

对轴向冲击圆柱壳局部屈曲及整体失稳的数值模拟分析

赵广臣

(太原理工大学 阳泉学院, 山西 阳泉 045000)

摘要:使用有限元程序 LS-DYNA 对不同加载情况圆柱壳的动力响应进行数值模拟,得到圆柱壳未发生局部屈曲点处的应变.数值模拟结果与实验符合较好.数值模拟所得到的未发生局部屈曲处应变表明:当壳发生局部屈曲时,整个壳的未屈曲部位处于塑性状态,随后壳会发生弹性卸载,并发生弹性振动,直至静止.

关键词:圆柱壳屈曲;数值模拟;整体失稳;轴向冲击

中图分类号: O34 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.024

Computer simulation on dynamical buckling and whole collapse of cylindrical shell under axial impact

ZHAO Guang-chen

(Institute of Yangquan, Taiyuan University of Technology, Yangquan 045000, China)

Abstract: The computer simulation on dynamic buckling and whole collapse of cylindrical shell under different axial impact was carried out using LS-DYNA. The numerical results and the experimental results showed good agreement. The strains of the points which were located in the middle of the local buckling cylindrical shells were obtained. The strains showed that the local buckling cylindrical shells were in the plastic stage and generated elastic vibration subsequently until standstill.

Key words: cylindrical shell buckling; computer simulation; whole collapse; axial impact

0 引言

轴向冲击下的金属圆柱壳一般有稳定的动力渐近屈曲并且行程较长,这样的特性符合能量吸收结构和材料选择的一般原则,所以轴向冲击下的圆柱壳的屈曲行为一直是人们关注的问题. A. L. Florence 等^[1]确立了柱壳在轴向冲击下发生屈曲的阈速度概念,利用放大函数法得到的阈速度和屈曲半波数与实验符合较好. N. Jones 等^[2]对轴向冲击下的柱壳进行了深入研究,提出了动力渐进屈曲和动

力塑性屈曲的概念. R. Wang 等^[3]在柱壳动力塑性屈曲方面进行了研究,提出了第 2 临界速度的概念. D. Karagiozova^[4-5]的研究表明,当本构关系是应变率敏感性的,圆柱壳只会发生动力渐进屈曲,尽管一些实验结果支持了这一观点,但仍需要进一步验证.至今,动力渐进屈曲和动力塑性屈曲的发生条件和机理还不是十分清楚.一般认为:在低速撞击下($V_0 < 5$ m/s)金属圆柱壳会发生动力渐进屈曲;在高速冲击作用下,圆柱壳则会发生动力塑性屈曲和动力渐进屈曲.显然冲击速度对壳的屈曲是有

影响的. 另外壳的材料特性对壳的屈曲模态也有影响, 圆柱壳的动力屈曲还需要做更多的研究. 施连会等^[6-7]利用哈密顿原理和相邻平衡准则推导出了圆柱壳非轴对称弹性动力屈曲控制方程, 利用差分方法求解了包含双特征参数的动力屈曲控制方程; 运用有限元特征值分析方法对应力波作用下圆柱壳塑性轴对称动力失稳问题进行了研究; 通过引入圆柱壳动力失稳时的波前约束条件实现了此类问题的有限元特征值解法. 数值模拟技术在轴向冲击圆柱壳屈曲行为应用越来越重要, 显式有限元技术例如 LS-DYNA 的数值分析方法得到了日益广泛的应用, 在很大程度上代替了实验研究. 但应用 LS-DYNA 程序对轴向冲击圆柱壳进行计算的文献大多是假设壳只发生轴对称屈曲从而只得到了轴对称的屈曲模态^[8-9]. 本文拟使用有限元程序 LS-DYNA 对不同加载情况圆柱壳的动力响应进行数值模拟, 以期得到与实验结果具有一致性的屈曲模态及圆柱壳未发生局部屈曲点处的应变.

1 有限元分析的力学模型

本文使用 LS-DYNA 完成冲击载荷的初始速度为 V_0 的质量块冲击的圆柱壳屈曲的数值模拟. 其中, 圆柱壳上下端的约束条件均为自由, 圆柱壳的单元类型为 SHELL, 冲击质量块和底座选取为实体单元, 圆柱壳自身接触定义为自动单面接触且摩擦系数为 0, 底座与圆柱壳的接触、冲击质量块与圆柱壳的接触定义为自动面面接触且摩擦系数为 0.25. 考虑到壳长或者加载条件不同时, 实际接触刚度会有差别, 本文所采用的数值模型的接触刚度也作了相应的修正. 圆柱壳所采用矩形单元大小为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 经过试算, 采用更小的单元尺寸除了计算时间更长, 圆柱壳的屈曲模态或者失稳模态没有变化. 底座和冲击质量块的材料采用刚体, 圆柱壳的本构关系采用 LS-DYNA3 号材料模型, 圆柱壳的密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 210 GPa , 强化模量为 763 MPa , 屈服应力为 285 MPa . 本文数值模拟通过调节冲击质量块的初始冲击速度 V_0 与实验中的不同冲击高度 H 来匹配, 数值模拟中的圆柱壳几何尺寸及所加载荷与实验都是相同的. 实验中的试件为无缝圆柱壳, 外径为 44 mm , 壁厚为 1.0 mm , 试件的长度 L 分别为 440 mm , 660 mm 和 880 mm . 对于不同长度的圆柱壳, 冲击高度 H 分别采用 $1\ 000\text{ mm}$ 和

$3\ 000\text{ mm}$, 初始冲击速度 $V_0 = 4.47\text{ m/s}$ 和 7.75 m/s . 数值模拟实验各试件长度与工况见表 1.

表 1 数值模拟实验各试件长度与工况

试件编号	L/mm	$V_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	H/mm
1	440	4.47	1 000
2	440	7.75	3 000
3	660	4.47	1 000
4	660	7.75	3 000
5	880	4.47	1 000
6	880	7.75	3 000

圆柱壳的轴向冲击实验是采用 DHR-9401 落锤式冲击加载试验机对不同长度的钢制圆柱壳进行冲击加载的. DHR-9401 落锤式冲击加载试验机总高度为 13.47 m , 有效落程为 12.6 m , 最大冲击速度为 15.7 m/s , 最大冲击动能为 $29\ 500\text{ J}$. 该落锤结构合理, 制作精细, 能量耗散极小, 锤体下落平稳, 动力重复性好, 冲击速度误差 $< 0.2\%$. 落锤质量可在 $1.9 \sim 240\text{ kg}$ 内调整, 与不同高度匹配, 可满足中低速大冲击能量的撞击试验要求.

2 数值模拟与实验结果对比

利用上述有限元模型对表 1 中各种实验工况下圆柱壳的屈曲响应进行数值模拟, 得到的圆柱壳屈曲模态与实验所得到圆柱壳屈曲模态进行对比, 结果如图 1 所示.

由图 1 可以看出, 本文用来模拟轴向冲击圆柱壳屈曲行为所采用的有限元模型是有效的, 所得结果是可靠的. 为了得到发生局部屈曲圆柱壳未屈曲部位的响应状态, 本文得到了有限元模型发生局部屈曲试件中部的轴向应变和曲线(见图 2). 可以看出, 发生局部屈曲试件的未屈曲部位的响应状态可以分为 3 个阶段: 弹塑性变形阶段、弹性卸载阶段和弹性振动阶段. 通过比较试件 1, 试件 3 与试件 5 中部轴向应变曲线可知, 对于相同加载工况的不同长度圆柱壳, 较长壳轴向的塑性残余变形更大. 通过对比试件 1 与试件 2 的中部轴向应变曲线可知, 对于同一个圆柱壳, 当加载速度较大时, 未屈曲部位的塑性残余变形也较大, 试件 5 与试件 6 中部轴向应变曲线对比也可以得到同样的结果.

3 结论

本文采用三维有限元模型对中低速轴向冲击钢制圆柱壳的屈曲行为进行了数值模拟, 得到与实验结果吻合良好的屈曲模态, 说明本文所采用的三维

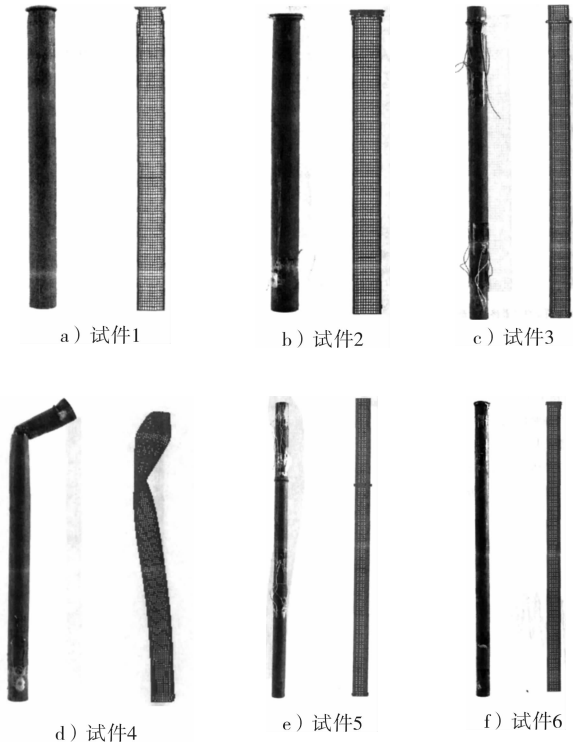


图1 试件1—6实验(左)与数值模拟(右)圆柱壳屈曲模态对比

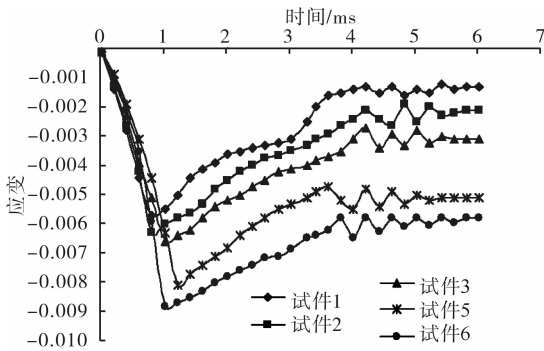


图2 局部屈曲试件中部轴向应变

有限元模型是有效和可靠的. 本文通过数值模拟结果得到的发生局部屈曲圆柱壳中部未屈曲部位的应变时程曲线表明, 当壳发生局部屈曲时, 整个壳的未屈曲部位处于塑性状态, 随后壳会发生弹性卸载, 并发生弹性振动, 直至静止. 最终的残余塑性应变和圆柱壳的长度及加载条件有关.

参考文献:

[1] Florence A L, Goodier J N. Dynamic plastic buckling of cylindrical shells in sustained axial compressive[J]. ApplMech, 1968, 35(1):80.

[2] Jones N. Structural Impact[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

[3] Wang R, Han M B, Huang Z P, et al. An experimental study on the dynamic axial plastic buckling of a cylindrical shell[J]. Int J Impact Engng, 1983(1):249.

[4] Karagizova D. Inertia effects on some crashworthiness parameter for cylindrical shell under axial impact[J]. International Journal of Crashworthiness, 2001, 6(4):561.

[5] Karagizova D, Jones N. Influence of stress waves on the dynamic progressive and dynamic plastic buckling of cylindrical shells[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 37(38-39):6723.

[6] 施连会, 王安稳. 轴向压应力下圆柱壳弹性动力屈曲数值解法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(10):105.

[7] 郑波, 王安稳. 轴向应力波作用下圆柱壳塑性轴对称动力屈曲[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(3):271.

[8] 崔艳, 韩志军, 路国运, 等. 刚性块轴向冲击圆柱壳动力屈曲的计算机模拟[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(5):1105.

[9] 杨卫奇, 张善元, 路国运, 等. 圆柱壳轴向冲击屈曲数值仿真及其应力波效应分析[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(23):6204.