DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0893-06

球壳塑性变形下的应变增长现象*

刘文祥[1,2],张庆明[1],钟方平[2],程 帅[2],张德志[2]
(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,陕西 西安 710024)

摘要:应变增长现象会对容器安全形成威胁。以往研究涉及的应变增长现象大多在壳体弹性变形范围内,本文中实验观察到球壳塑性变形时的应变增长现象,应变增长系数(最大应变值与第一个应变峰的比值)最大值达到 1.16。实验还获得了容器内壁压力-时间曲线,并利用球壳响应理论分析出应变增长现象是由容器内壁的周期性多脉冲载荷引起的,该载荷存在 3 个较明显的脉冲,前两个脉冲对应变增长现象起主要作用。

关键词:爆炸容器;应变增长现象;塑性变形;周期性爆炸载荷
中图分类号:O347.3 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

在爆炸载荷的作用下,容器壳体的最大应变没有出现在第一个应变峰上,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]。应变增长现象中出现意料之外的应变量,会对容器安全形成威胁。自 1976 年被发现以来[2],应变增长现象引起了广泛关注,其形成原因可以归纳为两种:不同振动模态的叠加[1~6]以及爆炸载荷与壳体振动共振[7]。到目前为止,涉及应变增长现象的研究几乎都是在壳体弹性变形范围内。针对实验中发现的球壳塑性变形时的应变增长现象,本文中将分析该现象形成的原因以及相关规律。

1 实验研究及结果

在球形容器中开展爆炸加载实验。容器内径为 523 mm,壁厚为 3 mm,壳体材料为 Q345R,其静态屈服强度不低于 345 MPa。球壳由两个半球焊接而成。容器顶部有内径 125 mm 的开孔,用于安装炸药。容器赤道面(即两个半球的焊缝面)上均布 4 个小开孔,用于安装压力传感器。实验采用球形装药,由细尼龙绳吊挂于容器中心。装药采用较严格的中心点起爆方式,由雷管(处于球壳上部的雷管腔内,与球壳内部空间隔开)引爆较细的柔爆索,柔爆索在中心起爆微型药球(直径 10 mm,由微米级的 PETN 粉压制而成),微型药球再起爆球形主装药(由 60%RDX 和 40%TNT 浇铸而成),以形成较理想的球面冲击波。球形容器照片见图 1。容器外壁粘贴三向应变片,应变片的位置和方向见图 2。



图 1 球形容器照片
Fig. 1 Photo of spherical vessel

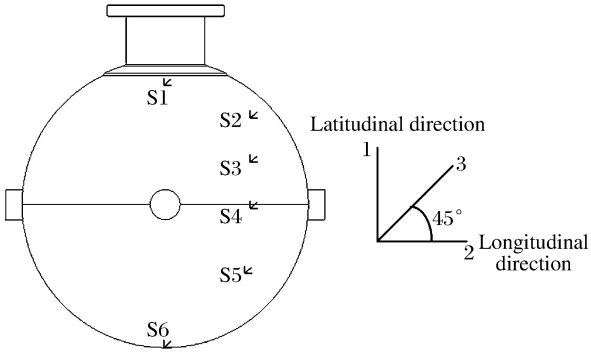

图 2 应变片位置和方向
Fig. 2 Positions and directions of strain guages

* **收稿日期**:2016-04-21;**修回日期**:2016-10-12
第一作者:刘文祥(1982—),男,博士研究生,副研究员,wxliu@ustc.edu。

爆炸当量 370 g TNT 时球壳的应变数据见表 1。从表 1 中可见,球壳应变的第一峰基本上都超过 1%,远超过壳体的屈服应变。壳体材料动态屈服强度 σ_y 按 620 MPa 计算,参考下式:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y(1-\nu)}{E} \tag{1}$$

式中:泊松比 $\nu=0.3$,弹性模量 $E=200$ GPa,可估算屈服应变 $\varepsilon_y=2.170\times10^{-3}$。图 3 为球壳应变的典型曲线,壳体残余应变也超过了 1%。

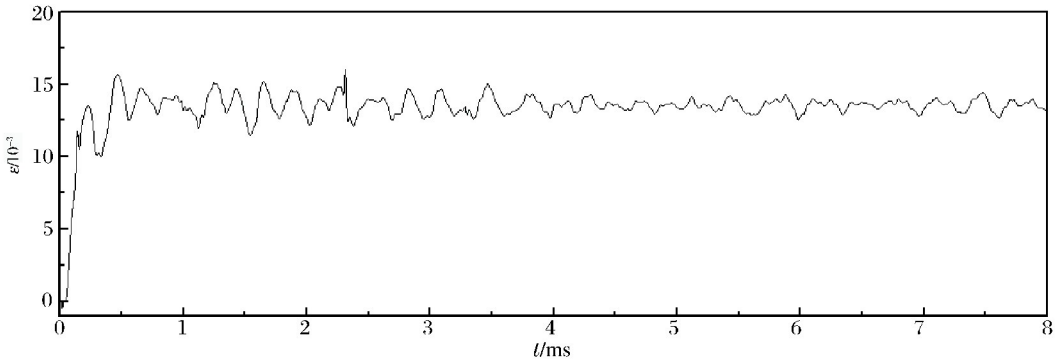

图 3 典型的应变曲线

Fig. 3 Strain-time curve of spherical shell

从图 3 中还可以看出,应变最大值出现在应变曲线的第二个峰上,应变曲线出现了应变增长现象。由表 1 数据可知,实验获得的有效应变数据为 17 组,其中 14 组出现了应变增长现象,13 组出现了应变最大值出现在第二个应变峰上的情况,与图 3 的应变曲线的特征一样。表 1 中数据显示,应变增长系数最大达到 1.16。

表 1 球壳应变数据

Table 1 Experimental strain of spherical shell

应变片位置	方向	第一个应变峰/10^{-3}		最大应变值/10^{-3}	最大值应变值所处峰的位置	应变增长系数
		实测值	平均值			
S1	1	10.804	11.081±2.5%	10.804	1	1.00
	2	10.804		12.606	2	1.16
	3	11.635		13.063	2	1.12
S2	1	10.802	10.262±6.6%	12.057	2	1.11
	2	10.397		12.057	2	1.15
	3	9.588		10.802	2	1.12
S3	1*	11.945	11.225±6.4%	12.197 (12.456)	2 (3)	1.02
	2	10.808		11.610	2	1.07
	3	10.922		11.485	2	1.05
S4	1	9.140	9.883±7.5%	9.140	1	1.00
	2	10.197		10.503	2	1.03
	3	10.312		10.503	2	1.01
S5	1	11.821	13.159±14.3%	11.821	1	1.00
	2	15.036		—	—	—
	3	12.619		12.989	2	1.02
S6	1	13.866	13.762±4.3%	15.211	2	1.09
	2	14.254		16.427	2	1.15
	3	13.167		14.571	2	1.10

注:标注 * 的数据出现特殊情况,其第二个应变峰虽大于第一个应变峰,但应变最大值出现在第三个应变峰上。

2　分析和讨论

对于振动叠加形成的应变增长现象，一般认为，弯曲波产生于扰动源（指容器上的开孔、法兰等）并传播至壳体某位置，与其他的壳体振动叠加形成应变增长现象[4-5]。由于弯曲波存在传播过程，在该应变增长现象中，不同位置球壳的应变增长现象的特征是不同的，比如应变最大值出现的时间存在差异。在本次实验出现的应变增长现象中，应变最大值均出现在第二个应变峰上，特征相同，因此其不是振动叠加形成的应变增长现象，而可能是由爆炸载荷与球壳振动共振引起的。

图 4 为实验测得的球壳内壁压力-时间曲线，曲线上周期性地出现了 3 个脉冲，脉冲之后容器内的压力基本趋于平静。Duffey 数值模拟研究[7]表明，炸药产生的冲击波直接作用在球壳内壁形成第一个脉冲，之后冲击波返回球壳中心并反射回来再次作用在球壳内壁，形成第二个脉冲，如此反复不断产生周期性的脉冲。本次实验对应的比距离约为 0.36 m/kg$^{1/3}$，冲击波来回过程仅持续了 3 次，之后冲击波衰减至可以忽略。在当量更大、容器半径更小的情况下，冲击波更强，脉冲的数目可能大于 3 个。

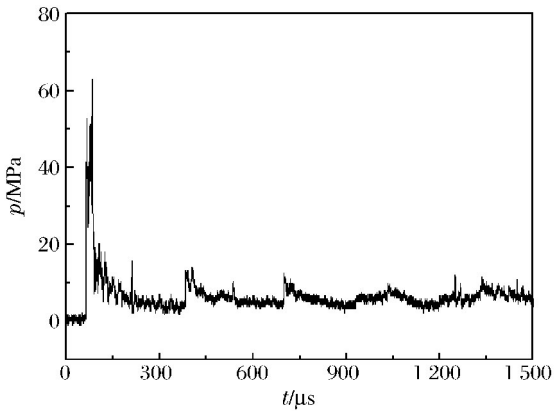

图 4　球壳内壁的周期性多脉冲载荷

Fig. 4　Pressure-time curve of blast loading on inner wall of spherical shell

借助一维球壳响应理论[8]，可以由容器内壁压力-时间曲线分析出壳体响应情况。因为一维球壳除了呼吸振动外无其他振动，因此一维球壳出现的应变增长现象必定由爆炸载荷引起。

一维球壳响应理论存在以下前提或假设：壳体材料密度变化忽略不计，即壳体材料不可压缩；球壳为薄壁，即截面上应力近似认为是均匀分布，意味着球壳半径 r 远大于壁厚 h 。

参考文献[8]，假设球壳半径变化不大，壁厚不变，根据牛顿定律建立平衡方程：

$$h(\sigma_\theta+\sigma_\varphi)+\rho hr\frac{\mathrm{d}^2u_r}{\mathrm{d}t^2}=rp(t) \tag{2}$$

式中：ρ 为壳体材料密度，E 为弹性模量，$p(t)$ 为容器内壁压力历程，u_r 为球壳径向位移，σ_θ、σ_φ 为球壳的主应力。由于球壳为点对称模型，则

$$\sigma_\theta=\sigma_\varphi=\sigma \tag{3}$$

根据 Hook 定律，在壳体材料弹性变形范围内，存在关系式

$$\sigma=\frac{E}{1-\nu}\varepsilon=\frac{E}{1-\nu}\frac{u_r}{r} \tag{4}$$

把式(3)、(4)代入式(2)，得到

$$\frac{\mathrm{d}^2u_r}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2u_r=\frac{p(t)}{\rho h} \tag{5}$$

其中

$$\omega^2=\frac{2E}{\rho r^2(1-\nu)} \tag{6}$$

设球壳材料的应力应变曲线关系为双线性弹塑性本构关系，壳体发生塑性变形时：

$$\sigma=\sigma_y+E_s(\varepsilon-\varepsilon_y) \tag{7}$$

式中：σ_y 和 ε_y 分别为容器材料屈服强度及屈服应变，E_S 为强化模量。把式(7)代入式(2)，得到球壳塑性变形时的平衡方程：

$$\frac{\mathrm{d}^2u_r}{\mathrm{d}t^2}+\omega_p^2u_r=\frac{p(t)}{\rho h}-\frac{2(\sigma_y-E_S\varepsilon_y)}{\rho r} \tag{8}$$

其中

$$\omega_p^2 = \frac{2E_S}{\rho r^2} \tag{9}$$

球壳弹性响应方程(5)和塑性响应方程(8)忽略了球壳半径和厚度的变化。考虑厚度的变化将更符合现实情况,变化的容器半径与厚度关系为:

$$hr^2 = h_0 r_0^2 \tag{10}$$

借助数学软件 Matlab 求解以上式子。

输入实测的球壳内壁压力-时间曲线(见图 4),计算出球壳响应曲线,见图 5。爆炸加载下壳体材料的动态屈服强度很难直接给出准确值,材料动态拉伸试验显示其屈服强度大部分在 600～700 MPa 之间,为了对比由压力曲线计算得到的应变曲线与真实应变曲线的特征,计算过程中壳体材料屈服强度取数值 620 MPa(前文的 620 MPa 也来源于此),以使得计算的应变曲线的第一个应变峰与实验应变曲线的第一个应变峰相等。

图 5 比较了计算得到的球壳应变曲线和实验获得的应变曲线,计算的应变曲线与实验应变曲线的特征相似,出现了应变增长现象,且应变最大值出现在第二个应变峰上。由此可以判断,实验中应变增长现象由容器内壁的周期性多脉冲载荷引起。图 5 还可以对比球壳响应曲线和球壳内壁压力-时间历程曲线的时间特征,可见仅前两个脉冲对应变增长现象有贡献。

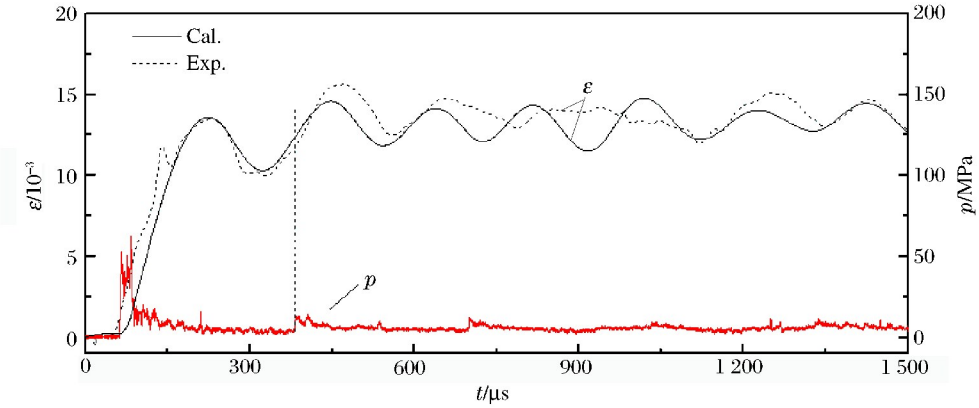

图 5 由爆炸载荷计算的应变曲线与实验应变曲线的比较

Fig. 5 Comparison between strain-time curves obtained by experiment and calculated from pressure-time curve

从响应方程(5)和(8)来看,第一个脉冲作用下壳体获得变形动力,且在内部应力和惯性力共同作用下进行振动。很显然,后续如出现第二个脉冲,且作用方向与壳体运动方向相同,将推动壳体变形在原变形基础上进一步增加,出现应变增长现象;相反,后续脉冲作用方向与壳体运动方向相反,会对壳体运动造成一定阻碍,导致壳体变形减少,不出现应变增长现象。从图 5 可见,第二个脉冲持续的时间较长,要大于壳体振动的半个周期,脉冲的一部分作用方向与壳体运动方向相同,另一部分必定与壳体运动方向相反。必须注意,从压力衰减规律来看,脉冲的主要部分处于脉冲的前期。

以球壳内壁压力-时间曲线(见图 4)为基础,人为设置第二个脉冲出现时刻不同的 8 种载荷,并计算得到相应的球壳响应情况,如图 6 所示。以此分析第二个脉冲作用方向与壳体运动方向出现不同状况时的应变增长现象。

可见,第二个脉冲出现时刻在上一个应变峰的下降沿前段,脉冲的主要部分作用在该应变峰的下降沿,作用方向与壳体运动方向相反,导致下一个应变峰减少,无应变增长现象,如图 6(a)～(c);第二个脉冲出现时刻在上一个应变峰的下降沿后段,脉冲的小部分作用在该应变峰的下降沿,大部分作用在当前应变峰的上升沿,导致当前应变峰大于上一个应变峰,出现应变增长现象,如图 6(d);第二个脉冲的出现时刻在当前应变峰的上升沿,必然导致当前应变峰大于上一个应变峰,出现应变增长现象,如图 6(e)～(h),其中以第二个脉冲出现在当前应变峰的上升沿前段时的应变增长现象最严重,如图 6(e)～

(f)。综上所述，后续脉冲的出现时刻决定应变增长现象的有无和强弱，本文实验中的第二个脉冲出现在应变峰的上升沿前段(见图 5)，由此引起比较严重的应变增长现象。

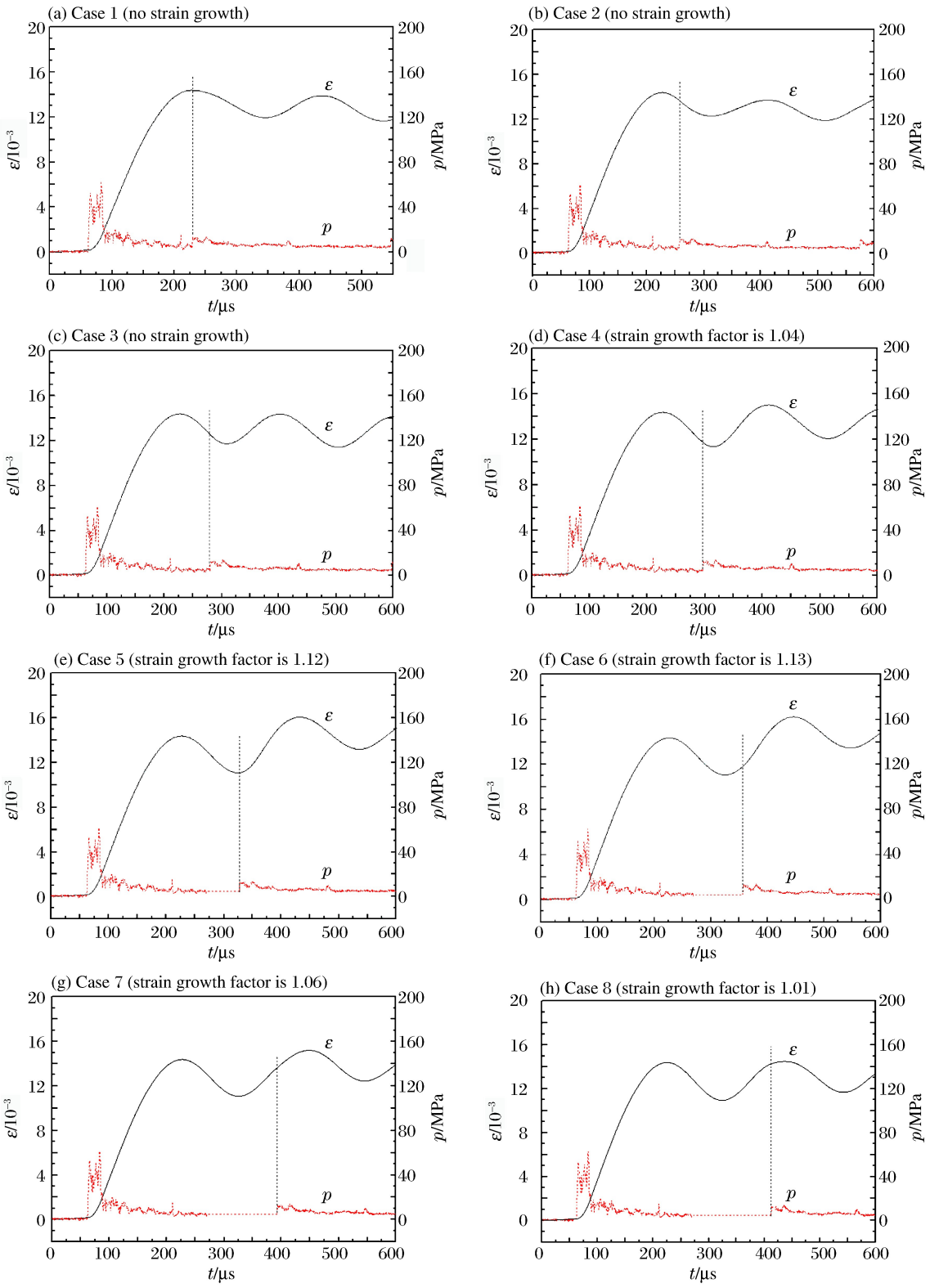

图 6　后续脉冲出现时间对球壳响应的影响

Fig. 6　Strain-time curves with second pulse appearing at different time points

4 结 论

(1)实验观察到球壳塑性变形量超过 1%时的应变增长现象,应变增长系数最大为 1.16。

(2)实验中应变增长现象是由球壳内壁周期性多脉冲载荷引起的,球壳内壁载荷存在 3 个较明显的脉冲,仅前两个脉冲对应变增长现象有贡献。

(3)第二个脉冲的出现时刻决定应变增长现象的有无和强弱,实验中的第二个脉冲出现在应变峰的上升沿前段,引起较严重的应变增长现象。

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] Buzukov A A. Characteristics of the behavior of the walls of explosion chambers under the action of pulsed loading [J]. Combustion Explosion & Shock Waves, 1976,12(4):549-554.

[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] Karpp R R, Duffey T A, Neal T R. Response of containment vessels to explosive blast loading[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1980,105(1):23-27.

[5] 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 & Technical Physics, 1984,25(3):455-458.

[6] Zhu W, Xue H, Zhou G, et al. Dynamic response of cylindrical explosive chambers to internal blast loading produced by a concentrated charge[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(9/10):831-845.

[7] 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.

[8] Baker W E. The elastic-plastic response of thin spherical shells to internal blast loading[J]. Journal of Applied Mechanics, 1960,27(1):139-144.

Strain growth of spherical shell subjected to internal blast loading during plastic response

Liu Wenxiang[1,2], Zhang Qingming[1], Zhong Fangping[2],
Cheng Shuai[2], Zhang Dezhi[2]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: Strain growth, whose related research has so far been concerned mostly with its behavior during the plastic response inside a spherical shell, poses a threat to the safety of explosion containment vessels. In the present work, the strain growth of the spherical vessel during the plastic response was observed by the experiment, and the strain growth factor (the ratio of the maximum strain of the strain curve to the first peak strain) reached up to 1.16. It was found through the theoretical analysis on the spherical shell response that it was the blast loading with three periodic pulses on the inner wall of the spherical vessel that brought about the strain growth, and that the first two pulses were mainly responsible for the strain growth.

Keywords: explosion containment vessel; strain growth; plastic response; periodic loading

(责任编辑 曾月蓉)