

文章编号: 1001-1455(2003)05-0420-05

# 冲击载荷作用下弹塑性板的反常动力响应研究<sup>\*</sup>

吴桂英, 秦冬祺, 杨桂通

(太原理工大学工程力学系, 山西 太原 030024)

摘要: 对弹塑性方板在横向脉冲载荷作用下动力响应的反直观行为进行了数值模拟及分析, 给出了产生反直观行为的载荷范围和对相关问题的探讨。详细的分析发现, 随着脉冲强度的增加, 在几个窄的载荷区域, 板的响应是反直观的, 而且在此附近, 结构参数、载荷等因素的微小改变将导致响应模式的很大差异, 表明反直观行为对这些参数的敏感性。进一步的计算表明, 这一特殊的动力行为主要与板的内力间的相互耦合作用密切相关, 同时, 卸载后的结构反弹到另一侧时发生较大的反向塑性变形, 导致能量的进一步耗散, 使板呈现反常的动力响应, 这一现象是几何与材料两种非线性相互作用的结果。

关键词: 固体力学; 反直观行为; 脉冲载荷; 弹塑性板; 数值分析

中图分类号: O347 国标学科代码: 130·1515 文献标志码: A

## 1 引 言

P. S. Symonds 等<sup>[1]</sup>最早在研究冲击载荷作用下两端铰支梁的动力响应时发现了反直观行为, 即最终位移方向与脉冲载荷方向相反, 这一发现引起了世界范围的极大关注, 引发了这方面文章的出现, 无论从理论上还是实验上有关梁反直观行为的研究随之展开。F. genna 等<sup>[2]</sup>用单自由度 Shanley 梁模型讨论梁的厚度及阻尼对反直观行为的影响, 分析表明阻尼和结构参数非常小的扰动可导致响应模式及最终位移的显著变化。G. Borino 等<sup>[3]</sup>从能量的观点对 Shanley 梁模型进行了分析, 揭示了反直观行为是一种实际存在的现象。席丰等<sup>[4]</sup>用最小加速度原理分析了 Shanley 梁模型响应各阶段位移、内力等的变化和分布规律, 进一步表明反直观行为是材料和几何两种非线性相互耦合, 共同作用的结果。J. Y. Lee 等<sup>[5]</sup>用二自由度的 Shanley 梁模型分析了梁的响应极大地依赖于初始条件、各种参数等因素。Q. M. Li 等<sup>[6]</sup>、H. Koisky 等<sup>[7]</sup>分别对夹支梁进行了冲击实验, 从实验中揭示了梁动力响应的反直观行为的客观性。

关于圆板中的反直观动力行为, Sh. U. Galiev<sup>[8]</sup>、A. Bassi 等<sup>[9]</sup>分别采用差分法与 Galerkin 近似方法进行了分析, 并与 ABAQUS 得到的有限元数值结果进行了比较, 讨论了自由度的选择对分析结果的影响。Sh. U. Galiev<sup>[10]</sup>通过释放三硝基甲苯在对圆板进行强度实验时发现了圆板中反直观行为的存在性, 但没有记录下更多详细的资料。

方板中是否存在反直观现象尚未见到报道。本文中, 对弹塑性方板在横向脉冲载荷作用下的反常动力行为进行了分析。随着脉冲载荷强度的增大, 板的响应由弹性过渡为弹塑性行为, 而且存在几个窄的载荷区域使板呈现反直观现象, 发现了板中存在动力响应的不稳定区域, 及该区内呈现的反直观行为的特征。

## 2 数值分析

考虑周边铰支的方板, 边长  $l=200$  mm, 板厚  $h=2$  mm (图 1(a))。承受横向向上的均布脉冲载荷 (图 1(b)), 载荷作用时间  $t_0=0.5$  ms, 材料弹性模量  $E=80$  GN/m<sup>2</sup>, 密度  $\rho=2.7 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, 泊松比

\* 收稿日期: 2002-05-08; 修回日期: 2003-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(10172063)

作者简介: 吴桂英(1962—), 女, 硕士, 教授。

$\mu=0.3$ , 屈服极限  $\sigma_0=0.3 \text{ GN/m}^2$  (图 1(c))。

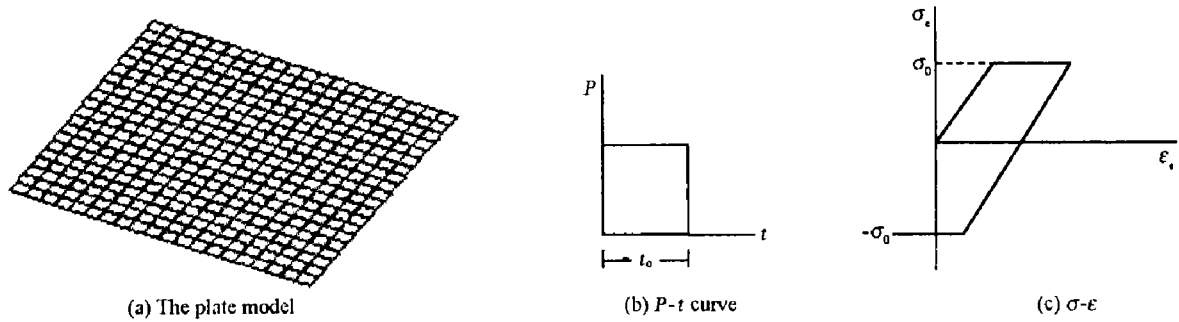


图 1 板模型及其载荷-时间曲线和应力-应变曲线

Fig.1 The plate model, loading curve and stress-strain

设板内任一点的应变相对于 1 很小, 即  $\epsilon_{ij} \ll 1$ 。用非线性有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 对上述方板进行数值分析。我们采用四边形等参薄壳单元将上述方板离散化为 400 个单元(图 1(a))。以薄壳中面(参考面)上四个节点和薄壳厚度定义单元的形状, 并用双线性形函数插值, 为防止零能摸态, 采用沙漏阻尼, 沿厚度取三个积分点, 考虑剪应变沿厚度方向非均匀分布, 引入校正系数  $k=6/5$ 。

### 2.1 载荷的不稳定域

随着脉冲载荷大小的变化, 板的响应由初始的弹性响应过渡到弹塑性响应, 由板中点最终挠度作为载荷强度的函数所画出的响应全过程的特征图(图 2)可知, 在整个响应过程中, 每个节点所受载荷范围 41.8 ~ 67.7 N, 是响应的不稳定区域。共有 6 个窄槽, 即六个窄的载荷范围内响应是反直观的。这 6 个载荷区域分别为: 41.8 ~ 41.91, 45.1 ~ 45.202, 53.8996678 ~ 53.90004, 57.898 ~ 57.9428, 62.88 ~ 64.321, 66.4 ~ 67.6 N。图 3 是第一个窄槽的局部放大图, 可见在这个载荷范围内, 载荷发生微小的变化, 引起最终响应的不规则上下跳跃, 而且载荷变化愈小, 在这个窄槽里将会出现更多的窄缝, 表现出响应的不可预测性。图 4 给出  $P=41.8 \text{ N}$  时板在几个典型时刻整体的变形过程。

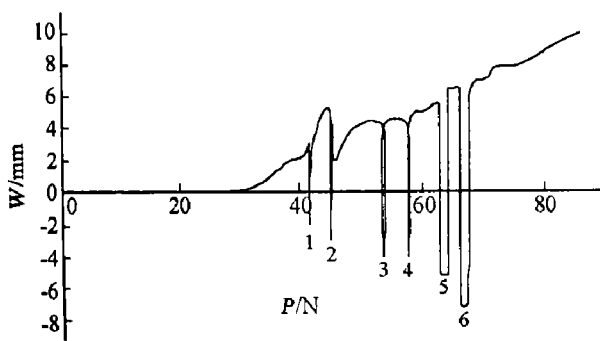


图 2 板中点挠度与载荷的特征图

Fig.2 Characteristic diagram of mid-point deflection -loading

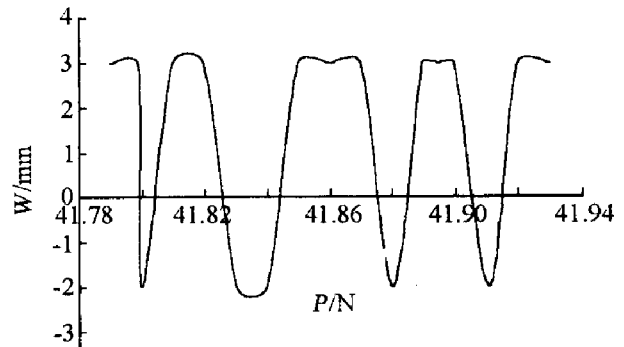


图 3 第一个窄槽的局部放大图

Fig.3 First slot central portion to enlarged scale for  $P=41.8 \sim 41.92 \text{ N}$

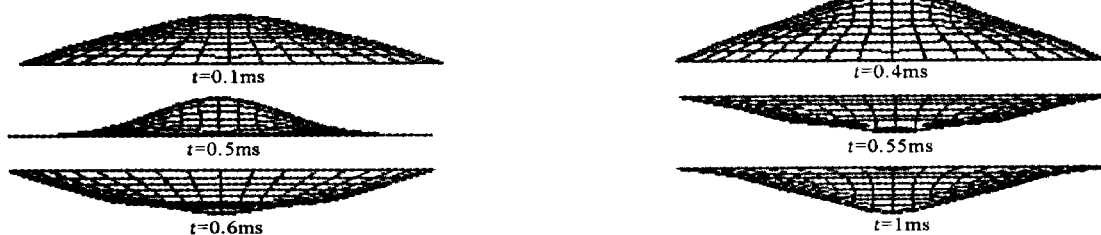


图 4 板整体变形图

Fig.3 Deformation process of plate

### 2.2 塑性变形的影响

在动载荷作用下板发生弹塑性响应时,板内的塑性变形随冲击载荷的增加而增加,首先加载阶段要产生适当的塑性变形,而卸载后,一部分将出现恢复运动,是否产生强烈恢复运动,导致反向的进一步塑性变形,出现反直观现象,这将取决于各种参数的变化。图 5 给出节点载荷分别为  $P=53.9\text{ N}$  (图 5 (a)) 和  $P=56\text{ N}$  (图 5 (b)) 时板中点等效塑性应变的时程曲线,曲线 1, 2, 3 分别对应板沿厚度上层、中面和下层的等效塑性应变。数值计算表明,当板正常响应时(图 5 (b)),卸载后板不再产生进一步的塑性变形,在加载方向做弹性振动;而当响应是反常时(图 5 (a)),卸载后板反弹到相反方向,产生进一步较大的塑性变形,且加载时塑性变形较小的板下层一跃成为最大的塑性变形,导致能量的再次耗散,使板停留在与载荷相反的方向,即出现反直观动力行为。

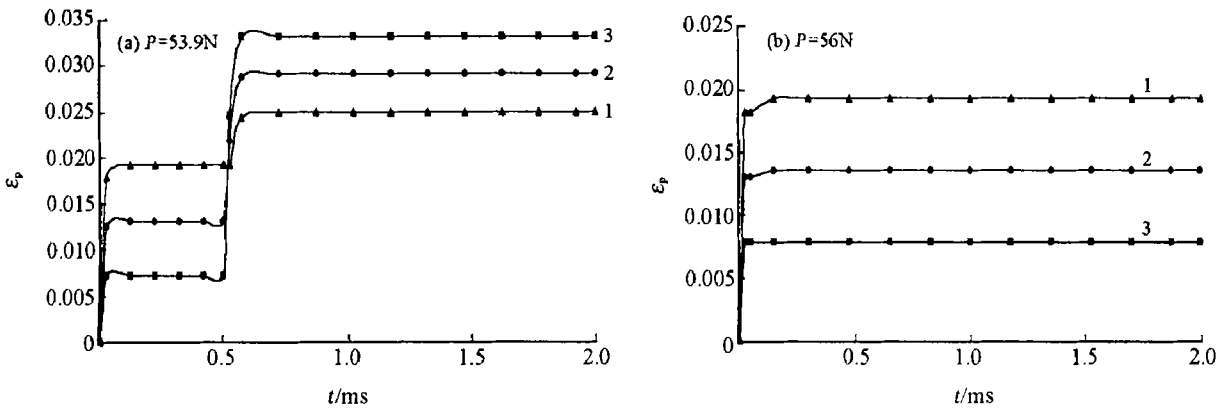


图 5 板中点等效塑性应变时程曲线

Fig. 5 Equivalent plastic strain-time curve of the plate Mid-point

### 2.3 动态内力耦合效应

在非线性动力响应中,由于系统的动力特性在响应过程中随时间在变化,当然系统的自振周期也是变化的。其系统的响应位移和内力的振动周期也随时在变化。板在变形的过程中,板内弯矩与中面力间有着耦合作用。当卸载的瞬时,若相关内力的振动周期相近或相同时,它们相互耦合,将使各内力剧增,有可能使反直观行为发生。图 6 是板内中点典型的两条量纲一中面力与弯矩的时程曲线,图中  $M_0 = \sigma_0 h/4, N_0 = \sigma_0 h$ 。图 6 (a) 是  $P=53.9\text{ N}$ , 板呈现反直观动力响应的内力时程曲线;图 6 (b) 是  $P=56\text{ N}$  正常响应的内力时程曲线。只有当中面力为压力而弯矩为正时,瞬时的耦合作用才使中面力和弯矩各自向负、正方向剧增,从而出现反常动力行为。而当其中面力不全在压力范围内变化时,则不会出现反直观现象。

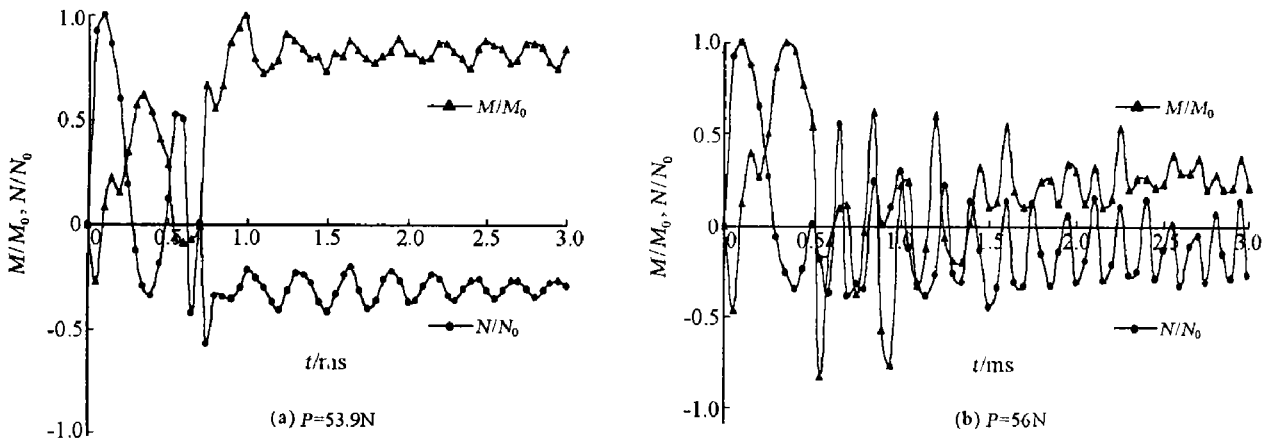


图 6 圆板中点量纲一弯矩与中面力时程曲线

Fig. 6 Non-dimensions bending moment and axial force vs. time curve of the plate mid-point

## 2.4 板厚度、约束的影响

板的动力响应行为受到各种因素的影响,在反直观行为域附近,当载荷与其它条件不变的情况下,板的厚度对其动力响应有很大的影响。表1给出当板厚度  $h=1\sim 2.5$  mm 变化时的几个代表值,  $P_0$  是第一个出现反直观行为时的载荷值;  $n$  是响应全过程中,出现反直观行为的载荷范围的个数。分析计算表明,当板的厚度增加时,出现反直观动力响应的载荷值增大,而相应的反直观行为的窄槽个数在减少。当厚度增加到一定值时将不会出现反常动力行为,在这种情形下,塑性变形把初始的平板转换成拱顶,再没有足够的能量使板进一步发生跳跃类的不稳定现象。

对于板厚度  $h=2$  m 时,改变板的约束情况,直接影响着板的动力响应,当板的边界约束分别为对边铰支,对边固定但放开一个转动约束和四边铰支时,第一次出现反直观行为的载荷值分别为  $P=30, 36, 41.8$  N,可见随边界约束的增强,发生反直观行为所需的载荷值增大。

表1 板厚度对反直观动力响应的影响

Table 1 Effect of depth to anomalous response

$h/\text{mm}$	$P_0/\text{N}$	$n$
1.0	24.0	9
1.2	25.0	9
1.5	31.0	7
2.0	41.8	6

## 3 结 论

(1) 从有限元数值分析结果看到板的弹塑性动力响应是相当复杂的过程,而反直观行为更是受各种因素的影响。卸载后结构的恢复运动,很强烈地取决于最大变形处的塑性应变场及峰值位移与恢复运动的最小位移值。数值计算表明,只有当板首先经历适当的塑性变形且卸载后由于弹性效应,板产生反向变形,能量进一步耗散,使板产生反常动力响应。

(2) 在响应的过程中,板内弯曲与拉压这两种内力间有着动态耦合作用,只有当中面力成为压力,而弯矩达到一定的峰值时可使板呈现反常动力行为。

(3) 在动力响应不稳定区域附近,载荷、结构参数、边界条件等因素的微小改变,将导致完全不同的响应模式,表现出对各种参数的极其敏感性。板的厚度增加或边界约束加强时发生反直观行为的载荷值增大,不稳定区域内窄槽个数减少。当厚度增加到一定值时将不会出现反常动力行为。

(4) 通过对不稳定区域内窄槽的精细计算后,发现弹塑性板的动力响应对外载荷极具敏感性。

## 参考文献:

- [1] Symonds P S, YU Tong-xi. Counterintuitive behavior in a problem of elastic-plastic beam dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1989, 52: 517—522.
- [2] Genna F, Symonds P S. Dynamic plastic instabilities in response to short-pulse excitation; effects of slenderness ratio and damping[A]. Proceedings of Royal Society of London[C]. London: Printed in Great Britain, A417, 1988.
- [3] Borino G, Perego U, Symonds P S. An energy approach to anomalous damped elastic-plastic response to short pulse loading[J]. Journal of Applied Mechanics, 1991, 56: 430—438.
- [4] 席丰, 杨嘉林, 黎在良. 再访结构弹塑性动力响应的异常行为[J]. 固体力学学报, 1999, 20(2): 113—122.  
XI Feng, YANG Jia-lin, LI Zhai-liang. Anomalous behavior revisited: dynamic response of elastic-plastic structures[J]. ACTA Mechanica Solida Sinica, 1999, 20(2): 113—122.
- [5] Lee J Y, Symonds P S, Borino G. Chaotic response of a two-degree-of-freedom elastic-plastic beam model to short pulse loading[J]. Journal of Applied Mechanics, 1992, 59: 711—721.
- [6] LI Qing-ming, ZHAO Long-mao, YANG Gui-tong. Experimental results on the counter-intuitive behavior of thin clamped beams subjected to projectile impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 1991, 11: 341—348.
- [7] Koisisky H, Rush P, Symonds P S. Some experimental observation of anomalous response of fully clamped beams[J]. International Journal of Impact Engineering, 1991, 11: 445—456.
- [8] Galiev Sh U. Distinctive features of counter-intuitive behavior of plates and shells after removal of impulse load[J]. In-

- ternational Journal of Impact Engineering, 1997, 19: 175—187.
- [ 9 ] Bassi A, Genna F, Symonds P S. Anomalous elastic-plastic response to short pulse loading of circular plates[ J] . International Journal of Impact Engineering, 2002, 28: 65—91.
- [ 10 ] GALIEV Sh U. Experimental observation and discussion of counterintuitive behavior of plates and shallow shells subjected to blast loading[ J] . International Journal of Impact Engineering, 1996, 18: 783—802.
- [ 11 ] WU Gui-ying, ZHANG Nian-mei, YANG Gui-tong. The research anomalous response on elasto-plastic plate with large deformation[ A] . QIAN Wei-chang. The 4th International Conference on Nonlinear Mechanics[ C] . 上海: 上海大学出版社, 2002: 508—511.

## A study on anomalous response of elasto-plastic plates under impulsive loading

WU Gui-ying<sup>\*</sup>, QIN Dong-qi, YANG Gui-tong  
( *Department of Mechanics, Taiyuan University of  
Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China* )

**Abstract:** Anomalous response of elasto-plastic square plate subjected to short transverse pulse loading is studied in this paper. The loading ranges have been found in which counter-intuitive behavior occurs, and related problems have been studied. It is found by detailed numerical analyses that there exists anomalous response in some narrow loading ranges, so called slots. In the vicinity of slots, a small variation of loads and structural parameters, etc, can lead to much different dynamic behavior, which shows the sensitivity of the anomalous behavior with respect to those factors. By further calculations it is shown that this unusual dynamic behavior is related to the coupling effect of internal forces and the large reverse plastic deformation following unloading. This phenomenon is the result of the coupling of the geometry nonlinearity, material nonlinearity, elastic effects and the irreversible plastic deformation.

**Key words:** solid mechanics; anomalous response; numerical analyses; elasto-plastic plate; pulse loading

---

\* Corresponding author: WU Gui-ying      E-mail address: haoruiqing@163.com; Telephone: 0351-6014805