

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.023

## 城市越岭长隧道爆破开挖振动影响研究\*

魏立恒<sup>1</sup>,倪修能<sup>1</sup>,郭洪雨<sup>2</sup>,孙飞<sup>2</sup>,葛艺超<sup>1</sup>,夏兆平<sup>1</sup>,王国波<sup>3</sup>

(1. 上海宝冶集团有限公司, 上海 201900; 2. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江杭州 310000;  
3 温州大学 建筑工程学院, 温州 325000)

**摘要:** 隧道钻孔爆破开挖技术在城市越岭长隧道中的应用能够有效地提高施工效率, 节约建造成本。然而受周边环境的影响, 爆破有害效应的影响日显突出, 特别是爆破振动影响成为爆破开挖制约的主要因素。根据大盘山城市越岭长隧道进出口段爆破开挖过程中对周边建筑振动影响的实际监测, 分析了不同围岩爆破地震波传播衰减规律。结果表明: 相同围岩等级下, 围岩完整性与萨道夫斯基公式中的关键参数  $K$ 、 $\alpha$  取值存在反相关性, 即在相同围岩等级下, 完整性越好, 关键参数取值越低。建议进口段  $K$ 、 $\alpha$  值分别为 350 和 1.9, 出口段 250 和 1.85, 并绘制了三个代表性装药量下的爆破振动速度传播曲线。根据绘制的曲线以及现场建筑对振动速度的控制要求, 确定了隧道爆破开挖距离洞口的起始位置。为进出口围岩等级和完整性较差、且周边拥有密集建筑群的实际隧道开挖工程提供参考。

**关键词:** 隧道开挖; 钻孔爆破; 振动速度; 围岩完整性; 现场测试

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2022)01-0159-09

## Blasting Excavation Vibration Effect of Long Tunnel across Mountain in City

WEI Li-heng<sup>1</sup>, NI Xiu-neng<sup>1</sup>, GUO Hong-yu<sup>2</sup>, SUN Fei<sup>2</sup>, GE Yi-chao<sup>1</sup>, XIA Zhao-ping<sup>1</sup>, WANG Guo-bo<sup>3</sup>

(1. Shanghai Baoye Group Corp., Ltd., Shanghai 201900, China;

2. Zhejiang Institute of Communications CO., LTD., Hangzhou 310000, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** The application of drilling and blasting technology in long urban cross-ridge tunnels can effectively improve construction efficiency and save the costs. However, due to the surrounding environment of urban tunnel, the harmful effects of blasting are becoming more and more prominent, especially the blasting vibration effects constraints the blasting excavation. According to the actual monitoring of the vibration on the surrounding buildings during the blasting excavation of the entrance and exit segments of the long urban cross-ridge tunnel in Dabanshan, the blasting seismic wave propagation attenuation law was analyzed. It is concluded that there is an inverse correlation between the integrity of the surrounding rock and the values of the key parameters  $K$ ,  $\alpha$  taken in the Sadovsky formula under the same rock type, the better the integrity of rock, the lower the values of the key parameters. The proposed values of  $K$  and  $\alpha$  are 350 and 1.9 for the entrance section and 250 and 1.85 for the exit section, respectively. The blast vibration velocity propagation curves were plotted for three representative charge volume. Based on the plotted curves and the vibration velocity control requirements of the site building, the starting position of the tunnel blasting excavation from the tunnel entrance was determined. And it provides a reference for the actual tunnel excavation project with poor grade and integrity of surrounding rock and dense surrounding buildings.

**Key words:** tunnel excavation; borehole blasting; vibration velocity; rock integrity; field test

伴随城市交通需求日益增高,城市交通建设过程中不可避免的遇到建设城市隧道,城市隧道及地下交通的开挖方法主要有机械开挖法如 TBM 和盾构等,然而,部分隧道由于其岩层、成本和工期等各方面的限制,需要选择成本和工艺较为简单,效率亦不低的钻孔爆破法。该方法由于其爆炸的高风险、高振动等问题,最初应用于矿业和跨城铁路等工程上,随着钻孔爆破技术的发展,越来越多的城市内交通隧道开挖亦采用该方法。该方法提高了开挖掘进速度,节约成本,但在建筑密集的城市区域开展隧道钻爆开挖,产生的爆破等对附近既有建筑的影响则需要重点关注<sup>[1]</sup>。

爆破振动对周边建筑物的影响,国内外学者进行了大量的研究<sup>[2-7]</sup>,取得了显著的成果,我国曾三次组织修编《爆破安全规程》,为爆破实际工程提供了可靠的技术保证。然而隧道受夹持作用以及周边密集建筑物复杂环境的影响<sup>[8-13]</sup>,给隧道爆破开挖带来很多新的挑战。对隧道爆破开挖主要集中在对周围岩土的影响以及振动控制方面,诸多学者进行了深入广泛的研究<sup>[14-17]</sup>,而临近建筑的振动响应以及控制的研究主要集中在城市地铁隧道,主要针对软土中的隧道开挖<sup>[18-20]</sup>。而对于隧道周边建筑物的振动以及相应的减振控制措施的研究则较少。主要原因有两个方面:(1)一般的爆破开挖隧道主要

集中在远离城市或者居住聚集的地区,周边建筑物较少或者较远,因此,相关的工程案例较少;(2)对于周边建筑较为密集且距离较近的隧道,施工方法往往采用非爆破的方法开挖,如盾构法施工,TBM 法开挖等。对于城市区域周边建筑布置复杂密集且距离近,又必须要采用爆破开挖的隧道掘进工程则需要重点关注爆破开挖过程中周边建筑物的振动影响,并判断是否需要采取进一步的减振措施。本文依托浙江省富阳市越岭城市隧道钻孔爆破工程,分析爆破对周边密集建筑物的振动影响,并判断爆破引起建筑物振动安全;根据经典的萨道夫斯基公式,结合现场监测振动数据,分析进口和出口相同围岩等级振动速度的衰减规律,确定合理参数值,计算不同爆破当量下振动速度随着距离的衰退演化曲线,提出爆破开挖前采用机械开挖的方式进行减振的措施,并根据建立的预测曲线,给出最小机械开挖距离。

## 1 工程概况

该公路隧道是富阳市“二环二纵二横一辅二通道”总体路网框架的重要一环,为一级公路越岭隧道,设计速度 80 km/h,抗震设防为 B 类隧道,设防烈度为Ⅷ度;左右洞呈分离布置(图 1),左线全长 2320 m,右线全长 2335 m,属于长大隧道。进口洞门采用削竹式洞门,出口洞门采用端墙式洞。

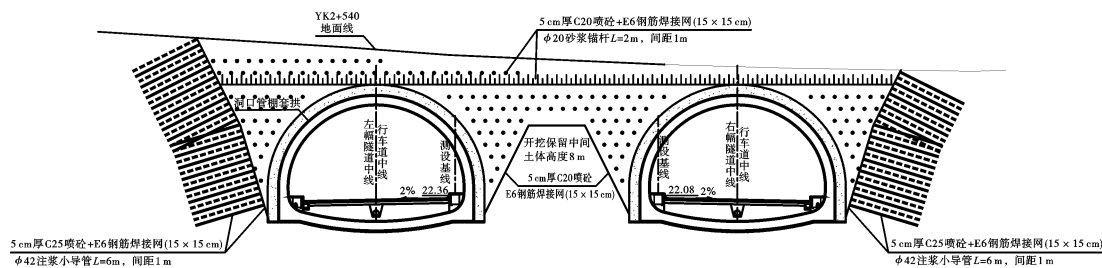


图 1 隧道双洞布置

Fig. 1 Double tunnel layout

进口段为双向 6 车道,单洞为 3 车道,3 车道隧道行车道宽度为 11 m(3.5 m + 2 × 3.75 m),单洞建筑界限总宽 13.75 m。出口段为双向 8 车道,单洞为 4 车道,行车道宽度为 14.5 m(3.5 m + 2 ×

3.75 m + 3.5 m),单洞建筑界限总宽 17.75 m。

隧道穿越低山垄岗区,地表第四系覆盖层较厚。进出口地形为低山斜坡地形,上覆坡洪积含圆砾粉质粘土,隧道围岩的划分长度见图 2 和表 1,其中左右线 V 级围岩划分长度分别为 336 m 和 315 m,分别占总长的 14.48% 和 13.49%,主要集中在洞口。隧道进出口的围岩物理力学指标见表 2,从表中可知,左右线的进出口的 V 级围岩,主要的物理力学参数相同,但是围岩的完整性系数差异较大,进口段的完整性系数要低于出口。

收稿日期:2021-09-18

作者简介:魏立恒(1968-),男,辽宁昌图人,1990年毕业于石家庄铁道学院,桥梁工程专业,硕士研究生,教授级高级工程师,上海宝冶集团市政工程公司,技术专家,(E-mail) 114618280@qq.com。

通讯作者:王国波(1979-),男,湖北孝昌人,博士、教授,主要从事工程结构动力分析方面的研究,(E-mail) 20190337@wzu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(52078386、51878529、51678465)

表 1 隧道围岩等级划分长度  
Table 1 Length of tunnel surrounding rock grading

隧道名称	左右	长度/m	V级围岩		IV级围岩		III级围岩	
			长度	比例/%	长度	比例/%	长度	比例/%
大盘山隧道	左洞	2320	336	14.48	840	36.21	1144	49.31
	右洞	2335	315	13.49	790	33.83	1230	52.68

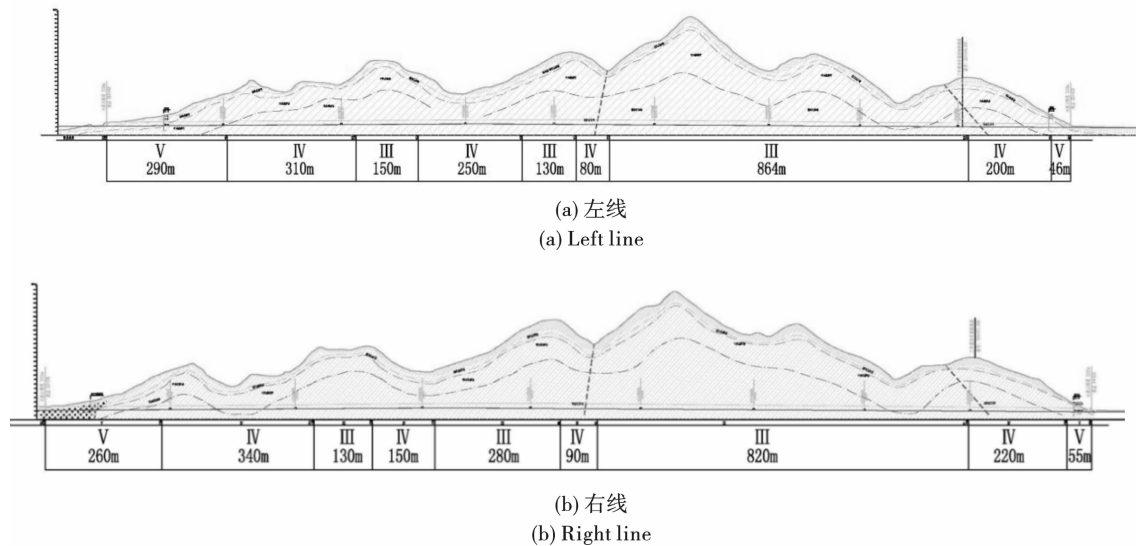


图 2 隧道围岩等级划分

Fig. 2 Classification of tunnel surrounding rock

表 2 进出口围岩状况  
Table 2 Status of surrounding rock of inlet and outlet section

左线进出口	左线进口	右线进口	左线出口	右线出口
里程桩号(左线)	ZK2 + 500 ~ ZK2 + 790	YK2 + 500 ~ YK2 + 760	ZK4 + 774 ~ ZK4 + 820	YK4 + 780 ~ YK4 + 835
围岩等级	V	V	V	V
岩石单轴饱和抗压强度/MPa	36.8 ~ 44.5	36.8 ~ 44.5	36.8 ~ 44.5	36.8 ~ 44.5
围岩岩体完整性系数	$K_V = 0.15 - 0.30$	$K_V = 0.15 - 0.35$	$K_V = 0.35 - 0.50$	$K_V = 0.35 - 0.55$
围岩岩体基本质量指标	< 250	< 250	< 250	< 250

## 2 隧道周边建筑位置

开挖隧道进出口段的周边建筑布置呈现密集复杂且极近的特点(图 3),周边建筑具体距离隧道间距离见表 3。可知隧道进口段周边建筑类型复杂,包括公墓、厂房等,最近的公墓距离隧道洞口仅 25 m,而出口段建筑物主要为住宅区民房,最近距离 30 m。如此近的距离以及复杂的建筑类型和布置,对于爆破是施工振动对周边建筑物的影响需要重点关注。因此,在进出口段爆破开挖时,对周边建筑物进行振动监测,一方面监测振动影响,及时避免振动速度过大对建筑结构的安全产生影响,另一方面,通过对振动速度以及主振频率的分析,确定最优的机

械开挖距离,为后续相关工程提供参考。

## 3 现场监测方案及评价标准

### 3.1 监测方案

本次对出口段和进口段的周边建筑物采集爆破源附近民房建筑振动情况。对于进口段选取 2 个测点,图 4(a),选取距离隧道洞口最近(约 30 m,距离首次爆破点距离 150 m 左右)3 幢建筑物作为测点 1;选取距离隧道洞口约 320m 的 2 幢建筑物作为测点 2。随着爆破掘进,爆破点与建筑物的距离增加,2 个测点距离爆点的位移会发生变化(表 4)。图 4(b)为出口段,选取 4 个测点作为监测对象,测点 1 位距离隧道洞口最近(约 25 m,距离爆点位置 30 m)

的3幢建筑物附近地面,测点2选取距离隧道洞口前方大约210 m的2幢建筑物附近地面,测点3与测点1类似,为距离隧道洞口最近(约30 m,距离爆

点位置30 m)的建筑物地面。测点4为与隧道洞身平行,距离洞口约180m的2幢建筑物地面。测点与爆点距离见表4。

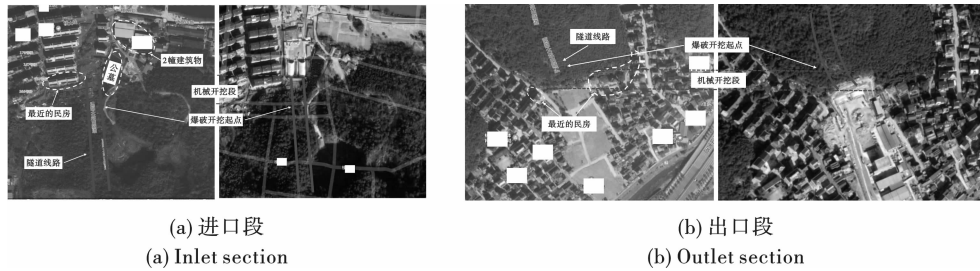


图3 进口段和出口段开挖前后空间位置关系

Fig. 3 Spatial position relationship before and after excavation of inlet and outlet section

表3 隧道与附近建筑物的方位距离关系

Table 3 The distance between the tunnel and nearby buildings

隧道进出口	建筑物方位	距离隧道/m	建筑物
进口	东侧	25	公墓
		80	废弃矿山宕口
		224	35 kV 高压线铁塔; 与隧道平行的高速线路
	东北侧	120	公墓管理房
		320	35 kV 高压线铁塔
	北侧	90	项目配电房和门岗值班室
		195	横大线
		215	2幢建筑物
		240	南渠
	西北侧	100	民用配电房
195		横大线	
西侧	30	民用架空线路及电线杆	
	38	民房	
出口	东侧	30, 50, 160, 300	民房
	西侧	60, 150	民房
		200	陆贝坞水库 (最高水位 56 m, 最低水位 35 m)

表4 振动测点与爆点的距离(测试时)

Table 4 Distance between vibration measurement point and explosion point (during testing)

隧道进出口	测点1	测点2	测点3	测点4
进口	150 ~ 380 m	320 ~ 380 m	/	/
出口	30 ~ 90 m	210 m	60 ~ 90 m	180 m

根据现场爆破开挖施工进度安排,从2020年10月14日到2021年2月28日对进口段附近建筑物进行振动跟踪监测;从2020年8月15日到2020年12月20日对出口段附近建筑物进行振动跟踪监测。监测设备采用L20 爆破测振仪、L20-S 爆破测振仪和SW-600A 型测距望远镜。

### 3.2 评价标准及安全评价

本次隧道爆破开挖振动对周边建筑的影响安全标准主要依据《爆破安全规程(GB6722—2014)》(后称《安全规程》)中13.2 中的规定<sup>[21]</sup>:地面建筑物等的爆破振动判据,采用地表质点峰值振动速度和主振频率,判断标准见表5。

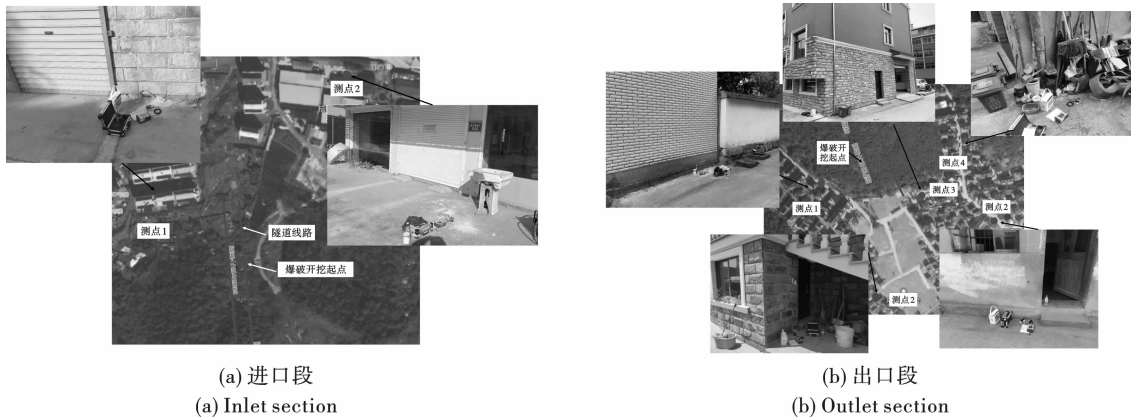


图4 测点布置

Fig. 4 Layout of measuring points

表 5 爆破振动安全允许标准

Table 5 Safety allowable range of vibration velocity in code

序号	保护对象类别	安全允许质点振动速度 $V/(cm \cdot s^{-1})$		
		$f \leq 10 \text{ Hz}$	$10 \text{ Hz} < f \leq 50 \text{ Hz}$	$f > 50 \text{ Hz}$
1	土窑洞、土坯房、毛石房屋	0.15 ~ 0.45	0.45 ~ 0.9	0.9 ~ 1.5
2	一般民用建筑物	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	2.5 ~ 3.0
3	工业和商业建筑物	2.5 ~ 3.5	3.5 ~ 4.5	4.2 ~ 5.0

由表 5 可知,本次保护对象主要为一般民用建筑物,安全允许的振动速度为:振动频率不超过 10 Hz 时,安全振动速度不超过 2.0cm/s;振动频率在 10 Hz 和 50 Hz 之间时,安全振动速度不超过 2.5 cm/s;振动频率超过 50 Hz 时,安全振动速度不超过 3.0 cm/s。由于该隧道附近建筑物类别复杂,且位置距离隧道口较近,在爆破设计过程中对于振动速度的控制要求为:一般民用建筑物振动控制在 2.0 cm/s 以内,塔基、电杆和公墓控制在 3.0 cm/s 以内。综合《爆破安全规程》和设计要求,设定振动控制速度为:主振频率超过 50 Hz 时,则振动控制速度为 3.0 cm/s,主振频率低于 50 Hz 时,则振动控制速度为 2.0 cm/s。

采集进出口段爆破开挖过程中周边建筑附近地面的振动速度和主振频率,以三个分量的最大振动速度值作为爆破振动速度值,分析主振频率与振动速度的关系,如图 5,图中可知,进口段振动速度在不同主振频率下,均满足《爆破安全规程》的要求亦满足设计要求,出口段仅有 1 次超过了《爆破安全规程》的规定。总体上,此次进出口段的爆破振动满足设计要求。爆破当量与主振频率之间的关系(图 6),图中可知,进出口段振动频率小于 10Hz 情形较少,主要分布在 50 Hz 以上,进口段最大主振频率不超过 200 Hz,出口段不超过 150Hz,总体上,振动速度表现为振动速度低,主振频率高的特点,爆破当量与振动频率不存在正比或反比关系。

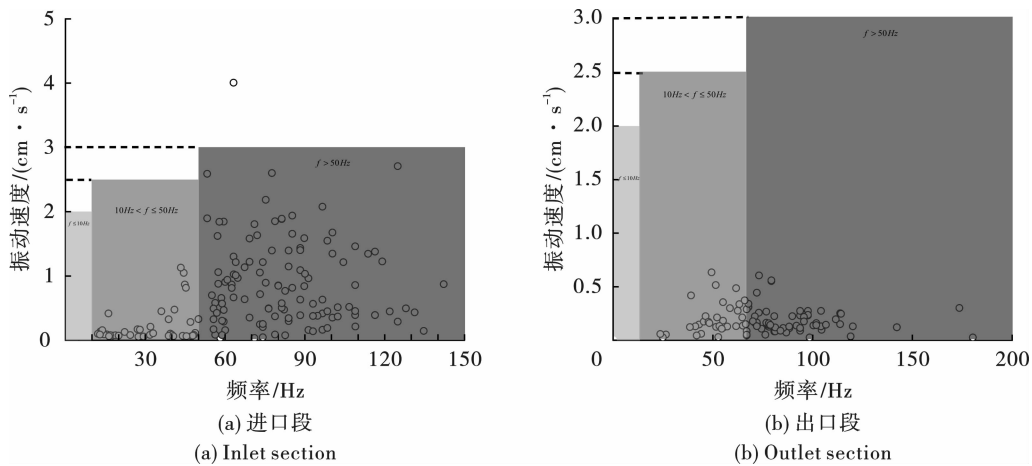


图 5 进出口段爆破振动频率和振动速度的关系

Fig. 5 Relationship between blasting vibration frequency and vibration velocity in inlet and outlet section

### 4 监测结果与参数分析

为了分析爆破单响药量、振动速度及爆点距离之间的关系,采用《爆破安全规程》认可的萨道夫斯基公式进行分析

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

式中: $V$ 为振动速度,cm/s; $Q$ 为最大一段起爆药量(单响药量),kg; $R$ 为保护对象离爆破中心的距离,m; $K$ 和 $\alpha$ 为地形、地质(场地)系数及衰减系数,其取值见表 6。按照表中的推荐值, $K$ 和 $\alpha$ 初步分别确定在 250 ~ 350 和 1.8 ~ 2.0 范围内。

表 6 不同岩性  $K$  和  $\alpha$  参考取值

Table 6 Reference values of  $K$  and  $\alpha$  for different lithologies

岩性	$K$	$\alpha$
坚硬岩石	50 ~ 150	1.3 ~ 1.5
中硬岩石	150 ~ 250	1.5 ~ 1.8
软岩石	250 ~ 350	1.8 ~ 2.0

选取三个爆破当量作为分析对象,分别为:(1)爆破当量的平均值;(2)爆破当量的平均值与对应的标准值之和;(3)爆破当量的平均值与对应的标准值之差;具体见表 7。 $K$ 、 $\alpha$  分别选择 350 和

1.9, 进出口段的爆破振动速度实测值与不同当量下的计算值进行对比, 分别见图 7 和图 8, 图 7 为进口段, 可见选取的  $K, \alpha$  能够基本符合实际情形, 为了确保振动速度在安全范围内, 大部分实测振动速度应当在萨道夫斯基公式计算曲线之下, 从而确保计算预测值作为振动控制的上限。考虑进出口围岩等级相同, 图 8(a) 中选取的  $K, \alpha$  值与进口段相同, 图中可知, 不同当量的计算预测曲线虽然能够保证实测值在曲线之下, 但是偏离实测值较大, 按照这个  $K, \alpha$  值计算, 若距离爆点越近, 则会偏离越远, 误差越大, 需要采用的减振措施更为严格, 成本相对增加。对比进出口的围岩状况(表 3)可知, 虽两者大部分物理力学参数相同, 但两者的完整性系数差异

较大, 出口段的围岩完整性系数高。根据《爆破安全规程》中  $K, \alpha$  的取值特点, 围岩越坚硬取值越小, 考虑到出口段完整性比进口段好, 其取值应小于进口段, 另一方面, 进出口段均属于 V 级围岩, 取值应在《爆破安全规程》中软岩石的取值范围内, 因此, 出口段的  $K, \alpha$  取值分别在 250 ~ 350 和 1.8 ~ 1.9 之间进行取值, 通过遍历法并与实测值进行对比, 确定了出口段的两个参数的取值, 分别取 250 和 1.85, 见图 8(b), 图中可知, 虽修正后的差异并不大, 但与实测值更加接近, 因此, 在进行  $K, \alpha$  取值过程中, 除了考虑围岩等级的因素, 还需要考虑围岩完整性系数, 相同围岩等级下, 完整性系数越高, 则  $K, \alpha$  越小。

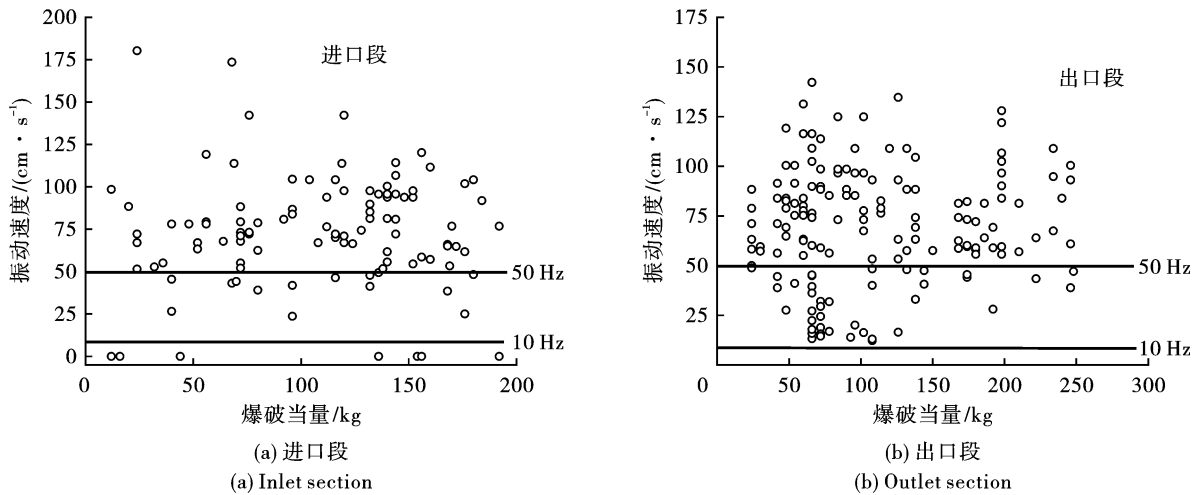


图 6 进出口爆破当量与振动频率的关系

Fig. 6 Relation between inlet and outlet blasting equivalent and vibration frequency

表 7 现场爆破当量计算取值

Table 7 Calculation value of on-site blasting equivalent

爆破位置	当量 平均值/kg	平均值 + 标准差/kg	平均值 - 标准差/kg
进口	109.5	170.8	61.2
出口	111.2	160.8	49.6

根据确定的进出口的  $K, \alpha$  值, 依据萨道夫斯基公式, 对进出口距离爆点不同位置的振动速度进行计算, 见图 9, 起始距离为进出口距离隧道洞口位置最近的建筑物分别为 25 m 和 30 m(表 4), 爆破当量分别要涵盖本项目爆破当量实际最大值和平均值, 进出口段分别取 10 kg、100 kg、200 kg 和 20 kg、125 kg、250 kg, 由图 9 可知, 根据设计要求的 2.0 cm/s 的控制振动速度, 若采用最大爆破当量, 爆点距离建筑物最少要分别超过 90 m 和 85 m, 若采用最小爆破当量亦会使得振动速度超过设计要求, 而爆破当量过小会导致进尺小, 成本增加。因此, 建议本项目的洞口位置一定范围内不采用爆破

开挖, 采用机械开挖, 机械开挖的长度要确保初始爆破距离超过 90 m 和 85 m。进口段机械开挖距离建议超过 30 m, 出口段建议超过 20 m。

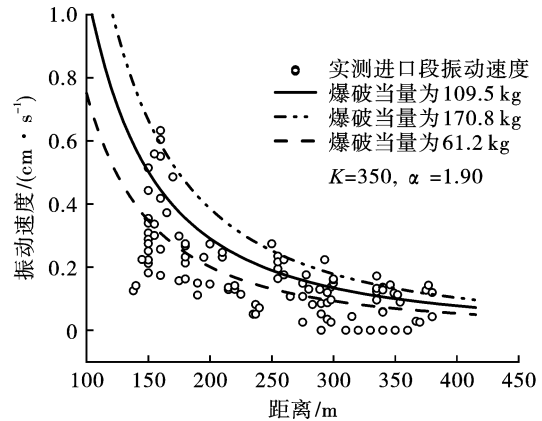


图 7 进口段振动速度实测值与公式计算值  
Fig. 7 Measured value and calculated value of vibration velocity in inlet section

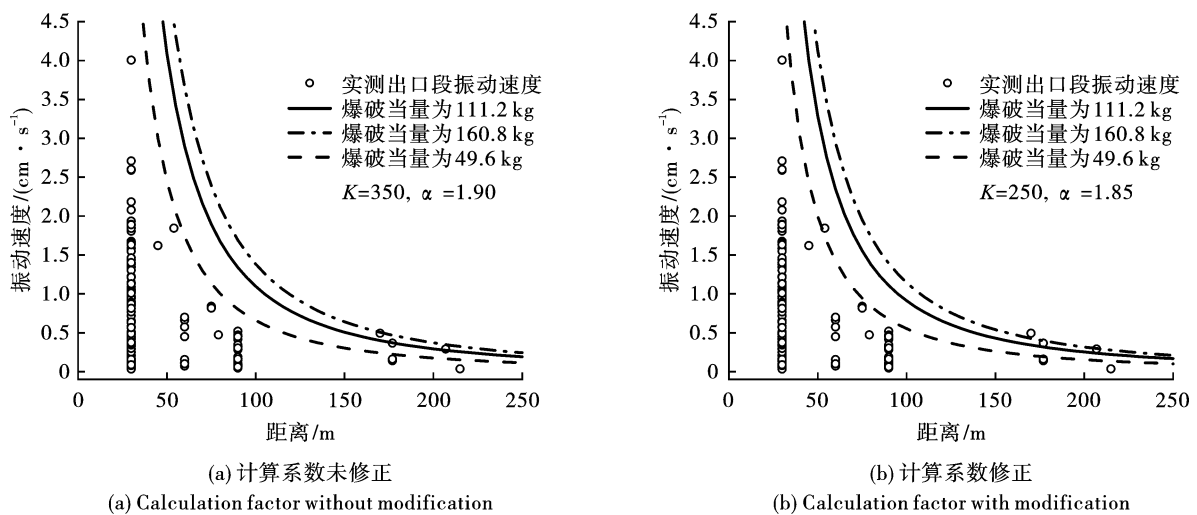


图8 出口段实测振动速度与计算值

Fig. 8 Measured vibration velocity and calculated value of outlet section

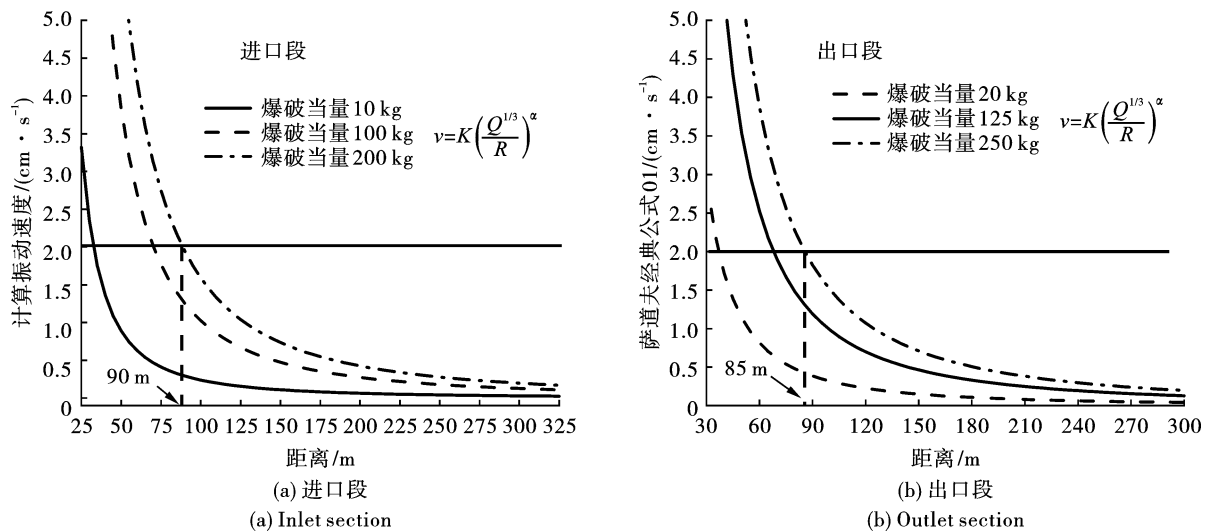


图9 不同距离下进出口段计算振动速度

Fig. 9 Calculation of vibration velocity in inlet and outlet section at different distances

## 5 结论与建议

根据大盘山城市越岭长隧道进出口段爆破开挖过程中对周边建筑振动影响的实际监测和分析得出如下结论:

- (1) 隧道爆破开挖地震波衰减系数  $K$ 、 $\alpha$  取值要考虑围岩的完整性,即完整性越好取值越低;
- (2) 建议本工程进口段  $K$ 、 $\alpha$  值分别为 350 和 1.9,出口段 250 和 1.85;
- (3) 隧道爆破开挖距离洞口的起始位置,分别为距离洞口 90 m 和 85 m;
- (4) 对于这种临近建筑物类型复杂,且距离极近的山岭隧道开挖,建议采用非爆破的方法开挖一段距离后再进行爆破开挖。

## 参考文献 (References)

- [1] 王肖辉,杜 镀,韩 超. 台阶法隧道掘进爆破时地表及邻近隧道的振动响应[J]. 爆破器材,2020,49(5): 54-58.
- [1] WANG Xiao-hui, DU Du, HAN Chao. Vibration response of ground and adjacent tunnel under bench blasting for tunnel excavation[J]. Explosive Materials,2020,49(5): 54-58. (in Chinese)
- [2] 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(3):208-214.
- [2] WU Liang, LI Feng, LU Wen-bo, 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)
- [3] 刘传阳,杨年华,崔晋中,等. 隧道分岔段爆破掘进技术研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(7):54-59.
- [3] LIU Chuan-yang, YANG Nian-hua, CUI Jin-zhong, et al. Research on the blasting excavation technology of tunnel in fork section[J]. Journal of Railway Engineering Society,2021,38(7):54-59. (in Chinese)
- [4] 钱正富,徐金峰,周应新,等. 红层软岩无中导洞连拱隧道爆破振动控制技术研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(3):167-174.
- [4] QIAN Zheng-fu, XU Jin-feng, ZHOU Ying-xin, et al. Monitoring and control technology for blasting vibration of the double-arch tunnel without middle drift in red-bed soft rock[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(3): 167-174. (in Chinese)
- [5] MOHAMMAD ZAID, M D Rehan SADIQUE. The response of rock tunnel when subjected to blast loading: Finite element analysis [J]. Engineering Reports, 2020; e12293.
- [6] 公伟增,段宝福,张雪伟,等. 隧道爆破地震波作用下砌体建筑物振动响应分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(33):377-383.
- [6] GONG Wei-zeng, DUAN Bao-fu, ZHANG Xue-wei, et al. Analysis of vibration response of surface masonry buildings under tunnel blasting seismic wave [J]. Science Technology and Engineering,2019,19(33):377-383.
- [7] 武 泽. 果子沟隧道爆破对临近管道影响的数值模拟[J]. 油气储运,2021,40(10):1167-1173.
- [7] WU Ze. Numerical simulation of the influence of blasting in Guozigou tunnel on adjacent pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(10): 1167-1173. (in Chinese)
- [8] 钱 阳,张志强. 浅埋区间隧道爆皮振东对邻近建筑物的影响分析[J]. 四川建筑,2020,40(3):114-117.
- [8] QIAN Yang, ZHANG Zhi-qiang. Influence analysis of shallow buried tunnel blasting on adjacent buildings[J]. Sichuan Architecture,2020,40(3):114-117. (in Chinese)
- [9] 李新平,郑青青,罗 忆,等. 溶洞规模对深埋隧道爆破围岩稳定性的影响[J]. 爆破,2020,37(1):40-45.
- [9] LI Xin-ping, ZHENG Qing-qing, LUO Yi, et al. Influence of scale of karst cave on stability of surrounding rock in deep tunnel blasting [J]. Blasting, 2020, 37(1): 40-45. (in Chinese)
- [10] 王海龙,赵 岩,王海军,等. 基于CEEMDAN-小波包分析的隧道爆破信号去噪方法[J]. 爆炸与冲击,2021,41(5):122-134.
- [10] WANG Hai-long, ZHAO Yan, WANG Hai-jun, et al. Denoising method of tunnel blasting signal based on CEEMDAN decomposition-wavelet packet analysis [J]. Explosion and Shock Waves,2021,41(5):122-134. (in Chinese)
- [11] 付晓强,俞 缙,戴良玉,等. 隧道爆破振动信号混沌分形特征研究[J]. 工程爆破,2021,27(1):36-44.
- [11] FU Xiao-qiang, YU Jin, DAI Liang-yu, et al. Study on chaotic fractal characteristics of tunnel blasting vibration signal [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 36-44. (in Chinese)
- [12] 贾 贝,凌天龙,侯仕军,等. 基于变分模态分解的延时识别法在短延时微差爆破中的应用[J]. 北京理工大学学报,2021,41(4):341-348.
- [12] JIA Bei, LING Tian-long, HOU Shi-jun, et al. Application of variational mode decomposition based delay time identification in short millisecond blasting [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(4): 341-348. (in Chinese)
- [13] 宋肖龙,高文学,季金铭,等. 爆破振动对隧道围岩累积损伤效应的影响[J]. 振动与冲击,2020,39(24):54-62.
- [13] SONG Xiao-long, GAO Wen-xue, JI Jin-ming, et al. Influence of blasting vibration on cumulative damage of surrounding rock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(24): 54-62. (in Chinese)
- [14] 周文锋,廖少明,秦青阳,等. 山岭隧道爆破施工振动响应分析及其控制研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(S1):620-628.
- [14] ZHOU Wen-feng, LIAO Shao-ming, QIN Qing-yang, et al. Study on vibration response caused by blasting and control measures in mountain tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 620-628. (in Chinese)
- [15] J J ZUO, R S YANG, X M MA, et al. Explosion wave and explosion fracture characteristics of cylindrical charges [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 135: 104501.
- [16] P J LI, C S CHEN, H P CHANG, et al. Explosion mechanism analysis during tunnel construction in the Zengwen Reservoir [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103279.
- [17] 郗庆桃. 隧道爆破震动控制技术 [J]. 爆破 1998, 15(4):83-87.
- [17] XI Qing-tao. Vibration control technology of tunnel blasting [J]. Blasting, 1998, 15(4): 83-87. (in Chinese)
- [18] 任登富,简中飞,孟祥栋,等. 数码雷管错相减震爆破技术在地铁隧道施工中的应用 [J]. 爆破, 2020, 37(2):53-59.
- [18] REN Deng-fu, JIAN Zhong-fei, MENG Xiang-dong et al. Application of digital detonator staggered shock absorption blasting technology in subway tunnel construction [J]. Blasting, 2020, 37(2): 53-59. (in Chinese)
- [19] 王松青,张全峰,汪海波,等. 武汉地铁区间隧道下穿

- 建筑物爆破振动控制技术研究[J]. 工程爆破, 2020, 26(1):85-90.
- [19] WANG Song-qing, ZHANG Quan-feng, WANG Hai-bo, et al. Research on blasting construction technology in subway tunnel beneath buildings in Wuhan [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(1):85-90. (in Chinese)
- [20] 汪平, 吉凌. 浅埋地铁隧道爆破振动速度传播规律及预测[J]. 工程爆破, 2021, 27(2):108-113.
- [20] WANG Ping, JI Ling. Propagation law and prediction of blasting vibration velocity of shallow buried subway tunnel [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2):108-113. (in Chinese)
- [21] GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [21] GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)

英文编辑:叶海旺

(上接第119页)



图6 测点布置图  
Fig. 6 Survey points

国内各城市对轨道交通沿线周边50 m以内土建施工管控严格,对爆破施工尤甚;在营运中的地铁站下方2.8 m处的爆破案例说明,只要技术措施得当、组织周密、监测手段完备,爆破对轨道交通影响是可控的。

### 参考文献 (References)

- [1] 韩志友. 隧道穿越地下连续墙采用的爆破清障技术[C]//中国城市基础设施建设国际大会会刊, 2016:10-12.
- [1] HAN Zhi-you. Blasting obstacle removal technology for tunnel crossing diaphragm wall [C] // Proceedings of China International Conference on urban infrastructure construction, 2016:10-12. (in Chinese)
- [2] 刘文广, 陶顺伯. 钻孔爆破在盾构穿越地下连续墙工程中的应用[J]. 工程爆破, 2010(3):72-74.
- [2] LIU Wen-guang, TAO Shun-bo. Application of borehole blasting in shield tunneling through diaphragm wall [J]. Engineering Blasting, 2010(3):72-74. (in Chinese)
- [3] 任江, 汪高龙, 王潇. 两座150 m高钢筋混凝土烟囱同时爆破拆除[J]. 爆破, 2020(4):94-98.
- [3] REN Jiang, WANG Gao-long, WANG Xiao. Simultaneous blasting demolition of two 150m high reinforced concrete chimneys [J]. Blasting, 2020(4):94-98. (in Chinese)
- [4] 上海申通集团. 上海市轨道交通管理条例[S]. 上海: 上海计划出版社, 2013:6-7.
- [4] Shanghai Shentong Group. Regulations on the administration of Shanghai Rail Transit [S]. Shanghai: Shanghai Planning Press, 2013:6-7. (in Chinese)
- [5] 孙冰峰, 傅洪贤. 基于建筑物模态分析的隧道爆破减振技术[J]. 中国公路学报, 2016, 29(10):86-94.
- [5] SUN Bing-feng, FU Hong-xian. Tunnel blasting vibration reduction technology based on building modal analysis [J]. Chinese Journal of Highway, 2016, 29(10):86-94. (in Chinese)
- [6] 张小军, 汪旭光, 于亚伦, 等. 确定延时爆破间隔的新方法[J]. 金属矿山, 2018(3):43-48.
- [6] ZHANG Xiao-jun, WANG Xu-guang, YU Ya-lun, et al. New method for determining delay blasting interval [J]. Metal Mines, 2018(3):43-48. (in Chinese)
- [7] 许建刚, 李翠林, 王中全, 等. 两栋紧邻的不同结构高楼同时爆破拆除[J]. 爆破, 2020(3):109-113.
- [7] XU Jian-gang, LI Cui-lin, WANG Zhong-quan, et al. Simultaneous blasting demolition of two adjacent high-rise buildings with different structures [J]. Blasting, 2020(3):109-113. (in Chinese)
- [8] 国家安全生产监督管理总局. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [8] State Administration of Work Safety. GB6722—2014 Safety regulations for Blasting [S]. Beijing: China Standards Press, 2015. (in Chinese)
- [9] 黎蜀明, 樊荆连, 陈新华, 等. 下穿既有地铁隧道电子雷管网路施工技术[J]. 工程爆破, 2021(1):105-108.
- [9] LI Shu-ming, FAN Jing-lian, CHEN Xin-hua, et al. Construction technology of electronic detonator network under existing subway tunnel [J]. Engineering Blasting, 2021(1):105-108. (in Chinese)
- [10] 刘国华, 王振宇. 爆破荷载作用下隧道的动态响应和抗爆分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(2):154-158.
- [10] LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu. Dynamic response and anti explosion analysis of tunnel under blasting load [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2004, 38(2):154-158. (in Chinese)

英文编辑:黄刚