对溪洛渡地下厂房的三维地震动力学响应,重点探讨了地震荷载作用下围岩结构的动力特性,提出了实用于地下工程结构抗震分析算法;赵宝友(2010)利用有限元分析软件 ABAQUS,在考虑损伤的塑性模型的基础上,综合分析了工程地质力学条件对地下洞室群地震动力学响应的影响,并提出了适合地下洞室群的抗震减震方法;李海波等(2006)利用有限元分析软件 FLAC3D,探讨了地下洞室形状、埋深、地应力特征等因素对地下岩体洞室的地震动力响应的影响,并初步分析了其影响规律,可为地震荷载下地下洞室的位移反应提供一定的借鉴意义。李海波(2009)在有限元数值分析计算的基础上,根据溪洛渡地下厂房的地震动力响应,建立了“动应力集中因子代表值”的基本概念,提出了一种地下洞室群的动力灾变的安全评价方法;王如宾等(2009)通过对金沙江两家人水电站的地震动力灾变的分析,重点研究了地震荷载作用下地下厂房洞室有无衬砌工况下相对位移(安全系数)的变化规律,探讨了位移变化规律和抗震效果。

梁建文和巴振宁(2012)基于间接边界元理论,重点研究了地下洞室对入射平面 SH 波的放大作用,在综合考虑场地土层的动力特性的基础上,通过数值计算单一土层中地下洞室对入射平面 SH 波的放大作用,指出了土层对 SH 波传播衰减的影响规律;梁建文等(2011)利用有限元分析软件 FLUSH,通过研究隧道群对地震的动力响应规律,探讨了隧道间距、入射地震波频谱等因素对隧道群地震动反应谱的影响规律;梁建文等(2012)采用频域变换方法和间接边界元理论相结合的办法,研究了地下洞室群对地震动的出平面时域放大作用,重点探讨了天津滨海地区不同地下洞室参数对地震波的放大效应;李帆(2008)在有限元分析软件 FLUSH 数值计算的基础,研究了地震作用下四种不同性质的场地背景的地铁隧道群的

动力灾变问题,并从时域范围内探讨了隧道群的存在对地震波的传递的影响;冯领香(2008)通过在间接边界元引入格林函数和半空间精确动力刚度矩阵,在频域范围内重点研究了破碎带对断层场地地震波传播衰减的影响规律,所得的结论可为断层场地的安全评价提供一定的借鉴意义。

荣棉水和李小军(2007)基于有限差分法,采用有限元数值计算方法研究了不同地震动输入方法(脉冲地震、实际地震)对粘弹性场地动力响应的差异,重点探讨了不同的体波入射角度和高宽比的入射波对地表平面运动谱特性的影响规律;刘必灯(2011)在局部人工边界的显式计算方法上,对 SV 地震波垂直入射下垂直入射下 V 型河谷地形运动的解析解,并重点研究了地震波在不同边坡角度影响下的传播衰减分布规律;喻焜和李小军(2012a)利用汶川地震强震记录数据,利用 NGA 衰减关系模型分析了对汶川地震区基岩场地各种场地的地震波传播衰减规律,并对影响地震动衰减的因素(加速度反应谱、峰值位移、峰值速度、峰值加速度)进行了深入的探讨;喻焜和李小军(2012b)基于强震数据,对比分析了各地区不同土层场地的强震动记录,在浅硬土层场地的放大系数研究分析的基础上,演化得到了相对应的深厚土层场地的平均放大系数;陈国兴等(2013)根据苏州某实际地层的工程地质情况,通过建立精细化有限元模型,重点研究了地震动参数(地震动峰值加速度 PGA、水平地震影响系数最大值、动力放大系数最大值)的变化规律,指出了地震的波动特性、场地土介质的性质对场地的设计地震动参数影响较大,所得的相关结论可为类似场地的地震安全性评价、抗震设防提高参考价值和借鉴意义。

国内的专家学者对于复杂地层的地震动力响应做了大量的有效研究工作,所取得的研究成果大大推动了岩土地震工程与土动力学领域的发展。但是对于矿区复杂场地土层及地下结构,往往会由于工程实践活动(采矿活动、爆破作用、地铁隧道的开挖)而产生一定程度的扰动损伤,而上述地震响应分析所用的地震动输入以及场地的动力响应都没有考虑场地的损伤所引起的抵抗破坏能力的影响,其计算结果应该会有失偏颇。

6 煤矿采空区地震动力灾变及防控研究亟待解决的学术问题及面临的挑战

目前关于煤矿采空区稳定性的研究多集中于静力荷载作用下的研究,即在岩层自重荷载作用下煤矿采空区发生失稳的研究国内专家学者研究较多,而对于扰动荷载作用下(尤其是地震作用下)煤矿采空区的动力稳定性相关的研究则刚刚起步(刘书贤等,2013,2014a, b, c, 2015;李海军等,2015)。矿井动力灾害(矿震、冲击地压、煤与瓦斯突出等)常常造成井巷垮塌、人员伤亡,造成重大的经济损失,而现有的研究多集中于矿井各种动力灾害发生机理的研究,只是分析了矿井发生各种动力灾害(矿震、冲击地压、煤与瓦斯突出等)的原因及诱发因素,而对煤矿巷道结构在灾害荷载作用下的破坏形式及灾害荷载在巷道结构中的传播演化致灾的过程少见报道,对于在地震作用下煤矿采动损伤地下结构灾变演化过程的研究也相对较少;并且矿区地下结构的设计中没有考虑到地震载荷的作用,且我国尚未有地下结构的抗震设计规范。

根据地震工程学、应力波基础、煤矿开采沉陷学与工程结构波动理论可知,如果要深入剖析强震作用下煤矿巷道结构的损伤机制及其灾变演化过程与动力灾变防控措施,需要重点从煤矿采空区岩层的移动变形致灾、地震作用下煤矿巷道结构的损伤演化破坏及煤矿采空区动力稳定性能的劣化机制与防控措施等内容开展一系列的研究工作,具体需要开展的研究内容(学术问题)如下:

(1) 煤矿采空区的稳定性及多煤层重复开采影响下覆岩移动变形沉陷致灾力学机制

研究煤矿采空区稳定性的影响因素及多煤层重复开采影响下覆岩的移动规律,建立煤矿采动覆岩移动变形破坏的力学模型及沉陷判据,并分析多煤层重复开采影响下的煤矿采空区上覆岩层的移动变形破坏与其应力分布的内在联系,通过分析煤矿采空区岩层的移动变形沉陷规律及致灾机制,为研究煤矿采空区的地震动力稳定性提供理论依据。

(2) 开采扰动条件下煤岩体的应力与能量演

化致灾研究

探讨煤矿采动影响下岩石变形破坏过程中能量耗散、能量释放与岩石强度和整体破坏(灾变)的内在联系,分析煤矿采空区煤岩体非对称作用诱致局部化失稳现象的致灾机制,研究煤矿开采扰动条件下煤岩体中的应力场与能量场的空间分布规律,探讨开采扰动与煤岩体卸压的动态关系以及卸压区内应力与能量变化速率;重点研究地下煤层开采过程中煤岩体局部化应力—变形的能量演化特征,基于地球物理理论和地震工程学探索中震、强震区煤岩局部动力失稳、孕灾模式,揭示煤矿采空区动力失稳特性、形成机理和分布规律,为研究煤矿采动区工程场地的地震稳定性奠定理论基础。

(3) 煤矿采空区煤柱、巷道结构及围岩的地震动力响应及稳定性,构建煤矿采动损伤地层的地震波传播理论与采空区动力失稳演化规律

研究煤矿采空区煤柱的地震动力稳定性、巷道结构地震动力灾变的影响因素及围岩的应力场分布演化规律,建立地震作用下煤矿采空区煤柱、巷道结构的动力学运动方程,探讨煤矿采空区煤柱地震动力失稳、煤矿巷道结构不同部位地震动力响应、考虑损伤效应的煤矿巷道结构的地震动力响应、煤矿采空区的地震动力稳定性以及考虑充填材料的煤矿采空区的地震动力稳定性是煤矿采空区地震安全研究的关键学术问题。

(4) 煤矿采动区工程场地地震动力稳定性及灾变防控

考虑到煤矿岩层受采动影响的分布特征,分析煤矿采动区冒落带、裂隙带、弯曲带“三带”、巷道之间空间分布的关系,采动区煤层群的空间结构关系、采动区域稳定时间、开采方法等对岩层移动致灾的影响,充分考虑煤矿采动区“三带”的形式、几何特征、破碎带的材料特性,采动损伤场地土的土层厚度和刚度,建立煤矿采动地层的均匀场地模型和煤矿采动损伤地层含破碎带断层的场地模型,分析煤矿采动区复杂地质体中波的传播规律,揭示煤矿采动区“三带”对弹性波的散射规律,探讨煤矿采动损伤土层对场地地震响应的重要影响,建立煤矿采动区工程场地地震稳定性评价的理论和方法是研究煤矿采空区地震动力灾变及安全防控措施的根本落脚点。

在充分分析国内外专家学者关于地下结构抗震研究领域的已有优秀研究成果的基础上发现: 要想较好的解决地震作用下煤矿采空区及地下结构的地震损伤力学机制与灾变控制的核心学术问题, 面临着以下技术难题及挑战 (即煤矿采空区及其矿区地下结构的动力灾变及防控的研究工作需要从以下几方面进行展开和完善):

(1) 煤矿采空区 (群) 的地震动力模拟试验及地震监测: 目前关于煤矿采空区 (群) 的振动台模拟试验及地震动力破坏观测鲜见报道, 加之振动台试验的小尺寸与煤矿采空区的大尺寸相对比, 试验中很难理想的将其合理化实现, 所以如何在振动台试验中合理的消除尺寸效应对于煤矿采空区、巷道结构的影响, 是试验中的难点和重点;

(2) 地震作用下煤矿采动裂隙岩体的动力本构模型及失稳致灾机制: 虽然目前关于岩石的动力本构模型已有大量的研究, 但目前的研究大多基于冲击荷载、爆破荷载作用下岩体的高应变率本构关系, 较难真实的反映煤矿采动损伤岩石在地震作用下其内部裂纹产生、扩展的机制与损伤演化过程, 以及煤矿开采扰动与煤岩体卸压的动态本构关系, 以及地震作用下煤岩体的裂隙发展演化与其应力和变形的能量演化特征, 尤其是煤矿采空区煤岩体在动荷载扰动作用下局部化失稳现象发展到煤矿采空区整体动力失稳的致灾机制将是核心需要解决的基础问题;

(3) 地震作用下煤矿采空区多因素、多相介质耦合的复杂恶劣力学环境的灾害演化机制: 煤矿采空区是涉及到固—液—气三相同同时存在的多场耦合复杂恶劣的灾害系统, 煤矿采空区任何一种致灾因子都可能导致和引发煤矿采空区灾变失稳现象的发生, 如何合理的将煤矿采空区灾害系统的复杂性、随机性以及非线性的灾害演化及致灾机制梳理清楚, 确定致灾因子在灾害系统中的权重, 是煤矿采空区稳定性控制的关键问题;

(4) 煤矿采空区地震动力灾变评判准则: 虽然目前关于煤矿采空区的稳定性研究已经取得了一定的研究成果, 但是对于煤矿采空区地震动力失稳及灾变方面的研究相对较少, 尤其是如何评价和评判煤矿采空区的失稳等级是亟需解决的重要问题; 所以建立科学合理的煤矿采空区动力灾

变的评判准则, 对于评价煤矿采空区场地稳定性是否可以建造建筑物具有重大意义, 也是建立准确的煤矿采空区动力灾变防控保护措施的重要问题。

参考文献:

- 陈国兴, 战吉艳, 刘培玄, 等. 2013. 远场大地震作用下深软场地设计地震动参数研究[J]. 岩土工程学报, 35(9): 1591–1599.
- 陈健云, 胡志强, 林皋. 2001. 超大型地下洞室群的三维地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 23(4): 494–498.
- 崔臻, 盛谦, 冷先伦, 等. 2013. 大型地下洞室群地震动力灾变研究综述[J]. 防灾减灾工程学报, 33(5): 606–616.
- 单仁亮, 薛友松, 张倩. 2003. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 22(11): 1771–1776.
- 冯领香. 2008. 断层场地对弹性波的散射[D]. 天津: 天津大学.
- 谷宁. 2011. 水电站地下洞室节理围岩的地震稳定性分析[D]. 大连: 大连理工大学.
- 何国清, 杨伦. 1994. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 何满潮, 钱七虎. 2010. 深部岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社.
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社.
- 姜耀东, 赵毅鑫, 宋彦琦, 等. 2005. 放炮震动诱发煤矿巷道动力失稳机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 24(17): 3131–3136.
- 来兴平. 2004. 西部矿山大尺度采空区衍生动力灾害控制[J]. 北京科技大学学报, 26(1): 1–3.
- 李帆. 2008. 地铁隧道群对地震动的影响[D]. 天津: 天津大学.
- 李海波, 刘博, 吕涛, 等. 2009. 一种简单的岩体地下洞室地震安全评价方法[J]. 岩土力学, 30(7): 1873–1882.
- 李海波, 马行东, 李俊如, 等. 2006. 地震荷载作用下地下岩体洞室位移特征的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 28(3): 358–362.
- 李海波, 马行东, 邵蔚, 等. 2005. 地震波参数对地下岩体洞室位移特性的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 24(S1): 4627–4634.
- 李海军, 魏晓刚, 孙琦, 等. 2015. 地震和煤矿采动耦合作用下露天矿边坡及采空区稳定性研究[J]. 地震研究, 38(1): 161–166.
- 李欢秋, 卢芳云, 吴祥云, 等. 2003. 应力波在有地下复合结构的岩石介质中传播规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 22(11): 1832–1836.
- 梁建文, 巴振宁. 2012. 层状半空间中洞室对平面 SH 波的放大作用[J]. 地震工程与工程振动, 32(2): 14–24.
- 梁建文, 李帆, 刘中宪. 2011. 地铁隧道群对地震动的放大作用[J]. 地震工程与工程振动, 31(2): 31–39.
- 梁建文, 张季, 巴振宁. 2012. 层状半空间中洞室群对地震动的时域放大作用[J]. 地震工程与工程振动, 45(S1): 152–157.
- 刘必灯, 周正华, 刘培玄, 等. 2011. SV 波入射情况下 V 型河谷地形对地震动的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 31(2): 17–24.
- 刘刚. 2011. 条带开采煤柱静态稳定性研究[D]. 西安: 西安科技大学.
- 刘书贤, 郭涛, 魏晓刚, 等. 2014a. 地震作用下煤矿开采损伤建筑的

- 能量耗散演化致灾分析[J]. 地震研究, 37(3): 442-449.
- 刘书贤, 胡红珍, 魏晓刚, 等. 2015. 煤矿采动与地震联合作用下建筑物损伤演化灾变分析[J]. 地震研究, 38(1): 156-160.
- 刘书贤, 王春丽, 魏晓刚, 等. 2014b. 煤矿采空区的地震动力响应及其对地表的影响[J]. 地震研究, 37(4): 642-647.
- 刘书贤, 魏晓刚, 王伟, 等. 2014c. 基于隔震技术的桥梁结构抗采动变形抗地震保护[J]. 地震研究, 37(1): 86-93.
- 刘书贤, 魏晓刚, 张弛, 等. 2013. 煤矿采动与地震耦合作用下建筑物灾变分析[J]. 中国矿业大学学报, 42(4): 526-534.
- 刘向峰. 2005. 采动损伤地层结构地震响应研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 吕涛. 2008. 地震作用下岩体地下洞室响应及安全评价方法研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所).
- 马行东, 李海波, 肖克强, 等. 2006. 动荷载作用下地下岩体洞室应力特征的影响因素分析[J]. 防灾减灾工程学报, 26(2): 164-169, 228.
- 马行东. 2005. 地震动荷载作用下地下洞室响应的初步分析[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所).
- 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 1994. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 19(6): 557-564.
- 钱七虎, 陈士海. 2004. 爆破地震效应[J]. 爆破, 21(2): 1-5.
- 荣棉水, 李小军. 2007. 局部地形对出平面运动谱特性的影响分析[J]. 中国地震, 23(2): 147-156.
- 余诗刚, 董陇军. 2013. 从文献统计分析看中国岩石力学进展[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 32(3): 442-464.
- 孙有为. 2006. 地下洞室的几何性质对松动圈的影响[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 孙有为. 2011. 地下洞室围岩松动圈的地震反应研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 谭志祥, 邓喀中. 2006. 建筑物下采煤研究进展[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 25(4): 485-488.
- 唐礼忠, 周建雄, 张君, 等. 2012. 动力扰动下深部采空区围岩力学响应及充填作用效果[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 39(6): 623-628.
- 汪海波. 2013. 煤矿爆破地震效应对巷道稳定性影响及控制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学.
- 王辉. 2003. 爆炸荷载下岩石爆破损伤断裂机理研究[D]. 西安: 西安科技大学.
- 王金庄, 郭增长. 2002. 我国村庄下采煤的回顾与展望[J]. 中国煤炭, 28(5): 28-32.
- 王来贵, 刘向峰, 姚再兴, 等. 2002. 大中型露天煤矿闭坑地质灾害浅析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 13(3): 51-54.
- 王来贵, 潘一山, 赵娜. 2007. 废弃矿山的安全与环境灾害问题及其系统科学研究方法[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 28(2): 97-101.
- 王明洋, 戚承志, 钱七虎. 2001. 岩体中爆炸与冲击下的破坏研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 20(4): 385-389.
- 王如宾, 徐卫亚, 石崇, 等. 2009. 高地震烈度区岩体地下洞室动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 28(3): 568-575.
- 魏晓刚. 2011. 考虑土-结构相互作用的采动区建筑物抗震抗变形双重保护装置减震分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 魏晓刚. 2015. 煤矿巷道与采空区岩体结构地震动力灾变及地面建筑抗震性能劣化研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 吴启红. 2010. 矿山复杂多层采空区稳定性综合分析及安全治理研究[D]. 长沙: 中南大学.
- 席道瑛, 刘卫, 易良坤, 等. 1996. 在不同饱和流体条件下大理岩砂岩应力波的衰减[J]. 岩石力学与工程学报, 15(S1): 456-459.
- 谢和平. 2003. 矿山岩体力学及工程的研究进展与展望[J]. 中国工程科学, 5(3): 31-38.
- 许增会, 宋宏伟, 赵坚. 2004. 地震对隧道稳定性影响的数值模拟分析[J]. 中国矿业大学学报, 33(1): 41-44.
- 言志信, 史盛, 党冰, 等. 2013. 水平地震力作用下岩体破坏机理探究[J]. 地震工程学报, 35(2): 203-207.
- 杨军, 高文学, 金乾坤. 2001. 岩石动态损伤特性实验及爆破模型[J]. 岩石力学与工程学报, 20(3): 320-323.
- 喻焜, 李小军. 2012a. 基于 NGA 模型的汶川地震区地震动衰减关系[J]. 岩土工程学报, 34(3): 552-558.
- 喻焜, 李小军. 2012b. 汶川地震余震震源参数及地震动衰减与场地影响参数反演分析[J]. 地震学报, 34(5): 621-632.
- 张彦宾. 2012. 条带开采工程非线性动力稳定性研究[D]. 焦作: 河南理工大学.
- 张玉敏. 2010. 大型地下洞室群地震响应特征研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所).
- 赵宝友, 马震岳, 丁秀丽. 2010. 不同地震动输入方向下的大型地下岩体洞室群地震反应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 29(S1): 3395-3402.
- 赵宝友. 2009. 大型岩体洞室地震响应及减震措施研究[D]. 大连: 大连理工大学.
- 朱旺喜, 王来贵, 王建国, 等. 2003. 资源枯竭城市灾害形成机理与控制战略研讨[M]. 北京: 地质出版社.
- J. Y., Li Y. X., Xie H. P., et al. 2006. Stress wave propagation and energy dissipation in jointed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(12): 2426-2434.
- Lu W. B., Hustrulid W. 2002. An improvement to the equation for the attenuation of the peak particle velocity[J]. Engineering Blasting, 8(3): 1-4.
- Wang M. Y., Fan P. X., Li W. P. 2010. Mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29(2): 234-239.
- Wang M. Y., Qian Q. H. 1995. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 17(2): 42-46.
- Wang Z. J., Li X. L., Ge K., et al. 2003. Free-field stress wave propagation induced by underground chemical explosion in granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 22(11): 1827-1831.
- Xia X., Li J. R., Li H. B., et al. 2007. Study of damage characteristics of rock mass under blasting load in Ling'ao nuclear power station, Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(12): 2510-2516.

Research Progress and Challenges of the Safety Control and Prevention of Seismic Dynamic Disasters in Coal Mine Goaf

WEI Xiao-gang¹, MA Feng-hai², LIU Shu-xian³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450046, Henan, China)

(2. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

(3. College of Civil and Transportation Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract

Aimed at the problems of insufficient research of the seismic safety of coal mine goaf and seismic of the underground structure in mining area, through the analysis of the related research results of the prevention and safety control of seismic dynamic disasters of underground structure by domestic and foreign experts and scholars, we analyzed and discussed the following important issues just as follows: the characteristics and forming reasons for disaster in coal mine goaf, the urgency and serious situation of dynamic disaster research of the coal mine goaf, the existing excellent research results of seismic research field of underground structure and development trend and shortage of seismic dynamic disaster research of coal mine goaf etc. . On the basis of the research result of the structural seismic of the underground structure, we found out that the urgent problem of the prevention and safety control of seismic dynamic disasters in the coal mine goaf needed to solve immediately. Then we systematically concluded the core academic problems of seismic damage mechanics and disaster control of coal mine goaf and underground structure, and preliminary revealed the urgent technical problems of the seismic dynamic response of coal mine goaf and seismic dynamic damage patterns of coal underground structures, so it can provided reference for the seismic dynamic stability and the prevention and safety control of seismic dynamic disasters of coal mine goaf.

Key words: coal mine goaf; disaster prevention and control; mining subsidence; seismic action; dynamic stability; strata movement