

薄壁球壳压缩非对称屈曲特性的实验及有限元分析

周刚毅, 董新龙, 郝伟伟

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 采用实验方法研究了球壳在刚性板准静态和冲击压缩下变形特性及非对称屈曲模态, 结合 ABAQUS 有限元分析了球壳冲击压缩下的屈曲变形过程、非对称屈曲特性, 探讨了其影响因素. 研究表明: (1)非对称屈曲模态与冲击速度相关, 随着加载速度提高, 薄壁球壳非对称屈曲从 5 边形转变为 6 边形. (2)在冲击速度较小时, 力—位移响应曲线及失稳变形模态与准静态几乎相同, 可近似按准静态过程分析. (3)在对称屈曲阶段的力—位移响应曲线, 有限元与实验结果吻合较好. 进一步对实验与有限元模拟结果在非对称屈曲阶段的差别进行了探讨, 认为冲击实验中平板与球壳的接触约束变化对非对称变形过程有重要作用.

关键词: 薄壁球壳; 非对称屈曲; 力—位移响应曲线; 冲击速度

中图分类号: O347.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 03-0063-05

薄壁球壳在工程实际中有着广泛的应用, 如航空航天、建筑、气液储藏压力容器、石油化工、反应堆等, 其在外力作用下的变形及屈曲失稳特性是人们关心的, 也是工程应用的基础. 最早, Reissner^[1]研究了弹性半球壳受集中力作用下的变形, 导出了小变形下的变形方程. 随后, Updike 和 Kalnins^[2-3]对刚性板准静态压缩球壳的变形和失稳过程开展了实验和理论分析, 认为弹性球壳变形分 3 个阶段: (1)压平阶段: 球壳顶点与刚性平板接触面被局部压平; (2)对称屈曲阶段: 当压缩量达到某个临界值, 球壳向内翻转(snap-through)形成环状塑性铰, 随变形发展塑性铰环半径不断向外增大; (3)非对称失稳阶段: 随着压缩继续增加, 球壳呈多边形的非对称屈曲变形, 分析给出了压平及对称屈曲阶段弹性球壳变形的作用力关系式. 关于球壳大变形后屈曲问题, 20 世纪 60 年代 Leckie 等^[4]研究了球壳刚性冲头压缩下的变形和屈曲现象. 其后, Updike^[5]对球壳在刚性板准静态压缩下的变形过程进行了探讨, 得到了大变形后屈曲阶段作用力的近似解, 但是文中并没有说明大变形下非对称屈曲的模态. De Oliveira^[6]、Yu 等^[7]研究了薄壁球壳在点载荷、刚性

板和其他不同形状压头作用下的非对称屈曲现象, 结果显示: 在不同压头作用下球壳会出现从三角形到多边形的不同的屈曲形式, 这些研究都是对准静态压缩情况. 事实上, 这类薄壁结构工程应用还经常受到冲击载荷作用. 近年来, Gupta 等^[8-9]对落锤冲击下薄壁钢球壳动态变形现象开展实验研究, 探讨高加载率下力—位移响应特性, 发现球壳屈曲模式与球壳的几何结构及特征尺寸相关. Dong 等^[10]对乒乓球在准静态及冲击压缩下的实验研究显示, 球壳在准静态压缩下呈 4 边形的屈曲模态, 而在动态冲击下变为 5 边形失稳形态. 综上可知, 目前对薄壁球壳动态变形及失稳特性的研究相对较少, 对非对称屈曲模态尚没有形成一致的认识, 因此对薄壁球壳在冲击载荷下的动态响应及屈曲特性的研究具有理论和实际意义^[11-13].

笔者对薄壁球壳在刚性板准静态和冲击压缩下的力学及变形失稳特性开展实验研究, 探讨不同加载速度下薄壁球壳的非对称屈曲及力响应特性, 并利用 ABAQUS 有限元对薄壁球壳冲击压缩作用下的变形、屈曲过程进行模拟, 分析讨论了薄壁球壳非对称屈曲行为及影响因素, 研究可为薄壁球壳

动态变形过程的分析提供参考.

1 薄壁球壳压缩实验及结果

1.1 实验方法及试样

实验利用改装的 $\Phi 34$ mm Hopkinson 压杆对薄壁球壳进行加载, 图 1 为实验原理图. 试样置于入射杆和固定端之间, 通过撞击杆撞击入射杆对试样进行加载, 以保证压缩过程的稳定性. 通过控制气枪压力获得不同撞击速度, 撞击速度由光电管测量. 固定端装有压电式动态力传感器, 测量试样底端的撞击力. 整个压缩变形过程采用高速相机(Photron Ultima APX-RS)记录, 高速相机采样频率 $20\,000$ 幅 $\cdot$ s $^{-1}$, 分析得到不同加载时刻的球壳压缩位移.

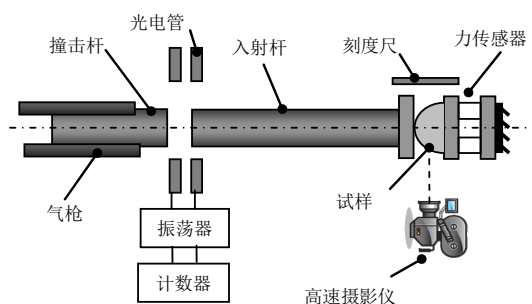


图1 动态实验原理示意图

薄壁球壳准静态压缩实验在 MTS 液压伺服材料试验机(661.20F-02)上进行, 压缩速度为 2 mm $\cdot$ min $^{-1}$, 实验测量球壳试样的压缩力—位移曲线.

薄壁球壳试样为 201 不锈钢, 半径 $R=38$ mm, 壁厚 $t=0.3$ mm, 球壳半径厚度比 $R/t=126.7$.

1.2 实验结果

在不同加载速度($6\sim 18$ m $\cdot$ s $^{-1}$)下对试样开展了系列实验, 结果显示: 薄壁球壳冲击压缩下的非对称屈曲模态与加载速度相关. 随加载速度提高, 球壳最终变形从 5 边形的屈曲模态变为 6 边形. 图 2 分别给出了 3 种速度下球壳屈曲结果, 可见对 201 不锈钢薄壁球壳在准静态压缩下呈 5 边形的非对称



(a) Quasi-static (b) $v=13.0$ m $\cdot$ s $^{-1}$ (c) $v=16.96$ m $\cdot$ s $^{-1}$

图2 试样非对称屈曲典型样式

屈曲特征, 冲击速度 13 m $\cdot$ s $^{-1}$ 时仍为 5 边形, 而当冲击速度达 16.96 m $\cdot$ s $^{-1}$ 时, 非对称屈曲变为 6 边形. 图 3 给出了相应实验典型的力—位移响应曲线, 可见: (1)在压缩初期(变形小于 3 mm), 实验加载速度下, 力—位移响应曲线基本相同; (2)球壳压缩变形后期(变形大于 3 mm), 冲击加载与准静态加载曲线趋势不同, 在动态加载中, 撞击力会出现一个“上凸”波形; (3)随冲击速度提高, 力—位移响应曲线提高. 准静态下力—位移曲线近似为两段斜率不同的直线, 而斜率转折点反映对称变形向非对称 5 边形屈曲转变. 而动态力响应曲线变化较准静态复杂, 可能受加载接触面的影响.

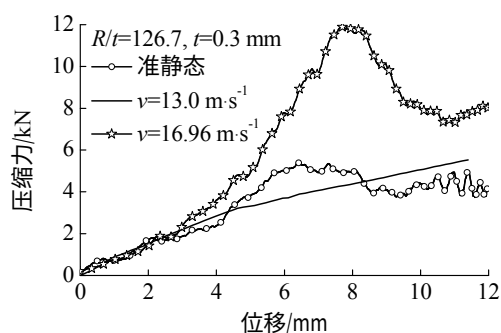


图3 准静态及动态压缩时力—位移响应曲线

2 薄壁球壳压缩的有限元分析

2.1 有限元模型

利用 ABAQUS 有限元对薄壁球壳的冲击动态压缩实验进行数值实验分析, 有限元采用刚性板撞击半球壳的三维几何模型. 分析中, 薄壁球壳采用线性减缩积分 4 边形壳单元 S4R. 球壳材料采用双线性线弹塑性本构, 材料参数由准静态拉伸试验得到, 其中屈服应力 $\sigma_s=690$ MPa, 弹性模量 $E=2.11\times 10^5$ MPa, 抗拉强度 540 MPa. 撞击钢板采用 C3D8R 实体单元, 约束为刚体. 有限元模型如图 4 所示.

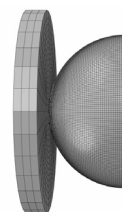


图4 有限元模型

为消除有限元单元尺寸对屈曲计算结果的影响, 设置有限元网格尺寸分别为 1.5 、 1.2 、 0.9 、 0.6 、

0.3 mm. 计算结果表明: 网格尺寸为 0.9 mm, 随单元网格的进一步细化, 单元尺寸不影响力—位移曲线计算结果. 同时, 考虑薄壁半球壳顶部(撞击区域)为主要变形区, 网格局部细化为 0.3 mm.

2.2 有限元结果及分析

图 5 为刚性板以 $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度冲击下薄壁球壳变形失稳发展典型过程. 从薄壁球壳的应力、应变分布状态分析, 弹塑性薄壁球壳在平板冲击压缩下的变形过程存在 4 个发展阶段(图 5): (1) 撞击时, 壳顶端局部被压平产生局部塑性变形, 并逐渐被挤入翻转; (2) 翻转后, 形成塑性铰环, 进入对称失稳阶段; (3) 沿对称屈曲的塑性铰环上局部产生应变集中, 对称变形向非对称变形转变过渡; (4) 形成稳定的 5 边形非对称屈曲模态. 将试样变形过程与力—位移响应曲线(图 6)进行比较, 图 6 中 a~d 分别对应图 5 中的 4 个典型转折点, 可见力—位移响应曲线在变形的不同阶段呈现不同的变化特征: (1) 在压平阶段, 曲线成近似的直线(oa 段); (2) 曲线发生转折, 变形进入对称屈曲阶段(ab 段), 薄壁球壳翻转发生在力—位移曲线第一个震荡的波峰之前; (3) 非对称屈曲的发生, 其力—位移曲线出现明显震荡变化(cd 段), 屈曲变形由均匀的圆环开始向多边形发展; (4) 在 d 点发展为等角度分布的固定多边形(5 边形), 力—位移曲线震荡进一步加剧.

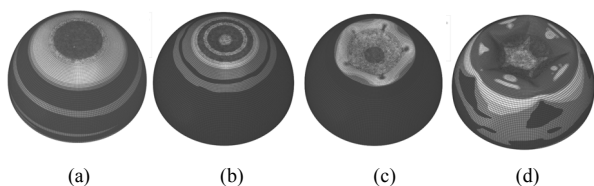


图 5 薄壁球屈曲变形典型过程

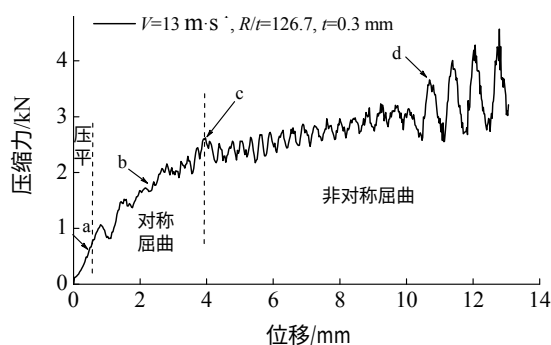


图 6 薄壁球压缩力—位移响应曲线

图 7 给出了不同加载速度下, 薄壁球壳非对称屈曲模态的变化, 可见随加载速度增加到 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

以上, 有限元计算显示球壳非对称屈曲从 5 边形变为 6 边形, 其变化趋势与实验结果一致. 但是相对实验在 $16.96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 冲击时开始变为 6 边形屈曲, 而有限元计算到 $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 才出现 6 边形屈曲.

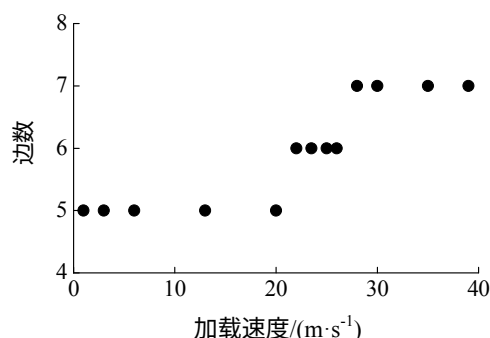


图 7 加载速度对非对称屈曲变形边数的影响

图 8 给出了准静态及不同钢板撞击速度下有限元计算得到的力—位移响应曲线, 其中撞击板与试样间设置为无摩擦自由接触. 作为比较, 图 8 还给出了相应准静态和动态实验结果. 研究表明: 在刚性板冲击速度较小($13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)时, 有限元计算得到的动力力—位移响应曲线有波动震荡, 并且随速度提高波动增大, 但力—变形响应曲线趋势与准静态计算几乎相同. 可见不考虑材料应变率效应时, 在较小冲击速度下, 球壳的动态变形响应分析可近似按准静态处理. 但随冲击速度的提高, 力—位移曲线出现大波动, 采用准静态分析会有较大差别.

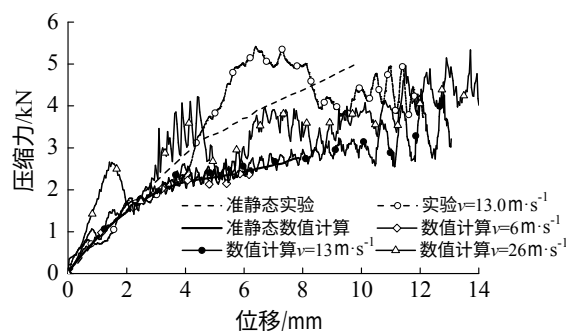


图 8 薄壁球壳钢板撞击下力—位移响应曲线

从图 8 还可以发现, 实验和有限元计算结果在球壳压平及对称屈曲阶段吻合较好, 但随压缩变形增大, 球壳进入非对称屈曲阶段, 有限元计算得到的力—位移响应曲线与实验不同, 且明显低于实验结果. 有限元的力—位移曲线稳定单调增大, 而实验曲线却出现一个明显的向上凸起的特征, 这在文献[9]的动态冲击实验中也测试得到类似的响应曲

线特征.

3 分析与讨论

实验和有限元研究表明, 刚性板压缩下薄壁球壳在非对称屈曲阶段从5边形发展为6边形的变化, 与冲击速度相关, 两者趋势相同, 但是转变的临界速度不同. 另外, 在压平及对称屈曲阶段, 实验和有限元力—位移响应曲线两者吻合性较好, 但在非对称屈曲阶段, 有限元计算得到的力—位移响应曲线与实验有较大区别, 主要表现在: (1)在动态实验中, 撞击力响应曲线有一个明显向上凸起的特征; (2)力—位移响应曲线有限元计算结果低于实验结果. 这可能与撞击球壳压缩变形过程中刚性板和球壳接触状态不稳定有关, 即在实验动态压缩过程中, 当屈曲状态从对称转变为不对称过程, 局部变形集中使试样与撞击钢板间的接触状态发生变化, 约束限制了塑性铰环向外稳定发展, 使得力响应曲线增大, 并且塑性铰环向外扩展不稳定, 引起曲线凸起并随后下降. 而有限元计算中接触面是一个理想无摩擦的状态.

为考察表面接触约束对屈曲失稳过程的影响, 我们利用有限元对比了试样与刚性板接触表面间具有不同摩擦系数情况下球壳的力—位移响应曲线和非对称屈曲模式变化. 图9给出了摩擦系数分别为0、0.3、0.8, 冲击载荷速度为 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时有限元计算的力—位移响应曲线比较, 需要说明的是, 这里摩擦系数取0.8主要是为考察球壳局部变形瞬间, 钢板可能对球壳变形产生较大约束的影响. 结果显示: (1)在压平及对称屈曲失稳阶段, 不同摩擦系数下, 力—位移曲线发展几乎相同, 即摩擦约束对变形影响很小; (2)当进入非对称屈曲阶段, 随摩擦系数增大, 力—位移响应曲线明显提高. 这说明

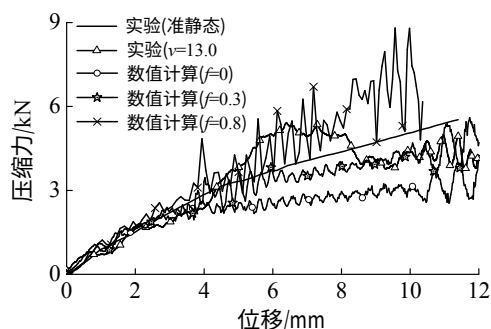


图9 不同摩擦系数下力—位移响应曲线

接触约束仅对非对称变形有较大影响. 随摩擦系数增大, 即钢板表面对球壳塑性铰扩展的约束增大, 非对称阶段力—位移响应曲线明显提高. 且当摩擦系数取0.8时, 力—位移曲线也出现了上翘的趋势.

图10为冲击速度为 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 不同摩擦系数下的球壳非对称屈曲模式有限元计算结果. 从图10可见, 随摩擦约束增加, 非对称屈曲从5边形变化到6边形, 直至向7边形发展, 即表面约束越大, 球壳倾向于产生更多边形的非对称屈曲.

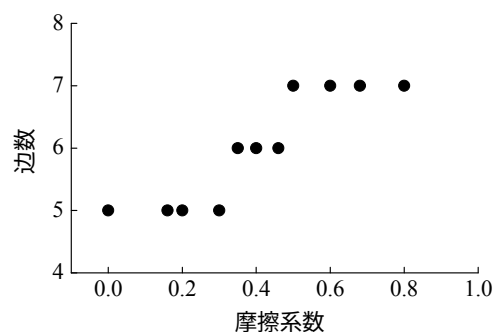


图10 摩擦系数对非对称屈曲模式影响

可见薄壁球壳在钢板冲击下动态变形及屈曲特性可能与表面接触状态有关, 当接触表面对球壳塑性铰扩展约束增大时, 非对称屈曲阶段力—位移响应曲线提高. 在相同冲击速度下, 约束越大, 球壳越易形成更多边形的非对称屈曲模式. 因此, 动态压缩实验中从非对称屈曲转变开始, 球壳局部变形集中位置与刚性板接触压力增大, 约束了塑性铰向外扩展, 使力—位移曲线出现上凸特征. 与有限元数值分析相比, 实验在较小的冲击速度下出现了6边形的屈曲模式. 在有限元计算中, 采用了理想光滑接触, 无法真实地反映实验冲击过程接触表面的状态变化, 造成有限元计算结果与实验的差别.

4 结语

利用 MTS 液压伺服材料试验机和改进的分离式 Hopkinson 杆对薄壁球壳的准静态和冲击载荷下动态压缩特性进行了实验研究, 并结合有限元分析, 探讨了平板冲击压缩下薄壁球壳的对称屈曲变形、非对称失稳过程, 比较了冲击速度对球壳力—位移响应曲线、非对称屈曲行为的影响, 研究结果表明: (1)在刚性平板撞击下, 非对称屈曲模式与冲击速度相关, 随着加载速度提高, 薄壁球壳非对称屈曲从5边形转变为6边形, 实验和有限元结果趋

势相同。(2)在冲击速度较小时,力—位移响应曲线及失稳变形模态与准静态几乎相同(均为5边形屈曲),可近似按准静态过程分析。(3)钢板与球壳的接触约束对球壳压平及对称屈曲阶段影响不大,但对非对称变形过程的力—位移响应曲线特征、屈曲模态都有较大影响,这导致了实验与有限元计算结果的差别。

参考文献:

- [1] Reissner E. On the theory of thin, elastic shells[C]//Reissner H, Edwards J W. Contributions to Applied Mechanics, Anniversary Volume MI, USA: Ann Arbor, 1960:231-247.
- [2] Updike D P, Kalnins A. Axisymmetric behavior of an elastic spherical shell compressed between rigid plates[J]. ASME J Appl Mech, 1970, 92:635-640.
- [3] Updike D P, Kalnins A. Axisymmetric post-buckling and on-symmetric buckling of a spherical shell compressed between rigid plates[J]. ASME J Appl Mech, 1972, 94:172-178.
- [4] Lekie F A, Penny P K. Plastic instability of spherical shell[C]//Heyman J, Leckie F A. Engineering Plasticity, UK: Cambridge University Press, 1968:401-411.
- [5] Updike D P. On the large deformation of a rigid plastic spherical shell compressed by a rigid plate[J]. J Eng Ind, 1972, 94:949-955.
- [6] De Oliveira J G, Wierzbicki T. Crushing analysis of rotationally symmetrical plastic shells[J]. J Strain Anal, 1982, 17:229-236.
- [7] Ruan H H, Gao Z Y, Yu T X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays[J]. Int J Mech, 2006, 48:117-133.
- [8] Gupta N K. Experimental and numerical studies of dynamic axial compression of thin walled spherical shells[J]. Int J Impact Eng, 2004, 30:1225-1240.
- [9] Easwara P G L, Gupta N K. An experimental study of deformation modes of domes and large-angled frusta at different rates of compression[J]. Int J Impact Eng, 2005, 32:400-415.
- [10] Dong X L, Gao Z Y, Yu T X. Dynamic crushing of thin-walled spheres: An experimental study[J]. Int J Impact Eng, 2008, 35:717-726.
- [11] Alghamdi A A A. Collapsible impact energy absorbers: An overview[J]. Thin-Walled Structures, 2001, 39:189-213.
- [12] 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006:189-192.
- [13] Teng J G. Buckling of thin shells: Recent advances and trends[J]. Appl Mech Rev, 1996, 49:263-274.

Experimental and Numerical Studies on Collapse Behaviors of Spherical Shells Compression

ZHOU Gang-yi, DONG Xin-long, HAO Wei-wei

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The deformation behaviors of thin-walled spherical shells subject to quasi-state and dynamic compression are studied experimentally. The process of deformation, the non-axisymmetric buckling characteristic and its influence factors are analyzed in detail using ABAQUS finite element code. The results show that the deformation modes are dependent on the impact velocity. It is found that, if impact loading speed increases, the collapse modes shift from pentagons to hexagons. The dynamic loading-deformation curve on which the impact velocity is not very high is in good consistence with its quasi-static one. Meanwhile, the load-deformation curves of FEM simulation conform well to the experimental results at the stage of axi-symmetric inward dimple, but it is not so at the non-axisymmetric buckling stage. Furthermore, the process of deformation of spherical shells and its effect factors are discussed, suggesting that the contact constraints of surface between spherical shell and rigid plate play a significant role in the process of non-asymmetric deformation.

Key words: thin-walled spherical shells; non-axisymmetric buckling; loading-deformation characteristics curves; impact velocity

(责任编辑 史小丽)