

爆炸容器承受内部加载的实验研究^{*}

朱文辉 薛鸿陆

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

刘仓理 韩钧万

(中国工程物理研究院流体物理研究所 成都 610003)

摘要 对两种实验容器在分布和集中装药两种情形下进行了爆炸加载实验,测量了几个典型位置的应变和压力。对实验结果的分析表明,容器主体环应变中通常只包含少数几种频率成分。容器(I)($L=2D$)中心位置的环应变中有应变周期性消涨现象,发生了应变增长;而容器(II)中心位置的环应变的极大值总在第一个 $1/4$ 周期到达。偏离中心位置各点的环应变中都表现出应变增长,并且应变增长的程度随着远离中心位置趋向法兰附近(容器端部)而加剧。轴向应变和封头的振动中含存更多的频率成分。

关键词 振动 爆炸容器 应变增长

中图分类号 O383.3

1 引言

爆炸容器已愈来愈成为现代爆轰物理实验室的必要装备之一。它的工程设计和理论研究最早由 A. F. Demchuk^[1]和 W. E. Baker^[2]等人于60年代分别在苏联和美国各自独立地展开。其后在国外已有相当规模的研究,这些研究成果的总结可参见文献[3、4]。国内在爆炸容器的动力学强度研究上做得不多。我们通过对设计的模拟实验容器在不同装药形式下进行炸药爆炸加载的实验研究,揭示出爆炸容器壳体振动的某些特征,分析了解产生这些特征的原因,为爆炸容器的强度分析和工程设计提供可参考的实验依据。

2 装置和设备

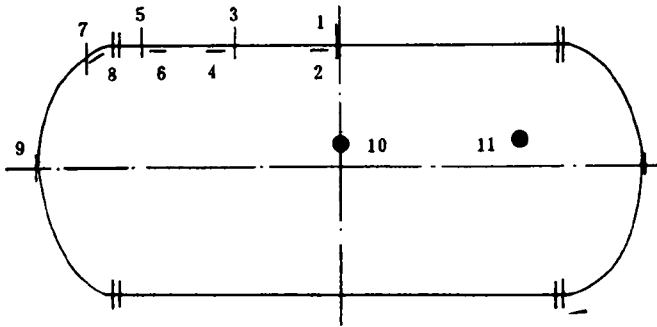
实验中使用了两个模拟实验容器,其中容器(I)外径 $D=425.6$ mm,壁厚 $H=9.8$ mm,主体 $L=2D$,主体材质为20钢;容器(II)外径 $D=426$ mm,壁厚 $H=9$ mm, $L=D$,主体材质为10钢。主体两端装配封头,以法兰连接,封头材质均为20钢。

在容器主体上中心圆面、法兰附近和这两者中间的位置共三个特征点用电阻丝应变片测量了容器(I)的环向和轴向变形;容器(II)的主体应变测量只针对中心位置和法兰附近进行。容器封头上测量了靠近法兰附近一点的经纬两个方向应变以及极点上的应变。同时对主体中心位置的残余变形进行了跟踪。在中心位置和法兰附近由压电石英传感器

* 中国工程物理研究院院外基金资助项目。

1994年8月22日收到原稿,1995年1月19日收到修改稿。

测量了内壁面的反射压力,各应变片和传感器的位置分布见图 1。测试系统包括两台 YE5852 型电荷放大器,一台 YJS-11A 型静态应变仪,三台四通道电压放大器,四个动态应变电桥,一台 CS2902H 型测试分析仪。由它们组成的测试电路见图 2。

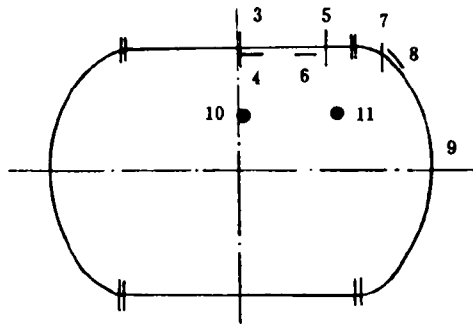


1~9 为应变片(“|”代表环向、纬向;“—”代表轴向、径向),10,11 为压力传感器

1~9 Strain gauge (“|” Represents in the latitude direction,
“—”Represents in the axial direction),10~11 Pressure gauge

(a) 容器(I)

(a) The chamber(I)



3~9 为应变片(“|”代表环向、纬向;“—”代表轴向、径向;

10,11 为压力传感器

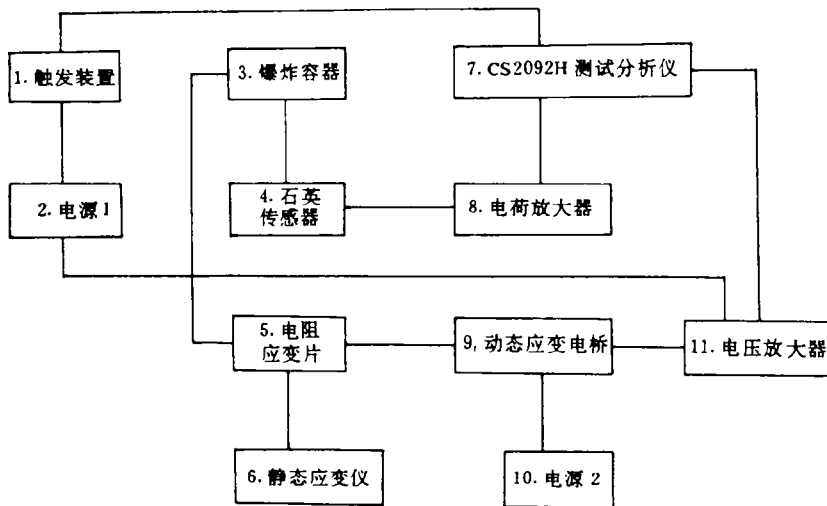
1~9 Strain gauge (“|” Represents in the latitude direction,
“—”represents in the axial direction),10~11 Pressure gauge

(b) 容器(II)

(b) The chamber(II)

图 1 应变片和传感器位置分布

Fig. 1 Location layout of strain gauges and pressure transducers



1. Trigger; 2. Electrical source I; 3. Explosive chamber; 4. Transducer; 5. Strain gauge;
6. Static-strain-meter; 7. Type CS2092 analyzer; 8. Charge amplifier;
9. Bridge of dynamic strain; 10. Electrical source 2; 11. Pressure-amplifier

图 2 爆炸加载实验的测试线路图

Fig. 2 Schematic diagram of the testing system

3 实验结果

在所进行的一系列加载实验中,炸药都选用导爆索,其单位长度的装药量为 12g RDX/m 。装药方式分线状分布装药和集中装药两种。在分布装药情形下,导爆索长度取实验容器主体的对应长度,沿容器对称轴布置,装药根数从 1 根逐渐增加到 4 根;集中装药时炸药由导爆索缠绕而成,悬挂于容器几何中心。对两种容器取相同的三种药量,对应的导爆索长度分别为 $760, 1520, 2280\text{ mm}$ 。每组试验重复 2~3 次,结果取平均值。容器整体由两端凸出的法兰盘自然支撑于平地。

测试过程中 CS2092H 测试分析仪的采样速率取 2.5 MSPS ,电压放大倍数置 50,电荷放大倍数为 10。在所进行的系列实验中,两个容器在两个位置(中心位置和法兰附近)的压力测量结果见表 1 和表 2。测量表明了多次反射脉冲的存在,但后续脉冲与第一主脉冲相比明显较弱^[5]。

表 1 和表 2 中线装药时的经验压力由 Tsikulin 公式计算,集中装药的压力由爆炸塔内的经验公式求得^[5]。可见在这里的实验条件,经验估计值不能良好地反映出测量结果。

在与图 1 的各应变片编号的位置所测得的部分应变结果列于表 3 和表 4。其中表 4 中容器(II)线状加载时的装药长度为每根 350 mm 。典型的应变变化曲线见图 3 和图 4。

从图 3 和图 4 可以看到主体上环应变随时间变化的特征对两种容器明显不同。对容器(I)($L=2D$),主体上各位置的环向应变呈现出显著的周期性消涨,其典型的应变信号见图 3。由于这种周期性消涨,环向应变的最大值不是在振动的初期或第一个 $1/4$ 周时期

达到,而是在以后的振动中发生,我们称之为应变增长现象。若定义振动过程中的最大应变 ε_m 和第一个 1/4 周期的应变幅值 ε_1 之比为应变增长系数 K_p ,则 K_p 值对容器(I)($L=2D$)在 1.2~3.5 之间。随着离开中心位置越远,距离法兰位置越近, K_p 值越大,而集中装药情形比线状装药时应变增长更为显著。

表 1 容器(I)两个位置上反射峰压测量结果

Table 1 Experimental results of pressure of the chamber(I)

导爆索 根数	压力/ 10^5 Pa(线装药)			压力/ 10^5 Pa(集中装药)		等效 TNT 当量/g
	p_1 (测量)	p_2 (测量)	p (经验)	p_1 (测量)	p_1 (经验)	
1	9±2	5±1	24	48±4	108	11.856
2	18±2	10±1	52	95±7	136	23.712
3	50±5	36±4	81	124±10	213	35.568
4	68±9	40±6	112	—	—	47.424

注:每根导爆索长 760 mm;“1”代表中心位置,“2”代表法兰附近位置;线装药情形的经验值同以 p 表示。

表 2 容器(II)反射峰压测量结果

Table 2 Reflection pressure of the chamber(II)

导爆索 根数	压力/ 10^5 Pa(线装药)			压力/ 10^5 Pa(集中装药)			等效 TNT 当量/g	
	p_1 (测量)	p_2 (测量)	p (经验)	p_1 (测量)	p_1 (经验)	p_2 (测量)		p_2 (经验)
1	21±3	16±4	24	69±4	108	16±2	24	11.856
2	40±3	39±4	52	112±9	136	60±4	53	23.712
3	72±5	70±6	81	135±25	213	78±15	110	35.568
4	91±7	84±10	112	—	—	—	—	47.424

注:线状装药时每根导爆索长 350 mm;集中装药时每根长 760mm,“1”代表中心位置,“2”代表法兰附近位置。

表 3 容器(I)的应变测量结果(导爆索每根长 760 mm)

Table 3 Results of strain of the chamber(I)

装药 根数	通道 号	线状装药				集中装药			
		$\varepsilon(\mu\varepsilon)$	$\varepsilon_m(\mu\varepsilon)$	t_m/ms	K_p	$\varepsilon(\mu\varepsilon)$	$\varepsilon_m(\mu\varepsilon)$	t_m/ms	K_p
1	1	158±20	204±7	—	1.3±0.12	351.6	470	3.77	1.34
	5	118±4	227±33	3.2	1.9±0.30	86.±5	292±14	4.25	3.38±0.04
2	1	278±9	399±13	1.8	1.4±0.04	672	943	3.9	1.4
	5	279±18	431±54	3.3	1.54±0.1	173	570	4.8	3.30
3	1	496±37	602±41	1.76	1.21±0.01	865±95	1117±135	3.8	1.28±0.02
	5	446±37	639±17	3.2	1.44±0.08	220±3	724±2	4.0	3.28±0.04
4	1	557±13	737±20	1.78	1.29±0.01	—	—	—	—
	5	495±42	662±54	3.2	1.33±0.01	—	—	—	—

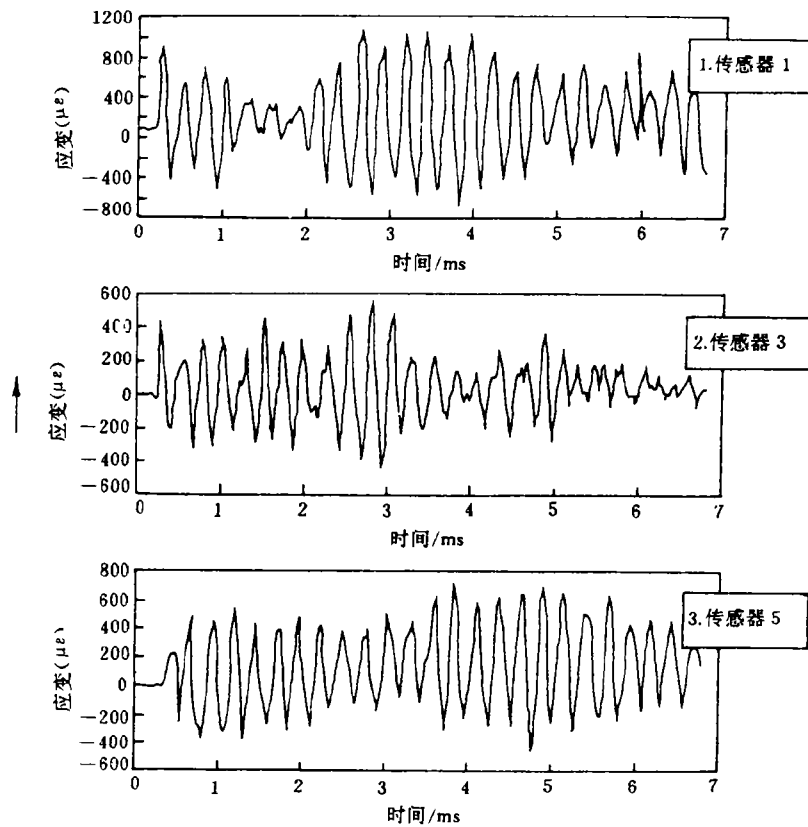
注: ε_1 为第一个 1/4 周期的变形幅值; ε_m 为应变的最大值; t_m 为达到 ε_m 所对应的时间。

表 4 容器(Ⅱ)的应变测量结果

Table 4 Results of strain of the chamber(Ⅱ)

装药 根数	通道 号	线状装药				集中装药			
		$\epsilon(\mu\epsilon)$	$\epsilon_m(\mu\epsilon)$	t_m/ms	K_p	$\epsilon_1(\mu\epsilon)$	$\epsilon_m(\mu\epsilon)$	t_m/ms	K_p
1	3*	205±17	208±19	—	1.0	406±28	—	—	1.0
	5*	48±6	109±13	1.6	2.45±0.02	116±9	167±14	0.52	1.44±0.04
2	3	312±27	—	—	1.0	675±41	—	—	1.0
	5	90±7	213±40	0.46	2.36±0.15	136±9	293±23	1.04	2.15±0.01
3	3	437±51	—	—	1.0	1049±97	—	—	1.0
	5	181±24	311±17	0.47	1.7±0.2	227±23	470±53	0.5	2.1±0.03
4	3	750±62	—	—	1.0				
	5	130±18	300±37	2.8	2.32±0.2				

* 导爆索长 456 mm

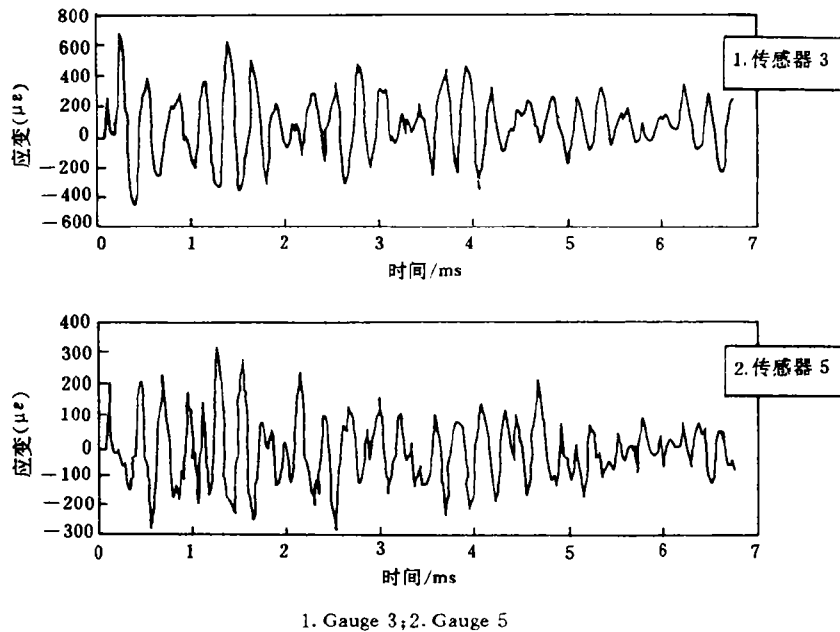


1. Gauge 1; 2. Gauge 3; 3. Gauge 5

集中装药, 药量为 3×760 mmRDX, Accumulative explosive is 3×760 mm RDX

图 3 容器(Ⅰ)应变随时间变化的典型曲线

Fig. 3 Typical strain vs. time curves of the chamber(Ⅰ)



集中装药,药量为 2×760 mmRDX, Accumulative explosive is 2×760 mm RDX

图4 容器(I)应变随时间变化的典型曲线

Fig. 4 Typical strain vs. time curves of the chamber(I)

对容器(I)($L=D$),环向应变信号尽管也有消涨变化,但主体中心位置上的环应变在我们的实验范围内都观察到其最大值在第一个 $1/4$ 周期到达,无显著的应变增长过程;而在靠近法兰处,应变的增长在线状装药下相应地较容器(I)显著,而在集中装药下较容器(I)弱。其典型的振动特征见图4。

两种容器的轴向振动信号中未见到类似的应变增长现象发生,其振动谱表现出更为复杂的性质。但是应变在数值上与环向应变在同一量级。

主体上应变的另一特征是振动的初期壳体十分接近于无弯矩(薄膜应力)状态,环应变有一稳定的基本频率 $f_0 \approx 4$ kHz,这个值与圆柱壳的径向呼吸振动的频率 $f = \sqrt{E/\rho}/2\pi R$ 非常一致。这种初始的薄膜振动持续约几个周期,然后就有其他频率成分的振型参与进来,使得振动过程复杂化。这一特征可从图3和图4清楚地看出。

封头上的应变也呈现出主体环应变的类似特征,并且靠近法兰处的应变增长特征较极点附近更明显。极点上应变变化的基本周期约为 0.45 ms,其最大应变值大于其他各点上的应变最大值。

4 结果分析和讨论

振动过程的初期,爆炸容器壳体呈现出良好的薄膜应力状态,但是其后随着弯曲的发展导致了应变增长现象的发生。因此我们认为应变增长是弯曲振型与初始薄膜振动叠加的必然结果。当弯曲振型及不同的薄膜振动的频率比较接近时,其叠加结果就出现类似于

图 3 的形状,相当于一个高频信号(约 4.0 kHz)被一个较低频调幅波(约 0.4 kHz)所调制。

基于这种分析,则容器振动过程中应变增长的程度取决于下述因素:对振动有主要贡献的所有振型的数目和振型相对应的频率与振幅,它们共同决定了应变增长系数 K_p 的大小。弯曲效应强的地方, K_p 较大;弯曲效应弱的地方, K_p 就小,这与实验结果完全符合。对于只有两种主要振型参与的振动, K_p 的极大值为 2。 $K_p > 3$ 则说明至少有三种以上振型对振动谱有主要贡献。

容器(I)和容器(II)环向振动谱特征的差别可能源于这样一个事实,即边界影响以及它们的各阶弯曲振型的频率谱的差别^[5],这个差别主要源于两种容器的长径比不同,因而各阶振型的频率、弯曲影响的程度及载荷分布的特征都不相同。另外,同种容器在集中装药加载下的应变增长较分布装药时更显著这个结果,也很明显地与弯曲效应的程度不同相关。进一步的理论分析表明,容器(I)确实存在频率与呼吸振动频率 f_0 相近的多种振型^[6],当它们相迭加时完全可能出现应变增长景象,且结果与实验吻合。这种响应上的差别可能是十分重要的,由于这种差别我们可以期望通过改变容器结构的特性尺寸来控制应变增长的程度。

为了弄清振动响应谱中所包含的频率成分,对应变信号进行了 Fourier 分析。对容器主体应变的分析表明,频率谱密度主要集中在 $f=0$ 和 $f \simeq 4$ kHz 附近的狭窄区域内,在其他频率域,频率谱密度很小。部分实验中还有 $f_0=2.5, 5.2 \dots$ kHz 等其他频率的存在。可见,只有少数几个频率的振型对振动起了主要作用。

通过上面的分析讨论,可以初步得出结论:

- (1)壳体振动初期基本上是无弯曲状态;
- (2)应变增长现象是弯曲振型与薄膜振动相互叠加的结果,应变增长的程度与结构的特征尺寸和所观察的位置有关;
- (3)容器主体上应变响应谱通常由少数几种频率成分作主要贡献;
- (4)在所测量的各点的应变中,封头极点上的最大应变幅值大于其它各点。

致谢:实验在中国工程物理研究院完成,作者衷心感谢刘光祚、刘绪发、李晓兰等同志的鼎力帮助。

参 考 文 献

- 1 Demchuk A F. Appl Mech Tech Phys(in Russian), 1968, (5): 47
- 2 Baker W E. J A M, 1960, 27: 139
- 3 赵士达. 爆炸与冲击, 1989, 9(1): 85
- 4 韩钧万. 在苏联有关爆炸容器的研制情况. 私人通信, 1992.
- 5 朱文辉. 圆柱形爆炸容器力学强度的理论和实验研究. [博士论文]. 长沙: 国防科技大学, 1994.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EXPLOSIVE CHAMBERS UNDER INTERNAL BLAST LOADING

Zhu Wenhui, Xue Honglu

(*National University of Defence Technology, 410073, Changsha*)

Liu Chuangli, Han Junwan

(*Southwest Institute of Fluid Physics, 610003, Chengdu*)

ABSTRACT Loading experiments were carried out on two model explosive chambers in two cases of charge: linear and concentrative charges. Strain and pressure on several typical positions were measured. Analysis based on the experimental results disclosed that only a few vibration modes play the main role in the hoop strain on the cylinder of chambers. For chamber (I), happens the strain growth in the strain at the central point, while for chamber (II) the maximum value of hoop strain at the correspondent position reaches at the first 1/4 period. The strain growth appears in the hoop strain at all other locations, and the farther the distance from the central point, the more remarkable the strain growth. More frequency components are contained in the axial strains at cylinders of chambers and polar strain on enclosures.

KEY WORDS explosive chambers, blast loading, vibration, strain growth