

深埋隧洞爆破开挖地应力瞬态卸荷诱发围岩 振动控制方法研究

杨建华¹, 吴泽南¹, 蒋水华¹, 姚池¹, 卢文波², 周创兵¹

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 爆破引起的开挖面上岩体地应力快速释放是深埋洞室爆破施工主要动力扰动因素之一。针对深埋圆形隧洞全断面毫秒延迟爆破开挖过程, 分析开挖面上地应力瞬态卸荷诱发围岩振动的力学机制及其影响因素, 在此基础上从掏槽方式选择、孔网参数布置、起爆网路优化的角度详细探讨诱发振动的控制方法。研究表明, 通过设计合理的钻爆参数可降低开挖面上的地应力、延长卸荷持续时间、减小开挖面的大小, 从而达到控制地应力瞬态卸荷诱发围岩振动的目的。研究成果对深地资源开采、深地空间开发利用等相关行业的深埋洞室爆破施工具有一定的指导作用。

关键词: 爆破力学; 深埋隧洞; 爆破; 地应力; 瞬态卸荷; 振动控制

中图分类号: TD 23

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)12 - 2751 - 11

Study on controlling methods for transient unloading inducing rock vibration due to blasting excavation of deep tunnels

YANG Jianhua¹, WU Zenan¹, JIANG Shuihua¹, YAO Chi¹, LU Wenbo², ZHOU Chuangbing¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: During blasting excavation of deep tunnels, the rapid in-situ stress release occurring on blast-created free surfaces is one of the major dynamic disturbances. For a deep circular tunnel which is excavated with the full-face millisecond-delay blasting method, the mechanism and influence factors of rock vibration induced by the transient unloading was analyzed, and vibration control methods were discussed in detail from the perspectives of cutting modes, blasthole arrangements and initiation sequences. The results show that properly designing drilling and blasting parameters can reduce initial stress levels on the excavation surfaces, prolong the duration of the transient unloading and reduce sizes of the excavation surfaces, and that, as a result, rock vibration induced by the transient unloading can be effectively controlled. The research work can be applied to blasting construction of deep tunnels in the industries of deep resource exploitation and deep space utilization.

Key words: blasting mechanics; deep tunnels; blasting; in-situ stresses; transient unloading; vibration controlling

收稿日期: 2018 - 06 - 01; **修回日期:** 2018 - 08 - 01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509126, U1765207); 江西省自然科学基金项目(20181BAB206047)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51509126 and U1765207) and Jiangxi Provincial Natural Science Foundation(Grant No. 20181BAB206047)

作者简介: 杨建华(1986 -), 男, 博士, 2009年毕业于武汉大学水利水电工程专业, 现任副教授, 主要从事岩石动力学及工程爆破方面的研究工作。E-mail: yangjianhua86@ncu.edu.cn。通讯作者: 蒋水华(1987 -), 男, 现任副教授。E-mail: sjiangaa@ncu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0570

1 引言

我国经济社会发展巨大的资源消耗使得浅部资源开采已趋于殆尽，千米级深部资源开采已成为常态^[1]。目前地表自然灾害频发、环境恶化、城市综合症等问题日益突出，深地空间开发与利用将成为人类未来活动的趋势，也是人类可持续发展的主要途径^[2]。进入地下深部后，岩体地应力作用将更加凸显，据地应力实测结果，在1 000~5 000 m深度岩体应力可达到50~135 MPa^[1]。

钻孔爆破是目前及未来相当长一段时间内深部岩体开挖的主要手段。对于深部岩体爆破开挖，伴随着炸药爆轰、岩体破碎及新开挖自由面的形成，开挖面上的地应力在岩体爆破破碎瞬间也随之突然释放^[3]。相关研究已经表明，该地应力瞬态卸荷过程会在岩体中诱发地震波，引起围岩及周围建(构)筑物振动^[4-8]。M. N. Toksöz 和 H. H. Kehr^[4]在研究地下核爆炸引起的地表振动时发现，岩体构造应力快速释放诱发地震波引起的地表振动在有些情况下甚至超过了爆炸地震波产生的地表振动；卢文波等^[5-6]在研究水电工程深埋洞室爆破开挖引起的围岩振动时也发现了开挖面上地应力瞬态卸荷诱发地震波的力学现象，并就瞬态卸荷诱发围岩振动的识别和传播衰减规律等问题开展了系列研究；X. B. Li 等^[7-8]研究了地应力瞬态卸荷诱发围岩振动的强度影响因素及诱发地震波与相邻隧洞的相互作用问题。此外，国内外其他一些学者在研究岩爆、矿震、分区破裂化等深部岩体开挖变形破坏现象时也揭示了地应力瞬态释放的动力扰动效应^[9-13]。尽管近年来国内外对深部岩体爆破开挖地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动已有所观测和认识，但在诱发振动的控制方面还缺乏深入系统的研究，难以指导深部岩体工程爆破实践。

本文针对深埋圆形隧洞全断面毫秒延迟爆破开挖典型的炮孔布置和装药参数，简要分析爆破开挖面上地应力瞬态卸荷诱发围岩振动的机制及影响因素；在此基础上从掏槽方式、孔网参数、起爆网路优化的角度提出深埋隧洞爆破开挖地应力瞬态卸荷诱发围岩振动的控制方法。

2 地应力瞬态卸荷诱发围岩振动机制

2.1 分析模型

为改善岩石破碎条件、控制开挖轮廓以及提高

掘进效率，隧洞全断面钻爆开挖时，按作用原理、布置方式及有关参数的不同，开挖断面上布置的炮孔往往分成掏槽孔、崩落孔和周边孔3类。这3类炮孔通过毫秒延迟雷管实现顺序起爆，先起爆的炮孔为后起爆的炮孔创造自由面，减小岩石的夹制作用。图1为圆形隧洞全断面开挖典型的炮孔布置与起爆顺序，数字1~6表示炮孔起爆顺序， p_0 为竖向地应力， κ 为侧压力系数，炮孔布置及起爆网路参数详见表1。本文以图1圆形隧洞开挖为例，分析爆破开挖面上地应力瞬态卸荷力学过程及诱发振动的影响因素和控制方法。

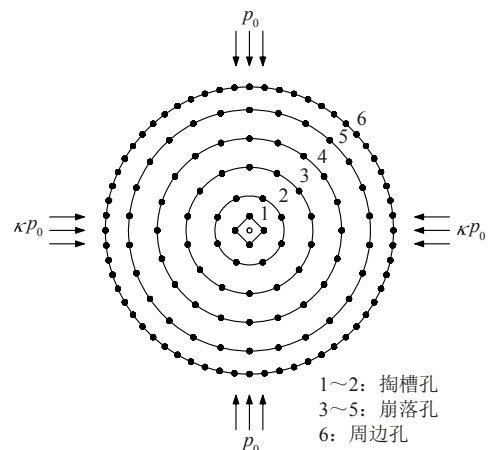


图1 圆形隧洞全断面爆破开挖典型的炮孔布置与起爆顺序
Fig.1 Typical blasthole layout and initiation sequence for full-face blasting excavation of a circular tunnel

表1 圆形隧洞全断面爆破开挖炮孔布置参数

Table 1 Parameters of blasthole layout for the full-face blasting excavation of a circular tunnel

起爆顺序	炮孔类型	炮孔间距/m	至隧洞中心距离/m	雷管段别	理论延迟时间/ms
1	掏槽孔	0.7	0.5	MS1	0
2	掏槽孔	0.8	1.2	MS3	50
3	崩落孔	1.0	2.2	MS5	110
4	崩落孔	1.0	3.2	MS7	200
5	崩落孔	1.0	4.2	MS9	310
6	周边孔	0.5	5.0	MS11	460

2.2 地应力瞬态卸荷力学过程

不考虑雷管延时误差，假定同一圈内的炮孔同时起爆，相邻炮孔爆破产生的爆炸应力波和爆生气体驱动岩体裂纹优先在相邻炮孔连线方向上扩展，如图2所示。当炮孔间的裂纹完全贯通、形成新的开挖面时，开挖面上的法向地应力也随之释放。因此，爆破开挖面上地应力卸荷持续时间约等于相邻炮孔间裂纹贯穿所需的时间。对于柱状装药炮孔从孔底起爆的情况，如图3所示，考虑爆轰波沿炮孔

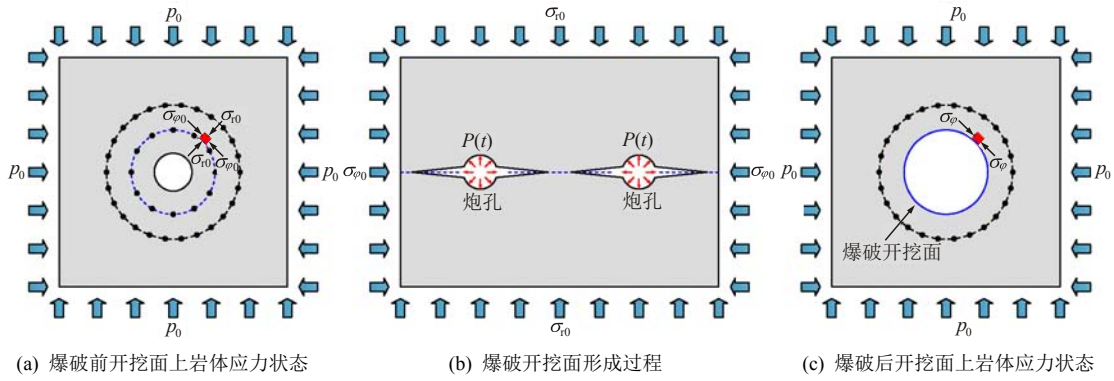


图 2 爆破开挖面上地应力瞬态释放示意图

Fig.2 Schematic diagram of the transient release of in-situ stress on blast-created free surfaces

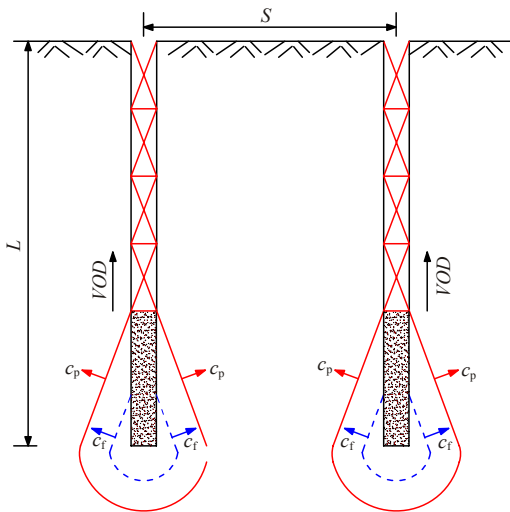


图 3 相邻炮孔间爆炸应力波及爆生裂纹传播过程示意图
Fig.3 Schematic diagram of blast-induced stress wave and crack propagation between adjacent blastholes

轴向传播，爆炸应力波在炮孔周围岩体中以锥形的马赫波向外传播，则开挖面上地应力卸荷持续时间可采用下式^[6]进行估算：

$$t_d = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2}S\right)^2 + L^2}}{c_f} \quad (1)$$

式中： t_d 为卸荷持续时间； S 为相邻炮孔的间距； L 为炮孔长度； c_f 为裂纹扩展的平均速度，为 $(0.2 \sim 0.3)c_p$ ， c_p 为岩体纵波速度。

取 $L = 3.0 \text{ m}$ ， $c_f = 0.25c_p$ ， $c_p = 4600 \text{ m/s}$ ，则图 1 中各圈炮孔爆破时开挖面上地应力卸荷持续时间为 $2.60 \sim 2.70 \text{ ms}$ 。爆炸荷载的作用时间约为几百微秒，应力波穿过相邻两圈炮孔之间的岩体所需的时间不超过 1 ms ，而图 1 中相邻两圈炮孔爆破的延迟时间至少为 50 ms 。这表明，某一圈炮孔起爆前，前一圈炮孔爆破已形成新的圆形空腔，对应的开挖面上

的地应力已释放完成，则该圈炮孔爆破时开挖面上的初始地应力为前一圈炮孔爆破完成后重分布的二次应力。平面应变假定条件下，开挖面上的初始地应力^[5]为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r0} &= \frac{p_0}{2} [(1 + \kappa)(1 - \eta^2) - (1 - \kappa)(1 - 4\eta^2 + 3\eta^4) \cos(2\varphi)] \\ \sigma_{\varphi0} &= \frac{p_0}{2} [(1 + \kappa)(1 + \eta^2) + (1 - \kappa)(1 + 3\eta^4) \cos(2\varphi)] \\ \tau_{r\varphi0} &= \frac{p_0}{2} (1 - \kappa)(1 + 2\eta^2 - 3\eta^4) \sin(2\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： σ_{r0} ， $\sigma_{\varphi0}$ 和 $\tau_{r\varphi0}$ 分别为第 i ($i = 1 \sim 6$)段炮孔爆破时开挖面上的初始径向正应力、环向正应力和剪应力； $\eta = a_i/a$ ， a_i 和 a 分别为第 $i-1$ 和 i 段炮孔爆破后形成的圆形空腔半径； κ 为侧压力系数； φ 为极角。

假定岩体为线弹性材料，将开挖面上地应力瞬态卸荷过程分解为初始地应力状态和动态拉荷载的叠加^[14]。静水地应力场条件下 ($\kappa = 1$)，开挖面上地应力瞬态卸荷引起的围岩应力调整可采用 Laplace 变换及其逆变换^[3, 14]进行求解：

$$\sigma_r(r, t) = \sigma_{r0} + \frac{\sigma_{r0}}{2\pi i} \int_{Br} \frac{(2G/r)K_1(kr) + (\lambda + 2G)kK_1'(kr)}{(2G/a)K_1(ka) + (\lambda + 2G)kK_1'(ka)} f(s)e^{st} ds \quad (3)$$

$$\sigma_{\varphi}(r, t) = \sigma_{\varphi0} + \frac{\sigma_{r0}}{2\pi i} \int_{Br} \frac{(2G/r)K_1(kr) - \lambda kK_1'(kr)}{(2G/a)K_1(ka) + (\lambda + 2G)kK_1'(ka)} f(s)e^{st} ds \quad (4)$$

其中，

$$f(s) = (e^{-t_0 s} - 1) / (t_0 s^2)$$

$$k = s / c_p$$

$$c_p = \sqrt{(\lambda + 2G) / \rho}$$

式中： $\sigma_r(r, t)$ 和 $\sigma_\theta(r, t)$ 分别为径向应力和环向应力； ρ 为岩体密度； λ 和 G 为 Lamé 常数； i 为虚数单位； Br 为 Bromwich 围道积分路径； K_1 为第 2 类 1 阶 Bessel 函数； s 为 Laplace 变换参数。

取岩体密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量 $E = 50 \text{ GPa}$ 、泊松比 $\mu = 0.22$ 。以崩落孔 MS7 段爆破为例， $a_t = 2.2 \text{ m}$ ， $a = 3.2 \text{ m}$ ，因开挖面上地应力瞬态释放引起的围岩应力调整过程如图 4 所示。可以看到，开挖面上地应力快速释放引起了围岩应力波动，径向应力先减小后增加，最后趋于稳定的二次应力状态；相反，环向应力先增大后减小，最后稳定于二次应力状态。这种应力波自开挖面向外传播，势必会引起围岩的振动。

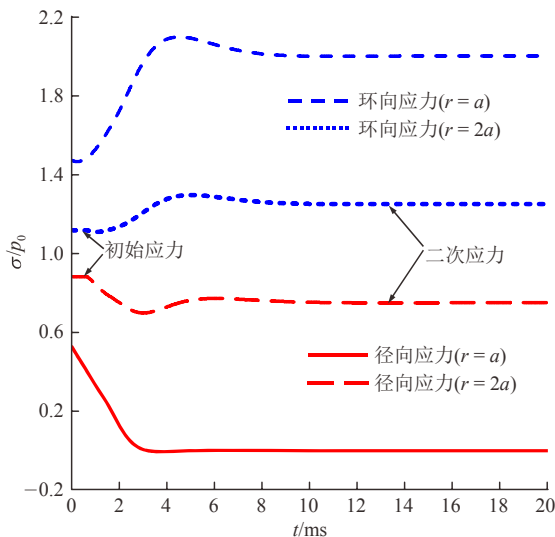


图 4 开挖面上地应力瞬态卸荷引起的围岩应力动态调整
Fig.4 Dynamic stress adjustment caused by the transient unloading on excavation surfaces

3 瞬态卸荷诱发围岩振动的影响因素

在上述力学模型中，瞬态卸载应力波传播引起的围岩径向质点振动速度 $v_r(r, t)$ 为

$$v_r(r, t) = \frac{\sigma_{r0}}{2\pi i} \int_{Br} \frac{sK_1(kr)}{(2G/a)K_1(ka) + (\lambda + 2G)kK_1'(ka)} f(s)e^{st} ds \quad (5)$$

可以看到，某一点(r 一定)的振动速度与开挖面上的初始应力 σ_{r0} 成正比，此外还与卸荷持续时间 t_d 和开挖面的半径 a 有关。图 5 给出了 $\sigma_{r0} = 10.5 \text{ MPa}$ 、 $a = 3.2 \text{ m}$ (MS7 段、 $p_0 = 20 \text{ MPa}$)时，不同卸荷持续时间条件下的径向质点峰值振动速度(PPV)

衰减曲线。可以看到，卸荷持续时间越短，诱发的振动速度越大，峰值振速随距离衰减越快。开挖面上的初始地应力和瞬态卸荷持续时间一定时($\sigma_{r0} = 10.5 \text{ MPa}$ ， $t_d = 2.7 \text{ ms}$)，不同半径的开挖面上地应力瞬态卸荷诱发的径向质点峰值振动速度衰减曲线如图 6 所示。随着开挖面半径的增大，质点峰值振动速度显著增加，峰值振速随距离衰减变缓。

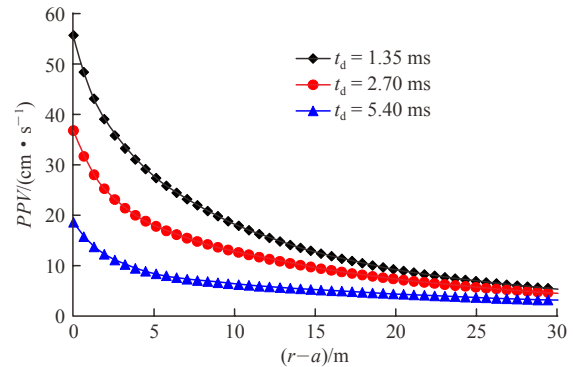


图 5 不同卸荷持续时间时的径向 PPV 衰减曲线
Fig.5 Attenuation curves of the radial PPV under different unloading durations

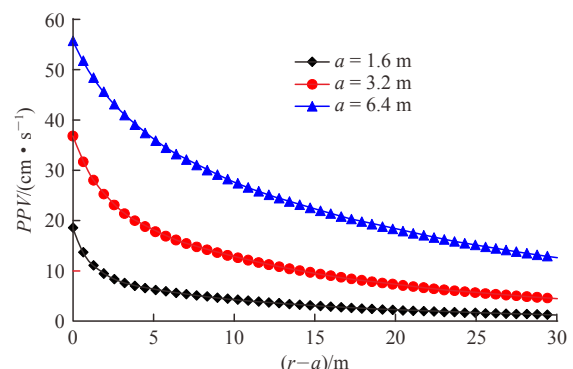


图 6 不同开挖面半径时的径向 PPV 衰减曲线
Fig.6 Attenuation curves of the radial PPV under different excavation radii

4 地应力瞬态卸荷诱发振动控制方法

基于以上分析，本节讨论如何从掏槽方式、孔网参数和起爆网络的优选上控制地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动。

4.1 掏槽方式选择

掏槽孔通常布置在开挖断面的中下部，是整个断面炮孔中首先起爆的炮孔。掏槽孔先在开挖掌子面上炸出一个槽腔，为后续炮孔的爆破创造新的自由面。按布孔形式，掏槽方式一般分为直孔掏槽和楔形掏槽。

直孔掏槽由若干个垂直于开挖掌子面的、彼此距离很近的炮孔组成，有时其中含有一个或几个不

装药的空孔。根据空孔的尺寸，直孔掏槽分为小直径空孔直孔掏槽和大直径空孔直孔掏槽，如图 7^[15]和 8^[15]所示。小直径空孔直孔掏槽的空孔直径与装药孔直径相同，大直径空孔直孔掏槽是充分利用大直径(75~100 mm)空孔作为装药孔爆破的辅助自由面和岩体破碎的膨胀空间，爆破后形成桶装槽腔。空孔直径越大，岩石破碎越充分，掏槽效果越好。因此，空孔直径宜大不宜小。但钻孔直径受现场钻孔设备和钻孔水平的限制，可采用数个小直径空孔代替一个大直径空孔，也能获得较好的掏槽效果，如图 7(b)所示的五梅花小直径中空直孔掏槽。

小直径空孔直孔掏槽常见的布置形式有小直径中空直孔掏槽、五梅花小直径中空直孔掏槽和螺旋掏槽，见图 7^[15]。小直径中空直孔掏槽中的第一段 4 个炮孔同时起爆，单响药量较大，爆破荷载引起的围岩振动相对较大；同时，1 个小直径空孔给装药孔爆破提供的自由面和膨胀空间有限，槽腔内的岩体破碎不够充分，更多的爆炸能以地震波的形式向外传播引起围岩振动。此外，相比于各个掏槽孔逐个起爆的情况，4 个掏槽孔同时起爆时，相邻炮孔

间爆生裂纹贯穿所需的时间更短，槽腔腔壁上的地应力释放更快，由此导致地应力瞬态卸荷引起的振动速度更大。因此，各个掏槽孔逐个起爆的五梅花小直径中空直孔掏槽(见图 7(b))和螺旋掏槽(见图 7(c))更有利于控制地应力瞬态卸荷引起的围岩振动。

大直径空孔直孔掏槽的基本类型有菱形掏槽、对称掏槽和双螺旋掏槽，如图 8^[15]所示。对称掏槽的第一段和第二段 2 个装药孔同时起爆、第三段 4 个装药孔同时起爆，相比于菱形掏槽 4 个装药孔依次起爆的情况，其爆生裂纹贯穿时间短、卸荷速率快，地应力瞬态卸荷引起的振动速度更大。菱形掏槽常用的炮孔布置尺寸为 $L_1 = (1.0 \sim 1.5)D$ ， $L_2 = (1.5 \sim 1.8)D$ ，而对称掏槽常用的炮孔布置尺寸为 $W = 1.2D$ ， $d = 0.7c$ ，对称掏槽第三段爆破对应的开挖面尺寸较大。由上文的分析可知，对称掏槽第三段爆破时地应力瞬态卸荷诱发的振动速度较大。双螺旋掏槽的各掏槽孔逐个起爆，与菱形掏槽情况类似。所以，大直径空孔直孔菱形掏槽和双螺旋掏槽在地应力瞬态卸荷诱发围岩振动的控制方面，效果相对较好，而对称掏槽的控制效果相对较差。

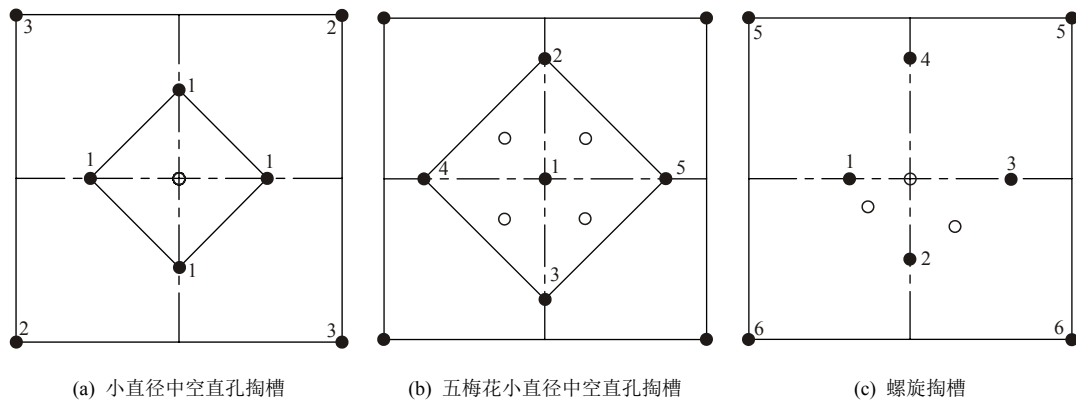


图 7 小直径空孔直孔掏槽布置形式^[15]

Fig.7 Blasthole layout for the parallel cut blasting with small-diameter empty holes^[15]

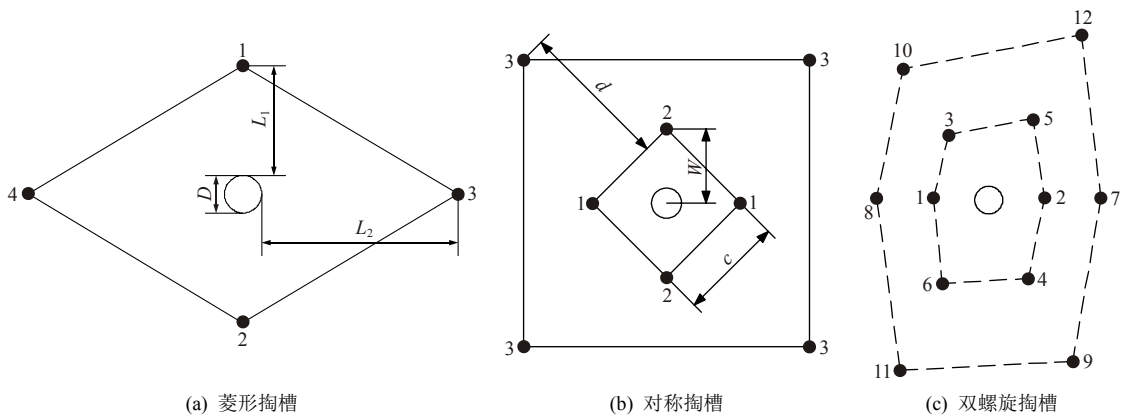


图 8 大直径空孔直孔掏槽布置形式^[15]

Fig.8 Blasthole layout for the parallel cut blasting with a large-diameter empty hole^[15]

楔形掏槽由2~4对对称的、相向倾斜的掏槽炮孔组成，掏槽孔的孔底夹角一般在60°，爆破后能形成楔形槽。楔形掏槽有单级楔形掏槽和多级复式楔形掏槽之分，开挖循环进尺较大时一般采用多级复式楔形掏槽，如二级复式楔形掏槽和三级复式楔形掏槽，如图9^[15]所示。采用多级复式楔形掏槽时，各级掏槽孔之间毫秒延迟爆破(延迟50 ms为宜)，槽腔内的开挖岩体逐级逐层破碎、抛掷，从而减小了开挖面上的地应力，这有利于减小地应力瞬态卸荷引起的围岩振动。因此，相比于单级楔形掏槽，多级复式楔形掏槽在控制瞬态卸荷诱发的围岩振动方面，效果更好。

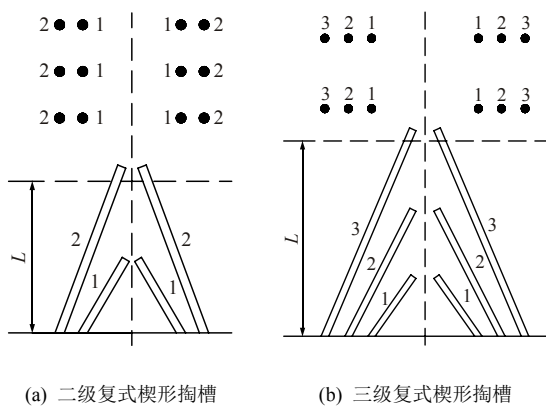


图9 多级复式楔形掏槽布置形式^[15]

Fig.9 Blasthole layout for the multistage wedge cut blasting^[15]

图10为某深埋隧洞采用三级复式楔形掏槽时全断面毫秒延迟爆破诱发围岩振动的时程曲线。一般来讲，由于密集的布孔与装药，加之岩体的夹制作用，掏槽孔爆破时产生的振动是整个断面开挖中最大的。但从图10可以看到，采用三级复式楔形掏槽后，各段的振动速度大小较为均匀，掏槽孔爆破产生的振动并未显著地高于其它类型炮孔爆破产生的振动。这也说明多级复式楔形掏槽方式的振动控制效果较好。

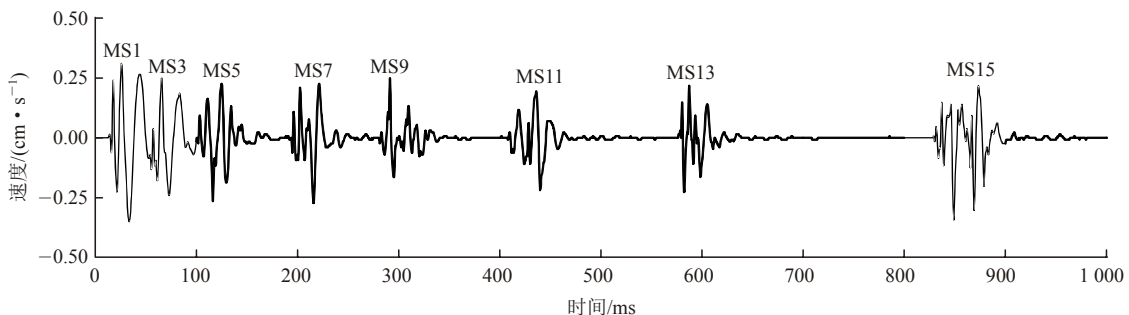


图10 某深埋隧洞全断面毫秒延迟爆破开挖围岩振动速度时程曲线

Fig.10 Vibration velocity-time history recorded in a full-face millisecond-delay blast of a deep tunnel

对于图1中的小直径中空直孔掏槽第一段，取掏槽孔深 $L = 3.0\text{ m}$ 、炮孔直径 $d_b = 42\text{ mm}$ ，采用密度 $\rho_c = 1\ 000\text{ kg/m}^3$ 、爆轰波速 $VOD = 3\ 600\text{ m/s}$ 的乳化炸药耦合装药。利用节3的平面应变计算模型及相关计算方法^[16]，可得到小直径中空直孔掏槽第一段爆破时爆破荷载激发围岩径向振动的峰值大小，以及不同静水地应力水平下开挖面上地应力瞬态卸荷诱发围岩径向振动的大小，如图11所示。为清晰展示各振动之间的差异，图中只给出了隧洞洞壁以外围岩的振动峰值。可以看到，在地应力水平相对较低时(20 MPa以下)，围岩振动主要由爆破荷载引起，此时围岩振动控制主要从减小爆破荷载动力效应入手，如减小掏槽爆破时的单响药量。随着地应力水平的提高，当地应力达到40 MPa时，在距隧洞壁10 m以外，地应力瞬态卸荷引起的振动超过了爆破荷载产生的振动。若地应力水平进一步提高，开挖面上地应力瞬态卸荷诱发的振动在整个围岩中均可占主导地位。此时的围岩振动控制主要从减小瞬态卸荷动力效应入手，如通过逐个起爆掏槽孔或采用多级复式楔形掏槽的方式来降低卸荷速率、减小开挖面的大小及开挖面上的地应力，从而达到控制瞬态卸荷诱发振动的目的。

4.2 孔网参数布置

本节讨论通过合理设计炮孔布置的几何参数(包括排距、孔距、孔深等参数)来降低地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动。

开挖面上的初始地应力大小是影响岩体开挖瞬态卸荷诱发围岩振动最为直接的因素。对于静水地应力场中的圆形隧洞全断面毫秒延迟爆破开挖(见图1)，根据式(2)，开挖面上的初始径向应力为

$$\sigma_{r0} = \left(1 - \frac{a_t^2}{a^2}\right) p_0 \quad (6)$$

可以看到，开挖面上的初始径向应力除与地应力水平 p_0 有关外，还与本圈炮孔和前一圈炮孔爆破

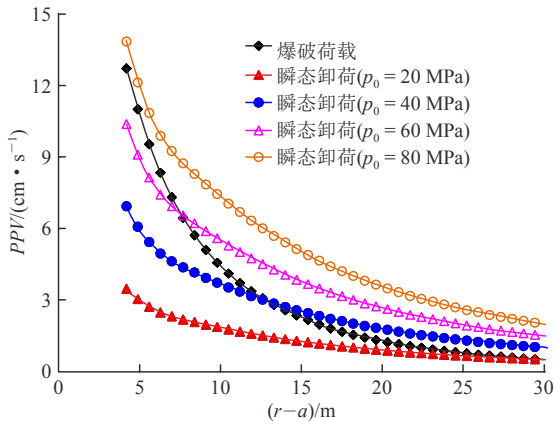


图 11 爆破荷载与地应力瞬态卸荷产生的径向 PPV 比较
Fig.11 Comparison of the radial PPV between blast-induced vibration and transient unloading-induced vibration

后形成的圆形空腔半径(开挖面半径) a 和 a_1 有关。 a 与 a_1 之差为相邻两段炮孔之间的排距，即抵抗线。排距(抵抗线)是岩体工程爆破中一个非常重要的孔网设计参数。虽然远场地应力 p_0 无法轻易改变，但可以通过变化炮孔排距来改变开挖面上的初始地应力大小，从而达到控制地应力瞬态卸荷诱发振动的目的。排距 $B = a - a_1$ ，则 $a_1 = a - B$ ，代入式(6)得

$$\sigma_{r0} = \left(\frac{2B}{a} - \frac{B^2}{a^2} \right) p_0 \quad (7)$$

以图 1 中的崩落孔 MS7 段爆破为例，取远场地应力 $p_0 = 20 \text{ MPa}$ 、开挖面半径 $a = 3.2 \text{ m}$ ，不同炮孔排距时，地应力瞬态卸荷诱发围岩振动的质点峰值振动速度随距离变化如图 12 所示。当炮孔排距从 1.5 m 减小到 0.5 m 时， $r - a = 10 \text{ m}$ 处的峰值振速由 17.2 cm/s 降低至 6.9 cm/s，减小了 60%。令式(7)括号中的 $2B/a - B^2/a^2 = M$ ，开挖面半径 $a = 3.2 \text{ m}$ 保持不变，在隧洞全断面爆破开挖常见的炮孔排距范围内($B = 0.5 \sim 1.5 \text{ m}$)，参数 M 随排距 B 的变化如图 13

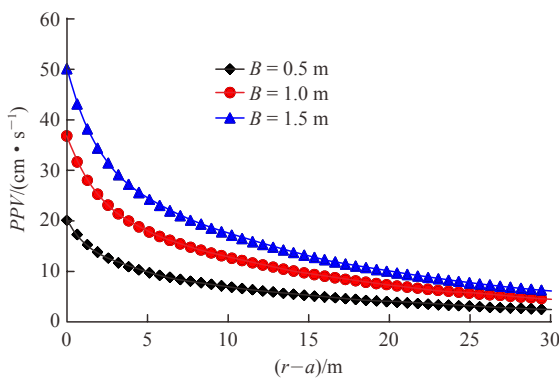


图 12 不同排距时地应力瞬态卸荷诱发的围岩峰值振速
Fig.12 PPV values of the vibration induced by transient unloading under different burdens

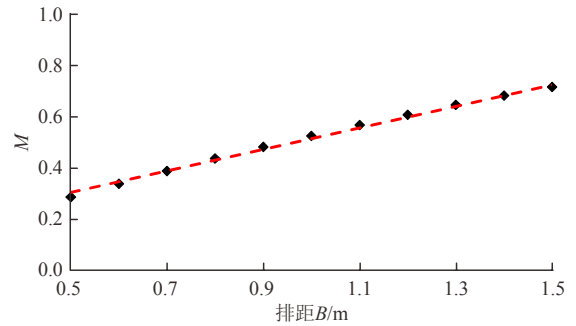


图 13 参数 M 与炮孔排距 B 的变化关系

Fig.13 Relationship between parameter M and burden B

所示。可以看到，在 $B = 0.5 \sim 1.5 \text{ m}$ 范围内，参数 M 与炮孔排距 B 基本呈线性变化关系，即开挖面上地应力瞬态卸荷引起的振动峰值随炮孔排距的减小而线性降低。因此，小排距钻孔爆破能有效降低岩体开挖瞬态卸荷诱发的围岩振动。

根据上文分析，开挖面上地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动与卸荷持续时间密切相关，卸荷持续时间越长，振动速度越小。由式(1)可知，对于既定的岩体介质(c_f 一定)，瞬态卸荷持续时间与相邻炮孔的间距 S 和炮孔孔深 L 有关。卸荷持续时间随炮孔间距 S 的增加而增大，因此，在满足岩体爆破破碎的前提下，可尽量选取较大的炮孔间距来延长卸荷持续时间，从而降低地应力瞬态卸荷引起的围岩振动。对于深埋隧洞全断面爆破开挖，一般采用孔间距 $S = 0.5 \sim 1.5 \text{ m}$ 、孔深 $L = 1.0 \sim 5.0 \text{ m}$ 的浅孔爆破。由于炮孔间距一般小于炮孔孔深，因此，通过增大孔深更能显著地延长卸荷持续时间，降低地应力瞬态卸荷引起的围岩振动。同样以图 1 中的崩落孔 MS7 段爆破为例， $a = 3.2 \text{ m}$ ， $S = 1.0 \text{ m}$ ，取 $p_0 = 20 \text{ MPa}$ ，不同炮孔孔深时地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动峰值振速如图 14 所示。当炮孔孔深从 1.0 m 增大到

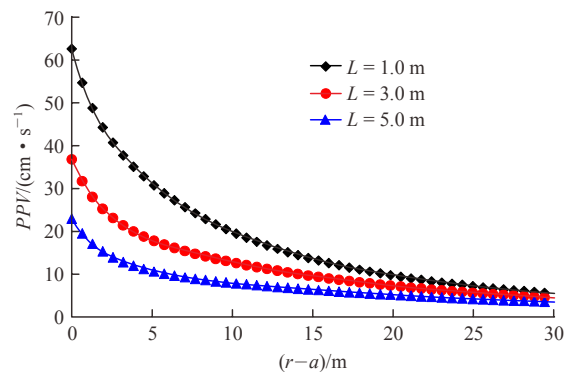


图 14 不同孔深时地应力瞬态卸荷诱发的围岩峰值振速
Fig.14 PPV values of the vibration induced by transient unloading under different blasthole depths

5.0 m 时, $r-a = 10$ m 处的质点峰值振动速度由 19.5 cm/s 降低至 7.9 cm/s, 降低了 59%。可见, 增大炮孔孔深以延长卸荷持续时间在降低地应力瞬态卸荷诱发围岩振动方面, 效果非常显著。

此外, 开挖面上地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动随开挖面的增大而加剧。因此, 高地应力水平下的深埋隧洞钻爆开挖宜采用分部开挖的方式来减小开挖面的大小, 且在炮孔布置时宜采用小排距、大孔距、大孔深的孔网参数来降低开挖面上的地应力和卸荷速率, 从而控制地应力瞬态卸荷引起的围岩振动。

4.3 起爆网路优化

深埋隧洞开挖掌子面上的各类、各圈炮孔通过毫秒延迟起爆网路实现顺序起爆。本节讨论通过优化起爆网路来降低开挖面上地应力释放强度和速率、减小开挖面大小, 从而达到控制地应力瞬态卸荷诱发围岩振动的目的。

对于深埋圆形隧洞全断面钻爆开挖, 常规的起爆网路如图 1 所示: 掏槽孔(MS1 和 MS3 段)、崩落孔(MS5~MS9 段)和周边孔(MS11 段)按毫秒延迟间隔由里向外依次起爆, 且各圈炮孔均一段起爆。随着各圈炮孔由里向外起爆, 同一段内起爆的炮孔数目、单响药量、开挖面大小也随之增大, 由此导致爆破荷载和地应力瞬态卸荷引起的围岩振动都相应增大。因此, 在同一圈内(特别是对于外圈的崩落孔和周边孔)可以采用分段起爆的方式, 来减小一段起爆时的单响药量和开挖面大小, 如图 15 所示, 这样可同时降低爆破荷载和地应力瞬态卸荷产生的围岩振动。

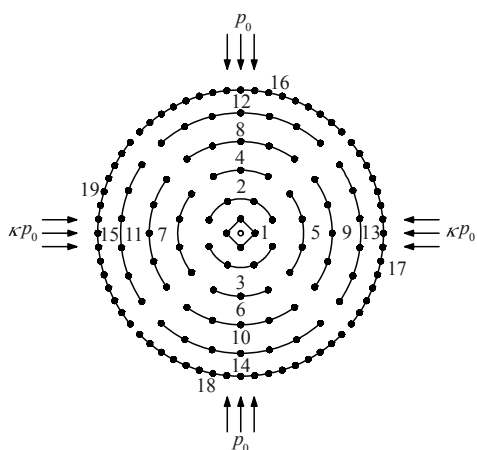


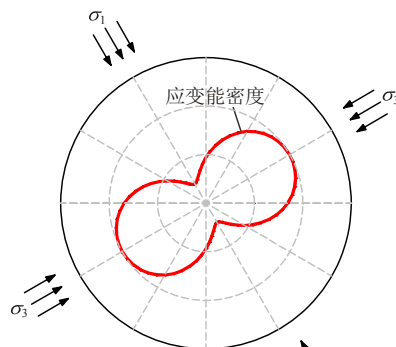
图 15 同一圈内炮孔分段起爆的优化网路

Fig.15 Optimized initiation sequence with multiple delays in a row

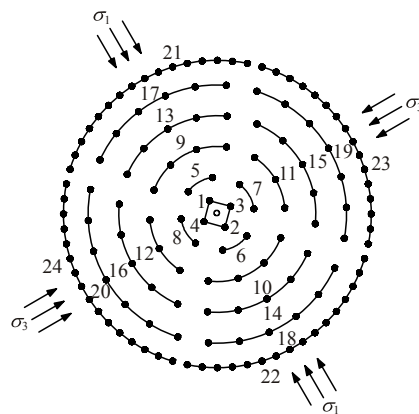
因原岩应力非均匀分布以及开挖卸荷引起的围岩应力重分布, 深埋隧洞开挖掌子面上的地应力、

应变能密度往往是不均匀分布的。在掏槽孔爆破形成槽腔前, 掌子面上最大主应力方向上的岩体应力最大, 开挖时该方向上岩体应力释放最为强烈。根据高地应力硬岩在小扰动后易于自裂、好凿好爆及破碎效果好的特点^[17], 掏槽孔爆破时宜先起爆最大主应力方向上的炮孔, 这样可达到较好的掏槽效果; 同时, 槽腔内的岩体充分破碎消耗更多的岩体应变能, 致使剩余的应变能释放所产生的围岩振动相对较小。

掏槽孔爆破形成槽腔后, 开挖掌子面上地应力重分布引起最小主应力方向附近出现应力集中, 在最小主应力方向上开挖岩体应变能密度最大, 在最大主应力方向上开挖岩体应变能密度最小, 如图 16(a)所示。若先爆破应变能密度较低部位的岩体, 由于地应力重新分布调整, 释放了邻近的应变能密度较高部位岩体的部分应变能, 降低了后续爆破的、应变能密度较高部位的岩体所释放的能量, 如图 17 所示。这样, 在同一圈内各段爆破时岩体应变能能够比较均匀地释放, 从而控制了地应力(应变能)的释放强度, 降低了地应力瞬态卸荷所诱发的围岩振动。按照上述思想, 崩落孔和周边孔爆破宜按照应



(a) 槽腔形成后掌子面上的应变能密度分布($\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$)



(b) 优化的起爆网路

图 16 基于掌子面上应变能密度分布的起爆网路优化方法
Fig.16 Initiation sequence optimization based on distribution of the strain energy density on the blasting work face

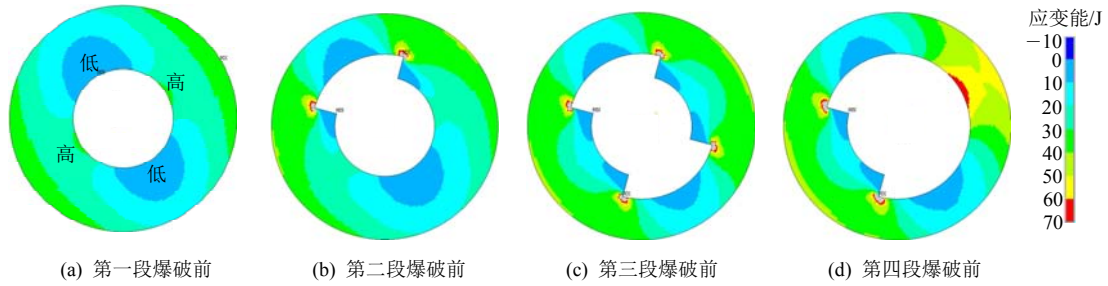


图 17 按应变能密度由低到高起爆时开挖岩体应变能变化过程

Fig.17 Strain energy variation of the rock excavated at the sequence from low to high of the strain energy density

变能密度的极值分布位置分段起爆，各段炮孔个数大致相等；且各圈内的炮孔按照岩体应变能密度由低到高的顺序起爆，先爆破最大主应力上的岩体，后爆破最小主应力方向上的岩体，如图 16(b)所示。

相反，若按照岩体应变能密度由高到低的顺序起爆，由于同一圈内先起爆的 2 段岩体含有较大的应变能(见图 17(a))，则这两段爆破时地应力瞬态卸荷所产生的围岩振动较大。以第二圈崩落孔(图 1 中第 4 段)爆破为例，取 $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ ， $\sigma_1 / \sigma_3 = 2.0$ ，采用动力有限元方法计算比较 2 种不同起爆顺序情况下地应力瞬态卸荷引起的围岩振动，如图 18 所示。按照岩体应变能密度由高到低的顺序起爆时，该圈第二段炮孔爆破时地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动最大，此时隧洞洞壁($r-R = 0$ ， R 为隧洞半径)处的质点峰值振动速度约为 25 cm/s ；若按照应变能密度由低到高的顺序起爆，在该圈第四段炮孔爆破时围岩振动速度最大，洞壁上的峰值振速约为 18 cm/s 。相比按应变能密度由高到低起爆的情况，质点峰值振动速度降低了 28%，振动控制效果明显。地应力实测资料表明，水平向地应力 σ_h 普遍大于竖直向地应力 σ_v 。根据以上分析，对于深埋隧洞钻爆开挖，为保障掏槽效果、同时控制开挖面上地应力瞬态卸荷所诱发的围岩振动，宜先起爆两侧边墙的炮孔，后起爆顶拱和底板部位的炮孔，如图 19 所示。

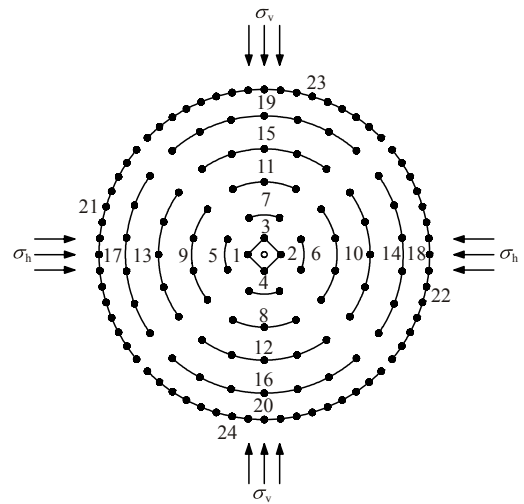


图 19 水平地应力大于竖直地应力情况下的起爆网路
Fig.19 Initiation sequence at higher horizontal in-situ stress than vertical in-situ stress

在水电、交通工程建设过程中，经常出现 2 条平行隧洞并行开挖或者在既有隧洞附近新开挖一条隧洞的情况。由于隧洞布置方向的限制或工程需要，两条隧洞有时间距较小，施工隧洞爆破开挖产生的振动则有可能导致邻近既有隧洞围岩的损伤破坏^[18-19]。数值模拟结果表明，在侧压力系数 κ 接近于 1 时，靠近邻洞的边墙侧岩体爆破时，地应力瞬态卸荷在邻洞迎爆侧产生了最大的振动速度。为减小该部位岩体开挖地应力瞬态卸荷诱发的振动对邻洞的影响，同一圈内的崩落孔、周边孔宜采用的起爆顺序是：先起爆顶拱和底板部位的炮孔，再起爆两侧边墙的炮孔，如图 20 所示。从而逐步降低靠近邻洞的边墙侧开挖岩体的应变能(原理同图 17)，减小瞬态卸荷引起的邻洞围岩振动。当水平向地应力明显大于竖直向地应力时，顶拱和底板应变能密度较大部位的岩体开挖地应力瞬态卸荷在邻洞引起的振动速度最大。根据上文分析，此时宜按照应变能密度由低到高的原则，先起爆两侧边墙的炮孔，再起爆顶拱和底板部位的炮孔。

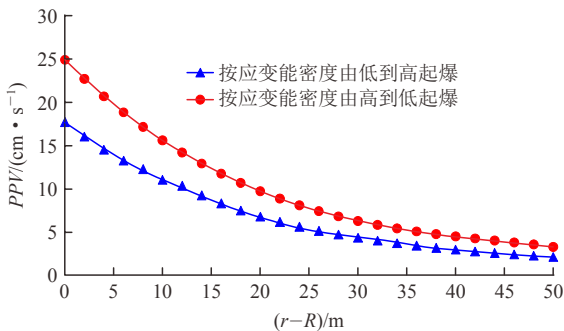


图 18 不同起爆顺序情况下地应力瞬态卸荷诱发围岩振动对比
Fig.18 Comparison of the transient unloading-induced vibration under different initiation sequences

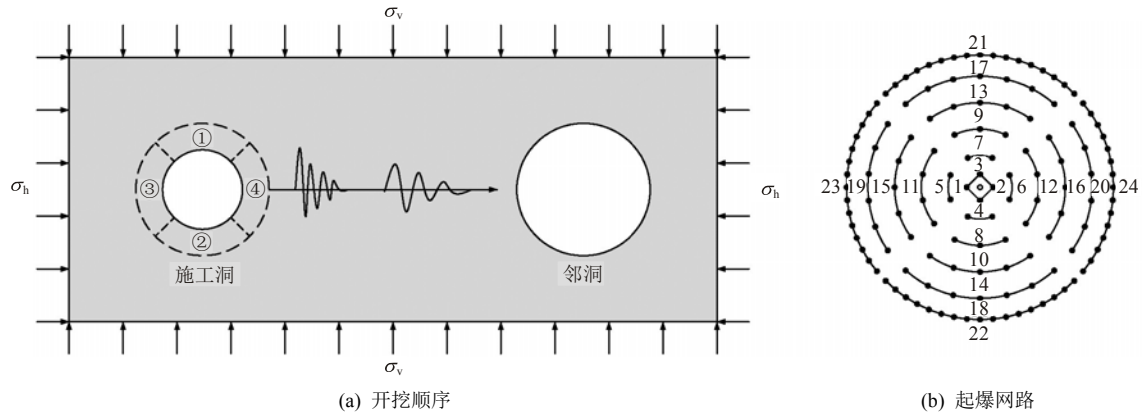


图 20 存在邻洞时的开挖顺序与起爆网路($\sigma_h \approx \sigma_v$)

Fig.20 Excavation and initiation sequence in the presence of an adjacent tunnel($\sigma_h \approx \sigma_v$)

5 结论与展望

通过以上计算和分析, 获得了以下主要结论:

(1) 深埋隧洞全断面钻爆开挖地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动主要受地应力水平、卸荷持续时间和开挖面大小的影响; 地应力水平越高、卸荷持续时间越短、开挖面越大, 诱发的振动速度越大。

(2) 采用五梅花小直径中空直孔掏槽、大直径空孔直孔菱形掏槽、多级复式楔形掏槽等掏槽方式, 采用分部开挖、小排距、大孔距、大孔深的开挖方式和孔网参数, 可降低开挖面上的地应力、延长卸荷持续时间、减小开挖面的大小, 有利于控制开挖面上地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动。

(3) 依据开挖掌子面上的地应力分布安排炮孔起爆顺序, 先爆破最大主应力方向上的岩体, 后爆破最小主应力方向上的岩体, 可降低地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动。

爆破振动控制是一个老的研究课题, 但对于深埋洞室爆破开挖, 由于涉及爆炸动应力与地应力耦合作用问题, 其振动安全判据、爆破振动与地应力释放诱发振动双重控制等方面仍有许多工作需要进一步开展。

参考文献(References):

[1] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究及探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161 - 2178.(XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161 - 2178.(in Chinese))

[2] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1 - 16.(XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1 - 16.(in Chinese))

[3] CARTER J P, BOOKER J R. Sudden excavation of a long circular tunnel in elastic ground[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1990, 27(2): 129 - 132.

[4] TOKSÖZ M N, KEHRER H H. Tectonic strain release by underground nuclear explosions and its effect on seismic discrimination[J]. Geophysical Journal International, 1972, 31(1/3): 141 - 161.

[5] 卢文波, 杨建华, 陈明, 等. 深埋隧洞岩体开挖瞬态卸荷机制及等效数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1089 - 1096. (LU Wenbo, YANG Jianhua, CHEN Ming, et al. Mechanism and equivalent numerical simulation of transient release of excavation load for deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1089 - 1096.(in Chinese))

[6] YANG J H, LU W B, JIANG Q H, et al. A study on the vibration frequency of blasting excavation in highly-stressed rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(7): 2825 - 2843.

[7] LI X B, CAO W Z, TAO M, et al. Influence of unloading disturbance on adjacent tunnels[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 84: 10 - 24.

[8] CAO W Z, LI X B, TAO M, et al. Vibrations induced by high initial stress release during underground excavations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 53: 78 - 95.

[9] 周小平, 毕靖, 钱七虎. 动态开挖卸荷条件下深埋圆形洞室各向同性围岩的分区破裂化机理[J]. 固体力学学报, 2013, 34(4): 352 - 360.(ZHOU Xiaoping, BI Jing, QIAN Qihu. The zonal disintegration mechanism of isotropic rock masses around a deep

- circular tunnel subjected to dynamic unloading[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 34(4): 352 - 360.(in Chinese))
- [10] ZHU W C, WEI J, ZHAO J, et al. 2D numerical simulation on excavation damaged zone induced by dynamic stress redistribution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43(7): 315 - 326.
- [11] SAINOKI A, MITRI H S. Instantaneous stress release in fault surface asperities during mining-induced fault-slip[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5): 619 - 628.
- [12] 董春亮, 赵光明, 李英明, 等. 深部圆形巷道开挖卸荷的围岩力学特征及破坏机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 511 - 518.(DONG Chunliang, ZHAO Guangming, LI Yingming, et al. Mechanical properties and failure mechanism of surrounding rocks in deep circular tunnel under excavation unloading[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(3): 511 - 518.(in Chinese))
- [13] 范鹏贤, 李颖, 赵跃堂, 等. 红砂岩卸载破坏强度特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 852 - 861.(FAN Pengxian, LI Ying, ZHAO Yuetang, et al. Experimental study on unloading failure strength of red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 852 - 861.(in Chinese))
- [14] MIKLOWITZ J. Plane-stress unloading waves emanating from a suddenly punched hole in a stretched elastic plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1960, 27(1): 165 - 171.
- [15] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 512 - 515.(WANG Xuguang. Handbook of blasting[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 512 - 515.(in Chinese))
- [16] 杨建华, 姚池, 卢文波, 等. 深埋隧洞钻爆开挖围岩振动频率特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1 195 - 1 202.(YANG Jianhua, YAO Chi, LU Wenbo, et al. Vibration frequency characteristics of surrounding rock of deep tunnel induced by borehole-blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1 195 - 1 202.(in Chinese))
- [17] 李夕兵, 姚金蕊, 宫凤强. 硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2 551 - 2 563.(LI Xibing, YAO Jinrui, GONG Fengqiang. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2 551 - 2 563.(in Chinese))
- [18] 李秀地, 蒋树屏, 刘元雪, 等. 小净距新建隧道爆破对运营隧道的影响与控制[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1 631 - 1 636.(LI Xiudi, JIANG Shuping, LIU Yuanxue, et al. Blasting effect and control of new tunnel with small clear space on existing operation tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(6): 1 631 - 1 636.(in Chinese))
- [19] 吴亮, 李凤, 卢文波, 等. 爆破扰动下邻近层状围岩隧道的稳定性与振速阈值[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 208 - 214.(WU Liang, LI Feng, LU Wenbo, et al. Vibration velocity threshold of a tunnel adjacent to surrounding layered rocks under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(2): 208 - 214.(in Chinese))