【土木建筑工程／Architecture and Civil Engineering】

双线隧道爆破初期支护结构的动态响应特性

黄传胜[1]，阳鑫[1]，林继华[2]，徐昊[1]，胡德玉[1]，任开富[3]

1）东华理工大学土木与建筑工程学院，江西南昌330013；2）江西省地质工程集团有限公司，江西南昌330029；
3）贵州路桥集团有限公司，贵州贵阳550001

摘　要：在后行洞隧道爆破开挖过程中，保证先行洞隧道的爆破振动安全极为关键．以中国贵州子母岩隧道爆破开挖为工程背景，基于现场监测和数值模拟，分析后行洞爆破开挖时左右线振速峰值衰减规律和应力分布特征，提出了爆破振速安全阈值．研究结果表明，在后行洞进行爆破时，后行洞初期支护振速最大值出现在拱顶及拱腰处，并且拱顶衰减更快；先行洞初期支护结构振速最大值出现在迎爆面侧拱腰处，迎爆面振速峰值由左拱腰、左拱脚和拱顶依次递减，迎爆面初期支护结构振速最大值约为背爆面的4倍；先行洞振速衰减规律与后行洞相同，均为拱顶衰减最快，其次为拱腰；先行洞初期支护结构振速峰值与应力分布基于开挖面呈对称分布，建立基于振速峰值与拉应力的安全准则，先行洞既有衬砌结构的安全振速阈值为10.81 cm/s，确定单段最大装药质量为58.2 kg．研究成果可为双线隧道同时掘进时的隧道安全施工提供参考．

关键词：隧道工程；现场监测；数值模拟；振速峰值；动态响应；安全阈值

中图分类号：U455.6　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3724/SP.J.1249.2024.04490

Dynamic response characteristics of the initial support structure of the double-track tunnel blasting

HUANG Chuansheng[1], YANG Xin[1], LIN Jihua[2], XU Hao[1], HU Deyu[1], and REN Kaifu[3]

1) School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi Province, P. R. China
2) Jiangxi Geological Engineering Group Co. Ltd. , Nanchang 330029, Jiangxi Province, P. R. China
3) Guizhou Road and Bridge Group Co. Ltd. , Guiyang 550001, Guizhou Province, P. R. China

Abstract: In the process of blasting excavation of the later excavated tunnel, it is crucial to ensure the safety of blasting vibration in the first excavated tunnel. Using the blasting excavation of the Zimuyan Tunnel in Guizhou, China, as the engineering background, we analyze the attenuation law of vibration velocity peak of the left and right lines and the stress distribution characteristics based on the field monitoring and numerical simulation methods. The safety threshold of the blasting vibration velocity is also proposed. The results show that during the blasting of the later-excavated tunnel, the maximum vibration velocity of the initial support of the later excavated tunnel occurs at the vault and the arch waist, with faster attenuation at the vault. In the first-excavated tunnel, the maximum vibration velocity of the initial support structure occurs at the side arch waist of the blasting surface, and the vibration velocity

Received: 2023-06-19; **Revised:** 2024-03-20; **Accepted:** 2024-04-09; **Online** (CNKI)**:** 2024-06-07
Foundation: National Natural Science Foundation of China (42061011, 41977236); East China University of Technology Doctoral Research Start-up Fund Project (DHBK2019240); Graduate Innovation Special Fund Project of Jiangxi Province (YC2023-S587)
Corresponding author: Professor HUANG Chuansheng (476806601@qq. com)
Citation: HUANG Chuansheng, YANG Xin, LIN Jihua, et al. Dynamic response characteristics of the initial support structure of the double-track tunnel blasting [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(4): 490-498. (in Chinese)

http://journal.szu.edu.cn

peak sequence on the blasting surface is left arch waist > left arch foot > vault, with the maximum vibration velocity at the blasting surface being approximately four times that of the back blasting surface. The attenuation law of vibration velocity of the first excavated tunnel is similar to that of the later excavated tunnel, with the fastest attenuation at the vault, followed by the arch waist. The vibration velocity peak and stress distribution of the initial support structure of the first-excavated tunnel are symmetrically distributed based on the excavation surface. Additionally, a safety-judging standard based on vibration velocity peak and tensile stress is established. It is concluded that the safe velocity for liner structures is 10.81 cm/s, with the maximum single-stage charge amount determined to be 58.2 kg. The research provides a reference for the safe construction of tunnels when excavating double-line tunnels simultaneously.

Key words: tunnel engineering; on-site monitoring; numerical simulation; vibration velocity peak; dynamic response; safety threshold

中国目前处于交通发展的重要阶段．为优化空间布局，整合可利用的资源，在双线同时施工，经常出现新建隧道距离既有隧道相近的情况[1-3]．在隧道开挖中，由于爆破本身的瞬时性、复杂性和应力波的各向异性等不确定性因素[4]，后行洞爆破施工对于先行洞围岩及衬砌结构的影响不可避免，日本狄津公路隧道和中国柳滩隧道[5]均发生过接近洞爆破时衬砌开裂、掉块等严重的安全隐患．隧道初期衬砌部分作为隧道主要的支撑结构，对于初期支护的爆破响应规律研究以及提出相应的安全判据尤为重要．

关于隧道初期支护结构的研究，主要有现场实验[6-7]、理论推导[8]及数值分析[9]等方法．针对先行洞振动规律的研究，主要包括理论分析[10]、振动监测[11-12]和数值模拟[13]等方法．在爆破开挖中，爆破产生的瞬时应力波传入衬砌结构产生瞬时应力．曹峰等[14]基于应力波传播理论，分析了爆破时应力波传入隧道衬砌结构的振速与应力的关系．JIANHUA 等[15]使用测振仪接收到爆破实验产生的围岩内部和表面的应力波，利用 LS-DYNA 有限元软件建立数值模型，并进行了相互验证．魏立恒等[16]基于盘山城市越岭特长隧道进、出口爆破施工对周围建筑物震动的实测数据，对不同类型围岩的爆破震动波在地层中的传播和衰减规律进行了研究．于建新等[3]采用 LS-DYNA 有限元软件，分析了新建隧道开挖时不同药量、净距和跨度对新建隧道和既有隧道的影响．

综上所述，现有研究多集中于新建隧道，但针对双洞同时施工，分析后行洞爆破对既有衬砌结构的影响并提出安全控制标准的文献并不多．隧道施工工艺也应在确保安全的基础上加快施工进度，而衬砌是钻爆法施工的主要支护结构，在双线并行施工过程中，其稳定问题显得尤为重要．本研究以中国贵州子母岩隧道项目为依托工程，通过现场监测与数值模拟探讨临近初期支护结构的振速与应力响应规律，并提出了先行洞已有衬砌迎爆面的安全振速阈值，为类似隧道工程的安全快速施工提供参考．

1　工程概况

1.1　项目背景

子母岩隧道项目区位于黔北高原北部，属于大娄山延伸段向四川盆地过渡的斜坡地带．该区域的主要山脉呈南北走向，海拔高，地形复杂．本次爆破振动研究段桩号为 ZK39+802 ~ ZK39+966 的左右两线隧道，该段隧道为Ⅳ级围岩，主要由中风化灰岩夹泥岩以及少量灰质泥岩组成，岩质整体较硬，岩体完整性较好．图 1 为子母岩隧道洞口图，左右线隧道间距为 18 ~ 25 m．图 2 为进行隧道监测时掌子面炮孔布置图．其中，掌子面总共装 2 号岩石乳化炸药 228 kg．本研究的隧道平面示意图如图 3．



图 1　子母岩隧道洞口图

Fig. 1　Portal diagram of Zimuyan rock tunnel.

http://journal.szu.edu.cn

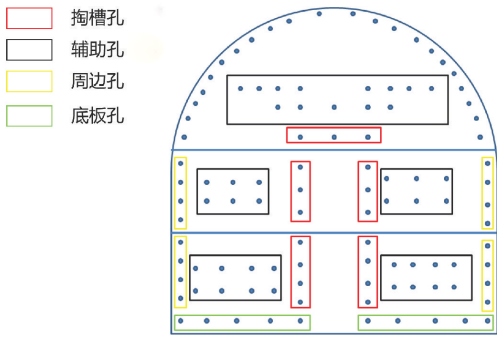


图2 掌子面炮孔布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hole arrangement on working face with cutting hole (red box), auxiliary hole (black box), peripheral hole (yellow box), and bottom hole (green box).

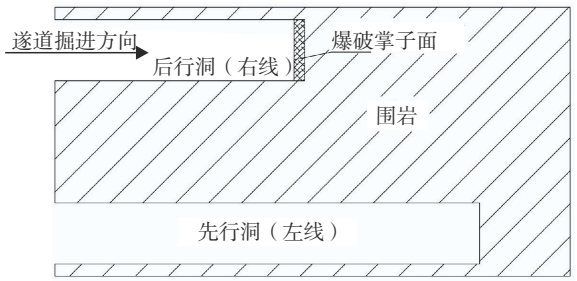


图3 隧道平面示意图

Fig. 3 Tunnel plane diagram.

2 模型建立

2.1 数值模型建立

根据工程勘探资料中所述的围岩参数，基于MIDAS/GTS模拟双线隧道施工爆破对既有隧道的动力响应．选取部分Ⅳ级围岩进行模拟．根据圣维南原理，选取模型周边尺寸为洞直径的3～5倍，因此模型的长、宽和高分别为300、110和70 m．模型网格为软件自动划分，隧道宽为1 m，两侧到隧道中心距离为1～6 m．模型边界的顶部为自由边界，四周为无反射边界，底部为固定边界，如图4．

2.2 模型参数选取

根据文献[17]可知，材料动力学特性和静力学特性满足式(1)和式(2)．根据式(1)计算材料动力学特性，参数如表1．

$$E_s = 0.002\,6E_d^{1.7} \tag{1}$$

$$\mu_d = 0.8\mu_s \tag{2}$$

其中，E_s为静力学弹性模量；E_d为动力学弹性模量；μ_d为动力学泊松比；μ_s为静力学泊松比．

http://journal.szu.edu.cn

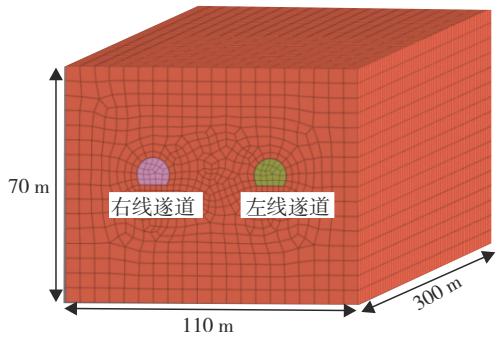


图4 隧道三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of tunnel.

表1 围岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock

材料名称	E_d / GPa	μ_d	内摩擦角/(°)	容重/(N·m^{-3})
初支	29.5	0.20	—	23
二衬	31.0	0.20	—	25
围岩	5.0	0.31	34	21

爆炸时产生的压缩波会沿着隧道的中轴线均匀地作用在周围的岩石上．首先，压缩波会使围岩受到压缩和压实．当压缩波达到峰值后，会迅速衰减．对于具有弹性和可塑性的围岩材料而言，加载的消失必然引起相反的回弹．因此，选择包括加载和卸载过程的三角形荷载作为爆破荷载的近似形式[18-19]．本次爆破荷载加载时长设置为10 ms，卸载时长设置为70 ms．爆破荷载作用在隧道洞壁上的应力峰值为

$$P_{max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2\,154}{Z^3} - 0.803\,4 \tag{3}$$

$$Z = \frac{r}{\sqrt[3]{Q}} \tag{4}$$

其中，P_{max}为爆破荷载峰值；r为炮眼至荷载作用面的距离(即爆心距)；Q为炮眼装药质量；Z为比例距离，是衡量爆炸超压作用的变量．

根据式(3)和式(4)计算，结果如图5所示．现有研究表明，爆破施工中，最大振速是由掏槽孔爆破所引起的[20-23]，因此本研究只考虑掏槽孔所造成的影响．

2.3 数值模拟可行性验证

为验证数值模型的可靠性，使用TC-4850爆破测振仪对现场爆破进行监测．在子母岩隧道右线衬砌拱脚处共布置两个监测点，分别为1#和2#监测点．在右线掌子面爆破时，1#和2#监测点距离爆破

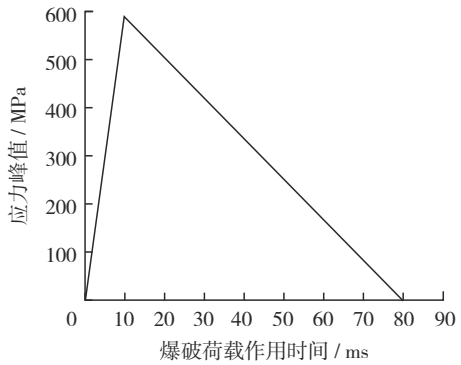


图5　爆破荷载时程曲线

Fig. 5　The blasting load versus the action time.

工作面的垂直距离分别为 107. 36 m 和 151. 89 m，具体布置如图6和图7.

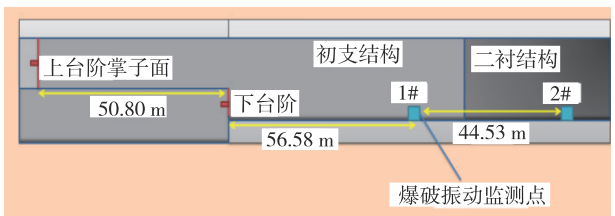


图6　爆破振动监测示意

Fig. 6　Blasting vibration monitoring diagram.



图7　TC-4850爆破测振仪传感器布置示意

Fig. 7　TC-4850 blasting vibrometer sensor layout diagram.

选取现场1#监测点的数据与模型相同点位合速度的计算结果进行对比验证，结果如图8所示．由图8可见，数值模型到达峰值的时间与实际监测结果的到达时间相近，且峰值相近，最大值误差约为7%，在允许误差范围内．综上所述，该数值模型可用于后续的研究．

3　结果分析

3.1　隧道右线爆破振动速度衰减规律研究

根据萨道夫斯基公式，测点处爆破振动速度衰减的规律可表示为

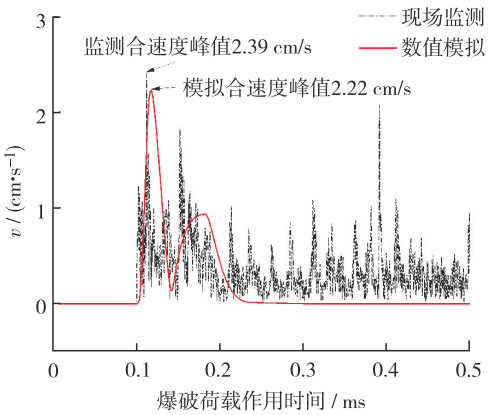


图8　合速度对比

Fig. 8　Comparison of velocities of the construction site monitoring points (black line) and numerical simulation points (red line).

$$v = K\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{\alpha} \tag{5}$$

其中，v 为质点的峰值振动速度；K 为场地系数，与场地条件相关；α 为衰减系数．

为了研究后行洞隧道爆破时，先行洞与后行洞隧道初期支护结构爆破振动速度衰减规律，基于数值模拟计算结果，提取隧道初期支护结构的拱顶、拱腰、拱脚和拱底6个关键点位爆破振速峰值，如图9．由于在隧道后行洞进行爆破，以后行洞掌子面为原点，每隔4 m，提取先行洞与后行洞6个关键点位的振动峰值速度，获得左右两线基于同一个爆源的爆破振动速度峰值规律．

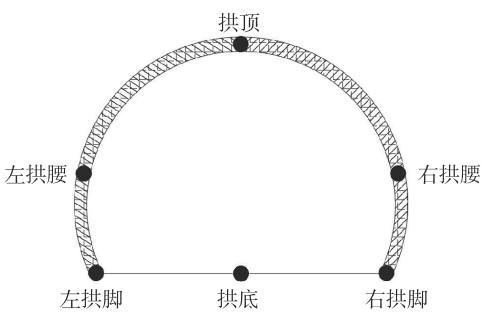


图9　衬砌结构关键点选取位置

Fig. 9　Selection positions of key points of lining structure with six key points of the tunnel, vault, arch bottom, left and right arch waists, left and right arch feet.

右线纵向振速变化曲线如图10．由图10可知，隧道初期支护的合振速最大值出现在拱顶处，其次就是左右拱腰，而拱底的合振速最小．并且隧道初期支护的合振速衰减最快的也为拱顶处．基于这6个点位随爆心距衰减的振速峰值进行拟合，见表

http://journal.szu.edu.cn

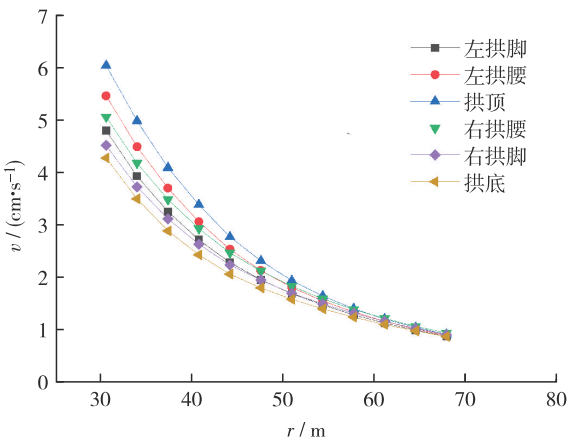


图10 右线纵向振速变化曲线

Fig. 10 Right line longitudinal vibration velocity variation curve with left arch foot (square, black line), left arch waist (circle, red line), vault (upper triangle, blue line), right arch waist (lower triangle, green line), right arch foot (prismatic, purple line), and arch ground (left triangle, yellow line).

2．得到的结果与右线纵向振速变化曲线图一致，拱顶与拱腰处衰减系数更大，衰减速度更快，其衰减系数从大到小依次为拱顶、右拱腰和左拱腰．

表2 后行洞萨道夫斯基公式回归分析结果

Table 2 The regression analysis results of Sadaovsk formula

断面位置	拟合公式 $v = K\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{\alpha}$	相关系数 R^2
左拱脚	$v = 152.948\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{1.7212}$	0.948 8
左拱腰	$v = 235.220\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{1.8446}$	0.968 1
拱顶	$v = 387.800\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{1.9957}$	0.983 7
右拱腰	$v = 351.920\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{1.9858}$	0.985 8
右拱脚	$v = 206.750\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{1.8283}$	0.971 9
拱底	$v = 240.620\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{1.8865}$	0.979 8

3.2 隧道左线爆破振动衰减规律研究

针对先行洞(左线)既有衬砌结构关键点位振速进行提取，左线振速峰值分布如图11．由图11(a)可见，衬砌中拱顶和拱腰等位置的振速随着爆心距的变化曲线基本相似．此外，各个断面位置的振速最大值通常出现在距离爆源最近的地方．随着爆心距的增加，振速逐渐减小．在距离原点± 20 m以内，振速衰减最为迅速，随后衰减速度逐渐变缓．既有衬砌振速峰值基于爆破开挖面呈对称分布．并且各个关键点位振速峰值区别明显，表现为从左拱腰、左拱脚、拱顶、拱底、右拱脚到右拱腰依次递减．爆心距为0时，先行洞振速峰值径向分布见图11(b)．从图11(b)可见，对于既有衬砌而言，迎爆面既有衬砌振速峰值明显大于背爆面，约为背爆面的4倍．说明迎爆面受临近荷载影响最大，在爆破施工时，要重点监测既有衬砌迎爆面的情况．

从图11(b)可见，既有衬砌中左拱腰处振速最大，并且受邻近荷载影响最大．对左拱腰处振速与

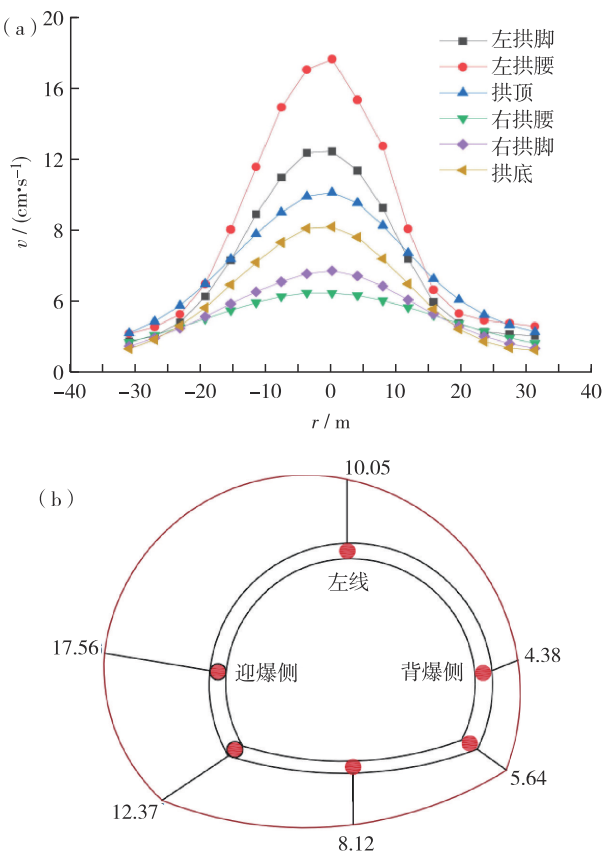


图11 左线振速峰值分布 (a) 左线振速变化曲线；(b) 断面振速包络图(单位：cm/s)

Fig. 11 Peak vibration velocity distribution of left line. (a) Left line vibration velocity curve with left arch foot (square, black line), left arch waist (circle, red line), vault (upper triangle, blue line), right arch waist (lower triangle, green line), right arch foot (prismatic, purple line), and arch ground (left triangle, yellow line). (b) section vibration velocity envelope diagram (unit: cm/s).

http://journal.szu.edu.cn

爆心距进行进行拟合，可得掌子面前后方对应的拟合公式如式(6)和式(7)所示.

在爆破面前方，

$$v = 0.478\,3r + 14.150 \tag{6}$$

在爆破面后方，

$$v = -0.487\,7r + 12.521 \tag{7}$$

对比图 11(a)开挖面前后位置的振速分布，以及对左拱腰处进行的振速与爆心距拟合曲线(图 12)，可见开挖面前方振速衰减速度小于开挖面后方. 这是由于爆破开挖导致的已开挖空洞无法让应力波直接传播，而是需要经过未开挖部分，这导致了能量的损失，所以开挖面后方振速衰减会更快[22]. 图 11(b)中，迎爆面振速大于背爆面振速的断面径向振速分布也从侧面印证了，隧道开挖空洞会对爆破振速传播产生影响.

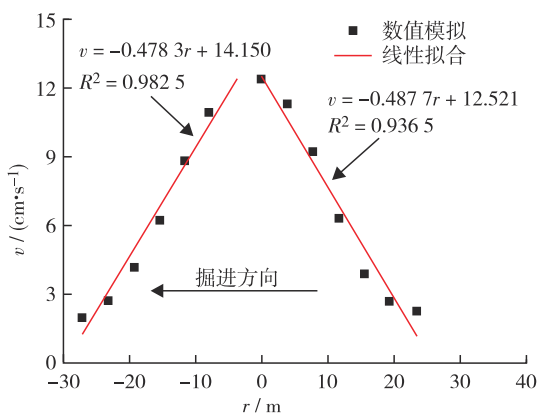


图 12　既有衬砌左拱腰处振速拟合曲线

Fig. 12　Fitting curves of vibration velocity at left haunch of existing lining with numerical simulation results (black square), and linear fitting results (red line).

3.3　既有隧道应力分析

爆破施工会给先行隧道带来不利影响，衬砌支护结构是保证隧道安全施工的关键，参考相关研究，隧道支护结构的爆破动力损伤多是由拉应力或剪应力引起[24-26]，且衬砌更容易受到拉应力作用而破坏[20-23,27]. 故而在右线掌子面进行爆破时，重点分析左线既有衬砌拉应力的变化. 现对左线 6 个关键点位的应力进行提取，结果如图 13. 既有衬砌拉应力分布与振速分布规律基本相同，拉应力在距离爆破面前后 20 m 处衰减最快，而后衰减速度趋于平缓，根据爆破面呈对称分布. 迎爆面应力表现为由左拱腰、左拱脚到拱顶依次递减，拉应力最大值出现在爆心距为 0 m 的左拱腰处. 这也是距离爆源最近的位置，应力较为集中，应当重点关注.

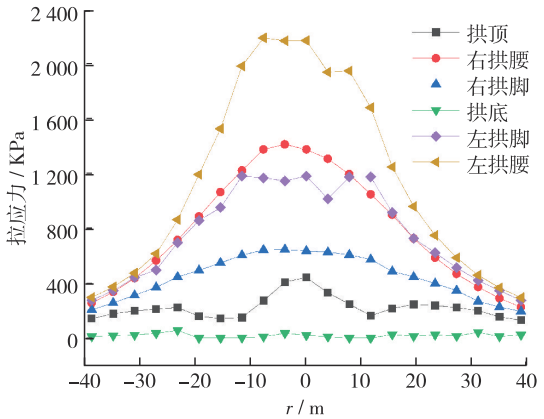


图 13　左线既有衬砌拉应力分布

Fig. 13　The tensile stress distribution of existing lining on the left line with left arch foot (square, black line), left arch waist (circle, red line), vault (upper triangle, blue line), right arch waist (lower triangle, green line), right arch foot (prismatic, purple line), arch ground (left triangle, yellow line).

4　既有衬砌安全控制标准

4.1　安全振速判据

根据对左线隧道(既有衬砌)的应力进行分析，发现最大拉应力往往出现在左拱腰处. 对先行洞衬砌迎爆面最大应力处(即左拱腰位置)的振速峰值进行分析[20-22,27]，得到最大拉应力(σ)与v的线性拟合关系为

$$\sigma = 0.085\,v + 0.590\,6 \tag{8}$$

将《公路隧道设计规范》[28]中喷射混凝土的σ = 1.1 MPa 作为衬砌静态受拉强度. 根据文献[14]可知，衬砌结构的动态受拉强度与所受荷载的施加速度有关，动态抗拉强度与静态抗拉强度的关系为

$$\sigma_t = \sigma_{t0}(1 + 0.12\lg V_H) = K_D\sigma_{p0} \tag{9}$$

$$V_H = \frac{\sigma_H}{\sigma_{t1}} \tag{10}$$

其中，σ_t为衬砌的动态抗拉强度；σ_{t0}为衬砌的静态抗拉强度；V_H为加荷速率比；K_D为衬砌动力强度提高系数；σ_H为衬砌爆破作用下加荷速度；σ_{t1}为一般情况下衬砌的加荷速率.

一般情况下，在爆炸地震波作用下岩石的加荷速度可以达到 1×10^6 MPa/s，衬砌结构的σ_{t1}一般取值为 $10 \sim 1 \times 10^4$ MPa/s. 根据式(8)和式(9)，衬砌动力强度系数可以达到 1.28 ~ 1.48，本研究取中间值 1.38. 本研究中，C20 混凝土的动态抗拉强度σ_t = 1.518 MPa，将其代入式(8)，可以得到子母岩

http://journal.szu.edu.cn

隧道既有衬砌的振速安全阈值为10.81 cm/s．由于爆炸应力波频率较高，其对于混凝土衬砌的影响可以忽略[27]．

4.2 安全装药量控制

根据得到的安全振速阈值，以及左线迎爆面拱腰处衬砌振速拟合的萨道夫斯基预测公式，可建立单响最大装药质量(Q_{max})的控制方程为

$$Q_{max} = (v/K)^{\frac{3}{\alpha}} r^3 \tag{11}$$

根据左线左拱腰处的萨道夫斯基回归分析结果可知，$K = 337.65$，$\alpha = 2.0971$．当炸药量一定时，最大装药量由安全振速阈值控制，并且阈值越大，最大装药量越大．子母岩隧道左右线距离在18～25 m，取爆心距为20 m．最大装药量与爆心距的关系曲线如图14．由图14可知，当左右线隧道距离减少时，衬砌结构的振速阈值也随之降低，此时应严格控制装药量，以免对现有衬砌结构造成严重破坏．将爆心距20 m和安全振速阈值10.81 m/s代入式(11)，可得到最大装药质量为58.2 kg．

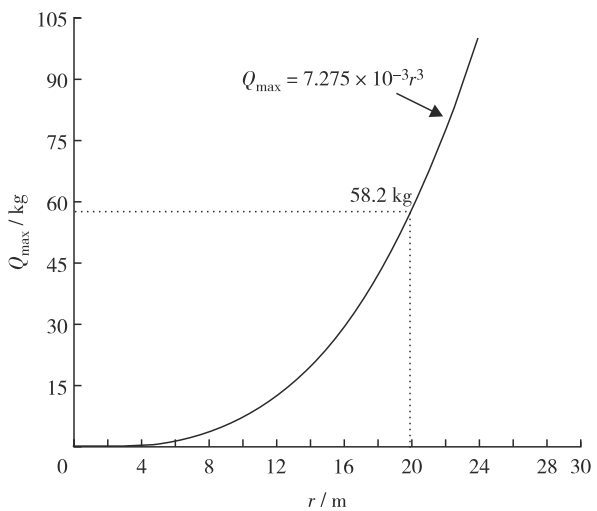


图14 最大装药量控制曲线

Fig. 14 Maximum charge control curve.

5 结 论

通过现场监测与数值模拟手段，基于对左右线初期支护结构进行爆破振动响应分析，可得：

1）后行洞爆破时，先行洞与后行洞爆破振速衰减规律基本相同，都是拱顶振速衰减最快，其次是拱腰处．对于爆破开挖洞，振速最大值出现在拱顶处，随着爆心距的增大，不同位置的振速逐渐衰减至同一水平．对于先行洞，振速最大值出现在迎爆面左拱腰处．振速峰值由左拱腰到左拱脚、拱顶、拱底、右拱脚和右拱腰依次递减．采用萨道夫斯基公式进行回归分析，得到了断面不同位置的振速衰减公式．

2）先行洞初期支护结构振速峰值与拉应力分布基于爆破开挖面呈对称分布．随着爆心距增大，衬砌振速峰值与应力逐渐衰减，在距离原点± 20 m以内，初期支护结构振速与应力衰减最快，而后衰减逐步平缓．迎爆面初期支护结构振速与应力明显大于背爆面，因此在开挖时需重点进行监测．

3）针对先行隧道的既有衬砌结构，结合迎爆面左拱腰的振速峰值和最大拉应力的安全判据及极限强度准则，得出左线隧道的安全振速阈值为10.81 cm/s，由萨道夫斯基预测公式得出最大装药(2号岩石乳化炸药)质量为58.2 kg．

本研究结果可为类似工程爆破设计提供参考，不足之处在于只提出了控制衬砌结构稳定性的安全判据，未考虑实质性的控制措施，下一步可对延时起爆和掏槽孔布设方式下的隧道衬砌动态响应特性进行研究．

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(42061011，41977236)；东华理工大学博士科研启动基金资助项目(DHBK2019240)；江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2023-S587)

作者简介： 黄传胜(476806601@qq.com)，东华理工大学教授．研究方向：隧道工程开发与工程管理．

引　　文： 黄传胜，阳鑫，林继华，等．双线隧道爆破初期支护结构的动态响应特性[J]．深圳大学学报理工版，2024，41(4)：490-498.

参考文献 / References：

[1] 颜天成，张庆彬，陈敏．新建隧道爆破对下部近接运营高铁隧道影响分析[J]．爆破，2023，40(1)：185-193，220．
YAN Tiancheng, ZHANG Qingbin, CHEN Min. Influence analysis of new tunnel blasting on lower adjacent high-speed railway tunnel [J]. Blasting, 2023, 40(1): 185-193, 220. (in Chinese)

[2] 于建新，刘焕春，郭佳奇，等．双线公路隧道开挖爆破振动响应规律研究[J]．安全与环境学报，2019，19(5)：1568-1575．
YU Jianxin, LIU Huanchun, GUO Jiaqi, et al. Determination of the vibration response regularity of the blasting excavation in the double-track highway tunnels [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(5): 1568-1575. (in Chinese)

[3] 于建新，刘焕春，魏海霞，等．近邻隧道爆破施工相

http://journal.szu.edu.cn

互动力影响研究[J]. 现代隧道技术，2019，56(6)：85-92.
YU Jianxin, LIU Huanchun, WEI Haixia, et al. On mutual dynamic effect of tunnel blasting construction adjacent to existing tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(6): 85-92. (in Chinese)

[4] 王海龙，柏皓博，王晟华. 基于FDM的爆破振动信号时频分析[J]. 爆破，2021，38(3)：143-151.
WANG Hailong, BAI Haobo, WANG Shenghua. Time-frequency analysis of blasting vibration signal based on FDM [J]. Blasting, 2021, 38(3): 143-151. (in Chinese)

[5] 曹明星，严松宏，郑永强，等. 邻近隧道爆破振动响应分析[J/OL]. 工程爆破，(2023-10-25) [2024-03-20]. https://doi. org/10. 19931/j. EB. 20230100.
CAO Mingxing, YAN Songhong, ZHENG Yongqiang, et al. Analysis of blasting vibration response of adjacent tunnel [J/OL]. Engineering Blasting, (2023-10-25) [2024-03-20]. https://doi. org/10. 19931/j. EB. 20230100. (in Chinese)

[6] 唐先习，夏顶顶，李旦合，等. 隧道爆破施工对初支混凝土的影响研究[J]. 铁道工程学报，2022，39(1)：73-78，113.
TANG Xianxi, XIA Dingding, LI Danhe, et al. Analysis of the influence of tunnel blasting construction on initial concrete [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(1): 73-78, 113. (in Chinese)

[7] 张庆松，李利平，李术才，等. 小间距隧道爆破动力特性试验研究[J]. 岩土力学，2008，29(10)：2655-2660，2666.
ZHANG Qingsong, LI Liping, LI Shucai, et al. Experimental study of blasting dynamic vibration of closely adjacent tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2655-2660, 2666. (in Chinese)

[8] 李芳涛，胡志平，陈南南，等. 爆破荷载作用下隧道围岩裂隙范围计算方法研究[J]. 振动与冲击，2022，41(8)：260-269.
LI Fangtao, HU Zhiping, CHEN Nannan, et al. A study of fracture range of tunnel surrounding rock under blasting [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(8): 260-269. (in Chinese)

[9] 韦彬，谢勇利，张国柱，等. 隧道衬砌换热器地源热泵长期性能数值分析[J]. 深圳大学学报理工版，2022，39(1)：36-41.
WEI Bin, XIE Yongli, ZHANG Guozhu, et al. Numerical study on long-term performance of ground source heat pumps with tunnel lining heat exchangers [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(1): 36-41. (in Chinese)

[10] 何理，钟东望，李鹏，等. 下穿隧道爆破荷载激励下边坡振动预测及能量分析[J]. 爆炸与冲击，2020，40(7)：105-114.
HE Li, ZHONG Dongwang, LI Peng, et al. Vibration prediction and energy analysis of slope under blasting load in underpass tunnel [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(7): 105-114. (in Chinese)

[11] HE Ru, JIANG Nan, LI Dongwei, et al. Dynamic response characteristic of building structure under blasting vibration of underneath tunnel [J]. Shock and Vibration, 2022, 2022: 9980665.

[12] 武贤龙，包小华，陈湘生，等. 基于gprMax的衬砌脱空三维正演分析[J]. 深圳大学学报理工版，2023，40(2)：127-135.
WU Xianlong, BAO Xiaohua, CHEN Xiangsheng, et al. 3D forward modeling analysis of lining void detection based on gprMax [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2023, 40(2): 127-135. (in Chinese)

[13] 袁冉，李俊晖，楚泽元，等. 小净距交叠隧道掏槽爆破动力响应研究[J]. 现代隧道技术，2023，60(3)：146-155.
YUAN Ran, LI Junhui, CHU Zeyuan, et al. Study on dynamic response in cut blasting in closely-spaced overlapping tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(3): 146-155. (in Chinese)

[14] 曹峰，凌同华，张胜. 考虑应力波透射影响的公路隧道爆破振动速度安全阈值[J]. 振动与冲击，2020，39(23)：154-159.
CAO Feng, LING Tonghua, ZHANG Sheng. Safety threshold of blasting vibration velocity of highway tunnel considering influence of stress wave transmission [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(23): 154-159. (in Chinese)

[15] YANG Jianhua, CAI Jiyong, YAO Chi, et al. Comparative study of tunnel blast-induced vibration on tunnel surfaces and inside surrounding rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4747-4761.

[16] 魏立恒，倪修能，郭洪雨，等. 城市越岭长隧道爆破开挖振动影响研究[J]. 爆破，2022，39(1)：159-167.
WEI Liheng, NI Xiuneng, GUO Hongyu, et al. Blasting excavation vibration effect of long tunnel across mountain in city [J]. Blasting, 2022, 39(1): 159-167. (in Chinese)

http://journal.szu.edu.cn

[17] 中国科学院地质研究所. 岩体工程地质力学问题(三)[M]. 北京：科学出版社，1980：229.
Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Geomechanical problems of rock mass engineering (3) [M]. Beijing: Science Press, 1980: 229. (in Chinese)

[18] 刘家明，张俊儒，王智勇，等. 硬质地层下近接隧道爆破振动影响分区及动力响应研究[J]. 现代隧道技术，2023，60(2)：125-137.
LIU Jiaming, ZHANG Junru, WANG Zhiyong, et al. Impact zoning and dynamic response to blasting vibration in adjacent tunnel under hard rock strata [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(2): 125-137. (in Chinese)

[19] 吴波，兰扬斌，杨建新，等. 新建隧道爆破对临近隧道振动特性的影响研究[J]. 中国安全科学学报，2019，29(11)：89-95.
WU Bo, LAN Yangbin, YANG Jianxin, et al. Influence of new tunnel blasting on vibration characteristics of adjacent existing tunnel [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(11): 89-95. (in Chinese)

[20] 肖可，周传波，郑璇，等. 断层带影响下隧道二衬结构爆破振动特性与安全判据[J]. 工程爆破，2021，27(4)：130-139.
XIAO Ke, ZHOU Chuanbo, ZHENG Xuan, et al. Blasting vibration characteristics and safety criteria of tunnel secondary lining under the influence of fault zone [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(4): 130-139. (in Chinese)

[21] 徐昊，何如，李栋伟，等. 预留核心土法爆破开挖下隧道初期支护动力响应特性[J]. 爆破，2024，41(1)：37-45，105.
XU Hao, HE Ru, LI Dongwei, et al. Dynamic response characteristics of tunnel primary support under blasting excavation with reserved core soil method [J]. Blasting, 2024, 41(1): 37-45, 105. (in Chinese)

[22] 彭悦森，钟冬望，王朝振，等. 极小净距隧道先行洞振动响应特性及衰减规律研究[J/OL]. 爆破，(2024-01-17)[2024-03-20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240116.1618.004.html.
PENG Yuesen, ZHONG Dongwang, WANG Chaozhen, et al. Study on the vibration response characteristics and attenuation law of the leading hole of the very small clear distance tunnel [J/OL]. Blasting, (2024-01-17) [2024-03-20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240116.1618.004.html. (in Chinese)

[23] 李小帅，高文学，宿利平，等. 小净距隧道掘进爆破及其振动响应规律研究[J/OL]. 爆破，(2023-12-29)[2024-03-20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20231228.1601.008.html.
LI Xiaoshuai, GAO Wenxue, SU Liping, et al. Study on blasting and vibration response of small spacing tunnel excavation [J/OL]. Blasting, (2023-12-29) [2024-03-20]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20231228.1601.008.html. (in Chinese)

[24] 蒋楠，周传波，罗钢，等. 铁路隧道混凝土衬砌爆破振动安全判据[J]. 中南大学学报自然科学版，2012，43(7)：2746-2750.
JIANG Nan, ZHOU Chuanbo, LUO Gang, et al. Blasting vibration safety criterion of railway tunnel concrete lining [J]. Journal of Central South University Science and Technology, 2012, 43(7): 2746-2750. (in Chinese)

[25] 凌同华，曹峰，张胜，等. 分岔隧道过渡段的爆破振动特性研究[J]. 振动与冲击，2018，37(2)：43-50.
LING Tonghua, CAO Feng, ZHANG Sheng, et al. Blast vibration characteristics of transition segment of a branch tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 43-50. (in Chinese)

[26] ZHANG Zhen, ZHOU Chuanbo, REMENNIKOV A, et al. Dynamic response and safety control of civil air defense tunnel under excavation blasting of subway tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 112: 103879.

[27] 吴忠仕，陈培帅，王伟，等. 扩建隧道爆破对既有衬砌的影响及安全判据[J]. 水利水电技术，2020，51(5)：77-85.
WU Zhongshi, CHEN Peishuai, WANG Wei, et al. Impact from blasting for tunnel expansion on existed tunnel lining and its safety criterion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(5): 77-85. (in Chinese)

[28] JTG 3370.1—2018 公路隧道设计规范[S].
JTG 3370.1—2018 Specifications for design of highway tunnels [S]. (in Chinese)

【中文责编：坪梓；英文责编：之聿】

http://journal.szu.edu.cn