

# UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$ 爆炸冲击波特性研究\*

鄢小清 王振国 黎勤武 刘 昆

(国防科技大学航天技术系, 长沙, 410073)

**摘 要:** 研究了 UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$  爆炸冲击波的一般机理和规律, 引进了 TNT 等价重量、极限当量两个基本概念, 建立了三种爆炸模式, 从理论上对爆炸冲击波特性进行了计算, 确立了各种冲击波特性参数的分布规律。计算结果与国外有关资料进行了比较, 数据基本吻合, 并针对 10 kg、50 kg、100 kg、300kg 实验进行了计算和比较。

**主题词:** 液体火箭推进剂, 推进剂爆炸, 冲击波参数, 测试技术

**分类号:** V511.1 TJ011.1

## A STUDY ON BLAST CHARACTERISTICS OF UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$ PROPELLANT EXPLOSIONS

Yan Xiaoqing Wang Zhenguo Li Qinwu Liu Kun

(Dept. of Aerospace Technology, National Univ. of Defense Technology, Changsha, 410073)

**Abstract:** The general mechanism and rules of blast characteristics of UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$  propellant explosions are studied. Two essential concepts, TNT equivalent weight and terminal yield, are adopted. Three explosion modes are established. Blast characteristics of UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$  propellant explosions are calculated with the theory we developed, and the parameters of distributing rules of blast characteristics of explosions are established. Compared with references abroad, reasonably good correlation is achieved. Blast characteristics of 10 kg, 50 kg, 100 kg and 300 kg UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$  propellant explosions are calculated and compared with the experiment data.

**Subject terms:** Liquid rocket propellant, Propellant explosion, Shock wave parameter, Measuring technique

## 1 引 言

液体推进剂爆炸冲击波特性研究对于载人飞船逃逸系统的设计及靶场建设具有极其重要的意义。影响爆炸冲击波特性的因素很多。对于自燃液体推进剂 UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$  系统, 推进剂的总重量、氧化剂、燃料贮箱及弹体的结构、贮箱与弹体之间的相对位置、推进剂的混合及着火时间、在地面爆炸时地面的状况、高速撞击时的撞击速度、被撞表面的硬度等均对爆炸后所形成的冲击波有较大的影响。参考国外所进行的研究工作<sup>[1~3]</sup>, 可以将爆炸模式分为三种。即受弹体约束的爆炸 (CBM 模型)、受地面约束的爆炸 (CBGS 模式) 和高速撞击爆炸 (HVI 模式)。本文从理论和实验两个方面研究了 UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$  的爆炸冲击波特性。

\* 本文 1995 年 6 月 9 日收到, 获中国宇航学会液体火箭推进专业委员会第七届学术交流会优秀论文三等奖。

## 2 计算公式

在研究液体推进剂系统的爆炸特性时,通常是 TNT 炸药为基准<sup>[4]</sup>。将液体推进剂折算成等价的 TNT,再由等价的 TNT 来确定出爆炸特性,这样,就给研究液体推进剂系统的爆炸特性带来了极大的方便。目前,国外对于液体推进剂的爆炸特性研究大都采用了这一方法。

对于自燃推进剂,一般采用在某一位置具有相同的冲击波特性参数(如超压、冲量)的方法,即在离爆炸中心较远处产生相同的超压,来确定 TNT 等价重量  $W$  (TNT)。引进一个参数  $Y$ ,定义  $W_{\text{TNT}} = Y \cdot W$ ,  $W$  为推进剂的重量,  $Y$  被称为极限当量。 $Y$  值确定后, TNT 等价重量也就确定了。 $Y$  值的大小必须是通过实验才能确定下来。

TNT 在空气中爆炸时,影响爆炸冲击波超压及其他参数的主要物理量有:① 炸药的药量  $m$  (质量)、炸药密度  $\rho$  和爆速  $D$ ; ② 介质(空气)的初始状态  $p_0$ 、 $\rho_0$ ; ③ 冲击波传播的距离  $R$ 。

忽略介质的粘性和热传导,空气冲击波压力可以写成:

$$p = \Phi(m, \rho, p_0, \rho_0, R) \quad (1)$$

设  $\Delta p_s = p - p_0$ , 由量纲分析可得:

$$\Delta p_s = f(W^{1/3}/R) \quad (2)$$

这就是炸药在空气中爆炸的爆炸相似律。根据爆炸相似律,两个当量分别为  $W_1, W_2$  的爆炸,距离分别为  $R_1, R_2$  时,如果满足条件:

$$W_1^{1/3}/R_1 = W_2^{1/3}/R_2$$

则在不同距离  $R_1$  与  $R_2$  上超压  $\Delta p_s^*$  是相同的。爆炸相似律为我们从小当量爆炸所获得的结果换算到大当量爆炸提供了理论依据。

将(2)式用多项式展开,则有

$$\Delta p_s = A_0 + A_1 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right) + A_2 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^2 + A_3 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^3$$

当  $R \rightarrow +\infty$  时,  $\Delta p_s = 0$ , 因此,  $A_0 = 0$ 。 $A_1, A_2, A_3$  由实验数据确定。

在无限空间爆炸时,

$$\Delta p_s = 0.95 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right) + 3.9 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^2 + 13.0 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^3$$

波阵面上的其他参数(如波阵面的传播速度  $U$ , 粒子速度  $V_s$ , 密度  $\rho_s$ , 温度  $T_s$ , 音速  $C$  等),均可以由理想气体的激波关系,通过超压  $\Delta p_s$  求出。

$$U = C_0 \left( 1 + \frac{6}{7} \Delta p_s \right)^{1/2} \quad V_s = \frac{5}{7} \cdot \frac{\Delta p_s / p_0}{\left( 1 + \frac{6}{7} \Delta p_s / p_0 \right)^{1/2}} \cdot C_0$$

$$\rho_s = \rho_0 \cdot \frac{1 + \frac{6}{7} \Delta p_s / p_0}{1 + \frac{1}{7} \Delta p_s / p_0} \quad T_s = T_0 \left( 1 + \frac{\Delta p_s}{p_0} \right) \cdot \frac{1 + \frac{1}{7} \Delta p_s / p_0}{1 + \frac{6}{7} \Delta p_s / p_0}$$

$$C = C_0(1 + \Delta p_s)^{1/2} \cdot \left\{ \frac{1 + \frac{1}{7} \Delta p_s / p_0}{1 + \frac{6}{7} \Delta p_s / p_0} \right\}^{1/2}$$

在标准状态下,

$$p_0 = 0.1 \text{ MPa}, \quad \rho_0 = 0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4, \quad T_0 = 288 \text{ K}, \quad C_0 = 340 \text{ m/s}$$

### 3 实验装置

UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$  爆炸冲击波特性研究实验装置由氧化剂贮箱、燃料贮箱、破碎器、电爆管、支架等组成,氧化剂贮箱与燃料贮箱之间用铝片隔开。对用于模拟受地面约束的爆炸(CBGS)模式,破碎器刺破氧化剂及燃料贮箱的底部,UDMH 及  $\text{N}_2\text{O}_4$  泄漏到地面后发生爆炸;对用于模拟受弹体约束的爆炸模式(CBM 模式)及高速撞击爆炸(HVI)模式,破碎器将氧化剂及燃料之间的铝片刺破后,UDMH 与  $\text{N}_2\text{O}_4$  在贮箱内部混合引起受弹体约束的爆炸(CBM)。另外,通过改变电爆管的装药量,可以使贮箱以不同的速度撞击地面,导致高速撞击爆炸(HVI)模式。冲击波超压测试系统由石英压力传感器、电荷放大器和示波器组成。冲击波的传播速度由压电探针、前置放大器和计数器组成。

传感器安装在水平和垂直两个方向上。在水平方向,传感器交错安装在距爆炸中心 5.5~13 m 的不等距的同心圆周上,各组传感器之间相距 1~1.5 m,距地面高度为 0.5~0.8 m。

### 4 计算结果及分析

利用以上所确定的计算公式,在较大的范围内进行了计算,计算结果和文献[1]中的结果基本吻合,如图 1 所示。图 2 是冲击波超压随距离的变化曲线。距爆炸中心距离越近,超

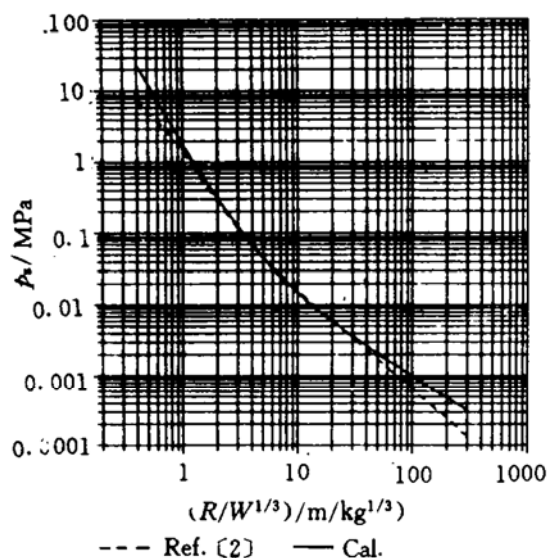


Fig. 1 Comparison of the calculated results and literature data

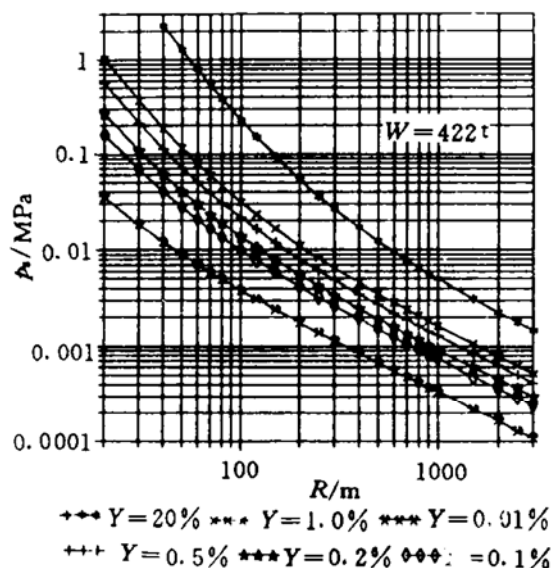


Fig. 2 Blast overpressure decreasing vs distance ( $W = 422 \text{ t}$ )

压越大,随着距爆炸中心距离的增加,超压迅速下降。其原因是:①冲击波向外扩张时,随着传播距离的增大,波阵面的面积增大,在波阵面单位面积上的能量分布迅速减小;②空气冲击波正压区随着波的传播不断拉宽,受压缩的空气量不断增加,使得单位质量空气的平均

能量不断下降；③冲击波的传播不是等熵的，在波阵面上熵是增加的，因此，在传播过程中始终存在着因空气受冲击绝热压缩而产生的不可逆的能量损失，并且冲击波越强，这种不可逆的能量损耗越大。因此，冲击波传播过程中波阵面压力是迅速衰减的，并且初始阶段衰减快，后期衰减渐缓。国内外的大量实验结果表明，当  $\Delta p_s > 0.01$  MPa 时，冲击波将对建筑物和人员带来威胁，建筑物部分破坏，人员受轻度损伤；当  $\Delta p_s > 0.1$  MPa 时，所有建筑物均破坏，人员大部分死亡。在  $\Delta p_s < 0.01$  MPa 的区域内，基本上是安全的。

研究过程中，对 10 kg、50 kg、100 kg 及 300 kg 的推进剂进行了爆炸实验和爆炸冲击波超压计算，所得结果的比较如图 3~6 所示。从图中可以看出，UDMH/ $N_2O_4$  发生爆炸时，其极限当量很低。在受弹体约束的爆炸 (CBM) 发生时， $Y=0.01\%$  左右。这主要是因为 UDMH 与  $N_2O_4$  刚刚相接触的瞬间，在接触面处即发生强烈的化学反应，释放出大量的热量，产生高温、高压的爆炸气体，爆炸气体急剧膨胀，将四周尚未混合的推进剂炸开，炸开后的推进剂，一部分继续混合，发生爆炸和爆燃，其余部分没有混合，未能参加化学反应，即爆炸发生的瞬间，只有极少量的推进剂参与了爆炸，因此爆炸的极限当量非常低。

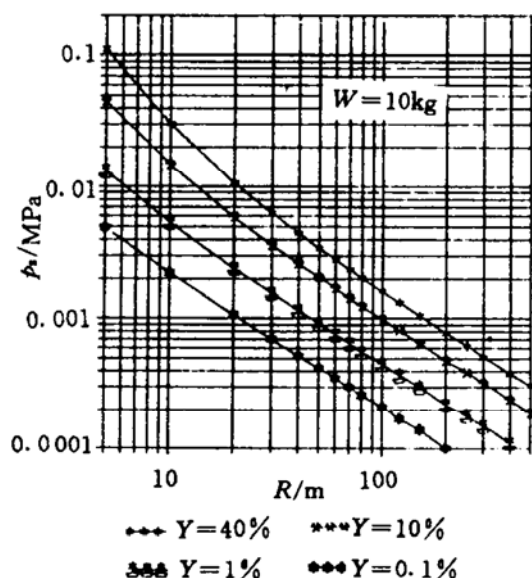


Fig. 3 Blast overpressure decreasing vs distance ( $W = 10$  kg)

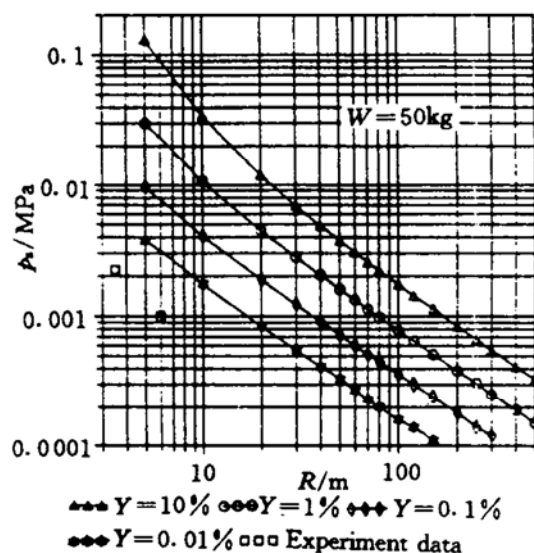


Fig. 4 Blast overpressure decreasing vs distance ( $W = 50$  kg)

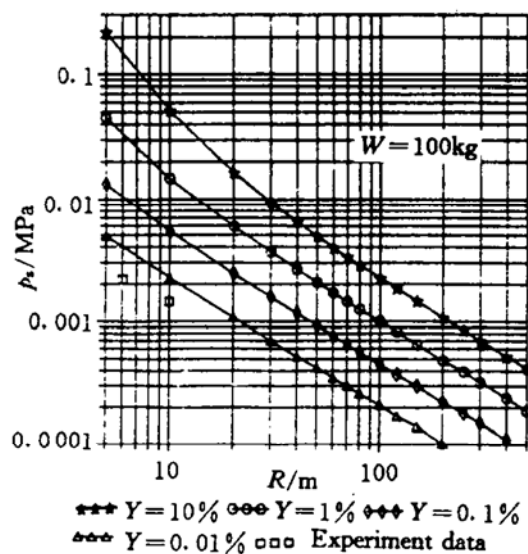


Fig. 5 Blast overpressure decreasing vs distance ( $W = 100$  kg)

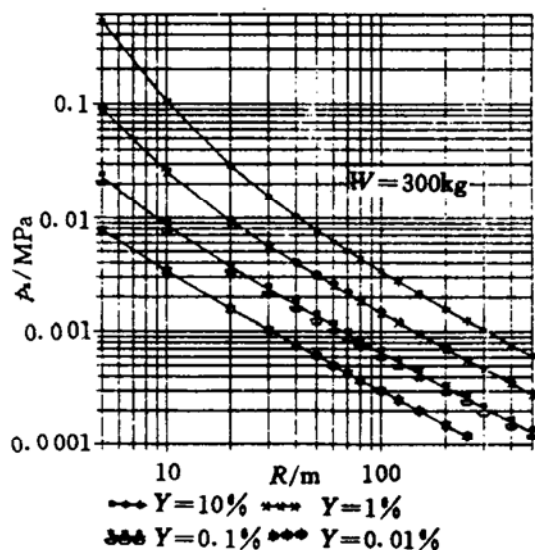


Fig. 6 Blast overpressure decreasing vs distance ( $W = 300$  kg)

10 kg、50 kg、100 kg 推进剂受地面约束的爆炸 (CBGS 模式) 实验时, 产生的冲击波极弱, 这主要是由于推进剂泄漏到实验平台后, 相当一部分推进剂流入了实验平台四周的排水沟内, 没有参加反应。

另外, 50 g TNT 的爆炸冲击波实验结果与理论计算结果基本吻合, 如图 7 所示。

## 5 结 论

从理论计算与实验相比较, 以及与国外所发表的资料相比较的结果来看, 本文中所采用的预测爆炸冲击波的方法是可靠的, 所采用的实验手段也是具有独创性的。UDMH/ $\text{N}_2\text{O}_4$  发生爆炸时, 其极限当量非常低, 对于 CBM 模式, 极限当量  $Y=0.01\%$  左右。

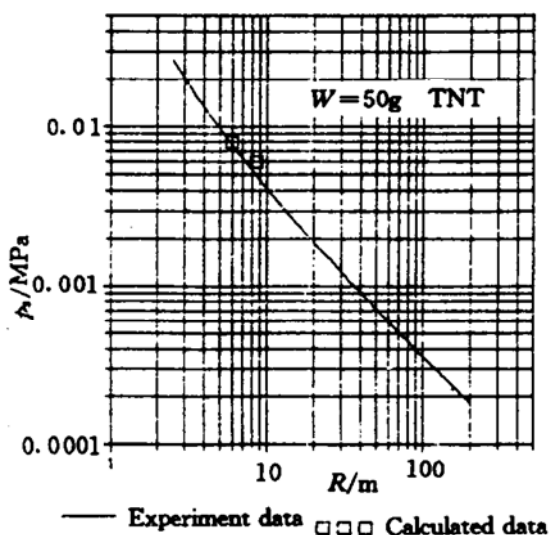


Fig. 7 Blast overpressure decreasing vs distance (50 g TNT)

## 参 考 文 献

- 1 Willoughby, Wilton, Mansfield. Liquid propellant explosive hazards. AFRPL-TR-68-92, 1~3
- 2 Baker W E, et al. Workbook for predicting pressure wave and fragment effects of exploding propellant tanks and gas storage vessels. NASA-CR-134906, 1977. 9
- 3 Hazards of chemical rocket and propellants. AD-A160951, 1
- 4 李翼祺, 马素贞. 爆炸力学. 北京: 科学出版社, 1992