

# 不耦合装药爆炸应力场的动光弹研究

朱振海 曲广建

(南京工程兵工程学院)

孙强 杨永琦

(中国矿业大学北京研究生部)

**摘要** 用动光弹方法定量研究了多个不耦合系数下爆炸应力场衰减规律。模型材料为环氧树脂平板。研究表明:当不耦合系数在1~1.75之间取值时,比例距离在15~60范围内,  $|\sigma_r/\sigma_0|_{\max}$  的值介于3.21~5.00之间,  $|\varepsilon_r/\varepsilon_0|_{\max}$  的值介于4.61~9.50之间。

**关键词** 不耦合装药 动光弹 爆炸应力场 模型研究

## 1. 前言

在预裂爆破、光面爆破中,不耦合装药结构已被广泛采用。实践证明,随着不耦合系数的增大,炮孔附近的破碎区迅速减小。不耦合装药结构对要保留的围岩起积极作用,同时减小使岩石过粉碎的能量,使炸药爆炸的能量得到充分利用。因此,研究不耦合装药条件下应力场的衰减规律,对于充分利用爆炸能量、改善围岩的破坏程度、保证工程质量等都具有实际意义。

一些研究者曾用电测方法研究过不耦合条件下炮孔周围应变场<sup>[1,2]</sup>,也有文章报道在现场研究不耦合装药效应的结果<sup>[3,4]</sup>。但现场试验只能了解不耦合装药对破碎的影响,对于爆炸应力场的变化过程难以知晓。电测方法则受测试系统的限制,每次只能获得几个点上的应变值而难以全面了解爆炸应力场的变化过程。

本文采用动光弹模型研究方法,用环氧树脂板制作模型,用多火花式高速摄影机记录了三种不耦合系数下爆炸应力波传播的等差条纹,再运用弹性近似分析的方法计算,获得不同不耦合系数下炮孔周围应力场的定量数值,其中主要是径向应力  $\sigma_r$ 、切向应力  $\sigma_\theta$ 、径向应变  $\varepsilon_r$  和切向应变  $\varepsilon_\theta$  随比例距离  $\bar{R}(=R/r_0, R$ ——测量点距炮孔中心的距离,  $r_0$ ——装药半径)衰减的规律,比较了不耦合系数对应力场的影响。

## 2. 试验原理与方法

试验模型采用脆性较好的环氧树脂板制作,环氧树脂的力学参数如下:膨胀波速度  $c_p = 2080\text{m/s}$ , 剪切波速  $c_s = 1180\text{m/s}$ , 泊松比  $\nu = 0.36$ , 密度  $\rho = 1.25\text{g/cm}^3$ , 杨氏模量  $E = 4740\text{MPa}$ , 材料条纹值  $f_{\sigma} = 15.9\text{kg/cm}^2$  级。

模型共三个,形状为正方形,边长为300mm,板厚为6mm。为保持应力场的轴对称性,

国家自然科学基金资助项目

本文主要内容分别在“全国非金属矿学术会议(1988.9武汉)”和“第二届世界非金属矿物学术大会(1989.10.17~21北京)”上宣读。

1990年11月3日收到原稿,1991年4月12日收到修改稿。

炮孔设在试件的几何形心,炮孔直径为 5mm、7.5mm、8.75mm 三种,相应的不耦合系数分别为 1,1.5,1.75。模型放置在偏振光场中,不受力时,模型为各向同性的,当有应力存在时,模型产生双折射效应,以等差条纹的形式显示其应力场的变化。根据应力-光学定律,模型上的应力条纹级数  $N$  与模型中主应力  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  的差  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  存在如下关系

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N f_{\sigma} / h \quad (1)$$

其中  $h$  为试件厚度。

加载源是用 DDNP 起爆药作为装药的简易微秒雷管,装药直径 5mm,药量 85mg,其结构原理可参见文献[5]。用 1600V 高压脉冲进行起爆,起爆精度为 1 $\mu$ s。

记录仪器为国产多火花式动态光弹性仪(WZDD-1),该仪器具有 16 个气隙和与之相应的 16 个照像镜头,当动态现象出现后,在同步系统控制下,高压(20kV)电容器对气隙放电,产生强烈的火花使底片曝光。关于该仪器的结构原理可参见文献[6]。

### 3. 数据处理方法

试验记录到的第一手资料是模型的瞬态等差条纹分布,在图 1 中给出了一组典型的等差应力条纹照片,照片下的时间是以雷管被点火的时刻为  $t=0(\mu\text{s})$  计算的,在照片上靠外的同心圆式的条纹对应着模型中的膨胀波,剪切波所相应的条纹分布紊乱,参见文献[7]。关于轴对称情况下应力条纹级数的判定方法可参见文献[8]。

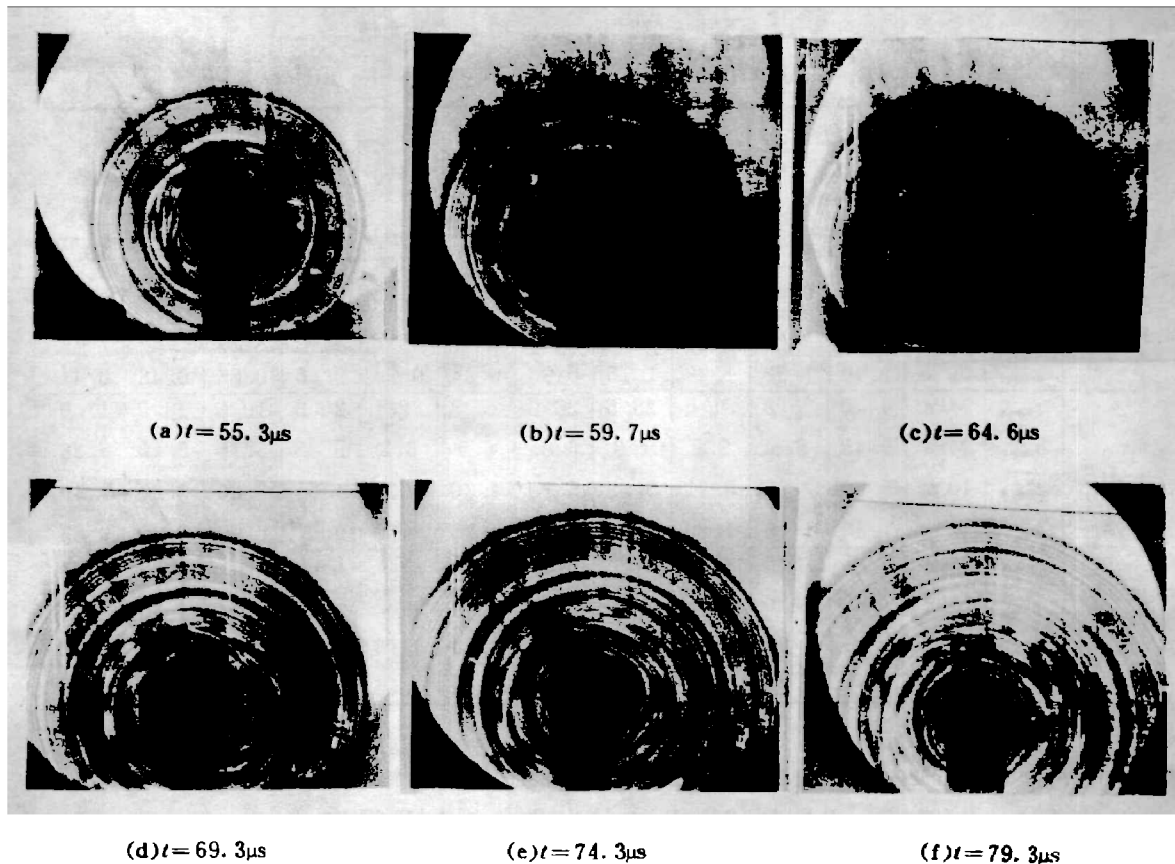


图 1. 无限平面中爆炸应力波传播的等差条纹

Fig. 1. The isochromatics of blasting stress waves propagating in an infinite plate

在所用实验条件下,由于应力场是中心轴对称的,因而所有切向位移  $u_\theta = 0$ 。尽管环氧树脂材料具有一定粘性,对应力波传播具有一定程度的影响,但仍以弹性应力场为主。根据弹性动力学理论和二维应力-光学定律,可以得出应力场中各应力、应变分量的表达式

$$\epsilon_\theta = - \frac{1 + \nu_d}{E_d} \cdot \frac{f_{od}}{h} \int_R \frac{N}{R} dR \quad (2)$$

$$\epsilon_R = - \frac{1 + \nu_d}{E_d} \cdot \frac{f_{od}}{h} (N + \int_R \frac{N}{R} dR) \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E_d}{1 - \nu_d^2} (\epsilon_\theta + \nu_d \epsilon_R) \quad (4)$$

$$\sigma_R = \frac{E_d}{1 - \nu_d^2} (\epsilon_R + \nu_d \epsilon_\theta) \quad (5)$$

由式(2)~(5)表明,可以根据不同加载条件下  $N \sim R$  的分布,计算出  $\sigma_R, \sigma_\theta, \epsilon_R$  和  $\epsilon_\theta$  随  $R$  的分布。

4. 试验结果的数据处理与分析

用高速摄影技术分别记录了三种不耦合系数下与模型中应力波传播相应的序列等差条纹照片。在投影放大读数仪上确定三种条件下不同时刻的  $N \sim R$  关系。根据式(2)~(5)编制了计算程序,计算出了三种不耦合值下各个时刻  $\sigma_R \sim R, \sigma_\theta \sim R, \epsilon_R \sim R$  和  $\epsilon_\theta \sim R$  的分布情况,然后把每个时刻的最大值  $\sigma_{Rmax}, \sigma_{\theta max}, \epsilon_{Rmax}$  和  $\epsilon_{\theta max}$  取出,其数据列于表 1。

表 1. 不同  $\beta$  值时  $\sigma_R, \sigma_\theta, \epsilon_R$  和  $\epsilon_\theta$  的最大值

Table 1 The maxima of  $\sigma_R, \sigma_\theta, \epsilon_R$  and  $\epsilon_\theta$  with the different  $\beta$

$\beta$	参数	比例距离 数据 单位	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
			1	$\sigma_{Rmax}$	MPa	50.2	42.3	37.2	33.5	30.5	28.1	25.9	24.1
	$\sigma_{\theta max}$	MPa	10.5	9.30	8.50	7.90	7.50	7.02	6.65	6.39	6.10	5.95	5.75
	$\epsilon_{Rmax}$	$10^4 \mu\epsilon$	9.40	7.75	6.71	5.95	5.40	4.95	4.56	4.26	4.02	3.78	3.55
	$\epsilon_{\theta max}$	$10^3 \mu\epsilon$	1.90	1.52	1.28	1.15	0.96	0.84	0.74	0.65	0.56	0.48	0.41
1.5	$\sigma_{Rmax}$	MPa	44.0	35.8	31.5	28.5	26.0	23.8	22.1	20.5	19.5	18.2	17.0
	$\sigma_{\theta max}$	MPa	9.45	8.5	7.8	7.3	6.85	6.5	6.2	5.95	5.70	5.50	5.28
	$\epsilon_{Rmax}$	$10^4 \mu\epsilon$	8.30	7.05	6.21	5.58	5.10	4.70	4.35	4.05	3.80	3.61	3.40
	$\epsilon_{\theta max}$	$10^3 \mu\epsilon$	1.80	1.46	1.20	1.03	0.88	0.76	0.65	0.57	0.49	0.42	0.36
1.75	$\sigma_{Rmax}$	MPa	32.5	28.6	25.8	23.6	21.8	20.5	19.1	18.0	17.2	15.9	14.9
	$\sigma_{\theta max}$	MPa	7.90	7.20	6.65	6.25	5.88	5.60	5.37	5.15	4.97	4.82	4.65
	$\epsilon_{Rmax}$	$10^4 \mu\epsilon$	6.85	5.93	5.28	4.78	4.38	4.00	3.78	3.55	3.34	3.20	3.00
	$\epsilon_{\theta max}$	$10^3 \mu\epsilon$	1.47	1.22	1.04	0.87	0.75	0.65	0.56	0.49	0.43	0.38	0.33

根据表 1 的数据,运用最小二乘法编制计算程序拟合出三个不耦合系数下  $\sigma_{Rmax} \sim \bar{R}, \sigma_{\theta max} \sim \bar{R}, \epsilon_{Rmax} \sim \bar{R}$  和  $\epsilon_{\theta max} \sim \bar{R}$  的衰减规律,并绘出曲线,分别见图 2~图 5。

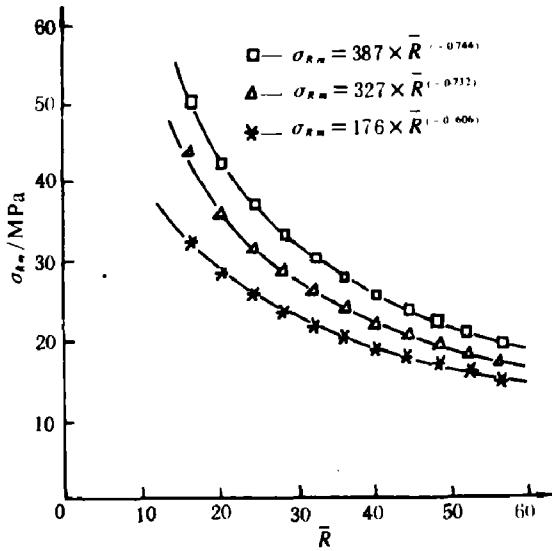


图2 拟合的  $\sigma_{Rmax} \sim \bar{R}$  分布曲线

( $\square$  —  $\beta=1$ ,  $\triangle$  —  $\beta=1.5$ , \* —  $\beta=1.75$ )

Fig. 2 The curves of  $\sigma_{Rmax} \sim \bar{R}$

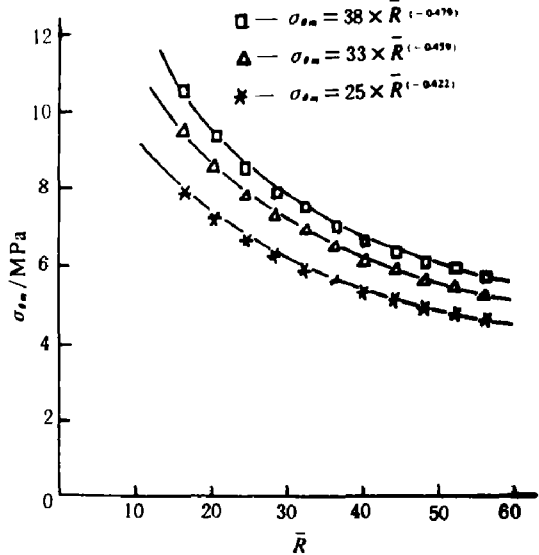


图3 拟合的  $\sigma_{Rmax} \sim \bar{R}$  分布曲线

( $\square$  —  $\beta=1$ ,  $\triangle$  —  $\beta=1.5$ , \* —  $\beta=1.75$ )

Fig. 3 The curves of  $\sigma_{Rmax} \sim \bar{R}$

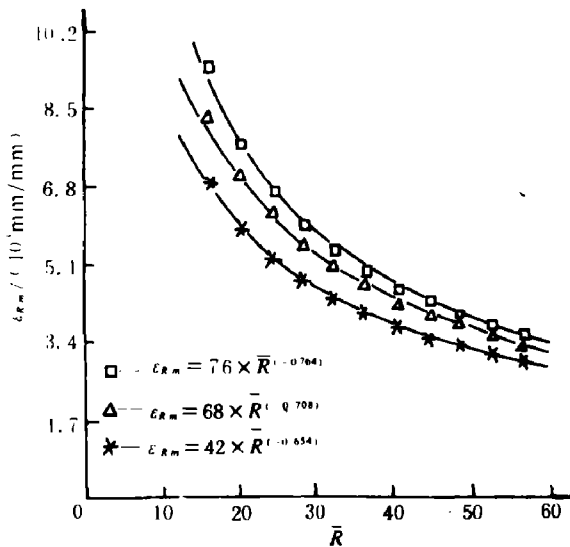


图4 拟合的  $\epsilon_{Rmax} \sim \bar{R}$  分布曲线

( $\square$  —  $\beta=1$ ,  $\triangle$  —  $\beta=1.5$ , \* —  $\beta=1.75$ )

Fig. 4 The curves of  $\epsilon_{Rmax} \sim \bar{R}$

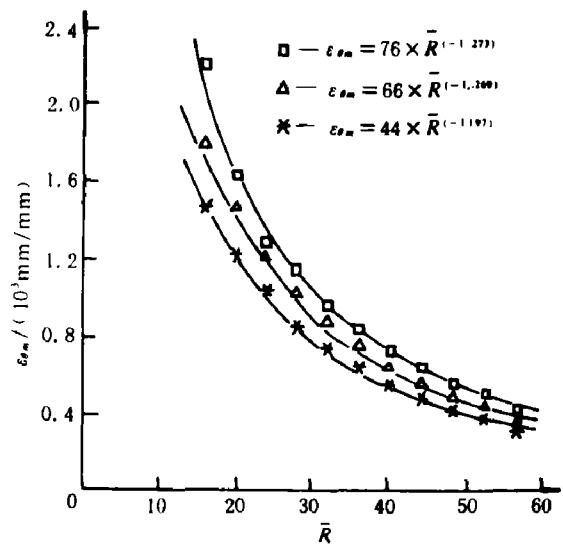


图5 拟合的  $\epsilon_{Rmax} \sim \bar{R}$  分布曲线

( $\square$  —  $\beta=1$ ,  $\triangle$  —  $\beta=1.5$ , \* —  $\beta=1.75$ )

Fig. 5 The curves of  $\epsilon_{Rmax} \sim \bar{R}$

由图2~图5可见,应力、应变分量都随比例距离和不耦合系数的增大而衰减,在离炮孔近处衰减快,在离炮孔远处衰减慢。在拟合曲线中,无论对于  $\sigma_{Rmax}$ 、 $\sigma_{\theta max}$ 、 $\epsilon_{Rmax}$  或  $\epsilon_{\theta max}$ ,比例距离前的系数和比例距离的指数都随不耦合系数的增大而减小,而且,当  $\beta > 1.5$  以后,减小得更快。

表 2. 应力、应变之比的比较表

Table 2 Comparing of the ratio of the maxima of stresses and strains

$\beta$	比例距离 数值 比项	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
		1	$[\sigma_R/\sigma_\theta]_{\max}$	5.00	4.57	4.38	4.24	4.07	4.00	3.89	3.77	3.66
	$[\varepsilon_R/\varepsilon_\theta]_{\max}$	4.59	5.10	5.24	5.41	5.63	5.89	6.19	6.55	7.18	7.88	8.66
1.5	$[\sigma_R/\sigma_\theta]_{\max}$	4.55	4.21	4.04	3.90	3.80	3.65	3.56	3.45	3.42	3.31	3.21
	$[\varepsilon_R/\varepsilon_\theta]_{\max}$	4.61	4.83	5.13	5.42	5.80	6.18	6.69	7.11	7.76	8.60	9.44
1.75	$[\sigma_R/\sigma_\theta]_{\max}$	4.11	3.97	3.87	3.78	3.70	3.65	3.56	3.50	3.42	3.32	3.22
	$[\varepsilon_R/\varepsilon_\theta]_{\max}$	4.66	4.86	5.08	5.49	5.84	6.23	6.75	7.24	7.79	8.42	9.09

表2中给出了径向应力对切向应力的比值和径向应变对切向应变的比值。由表2中可见,对于不同的不耦合系数,随着比例距离的增加,  $[\sigma_R/\sigma_\theta]_{\max}$  值不断减小,而  $[\varepsilon_R/\varepsilon_\theta]_{\max}$  值则不断增大。这表明了径向应力随比例距离的衰减比切向应力随比例距离的衰减快,切向应变随比例距离衰减比径向应变随比例距离衰减快。从表2中还可以看出,当比例距离较大时,  $[\sigma_R/\sigma_\theta]_{\max}$  和  $[\varepsilon_R/\varepsilon_\theta]_{\max}$  的值分别逐渐趋向于岩石介质的弹性应力场的  $[\sigma_R/\sigma_\theta]$  和  $[\varepsilon_R/\varepsilon_\theta]$  的值。

对于岩石介质,通常可取泊松比  $\nu=0.25$ ,则径向应力和切向应力之比为

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_\theta} = \frac{1-\nu}{\nu} = \frac{0.75}{0.25} = 3^{[9]} \quad (6)$$

而

$$\sigma_R = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_R + \nu\varepsilon_\theta) \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_R) \quad (8)$$

由此可得

$$\frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_\theta} = \frac{3-\nu}{1-3\nu} = \frac{3-0.25}{1-3 \times 0.25} = 11 \quad (9)$$

因此,由动光弹试验所获得的炮孔远区的应力场与岩石介质的弹性应力场是一致的,对炮孔近区,与岩石弹性应力场存在差异。这说明,用动光弹方法模拟研究岩石爆炸应力场是可行的,也是可信的。当然,也存在需要进一步解决的问题。

在  $1 \leq \beta \leq 1.75$ ,  $15 \leq \bar{R} \leq 60$  范围内,  $[\sigma_R/\sigma_\theta]_{\max}$  的值介于 3.21~5.00 之间,  $[\varepsilon_R/\varepsilon_\theta]_{\max}$  的值介于 4.61~9.50 之间。

### 5. 讨论与结论

以上研究表明,用动光弹模拟方法研究不耦合炸药作用下的爆炸应力场和应变场,可得出定量分析数据。与电测方法相比,具有试验次数少,测量数据点多的特点,并可观察到应力波传播的动态过程。当比例距离较大时,动光弹测量结果与岩石介质的弹性应力场是一致的,其最大应力之比和最大应变之比值很接近。不足的是环氧树脂具有一定的粘性,与岩石相比有一定的差异,需进一步解决。

在模拟实验条件下,当  $1 \leq \beta \leq 1.75$ ,  $15 \leq \bar{R} \leq 60$  时,  $[\sigma_R/\sigma_\theta]_{\max}$  的值介于 3.21~5.00 之

间和 $[\varepsilon_R/\varepsilon_\theta]_{\max}$ 的值介于4.61~9.50之间时。这些结果可供爆破理论研究参考。

### 参 考 文 献

- [1] 杨永琦、方文儒, 爆破, (3)(1985), 1~4.
- [2] 高士才等, 土岩爆破文集, 第二辑, 冶金工业出版社, (1985), 113~118.
- [3] 王树仁, 中国矿业学院学报, 3(1979), 119.
- [4] 荣际凯, 土岩爆破文集, 第二辑, 冶金工业出版社(1985), 124~132.
- [5] 朱振海, 火工品, (3)(1984), 32~34.
- [6] 朱振海等, 爆炸与冲击, 5(3)(1985), 67~76.
- [7] 朱振海等, 力学与实践, (6)(1987).
- [8] 朱振海、杨善元, 力学与实践, 北京大学出版社(1988), 157~160.
- [9] 王文龙编, 钻眼爆破, 煤炭工业出版社, 第1版, (1984), 199~201.

## DYNAMIC PHOTOELASTIC INVESTIGATION OF THE ACTION OF DECOUPLE

Zhu Zhenhai    Qu Guangjian

(Engineering Institute of Engineer Corps, PLA)

Sun Qiang    Yang Yongqi

(Beijing Graduate School, China University of Mining and Technology)

**ABSTRACT** The isochromatics of the propagation of blasting stress wave was recorded by means of the dynamic photoelasticity with a multiple spark high-speed camera. The models were made of the plate of epoxy resin. The quantitative relations of stress fields around a borehole with different decoupling coefficients were obtained by means of the analysis method of approximate elastic calculation. These quantitative relations are mainly the attenuation of  $\sigma_R$  with  $\bar{R}$  ( $=R/r$ , where  $R$  — the distance between the center of a borehole and the point of measurement,  $r$  — the radius of a charge), the tangential stress  $\sigma_\theta$  with  $\bar{R}$ , radial strain  $\varepsilon_R$  with  $\bar{R}$ , the tangential strain  $\varepsilon_\theta$  with  $\bar{R}$ . The influence of the decoupling coefficients on the blasting stress fields was compared.

It was shown that the value of  $|\sigma_R/\sigma_\theta|_{\max}$  ranges from 3.21 to 5.00 and the value of  $|\varepsilon_R/\varepsilon_\theta|_{\max}$  is between 4.61 and 9.50 when the decoupling coefficient ranges from 1 to 1.75 and the ratio distance is between 15 and 60.

**KEY WORDS** decoupling charge, dynamic photoelasticity, blasting stress fields, model investigation.