

文章编号: 1001-4632 (2005) 04-0073-04

# 近距离爆破对既有隧道的振动影响

彭道富<sup>1</sup>, 李忠献<sup>2</sup>, 杨年华<sup>3</sup>

(1. 中铁十八工程局, 天津 300222; 2. 天津大学, 天津 300072; 3. 铁道科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 根据实测资料, 运用统计回归方法, 进行近距离爆破对隧道周边振动场分布影响的分析, 得出结论: 最大振动速度出现在隧道迎爆侧的墙壁和拱部, 墙脚点振动速度较小, 背爆侧振动相对较轻; 爆源越近, 迎爆侧与背爆侧振动反差越大。比例距离越大, 隧道周边的振动峰值速度分布越趋于均匀; 爆破夹制作用越大, 邻近隧道产生的爆破振动越大; 岩体越坚硬完整, 振动峰值衰减越慢。提出增加起爆段别, 减小单段爆炸药量, 增加空孔, 改善临空面, 减小夹制作用等降低爆破振动的措施。

**关键词:** 隧道; 爆破; 振动; 安全

中图分类号: U458 文献标识码: A

为了满足高速交通的要求, 提高行车安全性, 我国当前铁路旧线改造和新线建设中的长隧道以及高速公路隧道基本都采用上、下行独立隧道的设计方案。由于受地形地质条件或征地范围的限制, 通常要求两条独立隧道的间距尽可能小。为此有时还会遇到两隧道高低交叉的情况。当间距过小时, 爆破开挖会对邻近隧道造成振动扰动危害, 对邻近隧道的安全造成影响。以往对隧道周边爆破振动场的认识大多基于模拟计算的推测, 为了获得邻近隧道周边的真实爆破振动场分布规律, 作者在秦岭隧道、八达岭隧道、招宝山隧道等工点进行了大量现场测试。通过对这些测试数据进行分析, 研究近距离爆破对既有隧道的振动影响, 进而提出合理的爆破减振措施和安全防护对策。

## 1 邻近爆破时隧道周边振动场的分布

秦岭隧道围岩条件为坚硬完整的花岗片麻岩, 两相邻隧道平行, 间隔  $R$  为 22 m, 见图 1。当 I 线隧道爆破掘进时, 在邻近 II 线隧道周边的特征点上布置测点, 安放法向速度传感器, 对其进行大量的振动测试。所得 II 线隧道周边典型的最大法向振速分布见图 2。

另一隧道工程围岩条件也为坚硬完整的花岗岩, 需要在邻近隧道上部左侧开挖爆破, 爆破位置

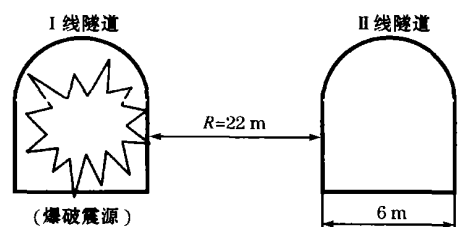


图 1 秦岭隧道剖面布置图

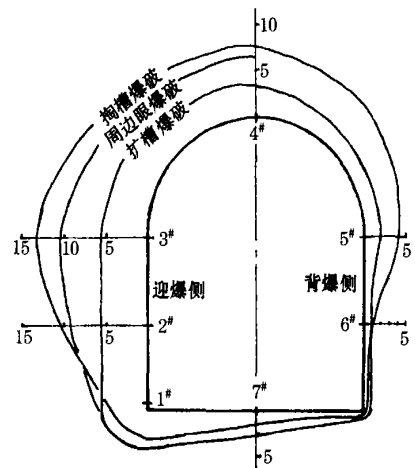


图 2 秦岭 II 线隧道爆破振动速度分布图(单位:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

和炮眼布置见图 3 所示。上部爆破区离洞顶仅 4 m, 每次爆破共 4 排抬炮, 由上向下逐排分段起

收稿日期: 2004-05-14

作者简介: 彭道富 (1959—), 男, 湖南浏阳人, 教授级高工。

爆，每排炮眼安排一个段别，每段引爆时差为50~75 ms。爆破时测得隧道周边最大法向振速分布见图4，振动测试数据见表1。

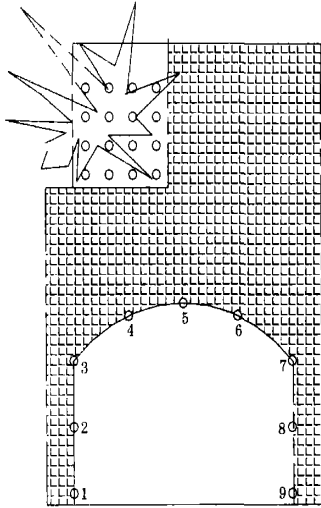


图3 爆破位置示意图 (1—9为炮眼布置点)

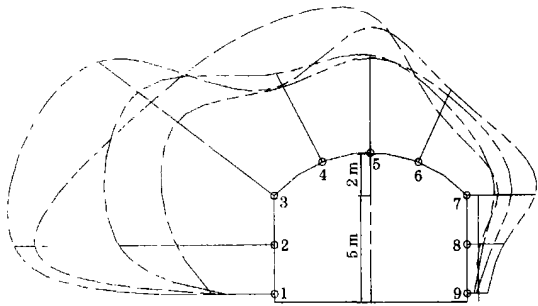


图4 爆破振动速度分布 (1—9为测点)

表1 隧道爆破振动测试结果

测点号	第一段峰值 $I / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	第二段峰值 $I / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	第三段峰值 $I / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	第四段峰值 $I / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	5.33	3.00	2.34	2.71
2	12.5	4.69	7.45	11.50
3	10.5	5.80	8.12	7.34
4	4.06	3.96	4.66	6.98
5	5.86	4.43	4.57	6.47
6	3.69	3.41	3.07	2.43
7	3.3	2.15	1.33	1.51
8	1.77	1.28	0.78	0.63
9	0.97	0.43	0.33	0.55

由测试结果可知，隧道周边迎爆侧拱脚附近振动速度最大，出现多个振动峰值；两侧为次峰值振动区；隧道底角虽然应力水平很高，但由于该部位夹制作用较大，与直墙的其他部位相比振动相对较小。迎爆侧拱顶的最大振速较高，它的振动破坏危险性很大，背爆侧直墙的峰值振动速度比迎爆侧小很多倍，可不采取防护措施。

## 2 影响爆破振动强度和分布规律的因素分析

大量洞内爆破振动测试结果表明，影响爆破振动强度和分布规律的因素主要有几何距离、爆破条件和地质条件。

### 2.1 几何距离

将至药包中心距离与单段爆破药量  $Q$  的立方根的比值当成比例距离  $R' = R/Q^{1/3}$ 。爆破振动最大值  $V$  与比例距离基本上可回归成指数衰减函数关系，即

$$V = KR'^a \tag{1}$$

式中： $K$  为回归系数， $a$  为衰减指数。

图5为秦岭隧道3#特征位置不同比例距离的振动衰减回归曲线，其相关系数都在0.9以上。由此可见，比例距离与振动速度有良好的对应关系，比例距离越近振动速度越大。

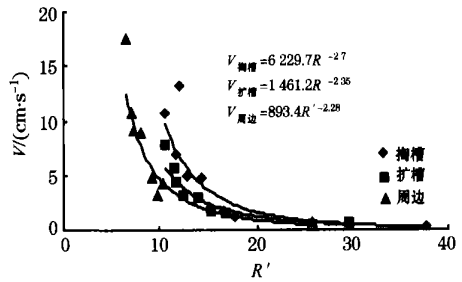


图5 3#位置不同爆破条件下爆破振动速度衰减规律

分析图2和图4的分布状况可知，爆源相对隧道洞径  $B$  的比例距离  $R'' = R/B$  越大，其隧道周边的振动峰值速度分布相对越均匀，反之，迎爆侧与背爆侧的反差越大。

### 2.2 爆破条件

爆破条件包括炸药重量、炸药性能、装药结构和爆破介质临空面的夹制条件等。在这些因素中，除单段最大爆破药量在比例距离中已做考虑外，爆破的夹制条件是影响爆破震动强度的另一重要因素。图6为典型的爆破振动记录波形图。由图6可见，爆破震动的最大峰值振速出现在掏槽爆破、底板眼爆破段或周边预裂爆破。

掏槽爆破时只有一个临空面（掌子面），而且掏槽爆破要求把槽内岩块抛出来，因此掏槽爆破的性质是在较大夹制作用下的强抛掷爆破，夹制爆破导致更多的爆炸波能向岩体内部传播，造成临近隧

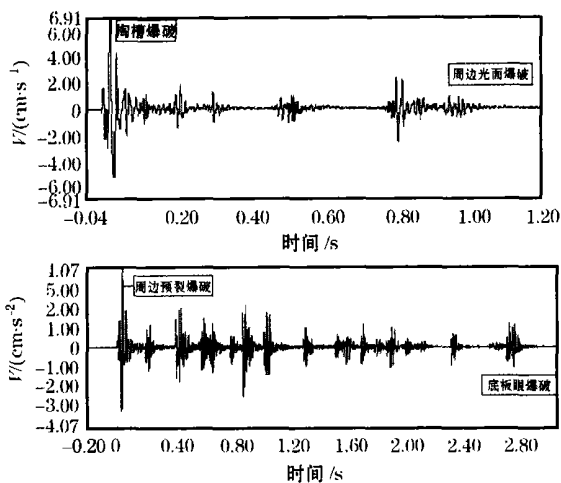


图 6 典型的爆破振动记录波形

道的较强振动。底板眼爆破要求将石碴向上抛起，并且底板眼一般要向下滑，特别是底板两侧靠近墙角的炮眼，其临空面内折，夹制作用增大，所以底板眼爆破时也引起较大振动。相反，周边眼光面爆破时临空面条件最好，即使周边眼单响药量与掏槽眼单响药量相等，其爆破振动峰值仅为掏槽爆破的 1/5。对比周边预裂和光面爆破效果时，相同距离 (20 m) 处测得预裂爆破的振动速度峰值比光面爆破大 4 倍。

根据不同爆破条件下测得的爆破振动速度的回归分析，爆破夹制作用与爆破振动速度衰减经验公式中  $K$  值有一定的对应关系。以秦岭隧道 I 线爆破时 II 线 3<sup>#</sup> 位置测得的径向振动速度为例，回归不同夹制条件下，掏槽爆破、扩槽爆破、周边眼爆破的爆破振动速度衰减规律，结果见图 5。可见，夹制作用最大的掏槽爆破条件下，公式中  $K$  值最大；扩槽爆破临空面增大，夹制作用减小， $K$  值也减小；周边爆破临空面最大，夹制作用最小， $K$  值最小。

招宝山隧道右洞预留光爆层爆破时，左洞洞壁振速衰减回归公式为

$$V_{\max} = 77.5R'^{-1.34}$$

中槽爆破振动速度的衰减回归式公式为

$$V_{\max} = 148R'^{-1.34}$$

对比以上两式，中槽爆破夹制作用大，对应回归公式中的  $K$  值较大， $\alpha$  值基本不变。这一现象在梧桐山隧道增建二线爆破振动测试中也有惊人的相似，其 IV 类围岩段爆破振动衰减规律如下：

掏槽爆破  $V_z = 150R'^{-1.76}$ ;

辅助眼爆破  $V_z = 100R'^{-1.77}$ ;

周边眼爆破  $V_z = 68R'^{-1.71}$ 。

以上参数再次证明，夹制作用大， $K$  值较大的趋势，而  $\alpha$  值变化较小。综上所述，爆破所处的地质条件基本相同时，随着爆破夹制作用逐渐加大，邻近隧道产生的爆破振动越大，具体表现在振动速度衰减公式中  $K$  值较大；夹制作用越小， $K$  值越小。

### 2.3 地质条件

岩体地质条件对爆破振动 (扰动) 场的影响，主要表现在振动波的传播衰减指数上。根据多条隧道爆破开挖工程中振动测试结果以及收集的其他邻近隧道爆破的有关测试资料<sup>[2,3]</sup>，表 2 给出了不同地质条件下隧道迎爆侧的振动衰减方程。

表 2 不同隧道中实测的爆破振动回归衰减方程

隧道名称	地质条件	衰减方程	备注
秦岭隧道 (掏槽爆破)	坚硬完整的花岗片麻岩, V 类围岩	$V_{\max} = 276R'^{-1.55}$	平行相邻隧道间距 30 m, 2 <sup>#</sup> 测点有可比性
招宝山隧道 (中槽爆破)	中等风化流纹斑岩, 节理裂隙发育, IV 类围岩	$V_{\max} = 148R'^{-1.34}$	平行相邻隧道中间隔墙厚 4 m
八达岭隧道 (掏槽爆破)	风化石和回填土	$V_{\max} = 89.5R'^{-1.70}$	十字交叉隧道, 爆源距离 10~30 m
梧桐山隧道 (中槽爆破)	风化花岗岩, III 类围岩	$V_{\max} = 280R'^{-2.08}$	平行相邻隧道中间隔墙厚 13 m
梧桐山隧道 (中槽爆破)	弱风化花岗岩, IV 类围岩	$V_{\max} = 150R'^{-1.76}$	平行相邻隧道中间隔墙厚 13 m

由表 2 中不同地质条件下，峰值振速衰减指数的对比可见，岩体越坚硬完整，衰减指数  $\alpha$  的绝对值越趋于减小，也即振动波衰减越慢；而振波通过软弱破碎岩体时，振动衰减指数  $\alpha$  的绝对值增大，振波衰减较快。

### 3 降低爆破振动的有效措施

根据上述邻近隧道爆破的振动场特点分析，结合以往施工经验，对邻近隧道的爆破提出以下几条主要的爆破减振措施。

1) 将一次爆破的所有炮孔分成较多段按顺序起爆，段数越多，单段爆破最大药量越少，特别对于掏槽爆破、底板眼爆破和预裂爆破等相关炮眼应尽可能减小单段爆破药量，这种分段微差爆破将使最大振速明显降低。目前国外高精度长延时雷管和雷管段别数，可以实现全断面逐孔外微差起爆，达

到最小的振动控制要求。

2) 为避免微差爆破延时时间不够或延时误差造成应力波叠加, 使振动加强, 在选择雷管段数时, 应加大相邻段别的段位差, 将目前国内市场供应的毫秒雷管和半秒延期雷管配合使用可分成 28 个段别。在段别排列方便的情况下, 应尽可能考虑掏槽区跳段排列雷管, 它既利于相邻两段振动的主振相分离, 避免振动叠加, 又利于为后排爆破创造更充分的临空面, 减轻爆破夹制作用对振动的加强作用。

3) 在振动要求较高地段, 为了减轻对邻近隧

道的振动影响, 除应适当减小炮孔内线装药密度外, 还可采取周边预裂爆破技术阻隔爆破地震波向外传播。

4) 若采用空孔直眼掏槽爆破方案, 应增加空孔数量或增大空孔直径, 以加大临空面, 减小夹制作用造成的振动加强, 这对降低掏槽爆破的振动强度十分有效。

5) 当分段延时和其他常规减振方法控制爆破振动仍然不能满足要求时, 只能减小爆破进尺, 缩短炮孔长度, 降低单孔装药量, 达到最大降低振动的目的。

### 参 考 文 献

- [1] Giogio Berta. Blasting induced Vibration in Tunnel [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9 (2): 175—187.
- [2] 高晓初, 吴子骏. 运营隧道小间距平行隧道开挖爆破安全控制 [A]. 工程爆破文集第六辑 [C]. 深圳: 海天出版社, 1997.
- [3] 林学义, 王兰民. 隧洞的爆破震动效应问题 [A]. 工程爆破文集第六辑 [C]. 深圳: 海天出版社, 1997.
- [4] 杨年华, 张志毅, 邓志勇, 等. 硬岩特长隧道快速爆破掘进技术研究与实践 [J]. 中国铁道科学, 2001, 22 (3): 41—46.
- [5] 杨年华. 城区浅埋隧道敏感地段爆破掘进技术 [A]. 铁道科学研究院院庆 55 周年论文集 [C]. 北京: 铁道出版社, 2005.

## Vibration Effect on the Working Tunnel Induced by an Adjacent Blasting

PENG Dao-fu<sup>1</sup>, LI Zhong-xian<sup>2</sup>, YANG Nian-hua<sup>3</sup>

(1. China Railway 16th Group Limited Company, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** According to the actual survey data and by adopting statistical regression method, analyses of the adjacent blasting influence were carried out on the distribution of vibration field circumjacent to the tunnel. Some conclusions have been drawn. The maximum vibration speed occurs on tunnel wall and arch section facing the blasting side. The vibration speed at the foot of the wall is relatively small. The vibration back facing the blasting side is comparatively small. The closer to the blasting source, the bigger is the contrast of the vibration between front facing side and back facing side. When proportional distance becomes longer, the speed distribution of vibration peak value circumjacent to the tunnel will be more even. The more the blasting clamping force is, the more blasting vibration is produced to the adjacent tunnel. If the rock body is harder and complete, the peak value of vibration will be declined more slowly. Measures for reducing blasting vibration are proposed, such as increasing primary blasting segments, decreasing explosive volume for single segment, adding more empty holes, improving free face and lessening clamping force.

**Key words:** Tunnel; Blasting; Vibration; Safety

(责任编辑 吴 彬)