

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.008

基于高速摄像的导爆管传爆过程研究^{*}

吕莎莎^① 王海亮^① 王万仁^② 张 伟^②

①山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建教育部重点实验室(山东青岛,266000)

②中铁二十二局集团轨道工程有限公司(北京,100043)

[摘 要] 为进一步研究导爆管的传爆过程,用高速摄像机对导爆管的传爆过程进行研究。对图像进行处理分析,得到导爆管爆轰的成长规律,用智能五段爆速仪对测得的稳定爆速进行验证;对出口冲击波进行分析,得到出口冲击波的传播规律,同时又验证了达到稳定爆速的最短距离。结果表明:爆轰有效反应区长度为13 cm,稳定传爆时导爆管最短约为40 cm,传爆速度为1 750 m/s;爆轰成长过程为先缓慢增长,后高速增长,再缓慢增长至稳定。出口冲击波传播速度是波动的,波速上升是因为发生了口外爆炸。

[关键词] 塑料导爆管;高速摄像;有效反应区;爆轰成长

[分类号] TJ45⁺7;TD235

Research on Detonating Process of Nonel Tube by High Speed Camera

LÜ Shasha^①, WANG Hailiang^①, WANG Wanren^②, ZHANG Wei^②

① State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology (Shandong Qingdao, 266000)

② China Railway 22nd Bureau Group Rail Engineering Co., Ltd. (Beijing, 100043)

[ABSTRACT] High-speed camera was used to understand the detonating process of the nonel tube. The image was processed and analyzed to obtain the detonation growth rule of detonation tube, and the measured stable detonation speed was verified by intelligent five-stage detonation velocity meter. The export shock wave was analyzed to obtain the propagation rule of export shock wave, and the shortest distance to achieve the stable detonation speed is verified. Results show that the effective reaction zone length of detonation is 13 cm, the minimum detonation tube length is about 40 cm, and the detonation speed is 1 750 m/s when the detonation is stable. The process is first slow growth, then high-speed growth, and then slow growth to stability. The propagation velocity of the exit shock wave fluctuates, and the explosion occurs outside the mouth during the rise of the wave velocity.

[KEYWORDS] plastic nonel tube; high-speed photography; effective response area; detonation growth

引言

在一个强度足够的激发能量的作用下,导爆管管腔内的猛炸药会被激发形成一个不稳定的、沿管路向前不断传播的爆轰波,该不稳定的爆轰波在导爆管管内传播一定距离后将会转变为稳定的爆轰波,而在这之后的爆轰波传播的速度将保持大致恒定的数值,形成所谓的稳定传爆。导爆管的爆轰结构及机理已经有大量的研究报道。文献[1-3]对导爆管的爆轰结构、成长区间进行了研究。对于稳定

爆轰下导爆管的最低长度说法不一,高耀林^[4]、魏伴云^[5]、陈士海^[6]、阳世清^[7]、刘大斌^[8]、胡升海^[9]先后得到达到稳定爆轰下导爆管的最低长度,分别为30.0~40.0、30.0、16.7、20.0~22.0、30.0~50.0 cm和18.5 cm。文献[9-10]还对出口冲击波的结构进行分析,验证了导爆管达到稳定爆轰的最低长度。

本文中,针对不同长度的导爆管,利用高速摄像机对整个爆轰过程及出口冲击波传播过程进行观测,一方面对导爆管达到稳定爆轰的最低长度、有效反应区长度、爆速进行论证,另一方面对导爆管出口

^{*} 收稿日期:2019-07-25
第一作者:吕莎莎(1995-),女,硕士研究生,主要从事工程爆破、安全科学与工程研究。E-mail:1091800671@qq.com

冲击波传播规律进行研究。为验证高速摄像机所测爆速的准确性,利用爆速仪(光电法)对同一型号导爆管的爆速进行测算,并将测算结果相对比。

1 试验器材和方法

1.1 试验器材

高速摄像机、镜头、爆速仪、光电传感器、外接光源、导爆管等。

导爆管为普通塑料导爆管,外径为 (3.2 ± 0.1) mm,内径为 (1.5 ± 0.1) mm。高速摄像机为美国 VRI 的 Phantom v61 系列高速摄像机。该相机显示画面为彩色,内存 16G,在全画幅 $1\,024 \times 1\,024$ 像素的分辨率下能够达到 $6\,200\text{ s}^{-1}$ 的拍摄速率,在降低至 64×64 像素的最小分辨率时,可达到最高为 $6.9 \times 10^4\text{ s}^{-1}$ 的拍摄速率,最小曝光时间为 $1\mu\text{s}$;内置机械快门,可远程启动相机黑平衡;可选择 AVI、TIFF、JPG、BMP 等图像存储格式,符合本试验要求。由于使用较高帧数进行拍摄时镜头画面十分昏暗,故使用了外设光源进行打光,以增强画面的可见性。

所使用的 BSW-3A 型智能五段爆速仪(以下简称爆速仪),是采用 100 MHz 晶振频率的高精度新型爆速仪,测速原理为光电法。该机主要用于测量炸药、导爆索等的爆速,配上适当的探针或传感器,还可以方便地测量各种微小时间间隔和高速运动物体的速度。本试验中,测量 5 段连续时间,以计算爆速。

1.2 试验方法

以 10 cm 长度导爆管为起始值、20 cm 为步长进行试验。用胶带将导爆管固定在木板上,使导爆管保持水平,便于观测;高速摄像机距导爆管水平距离为 4.7 m,设置高速摄像机参数为:分辨率 $1\,024 \times 512$ 像素,帧数 $1.1 \times 10^4\text{ s}^{-1}$,曝光时间 $90\mu\text{s}$ 。为了方便之后的数据处理,在木板上每间隔 10 cm 贴一根胶带作为标尺。

利用爆速仪进行爆速测定。爆速仪参数设置为:段数为 5,靶距为 100 mm。根据高速摄像机试验得到的结果,确定爆速仪试验所用到的导爆管长度。

2 数据处理

2.1 高速摄像测得数据

利用高速摄像机测得不同长度导爆管的传爆过程,通过计算机图像处理和计算,得到拍摄合成处理图,见图 1。

当导爆管传爆时,爆轰波波阵面处将会有强烈的光信号,高速摄影仪拍摄的导爆管传爆过程的图像上,可以清晰地看出较完整的爆轰波结构图,以亮光区的形式存在,并以一定的速度不断向前推进。

从图 1 中可以看出,爆轰波亮光区可以分为 3 个部分:最左端亮度较小的前沿冲击波、中部最亮的椭圆状爆炸反应区、反应后爆炸产物区。最前端有一层弧光,这是由于空气电离所致。导爆管前端爆轰波阵面在各幅图之间的尖端连线基本成笔直的倾斜直线,表明速度呈比例增加,为匀速运动。

利用软件 PCC (phantom camera contral 2.5.744.0 installer)对导爆管内爆轰波传递位移进行标定,任务栏选择 Play,然后选择模块 Measurements。先设置比例尺,在 Calibration 中点击 Calibrate,根据图中事先设定的标尺自动计算出当前视频的单位像素代表的实际尺寸,即校准完毕。

对移动位移进行快速测量,选择模块 Instant Measurement,点击 Active,选择 2 点法测位移,点击两张图片中爆轰波波阵面,生成爆轰波的位移。如图 2 所示。

对不同长度导爆管内爆轰波进行测算得出,中部最亮的爆炸反应区长度为 12 cm 左右,头部前沿冲击波长度为 1 cm 左右。认为导爆管内爆轰波的有效反应区^[11]为中部最亮区加头部亮区,即长度

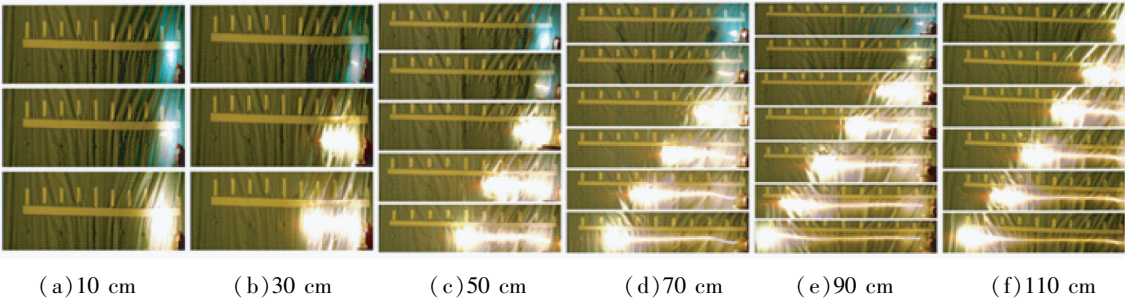


图 1 不同长度导爆管爆轰波的传爆过程

Fig. 1 Propagation process of detonation wave of different length nonel tube

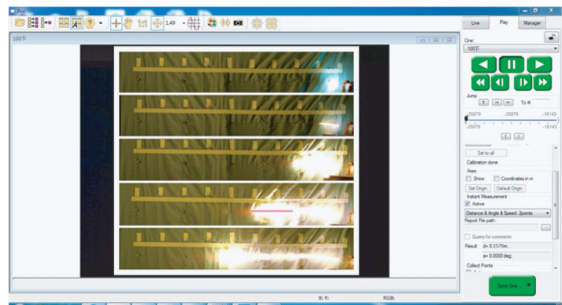


图 2 PCC 中快速测量

Fig. 2 Instant measurement in PCC

13 cm 左右。

图 1 中的图片除 110 cm 缺失初始图片一张外,其余长度均为连续时刻所拍。根据图像可以看到,整个传爆过程呈阶梯状。每两幅图片间隔时间为 $1/11\,000\text{ s}$,即 $90\text{ }\mu\text{s}$ 。以第一张出现爆轰波的图片作为零时刻,测定沿导爆管轴向前传播的爆轰波不同时刻的位移,进行爆速计算。

经测试,导爆管的稳定爆速在 $1\,737\sim1\,755\text{ m/s}$ 之间,平均值为 $1\,750\text{ m/s}$ 。

2.2 爆速仪测得数据

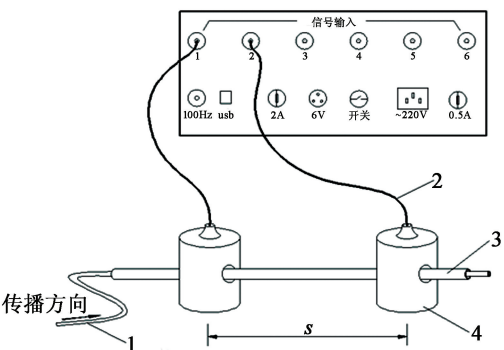
根据高速摄像试验,得到导爆管达到稳定爆轰的长度为 40 cm,故确定进行爆速试验时的导爆管长度为 130 cm。其中,起爆端铜管外导爆管长度为 50 cm,铜管内长度为 50 cm,铜管出口伸出 30 cm,以确保铜管内导爆管爆速的稳定性。用爆速仪测导爆管传爆速度,爆速仪结构如图 3 所示,得到的时间及计算的爆速如表 1 所示。

由表 1 可以看出,此类导爆管的爆速为 $1\,752\text{ m/s}$,与高速摄像机测算结果一致,说明了高速摄像机试验的正确性。

3 爆轰成长规律

根据图 1 所得爆速数据,绘制图 4,并利用 Origin 软件进行多项式拟合,获得爆轰成长规律。

爆轰成长过程开始呈缓慢的增长趋势,此区间



1 - 导爆管;2 - 数据线;3 - 钢管;4 - 光电传感器。

图 3 爆速仪的结构

Fig. 3 Structure of detonation velocity meter

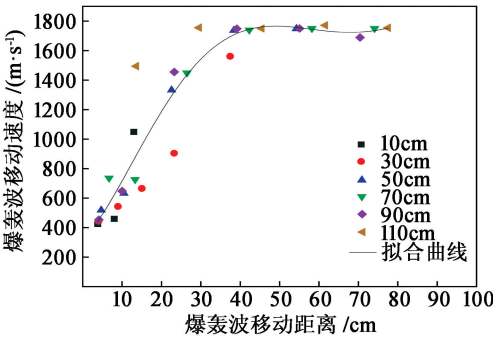


图 4 爆轰波移动速度与距离的关系

Fig. 4 Relationship between moving distance and velocity of detonation wave

的长度小于 10 cm,历时 $2.72\text{ }\mu\text{s}$;接着呈高速增长阶段,此区间的长度为 20 cm 左右;而后增速降低,此区间长度为 10 cm 左右,以平稳的速度达到稳定阶段。达到稳定阶段时长度为 40 cm 左右,爆速约 $1\,750\text{ m/s}$ 。

由图 1 可以看出,在传爆初始阶段爆轰波亮度为蓝绿色弱光区,此阶段持续 $90\text{ }\mu\text{s}$ 左右,之后明亮起来直至耀眼。这是因为导爆管内药粉的物理分布较分散,且传爆时管腔内压力也不太高,所以导爆管内药粉颗粒发生化学反应时并不是作为一个整体,开始的粒子反应活化状态是从某个局部的表面开始的。随着反应的加剧和扩大,反应中间产物迅速不

表 1 130 cm 长的导爆管传爆速度

Tab. 1 Detonation velocity of 130 cm-long nonel tube

次数	$\Delta t_1/\mu\text{s}$	$v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta t_2/\mu\text{s}$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta t_3/\mu\text{s}$	$v_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta t_4/\mu\text{s}$	$v_4/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta t_5/\mu\text{s}$	$v_5/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\bar{v}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	50.98	1 761	51.35	1 732	51.26	1 747	51.42	1 760	51.10	1 756	1 751
2	51.25	1 751	51.02	1 760	51.35	1 747	51.18	1 753	51.50	1 741	1 750
3	51.11	1 756	51.32	1 771	51.34	1 747	51.15	1 755	51.33	1 748	1 755

断地扩散,进而蔓延到药粉颗粒全部表面和药粉粒子内层。

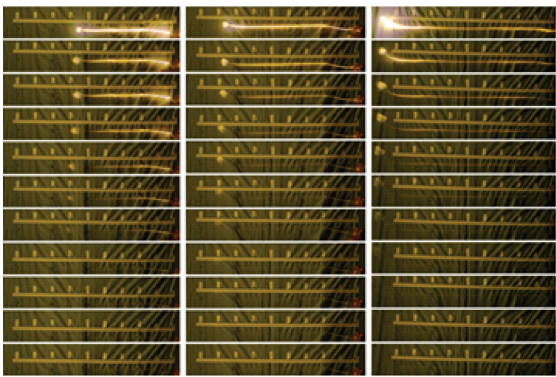
涂敷在导爆管管腔壁上的猛炸药受到传播而来的爆轰波前波阵面带来的高温高压作用,炸药的表面首先发生化学反应,然后通过化学反应产生的中间产物快速扩散到管中。化学反应为放热反应,产生的热量一部分将用于保持高温高压的管内环境,而另一部分则将继续作用,残余的炸药颗粒被允许继续反应。当在管腔中分散的中间产物充分混合于空气之中后,强烈的爆炸反应将继续发生。爆炸产生的能量将支撑着爆轰波前沿的波阵面继续前进而不至于衰落。最后,前进的爆轰波会继续导致导爆管内壁上尚未发生反应的炸药颗粒开始反应。导爆管的稳定传爆就是上述过程的不断循环^[12]。

4 出口冲击波传播规律

导爆管输出内容物包括冲击波、爆炸产物以及未反应物。根据图 5、图 6 可知,出口冲击波为不规则球形,长度 10 ~ 50 cm;爆轰信号总体逐渐强烈;爆轰产物量逐渐增大。以出口第一幅为例,3 种长度导爆管出口处冲击波的宽、高随导爆管长度的增加而增大,出口冲击波消散时间也越来越久;50 ~ 110 cm 长的导爆管,出口冲击波爆轰信号涨幅不大,基本一致,消散时间也基本保持一致;经过 11 幅图,出口冲击波肉眼已无法看到,约为 1 ms。这也验证了爆速的结果,达到稳定爆轰时长度约为 40 cm。

以第一张出现冲击波冲出端口的图片作为零时刻,测定沿导爆管管轴向前传播的爆轰波不同时刻的位移,进行冲击波速度计算。用 Origin 软件将冲击波传播速度与距离的关系绘制成折线图,如图 7 所示。

由图7可以清楚地看到,不同长度导爆管冲击



(a) 50 cm (b) 70 cm (c) 110 cm
图 6 50、70、110 cm 长导爆管的冲击波传播过程

Fig. 6 Propagation process of shock wave of nonel tube with the length of 50, 70, and 110 cm

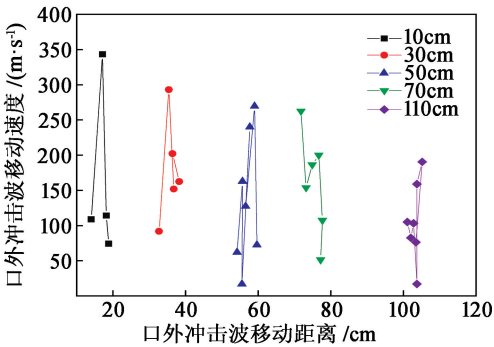
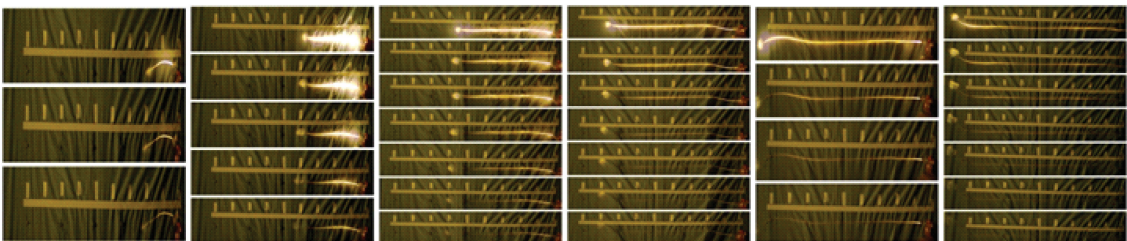


图 7 口外冲击波移动速度与距离的关系

Fig. 7 Relationship between moving distance and velocity of shock wave outside the mouth

波的传播均具有波动性,并非直线下降。波速上升,表明传播过程中有能量,在冲击波的作用下,管壁上的炸药后部发生爆燃,爆燃产物和未反应物质扩散至管内,与空气混合后发生爆轰。导爆管出口处某一长度内的炸药在冲击波作用下,也将发生同样的过程,由于发生在出口端部,混合物将进入口外自由空间,并在口外完成这一阶段的反应——爆轰^[13]。综上所述,认为出口冲击波速度上升是因为口外爆炸的发生。



(a) 10 cm (b) 30 cm (c) 50 cm (d) 70 cm (e) 90 cm (f) 110 cm

图 5 不同长度导爆管的冲击波传播过程

Fig. 5 Propagation process of shock wave of nonel tube with different length

5 结论

1) 对 6 种不同长度的导爆管利用高速摄像机进行拍摄,得到了各长度导爆管爆轰波传递的整个过程及出口冲击波传播过程。有效反应区间长度为头部亮区长度(约 1 cm)与椭圆状反应区长度(约 12 cm),共计 13 cm。

2) 对整个爆轰过程进行分析,得到爆轰成长规律为爆速开始增长缓慢,后高速增长,又缓慢增长至稳定爆速;达到稳定时,爆速为 1 750 m/s,长度为 40 cm 左右。

3) 利用智能五段爆速仪对爆速进行测算,得到爆速为 1 752 m/s,验证了高速摄像机得到的结论。

4) 对出口冲击波传播规律进行分析得到,出口冲击波速度是波动的,并非直线下降;导爆管长度 50 ~ 110 cm 时,出口冲击波消散时间接近一致,冲击波大小也接近一致;因不同长度导爆管冲击波速度均出现上升现象,故认为存在口外爆炸现象。

参 考 文 献

- [1] 高耀林,范钦文,黄人骏. 塑料导爆管起爆性能研究[J]. 爆破器材,1990(1):1-4.
GAO Y L, FAN Q W, HUANG R J. A study on the initiation properties of the plastic detonating tube[J]. Explosive Materials, 1990(1):1-4.
- [2] 廖小翠. 导爆管传爆可靠性的试验研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2009.
LIAO X C. Experimental study on the detonation propagation reliability of nonel tube [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2009.
- [3] 邓军. 导爆管爆轰成长规律及其影响因素的试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2017.
DENG J. Research on detonation growth law and its influencing factors [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [4] 高耀林,范钦文,陈嘉琨. 塑料导爆管起爆过程[J]. 爆破器材,1984(4):1-5.
- [5] 魏伴云,赵建勤,朱建平. 模拟导爆管传爆过程的高速纹影摄影与分析[J]. 爆破器材,1985(3):3-4.
- [6] 陈士海,胡峰. 导爆管的起爆特性[J]. 爆破,1990(2):9-12.
CHEN S H, HU F. Initiation characteristics of nonel [J]. Blasting, 1990(2):9-12.
- [7] 阳世清,王荪源,杨权中,等. 塑料导爆管在燃烧转爆轰过程中的火焰结构及爆轰波生成机理[J]. 爆炸与冲击,1990,10(1):17-20.
YANG S Q, WANG S Y, YANG Q Z, et al. The flame structure and the formation mechanism of detonation wave for the plastic shock tube system during deflagration-to-detonation transition process [J]. Explosion and Shock Waves, 1990,10(1):17-20.
- [8] 刘大斌. 塑料导爆管的起爆、传爆及输出性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2002.
LIU D B. Study of the initiation, explosion transmission and output character of nonel tube [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002.
- [9] 胡升海. 导爆管及其雷管传爆性能的试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
HU S H. Experimental study on detonation propagating performance of Nonel tube and its detonator [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [10] 刘向科,王海亮,孙志果,等. 三种孔外延期导爆管起爆网路的工程试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2014,33(2):63-66.
LIU X K, WANG H L, SUN Z G, et al. The engineering experimental research of three outer-hole delay firing circuit [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 33(2):63-66.
- [11] 匡翔波,陈俊芳. 导爆管出口冲击波与爆炸产物的传播过程及其分析[J]. 爆破器材,1988(4):1-4.
- [12] 陈嘉琨,范钦文,高耀林. 塑料导爆管[M]. 北京:国防工业出版社,1987.
- [13] 何中其,彭金华,刘大斌,等. 导爆管传爆性能设计与参数分析[J]. 爆破器材,2010,39(3):1-3,7.
HE Z Q, PENG J H, LIU D B, et al. Analysis and design of detonation parameters in nonel tube [J]. Explosive Materials, 2010,39(3):1-3,7.