

文章编号: 1001-1455(2002)02-0179-05

侧向爆炸冲击波加载作用下 钢管吸能特性的实验研究

唐德高, 周布奎, 周早生

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 在爆炸冲击波作用下, 对横卧单、双钢管吸能特性进行了实验研究。得出了影响钢管吸能效果的主要因素是几何尺寸、吸能元件配重的质量、结构形式等, 且双钢管吸能元件的吸能效果好于单钢管的结论。

关键词: 冲击波; 钢管; 吸能特性*

中图分类号: O342 文献标识码: A

1 引言

随着科技的发展, 武器命中精度越来越高, 威力越来越大, 国防工程或人防工程口部结构抗力已经远不能适应未来战争需要。高强度、高阻尼新型材料的应用可以提高结构抗力, 同时研究一种吸能装置, 作为防护结构的附属结构将会进一步提高其抗力。这种新型附属结构以大变形吸能层结构较为有效。冲击波作用下, 吸能层发生大变形, 吸收冲击波能量, 降低主体结构上的荷载, 从而提高结构抗力。钢管吸能层已被广泛应用于机动车辆, 以提高车辆的抗碰撞能力^[1~2]。静载作用下钢管吸能层的吸能特性也由此得到了深入的研究^[3~4]。但冲击波荷载作用下, 钢管吸能元件的特性还未作深入研究。

我们利用核爆压力模拟器, 在冲击波作用下对横卧钢管吸能元件在冲击波作用下的变形特征、吸能特性以及影响吸能效果的因素作了研究与分析, 得出了具有实用意义的结果。

2 试验原理与方法

2.1 试验模型

使用的条件不同, 吸能元件的结构形式也应该不同。但是作为吸能元件, 应该具有塑性变形稳定、变形行程长、变形荷载小的特点。单钢管吸能层, 结构形式简单, 其他形式钢管吸能层主要是由单钢管组成, 所以要研究钢管吸能层的吸能特性, 首先要研究单钢管吸能层的吸能特性。为了探讨单、双钢管

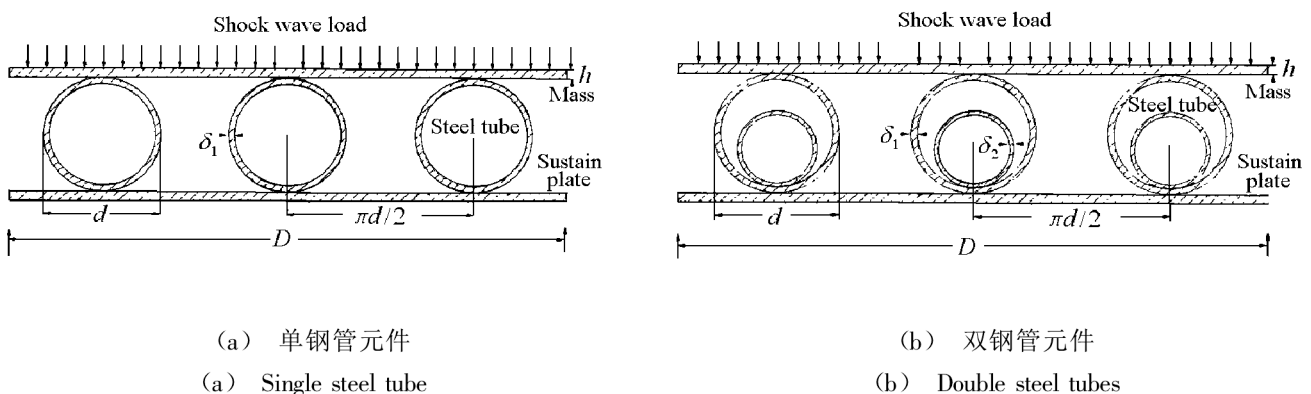


图1 试验元件

Fig.1 Experiment components

* 收稿日期: 2001-03-14; 修回日期: 2001-08-29
作者简介: 唐德高(1962—), 男, 硕士, 教授。

吸能层吸能特性之间的关系, 试验模型取单钢管横向压缩和双钢管横向压缩两种形式(见图 1), 其几何尺寸见表 1。模型底部为具有足够刚度的刚性支撑板, 顶部为配重质量块。

表 1 试验模型几何尺寸

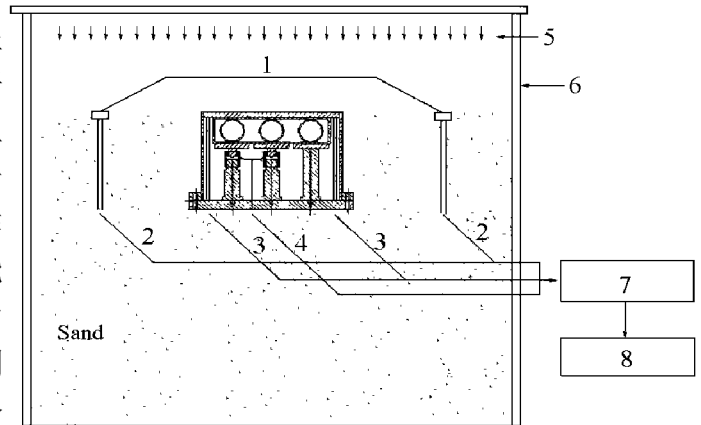
Table 1 Dimension of experiment components

| 单钢管尺寸 | | | 双钢管尺寸 | | | | | | 质量块尺寸 | |
|---------------|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-------|------|
| d/mm | l/mm | δ/mm | d_1/mm | l_1/mm | \hat{q}/mm | d_2/mm | l_2/mm | \hat{q}_2/mm | D | h |
| 62.5 | 100 | 3 | 62.5 | 100 | 3 | 40 | 100 | 3 | 338 | 10.4 |
| 62.5 | 100 | 37.5 | 62.5 | 100 | 3 | 40 | 100 | 2 | 338 | 14.6 |

d 为钢管直径; l 为钢管长度; δ 为钢管壁厚; D 为质量块直径; h 为质量块厚度。

2.2 试验原理

试验设备为模爆器, 高能导爆索在模爆器盖板和栅格板之间爆炸产生巨大的爆轰波, 经过栅格板整流后均匀地作用在空压传感器和模型上(如图 2 所示), 空压传感器和试验模型顶板处于同一水平面内, 空压传感器测量的冲击波即为作用在吸能元件上的动荷载 $P(t)$; 冲击波经过吸能层后的动反力 $R(t)$ 由吸能层正下方的晶体压力传感器测量; 模型顶板、底板、晶体压力传感器刚度远大于钢管刚度, 在冲击波作用下变形可忽略不计; 吸能层压缩位移即为刚性顶板与模型底板之间的相对位移 $u(t)$, 由动位移传感器测量。 $P(t)$ 、 $R(t)$ 、 $u(t)$ 由试验采集系统采集, 通过分析 $P(t)$ 、 $R(t)$ 、 $u(t)$ 即可研究钢管吸能层吸能特性。



- 1. Air pressure sensor; 2. Air pressure; 3. Displacement;
- 4. Dynamic pressure; 5. Exploding shock wave;
- 6. Outer shell of explosion simulation equipment;
- 7. Signal collection system; 8. Analyzing system

图 2 试验原理

Fig. 2 Experiment principle

3 试验结果分析

3.1 冲击波

作用在模型上的冲击波荷载由高能导爆索爆炸产生, 为了探讨吸能元件的吸能特性, 冲击波荷载保持不变, 因此每次试验用的导爆索的长度、放置位置和方式都相同, 测出的冲击波荷载峰值和波形也相同。图 3 为试验中空压传感器测出的冲击波波形曲线。

3.2 吸能效果分析

吸能效果与结构的破坏程度密切相关。结构动位移是结构动力响应的一个综合物理参数, 其大小反映了结构的工作状态。因此, 用冲击波 $P(t)$ 作用下的结构位移和经过横卧钢管后动反力 $R(t)$ 作用下的结构位移的变化计算吸能元件的吸能效果更具有实际意义。设 W_0 为冲击波荷载直接作用下吸能层下部主体结构的最大位移, W 为冲击波通过吸能元件后动反力作用下下部主体结构的最大位移, 则吸能元件吸能效果用 $\eta = (W_0 - W) / W_0$ 来表示。根据上述计算方法, 假定本次测得的冲击波 $P(t)$ 及不同吸能元件下测得的不同动反力 $R(t)$ 分别作用在简支梁上(为计算方便), 计算出的不同试验元件的吸能效果, 见表 2。

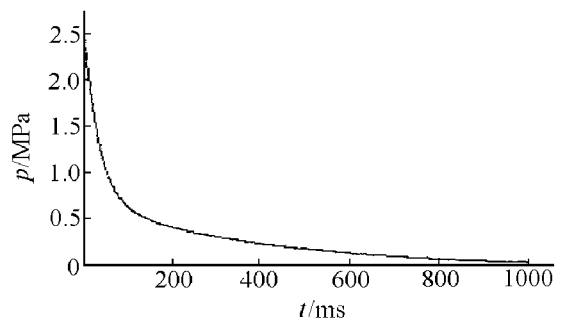


图 3 冲击波荷载

Fig. 3 Shock wave load

从表 2 可以看出：(1)双钢管吸能元件的吸能效果高于单钢管吸能元件；(2)对于单钢管和双钢管吸能元件，元件的壁厚和配重块质量对吸能效果的影响较大；(3)钢管吸能元件可以大大降低作用在下部主体结构上的动荷载，提高主体结构的抗力。

表 2 吸能元件的吸能效果

Table 2 Energy dissipating effect of experiment components

| 试件尺寸 | | | | | | C ₀ | C ₁ | η/(%) |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-------|
| d ₁ /mm | δ ₁ /mm | h ₁ /mm | d ₂ /mm | δ ₂ /mm | h ₂ /mm | | | |
| 62.5 | 3 | 10.4 | | | | 0.079 | 0.063 | 20 |
| 62.5 | 3 | 14.6 | | | | 0.079 | 0.055 | 30 |
| 62.5 | 3.75 | 14.6 | | | | 0.079 | 0.051 | 35 |
| 62.5 | 3 | 10.4 | 40 | 3 | 10.4 | 0.079 | 0.047 | 41 |
| 62.5 | 3 | 14.6 | 40 | 2 | 14.6 | 0.079 | 0.039 | 50 |

$W=C_0L^4/EI; W=C_1L^4/EI$ 。其中 L 为简支梁长度；EI 为简支梁抗弯刚度。C₀、C₁ 是与荷载波形、结构尺寸有关的综合系数。

3.3 试验元件的变形特征

图 4 为单钢管典型的动反力-位移曲线。从图 4 可以看出单钢管的动反力-位移曲线为四段：第一段(O—A)为钢管的弹性变形阶段；第二段(A—B)为钢管几何大变形阶段；第三段(B—C)为钢管强化大变形阶段；第四段(C—D)为钢管卸载阶段。

图 5 为双钢管典型的动反力-位移曲线。根据图 5 可以看出双钢管的动反力-位移曲线分为五段：第一段(O—A)为外层钢管弹性变形阶段；第二段(A—B)为外层钢管几何大变形阶段；第三段(B—C)为小钢管的弹性变形阶段；第四段(C—D)为小钢管几何大变形阶段；第五段(D—E)为双钢管卸载阶段。

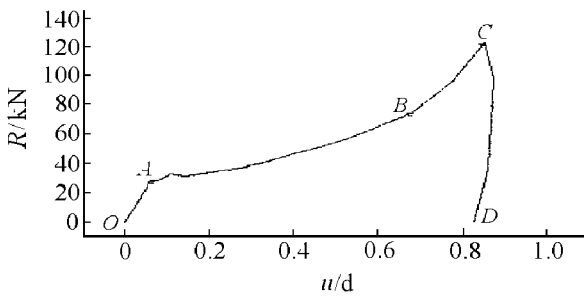


图 4 单钢管试件的动反力-位移曲线

Fig.4 Relation between dynamic residual force and displacement of single steel tube

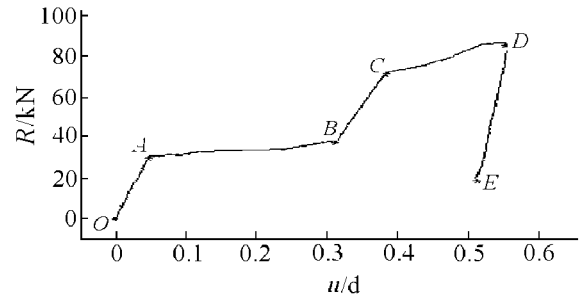


图 5 双钢管试件的动反力-位移曲线

Fig.5 Relation between dynamic residual force and displacement of double steel tubes

3.4 影响吸能效果的因素

3.4.1 质量

钢管吸能装置由钢管和配置于钢管上部的质量块(顶板)构成，质量块质量的大小对钢管吸能效果具有明显影响，图 6 为不同质量条件下单钢管动反力时程曲线。从图 6 中可以看出质量块质量越大，吸能元件动反力升压时间长，在同一时刻动反力就越小。从表 2 吸能效果的计算结果也可看出，质量块对钢管吸能效果的影响非常明显。同一厚度钢管试件，当质量块厚为 $h=14.6\text{mm}$ ，吸能效果 30%；当质量块厚度为 10.4mm ，吸能效果仅 20%。

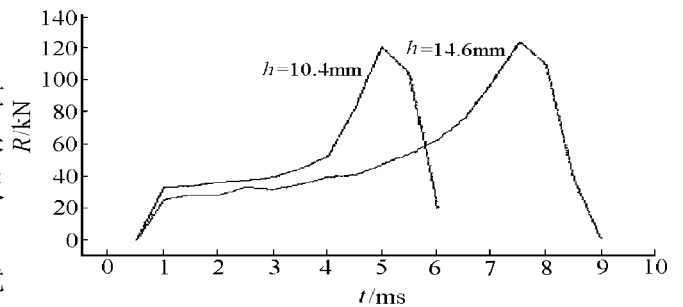


图 6 质量块不同钢管的动反力时程曲线

Fig.6 Residual force and time curves of steel tubes under different mass

3.4.2 几何尺寸

图7.8为不同几何尺寸试件的动反力时程曲线。对于钢管吸能元件,厚径比选择适当,可以避免质量块与结构发生直接碰撞,降低动反力峰值、延长动反力升压时间,提高吸能效果。对于单钢管,当其第二阶段变形(几何大变形)结束,第三阶段变形尚未开始时消波效果最明显,吸能效果最佳。对于双钢管,当小钢管第二阶段变形(几何大变形)结束,第三阶段变形尚未开始时消波效果最明显,吸能效果最佳。

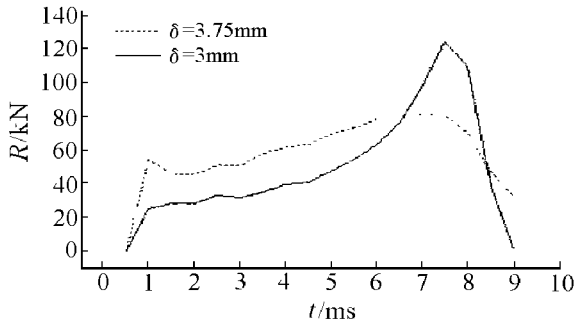


图7 几何尺寸对单钢管动反力的影响

Fig.7 Residual force of single tube in different geometry dimension

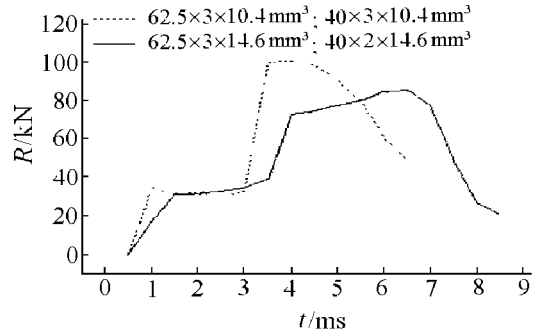


图8 几何尺寸对双钢管动反力的影响

Fig.8 Residual force of double tubes in different geometry dimension

3.4.3 结构形式

图9为不同结构形式吸能元件动反力时程曲线。从吸能效果的角度看,双管吸能元件吸能效果好于单管吸能元件,这是因为外层钢管产生大变形后,刚度迅速减小,由于内钢管支撑作用延缓了刚度衰减,有效避免质量块与下部支撑结构碰撞,降低动反力峰值,提高了吸能效果。

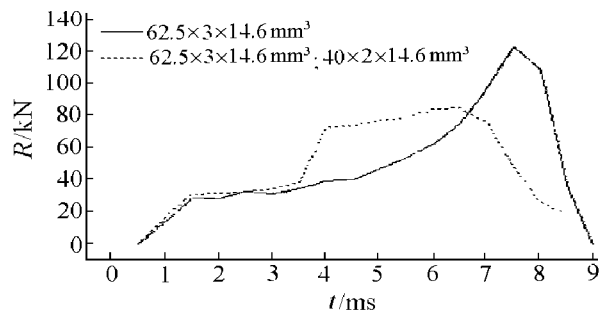


图9 结构形式对吸能元件的动反力的影响

Fig.9 Residual force in different structure models

4 结论

通过试验研究和分析,可以得出以下几点主要结论:

- (1)选取适当几何尺寸的横卧钢管吸能元件,能够有效削弱冲击波荷载峰值,降低作用在下部结构上的荷载,提高结构抗力。
- (2)单管和双管吸能元件的吸能效果均与上部质量块的质量和钢管几何尺寸有关。质量块和几何尺寸只有选取在一定范围内才能达到较好的吸能效果。
- (3)选取适当几何尺寸的钢管吸能元件,双钢管吸能元件优于单钢管吸能元件。

参考文献:

- [1] 余同希.利用金属塑性变形原理的碰撞能量吸收装置[J].力学进展,1986,16(1):28—38.
- [2] Johnson W, Reid S R. Metallic Energy Dissipating Systems[J]. Applied Mechanics Reviews, 1978, (31):277—288.
- [3] Redwood R G. Crushing of a Tube between Plates[J]. J Appl Mech, 1964, 31:357—358.
- [4] Reddy T Y, Reid S R. Phenomena Associated with the Crushing of Metal Tubes between Rigid Plates[J]. Int J Solids Structures, 1980, 16:545—562.

The Energy Dissipation Characteristics of Steel Tubes Side Loaded with Explosion Shock Waves

TANG De-gao, ZHOU Bu-kui, ZHOU Zao-sheng

(*Engineering Institute of Engineering Corps, PLAUST, Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

Abstract: The energy dissipation characteristics of single and double steel tubes side loaded with explosion shock waves were studied experimentally. It is found that the tube size, mass counterweight for power-absorbion and their structure are main factors to affect their energy dissipation. The experimental results indicate that energy dissipation effects of double steel tubes is better than that of single one.

Key words: shock wave; steel tubes; energy dissipating characteristics