

地震作用下煤矿开采损伤建筑的能量耗散 演化致灾分析*

刘书贤^{1,2}, 郭 涛^{1,3}, 魏晓刚², 张 弛^{2,4}, 麻凤海⁵

(1. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000;
3. 北京矿建建筑安装有限责任公司, 北京 102300; 4. 本溪钢铁集团建设有限责任公司, 辽宁 本溪 117000;
5. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要: 基于耗散结构理论, 从能量理论角度对煤矿开采区建筑物的动力破坏过程进行了系统的定量分析。提出了建筑物能量耗散的理论判据, 研究了地震作用下煤矿开采区建筑的损伤演化灾变过程。根据结构动力学理论, 建立了煤矿开采区建筑物在地震作用下的能量演化平衡方程, 定量分析了地震作用下煤矿开采区建筑物系统中耗散能量的变化过程。结果表明: 在开采沉陷和地震联合作用下, 建筑物与外界产生更多的有害的能量交换, 进而产生更多的塑性损伤变形, 结构阻尼耗能降低; 根据建筑物能量耗散演化趋势应建立合适的抗开采沉陷变形隔震保护新体系, 为我国矿区建筑物保护提供借鉴意义。

关键词: 耗散结构理论; 能量耗散; 开采沉陷; 地震作用; 损伤演化

中图分类号: TV435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)03-0442-08

0 引言

煤炭资源作为我国最主要的能源之一, 对我国的经济建设和国防建设都起到了巨大的推动作用。我国现有的煤炭资源开采率普遍偏低, 尤其是“三下”压煤储量高达 500 亿吨, 东部大部分煤炭矿区“三下”压煤量占可采储量的 50% 以上。随着对煤炭资源高强度、大面积的不断开采以及其储量的急剧减少, 我国许多矿区将不可避免的将一些人口和建筑相对密集的城市和村庄划入到开采范围内, 矿区出现开采沉陷变形的面积和变形程度越来越大, 对建筑物造成的损害也将日益严重(王金庄, 郭增长, 2002)。矿区建筑物不仅受到煤炭开采引起的开采沉陷的影响, 还要承受地震所产生的震害。近年来, 我国地震频发, 造成了严重的人员伤亡及经济损失。2008 年汶川地震造成 69 227 人遇难, 374 643 人受伤, 17 923 人失踪, 直接经济损失高达人民币 8 452 亿元。2013 年 4 月 20 日雅安地震, 截至 4 月 24 日, 造成 196 人死亡, 21 人失踪, 11 470 人受伤。由此可见,

研究煤矿开采区建筑在开采沉陷和地震联合作用下的破坏过程是十分必要的。

目前专家学者已经对煤矿开采区建筑物在开采沉陷和地震共同作用下的破坏及保护做了大量研究: 张春礼和于光明(2011)针对采动和地震对地表建筑物的危害性问题, 在现有研究的基础上, 利用有限元软件 ANSYS 建立了杆系高层钢筋混凝土框架结构模型, 并分别进行了采动作用分析、地震作用分析及采动—地震联合作用分析。刘书贤等(2010)运用有限元分析软件 ANSYS, 对煤矿开采区建筑物在开采沉陷变形和地震联合作用下的作用机理进行了系统分析, 把煤矿开采区建筑物开采沉陷的抗变形设计和抗震设计相结合, 提出了采动区建筑物抗震抗变形双重保护的具体措施, 发展和补充了煤矿开采区建筑结构抗震抗变形控制理论。

以上研究均是基于力学理论, 采用有限元方法进行分析, 缺乏对建筑物在开采沉陷作用和地震作用损伤的积累和连续性。近年来, 从能量角度去分析研究土木工程类问题引起了国内外专家学者的关注, 并取得了一定的成果。朱建华和沈

* 收稿日期: 2013-12-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474045, 51174038)、辽宁省教育厅科研项目(L2012111)、中国煤炭工业协会科学技术研究指导性计划项目(MTKJ2012-319)和辽宁工程技术大学市场调研信息立项基金(SCDY2012010)资助。

蒲生(2006)从能量角度对钢筋混凝土框架结构的倒塌作了分析,设计了4个不同层数的框架结构,将各框架结构等效成单自由度体系,运用能量法计算其滞回耗能,并考虑了多阶振型的影响,提出了根据推覆分析来近似求解框架结构梁柱构件的自身耗能能力,通过比较框架结构滞回耗能与自身耗能能力,评估其抗倒塌能力。缪志伟(2009)综合基于能量抗震设计方法和结构损伤控制设计思想,系统研究了基于能量抗震设计方法在RC框剪结构中的应用。

本文针对煤矿开采区建筑在开采沉陷和地震联合作用下建筑物损伤累积和连续性研究的不足,基于耗散结构理论,从能量理论角度对煤矿开采区建筑物的损伤演化致灾过程进行了分析研究。基于结构动力学的基本运动方程,笔者建立了建筑物系统在开采沉陷和地震作用联合下的能量演化方程,对煤矿开采区建筑物耗散结构进行系统分析。

1 开采区建筑物系统的耗散结构理论分析

耗散结构是在远离平衡状态,借助外界的能量流和物质流维持的一种空间和时间的有序结构(Nicolis, Prigogine, 1977)。耗散结构是在特定的外界条件下自发形成的有组织行为。耗散结构也可称为自组织。形成耗散结构需要满足以下条件:

- (1) 系统是远离平衡态的开放系统;
- (2) 临界条件;
- (3) 系统内部存在非线性的相互作用;
- (4) 涨落。

建筑物系统只要满足以上形成耗散结构的条件,就可以运用耗散结构理论对煤矿开采区建筑物在开采沉陷和地震联合作用下的致灾过程进行分析(图1)。

图1中曲线的变化表明煤炭开采区建筑物系统与周围环境存在物质及能量交换,属于开放系统,在外荷载作用下远离平衡状态。如图1中oa段所示,开采沉陷作用能量输入到建筑物系统中,主要以可释放应变能的形式储存在系统中,只有很小部分通过损伤耗能形式耗散。如ab段所示,地震作用能量输入到建筑物系统中,通过系统中局

部结构的非线性弹塑性变形及阻尼做功向外耗散能量,降低了构件的强度。如bc段所示,当局部系统中的积蓄的能量达到其临界值时,局部系统发生破坏,将积蓄的能量释放出来,建筑物系统进入到新的远离平衡状态,直到建筑物系统整体失稳,发生涨落,进入到新的状态(建筑物倒塌),如c点后曲线所示。

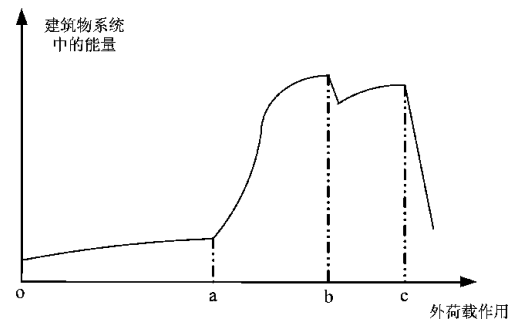


图1 建筑物系统耗散结构机理分析

Fig. 1 The theory analysis of dissipative structure of building system

2 开采区建筑物能量演化的理论分析

2.1 煤矿开采区建筑物系统能量方程

根据结构动力学理论(克拉夫,彭津,2006),多自由度结构体系的动力平衡方程如下:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [f_s(u, \dot{u})] = p. \quad (1)$$

式中, $[M]$ 是质量矩阵; $[C]$ 是阻尼矩阵; $[f_s(\dot{u}, u)]$ 是弹塑性体系的抗力矩阵, $[f_s(\dot{u}, u)] = [K]'\{u\}$, 其中 $[K]'$ 为非线性刚度矩阵, $\{u\}$ 为位移列向量; $\{\ddot{u}\}$ 为加速度列向量; \dot{u} 为速度列向量; p 为外部荷载的合力。

式(1)两边同时对位移进行积分,根据Bhattacharjee和Leger(1993)的推导变换,得到基于能量的平衡方程如下:

$$\begin{aligned} & \int m\ddot{u}du + \int \dot{u}Cdu + \int [f_s(\dot{u}, u)]du \\ & = \int \ddot{u}_t M du_g + \int p du. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $E_t = \int \ddot{u}_t M du_g$, 为地震作用输入建筑物系统

的能量; $E_U = \int p du$, 为开采沉陷作用输入建筑物系统的能量; $E_K = \int \dot{M} u du$, 为建筑物系统的动能; $E_C = \int \dot{u} C du$, 为建筑物系统的阻尼耗能; $E_S = \int [f_s(\dot{u}, u)] du$, 为建筑物系统的弹塑性体系抗力做功。

建筑物系统的弹塑性体系抗力做功主要包括可恢复应变能、损伤耗能、塑性耗能 (Anil, Chopra, 2005), 可表示为

$$\begin{aligned} E_S &= \int_0^T \int_V \sigma^r \varepsilon^d dV dt \\ &= \int_0^T \int_V \sigma^r \varepsilon^{el} dV dt + \int_0^T \int_V \sigma^r \varepsilon^{pl} dV dt \\ &= \int_0^T \int_V \frac{1-d_T}{1-d} \sigma^r \varepsilon^{el} dV dt + \int_0^T \int_V \frac{d_T-d}{1-d} \sigma^r \varepsilon^{el} dV dt \\ &\quad + \int_0^T \int_V \sigma^r \varepsilon^{pl} dV dt. \end{aligned} \quad (3)$$

式中, d_T 为 T 时刻的损伤值; σ^r 为弹塑性体系的恢复应力; ε 为应变变量, 包括弹性应变变量 ε^{el} 和塑性应变变量 ε^{pl} 。

式 (3) 可表示为

$$E_S = E_E + E_D + E_P. \quad (4)$$

式中, $E_E = \int_0^T \int_V \frac{1-d_T}{1-d} \sigma^r \varepsilon^{el} dV dt$ 为可恢复应变能, $E_D = \int_0^T \int_V \frac{d_T-d}{1-d} \sigma^r \varepsilon^{el} dV dt$ 为损伤耗能, $E_P = \int_0^T \int_V \sigma^r \varepsilon^{pl} dV dt$ 为塑性耗能。

综合以上理论公式, 结合耗散结构理论建筑物系统的能量方程可表示为

$$E_F + E_H = E_W. \quad (5)$$

式中, $E_F = E_E + E_K$ 为建筑物系统的储存可释放能量; $E_H = E_D + E_P + E_C$ 为建筑物系统的耗散能量; $E_W = E_I + E_U$ 为建筑物系统的输入能量。

2.2 混凝土本构方程及损伤方程

混凝土的应力应变关系可以分为拉伸、压缩两个单轴应力应变关系, 其计算方程如下:

(1) 拉伸情况下

$$\begin{cases} y = 1.2x - 0.2x^6 & (x \leq 1), \\ y = \frac{1}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} & (x > 1). \end{cases} \quad (6)$$

式中, $y = \sigma/f_t$, $x = \varepsilon/\varepsilon_t$ (f_t 为混凝土单轴抗拉强度, ε_t 为与 f_t 对应的峰值拉应变), α_t 为混凝土拉伸应力—应变曲线的参数值, 其计算可在《混凝土结构设计规范》中查找。

(2) 压缩情况下

$$\begin{cases} y = \alpha_a + (3-2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a-2)x^3 & (x \leq 1), \\ y = \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2} + x & (x > 1). \end{cases} \quad (7)$$

式中, $y = \sigma/f_c$, $x = \varepsilon/\varepsilon_c$ (f_c 为混凝土单轴抗压强度, ε_c 为与 f_c 对应的峰值压应变), α_a 和 α_d 为混凝土压缩应力—应变曲线的参数值, 其计算可在《混凝土结构设计规范》中查找。

混凝土在外荷载作用下从初始无损伤状态到完全破坏, 其损伤演化过程可以用损伤因子来表示, 混凝土的损伤因子 d ($0 \leq d \leq 1$) 计算如下:

(1) 拉伸情况下

$$\begin{cases} d = 1 - \sqrt{k_t(1.2 - 0.2x^5)} & (x \leq 1), \\ d = 1 - \sqrt{\frac{k_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}} & (x > 1). \end{cases} \quad (8)$$

式中, $k_t = f_t/(\varepsilon_t E_0)$ (E_0 为 $0.4f_c$ 时的割线模量), 具体计算取值参见《混凝土结构设计规范》。

(2) 压缩情况下

$$\begin{cases} d = 1 - \sqrt{k_c[\alpha_a + (3-2\alpha_a)x + (\alpha_a-2)x^2]} & (x \leq 1), \\ d = 1 - \sqrt{\frac{k_c}{\alpha_d(x-1)^2 + x}} & (x > 1). \end{cases} \quad (9)$$

式中, $k_c = f_c/(\varepsilon_c E_0)$, 具体计算取值参见《混凝土结构设计规范》(2010)。

3 地震作用下煤矿开采区建筑物损伤演化致灾的能量分析

3.1 有限元分析模型

中国东北某矿区地质条件良好, 主要有黏土、煤层和岩层组成, 岩层基本以粗砂岩、细砂岩、砂

砾岩为主，该矿区（该矿区抗震设防烈度为Ⅶ度）有现浇钢筋混凝土框架结构办公楼（图2），底层层高为3.6 m，其余4层层高为3 m，纵向3跨，跨度为4.2 m，横向2跨，跨度为6 m，该建筑物总高度为15.6 m，总宽度为12 m，总长度为12.6 m，柱子截面尺寸均为600 mm×600 mm，梁截面均为300 mm×600 mm，楼板厚度为120 mm，梁柱均采用C30混凝土，弹性模量 $E=30\text{ GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.2$ ，密度为 $2\,400\text{ kg/m}^3$ ，其拉伸、压缩应力应变关系及损伤因子与塑性应变关系如图3所示。

该矿区由于地下煤炭开采致使地表发生移动和变形，根据现场沉陷监测站的实际监测数据，由于采煤沉陷导致办公楼产生了5 mm/m的倾斜（图4）。

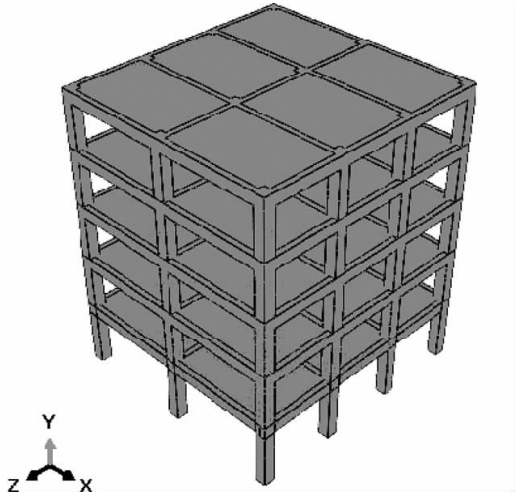


图2 办公楼有限元模型

Fig. 2 The finite element model of the office building

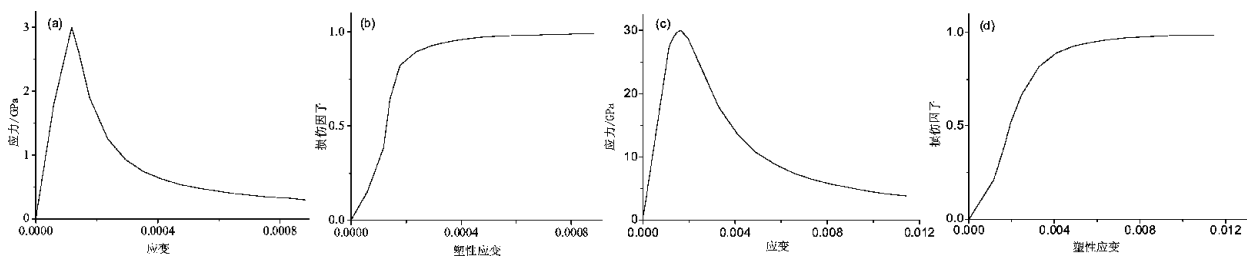


图3 混凝土应力—应变曲线及损伤演化曲线

(a) 拉伸应力—应变曲线；(b) 拉伸损伤演化曲线；(c) 压缩应力—应变曲线；(d) 压缩损伤演化曲线

Fig. 3 The stress-strain and damage evolution curves of concrete

(a) tensile stress-strain curve; (b) tensile damage evolution; (c) compressive stress-strain curve; (d) compressive damage evolution

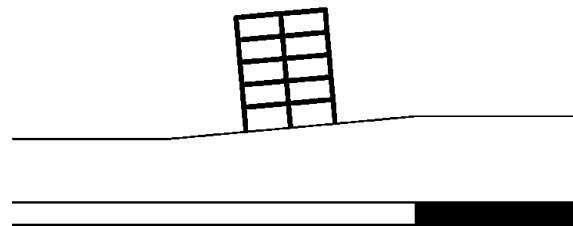


图4 煤矿开采沉陷影响

Fig. 4 The influence of coal mining subsidence

根据《建筑抗震设计规范》（2010），要求选取地震波要满足峰值、频谱特性、地震持时，结合该办公楼所处区域条件及结构的自振周期，为了能够分析建筑物在开采沉陷与地震联合作用下的耗散能量的变化过程，需要选取较长时间的强烈地震波。本文选用了30 s的Kobe地震波，其地震震级为7.2级，方向为南北向，最大加速度为0.83 g，如图5所示。

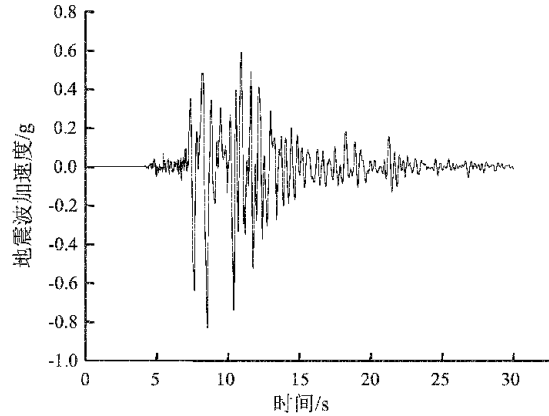


图5 Kobe地震波（南北向）

Fig. 5 Kobe earthquake waves

3.2 数值模拟结果分析

由于煤层采空后，煤矿开采区上覆岩层在重力作用下发生破坏，致使地表发生位移和沉降，

使建筑物基础发生移动或不均匀沉降,建筑物结构局部产生附加应力,当附加应力超过结构承载力时,结构发生破坏,刚度下降。受到开采沉陷与未受到开采沉陷作用的建筑物,在受到地震作用时,其动力响应和破坏程度有很大不同(刘书贤等,2013)。从能量角度来分析,输入了开采沉陷能量和未输入开采沉陷能量的建筑物系统,在输入地震作用能量时,其系统中不同形式耗散能量的变化有很大的不同。

分析不同工况下建筑物系统中的损伤耗散能量可知(图6a):在仅发生地震作用时,建筑物系统中产生的损伤耗散能量呈现出“缓慢变化—急剧增加—缓慢变化”的三阶段变化趋势。说明第一阶段输入建筑物系统的能量较小,未达到产生结构损伤的能量阈值,能量主要以可释放储存能的形式储存在建筑物系统中,较少能量以阻尼耗散能量的形式耗散出建筑物系统;第二阶段地震加速度突然加大,地震作用输入能量突然加大,系统中能量达到结构产生损伤的能量阈值极限,产生大量损伤耗散能,此时结构的刚度和强度严

重劣化,与外界交换能量较多;第三阶段地震加速度减小,但是建筑物结构的强度、刚度严重下降,结构产生损伤的能量阈值也降低,在地震作用下仍产生大量损伤耗散能。

在开采沉陷和地震联合作用下,建筑物系统中产生损伤耗散能量,在2 s前趋于0,在2 s后开始较快增加,在7 s后急剧增加,在8 s后缓慢增加,呈现出“缓慢变化—急剧增加—缓慢增加”的三阶段变化趋势,煤矿开采沉陷和地震联合作用下,建筑物能量耗散演化与地震单独作用不同的原因是:煤矿开采沉陷是长期缓慢的损害,对建筑物产生的损伤不可忽视;输入建筑物系统中的开采沉陷作用能量无法以阻尼耗能的形式与外界进行交换,系统中能量值更加接近建筑物结构损伤能量阈值。

在地震加速度刚开急剧变大时,系统中的损伤耗散能急剧增加,比仅在地震作用下提前了3 s多,说明在开采沉陷和地震联合作用下,建筑物系统产生损伤耗散能量的阈值比仅有地震作用下下降的快;在建筑物系统中损伤耗散能量急剧增加

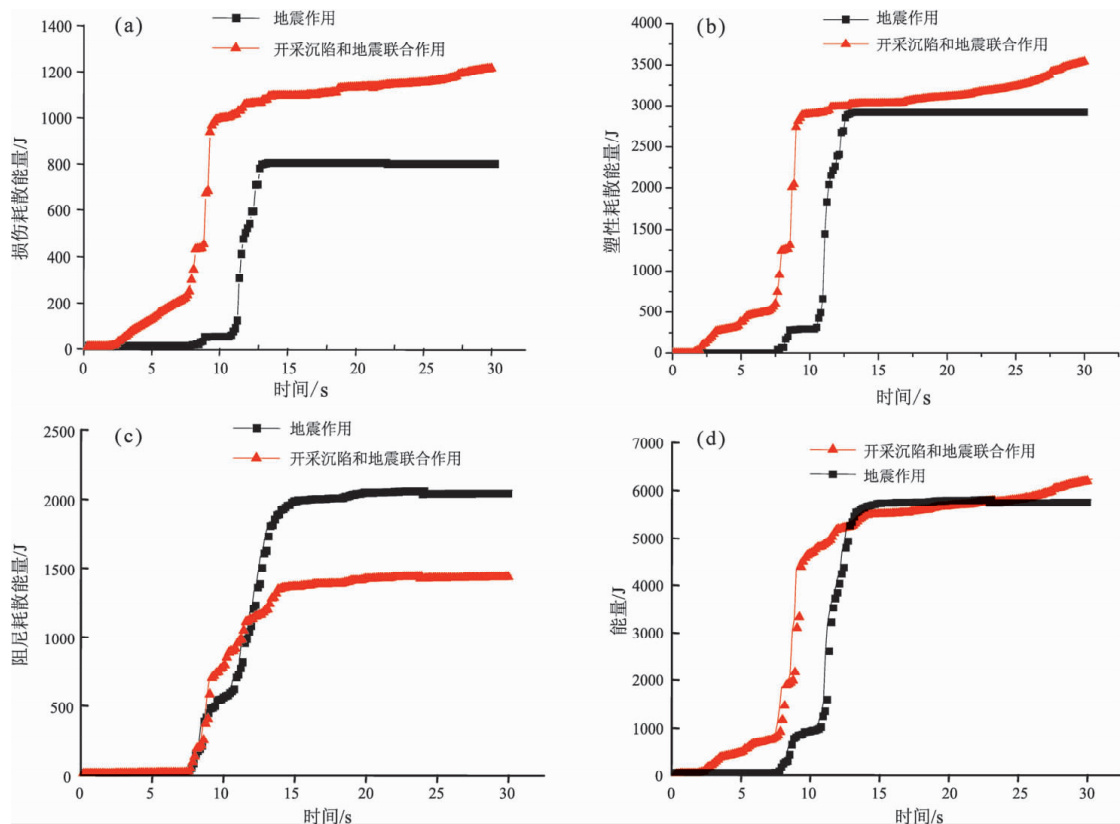


图6 不同工况下建筑物系统中的损伤耗散能量(a)、塑性耗散能量(b)、阻尼耗散能量(c)和耗散能量(d)

Fig. 6 The damage dissipative energy (a), the plastic dissipative energy (b), the damping dissipative energy (c) and the dissipative energy (d) of the building system on different working conditions

后，在开采沉陷和地震联合作用下其损伤耗散能量还在缓慢增加，说明建筑物在开采沉陷和地震联合作用下产生损伤耗散能量的阈值比仅在地震作用下低。

分析不同工况下建筑物系统中的塑性耗散能量可知（图 6b）：在开采沉陷和地震联合作用下比仅在地震作用下，建筑物系统的塑性耗散能量增加急剧，说明建筑物系统在开采沉陷作用下，系统中能量更接近产生塑性耗散能量的阈值，且阈值降低速度比仅在地震作用下要快；建筑物系统在开采沉陷和地震联合作用下累积产生的塑性耗散能量比仅在地震作用下多 26.5%，说明在开采沉陷和地震联合作用下建筑物产生不可恢复的塑性变形比仅在地震作用下多，此时结构体系的强度和刚度劣化更加严重。

分析不同工况下建筑物系统中的阻尼耗散能量可知（图 6c）：建筑物系统产生的阻尼耗散能

量在开采沉陷和地震联合作用下，比仅在地震作用下少了 29.6%。结合建筑物系统中损伤耗散能和塑性耗散能分析，说明建筑物塑性变形在开采沉陷和地震联合作用下比仅在地震作用下增加，并且随着塑性变形的增加，产生的阻尼耗散能量减小，严重劣化了建筑物的抗震性能。

分析不同工况下建筑物系统中的耗散能量可知（图 6d）：建筑物系统产生的耗散能量在煤矿开采沉陷和地震联合作用下，比仅在地震作用下多 13.5%，说明在煤矿开采沉陷作用下，建筑物系统与外界交换的能量增多，更容易发生涨落，进入到新的状态（建筑物破坏倒塌）。

分析不同工况下建筑物系统中产生的耗散能量及不同形式耗散能量比例图可知（图 7、8）：在煤矿开采沉陷作用的影响下，建筑物在地震作用下产生的阻尼耗散能量占总的耗散能量比例由 35.29% 降低到 22.89%，损伤耗散能量占总耗散

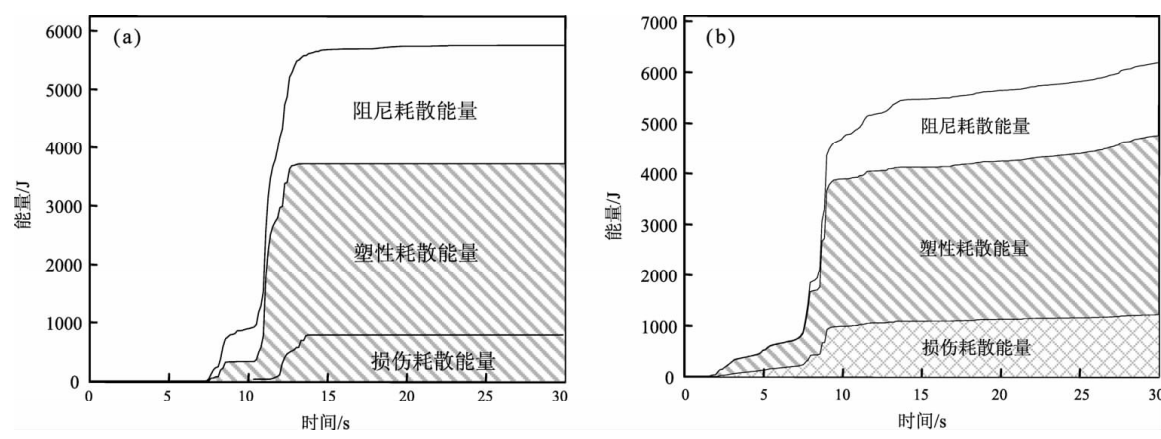


图 7 建筑物在不同工况下的耗散能量
(a) 在地震作用下；(b) 在开采沉陷和地震联合作用下
Fig. 7 The dissipative energy of the building on different working conditions
(a) under the effect of earthquake；(b) under the couple effect of mining subsidence and earthquake

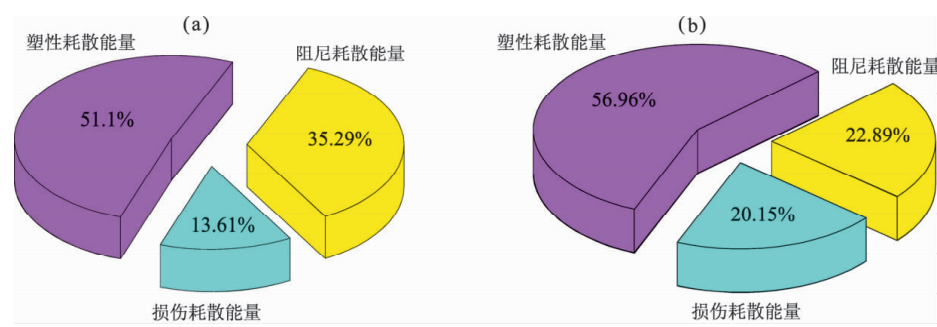


图 8 建筑物在不同工况下耗散能量比例图
(a) 在地震作用下；(b) 在开采沉陷和地震联合作用下
Fig. 8 The proportional graphs of the building on different working conditions
(b) under the effect of earthquake；(b) under the couple effect of mining subsidence and earthquake

能量的比例由 13.61% 增长到 20.15%，塑性耗散能量占总耗散能量的比例由 51.1% 增长到 56.96%。建筑物系统中产生损伤和塑性耗散能量是由于建筑物中发生损伤和塑性变形，导致建筑物的强度和刚度的退化，并且随着塑性变形的增加，产生的阻尼耗散能量减少。建筑物受煤矿开采沉陷影响下，在地震作用下，不同形式耗散能量比例的变化，说明了煤矿开采沉陷严重劣化了建筑物的抗震性能。

4 结论

本文从能量角度出发，基于耗散结构理论，系统分析研究煤矿开采损伤建筑物在地震作用下的破坏过程，利用有限元计算软件 ABAQUS 建立了煤炭开采区建筑物在开采沉陷和地震联合作用下的计算模型，计算出建筑物系统中的损伤耗散能量、塑性耗散能量、阻尼耗散能量，分析得到如下结论：

(1) 建筑物系统在开采沉陷和地震联合作用下，比仅在地震作用下，提前 5 s 产生损伤和塑性耗散能量，且提前 4 s 急剧增加，说明发生地震时，建筑物在开采沉陷影响下，更容易产生塑性变形及损伤，且建筑物强度、刚度退化更快。

(2) 建筑物系统在开采沉陷作用下，发生地震时，随着塑性变形的增加，产生的阻尼耗散能量降低了 29.6%，严重降低了建筑物的抗震性能。

(3) 建筑系统在煤矿开采沉陷影响下，发生

地震时，耗散能量增大 13.5%，耗散能量中损伤耗散能量、塑性耗散能量比例增加，阻尼耗散能量的比例减小，说明开采沉陷作用严重劣化了建筑物的抗震性能，建筑物容易发生破坏倒塌，应该针对煤矿开采沉陷对建筑物抗震性能的劣化开展研究，建立合适的抗开采沉陷变形隔震保护新体系，保护煤矿开采区建筑物。

参考文献：

- 克拉夫 R., 彭津 J. . 2006. 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 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, S1: 305-308.
- 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.
- 缪志伟. 2009. 钢筋混凝土框架剪力墙结构基于能量抗震设计方法研究[D]. 北京: 清华大学.
- 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): 28-31.
- 张春礼, 于光明. 2011. 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.
- 朱建华, 沈蒲生. 2006. 基于能量原理的钢筋混凝土框架结构倒塌分析[J]. 科学技术与工程, 8(6): 1146-1149.
- Anil K., Chopra. 2005. 结构动力学理论及其在地震工程中的应用[D]. 北京: 高等教育出版社.
- Bhattacharjee S. S., Leger P. 1993. Seismic Cracking and Energy Dissipation in Concrete Gravity Dams[J]. Earth quake Engineering and Structural Dynamics, 22(11): 991-1007.
- Nicolis G., Prigogine I. 1977. Self Organization and Nonequilibrium Systems[M]. New York: John Wiley & Sons. 24.
- GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S].

Hazard Evolution Analysis of Energy Dissipation of Buildings in the Coal Mining Areas under Earthquake

LIU Shu-xian^{1,2}, GUO Tao^{1,3}, WEI Xiao-gang², ZHANG Chi^{2,4}, MA Feng-hai⁵

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

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

(3. Beijing Kuangjian Construction & Installation Co., Ltd, Beijing 102310, China)

(4. Benxi Iron and Steel Group Construction Co., LTD, Benxi 117000, Liaoning, China)

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

Abstract

Based on the dissipative structure theory, we quantificationally analyze the dynamic failure process of the building in coal-mining areas by energy theory. The energy dissipation theory criterion of buildings is proposed, and the damage evolution process of building in coal-mining areas caused by earthquake is studied. According to the theory of structural dynamics, the energy evolution balance equation of the buildings in coal-mining areas under the effect of earthquake is established, and the changing process of energy dissipation in building system which caused by the coupling effect of earthquake in coal mine exploration area is quantificationally analyzed. It's shown that the buildings produce more harmful energy exchange with the outside environment under the couple effect of mining subsidence and earthquakes, and produce more plastic damage deformation, at the same time, the structural damping reduce. According to the evolution trend of energy dissipation, a new isolation protection system to keep buildings from the subsidence deformation should be established, and it could provide the reference for protecting the buildings in mining areas in China.

Key words: theory of dissipative structure; energy dissipation; mining subsidence; under the earthquake; damage evolution