

文章编号: 1001-1455(2010)01-0101-04

大型爆炸防护结构的动态应力测试与分析*

张小鹏, 葛飞, 邢怀念, 金立强
(大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 对某大型爆炸防护结构进行不同工况的爆炸实验, 通过电测法测量了几个典型位置的应力, 结果显示: 从第1和第2主应力测试结果来看, 球壳表面在爆炸冲击作用下的冲击应力峰值除第1次最大外, 之后基本以拉压应力状态来回振动, 而且振动应力在经过1~2个来回后立刻减小到100 MPa以下, 土的堆压可以起到削弱球壳振动的作用, 因此球壳单次爆炸引起的振动疲劳问题大为削弱; 模型的强度满足设计要求; 排气孔附近是应力最为集中区域; 炸药的形状系数对结构的安全影响很大。

关键词: 爆炸力学; 应力应变; 电测; 爆炸容器

中图分类号: O389

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

爆炸容器是控制能量瞬间释放的一种防护设备, 容器能够承受和封闭一定当量的爆炸冲击波及爆炸产物的破坏作用, 并有效保护人员、设备和环境的安全, 因此被广泛运用于工业、国防及科研领域^[1-6]。在容器内实施封闭的化学爆炸时, 容器内壁上冲击波的载荷特征是进行爆炸容器结构动力响应分析、安全评估和工程设计的基础。由于封闭爆炸条件下爆炸冲击波的产生、传播和对结构的作用是一个复杂的动力学过程, 难以用理论方法获得完整的解析解, 因此获得比较准确可靠的内壁载荷时间和历程及分布情况, 对研究结构动力响应意义重大。本文中采用电测实验的方法直接获得内壁应力的变化情况, 为此类大型爆炸容器的生产和研究提供参考。

2 工程概况

为取得爆炸焊接半球阻波结构体的结构设计实验依据, 在某场地设置了1/6缩比实验模型, 模型主体为半球壳体, 底部、中部和上部各有1个加强环, 表面还设置了加强筋。壳体直径6 m, 钢板厚6 mm, 筋板厚6 mm、高50 mm, 上口直径1.33 m, 材料均为6 mm的16MnR钢材, 材料设计强度310 MPa, 弹性模量206 GPa, 泊松比0.3。模型建成后对其表面进行覆土, 并采用2~5 kg的各种药量和药形进行了爆炸冲击实验, 同时在壳体上进行了瞬态冲击应变测试, 再对测试结果进行计算, 得到各测点的应力情况。

3 实验原理

测试仪器选用DH5922型动态信号测试分析系统, 并配有专门的多功能自动数据采集与处理软件。应变片采用直角应变花, 单点温度补偿。测试数据记录和显示采用计算机。

在本次测量中, 构件的受力形式及构件形状是比较复杂的, 在这种情况下主应力的方向和大小往往是未知的, 此时需要用应变花来解决这个问题, 应变花是不同方向的应变片的组合, 如图1所示。0°、45°、90°的应变片呈逆时针排列。由直角应变花可以同时测得3个方向的线应变, 即 ϵ_0 、 ϵ_{45} 和 ϵ_{90} , 因此可根据平面主应变公式计算主应变的方向和大小

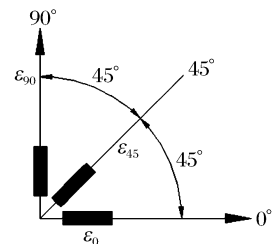


图1 直角应变花

Fig. 1 Rectangular flower strain

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{2} + \sqrt{[(\epsilon_0 - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_{45} - \epsilon_{90})^2]}/2}$$

* 收稿日期: 2008-07-16; 修回日期: 2008-10-29

作者简介: 张小鹏(1955—), 男, 副教授。

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{2} - \sqrt{\frac{(\epsilon_0 - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_{45} - \epsilon_{90})^2}{2}}$$

$$\tan 2\varphi_0 = \frac{2\epsilon_{45} - \epsilon_0 - \epsilon_{90}}{\epsilon_0 - \epsilon_{90}}$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 分别为测量平面内第 1、2 主应变, φ_0 为第 1 主应力与 0° 方向的夹角。最后可根据广义胡克定律将主应变转变为应力。

4 测试点的选择及传感器布置

在结构应力计算分析的基础上, 针对该结构爆破过程中的应力薄弱环节, 设置了 4 个测试点, 测试点具体位置见图 2。容器外观、半球阻波器覆土情况及覆土后爆炸实验瞬间如图 3~5 所示。本次测试采用的传感器贴片的位置定在壳体加肋网格的中心点, 应变片的布置规定如下: (1) 0° 片方向平行于水平地面方向; (2) 90° 片方向垂直于水平地面方向; (3) 0° 片、 45° 片、 90° 片为逆时针方向排列。

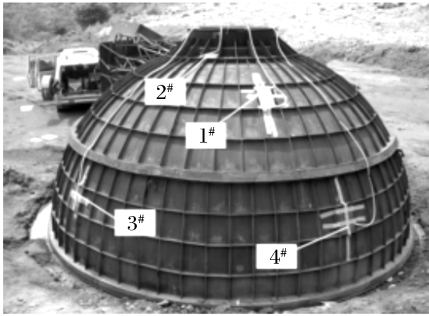


图 2 贴片的位置

Fig. 2 Test position



图 3 容器外观

Fig. 3 Explosion-containment vessel



图 4 半球阻波器覆土

Fig. 4 The vessel with soil



图 5 半球阻波器覆土后爆炸实验瞬间

Fig. 5 The moment of the test

5 测试结果及分析

(1) 经过一系列实验, 分析各工况的动应力波形图得出: 应力波形为典型的爆炸应力波形, 球壳表面在爆炸冲击作用下的冲击应力峰值除第 1 次最大外, 之后基本以拉压应力状态来回振动, 而且振动应力在经过 1~2 个来回后立刻减小到 100 MPa 以下, 图 6 是 5 kg 药量(药形 3)、4 号位置的第 1 主应力图, 比较具有典型代表性。

(2) 根据应变测试的结果可计算得出结构的最大应力及方向, 各测点在不同工况下都满足防护罩用材料的设计强度要求。实验测试结果见表 1, 其中 σ_1 、 σ_2 分别为测量平面内第 1、2 主应力。

(3) 比较各测点主应力变化情况可发现: 随着药量的增加, 2 号和 1 号位置的主应力增长幅度较大, 其中 2 号点应力增幅最大, 因此相对于其他点来说 2 号点最为薄弱, 当实际生产中需要再增加药量时应重点关注 2 号位置。图 7 为各测点主应力 σ_1 的比较。

(4) 图 8 为 5 kg 炸药不同药形下各测点应力的比较。分析不同药形情况下的应力变化情况可发现, 随着药形的不同, 3 号和 4 号位置的应力变化明显不同, 由此可推断出药形的不同对壳体不同部位的影响是不同的, 因此在实际使用中必须引进形状系数的概念来指导生产。

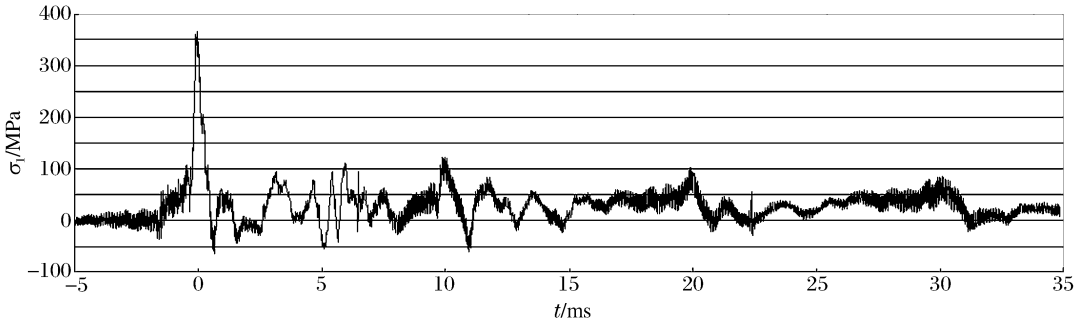


图 6 5 kg 药量(药形 3)、4 号位置第 1 主应力波形图

Fig. 6 The first principal stresses of 5 kg explosive

表 1 模型应力测试结果表

Table 1 The result of stress test

药量	测点号	$\epsilon_0/10^{-6}$	$\epsilon_{45}/10^{-6}$	$\epsilon_{90}/10^{-6}$	$\epsilon_1/10^{-6}$	$\epsilon_2/10^{-6}$	σ_1/MPa	σ_2/MPa	$\varphi_0/(\text{°})$
2 kg	4	406.0	393	562	604	364	161	123	24.70
	3	338.0	345	443	460	321	126	104	20.46
	2	390.0	308	252	391	251	106	83	-5.33
	1	191.0	233	172	234	129	62	45	39.77
3 kg	4	554.0	570	473	583	444	162	140	27.18
	3	309.0	317	374	382	301	107	94	18.51
	2	541.0	401	318	545	314	145	108	-7.17
	1	291.0	346	271	347	215	93	72	40.63
4 kg	4	581.0	637	513	643	451	176	146	34.65
	3	383.0	390	512	534	361	145	118	20.86
	2	736.0	569	438	737	437	197	149	-3.44
	1	316.0	399	290	400	207	105	74	41.14
5 kg(药形 1)	4	690.0	788	708	788	610	220	192	-42.10
	3	404.0	510	410	510	304	136	103	-44.20
	2	1 045.0	848	813	1 070	788	296	251	-17.50
	1	556.0	708	519	709	366	185	131	41.90
5 kg(药形 2)	3	309.0	379	445	445	309	122	100	-0.84
	4	873.0	815	568	900	541	240	184	15.89
5 kg(药形 3)	3	498.5	814	735	847	387	218	145	-29.50
	4	991.0	999	856	1 025	822	288	256	24.10
5 kg(药形 4)	3	412.0	489	557	557	412	154	131	-1.78
	4	1 261.0	1 290	1 143	1 307	1 096	371	337	28.08

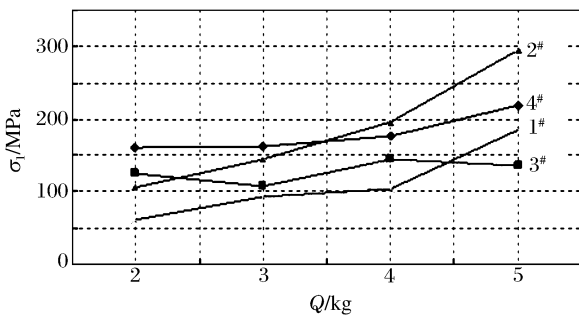


图 7 各测点主应力的比较

Fig. 7 The principal stresses at different measuring points

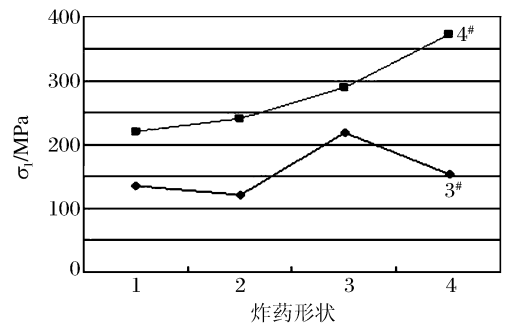


图 8 不同药形各测点主应力的比较

Fig. 8 The principal stresses for different charges

6 结 论

(1)土的堆压可削弱球壳振动,因此可以通过增加或减少土的质量来达到消除单次爆炸引起的疲劳问题,即通过调整覆土量达到单次爆炸球壳振动经过 1~2 个来回后立即减小到材料的疲劳极限以下,这样就可以忽略单次爆炸引起的球壳的振动疲劳问题,只需考虑多次爆炸引起的疲劳。(2)本次各工况中,除 5 kg 药量的其中一个工况结果偏大外,其他都能满足模型的设计强度,因此此次实验可以为最终实体的设计提供依据。(3)随着药量的增加,2 号位置即球壳的排气孔附近应力增加最快,这是壳体最为薄弱的环节,应该通过增加筋板来解决这个问题。(4)同一药量不同药形对结构不同位置的应力影响很大。因此炸药的形状系数也应引入到实验中,作为评定材料安全和指导生产的一条重要指标。

参考文献:

- [1] 赵士达. 爆炸容器[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(1): 85-87.
ZHAO Shi-da. Blast chamber[J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(1): 85-87.
- [2] 朱文辉. 爆炸容器动力研究进展评述[J]. 力学进展, 1996, 26(1): 68-77.
ZHU Wen-hui. A review of the mechanical research progress of the blast chamber[J]. Advances in Mechanics, 1996, 26(1): 68-77.
- [3] Hanna J W. The elastic response to internal blast loading of models of outer containment structures for nuclear reactors[R]. MRL-1067, 1959.
- [4] Karpp R R, Duffey T A, Neal T R, et al. Responses of containment vessels to explosive blast loading[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1983, 105(2): 23-28.
- [5] Duffey T A, Greene J M, Baker W E, et al. Containment of explosions in spherical vessels[R]. 1993 ASME PVP Conference. Denver CO, 1993.
- [6] Giglio M. Spherical vessel subjected to explosive detonation loading[J]. The International Journal of Pressure Vessel and Piping, 1997, 74(2): 83-88.
- [7] 吴宗岱, 陶宝祺. 应变电测原理及技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.

Dynamic stress measurement of a large explosion-containment vessel*

ZHANG Xiao-peng, GE Fei, XING Huai-nian, JIN Li-qiang
(Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Loading experiments were carried out in a large explosion chamber under different conditions, and the strains and stresses at several typical positions were measured by an electric test method. The experimental results show that: (1) The stress peak for the first time is the highest at the outer surface of the spherical shell under explosion impact, and then the vibration is basically dominated in the states of alternate tensile and compressive stresses, which fall below 100 MPa immediately just after 1~2 cycles, so the vibration fatigue of the spherical shell can be markedly weakened by the soil accumulation; (2) The strength of the model meets the design requirements; (4) The area showing the maximum stress concentration is nearby the discharge port; (4) The shape factor of the explosive charge has a great influence to the structure safety.

Key words: mechanics of explosion; large explosion-containment vessel; stress and strain; measuring

* Received 16 July 2008; Revised 29 October 2008

Corresponding author: GE Fei, sdgefei@163.com