

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.04.011

# 导爆管起爆与传爆过程的高速摄像研究\*

胡升海 房泽法 熊 鹏 巫雨田 戴国蕊 顾保虎  
武汉理工大学资源与环境工程学院(湖北武汉,430070)

[摘要] 结合高速摄像技术,对导爆管的正常起爆与传爆过程进行了研究,得到了导爆管的起爆与传爆过程的高速摄像图像。对高速摄像图像进行了分析与测算,得到 1745m/s 爆速导爆管起爆过程的爆轰成长规律及其成长长度为 18.5cm 左右的结论,得到了稳定爆轰波结构模型及其有效反应区长度为 7cm 左右的结论。

[关键词] 导爆管 高速摄像 起爆过程 成长长度 传爆过程 爆轰波结构 有效反应区长度

[分类号] TD235.2+2

## 引言

导爆管受到一定强度的激发冲量作用后,管内将形成一个向前传递的爆轰波,形成的波信号在经过一个从不稳定到稳定传播的成长过程后,其波速达到某一稳定值,即为稳定传爆<sup>[1]</sup>。人们对导爆管起爆的爆轰成长过程与稳定传爆的爆轰波结构及其有效反应区长度进行了相当多的研究,但却并未得到统一的结论。爆轰成长长度方面,高耀林<sup>[2]</sup>、魏伴云<sup>[3]</sup>、陈士海<sup>[4]</sup>、阳世清<sup>[5]</sup>、刘大斌<sup>[6]</sup>先后得到导爆管爆轰成长长度为 30~40cm、40~50cm、16.7cm、20~22cm、30~50cm 的结论。有效反应区长度方面,范钦文<sup>[7]</sup>、陈士海<sup>[8]</sup>、阳世清<sup>[5]</sup>、沙文健<sup>[9]</sup>先后得到有效反应区长度为 40cm 左右、3cm 左右、5~6cm、40cm 左右的结论,魏伴云<sup>[10]</sup>认为范钦文所得结论偏高,何中其<sup>[11]</sup>试图对导爆管化学反应区长度进行推算,Yang<sup>[12]</sup>指出有效反应区长度为 4.75cm。本文试图利用比前研究者所用更先进直观的高速摄像技术对导爆管的爆轰成长长度、导爆管内爆轰波结构及其有效反应区长度重新进行探讨。

## 1 试验器材与方法

试验所用器材及高速摄像试验系统示意图见文献<sup>[13]</sup>。

爆轰成长长度观测试验中,将长度大于 40cm 的导爆管试样安装在试验木架间,插入起爆针连接起爆器后起爆,同时辅以高速摄像记录其过程,最后对图像进行测算分析。为使结果可靠,进行了数十次的试验。简易试验装置见文献<sup>[13]</sup>。导爆管稳定传爆观测试验中,视场范围左侧应有不小于爆轰成长长度的导爆管长度。

## 2 导爆管起爆传爆过程的观测

### 2.1 试验图像

由于所拍摄的图像具有相似性,这里每种试验仅列出一组图像以作分析。导爆管稳定传爆的高速摄像图像如图 1 所示,导爆管起爆过程的图像如图 2、图 3 所示。

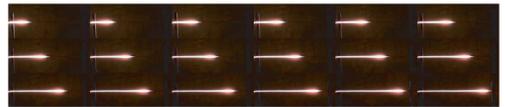


图 1 导爆管稳定传爆过程的高速摄像图像

Fig. 1 High speed photographs of steady detonation propagating process of Nonel tube

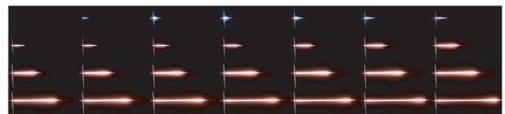


图 2 导爆管起爆过程 10<sup>4</sup> 帧/秒的高速摄像图像

Fig. 2 High speed photographs of Nonel tube initiating process at 10<sup>4</sup> fps

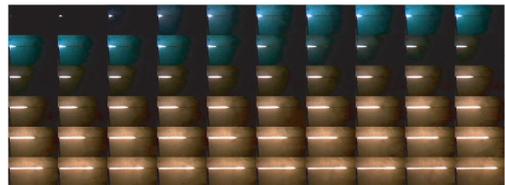


图 3 导爆管起爆过程 25 × 10<sup>4</sup> 帧/秒的高速摄像图像

Fig. 3 High speed photographs of Nonel tube initiating process at 25 × 10<sup>4</sup> fps

其拍摄参数分别为:

图 1:50 镜头、光圈 2.8、拍摄速率 10<sup>4</sup> 帧/秒、物

\* 收稿日期: 2013-04-19

作者简介: 胡升海(1989~),男,硕士,主要研究方向:爆炸作用及效应。E-mail:hush7014@sina.com

通信作者: 房泽法(1954~),男,教授,主要从事工程爆破方面的研究。E-mail:fangzefa@263net

距 3.75m、视宽 48.6cm。

图 2:50 镜头、光圈 2.8、拍摄速率  $10^4$  帧/秒、物距 3.05m、视宽 39.5cm。

图 3:广角镜头、光圈 2.8、拍摄速率  $25 \times 10^4$  帧/秒、物距 3.75m、视宽 40cm。

### 2.2 数据处理方法

在计算机上,先用图像处理软件对每幅图像进行统一的放大与去雾处理,以便观测与分析。然后用尺寸测量软件测算出经放大后每幅图像中光信号最前端离左边缘的距离与图像宽度的比值;而图像代表的实际宽度为已知,从而可得爆轰波在不同时刻离左边缘的水平距离,计算相邻两图幅阵面的相对位移,而相邻图幅的时间间隔为已知,可得各相邻时刻间导爆管传爆的平均速度。

### 2.3 数据处理与分析

由图 2 及图 3 可以看出,二者虽然拍摄参数不同,但其图像变化规律却基本一样,即点火、暗区、转变、正常爆轰,在经过不同数量像幅的暗区后,爆轰波结构及图像亮度都不再发生变化,说明爆轰波已成长稳定。

为得到准确的爆轰成长规律及长度,对图像中各图幅进行数据处理,相应的爆轰成长曲线如图 4、图 5 所示。

图 4 及图 5 所反映出的导爆管起爆的爆轰成长过程基本相同。波速先下降至一最低值,然后逐渐上升至稳定爆速。波速下降过程反映的是起爆针电火花对导爆管的作用过程。所用导爆管爆速在 1700 m/s 到 1800m/s 之间,测得其平均爆速为 1745m/s。在这里以爆速达到 1700m/s 为稳定爆轰。故两试验达到稳定爆轰的高速摄像图号分别为第 16 幅和第 38 幅。对应的长度分别为 21.03cm 及 21.35cm,均值为 21.2cm。若不包含击发针针头的长度,则导爆管的爆轰成长长度在 18.5 cm 左右。这一结果同陈

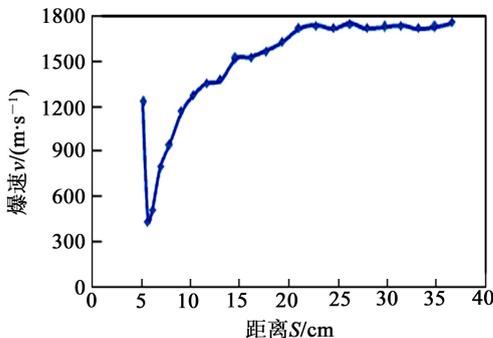


图 4  $10^4$  帧/秒试验所得起爆过程成长曲线  
Fig.4 Growth curve developed from photographs of Nonel tube initiating process at  $10^4$  fps

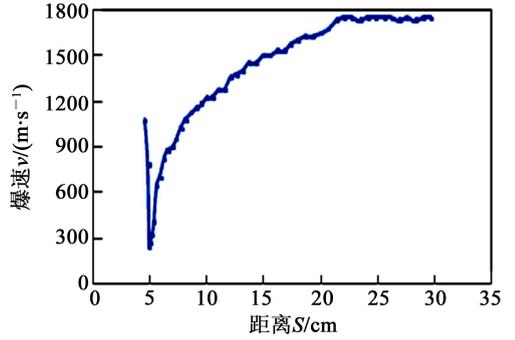


图 5  $25 \times 10^4$  帧/秒试验所得起爆过程成长曲线  
Fig.5 Growth curve developed from photographs of Nonel tube initiating process at  $25 \times 10^4$  fps

士海、阳世清所得结果相近。两次试验所得的导爆管爆轰不稳定段长度相近,其从起爆至稳定爆轰所用的时间也相近,分别用时  $150\mu\text{s}$  及  $148\mu\text{s}$ 。

实际上不同厂家生产的导爆管,其管内涂药品种、线密度及粒度不同,导爆管的起爆及传爆性能也不同。即使是同厂同批的导爆管,管内涂药也并不能保证完全均匀,因此其成长过程及长度可能也会有些许差异,但其差异应该不会太大。再者起爆能量的不同也可能导致爆轰成长长度的不同。

### 3 爆轰波结构及有效反应区长度的探讨

#### 3.1 导爆管内爆轰波的高速摄像图像

为了准确地认识导爆管内爆轰波结构,在不同曝光条件下利用高速摄像机多次拍摄了导爆管的正常传爆过程,并根据其不同亮区的光亮强度进行了初步的划分与测算,如图 6 所示。图中数字表示不同光区的长度值,单位为 cm。

#### 3.2 有效反应区长度分析

从图 6 中光区亮度可以看出,导爆管内爆轰波由 3 部分组成:最右端的近似球面弧形的前沿冲击波、中部的最亮的椭圆状爆炸反应区及其后反应完毕的爆炸产物区。

对图 6 中导爆管内的爆轰波进行测算得出,椭圆状最亮区均值为 6.02cm,其尖端亮区长度均值为 1.13cm,最前端的弧光区长度均值为 1.20cm,最亮区左侧的次亮区长度均值为 3.50cm。因视场宽度所限,没有测得最左侧的亮区长度,但据图中第 2、4、6 画幅所示,其长度为 50cm 以上。

直观来看,图中椭圆状的最亮区最有可能是导爆管内爆轰波的有效反应区,即约 6cm。若加上左侧次亮区及尖端亮区,则才 10.6cm。这与范钦文<sup>[7]</sup>、沙文健<sup>[9]</sup>等所得的 40cm 左右的结论相去甚远,然而若将所有光亮区加上,则会超过 60cm,同时很明显左侧亮区强度与椭圆亮区强度相差太大,且

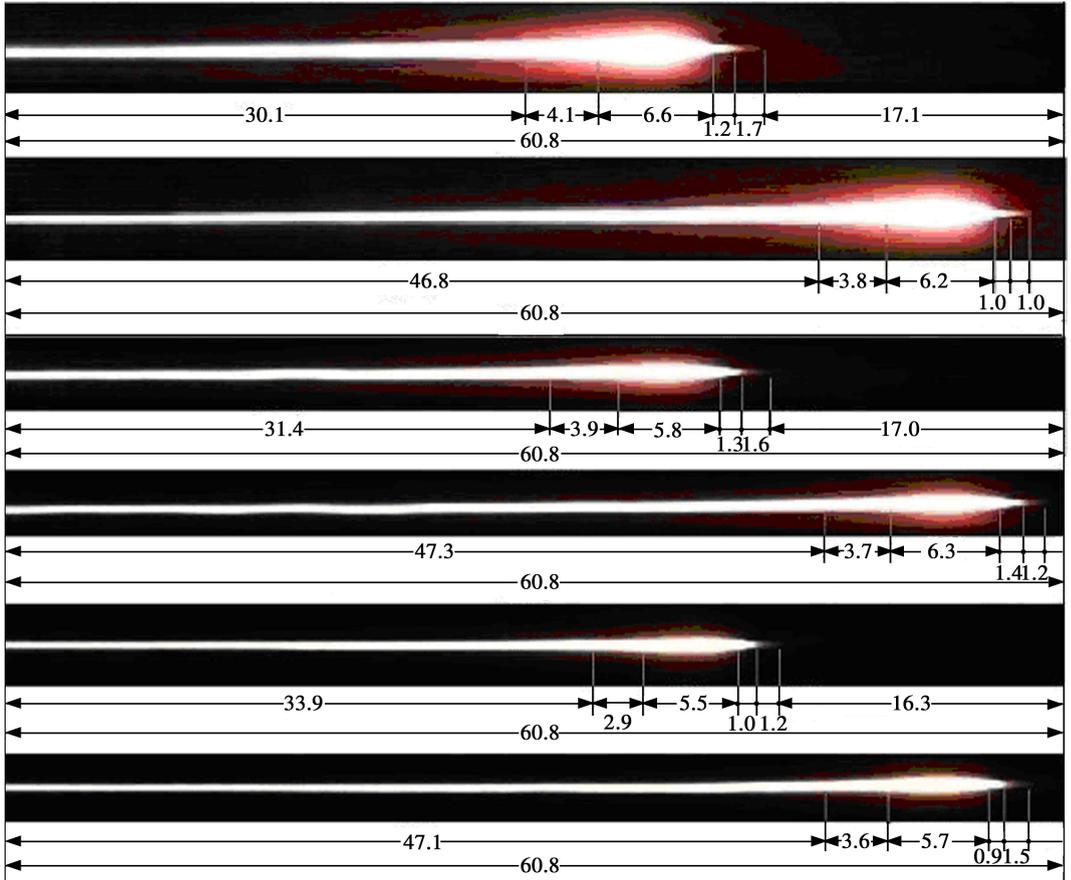


图6 导爆管内稳定爆轰波图像及其量测

Fig. 6 Steady detonation wave image of Nonel tube and its measurements

其离爆轰波阵面距离太远,即使有化学反应释放能量,其对维持爆轰传播的贡献也很微弱。在图中距波阵面 40cm 左右并未有亮光强度的明显界别,因此有效反应区长度为 40cm 左右的结论有待商榷。本文认为试验用导爆管内爆轰波的有效反应区为椭圆状亮区加尖端亮区,即长度为 7cm 左右,这一结论同阳世清<sup>[5]</sup>所得结论相近。

实际上,不同厂家生产的导爆管,其管内涂药品种、装药量及粒度不同,导爆管的传爆性能也不同,因此,其有效反应区长度也不同,但也不会相差太大。

### 3.3 爆轰波结构模型

根据以上导爆管内爆轰波图像及分析,结合以前研究者的研究结论<sup>[5,7-11,14]</sup>,得出导爆管爆轰波结构模型,如图 7 所示。

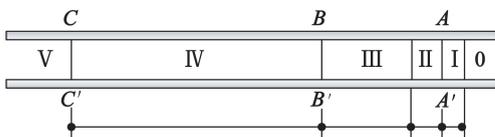


图7 导爆管内爆轰波结构简单模型

Fig. 7 Plain model of detonation wave structure in Nonel tube

0 区:未反应区。管内介质静止。

I 区:弧光区。管内空气被电离所致。宽度约为 1.4cm。

II 区:压缩汽化区。在前沿冲击波的高温高压作用下,炸药颗粒被冲击压缩、混合、破碎、燃烧、汽化,并与空气混合形成燃气炸药。II 区的最前端为前沿冲击波阵面,它以速度  $D$  向前区推进。宽度约为 1.1cm。

III 区:化学反应区 1(有效反应区)。该区炸药颗粒在前沿冲击波作用下继续汽化并产生炸药蒸气的爆炸,爆炸反应释放出的能量补充给超前冲击波,使其不衰减并保持恒定的速度传播。同时,爆炸波在管壁多次斜向反射,在管心形成聚心冲击波,使管心的压力大大提高,有力地支持了冲击波,防止了端部稀疏波的侵入。该区温度最高,发光最强,其放热将以气体膨胀形式支持冲击波阵面。宽度为 6cm 左右。

IV 区:化学反应区 2(后效反应区)。该区主要是 III 区中爆轰产物的膨胀以及少量尚未反应完全的炸药的爆炸反应,其产生的膨胀波已不能传到冲击波阵面,因而对维持冲击波阵面强度基本没有贡献。

V区;膨胀区。化学反应已完成,只有爆轰产物的膨胀。化学反应区2及膨胀区总长度在50cm以上。

由于管壁的粘滞作用,实际各面应为曲面。其中A-A'面为冲击波阵面,B-B'面为经典爆轰理论中的C-J面,A-A'面与B-B'面之间的长度称为有效化学反应区长度。A-A'与C-C'之间的距离称为总化学反应区长度。本爆轰波结构模型尚待论证。

#### 4 结论

利用高速摄像技术对导爆管的起爆及传爆过程进行了研究,得到所用爆速为1745m/s的导爆管爆轰成长规律及其成长长度为18.5cm左右的结论;得到稳定爆轰波结构模型及其有效反应区长度为7cm左右的结论。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 魏伴云. 导爆管起爆系统的现状与展望[J]. 地球科学,1985(3):119-126.  
Wei Banyun. Prospects and present status on firing system of detonator tube[J]. Earth Science,1985(3):119-126.
- [4] 陈士海,胡峰. 导爆管的起爆特性[J]. 爆破,1990(2):9-12.  
Chen Shihai, Hu Feng. Initiating characteristic of nonel [J]. Blasting,1990(2):9-12.
- [5] 阳世清. 低装填密度粉状炸药爆轰机理研究——塑料导爆管起爆与传爆过程[D]. 南京:南京理工大学,1990.
- [6] 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 Dabin. Study of the initiation, explosion transferring and output character of Nonel tube[D]. Nanjing:Nanjing University of Science & Technology,2002.

- [7] 范钦文,高耀林,陈嘉琨. 塑料导爆管稳定传爆的物理模型[J]. 爆破器材,1984(2):8-12.
- [8] 陈士海,胡峰. 导爆管中爆轰波的结构[J]. 爆破器材,1988(5):4.
- [9] 沙文健. 塑料导爆管反应区温度分布的近似计算[J]. 爆破器材,1992(4):2-6.  
Sha Wenjian. Approximate calculation of the temperature distribution in a detonating Nonel tube[J]. Explosive Materials,1992(4):2-6.
- [10] 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):3-5.
- [11] 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 Zhongqi, Peng Jinhua, Liu Dabin, et al. Analysis and design of detonation parameters in nonel tube[J]. Explosive Materials,2010,39(3):1-3,7.
- [12] Yang L C,Do I H P. Nonelectrical tube explosive transfer system[J]. AIAA Journal, 2000, 38(12):2260-2267.
- [13] 胡升海,房泽法,巫雨田. 基于高速摄像的断药导爆管传爆过程研究[J]. 爆破器材,2013,42(3):41-44.  
Hu Shenghai,Fang Zefa,Wu Yutian. Research on detonation propagating process of explosive faults Nonel tube by high speed photography[J]. Explosive Materials, 2013,42(3):41-44
- [14] 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 Xiaocui. Experimental study on the detonation propagation reliability of Nonel tube[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology,2009.

### High Speed Photography Study on the Initiating and Detonation Propagating Process of Nonel Tube

HU Shenghai, FANG Zefa, XIONG Peng, WU Yutian, DAI Guorui, GU Baohu

Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology(Hubei Wuhan, 430070)

[ABSTRACT] Experimental studies on the initiating process and detonation propagating process of nonel tube were conducted by using high speed photography to obtain the related high speed photographs of detonation wave. By means of analysis and calculation of relevant photographs, the growth rule of detonation for the nonel tube at the detonation propagating speed of 1745m/s with a corresponding growth length of about 18.5cm was clarified, and the structure model of steady detonation wave within the effective reaction zone length of about 7cm was also obtained.

[KEY WORDS] nonel tube, high speed photography, initiating process, growth length, detonation propagating process, detonation wave structure, effective reaction zone length