DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0901-06

球形爆炸容器应变增长现象的极限情况*

刘文祥[1,2],张德志[2],程 帅[2],钟方平[2],张庆明[1]
(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2.西北核技术研究所强动载与效应重点实验室,陕西 西安 710024)

摘要:应变增长现象威胁容器安全,研究应变增长现象的极限情况对爆炸容器的安全应用非常重要。本文中开展了球形容器爆炸加载实验,获得了应变增长系数达到 6.1 的应变数据,并利用数值模拟分析球壳弹性变形范围内振动模态叠加形成的应变增长现象的极限情况。研究表明:(1)应变增长现象符合几何相似律,影响应变增长的因素包括扰动源类型、扰动源半径与球壳半径之比、球壳厚度与球壳半径之比、第一个应变峰等,其中扰动源参数是主要影响因素。(2)当扰动源位移被完全约束、扰动源半径等于球壳半径时,球壳上可能的应变增长系数接近 12。

关键词:应变增长现象;球形爆炸容器;振动模态叠加;爆炸加载
中图分类号:O383 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在爆炸加载下,爆炸容器壳体的最大应变没有出现在第一个应变峰,而是出现在后期的应变峰上的现象被称为爆炸容器的应变增长现象[1]。一般情况下,容器壳体的第一个应变峰是爆炸载荷直接作用导致的,传统的容器安全分析往往参考该数值,但在应变增长现象中壳体会出现比第一个应变峰更大的变形,这对容器安全非常不利,因此应变增长现象引起了广泛关注。A. I. Abakumov 等[2]认为法兰等扰动源引起弯曲振动,进而导致应变增长现象;T. A. Duffey 等[3]认为呼吸振动和频率相近的弯曲振动线性叠加形成了应变增长现象;Q. Dong 等[1]认为壳体膜振动由于不稳定而转化为复合振动(膜振动和弯曲振动的组合振动),膜振动和复合振动非线性耦合形成应变增长现象,Q. Dong 等[4]还分析了容器内周期性爆炸载荷和壳体振动共振形成的应变增长现象。应变增长的形成原因可归纳为:振动模态叠加以及爆炸载荷与壳体振动共振。应变增长系数用于表征应变增长现象的严重程度,其等于应变曲线的最大应变值除以第一应变峰。现有研究表明[5-6],爆炸容器上可能的应变增长系数最大为 4.8。应变增长系数是否会更大、最严重的应变增长现象能达到什么程度,目前还没有研究回答过这些问题。

本文中在球形容器内开展爆炸加载实验,获得了应变增长系数超过 6 的应变数据,刷新了爆炸容器最大应变增长系数的记录,并在实验验证数值模型的基础上,利用数值模拟进一步分析了在弹性变形范围内球壳上模态叠加形成的应变增长现象的极限情况。

1 实验研究及结果

球形容器内半径为 261.5 mm,壁厚为 3 mm,壳体材料为 Q345R。炸药采用球形装药,当量为 27 g TNT,置于容器中心。球壳顶部有内半径 62.5 mm 的开孔,用于安装炸药。开孔的接管通过 4 根悬臂夹持,以固定容器。容器赤道面安装压力传感器。容器外壁粘贴应变计,以测量壳体外壁变形。实验容器照片见图 1。

在开孔正对的球壳外壁处发现了非常严重的应变增长现象,图 2 为相应的应变曲线,第一个应变峰为 713×10^{-6},最大应变值为 $4\ 357\times10^{-6}$,应变增长系数达到了 6.1。实验还测量了容器内壁的动态压力曲线,如图 3 所示。压力曲线存在 3 个较明显的脉冲,在 1 ms 之后脉冲消失,容器内压力进入准静态

* **收稿日期**:2017-01-12;**修回日期**:2017-02-13。 “第十一届全国爆炸力学学术会议”推荐论文。
第一作者:刘文祥(1982—),男,博士研究生,副研究员,wxliu@ustc.edu。

状态。对比图 2 和图 3,可发现图 2 中应变曲线的最大应变值出现在 2 ms 之后,而此时脉冲已经消失,由此推断,图 2 中的应变增长现象不是爆炸载荷和壳体振动共振引起的,而是振动模态叠加形成的。



图 1 实验容器照片

Fig. 1 Photo of experimental vessel

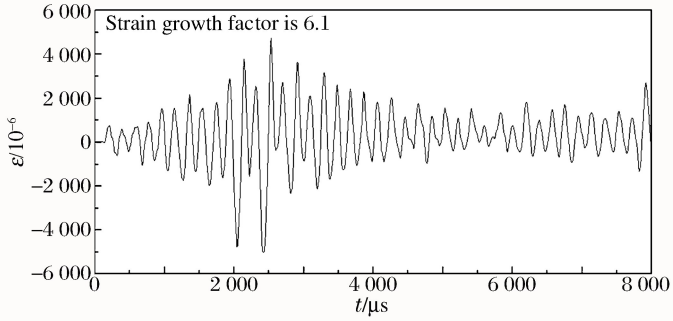

图 2 实验获得的典型应变增长现象

Fig. 2 Strain growth phnomenon observed in experiment

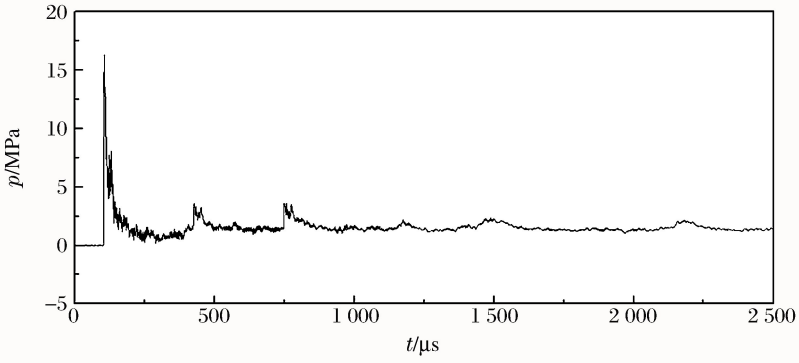

图 3 容器内壁载荷的压力-时间曲线

Fig. 3 Pressure-time curve of blast loading

2 数值模拟分析

利用商业软件 Autodyn 建立实验球形容器的二维轴对称数值模型,如图 4(a)所示,该模型考虑容器的顶部开孔,开孔接管外设置固支约束,等同于容器在接管处被夹持的状态。球壳材料采用弹塑性模型,密度为 7 830 kg/m^3,剪切模量为 77 GPa,屈服强度取 670 MPa,强化模量取 1 GPa。炸药采用 JWL 状态方程,空气采用理想气体状态方程,均采用软件库内的材料参数。炸药和空气采用欧拉网格,网格尺寸为 2 mm×2 mm,球壳采用拉格朗日网格,壳体环向网格尺寸为 1 mm,径向保留 6 个网格。为了避免数值模型中出现爆炸载荷和壳体振动共振引起的应变增长现象,在爆炸载荷第一个脉冲作用时间过后,删除欧拉网格,因此数值模拟中出现的应变增长现象仅可能由振动模态叠加形成。

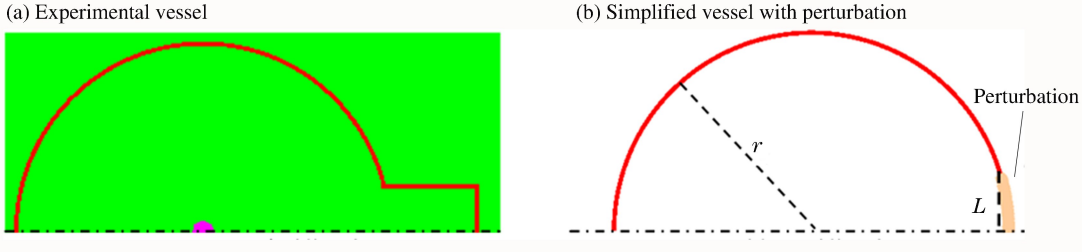

图 4 数值模型

Fig. 4 Numerical model

图 5 中比较了数值模拟得到的应变曲线和实验应变曲线，图 5(a)为早期实验获得的 60 g TNT 加载内半径 261.5 mm、壁厚 6 mm 球壳的应变曲线，图 5(b)为本文实验中 27 g TNT 加载内半径261.5 mm、壁厚 3 mm 球壳的应变曲线。考虑到实验中容器高频振动的能量损耗、周期性爆炸载荷对壳体响应的影响等因素，可以认为数值曲线和实验曲线的特征吻合，说明二维轴对称数值模型能够较好地模拟出实验中的应变增长现象。同时，也说明实验中的应变增长现象是由振动模态叠加形成的。

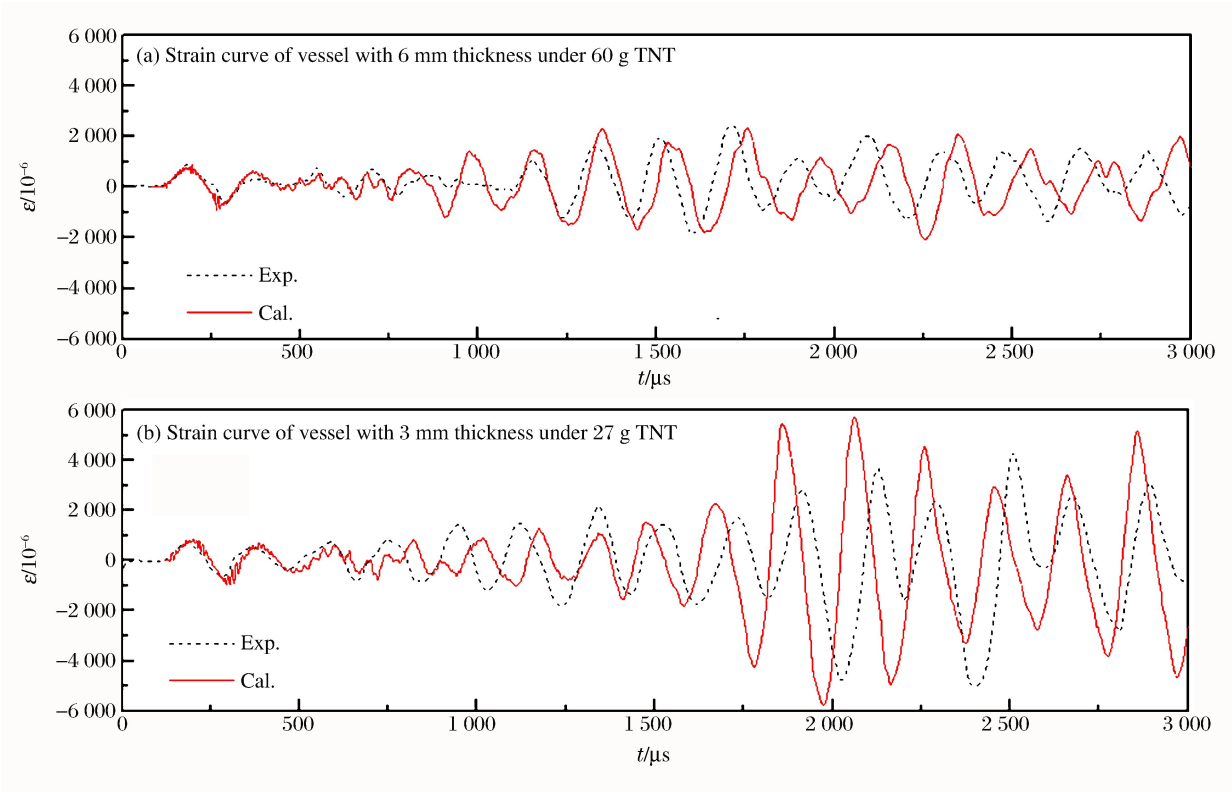

图 5　实验应变曲线与数值应变曲线的比较

Fig. 5　Comparison between experimental and numerical results

文献中往往把开孔、法兰等破坏理想球壳的点对称特征的结构归为扰动源，但没有给出扰动源的明确定义和分类。我们认为可以从扰动源运动特征来认识扰动源：理想球壳在爆炸作用下开始运动，之后在壳体内部应力和惯性力共同作用下进行周期性的膨胀——压缩运动，即呼吸振动；由于球壳某部位的特性与其他部位不同，比如质量特性、约束条件、所受载荷等与壳体其他部位存在差异(见图 6)，导致该部位与其他部位的运动状态不同，该部位相对于球壳其他部位来说进行横向运动，不断引起弯曲波并往壳体其他位置传播，弯曲振动模态与壳体其他振动模态叠加可能出现应变增长现象。这些与其他部位特性不同的球壳部位即为“扰动源”。

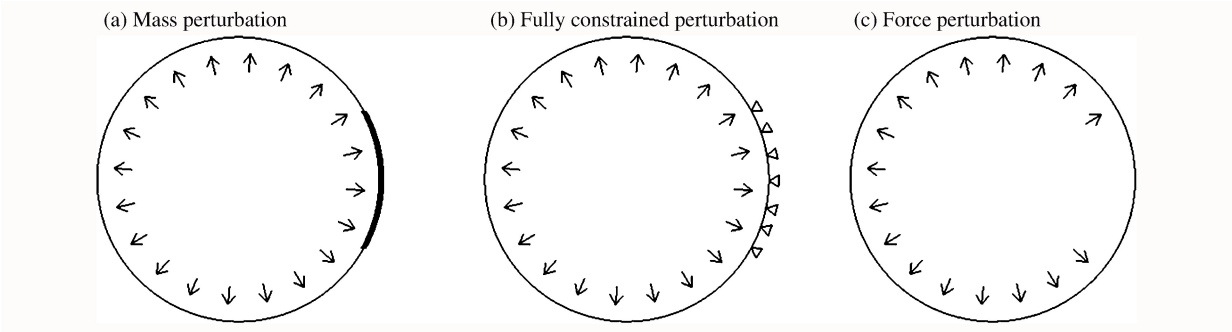

图 6　不同类型的扰动源

Fig. 6　Different types of perturbation

利用与图 4(a)中模型相同的建模方法建立带扰动源的球壳的简化模型，如图 4(b)所示，简化模型通过改变某部分球壳的密度得到不同质量扰动源，完全约束某部分球壳的位移得到位移被完全约束扰动源，去掉某部位球壳的载荷得到载荷类型扰动源。现有文献中，应变增长现象均是在球壳弹性变形范围内讨论的，其与球壳塑性变形的关系比较复杂，作者将在其他文章中讨论，本文中将仅讨论壳体弹性变形的情况，因此图 4(b)中壳体材料采用弹性模型，即球壳仅允许发生弹性变形。设扰动源半径为 L，球壳半径为 r，球壳厚度为 h，第一应变峰为 ε_0。

以 $L=62.5$ mm、$r=261.5$ mm、$h=3$ mm、$\varepsilon_0=730\times10^{-6}$ 的工况为例，通过图 4(b)的数值模型得到不同质量扰动源、位移被完全约束扰动源、载荷类型扰动源下球壳上的最大应变增长系数，如图 7 所示。对于不同质量扰动源，应变增长系数虽然随扰动源质量的变化成非单调变化，但大体上随扰动源质量增大而增大，且扰动源质量增大至一定程度时应变增长系数趋于稳定，达到了极限状态，接近位移被完全约束扰动源下的应变增长现象。从物理上说，扰动源的质量无限大时，则可以认为扰动源静止，等同于扰动源位移被完全限制的情况。载荷类型扰动源下的球壳应变增长现象相对较弱。综上，位移被完全约束扰动源可以认为是极端类型的扰动源，此时应变增长系数最大，应变增长现象最严重。

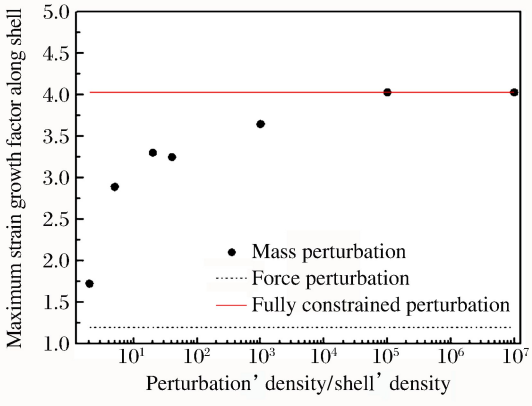

图 7 不同类型扰动源下球壳上的最大应变增长系数

Fig. 7 Maximum strain growth factor of spherical shell under different perturbations

在球壳材料固定的前提下，除了扰动源类型外，应变增长现象还可能与球壳半径 r、扰动源半径 L、球壳厚度 h、第一个应变峰 ε_0 等有关，则存在函数关系：

$$k=f(r,h,L,\varepsilon_0) \tag{1}$$

式中：k 为球壳上最大应变增长系数。选择球壳半径 r 作为基本变量，公式(1)可以转化成量纲一参数形式：

$$k=f(h/r,L/r,\varepsilon_0) \tag{2}$$

式(2)表明，球壳上的最大应变增长系数数跟球壳厚度与球壳半径之比、扰动源半径与球壳半径之比、第一个应变峰有关，应变增长现象遵循几何相似律。

图 8(a)为扰动源位移被完全约束下原型球壳和几何放大 2 倍球壳的应变曲线，图 8(b)把几何放大 2 倍球壳的应变曲线在时间上缩为 1/2 倍，两曲线完全重合，可见应变增长现象遵循几何相似律，符合公式(2)。

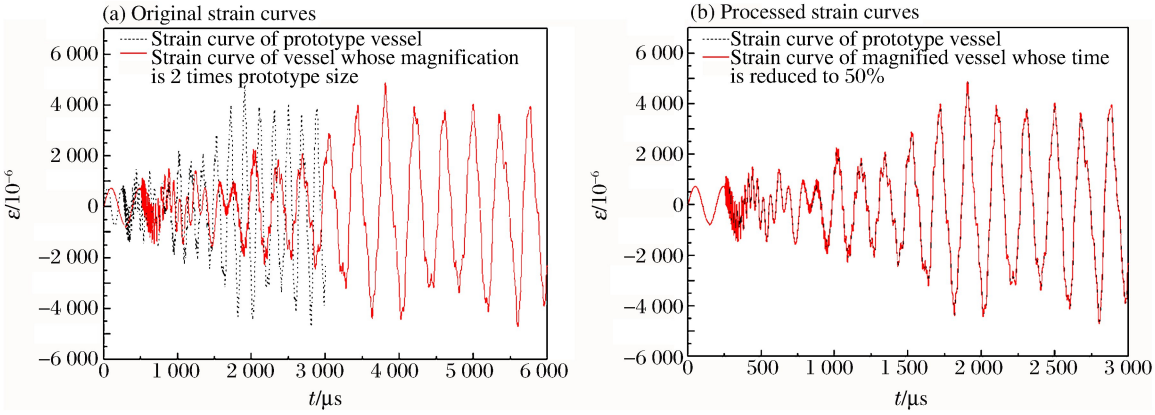

图 8 两个几何相似模型的应变增长现象对比

Fig. 8 Comparison between strain curves of vessels with geometric similarity

在采用极端类型扰动源——位移被完全约束扰动源时，图 9 比较了不同的球壳厚度与球壳半径之比和第一个应变峰下，球壳上的最大应变增长系数随扰动源半径与球壳半径之比的关系。可见，球壳上最大应变增长系数大体上随扰动源半径与球壳半径之比的增大而增大，当扰动源半径与球壳半径之比等于 1 时，即扰动源半径等于球壳半径时，球壳上最大应变增长系数均接近 12。需要注意的是，上述结果仅考虑振动模态叠加形成的应变增长现象，如果考虑振动模态叠加以及爆炸载荷与壳体振动共振两种因素的复合作用，球壳上的最大应变增长系数可能更大。

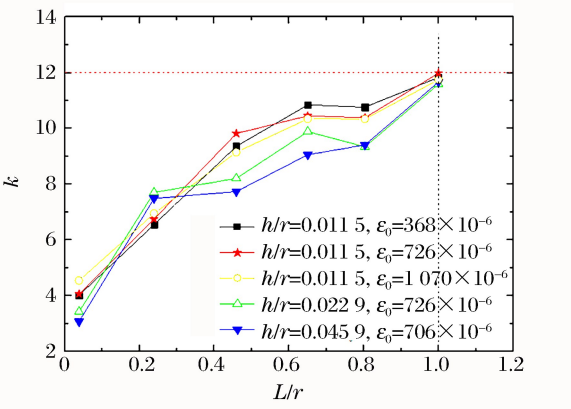

图 9　球壳上的最大应变增长系数变化规律

Fig. 9　Maximum strain growth factor vs ratio of perturbation radius to spherical shell radius

从图 9 还可以看出，球壳上的最大应变增长系数随球壳厚度与球壳半径之比、第一个应变峰的变化而变化，但变化幅度不及随扰动源半径与球壳半径之比的变化幅度，且不论球壳厚度与球壳半径之比、第一个应变峰如何改变，球壳上的最大应变增长系数随扰动源半径与球壳半径之比的变化趋势是不变的。可见，扰动源半径与球壳半径之比是影响应变增长现象的更重要的因素。从物理上说，扰动源引起弯曲波，弯曲波汇聚在扰动源正对的球壳位置。扰动源半径越大，初始形成的弯曲波越多，在扰动源正对位置的弯曲波汇聚得越严重，应变增长现象越严重，所以扰动源半径与球壳半径之比对应变增长现象的影响极大。另外，图 7 显示扰动源类型对应变增长现象影响也极大。这些均表明，扰动源参数（包括扰动源类型、尺寸）是影响应变增长现象的主要因素。

3　结　论

（1）球形爆炸容器实验获得了应变增长系数达到 6.1 的应变曲线，该应变增长现象主要由振动模态叠加形成。

（2）振动模态叠加形成的应变增长现象符合几何相似律，影响该应变增长现象的因素包括扰动源类型、扰动源半径与球壳半径之比、球壳厚度与球壳半径之比、第一应变峰等，其中扰动源特性（包括类型、尺寸）是主要影响因素。

（3）当扰动源位移被完全约束、扰动源半径等于球壳半径时，球壳上可能的应变增长系数接近 12。

参考文献：

[1] Dong Q, Li Q M, Zheng J Y. Further study on strain growth in spherical containment vessels subjected to internal blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(2): 196-206.

[2] Abakumov A I, Egunov V V, Ivanov A G, et al. Calculation and experiments on the deformation of explosion-chamber shells[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1984(3): 127-130.

[3] Duffey T A, Romero C. Strain growth in spherical explosive chambers subjected to internal blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(9): 967-983.

[4] Dong Q, Li Q M, Zheng J Y. Interactive mechanisms between the internal blast loading and the dynamic elastic response of spherical containment vessels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(4): 349-358.

[5] 胡八一，周刚，郑津洋，等. 爆炸容器研究及应用最新进展评述[C]// 第七届全国压力容器学术会议. 江苏：无锡，2009.

[6] Dong Q. Investigation on the mechanisms of the strain growth phenomenon in containment vessels subjected to internal blast loading[D]. Manchester: The University of Manchester, 2008.

Limit of strain growth in a spherical explosion vessel

Liu Wenxiang[1,2], Zhang Dezhi[2], Cheng Shuai[2],
Zhong Fangping[2], Zhang Qingming[1]
(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Key Laboratory of Intense Dynamic Loading and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *Shaanxi, China*)

Abstract: As the strain growth poses a potential hazard for the safety of an explosion vessel, it is of great importance to figure out its limit. The experiment, which was carried out in a spherical explosion vessel, shows that the maximum strain growth factor is up to 6.1. Numerical simulation was conducted to analyze the limit of the strain growth induced by the superposition of different vibration modes in the spherical vessel with elastic deformation. The following conclusions were reached: First, the strain growth phenomenon obeys the law of geometric similarity. The strain growth factor is related to the perturbation type, the ratio of the perturbation radius to the spherical shell radius, the ratio of the spherical shell thickness to the spherical shell radius, the first strain peak and so on. The perturbation type and the ratio of the perturbation radius to the spherical shell radius are the main influencing factors. Second, the largest strain growth factor is up to 12 when the perturbation is fully constrained and the perturbation radius is equal to the spherical shell radius.

Keywords: strain growth; spherical explosion vessel; superposition of different vibration modes; explosive loading

(责任编辑 曾月蓉)