

文章编号: 1001-1455(2006)02-0121-04

圆板动力反直观行为实验研究^{*}

吴桂英, 赵勇刚, 赵隆茂, 杨桂通

(太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 对受子弹正向撞击的铝合金圆板进行了动力反直观行为的实验研究。描述了不同撞击速度下板的响应模式, 发现了圆板中的反直观现象, 即板的最终变形与子弹撞击方向相反, 并记录了板在整个变形过程中典型点的位移历史曲线, 进一步证实了结构动力响应的反直观行为是一种客观存在的弹塑性动力行为。

关键词: 固体力学; 反直观行为; 撞击; 弹塑性圆板; 响应模式

中图分类号: O347 **国标学科代码:** 130 · 1515 **文献标志码:** A

1 引言

反直观动力响应问题自从 20 世纪 80 年代被 P. S. Symonds 等首先在受脉冲载荷作用的两端不可移梁中发现以来, 愈来愈多的科技人员给予了极大的关注, 并进行这方面的研究, 已取得了一定的研究成果^[1~7], 其中以数值模拟占多数, 而实验研究成果却很少。1977 年 M. A. Lavrentiev 等对不同厚度的铁、铜、铝进行了动力响应实验, 将板盖在一个存满水的圆形蓄水池上, 在蓄水池中进行不同动力的爆炸, 板通常其最终变形指向蓄水池外(即与爆炸力的方向相同), 在一系列的实验中, 出现了反常的结果, 当爆炸力增大到足够大时, 板的变形指向了蓄水池内部, 反直观现象被注意到, 但没有充分理解, 并且也没有进一步的理论解释。1977 年 C. A. Ross 等^[8]描述了铝板和梁受空气爆炸载荷作用的实验, 并表明一个梁模型的最终形状具有反常变形, 注意了屈曲构形但没有报导对这一现象进一步的实验和分析。1983 年 B. J. Mazyrovskii 等报导了反直观现象有时发生在水中电子释放的金属板中, 所用材料是铝合金和可塑性钢制成的圆板, 板厚度从 1 mm 至 3 mm 变化, 半径从 150 mm 至 500 mm 变化, 电子释放在距板 100 mm 到 200 mm 远, 本文中给出了板的反常行为照片, 这些照片没有相应的理论解释。1984 年 J. R. Moessner 报导了对两端固支钢梁, 在爆炸压力下的实验, 并且发现一例反常变形, 约 1 mm, 梁的跨长 200 mm。1991 年 Q. M. Li 等^[9]给出了两端固定的梁在中点受子弹冲击时反常行为的实验结果, 结果表明薄梁中点的最终变形可与冲击方向相反。一组 38 个试件, 其中 4 个是反常的, 产生反常行为的子弹速度范围是 35~55 m/s。1991 年 H. Kolsky 等^[10]用把梁先推到初始的变形, 然后突然释放来模拟冲击实验的方法, 36 个试件中, 有 2 个出现了反常行为, 文献^[11]报导了通过释放三硝基甲苯在做圆板的强度实验时观察到反直观现象, 但没有记录更多的信息。

本文中采用空气动力枪加载装置及光电位移传感器对铝合金圆板进行了冲击实验研究, 成功发现了圆板受子弹撞击时的反直观现象, 并记录了板在整个变形过程中典型点的位移历史曲线, 进一步说明在特定的条件下结构动力响应的反常行为是可能发生的。

2 圆板冲击实验

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 主要由加载系统、信号测量与分析系统组成。实验加载通过控制台控制内径

* 收稿日期: 2005-01-12; 修回日期: 2005-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(10172063); 山西省自然科学基金项目(20041004)

作者简介: 吴桂英(1962—), 女, 博士, 教授。

为 14.5 mm 的 KDQ-2 型空气动力枪,加压子弹以一定速度水平撞击试件。弹体是由钢质材料加工而成的圆柱体,其直径 14 mm,长 30 mm。圆板试件由 LY12 铝加工而成,通过夹具装在位于空气动力枪正前方约 200 mm 远的支架上。圆板直径 $D=300$ mm,板厚 1 mm,夹具采用 20 mm 厚钢板,将试件用直径 18 mm 的 8 个螺栓沿周边固定在支架上。

测量系统分为两部分。一是弹体的速度测量,当弹体扫过激光器时,通过红外线传感器及 TCCJ-2000 型瞬态记录仪记录其运行速度;二是圆板变形的测量,子弹撞击圆板的整个过程中,板上两个典型点即中点及约三分之一半径的点(见图 1 中 1、2 点)的位移历史通过光电位移传感器及瞬态数字式存储示波器记录并储存。本次实验记录时间 50 ms,共采样 2 500 个点。整个实验过程中采集的信号由磁盘输入计算机进行处理与分析。

2.2 实验结果

实验所采用的 LY12 铝的材料性能由 SUNSC-MT5105A 微机控制电子万能实验机及 YJW-8 型数字静态电阻应变仪测定。图 2 是材料的应力应变曲线。材料的屈服极限 $\sigma_0=165$ MPa,强度极限 $\sigma_b=207$ MPa,弹性模量 $E=79$ GPa,泊松比 $\mu=0.31$ 。

考虑到实验的难度,实验前,针对本次实验用材料模型,板直径为 300、200、400 mm 及三种厚度(1、2、3 mm)的圆板试件,用长为 30~50 mm,直径为 14 mm 的钢质圆柱体撞击圆板中点,分组进行了数值模拟,边界取周边简支及其他支承条件,基于大量的数值分析,发现当 $\varnothing 30$ mm 的子弹撞击直径 300 mm、厚度 1 mm 的板,子弹速度为 28~34 m/s 时,板发生反常的动力响应。

基于数值分析的结果,实验中作者发现,弹体速度不同,板表现出不同的响应模式。速度较低时,如图 3(a)记录的是子弹速度 $v=13.6$ m/s 时板中 1 点的位移历史曲线,可见是在初始构形附近的弹性振动;而当子弹速度足够大时,如 $v=34.8$ m/s,板经过加载及卸载过程后,停留在与加载方向(图 3 中向下的方向)相同的一侧做自由振动,图 3(b)所示为试件上 1、2 两点的位移历史曲线,这两种响应都属于正常的响应模式。

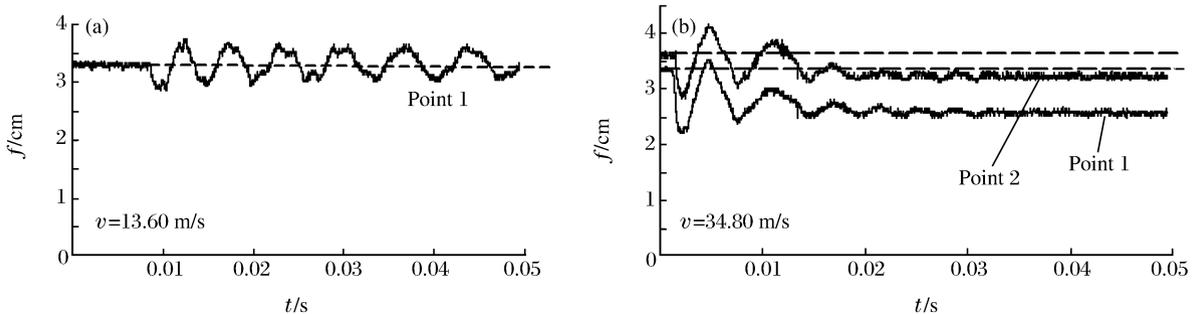


图 3 圆板中 1、2 点位移历史曲线

Fig. 3 Displacement history curves of 1 and 2 points in the circular plate

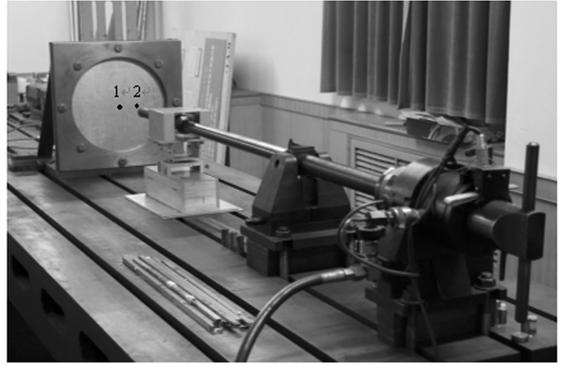


图 1 实验装置

Fig. 1 The experimental arrangement

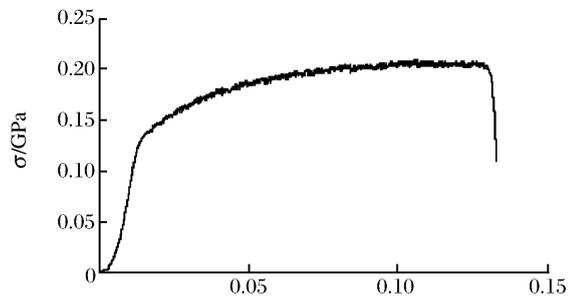


图 2 应力应变曲线

Fig. 2 The stress-strain curve

当子弹速度 $v=26.57 \text{ m/s}$ 时,圆板加载时中点位移峰值达到 $f_{\max}=8 \text{ mm}$,卸载后反弹的最小位移为 $f_{\min}=-6 \text{ mm}$,经过 $t\approx 9 \text{ ms}$ 的恢复阶段后,板最后停留在与加载方向相反的一侧做自由振动,振动的平衡位置为 $f=-1 \text{ mm}$ 。而第 2 点最后的平衡位置为 $f=-3 \text{ mm}$ 。由光学位移传感器与瞬态存储示波器记录的板中 1、2 两点的位移历史曲线如图 4 所示,可见此时反直观行为发生。实验结果与数值分析是吻合的。本次实验 20 个试件中,有 3 例发生反常的动力响应。

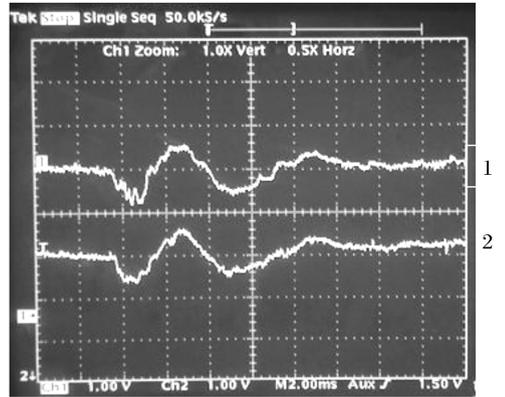


图 4 板中 1、2 点的反常动力响应

进一步的实验表明,子弹的速度对板的响应有显著影响,特别在动力不稳定区域附近,子弹撞击速度的微小改变将会导致完全不同的响应模式。图 5

Fig. 4 Anomalous responses of 1 and 2 points in the plate

记录的是 $v=25.50 \text{ m/s}$ 与 $v=25.25 \text{ m/s}$ 时板中点典型的两条位移历史曲线,可见 5 图(a)是反常响应,而 5 图(b)却是正常响应,子弹这一微小变化,在正常响应时,不会引起响应的明显差异。进一步说明,反直观行为对参数极其敏感。

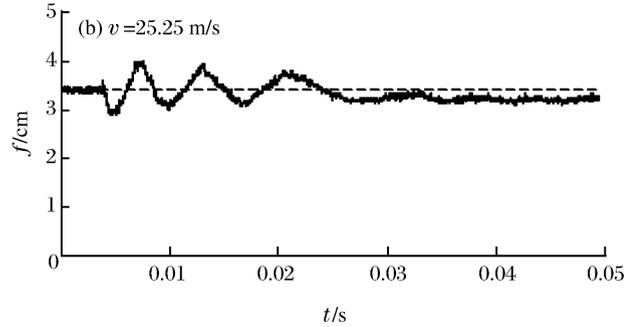
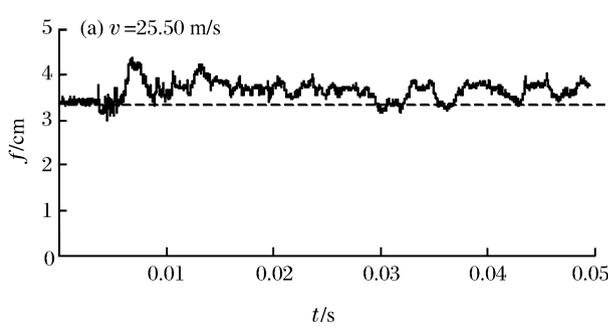


图 5 圆板中点位移历史曲线

Fig. 5 Displacement history curves of the mid-point in the circular plate

3 结 束 语

本文报导了圆板受子弹正向冲击时动力响应反直观行为的实验研究。发现了在其他条件不变时,随着子弹撞击速度的变化,圆板表现出不同的响应模式,撞击速度过大或过小都表现为正常的动力响应。当在某一特定的速度下,板表现出反常的动力行为,而且这一行为对撞击速度是极其敏感的,进一步说明动力反直观行为是难以捕捉的。

参考文献:

[1] Symonds P S, Yu T X. Counterintuitive behavior in a problem of elastic-plastic beam dynamics[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1985,52:517-522.

[2] Galiev S U. Distinctive features of counter-intuitive behavior of plates and shells after removal of impulse load[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19:175-187.

[3] WU Gui-ying, ZHANG Nian-mei, YANG Gui-tong. The research anomalous response on elasto-plastic plate with large deformation[A]. The 4th International Conference on Nonlinear Mechanics[C]. 上海:上海大学出版社,2002: 508-511.

[4] 吴桂英,秦冬祺,杨桂通. 冲击载荷作用下弹塑性板的反直观动力行为研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(5):420-424.

WU Gui-ying, QIN Dong-qi, YANG Gui-tong. A study on anomalous response of elasto-plastic plates under impul-

- sive loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003,23(5):420-424.
- [5] WU Gui-ying, LIU Wei, YANG Gui-tong. The anomalous response of elasto-plastic circular plates under impulsive loading[J]. *Journal of Shaihai Jiaotong University*, 2004,38:14-18.
- [6] 吴桂英, 秦冬祺, 杨桂通. 在冲击载荷作用下弹塑性圆板的反直观动力行为数值模拟[J]. *固体力学学报*, 2004,25(4):289-293.
- WU Gui-ying, QIN Dong-qi, YANG Gui-tong. The anomalous response of elasto-plastic circular lates under impulsive loading[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2004,25(4):289-293.
- [7] 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.
- [8] Ross C A, Strickland W S, Sierakowski R L. Response and failure of simple structural elements subjected to blast loading[J]. *Shock Vibration Digest*, 1977,9(12):15-16.
- [9] 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.
- [10] Koisky 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.
- [11] Galiev S 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.

Experimental investigation on dynamic anomalous response of circular plates

WU Gui-ying^{*}, ZHAO Yong-gang, ZHAO Long-mao, YANG Gui-tong
*(Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology,
 Taiyuan 030024, Shanxi, China)*

Abstract: Tests were performed to investigate the dynamic anomalous response of circular plates impacted by projectiles. Different response modes of the circular plates under different impact velocities have been described. Here exists anomalous response in the narrow velocity ranges. 'Anomalous' here means that the final deflection may be in the direction opposite that of the load. Displacement-history curves of the representative points in the circular plates were experimentally recorded. Experimental results confirm the objectivity of dynamic anomalous behavior and show that this behavior may happen under certain circumstances.

Key words: solid mechanics; anomalous response; impact; elasto-plastic plate; response mode

* Corresponding author: WU Gui-ying
 E-mail address: wgy2005112@163.com
 Telephone: 0351-6014805