

# 马蹄形隧道掏槽爆破三维数值模拟

王庆国<sup>1,2</sup>, 庞旭卿<sup>1</sup>, 何章义<sup>2</sup>

(1. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:** 文章利用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 采用三维数值计算方法, 对马蹄形隧道掏槽爆破过程进行了动态模拟, 得出一些有参考价值的结论。隧道岩石爆破时, 应对危险区域进行监控, 充分利用自由面对爆破效果的有利影响。

**关键词:** 数值计算; 马蹄形隧道; 掏槽爆破; 炸药

**中图分类号:** U 455.4

**文献标识码:** A

## 引言

隧道和地下工程在国民经济建设中有着重要的作用, 无论是铁路、公路、水利、水电、矿山等都不可或缺。随着国家建设事业的迅猛发展, 如何降低炸药用量, 减少岩石损伤, 有效进行爆破, 已成为目前隧道工程建设迫切需要解决的问题。在隧道爆破开挖时, 由于爆破过程是一个高温、高压、高速的工程, 其作用机理十分复杂, 爆破地震波的传播介质又是复杂多变的, 这就使得爆破技术的成熟和完善变得十分困难<sup>[1]</sup>。

本文拟基于显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA, 通过数值仿真计算, 探讨马蹄形隧道微差爆破时对孔壁、自由面等处岩石压力、速度以及加速度的影响, 试图给出一些结论和建议。

## 1 算法选择

本文数值计算讨论的是无限岩石介质中的隧道爆破问题。在显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 中, 关于爆破动力方面的算法主要有 Lagrange、Euler 和 ALE 算法。

Lagrange 算法多用于固体结构应力应变分析, 以物质坐标为基础, 采用这种方法结构形状变化和单元网格的变化是一致的, 物质不会在单元内流动, 能够非常精确的描述结构边界的运动, 但处理大变形时, 会出现网格畸变, 引起数值计算的困难, 甚至程序终止运算。Euler

算法以空间坐标为基础, 多用于流体分析, 网格与所分析的物质结构是相互独立的, 有限元节点记为空间点, 其所在位置在整个分析过程不变, 材料在网格之间流动, 在 LS-DYNA 中只要将有关实体单元标志 Euler 算法, 并选择输送 (Advection) 算法。ALE 算法兼具了 Lagrange 和 Euler 二者的特长, 与欧拉网格一样有两层网格, 不同的是空间网格可以任意运动, 可以处理整个物体有空间的大位移并且本身有大变形问题。ALE 算法是先执行一个或几个 Lagrange 时步计算, 此时单元网格随材料流动而产生变形, 然后执行 ALE 时步计算: 保持变形后的物体边界条件, 对内部单元进行重分网格, 网格的拓扑关系保持不变, 称为 Smooth Step。将变形网格中的单元变量 (密度、能量、应力张量等) 和节点速度矢量运输到重分后的新网格中, 称为 Advection Step<sup>[2]</sup>。本文计算采用 ALE 算法。

ALE 算法的控制方程可以由下列守恒方程给定:

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程

控制固定域上的牛顿流体流动问题的增强形式由控制方程和对应的初始及边界条件组成, 控制流体问题的方程是 Navier-Stokes 方程的 ALE 描述:

$$v \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij} + \rho b_i - \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

## (3) 能量守恒方程

$$\rho \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{ij} + \rho b_i v_i - \rho w_j \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} \quad (3)$$

推导欧拉方程是基于这样的假设: 参照构形的速度为零以及物质和参照构形两者的相对速度为物质速度。动量守恒方程中的相对速度项通常称为对流项, 用于计算物质通过网格的输运量, 正是由于方程中的附加项才导致用数值方法求解 ALE 方程要比拉格朗日方程求解困难得多, 这是因为拉格朗日方法中相对速度为零。

求解 ALE 方程有两种途径, 它们相当于流体力学中实现欧拉观点的两种方法。第一种方法为计算流体力学求解全耦合方程, 曾被不同作者引用过的该方法只能控制单个单元中的单一物质。另一种方法在文献中称为算子分离算法, 每一个时间步上的计算被划分为两个阶段。首先执行拉格朗日过程, 此时网格随物质运动。该过程中, 计算速度及由内外力引起的内能变化量, 平衡方程为:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij} + \rho b_i \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{ij} + \rho b_i v_i \quad (5)$$

计算的拉格朗日过程, 由于没有物质流经单元边界, 所以质量自动保持守恒。计算的第二个阶段, 即对流相, 对穿过单元边界的质量输运、内能和动量进行计算, 这可以认为是将拉格朗日过程的移位网格重映射回其初始位置或任意位置。

根据 Benson 对平衡方程的离散化观点, 采用单点积分就足够了。沙漏粘度用于控制网格的零能模式, 带线性和二次项的冲击粘度则用于求解冲击波, 在能量方程中增加了压力项。采用中心差分法按时间递增进行求解, 此中心差分法采用时间显式法, 提供二阶时间精度<sup>[3]</sup>。

## 2 数值计算

数值计算中炸药材料 (\* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN) 主要参数设定如下: 初始密度  $\rho = 1230 \text{ kg/m}^3$ , 爆速  $D = 4500 \text{ m/s}$ , 爆压  $P_{C-J} = 5.6 \text{ GPa}$  其 JWL 状态方程 (\* EOS\_JWL) 参数见表 1<sup>[4]</sup>。

表 1 炸药状态方程参数

| A /GPa | B /GPa | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $E_0$ /GPa | $V_0$ |
|--------|--------|-------|-------|----------|------------|-------|
| 42     | 10     | 3.55  | 0.16  | 0.41     | 3.15       | 1.0   |

炸药爆轰过程中压力和比容的关系:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (6)$$

式中 A, B,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  等均为输入参数, 其取值见表 1<sup>[4]</sup>。

空气定义为空材料模型 (\* MAT\_NULL), 密度  $\rho$

$= 1.18 \text{ kg/m}^3$ , 其状态方程 (\* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL), 表达式为:

$$P = C_0 + C_1 v + C_2 v^2 + C_3 v^3 + (C_4 + C_5 v + C_6 v^2) E_0 \quad (7)$$

式中,  $C_0 \sim C_6$  为方程系数,  $v$  为比体积, 材料参数见表 2<sup>[4]</sup>。

表 2 空气状态方程参数

| $\mu$   | $C_0 \sim C_3$ | $C_4 \sim C_5$ | $C_6$ | $v$ | $E_0$ /GPa | $V_0$ |
|---------|----------------|----------------|-------|-----|------------|-------|
| 1.75e-5 | 0              | 0.4            | 0     | 1.4 | 2.5e-4     | 1.0   |

岩石和炮泥均采用弹塑性材料 (\* MAT\_PLASTIC\_KNEMATIC), 其力学参数见表 3<sup>[4][5]</sup>。

表 3 岩石和炮泥力学参数

| 材料类别 | 密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 弹性模量 /GPa | 泊松比 | 屈服应力 /GPa | 切线模量 /GPa |
|------|--------------------------------------|-----------|-----|-----------|-----------|
| 岩石   | 2.7                                  | 60        | 0.3 | 0.05      | 0.5       |
| 炮泥   | 1.67                                 | 2         | 0.3 | 0.02      | 0.2       |

在采用 ANSYS/LS-DYNA 计算时, 炸药、炮泥、空气与周围岩石之间采用共结点的 ALE 算法。为了减小模型尺寸, 作一定的简化, 取 1/2 模型, 如图 1 所示。炸药采用反向起爆。为了考察隧道掏槽爆破时对被爆介质的动力响应, 掏槽区取 12 个炮孔, 分三段爆破, 微差时间为  $\Delta t = 60 \mu\text{s}$  且设定为连续装药。主要通过数值计算, 来模拟爆破时对掌子面处围岩各点的动力响应, 计算终止时间为  $4000 \mu\text{s}$ <sup>[6]</sup>。

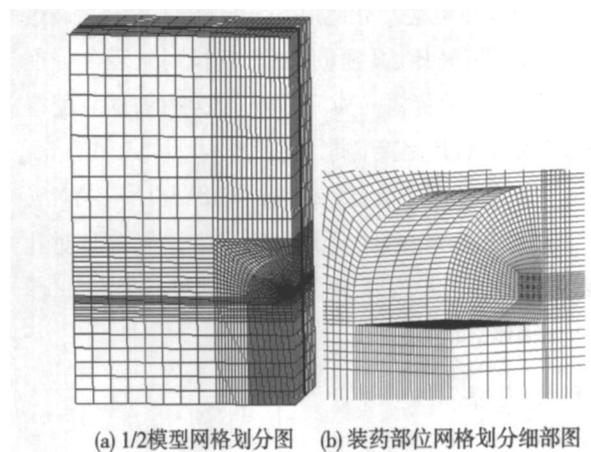


图 1 数值计算模型

## 3 结果分析

## 3.1 压应力云图分析

从图 2 中可以看出: 掏槽反向爆破时, 炸药由内向外进行传爆, 爆轰波首先作用于药包周围的岩壁上, 在岩石中激发形成冲击波并很快衰减为应力波。冲击波在药包附近的岩石中产生“压碎”现象。压应力波先到达掌子面处, 在隧道开挖轮廓范围内压应力明显增大, 在掌子面处应力波发生入射和反射。随着时间的推移, 叠加后的应力波一部分开始向隧道开挖方向岩石传播,

另一部分向掌子面方向传播,继续发生入射和反射。在  $1320\mu\text{s}$  时,掌子面掏槽炮眼上部应力反而比周围区域要小,这是由于应力波向四周扩散,在应力波背后形成低压区。这时,爆炸应力波才大范围地开始向隧道开挖方

向岩石传播。在  $1480\mu\text{s}$  以后,由于隧道已开挖空间内空气波的存在,在洞周出现拉应力区,若超过岩石抗拉强度,就会形成裂隙,降低围岩的完整性。

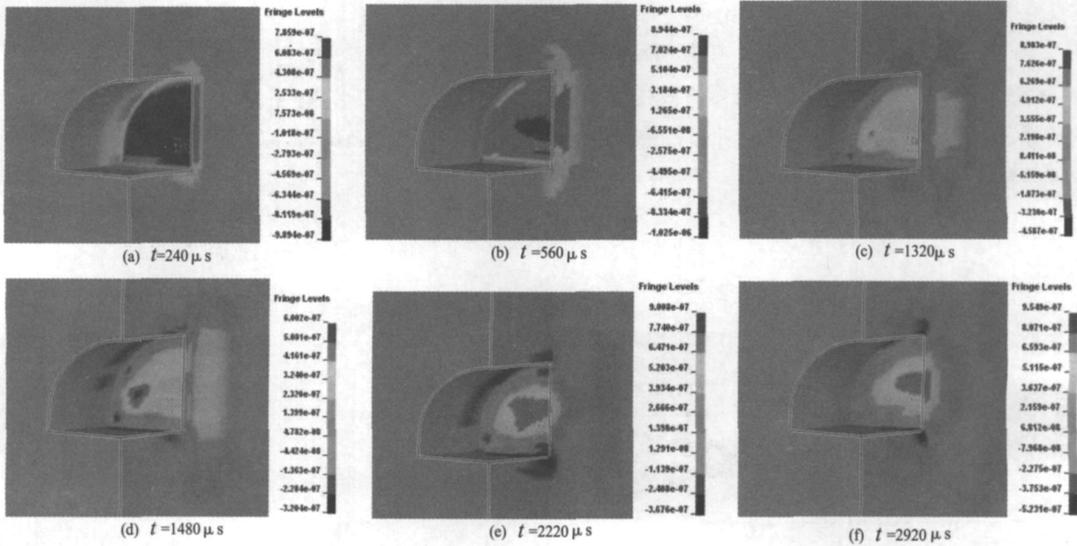


图 2 应力云图

在掌子面附近,由于爆轰波在掌子面处发生反射,入射波与反射波会产生干涉,叠加后的拉应力大于岩石抗拉强度,形成平行于掌子面的片落和层裂。掌子面(自由面)对岩石爆破动力响应的影响是显著的。

### 3.2 压应力时程分析

从图 3 中可以看出:掏槽爆破时,拱脚处先出现最大压应力,若超过围岩岩石抗压强度,岩石就会被压碎,而后随着应力波的传播,掌子面处围岩各点压应力迅速下降,并出现拉应力,且在墙脚处最大,若超过围岩岩石抗拉强度,岩石就会产生裂缝或裂纹。

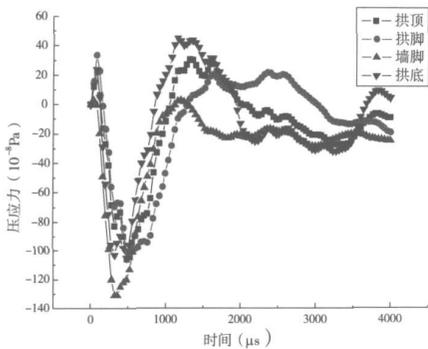


图 3 压应力时程曲线

### 3.3 速度和加速度时程分析

从图 4 中可以看出:掏槽爆破时,掌子面处围岩各点由于离装药炮孔比较近,速度增大很快,拱顶的速度达到最大,而后随着应力波的传播,速度逐渐减小。

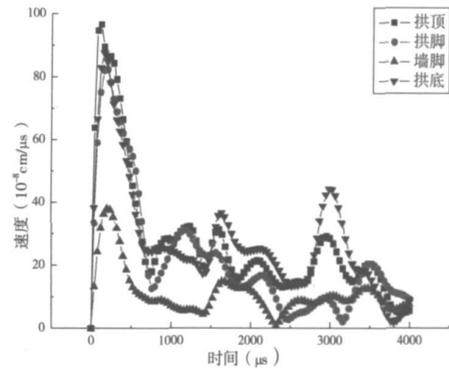


图 4 速度时程曲线

岩拱顶出现最大加速度,拱底其次,随后迅速下降,最后各处加速度趋于稳定,其值相差不大。

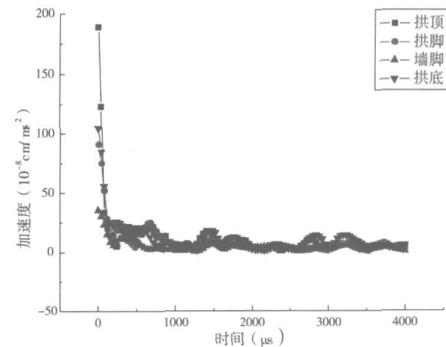


图 5 加速度时程曲线

### 3.4 隧道围岩危险区域时程分析

拱顶和拱底(速度和加速度)、拱脚(压应力)、墙脚

(拉应力)是危险区域,单独对其进行时程分析和讨论。

### 3.4.1 拱顶区域

点 A、B、C、D 位于隧道掌子面拱顶正上部由下到上不同高度处。从图 6 和图 7 可以看出: 在点 A 处, 速度和加速度衰减很快, 速度在  $600\mu\text{s}$  内从  $9.66 \times 10^{-7} \text{ cm}/\mu\text{s}$  减到  $1.73 \times 10^{-7} \text{ cm}/\mu\text{s}$ , 加速度在  $240\mu\text{s}$  内从  $189 \times 10^{-10} \text{ cm}/\mu\text{s}^2$  减到  $5.48 \times 10^{-10} \text{ cm}/\mu\text{s}^2$ 。随着爆炸波在围岩介质中的传播, 能量逐渐损失, 到点 D 时, 速度和加速度波形基本保持稳定。

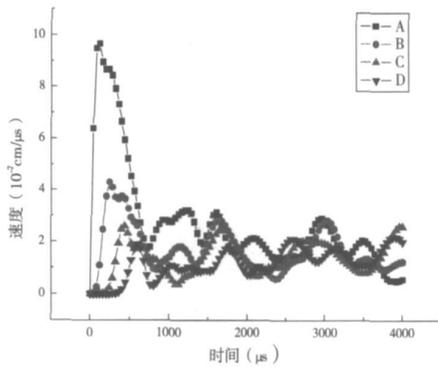


图6 速度时程曲线

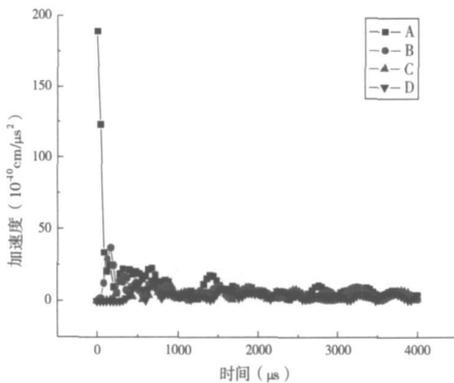


图7 加速度时程曲线

### 3.4.2 拱底区域

点 A、B、C、D 位于隧道掌子面拱底中部正下方由上到下不同高度处。从图 8 和图 9 可以看出: 在点 A 处, 速度和加速度衰减很快, 速度在  $1240\mu\text{s}$  内从  $8.76 \times 10^{-7} \text{ cm}/\mu\text{s}$  减到  $1.72 \times 10^{-7} \text{ cm}/\mu\text{s}$ , 加速度在  $800\mu\text{s}$  内从  $105 \times 10^{-10} \text{ cm}/\mu\text{s}^2$  减到  $6.07 \times 10^{-10} \text{ cm}/\mu\text{s}^2$ 。与拱顶相比, 衰减速度较小; 但是爆炸波在围岩介质中的传播时能量损失较大, 到点 D 时, 速度和加速度波很弱。

### 3.4.3 拱脚区域

点 A、B、C、D、E、F 位于隧道掌子面到开挖后方不同里程拱脚处。从图 10 可以看出: 在点 A 处, 先出现最大压应力  $33.8 \times 10^{-8} \text{ Pa}$  随后出现最大拉应力  $102 \times 10^{-8} \text{ Pa}$  接着迅速衰减。随着距离掌子面越来越远, 拱脚处应力波很弱, 基本为零。

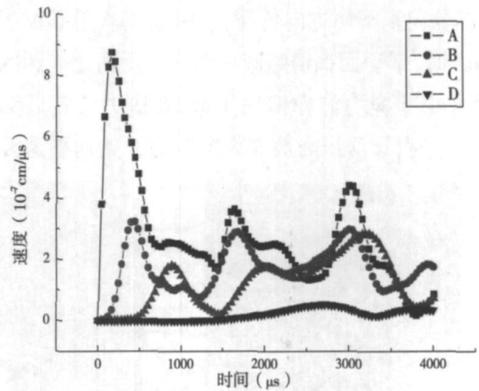


图8 速度时程曲线

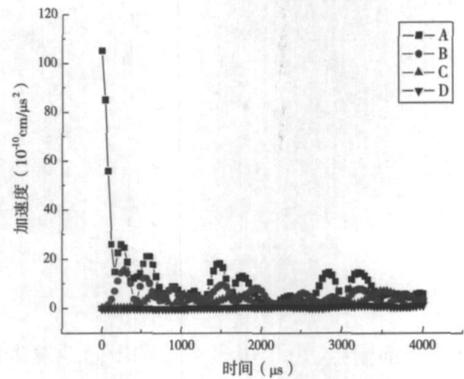


图9 加速度时程曲线

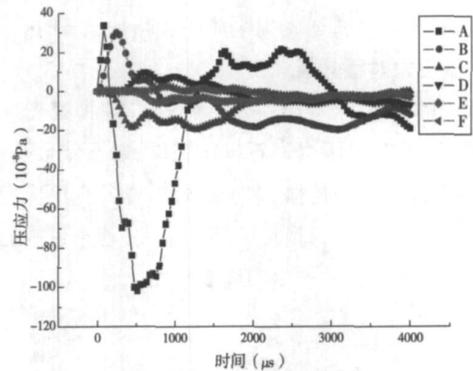


图10 压应力时程曲线

### 3.4.4 墙脚区域

点 A、B、C、D、E、F 位于隧道掌子面到开挖后方不同里程墙脚处。从图 11 可以看出: 在点 A 处, 先出现较小的压应力  $2.86 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ , 随后出现最大拉应力  $131 \times 10^{-8} \text{ Pa}$  接着迅速衰减。整个过程出现的压应力很小, 而拉应力较大。在 B 点处, 由于波的反射和叠加, 反而出现较大的压应力  $13.3 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 。随着距离掌子面越来越远, 墙脚处应力波很弱, 基本为零。

## 4 结论

本文通过对马蹄形隧道掏槽爆破掌子面处围岩岩石动力响应的数值模拟, 得出如下结论:

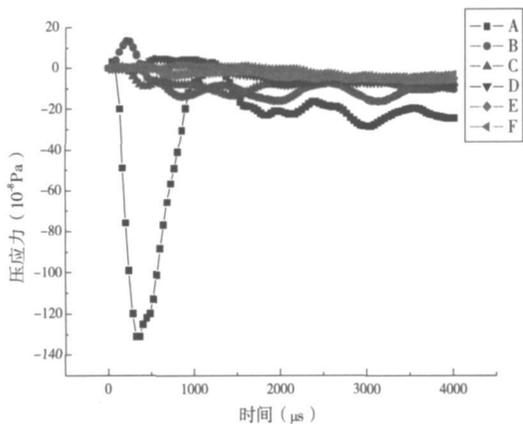


图 11 压应力时程曲线

1) 在爆破过程中, 拱底和墙脚处围岩分别出现最大压应力和最大拉应力。随着爆炸波的传播, 应力逐渐减小。

2) 对爆破振动响应, 拱顶部位出现最大速度和加速度, 其应该作为振动测试的主要控制点。

3) 在隧道爆破开挖时, 尽量增加爆破自由面。自由面对提高岩石破碎效果, 减小岩石损伤是有利的。

总之, 在进行隧道岩石爆破时, 应尽量采用台阶法

或分部开挖方法, 多自由面爆破, 同时考虑工程造价、工期以及施工单位自身的施工能力、施工机械、施工技术水平等条件, 综合选择施工方案。

参考文献:

[1] 王庆国. 隧道岩石爆破理论与数值模拟 [D]. 西南交通大学, 2008  
 [2] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003  
 [3] 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006  
 [4] 宇文慧鑫. 炮孔双介质不耦合装药断裂控制爆破理论与数值模拟 [D]. 太原理工大学, 2006  
 [5] 杨军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1999  
 [6] 王志亮, 李永池. 工程爆破中径向水不耦合系数效应数值仿真 [J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1926-1930  
 [7] 刘殿中. 工程爆破实用手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999  
 [8] LSTC. LS-DYNA971 User's Manual [M]. California Livermore Software Technology Corporation, 2006

Three-dimensional Numerical Simulation on Horseshoe Tunnel Cut Blasting

WANG Qing-guo<sup>1,2</sup>, PANG Xu-qing<sup>1</sup>, HE Zhang-yi<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** By using the ANSYS/LS-DYNA and three-dimensional numerical calculation method, dynamic simulation on process of horseshoe tunnel cut blasting is done and some conclusions that have reference value are drawn. When tunnel rock is blasted, dangerous areas should be monitored and favorable effect of free surface on blasting effect should be used.

**Key words** numerical calculation; horseshoe tunnel cut blasting; explosive

(上接第 744 页)

Propagation Offset Characteristics of Laser Beams Through the Natural Atmosphere

LIU Li, HE Zhiwei, ZHONG Jiafu

(1. Shanghai Vocational College of Science and Technology, Shanghai 476000, China)

**Abstract** Based on the laser field from a positive confocal unstable resonator, the propagation characteristics of the beam through atmosphere are investigated by means of fast Fourier transform (FFT), and it is assumed that the refractive index and absorption of atmosphere are only decided by the air molecules. Meanwhile, we evaluate the beam offsets and beam qualities of the laser field transmitting from the resonator through the natural atmosphere.  $\beta$  parameter and Strehl ratio, which are usually used for high-power lasers, are introduced to estimate the beam quality characteristics.

**Key words** laser propagation; refraction; absorption; beam qualities; beam offsets