

文章编号: 1001-1455(2009)06-0632-05

# 用动光弹方法研究隧道岩爆的爆破扰动机理\*

黄 锋<sup>1</sup>, 徐则民<sup>2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
2. 昆明理工大学土木工程系, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 利用动态光弹性方法, 以 Lamb 模型为依据, 研究了不同荷载形式下, 模型内应力波的传播、相互作用规律以及刻槽的拦截效应。实验结果与弹性动力学解答基本一致: (1) 倾斜冲击荷载作用下, 模型内传播的有 P 波、S 波和 Rayleigh 波, 其中 P 波和 Rayleigh 波对岩爆有突出贡献; (2) 等差条纹图的分布规律, 可以合理解释岩爆高发区段与开挖面的位置关系; (3) 模型表面的刻槽, 可以实现对 Rayleigh 波的大量拦截, 说明隧道表面切槽的岩爆控制方法理论上是可行的。

**关键词:** 爆炸力学; 爆破扰动机理; 动光弹; 岩爆; Lamb 模型

**中图分类号:** O389      **国标学科代码:** 130 · 35      **文献标志码:** A

## 1 引 言

在高地应力环境下的完整硬岩隧道施工中, 因开挖导致洞壁应力分布异常, 从而引发储存在岩体中的弹性应变能突然释放的一种动力失稳地质灾害, 称为岩爆。岩爆不仅严重威胁施工人员及设备的安全、影响施工进度, 严重时还会诱发地震<sup>[1-2]</sup>, 因而受到人们的广泛关注。

采用钻爆法对隧道进行施工时, 岩爆灾害与爆破之间存在密切的时空关系<sup>[3-5]</sup>。而传统的岩爆判别和机理解释多数是建立在静力学理论上的, 对于爆破扰动方面的研究, 也多集中在近区和远区方面, 如破岩机理、地震波效应等, 均难以直接用于岩爆动力学机理的探讨。岩爆的动力学机理属于高应变率条件下的动力破坏问题, 理论上可以用弹性动力学中的 Lamb 模型<sup>[6]</sup>来回答。如果把隧道沿拱顶展开成平面, 并将爆破炮孔简化为沿开挖轮廓面分布的, 且深度、药量相同的周边炮孔, 如图 1(a) 所示, 由于炮孔长度远小于隧道长度, 爆破脉冲均布荷载可简化成线荷载, 如图 1(b) 所示。弹性半无限空间在表面冲击荷载作用下, 顺序通过 P 波、S 波和 Rayleigh 波, 如图 1(c) 所示。它们对质点位移的扰动程度是不同的<sup>[7]</sup>: 水平向位移主要受 P 波影响, 垂向位移是一个以 Rayleigh 波速度传播的无穷间断。因此, P 波和 Rayleigh 波(主导作用)是岩爆灾害发生的重要因素, 将分别在围岩中形成垂直和平行于开挖轮廓面的张性破裂面, 这些破裂一旦贯通, 则围岩破坏, 形成岩爆灾害。

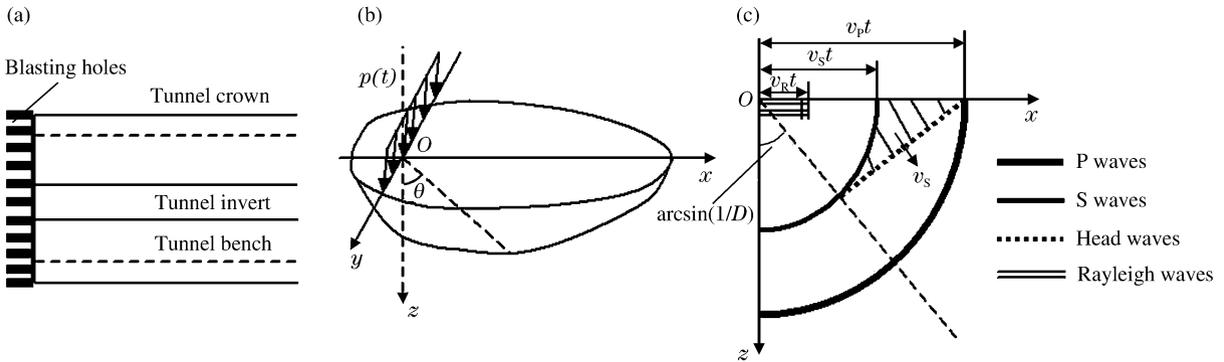


图 1 隧道爆破与已开挖围岩的扰动模型

Fig. 1 Disturbing model between explosion of tunnel and surrounding rock

\* 收稿日期: 2008-06-26; 修回日期: 2008-11-18  
基金项目: 国家自然科学基金项目(40272119)  
作者简介: 黄 锋(1982—), 男, 博士研究生。

由 P 波和 Rayleigh 波的特性可知, P 波沿隧道轴线按  $r^{-1}$  的衰减规律和 Rayleigh 波仅存在于表面, 分布深度为 1.6~2.0 倍波长, 可以合理地解释岩爆高发区与掌子面的空间关系, 这是目前弹性动力学理论对岩爆机理的最清晰的认识<sup>[8]</sup>。施工中, 若能够通过连续钻孔, 在隧道轮廓面(拱顶)上形成切槽, 如图 2 所示, 切槽屏障拦截爆破产生的应力波(尤其是 Rayleigh 波), 就可以有效缓解其对开挖围岩的扰动, 以达到控制岩爆的目的。

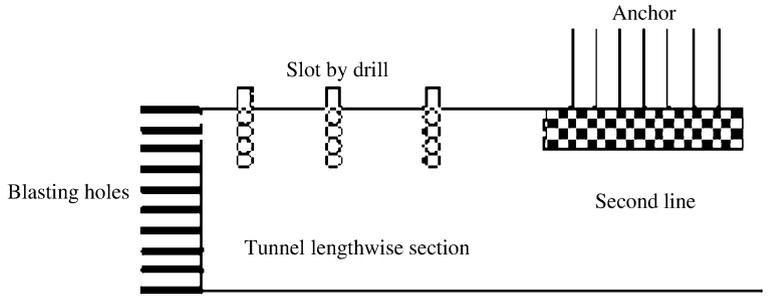


图 2 横向切槽示意图  
Fig. 2 Slot across the surface of tunnel

## 2 实验原理和方案

实验使用 WZDD-1 型多火花动态光弹仪进行。应力光学定律可以表达为

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{\max} = f_d N/h \tag{1}$$

式中:  $f_d$  为材料动态条纹值;  $h$  为模型厚度,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为主应力值;  $\tau_{\max}$  为最大剪应力;  $N$  为条纹级数, 本次实验采用明场, 即半级数,  $N=0.5, 1.5, 2.5, \dots$

实验模型采用聚碳酸脂板加工而成, 其动态性能参数为: P 波波速  $c_P = 1\,590$  m/s、S 波波速  $c_S = 905$  m/s、Rayleigh 波波速  $c_R = 847$  m/s、泊松比  $\nu = 0.352$ 、弹性模量  $E_d = 3\,021$  MPa、材料的条纹值  $f_d = 9\,360$  N/m 级; 静态性能参数为: 泊松比  $\nu = 0.36$ 、密度  $\rho = 1.20$  g/m<sup>3</sup>、弹性模量  $E_d = 2\,332$  MPa、材料的条纹值  $f_d = 6\,860$  N/m 级。厚度为 6 mm, 用来模拟 Lamb 问题中的半无限空间表面, 对应于隧道已开挖轮廓面及附近围岩, 模型表面的刻槽用于模拟隧道表面上的连续钻孔, 深度为 2 mm(1/3 板厚)。加载采用了 2 种方案: (1) 加载方向与模型成 70°, 如图 3(a) 所示(产生 P 波、S 波和 Rayleigh 波); (2) 加载方向与模型表面平行, 如图 3(b) 所示(仅产生 P 波)。

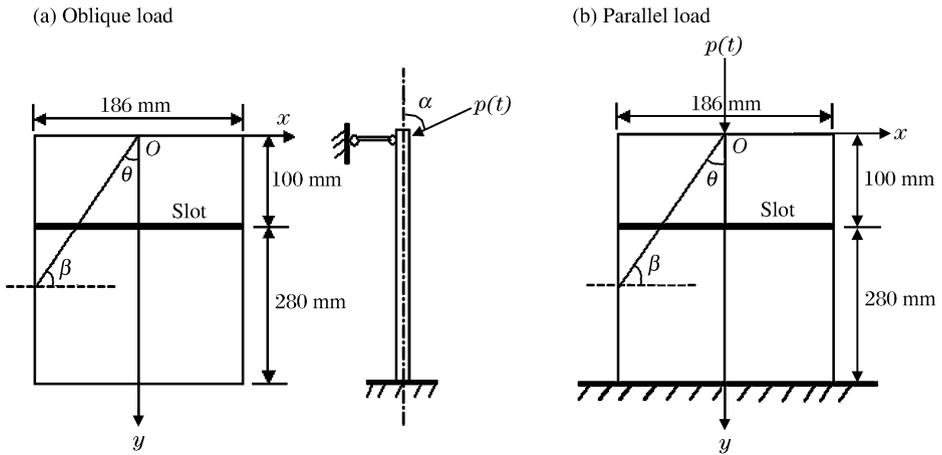


图 3 模型示意图  
Fig. 3 Diagram of model

实验加载装置为 5.6 mm 小口径运动步枪, 用来模拟爆破产生的冲击荷载, 属准静态应力状态问题, 惯性力可忽略<sup>[9]</sup>。冲击荷载的大小通过子弹的药量来控制, 为了保证每次加载尽可能一致和实验设备的安全, 每次减药 200 粒。根据叠加原理<sup>[9]</sup>, 多孔爆破的情况可看作多个单孔爆破的叠加, 且考虑到加载刚度问题, 实验采用冲击点荷载来代替线荷载。因为应力波在完整岩体中的传播受应力状态影响较小, 因而实验中模型表面取零应力状态是合理的(隧道表面及附近围岩处于切向受压的状态)。

由于实验得到的等差条纹图像较为模糊, 为了更为清楚准确地判读条纹级次, 用 Delphi 编制了图像处理软件<sup>[10]</sup>, 经处理后可得到较为清晰的条纹图像, 并且可以根据条纹级次按式(1)进行简单应力计算, 如图 4 所示。

(a) Picture treatment

(b) Stress calculation

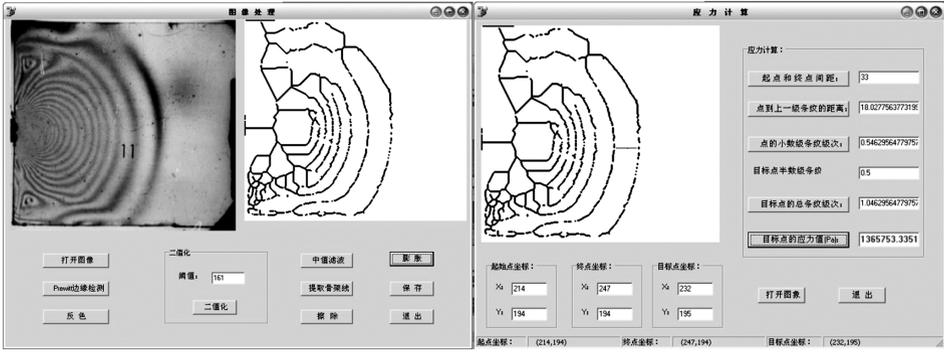


图 4 编制的图像处理软件界面

Fig. 4 Computer-aided fringe pattern process

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 应力波的传播及相互作用

图 5(a)是在倾斜和平行加载条件下,3 种应力波在完整模型中传播和相互作用的部分等差条纹图。模型内产生 P 波、S 波和 Rayleigh 波( $c_P \gg c_S \approx c_R$ )。首先出现的是波速较大的 P 波,以约 1 766 m/s 向外传播,等差条纹图上表现为一组近似以力作用点为圆心的同心圆。随后 S 波和 Rayleigh 波几乎同时出现,条纹相互交错显得较为混乱、不易区分。

图 5(b)是在平行加载的条件下,P 波在完整模型中传播的部分等差条纹图。采用编制的图像处理软件,将相同时刻荷载倾斜加载与平行加载下的条纹图像相减(即图 5(a)减去图 5(b),因篇幅限制,省略了计算过程),所得的结果有利于辨识 Rayleigh 波的传播过程。

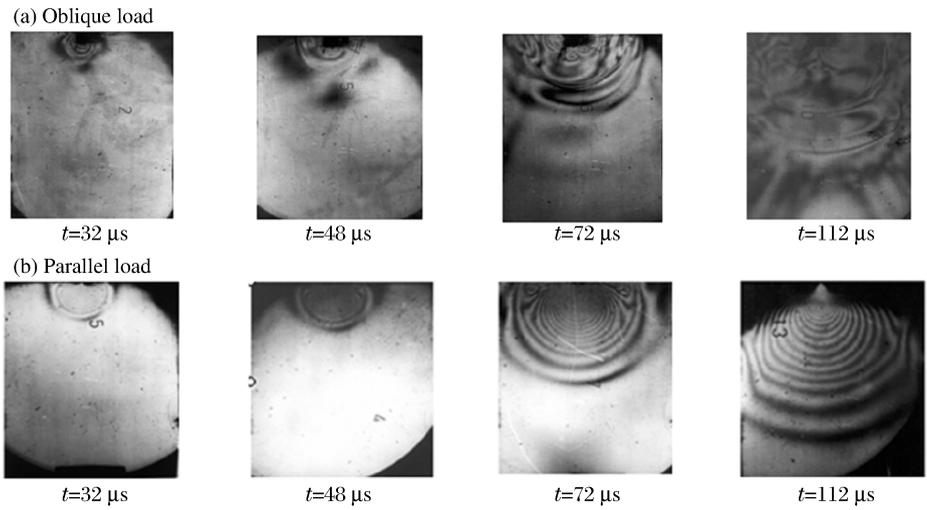


图 5 未切槽模型的典型等差条纹图

Fig. 5 Typical isochromatic fringe pattern in the intact model

由图 5(a)可得 y 轴线上不同时刻的条纹级次(N)的曲线,如图 6 所示。可以看出:条纹产生之初,由于仅有 P 波作用,条纹级次由荷载作用点向外递减,曲线单调下降;随着 S 波和 Rayleigh 波的出现,在 3 种应力波相互作用下,等差条纹图中出现了各向同性点(54~58 μs),使得条纹曲线不再单调下降,而是在距离作用点约 60 mm 的位置出现拐点,并形成较大应力集中;后期,由于 P 波衰减较快,各向同性点随之消失,条纹曲线再次具有单调递减的规律。y 轴线上的最大条纹级次( $N_{max}$ )分布曲线如图 7 所示,从图中可以看出,应力波除了在冲击荷载处产生大的条纹级次外,还将在距离作用点约 60 mm 的位置出现较高条纹级次、产生较大的应力集中。

由此可以推断,隧道开挖过程中,爆破产生的应力波首先将使当前炮次的岩石发生破碎造成围岩损伤,然后在相距掌子面一定距离的已开挖围岩内产生最大扰动,而这个位置往往也是岩爆的高峰区段(已开挖面岩爆),一般距离掌子面一至数倍洞径。

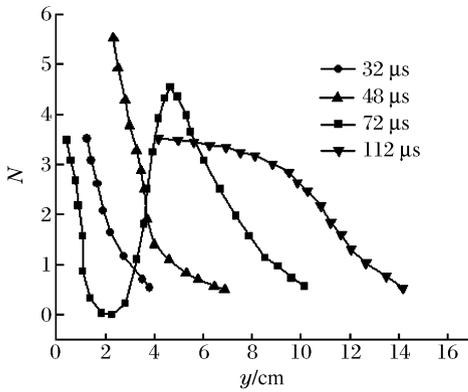


图 6 不同时刻 y 轴上的条纹级数曲线

Fig. 6 Fringe numbers along the y axis at different time

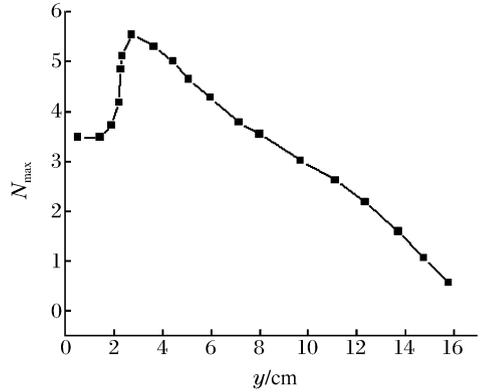


图 7 最大条纹级次沿 y 轴的分布

Fig. 7 Maximum fringe orders along the y axis

### 3.2 刻槽对应力波的拦截效应

因为倾斜加载将在模型中产生 P 波、S 波和 Rayleigh 波，而实验目的是检验刻槽对 P 波和 Rayleigh 波的拦截，应尽量避免 S 波的干扰。根据弹性波理论，当 S 波传播到模型左、右两端自由边界时，满足  $\beta > \arcsin(c_s/c_p) = 34.7^\circ$  的部分将反射为 Rayleigh 波，即  $\theta < 56.3^\circ$  的范围内的 S 波将反射为 Rayleigh 波。经计算，模型内  $y > 100 \text{ mm}$  的部分将很少有 S 波的出现，这也是刻槽位置的选取依据。图 8 是在模型表面切槽后，表面倾斜加载情况下的部分等差条纹图。

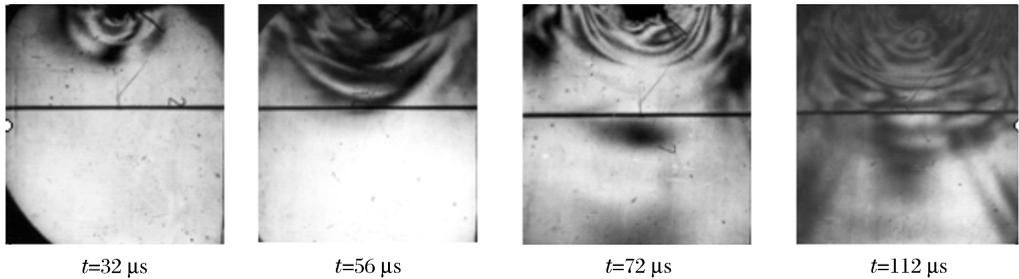


图 8 切槽模型在倾斜荷载作用下的典型等差条纹图

Fig. 8 Typical isochromatic fringe pattern of 3 waves in the slotted model

P 波具有衰减较快的性质，由图 5(a) 可知，在约  $80 \mu\text{s}$  以后，P 波在模型上半部分中开始衰减，下半部分则在固定端上反射后相对较强，而 Rayleigh 波却衰减很少，这在等差条纹图中表现为应力波传播的后期，模型上半部分条纹稀疏，而下半部分较密集。对比图 8 可以发现，在应力波到达切槽处 ( $y = 100 \text{ mm}$ ) 之前，与图 5(a) 的情况基本上相同，但是后期切槽以下部分的条纹并没有比上部条纹密集，反而相对稀疏。分析上述现象的原因，应该是切槽将大部分 Rayleigh 波反射到了切槽上方，而切槽下方仅有 P 波和少量 S 波通过(衰减很快)，从而导致上方的条纹较下方密集。因此，可以肯定模型表面的切槽对 Rayleigh 波的拦截是成功的，其效果也是明显的。

因此，钻爆法施工中，通过在隧道表面连续钻孔形成横向切槽，对于拦截爆破产生的应力波(特别是 Rayleigh 波)应该是可行的。横向切槽法可有效缓解应力波对已开挖洞段围岩的扰动，切槽可以用凿岩台车在切槽部位连续钻孔来实现，其深度和间距根据岩爆实际情况来确定。利用横向切槽方法防治岩爆，不仅易于操作，而且不会影响施工速度。

### 4 结 论

(1) 弹性动力学理论(Lamb 问题)和动光弹试验所得的结论是一致的，爆破脉冲将在隧道轮廓面及附近围岩内产生 P 波、S 波和 Rayleigh 波这 3 种不同形式的应力波。P 波、S 波和 Rayleigh 波相互作用的结果表明：P 波和 Rayleigh 波致裂作用和衰减规律是岩爆发生的重要因素；爆破和岩爆高之间存在密切的时空关系。

(2) 切槽实验结果表明，切槽可以实现对大部分 Rayleigh 波的反射，证明了隧道表面横向切槽的岩爆控制方法理论上的可行性，且该方法操作简单易实现。

### 参考文献：

[1] Broch E, Sorchein S. Experiences from planning, construction and supporting of a road tunnel subjected to heavy

- rock bursting[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1984,17:15-35.
- [2] Swanson P L. Mining-induced seismicity in faulted geologic structures: An analysis of seismicity-induced slip potential[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1992,139(3-4):657-676.
- [3] 周德培,洪开荣. 太平驿隧洞岩爆特征及防治措施[J]. *岩石力学与工程学报*,1995,19(2):171-178.  
ZHOU De-pei, HONG Kai-rong. The rockburst features of Taipingyi tunnel and the prevention methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995,19(2):171-178.
- [4] 徐则民,黄润秋. 岩爆与爆破的关系[J]. *岩石力学与工程学报*,2003,22(3):414-419.  
XU Ze-min, HUANG Run-qiu. Relationship between rock burst and blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003,22(3):414-419.
- [5] 司军平,高洪涛,刘正雄. 对秦岭隧道Ⅱ线平导端口岩爆的几点认识[J]. *隧道技术*,1998,2:57-60.  
SI Jun-ping, GAO Hong-tao, LIU Zheng-xiong. Review on the construction of long single-track tunnel with tyre transportation[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 1998,2:57-60.
- [6] Lamb H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid[J]. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Series A*, 1904,203:1.
- [7] Forrestal M J, Fugelso L E, Neidharl G L, et al. Response of a half-space to transient loads[C]// *Proceedings Engineering Mechanics Division Specialty Conference*. ASCE, 1966:719.
- [8] 徐则民,黄润秋. 深埋特长隧道及其施工灾害[M]. 成都:西南交通大学出版社,2000.
- [9] 陆渝生,邹同彬,连志颖,等. 应力波和动光弹等差条纹的分析与判读[J]. *力学与实践*,2004,26(1):34-37.  
LU Yu-sheng, ZOU Tong-bin, LIAN Zhi-ying, et al. Stress wave and identification of isochromatic fringes in dynamic photo elasticity. *Mechanics and Engineering*, 2004,26(1):34-37.
- [10] 田刚. 动态光弹性条纹的数字图像处理研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2007.

## On blasting perturbation mechanism of rock burst in tunnel by dynamic photo-elasticity

HUANG Feng<sup>1\*</sup>, XU Ze-min<sup>2</sup>

(1. *Geotechnical Engineering Department, Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China*;  
2. *Department of Civil Engineering, Kunming University of science and technology, Kunming 650224, Yunnan, China*)

**Abstract:** The model was simulated by photo-elastic experiments according to the Lamb model, which included the propagation, interaction laws and interception effects of slot obstacle. The experimental results accord with the kinetics mostly: (1) There are P, S and Rayleigh waves under the action of oblique impact load. Only P and Rayleigh waves contribute to rock burst. (2) From the fringe patterns, the effects of inducing fracture and laws of propagation about pressure and Rayleigh are important factors for rock-burst mechanism, which can explain the space relationship between rock burst and face. (3) The slot on the model surface can effectively intercept stress waves, especially Rayleigh waves. So the method for controlling rock-burst is theoretically feasible.

**Key words:** mechanics of explosion; blasting perturbation mechanism; dynamic photo-elasticity; rock burst; Lamb model

\* Corresponding author: HUANG Feng  
Telephone: 86-21-65985142

E-mail address: huangfeng216@126.com