

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.005

弯曲装药条件下粉状乳化炸药爆轰特性的试验研究^{*}

倪欧琪^{①②} 解立峰^① 李 斌^① 韩志伟^①

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 文章主要研究了弯曲装药条件下粉状乳化炸药的爆轰特性,并用弯曲装药条件下粉状乳化炸药爆轰速度出现的衰减,即爆速亏损进行表征。试验装置的材料为 304 钢,钢板上加工有凹槽,粉状乳化炸药装填在不同尺寸的凹槽中,采用爆速仪测量凹槽不同部位装药的爆速。试验发现:粉状乳化炸药的弯曲装药在爆轰过程中存在明显的爆速亏损;在连续的弯曲装药条件下,装药的爆轰出现持续衰减的现象。同时,在弯曲装药条件下,当装药截面积 S 一定时,爆速亏损随着曲率半径的减小而增加;当装药的曲率半径 R 一定时,爆速亏损随着装药截面积的减小而增加。而且曲率半径对爆轰传播的影响大于装药截面积的影响。文章通过数据分析,建立了装药截面积 S 和曲率半径 R 与爆速亏损之间的关系模型。

[关键词] 粉状乳化炸药;爆轰;弯曲装药;爆速亏损

[分类号] TD235.2⁺1 TJ55 TQ56

引言

爆轰波通过拐角时产生爆速改变的现象叫做爆轰波的拐角效应。对于传统高能炸药来说,其拐角效应研究颇多。Held^[1]研究了 TNT/RDX (15/85 质量比)装药剂的爆轰波通过尖角时的速度和压力亏损。李生才^[2]研究了通过 60°、90°和 120°凸角时爆轰波的绕射,发现爆轰波通过的弧长和死区区域随着凸角角度的变化而改变。国内外拐角效应的研究对象主要为单质炸药,对于乳化炸药只是一般爆轰性能方面的研究^[3-10],没有关于乳化炸药拐角效应的研究报道。

本文系统地研究了爆轰性能优良的粉状乳化炸药在拐角装药的一种特殊形式——弯曲装药条件下的爆轰特性。

1 试验装置及条件

1.1 试验材料

试验采用的粉状乳化炸药的成分(质量分数)为 91% 的硝酸铵、3% 的水、4% 的油相以及 2% 的乳化剂(T152)。其密度为 0.89 g/cm³,爆速为 4800 m/s。铁板材质为 304 钢,尺寸为 300 mm × 250 mm × 50 mm,铁板上加工有装药的凹槽。试验在标准状态下进行(常温常压),粉状乳化炸药由 8 号雷管直接起爆。

1.2 测试仪器

试验选用 ZBS-10 型多段爆速测量仪来测量爆轰波的平均传播速度。爆速仪有 11 个通道,测量时间范围 0.1 μs ~ 6.5 × 10⁷ μs,精度 0.1 μs。选用直径 0.35 mm、漆包线制作的探针。

1.3 试验装置

装药装置的结构和实物如图 1 和图 2 所示。在铁板上开设有矩形断面的凹槽。凹槽的轴线上设有

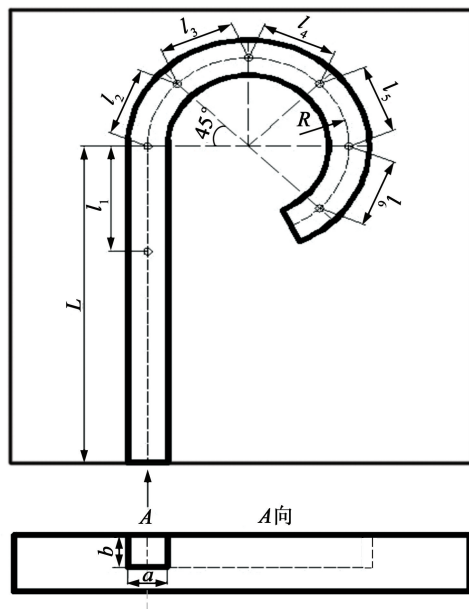


图 1 装药装置的结构图

Fig. 1 Structure of the charge device

^{*} 收稿日期: 2013-11-11

作者简介: 倪欧琪(1953 ~),男,硕士,研究员,主要从事工业炸药的研究和应用。E-mail: niouqimmm@163.com



图 2 装药装置的实物图
Fig. 2 Picture of the charge device

7 个小孔用于安装探针。

图 1 中,开设的小孔分别标记为 1 号到 7 号, l 是两个相邻孔之间的弧长, l_1 是凹槽直段部分的长度, $l_2 \sim l_6$ 分别是凹槽弯曲部分的弧长。 R 是凹槽弯曲段的曲率半径, a 和 b 分别为矩形端面的宽度和高度, $S = a \times b$ 为装药截面面积,通过改变 b 的值来改变装药截面面积。直段部分有 2 个测孔,弯曲段每隔 45° 开一个测孔。试验中, a 取 14 mm, b 取 8、9、10、11 和 12 mm;曲率半径 R 分别为 30、35、40、45 和 50 mm。

2 结果与讨论

2.1 粉状乳化炸药的爆速亏损

粉状乳化炸药的爆轰是非理想爆轰,其爆轰状态因装药条件的变化而不同。表 1 是装药的曲率半径为 $R = 30$ mm、不同装药截面面积情况下粉状乳化炸药的爆速(D)测试结果。

从表 1 可以看出,粉状乳化炸药装药在其弯曲部分爆轰速度呈持续下降的趋势。这是因为当爆轰波沿弯曲装药传播时,其前沿冲击波波阵面的面积持续扩张,导致爆轰波强度不断下降;同时,弯曲装药条件下,稀疏波对爆轰反应区的干扰增强,这些因

素导致爆轰速度衰减,即爆速亏损。表 1 中爆速数值为 0 时,即为装药出现了爆轰中断现象,这时试验装置凹槽中有未反应的残药。

2.2 装药截面积和曲率半径的影响

装药截面积和曲率半径是影响粉状乳化炸药爆轰传播的 2 个重要因素。

图 3 是曲率半径 $R = 50$ mm、装药截面面积发生变化的情况下,爆轰波传播距离 L 和时间 t 的关系。从图 3 可以看出,对于一定的曲率半径和截面积,粉状乳化炸药的爆速均呈连续下降趋势,即存在爆速的持续亏损;随着装药截面面积的增大,粉状乳化炸药爆轰速度的亏损减弱。当截面面积增大到一定程度时, $L-t$ 曲线将变成一条直线,即爆轰速度不再发生亏损。

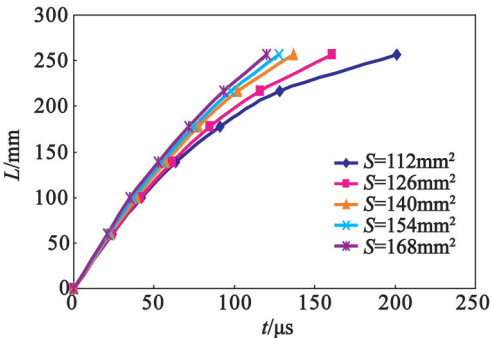


图 3 爆轰波传播距离和时间关系($R = 50$ mm)
Fig. 3 Relationship between propagation distance of detonation wave and time ($R = 50$ mm)

从图 3 可以拟合得到式(1)到式(5),如下:
 $L = -0.0076t^2 + 3.0337t, (S = 168 \text{ mm}^2); (1)$
 $L = -0.0071t^2 + 2.9159t, (S = 154 \text{ mm}^2); (2)$
 $L = -0.0071t^2 + 2.9159t, (S = 140 \text{ mm}^2); (3)$
 $L = -0.0066t^2 + 2.6491t, (S = 126 \text{ mm}^2); (4)$
 $L = -0.0061t^2 + 2.4878t, (S = 112 \text{ mm}^2). (5)$

拟合得到的方程相似率较高,相关系数都达到 0.96 以上。对于不同的装药截面面积,爆轰距离和时间的变化趋势是相同的。当 $S = 112 \text{ mm}^2$ 时,曲线的斜率要比其他曲线都小,说明装药截面面积越小,爆轰速度亏损越明显。

当装药截面面积 $S = 168 \text{ mm}^2$, 曲率半径 R 发生

表 1 不同装药截面面积下的爆速数据($R = 30$ mm)

Tab. 1 Detonation velocity under different cross-section area of charge($R = 30$ mm)

序号	S/mm^2	$D_{1,2}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{2,3}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{3,4}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{4,5}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{5,6}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{6,7}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	112	2487	1873	936	0	0	0
2	126	2505	1856	1123	873	0	0
3	140	2553	1906	1345	1012	453	0

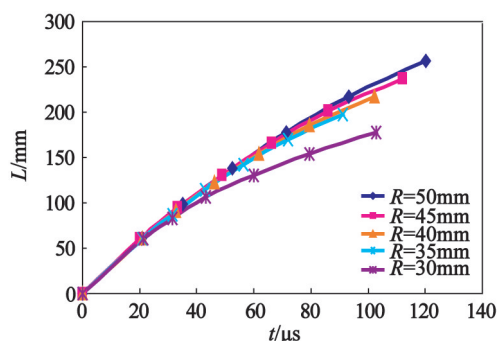


图 4 爆轰波传播距离和时间关系 ($S = 168 \text{ mm}^2$)

Fig. 4 Relationship between propagation distance of detonation wave and time ($S = 168 \text{ mm}^2$)

变化时,其 $L-t$ 曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,当装药截面面积 S 和曲率半径 R 一定时,粉状乳化炸药的爆速均呈连续下降趋势,存在爆速的持续亏损;当 R 由大到小变化时,曲线的斜率逐渐变小,爆轰速度亏损渐趋明显。

当 $S = 168 \text{ mm}^2$, R 从 50 mm 减少到 30 mm 时,从图 4 可以拟合得到下列方程:

$$L = -0.0076t^2 + 3.0337t, (R = 50 \text{ mm}); \quad (6)$$

$$L = -0.0090t^2 + 3.1025t, (R = 45 \text{ mm}); \quad (7)$$

$$L = -0.0095t^2 + 3.0924t, (R = 40 \text{ mm}); \quad (8)$$

$$L = -0.0105t^2 + 3.1208t, (R = 35 \text{ mm}); \quad (9)$$

$$L = -0.0116t^2 + 2.8819t, (R = 30 \text{ mm}). \quad (10)$$

方程的相关系数都高于 0.95。

从式(1)到式(5)可以得出装药截面面积对爆轰长度的影响规律。使用数据统计软件 SPSS 拟合得到爆轰长度 L 、装药截面面积 S 和时间 t 的关系。使用图 3 中的数据,假设 L 、 S 和 t 是线性关系,可以得到下面的方程:

$$L = -62.602 + 0.651S + 1.644t, \quad (11)$$

相关系数 0.919。

采用同样的方法,从式(6)到式(10)可以得到 L 、 R 和 t 的关系:

$$L = -12.982 + 0.748R + 2.03t, \quad (12)$$

相关系数 0.966。

从式(11)可以看出,当 $L = 0$,且 $t = 0$ 时,装药的临界截面面积为 96.16 mm^2 。这意味着当 $R = 50 \text{ mm}$ 时,装药截面面积需大于 96.16 mm^2 才能保证粉状乳化炸药装药完全爆轰。同样,通过式(12)可以得到,曲率半径的临界值为 $R = 17.36 \text{ mm}$,即当装药截面面积为 $S = 168 \text{ mm}^2$ 时,曲率半径必须大于 17.36 mm 才能保证粉状乳化炸药装药完全爆轰。

如上所述,式(11)和式(12)以及相关结论是通过一定的假设获得的。通过试验验证了方程和结论的准确性和实用性。

试验条件分别为 $S = 97 \text{ mm}^2$, $R = 50 \text{ mm}$ 和 $S = 168 \text{ mm}^2$, $R = 18 \text{ mm}$ 。结果发现,两次试验中,都有超过 1/4 的粉状乳化炸药残留。这说明在以上条件下,装药的爆轰速度的亏损严重以至于爆轰熄灭。根据上述试验结果,将参数略作调整, S 从 97 mm^2 增加到 99 mm^2 ; R 从 18 mm 增加到 20 mm ,则两种装药均完全爆轰。试验结果证明计算拟合的结果和实际情况具有较好的一致性。

2.3 多因素分析模型

考虑到粉状乳化炸药弯曲装药的爆速亏损是装药截面面积 S 和曲率半径 R 的综合作用,基于试验数据,拟合得到了综合因素影响条件下的关系模型:

$$L = -85.54 + 0.892R + 0.565S + 1.502t, \quad (13)$$

相关系数为 0.892。

从式(13)可以看出, R 和 S 的影响权重分别为 0.892 和 0.565,这说明对于弯曲装药而言,曲率半径对于爆轰波传播的影响要大于装药截面面积的影响,即在这种装药条件下,曲率半径对粉状乳化炸药爆轰速度的衰减起到更为重要的作用。

3 结论

1) 采用铁板凹槽装药进行了粉状乳化炸药弯曲装药的研究,通过爆速测定发现此装药条件下粉状乳化炸药的爆轰波会发生持续的爆速亏损现象。

2) 在弯曲装药过程中,当装药的曲率半径一定时,爆速亏损随着装药截面面积的减小而增加;当装药截面面积一定时,爆速亏损随着曲率半径的减小而增加。

3) 粉状乳化炸药在弯曲装药条件下,其爆轰传播受曲率半径的影响大于装药截面面积的影响。

参 考 文 献

- [1] Held M. 爆轰波的拐角效应[J]. 含能材料, 2000, 8(1): 5-8.
Held M. Detonation wave's corner effect [J]. Energetic Materials, 2000, 8(1): 5-8.
- [2] 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): 289-294.
Li Shengcai, Feng Changgen, Zhao Tonghu. The influence of the angle of convex corner on the effect of detonation waves [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4): 289-294.
- [3] Takahashi K, Murata K, Kato Y, et al. Non-ideal detonation of emulsion explosives [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85(1-3): 52-55.
- [4] Jones D E G, Feng Hongtu, Mintz K J, et al. Parameters affecting the thermal behaviour of emulsion explosives [J]. Thermochimica Acta, 1999, 331(1): 37-44.

- [5] Sumiya F, Tokita K, Nakano M, et al. Experimental study on the channel effect in emulsion explosives [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85(1-3):25-29.
- [6] Petel O E, Mack D, Higgins A J, et al. Minimum propagation diameter and thickness of high explosives [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20(4-6):578-583.
- [7] 倪欧琪. 粉状乳化炸药微观结构研究[J]. 爆破器材, 1998, 27(3):6-8.
- Ni Ouqi. The reserch of microstructure of powdery emulsion explosive[J]. Explosive Materials, 1998, 27(3):6-8.
- [8] 张玉磊, 倪欧琪, 侯旷怡, 等. 乳化炸药铁板凹槽弯曲装药的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(2):216-220.
- Zhang Yulei, Ni Ouqi, Hou Kuangyi, et al. Experimental study on emulsion explosives charged into the curved groove in an iron plate[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(2):216-220.
- [9] 倪欧琪, 俞明熊. 粉状乳化炸药的研究与发展[J]. 爆破器材, 2000, 29(2):12-15.
- Ni Ouqi, Yu Mingxiong. The research and development of powdery emulsion explosive [J]. Explosive Materials, 2000, 29(2):12-15.
- [10] 王肇中, 汪旭光, 夏斌. 粉状乳化炸药作功能力测试方法的研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(4):7-9.
- Wang Zhaozhong, Wang Xuguang, Xia Bin. Study on testing method of power for powdery emulsion explosives [J]. Explosive Materials, 2007, 36(4):7-9.

Experimental Study on the Detonation Characteristic of Powdery Emulsion Explosive in Curved Charge

NI Ouqi^{①②}, XIE Lifeng^①, LI Bin^①, HAN Zhiwei^①

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②National Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Detonation characteristics of powdery emulsion explosive in curved charge were studied experimentally by velocity deficit. In the experiments, powdery emulsion explosive was charged in a curved groove which was machined in steel plates of 304 steel and detonation velocities of the charge in different part of the groove were measured by detonation velocity meter. The results show that curved charge can decrease the strength of detonation continuously, and obvious velocity deficit of the charged explosive is observed. When cross section area S of the curved charge is fixed, the velocity deficit will increase with the reduction of curvature radius R . When curvature radius R of the curved charge is fixed, the velocity deficit will increase with the reduction of cross section area S . The effect of R to detonation propagation is greater than that of S . The experimental formulas between S , R and velocity deficit were also proposed.

[KEY WORDS] powdery emulsion explosive; detonation; curved charge; velocity deficit

2014 年《爆破器材》征订通知

《爆破器材》主要介绍爆破器材的理论、科研成果、生产技术、科学管理、分析测试、劳动保护、爆破应用、烟花爆竹、国内外动态等。

本刊为双月刊,大 16 开,每期 56 页,定价 12 元,全年 72 元。如果读者没有赶上邮局征订,也可以直接联系本刊编辑部订购。

银行汇款

(1)户名:南京理工大学;开户行:南京市工商银行军管支行;账号:4301017709001057330;附言上请注明“爆破器材”字样。

(2)户名:周勤;开户行:南京市建设银行大行宫支行;账号:4340611370016037。

邮局汇款

收款人:周勤;地址:南京理工大学化工学院《爆破器材》编辑部;邮政编码:210094;电话(传真):025-84315530

《爆破器材》编辑部另有一些专业书籍代销,有需求的朋友可以通过以上方式汇款购书。

《爆破器材》编辑部