

煤矿采空区地震安全防护的若干问题^{*}

魏晓刚^{1,2,3}, 麻凤海⁴, 刘书贤⁵, 戴君武²

(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. 中国地震局工程力学研究所
中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 航空经济发展河南省
协同创新中心, 河南 郑州 450046; 4. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622;
5. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对煤矿采空区地下岩体结构的地震安全防护不足的问题, 分别从煤矿采空区灾害的特征与危害、煤矿采空区的形成与基本特点及煤矿采空区失稳破坏的基本模式等方面深入研究煤矿采空区场地可能导致的次生灾害。通过分析煤矿采空区地下岩体结构地震灾变的相关研究成果, 总结煤矿采空区地震安全防护所涉及的关键安全问题, 揭示地震作用下煤矿采空区的场地稳定性与地下岩体结构安全防护迫切需要解决的技术难题, 为采煤沉陷区工程建设及地震安全防护提供参考。

关键词: 煤矿采空区; 地震灾变; 岩体结构; 地震荷载; 采煤沉陷; 岩层移动

中图分类号: TU4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)01-0151-08

0 引言

目前中国由于煤炭资源的过度开采, 形成了数量相当可观的煤矿采空区(群)(何满潮, 钱七虎, 2010; 李连济, 2005)。河北省邯郸市矿区由于煤炭的资源过度开采(已经累计开采煤炭约1.2亿t), 所形成的煤矿采空区的面积约43.72 km²(邯郸市的面积为1.2万 km²); 辽宁省阜新市矿区地下煤炭资源累计开采出1.2亿t, 所形成的无任何处理措施的煤矿采空区面积为77.18 km²(阜新市的面积为10 445 km²); 山西省由于煤炭资源开采所形成的煤矿采空区已经达到20 000 km², 约占山西省土地面积的1/8(山西省的面积为156 699 km²); 根据《中国煤炭城市采空塌陷灾害及防治对策研究》(李连济, 2005)可知: 截至2007年, 煤矿采空区发生塌陷沉陷的面积已经远远超过了70万 km², 由此所造成的经济损失大约500亿元, 并且目前煤矿采空区还以94 km²/a的速度发生塌陷沉陷。煤矿采空区失稳现象非常容易造成重大的灾害性事件, 在中国, 各大矿区由于采空区所造成的各种灾难性的事件也屡见不鲜

(何满潮, 钱七虎, 2010; 李连济, 2005; 刘书贤等, 2013; 张彦宾, 2012; 言志信等, 2013; 吴启红, 2010; 刘刚, 2011; 唐礼忠等, 2012)。

2007年8月29日, 陕西省神木县孙家岔镇的边不拉煤矿采空区由于坍塌引发3.3级地震, 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引发3.0级地震, 煤矿采空区附近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。

中国企业报(2012)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。2014年3月19日, 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。2014年10月24日, 新疆东方金盛工贸公司沙沟煤矿的采空区在其综采工作面附近出现了顶板大

^{*} 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474045、51174038)和河南省高等学校重点科研项目(16A560013、16A560012)联合资助。

面积冒顶破坏现象,造成了煤矿采空区岩层中大量有毒有害气体逸出,造成了16名煤矿工人窒息死亡。以上灾害案例说明了煤矿采空区的工程场地安全问题迫在眉睫,亟需解决。

随着土地资源的日益紧张及工程建设的迅猛发展,各类基础设施不可避免地要建立在煤矿采空区场地上,但是煤矿采空区场地稳定性是否满足建造建筑物的条件值得商榷,并且煤矿采空区岩层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(张彦宾,2012;言志信等,2013;魏晓刚,2015b)。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。

我国有80%以上的矿区处于强地震区,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,地震作用下煤矿采空区的稳定性、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问题是研究煤矿采空区的地震安全不可回避的重要问题(魏晓刚等,2015a,b)。矿区实际震害表明:煤矿采空区属于抗震不利的场地,在地震时可能会加剧原有的地表变形,甚至产生较大的震陷(魏晓刚等,2015a,b)。

中国的矿区煤田多处于抗震设防区域,而目前对于煤矿地下工程结构却没有相应的抗震设计规范,并且土木工程领域的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)也没有针对于地下巷道结构专门的条款。煤矿采空区的存在,对于地面建筑是一个极大的潜在威胁:由于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易出现裂缝和塌陷(吴启红,2010;刘刚,2011;唐礼忠等,2012)。为了最大限度地保证地震发生时煤矿巷道结构和地面建筑的安全性,有必要对煤矿采空区的地震安全性开展研究,为了保证地下采空巷道和地表建筑在地震作用下不被破坏,最大程度地保护人民的生命安全,有必要对地震波作用下煤矿采空区的安全问题进行研究。

1 煤矿采空区的形成及基本特点

20 世纪初期,由于矿山开采机械化程度较低,

主要依赖于人力开采矿山资源。人力开采初期由于挖掘强度低,所形成的采空区体积较小,采空区周围的围岩的稳定性保持较好,基本上不需要对采空区进行支护充填处理。随着科学技术的发展和成熟,矿山机械化程度越来越高,矿山开采工艺(空场法采矿、留矿法、崩落法等)也逐渐得到推广(何国清,杨伦,1994;余学义,张恩强,2004),大大提高了矿区矿山资源的开采能力。虽然高效成熟的开采工艺开采出了大量的矿山资源,获得了可观的经济效益,但是却为矿区留下了大量的安全隐患。

煤矿开采的过程中通常把矿山资源分为矿柱与矿房,随着采煤工作面的不断推进,会在一定的距离内设置一些矿柱(或者采用人工支柱)来作为巷道顶板的竖向传力途径。但是随着开采强度的增大和采煤工作面的持续推进,采空区(的体积)会越来越多(大)。开采后的矿区千疮百孔,犹如蜂窝一样。如果采空区足够多,发生连通现象则容易形成采空区群,此时采空区的稳定性非常差,容易发生各种矿山安全事故(表1)。

表1 煤矿采空区灾害来源及表现形式

Tab. 1 Sources and manifestations of disaster in mine goaf

灾害破坏效应	灾害来源	表现形式
直接破坏	顶板移动、破断、坍塌	冲击力
	顶板坍塌诱发飓风效应	风荷载的冲击波效应(冲击气浪)
	冲击地压、岩爆、机械冲击	矿山地震(矿震)
	地下水(地表水)涌进采空区	突水
	化学氧化反应	自燃(粉尘爆炸)
	外界气体涌入采空区	串风
	破碎的煤体与甲烷气体涌入采空区	煤与瓦斯突出
	采空区坚硬岩层应力集中爆发	冲击地压(岩爆)
间接破坏	采掘过程中的动力效应	其他动力扰动致灾现象
	采空区岩层坍塌、顶板破坏波及地表	地面沉陷坍塌
	采空区岩层坍塌、顶板破坏波及地表	滑坡

地下巷道结构周围的岩石属于脆性材料,其稳定性具有明显的突变性和时效性。地下岩石在外界扰动荷载(地震、矿震、机械扰动、地下水等)作用下,会发生崩解、粉碎等现象,导致煤矿采空区形状改变,并与临近的采空区相互贯通,

形成更大的采空区群。采空区群是由各种不同性质的采空所构成的复杂结构系统，其特点如下（何国清，杨伦，1994；余学义，张恩强，2004）：

（1）形状（态）各异：由于矿区岩体内部天然缺陷（裂隙、节理、断层、弱面）的存在，加之煤矿采空区所处的环境条件复杂，导致其自然形态各异。由于岩体大小不同，矿山资源开采后所形成的采空区的形态也各有不同；随着资源的不断采出，采空区的数量、面积和体积也随之增大，扩大了采空区（群）。采空区（群）的空间几何形状与矿山资源的分布情况密切相关，故其失稳灾变特点也是和采空区（群）的自身形状（态）密切相关的。

（2）空间结构复杂：采空区（群）如同蜂窝一样复杂，并且极其不规则。由于岩体结构存在几何缺陷，加之爆破开采、凿岩开采、机械开采等各种开采施工工艺的精度不高，岩体弱面大量存在于采空区的边界，各种不同功能的巷道结构呈现出不同的排列组合方式，由此导致采空区结构的复杂性加剧。

（3）动态演化：由于采空区的岩层失去支撑，加之岩层的流变特性以及采空区充填不及时，在外界各种扰动荷载（爆破荷载、机械施工荷载、地震、矿震）以及各种应力（构造应力、地应力）的影响下，采空区时刻与周围的围岩发生物理、化学、生物作用，导致采空区的空间结构和形态处于时刻变化之中，由此引起的失稳灾变也显得较为复杂。

2 煤矿采空区失稳破坏的基本模式

煤矿采空区顶板失稳破坏会严重影响煤矿采空区的稳定性与安全性，而煤矿采空区的失稳破坏与顶板的破坏模式密切相关，煤矿采空区的失稳本质上就是由顶板破坏引起的，不同的顶板破坏模式所引起的煤矿采空区失稳破坏形式不一样。从顶板破坏到煤矿采空区的失稳，最终会引起严重的矿山灾害，会造成巨大的经济损失，严重影响了矿山工程建设的安全持续进行。

顶板破坏模式（何国清，杨伦，1994；余学义，张恩强，2004）是指随着矿山资源的开采，

巷道上方的顶板成为悬挑结构，在上覆岩层的自重及其他次生灾害应力的多重作用下发生失稳破坏的方式。不同煤矿采空区的工程地质、水文地质条件不同，其失稳破坏模式也各不相同。分析总结煤矿采空区顶板破坏失稳现象，顶板的破坏模式主要可以分为：拱形冒落、离层垮冒、折断垮落、沿断层破碎带抽冒、楔形冒落、其它不规则方式的冒落（何国清，杨伦，1994；余学义，张恩强，2004）。

（1）拱形冒落：顶板产生拱形冒落破坏主要是因为顶板的岩体多为破碎状或者块状，其结构缺陷较大，内部节理发育明显，存在大量节理裂隙，严重降低了岩体的强度，削弱其承载能力；顶板岩体在自重作用下，会不断产生冒落现象并形成拱形。

（2）离层垮冒：当顶板为层状岩体（层状岩体属于强度低的岩石）且跨度较大时，顶板岩层多厚度低且质软。虽然层状岩体的单层连续性好，但是岩层之间结合力差，在岩层自重应力以及构造应力等外界力的作用下，顶板岩层会出现拉裂分层离析，顶板不同岩层（直接顶板与老顶）之间会分离，并产生弯曲变形破坏。一旦顶板弯曲变形产生的拉应力超过其极限抗拉强度时，岩体会被拉断破裂并向煤矿采空区方向垮冒，即发生了顶板的离层垮冒现象。

（3）折断垮落：如果顶板岩层的整体性较好、强度较低、中等厚度，有断层破碎带存在，且垂直于矿山资源，在进行煤炭开采时容易在断层破碎带发生抽冒现象，导致巷道顶板形成悬臂梁结构，在上覆岩层的重力作用下，悬臂梁结构形式的顶板容易在其垂直方向和水平方向上产生折断垮落破坏现象。

（4）沿断层破碎带抽冒：如果顶板结构存在倾角较大、厚度较厚的断层破碎带，则容易在顶板结构的断层破碎带处发生抽冒破坏现象。如果顶板厚度较小，且断层破碎带垂直矿体，当断层破碎带抽冒之后，顶板结构体系会出现折断垮冒破坏现象。

（5）楔形冒落：当顶板的岩体强度较低、厚度不大，且存在着与顶板夹角较小的多条断层破碎带时，由于顶板被断层切割成结构弱面，形成

了楔形体的结构。在岩体的重力作用下,顶板结构容易发生折断垮冒破坏现象。如果顶板中存在多个断层破碎带(或结构弱面),则容易形成多个棱柱(锥)形状的岩体,此时在自重荷载的作用下,棱柱(锥)形状的岩体容易发生冒落现象。

(6) 其它不规则方式的冒落:当顶板的厚度较小,不存在断层破碎带以及结构弱面时,或者顶板的岩体形状主要为块状、破碎状、层状(被黏结强度低的节理裂隙切割)时,顶板破坏容易出现不规则的破坏形式,此时顶板的破坏模式主要取决于局部岩体质量、物理力学特性以及岩体的裂隙分布情况。

3 煤矿采空区稳定的影响因素

煤矿采空区所造成的次生灾害主要体现在(何国清,杨伦,1994;余学义,张恩强,2004):①在煤炭开采的过程中,采场的围岩受到扰动荷载的作用后裂隙发育,容易形成贯通地表的裂缝,或者是与原有的老空区相连通形成通路,为矿区巷道的突水事故埋下了隐患,极易造成巨大的经济损失;②煤矿采空区遗留大量的矿柱,在发生蠕变变形、损伤破坏后,容易引起顶板冒落、岩层移动(图1),岩层的移动变形发展到地面则导致煤矿采空区地表开裂、沉陷和塌陷,影响矿区土地和建筑的正常使用。

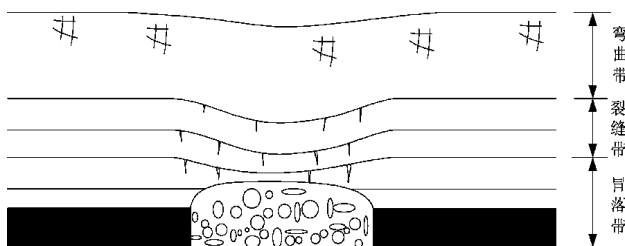


图1 煤矿开采形成的三带

Fig. 1 Three zones caused by mining subsidence

煤矿采空区的稳定性是一个涉及多载体、多影响因素耦合的复杂大尺寸空间的平衡问题,影响其稳定性因素主要有(何国清,杨伦,1994;余学义,张恩强,2004):结构体系因素、地质采矿因素和扰动荷载因素。

(1) 结构体系因素主要是指采空区自身结构

体系、上覆岩层的结构体系以及周围地质构造等诸多影响因素(何国清,杨伦,1994;余学义,张恩强,2004),主要涉及到:①采空区的形态(采空区空间形状、大小、高度、埋藏深度和顶板暴露面积)、煤层的物理性质(埋深、厚度、倾角等);②上覆岩层的物理力学性质(岩层的密度、泊松比、弹性模量、粘聚力、内摩擦角以及抗压、抗拉强度等)、厚度、赋存状态等;③采场场地的地形地貌、地质构造、水文地质等周围地质构造。

(2) 地质采矿因素(何国清,杨伦,1994;余学义,张恩强,2004)主要是指在煤矿开采过程中所涉及到的煤层开采方法、开采面积、开采次数、顶板管理方法以及采空区地层中的断层、褶皱和结构面等因素。

(3) 扰动荷载因素(何国清,杨伦,1994;余学义,张恩强,2004)则主要是指各种不可预测的影响采空区稳定性的动荷载(地震、岩爆、矿震、爆破、煤与瓦斯突出等冲击荷载、机械振动以及交通运输荷载引起的振动等),扰动荷载的大小、类型和位置对采空区稳定性影响极大。

煤矿采空区发生失稳灾变坍塌的影响因素较多,其失稳灾变机理以及影响因素目前尚不明晰。而目前对于煤矿采空区失稳现象多关注于由于静力荷载作用下(岩层自重)的采空区失稳现象,而对于扰动荷载因素影响下煤矿采空区的失稳演化则相对较少。笔者针对地震作用下煤矿采空区的动力失稳现象与建筑安全问题进行探讨,立足于煤矿采空区的4大特征(效应):大尺度特征(效应)、时间特征(效应)、动力特征(效应)和环境安全特征(效应),对煤矿采空区的稳定性进行了研究。

4 煤矿采空区地下岩体结构地震灾变的研究进展

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作用下的稳定性,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扰动荷载的稳定性具有较好的借鉴意义;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, 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, 利用莫尔—库仑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害的重要问题, 并根据国内外专家学者关于地下洞室

的地震动力灾害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害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 (吴启红, 2010; 刘刚, 2011; 唐礼忠等, 2012; 魏晓刚, 2015b; 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; 曹安业, 2009; 王国波等, 2014; 吕祥锋, 2014; 赵同彬等, 2014; 王书文等, 2012; 中国地震局工程力学研究所, 1978), 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和轻视的隐患。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 (胡聿贤, 2006)。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, 其动力灾害的孕育、演化过程及致灾机理尚不明晰, 无法采取切实有效的方法预测矿山动力灾害是重要的原因之一 (魏晓刚, 2015b)。

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; 加之中国矿区多采用机械化的采煤技术, 开采过程中容易引起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 (张晓明等, 2013; 崔臻等, 2012; 黄胜, 2010; 魏晓刚等, 2015a), 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 煤矿采空区地震安全防护所涉及的关键安全问题

煤矿采空区的岩体结构体系涉及煤柱、巷道结构、顶板、底板、围岩介质以及整体的岩体结构体系等(何国清, 杨伦, 1994; 余学义, 张恩强, 2004), 煤矿采空区与其他的地下岩体结构都面临着地震破坏的威胁(胡聿贤, 2006); 并且在煤层开采过程中不可避免的面临各种扰动荷载(岩爆、矿震、爆破、煤与瓦斯突出、地震、重载车辆等)的动力破坏效应, 但前期的矿山建设设计中较少考虑地震等各种动力灾害荷载对矿区地下工程结构的破坏影响(吴启红, 2010; 刘刚, 2011; 唐礼忠等, 2012; 魏晓刚, 2015b; 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; 曹安业, 2009; 王国波等, 2014; 吕祥锋, 2014; 赵同彬等, 2014; 王书文等, 2012; 中国地震局工程力学研究所, 1978)。基于此, 对矿区巷道围岩整体结构体系地震动力响应的研究, 需要重点对地震灾害荷载作用下煤矿采空区岩体结构的内力响应、应力场演化规律进行关注, 尤其是探讨地震灾害荷载对煤矿采空区岩体结构安全性能的影响, 是迫切需要开展的研究工作。目前煤矿采动裂隙岩体的地震动力灾变有以下几个问题需要解决:

(1) 高强度开采下岩体移动破断及地层塌陷灾变发生过程中的能量耗散迁移。从灾变演化过程入手, 研究煤炭开采扰动过程中采场岩层的能量转移、吸收与耗散机理和分布规律, 建立基于应力、位移和能量的控制指标的变位分配原理。针对分配指标, 建立多步骤、分阶段的控制理论, 区别性地优化和提高细部与整体的安全性, 达到量化安全控制的目的。从应力、位移、能量 3 个指标来分析高强度开采下岩体移动破断及地层塌陷的灾变机制, 建立煤矿采动覆岩移动变形破断的力学模型及能量方程, 推导煤矿采空区上覆岩层

破断坍塌的判据, 研究高强度开采过程中采场岩层的应力场分布、能量演化与移动变形的关系, 建立起合理的高强度开采下岩体移动破断及地层塌陷灾变演化中所涉及到的能量耗散迁移。

(2) 煤矿采空区固体密实充填材料介质的选择及其工作力学性能。煤矿采空区充填材料的选择, 需要考虑其来源、力学性能(尤其是充填碎矸体力学特性)、密实度、经济性、便捷性及环境污染, 同时也需要深入探讨充填介质材料、上覆岩层、煤柱以及支护结构体系的协同作用机理, 建立煤矿采空区充填复杂组合结构体系的数学几何关系、力学特性以及时空关系, 为研究考虑充填效应的煤矿采空区岩体结构体系(复杂支撑体系)的强度、刚度、变形特性及抗震性能提供参考和奠定理论基础。

(3) 地震灾害荷载作用下裂隙岩体的损伤破坏机制及能量运移(演化)规律。基于疲劳损伤试验测试、损伤识别方法和有限元数值计算试验, 初步探索裂隙几何特性(节理倾角、间距等)和地震荷载特性(振幅、持续时间、加载频率等)对裂隙岩体一般动力学性质及疲劳损伤性质的影响机制与变化规律。在此基础上, 深入研究动态循环荷载作用下裂隙岩体介质的应变率特性、疲劳损伤特性和它们之间的耦合特性, 揭示裂隙岩体地震往复荷载作用下的疲劳损伤规律与破坏机制; 考虑结构面、地应力等因素对煤矿采动裂隙岩体动力特性的影响, 建立裂隙岩体非线性动力特性及动强度参数的计算方法, 基于能量理论建立岩体非线性动态本构关系; 从应力调整→转移、能量聚集→传递→释放角度出发, 研究动力扰动荷载作用下不同结构的裂隙岩体应力转移和能量转化的过程中, 其围岩结构的演化(出现分区破裂化等现象)、灾害的孕育演化致灾的机制、特征和规律, 提出灾害孕育演化理论模型和灾害发生的应力、能量判据。

(4) 煤矿采动裂隙岩体的采动损伤及强震作用下震裂损伤的评估及测定。基于断裂力学、损伤力学、结构动力学、耗散结构与能量理论, 建立外力扰动灾变荷载(煤矿采动、地震)作用下岩体力学行为结构控制和应力控制转化的应力判据以及岩体结构与应力协同控制裂隙岩体行为的

准则,基于能量耗散理论搭建采动损伤及震裂损伤的桥梁;深入探讨开采扰动下(地震作用下)裂隙岩体结构围岩应力场的调整、转移机制;建立裂隙岩体结构灾变演化过程中的应力调整和转移的理论分析模型,提出合理的开挖强卸荷载影响下不同围岩介质的应力场演化(扰动、转移、传递和释放)过程分析方法。

建立地震作用下煤矿采空区失事概率演化模型,提出地震作用下煤矿采空区失事的动态风险评估方法,提出基于全生命周期性能演化的煤矿采空区岩体结构与场地设计、监测预警以及安全控制的理论与方法,完善全生命周期煤矿采动破坏岩体微破裂实时监测与评估技术。

(5) 考虑充填体的煤矿采动裂隙(破碎)岩体的耗能减隔震性能,防控煤矿采空区的动力失稳研究。建立地震作用下考虑扰动荷载效应的煤矿巷道结构的动力学方程及岩体内地震波传播的波动方程,探讨地震波作用于岩体时应力波性质的改变;重点分析地震波在考虑充填效应的煤矿采空区围岩介质与充填材料不同介质之间的传播衰减特性,深入探讨充填后煤矿采空区的地震动力稳定性的条件,以期得到煤矿采空区的地震动力稳定性的影响因素、地表动力响应以及煤矿采空区应力场演化特性。

参考文献:

- 曹安业. 2009. 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.
- 崔臻,盛谦,冷先伦等. 2012. 基于增量动力分析的大型地下洞室群性能化地震动力稳定性评估[J]. 岩石力学与工程学报,31(4): 703-712.
- 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.
- 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.
- 黄胜. 2010. 高烈度地震下隧道破坏机制及抗震研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所).
- 李连济. 2005. 中国煤炭城市采空塌陷灾害及防治对策研究[R]. 山西:山西省社会科学院.
- 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,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.
- 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).
- 吕祥锋. 2014. 考虑震源扰动作用的深埋隧洞开挖失稳研究[J]. 隧道建设,34(2):129-133.
- 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.
- 王国波,于艳丽,何卫. 2014. 下穿隧道-土-地表邻近框架结构相互作用体系地震响应初步分析[J]. 岩土工程学报,36(2):334-338.
- 王书文,毛德兵,杜涛涛等. 2012. 基于地震CT技术的冲击地压危险性评价模型[J]. 煤炭学报,37(S1):1-6.
- 魏晓刚,麻凤海,刘书贤. 2015a. 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[J]. 地震研究,38(3):495-507.
- 魏晓刚. 2015b. 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.
- 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.
- 余学义,张恩强. 2004. 开采损害学[M]. 北京:煤炭工业出版社.
- 张晓明,杨晓晨,卢刚等. 2013. 下伏采空区的煤矿地表地震动力响应模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),32(6):730-734.
- 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. 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.
- 赵同彬,张玉宝,谭云亮等. 2014. 考虑损伤效应深部锚固巷道蠕变破坏模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报,34(5):709-715.
- 中国地震局工程力学研究所. 1978. 唐山地震震害调查初步总结[M]. 北京:地震出版社.
- 中国企业报. 2012. 彝良地震之痛:夺命煤矿采空区[EB/OL]. (2012-09-18)[2015-11-16]. http://www.zqcn.com.cn/html/fuwu/shangyelunli_20121214_517215.html.
- GB50011—2010,建筑抗震设计规范[S].

Problems of Safety Control of Seismic Dynamic Disasters in Coal Mine Goaf

WEI Xiaogang^{1,2,3}, MA Fenghai⁴, LIU Shuxian⁵, DAI Junwu²

(1. *College of Civil Engineering and Architecture, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, Henan, China*)

(2. *Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

(3. *Cooperative Innovation Center for Aviation Economy Development of Henan Province, Zhengzhou 450046, Henan, China*)

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

(5. *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 rock mass structure in coal mine goaf, the secondary disasters caused by coal mining goaf field were delved into through the related research of the characteristics and the harm of the disaster in coal mine goaf, the formation, the basic characteristics, and the basic model of instability and failure of coal mine goaf respectively. Through analyzing related research results of seismic dynamic disaster of rock mass structure in coal mine goaf, we summarized the key problems of safety control of seismic dynamic disasters, and revealed technical problems of stability of the coal mine goaf field and safety control for underground rock mass structure, so it can provided the reference for engineering construction and safety protection in coal mining subsidence areas.

Key words: coal mine gob; earthquake disaster; rock mass structure; seismic load; mining subsidence; strata movement