

文章编号: 1001-1455(2012)02-0216-05

乳化炸药铁板凹槽弯曲装药的实验研究*

张玉磊¹, 倪欧琪¹, 侯旷怡², 李斌¹, 朱英中¹, 韩志伟¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 用铁板凹槽装填乳化炸药, 通过离子探针法测得不同装药截面积和不同装药曲率条件下乳化炸药爆炸传播速度, 分析弯曲装药条件下装药直径和装药曲率对爆轰波在乳化炸药中传播速度的影响。结果表明, 爆轰波传播速度随着装药直径的二次方和曲率半径的减小而线性衰减, 当装药直径或曲率半径小到某一临界值时其爆轰反应中止。通过大量实验数据计算得到乳化炸药特定曲率半径和装药直径条件下的爆轰波传播速度计算的经验公式。

关键词: 爆炸力学; 爆速亏损; 曲率半径; 乳化炸药; 装药直径; 熄爆

中图分类号: O382

国标学科代码: 1303510

文献标志码: A

对有限尺寸弯曲装药情况已有过大量研究, 王树山等^[1]研究了单质炸药有限尺寸弯曲装药的爆速亏损, 发现了对应于某个装药尺寸, 当弯曲装药的曲率大于某个临界值时, 就会发生熄爆。F. Sumiya等^[2]研究了沟槽效应对乳化炸药爆轰的影响, 通过实验揭示了前沿冲击波和爆轰波的作用是产生沟槽效应的主要因素。K. Takahashi等^[3]研究了乳化炸药的非理想爆轰状态。王昌建等^[4]研究了圆形弯管中的气相爆轰波传播现象, 分析了爆轰波弯曲传播强度降低的原因。李生才等^[6]就拐角角度对单质炸药爆轰波拐角效应的影响进行了研究, 认为随着拐角角度增大, 拐角距离减小并存在死区(未爆轰区)。

弯曲装药的爆轰传播研究主要是采用单质炸药进行的, 目前还没有对乳化炸药弯曲装药情况下的研究。乳化炸药是应用广泛的工业炸药, 爆轰反应与单质炸药的爆轰反应有着显著的不同^[7], 由于单质炸药的极限直径较小, 在一般条件下, 爆轰可看成理想爆轰, 而乳化炸药在一般使用条件下都处于非理想爆轰状态。因此, 研究弯曲装药条件下乳化炸药的爆轰传播过程对工程爆破等具有重要的价值。

本文中, 用铁板凹槽装填乳化炸药, 用离子探针法测量不同装药截面积和不同装药曲率条件下的爆炸传播速度, 模拟弯曲装药条件下装药直径和装药曲率对爆轰波在乳化炸药中传播速度的影响。

1 实验装置及条件

实验装置为一块带有凹槽的铁板。凹槽中有7个直径为2 mm的小孔用于安装金属探针。其中直管段有2个孔, 一个距凹槽端部12 cm, 另一个位于直管段与弯管段连接处; 弯管段有5个孔, 分别位于45°、90°、135°、180°和225°拐角处, 如图1所示。由于前端直管段长度大于5倍管径, 保证了爆轰反应进入弯管前达到相对稳定状态。在图1中, L 为凹槽直管段长度, d_0 为直管段靶距, d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 依次为弯管段靶距(弯管段靶距以弯管轴线长度计算, 非直线距离), 凹槽截面积为矩形, 矩形的边长 h_1 为14 mm, 另一边长 h_2 分别取为8、9、10、11、12 mm。

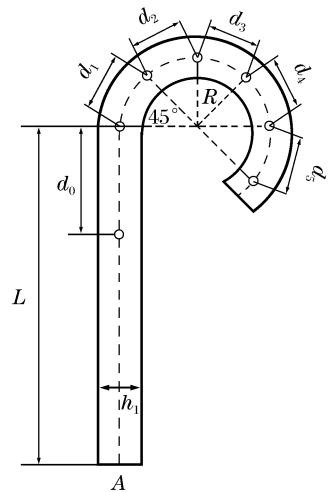


图1 乳化炸药铁板实验示意图

Fig. 1 Scheme of experimental facility

* 收稿日期: 2011-01-26; 修回日期: 2011-05-23

基金项目: 国家安全科技基金项目(B2620080135); 中国工程物理研究院基金项目(106761120)

作者简介: 张玉磊(1987—), 男, 硕士研究生。

实验从直管段起爆。起爆后,炸药爆轰反应经直管段加速稳定后进入弯曲段。爆轰波通过各段的速度由离子探针法测得,比较各段的速率来研究曲率半径与装药截面积对乳化炸药爆轰传播的影响。曲率半径分别为 50、40、30 mm 的凹槽进行装药。在固定曲率半径和凹槽宽度条件下,分别装填截面为矩形且截面积 A 为 112、126、140、154、168 mm^2 的乳化炸药。将 7 对金属探针分别插入铁板小孔,将探针与爆速测量仪对应接好。当炸药发生爆轰反应时,爆轰波阵面的电离导电特性和压力发生突变,采用 ZBS-10 型 10 段智能爆速仪记录爆轰波依次通过装药内部各探针所需要的时间,读出相邻信号之间的时间差 $\Delta t_i (i=0, 1, \dots, 5)$,那么相邻探针之间的平均爆速为 $D_i = d_i / \Delta t_i (i=0, 1, \dots, 5)$ 。

实验用铁板凹槽宽度为 14 mm,分别装填厚度为 8、9、10、11 和 12 mm 的粉状乳化炸药,装填密度为 1.21 g/cm^3 ,实验温度为 28 $^\circ\text{C}$,湿度为 60%。每种尺寸的样品测试 3 次,取平均值作为最终结果。

2 结果与讨论

实验中, d_0 段爆轰波传播速度为 D_0 ,依次类推爆轰波在 d_i 段的传播速度为 D_i 。在曲率半径 R 分别为 50、40、30 mm 的情况下,对于不同装药截面积的实验数据列于表 1~3。

表 1 爆轰波在不同装药截面积下的传播速度(曲率半径 $R=50$ mm)

Table 1 Detonation propagation velocities with different cross-sectional areas when $R=50$ mm

No.	A/mm^2	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D_0/(\text{m}/\text{s})$	$D_1/(\text{m}/\text{s})$	$D_2/(\text{m}/\text{s})$	$D_3/(\text{m}/\text{s})$	$D_4/(\text{m}/\text{s})$	$D_5/(\text{m}/\text{s})$	实验现象
1	112	1.21	2 480	2 201	1 821	1 422	1 063	539	爆轰中断
2	126	1.21	2 537	2 262	1 938	1 689	1 245	877	爆轰完全
3	140	1.21	2 643	2 399	2 184	1 932	1 603	1 124	爆轰完全
4	154	1.20	2 776	2 514	2 225	1 998	1 687	1 316	爆轰完全
5	168	1.21	2 906	2 734	2 263	2 056	1 804	1 456	爆轰完全

表 2 爆轰波在不同装药截面积下的传播速度(曲率半径 $R=40$ mm)

Table 2 Detonation propagation velocities with different cross-sectional areas when $R=40$ mm

No.	A/mm^2	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D_0/(\text{m}/\text{s})$	$D_1/(\text{m}/\text{s})$	$D_2/(\text{m}/\text{s})$	$D_3/(\text{m}/\text{s})$	$D_4/(\text{m}/\text{s})$	$D_5/(\text{m}/\text{s})$	实验现象
1	112	1.20	2 486	2 078	1 684	1 231	934	432	爆轰中断
2	126	1.21	2 543	2 204	1 856	1 478	1 276	705	爆轰中断
3	140	1.21	2 654	2 413	2 089	1 802	1 476	878	爆轰完全
4	154	1.22	2 778	2 601	2 144	1 945	1 642	1 230	爆轰完全
5	168	1.20	2 876	2 677	2 315	2 001	1 796	1 364	爆轰完全

表 3 爆轰波在不同装药截面积下的传播速度(曲率半径 $R=30$ mm)

Table 3 Detonation propagation velocities with different cross-sectional areas when $R=30$ mm

No.	A/mm^2	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D_0/(\text{m}/\text{s})$	$D_1/(\text{m}/\text{s})$	$D_2/(\text{m}/\text{s})$	$D_3/(\text{m}/\text{s})$	$D_4/(\text{m}/\text{s})$	$D_5/(\text{m}/\text{s})$	实验现象
1	112	1.20	2 487	1 873	936	0	0	0	爆轰中断
2	126	1.21	2 505	1 856	1 123	873	0	0	爆轰中断
3	140	1.21	2 553	1 906	1 345	1 012	453	0	爆轰中断
4	154	1.21	2 667	2 103	1 679	1 324	1 102	832	爆轰完全
5	168	1.21	2 802	2 331	1 998	1 408	1 222	1 007	爆轰完全

根据实验结果,以爆轰波在乳化炸药中的传播速度 D 为纵坐标,爆轰波在凹槽弯曲段传播角度 θ 为横坐标,作出同一曲率 $R=40$ mm 的情况下半径不同装药截面积下爆轰波在乳化炸药中沿铁板弯曲凹槽传播速度与传播角度关系曲线图,如图 2 所示,图中 A 为装药截面积,单位为 mm^2 。

从图 2 中可以看出,在弯曲装药条件下,爆轰波在乳化炸药中的传播速度随着传播长度的增大而减小,而且这种衰减趋势呈线性衰减;当 $A=168 \text{ mm}^2$ 时,斜率为 $-6.68 (\text{m}/\text{s})/^\circ$,而当 $A=112 \text{ mm}^2$ 时,斜率为 $-8.99 (\text{m}/\text{s})/^\circ$,随着装药截面积的减小, $D-\theta$ 直线越陡峭,爆速衰减的幅度越大。即装药截面积越小,爆轰波速度亏损越大,更容易熄爆。爆轰波在乳化炸药的稳定传播速度与装药截面积成正比关系,装药截面积越大,爆速越高。 $A=126 \text{ mm}^2$ 时,爆轰波在直管段末端的传播速度为 2 486 m/s ,而 $A=$

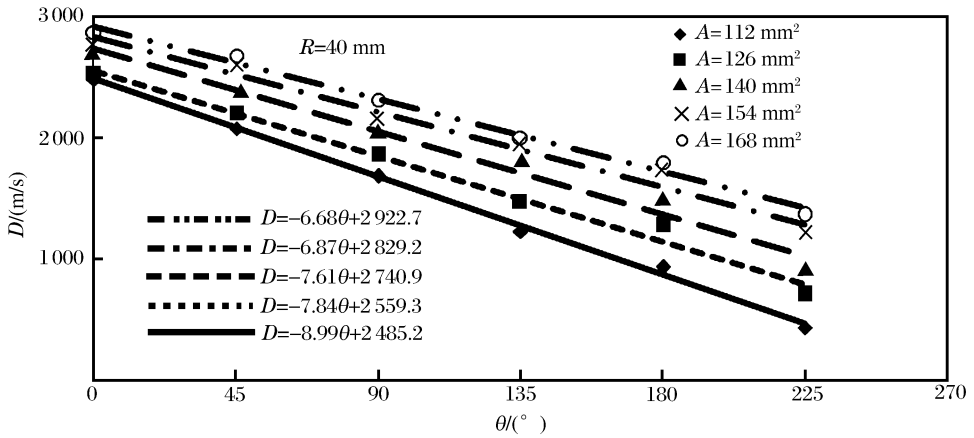


图 2 爆轰波在不同装药截面积下的传播速度变化曲线

Fig. 2 Detonation propagation velocity curves with different cross-sectional areas

168 mm²时,直管段末端传播速度上升到 2 876 m/s。

在相同装药截面积 $A=140 \text{ mm}^2$ 时,在不同曲率半径条件下,得到爆轰波在乳化炸药中沿铁板弯曲凹槽传播的速度与传播角度关系曲线图,如图 3 所示,图 3 中 R 为弯曲装药曲率半径,单位为 mm。从图 3 可以看出,当 $R=50 \text{ mm}$ 时,直线斜率为 $-6.50 \text{ (m/s)/}^\circ$,爆轰波传播速度 D 在装药末端衰减到 1 124 m/s; $R=40 \text{ mm}$ 时,直线斜率为 $-7.61 \text{ (m/s)/}^\circ$,在末端 D 衰减到 878 m/s; $R=30 \text{ mm}$ 时,直线斜率为 $-11.08 \text{ (m/s)/}^\circ$,在末端速度已经为 0。故当装药截面积一定时,爆轰反应经过直管段加速达到稳定爆轰速度,进入弯管段后爆轰波传播速度迅速衰减。可以明显看出,速度大小与爆轰波传播的距离呈线性衰减关系,且曲率半径越小, $D-\theta$ 直线越陡峭,斜率越小,爆轰波传播速度衰减越迅速。

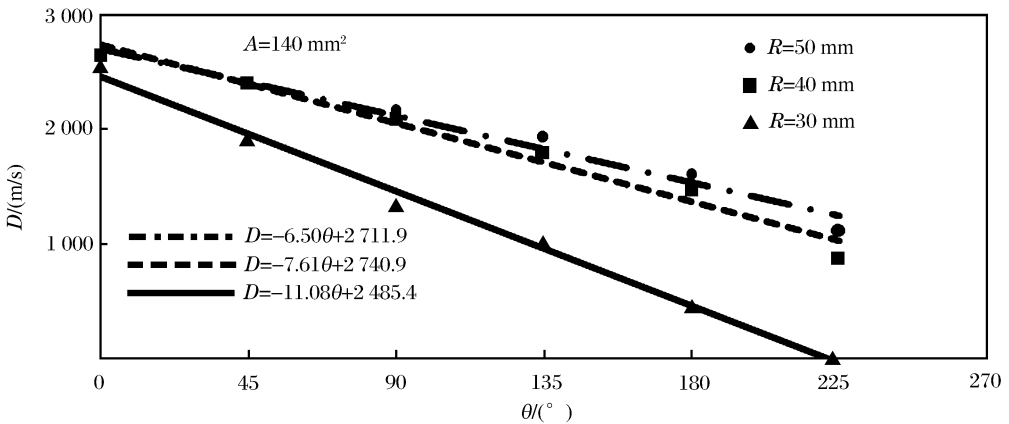


图 3 爆轰波在不同曲率半径下的传播速度变化曲线

Fig. 3 Detonation propagation velocity curves with different curvature radii

在直管段,装药截面积越大,爆轰反应能达到的稳定传播速度越高,这是因为爆轰产物具有侧向膨胀性^[8]。若装药截面积较大,装药轴线处受侧向膨胀波的影响较小,则随着装药截面积的增大爆轰波传播速度也增大^[9]。

在弯管段,爆轰反应波阵面是弯曲的,装药尺寸越小、曲率半径越小,爆轰波传播速度就越低^[10],在爆轰反应从直管段进入弯管段时,爆轰波传播速度大幅下降。根据经验爆轰波传播速度降低到 1 000 m/s后认定为熄爆,因为在这种速度下爆轰反应不能稳定传播。这是由于在爆轰过程中,爆轰波由直管段进入弯管段时,爆轰波仍然沿着直管部分的管体轴线传播,波阵面面积变大,前沿冲击波强度由于波面积突然变大而下降;而且爆轰波在由直管段到弯管部分的传播过程中,在弯管内侧的内壁发生反射产生稀疏波,稀疏波对继续传播的波阵面产生扰动。前沿冲击波能量的不同造成乳化炸药的反应速率不同,在弯管中出现爆轰波滞后现象,宏观表现为爆轰波传播速度下降。装药的持续弯曲使得爆轰

波阵面面积不断变化,爆轰反应区不断受到干扰,造成爆轰波传播速度的不断衰减。爆轰波传播速度衰减到一定程度至不能自持,就会出现爆轰中断现象。

3 实验数据拟合

对实验数据进行趋势线拟合后可以发现,无论在固定曲率半径或固定装药截面积的条件下,爆轰波在弯曲段各处的传播速度 D 与爆轰波在弯曲段中的传播角度 θ 呈线性关系,可用经验公式表示

$$D = D_0 + k\theta \quad (1)$$

式中: D_0 为爆轰波在直管段的稳定传播速度; θ 为爆轰波在弯曲段传播的角度; k 为 $D-\theta$ 直线的斜率。当装药截面积 A 和曲率半径 R 确定了, k 就确定了。由于本实验中装药截面积高宽比为 $0.57\sim 0.86$,因此用等效直径 d_e 作为特征尺寸, 112 mm^2 对应的圆形装药等效直径为 12 mm ,以此类推可得其他装药截面积的等效直径。斜率 k 如表 4 所示。

利用 SPSS 数据处理软件对表 4 中数据进行二元线性回归分析,得出了 k 与 R 、 d_e 的关系式

$$k = ad_e^2 + bR + c \quad (2)$$

式中: $a=0.053$; $b=0.178$; $c=-24.753$,置信水平为 0.90 。将式(2)代入式(1),得到

$$D = D_0 + (ad_e^2 + bR + c)\theta \quad (3)$$

那么爆速亏损为

$$\frac{D_0 - D}{D_0} = \frac{-(ad_e^2 + bR + c)\theta}{D_0} \quad (4)$$

通过式(3)可以计算出给定装直径和装药曲率半径条件下弯管段各处的爆轰波传播速度 D 。例如当 $R=40\text{ mm}$, $d_e=13.4\text{ mm}$ 时,已知 $D_0=2\,654\text{ m/s}$,那么在弯管段 $\theta=135^\circ$ 处爆轰波传播的速度为 $1\,559\text{ m/s}$,相应的爆速亏损为 0.413 。

通过以上分析,不难发现在固定的曲率半径和装药直径条件下,存在一个熄爆长度,以 $D=1\,000\text{ m/s}$ 为熄爆的界定速度,可以求出不同曲率半径和装药直径下的爆轰长度。例如当 $R=40\text{ mm}$, $d_e=13.4\text{ mm}$ 时,可以求出熄爆角度 $\theta\approx 204^\circ$,即长度为 0.142 m 。

4 结论

(1)弯曲装药条件下,爆轰波在乳化炸药中传播速度与曲率半径及装药直径的二次方成线性关系,而凝聚相炸药的爆速与装药尺寸成三次方关系。

(2)当乳化炸药装药直径一定时,弯曲装药会产生爆速亏损。装药曲率半径越小,爆速亏损越迅速,当曲率半径小到某一值时,发生熄爆。

(3)当乳化炸药弯曲装药的曲率一定时,装药直径越小,乳化炸药的爆速越小,弯曲装药爆速亏损越迅速,当装药直径小到某一值时,发生熄爆。

(4)弯曲装药条件下,乳化炸药的爆轰传播速度与传播角度成线性关系。

参考文献:

- [1] 王树山,焦清介,冯长根,等.有限尺寸弯曲装药的爆速亏损[J].北京理工大学学报,1994,14(S1):36-39.
WANG Shu-shan, JIAO Qing-jie, FENG Chang-gen, et al. Detonation velocity deficits in a curved charge of the finite size[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 1994,14(S1):36-39.
- [2] Symiya F, Tokita K, Nakano M, et al. Experimental study on the channel effect in emulsion explosives[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999,25(29):25-29.

- [3] Takahashi K, Murata K, Kato Y, et al. Non-ideal detonation of emulsion explosives[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999,52(55):52-55.
- [4] 王昌建,徐胜利,郭长铭.气相爆轰波在半圆形弯管中传播现象的实验研究[J].*爆炸与冲击*,2003,23(5):448-453.
WANG Chang-jian, XU Sheng-li, GUO Chang-ming. Experimental investigation on gaseous detonation propagation through a semi-circle bend tube[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003,23(5):448-453.
- [5] 王昌建,徐胜利,费立森,等.弯管内爆轰波传播的流场显示和数值模拟[J].*力学学报*,2006,38(1):9-14.
WANG Chang-jian, XU Sheng-li, FEI Li-sen, et al. Schlieren visualization and numerical simulation on gaseous detonation propagation through a bend tube[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006,38(1):9-14.
- [6] 李生才,冯长根,赵同虎.拐角角度对爆轰波拐角效应的影响[J].*爆炸与冲击*,1999,19(4):289-293.
LI Sheng-cai, FENG Chang-gen, ZHAO Tong-hu. The influence of the angle of convex corner on the effect of detonation waves[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999,19(4):289-293.
- [7] 刘鹏,张怀智,曹宏安,等.影响工业炸药爆速的因素[J].*四川兵工学报*,2009,30(3):124-127.
- [8] Lu F K, Fan H Y, Wilson D R. Detonation waves induced by a confined wedge[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2006(10):679-685.
- [9] Silvestrov V V, Plastinin A V. Investigation of low detonation velocity emulsion explosives[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009,45(5):618-626.
- [10] Ishii K, Monwar M. Detonation propagation with velocity deficits in narrow channels[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011,33(2):2359-2366.

Experimental study on emulsion explosives charged into the curved groove in an iron plate^{*}

ZHANG Yu-lei¹, NI Ou-qi¹, HOU Kuang-yi²,
LI Bin¹, ZHU Ying-zhong¹, HAN Zhi-wei¹

(1. *School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

2. *China Airborne Missile Academy, Luoyang 471003, Henan, China*)

Abstract: The emulsion explosives were charged into the curved groove machined on an iron plate. The detonation velocities of the emulsion explosives were measured by using the shorting pins in the cases of different charge cross-sectional areas and different charge curvatures. And the influences of the charge diameters and the charge curvatures on the detonation propagation velocities in the emulsion explosives were analyzed. It is shown that the detonation velocities decrease linearly with the decreasing of the charge curvature radii and the charge diameter square. When the charge diameter or the curvature radius reduces below a certain critical value, the detonation reaction ceases. Based on the experimental data, an empirical formula was proposed for calculating the detonation velocity of the emulsion explosives in the condition that the curvature radius and the charge diameter were given.

Key words: mechanics of explosion; velocity deficits; curvature radius; emulsion explosives; charge diameter; detonation failure

* Received 26 January 2011; Revised 23 May 2011

Corresponding author: NI Ou-qi, noq@IEMcn.com