文章编号：1000-5773(2003)04-0295-06

突发事件用爆炸容器设计方法及寿命评估*

段卓平[1]，栗玉斌[2]

(1. 北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室，北京 100081；
2. 吉林江北机械厂特种装备研究所，吉林吉林 132021)

摘要：提出了应付突发事件用爆炸容器的设计方法和使用寿命的评估方法，对 JBG 系列抗爆球罐在爆炸载荷作用后的残余变形进行了计算，评估了多次重复载荷条件下的使用寿命，残余变形的验证实验结果与计算结果基本一致。

关键词：爆炸载荷；爆炸容器；残余变形；使用寿命
中图分类号：X933.4 **文献标识码**：A

1 引 言

爆炸容器是一种潜在危险的限域装置，其作用是限制爆炸的作用范围，对试验设备和人员实现有效的近距离保护，对爆炸和爆轰过程进行测试和观察。这种容器主要用于国防科研部门的爆炸试验、核武器和化学武器的储存和转移、防止放射性或有毒废弃物以及其他有害材料引起的环境污染，过期武器弹药的销毁。近年，爆炸突发事件呈上升趋势，为防止恐怖分子携带的可疑爆炸物品危害社会安全，公安部门以及车站、机场、足球场等公共场所需要用爆炸容器紧急处理可疑爆炸物品。因此，应付突发事件的爆炸容器的研制具有十分重要的现实意义。

作为紧急处理可疑爆炸物品的爆炸容器，则要求小的体积和重量，但具有较大的抗爆能力；壳体可以发生塑性变形，但不能破裂。壳体在处理爆炸物后，能否继续使用，使用寿命是多少，是设计者和使用单位不可回避的问题。

对于爆炸容器设计的基础理论，Baker 等[1~4]做了大量的工作。国内近年由于科研和安全的需要，在爆炸容器壳体响应方面也进行了大量的研究，取得了一系列成果[5~7]。但是，对应付突发事件用的抗爆容器的研究和设计，特别是使用寿命的评估，国外公开报道很少，国内几乎是空白。本研究提出了应付突发事件用的抗爆容器的设计和使用寿命的评估方法，并对国营 524 厂生产的 JBG 系列抗爆球罐在爆炸载荷作用后的残余变形进行了计算，评估了多次重复载荷条件下的使用寿命，残余变形的验证实验结果与计算结果基本一致。

2 抗爆容器设计工程计算

2.1 一维弹性振动

对于壁厚为 h、平均半径为 R、密度为 ρ 的球对称(或柱对称)壳体，在内部载荷 $p(t)$ 的作用下运动，平衡的应力为 σ，径向位移为 u，在薄壳的近似条件下，径向的运动方程为

$$\rho\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}t^2}+\frac{2\sigma}{R}=\frac{p(t)}{h} \tag{1}$$

* **收稿日期**：2003-03-10；**修回日期**：2003-06-21
作者简介：段卓平(1965—)，男，博士，研究员，主要研究方向：爆炸与冲击动力学.

根据虎克定律

$$\sigma = E\varepsilon/(1-\nu) \quad (\text{球壳}) \tag{2}$$

式中:E 是杨氏模量,ν 是泊松比,$\varepsilon = u/R$ 是应变。一维薄壳线弹性方程可写成

$$\frac{\mathrm{d}^2 u}{\mathrm{d}t^2} + \bar{\omega}^2 u = \frac{p(t)}{\rho h} \tag{3}$$

式中:$\bar{\omega}^2 = 2E/[\rho R^2(1-\nu)]$(球壳),$T = 2\pi/\bar{\omega}$ 是壳体振动周期。

若 $t=0$ 时,$u = u_0 = 0$,假设壳体变形很小,壳体半径无明显变化,故 ω 可视为常数。这样(3)式即为一线性微分方程,根据载荷

$$p(t) = \begin{cases} p_r(1 - t/t_0) & 0 \leqslant t \leqslant t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \tag{4}$$

u 可以有解析解

$$u = \frac{p_r}{\bar{\omega}^2 \rho h}\left(1 - \cos\bar{\omega}t - \frac{t}{t_0} + \frac{\sin\bar{\omega}t}{\bar{\omega}t_0}\right) \qquad 0 \leqslant t \leqslant t_0 \tag{5}$$

$$u = \frac{p_r}{\bar{\omega}^2 \rho h}\left[-\cos\bar{\omega}t + \frac{\sin\bar{\omega}t - \sin\bar{\omega}(t-t_0)}{\bar{\omega}t_0}\right] \qquad t > t_0 \tag{6}$$

2.2 塑性响应

方程(5)、方程(6)的解只能用到应力达屈服应力 σ_y 的状态。假设壳体材料是符合线性应变硬化的应力-应变规律(如图 1),或者对于 $\sigma > \sigma_y$,应力由下式给出

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

式中 S 是应力-应变曲线塑性部分的斜率,下标"y"表示屈服点状态值,运动方程(1)可写成

$$\frac{\mathrm{d}^2 u}{\mathrm{d}t^2} + \frac{\alpha S u}{\rho R^2} = \frac{p(t)}{\rho h} - \frac{\alpha(\sigma_y - S\varepsilon_y)}{\rho R} \qquad t > t_y \tag{8}$$

式中:$\alpha = 2$ 表示球壳,$\alpha = 1$ 表示柱壳。这个方程和(3)式类似,可以用一样的方法求解,定义壳体径向振动频率为

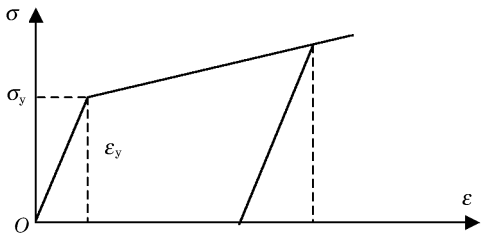


图 1 材料的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of material

$$\omega_p^2 = \alpha S/\rho R^2 \tag{9}$$

它比弹性振动频率要低。

对于(4)式定义的载荷,(8)式的解是

$$u = u_y \cos\omega_p(t - t_y) + u_y \frac{\sin\omega_p(t-t_y)}{\omega_p} - \frac{\alpha(\sigma_y - S\varepsilon_y)}{\rho R\omega_p^2}\left[1 - \cos\omega_p(t-t_y)\right] + \frac{p_r}{\rho h\omega_p^2}\left(1 - \frac{t}{t_0}\right)\Big] \cdot$$
$$\left\{\left[1 - \cos\omega_p(t-t_y)\right] + \frac{1}{\omega_p t_0}\left[\sin\omega_p(t-t_y) - \omega_p(t-t_y)\cos\omega_p(t-t_y)\right]\right\} \quad t_y \leqslant t \leqslant t_0 \tag{10}$$

$$u = u_y \cos\omega_p(t - t_y) + u_y \frac{\sin\omega_p(t-t_y)}{\omega_p} - \frac{\alpha(\sigma_y - S\varepsilon_y)}{\rho R\omega_p^2}\left[1 - \cos\omega_p(t-t_y)\right] \qquad t_y > t_0 \tag{11}$$

若屈服发生在压力脉冲期间,方程(10)可用到 $t = t_0$,方程 (11)用于屈服发生在脉冲之后,即 $t_y \geqslant t_0$。

3 JBG 系列抗爆容器变形的工程计算

到目前为止我国制造和使用的储运防爆罐,均为立式或上下泄爆的筒形结构罐,如果筒内爆炸物发生爆炸,虽可以基本保护筒周围人员和物品不受直接伤害,但如果是放置在室内,却不可避免强大的向上爆轰冲击波和反作用力对顶棚与地面的破坏。无论在室内还是室外,都无法预防爆炸飞溅碎片和巨大声响产生的震荡造成的二次伤害和破坏。针对上述问题,国营 524 厂设计了 JBG 系列球形爆炸物防爆储运罐,该罐为封闭球型结构,爆炸产物封闭在球内,高压气体从罐盖小孔缓慢释放,且受支撑盖阻

逆。爆炸后无碎片飞溅,没有较大声响,对环境不会产生作用力,所以不会造成二次伤害。根据我们的实爆试验,筒型罐经一次爆炸后就不能再用。JBG 系列球型罐如不超出规定的爆炸当量,罐体上各应变检测点间不会超出允许值,可多次重复使用。

这里设计的JBG 系列抗爆容器壁厚都为 30 mm,内径分别为 0.75 m、1.0 m、1.2 m、1.5 m,设计抗爆当量对应为 1.0 kg、3.0 kg、4.5 kg、6.0 kg TNT,使用的材料为 16MnR 钢,杨氏弹性模量 $E=208$ GPa,泊松比 $\nu=0.29$,屈服强度 $\sigma_s=325$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b=490$ MPa。

根据球形壳体弹、塑性振动理论,设计当量的炸药在球形抗爆容器内爆炸后,壳体的载荷、变形的计算结果见表 1。表中:W 为药量(kg),R 为壳体半径(m),p_r 为冲击波在壳体壁面的反射压力,t^+ 为正压作用时间,ω 为壳体在弹性阶段的振动频率,ω_p 为壳体在塑性阶段的振动频率,t_y 为壳体从变形开始到屈服的时间,ε_{max}为设计当量炸药爆炸时壳体的最大应变,ε_r 为设计当量炸药爆炸后壳体的残余应变。爆炸产生的冲击波入射超压的计算用文献[8]中的经验公式,考虑到容器壳体的变形对爆炸产生的容器内部的流场只有极小的影响(小于 1%),确定作用在容器各部分结构元上的爆炸载荷,此时容器壁可作刚性近似处理。对于容器内球对称爆炸冲击波,会发生多次反射,考虑反射脉冲压力(冲量)的衰减,壳体振动的最大值主要由前三个脉冲决定,而由前三个脉冲迭加的载荷是起始脉冲载荷的 1.75 倍[9]。

表 1　JBG 系列爆炸容器抗爆计算结果

Table 1　Calculated results of JBG-series blast chamber

No.	R /(m)	W /(kg)	p_r /(MPa)	t^+ /(μs)	ω /(s^{-1})	ω_p /(s^{-1})	t_y /(μs)	ε_{max}	ε_r
JBG-750	0.375	1.0	58.7	885	23112	1957	64	0.01395	0.01275
JBG-1000	0.500	3.0	54.6	1146	17335	1468	74	0.01367	0.01247
JBG-1200	0.600	4.5	51.4	1344	14445	1223	82	0.01572	0.01451
JBG-1500	0.750	6.0	43.8	1576	11556	978	99	0.01221	0.01102

4　抗爆实验及检验

为检验抗爆容器的抗爆能力,这里对 JBG-1000 爆炸容器进行抗爆实验。实验主要观测容器在炸药内爆后的变形情况。

实验采用密度为 $\rho_e=1.5\sim1.58$ g/cm^3 的长方形的军用 TNT 炸药,共重 3 kg,采用 8# 军用电雷管起爆,用 10 g 8701 做传爆药柱,放置在容器的中心位置。测点布置如图 2 所示,实验前准确测量各测点之间的母线距离,实验后再对相应测点进行测量,测量结果见表 2。

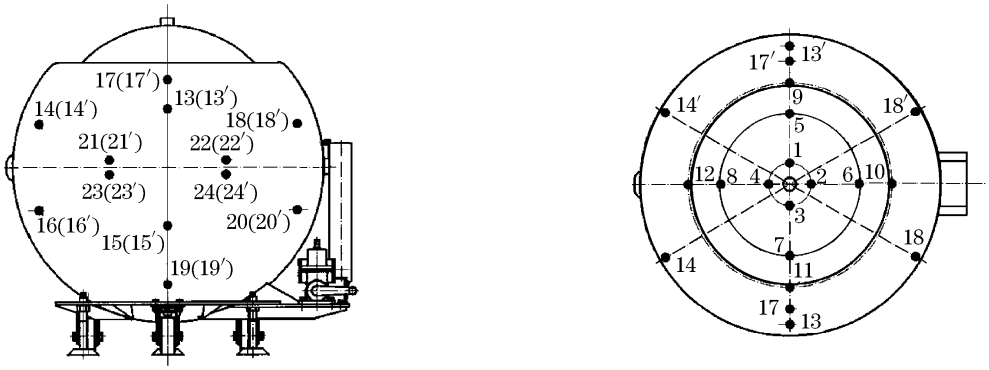


图 2　测点布置图

Fig. 2　Collocation of measuring points

表 2 JBG-1000 变形实验结果

Table 2 Experimental result of JBG-1000 distortion

No.	Position	Position distance /(mm)	Allowed remainder distortion/(mm)	Distance after blast/(mm)	Remainder distortion after blast/(mm)	Remainder strain after blast ε
1	1-5	194.3	6	195.8	1.5	0.0077
2	2-6	194.0	6	195.4	1.4	0.0072
3	3-7	193.8	6	194.8	1.0	0.0052
4	4-8	194.2	6	195.4	1.2	0.0062
5	9-11	720.5	20	722.8	2.3	0.0032
6	10-12	720.2	20	721.9	1.7	0.0024
7	13-15	410.1	12	410.8	0.7	0.0017
8	13′-15′	410.3	12	411.3	1.0	0.0024
9	13-17	114.2	3	115.0	0.8	0.0070
10	13′-17′	113.8	3	114.9	1.1	0.0097
11	14-16	410.0	12	411.2	1.2	0.0029
12	14′-16′	410.3	12	411.9	1.6	0.0039
13	14-18	248.5	7	250.4	1.9	0.0076
14	14′-18′	247.8	7	249.7	1.9	0.0077
15	15-19	248.0	7	250.2	2.2	0.0089
16	15′-19′	248.3	7	249.5	1.2	0.0048
17	16-20	248.1	7	249.6	1.5	0.0060
18	16′-20′	247.8	7	249.6	1.8	0.0073
19	18-23′	174.0	5	174.9	0.9	0.0052
20	18′-24	174.2	5	175.6	1.4	0.0080
21	20-23	173.9	5	174.8	0.9	0.0052
22	20′-24	174.0	5	175.1	1.1	0.0063
23	21-22	113.8	3	115.0	1.2	0.0105
24	21′-22′	114.2	3	115.1	0.9	0.0079

5 使用寿命评估计算

如果爆炸载荷足够大，壳体发生塑性变形，则要根据壳体材料的应力-应变曲线，按弹性范围和塑性范围分别处理，这里的材料应简化成线性硬化材料。首先，根据半经验公式，求出壳体承受的爆炸载荷的大小和正压作用时间，应用球形壳体弹性振动方程，根据屈服时的应变 ε_y，计算出壳体达到屈服点的时间 t_y；再根据塑性振动方程的解，计算出壳体能达到的最大应变 ε_{max}；最后根据材料应力-应变关系，计算最大应力 σ_{max} 和残余应变 ε_r。

对于短期使用的爆炸容器的使用寿命和安全性评价的理论分析，可重复上述过程，这时材料的屈服强度为前次爆炸加载而达到的最大应力值，这样，可求出各次加载后壳体的最大应变、最大应力和残余应变。假设每次爆炸载荷相同，当第 n 次同样加载后，壳体应力超过材料抗拉强度 σ_b，这时，容器的寿命为 $n-1$ 次。表 3 为 JBG-1000 抗爆容器重复抗爆时的应力、应变值，表 4 为各抗爆容器的设计抗爆当量和使用寿命。

对于安全性评价，可以根据爆炸容器使用的情况，测量使用后的残余变形，在图 3 中找到对应的壳

体曾经达到的最大应力 σ_i,以这个最大应力为下次计算的屈服强度,可计算再次允许使用的最大炸药量,也可计算某炸药量爆炸允许再使用的次数。

表 3　JBG-1000 爆炸容器重复抗爆时的应力、应变值

Table 3　The stress and strain of JBG-1000 blast chamber with repeat load

No.	ε_{max}	ε_e	ε_r	σ_{max}/(MPa)	$\sum\varepsilon_r$	t_y/(μs)
1	0.01367	0.00120	0.01247	351.4	0.01247	74
2	0.01184	0.00128	0.01056	373.7	0.02303	77
3	0.01050	0.00135	0.00915	393.1	0.03218	80
4	0.00951	0.00141	0.00810	410.2	0.04028	83
5	0.00876	0.00146	0.00730	425.7	0.04758	85
6	0.00816	0.00151	0.00665	439.7	0.05423	87
7	0.00768	0.00155	0.00613	452.7	0.06036	89
8	0.00728	0.00159	0.00569	464.7	0.06605	91
9	0.00697	0.00163	0.00534	476.0	0.07139	92
10	0.00667	0.00167	0.00502	486.7	0.07641	94
11	0.00646	0.00170	0.00476	496.7	0.08117	95

表 4　爆炸容器的设计抗爆当量和使用寿命

Table 4　Designed explosive mass and life-span of use

No.	R/(m)	W/(kg)	Life-span of use n/(time)
JBG-750	0.375	1.0	8
JBG-1000	0.500	3.0	10
JBG-1200	0.600	4.5	9
JBG-1500	0.750	6.0	16

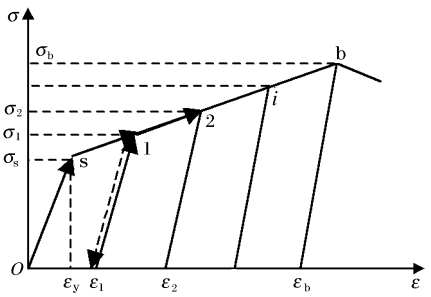


图 3　重复加载-卸载应力-应变路径

Fig. 3　Stress-strain curve of material with repeat load-uninstall

对于具体爆炸容器,根据壳体使用材料的抗拉强度 σ_b 和应力-应变关系,以及壳体的尺寸和安全系数,可确定壳体允许的最大变形。这可作为壳体使用和安全评价的依据。

6　结　论

(1) 由实验结果可知,JBG-1000 第一次爆炸 3 kg TNT 后,壳体的最大残余应变为 0.0105,而计算的最大残余应变为 0.0125,两者比较接近,相差 16%,说明本研究的设计理论稍偏保守,但合理可用。

(2) 本文中计算的允许的残余变形为 0.08,国营 524 厂给出的允许的残余变形大约为 0.03,工厂给出的值裕度太大,比较保守。

(3) 根据本文的计算结果可知,在工厂给出的允许的残余变形的条件下,JBG 系列抗爆容器的使用寿命为 2～3 次,本研究计算结果不少于 8 次,根据实验结果和计算结果来看,本研究的寿命计算结果较合理,工厂给出的值安全系数偏大。

References:

[1]　Baker W E. The Elastic-Plastic Response of Thin Spherical Shells to Internal Blast Loading [J]. J Appl Mech,

1960,27:139－144.

[2] Duffey T. An Elastic-Viscoplastic Solution for Impulsively Loaded Rings [J]. Int J Solids Struct, 1972, 8: 913－921.

[3] Belov A I, Belyaev V M, Kornilo V A, et al. Calculation of Wall Loading Dynamics in a Spherical Combustion Chamber [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 1985, 21(6): 132－135.

[4] Baker W E, Hu W C L, Jackson T R. Elastic Response of Thin Spherical Shell to Axisymmetric Blast Loading [J]. J Appl Mech, 1966, 33: 800－805.

[5] Duan Z P, Yun S R. The Experimental Study and Numerical Simulation of Explosion Containment Chamber [J]. China Safety Science Journal, 1994, 4(3): 1－7. (in Chinese)
段卓平,恽寿榕. 密闭爆炸容器实验研究及数值模拟 [J]. 中国安全科学学报, 1994, 4(3): 1－7.

[6] Zhu W H, Xue H L, Liu C L, et al. Experimental Study of Blast Chamber Enduring Interior Loading [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(4): 374－381. (in Chinese)
朱文辉,薛鸿陆,刘仓理,等. 爆炸容器承受内部加载的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(4): 374－381.

[7] Hu B Y, Bai J S, Zhang M, et al. Intension Analyzing for Dynamic Response of Sphericty Blast Chamber [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(4): 136－139. (in Chinese)
胡八一,柏劲松,张 明,等. 球形爆炸容器动力响应的强度分析 [J]. 工程力学, 2001, 18(4): 136－139.

[8] Beijing Institute of Technology. Explosion and Its Application [M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1979. 263－264. (in Chinese)
北京工业学院. 爆炸及其作用(下册) [M]. 北京:国防工业出版社, 1979. 263－264.

[9] Baker W E, Westine P S, Cox P A. Explosion Hazard and Its Evaluation [M]. Interpret by Zhang G S, Wen Y M, Liu J D. Beijing: The Crowd Publishing Company, 1988. (in Chinese)
Baker W E, Westine P S, Cox P A. 爆炸危险性及其评估 [M]. 张国顺等译. 北京:群众出版社, 1988.

Design of Blast Chamber for Break out Affair and Its Life-Span Evaluation

DUAN Zhuo-Ping[1], LI Yu-Bin[2]

(1. *State Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disasters, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Graduate School of Special Type Equipment, Jilin Jiangbei Machine Factory, Jilin* 132021, *China*)

Abstract: An evaluation method was proposed for the design and the life-span of use of blast chamber for break out affair, and the JBG series blast chambers had been designed and built up for resisting 1.0 ～6.0 kg TNT blast. In order to test the ability of the resistance to blasting, explosion experiment had been done, and the remainded distortions of the shell were measured. According to the method the remainded distortions of the JBG series blast chamber loaded first time by explosion with the allowed maximum explosive mass was calculated and the life-span of use for the shell affected by repeat explosion load was evaluated. The experimental and calculated results of remainded distortion were on the whole the same.

Key words: explosion load; blast chamber; remainder distortion; life-span of use