

## 【其他研究】

杆件装置在冲击波作用下的形变<sup>\*</sup>杜红棉<sup>1</sup>,李燕杰<sup>2</sup>,祖静<sup>3</sup>

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,太原 030051)

**摘要:**在冲击波下,对杆件装置形变的受力进行了分析,并对其应力进行了计算,同时阐述了材料属性及机械结构与杆件装置形变的关系,分析了爆炸冲击力和爆炸高温辐射对杆件装置形变的影响,得到了冲击波测试试验中,在冲击与高温辐射的作用下,杆件装置的形变程度既与装置本身材料属性及机械结构有关,又与弹体装药重量及测点离爆心的距离有关,并且3者之间满足一定比例关系的结论。

**关键词:**冲击波;杆件;惯性力;弯曲强度

**中图分类号:** O383

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-0707(2010)06-0136-02

冲击波<sup>[1]</sup>是炸药爆炸时产生的高温高压火球急剧、迅速地向周围空间膨胀而形成的超压现象,是弹药性能检测的一个重要指标。由于该超压具有极强的摧毁力,因此用于冲击波威力测试的仪器及其安装设备必须经得起压力、拖拽力和剧烈震动的考验。此外,仪器的弯曲也会影响测试数据的准确性,因此,对装置形变的研究具有重要的意义。

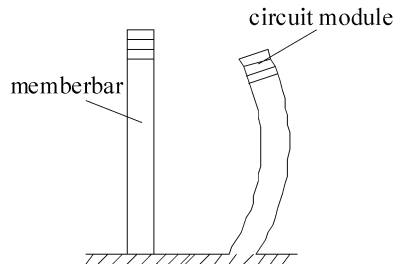


图2 简化模型

## 1 杆件装置形变的受力分析与应力计算

图1为冲击波自由场测试中杆件装置试验前后发生的变化,其爆心位于装置左侧,简化模型如图2所示。由图可知,爆炸冲击过程中杆件装置发生了明显的形变。

由于装置的直径及安装高度相对于其离爆心的距离要小的多,因此为简化模型,本文中把2个方向上的冲击力都作为均布力 $q$ 。其装置受力如图3所示。图3中: $m_1, m_2$ 分别为测试电路与杆件装置的质量; $a$ 为装置的加速度; $H, h$ 分别为测试电路及杆件离地面的高度; $D$ 为杆件直径; $F_1, F_2, F_3$ 为地面的约束力。

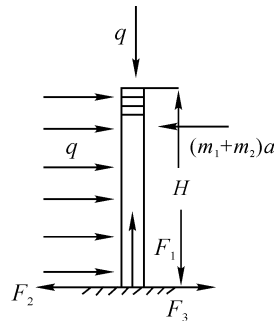


图3 杆件装置受力分析

为方便问题的分析,本文中把冲击发生分为2个部分:冲击力作用与惯性力<sup>[2]</sup>作用。由于杆件高度 $H$ 与横截面直径 $D$ 之比远远大于5,故其剪力对强度和刚度<sup>[3]</sup>的影响很小,本文中不予计算。

## 1.1 冲击力作用

图4为冲击力作用下杆件的受力情况,其轴向应力为

$$\sigma_{\parallel} = \frac{qD}{S} = \frac{4q}{\pi D} \quad (1)$$

水平方向应力为

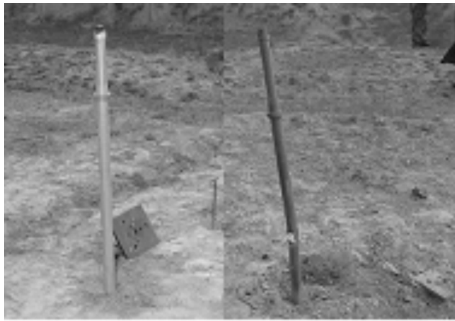


图1 试验前后装置比较

\* 收稿日期:2010-01-04

作者简介:杜红棉(1977—),女,博士,讲师,主要从事恶劣环境下武器系统参数测试研究。

$$\sigma_{j2 \max} = \frac{M_{\max}}{W_Z} = - \frac{16qH^2}{\pi D^3 (1 - [\frac{d}{D}]^4)} \quad (2)$$

冲击荷载弯压组合变形应值为:

$$\sigma_{d1} = k_{d1} |\sigma_{j1}| + k_{d2} |\sigma_{j2 \max}|$$

$$\sigma_{d1} = q \times \frac{8}{\pi D} + V\sqrt{q} \times \sqrt{\frac{32E}{\pi g D^2 (1 - a^4)}} \quad (3)$$

式中: $D$ 和 $d$ 分别表示钢管的外径和内径; $E$ 为弹性模量; $V$ 为冲击荷载的速度; $g$ 为重力加速度常数。

因此,冲击力作用下的杆件装置危险截面发生在杆与地面的连接处。

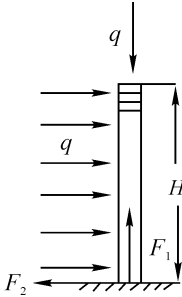


图4 冲击力作用

## 1.2 惯性力作用

图5为惯性力作用下杆件的受力情况。图5中: $a(m_1 + m_2)$ 为惯性力<sup>[3]</sup>,方向与加速度相反。由于形变过程对能量的吸收,故

$$a(m_1 + m_2) < qH$$

式中: $a$ 为装置的加速度,其值与冲击作用力成比例关系。

令 $a = \beta qH$ ( $\beta$ 为比例系数),则有

$$\sigma_{d2} = V\sqrt{q} \times \sqrt{\frac{96\beta EH(m_1 + m_2)}{\pi g D^2 (3H - h)(1 - a^4)}} \quad (4)$$

由于 $m_1, m_2$ 质量相近,故该惯性力可认为集中在2者的接触面上,力的突变也使得该接触面成为了危险截面。

冲击力、惯性力的作用结合就是整个系统的作用过程。

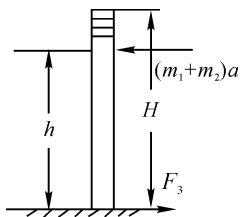


图5 惯性力作用

## 2 材料属性及机械结构与杆件装置形变

由式(3)、式(4)可知,装置的形变应力与材料的弹性模量 $E$ 、装置的高度 $H$ ,以及杆件的内外直径 $D, d$ 有关,并满足一定的比例关系。因此,在实验条件一定的前提下,为实现测试数据的准确无误以及达到仪器设备多次使用

的要求,应合理选择设备材料、优化装置机械结构。

## 3 爆炸冲击力与杆件装置形变

由萨道夫斯基公式<sup>[4]</sup>可得:

$$\Delta p_m = p_1 - p_0 = \frac{0.84}{\bar{r}} + \frac{2.7}{\bar{r}^2} + \frac{7}{\bar{r}^3} \quad (5)$$

$$V = c_0 \sqrt{\left[ \frac{6}{7p_0} \left( \frac{0.84}{\bar{r}} + \frac{2.7}{\bar{r}^2} + \frac{7}{\bar{r}^3} \right) + 1 \right]}, \bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{W}} \quad (6)$$

式中: $p_1, p_0$ 分别为冲击波波面绝对峰值压力未扰动的空气初始压力; $W$ 为装药重量; $r$ 为测点至药包中心的距离; $C_0$ 为未扰动的空气声速。

结合式(3)、式(4)可得,装药重量 $W$ 和测点至药包的距离 $r$ 将直接影响杆件装置的形变,并且成一定的比例关系。因此,在实验前要根据测试目标的威力及测点布局,选取并设计合理的测试装置。

## 4 爆炸高温辐射与杆件装置形变

炸药在爆炸瞬间能产生巨大的热辐射。该热量虽作用距离较短,且没有累计效应,但温度极高,故其对周围的物体仍然具有强烈的毁伤作用。以梯恩梯炸药(TNT)为例,1.95 kg的TNT在爆炸后,其火球在100 ms时能够达到1 713 °C的高温<sup>[5]</sup>;液体二次云爆剂的火球温度会更高。一般情况下,钢的熔化温度大约为1 500 °C,或者更低,所以在高温环境下,金属材料的性能一定会发生明显的变化。

低碳钢的变化曲线如图6所示。由图6可知,随着温度的增加,低碳钢的屈服强度、弹性模量与常温指标相比,均大幅减小,其塑性明显减弱,而且随着温度的增大有加速减弱的趋势。

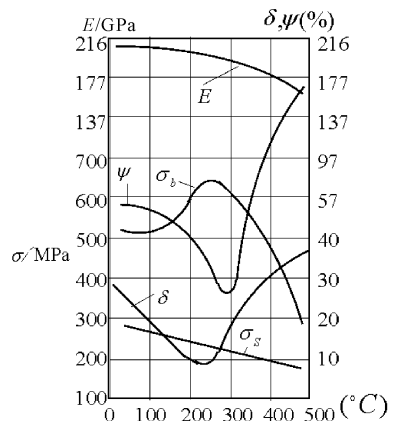


图6 温度对低碳钢 $\sigma_s, \sigma_b, E$ 的影响

ECCS 提出的高温下弹性模量建议公式为<sup>[6]</sup>

$$E_T = (-17.2 \times 10^{-12} T_s^4 + 11.8 \times 10^{-9} T_s^3 - 34.5 \times 10^{-7} T_s^2 + 15.9 \times 10^{-5} T_s + 1) E \quad (7)$$

式中: $0 \text{ °C} \leq T_s \leq 600 \text{ °C}$ ;  $E_T$ 为温度 $T$ 时的弹性模量; $E$ 为常温下的弹性模量。(下转第141页)