

文章编号: 1001-1455(2000)02-0175-07

# 近距侧爆情况下马蹄形隧道 动态响应特点的研究

刘 慧

(铁道部科学研究院, 北京 100081)

摘要: 在数值模拟和动光弹试验研究的基础上, 对马蹄形隧道在邻近爆破作用下的动态响应特点进行了分析, 并在综合考虑入射应力波波长、隧道直径、爆源与隧道的相对距离的基础上, 提出了隧道迎爆一侧的动应力集中因子的近似确定方法, 为今后邻近隧道的爆破施工安全提供了有益的参考。

关键词: 动应力集中因子; 隧道; 爆破

中图分类号: TB41 文献标识码: A

## 1 引言

随着经济的飞速发展, 大量的单线隧道需增建二线隧道, 一些新线隧道需建成双线, 而且将来这种需要还会进一步增长, 这就产生了邻近爆破作用下既有隧道损伤甚至破坏的危险。特别是对线间距偏小的双线隧道, 如何预测爆破对既有隧道的影响, 控制爆破振动造成的危害, 是爆破安全施工的关键。

目前国内外大都采用质点振动速度作为衡量隧道爆破安全影响的主要物理量。该法自60年代起普遍作为地面建筑物的安全判据, 作为地下建筑物的判据是一种沿用。我国国家标准《爆破安全规程》GB6722-86规定, 交通隧道安全振动速度标准为  $v \leq 15 \text{cm/s}$ 。质点振速标准的经验性较强, 且都没有与爆破破坏的机理联系起来, 缺乏足够的理论依据, 不同标准给出的安全振速相差很大, 在实际工程应用中可操作性较差。实质上, 爆破对隧道的破坏作用主要是由爆炸应力波在隧道周边产生反射和绕射所致, 受爆源特性、介质条件和隧道自身结构三大条件的影响, 由于影响因素的复杂性, 目前人们对这一动态作用过程的机制还不十分清楚, 为此我们首先对该问题进行数值模拟。

## 2 邻近爆破作用下隧道动态响应的数值模拟

在波动力学中, 邻近爆破对隧道影响的问题, 可以看作应力波在半无限介质中的孔洞周边的绕射。文献[1]通过理论分析得到了稳态波作用下隧道周边的动应力集中因子(即孔洞周边的应力与无孔洞情况下相应位置、时刻的入射应力之比<sup>[1]</sup>)的分布及其变化规律。解析法虽然能给出准确可靠的分析结果, 但数学处理上的困难制约了它的适用范围, 目前理论分析仍只能

\* 收稿日期: 1998-10-28; 修订日期: 1999-11-05  
作者简介: 刘 慧(1968—), 男, 博士, 助理研究员。

解决介质、结构线弹性,入射波为稳态波、边界条件较简单的情形,要分析更为复杂的实际问题,主要借助试验或数值计算及有限元方法。由于爆炸应力波是一种冲击波,持续时间很短,频谱构成十分复杂,目前用理论方法精确计算应力波参数还不可能,用试验方法得到的应力波参数,因受试验条件所限,也有其应用的局限性。而随着计算机及动力有限元、边界元等的迅猛发展和应用的日益广泛,使得此问题的数值模拟计算成为可能。由于在爆炸冲击荷载作用下,结构往往产生大变形而表现出三重非线性:几何非线性、边界非线性、材料非线性,因而传统的有限元方法大多建立在爆炸应力波的简化模型之上,带有很大的局限性。近些年来,数值计算在爆破理论与技术研究领域的应用取得了令人瞩目的成果,许多流体弹塑性计算程序(包括有限元程序和有限差分程序等)被先后应用于爆破过程数值模拟并获得成功。在美国、澳大利亚、西班牙等国学者的研究中,已有大量爆破数值模拟的成果<sup>[2]</sup>。特别是80年代以来,美国LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)的John O. Hallquist教授主持并一直研究材料的动态性能数值计算,取得了大量的开创性成果,DYNA-2D程序就是其中之一。该程序是应用有限元方法来计算非线性结构材料的大变形动力响应,采用四节点单元进行离散化;程序使用单点高斯积分,引入沙漏黏性控制零能模态,并应用中心差分法进行时间积分。尤其是程序能处理结构在高速碰撞或炸药爆炸作用下的动态响应,这些特性使得该程序特别适合结构(如隧道)或介质材料在爆破作用下的数值模拟。

**算例** 如图1所示:隧道形状为马蹄形,跨度为14m,直墙高12m,爆源距左直墙的距离为10m,距离底板8m,药量为100kg(二号岩石炸药);隧道围岩的有关参数见表1。

利用DYNA-2D程序,我们对上述算例进行了计算,得到了炸药起爆后不同时刻隧道围岩内的应力场及最大振速场等值线图,并在对这些图分析研究的基础上得到了相应的数据分析表。

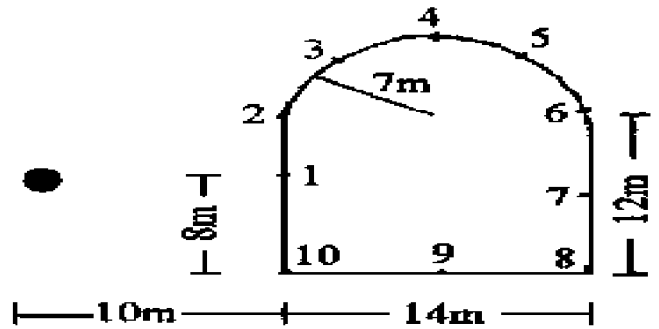


图1 马蹄形隧道动态响应计算模型图

Fig.1 Schematic drawing of the calculating model for the dynamic response of a hoof-shaped tunnel

表1 围岩物理性质参数表

Table 1 Physical properties of the rock

容重 /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	纵波速度 /( $\text{m}/\text{s}$ )	泊松比	弹性模量 /TPPa	波阻抗 /[ $(\text{kg}/\text{m}^3) \times (\text{m}/\text{s})$ ]	抗剪强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	体积压缩 模量/GPa
2850	5400	0.26	0.74	15.4	40	25	55.80

## 2.1 最大剪应力

马蹄形隧道周边最大剪应力等值线图如图2所示。由图2及相应的数据分析表2可以看出:

(1)在迎爆直墙的大范围内存在着应力振荡现象,应力峰值分布均匀,且在计算时间内没有出现跨量级的衰减。

(2)隧道的两直墙底部都有相对较高的应力集中现象发生,这是由该部位的等效曲率半径较小、入射应力波的相对波长 $\lambda/(2a)$ ( $\lambda$ 为应力波的波长, $a$ 为隧道的半径)较大(即波数 $\alpha a$

=2πa/λ 降低)造成的。

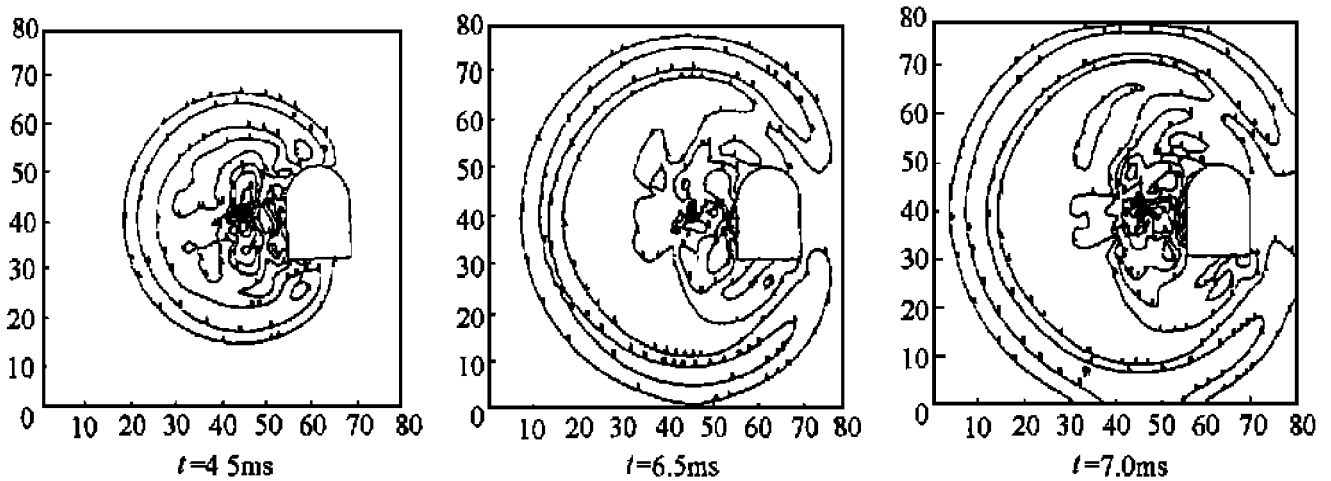


图2 马蹄形隧道周边最大剪应力等值线图

Fig.2 Contours of the maximum shear stress surroundly the tunnel

表2 马蹄形隧道周边的最大剪应力 τ<sub>max</sub> 数据分析表

Table 2 Maximum shear stress in surrounding rock

P	τ <sub>max</sub> /MPa												(α <sub>k</sub> ) <sub>P</sub>
	2ms	2.5ms	3ms	3.5ms	4ms	4.5ms	5ms	5.5ms	6ms	6.5ms	7ms	7.5ms	
1	22.5	30	58	72	71	60	41	55	43	51	40	38	2.48
2	15	45	43	43	43	45	41	27	32	25	24	23	1.96
3	0	15	58	72	57	23	14	<14	11	10	16	<15	1.67
4	0	0	0	20	28	30	20	<14	11	10	12	11	1.33
5	0	0	0	0	0	0	0	<14	<11	10	8.1	7.7	0.5
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<8.1	7.7	<0.5
7	0	0	0	0	0	0	0	0	<11	0	0	<7.7	<0.5
8	0	0	0	0	0	0	0	14	11	10	16	<15	1.86
9	0	0	0	0	21	23	14	14	11	10	8.1	<7.7	0.65
10	0	30	72	72	28	20	14	<14	11	15	16	10	2.0

注：上表中(α<sub>k</sub>)<sub>P</sub> 为隧道周边某一点P(P=1, 2, ..., 10)上的最大动应力集中因子。

(3)最大剪应力出现在拱部,为底板(两底角除外)的3倍左右;迎爆直墙的最大剪应力则为背爆一侧的5倍左右。

(4)将此隧道视为一等面积的圆形隧道,则此隧道的等效半径 a=8.83m, r<sub>0</sub>/a ≈2, 按文献[3]提供的方法(文献[3]给出了爆炸应力波卓越周期的估算方法)进行估算可得入射到直墙上的应力波波数 αa=1.08, 将入射波假定为稳态波,由文献[1]提供的波函数展开法可得相应的理论最大动应力集中因子为2.41(模拟结果为2.48);对拱顶部分按半径为7m的圆形隧道处理,可得 αa=0.59,相应的理论最大动应力集中因子为1.4(模拟结果为1.33);背爆一侧的动应力集中因子均低于理论值。

## 2.2 压应力

马蹄形隧道周边压应力等值线图如图3所示。由图3可以看出:迎爆直墙的绝大部分都

处在反射拉伸区(最大拉应力达 78~130MPa),且持续时间较长(约 5.5ms);在 5.5ms 时,底板中部也出现了反射拉伸区(-15MPa);在 7.0ms 时,背爆直墙底部附近也有反射区出现(-15MPa)。除此以外,其它部位在计算时间内均没有较高的反射拉伸区。

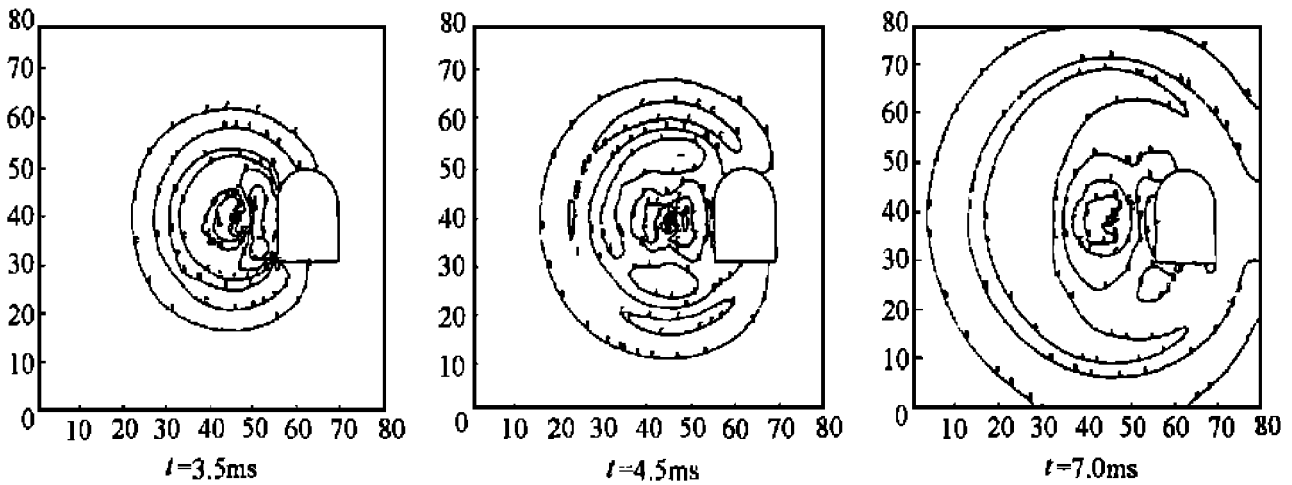


图 3 马蹄形隧道周边压应力等值线图

Fig.3 Contours of the pressure stress in surrounding rock

### 2.3 峰值振速

马蹄形隧道周边最大振速等值线图如图 4 所示。由图 4 及数据分析表 3 可以看出:迎爆直墙上的振动最大,起拱线处为第二峰值区;直墙底部的应力水平虽然很高,但由于该部位的夹制作用较大,与直墙的其他部位相比相应的振动并不大;拱顶的最大振速为底板峰值的 1.4 倍左右,迎、背爆直墙的峰值振速比达 25。

综上所述,在算例给出的条件下,以迎爆直墙的危险性最大,且这种破坏是以反射拉伸破坏为主的;拱部为最大剪应力峰值区,该部位的破坏方式以剪切破坏为主;直墙底部的应力峰值虽然很大,但沿径向的衰减很快,可能的破坏范围较小;背爆一侧为相对安全区。

表 3 马蹄形隧道周边质点最大振速  $v_{max}$  表

Table 3 Peak velocity in surrounding rock

P	$v_{max}/(cm/s)$												
	2ms	2.5ms	3ms	3.5ms	4ms	4.5ms	5ms	5.5ms	6ms	6.5ms	7ms	7.5ms	8ms
1	15	27	8.4	2.5	2.5	1.5	3.4	0.92	2.5	2.3	1.5	1.5	1.0
2	11	21	11	2.5	5.0	3.1	1.1	1.8	1.6	<1.6	1.5	2.3	2.0
3	0	5.3	5.6	7.6	6.3	6.1	4.5	0.92	0.83	0.78	0.78	0.77	<1
4	0	0	0	0	2.5	5.0	3.0	>5.5	5.0	1.6	1.5	0.77	<1
5	0	0	0	0	0	0	1.1	1.35	1.6	2.3	2.3	1.9	1.0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.78	1.5	1.5
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<0.77	<1
8	0	0	0	0	0	0	1.1	1.8	1.6	1.6	2.3	2.3	2.0
9	0	0	0	0	2.5	3.1	2.3	>5.5	5.0	3.1	1.5	1.5	1.0
10	0	5.3	8.4	5.1	5.0	3.1		0.92	0.83	0.78	0.78	<0.77	<1.0

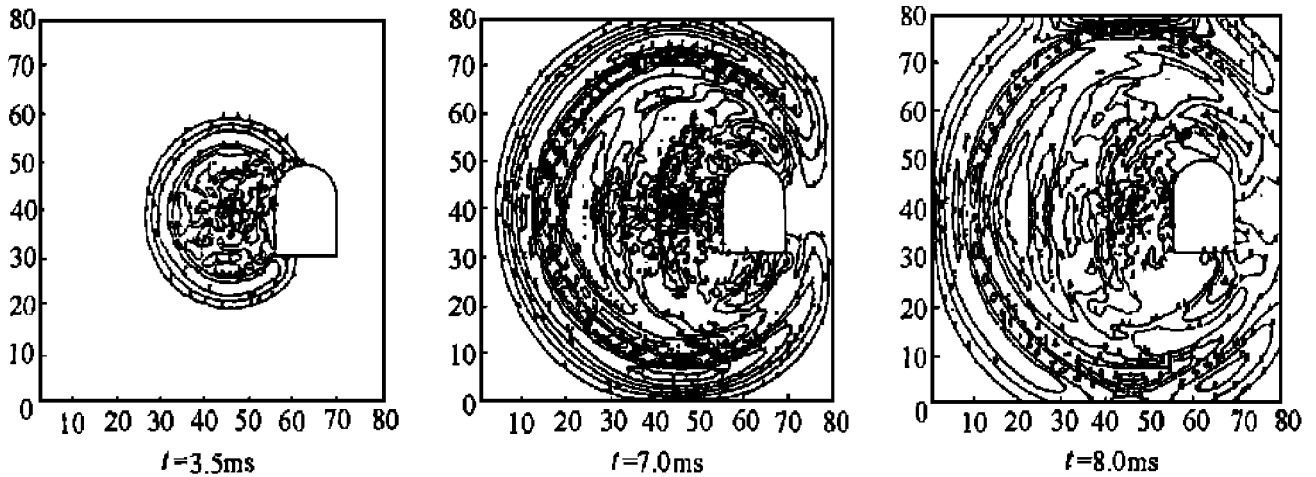


图4 马蹄形隧道周边最大振速等值线图

Fig.4 Contours of peak velocity in surrounding rock

### 3 模拟分析的实验验证

为验证上述数值分析结果，我们在聚碳酸脂板上设计了相应的动光弹实验，其模型如图5所示。马蹄形隧道在爆破作用下应力场演化的动光弹图如图6所示。由图6及表4可以看到：

(1)隧道周边的曲率对应力波的衍射影响很大，在两直墙底部有突出的应力集中现象，而对迎爆直墙部分则在大范围内出现了强烈的反射；

(2)在背爆一侧其应力集中程度较低(被爆直墙底部除外)，迎爆与背爆两侧的应力峰值比约为4；

(3)迎爆一侧反射拉伸区的应力集中程度比圆形断面隧道时低，这可能与迎爆直墙的等效曲率较大有关，因为由文献[1]中的理论分析知，在其它条件相同的情况下， $\alpha a$  增大，应力集中程度相对下降。

(4)将此隧道看作等面积的圆形隧道，可得到入射到  $P=1,4$  处的应力波波数(入射波长可由动光弹图确定)分别为： $(\alpha a)_{P=1}=0.65$ 、 $(\alpha a)_{P=4}=0.57$ ，相应的理论动应力集中因子分别为： $(\alpha_k)_{P=1}=2.5$ 、 $(\alpha_k)_{P=4}=1.68$ (试验值分别为2.7、1.5)。

(5)在实验记录图片中，某些时刻的条纹图案与相应的数值模拟结果非常相似，这进一步说明了用数值方法对实际爆破作用下隧道动态响应的模拟是可信的。

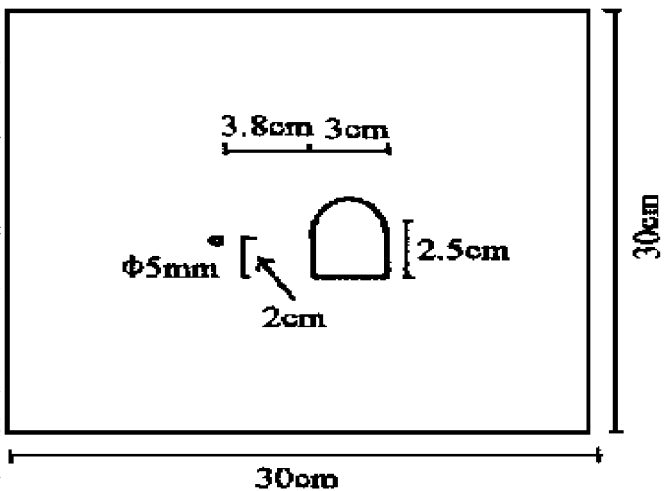


图5 动光弹试验模型图

Fig.5 Schematic drawing of dynamic photoelastic experiment set-up

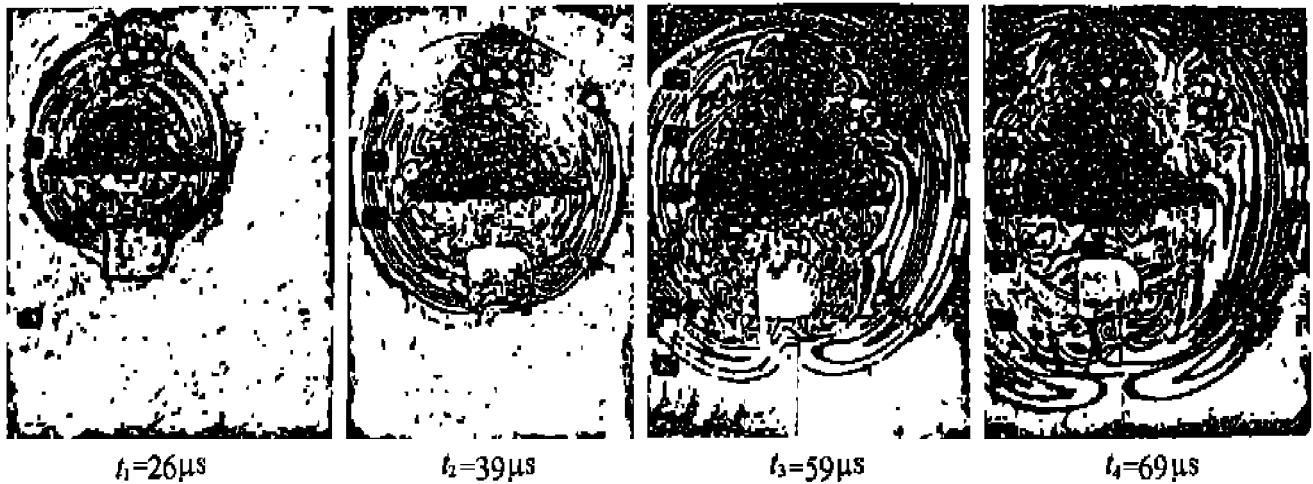


图 6 马蹄形隧道在爆破作用下应力场演化的动光弹图  
Fig.6 Dynamic photoelastic fringe patterns for the development of stress field of a hoof-shaped tunnel nearby the blasting

表 4 马蹄形隧道周边应力条纹级次分布分析表

Table 4 The distribution data of fringe grades around the tunnel

$P$	条纹级次				$(\alpha_k)_P$
	$26\mu s$	$39\mu s$	$59\mu s$	$69\mu s$	
1	-8(2.7)	2(1)	1(0.5)	0.5(0.5)	2.7
2	0	2(1.3)	0.5(0.5)	1(1)	1.3
3	12(3)	6(2.4)	3(1.5)	2(1)	3
4	0	3.5(1.4)	2(1)	3.5(1)	1.4
5	0	2(0.4)	3(1.5)	1(1)	1.5
6	0	0	1(0.67)	1(0.5)	0.67
7	0	0	1(0.5)	0.5(0.25)	0.5
8	0	4(1.3)	7(2.3)	4(2)	2.3
9	0.5(0.25)	0	2(1)	1(1)	1
10	14(3.5)	6(2.4)	2(2)	1.5(1.5)	3.5
$(\alpha_k)_t$	3.5	2.4	2	1.5	$(\alpha_k)=3.5$

注:  $(\alpha_k)_t$  为隧道周边某时刻  $t$  的最大动应力集中因子;  $(\alpha_k)_P$  为隧道周边点  $P$  上的局部最大动应力集中因子;  $(\alpha_k)$  为隧道周边的最大动应力集中因子。

## 4 结 论

由于应力波在孔洞周边存在着衍射、散射效应,在一定深度范围内的隧道围岩应力场与无孔洞时的自由场情况并不相同,其应力水平及分布规律是由应力波波长、隧道尺寸、爆源到隧道的距离等共同决定的。我们采用数值计算与动光弹实验相结合,对近距侧爆情况下隧道周边的动应力场、振动场的特点进行了探讨,并得到了如下结论:

- (1)在近距侧爆作用下,以迎爆直墙的反射拉应力最大,峰值振速最大。
- (2)最大剪应力峰值发生在拱部。

(3)背爆一侧的应力水平、振动强度都远小于迎爆一侧。

(4)隧道周边的动应力集中因子,以迎爆直墙处最大且与稳态波作用下的理论值相近,但背爆一侧的动应力集中因子则比稳态波情况小得多。

(5)在隧道周边曲率突变处有较强的应力集中发生,但影响深度较小。

(6)隧道周边迎爆侧最大动应力集中因子可按下面的步骤近似确定:a. 根据文献[3]及现场实测确定入射应力波在隧道周边不同位置对应的入射波的波长;b. 计算相应的应力波波数(对于非圆形隧道其半径取等效半径),计算相对距离  $r_0/a$ ;c. 由理论分析中给出的解析结果,确定隧道周边的最大动应力集中因子;d. 由此可进一步根据文献[4~5]确定围岩临界振速  $v_e = 10^3 K_0 (K_D \sigma_{p_0} - \sigma_{CT}) g / (K_G \gamma c_e)$ , 式中: $v_e$  为岩石隧道处于弹性阶段时,隧道周边岩石质点的临界振速(cm/s); $\gamma$  为岩石容重( $t/m^3$ ); $g$  为重力加速度; $c_e$  为岩石介质的纵波弹性波速(m/s); $K_D$  为岩石的动应力强度提高系数,取  $K_D = (0.80 - 0.90) \bar{K}_D$ ,  $\bar{K}_D = 1.24 \sim 1.48$ ;  $\sigma_{p_0}$  为岩石静态抗拉强度( $kg/cm^2$ ),  $\sigma_{CT}$  为山体静载在隧道周边岩体产生的静应力( $kg/cm^2$ ); $K_0$  为系数。根据理论计算与试验资料,当炮孔轴线与相邻隧道垂直,即相邻隧道受爆炸应力波的入射作用时,  $K_0 = 2.0$ ; 当炮孔轴线与相邻隧道平行,即相邻隧道受爆炸应力波的反射作用时,  $K_0 = \sqrt{2}$ 。 $K_G$  为动应力集中系数,即上文中的( $\alpha_k$ )。

本文是作者博士学位论文的一部分。在论文完成过程中自始至终得到了冯叔瑜院士和王中黔研究员的悉心指导,借此表示衷心的感谢。

## 参考文献:

- [1] Pao Y H, Mow C C. Diffraction of Elastic waves and Dynamic Stress Concentrations Crane [M]. USA: Russak & company Inc, UK: Adam Hilger Ltd, 1973.
- [2] 金乾坤. 岩石爆破破碎三维逾渗损伤模型的非线性数值模拟[D]. 北京: 中国矿业大学, 1996.
- [3] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. 177 ~ 179.
- [4] 朱瑞庚, 李 铮. 爆炸地震作用下隧道的安全距离问题[J]. 地下工程, 1981, (4): 26 ~ 33.
- [5] 李 铮. 爆炸地震波作用下隧道稳定性的计算[J]. 防护工程, 1993, (4): 19 ~ 25.

## Dynamic Responses of Hoof-shaped Tunnels to Adjacent Blastings

LIU Hui

(China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Dynamic responses of hoof-shaped tunnels to adjacent blastings were studied using numerical simulations and dynamic photoelastic experiments. A method to determine dynamic stress concentration factor on surrounding rock facing the charge was suggested. The method takes incident wavelength, tunnel diameter and the distance between charges and tunnel surface into account, and can be used to evaluate the safety of tunnels nearby blastings.

**Key words:** dynamic stress concentration factor, tunnel, blasting