

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.027

矿体回采爆破对覆压铁路安全性的数值模拟研究*

褚夫蛟¹, 段玉德², 李公成¹, 王作鹏², 魏志鹏¹, 张连新³

(1. 山东理工大学 资源与环境工程学院, 淄博 255000; 2. 山东东平宏达矿业有限公司, 泰安 271000;

3. 山东盛鑫矿业有限公司, 泰安 271000)

摘要: 针对某矿山 I-1 矿体矿房爆破时爆破振动对铁路安全的影响, 通过数值计算的方法建立矿体和铁路路基的数值模型进行安全评估, 判断既有铁路路基及车站是否安全。根据矿房 1、2 的位置关系, 在临近的铁路路基上设置 1-1、2-2、3-3 剖面来监测铁路路基的动态响应情况, 通过计算分析路基的振动速度以及各监测剖面的应力、应变。经分析可知, 铁路路基的最大振动为矿房 1 爆破时产生的, 最大振动点位于 1-1 剖面的铁路路基下部, 最大合速度为 3.412 cm/s, 三向最大速度为 3.392 cm/s, 为 Y 方向。而车站产生的振动最大值为矿房 2 爆破导致的, 车站合振速的最大值为 0.02005 cm/s, 为铁路路基底部振速。矿房爆破导致的铁路路基以及车站的振动速度均小于爆破安全允许振速。矿房 1 爆破时, 1-1 剖面出现应力最大值, 最大主应力最大值为 8108.17 Pa, 最小主应力最大值为 12409.1 Pa, 最大剪应力值为 5955.34 Pa, 所有应力值均不会导致路基出现破坏现象。而矿房 2 爆破时, 路基的 2-2 剖面产生的应力值最大, 但最大应力值均小于矿房 1 爆破时 1-1 剖面路基所产生的应力值。路基和车站在矿房爆破作用下产生的最大剪应变值为 $2.58 \times 10^{-4} \varepsilon$, 由于车站距离较远, 因而产生的应变值非常小, 在此情况下, 路基和车站不会产生明显的变形。

关键词: 矿山爆破; 爆破振动; 铁路路基; 数值模拟; 安全分析

中图分类号: TD235; U24

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)02-0179-07

Numerical Simulation Study on Safety of Overlying Railway caused by Orebody Mining Blasting

CHU Fu-jiao¹, DUAN Yu-de², LI Gong-cheng¹, WANG Zuo-ping², WEI Zhi-peng¹, ZHANG Lian-xin³

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology,

Zibo 255000, China; 2. Shandong Dongping Hongda Mining Co., Ltd., Taian 271000, China;

3. Shandong Shengxin Mining Co., Ltd., Taian 271000, China)

Abstract: In view of the influence of blasting vibration on railway safety in the mine room blasting of I-1 orebody, a numerical model of the orebody and railway subgrade was established to evaluate the safety of existing railway subgrade and station. According to the location relationship of the mine room 1 and 2, the sections of 1-1, 2-2 and 3-3 were set on the adjacent railway subgrade to monitor the dynamic response. Specifically, the vibration speed, the stress and the strain of each monitoring profile were calculated and analyzed. Analysis shows that the maximum vibration of the railway subgrade is caused by the blasting of mining room 1, the maximum vibration point is located under the railway subgrade of section 1-1, the maximum resultant velocity is 3.412 cm/s and the maximum three-direction velocity is on the Y direction which is 3.392 cm/s. More importantly, the maximum vibration of the station is caused by the blasting of the mining room 2, and the maximum resultant vibration velocity of the station is 0.02005 cm/s, which is the bottom vibration velocity of the railway subgrade. Meanwhile, the vibration velocity of the railway subgrade and station caused by mine room blasting is less than the allowable vibration velocity of blasting safety. During the blasting of mine room 1, the maximum stress occurs on section 1-1. More precisely, the maximum principal

stress is 8108.17 Pa, the maximum value of the minimum principal stress is 12409.1 Pa, the maximum shear stress is 5955.34 Pa. However, all stress values do not cause damage to the subgrade. For another, during the blasting of mine room 2, the stress value of section 2-2 of subgrade is the largest. But the maximum stress values are all less than the stress values generated by the 1-1 section subgrade during the blasting of Mine room 1. Besides, the maximum shear strain value generated by the subgrade and station under the mine room blasting is $2.58 \times 10^{-4} \epsilon$. It is very small, because the station is far away. In this case, the subgrade and station will not produce obvious deformation.

Key words: mine blasting; blasting vibration; railroad bed; numerical simulation; safety analysis

如今大多数金属矿山采用爆破的方式进行开采,但是,炸药在爆炸时会产生巨大的能量,其中一部分能量会以地震波的形式传播到地面,在爆区范围内,会对地面建筑设施的安全产生影响^[1,2],因此,正确的评估爆破时对地面建筑设施的影响是十分重要的。

目前,地下矿山爆破时对地面建筑的安全影响引起许多学者的关注,陈永伟通过三维动力数值及萨道夫斯基经验公式计算得出路堑开挖爆破时对铁路路基的质点峰值振动速度的最大值^[3],根据经验公式与数值计算得到的质点峰值振动速度均小于规程,可以保证既有铁路路基安全。V Graizer认为^[4],低速率带和地质地貌是振动放大效应的主要原因。S Spyros等利用有限元程序模拟软件模拟了爆破振动波在地形中的传播^[5],获得了到达时间以及域内特定点的正负相位持续时间关系;孙秀民等根据路堑边坡及现场爆破振动所测得的数据^[6],经数学回归分析处理,得到爆破震动传播经验公式,根据所得公式计算出不同距离出的建筑物振动速度,参照相关规程对爆破时周围民用建筑的安全进行评价,同时给出了爆破振动安全的允许距离。J Torano等综合考虑不同介质、装药量、起爆顺序等因素^[7],通过建立三维有限元模型研究了隧道爆破振动速度分规律。叶明班等基于背景工程结合岩质边坡下部台阶爆破开挖进行现场振动监测^[8],建立了岩质边坡动力响应数值计算模型,系统分析了边坡岩体质点峰值振速、应力场及位移场的变化和分布规律。于德海等通过三维有限元程序仿真模拟以及工程现场动态监测对比^[9],研究爆破振动对既有构筑物的动力响应问题。

国内外学者在研究爆破振动对构筑物影响方面已取得了一系列成果,但是,针对地下爆破对地铁路基的安全影响所作的研究却不多。结合某矿山 I-1

矿体矿房爆破回采矿石时爆破振动对铁路安全的影响,利用三维数值模拟方法建立矿体和铁路路基的数值模型,对矿体爆破时路基的动态响应情况进行分析,获取矿房爆破时铁路路基以及车站的振动速度、路基应力以及应变等数据,分析 I-1 矿体回采爆破对既有铁路线及车站的安全影响。

1 项目概况

某矿地形为冲洪积平原区,矿山北部约 1.3 km 处地表有铁路通过。矿山内矿体大部分赋存于 -40 m 标高以下,按矿体顺序,主要有 I-2、I-1、II-1、III 矿带、IV 矿带。其中 I-1 矿带距离北部铁路较近,最小水平距离仅 327 m,如图 1 所示。I-1 对铁路及车站安全起主要影响,矿体设计采用分段凿岩阶段矿房嗣后充填采矿法。企业北部铁路主要考虑的影响范围为 DK900+750~DK904+250。

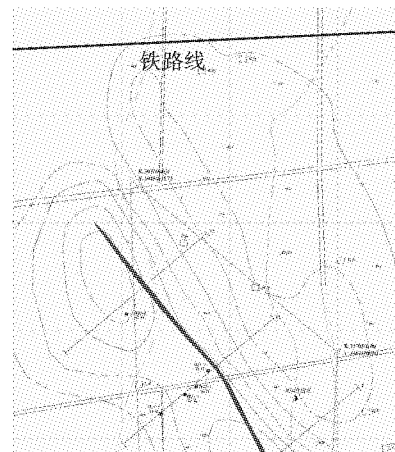


图 1 矿体与铁路位置关系图

Fig. 1 The location between orebody and railway

采用地震波安全距离计算最大药量^[10]。

$$R = (K/V)^{1/\alpha} Q^{1/3} \quad (1)$$

式中:R 为测点至爆源的中心距离,铁路路基按距离爆源最近距离取 327 m,地表建筑按距离爆源最近距离取 150 m;K、 α 为与介质场区条件等有关的待定常数,根据当地岩性为中硬岩石,参考类似矿山,K 取 200, α 取 1.75;V 为质点最大允许速度,铁路路基

收稿日期:2022-02-27

作者简介:褚夫蛟(1988-),男,汉族,山东枣庄人,博士、讲师,从事
矿山安全、控制爆破研究,(E-mail) zchufuj@sina.com。

基金项目:国家自然科学基金(51904177)

取 3.5 cm/s;地表建筑的村落中仍存在土坯墙,按较差民房取 1 cm/s; Q 为每次爆破或单段最大药量。

采用上向扇形中深孔爆破,对矿体厚度 10 m,分段高度 17 m 的标准采场进行布置计算,炮孔结构布置如图 2 所示。图中每排 10 个炮孔,炮孔合计 129.4 m,其中最深孔 19.8 m,装药长度 94.5 m,装药系数 0.73,其中最装药长度 15.4 m,单孔最大装药量 43.6 kg,单排装药量 267.4 kg。

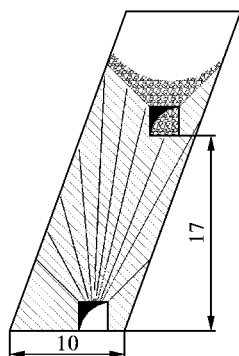


图 2 扇形中深孔结构布置图(单位:m)

Fig. 2 Layout of deep hole structure(unit:m)

表 1 工业和商业建筑物爆破振动安全允许标准

Table 1 Safety allowable standard for blasting vibration

频率/Hz	安全允许质点振动速度/(cm·s ⁻¹)
$f \leq 10$	2.5 ~ 3.5
$10 \leq f \leq 50$	3.5 ~ 4.5
$f > 50$	4.2 ~ 5.0

注:硐室爆破 f 小于 20 Hz,露天深孔爆破 f 在 10 ~ 60 Hz 之间,露天浅孔爆破 f 在 40 ~ 100 Hz 之间,地下深孔爆破 f 在 30 ~ 100 Hz 之间,地下浅孔爆破 f 在 60 ~ 300 Hz 之间(下同)。

表 2 铁路路基相关爆破振动安全允许值

Table 2 Safety allowable value of blasting vibration related to railway roadbed

频率/Hz	有砟轨道路基的爆破 振动速度允许值/ (cm·s ⁻¹)	无砟轨道路基的爆破 振动速度允许值/ (cm·s ⁻¹)	圆管涵、整体式箱涵 的爆破振动速度允许值/ (cm·s ⁻¹)	混凝土盖板涵的箱涵 爆破振动速度允许值/ (cm·s ⁻¹)
$f \leq 10$	5 ~ 6	3 ~ 4	4 ~ 5	3 ~ 4
$10 \leq f \leq 50$	6 ~ 7	4 ~ 5	5 ~ 6	4 ~ 5
$f > 50$	7 ~ 8	5 ~ 6	6 ~ 7	5 ~ 6

2.1.2 爆破荷载设置

目前对隧道爆破振动影响的研究中,关于爆破冲击荷载的相关参数尚无较为完善的方法和理论加以确定。结合前人研究,采用美国 National Highway Institute 里提及的公式^[14]。爆破荷载计算公式如下

$$P_{det} = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times \gamma \times V_e^2}{1 + 0.8\gamma} \quad (2)$$

由于矿房爆破回采属于地下深孔爆破, $f = 30 \sim 100$ Hz,同时测定质点振动相互垂直的三个分量,得质点振动速度为三分量中的最大值,由表 1、表 2 可知^[11,12],取铁路工程的爆破振动速度安全允许标准为 3.5 cm/s。铁路路基从上至下由 A 组填料、改良土、路基本体、碎石垫层组成,根据相关资料,以各组成材料的强度作为强度标准。

2 数值模拟

2.1 计算模型和参数

2.1.1 模型尺寸和网格划分

车站是生产的基地,集中了与行车有关的技术设备,人员密集,人口流量大,路基是轨道或者路面的基础,为列车运行提供必要条件,保证铁路路基及车站的安全是必要的,在矿房 1 及矿房 2 爆破回采矿石时,对铁路路基及车站的安全有影响,因此,数值计算以铁路路基和车站作为研究对象,选取 K907 + 892.88 (DK900 + 750) ~ K909 + 894.88 (DK902 + 752) 段路基以及最近距离的矿房,通过施加爆破荷载获取铁路路基的动态响应情况,建立如图 3 所示几何模型。距离路基最近的为矿房 1,距离车站最近的为矿房 2,矿房 1 与路基最近距离约 327 m,与车站距离约为 1810 m,矿房 2 与路基最近距离约 1030 m,与车站距离约为 1654 m。通过设置单元尺寸以及软件自动划分网格功能,建立数值计算模型如图 4 所示^[13],模型包含 95577 个单元,47842 个节点。为最大限度获得爆破振动,从极限角度出发,减小软弱地层对爆破地震波造成的衰减作用,模型不设地表黄土层。

$$P_B = P_{det} \left(\frac{d_c}{d_h} \right)^3 \quad (3)$$

$$P_D(t) = 4P_B \left[\exp\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2}Bt) \right] \quad (4)$$

式中: P_{det} 为爆破压力; P_B 为孔壁面上的压力; $P_D(t)$ 为爆破压力的时程函数; V_e 为爆轰速度; d_c 为炸药直径; d_h 为炮孔直径; γ 为比重; B 为荷载常量。

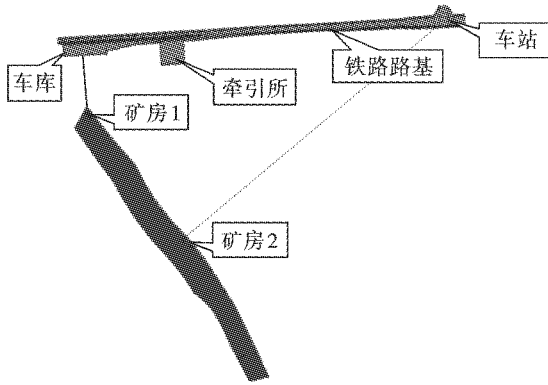


图3 I-1号矿体与铁路路基空间位置关系
Fig. 3 Spatial position relationship between I-1 orebody and railway roadbed

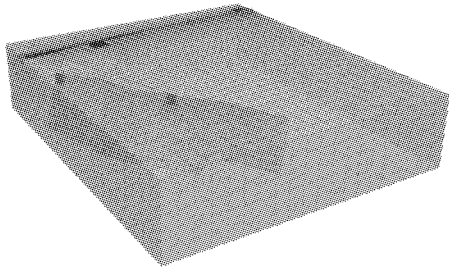


图4 数值计算模型
Fig. 4 Numerical calculation model

结合矿山采矿的爆破设计方案,通过计算得到爆破时程荷载如图5,数值计算模型所用的主要物理力学性能参数见表3。

2.2 铁路路基动态响应分析

根据矿房1和矿房2的位置关系,以与两矿房

邻近的铁路路基作为研究对象,同时监测车站的动态响应情况,设置1-1、2-2、3-3剖面,其中矿房1爆破时主要监测1-1、3-3剖面,矿房2爆破时主要监测2-2、3-3剖面,如图6所示。对于各剖面,设置4个监测点(如图7所示),主要监测各点位的质点振动速度,以此来表征其动态响应情况。

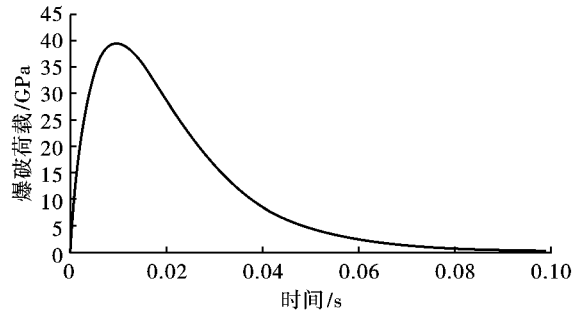


图5 爆破荷载时程曲线
Fig. 5 Blasting load time history curve

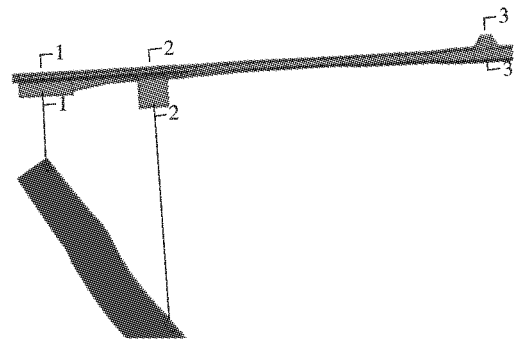


图6 监测剖面设置
Fig. 6 Monitoring profile setting

表3 主要物理力学性能参数

Table 3 Main physical and mechanical parameters

材料	密度/(g·cm ⁻³)	弹模/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/°
A组填料	1920.00	340.00	0.30	21.80	22.00
改良土	1900.00	120.00	0.30	45.00	25.00
路基本体	1850.00	60.00	0.30	60.00	25.00
碎石	1950.00	190.00	0.30	80.00	25.00
围岩	2680.00	28 964.00	0.25	900.00	36.47
矿体	3180.00	23 748.00	0.33	430.00	32.90

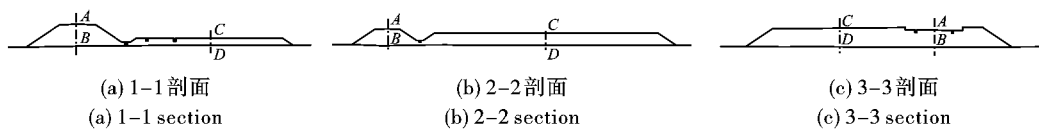


图7 剖面测点位置图

Fig. 7 Section survey point location map

2.2.1 速度响应分析

根据《爆破安全规程》,提取各测点的振动速度峰值,见表4所示。(各测点的名称以“剖面-测点”的

方式命名,如“1-A”测点表示1-1剖面的测点A)。

从表4可以看出,最大振动测点位于1-1剖面的铁路路基下部,此时为矿房1爆破导致的,最大合

速度为 3.412 cm/s,三向最大速度为 3.392 cm/s,为 Y 方向,即为南北向。而 1-1 剖面在矿房 1 爆破时所有测点的最大振动速度方向均为 Y 方向,其数值

分别为 A 点:2.173 cm/s,B 点:3.392 cm/s,C 点:2.658 cm/s,D 点:2.303 cm/s。

表 4 矿房 1、2 爆破各测点振动速度峰值(单位:cm/s)
Table 4 Peak value of vibration velocity at each measuring point(unit:cm/s)

测点	V1/ (cm·s ⁻¹)	VX1/ (cm·s ⁻¹)	VY1/ (cm·s ⁻¹)	VZ1/ (cm·s ⁻¹)	V2/ (cm·s ⁻¹)	VX2/ (cm·s ⁻¹)	VY2/ (cm·s ⁻¹)	VZ2/ (cm·s ⁻¹)
1-A	2.174000	-0.091190	2.173000	-0.195500	—	—	—	—
1-B	3.412000	-0.263400	3.392000	-0.601600	—	—	—	—
1-C	2.661000	-0.219100	2.658000	-0.161400	—	—	—	—
1-D	2.481000	-0.202800	2.303000	1.001000	—	—	—	—
2-A	—	—	—	—	0.289100	-0.031730	0.286600	0.022100
2-B	—	—	—	—	0.230500	0.010340	0.229700	0.022330
2-C	—	—	—	—	0.204600	0.009522	-0.203400	0.031880
2-D	—	—	—	—	0.208300	0.011880	-0.207700	0.034430
3-A	0.008614	-0.004080	0.008546	0.000920	0.017210	-0.006750	0.016890	0.001874
3-B	0.009665	0.008888	0.008157	0.001026	0.020050	0.010760	0.017470	-0.004200
3-C	0.010200	0.009607	0.007211	0.001189	0.019280	-0.012450	0.015060	0.000415
3-D	0.009582	0.009063	0.007298	0.001081	0.018910	0.011770	0.015350	0.000267

从表 4 中可以看出,车站在矿房 1 爆破时所产生的振动最小,最大合振动速度仅为 0.0102 cm/s,三向最大振动速度为 X 方向,仅有 0.009607 cm/s。

矿房 2 爆破时,距离铁路路基约 1000 m,为矿房 1 与铁路路基距离的 3 倍,此时导致的路基振动速度明显低于矿房 1 爆破导致的振动,最大合振动速度为 0.2891 cm/s,三向最大振动速度为 Y 方向。与矿房 1 爆破导致的路基最大振动速度方向一致,各测点的最大振动速度方向均为 Y 方向。而此时矿房 2 距离车站约 1650 m,车站的合振动速度最大值为 0.02005 cm/s,为铁路路基底部振动速度。

从以上数据及分析可以看出,两种工况导致的最小振动速度出现在了矿房 1 爆破时铁路路基测点,最小振动速度为矿房 1 爆破时车站位置,各测点振动速度均小于确定的爆破安全允许质点振动速度。

2.2.2 应力分析

提取 1-1 剖面、2-2 剖面的应力云图,如图 8、9 所示,各工况下应力最大值出现在了矿房 1 爆破时的 1-1 剖面,其中最大主应力最大值为 8108.17 Pa,为拉应力,最小主应力最大值为 12409.1 Pa,为压应力,最大剪应力最大值为 5955.34 Pa,均位于非铁路路基即维修办公区域基础的底部,且最大应力值小于路基各材料的抗压、抗拉和抗剪强度。矿房 1 爆破时,由于车站距离较远,所产生的应力最大不超过 100 Pa。矿房 2 爆破时,2-2 剖面路基产生的应力最大值均小于矿房 1 爆破时 1-1 剖面路基所产生的应力值。而矿房 2 爆破时位于车站的 3-3 剖面

应力值最大不超过 150 Pa。由此可知矿房 1、矿房 2 爆破时,路基所受的爆破冲击均小于自身强度,所受扰动较小,路基结构相对稳定。



(a) 最大主应力
(a) Maximum principal stress



(b) 最小主应力
(b) Minimum principal stress



(c) 剪切应力
(c) Shearing stress

图 8 矿房 1 爆破 1-1 剖面应力云图

Fig. 8 Stress cloud map of blasting section 1-1 in mine room 1

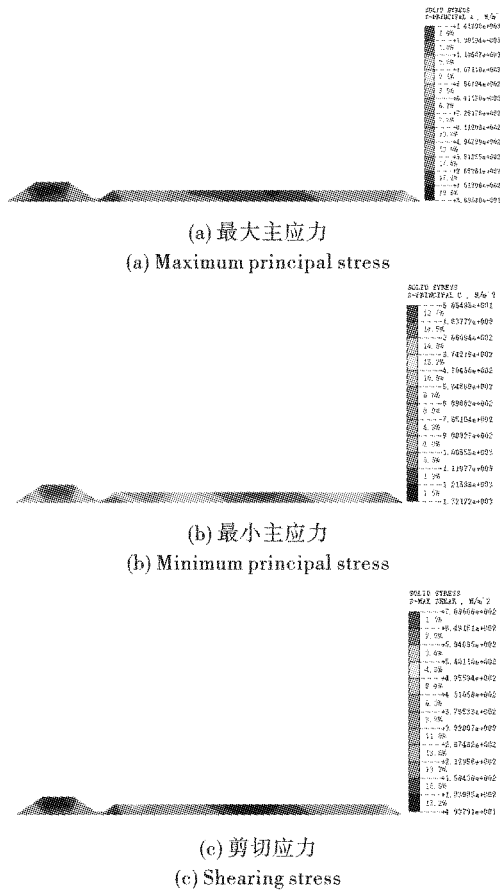


图 9 矿房 2 爆破 2-2 剖面应力云图
Fig. 9 Stress cloud map of blasting section 2-2 in mine room 2

2.2.3 应变分析

提取不同工况下各监测剖面的应变云图,如图 10 所示。矿房 1 爆破时的 1-1 剖面最大剪应变值仅为 $2.58 \times 10^{-4} \epsilon$, 变形较小。车站最大剪切应变值仅有 $1.15 \mu\epsilon$, 所受影响非常轻微。矿房 2 爆破时, 2-2 剖面路基剪切应变最大值仅有 $30.59 \mu\epsilon$, 车站的最大剪应变值仅为 $2.47 \mu\epsilon$, 由此可知矿房 1、矿房 2 爆破时, 路基所受的爆破冲击均小于自身强度, 所受扰动较小, 路基结构相对稳定。

3 结论

(1) 通过对各测点速度峰值的监测, 分析得出矿房 1 爆破时铁路路基产生的振动速度最大, 这是由于矿房 1 距离路基最近的原因导致的。而导致车站振动速度达到最大值是由矿房 2 爆破引起的。尽管如此, 两种矿房爆破工况下产生的震动速度最大值均不超过《爆破安全规程》及《铁路工程爆破振动安全技术规程》规定的允许速度。

(2) 通过应力分析可知矿房 1 爆破时, 1-1 剖面路基出现了应力极值, 且均位于非铁路路基, 所有应力值均小于材料自身强度。矿房 2 爆破时车站所受应力较大, 但其应力值最大不超过 150 Pa。由于应力值较小, 即使出现了应力集中现象, 仍然不能导致出现破坏现象。

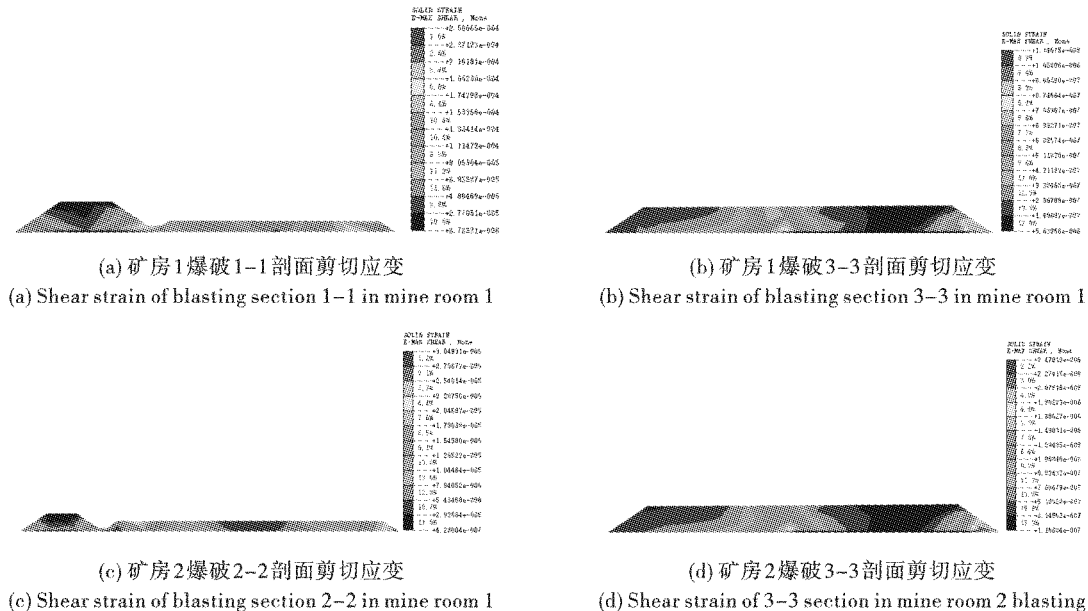


图 10 不同工况下各监测剖面的应变云图

Fig. 10 Strain cloud images of each monitoring profile under different working conditions

(3) 通过应变分析可知矿房 1 爆破时, 路基产生的最大剪切应变仅为 $2.58 \times 10^{-4} \epsilon$ 。矿房 2 爆破时车站所受应变较大, 最大剪应变值仅为 $2.47 \mu\epsilon$ 。

通过模拟结果可知, 铁路路基及车站在爆破荷载作用下, 剪切应变较小, 路基结构不会发生明显的变化。

参考文献(References)

- [1] 杨凯,吕淑然,董华兴. 地下采矿爆破振动对地面环境影响的监测与分析[J]. 金属矿山,2013(10):144-147.
- [1] YANG Kai, LU Shu-ran, DONG Hua-xing. Monitoring and analysis of impact of blast vibration on ground environment in underground mining[J]. Metal Mine, 2013(10): 144-147. (in Chinese)
- [2] ROY M P, SINGH P K, SARIM MD, et al. Blast design and vibration control at an underground metal mine for the safety of surface structure [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2016, 83: 107-115.
- [3] 陈永伟. 路堑爆破开挖对既有铁路路基振动影响研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(3): 61-64.
- [3] CHEN Yong-wei, Vibration influence of road cutting blasting excavation on existing railway subgrade [J]. Railway Survey, 2021, 47(3): 61-64. (in Chinese)
- [4] GRAIZER Vladimir. Low-velocity zone and topography as a source of site amplification effect on Tarzana hill, California [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(2): 324-332.
- [5] SKLAVOUNOS S, RIGAS F. Computer simulation of shock waves transmission in obstructed terrains [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(6): 407-417.
- [6] 孙秀民,汪进玉. 爆破振动对建筑物的影响评价研究[J]. 爆破, 2008(2): 73-76, 88.
- [6] SUN Xiu-min, WANG Jin-yu, Evaluation of blasting vibration effects on buildings [J]. Blasting, 2008(2): 73-76, 88. (in Chinese)
- [7] TORANO J, RODRIGUEZ R, DIEGO I. FEM models including randomness and its application to the blasting vibration prediction [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(1): 15-28.
- [8] 叶明班,高文学,曹晓立,等. 爆炸荷载下岩质边坡动力响应规律研究[J]. 爆破, 2019, 36(4): 31-36, 118.
- [8] YE Ming-ban, GAO Wen-xue, CAO Xiao-li, et al. Dynamic response law of rock slope under explosive loading [J]. Blasting, 2019, 36(4): 31-36, 118. (in Chinese)
- [9] 于德海,秦凯凯. 地铁下穿既有铁路桥的爆破动力响应分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(8): 3302-3307.
- [9] YU De-hai, QIN Kai-kai. The dynamic effect analysis of the blasting to the existing structures in subway tunnel [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(8): 3302-3307. (in Chinese)
- [10] 邢恩达,曹丽,卢斌强. 露天矿高边坡爆破振动监测与衰减规律分析[J]. 科技通报, 2021, 37(9): 90-93, 117.
- [10] XING En-da, CAO Li, LU Bin-qiang. Blasting vibration monitoring and attenuation analysis of high slope in open-pit mine [J]. Bulletin of Science and Technology, 2021, 37(9): 90-93, 117. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [11] National Standard of P R China. GB6722—2014 Safety regulations for blasting [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国国家标准. TB 10313—2019《铁路工程爆破振动安全技术规程》[S]. 北京: 国家铁路局, 2019.
- [12] National Standard of P R China. TB10313—2019 Safety technical specification for blasting vibration of railway engineering [S]. Beijing: National Railway Administration, 2019. (in Chinese)
- [13] BERNAL D. Viscous damping in inelastic structural response [J]. Struct Eng, 1994, 120(4): 1240-1254.
- [14] XIA Yu-qing, JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, et al. Theoretical solution of the vibration response of the buried flexible HDPE pipe under impact load induced by rock blasting [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 146: 106734.

英文编辑: 陈东方

(上接第158页)

- [15] 黄智刚,吕虎波,林一庚,等. 基于CEEMDAN-MPE算法的隧道爆破地震波信号降噪方法及应用[J]. 爆破, 2020, 37(4): 138-144.
- [15] HUANG Zhi-gang, LV Hu-bo, LIN Yi-geng, et al. Denoising method of tunnel blasting seismic wave signal based on CEEMDAN-MPE algorithm and its application [J]. Blasting, 2020, 37(4): 138-144. (in Chinese)
- [16] 彭亚雄. 水下钻孔爆破地震波与水击波协同作用下桥墩动力响应特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
- [16] PENG Ya-xiong. Study on the dynamic responses of bridge piers under the synergistic effects of seismic wave and water shock wave induced by the underwater drilling and blasting [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)
- [17] 孙远,杨峰,郑晶,等. 基于变分模态分解和小波能量熵的微震信号降噪[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(6): 469-479.
- [17] SUN Yuan, YANG Feng, ZHENG Jing, et al. Research on microseismic signal denoising based on variational mode decomposition and wavelet energy entropy [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(6): 469-479. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方