

文章编号: 1001-1455(2005)02-0112-07

横向爆炸载荷下开孔板的动应力集中因子*

蔡中民, 高经武, 张 兵, 杨桂通

(太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 基于 ANSYS 5.7/LS-DYNA 程序, 对 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ 四边固支和简支、中心具有 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 方孔的开孔板和无孔板对应点在两种下三角爆炸载荷作用下的应力响应进行了分析; 由开孔板和无孔板边对应点的主应力时程曲线, 对提出的能量密度时间分布函数的绝对值平方进行变上限积分, 按其比值确定动应力集中因子, 该方法简单易行。

关键词: 爆炸力学; 动应力集中因子; 能量密度时间分布函数; 开孔板; 横向爆炸载荷

中图分类号: O343.3 **国标学科代码:** 130·35 **文献标志码:** A

1 引言

动应力集中研究始于 1927 年 Sezawa 用特殊函数研究圆柱、椭圆柱及球体对入射压力波的绕射问题。1962 年, Pao 用本征函数展开法研究了稳态入射波在具有圆孔的无限弹性薄板中的动态响应问题, 指出应力集中因子取决于入射波的波长和板材的泊松比, 对某些入射波长, 动应力集中因子大于相应的静应力集中因子。K. Shanker^[1] 使用 SEA (statistical energy analysis) 统计能分析方法, 得到了在给定耦合和任意激励下与结构相关的均方振动动能, 揭示了空间平均能或应力与应变速度之间的简单关系。给出动应力集中因子定义: 由单位输入功率引起的角点或夹具边 RMS (range mean stress) 值与单位输入功率引起的平板的 RMS 值之比。A. William 等^[2] 对轴向支撑具有几何不连续结构在动力荷载下的计算模型、仿真和分析进行了研究, 首先用 FEA (finite element analysis) 方法对具有局部椭圆不连续的一维杆进行了计算机模拟且与激光光弹的实验结果进行了对比, 符合较好。我们建议用冲击以后不连续边界上应力时程曲线中的最大应力与冲击后连续结构相同时刻相同位置的应力比值定义动应力集中因子 K_d 。 K_d 是冲击以后的时间函数, 且依赖于网格密度, 对时间的依赖随着标准横截面的减小而增加; 对于椭圆孔, K_d 可比 K_s (静应力集中因子) 大, 也可比 K_s 小, 并且依赖于时间。横向冲击载荷作用下以弯曲为主的开孔板应力集中研究尚未发现有关报导, 蔡中民等^[3] 在横向爆炸载荷下 (下三角形) 对中心开有圆孔的正方形板进行了有限元分析, 用孔口边处等效应力的响应谱与无孔板对应点的响应谱的比值作为 K_d 的定义, 得出与文献^[2] 相同的定性结论。由于我们采用的是等效应力, 因此频率加倍。而且开孔板与无孔板的频率不一致, 只有用最小二乘法分别拟合以后, 方可确定依赖频率的 K_d 。

防爆结构的结构物是以梁、板、壳为主, 因而具有各种不连续区域, 在这些不连续区域中应力集中的出现是必然的, 怎样确定应力集中因子是设计者关心的问题。本文的目的就在于根据应力集中因子的原始定义, 基于 ANSYS 5.7/LS-DYNA 程序中壳单元的计算所得的不连续点和与无孔板对应点的应力时程结果, 直接对其绝对值平方进行变上限的时间积分, 用其积分所得的能量密度时间分布函数 $E(t)$, 确定其 K_d 。该方法在具有 ANSYS 5.7/LS-DYNA 程序的情况下, 方便可行。

2 基本原理

应力集中定义: 由于几何不连续, 例如孔洞、空穴、缺口、沟槽、转角、截面突然改变等原因, 在构件上

* 收稿日期: 2004-06-21; 修回日期: 2004-09-16

基金项目: 山西省自然科学基金项目(20011003)

作者简介: 蔡中民(1942—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师。

引起的局部应力的增加。应力集中因子: 一个不连续区域里的最大应力与根据简单原理算出的标准局部应力的比值, 它是对在一个局部区域里的应力集中的严重程度的度量标准。所谓标准应力, 可以基于构件不连续部分的净截面为基础, 也可以忽略不连续性而以构件的全截面为基础, 然后按没有不连续状态的情况用简单原理进行计算^[4]。本文中的“标准应力”是在没有不连续的情况下用 ANSYS/LS-DYNA 程序计算得到的。

根据电磁理论中的 Poynting 定理(电的能量密度是电场的绝对值平方, 对磁场也是一样)和 Parseval 或 Rayleigh 定理, 如果每单位频率内的能量密度是 $|S(\omega)|^2$, 那么总能量应该是 $|S(\omega)|^2$ 在整个频率范围内的积分, 而且等于直接由时间波形 $S(t)$ 计算得到的信号的总能量, 即

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |S(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega$$

信号的总能量应该与计算方法无关, 式中 $|S(\omega)|^2$ 为在频率 ω 下每一单位频率内的能量或强度(能量密度频谱), $|S(t)|^2$ 为在时间 t 内每单位时间内的能量或强度(能量密度或瞬时功率)^[5], 据上述定理, 定义能量密度

$$|S(\omega)|^2 = |\sigma_1(t)|^2 + |\sigma_2(t)|^2 + |\sigma_3(t)|^2 = |\sigma_{ii}(t)|^2 \quad (1)$$

对(1)式积分

$$E(t) = \int_0^t |\sigma_{ij}(\tau)|^2 d\tau \approx \sum_{k=1}^n |\sigma_{ii}(\tau)|^2 \Delta\tau_k =$$

$$\sum_{k=1}^n [|\sigma_{11}(\tau)|^2 + |\sigma_{22}(\tau)|^2 + |\sigma_{33}(\tau)|^2] \Delta\tau_k \quad \tau \in [0, t], \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 是一点的应力张量, σ_{ii} 是一点的主应力。

方程(2)在数学上称为变上限积分, 在本文中可称为累积能量密度分布函数或能量密度时间分布函数, 我们采用后者。当 $E(t)$ 的导数存在时, 能量密度与能量密度时间分布函数之间的关系为 $|\sigma_{ii}(t)|^2 = dE(t)/dt$, 引入 $E(t)$ 可以把一点应力分量杂乱无章的时程曲线变换为连续曲线。用 $E_k(t)/E_w(t)$ 确定 $K_d(t)$ ($E_k(t)$ 、 $E_w(t)$ 分别表示不连续点和连续结构中对对应点的能量密度时间分布函数), 从而确定 $\max K_d(t)$ 和对应时间。

定义动态应力集中因子

$$K_d = \max K_d(t) = E_k(t)/E_w(t) \quad (3)$$

在有限时间内的爆炸载荷作用下, 对于具有粘性的结构, $\sigma_{ii}(t)$ 在区间 $[0, \infty)$ 内是有界的, 于是 $\sigma_{ii}(t)$ 在区间 $[0, t]$ 上是可积的。根据应力集中因子原始定义, 把动态应力集中因子修正为: 一个不连续区域里的能量密度时间分布函数与连续区域里对应点的能量密度时间分布函数的最大比值。不连续点 $\sigma_{ii}^*(t)$ 与对应点 $\sigma_{ii}(t)$ 由程序计算。用能量密度时间分布函数选取最大比值及对应时刻比较方便。积分上限 t 按 $\sigma_{ii}(t)$ 的时程曲线衰减情况确定。

计算结果精度: 根据定积分的性质, 在 ANSYS/LS-DYNA 软件中, 采用自动选取的方法划分空间单元、设定时间步长, 本文算例中 $\Delta t = 1.32 \text{ ms}$, $\sigma_{ij}(t)$ 数值库建立与计算机的容量有关, 数据存储时间间隔采用 0.04 s 。上述积分依赖于数据取样的时间间隔, 为了提高 K_d 的精确度, 在计算机容量允许的情况下, 应尽可能缩小数据取样的时间间隔。

3 算例

采用 ANSYS 5.7/LS-DYNA 中的动力壳单元, 网络划分选用具有薄膜和弯曲功能的四节点显式程序。横向爆炸载荷两种, 其最大爆炸压力和作用时间分别为 1.2 MPa 和 12.04 ms 、 4.78 MPa 和 3.02 ms , 如图 1 所示。

混凝土板尺寸为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$, 四边固支或简支, 有孔板中心开有 $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的方孔, 分别计算了有孔板和无孔板的动力响应。混凝土本构关系选用等向强化弹粘塑性模型, 其屈服应力

$$\sigma_y = [1 + (\dot{\epsilon}/c)^{1/p}](\sigma_0 + \beta E^p \epsilon_{\text{eff}}^p)$$

式中： σ_0 为初始屈服应力， c 、 p 为应变率参数， ϵ_{eff}^p 为等效塑性应变， E^p 为塑性硬化模量， $\dot{\epsilon}$ 为应变率， β 为硬化参数。弹性模量 $E^e = 33 \text{ GN/m}^2$ ，材料密度 $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$ ，泊松比 $\mu = 0.18$ ，切线模量 $E_{\text{tan}} = 330 \text{ MN/m}^2$ ， $\sigma_0 = 35 \text{ MN/m}^2$ ， $c = 99.3$ ， $p = 1.94$ ， $\beta = 0, 1$ (弹性取 0，塑性取 1)。

无孔板单元数 400，节点数 441，有孔板在孔口的加密网格共有 560 个单元，680 个节点。时间步长 $\Delta t = 1.32 \text{ ms}$ ，采集数据时间间隔为 0.04 s 。

1.2、4.78 MPa 横向爆炸载荷下，不同边界条件、孔口角点和与之对应的无孔板点的 3 个主应力时程曲线如图 2~3 所示，等效应力等高线如图 4 所示。

能量密度时间分布函数 $E(t) = \int_0^t (\sigma_1^2(\tau) + \sigma_2^2(\tau) + \sigma_3^2(\tau)) d\tau$ ，如图 5 所示。

根据图 5 中能量密度时间分布函数 $E(t)$ ，按 $K_d = E_k(t)/E_w(t)$ 计算，结果如图 6 所示。

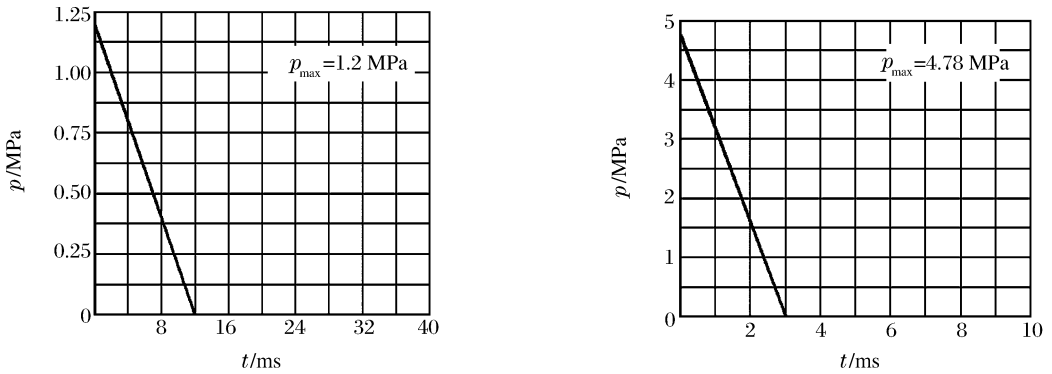


图 1 载荷-时间曲线
Fig. 1 The curve of load-time

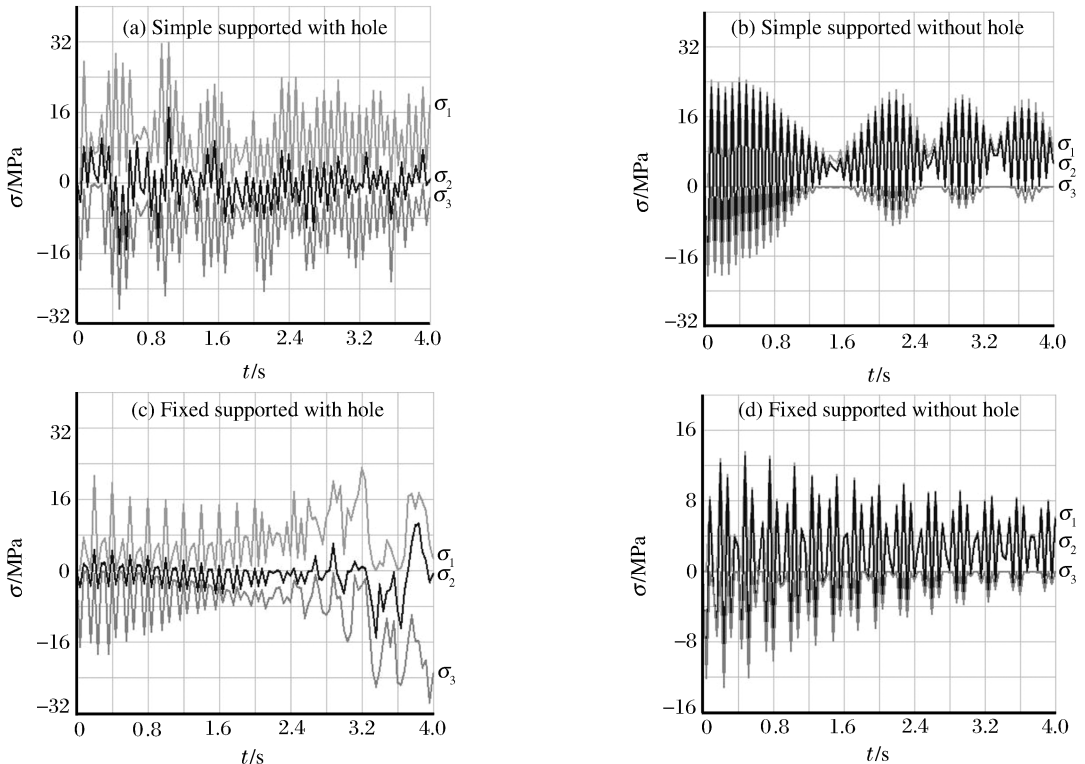


图 2 最大爆炸压力为 1.2 MPa 时混凝土板的主应力时程曲线

Fig. 2 The time-displacement curve of primary stress of concrete plate under explosive load 1.2 MPa

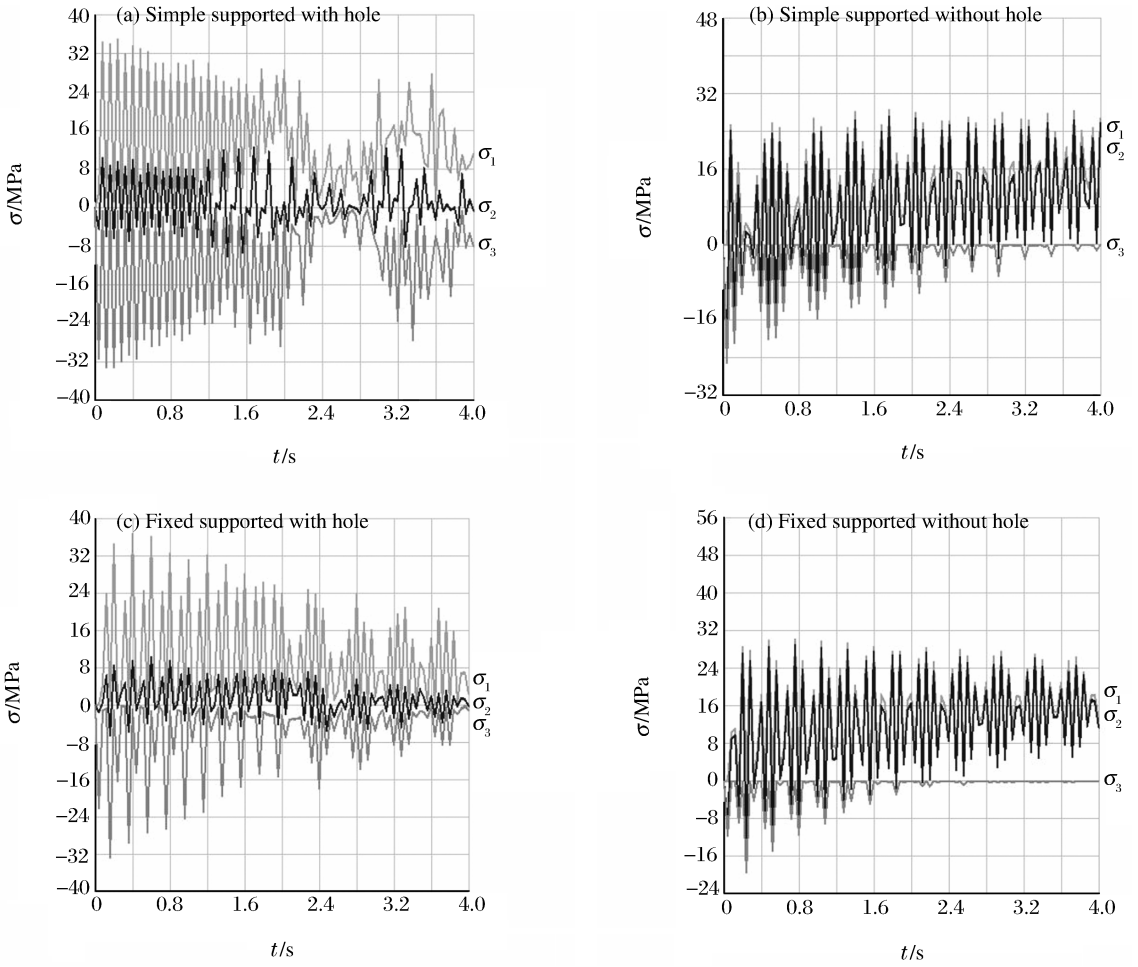


图 3 最大爆炸压力为 4.78 MPa 时混凝土板的主应力时程曲线

Fig. 3 The time-displacement curve of primary stress of concrete plate under explosive load 4.78 MPa

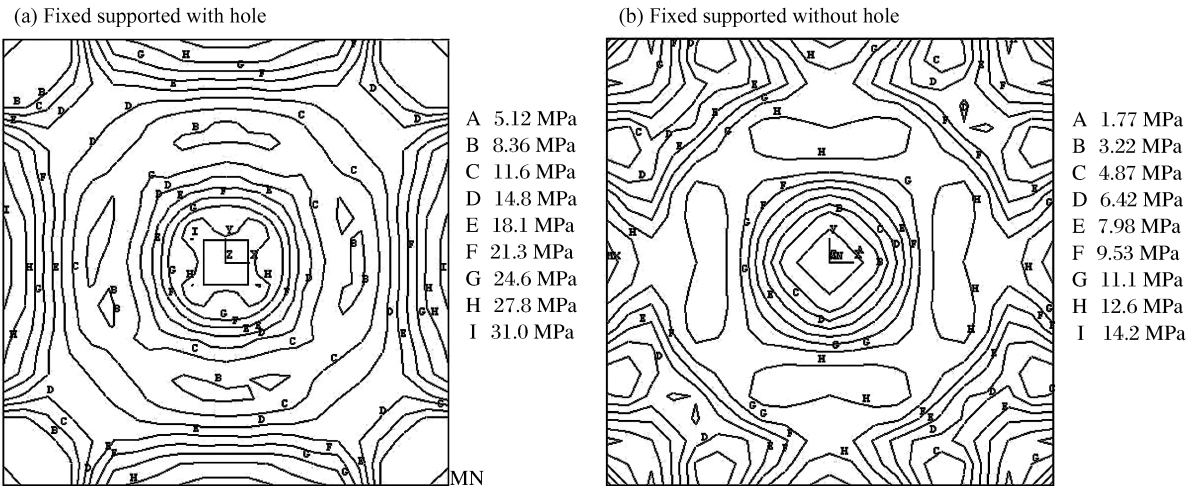


图 4 最大爆炸压力为 4.78 MPa 时混凝土板的等效应力等高线

Fig. 4 The contour line of equivalent stress of concrete plate under explosive pressure 4.78 MPa

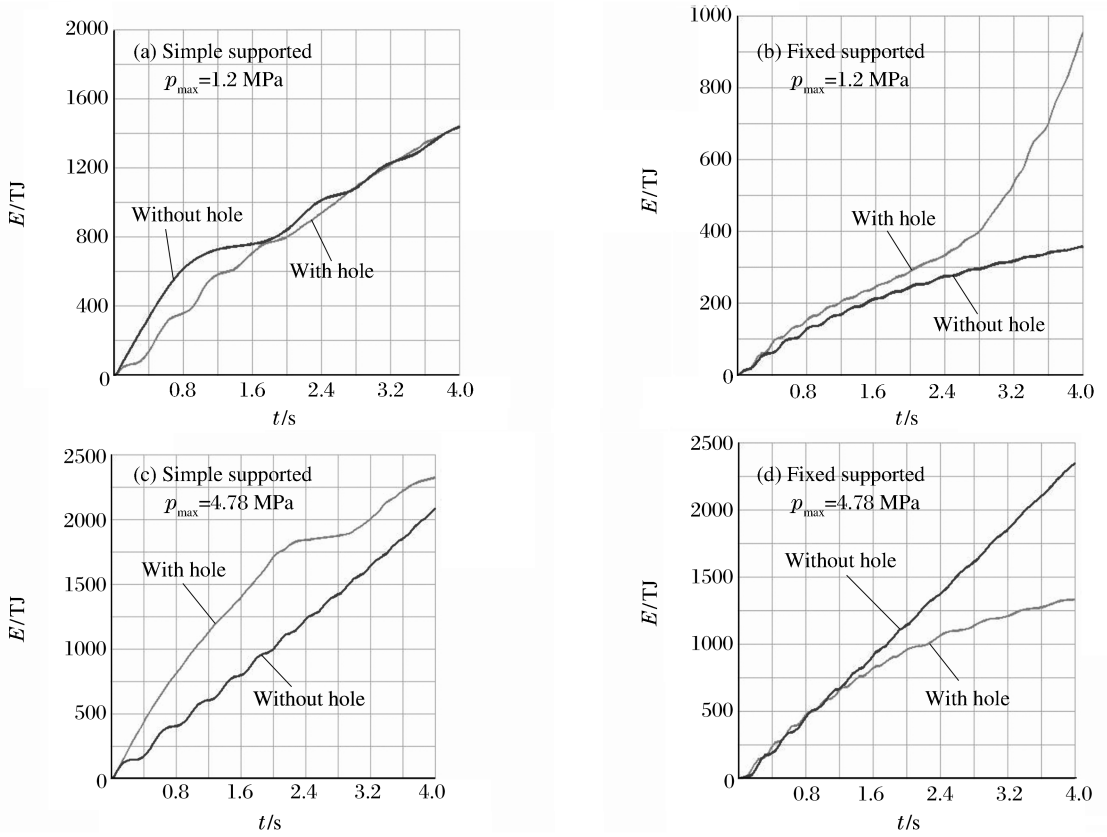


图 5 混凝土板的能量密度时间分布函数

Fig. 5 Time-distributive function of energy density of concrete

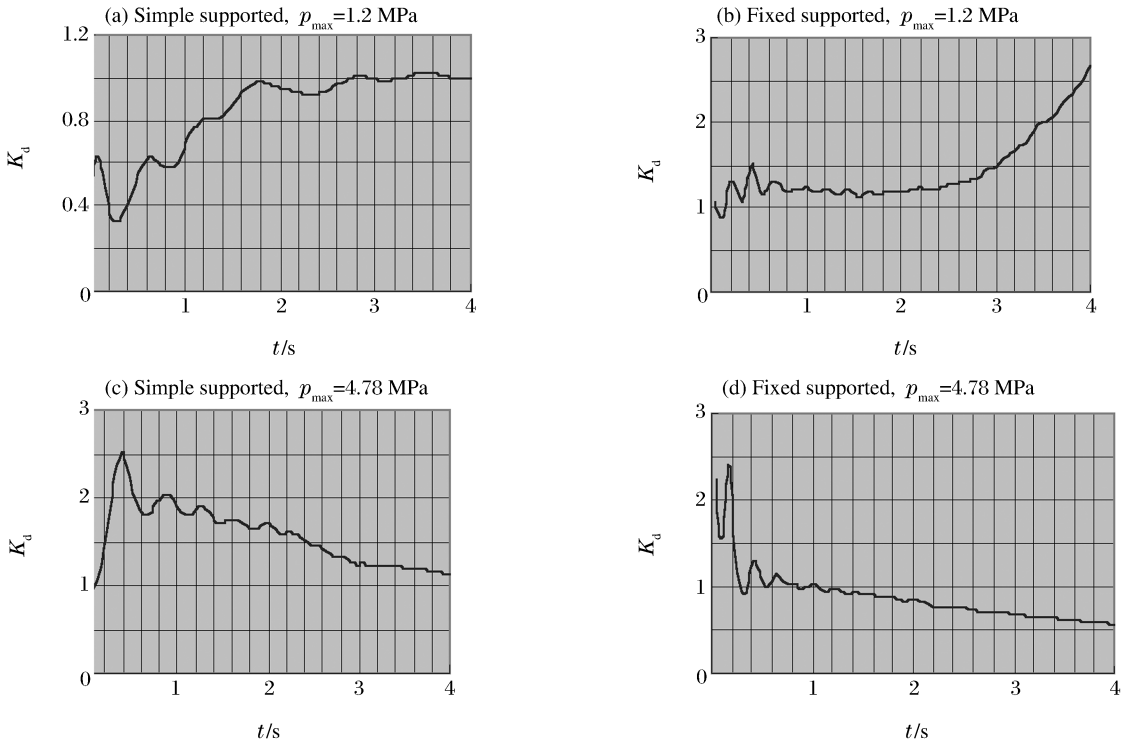


图 6 混凝土的 K_d-t 曲线

Fig. 6 The K_d-t curve of concrete plate

从主应力时程曲线图 2~3 可以看出开孔的 σ_2 均小于无孔的 σ_2 ; 不论开孔与否, 简支 σ_1 、 σ_2 均大于固支的(4.78 MPa 无孔情况除外)。峰值应力 σ 及对应时刻 t 、振荡平衡值 $\bar{\sigma}$ 见表 1。

表 1 混凝土板在爆炸载荷作用下的峰值应力、对应时刻及振荡平衡值
Table 1 The peak stress, corresponding time and its balance value
of concrete plate under explosive load

p_{\max}/MPa	支撑	开孔情况	σ_1/MPa	t_1/s	σ_2/MPa	t_2/s	σ_3/MPa	t_4/s	$\bar{\sigma}_1/\text{MPa}$	$\bar{\sigma}_2/\text{MPa}$
1.2	简支	有孔	32.0	1.02	17	1.02	28.0	0.98	8	0
		无孔	25.0	0.40	24	0.40	20.0	0.02	8	8
	固支	有孔	23.0	3.20	11	3.80	29.0	3.92	4	0
		无孔	13.5	0.50	13	0.50	13.5	0.23	4	4
4.78	简支	有孔	35.5	0.22	13	1.70	33.5	0.15	19	2
		无孔	29.0	1.80	28	1.80	26.0	0.03	11	11
	固支	有孔	37.0	0.40	10	0.60	33.0	0.15	11	3
		无孔	30.0	0.75	29	0.75	20.0	0.25	13	11

从等效应力等高线图 4 可以看出: 在固支条件下, 4.78 MPa 载荷时, 孔角点最大等效应力均大于无孔相应点的等效应力, 也就是说应力集中因子大于 1。有孔板和无孔板等效应力分布差异较大。

从能量密度时间分布图 5(a)、(b)可以看出: 开孔板曲线似乎无界, 但是在时间超过 5 s 后趋于收敛。从图 5(c)、(d)可以看出, 开孔板有界, 而无孔板单调增加无界。这是由于在本构方程中弹性部分无粘性, 仅在计算机程序中施加了微小粘性。

从图 6(a)、(b)可以看出, 1.2 MPa 简支和固支板的 K_d 最大值分别出现在 1.8 s 和 3 s 以后, 鉴于它们比爆炸作用时间 12.04 ms 分别大 150 倍和 250 倍, 此时结构已处于自由振动状态, 由于本构关系中弹性部分未加阻尼, 其值可信度很小。故 K_d 值分别采用小于 1.8 s 和 3 s 时的最大值: 当 $p_{\max} = 1.2$ MPa 时, 简支, $K_d = 0.63 \sim 0.98$, $t = 0.1 \sim 1.77$ s; 固支, $K_d = 1.52$, $t = 0.45$ s。从图 6(c)、(d)可以明显看出: 当 $p_{\max} = 4.78$ MPa 时, 简支, $K_d = 2.54$, $t = 0.40$ s; 固支, $K_d = 2.45$, $t = 0.08$ s。

4 结 论

(1) 利用 ANSYS5.7/LS-DYNA 程序, 计算孔口角点和无孔对应点的 $\sigma_{ij}(t)$, 并变换为主应力 $\sigma_i(t)$, 以本文中提出的能量密度时间分布函数 $E(t)$ 的计算公式(2)分别计算 $E_k(t)$ 、 $E_w(t)$, 按公式(3)确定 K_d 简单易行, 但尚需实验验证。

(2) 建议在本构关系中弹性部分施加阻尼, 避免出现类似图 6(a)、(b)的现象。

(3) 注意时间步长和 $\sigma_{ij}(t)$ 数据采集时间间隔的选取, 在计算机容量允许的情况下, 尽可能缩小数据取样的时间间隔。

(4) 在横向爆炸载荷作用下, 孔口角点动应力集中因子不一定大于 1。当结构响应在弹性范围内时, 开孔板可以减小爆炸载荷对结构的作用。

参考文献:

- [1] Shankar K. A study of the dynamic stress concentration factor of a flat plane for sea applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 217(1): 97-111.
- [2] Altenhof W, Zamani N, North W, et al. Dynamic stress concentration for an axially loaded strut at discontinuities due to an elliptical hole or double circular notches[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(3): 255

—274—

- [3] 高经武,蔡冰,蔡中民. 横向爆炸载荷作用下中心具有圆孔矩形板的动应力集中[A]. 第七届全国爆炸力学学术会议论文集[C]. 2003:161—162.
- [4] 鲍亦兴,毛昭宙. 弹性波的衍射与动应力集中[M]. 刘殿魁,苏先越,译. 北京:科学出版社,1993.
- [5] L·科恩. 时-频分析:理论与应用[M]. 白居宪,译. 西安:西安交通大学出版社,1998.

Stress concentration factor of a plate with hole subjected to transverse explosive loading

CAI Zhong-min^{*}, GAO Jing-wu, ZHANG Bing, YANG Gui-tong
(*Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology,
Taiyuan 030024, Shanxi, China*)

Abstract: In this paper, using ANSYS 5.7/LS-DYNA, the dynamic stress concentration at the hole edge in a plate subjected to transverse explosive loading was studied. A simple and effective approach based on time-distributive function of energy density was developed to calculate the dynamic stress concentration factor. Numerical results are carried out for fixed supported and simple supported square plates (3 m×3 m) with a hole (0.3 m×0.3 m) in the center.

Key words: mechanics of explosion; dynamic stress concentration factor; time-distributive function of energy density; plate with hole; transverse explosive load

* Corresponding author: CAI Zhong-min
E-mail address: cai_zhongmin@126.com
Telephone: 0351-6010560