

文章编号: 1001-1455(2013)06-0662-05

预制孔靶板在爆炸冲击波载荷作用下的动态响应^{*}

侯俊亮, 蒋建伟, 门建兵, 王树有

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 对四边固定带预制孔靶板在爆炸冲击波载荷作用下的动态响应问题进行了实验研究。通过设计爆炸冲击波载荷对2种材料不同孔数、不同孔径的靶板的冲击工况, 获得了各靶板的中心点挠度。通过分析, 得到了预制孔靶板中心点挠度与预制孔数、孔径的相关规律, 结合无孔平板在爆炸冲击波载荷下的挠度公式, 建立了广义的靶板中心点挠度公式, 可用于计算不同孔靶板的中心点挠度。研究结果可作为平板材料在破片冲击波联合毁伤研究的基础, 为杀爆战斗部威力评估提供一些依据。

关键词: 爆炸力学; 动态响应; 冲击波; 预制孔靶板

中图分类号: O383.3

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

无论在军事上还是民用上, 薄板都是最常见的结构, 如飞机、汽车、舰船的壳体及隔板等。薄板在爆炸冲击波作用下表现出大的变形、折弯甚至断裂, 其动态响应是典型的爆炸力学问题。很多学者对此类问题进行了相关的研究^[1-6]; N. Jones等^[1]通过理论分析, 给出了四角固支的矩形靶板在冲击波载荷下变形量的表达式, 并给出了解析解; 赵翠翠^[2]采用数值模拟和实验研究的方法, 比较了不同种类装药非接触爆炸条件下矩形靶板的变形情况, 获得了与实验和理论模型符合度较好的结果; 王芳等^[3]对爆炸冲击波作用下四边约束的靶板塑性大变形问题进行了理论分析和实验研究, 得到了靶板挠度与尺寸及爆炸冲击波参数相关的半经验公式。张世臣等^[4]利用 LS-DYNA 对 LY-12 靶板在爆炸冲击波作用下的变形特点和损伤模式进行了数值计算, 得到了靶板的塑性区变形特点及规律等。

杀爆战斗部对目标的作用过程中, 破片、冲击波两种毁伤元速度随距离体现出不同的衰减特点, 两种毁伤元对目标作用一般有时间顺序^[7]。破片先对目标穿孔, 冲击波再对目标作用是典型的作用工况, 一方面破片穿孔必然对结构的强度有影响, 穿孔处也有一定的应力集中^[8]; 另一方面由于穿孔的存在冲击波能量不能完全作用于靶板, 因此与无孔靶板相比, 有孔靶板在爆炸冲击波作用下变形更加复杂, 很难通过理论分析建立工程计算模型, 此方面研究成果较少。

本文中以带预制圆孔靶板模拟破片穿孔后的靶板, 采用实验的方法得到一定爆炸冲击波载荷作用下不同预制孔靶板的中心挠度, 通过对无孔和有孔靶板结果的对比分析, 建立了预制孔靶板与无孔靶板相比挠度值增益的表达式, 结合平板目标挠度公式, 可作为广义的平板目标挠度公式。

1 实验条件

现场布置如图1所示。靶架与悬挂支架放置于水平地面, 矩形钢靶板由上压板及螺钉固定约束在靶架上, 悬挂支架用于悬挂炸药, 保证炸药位于靶板中心正上方, 药柱底距靶板中心点高度 $H=1\text{ m}$ 。

炸药为长径比为1的圆柱形 TNT, 装药密度 1.60 g/cm^3 , 质量 1 kg , 传爆药柱采用 $10\sim 15\text{ g}$ 钝化黑索今炸药。靶板材料为 2 mm 厚 Q235 钢及 4 mm 厚 2A12 铝, 开孔方式有均布 4、9、16 个孔(见图2), 开孔直径 d 分别有 4、6 和 8 mm 等 3 种类型。

* 收稿日期: 2012-06-29; 修回日期: 2012-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(11032002);

爆炸科学与技术国家重点实验室自主基金项目(ZDKT10-03C, ZDKT11-02)

作者简介: 侯俊亮(1983—), 男, 博士研究生, 工程师。

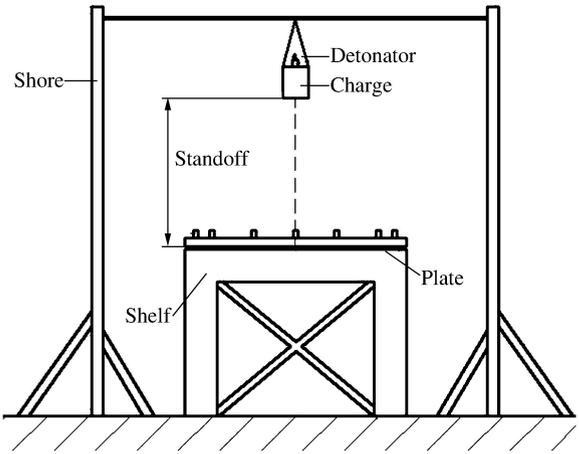


图 1 实验现场布置

Fig. 1 Arena layout

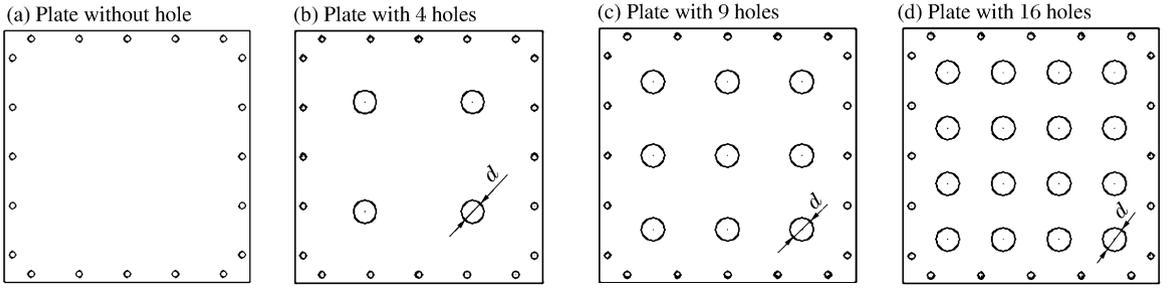


图 2 实验靶板工况

Fig. 2 Thin plates for experiment

2 实验结果及分析

在上述条件下进行实验后，得到全工况靶板实验前后照片，如图 3 所示。

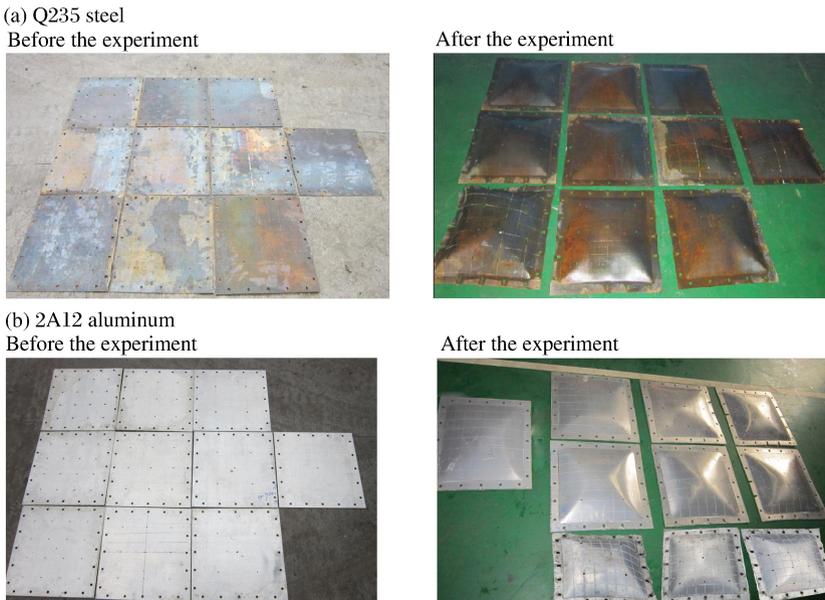


图 3 靶板典型工况实验前后照片

Fig. 3 Pictures of targets before and after experiment

靶板在爆炸冲击波作用下沿着载荷作用方向出现显著的塑性变形,变形区呈中心点挠度最大,向周边辐射方向逐渐减少的特点。由于靶板通过周边螺钉进行约束,部分变形量较大的靶板出现靶板从约束孔处拉脱的情况。一块 16 孔、孔径 8 mm 的 2A12 铝材料靶板还出现了靶板整体破裂,16 孔、孔径 6 mm 的靶板中心也已经出现了剪切裂纹。

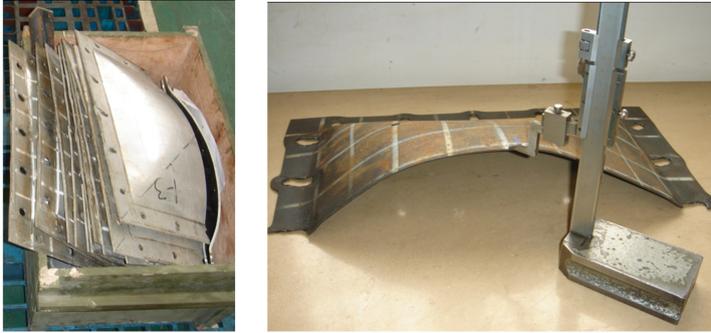


图 4 切割后的靶板及挠度测量

Fig. 4 Shorn plates and deflection measurement

将靶板沿中轴线切开,放置于水平测量台,如图 4 所示,对切纵面变形点进行测量,得到靶板中心点及左右每隔 50 mm 位置点变形量如图 5 所示。

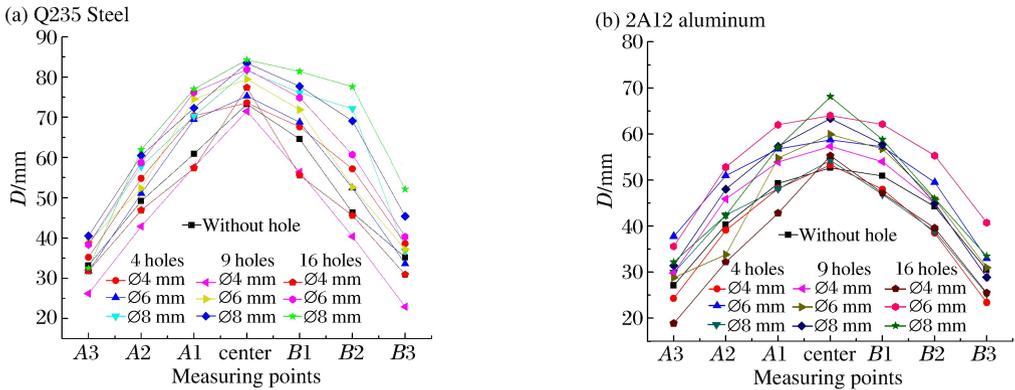


图 5 靶板全状态变形量测量结果

Fig. 5 Deformation measurement of all plates

冲击波载荷作用下,靶板表现为塑性变形凹坑和中心点大挠度变形,其中中心点挠度易于测量,可直观地反映出冲击波作用效果,本文选取其作为评价靶板动态响应的参数。测得靶板中心点平均挠度如表 1 所示,表中 d 为孔径, D_c 为中心点平均挠度。

由表 1 可知,2A12 铝板与 Q235 钢板呈现相同的变化趋势。即在相同冲击波载荷作用下,预制孔靶板表现为更大的挠度,且随开孔数量、开孔孔径的增加,靶板中心点挠度增大。

表 1 实验后靶板中心点挠度值

Table 1 Deflection of plates centre after experiment

预制孔数	d/mm	D_c/mm	
		2A12 铝板	Q235 钢板
0		53.5	72.1
4	4	53.9	74.2
	6	55.7	76.2
	8	57.4	79.0
9	4	55.7	74.3
	6	60.9	78.6
	8	62.2	82.8
16	4	57.3	76.2
	6	62.6	81.1
	8	65.1	85.5

3 广义半经验公式

王芳等^[3]运用能量守恒的方法,得到的无孔靶板中心点挠度的半经验公式如下

$$D_0 = 0.0756 \left(\frac{W_e}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{r_e 32 a i_+}{\pi^3 h \sqrt{2 \sigma_s \rho_t}} \quad (1)$$

式中: W_e 为装药质量, ρ 为装药密度, r_e 为反射系数, a 为方靶板一半边长, i_+ 为比冲量, h 为靶板厚度, σ_s 为靶板屈服强度, ρ_t 为靶板密度。

$$r_e = \begin{cases} 2 + 6\Delta p_1 / (\Delta p_1 + 7p_0) & \Delta p_1 \leq 0.8 \text{ MPa} \\ 5 & 0.8 \text{ MPa} < \Delta p_1 \leq 5 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δp_1 为入射的冲击波超压值, p_0 为标准大气压。

由于以上公式不能解决带孔靶板的中心点挠度问题,结合实验结果,定义 K_f 为带预制孔靶板中心点挠度 D_f 与无孔靶板中心点挠度 D_0 之比,为预制孔靶板挠度增益系数, $K_f \geq 1$ 。

从实验结果可知,预制孔靶板的弱化与穿孔直径 d_f 和单位面积穿孔数 n_f 有一定函数关系,引入靶板厚度 h_0 ,给出增益系数的表达式

$$K_f = f(n_f, d_f/h_0) \quad (3)$$

设 $x_1 = n_f, x_2 = \frac{d_f}{h_0}$, $K_f = f(x_1, x_2)$,假设 x_1 和 x_2 为相互独立参量,给出预拟合的 K_f 的二项式形式

$$K_f = f(x_1, x_2) = f_1(x_1) f_2(x_2) = (c_1 + c_2 x_1 + c_3 x_1^2)(d_1 + d_2 x_2 + d_3 x_2^2) \quad (5)$$

利用表 1 中数据拟合后得到靶板的参数,如表 2 所示。

表 2 参数拟合结果

Table 2 Parameters gained by analysis

靶材	c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3
Q235 钢	-7.36	-0.010 6	2.9948×10^{-5}	-0.129 00	-0.002 421	-1.504×10^{-4}
2A12 铝	-128.89	-0.260 4	1.1218×10^{-3}	-0.007 28	-0.000 241	-8.724×10^{-5}

实验结果与拟合曲线如图 6 所示。从图 6 可知,拟合的公式与实验结果有符合较好,在一定穿孔密度和穿孔直径范围内公式可以用于计算穿孔靶板挠度,进而评估冲击波作用下有孔靶板的变形效果。

由于条件有限,只进行了一定装药固定炸高下不同工况靶板的变形实验研究,不同装药量及不同炸高下预制孔靶板的变形规律将作为进一步研究的重点内容,以修正经验公式,提高其可靠性及适用性。

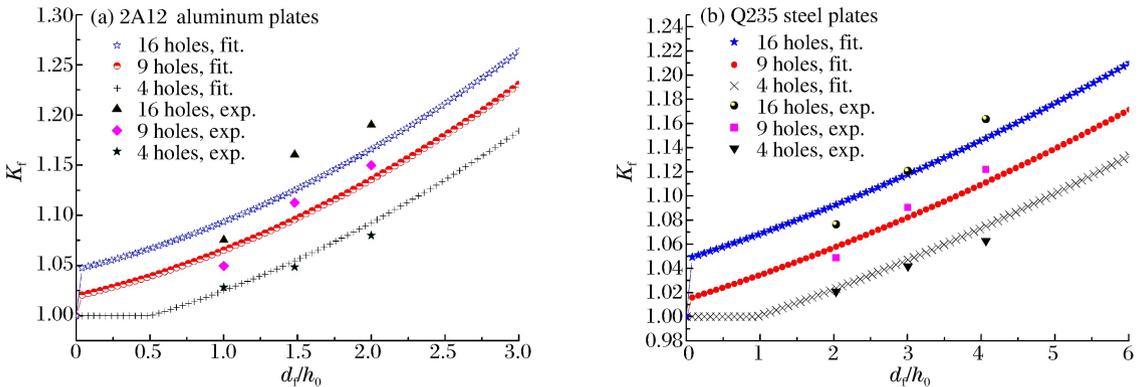


图 6 实验结果与拟合曲线

Fig. 6 Results of experiment and fitting curves

4 结论

通过实验的方法,得到了一定冲击波载荷对 2A12 铝和 Q235 钢材料不同孔数和孔径的 10 种状态

靶板的冲击变形结果;利用预制孔靶板与无孔靶板的挠度对比,得到预制孔靶板中心点挠度随着孔数和孔径的增益规律,建立了预制孔靶板挠度增益与预制孔密度和孔径相关的经验计算模型,继而建立了广义的平板目标在爆炸冲击波载荷作用下的中心点挠度计算公式。该结果可用于评估冲击波载荷作用下无孔、预制孔靶板的动态响应,也可为破片、冲击波联合毁伤研究提供参考。

参考文献:

- [1] Jones N, Uran T O, Tekin S A. The dynamic plastic behavior of fully clamped rectangular plates[J]. *International Journal of Solids Structures*, 1970,6(12):1499-1512.
- [2] 赵翠翠. 复合炸药能量输出与靶板塑性大变形响应研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- [3] 王芳,冯顺山,俞为民. 爆炸冲击波作用下靶板的塑性大变形响应研究[J]. *中国安全科学学报*, 2003,13(3):59-61.
Wang Fang, Feng Shun-shan, Yu Wei-min. Study on large plastic deformation response of target plate under explosive blast wave[J]. *China Safety Science Journal*, 2003,13(3):59-61.
- [4] 张世臣,米双山. LY-12 靶板在爆炸冲击波作用下损伤的有限元分析[J]. *兵工自动化*, 2008,27(5):18-19.
Zhang Shi-chen, Mi Shuang-shan. Finite element analysis of LY-12 target damnifying by explosive shock wave[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2008,27(5):18-19.
- [5] 何建,肖玉凤,陈振勇,等. 空爆载荷作用下固支矩形钢板的塑性极限变形[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007,39(2):310-313.
He Jian, Xiao Yu-feng, Chen Zhen-yong. Plastic limited deformation analysis of the clamped rectangular steel plate subjected to air noncontact explosions[J]. *Journal of Harbin Institute of Technolog*, 2007,39(2):310-313.
- [6] Wu C, Hao H. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005,31(6):699-717.
- [7] 任丹萍. 破片和冲击波复合作用下对导弹的毁伤[D]. 南京:南京理工大学,2006.
- [8] Altenhof W, Zamani N, North W, et al. Dynamic stress concentration for an axially loaded structure at discontinuities due to an elliptical hole or double circular notches[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004,30(3):255-274.

Dynamic response of thin plate with holes under blast loading^{*}

Hou Jun-liang, Jiang Jian-wei, Men Jian-bing, Wang Shu-you

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,*

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To explore the deformation features of the plates with holes under blast waves, thin plates of two materials were prepared by adopting three kinds of hole numbers and three kinds of hole diameters to gain the rules of deflection at the centre of the plates. A generalized deflection formula was proposed by combining the existent deflection formula for the plates without holes subjected to blast loading. The proposed deflection formula can be used to calculate the deflection at the centre of the plates with holes.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; blast wave; perforated plate

^{*} Received 29 June 2012; Revised 31 October 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11032002)

Corresponding author: Jiang Jian-wei, bitjw@bit.edu.cn