

煤矿巷道及围岩结构地震动力稳定性的影响因素研究*

魏晓刚^{1,2}, 杨柳川^{1,3}, 刘会丽^{1,3}, 魏亚强⁴, 黄道顺⁵, 李广慧^{1♣}, 呼志凯⁶, 秦 赛⁶, 高 赫⁷

(1. 郑州航空工业管理学院 土木建筑学院, 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. 郑州意合达建筑科技研究院, 河南 郑州 450046;
4. 黄河交通学院 交通工程学院, 河南 焦作 454002; 5. 中和刚大工程顾问有限公司, 河南 郑州 450046;
6. 科兴建工集团有限公司, 河南 郑州 450046; 7. 河南省大河基础建设工程有限公司, 河南 郑州 450046)

摘要: 为深入研究地震动力荷载作用下煤矿巷道与围岩结构破坏坍塌机理, 得到煤矿巷道与围岩结构的失稳破坏机制, 基于有限元数值软件 ANSYS/LS-DYNA 分析了 El Centro 地震波作用下煤矿巷道与围岩结构的失稳演化过程, 重点探讨了截面形式、地层地应力及埋置深度等因素对煤矿巷道及围岩结构动力响应的影响, 研究发现: 圆形截面形成煤矿巷道的抗震性能相对较好, 明显强于拱形及矩形截面形成的巷道; 埋置深度越深, 煤矿巷道及围岩结构协同变形能力越差、越易发生动力失稳现象; 随着深度的增加, 截面形式对煤矿巷道及围岩结构动力稳定性的影响逐渐弱化。煤矿巷道的顶板、帮部及腰部等围岩位置属于薄弱部位, 易发生拉裂破坏现象, 应采取合理有效的锚固防护措施来保证煤矿巷道及围岩结构的动力稳定性。

关键词: 动力失稳; 围岩介质; 地震动; 煤矿巷道; 数值模拟

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2021)02-0233-09

0 引言

由于地下煤炭的掠夺式开采, 我国矿山城市产生了大量的遗留煤矿空洞区, 严重限制了矿山城市的绿色可持续发展。我国近 80% 的矿山城市位于 7 度抗震设防烈度区 (何满潮, 钱七虎, 2010; 魏晓刚等, 2016), 但现行的建筑抗震设计规范能否直接用于煤矿地下巷道结构尚不得而知。如何保证煤矿巷道结构及上覆围岩的地震冲击动力稳定性, 是实现矿山安全城市建设不可回避的重要问题 (何满潮, 钱七虎, 2010; 魏晓刚等, 2016)。

国内专家学者对动力荷载作用下煤矿巷道及围岩结构的动力稳定性已经开展了一定的研究工作 (何满潮, 钱七虎, 2010; 魏晓刚等, 2015a, b, 2016; 李夕兵等, 2007; 朱万成等, 2007)。

李夕兵等 (2007) 基于有限元差分计算程序研究了动力扰动作用下高应力圆形煤柱的响应规律及特征, 得到了外界扰动荷载对煤柱的动力破坏效应与初始静载应力密切相关的结论; 朱万成等 (2007) 研究得出煤矿巷道的动力稳定性与动力扰动作用所产生的应力波幅值和作用时间成正比; 姜耀东等 (2005) 研究认为在爆破地震波的作用下煤矿巷道围岩产生了裂纹并导致岩层与巷道顶板、底板发生了滑动破坏现象; 魏晓刚等 (2015b) 系统梳理了国内外煤矿采场岩体与巷道结构地震动力响应的研究现状及发展趋势, 指出煤矿巷道结构与周围岩层介质的地震动力稳定性问题是矿区城市迫切需要解决的安全问题。

目前, 煤矿巷道及围岩结构的协同变形动力破坏规律及失稳机理缺乏系统性、完整性的理论支撑 (叶洲元, 周志华, 2005; 魏晓刚等, 2015b, c; 邵

* 收稿日期: 2020-09-24.

基金项目: 国家自然科学基金 (51474045, 41902266), 中原千人计划科技创新领军人才项目 (194200510015), 河南省科技攻关项目 (192102310465、202102310240、212102310275、202102310572、212102310967、212102310968), 河南省高等学校重点科研项目 (19A560023) 和河南省住房城乡建设科技计划项目 (HNJS-2020-K38, K-1915) 联合资助。

第一作者简介: 魏晓刚 (1984-), 副教授, 研究生导师, 博士, 主要从事岩土地震工程、岩层移动与控制等方面的研究。
E-mail: zxmwxg@163.com.

♣通讯作者简介: 李广慧 (1970-), 二级教授, 研究生导师, 博士, 主要从事工程结构抗震与防災的研究。
E-mail: zzulgh@163.com.

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\partial' u_x}{\partial x} = \varepsilon_0 + \frac{\partial f(x - c_0 t)}{\partial x} + \frac{\partial g(x + c_0 t)}{\partial x} \\ \sigma = E\varepsilon = E\varepsilon_0 + E \frac{\partial' u_x}{\partial x} = E\varepsilon_0 + E \frac{\partial f(x - c_0 t)}{\partial x} + E \frac{\partial g(x + c_0 t)}{\partial x} \\ x' = \frac{-\partial' u_x}{\partial t} = -\left(c_0 \frac{\partial f(x - c_0 t)}{\partial x} + c_0 \frac{\partial g(x + c_0 t)}{\partial x}\right) \end{cases} \quad (4)$$

通过求解式（4），其数值计算解即为动力荷载作用下煤矿巷道及围岩结构的应变能：

$$U = \int_0^A \int_0^{\varepsilon_t} \sigma d\varepsilon dA \quad (5)$$

基于式（4），通过求解得到应力波作用下岩体结构内部的应力 σ 、应变 ε 、位移 x 的数值解，可以较好地判断煤矿巷道及围岩结构的动力稳定性。

由于煤矿巷道的埋置深度较深，在地应力的作用下煤矿巷道及围岩结构所承受的矿山岩层压力加大，在外界动力荷载的扰动下，即使是较小的扰动荷载，围岩介质所承受的应力容易超过自身的屈服应力，进入塑性损伤状态，此时围岩发生动力失稳破坏的可能性较大。

2 煤矿巷道及上覆围岩介质结构协同变形的数值计算模型

2.1 工程概况

某矿区采场由砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩、泥岩和煤层等岩层组成，各岩层的基本物理力学性能的具体参数见表1。在有限元数值模型中，所建立的坐标系如图2所示。

表1 材料的物理力学参数

Tab. 1 The physical and mechanical parameters of materials

岩层分布	力学指标				
	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松 比	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	粘聚力/ MPa
砂质泥岩	2 200	5.2	0.26	29.5	1.7
泥岩	2200	4.0	0.28	27.0	1.2
煤层	1 400	1.01	0.32	23.0	0.8
粉砂岩	2 800	26	0.22	32.1	34.7
细砂岩	2 700	21	0.20	27.8	27.2
C50 混凝土(衬砌)	2 493	34.5	0.26	—	—

根据煤矿采场区域情况以及有限元数值计算的需要，本文定义数值计算模型的基本尺寸为 $X \times Y \times Z = 660 \text{ m} \times 610 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 。为了研究动力荷载作用下煤矿巷道及上覆围岩介质结构的协同变形失稳过程，所输入的水平剪切波为由基岩输入的地震波。为了保证有限元数值计算模型尽可能符合实际情况，把煤矿巷道及采场围岩的边界设置为无反射的人工粘弹性边界，以 COMBINE14 弹簧阻尼单元实现。煤矿巷道 300 mm 厚度的衬砌结构采用 C50 混凝土，半径为 4 m，密度为 $2\,493 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，弹性模量 $E = 34.5 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.26$ 。

煤矿巷道上覆围岩介质及衬砌结构以单元 Solid64 进行模拟，采用整体式模型来建立整体数值计算模型，采用配筋率的模式模拟钢筋混凝土材料的力学性能。

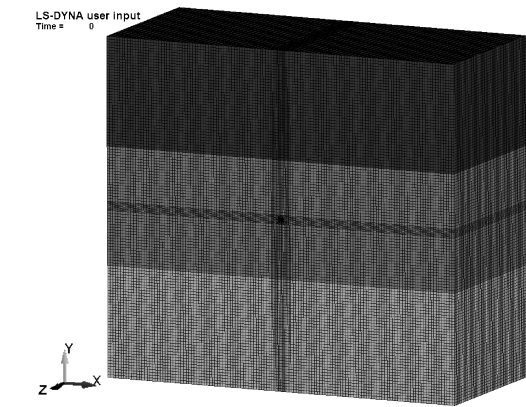


图2 煤矿巷道及围岩结构有限元模型
Fig. 2 Finite element model of the coal mine roadway and the surrounding rock structure

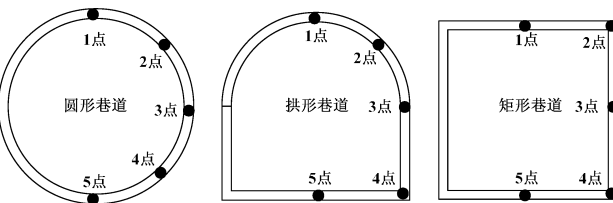


图3 煤矿巷道的监测位置
Fig. 3 Monitoring points of the coal mine roadway

为了研究不同因素对煤矿巷道动力稳定性的影响和截面形式对巷道不同位置的地震动力稳定性的影响,笔者分别在不同截面形式的煤矿巷道的相似位置选取 5 个监测点(图 3),以便深入分析研究和对比煤矿巷道不同位置的抗震性能。

2.2 地震波的选取

由《建筑结构抗震设计规范》(GB50011—2010)、《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB50909—2014)、《地下结构抗震设计标准》(GB/T51336—2018)可知,在对工程结构进行抗震性能分析时,应遵循以下原则选取地震波:①地震波的持续时间应包含地震波振动最强烈的部分;②地震波的持续时间一般为工程结构基本自振周期的 5~10 倍;③持续时间的选择,根据是否进行弹塑性分析而确定。

根据所建立的煤矿巷道结构的自振周期以及规范的要求,本文选取 20 s 的 El Centro 地震波,最大加速度为 150 cm/s^2 ,其加速度时程曲线如图 4 所示。地震波的输入方式采用由基岩输入的水平向地震动形式。

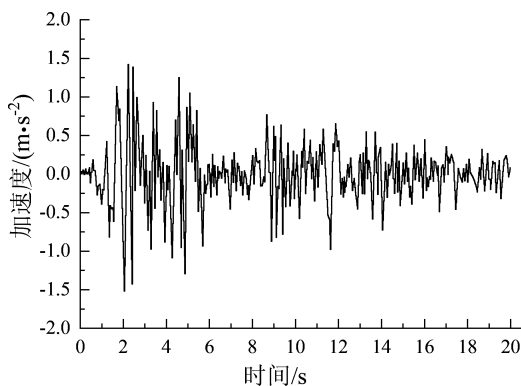


图 4 El Centro 地震波加速度时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of the seismic acceleration of El Centro wave

3 煤矿巷道及围岩结构的地震动力响应分析

3.1 截面形式对煤矿巷道及围岩结构地震动力响应的影响

截面形式对煤矿巷道及围岩结构地震动力响应的影响不容忽视,通过监测巷道不同截面、不

同位置的内力分布及位移变形,可以较好地衡量煤矿巷道的力学性能及其稳定性。图 5 为不同截面形式的煤矿巷道的第一主应力 S_1 及平面剪应力 S_{xy} 分布。

由图 5a 可以看出:矩形截面形式的煤矿巷道的峰值第一主应力 S_1 的高应力集中现象主要出现在煤矿巷道的帮部,且峰值应力明显高于其他截面形式煤矿巷道。矩形煤矿巷道高应力集中区域应力集聚明显、波动剧烈(橙色、黄色交界区域集中);拱形煤矿巷道高应力集中分布区域相对弱化;圆形煤矿巷道的最小。以上现象说明截面形式对煤矿巷道抗震性能的影响不容忽视:矩形截面形式煤矿巷道抗震性能相对较差,高应力集中区域应力波动现象明显,说明在高应力集中区域容易发生岩层动力失稳现象;圆形截面形式煤矿巷道的抗震性能相对较为理想。

由图 5b 可以看出:与第一主应力的峰值应力分布明显不同,矩形截面形式煤矿巷道的平面剪应力 S_{xy} 峰值应力的分布明显不同,矩形截面形式煤矿巷道的高应力集中现象大面积出现在煤矿巷道的顶板、底板、帮部等位置,在圆形及拱形形式截面煤矿巷道也多处出现;矩形巷道的高应力集中区域面积较大,拱形巷道次之,圆形巷道最小,且高应力集中区域与普通应力集中区域交替出现,所以矩形截面形式煤矿巷道的抗震性能相对较差,圆形截面形式煤矿巷道抗震性能相对较好。由于岩石是典型的抗拉抗剪性能较弱的脆性材料,所以煤矿巷道的顶板、底板及帮部属于重点防护位置,应采取合理的防护加固措施来保证煤矿巷道的地震动力稳定性。

通过分析地震作用下不同截面形式煤矿巷道不同位置的 X 向峰值位移(图 6)可知:不同截面形式下煤矿巷道结构整体峰值位移响应差异不大,主要与其具体位置密切相关。峰值位移在煤矿巷道顶板最大,从该位置开始,沿着顺时针方向逐渐减小。在顶板位置,矩形截面形式煤矿巷道的峰值位移最大,圆形与拱形截面形式煤矿巷道的峰值位移则比较接近;在拱腰的位置,3 种截面形式的煤矿巷道峰值位移响应差别不大。矩形截面形式的煤矿巷道顶板与底板峰值位移差最大,说明矩形巷道变形较大,拱形巷道次之,圆形巷道最小。煤矿巷道围岩的移动变形较大,不利于维持其动力稳定性。

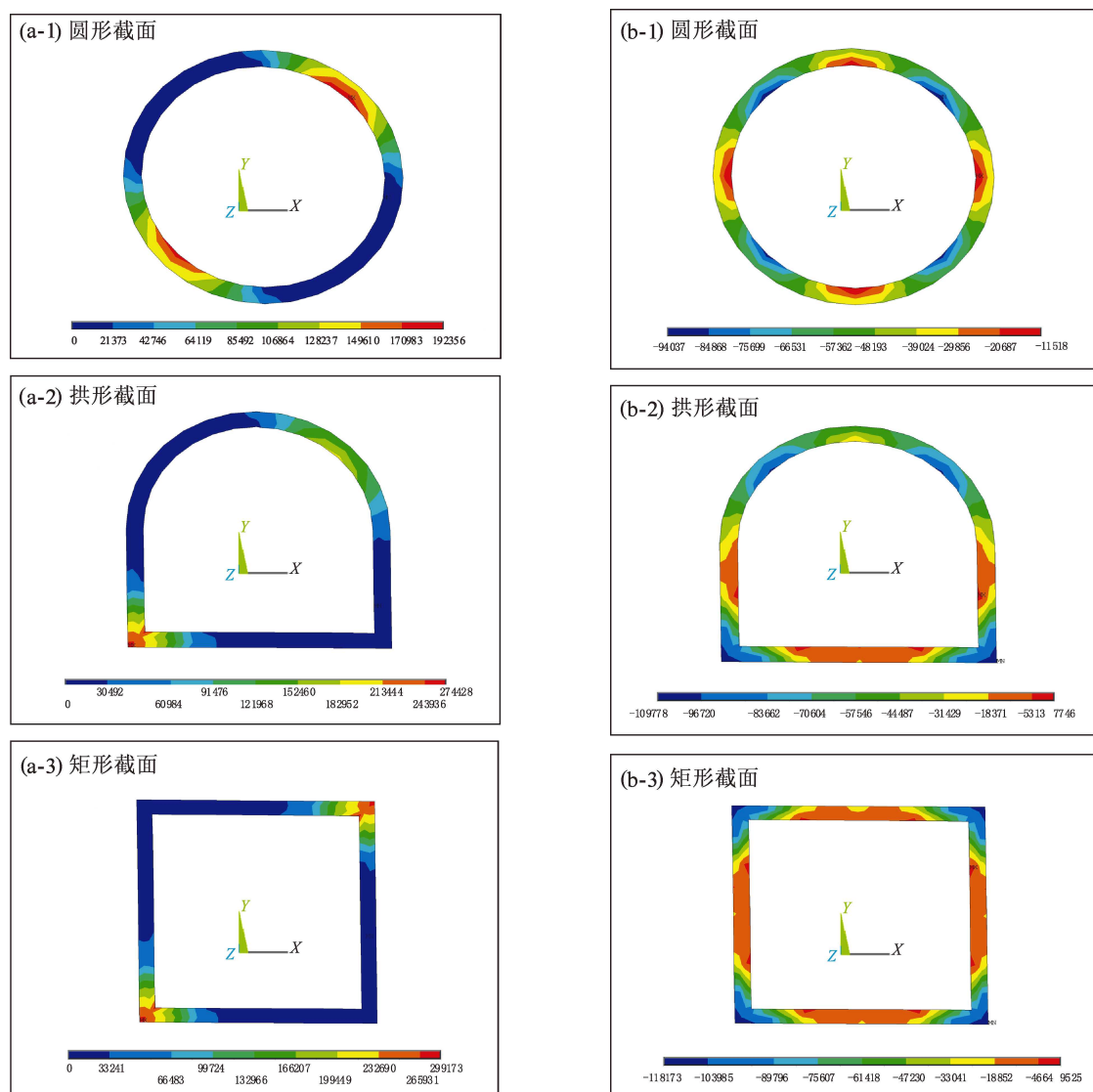


图5 不同截面形式的煤矿巷道第一主应力 S_1 (a) 及剪切应力 S_{XY} (b) S_{XY} 分布 (单位: Pa)

Fig. 5 S_1 stress (a) and S_{XY} stress (b) of the coal mine roadways in different cross section forms (unit: Pa)

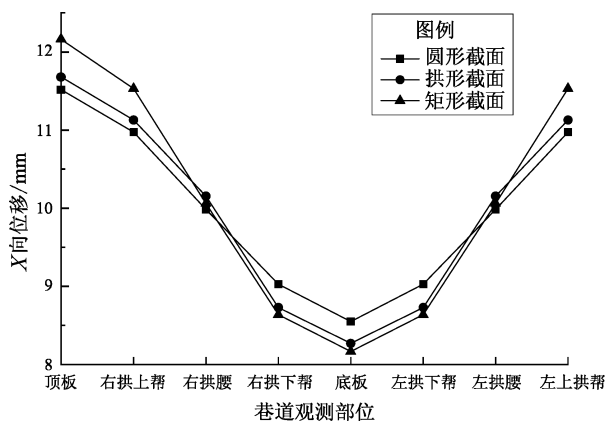


图6 不同截面形式的煤矿巷道的峰值位移

Fig. 6 Maximum displacement of the coal mine roadways in different cross section forms

结合不同截面形式的煤矿巷道结构的内力及位移响应,发现圆形截面形式的煤矿巷道的抗震性能相对较好,为了较好地保证煤矿巷道结构具有足够的安全储备,后续分析中笔者选取圆形截面形式的煤矿巷道作为研究对象,分析探讨地应力、内力分布及位移变形对其抗震性能的影响,为其他截面形式煤矿巷道的动力稳定性研究提供参考。

3.2 地应力对煤矿巷道衬砌结构内力分布的影响

由于煤矿巷道处于岩层之中,地应力对其内力的影响不可忽视。地应力分为自重应力与构造应力。对于处于正常生产环境的煤矿巷道,其周围岩(土)层自重应力场的分布对其内力分布的

影响不容忽视。鉴于此,本文只计算自重应力对煤矿巷道及围岩结构内力分布的影响。

煤矿巷道结构的衬砌结构以混凝土居多,混凝土材料抗压能力较强、抗拉能力较弱,所以第一主应力 S_1 、平面剪切应力 S_{xy} 以及等效应力对混凝土材料的力学性能影响较大,所以笔者重点考察了围岩介质在不同本构模型(线弹性本构及 DP 本构)条件下对煤矿巷道衬砌结构内力分布的影响(图 7)。

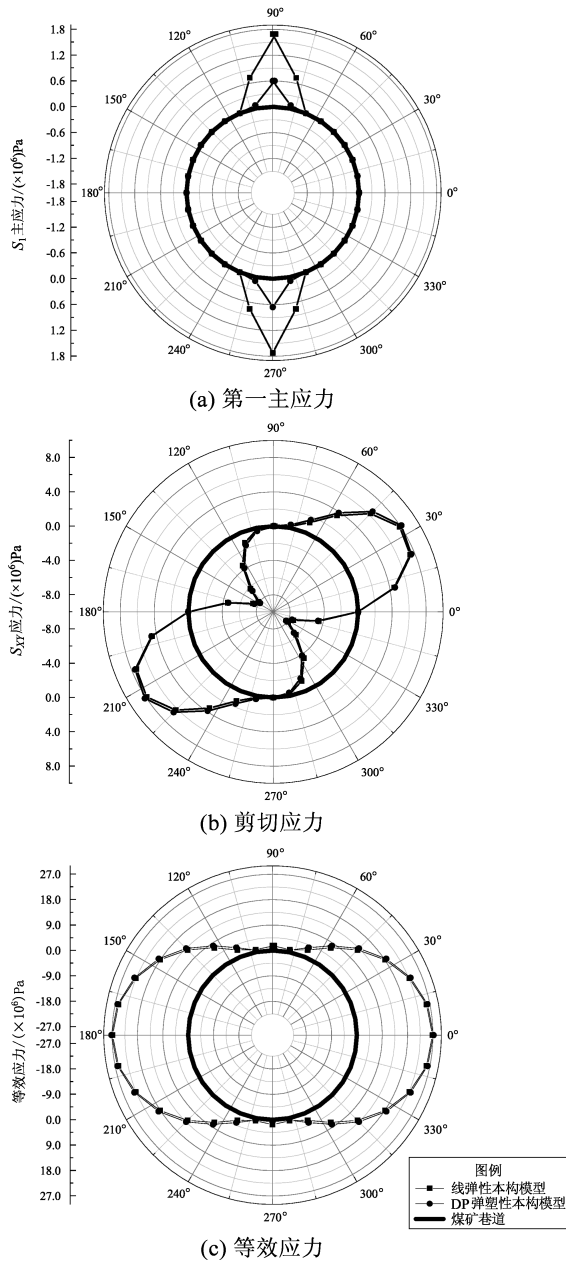


图 7 煤矿巷道衬砌结构应力分布

Fig. 7 Stress distribution in the lining structure of the coal mine roadway

由图 7 可见:在围岩介质自重应力的作用下,煤矿巷道结构的 S_1 主要出现在煤矿巷道衬砌结构的顶板和底板位置,并且其应力值为正值,说明在自重应力作用下煤矿巷道围岩及衬砌结构的底板和顶板处于受拉状态,由于岩石及混凝土材料的抗拉性能较弱,因此顶板及底板属于薄弱部位。

煤矿巷道衬砌结构的 S_{xy} 在 30° 、 150° 、 210° 和 330° 位置密集分布且呈正负交替出现,由此可以发现,煤矿巷道及围岩介质在上述 4 个位置上交替出现的剪应力对其结构稳定性影响较大,这 4 个位置属于应力高度集中的巷道结构薄弱位置;衬砌结构的峰值等效应力密集出现在巷道结构的腰部中点处。通过对比发现:采用 DP 弹塑性本构模型的煤矿巷道 S_1 明显低于线弹性本构模型下的 S_1 ,而 S_{xy} 和等效应力略高于线弹性本构模型下的 S_{xy} 和等效应力,说明在考虑岩层塑性变形性能后,其吸能耗能能力有所提高,比较符合岩层的实际工作状态。

3.3 地震作用下煤矿巷道的内力分布分析

分析图 8a 所示的地震作用下煤矿巷道的最大

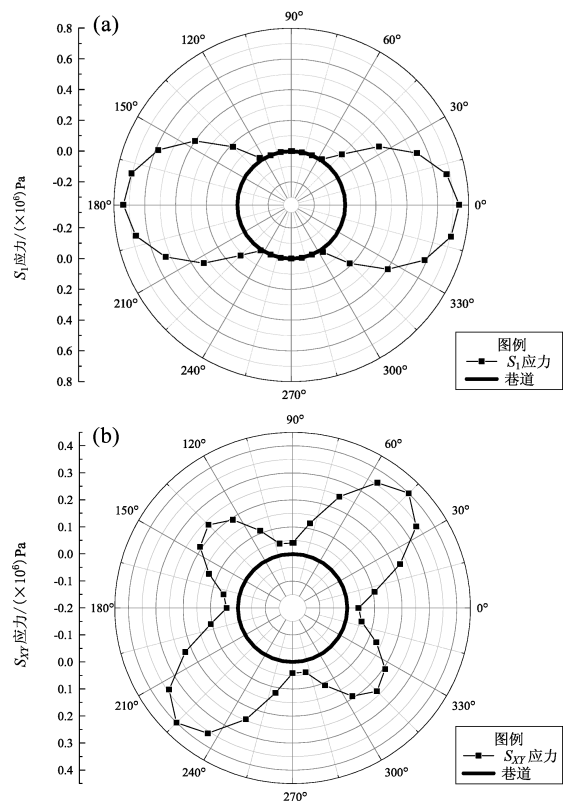


图 8 煤矿巷道最大 S_1 应力 (a) 和最大 S_{xy} 应力 (b)

Fig. 8 Maximum stress S_1 (a) and S_{xy} (b) of the coal mine roadway

S_1 应力分布可以发现：煤矿巷道的 S_1 在地震荷载与自重应力作用下的区别较大，其峰值由煤矿巷道的 90° （顶板和底板）位置向 0° 和 180° （巷道的腰部）位置转移，并且 S_1 峰值也逐渐变大，在 0° 和 180° （巷道的腰部）位置达到最大，其应力值分布位置围成类似于蜜蜂翅膀的“双翼”形状，并呈对称分布，说明在动力扰动荷载作用下煤矿巷道的腰部容易发生失稳破坏，从而严重削弱了煤矿巷道的整体力学性能。

分析图 8b 所示的煤矿巷道的最大 S_{xy} 应力分布可以发现：地震作用下煤矿巷道的 S_{xy} 分布明显区别于自重应力作用下的 S_{xy} 的分布，尤其是 45° 和 225° 位置上的 S_{xy} 明显大于其对称位置 135° 和 325° 位置的 S_{xy} ；其应力值分布位置围成类似于“燕子形”的形状，并呈对称分布，说明 S_{xy} 峰值出现的位置主要集中于煤矿巷道的上下帮部等容易发生剪切破坏并引发巷道整体失稳的地方。

3.4 地震作用下煤矿巷道的动力响应分析

通过分析图 9a 所示的地震作用下煤矿巷道的第一主应力 S_1 动力响应的时程曲线可以发现：地震

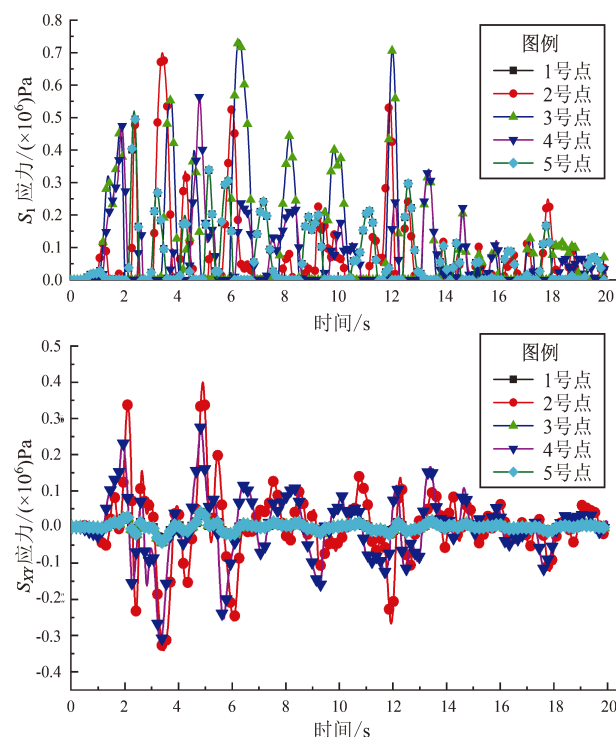


图9 煤矿巷道监测点 S_1 (a)、 S_{xy} 应力曲线 (b)

Fig. 9 Stress - time curves of S_1 (a) and S_{xy} (b) stress at monitoring points of the coal mine roadway

发生后，煤矿巷道不同观测点的峰值第一主应力 S_1 均为正值，且呈现出交错山峰变化的趋势。其中 3 号观测点峰值应力 S_1 明显高于其他观测点，地震发生后的前 6 s 内 2 号观测点峰值应力 S_1 稍微大于其他观测点应力；地震发生后的 6 ~ 13 s，3 号观测点峰值应力最大，13 s 以后 2 号和 4 号观测点的峰值应力相对较大。不同时间段内不同观测点的峰值应力最大值出现的时间不一致的主要原因是地震发生的初期以及后期，煤矿巷道的帮部属于抗震不利的薄弱部位；地震发生中期，煤矿巷道的腰部属于薄弱部位。地震作用下不同岩层对地震波的耗散传播能力不同，加剧了煤矿巷道地震动力响应的复杂性。以上现象说明了地震作用下煤矿巷道的帮部及腰部属于抗震不利的薄弱部位，容易发生拉裂破坏现象，应该加强锚固防护（锚网喷 + 锚索支护的刚柔联合支护方式）措施。

通过分析图 9b 所示的地震作用下煤矿巷道的平面剪切应力 S_{xy} 动力响应的时程曲线可以发现：在地震发生的整个过程中，煤矿巷道围岩的帮部及腰部（监测点 2 和 4）的峰值剪切应力 S_{xy} 明显高于其他监测点的峰值剪切应力；并且监测点 4 的剪切应力明显滞后并且弱于监测点 2 的剪切应力，说明在动力荷载作用下煤矿巷道围岩体的帮部位置容易产生高应力集中，从而引发煤矿巷道的动力失稳破坏。

3.5 地震作用下煤矿巷道围岩的变形分析

从内力响应和位移变形两个角度分析煤矿巷道围岩的地震动力稳定性，能够较好地反映出煤矿巷道围岩体系的抗震性能。在前文分析煤矿巷道地震内力响应的基础上，还需要对煤矿巷道围岩的地震动力变形予以关注。

通过分析图 10a 所示的地震作用下煤矿巷道围岩的 X 向位移响应时程曲线可以发现：煤矿巷道围岩不同监测位置的位移响应时程曲线变化规律趋于一致，地震发生初期煤矿巷道围岩的位移响应迅速达到第一次峰值；之后位移响应改变振动方向并达到第二次峰值，地震发生 13 s 后其位移响应逐渐衰减。地震发生初期（1.74 s）煤矿巷道的水平位移响应达到第一次峰值 8.45 mm（顶板）、8.02 mm（右拱上帮），其他 3 个监测位置的峰值位移响应也均在 6.5 mm 以上；3.16 s 时煤矿

巷道围岩顶板的峰值位移响应达到 11.64 mm, 围岩右拱上帮的峰值位移响应达到 11.03 mm, 其他监测位置的峰值位移响应也均在 8.79 mm 以上, 之后高峰值位移响应 (4.58 mm 以上) 一直持续到 4 s 前后, 说明 3~4 s 内煤矿巷道围岩由于位移响应过大, 容易发生动力失稳现象; 之后在 4.5~5.5 s 又一次出现高峰值位移响应。过大的水平位移响应, 说明顶板及帮部位置更容易与围岩发生相互挤压, 产生动力失稳破坏现象; 地震发生的过程中, 煤矿巷道顶板的位移响应要稍高于底板的位移响应, 说明在扰动荷载的作用下顶板容易发生失稳破坏, 需要对顶板进行加固支护, 以保证煤矿巷道的动力稳定安全性能。

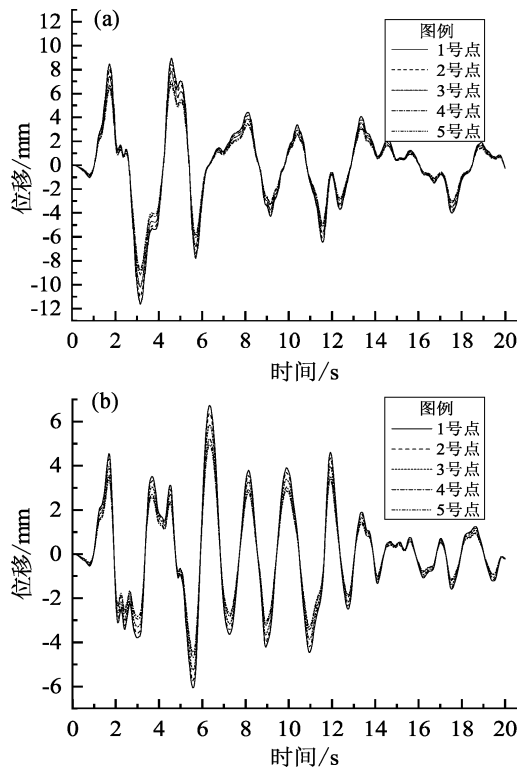


图 10 煤矿巷道围岩监测点 X 向 (a)、Y 向 (b) 位移响应时程曲线

Fig. 10 Displacement-time curves in horizontal (a) and vertical (b) dimensions at monitoring points of the surrounding rock of coal mine roadway

通过分析图 10b 所示的地震作用下煤矿巷道围岩的 Y 向位移响应时程曲线可以发现: 煤矿巷道围岩的 Y 向位移地震动力响应振荡现象明显比 X 向要密集, 但其顶板位移的峰值达到 6.03 mm (向下方向发生在 5.6s) 和 6.73 mm (向上方向发生

在 6.34 s), 明显弱于其水平方向位移响应; 与水平方向位移相比较, Y 向位移响应属于高频次低峰值位移响应, 容易引起煤矿巷道围岩的拉伸、压缩现象反复发生, 煤矿巷道与周围围岩的相邻质点的相对位移差别越大, 在该区域越容易产生较大的附加应力, 越容易引起岩层的屈服破坏, 从而严重劣化了围岩的承载能力, 引发岩层大规模的失稳破坏。

4 结论

通过建立煤矿巷道及围岩结构协同变形理论分析模型, 研究了强地震动作用下煤矿巷道及围岩结构的动力破坏特征、机理及影响因素, 得到以下结论:

(1) 地应力对于煤矿巷道及围岩结构的动力稳定性影响较大。煤矿巷道的埋置深度越深, 所承受的地应力就越大, 其安全稳定性就不容易保证, 较小的扰动荷载就容易导致煤矿巷道的动力失稳现象发生。

(2) 矩形截面形式的煤矿巷道的抗震性能相对最差, 圆形截面形式的煤矿巷道的抗震性能相对最好, 拱形截面形式的煤矿巷道的抗震性能则介于二者之间。当煤矿巷道的埋置深度较深时, 截面形式对煤矿巷道抗震性能的影响逐渐减弱, 不同截面形式的煤矿巷道的动力响应趋于一致。

(3) 在动力荷载的扰动影响下, 煤矿巷道的顶板、帮部及腰部等位置属于薄弱部位, 容易发生拉裂破坏现象, 应该采取合理的锚固防护措施 (如锚网喷+锚索支护的刚柔联合支护方式) 来实现煤矿巷道的安全稳定性。

参考文献:

- 何满潮, 钱七虎. 2010. 深部岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社.
- 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(7): 3131-3136.
- 李夕兵, 李地元, 郭雷, 等. 2007. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 26(5): 922-928.
- 邵良杉, 赵琳琳. 2013. 露天采矿爆破振动对民房破坏的旋转森林预测模型[J]. 中国安全科学学报, 23(2): 58-63.
- 陶连金, 张倬元, 傅小敏. 1998. 在地震荷载作用下的节理岩体地下洞室围岩稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 9(1): 32-40.
- 魏晓刚, 麻凤海, 刘书贤. 2015a. 爆破开采对采空区地面建筑抗震性

- 能的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 25(9): 102 – 108.
- 魏晓刚, 麻凤海, 刘书贤. 2015b. 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. 2015c. 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.
- 魏晓刚, 麻凤海, 刘书贤. 2016. 煤矿采空区岩体结构及地面建筑地震安全防护[M]. 北京: 科学出版社.
- 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.
- 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 2005. 爆破震动对采空区稳定性影响的FLAC3D 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 24(16): 2894 – 2899.
- 叶洲元, 周志华. 2005. 爆破震动安全距离的优化计算[J]. 中国安全科学学报, 15(3): 57 – 60.
- 朱万成, 左宇军, 尚世明, 等. 2007. 动态扰动触发深部巷道发生失稳破裂的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 26(5): 915 – 921.
- 朱维申, 李晓静, 郭彦双, 等. 2004. 地下大型洞室群稳定性的系统性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 23(10): 1689 – 1693.
- GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范(2016 版)[S].
- GB 50909—2014, 城市轨道交通结构抗震设计规范[S].
- GB/T 51336—2018, 地下结构抗震设计标准[S].

Research on Influence Factors of the Seismic Dynamic Instability of Coal Mine Roadway and Surrounding Rock Structure

WEI Xiaogang^{1,2}, YANG Liuchuan^{1,3}, LIU Huili^{1,3}, WEI Yaqiang⁴, HUANG Daoshun⁵,
LI Guanghui¹, HU Zhikai⁶, QIN Sai⁶, GAO He⁷

(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, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

(3. Institute of Civil Engineering of Realization in Zhengzhou, Zhengzhou 450046, Henan, China)

(4. College of Traffic Engineering, Huanghe Jiaotong University, Jiaozuo 454002, Henan, China)

(5. Zhonghe Gangda Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450046, Henan, China)

(6. Kexing Construction Engineering Group Co. Ltd., Zhengzhou 450046, Henan, China)

(7. Henan Dahe Infrastructure Engineering Co. Ltd., Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract

Aiming at the influence factors of seismic dynamic instability of the coal mine roadway and the surrounding rock structure, and by the help of the finite element analysis software, ANSYS/LS – DYNA, we analyze the failure process of the coal mine roadway and the surrounding rock structure which are subjected to El Centro earthquake wave, and focus on the influence of section form, embedment depth of the roadway, and the ground stress etc. on the dynamic response of the roadway itself. We find that the aseismatic behavior of the roadway with circular cross section is far better than that of the roadway with arch section or rectangular cross section. The deeper the buried depth of the roadway is, the weaker the collaborative deformation capacity of the roadway and the surrounding rock structure will be, and the more prone to failure they will be. As the buried depth of the roadway increases, cross section forms' influence on the dynamic instability of the roadway is declining. Further, the roadway's weak parts, such as roof, shoulder and waist are prone to tensile cracking, so, anchoring measures are necessary to ensure the dynamic stability of the roadway.

Keywords: dynamic instability; surrounding medium; earthquake motion; coal mine roadway; numerical simulation