

# 条形药包端部爆炸应力场的 动光弹试验研究

邓志勇 张志毅 王中黔

(铁道部科学研究院 北京 100081)

**摘要** 借助动光弹试验方法,采用聚碳酸酯板模拟无限平面,探索了条形药包端部爆炸应力场的分布特性。根据动态二维应力光性定律,得出了端部应力场分布的定性结论。

**关键词** 条形药包 爆炸应力场 动光弹

**中图法分类号** TD235.1 TD235.14

实践证明,条形药包端部效应对整个爆破工程的影响是十分巨大的。只有充分认识端部效应的作用机理,才有可能利用它来改善爆破质量,降低工程成本。另外,条形药包端部作用区的破坏机理一直是爆破理论的缺口。因此,研究端部作用机理必将进一步完善条形药包爆破理论,提高爆破设计的准确性,更好地指导实践应用。

爆破机理研究的一个基本问题是研究其爆炸应力场。文献[1]得出,条形药包爆炸应力场分布具有明显的分区特征,且端部的应力场分布既不同于中间部分的应力场分布,也不同于球形药包的应力场分布。为此,我们借助于二维动态光弹性试验方法,模拟研究和分析无限弹性介质中条形药包端部爆炸应力场的分布特性,以推动端部作用机理的深入研究。

## 1 试验方案和技术

试件由聚碳酸酯板制成,模拟无限平面介质,其几何尺寸为300mm×300mm×5mm,如图1。爆源为PbN<sub>6</sub>,装药密度为1.2g/cm<sup>3</sup>。起爆方式为镍铬桥丝通电1600V瞬间起爆,技术要求是将桥丝绷直于药包中,不得有折痕,保证起爆的同时性,以形成理想的条形药包爆炸应力场。记录仪器为WZDD-1型多火式动态光弹性仪,每次试验可记录16幅动态过程的序列照片,详细原理参见文献[2]。模型材料的动静态参数见表1。

表1 聚碳酸酯板静、动态参数

Table 1 Static and Dynamic parameters of Polycarbonate

	$c_p/(m/s)$	$c_s/(m/s)$	$\nu_d$	$\rho/(g/cm^3)$	$E_d/(MPa)$	$f_{sd}/(N/m \text{ 条})$
静态			0.36	1.2	2332	6860
动态	1590	905	0.352		3021	9360

1995年3月15日收到原稿,8月28日收到修改稿。

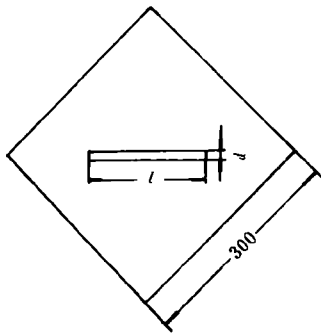


图 1 药包布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of charge arrangement

## 2 试验结果与数据处理

图 2 为不同时刻条形药包端部爆炸应力条纹分布照片,它们是从一次试验的 16 张序列照片中任选的。试验中  $l/d=50$ ,  $l$  为药包长度,  $d$  为药包直径。试验过程中圆偏振光场为明场,故每幅照片上最外一圈黑色条纹为 0.5 级。

一般来说,光弹材料具有一定的粘性,但在瞬时脉冲载荷作用下可近似看作完全弹性介质。在无限平面光弹介质中,药包爆炸产生的应力波传播对应着一组应力条纹的传播,因此,满足平面应力光性定律:

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

式中:  $\sigma_1, \sigma_2$  为平面主应力;  $N$  为条纹级数;  $f_{od}$  为材料动态条纹值;  $h$  为模型厚度。

由式(1)可知,条纹级数直接反映了最大剪切应力,因此可根据条纹级数比较应力波的强弱。根据动光弹分析方法,条形药包爆炸载荷脉冲可以通过不同时刻应力条纹级数  $N$  与径向比距离  $R/R_0$  的关系确定<sup>[2]</sup>。

文献[1]通过一系列不同长径比药包爆炸的动光弹试验给出长径比  $\phi \gg 20$  的柱状药包为条形药包。故文中讨论的条形药包为  $\phi \gg 20$  的柱状药包。另外文献[1]给出,  $\delta$  为条形药包端部爆炸应力波波头传播中心到药包端头距离,  $\delta = (3 \sim 5)d$  (试验条件下)。

图 2 照片表明,条形药包端部爆炸应力条纹分布在不同方向上是不一致的,为此,根据图 2 试验,文中选取五个特征方向作  $N-R/R_0$  曲线,以分析其应力场分布特性,如图 3 (图中  $R$  为以  $\delta$  起始点的径向距离,  $\alpha$  为径向方向与药包轴线夹角)。图 3 曲线表明,随着时间的推移和应力波的传播,载荷脉冲宽度逐渐增加,幅度降低,这说明了应力场强度随径向比例距离的增大而降低。另外,图中还可以看出,在应力波传播过程中,应力场强度在各个方向上的分布规律是不一致的。对图中曲线拟合得到如下五个关系式:

$$a = 0^\circ \quad N_{\max 1} = 508.49 \times (R/R_0)^{-1.316} \quad (2)$$

$$a = 22.5^\circ \quad N_{\max 2} = 367.90 \times (R/R_0)^{-1.201} \quad (3)$$

$$a = 45^\circ \quad N_{\max 3} = 206.89 \times (R/R_0)^{-0.975} \quad (4)$$

$$a = 67.5^\circ \quad N_{\max 4} = 143.50 \times (R/R_0)^{-0.807} \quad (5)$$

$$a = 90^\circ \quad N_{\max 5} = 56.63 \times (R/R_0)^{-0.427} \quad (6)$$

上述各式:  $30 \leq R/R_0 \leq 70$ 。

分析式(2)~(6),衰减指数随着角度的增加逐渐减小,即  $N_{\max}$  随  $R/R_0$  在  $0^\circ$  方向衰减最快,  $90^\circ$  方向衰减最慢。这说明了条形药包端部爆炸应力场强度分布是不均匀的,它在径向距离上的分布规律是随着角位置  $\alpha (0^\circ < \alpha < 90^\circ)$  的增加而衰减逐渐变慢。

综合式(2)~(6),条形药包端部应力场强度在径向距离上衰减规律近似表示为:

$$N_{\max} = A(R/R_0)^{-\beta} \quad (\beta > 0, A > 0) \quad (7)$$

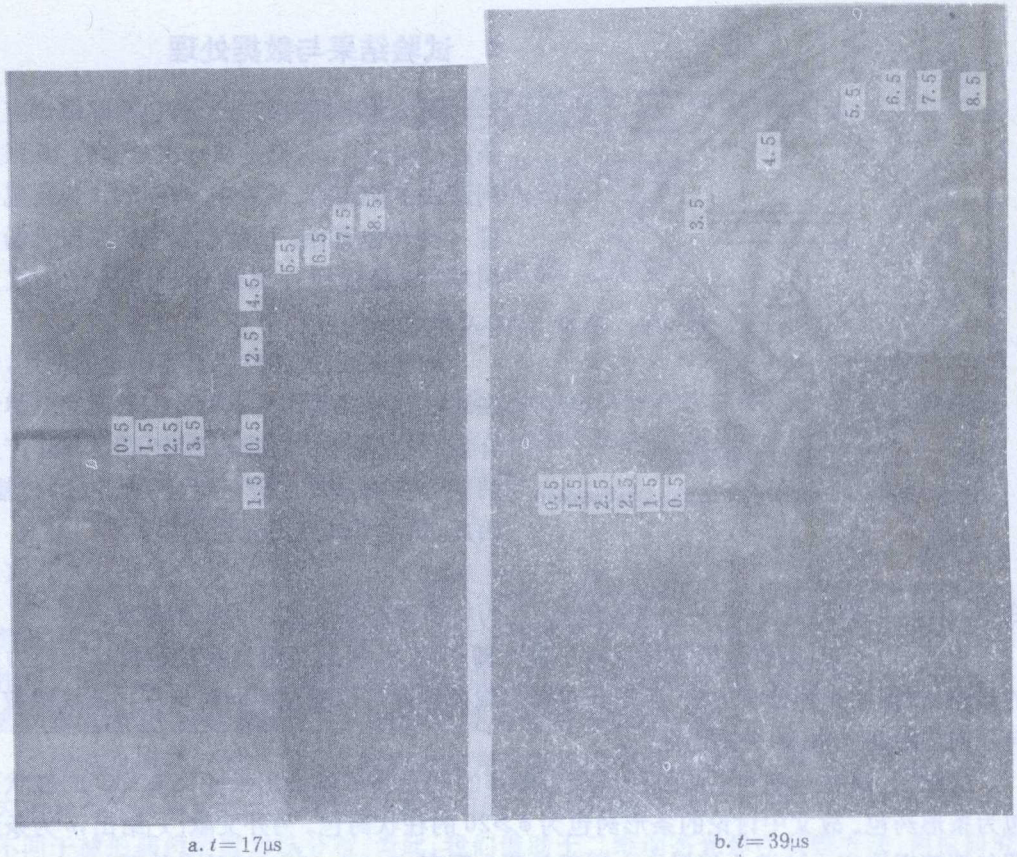


图2 条形药包端部爆炸应力条纹分布

(图中数字为应力条纹级数,阴影部分为支架)

Fig. 2 The explosive stress fringe patterns at the end of the linear-charge

(In the Fig. the number represents the fringe order and the shadow part is the stand)

表2 不同方向不同距离  $N_{\max}$  值Table 2  $N_{\max}$  at different angles and distances

$R/R_0$	$\alpha/(^{\circ})$				
	0	22.5	45	67.5	90
30	5.79	6.19	7.51	9.22	13.25
40	3.96	4.38	5.67	7.31	11.72
50	2.95	3.35	4.56	6.11	10.65
60	2.32	2.69	3.82	5.27	9.86
70	1.90	2.24	3.29	4.65	9.23

分析表中数据,端部应力条纹级数的分布,不仅与距离有关,而且与方向有关。在同一比例距离处,应力条纹级数随着方向角位置的增加而变大,在  $90^{\circ}$  方向(柱部)达到最大。这说明了条形药包应力场分布中柱部的应力场强度大于端部的应力场强度,且端部的应力场强度随方向角位置的增加而增强( $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ )。

根据表 2 数据,文中选取端部轴线( $0^\circ$ )方向与柱部( $90^\circ$ )方向的最大条纹级数相比,在  $R/R_0=30$  处,轴线方向的应力场强度只是柱部的 43.6%,并且随着距离的增加,这一数值越来越小,这说明了随着距离的增加,端部应力场强度相对于柱部的越来越小。

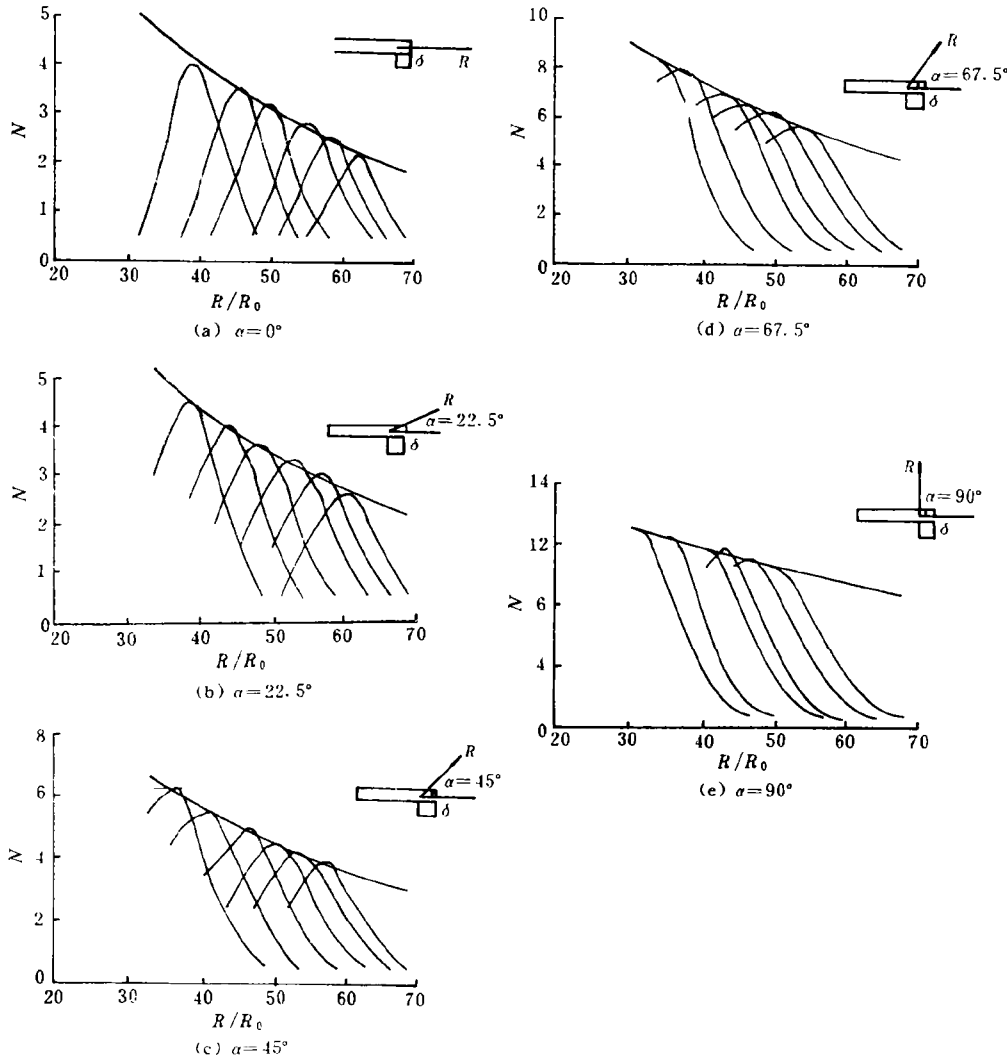


图 3 不同方向不同时刻端部应力条纹级数和最大条纹级数随径向比例距离的分布曲线

[图中自左到右  $t_1=17, 23, 29, 35, 39, 43(\mu s)$ ]

Fig. 3 Fringe orders and the maximum order vs  $R/R_0$  at different angles and times

[The time of curves in the fig. from left to right:  $t_1=17, 23, 29, 35, 39, 43(\mu s)$ ]

### 3 结 论

1. 条形药包端部应力场强度在不同方向上的衰减规律是不一致的,近似表示为:

$$N_{\max} = A(R/R_0)^{-\beta} \quad (\beta > 0, A > 0)$$

其中系数  $\beta$  从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  依次减小, 即  $90^\circ$  方向  $\beta$  最小, 衰减最慢;  $0^\circ$  方向  $\beta$  最大, 衰减最快。

2. 条形药包端部应力场强度在同一距离处, 随着角位置的增加而增强。

3. 随着距离的增加, 端部应力场强度相对于柱部的越来越小。

应用动光弹试验方法研究光弹介质中条形药包端部应力场特性尚属首次探索, 还有待于进一步完善和改进试验技术, 以寻求应力场分布的定量定性结论。

本文试验得到中国矿业大学北京研究生部高尔新副教授大力支持。

#### 参 考 文 献

- 1 邓志勇. 条形药包端部爆炸应力场的试验研究, [硕士论文]. 北京: 铁道部科学研究院, 1994
- 2 朱振海. 爆炸加载时光弹性材料动态性能参数的测定. 爆炸与冲击, 1988, 8(1): 29~36
- 3 Reinhardt H W, Pally J W. Dynamic Photoelastic Investigation of Stress Wave Interaction with a Banch Face. Society of Mining Engineers, AIME, 1971.

## DYNAMIC PHOTO-ELASTIC STUDIES OF EXPLOSIVE STRESS FIELD AT THE END OF A LINEAR CHARGE

Deng Zhiyong, Zhang Zhiyi, Wang Zhongqian

(China Academy of Railway Sciences, Beijing, 100081)

**ABSTRACT** The explosive stress field at the end of a linear charge are studied in the polycarbonate plane with the dynamic photo-elasticity method. Some conclusions of the explosive stress field at the end are discussed according to the optical law of the dynamic two dimensional stress.

**KEY WORDS** linear charge, explosive stress field, dynamic photo-elasticity.