

文章编号: 1001-1455(2010)02-0215-05

离散多层爆炸容器的抗爆性能和尺寸效应^{*}

邓贵德^{1,2}, 郑津洋¹, 陈勇军¹, 赵隆茂³, 赵永刚³, 马利¹

(1. 浙江大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310027;

2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013;

3. 太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 为了研究离散多层爆炸容器筒体的抗爆性能和尺寸效应, 对材料相同、几何相似、放大系数为4的2种离散多层试验圆筒进行了中心爆炸加载试验。试验结果表明, 2种离散多层圆筒极限承载 TNT 装药的相对质量为0.89%~1.11%, 尺寸放大4倍后离散多层圆筒的抗爆性能没有明显的降低。根据能量相关理论分析认为, 由于2种圆筒中钢带特征尺寸保持不变, 作为离散多层爆炸容器筒体承载主体的钢带层不存在强烈的能量尺寸效应, 从而使得离散多层爆炸容器筒体整体抗爆性能未被显著削弱。

关键词: 爆炸力学; 抗爆性能; 爆炸试验; 离散多层爆炸容器; 尺寸效应

中图分类号: O383 国标学科代码: 130°35 文献标志码: A

1 引言

爆炸容器按照使用目的和设计原则可以分为重复使用和单次使用等2类, 前者要求在任何情况下变形都是弹性的, 后者允许在使用过程中发生一定量的塑性变形, 充分利用材料性能以减小体积、减轻重量^[1]。尺寸效应^[2-3]是指不同尺寸的相似结构具有不同的结构强度, 一般随着结构特征尺寸的增大, 结构破坏应力降低, 强度和塑性变形能力减小。对于大型单次使用爆炸容器, 尺寸效应的存在会大大降低其极限承载能力。

科研人员已在爆炸容器尺寸效应方面开展了大量的试验研究。V. A. Tsypkin 等^[4-5]对单层球形和圆柱形金属爆炸容器的试验结果表明, 以量纲一相对质量 ξ ($\xi = W/M$, W 为装药质量, M 为容器质量, 对于圆柱形爆炸容器 M 一般取为2倍内径长度的筒体质量) 来表征爆炸容器壳体的承载能力时, 尺寸增大4倍导致 ξ 减小1/2, 失效应变减小为小尺寸容器的5/9~5/8。A. G. Ivanov 等^[6-8]的试验结果表明: 对于金属钢管, ξ 相同时小尺寸钢管没有破坏, 而4倍直径的大尺寸钢管被破坏, 且小尺寸钢管破坏前呈现的变形能力明显大于大尺寸钢管的; 对于球形爆炸容器, 直径增大10倍导致 ξ 减小为小尺寸容器的1/5, 失效应变减小为小尺寸容器的1/7; 直径尺寸增大15倍导致 ξ 减小为小尺寸容器的1/15.7。

但是, V. A. Ryzhanskii 等^[9]通过试验发现, 对于由相同直径玻璃纤维缠绕而成的圆柱形爆炸容器, 直径增大1.5~4.4倍, ξ 基本上不变化。A. G. Fedorenko 等^[10]的试验结果进一步表明, 直径增大9.3倍后, ξ 仍无显著变化。V. I. Tsypkin 等^[11]的试验研究结果表明, 由相同厚度钢带缠绕而成的圆柱形筒体也不存在明显的尺寸效应, 直径增大10倍后, ξ 只减小24.2%, 失效应变减小21.9%。以上研究结果表明, 单层金属爆炸容器存在着严重的尺寸效应, 而玻璃纤维缠绕爆炸容器和钢带缠绕爆炸容器不存在显著的尺寸效应。

离散多层爆炸容器是1种新型结构的爆炸容器, 筒体是由薄内筒和交错缠绕在内筒外的钢带层所组成的离散结构, 内筒厚度一般只占总厚度的1/4~1/8, 具有制造经济简便、材料质量易于保证、便于

* 收稿日期: 2009-01-09; 修回日期: 2009-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372091, 50675195, 50875236);

教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-0526)

作者简介: 邓贵德(1982—), 男, 博士。

现场制造等优点,在国防军事、科学研究、爆炸加工和公共安全等领域有广阔的应用前景^[12]。为了研究该型爆炸容器筒体的抗爆性能和尺寸效应,本文中对材料相同、几何相似、放大因数为 4 的 2 种离散多层试验圆筒进行中心爆炸加载试验。

2 试验圆筒

离散多层试验圆筒的结构示意图和实物图如图 1 所示,由筒体及两端 2 个相同的端部法兰构成,筒体是由薄内筒和缠绕钢带层组成的复合结构。筒体内筒与端部法兰的直边段焊接,钢带以相对内筒环向倾角 α 螺旋缠绕于内筒外,钢带两端斜边焊接于两端端部法兰的 45° 锥面,相邻钢带层交错缠绕以消除扭矩。试验圆筒总厚度为 H ,筒体总质量为 M ,其中内筒内半径为 R ,厚度为 h ,长径比为 2;钢带层缠绕层数为 N ,钢带宽 20 mm,厚 1.2 mm。端部法兰外径为内筒内径的 1.23 倍,长度为 L 。端部法兰材料为 20 钢锻件,内筒材料为 20 钢管,钢带材料为 Q195。

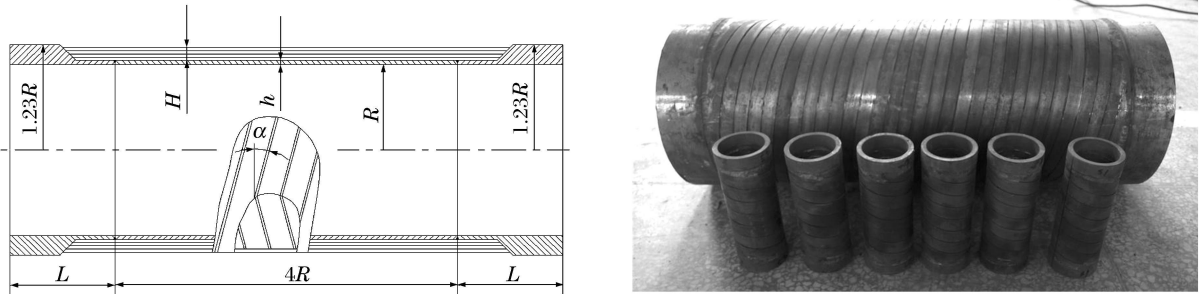


图 1 离散多层试验圆筒结构示意图和实物图

Fig. 1 Sketch map and actual picture of the discrete multi-layered cylinders

总共设计制造了大小 2 种型号共 9 台离散多层试验圆筒,其中大尺寸试验圆筒(L 型) 3 只,小尺寸试验圆筒(S 型) 6 只。2 种试验圆筒材料相同、几何相似,内筒厚度都占总厚度的 $1/4$ 。2,除所用钢带规格和钢带平均缠绕倾角保持不变外,其他关键尺寸的放大因数都为 4,具体参数如表 1 所示。

表 1 离散多层试验圆筒尺寸参数

Table 1 Dimension parameters of the discrete multi-layered cylinders

型号	R /mm	L /mm	h /mm	N	H /mm	α / ($^\circ$)	M /kg
S	32.5	40	1.5	4	6.3	10.9	1.348
L	130.0	160	6.0	16	25.2	10.9	86.260

3 试验结果

试验装药采用压装 TNT 炸药,装药形状为等长径比圆柱形,装药密度约为 1.55 g/cm^3 。试验圆筒垂直立于地面,装药悬挂于试验圆筒中心,采用电雷管从装药端部中心位置起爆。

表 2 所示为 6 只小尺寸离散多层圆筒的爆炸加载试验结果,表中 ξ 为离散多层试验圆筒爆心环面外壁面上的环向塑性应变平均值;图 2(a) 所示为试验后的小尺寸离散多层试验圆筒。小尺寸离散多层试验圆筒在 15 g 装药量时开始出现内筒内壁裂纹,而 2 次 12 g 装药量重复加载却没有出现,因此小尺寸试验圆筒的极限承载装药量为 12 ~ 15 g,采用相对质量表示为 $0.89\% < \xi < 1.11\%$ 。

表 3 所示为 3 只大尺寸离散多层圆筒的爆炸加载试验结果,图 2(b) 所示为试验后的大尺寸离散多层试验圆筒。试验圆筒 L1 在 3 次 768 g 装药重复加载作用下内筒未见裂纹,也未发现钢带断裂;L2 在第 1 次 960 g 装药作用下内筒无裂纹,也未发现钢带断裂,但在第 2 次 960 g 相同装药加载下,钢带层第 14 层有 2 根钢带被拉断;L3 在 960 g 装药作用下内筒未见裂纹,但钢带层第 15 层中 1 根钢带被拉断。大尺寸离散多层圆筒的极限承载装药量为 768 ~ 960 g,采用相对质量表示为 $0.89\% < \xi < 1.11\%$,这表明尺寸放大 4 倍后离散多层圆筒的整体抗爆性能并没有明显降低。

(a) S1~S6



(b) L1~L3



图 2 爆炸试验后的离散多层圆筒

Fig. 2 Discrete multi-layered cylinders after explosion experiments

表 2 小尺寸离散多层圆筒试验结果

Table 2 Experimental results of small discrete multi-layered cylinders

编号	W/g	$\xi/\%$	$\epsilon_B/\%$	破坏情况
S1	12	0.89	0.8	筒体鼓胀, 未见内筒裂纹和钢带断裂
			4.0	鼓胀量增大, 未见内筒裂纹和钢带断裂
S2	15	1.11	2.0	筒体鼓胀, 爆心附近内筒内壁出现 1 条明显裂纹, 长度约为 1/2 内周长; 未见钢带断裂
			3.6	鼓胀量增大, 内筒内壁新增 1 条裂纹, 原裂纹约扩展至整个圆周; 未见钢带断裂
S3	18	1.34	4.0	筒体鼓胀, 爆心附近内筒内壁出现 1 条明显裂纹, 长度约为 3/4 内周长; 未见钢带断裂
S4	20	1.48	4.9	筒体鼓胀, 爆心附近内筒内壁出现 1 条明显裂纹, 长度约为整周长; 未见钢带断裂
S5	20	1.48	5.7	筒体鼓胀, 爆心附近内筒内壁出现 1 条明显裂纹, 长度约为整周长; 未见钢带断裂
S6	25	1.85	9.7	筒体鼓胀, 爆心附近内筒内壁出现 1 条明显裂纹, 长度约为整周长; 未见钢带断裂
			> 9.7	筒体于爆心环面处爆破, 内筒破口沿第 1 层钢带的缠绕方向, 破口宽约 8 mm, 长约 60 mm; 破口处 2 根钢带断裂

表 3 大尺寸离散多层试验圆筒试验结果

Table 3 Experimental results of large discrete multi-layered cylinders

编号	W/g	$\xi/\%$	$\epsilon_B/\%$	破坏情况
L1	768	0.89	3.1	筒体鼓胀, 但未见内筒裂纹和钢带断裂
			5.1	鼓胀量增大, 但未见内筒裂纹和钢带断裂
			6.5	鼓胀量增大, 但未见内筒裂纹和钢带断裂
L2	960	1.11	5.5	筒体鼓胀, 但未见内筒裂纹和钢带断裂
			10.9	鼓胀量增大, 未见内筒裂纹, 第 14 层钢带层中 1 根钢带断裂
L3	960	1.11	5.6	筒体鼓胀, 未见内筒裂纹, 第 15 层钢带层中 2 根钢带断裂

4 结果分析

对于爆炸容器尺寸效应的解释主要有应变率理论、统计理论和能量相关理论等。A. G. Ivanov^[3]的研究和分析结果表明, 只有能量相关理论才能解释单层金属爆炸容器存在的强烈尺寸效应, 能量相关的

尺寸效应是导致大型单层金属爆炸容器承载能力下降的最主要原因。该理论认为,当结构中储存的弹性能等于裂纹扩展所需断裂功时结构发生破坏。对于材料相同、几何相似的结构,其储存的弹性能正比于特征尺寸 l^3 ,而断裂功正比于 l^2 ,由能量平衡可得破坏应力 σ_f 与结构特征尺寸 l 满足 $\sigma_f \propto l^{-1/2}$ 。

对于单层金属爆炸容器,特征尺寸为容器壁厚,比例放大 4 倍后破坏应力减小 50%。而对于由相同尺寸的玻璃纤维或者钢带缠绕而成的圆柱形筒体,由于其特征尺寸——纤维直径或钢带壁厚不发生变化,因此不存在显著的尺寸效应。离散多层爆炸容器筒体由内筒和钢带层组成,钢带层相当于钢带缠绕筒体,当缠绕所用钢带厚度尺寸不发生变化时,不存在强烈的能量相关尺寸效应;内筒比照于单层圆柱形筒体,可能会存在尺寸效应。但是,离散多层试验圆筒的内筒厚度只占总厚度的 1/4.2,钢带缠绕层为离散多层圆筒承载主体,由于钢带层极限承载能力未被能量相关尺寸效应削弱,离散多层爆炸容器筒体整体抗爆性能未被显著削弱,因此尺寸放大 4 倍后离散多层圆筒的抗爆性能没有明显地降低。

值得关注的是,表 2 和表 3 中装药相对质量等于 0.89%和 1.11%时,大尺寸离散多层圆筒爆心环面外壁面上的环向塑性应变平均值都大于小尺寸圆筒的,并没有出现失效应随尺寸增大而减小的现象,可能是由于钢带层间间隙的影响。实际加工的离散多层圆筒钢带层之间存在微小的层间间隙,层间间隙的存在不会降低离散多层圆筒的极限承载能力^[13],但会导致离散多层圆筒最外层钢带的径向位移值减小。由于合理控制的层间间隙并不随着筒体几何尺寸的增大而增大,大尺寸离散多层圆筒最外层钢带径向位移受层间间隙影响反而更小,从而使得实测所得其环向塑性应变平均值大于小尺寸圆筒的。

5 结 论

对材料相同、几何相似、放大因数为 4 的两种离散多层圆筒进行了中心爆炸加载试验,试验结果表明:两种离散多层圆筒极限承载 TNT 装药的相对质量为 0.89%~1.11%,尺寸放大 4 倍后离散多层圆筒的抗爆性能没有明显的降低。根据能量相关理论分析认为,由于 2 种圆筒中钢带特征尺寸保持不变,作为离散多层爆炸容器筒体承载主体的钢带层不存在强烈的能量尺寸效应,从而使得离散多层爆炸容器筒体整体抗爆性能未被显著削弱。

对衢州巨化集团工程有限公司的叶晓茹、魏志强、路敏等在试验容器加工方面的支持;太原理工大学应用力学研究所的梁卫民、宋延泽、李志峰等以及江阳化工集团科研所的张虎成、刘学柱、刘伟等在爆炸试验方面的协助,谨表感谢!

参考文献:

- [1] Thomas A D, Christopher R. Strain growth in spherical explosive chambers subjected to internal blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(9): 967-983.
- [2] Ivanov A G. Dynamic fracture and scale effects (survey)[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1994, 35(3): 116-131.
- [3] Bazant Z. Scaling of structure failure[J]. Applied Mechanic Review, 1997, 50(10): 593-627.
- [4] Tsympkin V I, Kleshchevnikov O A, Shitov A T, et al. Scale effect in the explosive destruction of water-filled vessels[J]. Soviet Atomic Energy, 1975, 38(4): 317-318.
- [5] Tsympkin V I, Ivanov A G, Mineev V N, et al. Effect of scale, geometry, and filler on the strength of steel vessels to internal pulsed loads[J]. Soviet Atomic Energy, 1976, 41(5): 303-308.
- [6] Ivanov A G, Minaev V N, Tsympkin V I, et al. Plasticity, failure, and the scale effect in explosive loading of steel tubes[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1974, 1(4): 603-607.
- [7] Ivanov A G, Novikov S A, Sinitsyn V A. Scale effect in the explosive destruction of closed steel vessels[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1972, 8(1): 124-129.
- [8] Ivanov A G, Ryzhanskii V A, Tsympkin V I, et al. Scale effect in the strength of a pressure vessel under internal explosive loading[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1981, 17(3): 102-108.
- [9] Ryzhanskii V A, Mineev V N, Ivanov A G, et al. Failure of water-filled cylindrical glass-reinforced epoxy shells under internal impulsive loading[J]. Mechanics of Composite Materials, 1978, 14(2): 283-289.

- [10] Fedorenko A G, Tsykin V I, Ivanov A G, et al. Deformation and failure of different-scale cylindrical glass-reinforced plastic shells in internal pulsed loading[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 1987, 22(4): 658-664.
- [11] Tsykin V I, Ivanov A G. Scale effect in explosive failure of wound strip shells[J]. *Strength of Materials*, 1981, 13(6): 110-112.
- [12] Zheng J Y, Deng G D, Chen Y J, et al. Experimental investigation of discrete multilayered vessels under internal explosion[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2006, 42(5): 617-622.
- [13] 朱国辉, 郑津洋. 新型绕带式压力容器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 111.

Anti-explosion capability and scale effect of discrete multi-layered explosion containment vessels^{*}

DENG Gui-de^{1,2}, ZHENG Jin-yang¹, CHEN Yong-jun¹,
ZHAO Long-mao³, ZHAO Yong-gang³, MA Li¹

(1. *Institute of Chemical Machinery, Zhejiang University,*

Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

2. *China Special Equipment Inspection and Research Institute,*

Beijing 100013, China;

3. *Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology,*

Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: Nine discrete multi-layered cylinders were manufactured with the same materials and the magnification factor of 4. A series of explosion experiments were conducted under internal explosive loading to investigate their anti-explosion capability and scale effect. Experimental results show that their limiting TNT charges are all 0.89%~1.11% in relative mass, and that the anti-explosion capability of the discrete multi-layered cylinders is not attenuated significantly after magnified 4 times. It is attributed to the reason that there is no strong scale effect of an energy nature in their steel ribbon layers which construct the main load-supporting capability of discrete multi-layered explosion containment vessels.

Key words: mechanics of explosion; anti-explosion capability; explosion experiments; discrete multi-layered explosion containment vessels; scale effect

* Received 9 January 2009; Revised 25 May 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10372091, 50675195, 50875236)

Corresponding author: ZHENG Jin-yang, jyzh@zju.edu.cn

(责任编辑 张凌云)