

# 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<sup>\*</sup>

魏晓刚<sup>1</sup>, 麻凤海<sup>2</sup>, 刘书贤<sup>3</sup>

(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:** 针对煤矿采空区地面建筑地震动力灾变及抗震性能劣化研究不足的问题, 通过分析国内外关于煤矿采动区建筑物保护的相关研究成果, 分别从煤矿采动的次生灾害、煤矿采动建筑安全研究的紧迫性与严峻性、煤矿采动建筑安全性研究的不足、煤矿采动损害与地震灾害联合作用的致灾机制以及煤矿采动建筑地震动力灾变现有的研究成果与发展趋势进行了重点探讨, 在分析煤矿采动建筑地震动力灾变机制的基础上指出了煤矿采动建筑地震动力灾变与防控研究迫切需要解决的学术问题, 初步阐述了技术难题, 为煤矿采动建筑的地震动力响应与灾变演化过程的防控提供参考借鉴。

**关键词:** 煤矿采动损害; 地震灾害; 致灾机制; 动力灾变; 能量演化

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2015)04-0674-15

## 0 引言

作为以煤炭资源为主要能源的国家, 煤炭资源在我国经济和社会发展一直处于重要的战略地位。我国在《能源中长期发展规划纲要(2004~2020年)》明确提出<sup>①</sup>: 我国将实施“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略”; 由中国工程院(2001)编制的《中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究》也明确提出: 到2050年我国煤炭资源每年的产量需要控制在30亿吨, 由此可见煤炭资源目前仍然是我国核心的主体能源, 煤炭资源将依然是我国国民经济持续高速发展不可忽略的因素, 根据《能源中长期发展规划纲要(2004~2020年)》相关数据所得到的我国能源生产结构图(图1)和能源消费结构图(图2)可以较为直观看到煤炭资源在我国社会和经济中的重要性(中国工程院, 2011; 朱旺喜等, 2003; 谭志祥, 邓喀中, 2006; 王金庄, 郭增长, 2002)<sup>①</sup>。

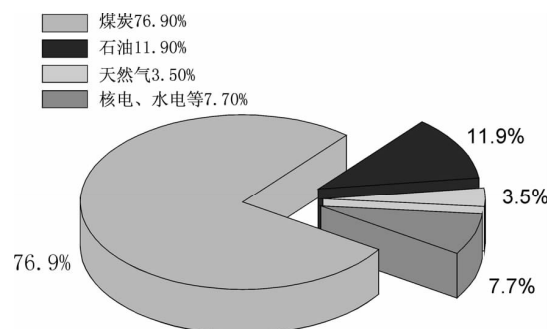


图1 中国能源生产结构

Fig. 1 Structure of energy production in China

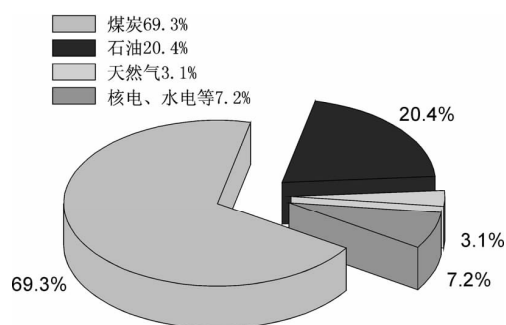


图2 中国能源消费结构

Fig. 2 Structure of energy consumption in China

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-05-27.

**基金项目:** 国家自然科学基金(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.

<sup>①</sup> 国务院. 2001. 能源中长期发展规划纲要(2004~2020年).

从图1、2可以明显的看出：我国煤炭资源在一次能源生产结构中所占的比例一直超过70%（煤炭资源所占的比例为76.9%），在一次性能用消费结构中所占的比例接近70%（煤炭资源所占的比例为69.3%），煤炭资源在我国国民经济中的重要性及关键性显而易见；随着我国能源结构的不断完善和调整，煤炭资源作为我国主要的可靠的能源地位依然不可改变（国务院，2001；中国工程院，2011；朱旺喜等，2003；谭志祥，邓喀中，2006；王金庄，郭增长，2002）。所以如何科学合理高效的开采出地下煤炭资源是我国社会经济快速发展的迫切需要，但是随着煤炭资源持续高效的开采过程，煤炭工业所带来的环境污染、生态破坏等灾害问题也越来越突出（来兴平，2004；王来贵等，2002）。

目前我国由于地下煤炭开采对矿区造成了严重的环境污染和生态破坏，如果涉及到“三下压

煤”（建筑物下、道路与铁路下、水体下）问题，所造成的危害及破坏就更大；目前我国由于“三下压煤”问题导致地下煤矿资源的开采率远远达不到40%（国务院，2001；中国工程院，2011；朱旺喜等，2003；谭志祥，邓喀中，2006；王金庄，郭增长，2002；来兴平，2004；王来贵等，2002），每年由于煤炭开采新增耕地超过7万公顷（图3），地下水的肆意排放超过80亿吨，煤炭资源开采过程中所产生的煤矸石每年超过9亿吨，由煤矸石所形成的矸石山近1600余座，占地面积已经超过15000公顷（朱旺喜等，2003；谭志祥，邓喀中，2006；王金庄，郭增长，2002；来兴平，2004；王来贵等，2002），煤矸石山的矸石堆积量超过55亿吨，并且煤矸石还存在着占用土地资源、破坏植被、污染水体和空气以及自燃爆炸等各种安全隐患（梁为民，郭增长，2000）。



图3 煤矿开采引起的土地裂缝

(a) 山岭裂缝；(b) 耕地裂缝；(c) 煤矿采动引起的土地破坏

Fig. 3 Land cracks caused by coal mining

(a) cracks of mountain; (b) cracks of cultivated land; (c) land destruction caused by coal mining

根据不完全统计（朱旺喜等，2003；谭志祥，邓喀中，2006；王金庄，郭增长，2002；来兴平，2004；王来贵等，2002），我国矿区目前由于地下煤炭资源开采所直接引发的各类各种灾害灾难事件每年超过1万起，由此造成巨大的经济损失和人员伤亡；并且地下煤炭资源的开采还会诱发更严重的次生灾害（矿震、煤与瓦斯突出、突水、粉尘爆炸、地面建筑倒塌破坏等）。仅以煤矿开采所引起的地表移动变形（开采沉陷变形）与地面建筑的损伤破坏为例，目前我国由于矿区开采沉陷变形引起的地面建筑物倒塌破坏直接经济损失达到50亿元，间接损失更是达到400亿元（谭志祥，2004；郭广礼，2001；线登洲，2008）；由于煤炭

开采所造成的土地破坏与荒漠化的面积（图3）已经超过4万 $\text{km}^2$ ，目前仍在以2000 $\text{km}^2$ /年的速度高速增加，而采煤所引起的荒漠化与破坏的土地的治理利用率仅仅能达到15%（来兴平，2004；王来贵等，2002）。能源短缺的紧迫性与矿山开采安全的刚性制约，使得矿区煤炭开采过程的地下工程结构与地面建筑的安全性显得尤为重要。

随着地下煤炭开采强度和范围的不断扩大，矿区出现开采沉陷变形的面积越来越大。大面积的开采沉陷变形引发严重的矿区生态环境问题，如造成建筑物的损害破坏，水资源污染，交通、通讯、管线设施等生命线工程受到损害等，给矿区和资源性城市在资源枯竭后的可持续发展带来很大的隐患，

极大的限制了矿区的经济发展。地面建筑物是人类赖以生存的必要条件,一旦遭到破坏,就势必造成巨大的不可挽回的损失。随着矿区经济的发展,矿区地面建筑物在逐渐增多,建筑物下压煤开采已成为许多矿区面临的主要问题,严重制约着矿区的可持续发展。当矿区地下煤炭资源被开采后,煤矿采动区的地表会出现开采沉陷变形,导致建筑物出现各种不同程度的损害和破坏,轻则需要维修加固,重则需要拆迁重建(谭志祥,2004;郭广礼,2001;线登洲,2008)。

煤炭开采后所形成的煤矿采空区对于地面建筑是一个极大的潜在威胁:煤矿开采引起的地表移动变形,不仅会严重降低和破坏建筑物的抗震性能,而且发生地震时地面极容易出现裂缝和塌陷。为了最大限度的保证地震发生时矿区地面建筑的抗震安全性,有必要对煤矿采空区及地面建筑的地震安全性开展研究(吴启红,2010;张永波,2005;彭欣,2008;王正帅,2011;胡聿贤,2006;欧进萍,2003;周福霖,1997;牛宗涛,2008)。

煤炭资源开采活动使矿区地层结构遭受损伤、抵抗破坏能力降低。调查表明:天然地震、采矿诱发地震对煤矿采动损伤地层内的地下结构破坏严重(夏军武等,2007,2002;郑玉莹等,2012;谭志祥,2004)。采矿活动使矿区地层及建筑结构的抗震能力降低,对唐山、大同等矿区的调查表明:煤炭开采活动明显改变了煤矿采动区周围的地震波场;煤矿采空区会加重地震的破坏,地震对矿区地下结构及地面建筑的破坏更为严重。目前的采矿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;而对矿区建筑物的设计工作,没有较好的将建筑物的抗震性能设计与抗变形设计统一起来。因而开展对矿区地层、地下结构与地面建筑结构的地震动力响应及灾变控制的研究,具有重要的理论意义与现实意义。

## 1 煤矿采动建筑安全研究的紧迫性与严峻性

2012年9月7日11时19分,云南省昭通市彝良县与贵州省毕节地区威宁彝族回族苗族自治县

交界发生5.7级地震。新闻媒体以《彝良地震之痛:夺命煤矿采空区》为题报道了该地区95%以上的农民自建房屋都不具备抗震的条件,由于煤矿企业开采形成的煤矿采空区,更加剧了地震的破坏性。矿区实际震害表明:煤矿采空区严重加剧了地震灾害荷载的破坏性,煤矿采动损伤建筑的保护问题是矿区建设发展的瓶颈问题(刘书贤等,2013a, b, 2014a, b, c, d, e, 2015;魏晓刚,2011, 2015;李海军等,2015)。

自1976年唐山发生7.8级大地震以来,我国的学者和科研人员就开始关注地震作用下煤矿采空区及地面建筑的安全问题(胡聿贤,2006;欧进萍,2003;周福霖,1997)。在调查分析煤矿采动区的地震灾害的基础上,一些学者发现由于煤矿地下巷道结构及煤矿采空区的存在,地震波的传播在发生改变的同时会严重影响煤矿巷道及岩层的应力场分布演化。由于地面建筑物的结构形式、强度储备等诸多随机模糊因素的存在,目前尚不能对煤矿采空区对建筑物的抗震性能的扰动规律进行定量分析判断。因此开展煤矿采动区的地震稳定性研究,对于煤矿采空区的工程建设场地的规划选择、地面建筑物的抗震性能具有十分重要的现实意义。由于专业学科的限制,煤矿采动建筑的地震安全问题具有其特殊性:煤矿采动区由于煤矿开采导致岩(土)层发生移动变形破断,岩层的移动变形属于矿山开采沉陷领域,主要涉及到岩体力学、开采沉陷学以及采矿工程学;煤矿采动建筑物的地震安全属于土木工程领域,主要涉及到地震工程学、结构动力学、工程结构抗震等学科;目前国内外采矿工程领域的专家较少涉足结构工程领域,而土木工程领域的学者则对采矿工程的关注相对较少,导致煤矿采动建筑的地震灾变与防控相关研究发展受阻。煤矿采动建筑物地震灾变防控问题的特殊性和严峻性导致煤矿采动(空)区的地震安全问题愈发严重。

我国矿区由于高强度、大面积的持续开采,导致煤矿采空区建筑物安全问题越发突出,采煤沉陷区建筑物损伤破坏现象日益严重<sup>①</sup>(查剑锋等,2005;苏仲杰,刘文生,2001;赵德深,

<sup>①</sup> 煤科总院唐山分院,徐州矿务局.1995.徐州庄矿大户群高潜水位就地重建村庄下采煤技术研究报告.

2000; 杨逾, 2007; 段敬民, 2005; 于广云等, 2004; 常虹, 2013; 孙冬明, 2010)。加之我国有80%的矿区处于抗震设防区, 所以采煤沉陷区的建筑物不仅需要承受采煤沉陷的危害, 同时也面临着地震灾害的威胁; 因此研究采煤沉陷区建筑物的抗震性能也是矿区工程建设迫切需要解决的问题。

地下煤炭资源的开挖对地下工程围岩产生扰动, 使地下原有应力状态发生改变, 引起围岩的应力重新调整, 这就使围岩材料发生了随时间变化的蠕变特性, 所以煤矿沉陷区地表的沉降变形一般持续时间比较长。煤矿采空区会加重地震的破坏, 开采沉陷变形导致建筑物破坏问题异常严峻, 严重影响矿区的环境保护、经济发展和社会稳定, 煤矿采动区建筑物抗震抗开采沉陷变形保护的研究已成为一个亟待解决的问题<sup>①</sup> (查剑锋等, 2005; 苏仲杰, 刘文生, 2001; 赵德深, 2000; 杨逾, 2007; 段敬民, 2005; 于广云等, 2004; 常虹, 2013; 孙冬明, 2010)。

煤矿采动建筑物保护是涉及采矿、地质、岩土、结构、防灾减灾等多学科的综合性和交叉性问题, 采动区建筑物的变形破坏多是由于地下煤炭的开采引发的开采沉陷, 产生了附加应力而引起的建筑物发生倾斜、出现裂缝等一系列问题。由于受到煤矿采动区地质条件的物理力学的性质以及煤炭的开采方法、开采面积、开采顺序等开采因素的影响, 加之建筑物的结构型式、地基土性质与承载能力、基础与结构的强度刚度和整体性、基础的稳定性以及建筑物在煤矿采动区的位置等因素, 给理论计算和力学模型的建立与分析带来了很大的困难。

对于煤矿采动区建筑物的损害防治与保护, 国内外的专家学者等科技工作者都开展了大量的科学研究工作 (查剑锋等, 2005; 苏仲杰等, 2001; 赵德深, 2000; 杨逾, 2007; 煤科总院唐山分院等, 1995; 段敬民, 2005; 于广云等, 2004; 常虹, 2013; 孙冬明, 2010), 无论是从采矿工程 (如煤炭资源的各种开采方法以及开采沉陷变形控制) 还是从土木工程 (如对采动区建筑物进行加固维修或者是采取相应保护措施) 等方面, 取得

了大量有益的科研成果 (井征博等, 2011, 2010; 吴艳霞, 2012; 周长海, 2010; 张春礼, 2009; 杨鑫欣, 2011; 于广云, 2009; 段敬民, 1998; 张永波, 2005; 吴启红, 2010; 罗一忠, 2005; 王金东, 2013; 陈炎光, 陈冀飞, 1996; Dobry, Gazetas, 1986)。但是目前从矿区现场的实际调查和观测的结果来看, 地下煤炭资源的开采对地表建筑物的损害与破坏并非与现有的理论成果相一致 (魏晓刚, 2011, 2015), 甚至与一些理论成果的差异还比较大。煤矿采动应力会导致建筑物产生一定的损伤破坏 (次生损伤), 该量级的次生损伤在强地震场作用下会逐渐累积、演化, 对煤矿采动区的建筑物的整体稳定性和安全性构成极大的威胁。由于地面建筑物的设计方法均是单独考虑建筑的抗震设计 (普通地区) 或抗变形 (煤矿采空区), 而煤矿采动区建筑物在受到地下煤炭开采扰动的条件下是否经得起地震的破坏影响, 尤其是破坏形式及灾变演化过程如何尚无从得知。地下煤炭资源开采引起采场围岩变形破坏产生采动裂隙, 采动裂隙是矿山一系列灾害的根源, 矿区建筑物不仅要受到煤炭开采引起的采动损害的影响, 还要承受地震所产生的震害。基于此, 继续不断深入的开展煤矿采动损害与地震对地面建筑的双重作用致灾机理的理论研究就显得十分重要。

## 2 煤矿采动建筑安全性的研究现状

### 2.1 煤矿采动建筑安全性研究的不足

目前对矿区的建筑物通常采取的保护措施主要可以分为: (1) 通过提高采动区建筑物的整体刚度, 来提高建筑物抵抗开采沉陷变形的能力; (2) 通过现有采矿工艺和方法的改进, 或者直接在地表采取离层注浆的方法来有效减缓沉降的方法 (查剑锋等, 2005; 苏仲杰等, 2001; 赵德深, 2000; 杨逾, 2007; 煤科总院唐山分院等, 1995; 段敬民, 2005; 于广云等, 2004; 常虹, 2013; 孙冬明, 2010)。综合以上因素, 岩层移动变形对建筑物的损伤破坏不容忽略, 所以需要同时考虑煤矿采动区地基土—基础—上部结构的相互作用

<sup>①</sup> 煤科总院唐山分院, 徐州矿务局. 1995. 徐州庄矿大户群高潜水位就地重建村庄下采煤技术研究报告.

(夏军武等, 2007, 2002; 郑玉莹等, 2012; 谭志祥, 2004), 将三者视为一个整体结构体系, 并考虑他们之间的协同工作关系(煤矿采动区土—结构相互作用不仅指地震作用下土—结构动力相互作用, 也指在煤矿采动过程中地基—基础—上部结构之间的协调变形作用), 采取合理的保护措施来吸收或减缓地表的移动变形, 提高建筑物自身的抗变形能力, 消除开采沉陷变形对建筑物的危害。

虽然煤矿采动损害影响下建筑物保护理论取得了丰硕的研究成果(夏军武等, 2007, 2002; 郑玉莹等, 2012; 谭志祥, 2004), 但是, 对于煤矿采动损伤建筑的研究主要存在以下不足之处: (1) 注重一般自然环境的研究, 对于煤矿地面复杂工业环境(煤矿沉陷区)缺乏定量认识; (2) 注重常规工业与民用建筑损伤劣化研究, 对于煤矿地面建筑物严重损伤劣化程度缺乏定量的系统认识; (3) 注重单一因素或少量因素作用的研究, 对于地震作用下煤矿采动建筑的损伤劣化物理模拟试验和机理研究缺少系统性; (4) 现有钢筋混凝土结构的可靠性评价理论注重一般自然环境, 不能体现煤矿地面复杂环境(煤矿沉陷区)的特殊性(煤矿采动致灾、煤矿采动与地震联合致灾)及复杂性。

对煤矿采动区建筑物进行保护需要同时开展煤矿采动建筑物抗开采沉陷变形隔震保护体系的研究(刘书贤等, 2013a, b, c, d, 2014a, b, c, d, e, 2015; 魏晓刚, 2011, 2015; 李海军等, 2015), 抗开采沉陷隔震保护的原则可概括为: 在小于地震设计烈度或由于采动影响而引起的地表移动变形较小时, 建筑物构件不开裂或仅产生微小变化; 当发生罕遇地震时或较大的地表移动变形时, 允许建筑物在抗开采沉陷隔震保护体系的保护下, 使抗开采沉陷隔震保护体系首先发生破坏, 尽量保证建筑物的整体不被破坏。煤矿采动区建筑物抗开采沉陷隔震保护体系是针对地基变形进行建筑物保护设计的同时, 还应考虑建筑物的抗震性能设计。建筑物的抗采动保护与抗地震保护是对立统一的, 抗震设计和抗变形设计的共同点是提高建筑结构的抗变形能力(开采沉陷变形是长期缓慢的变形, 地震则短时间的剧烈变形破坏)(魏晓刚, 2011, 2015)。

## 2.2 煤矿采动损害影响下的建筑物灾变分析

煤炭资源开采后所形成的地下洞室结构(煤矿采空区)在上覆岩层的自重应力作用下, 煤矿采空区的岩层结构会逐渐产生弯曲、冒落、下沉甚至于破裂现象, 在形成“弯曲带”、“冒落带”、“裂隙带”后(图4), 煤矿采空区周围的围岩结构体系会形成暂时的稳定平衡状态(何国清, 杨伦, 1994)。随着煤炭资源的持续开采, 岩层移动变形破坏的范围会不断扩大。在上覆岩层的自重应力作用下, 煤矿采空区上覆岩层会不断的经历“失稳—稳定—再失稳—再稳定”的演化过程, 此时煤矿采空区的空洞(隙)的岩层会逐渐压实, 波及到地面就表现为地表沉陷。

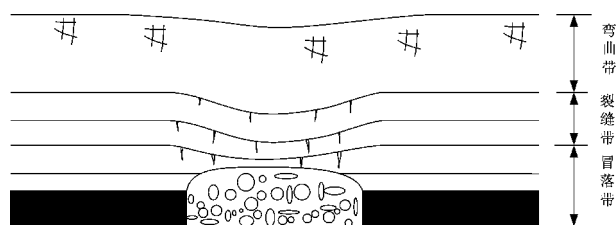


图4 煤矿开采形成的三带

Fig. 4 Three zones caused by mining subsidence

煤矿采动建筑的损伤破坏主要与煤炭开采引起的岩层移动变形破断有关, 煤矿采空区上覆岩层的移动变形不断波及地表, 地表会产生不同形式的移动变形(通常为开采沉陷变形)。开采沉陷变形在地表的表现形式主要为: 下沉、倾斜、地表曲率、地表水平变形、剪切变形以及扭转变形等。

### (1) 地表下沉对地面建筑的损伤破坏

岩层的移动变形破坏波及地表, 引起地表发生均匀下沉现象的时候, 地面建筑一般只会产生整体下沉现象, 此时由于地表几乎不对地面建筑产生附加应力, 所以地面建筑的损伤破坏较小; 如果煤矿开采区域的地下水位较高时, 地面建筑基础所处的环境则转变为潮湿的环境, 容易引起基础强度降低, 导致地面建筑破坏倒塌。

### (2) 地表倾斜对地面建筑的损伤破坏

煤矿开采引起的地表移动变形容易导致建筑物倾斜, 此时地面建筑的重心及中心发生偏离而产生了倾覆力矩, 倾覆力矩对地面建筑物所产生的附加应力是其损伤破坏的灾害源。

### (3) 地表曲率变形对地面建筑的损伤破坏

煤矿开采沉陷变形容易引起地表由初始的平面状态向曲面状态变化,进而破坏了建筑物基础底面及建筑物荷载之间的力学平衡状态(图5)。地表曲率变形分为正曲率变形和负曲率变形,地面建筑物在地表曲率变形的影响下,地基反力会发生应力重分布现象;如果曲率变形对地面建筑所产生的附加应力(或剪力)超过了地面建筑的结构构件(尤其是基础)的承载能力极限状态,则容易引起地面建筑发生损伤破坏现象。

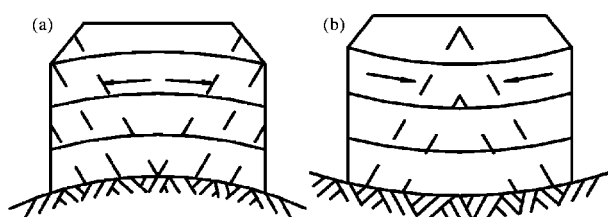


图5 地表曲率变形对建筑物的影响

(a) 正曲率影响下的裂缝;(b) 负曲率影响下的裂缝

Fig. 5 Influence of surface curvature deformation on structure

(a) cracks caused by positive curvature; (b) racks caused by negative curvature

### (4) 地表水平变形、剪切变形以及扭转变形对地面建筑的损伤破坏

煤矿采空区地表的移动变形主要可以分为水平变形、剪切变形以及扭转变形,煤矿采空区地面建筑物的损伤破坏多为以上几种变形的单独作用或者几种变形的耦合作用所引起,不同的变形所引发的建筑物破坏形式有所区别:水平变形容易引发建筑物的张拉破坏,尤其是在建筑物的门窗洞口等薄弱部位;剪切变形容易引起建筑物的基础与上部结构发生相对错(转)动,继而引发建筑物的损伤破坏;扭曲变形则会引发建筑物产生较大的附加应力,引起建筑物发生扭曲变形,影响其正常使用。

### 2.3 煤矿采动区建筑保护的研究进展

波兰主要是采用条带开采的方法来提高煤炭开采的回采率及控制地面下沉,在多年的工程实践之后波兰的条带开采方法的回采率在保证下沉系数为0.05~0.1时基本可以达到50%~60%;波兰在开采完成后对于采空区的处理主要是采用

密实水砂充填的方法来实现煤矿采空区的安全性(刘天泉,1986)。采用水砂充填方法进行填充煤矿采空区时要求砂子必须满足以下条件:保证压缩率为5%~6%时,要求含泥率 $\leq 10\% \sim 20\%$ ,此时采区地表的下沉系数约为0.1~0.15。英国在进行建筑物下采煤的时候,主要是采取房柱式的开采方法来保证每天的开采率以及合理的实现地面建筑物保护。德国曾经采用破碎后的煤矸石以及炉渣作为煤矿采空区的填充材料,以减缓地表的移动变形和减轻对建筑物的采动损害(英国煤炭局,1980)。波兰还曾经利用不同矿山之间的协调开采方法、全部回采不留煤柱的开采方法以尽可能的减小和控制煤矿采空区的移动变形,以达到保护地面建筑物的目的(刘天泉,1986)。

20世纪70、80年代,Sergeant(1992)曾先后分析研究了地下煤炭开采对地面公路、建筑物的损伤破坏,尤其是在公路下采煤及建筑物下伏采空区的区域采取合理的开采方法获得了大量有益的研究成果;Peng(1992)根据煤矿采空区复杂的工程地质条件,在前人研究的基础上提出了煤矿采空区建筑物尽可能采取对称结构,以保证可以及时的控制煤矿采动引起的开采沉陷变形对建筑物的损害;Begley等指出要控制煤矿采空区地表的水平变形和垂直变形可以通过采用Expansion Joints(膨胀接头)的保护方法来实现。德国的研究人员对于煤矿采动区建筑物的保护主要是采用弹簧来抵抗地表的移动变形以达到保护地面建筑的目的,但是其成本相对较高(克拉茨等,1984)。

与国外的三下采煤技术及建筑物保护相比,我国的煤矿采动区建筑物保护的研究工作开展相对较晚:牛宗涛(2008)基于矿山开采沉陷理论,通过对煤矿采动损害影响下的建筑破坏的实地考察,利用有限元数值软件对煤矿采动损害建筑进行数值模拟,并与实际采动损害现象进行了对比分析,提出了合理的煤矿采动建筑的抗变形加固措施;夏军武等(2007,2002),郑玉莹等(2012)和谭志祥(2004)基于力学理论及矿山开采沉陷学,通过理论分析建立同时考虑上部建筑结构一条形基础一下部地基的协同力学模型,重点探讨了煤矿开采过程中上部建筑结构在适应地表移动变形的过程中结构内力的变化过程以及相

应的影响因素,得到了由于地表移动变形导致煤矿采动建筑物所产生的附加内力的计算公式,在以上研究基础上,设计了安装在框架结构的主动抗变形支座装置,以保证建筑物可以适时适应地表的移动变形。

谭志祥和邓喀中(2004)通过理论研究发现地表移动变形对建筑物损伤破坏主要是以附加内力的方式对建筑物进行加载,在此基础上建立煤矿采动区建筑物上部结构—基础—地基的整体力学模型,并对地表移动变形对建筑物所产生的附加内力进行了计算;查剑锋等(2005)在实验研究的基础上,通过对实验数据分析研究发现要实现煤矿采动区建筑物的保护,首先需要控制地表的移动变形,而离层注浆减沉技术则是控制地表沉陷比较理想的技术;苏仲杰和刘文生(2001)根据煤矿采动所引起的地表移动变形及地面沉降,建立了煤矿采空区的上覆岩层产生离层的力学模型,对其覆岩离层的力学机理进行了深入全面的探讨研究,并对充填材料与上覆岩层相互作用的机理进行了总结,确定了合理的离层充填注浆设备(系统)。赵德深(2001)研究了煤矿采空区覆岩离层充填减沉机理,采用薄板小挠度方法重点分析了煤矿采空区的上覆岩层离层产生的机理及控制方法,所得的研究成果可以为控制煤矿采空区上覆岩层的离层产生及控制地表移动变形提供参考和借鉴;苏仲杰(2001)针对煤矿采空区覆岩离层注浆控制地表移动变形尚不完善的问题,利用相似材料开采试验与数值模拟分析计算相结合的方法,重点研究了煤矿采空区上覆岩层离层发育机理、影响因素及控制方法,并将研究成果在矿区进行了实际应用;杨逾(2007)针对矿区垮落带岩层移动变形破断的问题,采用粉煤灰浆体对垮落带破碎岩体进行填充,并研究了充填后岩体的本构方程及移动变形的计算方法,并在邯郸矿区进行了工程应用。原煤炭科学研究总院通过大量的工业实验研究设计出了盒子房屋,该房屋不仅可以有效的抵御开采沉陷变形所引起的地表移动及沉降,并且可以实现随时搬迁,提高了建筑物的可利用性<sup>①</sup>;段敬民(2005)根据煤矿采动所引起的地表沉降特点研

制出了一种特殊的建筑物基础,该基础为可升降点式基础,可以较好的抵抗地基不均匀沉降,以达到保护煤矿采动区建筑物的目的。

#### 2.4 煤矿采动区土—结构相互作用研究的不足

煤矿采动区建筑物地基、基础与上部结构的相互作用与一般地区的建筑物三者之间的相互作用机理不同(夏军武等,2007,2002;郑玉莹等,2012;谭志祥,2004;刘书贤等,2013a, b, 2014a, b, c, d, e, 2015;魏晓刚,2011, 2015;李海军等,2015):地下煤炭开采所引起的地表移动变形,导致采动区建筑物地基变形。在煤炭开采过程中因为煤炭开采所产生的扰动效应导致地基土基本的物理性质和力学性能随着煤炭的开采而不断变化;未采动建筑物的地基则由于开采沉陷变形的影响,再加之其上建筑建筑物的自重会再不断加载到地基土上,导致地基产生应力重新分布的现象。采动区建筑地基—基础之间原来彼此相互连接或接触的状态,在地表发生移动变形后仍然部分或整体处于相互连接或接触。而现有采动区建筑物的设计计算中通常不考虑地基、基础与上部结构的相互作用,并且在结构的动力学性能计算时,往往将上部建筑结构视为绝对刚性体,同时将位移边界条件与力的边界条件进行转换(直接施加强迫位移),此时的计算所得的结果与实际之间相距甚远。

目前煤矿采动区建筑物抗开采沉陷变形抵抗地震保护中涉及到地基土—基础—上部结构之间相互作用关系的研究成果很少,并且主要存在以下不足(夏军武等,2007,2002;郑玉莹等,2012;谭志祥,2004;刘书贤等,2013a, b, 2014a, b, c, d, e, 2015;魏晓刚,2011, 2015;李海军等,2015;于广云,2009):

(1) 煤矿采动区地基土、基础与上部结构之间的相互作用的理论模型和动力学方程尚未建立,并且采动区地基土特有的内力变化过程:“地基土变形—基础切入—应力重新分布”这一过程现有理论不能较好的解释和阐述,即当地基土曲率变形逐渐增大时,建筑物基础的切入量也随之增大,目前对地基土、基础之间相互作用和影响的变形

<sup>①</sup>煤科总院唐山分院,徐州矿务局.1995.徐州庄矿大户群高潜水位就地重建村庄下采煤技术研究报告.



规律认识不充分,使得实际计算出来的地基土附加反力值与实际的监测值有较大的差别。

(2) 由于地下煤炭开采所引起的开采沉陷变形,在引起将采动区建筑物地基反力实际上是不对称的,而现有的理论通常假设由于采动所引起的建筑物地基反力为绝对对称的,由此而造成理论计算的误差偏大。

(3) 煤矿采动区地基土的曲率变形导致建筑物产生曲率变形,由于两者之间刚度的差异,从而使采动区建筑物存在着加载区和卸载区,可能出现嵌入区和悬空区;但基础切入地基量尚无实用的计算方法,嵌入区和悬空区的长度也难以确认。

(4) 煤矿采动区建筑物地基、基础与上部结构之间的相互作用尚未进行深入研究:因为建筑物刚度对地基反力的和分布的影响很大。而现有的计算理论是基于采动区建筑物的变形与地基的移动变形同步的假定,即不考虑建筑物刚度的大小,均按照地表曲率变形值进行计算。

### 3 煤矿采动损伤建筑物的地震灾变分析

#### 3.1 煤矿采动与地震对建筑物的成灾机制探讨

煤矿采空区岩层的移动变形与地震灾害对建筑物的破坏有所不同:煤矿开采引起的岩层移动变形是长期缓慢发展的变形,对建筑物的破坏也是随时间逐渐发展起来的;地震灾害对建筑物的破坏则是短时间内剧烈的破坏,煤矿开采沉陷变形会导致建筑物产生一定的损伤破坏(次生损伤),该量级的次生损伤在强地震场作用下会逐渐累积、演化,这两种不同层次的损伤如何演化发展,目前尚没有清晰系统的理论。但是煤矿采动损害与地震灾害对建筑物的损伤破坏具有相同(通)之处:二者对建筑物的荷载传递途径都是通过“场地—基础—上部结构”来实现对建筑物的损伤破坏,并且建筑物的破坏过程中都伴随着建筑物的损伤和能量的耗散演化,因此可以根据损伤力学及能量理论,通过分析其荷载传递途径来建立煤矿采动损害以及地震灾害对建筑物损伤破坏的内在联系。

采煤沉陷区由于岩层的移动变形破断导致其岩层环境相对要复杂些,所以当煤矿采空区发生

地震时,地震波在煤矿采空区的传播更为复杂:不仅需要考虑地震波从基岩部分传播入射到煤矿采空区底部,同时也要考虑在煤矿采空区可能会出现多个迎波边界,并且在煤矿采空区不同位置的波动情况差别较大。综上可知,煤矿采空区的破断岩层属于松散介质,其介质的不均匀性及局部几何的不规则性对地震波的传播影响均较大,需要采取合理的计算方法对其进行研究。图6为煤矿采空区发生地震时的地震波传播示意图。

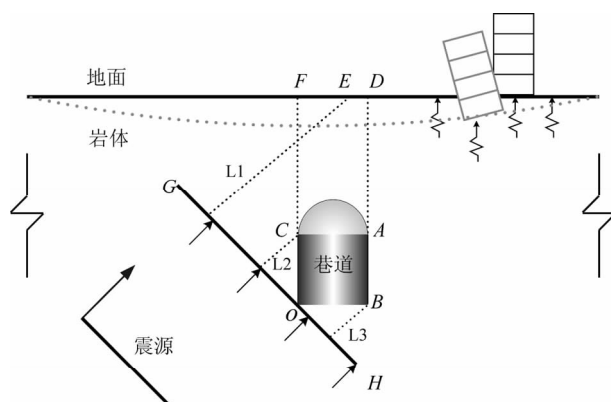


图6 煤矿采空区地震波传播示意

Fig. 6 Sketch of propagate of incident seismic waves in mining areas

#### 3.2 煤矿采动区建筑物地震动力灾变的研究现状

国外关于建筑物下采煤技术及煤矿采动区建筑物保护等方面的研究工作开展的相对较早,其中德国是最早开始煤矿采动区建筑物保护相关理论及技术的研究,克拉茨(1984)撰写的专著《采动损害及其防护》成为德国建筑物下采煤技术发展的标志性里程碑;波兰、前苏联在煤炭条带开采技术方面做出了巨大的贡献;英国和日本曾经对建筑物下的煤炭资源采用房柱式开采方法进行开采。

由于煤矿采动区建筑物保护问题属于三下采煤(建筑物下、水体下、道路与铁路下)领域,所以在国内关于煤矿采空区建筑物保护的研究,主要以煤炭院校为核心骨干研究力量;在国家自然科学基金的支持下(表1),煤矿采动区建筑保护方面的研究得到了长足发展。

原煤炭科学技术研究总院唐山分院的崔继宪研究员较早开始进行关于煤矿采动区建筑的抵抗地表移动变形及抵抗地震的双重保护研究,是该方面研究的开拓者,之后在中国矿业大学、青岛



表 1 煤矿采动区建筑物保护方面的部分国家自然科学基金

Tab. 1 Partial National Natural Science Foundation of China about protection of buildings in coal mining area

时间	单位	主持人	项目名称
2007 年	中国矿业大学	夏军武	采动区框架结构建筑物整体稳定机理研究
2008 年	中国矿业大学	夏军武	采动区多层建筑物稳定机理研究
2012 年	中国矿业大学	夏军武	采动区桥体结构整体稳定机理研究
2011 年	中国矿业大学	温庆杰	采动区混凝土曲线箱梁桥拓宽后的基础不均匀沉降全过程研究
2006 年	中国矿业大学	于广云	煤矿采动区大变形条件下桥梁及地基的加固方式研究
2008 年	中国矿业大学	于广云	地下采矿对地基稳定性的微观扰动机理研究
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	青岛理工大学	路世豹	地震区煤矿采动建筑物双重保护的基础理论研究
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
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
2013 年	辽宁工程技术大学	杨 逾	复杂应力状态下条带煤柱的延时特性研究
2008 年	辽宁工程技术大学	杨 逾	垮落带注充控制覆岩移动机理研究
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
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
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
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

理工大学、河南理工大学、辽宁工程技术大学以及大连大学等学者相继开始了该方向的研究工作。

目前在中国的高等院校及研究所（表 2）先后形成了以中国矿业大学夏军武教授、袁迎曙教授、于广云教授为代表的江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室，该实验室明确提出以开展建筑物抵抗地表移动变形和抗地震的双重保护研究为该实验室的重点研究方向；在辽宁工程技术大学形成了以刘文生教授、苏仲杰教授及杨逾教授为代表的以研究矿山开采损害防护为研究特色的辽宁省矿山沉陷灾害防治实验室，其中该校的刘书贤教授也开展了煤矿采动区建筑物地震灾变防护相关的研究工作，王来贵教授所带领的科研团队主要在煤矿采动损伤地层的稳定性及演化灾变方面开展了大量的研究工作；在青岛理工大学则形成了以于广明教授、王谦源教授为代表的以从事地下开挖损害鉴定、地表沉陷与工程效应研究的山东省岩体损害防护与地表沉陷治理工程技术研究中心和青岛理工大学矿山充填技术与地压控制研究所；在大连大学形成了以麻凤海教授为代表的以研究矿山开采沉陷变形及地下结构系

表 2 国内开展煤矿采动建筑保护的重点实验室

Tab. 1 Key laboratory of China about protection of buildings in coal mining area

单位	项目名称
中国矿业大学	深部岩土力学与地下工程国家重点实验室
	江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室
辽宁工程技术大学	辽宁省矿山沉陷灾害防治实验室
西安科技大学	陕西省岩层控制重点实验室
河南理工大学	煤矿采动损害与保护河南省创新型科技团队
大连大学	辽宁省复杂结构系统灾害预测与防治实验室
青岛理工大学	山东省岩体损害防护与地表沉陷治理工程技术研究中心
	青岛理工大学矿山充填技术与地压控制研究所
冀中能源股份有限公司	冀中能源集团国家能源充填采煤技术重点实验室
山东科技大学	山东省煤炭开采安全与环境保护工程技术研究中心
湖南科技大学	煤矿安全开采技术湖南省重点实验室
黑龙江科技大学	黑龙江省煤矿深部开采地压控制与瓦斯治理重点实验室

统稳定为特色的辽宁省复杂结构系统灾害预测与防治实验室；在河南理工大学则形成了以郭文兵教授为学术带头人的煤矿采动损害与保护河南省创新型科技团队；在西安科技大学形成了以伍永平教授为实验室主任的陕西省岩层控制重点实验

室; 山东科技大学、安徽理工大学及煤炭科学技术研究院有限公司(尤其是唐山分院)也进行了煤矿采动损害防护的大量研究工作。

当煤矿采空区隶属于地震区时, 煤矿采动区建筑物需要同时承受煤矿采动损害引起的开采沉陷变形作用及地震的动力破坏作用。目前国内的专家学者关于煤矿采动区建筑物的抵抗开采沉陷变形和抵抗地震动的研究已经开展了一些研究工作: 夏军武等(2007, 2002)、郑玉莹等(2012)、谭志祥(2004)通过对煤矿采动区框架结构抗震性能的研究, 指出了在对煤矿采动区建筑物进行设计时, 需要同时考虑煤矿采动损害与地震对建筑物的破坏作用; 中国矿业大学的夏军武先后主持了国家自然科学基金项目《采动区桥体结构整体稳定机理研究》、《采动区框架结构建筑物整体稳定机理研究》以及教育部跨世纪人才基金项目《采动区多层建筑物稳定机理研究》, 在国家自然科学基金的支持下得到了许多重要研究成果(夏军武等, 2007, 2002; 郑玉莹等, 2012; 谭志祥, 2004): 根据煤矿采动区扰动土的破坏实验, 综合考虑煤矿采动区地基土与上部框架结构之间的相互作用, 建立了同时考虑煤矿采动区上部框架结构—独立基础—地基土的协调变形统一体的理论模型, 该理论分析模型综合考虑了煤炭开采过程中所引起地表移动变形的动态变化过程, 指出了煤矿开采沉陷变形与煤矿采动建筑物的附加内力的关系, 推导建立了煤矿采动区框架结构的附加(变形)内力的理论计算公式, 并设计出了安装在框架结构的主动抗变形支座装置; 通过分析影响煤矿采动区框架结构建筑物整体稳定性的因素, 探讨了开采沉陷变形影响下的煤矿采动区框架结构建筑物的极限能力, 初步得到了煤矿采动区框架结构的抗地表移动变形的保护措施。常虹(2013)通过理论分析、试验研究、数值模拟与现场调研应用相结合的研究方法, 重点研究了煤矿采动区水闸结构损伤破坏过程, 在综合考虑煤矿采动区水闸结构与地基土(协调变形)相互作用的基础上, 提出了对已破坏水闸结构合理化的加固设计方案以及煤矿采动区新建抗变形水闸的设计建议; 孙冬明(2010)通过建立煤矿采动区输电塔—线的整体有限元模型, 根据地下采煤工作面的推进方向与输电塔导线走向的不同, 重点研

究了煤矿采动区输电塔—线的内力变化, 同时给出煤矿采动区输电塔的安全评价, 为煤矿采动区输电塔—线体系的加固提供参考。

在国家自然科学基金的支持下, 路世豹老师完成了科研项目《地震区煤矿采动建筑物双重保护的基础理论研究》的研究工作, 该项目主要研究煤矿采空区地表移动变形对建筑物的损害在地震作用下的破坏倒塌机制(井征博等, 2011), 初步揭示了煤矿采动损害影响下的建筑物损伤演化规律以及地震作用下的灾变过程, 但是并没有较好的解释煤矿开采沉陷变形以及地震这两种截然不同的灾害荷载是如何影响和破坏建筑物, 如何构建搭接这两种灾害荷载对建筑物损伤破坏的桥梁。井征博(2010)利用有限元数值计算软件 ANSYS 建立了钢筋混凝土框架—剪力墙结构, 采用沉降的方法来模拟地表的移动变形, 初步得到了钢筋混凝土框架—剪力墙结构在同时考虑煤矿采动与地震荷载效应下的损伤破坏过程, 但在没有考虑地基土对结构的影响, 所得到的结果是偏于安全的; 吴艳霞(2012)根据青岛地区地铁施工的工程背景, 研究了地下地铁隧道结构施工过程中引起的地面沉降对建筑物的损伤破坏, 采用模糊数学的分析方法对地铁上方建筑物的安全防护等级进行了判断, 提出了适用于适合青岛滨海地区地铁隧道结构上方建筑物损伤评判标准; 周长海(2010)利用 SAP2000 软件研究了沉降荷载和地震荷载作用下建筑物的内力响应, 重点分析了结构塑性铰的形成发展过程; 但是由于 SAP2000 较好的结构的弹性力学行为, 不能较好的实现结构的塑性力学行为, 容易造成数据误差; 张春礼(2009)基于 ANSYS 软件建立了钢筋混凝土框架结构, 通过分析煤矿采动与地震灾害荷载双重作用下框架结构的力学响应及塑性铰发展, 指出对于煤矿采动区建筑物而言必须考虑建筑的抗采动设计和抗震设计; 杨鑫欣(2011)通过 ANSYS 软件建立了高层框架结构, 重点研究了煤矿采动损害与地震联合作用下位移的时程曲线, 并初步进行了结构损伤评估工作。

于广云(2009)以淮南矿区为工程背景, 重点研究了煤矿采动区大变形影响下的土体物理力学性能的变化规律, 提出了煤矿采动扰动率的概念, 为煤矿采动区建造抗变形建筑以及加固设计

提供参考;段敬民(1998)通过建立煤矿沉陷区的建筑物—基础—地基共同作用协调变形的整体力学模型,分析了煤炭开采过程中对建筑物所产生的附加作用力,提出了可移动及升降点式基础的煤矿采动建筑物的保护方法,为煤矿沉陷区的建筑物的抗震加固提供参考和借鉴;谭志祥(2004)采用现场调研、试验研究、理论分析与数值模拟相结合的方法建立煤矿采动区的建筑物—基础—地基协调变形的整体力学模型,分析了地表移动变形影响下不同参数变化所导致的煤矿采动建筑物附加应力的变化趋势,并提出了煤矿采动裂缝角的概念及其煤矿采动建筑破坏等级评判标准及保护措施;张永波(2005)针对煤矿老采空区建筑物地基稳定性不足的问题,通过分析煤矿采空区上覆岩层、采矿工程的设计参数以及建筑物的自重荷载,通过现场工业实验重点研究了煤矿老采空区建筑损伤破坏及地基失稳机理,可以为煤矿老采空区建筑物加固处理及设计提供参考。刘书贤等(2010, 2011a, b)通过深入矿区实地考察煤矿采动损害现场,采用理论分析与数值计算相结合的方法研究了煤矿采动损害荷载与地震灾害荷载联合作用下建筑物灾变过程,重点探讨了两种灾害联合作用下建筑物的内力响应,建立了煤矿采动区建筑物的抗震抗变形双重保护装置,并进行了考虑土—结构相互作用的煤矿采动建筑抗震抗变形双重保护装置的减震性能的研究工作,但是没有指出如何将煤矿采动损害与地震荷载对建筑物的损伤破坏联系起来;刘书贤等(2014b)从能量角度分析了建立煤矿采动建筑的地震灾变演化过程,指出了可以从能量角度分析建筑物的煤矿采动损伤与地震损伤。

目前对于煤矿采空区岩层移动变形的控制及煤矿采动建筑物的抵抗地表变形技术已经取得了丰硕的研究成果,但是对于煤矿采动损伤建筑在地震作用下的灾变演化机理及控制尚存在着不足,尤其是考虑煤矿采动区建筑同时抵抗地表移动变形(长期的变形)和抵抗地震动的大变形(短时间内的变形)相关的研究尚不完善,尤其是如何建立建筑物的煤矿采动损伤与地震损伤的内在联系,这是研究煤矿采动损伤建筑抗震性能劣化的核心和关键问题,通过合理的方法建立煤矿采动损害与地震损害联系的桥梁与纽带是研究地震区

煤矿采动建筑抗震性能迫切需要解决的学术问题。

#### 4 煤矿采动区建筑物地震动力灾变防控亟待解决的学术问题

煤矿环境的复杂性、恶劣性,对建筑物的安全性、耐久性等产生了严重威胁。现行的《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)关于建筑物的抗震设计方法主要是基于自由场地来假设建筑周围的区域,但是对于矿区建筑而言,地震发生煤矿采空区的存在对其动力响应的影响效应不可忽略。地震发生时,煤炭开采后形成的采空区的边界区域改变了地震波的传播,对地面建筑的动力响应有较大影响;所以地震作用下煤矿采空区的抗震安全问题、煤矿采空区与地面建筑物动力响应的相互影响的互馈机制的问题是研究煤矿采空区及地面建筑的地震安全的重要课题。针对煤矿采动损害影响下建筑抗震性能劣化致灾的安全问题,要想对煤矿采动区建筑物地震动力灾变防控开展系统化的研究工作,首先需要解决以下问题:

(1) 煤矿采动区复杂地质环境(采动损伤地层)地震动特性与灾变演化分析:煤矿采动损伤地层的震源特性模型、地震波传播路径范围内(区域尺度)的损伤地层介质模型及煤矿采动区的局部场地介质模型的选取,地震动场分析模型边界约束条件的合理假定,煤矿采动区地震动场的时空分布规律,煤矿采动区复杂地下结构、复杂地形、断层系统对地震的影响是理论分析、试验研究和数值计算中拟解决的关键问题之一。

(2) 煤矿采动区复杂工业环境下建筑物抗震性能劣化及煤矿采动对建筑物抗震性能的扰动规律研究:根据建筑物所处的自然环境、生产环境和力学环境,从材料、构件和结构层次探讨煤矿沉陷区复杂环境下建筑物抗震性能劣化的影响因素,分析复杂灾害因子耦合作用下建筑抗震性能的劣化过程,得到矿区复杂多变的灾害演化系统对建筑物抗震性能的劣化机制;分析煤矿采动区岩层的移动破断对建筑物抗震性能的影响,建立煤矿采动损害影响下建筑物的灾变机制,重点探讨煤矿采动对建筑物的损伤机理,研究煤矿复杂工业灾害演化系统对建筑物的侵蚀破坏,揭示煤矿采动损害影响下的建筑结构损伤失效机制,形

成煤矿采动损害影响下的建筑物修复加固及维护方法, 最终建立矿区复杂多变的灾害演化系统环境下既有建筑结构的可靠性设计理论。

(3) 煤矿采动损害与地震灾害双重作用下建筑物性能损伤破坏演化机理: 煤矿采动引起的建筑物次生损伤在地震动荷载作用下渐进破坏的演化进程中的宏细观结构特征与力学属性, 合理的非线性静、动力强度准则与采动损伤本构模型, 煤矿采动与地震双重作用下建筑物抗震性能参数及宏观损伤的综合影响机制。通过理论研究、试验和数值分析手段深入研究地震区煤矿采动建筑物性能损伤演化机制, 得到煤矿采动对建筑物抗震性能的扰动规律, 提出煤矿采动与地震双重作用下建筑物抗开采沉陷减震控制技术, 是迫切需要解决的一个关键科学问题。

(4) 煤矿采动区新建建筑物抗开采沉陷变形隔震保护理论与方法: 研究煤矿采动与地震双重作用下建筑抗开采沉陷减震控制原理, 提出考虑煤矿采动损伤地层场地条件影响的结构减震控制方法; 研究煤矿采动与地震双重作用下抗开采沉陷变形隔震保护控制装置力学性能劣化规律, 建立相应的力学模型; 研究煤矿采动区建筑物非线性损伤控制策略, 建立结构减震控制体系的损伤控制及全寿命抗震性能设计方法和理论体系, 构建煤矿采动区建筑物地震失效模式控制理论体系, 建立煤矿采动区新建建筑物抗开采沉陷变形隔震保护体系的损伤控制体系, 给出煤矿采动区新建建筑物抗开采沉陷变形隔震保护设计与建议是另一个关键科学问题。

要想真正解决煤矿采空区建筑物灾变问题, 首先需要解决煤矿开采引起的岩层移动变形破坏问题, 最大限度的控制岩层移动变形对建筑物的损伤破坏, 目前控制岩层移动变形最为理想的煤炭开采方法为采煤充填方法, 以减缓煤炭开采引起的地表移动变形; 其次采取合理的煤矿采动建筑物抗开采沉陷变形隔震保护措施, 以保证煤矿采动建筑物在一定范围内可以抵抗(或适应)地表移动变形, 同时在发生地震时, 也可以较好的减少地震灾害能量对煤矿采动区地面建筑物的动力破坏; 基于此要想真正解决煤矿采动区建筑物的地震动力灾变防控问题, 需要采取“地下采煤充填控制岩层移动—地面建筑抗开采沉陷变形

隔震保护措施”的煤矿采空区建筑保护理念, 保证矿区工程建设的安全健康发展。

## 5 煤矿采动建筑地震动力灾变与防控研究的发展趋势

随着煤炭资源持续高效的开采, 遗留的煤矿采空区以及废弃矿井巷道将会成为各种衍生灾害的隐患, 加之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要建立在煤矿采空区场地上, 但是煤矿采空区场地是否稳定, 并在其上建造建筑物值得商榷, 并且目前关于煤矿采空区地面建筑物的地震动力灾变更更多的是局限于探索性研究阶段, 尚未形成系统化的研究成果及理论(魏晓刚, 2011, 2015)。目前煤矿采空区地面建筑抗震性能的劣化及保护的研究工作需要从以下几方面进行展开和完善:

(1) 煤矿采动区工程场地的静力稳定性及地震动力稳定性研究

煤矿采动区域的地层结构分布与主采煤层形成的废弃采场采深、大小、采高、倾向及巷道分布等参数是煤矿采空区的关键参数, 研究主采煤层形成的采场与构造破碎带、裂隙发育带的位置、厚度、面积、走向、倾角和倾伏角等参数之间的关系, 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, 以采厚采深比为参数进行分类, 深入研究煤矿采动对区域地表建筑物的稳定性的影响。分析地下煤炭资源开采后所形成的地下孔洞、含破碎带断层、断层裂缝、凹凸地形及土介质分层等不规则性的地形及介质的不均匀性, 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, 分析煤矿采动损伤地层无破碎带断层的场地对弹性波的反射、散射等问题, 求解SH波、P波、SV波入射所引起的煤矿采动区的地面位移场、应变场和应力场。

在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, 采动损伤场地的

土层厚度和刚度的基础上,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反应的重要影响。建立煤矿采动区工程场的采动损伤岩土介质地震响应的理论分析模型,研究煤矿采空区一岩土介质相互作用对地基液化、侧移和震陷的影响,揭示煤矿采动区场地液化、侧移和震陷的特点及形成机理,建立煤矿采动区工程场地地震稳定性评价的理论和方法。

## (2) 煤矿采空区既有建筑结构的全生命周期抗震性能评估及安全控制的理论与方法

根据地震作用下煤矿采空区动力失稳及地面建筑抗震性能劣化及灾变过程的孕育演化特征和成灾条件,建立煤矿采空区的地震动力失稳演化致灾预测与煤矿采空区既有建筑结构的全生命周期抗震性能评估及安全动态调控的综合集成智能系统,为建筑物下采煤及煤矿采空区场地的地震安全性评价提供理论支撑和技术平台是迫切需要展开的重要研究内容。

## (3) 研究煤矿采动区复杂地质环境下对建筑物抗震抗变形控制装置力学性能的劣化影响规律。

不同抗开采沉陷变形隔震保护支座力学性能试验研究,总结已有煤矿采动区建筑保护的理论与试验成果,分析不同类型煤矿采动区建筑结构的失效破坏准则,分析煤矿采动区复杂场地的工程地质水文地质特点,研究其对建筑结构抗开采沉陷变形隔震保护减灾控制体系地震动输入的影响。在试验研究、数值计算的基础上,凝练深化煤矿采动区建筑物抗开采沉陷变形隔震保护理论与方法,形成系统化、合理化的煤矿采动建筑的抗开采沉陷变形隔震保护理论体系。

## 参考文献:

- 查剑锋,郭广礼,狄丽娟,等. 2005. 高压输电线路下采煤防护措施探讨[J]. 矿山压力与顶板管理, (1): 112-114.
- 常虹. 2013. 采动区地基与水闸结构相互作用机理及加固技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学.
- 陈炎光,陈冀飞. 1996. 中国煤矿开拓系统[M]. 徐州:中国矿业大学出版社.
- 段敬民. 1998. 采动区可升降点式基础房屋抗变形理论探讨[J]. 焦作工学院学报, 17(1): 44-49.
- 段敬民. 2005. 矿山塌陷区房屋抗采动理论及加固技术研究[D]. 成都:西南交通大学.
- 郭广礼. 2001. 老采空区上方建筑地基变形机理及其控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社.
- 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.
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社.
- 井征博,路世豹,蔡文进,等. 2011. 采动引起的地表变形对框剪结构的影响[J]. 青岛理工大学学报, 32(2): 27-32.
- 井征博. 2010. 钢筋混凝土框剪结构在采动影响条件下的抗震性能分析研究[D]. 青岛:青岛理工大学.
- 克拉茨 H. 1984. 采动损害及其防护[M]. 马伟民,王金庄,王绍林译. 北京:煤炭工业出版社.
- 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.
- 梁为民,郭增长. 2000. 采动区建筑物保护研究现状及展望[J]. 焦作工学院学报, 19(3): 86-89.
- 刘书贤,魏晓刚,魏亚强. 2010. 采动区建筑物抗震抗变形双重保护作用机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 30(S): 305-308.
- 刘书贤,刘书会,魏晓刚,等. 2011a. 采动区地震一开采沉陷变形对建筑耦合作用[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 30(S): 92-94.
- 刘书贤,魏晓刚,魏亚强. 2011b. 基于隔震技术的采动区半主动双重保护装置减震分析[J]. 土木工程与管理学报, 28(4): 1-5.
- 刘书贤,魏晓刚,张弛,等. 2013a. 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.
- 刘书贤,魏晓刚,王伟,等. 2013b. 采动区建筑物抗变形隔震装置的力学性能分析[J]. 实验力学, 28(4): 542-548.
- 刘书贤,魏晓刚,麻凤海,等. 2013c. 深部采动覆岩移动变形致灾的试验分析[J]. 水文地质工程地质, 40(4): 88-92+105.
- 刘书贤,魏晓刚,王伟,等. 2013d. 深部采动覆岩破断的力学模型及沉陷致灾分析[J]. 中国安全科学学报, 23(12): 71-77.
- 刘书贤,魏晓刚,王伟,等. 2014a. 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,郭涛,魏晓刚,等. 2014b. 地震作用下煤矿开采损伤建筑的能耗耗散演化致灾分析[J]. 地震研究, 37(3): 442-449.
- 刘书贤,王春丽,魏晓刚,等. 2014c. 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,张弛,等. 2014d. 煤矿多煤层重复采动所致地表移动与建筑损坏分析[J]. 中国安全科学学报, 24(3): 59-65.
- 刘书贤,魏晓刚,张弛,等. 2014e. 煤矿采动损害影响下输电塔—线耦合体系风致振动灾变分析[J]. 中国安全科学学报, 24(2): 65-70.
- 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.
- 刘天泉. 1986. 波兰城镇建筑物下采煤的建筑物加固、维修和迁建可行性技术经济分析方法[J]. 矿山测量, (6): 50-54.
- 罗一忠. 2005. 大面积采空区失稳的重大危险源辨识[D]. 长沙:中南大学.

- 牛宗涛. 2008. 采动区建筑物变形特性研究与工程应用[D]. 西安: 西安科技大学.
- 欧进萍. 2003. 结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社.
- 彭欣. 2008. 复杂采空区稳定性及近区开采安全性研究[D]. 长沙: 中南大学.
- 苏仲杰, 刘文生. 2001. 减缓地表沉降的覆岩离层注浆新技术的研究[J]. 中国安全科学学报, (11): 21–24.
- 苏仲杰. 2001. 采动覆岩离层变形机理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 孙冬明. 2010. 采动区送电线路铁塔力学计算模型及塔—线体系共同作用机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 谭志祥, 邓喀中. 2004. 采动区建筑物地基、基础和结构协同作用力学模型[J]. 中国矿业大学学报, 33(3): 264–267.
- 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.
- 谭志祥. 2004. 采动区建筑物地基、基础和结构协同作用理论与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 王金东. 2013. 采空沉陷区天然气管道的危险性评价[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.
- 王正帅. 2011. 老采空区残余沉降非线性预测理论及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 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害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.
- 吴艳霞. 2012. 青岛地铁隧道施工引起地面沉降对建筑物影响规律与防治研究[D]. 青岛: 青岛理工大学.
- 夏军武, 郭广礼, 王守祥, 等. 2002. 框架结构抗变形性能的研究现状和展望[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 32(S): 348–351.
- 夏军武, 袁迎曙, 董正筑. 2007. 采动区地基、独立基础与框架结构共同作用的力学模型[J]. 中国矿业大学学报, 36(1): 33–37.
- 线登洲. 2008. 采空区大型工业建筑关键理论与应用研究[D]. 天津: 天津大学.
- 杨鑫欣. 2011. 采动影响下钢筋混凝土框架结构的弹塑性动力分析和损伤评估[D]. 青岛: 青岛理工大学.
- 杨逾. 2007. 垮落带注充控制覆岩移动机理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 英国煤炭局. 1980. 地面沉陷工程师用手册[M]. 董其逊译. 北京: 煤炭工业出版社.
- 于广云, 夏军武, 王东权. 2004. 采动区铁路桥沉陷加固治理[J]. 中国矿业大学学报, 33(1): 59–61.
- 于广云. 2009. 采动区大变形扰动土物理性质演变及工程响应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 张春礼. 2009. 采动与地震共同作用下建筑物的破坏过程研究[D]. 青岛: 青岛理工大学.
- 张永波. 2005. 老采空区建筑地基稳定性及其变形破坏规律的研究[D]. 太原: 太原理工大学.
- 赵德深. 2000. 煤矿区采动覆岩离层分布规律与地表沉陷控制研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 郑玉莹, 夏军武, 熊军辉, 等. 2012. 采动区框架结构主动抗变形支座及其力学性能研究[J]. 山东科技大学学报, 31(1): 62–66.
- 中国工程院. 2011. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 周长海. 2010. 不均匀沉降对钢筋混凝土框架结构影响的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学.
- 周福霖. 1997. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社.
- 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.
- Dobry R., Gazetas G. . 1986. Dynamic response of arbitrarily shaped foundations[J]. Geotech J Engorge, ASCE, 112(2): 109–135.
- Peng, S. S. 1992. Surface Subsidence Engineering[M]. The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- GB50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].

## Current Situation and Development Trend of Seismic Dynamic Disaster and Prevention Research of Buildings in Coal Mine Goaf

WEI Xiao-gang<sup>1</sup>, MA Feng-hai<sup>2</sup>, LIU Shu-xian<sup>3</sup>

(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 seismic dynamic disaster and seismic performance degradation of buildings in coal mine goaf, through the analysis of related research results of buildings protection in coal mine goaf, we carried on the key discussion of the following important issues just as follows: the secondary disasters of coal mining, the urgency and severity researchs shortage of of buildings safety in coal mine goaf their shortage, the formative mechanism of joint action of coal mining damage and seismic hazard, and the existing research results and development tendency of seismic dynamic catastrophe of buildings in coal mine goaf. Based on the analysis of seismic dynamic catastrophe mechanism of buildings in coal mine goaf, we pointed out that the academic problems of the seismic disaster and prevention of buildings need to be solved urgently in coal mine goaf and preliminary revealed the technical problems of it need to be solved urgently, which can provided reference for the seismic dynamic response and prevention and control of disaster evolution process of buildings in coal mine goaf.

**Key words:** coal mining damage; earthquake disasters; catastrophe mechanism; dynamic catastrophe; energy evolution