

文章编号: 1001-1455(2006)05-0452-04

# 负压爆炸载荷和数据采集间隔对弹性开孔板 动应力集中的影响\*

蔡中民<sup>1</sup>, 徐文龄<sup>2</sup>, 梁卫民<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学基建规划处, 山西 太原 030024)

**摘要:** 基于 ANSYS 7.0/LS-DYNA 程序, 对 3 m×3 m 四边简支, 厚度 0.025 m, 中心开有 0.3 m×0.3 m 方孔的弹性板, 在正压和负压三角爆炸载荷作用下的应力响应进行了分析, 利用能量密度时间分布函数 (TDFED) 确定了动应力集中因子, 并给出其计算步骤。计算结果表明计算总时间和数据采集时间间隔对动应力集中因子影响较大, 而负压荷载影响较小。

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

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

## 1 引 言

以梁、板、壳为主的防爆结构物通常具有各种不连续区域, 在不连续区域出现应力集中是必然的, 设计者必须关心怎样确定动应力集中因子。K. Shanker<sup>[1]</sup>用统计能量分析 (SEA—statistical energy analysis), 得到在给定耦合和任意激励下与结构相关的均方振动能, 揭示了空间平均能或应力和应变速度间的关系, 给出动应力集中因子的定义: 单位输入功率引起角点或夹具边的 RMS (range mean stress) 值与单位输入功率引起平板的 RMS 值之比。A. William 等<sup>[2]</sup>研究了具有轴向支撑的几何不连续结构在动力荷载下的计算模型、仿真和分析, 用 FEA (finite element analysis) 法对具有局部椭圆不连续的一维杆进行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。建议用冲击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的比值定义动应力集中因子  $K_d$ ,  $K_d$  是冲击后的时间函数, 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, 对椭圆孔,  $K_d$  可比  $K_s$  (静应力集中因子) 大, 也可比  $K_s$  小, 且依赖于时间。文献<sup>[3]</sup>指出核爆炸引起的冲击波现象中, 由于空气被吸入造成部分真空状态——即负压, 而峰值负压很少超过 34 kPa, 且一般都远小于正压阶段中的峰值动压和峰值超压, 因而, 在大多数的工程实践中, 负压不是确定结构特性的关键因素。蔡中民等<sup>[4]</sup>对在正压横向三角形爆炸载荷下中心开有圆孔的正方形板进行有限元分析, 用孔口边处等效应力的响应谱与无孔板对应点的响应谱之比值定义  $K_d$ , 得出与文献<sup>[2]</sup>相同的定性结论。蔡中民等<sup>[5]</sup>对厚 0.25 m、中心开有正方形孔的正方形板, 在与文献<sup>[4]</sup>相同的爆炸荷载下, 基于 ANSYS 5.7/LS-DYNA 壳单元计算不连续点和无孔板对应点的主应力, 然后根据能量密度时间分布函数 (TDFED—time-distributive function of energy density) 计算不连续点和对应点的函数值, 把前两者比值的最大值定义为  $K_d$ 。文献<sup>[4~5]</sup>本构关系采用的是等向强化弹粘塑性模型, TDFED 是有界的, 如果本构关系采用线弹性模型, 则上述函数是无界的, 于是, 利用 TDFED 确定弹性板的  $K_d$  是否可用, 是必须考虑的问题。

本文中, 利用 ANSYS 7.0/LS-DYNA 壳单元和 TDFED, 对厚 0.025 m、中心开有正方形孔的四边简支正方形弹性板, 在横向正压和负压三角爆炸荷载作用下的  $K_d$  进行了分析, 比较了数据采集时间间隔  $\Delta\tau$  和负压爆炸荷载对  $K_d$  的影响, 建议了  $K_d$  的计算步骤。计算结果表明 TDFED 适用于确定弹性板的动应力集中因子; 计算总时间和数据采集时间间隔对  $K_d$  的影响较大, 而负压荷载影响较小。

\* 收稿日期: 2005-07-25; 修回日期: 2005-10-08

作者简介: 蔡中民(1942—), 男, 教授。

## 2 动应力集中因子计算步骤

(1) 建模:根据研究对象选取 ANSYS 程序中相关单元,自动生成网格,并自动选取计算时间步长。

(2) 确定计算总时间:如果是爆炸荷载,计算总时间初选荷载作用时间的 6 倍或更大,设定不同采集时间间隔  $\Delta\tau$ ,计算不同  $\Delta\tau$  时的不连续点等效应力的时程曲线,选取等效应力的峰值几乎不依赖于采集时间间隔  $\Delta\tau$  的曲线,把至少不小于其峰值所对应时间的 1.5 倍作为计算总时间,否则重新选取。

(3) 确定数据采集时间间隔  $\Delta\tau$ :对(2)选定的计算总时间所对应的等效应力曲线进行频谱分析,确定最大幅值所对应的频率,由于等效应力的频率是主应力频率的 2 倍,建议把它的最大幅值对应的周期(频率的倒数)的 1/3 作为最大的数据采集时间间隔  $\Delta\tau$ 。

(4) 根据 TDFED<sup>[5]</sup>

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

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

式中: $\sigma_{ij}$ 和 $\sigma_{ii}$ 为某点的应力张量和主应力。分别计算开孔板角点(不连续点)和无孔板对应点的  $E(t)$ 。

(5) 根据动应力集中因子的定义式<sup>[5]</sup>

$$K_d = \max K_d(t) = E_k(t) / E_w(t) \quad (2)$$

式中: $E_k(t)$ 、 $E_w(t)$  分别是开孔板角点和无孔板与之对应点的 TDFED。

## 3 算例

### 3.1 算例一

设有 3 m×3 m、厚 0.025 m、中间开有 0.3 m×0.3 m 方孔的四边简支弹性板,弹性模量  $E=210$  GPa、泊松比为 0.25、密度为 7.8 t/m<sup>3</sup>,横向爆炸荷载正压峰值压力 1.2 MPa、作用时间 12 ms,负压分为两种形式,总作用时间分别为 15、24 ms(见图 1)。采用 ANSYS 7.0/LS-DYNA 壳单元,有孔板网格单元 1 260 个,节点数 1 336 个,无孔板网格单元 841 个,节点数 900 个,最大尺度 10 cm。时间步长

$\Delta\tau$  由计算机根据设定的网格单元自动选取:有孔板为 3.93  $\mu$ s,无孔板为 0.174  $\mu$ s。

为了讨论计算总时间和数据采集时间间隔  $\Delta\tau$  对  $K_d$  的影响,首先对上述横向正压爆炸荷载(无负压)作用下的板进行分析,计算总时间  $t_s$ ,采用 0.1 s 和 15 ms,它们分别是荷载作用时间的 8.3 和 1.25 倍。 $\Delta\tau$  分别取 2,1,0.5,0.25,0.16,0.125 ms 和 0.3,0.15,0.075,0.037 5,0.025,0.018 75 ms;当  $t_s=0.1$  s 时,不同  $\Delta\tau$  的等效应力的时程曲线和频谱所对应的峰值,见表 1 和表 2。

由表 1 看出,开孔板角点与无孔板对应点等效应力峰值在  $\Delta\tau \leq 0.25$  ms 时保持不变,当  $\Delta\tau > 0.25$  ms 时,相对误差在 5.5%~5.9%,对应时间均为 0.05 s,按步骤 2 建议的  $t_s$  应为 0.072 s,选用 0.1 s 是合适的。当计算总时间选用  $t_s=15$  ms, $\Delta\tau=0.15$  ms 时,开孔板角点和无孔板对应点等效应力峰值及对应时间分别为 1.8 GPa,7.3 ms 和 0.65 GPa,7 ms,远未达到 0.1 s 时的最大峰值应力,因此舍去。

由表 2 看出, $\Delta\tau$  对有孔板角点和无孔板对应点的频谱峰值影响很大, $\Delta\tau$  由 2 ms 变化到 0.25 ms,有孔板角点的峰值扩大了 3.3 倍,无孔板扩大了 1.26 倍,但  $\Delta\tau \leq 0.25$  ms 时,几乎都保持不变;对有孔板角点频率也有较大影响, $\Delta\tau$  减小到 0.25 ms 时,频谱峰值所对应的频率基本保持在 110 Hz,对无孔板的对应点的频率几乎没有影响。 $\Delta\tau$  对  $K_d$  的值影响较大,当  $\Delta\tau$  由 2 ms 变化到 0.25 ms 时, $K_d$  由 3.81 增加到 4.16,其相对误差在 8.4%之内,当  $\Delta\tau \leq 0.25$  ms 时, $K_d=4.16$  几乎保持不变。

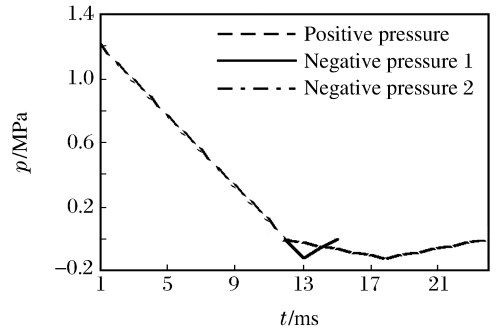


图 1 爆炸荷载

Fig.1 Explosive loading

表1  $t_s=0.1$  s, 不同  $\Delta\tau$  的等效应力峰值  $\sigma_{\max}$ 

Table 1 The peak values of equivalent stress

 $\sigma_{\max}$  for various  $\Delta\tau$  at  $t_s=0.1$  s

$\Delta\tau/\text{ms}$	$\sigma_{\max}/\text{GPa}$	
	开孔	无孔
2	2.600	1.270
1	2.600	1.270
0.5	2.650	1.270
0.25	2.750	1.350
0.16	2.750	1.350
0.125	2.750	1.350

表2  $t_s=0.1$  s, 不同  $\Delta\tau$  的等效应力峰值  $\sigma_{\max}$  及频谱和  $K_d$  及对应时间Table 2 The spectra of equivalent stress and the peak values  $\sigma_{\max}$  ofequivalent stress, and the times, and  $K_d$  for various  $\Delta\tau$  at  $t_s=0.1$  s

$\Delta\tau/\text{ms}$	开孔板		无孔板		$K_d$ 及对应时间	
	$\nu/\text{Hz}$	$\sigma_{\max}/\text{GPa}$	$\nu/\text{Hz}$	$\sigma_{\max}/\text{GPa}$	$K_d$	$t/\text{ms}$
2	130	4.71	120	6.71	3.81	8
1	100	5.22	120	7.93	4.09	9
0.5	180	8.45	120	8.22	4.11	8
0.25	110	15.60	120	8.30	4.16	8
0.16	110	15.60	120	8.32	4.17	9
0.125	110	15.60	120	8.32	4.16	8

### 3.2 算例二

算例二的模型与算例一相同,不同的是施加了正压和负压爆炸载荷,正压作用时间仍为 12 ms,负压载荷分为两种,峰值均为  $-0.12$  MPa,分别对应荷载作用时间为 1.32 ms 和 16 ms,两种负压载荷作用总时间分别为  $t_n=15, 24$  ms。计算总时间采用了  $t_s=0.1, 2$  s,它们分别是荷载作用时间的 6.67、4.44 和 133.3、83.3 倍,所对应的  $\Delta\tau$  由程序自动选取,即分别为 1、20 ms。开孔板角点与无孔板对应点等效应力和其频谱的计算结果见表 3。

表3 不同负压时等效应力峰值和其频谱及对应时间

Table 3 The equivalent stress, its spectra and corresponding time under various negative pressures

$t_s/\text{s}$	$\Delta\tau/\text{ms}$	有孔				无孔					
		$t_n=15$ ms		$t_n=24$ ms		$t_n=15$ ms		$t_n=24$ ms		$t_n=15$ ms	
		$\sigma_{\max}/\text{GPa}$	$t/\text{s}$	$\sigma_{\max}/\text{GPa}$	$t/\text{s}$	$\sigma_{\max}/\text{GPa}$	$\nu/\text{Hz}$	$\sigma_{\max}/\text{GPa}$	$\sigma_{\max}/\text{GPa}$	$\sigma_{\max}/\text{GPa}$	$\nu/\text{Hz}$
0.1	1	2.65	0.05	2.35	0.034	19.3	155	1.47	1.26	9.1	120
2	20	2.06	0.4	1.6	0.21	0.72	10	1.67	1.4	3.2	17

由表 3 可以明显地看出一个似乎非常矛盾的问题,即在荷载作用时间为 15、24 ms 时,当选用  $t_s=2$  s、 $\Delta\tau=20$  ms,则有孔板等效应力的峰值和对应时间分别为 2.06 GPa、0.4 s, 1.6 GPa、0.21 s,而当  $t_s=0.1$  s、 $\Delta\tau=1$  ms,则为 2.65 GPa、0.05 s, 2.35 GPa、0.034 s。也就是说,不同的计算总时间  $t_s$  和  $\Delta\tau$ ,使同一问题的等效应力峰值和对应时间产生了较大偏差,而且小的  $t_s$ 、 $\Delta\tau$  对应的峰值大,出现的时间早。该现象出现的原因,涉及到计算机采集数据的方法以及  $t_s$  的滤波作用。在作用时间为 15 ms 下,当采用  $t_s=2$  s、 $\Delta\tau=20$  ms 时,无孔板频谱的峰值、频率比有孔板的高;但是,当采用  $t_s=0.1$  s、 $\Delta\tau=1$  ms 时,无孔板却比有孔板低。

表4 正压和不同负压在不同  $t_s$  时的  $K_d$  的值及对应时间Table 4 The values of  $K_d$  and corresponding time under negative and positive pressures

$t_s/\text{s}$	负压时间 $t_n=15$ ms		负压时间 $t_n=24$ ms		正压时间 $t_p=12$ ms	
	$K_d$	$t/\text{s}$	$K_d$	$t/\text{s}$	$K_d$	$t/\text{s}$
2	0.08	4.94	0.1	4.49	0.08	4.62
0.1	0.009	4.1	0.009	4.1	0.005	4.1

由表 4 可以看出,当正压和负压荷载的峰压值相同,仅负压作用时间不同,即 15 ms 和 24 ms 时,  $K_d$  随负相作用时间的增加而减小;当  $t_s=0.1$  s、 $\Delta\tau=1$  ms 时,对于 15 ms 和 24 ms 的两种情况,  $K_d$  几乎没有变化且等于 4.1,而且与正压相同;若为了确定  $K_d$ ,上述两种  $\Delta\tau$  对于两种负相荷载,其  $K_d$  相对误差在 9%~17%之间,这个误差范围在工程中往往是可以接受的,因此可以简化计算步骤。

## 4 结论

(1) 所建议的确定横向爆炸载荷下开孔板的动应力集中因子的计算步骤,由算例一说明了它对工程设计是适用的,而且方便易操作,如果具有试验资料支持,则可省去确定计算总时间的麻烦。

(2) 计算时间步长由计算机根据网格划分的自动设定已足以满足工程要求, 数据采集时间间隔对  $K_d$  有较大影响, 但选取一个非常合适的  $\Delta\tau$  也非易事, 或者说是不可可能的, 因为数值计算本身就是一种近似方法。按本文中所建议的方法, 可以使  $K_d$  的误差控制在一定的范围内。

(3) 对于弹性结构来说, TDFED 适于确定  $K_d$ , 但必须在得到一定试验检验后, 方可在工程中应用; 这是因为结构中的角点或不连续点是数学中的奇点, 该点的应力响应是无穷的, 在有限单元法中只是把这个奇点作为一个网格区域处理, 因此应力响应值对该点的网格大小更为敏感, 奢望提出一个既理想又简单的方法看来是不可能的, 只能以计算机模拟和试验相结合的经验方法来解决该类工程问题。

(4) 负压在正压 10% 的范围内, 动应力集中因子与单独正压作用时的因子几乎相同, 因此在计算动应力集中因子时, 可以忽略负相的作用, 与文献[3]的结论相符。

## 参考文献:

- [1] Shankar K. A study of the dynamic stress concentration factor of a flat plate for sea applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 217(1): 97-111.
- [2] William A, Nader Z, Water N, 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] Robert E Crawford, Cornelius J Higgins, Edward H Bultmana Civil. The Air Force Manul for Design and Analysis of Hardened Structures[M]. Albuquerque, New Mexico: Nuclear Systems Corporation, 1974.
- [4] 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[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23 增刊: 161-162.
- [5] 蔡中民, 高经武, 张兵, 等. 横向爆炸载荷下开孔板的动应力集中因子[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(2): 112-118.  
CAI Zhong-min, GAO Jing-Wu, ZHANG Bing, et al. Stress concentration factor of a plate with hole subjected to transverse explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2): 112-118.

## Dynamic stress concentration factor of an elastic plate with a hole subjected to negative transverse explosive loading

CAI Zhong-min<sup>1\*</sup>, XU Wen-ling<sup>2</sup>, LIANH Wei-min<sup>1</sup>

(1. Institute of Applied Mechanics,

Taiyuan University of technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. Infrastructure department, Taiyuan University of Technology,

Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** Based on ANSYS 7.0/LS-DYNA, an analysis is performed of the stress response of a simply-supported plate (3 m×3 m), with a hole (0.3 m×0.3 m), subjected to positive and negative triangularly-distributed pressures. The dynamic stress concentration factor is determined by using time-distributive function of energy density, and the corresponding procedure is provided. It is shown from the result of calculation that the calculation time and the data-collecting time interval have great effects on the factor, but the negative pressure has an insignificant effect on it.

**Key words:** mechanics of explosion; dynamic stress concentration factor; time-distributive function of energy density; triangularly-distributed explosive load; plate with a hole; negative pressure

\* Corresponding author: CAI Zhong-min

E-mail address: cai\_zhongmin@126.com

Telephone: 0351-6010560