

# 侧向强动冲击下冲击位置对薄壁圆柱壳 动态响应的影响\*

樊召帅<sup>1</sup>, 葛树宏<sup>2</sup>, 岳增申<sup>1,3</sup>, 彭宇翔<sup>1</sup>,  
焦建凯<sup>4</sup>, 刘建华<sup>4</sup>, 张钱城<sup>1</sup>

- (1. 西安交通大学 航天航空学院 复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 西安 710049;  
2. 西安航天动力研究所, 西安 710100;  
3. 香港理工大学 机械工程系, 香港 999077;  
4. 中国水利水电建设工程咨询西北有限公司, 西安 710100)

**摘要:** 采用有限元分析软件 ABAQUS/Explicit 研究泡沫子弹侧向冲击的冲击位置(偏置比)对 Q235 钢薄壁圆柱壳动态响应行为的影响. 基于已有的实验结果, 验证了有限元模型的准确性, 并通过该模型对比分析了不同偏置比下圆柱壳的动态变形演化、冲击侧与后侧冲击区域中心点的挠度值和圆柱壳的最终变形模式. 研究发现冲击侧冲击区域中心点的挠度均与冲击方向一致, 而后侧冲击区域中心点的挠度均与冲击方向相反; 圆柱壳的不对称变形模式随着偏置比的增大而更加明显. 进一步地, 讨论了不同偏置比下, 约束形式、初始动量及长径比对圆柱壳抗冲击能力的影响, 结果表明, 无论何种约束形式和初始动量大小, 偏置比的增大降低了圆柱壳两侧冲击区域中心点挠度的绝对值, 同时也减缓了后侧冲击区域中心点挠度在长径比影响下从凹陷到凸起的转变过程. 这种增强机制主要在于偏置比的增大显著提升了边界条件对圆柱壳的约束作用.

**关键词:** 薄壁圆柱壳; 侧向冲击; 泡沫子弹; 偏置比

**中图分类号:** O347 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450074

## Effects of Impact Positions on Dynamic Responses of Thin-Walled Cylindrical Shells Under Lateral Shock Loadings

FAN Zhaoshuai<sup>1</sup>, GE Shuhong<sup>2</sup>, YUE Zengshen<sup>1,3</sup>, PENG Yuxiang<sup>1</sup>,  
JIAO Jiankai<sup>4</sup>, LIU Jianhua<sup>4</sup>, ZHANG Qiancheng<sup>1</sup>

- (1. *State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P.R.China;*  
2. *Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, P.R.China;*  
3. *Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, P.R.China;*

\* 收稿日期: 2024-03-25; 修订日期: 2024-04-05

**基金项目:** 国家自然科学基金(12072250)

**作者简介:** 樊召帅(1999—), 男, 硕士生(E-mail: fanzhaoshuai@126.com);

岳增申(1997—), 男, 博士生(通讯作者. E-mail: yuezengshen@163.com).

**引用格式:** 樊召帅, 葛树宏, 岳增申, 彭宇翔, 焦建凯, 刘建华, 张钱城. 侧向强动冲击下冲击位置对薄壁圆柱壳动态响应的影响[J]. 应用数学和力学, 2025, 46(2): 175-186.

4. *China Water Conservancy & Hydropower Engineering Consulting Northwest Co., Ltd., Xi'an 710100, P.R.China*)

**Abstract:** The effects of impact positions (offset ratios) on the dynamic behaviors of Q235 steel thin-walled cylindrical shells under lateral impacts by foam projectiles were explored with finite element software ABAQUS/Explicit. Based on existing experimental results, the accuracy of the finite element model was validated, and the model was employed to conduct a comparative analysis of the dynamic deformation evolution, the deflections at mid-points of the impact region on the impact and rear sides, and the final deformation modes of the cylindrical shell under different offset ratios. The results show that, the deflections at the mid-point of the impact region on the impact side are consistent with the impact direction, while those on the rear side are in the opposite direction; the asymmetric deformation mode of the cylindrical shell becomes more pronounced as the offset ratio increases. Subsequently, the effects of constraint types, initial momentums, and length-to-diameter ratios on the impact resistance of the cylindrical shell under offset lateral impact were studied. The comparisons indicate that, regardless of the constraint type or the initial momentum, an increase in the offset ratio will reduce the absolute values of the deflections at the mid-point of the impact region on both sides, which will also slow down the transition process of deflections at the mid-point of the impact region on the rear side from indentation to bulging, under the influence of the length-to-diameter ratio. This enhancement mechanism is primarily attributed to the significant improvement of the constraining effect of boundary conditions on the cylindrical shell as the offset ratio increases.

**Key words:** thin-walled cylindrical shell; lateral shock loading; foam projectile; offset ratio

## 0 引言

薄壁圆柱壳具有优异的承载能力<sup>[1]</sup>、高能量吸收性能<sup>[2]</sup>以及良好的结构稳定性<sup>[3]</sup>,因此被广泛应用于多种工程领域,如车辆碰撞安全装置<sup>[4]</sup>、海上平台<sup>[5]</sup>、飞机舱段<sup>[6-7]</sup>和管道<sup>[8]</sup>等。在极端环境下,受撞击、爆炸等动态荷载的影响,这些设备和建筑设施经常受到侧向冲击的威胁,可能导致结构损坏、经济损失,甚至危及人民生命安全<sup>[9]</sup>。例如,英国安全执行局(HSE)的一份调查报告指出,由冲击引起的油气管道故障约占总故障事故的47%<sup>[10]</sup>,并且其中大部分是由侧向冲击引起的。

关于薄壁圆柱壳在侧向低速冲击载荷下的动态响应已有相应研究<sup>[11-16]</sup>。Jones等<sup>[17]</sup>通过落锤试验和理论分析总结了薄壁圆柱壳在低速冲击载荷下的理想化变形截面。研究表明,钢制薄壁圆柱壳在受到侧向低速冲击时主要通过四种塑性变形耗散能量:局部凹陷、整体弯曲、局部凹陷与整体弯曲的耦合以及轴向变形<sup>[18-19]</sup>。此外,局部凹陷和整体弯曲变形之间的耦合程度受圆柱壳几何参数(如直径与厚度比和长度与直径比)的影响显著<sup>[20]</sup>。除侧向低速冲击以外,一些研究还对侧向爆炸载荷和侧向弹道冲击下薄壁圆柱壳的最终变形进行了分析<sup>[21-23]</sup>,考虑了低速冲击理论中忽略的应变硬化、应变速率硬化和温度软化效应。圆柱壳表现出了I型破坏(局部塑性变形)和II型破坏(大非弹性变形),并出现少数III型破坏(包括与大非弹性变形相关的圆柱壳撕裂)。

以上研究通常考虑圆柱壳跨中位置受到侧向冲击载荷的情形,然而结构跨中并非是最有可能发生冲击的位置。例如,当结构垂直立于地面时,冲击更可能发生在接近地面的位置(如车辆撞击)。因此,研究冲击位置对圆柱壳动态响应的影响是非常必要的。然而,现有的研究主要集中在落锤等低速侧向冲击载荷<sup>[24]</sup>,对于相比低速冲击下结构动态响应存在显著差异的强动冲击载荷<sup>[18-23]</sup>,冲击位置对圆柱壳动态响应的影响分析仍然不足。因此,本研究采用了泡沫子弹侧向高速撞击圆柱壳的方法,观察不同撞击偏置比下圆柱壳的动态变形演化过程和最终变形破坏模式,从而分析侧向强动冲击载荷下冲击位置对金属薄壁圆柱壳动力学响应的影响。

## 1 数值预测

泡沫子弹冲击技术已被广泛应用于实验室尺度下的强动载荷冲击测试。高速运行的泡沫子弹撞击试样

时,其产生的压力-时间历程一定程度上有效地反映了空气或水下爆炸引起的冲击载荷特征<sup>[25]</sup>。通过适当调整泡沫子弹的冲击速度  $v_0$ 、长度  $l_f$  和密度  $\rho_f$ ,可以控制压力脉冲的大小和持续时间。在绝大多数实验场景下,泡沫子弹撞击样件后的回弹速度  $v_r$  相比冲击速度  $v_0$  较小时 ( $v_r/v_0 < 0.05$ ),传递给冲击目标的冲量与泡沫子弹的初始动量基本相等,即冲击目标单位面积获得的冲量为

$$I_0 \approx \rho_f l_f v_0. \quad (1)$$

本研究采用泡沫子弹冲击方法来探索冲击位置对金属薄壁圆柱壳在强动载荷作用下动态响应行为的影响。

### 1.1 有限元模型

使用商业有限元软件 ABAQUS 2020/Explicit 模拟泡沫子弹对金属薄壁圆柱壳在不同位置下的侧向冲击过程。图 1 展示了泡沫子弹对金属薄壁圆柱壳侧向偏置冲击的三维有限元模型。图 2 给出模型详细的几何参数,其中,薄壁圆柱壳的尺寸为长度  $L = 289$  mm,外径  $\Phi_o = 86$  mm,内径  $\Phi_i = 80$  mm。泡沫子弹的尺寸为长度  $l_f = 85$  mm,半径  $r_f = 28.5$  mm,刚体夹具深度为  $d_f = 25$  mm。基于对称性,模拟仅采用了二分之一模型,沿有限元模型的  $y$  轴施加对称边界条件<sup>[26]</sup>。薄壁圆柱壳和泡沫子弹均使用实体单元 (C3D8R) 进行网格划分,圆柱壳的网格大小为 1 mm,泡沫子弹的网格大小为 1.2 mm。将夹具设置为刚体,建模为具有夹具外部几何形状的空心壳体结构,并使用 R3D4 壳体单元进行网格划分,网格大小为 2 mm。夹具的平动和转动自由度均被约束,以模拟固定边界条件。薄壁圆柱壳与刚性夹具以及薄壁圆柱壳与泡沫子弹之间采用通用接触,并采用罚函数设置摩擦,摩擦因数为 0.2。每次模拟开始时,我们为泡沫子弹分配一个初始速度  $v_0$ ,对薄壁圆柱壳进行冲击。

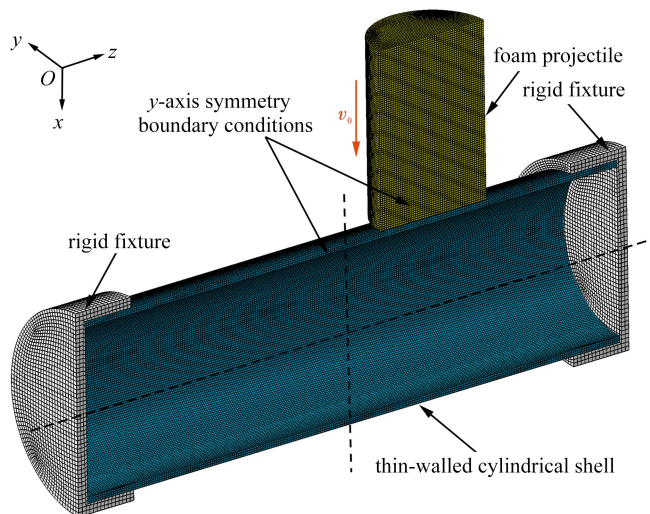


图 1 泡沫子弹偏置冲击金属薄壁圆柱壳的二分之一有限元模型

Fig. 1 The one-half finite element model for the foam projectile eccentrically impacting the metallic thin-walled cylindrical shell

定义偏置比  $l^*$ ,其为冲击中心位置到圆柱壳侧向中轴线的距离  $l_p$  与泡沫子弹能够达到离圆柱壳侧向中轴线的最远距离  $L/2 - r_f - l_c$  的比值,即

$$l^* = \frac{l_p}{L/2 - r_f - l_c}, \quad (2)$$

其中  $l_c$  为夹具影响区域,本文设置  $l_c$  为 26 mm 以防止夹具与泡沫子弹之间发生接触。

### 1.2 本构模型

薄壁圆柱壳采用 Q235 钢材,使用 Johnson-Cook (J-C) 本构模型来表征其受冲击过程中的大变形行为。该模型通常用于描述金属材料的非线性塑性行为,包括应变硬化、应变速率效应和热软化效应<sup>[27]</sup>。在 J-C 模型中,等效屈服应力表示为

$$\sigma_{eq} = [A + B(\varepsilon^p)^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (3)$$

其中  $A, B, n, C$  和  $m$  为材料参数,  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变速率,  $T$  为材料温度,  $T_m$  为材料熔化温度,  $T_r$  为室温。表 1 列出

了 Q235 材料的 J-C 本构模型参数,取自文献[28],且本研究未考虑热软化效应。

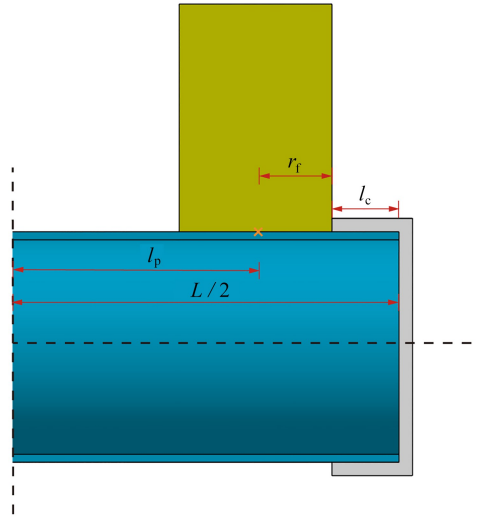


图2 泡沫子弹偏置冲击金属薄壁圆柱壳几何模型示意图

Fig. 2 Sketch of the geometric model for the foam projectile eccentrically impacting the metallic thin-walled cylindrical shell

表1 Q235 钢的 J-C 塑性模型参数

Table 1 The J-C plasticity model parameters of Q235

material	$\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	$E / \text{GPa}$	$\nu_e$	$A / \text{MPa}$	$B / \text{MPa}$	$n$	$C$	$\dot{\epsilon}_0 / \text{s}^{-1}$
Q235	7 800	200	0.3	293.8	230.2	0.578	0.065 2	0.002 1

泡沫铝子弹采用 ABAQUS 中的可压缩泡沫模型来模拟其力学性能,使用了文献[29]中准静态压缩测试的泡沫试样的密度 ( $\rho_f = 327.03 \text{ kg}/\text{m}^3$ ),弹性模量为  $E = 1 \text{ GPa}$ ,弹性 Poisson 比为  $\nu_e = 0.3$ ,塑性 Poisson 比为  $\nu_p = 0$ ,其塑性行为用如图 3 所示的其在  $0.0001 \text{ s}^{-1}$  应变率下的压缩应力-应变曲线进行描述.此外,忽略了泡沫铝的应变率效应。

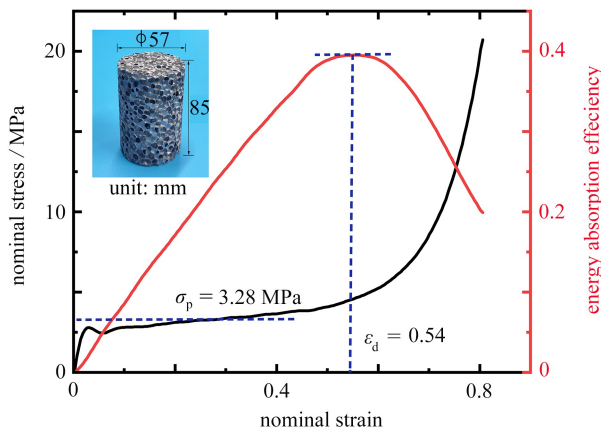


图3 泡沫铝的准静态压缩工程应力-应变曲线<sup>[29]</sup>

Fig. 3 Quasi-static compressive engineering stress vs. engineering strain curves of the aluminum (Al) foam<sup>[29]</sup>

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同。

### 1.3 模型有效性验证

通过数值仿真计算薄壁圆柱壳在不同冲击位置下受泡沫子弹冲击的动态力学行为.首先,验证数值仿真模型的准确性,将薄壁圆柱壳在不同动量下受泡沫子弹冲击跨中位置的仿真计算结果与已有文章的实验结果<sup>[29]</sup>放在一起,展示了实验测得的薄壁圆柱壳的破坏模式<sup>[29]</sup>与本文仿真计算所得破坏模式的对比,如图 4

所示.图 4(a)给出了冲击方向视图的破坏模式,仿真和实验结果均呈现出在冲击接触区域形成的局部凹陷和在侧壁形成的膨胀凸起,两种结果在凹陷形状、大小,侧壁凸起形状、大小等方面均没有明显差别;图 4(b)给出了侧向视图的破坏模式,仿真和实验结果均表现为在冲击侧形成局部凹陷和整体弯曲的耦合变形,后侧产生微小凹陷.本文仿真所得薄壁圆柱壳破坏模式与原文实验结果吻合良好.

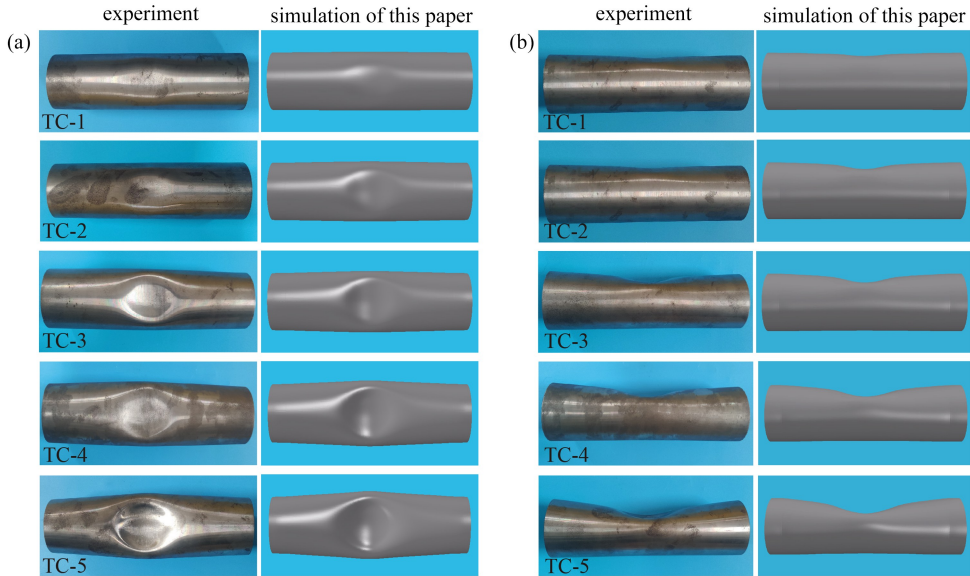


图 4 实验测得薄壁圆柱壳破坏模式<sup>[29]</sup>与本文仿真结果的对比

Fig. 4 Comparison of experimentally measured failure modes of thin-walled cylindrical shells<sup>[29]</sup> and the simulation results

图 5 展示了薄壁圆柱壳冲击侧中心点与后侧中心点挠度值的仿真与实验结果对比,结果表明,冲击侧中心点和后侧中心点的挠度值的仿真与实验结果依然吻合较好,最大误差值不超过 20%.

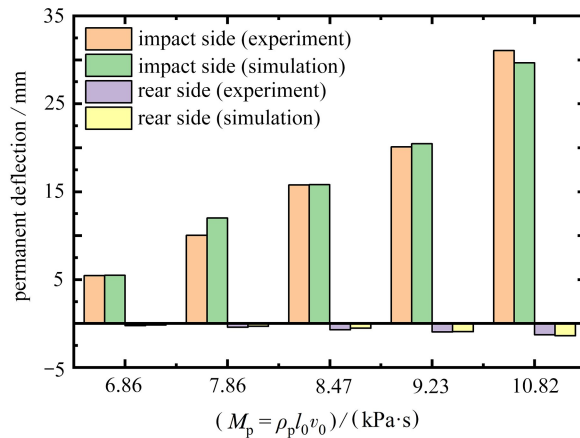


图 5 实验测得薄壁圆柱壳中心点最终挠度值<sup>[29]</sup>与本文仿真结果的对比

Fig. 5 Comparison of the experimentally measured permanent mid-point deflections of thin-walled cylindrical shells<sup>[29]</sup> and the simulation results

## 2 薄壁圆柱壳的动态力学行为

为了更好地反映冲击位置对薄壁圆柱壳动态响应行为的影响,首先,始终将泡沫子弹的速度设置为  $v_0 = 360 \text{ m/s}$ ,即动量  $M_p = 10.01 \text{ kPa}\cdot\text{s}$ ,计算分析不同偏置比 ( $l^* = 0, 0.5, 0.75, 1$ ) 对圆柱壳动态行为的影响.

### 2.1 动态变形演化

图 6 给出了相同动量 ( $M_p = 10.01 \text{ kPa}\cdot\text{s}$ )、不同偏置比情况下薄壁圆柱壳受泡沫子弹冲击的动态变形过

程.由于偏置比  $l^* = 0.25, 0.75$  与偏置比  $l^* = 0.5$  下的结果相似,为简洁起见,仅给出了偏置比  $l^* = 0, 0.5$  以及  $l^* = 1$  下的仿真计算结果.图中标注时间的起始设定为泡沫子弹冲击圆柱壳的瞬间,结果显示,不同冲击位置的薄壁圆柱壳具有一些相似响应特征.其变形过程可大致分为三个阶段:第一阶段,冲击侧产生局部凹陷;第二阶段,冲击侧的局部凹陷持续扩展,整体弯曲随之出现并逐渐加剧,圆柱壳发生局部凹陷与整体弯曲的耦合变形,后侧出现微小凹陷;最后阶段,变形达到最大,之后开始回弹,最终泡沫子弹脱离薄壁圆柱壳.具体而言,当泡沫子弹冲击薄壁圆柱壳时,壳体冲击侧获得初速度并开始变形,从而在冲击区域产生局部凹陷.随后在冲击区域中心及边缘形成“三塑性铰”<sup>[30-31]</sup>,即在冲击位置的上方、冲击位置中心处、冲击位置的下方分别形成塑性铰 I、塑性铰 II、塑性铰 III.塑性铰 I 和塑性铰 III 沿轴向传播,由初始出现位置向夹持方向扩展,引起冲击侧出现整体弯曲,局部凹陷和整体弯曲的耦合构成了冲击侧的总变形.塑性铰 II 也沿轴向传播,使得侧壁逐渐凸起,同时带动壳体后侧出现微小凹陷.在三个偏置比下,冲击侧均在大约 0.55 ms 时达到最大变形,随后是弹性回弹和振荡过程.

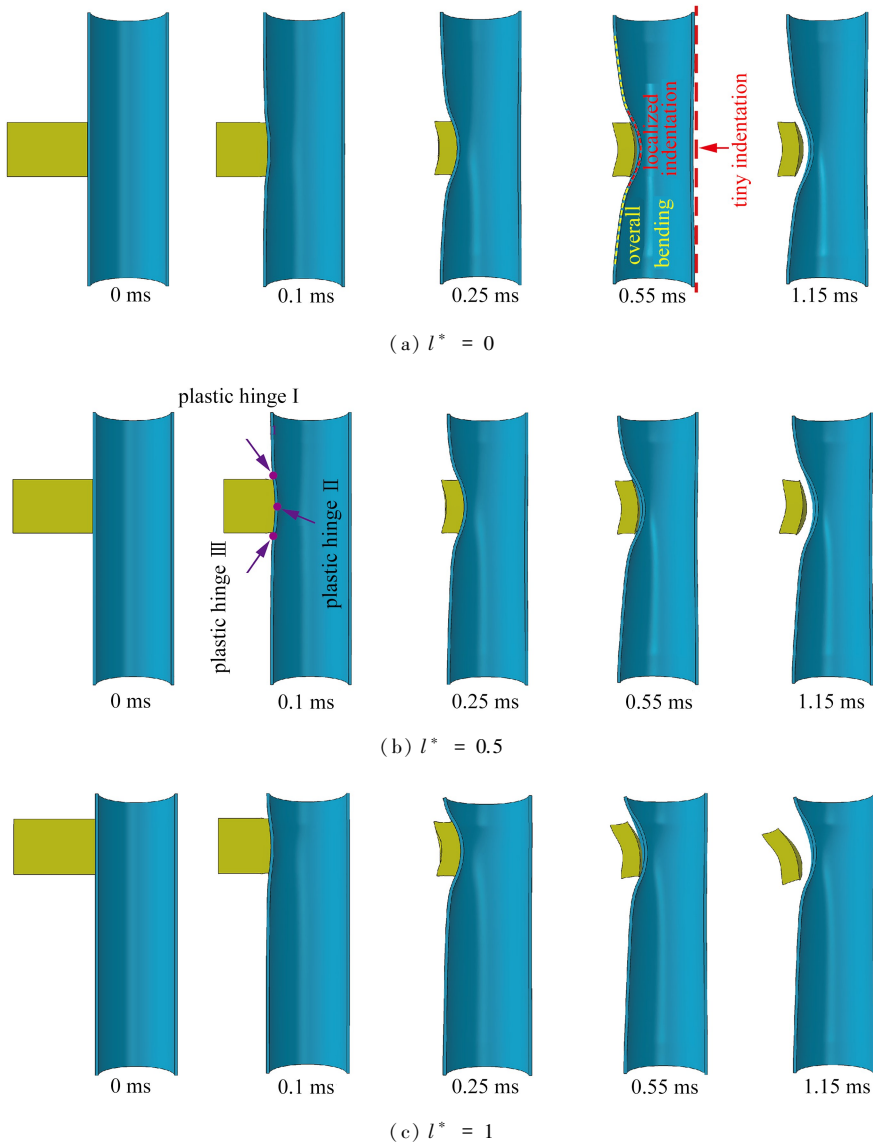


图6 不同偏置比下薄壁圆柱壳在初始动量  $M_p = 10.01 \text{ kPa}\cdot\text{s}$  作用下的动态变形演化

Fig. 6 Dynamic deformation evolutions of thin-walled cylindrical shells under initial momentum  $M_p = 10.01 \text{ kPa}\cdot\text{s}$  with different impact offset ratios

不同偏置比也导致薄壁圆柱壳的动态响应存在一些差异.对于偏置比  $l^* = 0$  的圆柱壳,如图 6(a) 所示,冲击侧形成局部凹陷后,塑性铰传播引起的局部凹陷与整体弯曲的耦合变形关于冲击方向对称.而对于偏置

比  $l^* = 0.5$  的情况,如图 6(b)所示,在 0.1 ms 时,局部凹陷形成后,随后塑性铰 I、塑性铰 III 沿轴向传播,在 0.25 ms 时出现不对称的耦合变形,随着塑性铰的持续传播,圆柱壳偏置方向的整体弯曲加剧,偏置反方向的整体弯曲变得平缓,最终形成的不对称变形更加明显.此外,对于偏置比  $l^* = 1$  的圆柱壳,其非对称变形情况类似,并且由于偏置程度更大,塑性铰 I 形成位置更靠近端部,很快传递到圆柱壳边界,导致圆柱壳在偏置方向几乎没有整体弯曲,只存在局部凹陷,且偏置反方向的整体弯曲更加平缓.

### 2.2 最终变形/失效模式

图 7(a)展示了数值仿真得到的薄壁圆柱壳冲击侧的永久挠度轮廓曲线,结果表明随着偏置比增大,冲击侧的永久挠度值减小,局部凹陷程度减弱.图 7(b)展示了薄壁圆柱壳冲击侧冲击中心点挠度值的时间历程曲线,此处,冲击侧冲击中心点是指泡沫子弹中心点接触到圆柱壳的位置,即偏置处.相应地,后侧冲击中心点则是其相对应的圆柱壳后壁的点.为简化起见,如无特殊说明,后文均称为中心点,不再赘述.仿真计算的永久挠度值则是在挠度时间历程达到最大挠度值后,通过计算几个弹性振荡周期(从波谷到波峰)的平均值得出.相比于无偏置的圆柱壳,偏置比  $l^* = 1$  的圆柱壳的冲击侧中心点永久挠度值减小了约 20%.

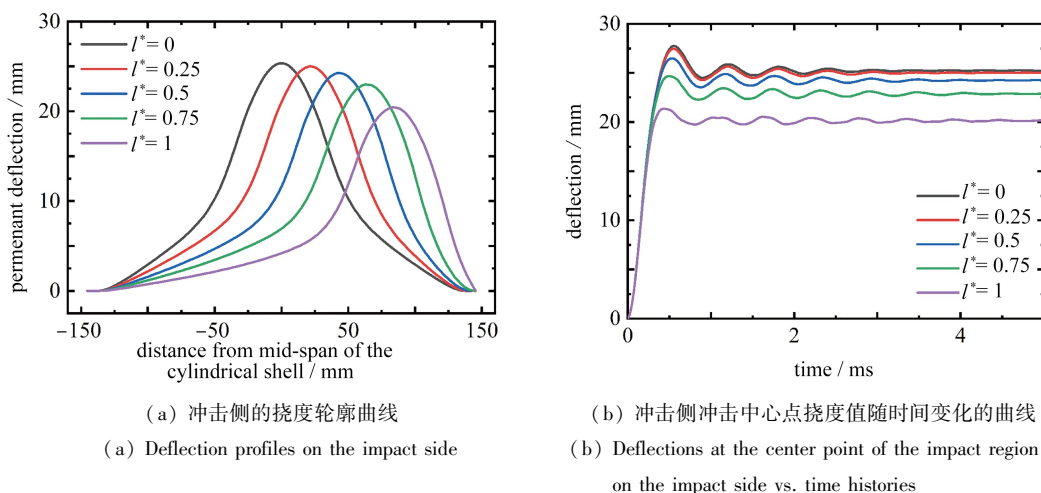
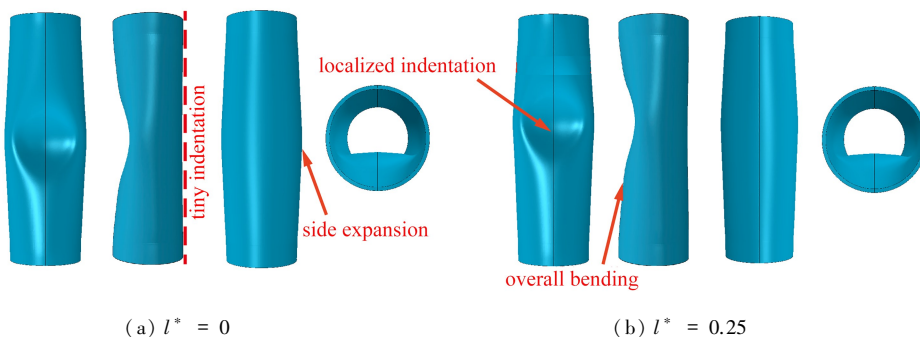


图 7 金属薄壁圆柱壳受侧向泡沫子弹在不同偏置比下冲击的数值仿真结果

Fig. 7 Numerical simulation results of metallic thin-walled cylindrical shells laterally impacted by foam projectiles at different impact offset ratios

图 8 展示了薄壁圆柱壳完整模型的最后变形模式(图 8(a)—8(e),通过镜像得到)和二分之一模型的最后变形模式(图 8(f),调整放大变形系数为 2.75 倍),共包括四种主要的变形模式:冲击侧的局部凹陷、冲击侧的整体弯曲、后侧的微小凹陷和侧壁的膨胀凸起.为了清晰地展示后侧的微小凹陷,将薄壁圆柱壳的上下端部连接起来绘制基准线.

在冲击载荷作用下,圆柱壳主要表现为冲击侧的局部凹陷与整体弯曲的耦合变形.由图 8(f)可以看出:对于无偏置的冲击,圆柱壳呈现出对称的局部凹陷和整体弯曲耦合变形;而在偏置冲击下,圆柱壳呈现出不对称的耦合变形;当偏置比  $l^* = 1$  时,圆柱壳偏置方向的整体弯曲几乎消失.此外,圆柱壳后侧还存在一个相对微小的凹陷,其主要是由周向膜力(因变形而产生的沿薄壁圆柱壳圆周方向的内力)引起的.



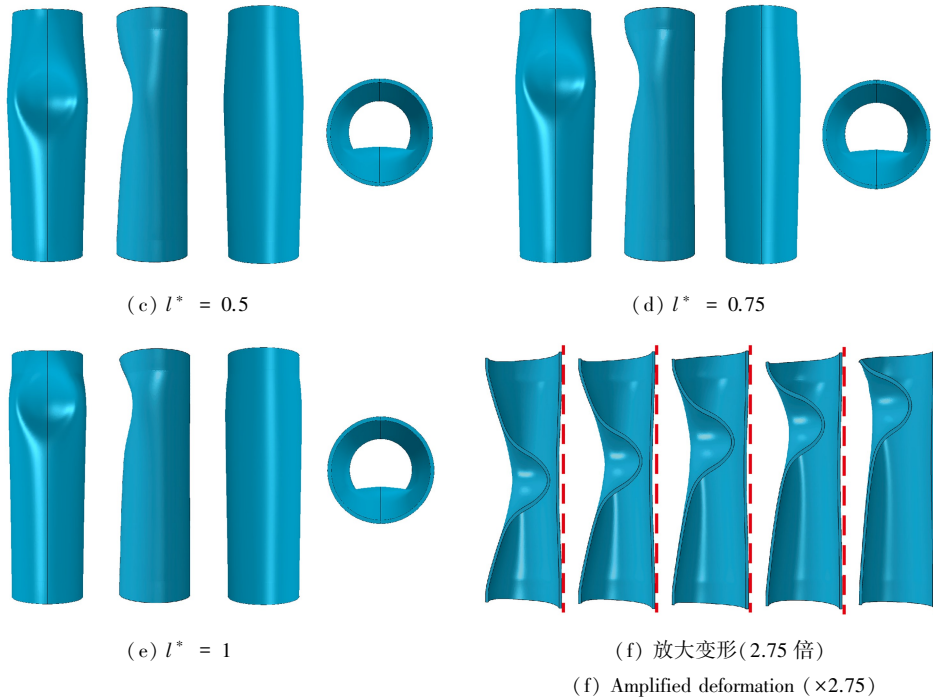


图8 金属薄壁圆柱壳在不同偏置比下受泡沫子弹侧向冲击的最终变形模式

Fig. 8 Final deformation modes of metallic thin-walled cylindrical shells laterally impacted by foam projectiles at different impact offset ratios

在冲击侧的正视图中,我们观察到了侧壁的膨胀凸起,这是由薄壁圆柱壳的侧向冲击载荷和周向膜力共同作用引起的<sup>[20,32-34]</sup>。此外,其膨胀程度从冲击中心到夹持端沿跨度递减。随着偏置比增加,冲击侧的局部凹陷、侧壁的膨胀凸起、后侧的微小凹陷逐渐减小,而偏置方向的整体弯曲加剧,偏置反方向的整体弯曲则变得平缓。总之,薄壁圆柱壳的最终变形模式由局部凹陷(冲击侧)、微小凹陷(后侧)、整体弯曲(冲击侧)和膨胀凸起(侧壁)耦合决定,其变形程度随初始冲击位置的变化而变化。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 约束形式的影响

现有研究表明,约束形式对圆柱壳侧向冲击的响应具有显著影响<sup>[35]</sup>。由于薄壁圆柱壳在侧向载荷作用下会瞬时缩短,此现象可能导致结构内部局部失稳,进而引发严重的变形甚至破坏<sup>[30]</sup>。因此,开展不同约束形式下圆柱壳侧向冲击研究,以探索工程实际中发生的不同情形的冲击事故,有助于深入了解圆柱壳结构在冲击载荷下的力学响应。本小节将约束形式分为两种:约束形式1,仅固定两个夹具,再通过夹具约束薄壁圆柱壳,夹具和圆柱壳之间仅设置接触而无绑定;约束形式2,固定两个夹具,夹具和圆柱壳之间设置接触和绑定约束。

结果对比如图9所示,两种约束形式下圆柱壳的永久挠度值存在明显差异。可以看出:在同一约束形式下,随着偏置比增大,冲击侧和后侧中心点挠度值的绝对值减小。不同约束形式下,圆柱壳的挠度值随偏置比变化的响应趋势基本一致,但挠度值大小差异明显。在相同偏置比下,约束形式2显著减小了圆柱壳冲击侧中心点挠度值,相比约束形式1,降幅达18%至28%。这是由于对圆柱壳与夹具施加绑定约束后,圆柱壳发生大变形时会产生轴力效应或膜力效应<sup>[36]</sup>,从而显著提高了圆柱壳在侧向冲击下的承载能力。因此,约束形式2适用于圆柱壳结构承受较大冲击载荷的工况,即施加较强的固定约束。然而,约束形式1由于简单便捷而被广泛使用,因此本文后续的讨论均在约束形式1的基础上开展。

#### 3.2 初始动量的影响

图10展示了初始动量对金属薄壁圆柱壳冲击侧和后侧中心点挠度值的影响。泡沫子弹的初始动量  $M_p$



分别为 6.67 kPa·s, 7.78 kPa·s, 8.90 kPa·s, 10.01 kPa·s。结果表明,在相同动量下,随着偏置比增大,冲击侧中心点挠度值逐渐减小,后侧中心点挠度均与冲击方向相反(图中显示为负值),其大小亦逐渐减小。即偏置比越大,冲击侧和后侧中心点挠度值的绝对值越小。这是由于随着偏置比增加,冲击区域向约束位置靠近,边界条件产生的约束作用增强,导致结构变形减小。在相同的偏置比下,冲击侧的中心点挠度值随着初始动量的增加而增加,而后侧中心点挠度值则随初始动量的增加沿冲击作用方向的反方向增加。然而,随着偏置比的增大,动量对后壁中心点挠度值的影响显著减弱。

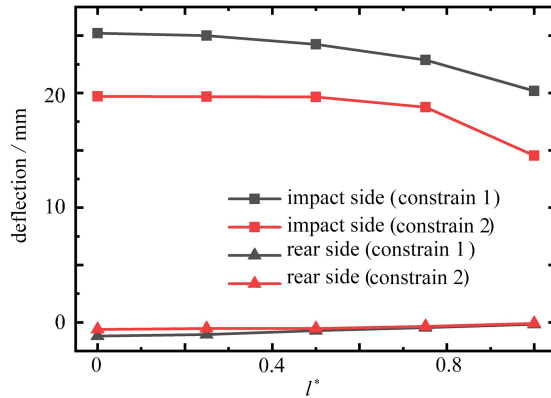
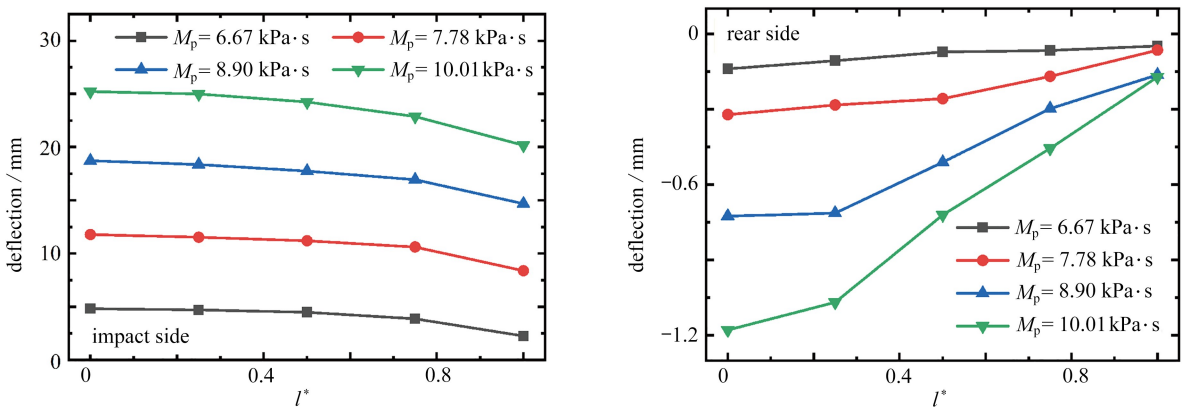


图 9 不同约束形式下冲击侧和后侧冲击中心点挠度值与偏置比的关系

Fig. 9 Effects of impact offset ratios on the center-point deflections on impact and rear sides of the metallic thin-walled cylindrical shell under different constraints



(a) 冲击侧

(a) The impact side

(b) 后侧

(b) The rear side

图 10 不同初始动量下冲击侧和后侧中心点挠度值与偏置比的关系

Fig. 10 Effects of impact offset ratios on the center-point deflections on impact and rear sides of the metallic thin-walled cylindrical shell under different initial impact momentums

### 3.3 长径比的影响

长径比  $k$  定义为薄壁圆柱壳的长度与外径之比。如图 11 所示,在保持所有其他几何参数不变的情况下,逐渐增加薄壁圆柱壳的长度,使其长径比  $k$  分别为 3.36, 5.04, 6.72, 8.4。图 11(a) 表明,在相同长径比下,偏置比越大,冲击侧中心点挠度值越小。同时,在相同偏置比下,随着长径比增大,冲击侧中心点挠度值也减小。这可能是因为更大的长径比下,圆柱壳受到冲击载荷时更容易产生振荡缓冲,可以更有效地吸收和分散冲击载荷,降低结构的变形程度,从而减小冲击侧中心点的挠度值。此外,从图 11(b) 可以看出,在相同偏置比下,随着长径比增大,后侧的中心点挠度值向冲击方向增大(挠度值由负转正并持续增大)。这表明,随着长径比增加,后壁的变形逐渐从微小凹陷转为凸起,并且,偏置比越大,薄壁圆柱壳后壁从微小凹陷到凸起变形的转变越缓慢。这是由于偏置比增大,边界条件对冲击位置的约束作用变得更加显著。

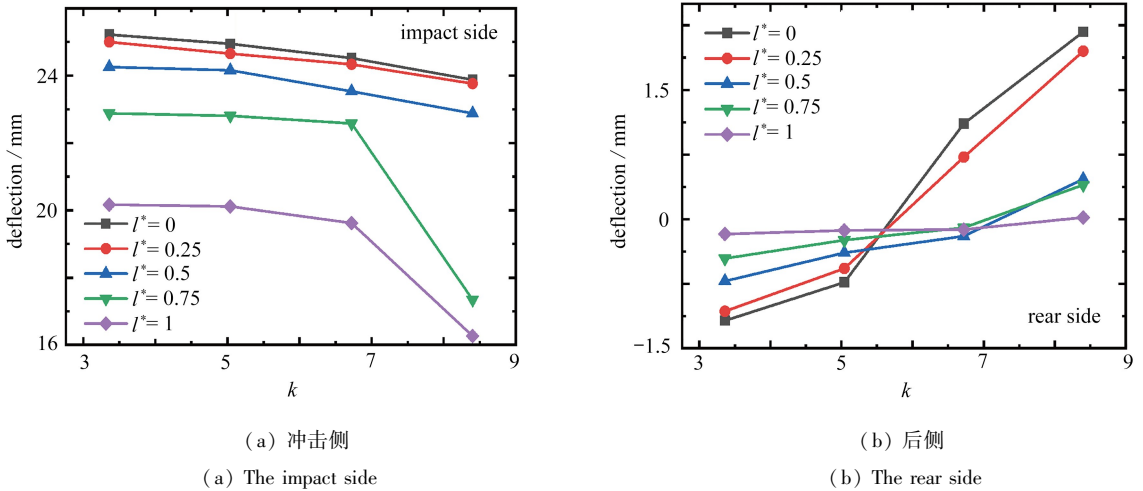


图 11 不同偏置比下冲击侧和后侧中心点挠度值与长径比的关系

Fig. 11 Effects of length-to-diameter ratios on the center-point deflections of impact and rear sides of the metallic thin-walled cylindrical shell under different impact offset ratios

## 4 结 论

本文通过数值模拟研究了金属薄壁圆柱壳承受侧向强动冲击时,沿轴向的冲击位置对其动态力学响应的影响.研究发现,薄壁圆柱壳受偏置冲击时会产生非对称变形模式,并进一步探讨了边界约束形式、初始动量大小以及结构长径比对其变形大小的影响.本文对于评估金属薄壁圆柱壳在强动载荷作用下的结构安全性具有现实意义.主要结论如下:

- 1) 不同偏置比下,薄壁圆柱壳承受高速侧向冲击载荷时产生四种主要变形:冲击侧的局部凹陷、冲击侧的整体弯曲、后侧的微小凹陷和侧壁的膨胀凸起.偏置比会显著影响薄壁圆柱壳局部凹陷与整体弯曲的程度,同时也导致了“三塑性铰”的非对称性特征.
- 2) 不同的约束方式导致薄壁圆柱壳的侧向承载力差异显著,绑定约束会增强薄壁圆柱壳的侧向抗冲击性能.
- 3) 初始动量影响薄壁圆柱壳的变形大小,冲击侧和后侧中心点挠度值的绝对值随着初始动量增加而增加.然而,随着偏置比增大,初始动量对后壁中心点挠度值的影响显著减弱.
- 4) 随着长径比增大,薄壁圆柱壳的冲击侧中心点挠度值降低,后侧中心点挠度值则由负转正(变形从微小凹陷转变为凸起),并且偏置比越大,其转变过程越缓慢.

## 参考文献 (References):

- [1] 沈志远. 含裂纹薄壁圆管的承载力学特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022. (SHEN Zhiyuan. Study on mechanical load-bearing characteristics of cracked thin-walled pipe[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. (in Chinese))
- [2] 邹广平, 闫安石, 唱忠良, 等. 金属薄壁夹层结构变形形式及吸能特性研究[J]. 机械强度, 2023, 45(5): 1249-1253. (ZOU Guangping, YAN Anshi, CHANG Zhongliang, et al. Study on deformation form and energy absorption characteristics of metal thin-walled sandwich structure[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2023, 45(5): 1249-1253. (in Chinese))
- [3] 洪金昌. 冲击载荷作用下圆柱壳支承结构的动态响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021. (HONG Jinchang. Analysis on dynamic response of cylindrical shell supporting structure under impact load[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese))
- [4] POONAYA S, TEEBOONMA U, THINVONGPITUK C. Plastic collapse analysis of thin-walled circular tubes

- subjected to bending[J]. *Thin-Walled Structures*, 2009, **47**(6/7): 637-645.
- [5] ZHANG R, ZHI X D, FAN F. Plastic behavior of circular steel tubes subjected to low-velocity transverse impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, **114**: 1-19.
- [6] SONG K, LONG Y, JI C, et al. Plastic deformation of metal tubes subjected to lateral blast loads[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, **2014**: 250379.
- [7] 陈卫, 汤智宏, 彭林欣. 基于分层法的功能梯度三明治壳线性弯曲无网格分析[J]. *应用数学和力学*, 2024, **45**(5): 539-553.(CHEN Wei, TANG Zhihong, PENG Linxin. Linear bending analysis of functionally graded sandwich shells with the meshless method based on the layer-wise theory[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, **45**(5): 539-553.(in Chinese))
- [8] WEIHS D, RITTEL D. Off-center high velocity impact on cylindrical pipes and shells[J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2021, **7**(4): 526-537.
- [9] MOHAMMAD Z, GUPTA P K, BAQI A, et al. Energy dissipation characteristics of single curvature metallic shells subjected to ballistic impact[J]. *European Journal of Mechanics A: Solids*, 2021, **89**: 104279.
- [10] PARLOC 92. The update of loss of containment data for offshore pipelines; OTH-93-424[R]. 1994.
- [11] KHALILI S M R, SOROUSH M, DAVAR A, et al. Finite element modeling of low-velocity impact on laminated composite plates and cylindrical shells[J]. *Composite Structures*, 2011, **93**(5): 1363-1375.
- [12] CHEN K, SHEN W Q. Further experimental study on the failure of fully clamped steel pipes[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, **21**(3): 177-202.
- [13] KARAMANOS S A, ANDREADAKIS K P. Denting of internally pressurized tubes under lateral loads[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, **48**(10): 1080-1094.
- [14] LU G Y, ZHANG S Y, LEI J P, et al. Dynamic responses and damages of water-filled pre-pressurized metal tube impacted by mass[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, **34**(10): 1594-1601.
- [15] YU J X, ZHAO Y Y, LI T Y, et al. A three-dimensional numerical method to study pipeline deformations due to transverse impacts from dropped anchors[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, **103**: 22-32.
- [16] BROOKER D C. Denting of pressurised pipelines under localised radial loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, **46**(12): 1783-1805.
- [17] JONES N, BIRCH S E, BIRCH R S, et al. An experimental study on the lateral impact of fully clamped mild steel pipes[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part E): Journal of Process Mechanical Engineering*, 1992, **206**(2): 111-127.
- [18] WATSON A R, REID S R, JOHNSON W, et al. Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading, II: experimental study of the crushing of circular tubes by centrally applied opposed wedge-shaped indenters[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1976, **18**(7/8): 387-397.
- [19] WATSON A R, REID S R, JOHNSON W. Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading, III: further experiments on the bending of simply supported tubes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1976, **18**(9/10): 501-502.
- [20] CHRISTOFOROU A P, SWANSON S R. Analysis of simply-supported orthotropic cylindrical shells subject to lateral impact loads[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1990, **57**(2): 376.
- [21] CORBETT G G, REID S R, JOHNSON W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, **18**(2): 141-230.
- [22] LI S, YU B, KARAGIOZOVA D, et al. Experimental, numerical, and theoretical studies of the response of short cylindrical stainless steel tubes under lateral air blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, **124**: 48-60.
- [23] WU J, JI C, LONG Y, et al. Dynamic responses and damage of cylindrical shells under the combined effects of fragments and shock waves[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, **113**: 94-103.
- [24] ZHU L, LIU Q, JONES N, et al. Experimental study on the deformation of fully clamped pipes under lateral impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, **111**: 94-105.

- [25] RADFORD D D, DESHPANDE V S, FLECK N A. The use of metal foam projectiles to simulate shock loading on a structure[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, **31**(9): 1152-1171.
- [26] YUE Z, WANG X, HE C, et al. Elevated shock resistance of all-metallic sandwich beams with honeycomb-supported corrugated cores[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, **242**: 110102.
- [27] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983, **21**: 541-548.
- [28] 郭子涛, 高斌, 郭钊, 等. 基于 J-C 模型的 Q235 钢的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2018, **38**(4): 804-810. (GUO Zitao, GAO Bin, GUO Zhao, et al. Dynamic constitutive relation based on J-C model of Q235 steel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, **38**(4): 804-810. (in Chinese))
- [29] FAN Z S, GE S H, YUE Z S, et al. Dynamic response of clamped metallic thin-walled cylindrical shells under lateral shock loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, **200**: 111922.
- [30] 张荣. 建筑用圆钢管构件侧向冲击响应及失效机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. (ZHANG Rong. Dynamic response and failure mechanism of structural tubular steel members subjected to transverse impact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese))
- [31] REID S R, WANG B, HUA Y L. Triple plastic hinge mechanism for a bent cantilever beam subjected to an out-of-plane tip force pulse of finite duration[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, **16**(1): 75-93.
- [32] JONES N. *Structural Impact*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.
- [33] JONES N. The influence of large deflections on the behavior of rigid-plastic cylindrical shells loaded impulsively[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1970, **37**(2): 416-425.
- [34] TIMOSHENKO S P, GERE J M. *Theory of Elastic Stability*[M]. 2nd ed. Mineola, NY: Dover Publications, 2009.
- [35] ZEINODDINI M, PARKE G A R, HARDING J E. Axially pre-loaded steel tubes subjected to lateral impacts: an experimental study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, **27**(6): 669-690.
- [36] LU G X, YU T X. *Energy Absorption of Structures and Materials*[M]. Cambridge: Woodhead, 2003.