

带平板封头的双层爆炸容器 动力响应的实验研究^{*}

钟方平^{a,b} 陈春毅^b 林俊德^b 彭 炜^b 楼洸涛^b 刘 乾^b 张向荣^b

(a. 中国科学技术大学 合肥 230026)

(b. 西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 对采用平封头的圆柱形双层爆炸容器在内部装药爆炸所产生的载荷作用下的动力响应进行了实验研究。研究了容器内部抽真空和内层容器结构形式等因素对爆炸容器弹塑性响应的影 响,探讨了平封头应用的可行性。

关键词 爆炸 压力容器 高能炸药 弹塑性响应 应变

中图法分类号 O344.3

1 引 言

爆炸容器是现代爆炸和爆轰实验室常见设备之一。在一般情况下,爆炸容器是长期重复使用的。为确保安全,不允许容器发生塑性变形。为充分利用材料和估计爆炸容器安全上限,有必要对爆炸容器的弹塑性变形进行研究^[1~3]。为开展爆炸合成纳米金刚石粉等材料研究工作,需要进行少量的超过原有爆炸容器设计允许当量的实验。可以考虑在已有容器内部套一夹层,利用夹层承担爆炸载荷,保护爆炸容器。另一方面,对涉及到有毒物质的爆炸实验,可以采用多层结构爆炸容器,其内层一次性使用,实验完成后将内层容器移往它处进行处理。对于夹层或一次性使用的爆炸容器,在确保安全、密封的前提下,允许容器发生一定程度的塑性变形,可以节省材料,减轻重量,节约费用。

由于椭圆封头的受力状态比较理想,常规爆炸容器封头大多采用这种形式。对于一次性或短期使用来说,可以考虑采用平板封头,以节省经费。为此,加工了采用平板形式封头的双层圆柱形模拟爆炸容器,其外径 400mm,总长 830mm,内层容器壁分开孔和不开孔两种结构形式。采用固体炸药中心爆炸加载方式,在容器内抽真空与不抽真空两种条件下,对容器的弹塑性动力响应进行了实验研究并得到了一些有意义的结论。

2 实验装置和测试系统

2.1 模拟爆炸容器

图 1 是模拟容器示意图。外容器主体长径比为 2,两端均采用平封头,其中一个封头与外罐体直接焊接,另一个通过法兰用螺栓与外罐连接。容器主要尺寸见表 1。其中内罐两头有长 30mm,高 19mm 的凸台。共加工了 2 个内容器,其中一筒体上均匀分布数百个直径为 10mm

* 钟方平:男,1966 年 3 月生,博士。

李永池教授推荐。1999-02-27 收到原稿。

的小孔,孔的总面积占罐壁面积的 2.5%。内罐体两头用多孔板和挡圈定位(挡圈在封头和多孔板之间,防止爆炸时多孔板飞起来碰到封头上)。多孔板上均匀分布数十个直径为 20mm 的圆孔,开孔面积占 40%。所用材料均为 16MnR 钢。

表 1 实验容器的主要尺寸

Table 1 Experimental vessel parameters

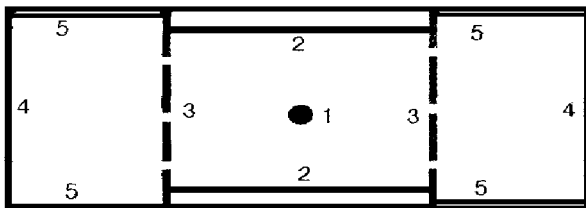
部件名称	外径/mm	长度/mm	厚度/mm
外罐体	400	770 ¹⁾	6
内罐体	350	500	10
封头			30
多孔板	387		25
挡圈	387	110	6

注:1)不含两封头的厚度。

2.2 测试系统

测试系统由电阻应变计、动态应变仪、同步机、数字示波器等组成。用 502 胶将箔式电阻应变片粘贴在容器外壁各测点上。其中封头中心贴一个应变片,外罐中央、内罐凸台对应处和凸台到封头内表面的中间位置上分别沿纵向和环向各贴一个应变片(图 2)。

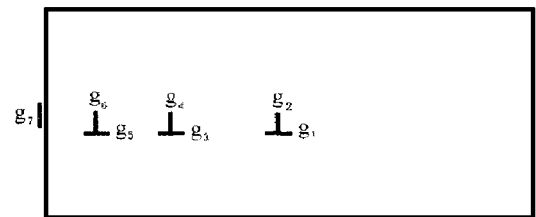
实验完成后取出内罐,分别测量内、外罐各点圆周长的变化情况,以确定残余塑性变形的发生和塑性变形的大小。



1. High explosives; 2. Interior vessel;
3. Porous plate; 4. Flat head; 5. Locating ring

图 1 模拟实验容器示意图

Fig. 1 Schematic arrangement of the experimental vessels



$g_1 \sim g_7$. Resistance gauges

图 2 探头位置示意图

Fig. 2 Gauge location

2.3 实验安排

为分别研究抽真空、内层容器和内层容器壁开孔等因素对爆炸容器动力响应的影响,进行了三项实验:(1)单层外罐抽真空和不抽真空实验(不装多孔板、挡圈和内罐);(2)带开孔内罐抽真空和不抽真空实验;(3)带不开孔内罐抽真空和不抽真空实验。实验药量为 12、48、120 和 240g 左右(等效 TNT 药量)。

对每一结构组合,从 12g 开始,先进行抽真空的爆炸实验,再进行不抽真空的实验,完成后增大药量进行下一轮实验。所有实验使用同一外罐。进行抽真空实验时,实测容器内气压不大于 500Pa。炸药柱放在简易木架上,仔细调整到位于罐体中心位置后进行实验。对每一结构组合,药量低于 100g 时实验重复 2~3 次,取测量结果的平均值。对大药量实验(100g 以上),考虑到内、外罐要重复使用,一般只进行一次,以确保安全和实验完成。

3 实验结果和分析讨论

3.1 实验数据

表2~表4分别给出单层外罐实验、外罐+开孔内罐实验和外罐+不开孔内罐实验中各测点的实测应变峰值。

表2 单层罐实验数据

Table 2 Experimental data for single vessel

实验条件	$\epsilon_{1\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{2\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{3\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{4\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{7\max} / (10^{-6})$
12g ¹⁾	152	282	143	196	300
12g ²⁾	308	544	394	447	340

注:1)表示抽真空实验;2)表示不抽真空实验。

表3 外罐+开孔内罐实验数据

Table 3 Experimental data for double-walled vessels (with opening on inner vessel)

实验条件	$\epsilon_{1\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{2\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{3\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{4\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{5\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{6\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{7\max} / (10^{-6})$	内罐累积塑性变形
12g ¹⁾	39	69	52	77			110	无
47g ¹⁾	214	414	247	308			485	无
47g ²⁾	386	489	496	535			752	无
118.0g ²⁾	921	951	659	1091	671	906	892	0.32%
231.0g ²⁾	1357	1328	852	1864	1223	1299	1472	1.87%

注:1)表示抽真空实验;2)表示不抽真空实验;表格中空白表示没有进行测量。

表4 外罐+不开孔内罐实验数据

Table 4 Experimental data for double-walled vessels (with intact inner vessel)

实验条件	$\epsilon_{1\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{2\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{3\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{4\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{5\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{6\max} / (10^{-6})$	$\epsilon_{7\max} / (10^{-6})$	内罐累积塑性变形
12g ¹⁾	54	75	48	70	72	47	56	无
12g ²⁾	131	164	122	161	151	169	212	无
48g ¹⁾	180	180	186	216	294	194	237	无
48g ²⁾	302	397	355	366			449	无
113.7g ¹⁾	492	343	418	352	471	315	642	无
114.2g ²⁾	604	616	738	491	582	498	889	0.68%
231.0g ¹⁾	1084	767	860	646	685	598	1246	1.09%
235.4g ²⁾	1386	971	1652	890	1365	1007	1625	1.95%

注:1)表示抽真空实验,2)表示不抽真空实验;表格中空白表示因故没有测到数据。

3.2 抽真空和内容器的影响和作用

在结构和炸药量相同的条件下,抽真空以后罐体的应变峰值有明显下降(约下降30%~50%),说明抽真空能够有效地降低爆炸载荷,提高罐体的抗载能力。

加上内罐以后,外罐的应变值明显小于单层外罐的情况,可见内罐承担了很大部分的爆炸载荷,对外罐起到了良好的保护作用。内罐在 100g 非真空实验后开始发生塑性变形(集中在中心附近区域,向外鼓起),最终残余塑性变形约 2%。外罐体最大应变峰值分别为 1864×10^{-6} 和 1652×10^{-6} ,说明外层罐某些部位可能开始发生塑性变形,但在测量精度范围内没有发现周长变化。外罐体母线保持平直,没有发生弯曲和裂缝。一般而言,相同药量时不开孔内罐的最大应变峰值小于开孔内罐的对应值,相同测点的测量值也反映出基本类似的规律。从提高结构抗载能力方面考虑,用不开孔内罐优于开孔内罐。

随着结构形式和炸药量的改变,本实验容器的弹塑性动力响应有不同的特点。(1)单层罐的最大应变峰值发生在罐体中心环向(ϵ_2),且对同一个测点,总是环向应变峰值大于纵向应变峰值;(2)外罐+开孔内罐时最大应变峰值不一定发生在中心环向,在药量较大时转移到对应于多孔板位置处环向(ϵ_4),随着药量的增加,各点的纵向与环向应变峰值逐渐接近,但基本上仍保持环向峰值大于纵向峰值;(3)外罐+不开孔内罐时在小药量实验中(100g 以下)纵向与环向应变峰值基本接近,大于 100g 以上时,除一个测点外,其余点的纵向应变都大于环向应变。

其原因可能是以下两个:(1)多孔板的影响。由于多孔板与容器封头之间通过挡圈互相接触,多孔板承受的冲击载荷通过挡圈传递到封头和外罐体上。当爆炸能量增加时,由多孔板对外罐体造成的纵向冲击作用不断加强。(2)内罐的存在和内罐上开孔两方面因素对爆炸波的传播发生影响。由于内罐限制爆炸能量的扩散,有加强纵向爆炸冲击作用的趋势;另一方面开孔又形成复杂的流动,有利于爆炸波衰减,但由于开孔面积比较小,所以前一因素影响更大。不开孔时,只有内罐的约束影响,所以纵向爆炸冲击作用相应得到较大加强,造成纵向应变峰值大于环向应变峰值。

3.3 平封头的动力响应

简支平板振动基频为

$$f_0 = \frac{4.977h}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}} \quad (1)$$

将各参数代入,得 $f_0=908\text{Hz}$,实测信号以 977Hz 为主,反映封头基本以板振动为主。由于将封头简化为简支圆板,忽略实际复杂结构的影响,所以频率略有差异。平封头的动态响应同

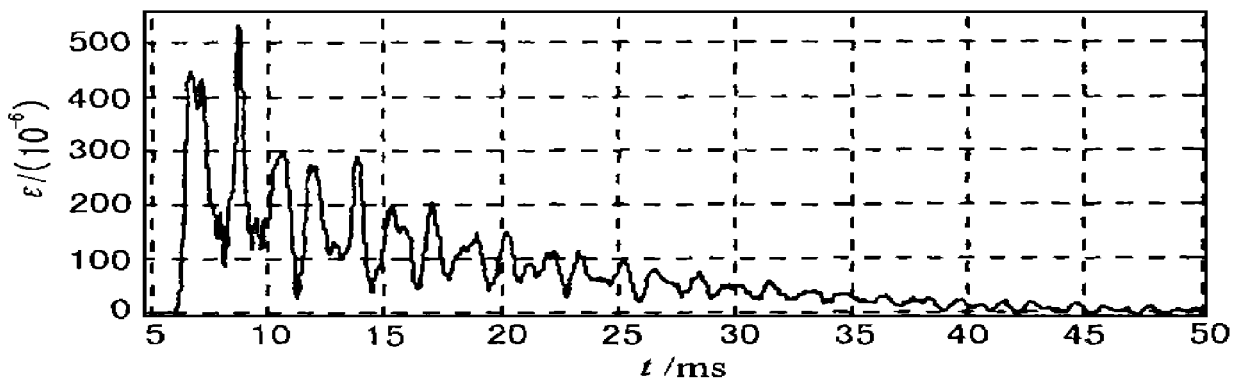


图3 封头实测应变波形(48g 炸药,双层容器)

Fig.3 The strain profile for the end cap(48g explosive, double-walled vessel)

时受容器纵、径向振动和爆炸波在内部来回反射的影响(图3)。平封头中心处应变值在每次实验中基本上是最大值或仅次于最大值,这反映了平板构件的受力特性。在采用多孔板阻挡冲击波后,封头的动态变形基本与外罐体在同一水平上。所有实验完成后,封头中心处挠度达到2~4mm,可以计算出累积残余塑性变形约为1%~2%(取罐外径为400mm)。考虑到封头的永久变形是多次实验累加的结果,对于一次性或短时期使用来说,可以采用平板形式的封头结构。

4 结 论

在相同炸药量的条件下,采用双层结构时外罐体变形远小于单层结构的变形。说明内层罐承担了很大的冲击载荷,很好地保护了外罐。实验表明内层罐不开孔的结构略优于内罐开孔的结构。

内罐的塑性变形集中在中心环区域。在多次大药量(最大235.4g)实验后最终累积塑性变形约2%,充分说明在条件许可时利用材料的塑性性质具有很大的潜力。

实验结果说明抽真空能够有效降低冲击载荷,提高罐体承载能力。在相同药量和罐体结构条件下,抽真空后罐体应变峰值大约为不抽真空情况下的50%~80%。

参 考 文 献

- 1 Duffey T A, Mitchell D. Containment of Explosions in Cylindrical Shells. *Int J Mech Sci*, 1973, 15: 237
- 2 Benham R A, Duffey T A. Experimental-Theoretical Correlation on the Containment of Explosions in Closed Cylindrical Vessels. SLA-73-0508, 1973
- 3 杨慕松. 爆炸容器的初步实验研究. 见: 第二届全国爆炸力学学术会议论文集(第三册), 扬州, 1981

EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMIC RESPONSE OF DOUBLE-WALLED EXPLOSION VESSELS WITH FLAT HEAD

Zhong Fangping^{a,b}, Chen Chunyi^b, Lin Junde^b, Peng Wei^b,
Lou Weitao, Liu Qian^b, Zhang Xiangrong^b

(a. *University of Science and Technology of China, Hefei, 230026*)

(b. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024*)

ABSTRACT The experimental research has been conducted to investigate the dynamic response of flat head double-walled cylindrical explosion vessels to the blast loading produced by detonation of high explosives centrally positioned within the vessel. The effects, due to the pressure of air contained in the vessel and the interior vessel structure, on the elasto-plastic response of the vessel are studied. The feasibility of the flat head structure is also investigated.

KEY WORDS explosions, pressure vessels, high explosives, elasto-plastic response, strain