

文章编号: 1001-1455(2009)03-0249-06

椭圆封头圆柱形爆炸容器动力响应的数值模拟*

马圆圆, 郑津洋, 陈勇军, 邓贵德
(浙江大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 采用显示非线性动力有限元软件 LS-DYNA, 在不同 TNT 当量下对椭圆封头圆柱形爆炸容器进行了数值模拟。模拟结果表明: 对椭圆封头与圆筒组合而成的理想结构, 爆心环面的应变在初始响应阶段就达到了最大值, 并且其值大于筒体上其他点的最大应变; 实际结构中法兰对爆炸容器的动力响应有很大的影响, 当法兰的质量超过一定值之后, 容器爆心环面会产生应变增长现象。在容器的设计工作中要加强容器的爆心环面并适当地选择法兰。

关键词: 爆炸力学; 动力响应; 非线性动力有限元; 爆炸容器; 应变增长

中图分类号: O389

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引 言

设计爆炸容器要解决的第一个问题是正确得到其动力响应以便为其设计提供依据, 并能针对具体的动力学过程可靠地评估容器的工作能力。爆炸容器的动力学响应归结为研究爆炸冲击波和爆轰产物与爆炸容器结构的相互作用以及由此引起的壳体的受力变形状态, 并进一步研究其工作能力、安全强度、可能的破坏模式及在给定载荷下操作的危险性^[1-2]。板壳等结构在动载下的响应已经有了大量的研究成果, 国内外针对爆炸冲击载荷作用下的响应研究也取得了很大的进展。W. E. Baker^[3-5]对爆炸容器的动力响应进行了研究, 得到了球形容器在线性衰减载荷下的弹性及弹塑性解, 并进一步考虑了球壳在偏心爆炸下的弹性响应问题; T. A. Duffey^[6-7]则一直致力于柱形及球形爆炸容器的爆炸载荷和壳体动力响应研究, 其方法是运用一维流体力学编码来模拟爆炸载荷, 用 ADINA 二维及 DYNA3D 三维编码来模拟壳体的应变历史; 朱文辉^[8]通过实验方法得到了椭圆封头爆炸容器在爆炸载荷加载下的动力响应, 并通过数值计算得到了与实验几乎一致的响应特征; 钟方平^[9]运用 ADINA 有限元程序模拟了圆柱形双层组合爆炸容器在爆炸载荷下的弹塑性结构响应; 胡八一等^[10-11]运用 DYTRAN 编码中的欧拉计算方法, 得到了球形爆炸容器内壁的反射压力, 并运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对容器壳体在爆炸载荷下的动力响应进行了强度分析; 霍宏发等^[12]对椭圆封头圆柱形爆炸容器进行了实验研究, 并采用 ANSYS/LS-DYNA 对该容器内部的爆炸载荷和壳体的动力响应进行了数值模拟, 得到了壁面反射超压和壳体应变沿轴向的变换规律。

应变增长是爆炸容器动力响应研究中的一个重要问题, 早在 1976 年, 由 A. A. Buzukov^[13]在实验中观察到圆柱形爆炸容器壳体中应变周期性增长现象, 即壳体在振动过程中, 应变有周期性消长(即应变跳变)现象发生, 且最大应变大于初始应变的现象^[8], 随后 V. M. Kornev^[14]以及许多研究者证实了这一现象的存在。本文中采用显示非线性动力有限元软件 LS-DYNA 对椭圆封头圆柱形爆炸容器在 4 种不同 TNT 当量下的响应进行数值模拟。模拟得到的结果表明, 椭圆封头与圆柱壳组合成的理想结构在爆炸载荷的作用下, 爆心环面应变在初始响应阶段就达到了最大值; 而实际爆炸容器由于一定质量法兰的存在, 该位置产生了应变增长现象。在实际爆炸容器设计过程中, 应该将爆心环面最大应变加以限制, 并选择适当的法兰。

* 收稿日期: 2008-01-16; 修回日期: 2008-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372091, 50675195); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0526)

作者简介: 马圆圆(1984—), 女, 硕士。

2 爆炸容器壳体动力响应的数值模拟

2.1 模拟容器的尺寸

模拟采用的椭圆封头圆柱形爆炸容器的尺寸为:筒体外径 425.6 mm,筒体壁厚 9.8 mm,圆柱形筒体长 852 mm,容器总长 1 204 mm,容器两端均配有 2:1(长轴:短轴)的标准椭圆封头。容器材料拟采用 20 钢,屈服强度 345 MPa,密度 7.8 g/cm^3 ,弹性模量为 210 GPa,泊松比 0.3。炸药采用 TNT,其密度约 1.63 g/cm^3 ,采用 4 种药量 Q 进行模拟,分别为 11.9、23.7、35.6、47.4 g。

2.2 有限元计算模型

椭圆封头圆柱形爆炸容器具有轴对称特性,故模型采用 1/8 实体建模。模型分为 3 部分,第 1 部分为中间的炸药单元,向外的较大空间的空气单元为第 2 部分,最外层为钢质的容器壁。有限元模型见图 1。

对计算模型采用显式六面体单元来模拟,并对模型进行映射网格划分,针对不同的药量,模型分别有 403 466 个节点,363 500 个实体单元;359 326 个节点,323 500 个实体单元;572 202 个节点,533 520 个实体单元;583 194 个节点,543 792 个实体单元,单元尺寸(六面体边长)控制在 2 mm 左右。

炸药和空气单元采用任意拉格朗日欧拉(Arbitrary-Lagrangian-Eulerian,简称 ALE)多物质算法,圆柱筒体采用拉格朗日算法。多物质算法允许同一单元中同时存在空气和爆炸产物;采用 ALE 算法的网格同时具有欧拉网格和拉格朗日网格的优点,网格可以随物质一起运动,也可以固定在空间不动,甚至可以在一个方向上随物质运动,而在另一个方向上固定不动。ALE 网格和圆柱筒体网格通过共用节点连接,在运动界面上 ALE 网格节点随筒体一起运动,离开界面一定距离后 ALE 网格节点固定在空间不动,通过这种方式实现流体域和固体域的耦合^[15]。

炸药单元采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型,炸药爆速取 6 626.5 m/s,爆压取 176 GPa,采用 JWL 状态方程描述爆轰过程中压力和内能及质量体积的关系

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v_e} \right) e^{-R_1 v_e} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v_e} \right) + \frac{\omega e}{v_e}$$

式中: v_e 为炸药的质量体积, e 为炸药产物的比内能,参数 A 、 B 、 ω 、 R_1 、 R_2 的值取自文献[16], $A = 373 \text{ GPa}$, $B = 3.33 \text{ GPa}$, $\omega = 0.28$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$,初始比内能为 6.4 MJ/kg。

空气单元采用 *MAT_NULL 材料模型,密度取 1.29 mg/cm^3 ,初始比内能为 0.35 kJ/kg,采用理想气体状态方程,多方指数 γ 取 1.4,在 LS-DYNA 软件中可以通过以下线性多项式状态方程描述

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E$$

式中: $\mu = 1/v_a - 1$, v_a 为空气质量体积; E 为空气比内能。 $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ 时,该方程可描述理想气体状态方程。筒体和封头采用各向同性弹性模型,不考虑应变率和应变强化效应。

3 计算结果及分析

3.1 理想结构爆炸容器的应变分析

在数值模拟过程中得到了 4 个不同 TNT 当量下的容器关键点 A、B、C、D 的应变波形图。其中点 A 代表筒体爆心环面,B 代表筒体上距离爆心 1/4 筒体长处,C 代表封头与筒体连接处,D 代表封头顶点。理想结构是指爆炸容器仅由封头和筒体组成。下面将对理想结构的应变特征做具体分析。

图 2 是 4 种不同药量 TNT 爆心环面 A 点的环应变-时间曲线。如图 2 所示,由于压力载荷的宏观脉动特征,A 点环应变表现出跳变现象,呈现出应变幅度的非周期性消涨特征,但是 A 点应变在第 1 个消涨过程就达到了最大值,后续应变幅值始终小于初始应变值,即没有产生应变增长现象,说明椭圆封

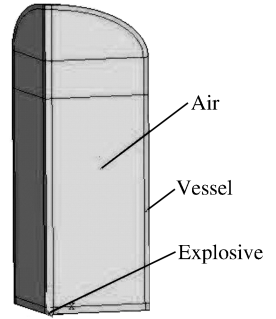


图 1 有限元模型

Fig. 1 FEM model

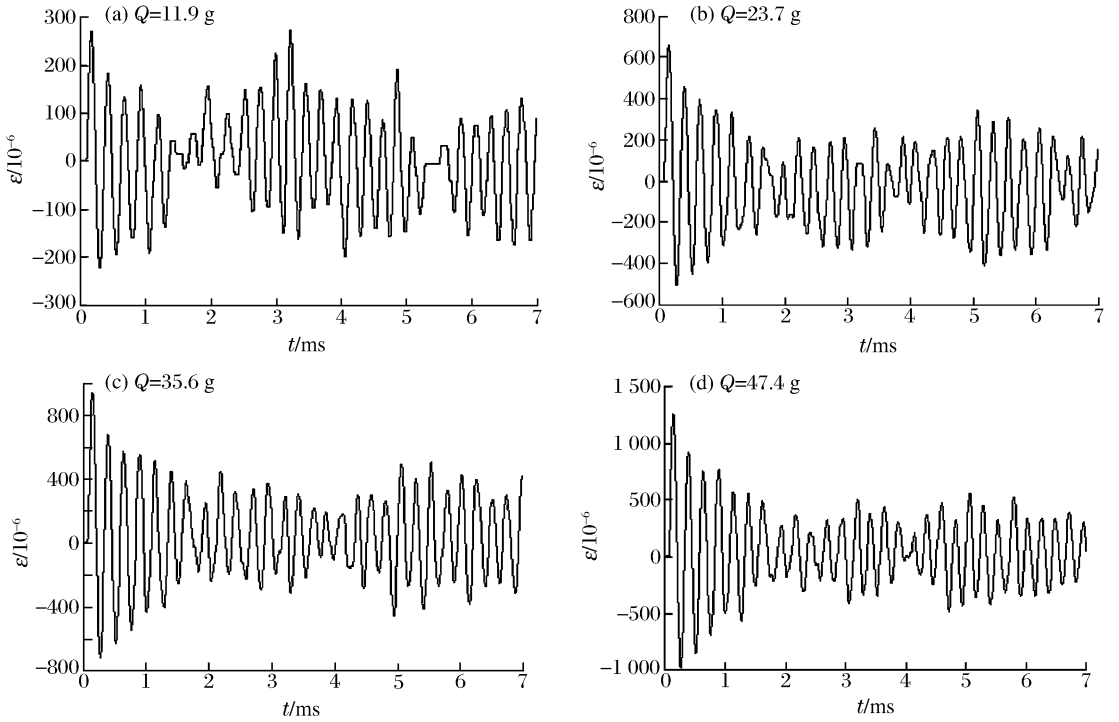


图 2 不同药量 TNT 爆心环面 A 点的环应变历程

Fig. 2 Strain histories at point A in case of different TNT equivalent mass

头与圆柱壳组合而成的理想结构,在内部爆炸载荷作用下爆心环面不会出现应变增长现象。在爆炸载荷的作用下,壳体运动的主振频率主要关于于壳体结构的固有频率^[17],对 $Q=23.7\text{ g}$ 时 A 点环应变曲线所做的 Fourier 分析如图 3 所示,图中 A 为振幅。从图中曲线可知,对应变贡献最大的频率主要集中在 $f=4.0\text{ kHz}$ 附近一个很小的区域内,而 4.0 kHz 正是容器主体径向呼吸振动的基本频率 f_0 ,说明对椭圆封头圆柱形爆炸容器壳体动力响应的数值模拟结果是准确的。

图 4(a)是 $Q=23.7\text{ g}$ 时筒体上 B 点的环应变-时间

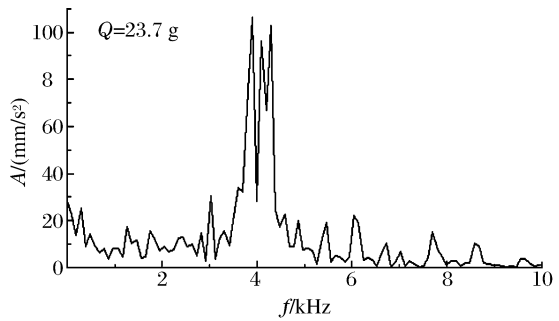


图 3 A 点环应变曲线的 FFT 变换

Fig. 3 Frequency spectrum

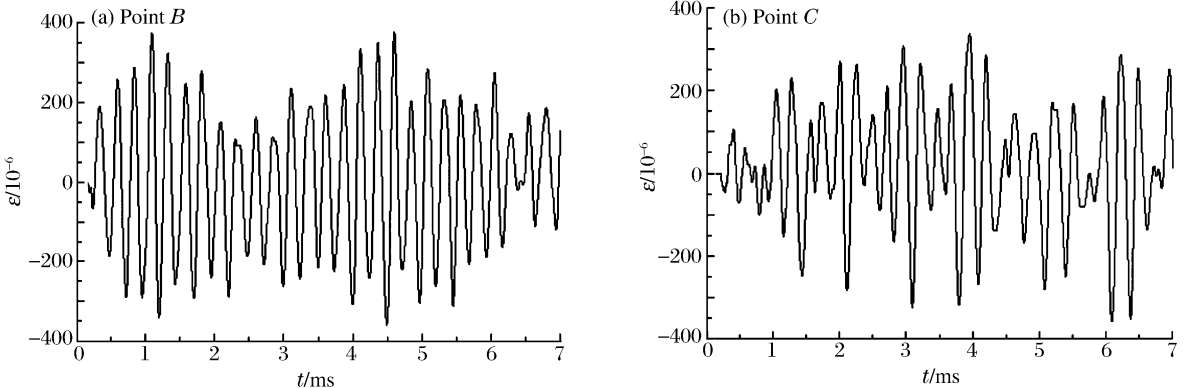


图 4 $Q=23.7\text{ g}$ 时的环应变历程

Fig. 4 Strain histories when $Q=23.7\text{ g}$

曲线。如图 4(a)所示, B 点应变不但表现出非严格一致的周期性消涨特征, 并且出现了后续应变大于初始应变的特征, 即应变增长现象, 最大应变是初始应变的 2 倍, 即应变增长系数 $K_p = 2$, 说明离开容器筒体爆心环面会出现应变增长现象。

图 4(b)是 $Q = 23.7 \text{ g}$ 时封头与壳体的连接点 C 的环应变-时间曲线。如图 4(b)所示, C 点也表现出了应变增长现象, 应变增长系数 $K_p \approx 3.5$, 大于 B 点的应变增长系数。可以看出 C 点并没有表现出 B 点那种有规律的拍现象, 说明这里的振动更复杂。在 C 点, 封头与筒体的连接导致曲率骤变, 使得此处的剪力和转角在整个筒体上是最严重的, 从而导致此处的变形极其复杂, 而且应变增长系数在整个筒体中是最大的。所以在实际容器设计过程中应该加强封头和筒体的连接处, 以免产生过大的变形而导致容器失效。

比较以上 $Q = 23.7 \text{ g}$ 时筒体上 A 、 B 、 C 等 3 点的环应变-时间曲线, A 点的最大应变值即初始应变为约 700×10^{-6} , B 点的最大应变值为约 400×10^{-6} , C 点的最大应变约为 350×10^{-6} , 可以看出 A 点的初始应变值远大于筒体上其他点的最大应变值, 说明在爆心环面位置虽然没有出现应变增长现象, 但是它的起始变形非常大, 在爆炸容器设计过程中也应该作为重点来考虑。

图 5 是爆心环面 A 点和椭圆封头顶点 D 点的应变-时间曲线。如图 5 所示, D 点没有显著的周期性消涨特征, 其应变特征与 A 点应变特征明显不同, 且 D 点应变值大于 A 点应变值。可以看出封头顶点的振动要比筒体的振动复杂得多, 由于椭圆封头本身结构复杂, 载荷在封头上的分布不均匀, 所以有更多的频率成分参与了 D 点的振动。封头顶点在爆炸载荷的作用下变形大, 且振动复杂, 是整个容器中最薄弱的地方, 所以封头顶点在实际爆炸容器的设计过程中, 也应作为最关心的位置, 应该采取适当的措施加强对这点的保护。

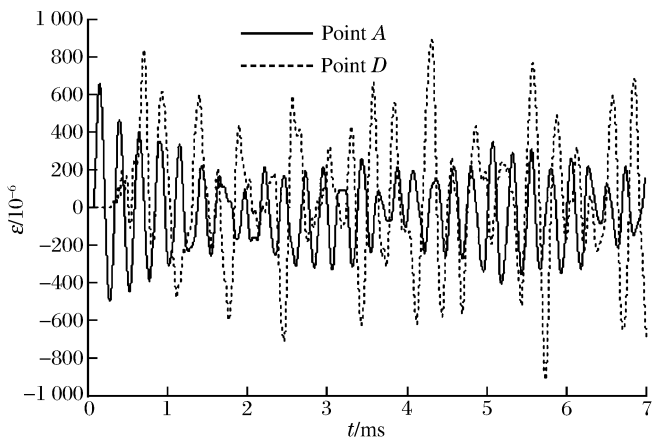


图 5 A 点和 D 点的应变历史

Fig. 5 Strain histories at points A and D

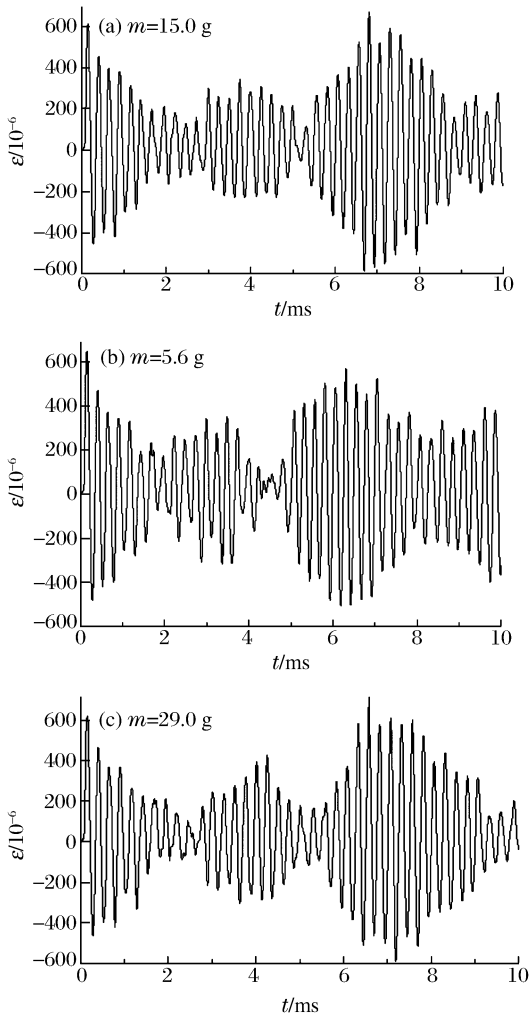
3.2 法兰对容器动力响应的影响

上节讨论的爆炸容器是仅由封头和筒体组合而成的理想结构, 实际爆炸容器的封头与筒体是由法兰连接的, 为了考察实际爆炸容器的动力响应, 在原模型两端均加入法兰连接结构, 忽略开孔、螺栓, 不考虑法兰的形式, 对法兰采用简化的圆环模型, 不同的法兰, 内径和厚度相同, 只是外径不同。将法兰与原容器作为一个整体进行建模, 建模时仍取 $1/8$ 模型, 法兰与筒体之间采用共节点连接。简化的法兰模型, 由于外径不同, 法兰的质量不同, 刚度也不同, 考察时法兰的质量 m 分别取 5.6、15.0、29.0 kg。

T. A. Duffey 等^[6]和朱文辉^[8]认为频率接近的不同振动模态的叠加是应变增长现象产生的原因。由图 6(a)中 A 点的应变曲线可以看出, 在容器上加上法兰后, 由于法兰的连接带来的附加弯矩对壳体的响应造成干扰, 使壳体在实际振动过程中有多个频率相互接近的薄膜和弯曲振动参与其中, 从而使得爆心环面明显出现了应变增长现象, 应变增长系数 $K_p \approx 1.10$; 容器加上法兰后, 应变增长沿容器轴向提前了, 即加法兰前, 离开爆心一定距离才出现应变增长现象, 加上法兰后, 在爆心产生了应变增长现象。

图 6(b)、(c)是 $Q = 23.7 \text{ g}$, $m = 5.6$ 、29.0 kg 时爆心环面 A 点应变曲线。从图中可以看出法兰质量较小时 A 点的应变虽有出现明显的周期性消涨现象, 但应变在振动的第 1 个 $1/4$ 周期就达到了最大值, 没有出现应变增长现象, 而 $m = 29.0 \text{ kg}$ 中却明显出现了应变增长现象, 应变增长系数 $K_p \approx 1.15$ 大于 $m = 15.0 \text{ kg}$ 时, 说明法兰的质量对壳体的动力响应产生了极大影响。所以在爆炸容器的设计过程中在法兰的刚度和密封性能相同的情况下, 选择较轻的法兰能够有效减小小容器爆心环面的变形。

将图 2 中第 2 个应变历程与图 6(b)、(c)作比较可以看出, 有无法兰时容器爆心环面响应在开始的

图6 $Q=23.7$ g时A点环应变历史Fig. 6 Strain histories at point A when $Q=23.7$ g

0~5 ms时非常接近,而后却有较大不同,说明法兰带来的弯曲是在容器振动了几个周期后才对爆心环面产生作用的。进一步说明了容器的局部结构对壳体有一定的影响。实际爆炸容器由于在爆心环面产生应变增长现象,在设计过程中不能只考虑该点的初始应变值,应限制该点的最大应变。

4 结 论

(1)对于椭圆封头与圆柱筒体组合而成的理想结构,在内部爆炸载荷的加载下,爆心环面的应变呈现出非严格一致的周期性消涨特征,并且应变在第1个消涨过程中就达到了最大值,没有出现应变增长现象;但在离开爆心环面的一定距离处开始产生应变增长现象,在封头与法兰的连接处应变增长系数 K_p 最大;爆心环面的初始应变值要大于筒体上其他位置的最大应变值,即它是整个筒体变形最大点;封头顶点在爆炸载荷作用下,其变形大于爆心环面,因此在爆炸容器设计过程中应该加强这3个位置的保护;

(2)实际爆炸容器在端部一定质量法兰的作用下,爆心环面开始出现应变增长现象,但当法兰较轻时,爆心环面没有应变增长现象发生,说明容器的局部结构对壳体的动力响应会产生极大的影响。实际爆炸容器在爆心环面将产生应变增长现象,因此在设计工作中要充分考虑到这一现象;在法兰的刚度和密封性能相同的情况下,选择较轻的法兰能够有效减小容器爆心环面的变形。

数值模拟过程忽略了容器上的开孔、螺栓、法兰形式、炸药形状和偏心对爆炸容器动力响应的影响。

参考文献:

- [1] 赵士达. 爆炸容器[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(1): 85-97.
ZHAO Shi-da. Blast chamber[J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 26(1): 85-97.
- [2] 李翼祺, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [3] Baker W E, Allen F J. The response of elastic spherical shells to spherically symmetric internal blast loading[C]// Haythornthwaite R M. Proceedings of the Third U. S. National Congress of Applied Mechanics. New York: ASME, 1958: 79-87.
- [4] 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.
- [5] Baker W E, Hu W C L, Jackson T R. Elastic response of thin spherical shells to axisymmetric blast Loading[J]. Journal of Applied Mechanics, 1966, 33(4): 800-806.
- [6] 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.
- [7] Duffey T A, Baker W E, Lewis B B. Containment of explosions in spherical shells[C]// Piping Supports and Structural Dynamics, ASME PVP. New York: ASME, 1993: 85-91.

- [8] 朱文辉. 圆柱形爆炸容器动力学强度的理论和实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 1994.
- [9] 钟方平. 双层圆柱形爆炸容器弹塑性结构响应的实验和理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1999.
- [10] 胡八一, 刘大敏, 柏劲松, 等. 脉冲载荷下球形爆炸容器的弹性响应[J]. 振动与冲击, 1998, 17(3): 19-23.
HU Ba-yi, LIU Da-min, BAI Jin-song, et al. Elastic response of spherical containment vessel to impulsive loads [J]. Journal of Vibration and Shock, 1998, 17(3): 19-23.
- [11] 胡八一, 柏劲松, 张明, 等. 真实爆炸容器壳体动力响应的强度分析[J]. 应用力学学报, 2001, 18(3): 136-139.
HU Ba-yi, BAI Jin-song, ZHANG Ming, et al. The dynamic response analysis of a real explosion-container vessel [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(3): 136-139.
- [12] 霍宏发, 于琴, 黄协清. 组合式爆炸容器冲击载荷及其动力响应的数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(5): 513.
HUO Hong-fa, YU Qin, HUANG Xie-qing. Numerical simulation of dynamical responses of assembled vessel to explosion impact load[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(5): 513.
- [13] Buzukov A A. Characteristics of the behavior of the walls of explosion chambers under the action of pulsed loading [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1976, 12(4): 605-610.
- [14] Kornev V M, Adishchev V V, Mitrofanov A N, et al. Experimental investigation and analysis of the vibrations of the shell of an explosion chamber[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1979, 15(6): 155-157.
- [15] 时党勇, 李裕春, 张胜敏. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [16] 蒋平国, 浣石. 小隔板试验冲击起爆和熄灭流场的实验与 Lagrange 分析[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 472-476.
JIANG Ping-guo, HUAN Shi. Experimental investigation and lagrange method used for small partition assay[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(5): 472-476.
- [17] 霍宏发, 黄协清, 陈花玲, 等. 椭圆封头圆柱形爆炸容器振动特性研究[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(6): 967-969.
HUO Hong-fa, HUANG Xie-qing, CHEN Hua-ling, et al. Experimental study on vibration characteristic of explosion vessel with cylindrical shells and ellipsoidal closures[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2000, 19(6): 967-969.

Numerical simulation on dynamic response of the cylindrical explosion containment vessel with an elliptical cover

MA Yuan-yuan^{*}, ZHENG Jin-yang, CHEN Yong-jun, DENG Gui-de
(*Institute of Chemical Machinery and Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China*)

Abstract: The dynamic response of a cylindrical explosion containment vessel with the elliptical cover under four kinds blast loading was studied using explicit finite element code LS-DYNA. The results show that for the ideal structure that only include a cylinder and an elliptical cover, the strain of the points on the plane which across the center of the vessel has become the largest during the initial stage. When adding a certain mass flange on the vessel, the strain growth phenomenon has shown up on the above points. The strain growth and the mass of the flange are the factors that must be considered when designed.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; explicit finite element; cylindrical explosion containment vessel; strain growth

^{*} Corresponding author: MA Yuan-yuan

E-mail address: mayuanyuan@sei.com.cn