



双轴压缩下含舱内爆炸凹陷损伤薄板的剩余极限承载能力试验分析

敖雷 史治中 张磊 丁子奇 裴志勇 吴卫国

Experimental analysis on residual ultimate bearing capacity of thin plate with internal explosion dent damage under biaxial compression

AO Lei, SHI Zhizhong, ZHANG Lei, DING Ziqi, PEI Zhiyong, WU Weiguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03610>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单轴压缩下金属夹层板极限承载性能分析

Ultimate bearing capacity for steel sandwich panels under uniaxial compression

中国舰船研究. 2020, 15(4): 53-58 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01554>

PVC泡沫夹芯板单点低速冲击动态响应与冲击后剩余抗压强度试验研究

Experimental study on dynamic response and residual compressive strength of composite sandwich panel with PVC foam core under single-point low-velocity impact

中国舰船研究. 2024, 19(4): 263-270 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03337>

面内剪力对加筋板纵向轴压极限强度的影响分析

Analysis of ultimate uniaxial compressive strength of stiffened panel considering influence of shear load

中国舰船研究. 2023, 18(2): 149-159 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02540>

复合壳体水中高静压试验及极限承载能力分析

High hydrostatic pressure test and ultimate load capacity of composite shell in water

中国舰船研究. 2024, 19(5): 122-130 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03435>

轴向循环载荷下加筋板极限承载性能分析

Analysis of ultimate load-bearing behavior of stiffened plate under axial cyclic loading

中国舰船研究. 2022, 17(4): 204-211 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02400>

基于数字图像方法的加筋板屈曲失效路径试验研究

Experimental study on the buckling failure process of stiffened panel based on 3D-DIC method

中国舰船研究. 2020, 15(5): 132-140 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01735>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 敖雷, 史治中, 张磊, 等. 双轴压缩下含舱内爆炸凹陷损伤薄板的剩余极限承载能力试验分析[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(2): 245-255.

AO L, SHI Z Z, ZHANG L, et al. Experimental analysis on residual ultimate bearing capacity of thin plate with internal explosion dent damage under biaxial compression[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(2): 245-255 (in both Chinese and English).

双轴压缩下含舱内爆炸凹陷损伤薄板的剩余极限承载能力试验分析



扫码阅读全文

敖雷¹, 史治中², 张磊¹, 丁子奇², 裴志勇^{*1}, 吴卫国¹

1 武汉理工大学 绿色智能江海直达船舶与邮轮游艇研究中心, 湖北 武汉 430063

2 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

摘要: [目的] 为评估舰船毁伤生命力并支撑战场快速决策, 进行复杂海况下损伤结构剩余承载能力分析。

[方法] 针对舱内爆炸损伤后的船体薄板, 通过模型试验, 分析双轴压缩下含凹陷损伤薄板的剩余承载能力。通过不同载荷比例加载, 分析凹陷损伤薄板在组合载荷作用下的力学特性。基于数字图像相关法(DIC), 建立三维全场应变测量系统, 详细记录薄板的面外变形过程, 揭示双轴压缩下含凹陷损伤薄板的破坏失效模式。[结果] 结果显示, 在任意加载比例下, 凹陷损伤的存在都会显著降低薄板的剩余承载能力, 最大可达19.96%, 所有板均是因加载边夹角处的塑性大变形而破坏失效; 随着双向轴压一端载荷的增加, 另一端的极限承载能力会显著下降。[结论] 所做研究对复杂应力下舰船毁伤生命力评估和安全返港具有重要指导意义。

关键词: 爆炸; 舱内爆炸; 凹陷损伤; 双向轴压; 全场应变测量技术; 剩余极限强度; 模型试验

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03610

0 引言

伴随武器装备的更新迭代以及精确制导技术的革命性发展, 舰船在面临武器攻击时, 所承受的爆炸冲击威胁日益加剧。舰船通常采用薄壁结构设计, 相较于常规爆炸场景, 发生于密闭环境内的爆炸事故对舰船结构所造成的损伤更为严重, 已引起广泛重视^[1-3]。Geretto等^[4]发现, 钢板在承受完全密闭爆炸时会呈现出更大的外翻膨胀变形, 也即凹陷损伤。Yao等^[4]选取2:3:4三种不同比例的缩尺密闭箱型舱室模型, 分析了不同内爆载荷作用下结构的损伤变形特性和相似性变化规律。Zheng等^[5]通过内爆冲击试验, 分析板和加筋板结构的动态响应特性, 发现板在舱内爆炸冲击作用下会发生显著的凹陷变形损伤, 幅值可达板厚的10倍以上。由于爆炸冲击作用, 局部会产生凹陷变形损伤, 从而降低结构的弯曲刚度, 改变船体结构的崩溃失效模式, 极大地降低结构的承载能力, 对舰船的安全运行产生重大隐患。上述

研究主要分析了爆炸冲击过程中结构的损伤特性, 但围绕损伤特性对船体结构剩余强度影响的研究较少。

近年来, 针对含凹陷损伤薄板结构的剩余强度, 学者们进行了许多研究。Paik等^[6]通过非线性有限元法, 分析凹陷形状、大小和位置等对轴向压力作用下筒支板的极限强度的影响。Guedes Soares等^[7]研究凹陷位置对极限强度的影响, 结果显示局部缺陷的影响主要取决于损伤的形状和变形幅值。Raviprakash等^[8]探讨各种凹陷参数对单向压缩载荷作用下薄板极限强度的影响, 结果显示较长的凹陷能极大地降低板的极限强度, 凹陷方向和凹陷面积等参数的影响会随着板厚的增加而放大。Peroumal等^[9]考虑几何的整体缺陷和局部凹陷的影响, 分析了横向凹陷和纵向凹陷对受压板的影响。Ao等^[10]通过非线性有限元法研究主要凹陷参数对加筋板剩余极限强度的影响, 并提出了一种预测凹陷损伤程度的公式。李晓东等^[11]研究了单轴压缩载荷下具有初始缺陷的凹陷

收稿日期: 2023-10-25 修回日期: 2024-01-02 网络首发时间: 2025-01-09 11:01

作者简介: 敖雷, 男, 1989年生, 博士, 助理研究员。研究方向: 船舶结构极限强度。E-mail: lei_ao@whut.edu.cn

张磊, 男, 1988年生, 博士, 副研究员。研究方向: 流固耦合。E-mail: kellyyioy@126.com

裴志勇, 男, 1974年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶结构极限强度。E-mail: Zhiyong_pei@whut.edu.cn

吴卫国, 男, 1960年生, 硕士, 教授。研究方向: 船舶结构极限强度。E-mail: mailjt@163.com

*通信作者: 裴志勇

损伤加筋板的剩余承载能力。张婧等^[12]提出低温含凹陷损伤加筋板剩余极限强度的经验公式,并对比有限元计算结果,发现拟合良好。

当船舶在复杂海况下航行时,会遭受多种载荷的共同作用,结构将不再是在单一载荷作用下发生屈曲失效,国内外不少学者研究了双向轴压载荷对船体结构极限承载能力的影响。Ma等^[13]通过试验研究双轴压缩载荷和侧向载荷作用下加筋板的极限强度与破坏特性,发现当横向载荷增大到一定程度时,加筋板的破坏形式将由加筋的横向扭转屈曲转变为加筋腹板局部屈曲与横向扭转屈曲的组合形式;Li和Chen^[14]发现,随着横向轴压载荷的增加,加筋板的纵向极限承载能力通常呈下降趋势,但如果厚板的横向膨胀不能被横向压缩载荷有效抵抗,则板的纵向极限强度将会提高;Paik等^[15]研究单轴和双轴压缩下板的崩溃特性,发现与单纯的纵向压缩相比,初始变形形状和横向压缩载荷的相互作用将会导致明显的极限强度差异。

上述研究介绍了完整船体板和加筋板在双轴压缩载荷作用下的失效模式与极限承载能力,但是针对含凹陷损伤结构在双轴载荷作用下的剩余极限强度却缺乏相应的研究。因此,本文拟针对复杂载荷作用下含凹陷损伤船体板的剩余强度开展试验研究。首先,采用多油顶并联加载的方式设计双向轴压的载荷工况,并采用模型试验方法分析双向轴压作用下含舱内爆炸凹陷损伤薄板的崩溃失效特性;然后,通过改变载荷比例建立多组试验工况,分析不同载荷比例对受损结构力学性能的影响;最后,运用全场应变测量技术,对薄板的面外变形进行分析,建立组合载荷下含凹陷损伤薄板的全场应变分布数据库。

1 试验设计

1.1 试验对象

本文以舱内爆炸冲击后的含凹陷损伤薄板为

研究对象,损伤试件来源于Zheng等^[5]的舱内爆炸试验。通过模型试验方法,分析双向轴压下损伤板的后屈曲崩溃特性。3块薄板主尺寸长宽均为 $1\ 100\text{ mm}\times 1\ 100\text{ mm}$,板厚 $t=5\text{ mm}$,分别命名为板I、板II和板III(载荷比例分别为1:1、1:1.5和1:2)。在加载端A-A1, A1-B1处增加 $1\ 000\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 、厚度为 10 mm 的承载板,以起到载荷支撑传递的作用,便于油顶载荷均匀施加于平板断面,如图1所示。在板边A-B端焊接 $1\ 000\text{ mm}\times 185\text{ mm}$ 、厚 10 mm 的垫板,垫板通过直径 $D=25\text{ mm}$ 的螺栓孔固支在支撑横梁上,形成固支边界。板边B-B1则通过夹持工装形成简支边界,简支夹持如图2的局部结构所示,夹持工装的另一端则通过螺栓固支于支撑桁架(橙色)。

模型制作材料为Q235钢,根据GB/T 288.1.2010第1部分“室温实验方法”^[16]进行准静态拉伸试

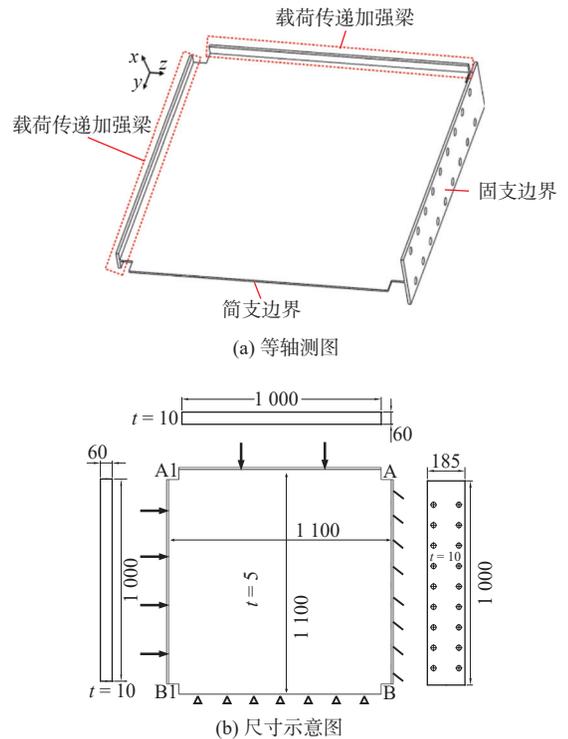


图1 含凹陷损伤板的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of dent damaged plate

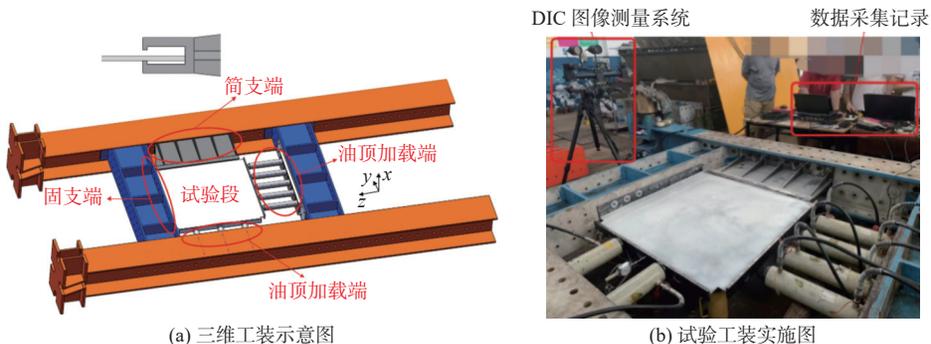


图2 双向轴压试验工装图

Fig. 2 Tooling drawing of biaxial compression test

验, 以确定试件材料的力学性能。通过试验, 得到材料的屈服强度为 317 MPa, 泊松比 $\lambda = 0.28$, 弹性模量 $E = 206\ 000$ MPa。

1.2 载荷施加及边界约束

为便于双向载荷的施加, 将凹陷板非加载边一端设计为固支边界, 另一边设计为简支。固支端通过螺栓与支撑横梁固连, 简支端则通过延长支撑架提供约束作用。另外两边则通过油顶对薄板进行轴向施压, 2 个加载边分别焊接上高 60 mm、厚 10 mm 的垫板, 以保证轴压载荷能够较为均匀地传递到薄板。在加载过程中, 通过油顶端部与垫板接触面间的摩擦力为加载边垂向位移提供一定的约束作用。整个模型的边界条件分为 6 个自由度, U_x, U_y, U_z 分别表示沿 x, y, z 轴的平移; R_x, R_y, R_z 分别表示沿 x, y, z 轴的旋转, 如表 1 所示。表中, AB 代表固支边, BB1 代表简支边, AA1 和 A1B1 分别代表横向和纵向加载边, 横线表示无约束。

表 1 模型边界条件

Table 1 Model boundary conditions

边界	U_x	U_y	U_z	R_x	R_y	R_z
AB	0	0	0	0	0	0
AA1	油顶接触面	0	-	-	-	0
	非油顶接触面	-	-	-	-	-
A1B1	油顶接触面	0	-	-	0	-
	非油顶接触面	-	-	-	-	-
BB1	0	0	-	0	0	-

1.3 试验工装

试验实施的具体工装示意图和实际工装如图 2 所示, 图中 DIC 为数字图像相关法的缩写。凹陷板的一边通过简支夹持工装约束于桁架(橙色)上, 另一端则通过螺栓固支在与桁架相连的横梁(蓝色)上, 然后分别在横向加载边(简支端的对边)布置 2 个油顶, 纵向加载边(固支端的对边)布置 4 个油顶以提供均布载荷。为保证外载荷均匀分布, 在薄板的 2 个加载边分别焊接一块细长的厚板, 以保证油顶端部能够提供均匀的轴压载荷。油顶的另一端则通过支撑板与桁架结构相连。整个试验加载系统平行放置于地面, 在桁架与横梁内形成了一个自平衡的面内加载封闭空间。

图 3 给出了试验板 I (载荷比例 1:1) 的三维扫描示意图。从图中可以看出, 在较小的舱内爆炸冲击载荷作用下, 板面并未发生冲击破损。但

是, 试件在舱内爆炸冲击区域产生显著的凹陷大变形, 并在四边形成塑性铰边。凹陷的最大深度为 50.1 mm, 达到板厚的 10 倍左右。需要注意的是, 除了薄板中间的凹陷大变形外, 凹陷周围薄板还有不同程度的初始变形。不过, 测量结果发现初始变形的最大幅值为 2.9 mm, 远小于凹陷变形幅值。

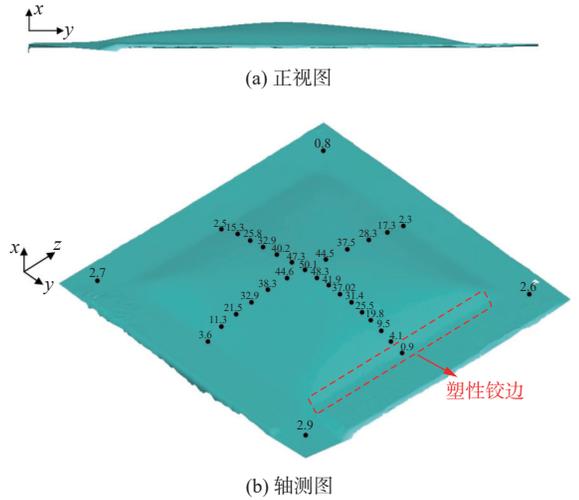


图 3 凹陷损伤板三维扫描图

Fig. 3 The 3D scanning map of dent damaged plate

本文建立的用于描述舱内爆炸凹陷变形形状的简化三角函数关系式如式(1)所示。3 块薄板在爆炸损伤下最大的断面如图 4(a)所示, 3 块板的凹陷变形形式与最大幅值基本一致, 其差异可以忽略。图 4(b)给出了板 I 两个实际凹陷断面轮廓扫描结果与简化凹陷变形函数的对比。从中可以看出, 实际凹陷的断面形状与给出的三角函数形状吻合较好, 凹陷在薄板面内的投影均为一个 $D_1 \times D_2$ 的方形。

$$w_{32} = D_3 \sin\left(\frac{\pi y}{D_1}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{D_2}\right), \quad \begin{cases} 0 \leq y \leq D_1 \\ 0 \leq z \leq D_2 \end{cases} \quad (1)$$

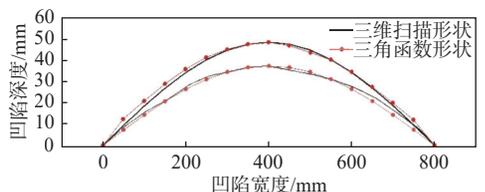
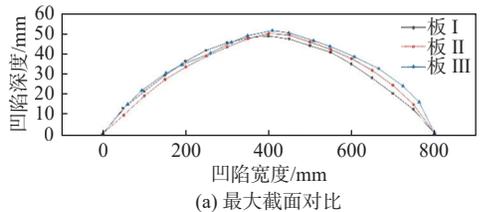


图 4 凹陷截面比较

Fig. 4 Comparison of dent cross-sections

式中: w_{32} 为凹陷变形; D_1 和 D_2 分别为凹陷投影的长度和宽度; D_3 为最大凹陷深度。

2 双向轴压薄板的剩余强度试验

2.1 试验测试仪器

试验过程中,油顶之间通过分油阀串联,单个油顶的载荷通过串联的压力传感器测量得到。在试验过程中,为得到含凹陷损伤薄板试件目标位置的应力,使用三向应变计对试验模型关键测点的应变水平进行测量。在模型试验过程中,可通过应变片的监测结果看出模型在逐步破坏过程中的应力水平变化和分布情况。首先,通过有限元计算获得极限状态下薄板的应力分布云图;然后,选取最大应力位置 and 对称性验证的位置布置三向应变计,具体位置如图5中黑色标记所示。试验使用位移百分表对加载过程中模型的位移进行记录,位移百分表的布置如图5红色标记所示。以板I为例,测点1和测点2可测量记录试验模型 z 方向的位移(纵向-固支端),测点3可测量记录试验模型 y 方向的位移(横向-简支端),用于观察模型结构受到双向轴压载荷作用时的面内位移,板II和板III同理。试验中,除通过应变片对局部测点的应变进行测量外,还采用DIC全场应变测量系统对垂直于薄板的面外变形进行了测量,DIC测量系统实物如图2所示。

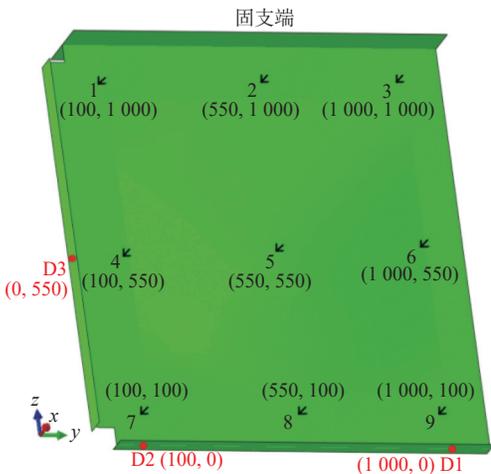


图5 应变和位移测点布置图

Fig. 5 Arrangement of strain and displacement measuring points

2.2 载荷施加步骤

2.2.1 预加载

金属构件在冷、热加工或焊接过程中均会产生残余应力,而残余应力会影响构件的实际承载能力。因此,需要通过线性预加载释放试件中残

存的应力,从而降低残余应力对试验结果的影响。由于构件加工的尺寸存在误差,在试验工装过程中,构件的装配存在间隙。装配间隙可能会导致试验中的位移测量结果与真实值之间产生较大偏差,故需要通过多组预加载方式消除构件的装配间隙。因此,为了获得更加准确的试验数据,提高试验结果的可信度,在崩溃破坏试验加载之前,对模型在线弹性范围内进行了3次预加载/卸载,以降低残余应力对试验结果的影响,同时消除部分工装间隙。单个油顶的预加载峰值为 $2t$ 。

2.2.2 极限承载能力试验

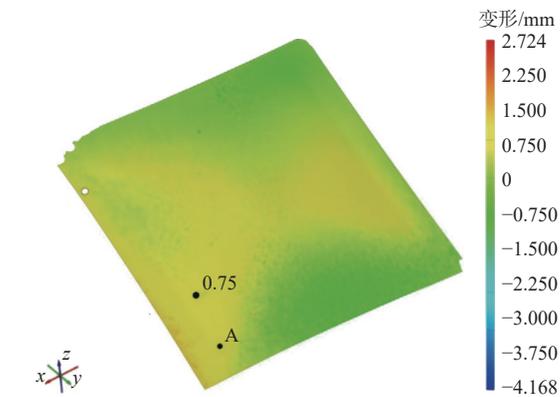
在预加载的基础上,采用多个油顶对试验模型进行横向(y 轴,简支端)和纵向(z 轴,固支端)的同步加载,直至模型发生崩溃失效。横向方向布置2个油顶,纵向方向布置4个油顶,在施加载荷的过程中,横向与纵向的总载荷比例保持为一确定值,载荷比分别为1:1, 1:1.5和1:2。试验过程中,通过两组人员分别独立进行油顶操作和数据记录工作。首先,一组人员操纵一个方向的油顶至其接触模型加载边,另一组人员操纵另一个方向的油顶至其接触模型的另一加载边。随后,两组人员同步开始增加外载荷增量。在初始线性加载阶段,每组油顶的最小载荷步长分别为5 kN和10 kN。每增加一个载荷增量后,维持5 s时间并继续下一个增量步。当总载荷增加到某一设定值后,每组油顶缩小载荷步长至2.5 kN和5 kN,并继续逐步加载直至试验模型发生崩溃破坏失效。在加载过程中,尽量保证双向载荷按照给定的比例同时记录试验阶段每一加载步的模型应变、位移和压力载荷等数据。当模型发生破坏失效而无法承受更大的载荷时,继续增加一段油顶位移,以使试件的塑性变形更加明显。然后,缓慢卸下外载荷并将油顶冲程归位,同时保持试验数据记录直至试验结束。

3 试验结果分析

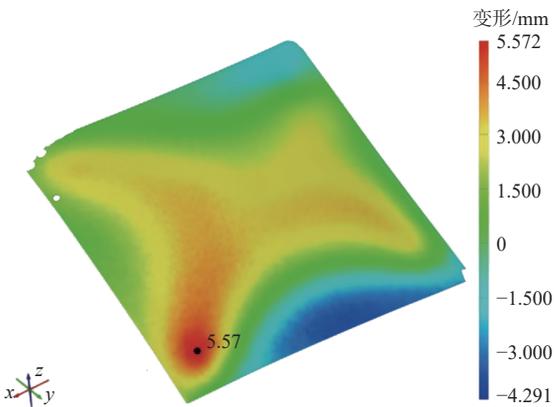
3.1 模型的面外位移变化

本文通过DIC全场应变测量技术对板III(载荷比例1:2)的面外位移进行了实时测量,得到双向轴压载荷下薄板面板的全场位移云图如图6所示。从图中可以清晰地看到薄板在双轴加载过程中整个面板的面外位移变化规律。当载荷较小时,薄板沿着凹陷整个向面外拱起,并且在横向加载边和塑性铰区域位移最大,最大面外位移为

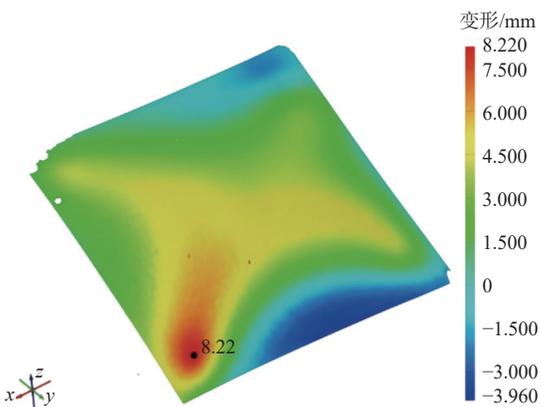
0.75 mm。随着载荷的逐渐增加,板的面外变形沿着初始凹陷损伤的轮廓发生变化,并逐渐向凹陷拐角处集中。随着载荷的继续增加,薄板进入弹塑性阶段,其最大位移和变形逐渐集中于两加载边的夹角处。这种现象一直持续至结构发生破坏。在极限状态下,薄板对角线夹角的最大面外位移为 8.22 mm。由图中的位移云图可以看出,板在发生屈曲破坏的过程中,加载边夹角处伴随有显著的位移梯度差,表明纵向加载边与横向加载边在夹角处形成了一定的错位变形。



(a) $T = 108$ s, 横向载荷 4.48 t, 纵向载荷 9.17 t



(b) $T = 232$ s, 横向载荷 9.60 t, 纵向载荷 19.28 t



(c) $T = 296$ s, 横向载荷 12.11 t, 纵向载荷 22.57 t

图 6 加载过程中薄板的面外变形

Fig. 6 Out-of-plane deformations of the thin plate during loading

3.2 双向轴压下含凹陷损伤板的总体破坏模式

3 块含凹陷损伤板在尺寸、厚度与损伤参数上基本保持一致。试验中,选用 3 种比例施加载荷, y 方向与 z 方向的轴压载荷比例分别为 1:1, 1:1.5 和 1:2。从试验结果中可以看出,3 种不同比例组合载荷作用下的薄板首先发生屈曲变形的位 置及总体破坏失效模式基本相同。在加载初期,在双向轴压载荷作用下,两受载边分别沿 y 方向和 z 方向产生微小的平移。此时,载荷幅值较小,试件并未发生显著变形。随着轴向压力的逐渐增加,当载荷增加至某一临界值时,3 块损伤板均在两加载边的夹角处发生局部屈曲,变形沿薄板对角线的方向并向两加载边扩大。随着载荷的进一步增加,在屈曲对角处形成显著的塑性大变形,薄板最终发生崩溃失效并出现卸载现象而不能承受更大的载荷,如图 7 所示。薄板在夹角附近的面板沿凹陷和对角线发生较大的错位变形并形成明显的折痕(虚线所示),两条受载边的夹角由 90° 压缩至 60° 左右。

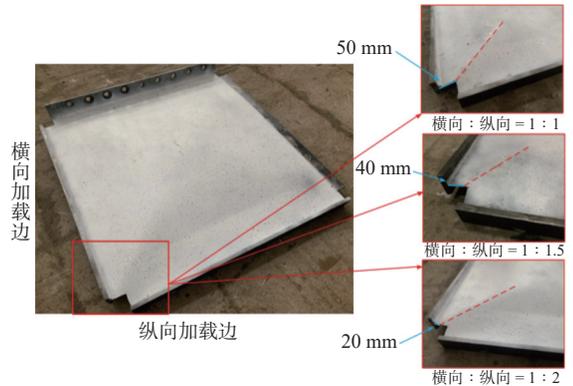


图 7 薄板失效破坏形式
Fig. 7 Failure mode of the thin plate

在整个加载过程中,薄板两非加载边并未发生局部屈曲。在结构破坏失效过程中,塑性变形集中在两加载边对角区域,随着载荷的增加沿加载边进一步扩展,其他区域并未发生显著大变形。从图中可以看出,不同载荷比例下对角区域产生的大变形折痕有细微差别。如图 7 中红色虚线所示,随着纵向载荷比的增加,大变形折痕越来越靠向横向加载边,3 块板的折痕端点与横向加载边的距离分别为 50, 40 和 20 mm。这说明随着纵向载荷比的增加,塑性大变形向横向加载边集中,在薄板破坏失效过程中纵向载荷慢慢起主导的作用。

在试验加载过程中,通过多个油顶的接触支撑对两加载边起到了一定的约束作用。在实施过

程中,两加载边处的边界约束条件最弱,只有油顶在局部接触面的约束作用。加载边未与油顶接触的部分实际为自由状态,在双向对压过程中,两加载边很容易产生垂直于面内方向的位移。随着轴压载荷的增加,薄板在两加载边夹角处最容易产生垂向错位,进而出现试验中的屈曲与破坏失效模式。

3.3 双轴压缩下薄板的极限承载能力

板 I 选取的理想载荷比例为 $F_y : F_z = 1 : 1$ (F_y , F_z 分别为沿 y 轴和 z 轴方向的载荷), 其在双轴压缩下发生崩溃失效的应力-应变曲线及载荷比例变化如图 8 所示。这里, 应力是横向和纵向载荷大小与板横截面积的比值, 应变则是横向和纵向边的位移大小。由于在整个加载过程中是通过人工操作油顶的方式来实现, 故 2 个方向的载荷并不能严格按照理想的比例同步增加, 而是呈现上下波动的状态。在加载初期, 结构为弹性变形阶段, 组合载荷按载荷增量呈持续线性增加状态, 横向和纵向的外载荷大小基本一致。

图 9 所示为位移-时间曲线, 从图中可以看出, 在约 215 s 时, 结构进入弹塑性变形状态, 载荷逐渐为非线性增加; 在约 234 s 时, 位移曲线发

生明显突变, 说明结构达到极限状态, 此时板 I 在横向承受的最大平均应力为 36.82 MPa, 在纵向承受的最大平均应力为 36.31 MPa; 随着位移的进一步增加, 结构发生崩溃破坏, 出现卸载现象, 载荷骤然下降, 结构无法承受更大的载荷。在整个加载过程中, 载荷平均比例保持在 1.01, 与理想载荷比例基本一致。

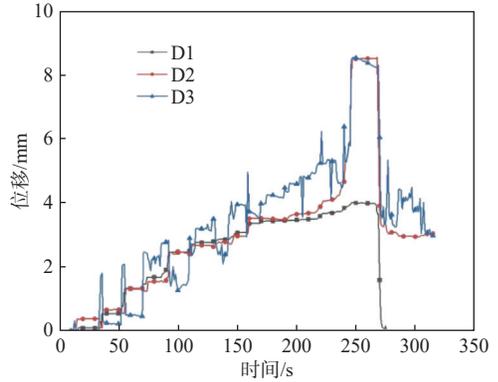
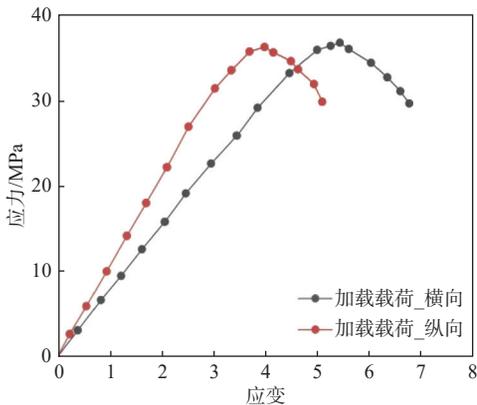


图 9 板 I (1:1) 的测点位移-时间曲线

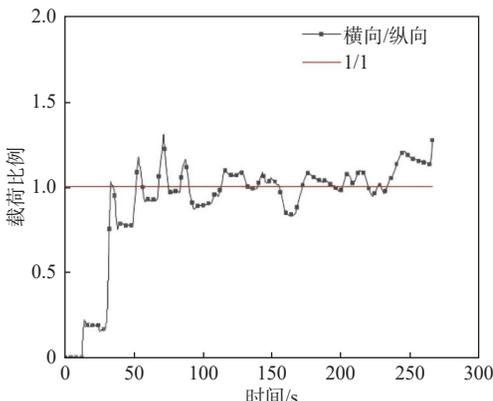
Fig. 9 Displacement-time curves of plate I (1:1) measuring points

在板 I 的两加载端选取 3 个位移测点 D1, D2 和 D3, 其中 D1 和 D2 分布在纵向加载端, D3 分布在横向加载端中部, 如图 5 中红色标识所示。3 个测点的位移-时间曲线如图 9 所示。从图中可以看出, 在加载初期, 板 I 处于线弹性阶段, D1 与 D2 位移曲线的变化趋势基本一致。由于油顶不是完全均匀布置, D1 与 D2 两侧边界条件存在差异, 两测点在线弹性阶段的位移大小有细微差别, 平均差值为 0.12 mm。随着载荷的持续增加, 在 215 s 以后结构进入弹塑性变形阶段, D1 与 D2 之间的差值逐渐增大, 沿加载边方向的薄板变形由均匀分布变为梯度分布。在 234 s 时, D2 和 D3 的位移显著上升并发生突变, 板 I 达到极限状态。在试验的过程中, 两加载边的载荷相当, 因此在极限状态下 D2 与 D3 的位移值相差不大, 进入极限状态后, 最大幅值达 8.53 mm。D1 在板崩溃失效过程中一直处于线弹性变形阶段, 最大位移为 4.00 mm, 并在卸载后归零。由于薄板局部发生塑性大变形, 因此, 在完全卸载之后, D2 和 D3 的位移并未归零, 测点的剩余位移则为 3 mm。

板 I 典型测点的 von Mises 应力-时间曲线如图 10 所示。从图中可以看出, 横向加载边和固支端交界处的测点 1 最先达到屈服点; 随着载荷的增加, 沿横向加载边的中间测点 4 和两加载边交界处的测点 7 随后发生屈服, 此时, 薄板整体未发生屈服, 结构尚未达到极限状态; 随着载荷的



(a) 纵、横向应力-应变图



(b) 载荷比例图

图 8 板 I (1:1) 的载荷曲线

Fig. 8 Load curves of plate I (1:1)

进一步增大,沿筒支边的测点 6 和测点 9 在约 244 s 时也达到屈服极限,而固支和筒支交界处的测点 3、板中心处的测点 5 和纵向加载边的中间测点 8 的应力较小,在结构崩溃破坏过程中均未达到屈服极限,最大应力为 259 MPa。

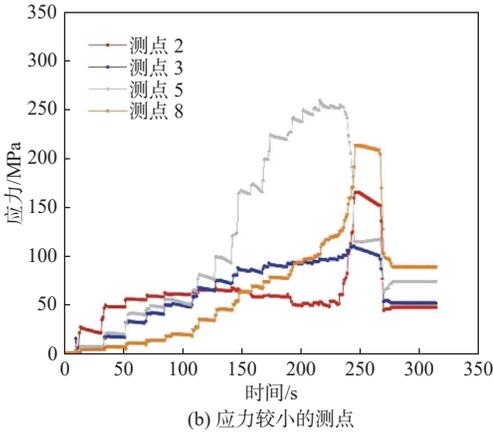
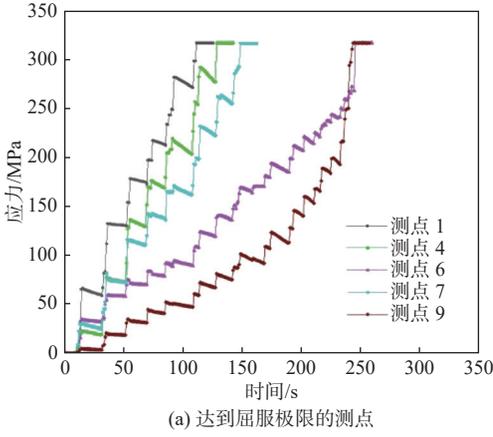


图 10 板 I (1:1) 典型测点的应力-时间曲线

Fig. 10 Stress-time curves of plate I (1:1) typical measuring points

板 II (1:1.5) 和板 III (1:2) 的应力-应变曲线如图 11 所示。板 II 在极限状态时在横向承受的最大平均应力为 30.14 MPa, 在纵向承受的最大平均应力为 43.35 MPa, 板 III 在极限状态时在横、纵向承受的最大平均应力则分别为 22.56 和 58.75 MPa。图 12 所示为板 II、板 III 典型测点的 von Mises 应力-时间曲线。

3.4 有限元分析

为进一步分析凹陷损伤参数和载荷比例对含凹陷损伤薄板剩余极限承载能力的影响,通过非线性有限元软件 ABAQUS 进行参数分析。图 13 给出了 3 块含凹陷损伤薄板的应力-应变曲线有限元与试验结果对比。从图中可以看出,由有限元计算得到的结构极限承载力大于试验结果。3 块板的横向和纵向载荷峰值平均误差分别为 4.45% 和 7.32%, 最大差异为 6.85% 和 9.44%。产

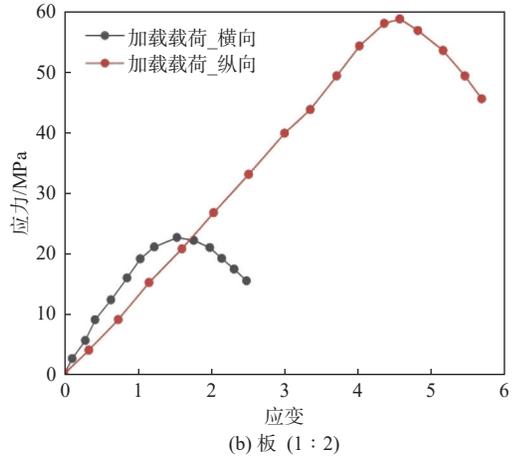
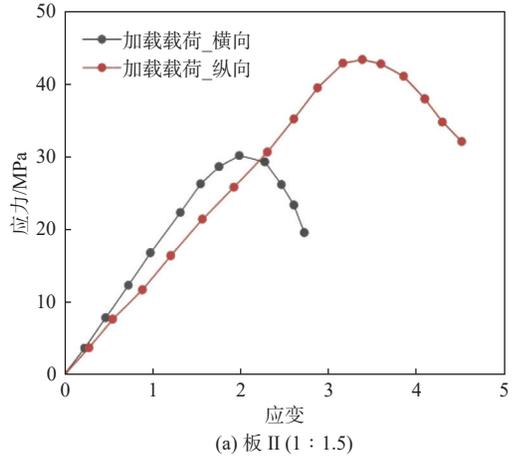
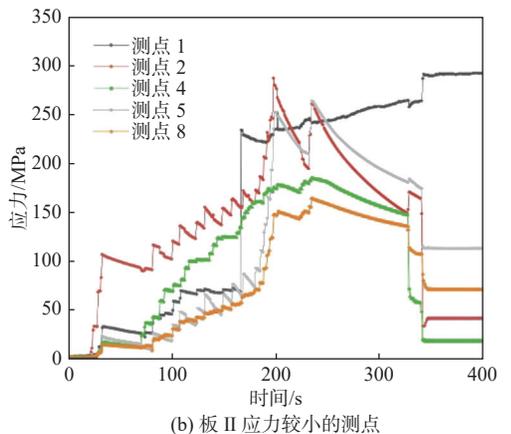
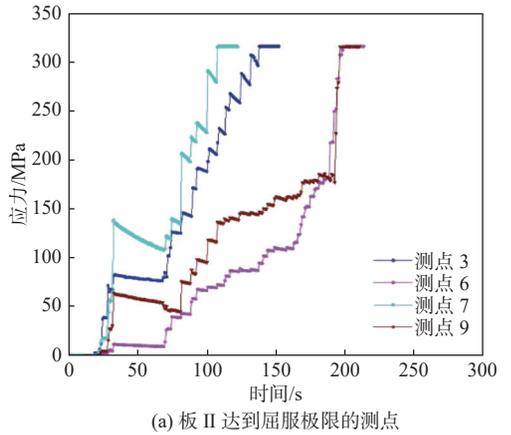


图 11 板 II 和板 III 应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves for plate II and plate III



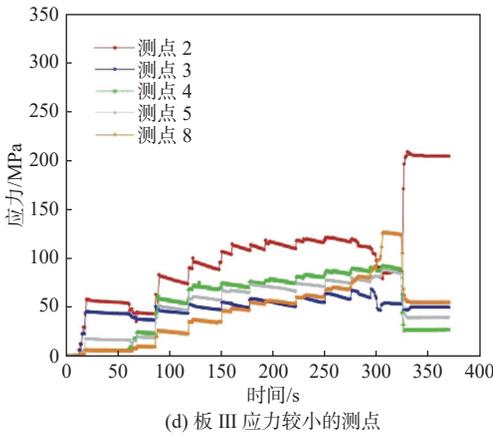
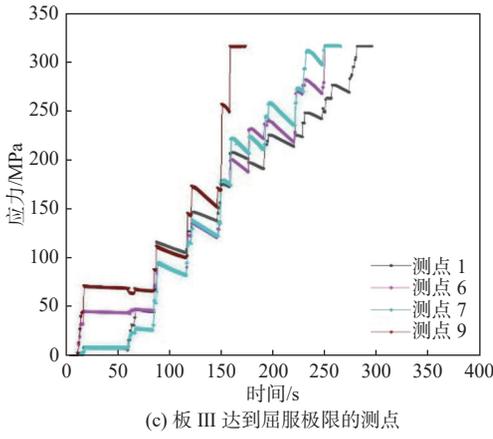


图 12 板 II 和板 III 典型测点的应力-时间曲线

Fig. 12 Stress-time curves of plate II and plate III typical measuring points

生这种现象的原因一方面是试样在加工安装过程中会产生初始变形,实际初始变形不能充分反映在数值分析中;另一方面是相较于试验实施过程中的边界约束,有限元分析设定的边界条件更理想、约束更强,所以导致试验得到的结构极限强度略低于有限元分析所得。此外,通过有限元计算得到的横、纵向位移小于试验结果,载荷位移曲线在弹性阶段的斜率也有明显差异,这是因为有限元分析是理想的边界条件,而试验在弹性预加载过程中并不能完全消除工装间隙,所以导致位移结果偏大。

凹陷深度是含凹陷损伤薄板剩余极限承载能力

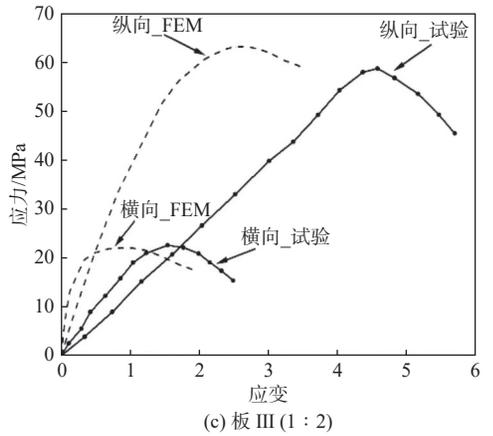
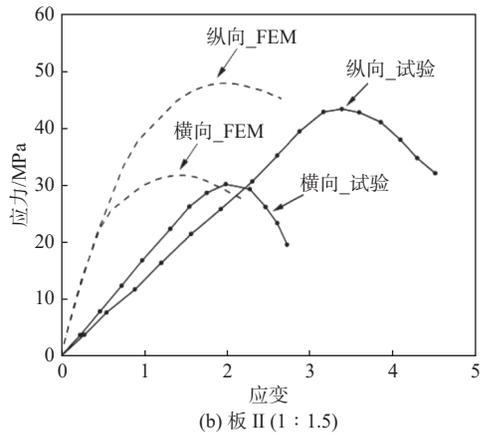
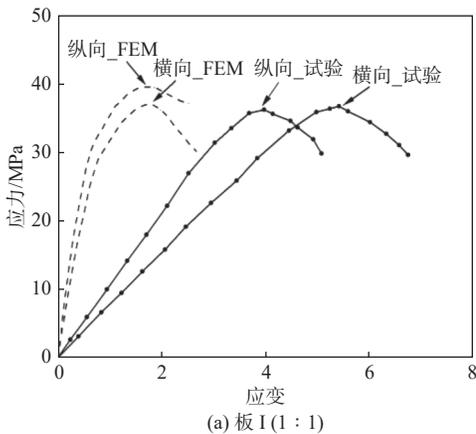
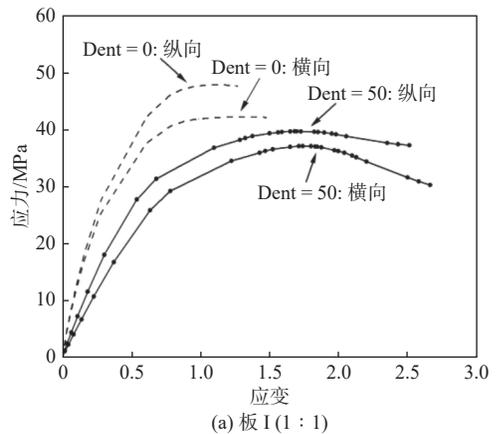


图 13 试验与有限元结果对比

Fig. 13 Comparison between experiment and FEM results

力的重要影响因素。通过有限元,计算了完整薄板 ($Dent = 0$) 和凹陷深度为 50 mm 薄板 ($Dent = 50$) 在 3 种载荷比例下的极限强度,图 14 示出了这 3 组工况下的应力-应变曲线。从图中可以看出,相较于完整薄板,含 50 mm 凹陷深度薄板的初始刚度和载荷峰值明显降低,横向载荷峰值最大降低 11.26%,最小降低 8.47%,纵向载荷峰值最大降低 18.73%,最小降低 16.98%。

图 15 综合比较了载荷比例和凹陷深度对薄板剩余极限承载能力的影响,图中 σ_{ux}/σ_y , σ_{wy}/σ_y 分别为横向和纵向载荷的无量纲比例因子。从图中可以看出,载荷比例和凹陷深度均对薄板的极限承载能力有明显影响。在任一载荷比例下,凹



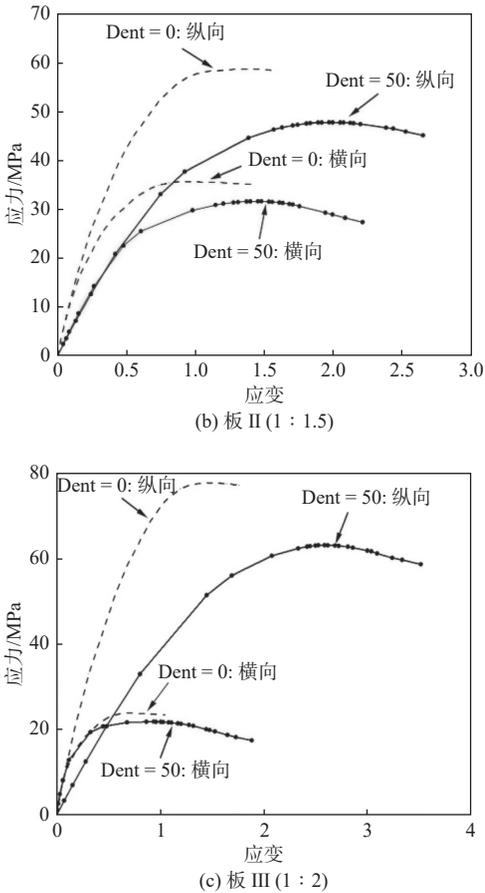


图 14 不同凹陷深度的应力-应变曲线

Fig. 14 Stress-strain curves for different dent depths

凹陷的存在都会显著降低薄板的剩余承载能力, 凹陷深度越大, 结构的剩余极限承载能力越小, 最大可达 19.96%。而在同一凹陷损伤下, 随着一端载荷的增加, 结构另一端的承载能力会显著降低。此外, 不同于完整板, 当一端载荷较小时, 由于此端载荷的作用, 会略微增加凹陷损伤薄板另一端的承载能力。

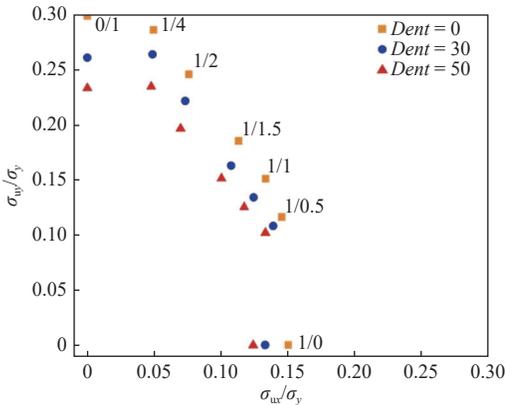


图 15 载荷比例和凹陷深度的综合影响

Fig. 15 The comprehensive effect of load ratio and dent depth

4 结 论

本文建立了舱内爆炸凹陷损伤简化模型, 通过采取改变载荷比例的方式, 开展了 3 组含舱内

爆炸凹陷损伤薄板的双向轴压试验, 分析含凹陷损伤薄板在双轴压缩下的耦合力学特性及崩溃失效模式, 并对结构极限承载能力进行评估, 主要得到如下结论:

1) 3 块含舱内爆炸凹陷损伤薄板模型的主要变形破坏模式为: 当轴向压缩载荷较小时, 薄板沿凹陷整个向面外拱起, 其在加载边和塑性铰区域的位移最大; 随着载荷的增加, 侧向位移逐渐向加载边夹角集中; 纵向加载边与横向加载边形成显著的位移梯度, 导致夹角处产生错位变形; 随着外载荷的进一步增加, 夹角处的位移错位更加明显, 并发生塑性大变形, 薄板最终在加载边夹角处发生破坏失效。在 3 种不同比例载荷的作用下, 薄板的总体失效模式一致。但随着纵向载荷比的增加, 薄板破坏失效中纵向载荷起到的作用也更大。

2) 随着载荷比例的增加, 率先达到屈服点的测点位置会沿板的逆时针方向变化, 但始终在薄板的夹角处。在试验过程中, 各测点位移沿加载边并非均匀分布, 靠近两加载边夹角的位移最大, 并向另一侧变小。并且, 同一加载边的位移差值会随着载荷比例的增加而增大。

3) 通过全场应变测量技术, 可以有效记录整个加载过程中薄板的面外变形情况。板在发生破坏失效之前, 可以看到在加载边夹角处伴随有明显的位移梯度差, 表明纵向与横向加载边形成了错位变形。

4) 通过有限元计算对比分析凹陷深度和载荷比例对薄板剩余极限承载能力的影响, 发现凹陷会显著降低薄板的剩余极限强度, 而双轴载荷比例的变化会使凹陷板表现出与完整板不同的极限承载特性。

本文仅针对单一凹陷损伤开展了研究, 但在实际作战环境中, 舱室结构可能会遭受凹陷与裂纹共存的复合损伤。未来, 还需探索多损伤协同作用下薄板结构的剩余强度退化规律与失效机理。

参考文献:

[1] HU Y, WU C Q, LUKASZEWICZ M, et al. Characteristics of confined blast loading in unvented structures[J]. *International Journal of Protective Structures*, 2011, 2(1): 21-43.

[2] DRAGOS J, WU C Q, OEHLERS D J. Simplification of fully confined blasts for structural response analysis [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 312-326.

[3] GERETTO C, CHUNG KIM YUEN S, 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.
- [4] YAO S J, ZHANG D, LU F Y, et al. A combined experimental and numerical investigation on the scaling laws for steel box structures subjected to internal blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 102: 36–46.
- [5] ZHENG C, KONG X S, WU W G, et al. Experimental and numerical studies on the dynamic response of steel plates subjected to confined blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 113: 144–160.
- [6] PAIK J K, LEE J M, LEE D H. Ultimate strength of dented steel plates under axial compressive loads[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2003, 45(3): 433–448.
- [7] GUEDES SOARES C, LUÍS R M, TEIXEIRA A P, et al. Parametric study on the collapse strength of rectangular plates with localized imperfections under in-plane compression[J]. *International Shipbuilding Progress*, 2008, 55(1/2): 63–85.
- [8] RAVIPRAKASH A V, PRABU B, ALAGUMURTHI N. Ultimate strength of a square plate with a longitudinal/transverse dent under axial compression[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(9): 2377–2384.
- [9] PEROUMAL D, SIDHUVILAJI E, PRABU B, et al. Numerical study about combined effect of distributed initial imperfections and dent on ultimate strength of square plates under uni-axial compression[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 813/814: 1037–1041.
- [10] AO L, WU H, WANG D Y, et al. Evaluation on the residual ultimate strength of stiffened plates with central dent under longitudinal thrust[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 202: 107167.
- [11] 李晓东, 窦培林, 景宝金. 含凹陷损伤 FPSB 典型加筋板剩余极限强度研究 [J]. *船舶工程*, 2017, 39(6): 62–66, 94. LI X D, DOU P L, JING B J. Remaining ultimate strength analysis of typical stiffened panel with damage of a FPSB[J]. *Ship Engineering*, 2017, 39(6): 62–66, 94 (in Chinese).
- [12] 张婧, 李铭军, 汪雪良, 等. 极地低温和凹陷损伤下加筋板极限强度的参数敏感性分析 [J]. *船舶力学*, 2023, 27(5): 750–762. ZHANG J, LI M J, WANG X L, et al. Parameter sensitivity analysis of ultimate strength of stiffened plates under polar low temperature and depression damage[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 27(5): 750–762 (in Chinese).
- [13] MA H Y, XIONG Q F, WANG D Y. Experimental and numerical study on the ultimate strength of stiffened plates subjected to combined biaxial compression and lateral loads[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 228: 108928.
- [14] LI D Y, CHEN Z. Advanced empirical formulae for the ultimate strength assessment of continuous hull plate under combined biaxial compression and lateral pressure [J]. *Engineering Structures*, 2023, 285: 116041.
- [15] PAIK J K, THAYAMBALLI A K, LEE J M. Effect of initial deflection shape on the ultimate strength behavior of welded steel plates under biaxial compressive loads [J]. *Journal of Ship Research*, 2004, 48(1): 45–60.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Metallic materials —tensile testing —Part I: method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011 (in Chinese).

Experimental analysis on residual ultimate bearing capacity of thin plate with internal explosion dent damage under biaxial compression

AO Lei¹, SHI Zhizhong², ZHANG Lei¹, DING Ziqi², PEI Zhiyong^{*1}, WU Weiguo¹

1 Green & Smart River-Sea-Going Ship Cruise and Yacht Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: [**Objectives**] In modern naval warfare, advancements in weaponry have significantly increased the vulnerability of ships to explosion impacts. Precision-guided weapons, in particular, pose a significant threat, as internal explosions within ship cabins can cause extensive damage to thin-walled structures. This damage not only compromises the ship's structural integrity but also affects its overall functionality and safety. To accurately assess a ship's ability to withstand such damage and make informed battlefield decisions, it is crucial to evaluate the residual load-bearing capacity of damaged structures under complex sea conditions. This analysis is essential for evaluating the ship's damage tolerance and determining its ability to safely return to port. [**Methods**] This study focuses on the behavior of hull plates damaged by in-cabin explosions. A series of meticulously designed model tests were conducted, aiming to analyze the residual load-bearing capacity of thin plates exhibiting dent damage under biaxial compression. The use of biaxial compression is highly relevant, as it replicates the complex stress states experienced by ship hulls in actual sea conditions. To measure the detailed mechanical behavior of the damaged plates, the digital image correlation (DIC) method was employed. This advanced technique enabled the creation of a three-dimensional full-field strain measurement system, which recorded the out-of-plane deformation of the plates with high precision. By analyzing this data, the study explored the failure modes of dent-damaged thin plates under biaxial compression, illuminating the mechanisms through which such damage progresses and ultimately leads to structural failure. [**Results**] The experimental results provided significant insights into the behavior of damaged thin plates under biaxial compression. A key finding was that, regardless of the applied loading ratio, the presence of dent damage led to a substantial reduction in the residual load-bearing capacity of the thin plates. In some cases, this reduction reached up to 19.96%, demonstrating the severe impact of even minor damage on the structural performance of the plates. Furthermore, all tested plates ultimately failed due to significant plastic deformation at the intersection of the loading edges, which underscores the localized nature of the damage and its catastrophic consequences for structural integrity. Another key finding was that an increase in the load at one end of the biaxial compression resulted in a notable decline in the ultimate bearing capacity at the other end. [**Conclusions**] This study provides valuable insights into assessing the damage survivability of ships under complex stress conditions. The findings help naval personnel better understand the structural state of damaged ships, enabling them to make informed decisions regarding mission continuation or safe return to port. Additionally, the research provides a basis for future research focused on optimizing ship structural design and enhancing damage-tolerance capabilities. Overall, this study plays a vital role in ensuring the safety and operational effectiveness of ships in combat and their safe return to port.

Key words: explosions; internal explosion; dent damage; biaxial compression; full field strain measurement technology; residual ultimate strength; model test