

文章编号: 1000-7598-(2003)06-0969-05

爆破破岩过程中的动态卸载效应探讨

许红涛, 卢文波

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 以瞬态载荷作用下弹性介质中球形空腔的动态响应解析解为基础, 分析了爆炸载荷动态卸载时对介质中应力分布的影响, 探讨了动态卸载效应在爆破破岩过程中的作用, 并对爆破工程实践中的一些现象作了合理地解释, 指出了深入研究动态卸载效应的必要性。

关 键 词: 爆破动态卸载; 效应; 破岩机理; 松动区

中图分类号: O 382.42 **文献标识码:** A

Study on dynamic unloading effect during process of fragmentizing rock by blasting

XU Hong-tao, LU Wen-bo

(State key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the analytical solution of sphere cavity loaded with instantaneous load in elastic medium, the influence of dynamic unloading of blasting load on the stress distribution in the medium is studied; then the role of dynamic unloading effect in the process of fragmentizing rock by blasting is discussed further. Some phenomena observed in blasting engineering could be explained with the dynamic unloading effect proposed. Finally the necessity of further studying dynamic unloading effect is illustrated.

Key words: dynamic unloading; effect fragmentizing; rock mechanism; loosened zone

1 引 言

长期以来, 人们对冲击载荷导致的岩石动应力特性做了大量的研究。因为, 了解这种突然加载行为及其在介质中产生的瞬态应力在某些情况下, 尤其是在对爆破荷载动力效应的研究中, 显得尤为重要。研究人员对卸载行为也做过一些研究, 但大都限于低卸载速率 (MPa/min) 的准静态卸载情况^[1], 对爆炸载荷达到高卸载速率 ($10^5 \sim 10^7$ MPa/s) 量级下的动态卸载效应的研究并不多见, 而且多限于定性研究。

早在 1966 年, M. A. Cook 等^[2]就指出, 作用荷载的突然释放可能导致岩石的超松弛, 在介质中产生拉应力。但是, 从实体爆破中没有得到能够支持这种超松弛机制的类似证据, 用室内试验突然卸载

生成裂隙的尝试也未获得成功^[3]。澳大利亚学者 T. N. Hagan^[4]在研究爆破破岩机理时指出, 当炮孔内气体压力降低到一定程度后, 储存在炮孔周围岩石介质中的应变能会急剧释放出来, 形成环向裂隙, 并称之为“卸载裂纹”。J. N. Edl Jr^[5]分析了理想化岩柱在柱端恒压突然卸除时的反应, 并将之用于解释被爆岩石对气体压力施加的载荷的反应情况。

爆破开挖工程中, 爆破荷载的施加和卸除都相当快。对于爆破荷载动力效应的研究, 应不仅仅限于瞬间加载情况, 加强对高速率动态卸载过程中岩石动应力行为的研究也极其有必要。为此, 本文以瞬态载荷作用下弹性介质中球形空腔的动态响应解析解为基础, 分析了球腔压力随时间变化过程中球腔周围岩石介质中的应力、应变场, 以研究爆炸过

收稿日期: 2002-07-15

基金项目: 教育部优秀青年教师资助计划 (编号: 2081), 留学回国人员科研启动基金 (编号: 教外留 (2002) 247 号)

作者简介: 许红涛, 男, 1978 年生, 博士生, 主要从事岩石动力学方面的研究。

程中的动态卸载效应。

2 瞬态载荷作用下球形空腔激发的应力场

在弹性介质中开挖一球形空腔, 内装炸药, 炸药爆炸时将有一随时间变化的正压力 $p(t)$ 作用在腔壁上。并作如下假设:

(1) 球腔半径足够大, 且装药量不多。可认为腔壁产生的形变为弹性形变, 从腔壁将有弹性波向外辐射。

(2) 球形空腔位于地下足够深度, 这样, 可忽略地表面对弹性波的影响。

(3) 暂不考虑初始地应力的影响。

设球腔半径为 a_0 , 由于球坐标系的对称性, 描述问题的场变量只依赖于由球面中心算起的矢径 $\bar{r}$ 和时间 t , 唯一的位移分量为径向位移, 记为 $u(r, t)$ 。

用位函数 $\varphi(r, t)$ 来表示, 则有

$$u(r, t) = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (1)$$

各向同性弹性体中质点的运动方程为

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中 σ_r , σ_θ 分别为球坐标系下岩石介质中的径向、环向应力; ρ 为岩石介质密度。

各应力分量为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} + 2\lambda \frac{u}{r} \\ \sigma_\theta &= \sigma_\phi = \lambda \frac{\partial u}{\partial r} + 2(\lambda + \mu) \frac{u}{r} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 λ , μ 均为拉梅常数。

将式 (1) 及式 (3) 代入式 (2), 可得到:

$$\frac{\partial^2 (r\varphi)}{\partial r^2} = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 (r\varphi)}{\partial t^2} \quad (4)$$

式中 $C_L = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$, 为弹性纵波波速。

上述方程的通解为

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{r} f\left(t - \frac{r}{C_L}\right) + \frac{1}{r} f\left(t + \frac{r}{C_L}\right) \quad (5)$$

式 (5) 中的前一项表示由坐标原点往外传播的球面发散波 (外行波), 适用于无限弹性介质中某点有一个对称扰动时的情况; 后一项表示往球心传播的收敛波, 适用于实心或空心弹性圆球体, 外表面受到球对称扰动压力作用的情况。

我们感兴趣的是发散波, 于是取

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{r} f\left(t - \frac{r}{C_L}\right) \quad (6)$$

为了简化边界条件和初始条件, 用变元 $\tau = t - \frac{r - a_0}{C_L}$ 代替式 (6) 中的 $t - \frac{r}{C_L}$, 得到:

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{r} f(\tau) \quad (7)$$

规定压力为正, 问题的边界条件和初始条件为

$$\sigma_r(a_0, t) = p(t) \quad (t > 0) \quad (8)$$

$$u(r, t) = \dot{u}(r, t) = 0 \quad (r \geq a_0, t \leq 0) \quad (9)$$

由式 (1), (3), (7) 得到应力分量:

$$\sigma_r = \frac{\lambda + 2\mu}{C_L^2 r} f''(\tau) + \frac{4\mu}{C_L r^2} f'(\tau) + \frac{4\mu}{r^3} f(\tau) \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\lambda}{C_L^2 r} f''(\tau) - \frac{2\mu}{C_L r^2} f'(\tau) - \frac{2\mu}{r^3} f(\tau) \quad (11)$$

应变分量如下:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{C_L^2 r} f''(\tau) + \frac{2}{C_L r^2} f'(\tau) + \frac{2}{r^3} f(\tau) \quad (12)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} = -\frac{1}{C_L r^2} f'(\tau) - \frac{1}{r^3} f(\tau) \quad (13)$$

将式 (10) 代入边界条件式 (8) 中, 并整理得

$$f''(\tau) + 2\xi f'(\tau) + (\xi^2 + \eta^2) f(\tau) = \frac{a_0}{\rho} p(\tau) \quad (14)$$

式中 $\xi = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \frac{C_L}{a_0}$; $\eta = \frac{\sqrt{1-2\nu}}{1-\nu} \frac{C_L}{a_0}$ 。其中 ν 为岩石介质泊松比。

方程 (14) 的解直接引用文献[6]的结果:

$$f(\tau) = \frac{1}{\eta} \frac{a_0}{\rho} \int_0^\tau p(\tau - s) \exp(-\xi s) \sin(\eta s) ds \quad (15)$$

通过数值计算可得到 $f(\tau)$ 随 τ 的变化关系, 于是由式 (10) ~ (13) 和式 (15) 相应地可得到径向位移 $u(r, t)$, 应力分量 σ_r , σ_θ 和应变分量 ε_r , ε_θ 。

3 动态载荷作用下弹性介质中的应力场

3.1 阶跃脉冲载荷作用下的应力场

假设球腔压力 $P(t)$ 为如图 1 所示的阶跃脉冲载荷, t_s 时刻载荷突降为 0。参数选取如下: $C_L = 5\ 000$ m/s; $a_0 = 50$ mm; $\rho = 2\ 400$ kg/m³; $\nu = 0.25$; $t_s = 300$ μ s。

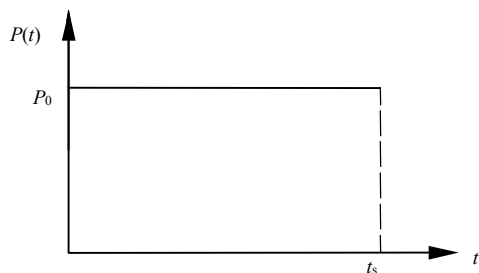


图1 阶跃脉冲
Fig. 1 Stepping impulse

根据式(10)、(11)和(15)计算得到典型的应力-时程关系曲线如图2、3。

从图2中可以看出，在脉冲压力加载瞬间，周围岩石介质中切向应力发生突跃，形成第一个拉应力峰值，此后趋于一个稳态拉应力值；而在卸载瞬间激起二次拉应力波，切向应力由稳态值再次发生突跃，形成第二个拉应力峰值，而且，在卸载瞬间激起的切向拉应力峰值比爆炸加载瞬间的切向拉应力峰值还要高。

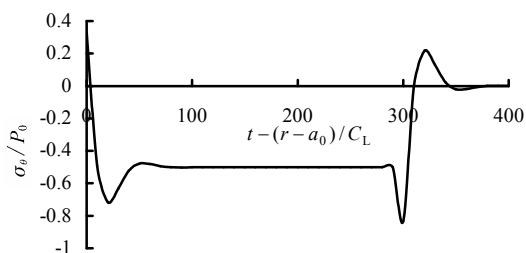


图2 腔壁处切向应力 σ_θ 随 $t-(r-a_0)/C_L$ 的变化关系曲线
Fig. 2 Curve of tangential stress in rock mass around sphere cavity wall vs $t-(r-a_0)/C_L$

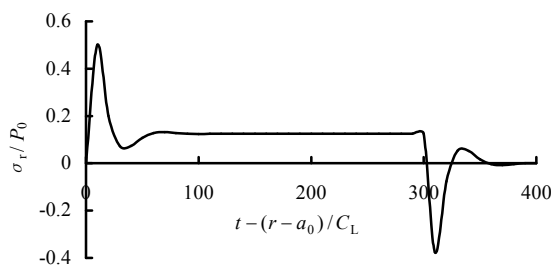


图3 2倍洞径处径向应力 σ_r 随 $t-(r-a_0)/C_L$ 变化关系图
Fig. 3 Curve of radial stress vs $t-(r-a_0)/C_L$ ($r=2a_0$)

由于腔壁处径向应力 σ_r 在卸载前始终保持压应力 p_0 不变，在卸载瞬间也只会降低为0，不会转变为拉应力，因而，这里给出了具有代表性的2倍洞径处径向应力时程图。由图3可以发现，在 $r=a_0$ （洞壁）以外， σ_r 在瞬间加载时激起压应力峰值，

而在卸载瞬间会激起拉应力峰值。加载、卸载瞬间径向应力的变化值相等。

3.2 其它型式载荷

笔者还分析了孔壁压力呈其它型式衰减时球腔周围岩石介质中的应力场。如图4，假设球腔压力经历一个升压阶段和一个降压阶段，其中 t_r 为升压时间， t_s 为腔壁压力正压作用时间。升压阶段为直线上升，而降压阶段呈不同型式衰减，如图4，曲线1~3分别对应于指数型衰减 $P(t)=P_0 e^{-\beta(t-t_r)}$ ，简谐型衰减 $P(t)=P_0 \cos \omega(t-t_r)$ 和直线型衰减 $P(t)=P_0[1-(t-t_r)/(t_s-t_r)]$ 三种情况。计算时取参数 $t_r=50\mu s$ ， t_s 则变化取值。于是得到对应各种情况下2倍洞径（ $r=2a_0$ ）处的典型应力-时程曲线分别如下。

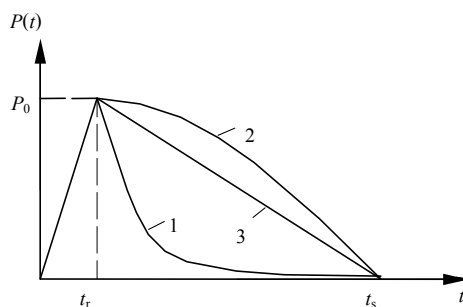


图4 腔壁作用荷载随时间变化曲线
Fig. 4 Curve of load vs time on the sphere cavity wall

3.2.1 指数型

图5中1~3曲线分别对应于 $\beta=2 \times 10^5$ ， $\beta=1 \times 10^5$ ， $\beta=5 \times 10^4$ （即 t_s 为 $150\mu s$ ， $250\mu s$ 和 $450\mu s$ ）时，2倍洞径处的径向应力随时间的变化关系。

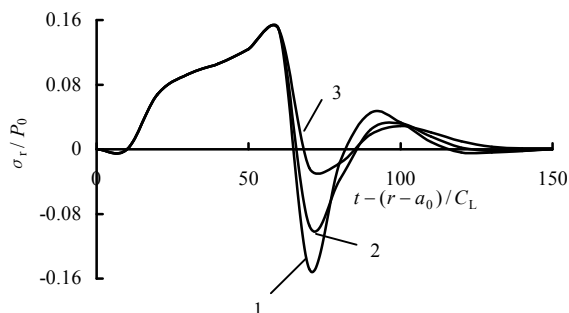


图5 腔壁压力 $P(t)$ 呈指数型衰减时2倍洞径处径向应力随时间变化关系
Fig. 5 Curve of radial stress vs $t-(r-a_0)/C_L$ when $P(t)$ decays exponentially ($r=2a_0$)

3.2.2 简谐型

图6中1~3曲线分别对应于 $\omega=5000\pi$ ，

$\omega = 2\,500\pi$, $\omega = 2\,000\pi$ (即 t_s 分别为 $150\mu\text{s}$, $250\mu\text{s}$ 和 $300\mu\text{s}$) 时, 2 倍洞径处的径向应力随时间的变化关系。

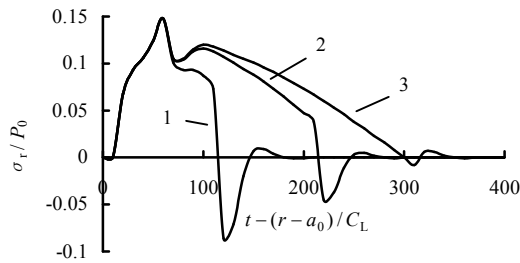


图 6 腔壁压力 $P(t)$ 呈简谐型衰减时, 2 倍洞径处径向应力随时间变化关系

Fig. 6 Curves of radial stress vs $t - (r - a_0)/C_L$ when $P(t)$ decays harmonically ($r=2a_0$)

3.2.3 直线型

图 7 中曲线 1~3 分别对应 $t_s=150\mu\text{s}$, $t_s=250\mu\text{s}$ 和 $t_s=350\mu\text{s}$ 时, 2 倍洞径处的径向应力随时间的变化关系。

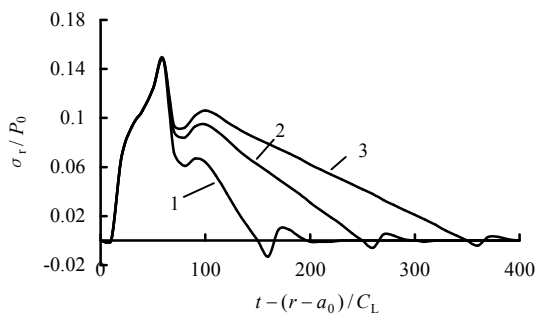


图 7 腔壁压力 $P(t)$ 呈直线型衰减时二倍洞径处径向应力随时间变化关系

Fig. 7 Curves of radial stress vs $t - (r - a_0)/C_L$ when $P(t)$ decays linearly ($r=2a_0$)

以上结果表明, 高速率卸载时, 径向应力均由压应力转为拉应力, 而且, 卸载越快, 径向拉应力峰值越高。

J. P. Carter 等^[7]比较了处于静水压力状态下岩体中开挖圆柱形空腔时, 不同开挖速率对岩体中切向应力分布的影响。所得到的结论是开挖速率越快, 意味着边界应力卸除得越快, 则在边界上激起的切向应力峰值越高; 而卸载时间很长时, 切向应力基本上没有动态放大效应。

4 动态卸载过程对爆破破岩的作用

对于岩石中爆破破岩作用机理, 大致有三种不

同看法: (1) 爆轰气体膨胀压力作用破坏机理; (2) 应力波反射拉伸破坏机理; (3) 冲击波和爆轰气体压力共同作用破坏机理。目前, 被广泛接受的是冲击波和爆轰气体压力共同作用破坏机理。该种观点强调了爆轰冲击波对炮孔周围岩石介质中径向裂隙的产生所起的作用和爆生气体驱动裂纹扩展、贯通进而破碎、抛掷岩石的作用。

在爆炸冲击波、应力波作用下, 孔壁周围岩石介质受到强烈的压缩, 在极短的时间内粉碎区形成、径向裂隙产生, 同时未发生塑性破坏区域的岩石介质中积蓄了大量弹性变形能。在粉碎区以外, 冲击波能量大大削减, 冲击波急剧衰减为弱压缩波, 其强度已低于岩石的动抗压强度, 不能直接压碎岩石。但是, 它可使压碎区外围的岩石遭到强烈的径向压缩, 岩石质点产生径向位移, 导致外围岩石中产生切向拉伸应变, 形成径向裂隙。

爆炸冲击波从爆炸腔脱离以后, 腔壁质点继续向外径向扩张, 并将持续一段时间, 加之径向裂隙扩展, 结果引起爆炸腔内爆生气体负压, 且在爆炸波后面有一个稀疏波传播, 导致腔壁压力卸载。而从高达几万个甚至几十万个大气压力的爆轰压力衰减为相对较低的均压 (爆生气体准静态压力) 所需时间极短 (以毫秒计), 卸载速率极高, 在宏观上可视为瞬间卸载。在这样一个高速率卸载过程中, 原先储存在岩石介质中的弹性变形能被急剧释放出来, 形成卸载波, 径向应力由压应力转为拉应力, 并激起相当高的拉应力峰值, 当径向拉应力超过岩石的动抗拉强度时, 岩石就被拉裂形成环向裂隙。这很好地解释了孔壁外围岩石中环向裂纹产生的机理。

在径向裂隙和环向裂隙形成的同时, 由于径向应力与切向应力共同作用, 还可能形成剪切裂隙。此后, 在爆生气体准静态作用阶段, 高压爆生气体楔入到各种裂隙中, 扩展和贯通原有裂隙, 造成岩石破碎。

J. Henrych^[8]指出: 从冲击波、应力波的波形图上看, 其前面部分为压缩相, 后一部分则为具有拉伸应力的尾部拉伸相。徐国元等^[9]对两种不同装药结构爆炸时的应力波波形进行了测定, 发现柱状中空药包爆炸时传感器捕捉到的典型波形信号, 由压缩相和拉伸相组成。这说明, 在冲击波、应力波作用的后面阶段, 的确存在着拉应力的作用, 笔者认为, 这种拉应力正是由于爆炸空腔内爆轰压力的急剧卸载, 应变能猛烈释放所造成的。但拉伸应力并不总能造成岩石拉裂, 它的大小与炸药性能、装药结构、岩性的软硬和破碎程度、岩石中初始地应

力场等有关, 一般情况下, 只有在完整坚硬、具有良好的脆性和弹性的岩石介质中, 动态卸载效应才比较明显, 这也进一步解释了环向裂隙并不总是出现的原因。

潘井澜^[10]提出爆破破岩的“动静压二源论”认为, 爆破破岩的主要型式是“拉伸式破坏”, 并指出, 由动压产生的三类裂纹中, 径向裂纹由应力波的切向拉伸应力分量形成; 片落裂纹由自由面反射应力波的双相拉伸应力形成; 而环向裂纹由应力波的尾部拉伸相形成。

综上所述, 爆炸载荷的高速率卸载导致岩石介质中产生了相对较高的拉应力场, 加剧了径向和环向裂纹的产生, 促使了岩石的进一步破碎。

5 动态卸载效应的工程实证

在爆破开挖工程实践中, 该动态卸载效应可以找到有力的支持:

岩石高边坡开挖过程中, 由于爆炸应力波和爆生气体的联合作用, 在完成岩石爆破破碎的同时, 必然对保留的岩体产生动力损伤, 导致边坡表层岩体力学参数大幅下降, 形成所谓的爆破松动区, 严重时甚至可能引起边坡岩体的局部失稳或开裂。文献[4, 10]提到, 露天矿台阶爆破之后, 仔细观察保留的台阶上部平台, 经常可以见到与台阶坡面大致平行的多条裂纹。澳大利亚学者 T. N. Hagan^[4]指出, 这是因为荷载的释放而造成的。用卸载机制可以较好地给予解释: 作用在保留岩体开挖面上的爆轰压力急剧衰减时, 产生相对较高的垂直于保留壁面的卸载拉伸应力, 当拉伸应力大到一定程度时, 就会对开挖面附近岩体形成拉伸破坏, 导致边坡局部失稳或开裂。这里需要补充说明的是, 通常所讨论的岩体开挖卸荷, 其实质也是一个动态卸载过程。爆炸载荷与开挖荷载的联合动态卸荷作用, 最终导致了平行于坡面的卸荷裂缝的形成。

对于空气间隔装药爆破, 也存在动态卸载效应的影响。爆炸后, 稀疏波由空气间隙向爆生产物中传播, 导致孔壁压力急剧卸载, 一方面降低了爆轰压力峰值, 避免了炮孔周围岩石介质的过度粉碎, 使直接用于粉碎孔壁的爆轰能量减少而增加了传输到粉碎区以外介质中的能量, 增大了对介质的破坏作用范围; 而另一方面, 卸载过程产生相当高的径向和切向拉应力, 借助拉应力使岩石破裂, 相比压缩致裂来说, 以较低的代价在孔壁周围形成了裂隙网。

此外, 地下洞室开挖中围岩松动区的产生、矿山开采中矿柱的突然断裂、岩爆等均可用动态卸载

效应加以解释。

6 结 论

(1) 通过分析球腔压力高速卸载时周围岩石介质中的应力场, 发现卸载过程中径向会激起拉应力峰值, 径向应力总是由压应力转为拉应力。并且卸载越快, 这种拉应力峰值越高; 对于岩石类介质, 由于其抗拉强度远低于抗压强度, 因此, 此种表面上的卸载, 对岩石类介质来说其实质反而可能是加载。

(2) 利用这种卸载效应能合理地解释爆破破岩过程中环向裂隙的产生原因和各种工程现象。

(3) 研究爆破过程中的动态卸载效应对岩石介质的损伤, 对岩石高边坡和地下洞室开挖中的爆破松动区的确定和稳定分析以及深入探讨岩爆机理等, 都具有重要的指导作用。因此, 建立合理有效的动态卸载损伤计算模型是今后的研究方向。

参 考 文 献

- [1] An-Zeng Hua, Ming-Qing You. Rock failure due to energy release during unloading and application to underground rock burst control[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2001, 16: 241—246.
- [2] Cook M A, Cook U D, Clay R B, et al. Behavior of rock during blasting[J]. **Transaction of Social Mining Engineering**, 1966, 17—25.
- [3] 布雷迪 B H G (澳), 布朗 E T (英). 地下采矿岩石力学[M]. 冯树仁译. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [4] HAGAN T N. Rock breakage by explosives[A]. **The Sixth International Colloquium on Gas Dynamics of Explosions and Reactive Systems**[C]. Great Britain: Pergamon Press, 1979, 16: 329—340.
- [5] Edl Jr J N. 应力波在爆炸引起的岩石膨胀移动过程中的作用[A]. 第一届爆破破岩国际会议论文集[C]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1985, 32—40.
- [6] Achenbach J D. 弹性固体中波的传播[M]. 徐植信, 洪锦如译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [7] Carter J P, Booker J R. Sudden Excavation of a Long Circular Tunnel in Elastic Ground [J]. **International Journal of Rock Mining Science & Geomechanics Abstract**. 1990, 27(2): 129—132.
- [8] Henrych J. The Dynamics of Explosion and Its Use[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company, 1979.
- [9] 徐国元, 古德生, 陈寿如. 爆破破岩机理的实验研究[J]. 中南工业大学学报, 1997, 28(6): 522—525.
- [10] 潘井澜. 爆破破岩机理的探讨[J]. 爆破. 1994, 11(4): 1—6.