

# 爆炸冲击波作用下的金属板损伤 P-I 图仿真

陈 赟<sup>1</sup>, 冯顺山<sup>1</sup>, 王 芳<sup>1</sup>, 胡松涛<sup>2</sup>

1. 北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081
2. 国营 9374 厂, 合肥 230041

**摘要** 目标损伤的 P-I 图是确定冲击波对目标的毁伤效果及防护设计的重要依据。目标可等效为一定厚度的金属靶板, 考虑冲击波在靶板上反射参数, 由反射的“超压-冲量”准则评价冲击波对目标的损伤效应。由理论推导与数值分析相结合的方法获得靶板损伤的 P-I 图。应用有限元动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA, 建立了 TNT 炸药柱对靶板作用的数值模拟方法, 进而研究了装药质量和作用距离变化对作用在靶板上超压与冲量的影响, 得到了靶板不同损伤等级的 P-I 图。通过与试验结果比较, 两者符合较好, 验证了方法的正确性。

**关键词** 冲击波; P-I 图; 数值仿真方法; 理论分析法; 金属板

**中图分类号** TJ760.6

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)18-0052-05

## Numerical Methods of Pressure-Impulse Diagrams for Damages of Plates Under Blast Loads

CHEN Yun<sup>1</sup>, FENG Shunshan<sup>1</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>, HU Songtao<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology; Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. No. 9374 Factory, Hefei 230041, China

**Abstract** The different damage levels of targets can be expressed by different P-I diagrams. P-I diagrams, which are very important in the estimation of the blasting effect on targets, also provide a basis for the design of protective structures. Targets can be represented by metal plates with a certain thickness, and with the reflected parameters, the reflected pressure-impulse criterion can be used to assess the damage caused by the blast. This paper combines the analytical and numerical methods to obtain the P-I diagrams of a certain metal plate. Using the finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA, the numerical model is built, where the process of TNT column blasting above the metal plate is simulated. The variations of pressure and impulse are studied, for different mass of TNT and the blast distance. With the obtained P-I diagrams, the coefficients affected by the boundary condition of the experiments are studied. The results of the experiments and simulations are found in good agreement, which validates the numerical model.

**Keywords** blast load; pressure-impulse diagrams; numerical methods; analytical formulae; plates

### 0 引言

超压-冲量 (Pressure-Impulse, P-I) 图, 又称等毁伤曲线<sup>[1]</sup>, 广泛用于建筑物、飞机的爆炸毁伤预测。许多中外学者对 P-I

图进行了一定的数值仿真和理论研究<sup>[2-3]</sup>, 这些研究大都是讨论入射超压和冲量对梁等单自由度系统的作用效果。然而, 靶板在爆炸作用下的损伤, 实质上是冲击波的反射压力及其

收稿日期: 2010-03-26; 修回日期: 2010-08-04

作者简介: 陈赟, 博士研究生, 研究方向为灵巧弹药技术, 电子信箱: chenyun@bit.edu.cn; 冯顺山 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E520000035L), 教授, 研究方向为毁伤理论与技术、灵巧弹药技术, 电子信箱: ssfeng@bit.edu.cn

冲量所致,目前无法预测冲击波作用在目标上反射超压和比冲量。因此,本文结合国内外的研究方法,考虑冲击波在靶板上反射超压,由理论推导与数值分析相结合的方法获得靶板损伤的 P-I 图。应用有限元动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA,建立 TNT 炸药柱对靶板作用的数值模拟方法,进而研究装药质量和作用距离变化对作用在靶板上超压与冲量的影响,得到了靶板不同损伤等级的 P-I 图;通过数据对比分析,得到了边界条件对靶板挠度的影响系数;与试验结果比较,两者符合较好,验证了方法的正确性,为研究爆炸装置冲击波对目标的作用效果或防护冲击波破坏方面提供有价值的参考。

### 1 目标损伤的 P-I 图

目标损伤的 P-I 图,如图 1 所示,是“超压-冲量”准则的表现形式,其认为冲击波对目标的毁伤取决于超压和冲量两者的组合效应。“超压-冲量”准则克服了超压准则和冲量准则中只考虑某一种作用效果的欠缺,更准确地描述目标的损伤情况。不同的损伤等级,如完全破坏、严重破坏等,都可以用 P-I 曲线量化。P-I 图法已经成为美国结构爆炸防护设计手册中的主要分析工具<sup>[4]</sup>。利用 P-I 图,美军可以预测 20 多种结构的毁伤<sup>[5]</sup>。超压准则和冲量准则分别对应于 P-I 图中的准静态加载区和冲量加载区。连接冲量加载区和准静态加载区的动态加载区是研究中主要关心的区域,但该区域无理想过程可用,一般通过爆炸试验、理论分析及数值仿真<sup>[2]</sup>获得 P-I 图。

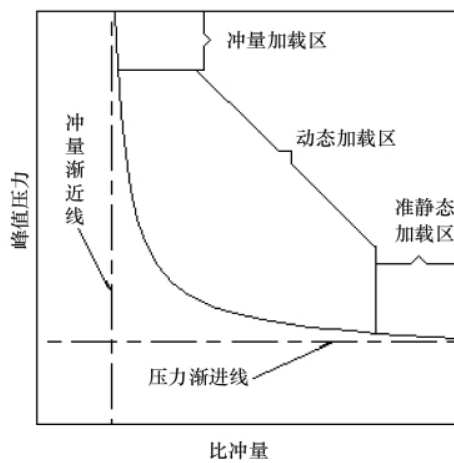


图 1 典型 P-I 图  
Fig. 1 Typical P-I diagram

### 2 爆炸冲击波作用下金属靶板的 P-I 图

理想情况下,要想预测冲击波对目标的破坏结果,进而评价冲击波的毁伤威力,需要知道目标完整的动力响应过程,以及准确的冲击波作用在目标上的反射压力、冲量等参量。入射超压越大,实际受到的反射超压与入射波的比值  $r_{ep}$  就越大。根据经验公式获得的靶板入射超压,以及数值仿真

获得作用在靶板上的反射超压,可获得  $r_{ep}$ 。在入射比冲量  $i_+$  已知的情况下,对于某一范围的入射冲击波超压,其时间历程曲线与正反射超压的时间历程曲线之间存在着相似性<sup>[6]</sup>,即反射比冲量的反射系数  $r_{ei}$  在一定范围内与反射超压的反射系数  $r_{ep}$  相似,反射比冲量  $i_R$  为

$$i_R = r_{ei} i_+ \quad (1)$$

其中,  $r_{ei} = \begin{cases} r_{ep} & h=1\text{mm} \\ 5 & h \in [2,3]\text{mm} \end{cases}$ ,  $h$  为靶板厚度。

在试验中获得所有这些项,且具有足够的准确性,从而进行详细的、有价值的计算与分析是十分困难的。而数值仿真可解决这一问题。结合能量守恒法,获得冲量和准静态加载区,能大大减小计算量,获得准确的 P-I 图。

#### 2.1 金属靶板 P-I 图的动态加载区

美国海军武器实验室和弹道研究室经过大量理论和试验研究,提出了超压-冲量破坏准则模型:

$$(\Delta P - P^*)(i_+ - i^*) = DN \quad (2)$$

其中,  $P^*$  为产生某种毁伤等级的准静态加载区的静压垮压力载荷,即准静态渐近线对应的数值;  $i^*$  为产生某种毁伤等级的冲量加载区的比冲量,即冲量渐近线对应的数值;  $\Delta P$  为峰值超压;  $i_+$  为对目标作用的冲量;  $DN$  为某一等级的破坏准数。

#### 2.2 金属靶板的 P-I 图冲量加载区和准静态加载区

根据能量守恒法,由目标的材料、尺寸等参数,可得靶板产生该种毁伤等级所需要的静压垮载荷和理想比冲量。对于靶板某一给定的损伤等级,将作用在目标靶板上的可能的最大功等于应变能,动能等于应变能,分别求出  $P^*$  和  $i^*$ <sup>[7]</sup>。

对于四边约束的夹紧矩形板,厚度为  $h$ ,长宽尺寸为  $2x, 2y$ ,坐标原点在板中央,不考虑弯曲效应,仅考虑膜力效应,只要变形形状满足边界条件,就能得到相差不到百分之几的合理结果,且与变形形状无关,选择最佳变形形状在整个能量解析法的推导过程中是比较次要的。根据文献[3]可知,在冲量加载区,靶板中心点的变形挠度与垂直均匀作用的冲量  $i_0$  的关系为

$$w_0 = \frac{4xyi_0}{\pi h} \sqrt{\frac{1}{(x^2+y^2)\rho\sigma_Y}} \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为靶板的密度,  $\sigma_Y$  为屈服强度。

在准静态加载区,靶板中心点的变形挠度与垂直均匀作用在整个板面上的准静态压力载荷  $P_0$  的关系为

$$w_0 = \frac{128}{\pi^4} \frac{x^2y^2}{x^2+y^2} \frac{P_0}{\sigma_Y h} \quad (4)$$

则对于方形靶板,  $x=y$ , P-I 图的冲量和准静态渐近线可以表示为<sup>[3]</sup>

$$i^* = \frac{\pi h}{4x} \sqrt{2\rho\sigma_Y} w_0 \quad (5)$$

$$P^* = \frac{\pi^4}{64x} \sigma_Y h w_0 \quad (6)$$

#### 2.3 毁伤等级的划分

根据式(5)和式(6),  $P^*$  和  $i^*$  均与靶板中心点的变形挠度

$w$  成正比,因此各损伤等级可用变形挠度  $w_n$  对应的 P-I 曲线体现:

$$w_n = \alpha_n w_m \quad (\alpha_n = 0.1, 0.4, 0.7, 1.0) \quad (7)$$

其中,  $w_m$  为靶板撕裂之前的最大变形挠度。根据靶板某些特定挠度下 P-I 曲线的  $P^*$  和  $i^*$  划分靶板的损伤等级,  $P^*$  和  $i^*$  每增大 30%, 可认为提高一个损伤等级。将目标划分为以下 5 个损伤等级:

- 一级损伤:  $w \leq 0.1w_m$ , 靶板未变形;
- 二级损伤:  $0.1w_m < w \leq 0.4w_m$ , 靶板轻微变形;
- 三级损伤:  $0.4w_m < w \leq 0.7w_m$ , 靶板中度变形;
- 四级损伤:  $0.7w_m < w \leq w_m$ , 靶板严重变形;
- 五级损伤:  $w > w_m$ , 靶板撕裂, 完全破坏。

### 3 数值模拟建模

利用 ANSYS/LS-DYNA 非线性动力有限元程序, 对金属靶板在爆炸冲击波作用下的变形破坏进行数值模拟研究。采用流-固耦合算法计算近距离爆炸时爆轰产物和空气冲击波对金属靶板的作用, 其中炸药和空气采用 Euler 算法, 钢板采用 Lagrange 算法。

考虑靶板结构和爆炸波的空间对称性, 建立 1/4 模型。靶板边界固支, 对空气设定透射边界。靶板采用 shell163 壳单元, 靶板模型为 Plastic Kinematic 模型, 几何尺寸 400mm×400mm×1mm。炸药和空气采用 solid164 三维实体单元, 炸药模型为高能炸药, TNT 炸药密度  $\rho_e = 1.63 \times 10^3 \text{kg/cm}^3$ , 爆速  $D = 6.95 \text{km/s}$ 。由于模拟炸药在不同炸距、不同装药质量下对靶板的毁伤效果, 每次仿真的炸药和空气域的尺寸不同。根据具体物理状况, 分别对空气和炸药采用 Grüneisen 状态方程和 JWL 状态方程进行描述。A3 钢的密度为  $7800 \text{kg/m}^3$ , 弹性模量 2.12GPa, 泊松比 0.288, 屈服强度 235MPa。

#### 3.1 有限元模型建立

为了保证计算精度, 在单元划分时采用四边形单元, 并对网格进行优化, 使网格从空气域到炸药域递增, 靶板从边缘到中心递增。靶板中心单元边长尺寸为 5mm, 炸药中心单元边长尺寸为 5mm, 空气域中心单元边长尺寸为 5mm。模型示意图如图 2 所示。



图 2 模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the model

#### 3.2 材料模型

Plastic Kinematic 模型的基本公式为

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/\beta} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (8)$$

式中, 方括号项表示应变率对屈服应力提高的影响; 圆括号项表示塑性模型的选取,  $\beta = 1$  为等向强化模型,  $\beta = 0$  为随动强化模型。

高能炸药模型的材料压力  $p_e$  的基本公式为

$$p_e = F \cdot p_{\text{os}}(v, e_t) \quad (9)$$

其中,  $p_{\text{os}}$  为 JWL 状态方程计算压力,  $v$  为比体积,  $e_t$  为比热力学能。  $F$  由下式计算:

$$F = \max(F_1, F_2) \quad (10)$$

其中,  $F_1 = \begin{cases} 2(t-t_1)DA_{\text{max}}/(3V_e) & t > t_1 \\ 0 & t \leq t_1 \end{cases}$ ,  $F_2 = (1-v)/(1-v_{c_j})$ ;  $t_1$  为距离爆轰最近点的终止爆轰时间,  $A_{\text{max}}$  为单元最大截面积,  $V_e$  为单元面积,  $v_{c_j}$  为  $c_j$  点比体积。

#### 3.3 材料状态方程

Grüneisen 状态方程的材料压力  $p_d$  为

$$p_d = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{\mu + 1} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) e_t \quad (11)$$

其膨胀材料压力  $p_t$  计算公式为

$$p_t = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) e_t \quad (12)$$

式中,  $C$  为  $v_s - v_p$  曲线的截距;  $S_1, S_2$  和  $S_3$  为材料常数;  $\gamma_0$  为 Grüneisen 系数;  $a$  为  $\gamma_0$  的一阶体积修正系数; 泊松比  $\mu$  为

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1 \quad (13)$$

JWL 状态方程的材料压力  $p_{\text{os}}$  基本公式为

$$p_{\text{os}} = A \left( 1 - \frac{\bar{\omega}}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left( 1 - \frac{\bar{\omega}}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\bar{\omega} e_t}{v} \quad (14)$$

式中,  $A, B, R_1, R_2$  和  $\bar{\omega}$  为常数;  $v$  为爆轰产物体积与爆轰炸药体积之比。

### 4 仿真结果分析与对比

在不同药量下, 使用几种长径比为 1:1 的 TNT 裸装圆柱形药柱对同样尺寸的正方形靶板作用, 进行爆炸试验, 靶板尺寸为 500mm×500mm×1mm, 靶架四边各压住 50mm, 用 20 根螺钉将四周加紧。通过与试验结果的对比较验证仿真结果。

当某一尺寸的药柱距靶板 1m, 靶板中心的挠度变化情况如图 3 所示。靶板最大变形挠度为 7.2cm。在试验条件下, 靶板变形挠度为 7.9cm。考虑试验中靶板边界无法绝对压紧, 情况吻合。

在本文的试验条件下, 靶板中心挠度最大为 92mm, 此时, 螺钉孔一边全断, 靶板严重变形, 认为已经达到最大挠度。同样装药质量和作用距离下的仿真结果中, 靶板中心的最大挠度只有 77mm。这是由于实际中的靶板四周被靶架板压住的部分均会发生一定程度向靶板中心移动的现象, 参与变形, 使靶板变形挠度增大, 因此引入修正系数  $\varphi$ ,  $\varphi$  为每次试验靶板中心的挠度与仿真结果的比值。试验结果和部分仿

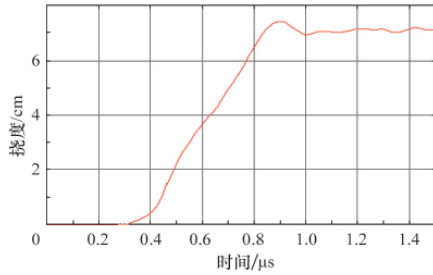


图3 靶板中心的挠度变化仿真  
Fig. 3 The maximum displacement of the plate

真结果如表 1 所示。

表 1 可以看出, 仿真结果与试验结果相差不大, 靶板的

最大挠度较小时, 试验值与理论值的比值  $\varphi$  较小, 这是由于螺钉孔未被拉断, 靶板四周被靶架压住的部分参与变形的面积较少; 随着螺钉孔被拉断数目的增多, 参与变形的面积较多, 试验结果与仿真结果相差较大。 $\varphi$  与靶板上被拉断的螺钉孔的数量、靶板被靶架压住的面积等边界条件有很大关系, 在本文试验条件下, 当螺钉孔未被拉断时,  $\varphi=1.05$ ; 当拉断的螺钉孔数占总孔数的 50% 以内,  $\varphi=1.10$ ; 当拉断的螺钉孔数大于总孔数的 50% 时,  $\varphi=1.20$ 。入射超压大于 0.5MPa 时,  $r_c^p=2.5$ ; 小于 0.5MPa 时,  $r_c^p=2$ 。

按照第 2.3 节的等级划分方式,  $\alpha_n=0.1, 0.4, 0.7, 1$  时, 挠度分别为 7.7, 30.8, 53.9, 77mm。根据式 (2) 及仿真结果, 获得各临界挠度对应的 P-I 曲线, 各损伤临界等级的具体参数如表 2 所示。

表 1 部分仿真与试验结果比较

Table 1 Comparison between simulations and experiment

药柱	炸距/m	试验挠度 $w_e$ /mm	拉断螺钉孔数	仿真挠度 $w_s$ /mm	$\varphi=\frac{w_e}{w_s}$	入射超压/MPa	反射超压/MPa	$r_c^p$
1#	0.9	92	13	77	1.19	0.647	1.623	2.51
1#	1	79	9	72	1.09	0.514	1.291	2.52
1#	1.2	48.5	0	45	1.06	0.323	0.647	2.01
2#	1.33	82	11	69	1.18	0.361	0.751	2.08
2#	1.5	53	0	50	1.04	0.272	0.535	1.97
3#	1.63	65	7	57	1.13	0.261	0.536	2.05

表 2 P-I 曲线  
Table 2 P-I diagram

$\alpha_1$	$P_n^c$ /MPa	$i_n^c$ /(Pa·s)	DN
0.1	0.069	57.8	20.9
0.4	0.275	231	30.4
0.7	0.482	405	95.7
1.0	0.688	579	78.1

$\alpha_1$  以内超压冲量的组合可以对靶板造成一级损伤,  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  之间超压冲量的组合可以对靶板造成二级损伤,  $\alpha_2$  与  $\alpha_3$  之间超压冲量的组合可以对靶板造成三级损伤,  $\alpha_3$  与  $\alpha_4$  之间超压冲量的组合可以对靶板造成四级损伤,  $\alpha_4$  以上的超压冲量组合可以对靶板造成五级损伤, 如图 4 所示。

### 5 结论

1) 本文提出由作用在目标上反射的“超压-冲量”准则评价冲击波对目标的损伤效应, 由理论推导和数值分析相结合的方法获得靶板损伤的 P-I 图。

2) 根据能量守恒法获得 P-I 图的冲量区域和准静态区域, 根据数值仿真结果确定动态响应区域。

3) 应用有限元动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA, 建立了 TNT 炸药柱对靶板作用的数值模拟方法, 进而研究了装药质量和作用距离变化对作用在靶板上反射超压与冲量的影

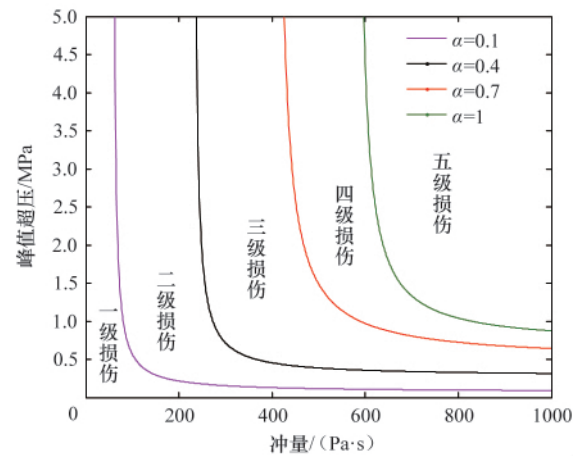


图 4 A3 钢板损伤 P-I 图

Fig. 4 P-I diagram of damage levels of A3 plates

响, 得到了靶板不同损伤等级的 P-I 图。

4) 与试验结果进行比较, 两者符合较好, 验证了本文方法的正确性。本文的研究成果可为研究爆炸装置冲击波对目标的作用效果, 或防护冲击波破坏方面提供有价值的参考。

### 参考文献 (References)

[1] Mays G C, Smith P D. Blast effects on buildings: Design of buildings to optimize resistance to blast loading[M]. London: Thomas Telford Ltd, 1995.

- [2] Krauthammer T, Astarlioglu S, Blasko J, *et al.* Pressure-impulse diagrams for the behavior assessment of structural components [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(8): 771-783.
- [3] 王芳, 冯顺山, 俞为民. “超压-冲量”毁伤准则及其等毁伤曲线研究[J]. 弹箭与制导学报, 2003(S2): 126-130.  
Wang Fang, Feng Shunshan, Yu Weimin. *Journal of Projectiles, Rockets, Missile and Guidance*, 2003(S2): 126-130.
- [4] Shi Y C, Hao H, Li Z X. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(11): 1213-1227.
- [5] Smith P D, Hetherington J G. Blast and ballistic loading of structures[M]. London: Butterworth Heinemann, 1994.
- [6] 王芳. FAE 战斗部威力的评价方法研究 [D]. 北京: 北京理工大学机电学院, 2001  
Wang Fang. Study on evaluation method of FAE warhead power[D]. Beijing: School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, 2001.
- [7] Baker W E. Explosion hazard and evaluation [M]. New York: Elsevier Scientific Pub Co, 1983.

(责任编辑 代丽)



## 欢迎订阅 《中国学术期刊文摘》

《中国学术期刊文摘》致力于全面、快速地向广大科技工作者交流和传播中国科学技术各领域的原创性学术成果。《中国学术期刊文摘(中文版)》遴选中国近600种高水平科技期刊为文摘收录源期刊,每期收录学术论文文摘和中国科协系统学术会议论文题录共4000余条;是科研单位、高等院校、图书馆以及广大科技工作者了解中国科技研究成果、学术研究动向的重要参考工具书。《中国学术期刊文摘(中文版)》为半月刊,2010年定价为45元/册,邮发代号:82-707。

《中国学术期刊文摘(英文版)》遴选近400种中国高水平科技期刊作为收录源期刊,是海外科技工作者了解中国科技发展动态、最新科研成果的重要窗口。《中国学术期刊文摘(英文版)》为月刊,2010年定价为30元/册,邮发代号:80-487。

中国科协所属全国学会个人会员订刊享受8折优惠。