爆破应力扰动下采空区群结构动力响应分析方法及算例研究*

陈俊豪，姜立春

（华南理工大学 土木与交通学院， 广东 广州 510640）

摘要：为研究爆破应力扰动下采空区群的动力响应及其稳定性问题，基于采空区群的结构特征及其与围岩的相互作用，构建采空区群动力响应模型，创建动力响应分析方法，提出动力失稳判据，并研判其稳定性。以某地下石灰岩矿为对象进行计算分析，与数值模拟及现场监测结果对比验证，并研究不同爆破频率、空区跨高比及矿柱高宽比对采空区群动力响应的影响规律。结果表明：在爆破应力扰动下，动力响应分析方法计算结果与数值模拟、现场监测结果趋于一致；采空区群速度、位移响应主要集中在 x 与 y 方向；爆破频率显著影响采空区群速度、位移响应，两类峰值与频率关系曲线呈“单峰”状特征；速度峰值随空区跨高比增大呈先增后减变化，x 与 y 方向速度峰值曲线拐点分别为0.8与0.6；位移峰值随空区跨高比增大呈线性增长，x 与 y 方向线性变化斜率分别为0.926与0.670；速度、位移峰值随矿柱高宽比增大呈负指数缓慢增长，对采空区群稳定性影响较弱。研究成果可为采空区群动力响应问题提供新方法。

关键词：爆破扰动；采空区群；动力响应；稳定性

中图分类号：TD325　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)02-0099-10

Study on Dynamic Response Analysis Method and Example of Goaf Group Under Blasting Stress Disturbance

CHEN Junhao, *JIANG Lichun*

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: In order to study the dynamic response and stability of goaf group under blasting stress disturbance, based on the structural characteristics of goaf group and its interaction with surrounding rock, the dynamic response model of goaf group was constructed, the dynamic response analysis method was created, the dynamic instability criterion was put forward, and its stability was judged. An underground limestone mine was selected as the object for calculation and analysis, which was compared with the results of numerical simulation and field monitoring. The influence of different blasting frequency, span-height ratio of goaf and height-width ratio of pillar on the dynamic response of goaf group was studied. The results show that under the disturbance of blasting stress, the calculation results of dynamic response analysis method are consistent with those of numerical simulation and field monitoring. The velocity and displacement response of the goaf group are mainly concentrated in the x and y directions. The blasting frequency significantly affects the velocity and displacement response of the goaf group, and the relationship curve between the two types of peak and frequency is “single peak”. The peak velocity increases first and then decreases with the increase of the span-height ratio of goaf, the inflection points of the peak velocity curves in the x and y directions are 0.8 and 0.6, respectively. The peak displacement increases linearly with the increase of the span-height ratio of goaf, and the linear change slopes in the x and y directions are 0.926 and 0.670, respectively. The peak values of velocity and displacement increase slowly with the increase of height-width ratio of pillar, which has a weak influence on the stability of goaf group. The research results can provide a new method for the dynamic response of goaf group.

Key words: Blasting disturbance, Goaf group, Dynamic response, Stability

0 引言

房柱空场法是地下金属非金属矿山常见的开采方法，在确保安全的前提下，回采高品位矿柱有助于提高资源回采率[1-3]。矿柱与顶板是采空区关键承载单元，残采爆破将引发采空区群系统内部矿柱、顶板动力响应，破坏原有的应力平衡，当系统内部的应力、位移响应值超过结构极限值时，采空区将发生失

* **收稿日期**：2025-02-20

基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFC2903802)；广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515011118)

作者简介：陈俊豪(1999—)，男，江西赣州人，硕士研究生，主要从事矿山岩土安全方面的研究。E-mail：junhao_chen2022@163.com

稳灾变。

目前,国内外已有部分学者开展采空区群结构稳定性及动力响应方面的研究。刘轩廷等[4]建立了间柱-顶板支撑体系的力学模型,应用突变理论研究了支撑体系的破坏机制。蔡鑫等[5]基于采空区矿柱群连锁失稳机制与风险理论,研究了关键柱-顶板的失稳问题。陈祉颖等[6]利用结构力学模型和Abaqus有限元软件,分析了间柱及顶底柱回采的应力、位移时空演化特征,研究了采空区塑性应变演化规律。姜宽等[7]引入双曲线模型,建立摆型波扰动下块系岩体非线性动力模型,研究了围岩-巷道结构的互馈作用。周子龙等[8]通过模拟地震作用下采空区群围岩的动力响应过程,分析了地震对采空区围岩及矿柱的动力影响。陈祥等[9]基于现场监测与数值模拟相结合的方法,提出了爆破作用下硐室的安全性分析方法。总体而言,相关研究未涉及三维空间内回采爆破应力扰动下采空区群结构动力响应分析方法及其稳定性问题。

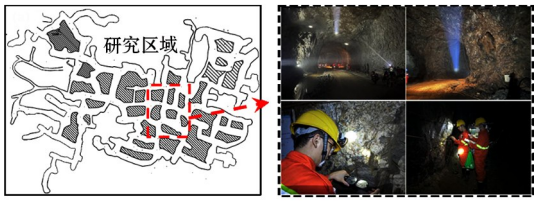
笔者在前期工作中,基于结构动力学与理论力学,首次创建了离散多自由度动力响应分析方法[10-13],研究爆破激励下地下采场矿柱-顶板的速度、位移响应规律,研判采空区的稳定性问题,并取得了良好的效果。本文在前期研究的基础上,结合弹性力学、矩阵位移法与结构动力学,创建采空区群动力响应分析方法,自编Newmark-β计算程序,研究回采爆破扰动下采空区群的结构动力响应问题,提出采空区群动力失稳判据,研判采空区群稳定性。以某地下石灰岩矿回采区域为例,通过数值模拟和现场监测验证理论方法的合理性。该方法为爆破应力扰动下采空区群稳定性研究提供了参考。

1 结构动力响应模型

1.1 基本假设

受环保政策和矿石价格低的制约,地下石灰岩矿山普遍采用房柱空场法开采。受溶洞和矿石品位的影响,实际矿柱形态和位置与设计相比常常会出现较大的出入[14-15]。为了提高资源综合利用率,矿山在确保安全的情况下,常常回采部分高品位矿柱。

广东某地下石灰岩矿山采空区群的内部结构如图1所示。由图1可以看出,采空区由顶板和矿柱组成,矿柱近似为长方体,呈网格状分布,行距均匀。顶板呈条带状,近似为矩形梁单元,采空区群整体可视为框架结构体。



(a) 采空区平面示意 (b) 实地勘察图

图1 采空区群的内部结构

Fig.1 Internal structures of the goaf group

为了简化爆破作用下采空区群内部结构动力响应理论计算,对采空区群进行如下假设:

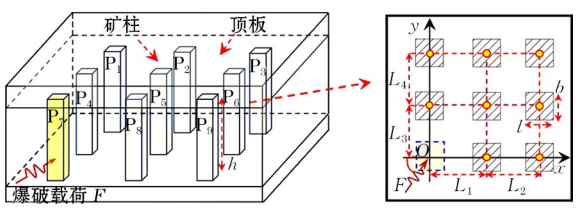
(1) 矿柱与顶板质量分布均匀,岩体物理力学性质近似;

(2) 采空区内的矿柱视为大小相同的长方体;

(3) 爆破应力为唯一外部输入动力荷载。

1.2 基本模型

图2为某地下石灰岩矿采空区群结构模型。由图2可以看出,该采空区群包括9个矿柱,编号分别为P_1、P_2、…、P_9,高度记为h;另有1个顶板,厚度记为H。该采空区回采过程中,设定先回采矿柱P_7,爆破应力荷载作用于矿柱P_7,应力波传递至顶板与周边矿柱,引发采空区群结构动力响应。



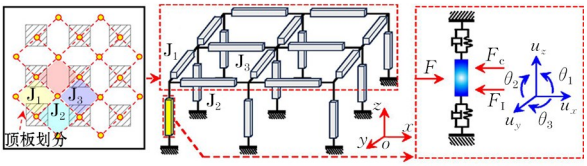
(a) 矿柱分布立体图 (b) 矿柱水平投影图

图2 采空区群模型

Fig.2 Goaf group model

以矿柱P_7中心为坐标原点,建立平面坐标系,顶板跨度记为L_i,其中,矿柱P_7与矿柱P_8、矿柱P_8与矿柱P_9的顶板跨度分别为L_1、L_2,矿柱P_7与矿柱P_4、矿柱P_4与矿柱P_1的顶板跨度分别为L_3、L_4,矿柱的x与y方向宽度分别记为l与b。

基于结构动力学,将采空区群离散化为有限自由度动力系统[11-12],矿柱与顶板视为集中质量体,顶板分别对应质量体J_1、J_2、…。通过弹簧元件和阻尼器连接各质量体,表征结构间轴向变形、弯曲变形、转动变形及能量耗散阻尼。图3为采空区群动力响应系统。



（a）顶板离散图　（b）结构动力响应模型　（c）质量体受力图

图 3　采空区群动力响应系统

Fig.3　Dynamic response system of the goaf group

在空间坐标系中，矿柱质量体受到爆破荷载 F、惯性力 F_I 和阻尼 F_C 作用，存在 6 个自由度，分别对应 6 种位移。其中，x 方向位移记为 u_x，y 方向位移记为 u_y，z 方向位移记为 u_z，xoz 平面扭转角位移记为 θ_1，yoz 平面弯曲角位移记为 θ_2，xoy 平面弯曲角位移记为 θ_3。

2　结构动力响应模型

2.1　动力方程

在爆破应力扰动下，基于结构动力学中的达朗贝尔原理[12]，采空区群结构动力响应方程如下：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{F} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；$\boldsymbol{F}$ 为爆破荷载矩阵；$\ddot{\boldsymbol{x}}$、$\dot{\boldsymbol{x}}$ 和 $\boldsymbol{x}$ 分别为结构体的加速度矩阵、速度矩阵和位移矩阵。

2.2　参数确定

2.2.1　刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$

基于矩阵位移法[16]，采空区群动力响应系统任意质量体两端结点记为 i 与 j，通过结点位移向量表示质量体位移。其中，结点 i 位移向量记为 $(u_{xi}\quad u_{yi}\quad u_{zi}\quad \theta_{1i}\quad \theta_{2i}\quad \theta_{3i})$，结点 j 位移向量记为 $(u_{xj}\quad u_{yj}\quad u_{zj}\quad \theta_{1j}\quad \theta_{2j}\quad \theta_{3j})$，通过单元定位向量 $\boldsymbol{D}$ 表示不同边界条件下质量体的定位与连接，如下：

$$\boldsymbol{D}=[u_{xi}\quad u_{yi}\quad u_{zi}\quad \cdots\quad \theta_{1j}\quad \theta_{2j}\quad \theta_{3j}]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{N}_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix}\varphi_1(x) & 0 & \cdots & 0 & \varphi_2(x)\\ 0 & \varphi_3(x) & \cdots & \varphi_4(x) & 0\\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0\\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0\end{bmatrix}$$

式中：$\varphi_1(x)=1-x/L_i$，$\varphi_2(x)=x/L_i$，$\varphi_3(x)=1-3x^2/L_i^2+2x^3/L_i^3$，$\varphi_4(x)=x-2x^2/L_i^2+x^3/L_i^3$，$\varphi_5(x)=3x^2/L_i^2-2x^3/L_i^3$，$\varphi_6(x)=-x^2/L_i^2+x^3/L_i^3$。

由插值函数 N_{d} 与结点位移向量 $\boldsymbol{d}_n$ 可得单元一致质量矩阵 $\boldsymbol{M}_i$，如下：

$$\boldsymbol{N}_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix}\cdots & 0 & 0 & 0 & 0\\ \cdots & 0 & 0 & 0 & \varphi_6(x)\\ \cdots & \varphi_5(x) & 0 & -\varphi_6(x) & 0\\ \cdots & 0 & \varphi_2(x) & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{M}_i=\iiint_V \boldsymbol{N}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\rho\boldsymbol{N}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{d}_n\,\mathrm{d}V \tag{8}$$

式中：ρ 为密度；V 为质量体总体积。

由式(8)积分得到空间坐标下单元一致质量矩

式中：u_{xi}、u_{yi}、u_{zi}、θ_{1i}、θ_{2i}、θ_{3i}、u_{xj}、u_{yj}、u_{zj}、θ_{1j}、θ_{2j}、θ_{3j} 分别代表杆件单元结点 i 和结点 j 的 x 方向位移、y 方向位移、z 方向位移、xoz 平面扭转角位移、yoz 平面弯曲角位移、xoy 平面弯曲角位移。

基于结构力学与位移互等定理[17]，局部坐标下质量体的单元刚度矩阵 $\boldsymbol{k}^{\mathrm{e}}$ 如下：

$$\boldsymbol{k}^{\mathrm{e}}=\begin{bmatrix}\dfrac{EA}{L_i} & \cdots & 0\\ \vdots & & \vdots\\ 0 & \cdots & \dfrac{4EI}{L_i}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：E 为弹性模量；A 为单元截面面积；I 为单元截面惯性矩。

采用转换编码法[16]，将局部坐标下单元刚度矩阵 $\boldsymbol{k}^{\mathrm{e}}$ 转化为整体坐标下刚度矩阵 $\boldsymbol{k}^{\mathrm{e}'}$，坐标转换矩阵记为 $\boldsymbol{T}$，质量体局部坐标与整体坐标下的单元刚度矩阵转换关系如下：

$$\boldsymbol{k}^{\mathrm{e}'}=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{k}^{\mathrm{e}}\boldsymbol{T} \tag{4}$$

由单元定位向量 $\boldsymbol{D}$ 集成结构总体刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$：

$$\boldsymbol{K}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{D}_i^{\mathrm{T}}k^{\mathrm{e}'}\boldsymbol{D}_i \tag{5}$$

式中：n 为结构单元数量；$\boldsymbol{K}$ 为整体刚度矩阵；$\boldsymbol{D}_i$ 为单元定位向量；$\boldsymbol{D}_i^{\mathrm{T}}$ 为单元定位向量转置矩阵。

2.2.2　质量矩阵 $\boldsymbol{M}$

基于有限单元法[18]，对于质量均匀分布的顶板与矿柱，采用空间框架单元一致质量矩阵 $\boldsymbol{M}_i$ 组合集成结构的整体质量矩阵 $\boldsymbol{M}$。在局部坐标下，通过插值函数 N_{d} 与结点位移向量 $\boldsymbol{d}_n$ 表示结构单元任意处位移向量 $\boldsymbol{d}$：

$$\boldsymbol{d}=\boldsymbol{N}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{d}_n \tag{6}$$

位移插值函数矩阵 $\boldsymbol{N}_{\mathrm{d}}$ 的轴向位移与扭转位移采用线性插值表示，横向位移采用多项式插值表示[19]，如下：

阵 $\boldsymbol{M}_i$,如下:

$$\boldsymbol{M}_i=\begin{bmatrix}\dfrac{\rho h b L_i}{3} & \cdots & 0\\ \vdots & & \vdots\\ 0 & \cdots & \dfrac{\rho h b L_i^3}{105}\end{bmatrix} \tag{9}$$

由动力响应系统内部所有质量体的单元一致质量矩阵 $\boldsymbol{M}_i$ 与其对应的单元定位向量 $\boldsymbol{D}$ 集成结构整体质量矩阵 $\boldsymbol{M}$,如下:

$$\boldsymbol{M}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{D}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{D}_i \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{D}_i$ 为单元定位向量;$\boldsymbol{D}_i^{\mathrm{T}}$ 为单元定位向量转置矩阵;$\boldsymbol{M}_i$ 为局部坐标下的一致质量矩阵。

2.2.3 阻尼矩阵 $\boldsymbol{C}$

实际工程中,将岩体阻尼等效为黏性阻尼 $\boldsymbol{C}$,常用的黏性阻尼为 Rayleigh 阻尼,采用质量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 和刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 的线性组合表示[13,20],如下:

$$\boldsymbol{C}=\alpha\boldsymbol{M}+\beta\boldsymbol{K} \tag{11}$$

式中:α 为质量阻尼比例系数;β 为刚度阻尼比例系数。

2.2.4 爆破荷载矩阵 $\boldsymbol{F}$

根据地下矿山爆破的特点,爆破荷载 $F(t)$[10] 取为:

$$F(t)=\begin{cases}0.5F_{\max}[1-\cos(2\pi ft)] & (t\leqslant 1/f)\\ 0 & (t>1/f)\end{cases} \tag{12}$$

式中:$F_{\max}$ 为爆破荷载峰值;f 为爆破荷载频率;t 为爆破荷载作用时间。

设爆破荷载 $F(t)$ 与 x 轴的夹角为 φ_1,爆破荷载 $F(t)$ 与 z 轴的夹角为 φ_2,则 x、y 与 z 方向的等效爆破作用力表达式如下:

$$\begin{cases}F_z(t)=F(t)\cos\varphi_2\\ F_x(t)=F(t)\sin\varphi_2\cos\varphi_1\\ F_y(t)=F(t)\sin\varphi_2\sin\varphi_1\end{cases} \tag{13}$$

式中,$F_x(t)$、$F_y(t)$、$F_z(t)$ 分别为 x、y 与 z 方向等效爆破作用力。

根据等效荷载分配原则[16],将非结点爆破荷载等效分配至结点,得到爆破荷载列阵 $\boldsymbol{F}$,如下:

$$\boldsymbol{F}=[F_x(t)/2 \quad \cdots \quad -F_y(t)h/8]^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

综上,在爆破应力扰动下,采空区群结构动力响应方程见式(15)。

$$\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{D}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{D}_i\ddot{\boldsymbol{x}}+(\alpha\boldsymbol{M}+\beta\boldsymbol{K})\dot{\boldsymbol{x}}+\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{D}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{k}^{e'}\boldsymbol{D}_i x=[F_x(t)/2 \quad \cdots \quad -F_y(t)h/8]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

3 动力失稳判据

爆破过程中,爆破应力波将引发采空区群应力变化,当应力值达到其承载极限值时,结构易发生破坏[21]。当拉应力极大值 $\sigma_{t\max}$ 大于其极限抗拉强度 σ_t 时,或压应力极大值 $\sigma_{c\max}$ 大于其极限抗压强度 σ_c 时,采空区群结构将发生张拉或压缩失稳破坏。

由材料力学柱理论[21-22] 可知,爆破扰动作用将对矿柱产生振动影响,采用弹性力学 Galerkin 法推导失稳临界振速表达式,研判其稳定性。经计算,拉伸破坏临界振速 $v_{t\max}$ 与压缩破坏临界振速 $v_{c\max}$ 的表达式如下:

$$\begin{cases}v_{t\max}=\dfrac{20b^2}{\rho c(25h^2+4b^2)}\cdot\\ \qquad(\sigma_t+(5-\lambda)\gamma h/10+q-21\lambda\gamma h^3/40b^2)\\ v_{c\max}=\dfrac{20b^2}{\rho c(25h^2+4b^2)}\cdot\\ \qquad(\sigma_c-(5+\lambda)\gamma h/10-q-21\lambda\gamma h^3/40b^2)\end{cases} \tag{16}$$

式中:c 为岩体纵波波速;λ 为侧压系数;γ 为岩体容重;q 为上覆围岩荷载。

综合考虑爆破扰动下拉伸与压缩两种变形破坏的影响,则采空区群结构动力失稳判据 $v_{\max}$ 如下:

$$v_{\max}=\min[v_{t\max},v_{c\max}] \tag{17}$$

当采空区群结构振速大于 $v_{\max}$ 时,结构处于不稳定状态;当采空区群结构振速小于 $v_{\max}$ 时,结构处于稳定状态。

4 工程案例计算分析

4.1 理论方法合理性验证

为验证理论方法的合理性,以某地下石灰岩矿山为例,自编 Newmark-β 计算程序,采用理论方法计算采空区群振动速度,并与 FLAC3D 6.0 数值模拟计算结果进行比较,利用现场监测爆破数据对比验证。

4.1.1 工程概况

该地下石灰岩房柱空场法开采矿山的地层主要为石炭系上统船山组岩层,种类为中厚层状灰岩、白色大理岩与厚状白云质灰岩,平均厚度大于 200.0 m,主要成分为 CaO 和 MgO,矿山现已形成+80 m 中段采空区,埋深约 84.0 m。经测量,该中段采空区平均跨度为 20.0 m,高度为 9.1 m,矿柱尺寸为 13.0 m×22.0 m(长×宽)。

4.1.2　参数获取

根据矿山地质资料及岩石力学试验结果，采空区群矿岩物理力学参数见表 1。

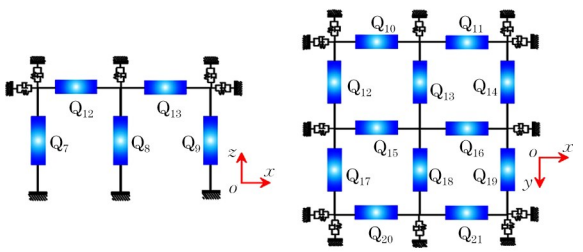
表 1　采空区矿岩物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical parameters of ore and rock in the goaf

类型	容重/(kN/m³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
矿体	25.3	6.46	25.20	0.25	7.21	35.2
围岩	27.2	6.53	28.12	0.26	7.42	40.7

4.1.3　理论计算

由图 2、图 3 可得研究区域的理论计算模型(见图 4)。综合矿山开采现状，建立采空区群结构动力响应模型，模型由 21 个集中质量体组成，对集中质量体正序编号，分别记为 Q_1、Q_2、…、Q_{21}，爆破荷载作用于质量体 Q_7 上。



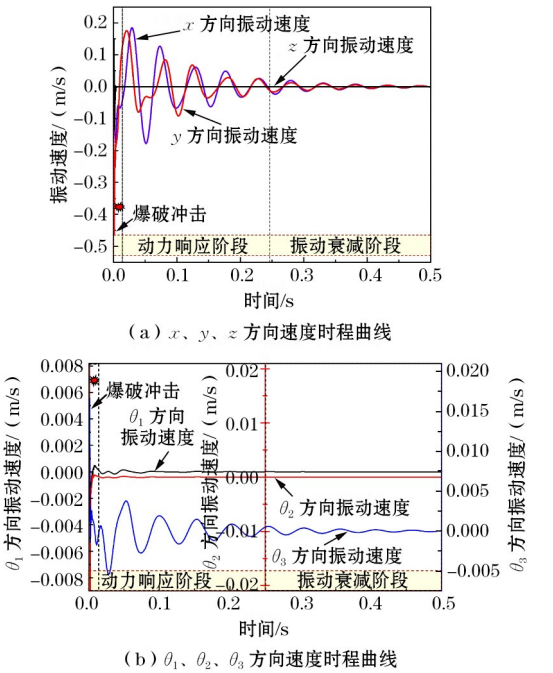
(a) 正视图　　(b) 俯视图

图 4　理论计算模型

Fig.4　Theoretical calculation model

将表 1 矿岩物理力学参数值代入式(15)，采用理论方法计算爆破应力扰动下采空区群速度响应，采空区群的不同方向速度响应时程曲线如图 5 所示。

由图 5(a)可知，在爆破扰动下，采空区群速度瞬间达到最大值，随后在围岩阻尼作用下逐渐衰减，0.3 s 后达到基本平衡。其中，采空区群 x 与 y 方向振动速度较大，最大值可达到 0.183 m/s，z 方向振动速度较小，爆破冲击后迅速衰减至稳定状态。究其原因，矿柱轴向刚度大，z 方向位移约束强，爆破冲击难以引发压缩变形。由图 5(b)可知，沿转角方向振动速度可忽略不计，而 θ_3 方向振动速度存在振动衰减趋势，θ_1 与 θ_2 方向振动位移近似趋于 0。究其原因，地下采空区群的弯曲刚度与扭转刚度较大，弯曲角位移与扭转角位移方向边界约束较强，使得爆破冲击引起的角位移极小。



(a) x、y、z 方向速度时程曲线

(b) θ_1、θ_2、θ_3 方向速度时程曲线

图 5　采空区群速度响应时程曲线

Fig.5　Velocity time-history curves of the goaf group

4.1.4　数值计算

根据矿山开采设计并结合现场实测数据，利用 FLAC3D 6.0 软件开展数值模拟计算，数值模型的物理力学参数按表 1 设定，采用四面体单元进行划分，并服从 Mohr-Coulomb 破坏准则。数值模型共生成 106 726 个节点、798 793 个单元(见图 6)。模型结构分为上覆岩层、顶板、矿柱和周边围岩，通过 FISH 语言施加爆破荷载，爆破点位于矿柱 P_7，模型四周采用黏性边界进行约束。

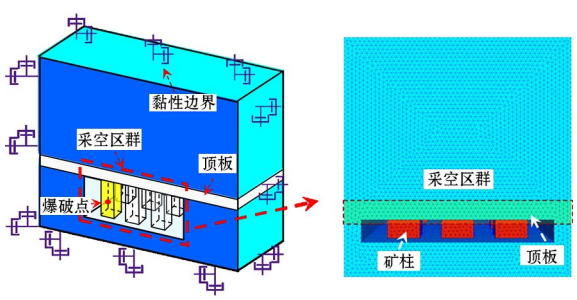


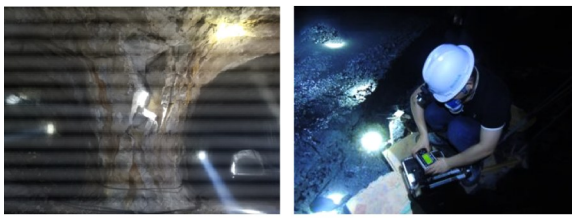
图 6　数值模型

Fig.6　Numerical model

4.1.5　现场监测

在数值模型中布置如图 7 所示的爆破应力监测点，用于监测爆破相邻矿柱的速度响应。图 7 中所用的监测仪器为成都中科测控公司生产的爆破测振仪 TC-4850，量程为 0.001～35.4 cm/s，分辨率为 0.01

cm/s,读数精度为0.1%,A/D转换位数为16位,监测过程中感应器与岩体之间采用刚性固定。



(a)相邻矿柱 (b)监测仪器

图7 爆破振动监测

Fig.7 Blasting vibration monitoring

4.1.6 对比分析

将理论计算结果、数值模拟结果与现场监测数据进行对比,3种方法的速度响应时程曲线如图8所示。

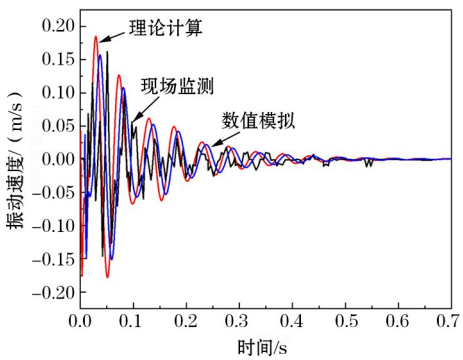


图8 速度响应对比分析

Fig.8 Comparative analysis of velocity responses

由图8可知,3种方法的速度响应时程曲线的变化趋势相似。在爆破扰动下,3种方法的速度响应曲线均在0.05 s左右达到峰值,在围岩阻尼作用下,速度幅值降低,最终达到平衡。其中,理论计算得到的速度响应波形峰值较大,与其余两类方法得到的速度峰值处于同一数量级,差异不大。理论方法计算耗时7.5 s,计算效率较高,且其整体变化趋势与数值模拟、现场实测结果基本吻合,验证了该理论计算方法的合理性与可靠性。

4.2 采空区群稳定性分析

将表1物理参数代入式(16),研判采空区群结构稳定性。经计算,$v_{tmax}=0.279$ m/s,$v_{cmax}=0.271$ m/s,则 $v_{max}=0.271$ m/s。爆破引发的最大振速为0.183 m/s,小于临界失稳振速 v_{max},采空区群将处于安全稳定状态。

经现场调查,爆破冲击下,部分矿柱出现微小片帮,顶板未出现岩块松散与冒顶现象,巷道两侧岩体完整,围岩稳固,节理紧密,采空区群整体处于稳定状态。

5 影响因素分析

为研究爆破应力波频率、采空区结构参数对采空区群动力响应的影响规律,分别开展爆破频率、空区跨高比与矿柱高宽比在不同取值条件下的影响因素分析。

5.1 爆破频率

根据4.1.3节可知,采空区群动力响应主要以 x 和 y 方向为主。为了研究爆破频率对采空区群动力响应的影响,在保持固定其他条件不变的情况下,爆破应力波频率的取值分别为25 Hz、45 Hz、65 Hz与85 Hz,取 x 和 y 方向的速度、位移响应进行分析。在爆破扰动下,不同爆破频率下采空区群的不同方向速度与位移响应时程曲线如图9所示。

由图9(a)与图9(b)可知,不同爆破频率条件下,采空区群 x 和 y 方向速度响应曲线的变化趋势不同,x 方向振速值与波动性均高于 y 方向。同一方向的速度振动趋势相同,而速度响应峰值不同。随着爆破频率增大,x 和 y 方向振速峰值先增后减。当频率为85 Hz时,x 和 y 方向振速幅值较小;频率显著影响采空区群结构稳定性。

由图9(c)与图9(d)可知,不同爆破频率条件下,采空区群 x 和 y 方向的位移振动趋势不同,x 方向振动位移衰减较慢,y 方向振动位移衰减速度较快。同一方向的位移振动趋势相同,位移幅值不同。随着爆破频率增大,x 和 y 方向位移峰值先增后减。当频率为85 Hz时,x 和 y 方向位移幅值较小,采空区群稳定性好。

由图9(e)可知,当频率为50~85 Hz时,x 方向速度峰值从0.180 m/s降低至0.038 m/s,曲线变化率较小;y 方向速度峰值从0.461 m/s降低至0.095 m/s,曲线变化率较大,速度与频率关系曲线拐点出现在50 Hz。由图9(f)可知,当频率为65~85 Hz时,x 和 y 方向位移峰值相近;当频率为50~85 Hz时,x、y 方向位移峰值迅速减小,位移与频率关系曲线拐点出现在50 Hz。

由图9(e)与图9(f)可知,速度、位移响应峰值与爆破应力频率呈现二次抛物线变化规律,采空区群速度、位移响应峰值与爆破频率关系曲线均呈“单峰”状特征。

究其原因,采空区群具有明显的结构特征,当外

部荷载频率接近其自振频率时，将发生“共振”现象，两类响应峰值将显著增大，容易发生失稳现象。

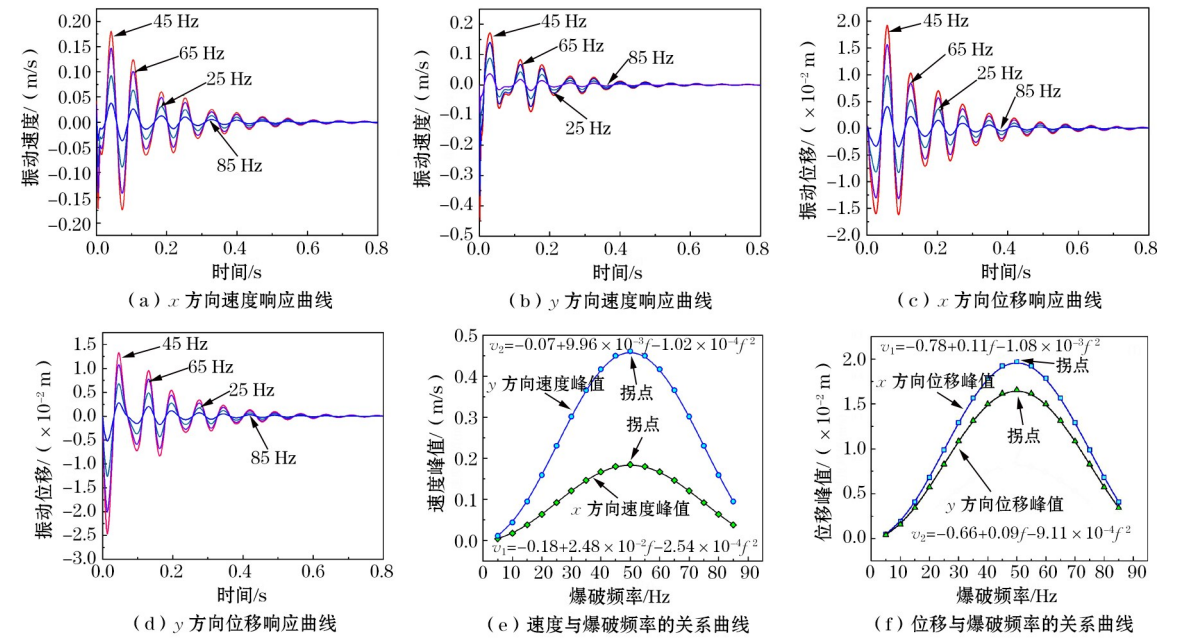


图 9　不同爆破应力波频率条件下动力时程响应曲线

Fig.9　Dynamic time-history response curves under different blasting stress wave frequencies

5.2　空区跨高比

为了研究空区跨高比(m)对采空区群结构动力响应的影响，在保持固定其他条件不变的情况下，分别取空区跨高比为 0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.4 进行模拟分析。在爆破应力扰动作用下，采空区群各方向速度与位移响应时程曲线如图 10 所示。

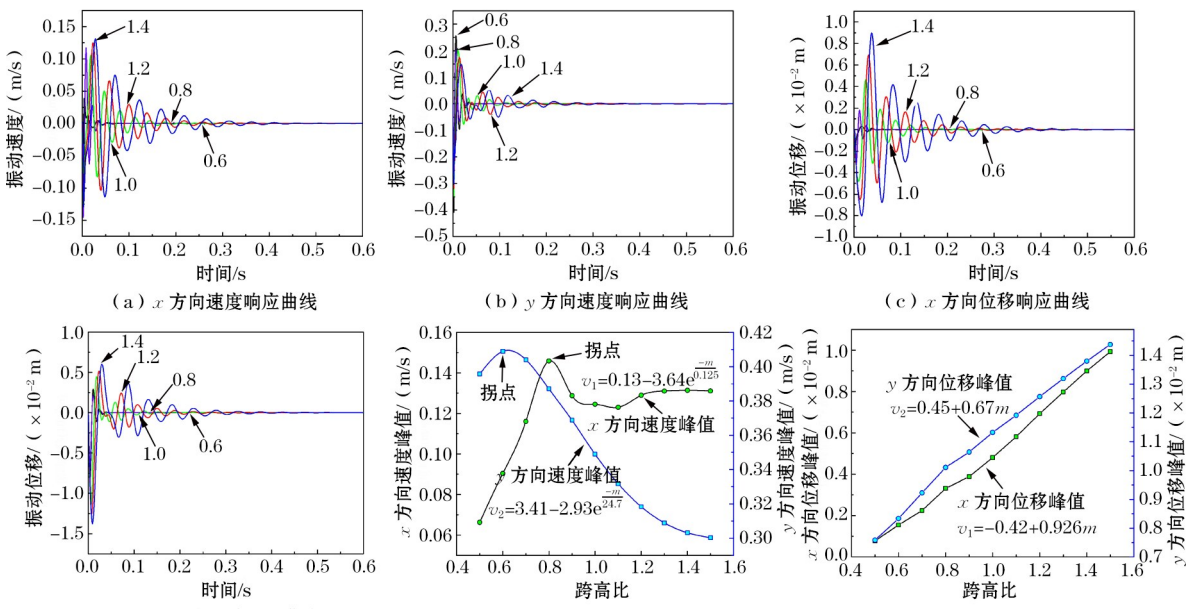


图 10　不同空区跨高比条件下动力时程响应曲线

Fig.10　Dynamic time-history response curves under different span-to-height ratios of goaf

由图 10(a)与图 10(b)可知，不同空区跨高比条件下，x 和 y 方向速度响应存在明显差异。其中，x 方向速度响应显著，振动幅值较大，衰减速度较慢，当 $t>0.3$ s 时，振动速度趋于 0；y 方向速度响应不显著，振动幅值相对较小，衰减速度较快，当 $t>0.2$ s 时，振动速度趋于 0。x 和 y 方向速度响应值随跨

高比增大逐渐增大,衰减平衡时间延长,速度振动峰值增大。究其原因,随跨高比增大,顶板刚度降低,结构柔度增大,能量耗散速度减弱,采空区群整体稳定性降低,同一爆破荷载作用下,振动速度幅值增加。

由图 10(c)与图 10(d)可知,不同跨高比条件下,x 和 y 方向位移响应存在明显差异。其中,x 方向位移响应显著,振动幅值较大,衰减速度较慢;y 方向位移响应不显著,幅值相对较小,爆破冲击后,位移响应迅速衰减至 0。x 和 y 方向速度响应随跨高比增大逐渐增大,振动平衡时间延长,速度振动峰值增大。

由图 10(e)可知,x 和 y 方向速度峰值关系曲线具有较大差异,x 方向速度峰值随跨高比增大呈现先增后减随后平稳波动的趋势,当跨高比低于 0.8 时,速度峰值快速增长,0.8 为曲线拐点;当跨高比为 0.8～0.9 时,速度峰值迅速下降,速率较快;当跨高比大于 0.9 时,速度峰值开始趋于稳定,在 0.13 m/s 上下波动。y 方向速度峰值随跨高比增大呈现先增后减趋势,当跨高比小于 0.6 时,速度峰值快速增加;当跨高比为 0.6 时,曲线达到拐点;当跨高比为 0.6～1.2 时,速度峰值迅速下降;当跨高比大于 1.2 时,曲线下降速率减缓。由图 10(f)可知,位移与跨高比的关系曲线近似为线性关系,随着空区跨高比增大,x 和 y 方向位移峰值不断增大。

由图 10(e)与图 10(f)可知,速度峰值与跨高比关系曲线呈“单峰”状特征,拐点对应的空区跨高比不同;位移峰值与跨高比关系呈线性变化规律,其中,x 方向关系曲线斜率为 0.926,y 方向关系曲线斜率为 0.670,两类曲线增长速度较快,表明空区跨高比对位移响应影响较大,控制空区跨高比可以提升采空区整体稳定性。

5.3 矿柱高宽比

为了研究矿柱高宽比(n)对采空区群结构动力响应的影响,在保持固定其他条件不变的情况下,矿柱高宽比分别取 0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.4,在爆破扰动下,不同矿柱高宽比下采空区群的不同方向速度与位移响应时程曲线如图 11 所示。

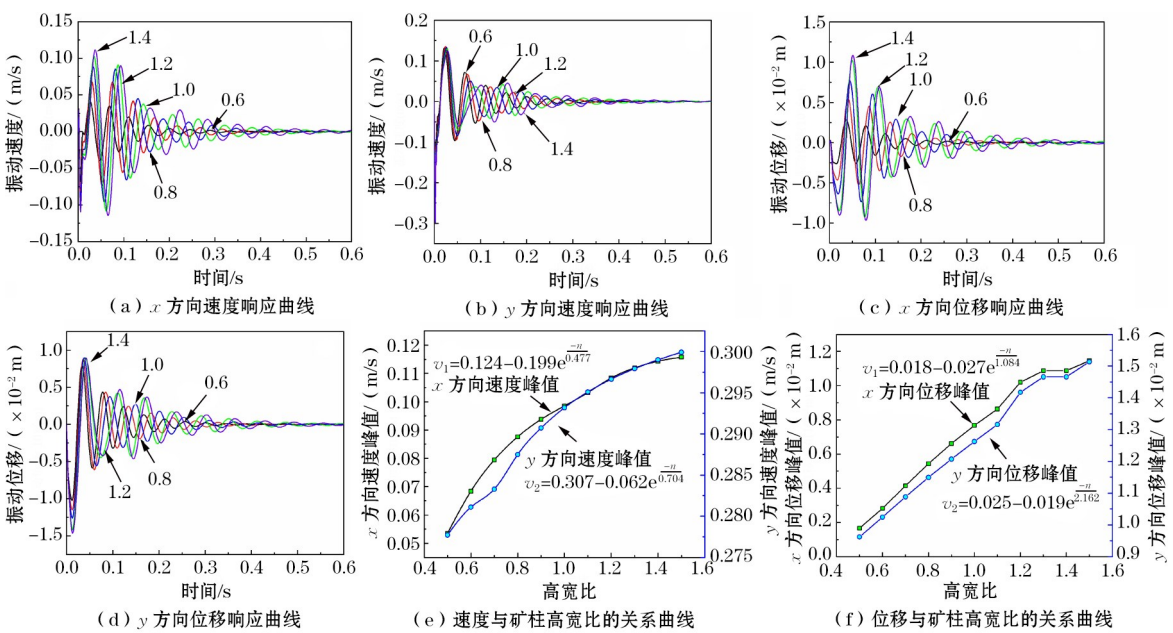


图 11 不同矿柱高宽比条件下动力时程响应曲线

Fig.11 Dynamic time-history response curves under different height-to-width ratios of pillar

由图 11(a)与图 11(b)可知,不同矿柱高宽比条件下,不同方向的速度响应存在一定差异。x 方向的速度响应变化显著,速度幅值随高宽比增大逐渐增大,振动周期增大,平衡时间延长,y 方向的速度响应变化不明显,振动趋势趋于一致。记高宽比 1.4 为工况 1,进行分析。当 $t=0.05$ s 时,工况 1 的 x 方向速度幅值最大,当 $t=0.15$ s,工况 1 的 x 方向速度响应幅值小于高宽比为 1.2、1.0 与 0.8 工况的速度响应幅值,表明多个周期振动下,矿柱高宽比越大,速度响应衰减越快。

由图 11(c)可知,随着高宽比增大,x 方向位移响应峰值逐渐增大,周期增大,平衡时间延长,多周

期振动下，不同高宽比的位移响应峰值保持一定差值。由图 11(d)可知，随着高宽比增大，y 方向位移响应振动周期增大，平衡时间延长。

由图 11(e)可知，x 和 y 方向速度峰值关系曲线变化相似。当高宽比为 0.5～0.9 时，x、y 方向速度峰值曲线变化斜率较大；当高宽比为 1.0～1.5 时，x、y 方向速度峰值曲线变化斜率较缓慢。由图 11(f)可知，x、y 方向位移响应峰值关系曲线变化相似。当高宽比为 0.5～1.1 时，x、y 方向位移峰值迅速增加；当高宽比为 1.1～1.5 时，x、y 方向位移峰值呈波动变化，变化速率较缓慢。

由图 11(e)与图 11(f)可知，采空区群 x、y 方向的速度、位移响应峰值与矿柱高宽比近似为负指数增长关系，两类响应数值增长幅度较小，表明矿柱高宽比对采空区群动力响应及其稳定性的影响较弱。

6 结论

(1) 综合采空区群结构特征，建立了结构动力响应计算模型，创建了采空区群结构动力响应分析方法，系统研究了爆破应力扰动下采空区群动力响应问题，提出了采空区群动力失稳判据，并对其稳定性进行了研判。

(2) 在爆破应力扰动下，采空区群速度、位移响应瞬间达到最大值，采空区群速度、位移动力响应集中在 x 与 y 方向，z 方向速度、位移响应值较小，爆破扰动后采空区群速度、位移响应迅速衰减至稳定状态，θ_1、θ_2 与 θ_3 方向的速度、位移响应值近似趋于 0，可忽略不计。

(3) 在爆破应力波扰动下，爆破频率与采空区群动力响应密切相关，速度、位移峰值与爆破频率关系曲线呈“单峰”状特征，曲线峰值点为 50 Hz；采空区群速度峰值随空区跨高比增大呈先增大后减小的变化趋势，x 与 y 方向速度峰值变化曲线拐点分别为 0.8 与0.6；位移峰值随空区跨高比增大呈线性增长趋势，x 与 y 方向线性斜率分别为 0.926 与 0.670；采空区群速度、位移峰值随矿柱高宽比增大呈负指数缓慢增长变化；控制爆破频率与空区跨高比可有效提升采空区群的整体稳定性。

参考文献(References)：

[1] 陈顺满，吴爱祥，王贻明，等.深部回采矿柱稳定性影响因素分析及其应用[J].中南大学学报(自然科学版)，2018，49(8)：2050-2057.
CHEN Shunman，WU Aixiang，WANG Yiming，et al. Analysis of influencing factors of pillar stability and its application in deep mining[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2018，49(8)：2050-2057.

[2] LI Xibing，QIU Jiadong，ZHAO Yuzhe，et al. Instantaneous and long-term deformation characteristics of deep room-pillar system induced by pillar recovery[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2020，30(10)：2775-2791.

[3] 雷忠平，姜立春，付建生.采空区顶板-矿柱支撑系统失稳破坏研究[J].矿业研究与开发，2023，43(11)：53-60.
LEI Zhongping，JIANG Lichun，FU Jiansheng. Study on instability and failure of roof-pillar support system in goaf[J]. Mining Research and Development，2023，43(11)：53-60.

[4] 刘轩廷，陈从新，刘秀敏，等.充填开采下顶板-间柱支撑体系的突变失稳分析[J].岩土力学，2021，42(9)：2461-2471.
LIU Xuanting，CHEN Congxin，LIU Xiumin，et al. Analysis of catastrophic instability of roof-rib pillar support system under backfill mining[J]. Rock and Soil Mechanics，2021，42(9)：2461-2471.

[5] 蔡鑫，黄涯帅，周子龙，等.基于矿柱失稳风险分析的采空区关键矿柱重定义与辨识[J].岩石力学与工程学报，2024，43(1)：216-225.
CAI Xin，HUANG Yashuai，ZHOU Zilong，et al. Redefinition and identification of critical pillars in goaf based on the risk analysis of pillar instability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(1)：216-225.

[6] 陈祉颖，刘志祥，李夕兵，等.残矿矿柱回采方案数值模拟与优化研究[J].中南大学学报(自然科学版)，2023，54(6)：2150-2161.
CHEN Zhiying，LIU Zhixiang，LI Xibing，et al. Numerical simulation and optimization of recovery scheme for residual ore pillars[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2023，54(6)：2150-2161.

[7] 姜宽，戚承志.非线性块系岩体动力响应及在巷道防冲支护中的应用[J].力学学报，2024，56(4)：1057-1067.
JIANG Kuan，QI Chengzhi. Dynamic response of nonlinear block rock masses and its application in the anti-impac support of roadway[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2024，56(4)：1057-1067.

[8] 周子龙，刘富，王海泉，等.地震作用下采空区群围岩动力响应特征研究[J].中国安全科学学报，2018，28(11)：110-115.
ZHOU Zilong，LIU Fu，WANG Haiquan，et al. Dynamic response of surrounding rock of goaf group under seismic loading[J]. China Safety Science Journal，2018，28(11)：110-115.

[9] 陈祥，刘明学，祁小博.爆破振动作用下大型地下洞室群围岩动力响应及合理间距分析[J].振动与冲击，2021，40(1)：277-285.
CHEN Xiang，LIU Mingxue，QI Xiaobo. Dynamic response of surrounding rock of large underground caverns under blast vibration and reasonable spacing between adjacent caverns[J]. Journal of Vibration and Shock，2021，40(1)：277-285.

[10] 姜立春，苏勇，代庆松.远场爆破水平应力波扰动下分层胶结充填体矿柱的动力响应机制[J].岩石力学与工程学报，2020，39(1)：34-44.

JIANG Lichun, SU Yong, DAI Qingsong. Dynamic response mechanisms of layered cemented backfill pillars under horizontal stress wave disturbance of far-field blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(1):34-44.

[11] 姜立春,曾俊佳,王国伟.水平采空区群离散多自由度动力响应模型[J].岩石力学与工程学报,2016,35(1):59-67.
JIANG Lichun, ZENG Junjia, WANG Guowei. A discrete dynamic response model with multiple degrees of freedom for horizontal goaf group [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(1):59-67.

[12] 姜立春,罗恩民,沈彬彬.多自由度模型法的立体采空区群爆破动力响应研究[J].岩土力学,2019,40(6):2407-2415.
JIANG Lichun, LUO Enmin, SHEN Binbin. A dynamic response of blasting to stereoscopic goaf group based on the multi-degree of freedom model method[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(6):2407-2415.

[13] 姜立春,曾俊佳,吴爱祥.基于结构离散的复杂水平采空区群残采激励动力响应[J].中国有色金属学报,2017,27(5):1023-1030.
JIANG Lichun, ZENG Junjia, WU Aixiang. Dynamic response of complicated horizontal goaf group under residual mining excitation based on structural discrete [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27 (5): 1023-1030.

[14] GUO Yanhui, MIAO Yichen. Study on stope stability in continuous mining of long-dip, thin orebody by room-pillar method[J]. Sustainability,2022,14(15):9601.

[15] 姜立春,卞浩然.不均匀分布点状矿柱承载条件下顶板最小安全厚度[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(11):4381-4391.
JIANG Lichun, BIAN Haoran. The minimum safety thickness of roof under condition of uneven distribution of point pillar bearing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(11):4381-4391.

[16] 高龙.基于矩阵位移法精确求解含无限刚性体杆系结构动力学问题的研究[D].广州:华南理工大学,2016.
GAO Long. Study on the accurate method of the dynamic problem of the member structures including infinite stiffness truss based on the matrix displacement method [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2016.

[17] 刘齐茂,燕柳斌.地震作用下空间框架结构层间相对位移响应梯度和海赛矩阵的计算[J].计算力学学报,2010,27(2):303-309+320.
LIU Qimao, YAN Liubin. Generalized conforming curved rectangular shallow shell element with in-plane rotational degrees of freedom [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2010,27(2):303-309+320.

[18] 刘瑞岩.全耦合梁单元的一致质量矩阵[J].国防科技大学学报,1984(1):101-108.
LIU Ruiyan. Consistent mass matrix for complete coupled beam elements[J]. Journal of National University of Defense Technology,1984(1):101-108.

[19] SIVORI D, LEPIDI M, CATTARI S. Analytical identification of dynamic structural models: mass matrix of an isospectral lumped mass model [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2024, 53 (8): 2447-2467.

[20] XU Huawei, APEL D B. WANG Jun, et al. Investigation and stability assessment of three sill pillar recovery schemes in a hard rock mine[J]. Energies,2022,15(10):3797.

[21] 姜立春,苏勇.胶结充填体矿柱失稳的临界爆破振速理论模型及应用[J].中国有色金属学报,2019,29(11):2663-2670.
JIANG Lichun, SU Yong. Theoretical model and application of critical blasting vibration velocity for instability of cemented backfill pillar [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2019,29(11):2663-2670.

[22] XIE Xuebin, ZHANG Huaxi. Research on hard rock pillar stability prediction based on SABO-LSSVM model [J]. Applied Sciences,2024,14(17):7733.