DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0964-05

内部爆炸作用下钢箱结构变形规律性实验*

姚术健,张 舵,郑 监,卢芳云,于大鹏
(国防科学技术大学理学院,湖南 长沙 410073)

摘要:箱型结构内部爆炸能够造成比空爆更严重的破坏效果。本文中设计了 3 个边长 600 mm、板厚 4 mm 的实验试件,并分别用 98.4、194.7 和 355.8 g 的 TNT 炸药进行了内部爆炸实验,得到了所有试件的变形特征。箱体壁板的变形都呈现向外凸出(鼓起)的特点,壁板中心的最终挠度随着爆炸 TNT 当量的增大而近似成线性增长,拟合了箱体壁板挠厚比与爆炸当量之间的经验公式。通过三维数字图像相关技术,得到了箱体壁板的动态响应过程:爆炸发生后,壁板中心最先产生向外鼓起;壁板中心随后变形增长,同时变形向四周传播;壁板中心变形达到最大值后,板的变形会产生一定量的振荡回缩。

关键词:变形规律;数字图像相关;钢箱结构;内部爆炸
中图分类号:O383;TU511 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

钢箱结构广泛存在于大型钢箱梁桥及船体舱室结构中。由于箱体结构内壁面对爆炸冲击波的反射与约束作用,结构内部爆炸能够造成比空爆更严重的破坏[1],不同爆炸载荷会造成不同的破坏程度,因此有必要研究钢箱结构内部爆炸的破坏规律。

目前,有关钢板等构件的研究较多,而关于箱形结构内部爆炸的研究还很少。R. G. Teeling-Smith 等[2]对固支圆板在爆炸作用下的破坏模式进行了研究,指出在爆炸载荷下圆板存在塑性大变形、固支端拉伸撕裂及固支端的剪切失效等 3 种模式。M. D. Olson 等[3]、G. N. Nurick 等[4-7]对方形钢板在爆炸载荷下的失效模式进行了实验研究,指出还存在局部花瓣形破坏及冲碟破坏等破坏模式。蒋志刚等[8]对金属簿板及加筋板在冲击载荷作用下的破坏模式进行了较系统的总结。侯海量等[9]对典型舱室结构进行了舱内爆炸实验,研究了舱内爆炸下的冲击载荷及其作用过程,指出相同比例距离下内爆炸的荷载强度远高于空中爆炸。M. Kurki[10]通过数值模拟,对舰船结构在内爆作用下的破坏特征进行了研究。L. Ma 等[11]对内爆载荷下的压力容器进行了研究,并分析了它的延性和脆性破坏。C. Geretto 等[12]别对边长 200 mm 的方形固支板在无约束、部分约束及完全约束(箱体结构)内爆加载作用下的变形进行了一系列实验研究,研究了各自的变形规律,并分析了约束对板变形的影响。姚术健等[13-14]对箱内爆炸的冲击波传播规律及箱体的破坏模式,进行了数值模拟及实验研究。

本文中,对内爆作用下钢箱结构的变形规律进行实验研究,并利用三维数字图像相关技术,对动态响应过程进行监测与分析,拟为箱形结构内部爆炸的损伤评估及结构内爆的深入研究提供参考。

1 实 验

1.1 试件模型

为了研究钢箱结构在不同爆炸强度作用下结构的变形破坏程度,设计了 3 个钢箱结构实验模型。钢箱模型边长为 600 mm,为了约束箱体边缘的变形,设计了 120 mm 的延伸结构,模型设计如图 1 所示。为方便炸药的安放,在顶板的中心开 100 mm 直径孔。试件采用 4 mm 厚 Q235B 钢板焊接而成,焊缝为双面线焊以保证强度。

通过静态拉伸实验,测得 4 mm 厚 Q235B 钢板的屈服强度和拉伸强度分别为 360 和 480 MPa,伸

* **收稿日期**:2016-01-11;**修回日期**:2016-06-07
基金项目:国家自然科学基金项目(11132012)
第一作者:姚术健(1988—),男,博士研究生;**通信作者**:卢芳云,fangyunlu@126.com。

长率为 28%。为了保证试件在实验过程中不因振动而倾倒，将试件绑定在混凝土质量块上。加工完成后的试件及试件固定，如图 2 所示。

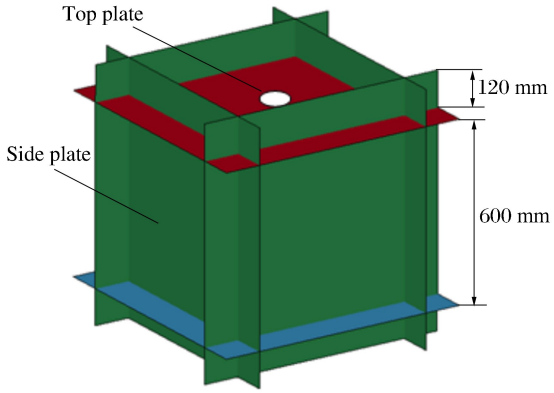

图 1　钢箱试件设计模型

Fig. 1　Design model of steel box specimen

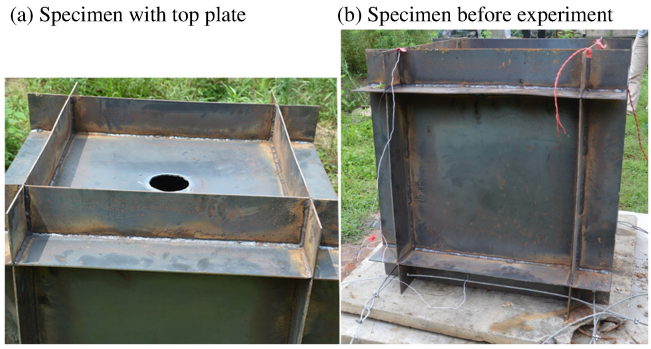

图 2　钢箱试件模型

Fig. 2　Model of steel box specimen

1.2　实验工况

为了考察钢箱在不同爆炸载荷下的变形情况，本文设计了 3 种爆炸工况。TNT 为立方体形状，密度为 1.5 g/cm^3，边长分别为 40、50 和 60 mm，如图 3 所示。TNT 采用电雷管起爆，雷管垂直插在 TNT 顶面中心圆孔中，悬挂于钢箱内部正中心，TNT 各边与箱体各边平行，以保证爆炸载荷对箱体各边的冲击作用相等。实验工况见表 1。

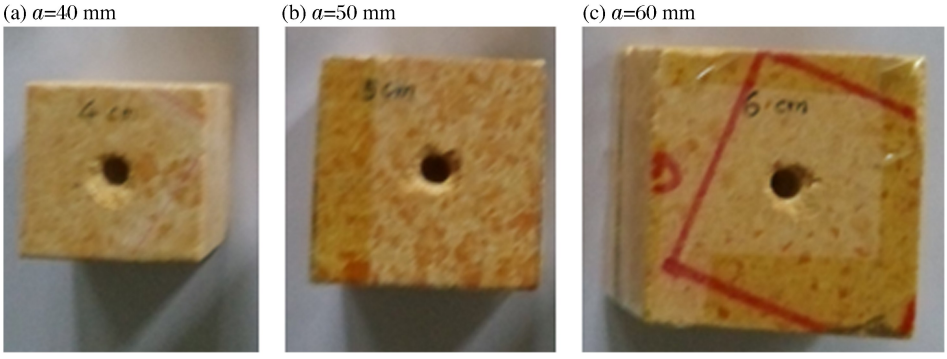

图 3　TNT 形状及尺寸

Fig. 3　Shape and dimension of TNT explosive

表 1　实验工况和结果

Table 1　Experimental cases and results

工况	a/mm	m/g	Z/(m·kg$^{-1/3}$)	δ_e/mm	δ_c/mm
1	40	98.443	1.299	32.93	33.44
2	50	194.689	1.035	53.33	52.56
3	60	355.800	0.847	78.04	78.32

1.3　测试方案

为了研究箱体壁面的动态变形过程，利用三维数字图像相关(digital image correlation，DIC)技术[15-16]对实验过程进行了测量。DIC 技术能够将物体表面随机分布的斑点或人工制作的随机分布的散斑作为变形信息载体。由于钢板表面比较光滑且颜色单一，因此测量前对试件喷涂散斑，散斑效果如图 4(a)所示。三维 DIC 技术后期处理需要不同角度的数字图片，因此利用两台高速相机成一定角度，同时对试件目标区域进行拍摄。

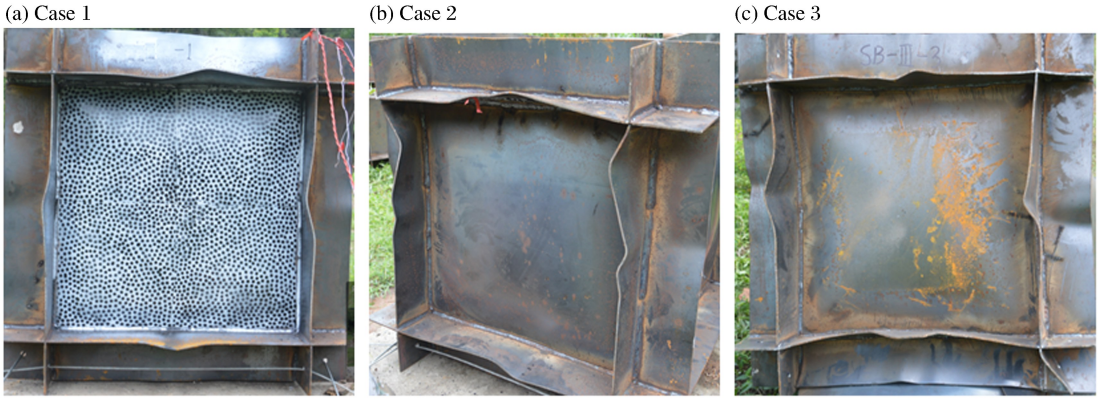

图 4 不同工况下的破坏形状

Fig. 4 Damage figures of different experimental cases

2 结果及分析

2.1 结果

各工况下钢箱壁面的变形结果如图 4 所示。从图中可以明显看出，壁面均呈现向外凸的变形特征，在壁面对角线位置产生了明显的塑性铰线，且变形程度从工况 1 到工况 3 逐渐严重。

对试件进行壁板最终变形测量，分别测量四面侧板中心的挠度，平均值记为侧板挠度δ_c。测量结果见表 1。

2.2 分析

挠度厚度比 δ/H 能够体现梁板构件变形特征的物理量[17-18]，图 5 给出了箱体壁面挠度厚度比 δ/H 与爆炸比例距离 Z 的关系。

由图 5 可看出，挠厚比随着爆炸比例距离的增大而减小，对该变化趋势进行拟合，得：

$$\frac{\delta}{H}=14.07Z^{-1.99} \tag{1}$$

根据式(1)，可以对与本文研究工况相似的钢箱变形进行预测。计算得到的挠度 δ_c 见表 1，它与实验测量值最大误差仅为 1.55%，拟合精度较好。

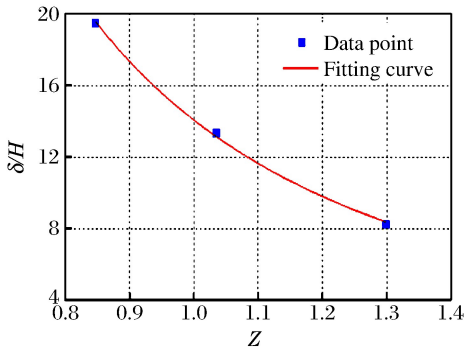

图 5 壁面中心挠厚比与爆炸比例距离的关系

Fig. 5 Relationship between central deflection thickness ratio and scale distance

3 动态响应过程分析

实验过程中，利用两台高速相机对工况 1 的实验过程进行了拍摄。实验后，利用三维 DIC 技术对拍摄的照片进行分析处理，得到箱体壁面中心的挠度曲线(见图 6)及壁面的动态变形响应过程(见图 7)。由图 6 可得，工况 1 喷有散斑的壁面变形最大值为 46.3 mm，最终变形值约为 42.8 mm。图 7 中，云图颜色从紫到蓝到黄到红，显示壁面变形值越来越大。

结合图 6～7，可得壁面的变形响应过程为：爆炸发生后，很快壁面中心就有变形产生，到 $t=0.3$ ms时，壁面中心已经有较明显的凸起；且随着

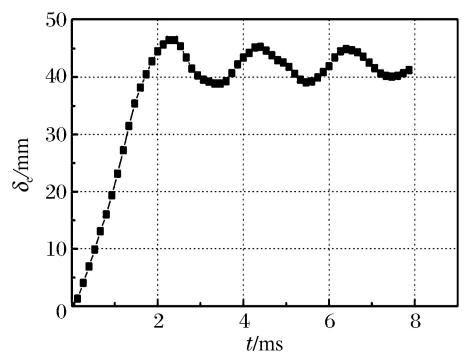

图 6 DIC 技术测得的壁面中心挠度

Fig. 6 Central deflection obtained by DIC technique

时间的推移，壁面中心挠度增大的同时变形也逐渐向四周拓展，到 $t=0.6$ ms 左右时，变形传播到壁板边缘；在 $t=2.4$ ms 左右时，壁面中心挠度达到最大值；随后，壁面中心变形发生回缩，最大挠度值减小，如 $t=3.6$ ms 时；到 $t=7.9$ ms 时，记录结束，板的变形最终会在振荡中趋于一个定值。

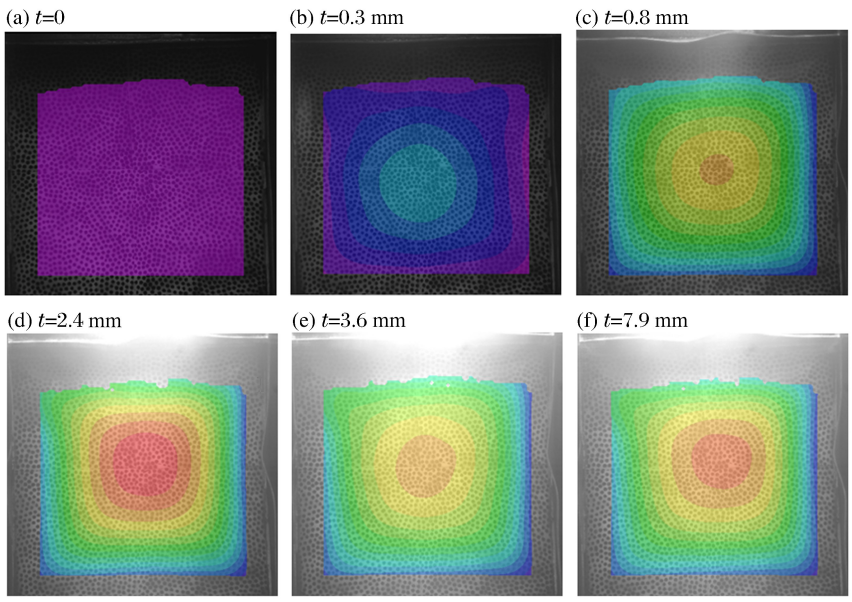

图 7　钢箱壁面动态变形三维 DIC 技术测试结果

Fig. 7　DIC measured results of dynamic response of steel box wall

4　结　论

设计了边长 600 mm、板厚 4 mm 的实验试件，并且分别用 98.4、194.7 和 355.8 g 的 TNT 炸药进行了内部爆炸实验，得到了所有试件的变形特征。箱体壁板的变形都呈现向外凸出（鼓起）的特点，壁板中心的最终挠度值随着爆炸 TNT 当量的增大而增大，且近似成线性增长。拟合了箱体壁板变形与爆炸当量的经验公式，可以对类似工况下箱体的变形进行预测。通过三维数字图像相关技术，对箱体壁板的动态响应过程进行了研究，得到了其响应过程：爆炸发生后，壁板中心最先产生向外鼓起；随后，壁板中心变形增长的同时变形向着四周传播；壁板中心变形达到最大值后，板的变形会产生一定量的振荡回缩。

本文研究内容可为箱形结构内部爆炸的损伤评估以及结构内爆的深入研究提供参考与依据。后续将利用本文实验标定数值模拟技术，并对钢箱结构内爆问题进行深入分析。

参考文献：

[1]　Baker W E. Explosion hazards and evaluation[M]. New York: Elsevier Publishing Company, 1983.

[2]　Teeling-Smith R G, Nurick G N. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads [J]. International Journal of Impact Engineering, 1991,11(1):77-91.

[3]　Olson M D, Nurick G N, Fagnan J R. Deformation and rupture of blast loaded square plates-predictions and experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993,13(2):279-291.

[4]　Nurick G N, Radford A M. Deformation and tearing of clamped circular plates subjected to localised central blast loads[C]// Reddy B D. Recent Developments in Computational and Applied Mechanics. Barcelona, Spain: CIMNE, 1997:277-301.

[5]　Nurick G N, Bryant M W. Fragmentation damage as a result of an explosion[C]// Plasticity and Impact Mechanics. New Delhi, India, 1996:484-498.

[6]　Nurick GN, Shave G C. The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads: An experimental study[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996,18(1):99-116.

[7]　Nurick G N, Olson M D, Fagnan J R, et al. Deformation and tearing of blast loaded-stiffened square plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995,16(2):273-291.

[8]　蒋志刚，白志海，严波，等. 金属薄板与加筋板爆炸冲击响应研究进展[J]. 振动与冲击，2010,29(11):41-46.
Jiang Zhigang, Bai Zhihai, Yan Bo, et al. Research advancement on the impact response of thin and stiffened metal plates under blast loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(11):41-46.

[9] 侯海量,朱锡,李伟,等.舱内爆炸冲击载荷特性实验研究[J].船舶力学,2010,14(8):901-907.
Hou Hailiang, Zhu Xi, Li Wei, et al. Experimental studies on characteristics of blast loading when exploded inside ship cabin[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010,14(8):901-907.

[10] Kurkit M. Contained explosion inside a naval vessel: Evaluation of the structural response[M]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2007.

[11] Ma L, Xin J, Hu Y, et al. Ductile and brittle failure assessment of containment vessels subjected to internal blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013,52:28-36.

[12] Geretto C, Yuen S C K, Nurick G N. An experimental study of the effects of degrees of confinement on the response of square mild steel plates subjected to blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015,79:32-44.

[13] 姚术健,卢芳云,蒋志刚,等.钢箱内部爆炸冲击波载荷及破坏模式研究[J].兵工学报,2013,34(增刊 1):314-320.
Yao Shujian, Lu Fangyun, Jiang Zhigang, et al. Research on the shock wave and failure modes of steel box subjected to internal blast loading[J]. Acta Armamentraii, 2013,34(suppl 1):314-320.

[14] 姚术健,张舵,卢芳云,等.多箱室结构内部爆炸损伤特性研究[J].兵工学报,2015,36(增刊 1):87-91.
Yao Shujian, Zhang Duo, Lu Fangyun, et al. Study on the damage character of multi-chamber structure subjected to inside explosion[J]. Acta Armamentraii, 2015,36(suppl 1):87-91.

[15] Spranghers K, Vasilakos I, Lecompte D, et al. Full-field deformation measurements of aluminum plates under free air blast loading[J]. Experimental Mechanics, 2012,52(9):1371-1384.

[16] Sutton M A, Orteu J, Schreier H W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements[M]. USA: Springer, 2009.

[17] Yao S J, Zhang D, Lu F Y, et al. Damage features and dynamic response of RC beams under blast[J]. Engineering Failure Analysis, 2016,62:103-111.

[18] Yao S J, Zhang D, Lu F Y. Dimensionless numbers for dynamic response analysis of clamped square plates subjected to blast loading[J]. Archive of Applied Mechanics, 2015,85(6):735-744.

Experimental study of deformation of steel box subjected to internal blast loading

Yao Shujian, Zhang Duo, Zheng Jian, Lu Fangyun, Yu Dapeng
(*College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *Hunan, China*)

Abstract: Damage could occur to a more severe degree in an internal blast than in an air blast with respect to box-shaped structures. In the present study, a blast experiment was performed using 98.4, 194.7 and 355.8 g TNT explosives, respectively on three box-shaped specimens 600 mm in length and 4 mm in plate-thickness, to obtain their deformation features and observe the outward bulges at the center of their plate wall. It was found that the central deflection of the wall increases with the increase of the TNT mass. An empirical equation is proposed by fitting the linear relationship of the deflection thickness ratio and the TNT mass. The dynamic response of the wall was analyzed using the 3D digital image correlation (DIC) technique. The outward bulge was produced in the wall center after the explosion and at the same time the deflection increased with time passing by and the deformation propagated towards the wall edge all around. After the deflection reached the maximum value, the deformation of the wall experienced several oscillations.

Keywords: plastic deformation feature; digital image correlation; steel box; internal blast

(责任编辑 丁 峰)