

# 城市地铁浅埋隧道掘进爆破地表振动试验研究

高照帅<sup>1,2</sup>, 王德胜<sup>1,2</sup>, 尹作明<sup>2</sup>, 花良奎<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:**针对北京地铁某区段的浅埋复杂隧道掘进爆破振动进行现场试验研究,通过爆破振速的全程跟踪实测及数据分析,研究了掘进掌子面前后等距离处的地表振动特性。结果表明:已开挖的隧道形成的孔洞具有散射放大效应,致使掌子面后方地表处的最大波峰振速矢量总和是其前方等距离处的 1.22~2.04 倍;用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行数值模拟研究,模拟结果与实测的变化规律和特性吻合;在不改变炸药单耗及其他材料参数,仅改变隧道埋深及断面尺寸的状况下,通过数值计算分析得出,放大效应对埋深及断面尺寸的变化比较敏感,埋深越浅、断面尺寸越大,放大效应越显著。

**关键词:**城市地铁;浅埋隧道;地表振动;放大效应;数值模拟;隧道埋深;断面尺寸

中图分类号:TD235.3

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2016)01-0079-07

## Experimental Study of Ground Vibration Induced by Shallow Urban Subway Tunnel Excavation Blasting

GAO Zhaoshuai<sup>1,2</sup>, WANG Desheng<sup>1,2</sup>, YIN Zuoming<sup>2</sup>, HUA Liangkui<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. College of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the experimental research of the blasting vibration effect on ground in complex shallow tunnel excavation in a section of Beijing subway, this paper studied the ground vibration characteristics at equal distances in the front and rear of tunneling blasting sources by whole course tracking and monitoring the blasting vibration velocity and analyzing the data. The results show that the opening formed by the excavated tunnel has a scattering and amplification effect and that the vector sum (PVS) of the peak ground vibration at the rear of working face is about 1.22~2.04 times that at the front of equal distance. After the numerical simulation with ANSYS/LS-DYNA, it has been found that the simulated results are in great agreement with the field measured results in terms of changing law and characteristics. With the specific explosive charge and other material parameters fixed and only the buried depth and section size of tunnel changing, numerical calculations were made and the analyses show that the amplification effect, sensitive to tunnel depth and section size, is more notable when the tunnel depth is shallower and the section size is greater.

**Key words:** city subway; shallow buried tunnel; surface vibration; amplification effect; numerical simulation; tunnel depth; section size

收稿日期:2015-10-23

作者简介:高照帅(1989—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事岩土工程爆破研究. E-mail:lvjiren89@163.com

王德胜(1961—),男,山东莱芜人,教授,博士生导师,主要从事爆破工程方面的教学与研究工作,本文通信作者. E-mail:wds812123@163.com

在城市地面道路交通资源日趋紧张的情况下,建设地铁工程是缓解城市交通拥堵的有效措施。开挖城市地铁隧道需下穿坚硬岩层时,爆破掘进是最经济、快速和高效的方法。但爆破掘进致使周围岩体及地表产生地震效应,对工程本身及其邻近建(构)筑物的安全性和耐久性产生不良影响<sup>[1]</sup>,制约着城市在复杂环境条件下地下工程安全推进的进度。爆破振动理论和实践研究一直是工程爆破研究的一个热点<sup>[2]</sup>,爆破振动效应研究是控制爆破振动危害的基础和前提,也是指导爆破工程施工的重要理论依据<sup>[3]</sup>。合理控制隧道下穿危险地段时的爆破振动,在振动危害允许的条件下,实现工程效益最大化。要从根本上解决这个问题,必须先弄清楚隧道掘进爆破引起的地表振动特性及其影响范围<sup>[4]</sup>。

以北京新建地铁的土岩混合、下穿煤气管线、紧邻密集建筑物的浅埋复杂隧道掘进爆破工程为背景,对地表振速全程跟踪实测,用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行数值模拟研究,探讨介质一定的条件下掘进掌子面前后等距离处的地表振动特性及隧道埋深和断面尺寸的影响,优化爆破设计方案,指导复杂条件下的浅埋隧道顺利施工。

## 1 工程概况

在北京地铁浅埋隧道掘进爆破的某区段内,沿线距离需重点保护的建筑群及庙宇分别为 40 m 和 30 m,隧道拱顶距煤气管线 20 m。试验研究区段地势较平坦,土层厚 12 m 左右,其表层分布新近沉积土层,下部第四纪沉积土层以粘性土和粉土为主,局部夹砂土层;土层下大多属Ⅲ级围岩,以石英砂岩为主,从上到下风化程度由强至中等,层理、节理不发育,均质性较好,韧性较大,普氏系数  $f$  为 8~10。设计隧道拱顶距地表 21 m,断面呈马蹄形,开挖净高 6.4 m,宽 6.3 m。

## 2 爆破施工方案及振动监测

### 2.1 爆破施工方案

试验研究是以《爆破安全规程 GB6722-2003》中爆破震动安全允许标准为控制爆破振动大小的依据,同时加强沿线需重点保护的建(构)筑物的振动监测,在振动允许的条件下进行试验研究。为了确保试验研究能够安全顺利进行,设置需重点保护的建(构)筑物处的振动预警值为 1 cm/s。

采用台阶法施工方案,上台阶采用楔形掏槽爆破,中间四排楔形掏槽眼垂深 1.4 m;周边眼长 1.2 m,光面爆破;采用电子雷管起爆网路,掏槽眼和周边眼 2 ms 时差,辅助眼和底板眼 4 ms 时差,精准延时逐孔起爆。合计 62 个炮眼,孔径 42 mm,总装药 30 kg,断面面积 18 m<sup>2</sup>,炸药单耗 1.7 kg/m<sup>3</sup>,进尺 1.0 m,炮孔利用率 85%。布孔及雷管延时设计见图 1,隧道参数设计见表 1。

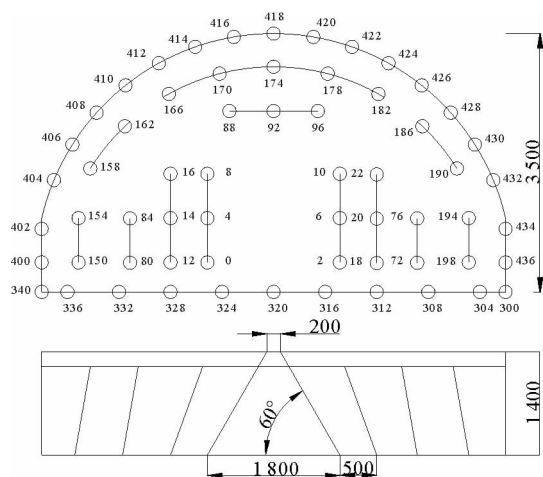


图 1 上台阶炮孔布置及电子雷管起爆时间设计  
Fig. 1 Blast pattern of upper bench and electronic detonator detonating time design

表 1 台阶法设计参数表

Tab. 1 Blasting parameters of bench method

部位	名称	类型	数量/个	孔距/m	孔长/m	单孔装药量/kg	装药量小计/kg
上台阶	掏槽眼	60°斜孔	6	0.6	1.5	0.8	4.8
	扩槽眼	70°斜孔	6	0.5	1.4	0.8	4.8
	辅助眼	80°斜孔	20	0.7	1.2	0.5	10.0
	周边眼	垂直孔	19	0.5	1.2	0.2	3.8
	底板眼	垂直孔	11	0.8	1.2	0.6	6.6

## 2.2 爆破振动监测

采用加拿大 Instantel 公司生产的 Blast Mate III 爆破振动测试仪进行现场监测。该仪器有四个通道(超声波和三维振动检波器),各通道采样频率为每秒采集 1 024 个样本。振动检波器量程 254 mm/s;分辨率 0.015 9 mm/s,带内置式前置放大器;通频带为 2~500 Hz。

以上台阶掘进爆破引起的地表振动为试验研究对象。如图 2 所示,校准后的检波器安设在隧道轴线正上方的地表处,以掌子面为对称面,沿隧道轴线方向每隔 5 m 对称布置测点,共布置 9 个测点,且每次监测时各测点与爆源的相对位置不变。

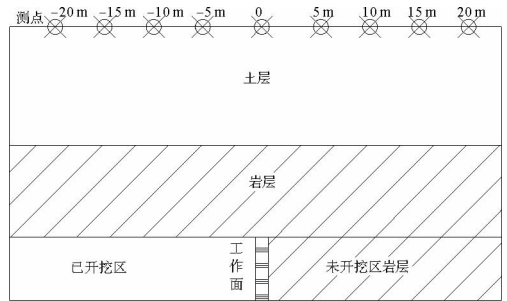


图 2 纵剖面测点布置示意图

Fig. 2 The layout diagram of longitudinal section measuring point

## 3 试验结果及分析

### 3.1 实测结果

经全程跟踪实测,得到大量振动数据,因篇幅有限,仅将试验期间 12 月 16 日、17 日、19 日及 21 日的爆破振动监测数据列表(表 2)。

表 2 实测地表振速数据

Tab. 2 Measured data of ground vibration velocity

掏槽药量/kg	测点位置/m	爆源距离/m	PVS/(mm/s)			
			16 日	17 日	19 日	21 日
Q=9.6	20	29.22	26.3	25.9	27.3	22.9
	15	26.05	31.4	32.3	31.7	30.2
	10	23.53	36.3	37.3	38.3	36.3
	5	21.88	43.9	44.3	43.9	39.2
	0	21.30	45.9	46.1	46.7	43.4
	-5	21.88	67.2	69.6	64.1	49.7
	-10	23.53	74.1	73.2	77.3	52.7
	-15	26.05	49.6	52.7	43.2	39.3
	-20	29.22	36.7	35.6	33.2	32.1

注:PVS 为最大波峰矢量总和。

### 3.2 地表振动特性分析

由表 2、图 3 及图 4 可知,掌子面后方地表处的 PVS (peak vector sum)较其前方等距离处具有放大现象,且放大倍数随爆源距的增大而先增大后减小,在 10 m 处达到最大,整体放大倍数在 1.22~2.04 之间。

## 4 数值模拟研究

根据工程波动理论,地下隧道对地表振动速度的影响,实质上是隧道对爆破地震波的散射问题,可用解析法和数值法对其进行理论分析。数值法在任意地下结构及复杂场地特性方面具有解析法所不具备的独到优势,故用数值法对试验现象进行进一步研究。

由于测点位于爆破点上方,地表质点的垂向振动速度一般要大于其水平向振动速度<sup>[5]</sup>。因此采用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟研究上台阶掘进爆破引起的振速变化规律。采用 cm-g- $\mu$ s 单位制,采用 ALE 多物质流-固耦合算法进行计算。

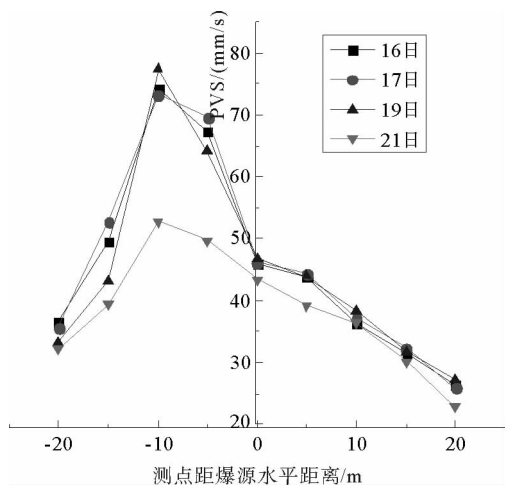


图 3 地表振速特性折线图

Fig. 3 The curve of vibration velocity for surface measuring point

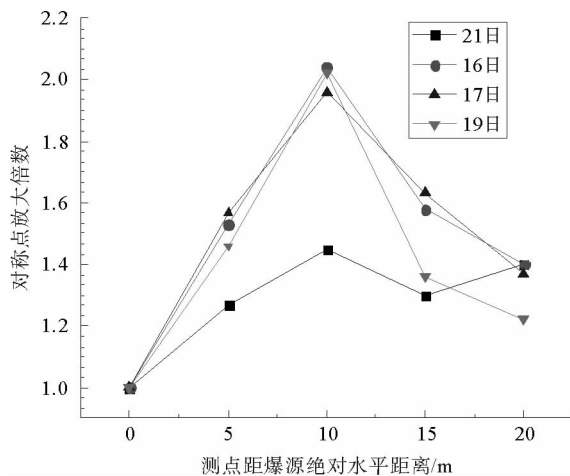


图 4 振速放大倍数随水平距离变化折线图

Fig. 4 The curve of vibration velocity magnification times with the changing of distance

#### 4.1 计算模型及边界处理

$x$  轴指向掘进方向右侧,  $y$  轴竖直向上,  $z$  轴背离掘进方向且过隧道拱心。隧道上边界至地表的距离与实际一致。为减少边界效应, 将隧道底部至模型底部的距离设置为隧道高度的 3 倍, 将两个隧道的边缘到模型边缘的距离设置为隧道宽度的 3 倍<sup>[6]</sup>。如图 5~6 所示, 考虑到对称性, 故建二分之一模型, 计算区域为  $25\text{ m} \times 50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。由于坑道内冲击波的传播规律明显不同于自由大气中冲击波的传播规律<sup>[7]</sup>, 因此模型包括土层、围岩、炸药、炮泥及隧道内空气, 采用 8 节点 SOLID164 实体单元建模, 炸药、炮泥和空气采用欧拉网格划分, 围岩和土层采用拉格朗日网格划分。整个模型共划分 20 936 个单元, 23 890 个节点。为消除截断边界的反射波影响, 设  $x=0$  面为对称面、地表为自由边界、其余面为无反射固定边界, 位移均为  $u_x=0$ ,  $u_y=0$ ,  $u_z=0$ 。

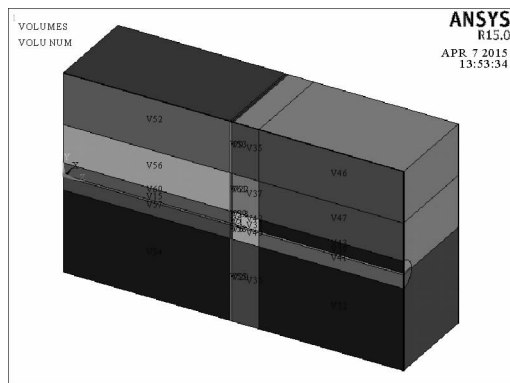


图 5 有限元计算模型

Fig. 5 The finite element calculation model

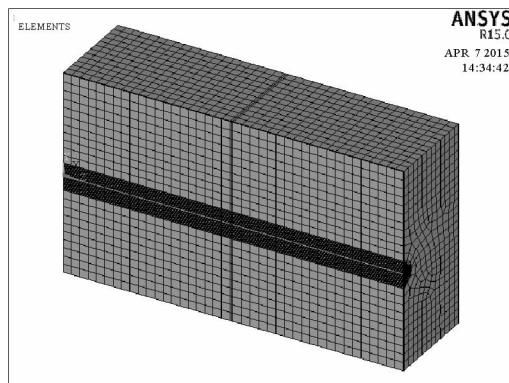


图 6 网格划分

Fig. 6 Mesh generation

#### 4.2 材料参数选取

选用 \* MAT\_NULL 为隧道内空气的材料模型、\* MAT\_SOIL\_AND\_FOAM 作为土层的材料模型、\* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 为围岩和炮泥的材料模型、\* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 为 2 号岩石乳化炸药的材料模型。数值模型材料参数列于表 3, 炸药及其状态方程参数列于表 4。

表 3 数值模型材料参数表

Tab. 3 Material parameters of numerical model

参数	指 标			
	围岩	土层	炮泥	空气
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2 600	1 730	850	1.29
弹性模量/GPa	62	0.03	0.000 18	
剪切模量/GPa	11.2	3.85		
泊松比	0.25	0.32	0.35	
抗拉强度/MPa	2.580	0.016	0.040	
内聚力/MPa	5.50	0.06		
内摩擦角/(°)	43	32		

表 4 炸药及其状态方程参数表<sup>[5]</sup>

Tab. 4 The table of state equation parameter for explosive

$\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	$D$ /(m/s)	$A$ /GPa	$B$ /GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$ /GPa	$P_{CJ}$ /GPa	$V_0$ /(L/kg)
1 300	4 600	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192	32.4	1

### 4.3 数值计算结果分析

选取爆源的正上方、前方 15 m 及后方 10 m 处的模拟地表振动速度变化曲线与现场实测的地表振动速度变化曲线进行对比分析。由图 7~9 的波形对比分析可知,数值模拟获得的波形与实测波形基本相符,振动速度衰减规律相同,但最大峰值振速存在一定误差,误差的大小将直接影响数值方法的可靠度,因此将两者的对比结果列于表 5。

由表 5 中的数据可知,虽然不同位置处的差异具有波动和不确定性,但最大相对误差为 5.04%,这充分说明模拟结果与实测结果的变化规律及特性吻合,证实数值模拟研究实际隧道掘进爆破产生的振动效应是可行的。

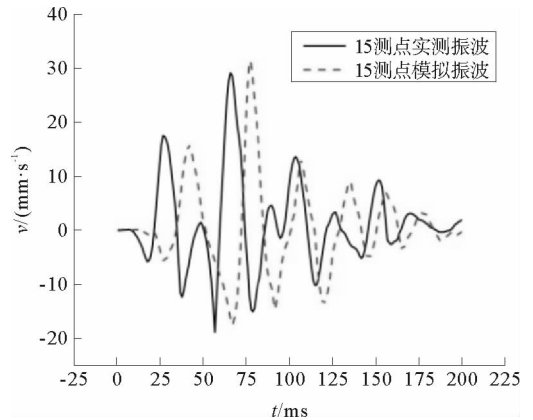


图 7 掌子面前方距爆源 15 m 处地表振动速度波形  
Fig. 7 Vibration velocity of ground at 15 m from a blasting source in front of working face

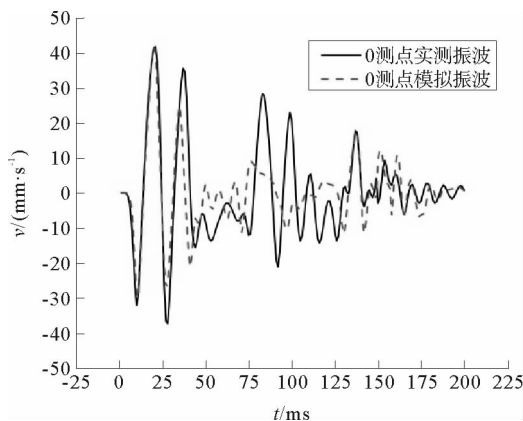


图 8 爆源正上方地表振动速度波形  
Fig. 8 Vibration velocity of ground over a blasting source

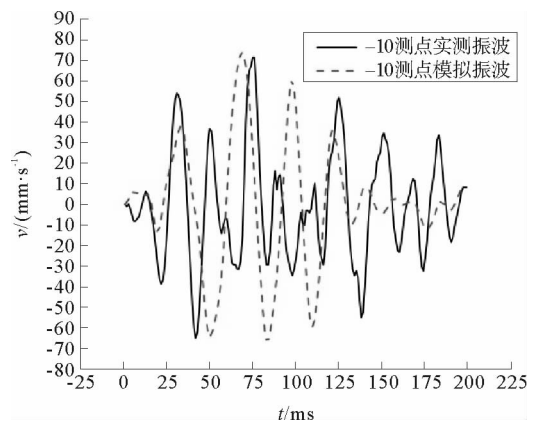


图 9 掌子面后方距爆源 10 m 处地表振动速度波形  
Fig. 9 Vibration velocity of ground at 10m from a blasting source behind working face

表 5 地表振动参数模拟计算结果及其误差

Tab. 5 Results and errors of surface vibration parameters simulation

距爆源水平距离/m	实测垂直振速峰值/(mm/s)	模拟垂直振速峰值/(mm/s)	绝对误差/(mm/s)	相对误差/%
20	26.1	27.3	1.2	4.60
15	30.6	31.4	0.8	2.61
10	34.8	35.7	0.9	2.59
5	38.3	37.1	-1.2	3.13
0	43.1	42.5	-0.6	1.39
-5	63.5	62.6	-0.9	1.42
-10	73.9	75.8	1.9	2.57
-15	47.5	48.6	1.1	2.32
-20	27.8	29.2	1.4	5.04

为进一步研究爆破的地表振动响应及传播规律,采用单一变量原则,在仅将隧道埋深分别改变为 11, 21, 31, 41 m 的状况下进行数值计算分析,结果如图 10 所示。分析表明:隧道埋深越浅,放大现象越显著,并且放大倍数增幅较大;隧道埋深越深,放大现象越微弱甚至不显现。

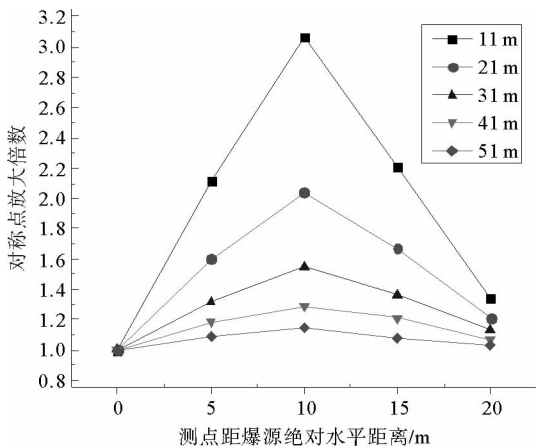


图 10 隧道埋深对放大效应的影响

Fig. 10 Influence of tunnel buried depth on amplification

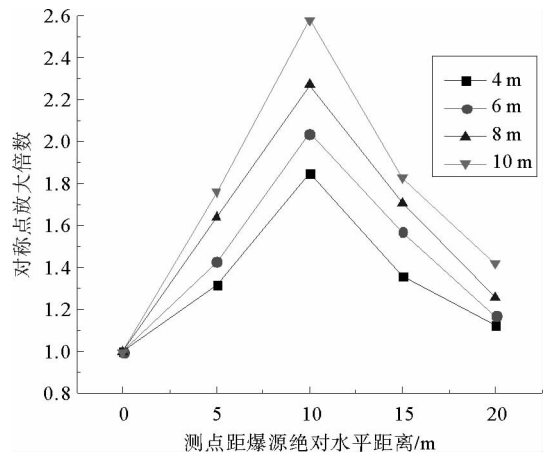


图 11 隧道断面尺寸对放大效应的影响

Fig. 11 Influence of tunnel section size on amplification

同时,为了研究隧道断面尺寸对放大效应的影响,在不改变炸药单耗,仅改变断面直径分别为 4, 6, 8, 10 m 的状况下进行数值计算分析,结果如图 11 所示。分析表明:隧道断面尺寸越大,放大效应越显著,且放大倍数增幅较大;如若取断面尺寸无限大,可以将上覆岩土层看成独立的悬臂结构,此时的放大效应与鞭梢效应相似。

鉴于隧道的埋深及断面尺寸对爆破的地表振动响应及传播规律的影响是数值计算所得,并且试验研究中的隧道埋深及断面尺寸已由设计确定,故数值计算分析得出的结果尚需其他工程实践验证。另已有专家学者<sup>[8-12]</sup>运用解析法得出,浅埋孔洞对 P 波、SH 波、SV 波及 Rayleigh 波均有不同程度的散射放大作用,致使孔洞附近地表出现振动放大的现象。

## 5 结论

- 1) 城市地铁浅埋隧道掘进爆破过程中,存在着掌子面后方地表处的爆破振速是其前方等距离处的 1.22~2.04 倍。
- 2) ANSYS/LS-DYNA 模拟结果与实测的变化规律和特性吻合,最大峰值振速误差在工程接受范围内。
- 3) 孔洞散射放大效应对埋深及断面尺寸的变化比较敏感,埋深越浅、断面尺寸越大,放大效应越显著。
- 4) 浅埋隧道开挖后形成的孔洞,破坏开挖前岩体的整体性,致使隧道上方岩土层抵抗扰动的能力下降;

已形成的孔洞限制爆破空气冲击波的衰减速度,使爆破应力波与空气冲击波在孔洞内壁面上进行复杂的相互作用;已形成的孔洞对爆破应力波具有散射放大作用;受上述三方面因素的综合影响,浅埋隧道爆破掘进过程中的孔洞散射放大效应特别显著。

因此,浅埋隧道掘进爆破下穿地表重要保护建(构)筑物及对振动敏感的地段时,应重视这种放大现象存在的安全隐患及其对隧道爆破设计、震动安全评价的影响。在掌子面后方有孔洞存在时,应加强对掌子面后方地表处的振动监测,合理优化爆破设计方案,有效控制爆破振动。

### 参考文献:

- [1]周俊汝,卢文波,张乐,等.爆破地震波传播过程的振动频率衰减规律研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(11):2171-2178.  
ZHOU Junru,LU Wenbo,ZHANG Le,et al. Attenuation of vibration frequency during propagation of blasting seismic wave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(11):2171-2178.
- [2]陈士海,魏海霞,张安康,等.基于小波包技术的爆破地震效应计算模型及安全判据研究[J].爆炸与冲击,2010,30(4):377-382.  
CHEN Shihai,WEI Haixia,ZHANG Ankang,et al. Computational model and safety criterion of blasting vibration effect based on wavelet packet techniques[J]. Explosion and Shock Waves,2010,30(4):377-382.
- [3]柴修伟.不同炸药性能对爆破振动效应的影响[J].爆炸与冲击,2011,31(5):548-552.  
CHAI Xiuwei. Effects of different explosive properties on blast vibration[J]. Explosion and Shock Waves,2011,31(5):548-552.
- [4]张继春,曹孝君,郑爽英,等.浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(22):4158-4163.  
ZHANG Jichun,CAO Xiaojun,ZHENG Shuangying,et al. Experimental study on vibration effects of ground due to shallow tunnel blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(22):4158-4163.
- [5]肖文涛,肖文芳,房泽法,等.地铁隧道掘进爆破地表震动效应研究[J].武汉理工大学学报,2011,33(10):113-117.  
XIAO Wentao,XIAO Wenfang,FANG Zefa,et al. Study on vibration effects of ground induced by metro tunnel excavation blasting[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2011,33(10):113-117.
- [6]国胜兵,潘越峰,高培正,等.爆炸地震波模拟研究[J].爆炸与冲击,2005,25(4):335-340.  
GUO Shengbing,PAN Yuefeng,GAO Peizheng,et al. Numerical simulation of explosion seismic waves[J]. Explosion and Shock Waves,2005,25(4):335-340.
- [7]刘晶波,闫秋实,伍俊.坑道内爆炸冲击波传播规律的研究[J].振动与冲击,2009,28(6):8-11.  
LIU Jingbo,YAN Qiushi,WU Jun. Analysis of blast wave propagation in side tunnels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(6):8-11.
- [8]刘中宪,梁建文,张贺.弹性半空间中衬砌洞室对平面波P波和SV波的散射(II):数值结果[J].自然灾害学报,2010,19(4):77-88.  
LIU Zhongxian,LIANG Jianwen,ZHANG He. Scattering of pland P and SV waves by a lined tunnel in elastic half space (II):Numerical results[J]. Journal of Natural Disasters. 2010,19(4):77-88.
- [9]纪晓东,郭伟.地下圆形衬砌洞室对SH波的散射(II):数值结果[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(3):409-412.  
JI Xiaodong,GUO Wei. Scatteringof an underground cylindrical lined cavity subjected to incident plane SH waves (II):Numerical results[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2014,33(3):409-412.
- [10]梁建文,尤红兵.层状半空间中洞室对入射平面P波的放大作用[J].地震工程与工程振动,2005,25(2):16-24.  
LIANG Jianwen,YOU Hongbing. Amplification of plane P waves by a cavity in a layered half-space[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2005,25(2):16-24.
- [11]梁建文,纪晓东.地下衬砌洞室对Rayleigh波的放大作用[J].震动工程与工程振动,2006,26(4):24-31.  
LIANG Jianwen,JI Xiaodong. Amplification of Rayleigh waves due to underground lined cavities[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2006,26(4):24-31.
- [12]陈志刚.浅埋孔洞对地表反平面运动的影响[J].岩土力学,2007,28(8):1655-1660.  
CHEN Zhigang. Effects of shallow buried cavity on anti-plane groundmotion[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(8):1655-1660.