

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.03.010

基于高速摄像的断药导爆管传爆过程研究^{*}

胡升海 房泽法 巫雨田
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不同断药长度导爆管的传爆过程进行了试验研究,得到本试验所用 1745m/s 爆速导爆管的可靠传爆的最大断药长度为 20cm,超过 25cm 必然断爆的结论。通过对高速摄像图像的分析,发现成功传爆的长间距断药管内及其前后的波速呈现出由正常到最小再到正常的规律,且其拐点并不出现在无药和有药的交界,而是在进入正常有药管一段距离之后。同时得到了维持导爆管可靠传爆的管内冲击波临界速度为 400m/s 的结论。

[关键词] 高速摄像 导爆管 断药长度 传爆过程

[分类号] TD235.2⁺2

引言

导爆管在加工时管壁药粉不足及在装配运输过程中经受颠簸、震动,可能导致管壁药粉出现断药。断药导爆管在传爆时,管内爆轰波的能量在断药区内将会不断衰减,断药长度较短时可能会引起爆速波动;断药长度过长时可能使导爆管出现断爆,导致与其连接的起爆系统发生拒爆。陈士海^[1]、郝建春^[2]、廖小翠^[3-4]对导爆管可靠传爆的最大断药长度进行过研究,在各自试验条件下,分别得到最大断药长度为 15cm、17cm 及 19cm 的结论。

试验旨在通过对不同断药长度的导爆管传爆过程进行高速摄像观测,一方面对导爆管可靠传爆的最大断药长度的有关结论进行验证;另一方面观察导爆管出现断药时,在断药前后及在断药管内爆轰波或冲击波的变化情况,分析其断药传爆机理。

1 试验材料与高速摄像系统

试验所用器材主要为高速摄像机、导爆管、电脑、起爆针、起爆器、导线、游标卡尺、卷尺、普通刀片、透明胶布、半框形木架等。其中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。试验采用日本 Photron 公司的 Fastcam SA1.1 型高速摄像机。该相机在全画幅 1024×1024 像素的分辨率下能够达到 5400 帧/秒的拍摄速率,在降低至 64×64 像素的最小分辨率时可达最高为 67.5×10^4 帧/秒的拍摄速率。最快的电子快门为 370ns;可选择 AVI、TIFF、JPG、BMP 等图像存储格式。

高速摄像试验系统(图 1)由高速摄像机、装有专业数据采集软件的笔记本电脑、被测导爆管、起爆器、同步控制仪等组成,由于导爆管在传爆过程中会发出亮光,所以无需外加光源。

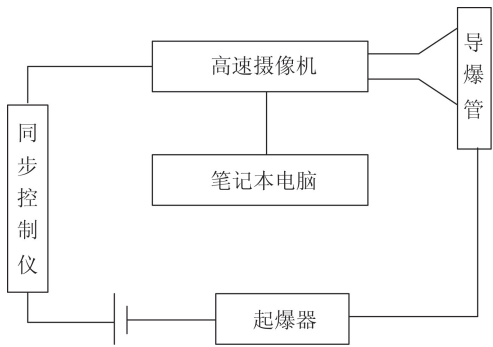


图 1 高速摄像试验系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of high speed photography experimental system

2 试验方法

准备 40cm 长的导爆管试样若干,在已传爆过的导爆管上截取一定长度作为试验中的断药管,用强力透明胶布将断药管两端与两段正常的导爆管对接起来,以此组合成完整的试验用不同断药长度的导爆管试样。

制作一内宽为 40.0cm 的半框形木架,并在木架两木条的同一高度处,各刻深度为 1cm,宽度比导爆管内径略小的凹槽,以此卡住试验用的导爆管,使其保持平直状态,便于高速摄像机观测。装好断药

^{*} 收稿日期: 2013-03-14
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:hush2014@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

导爆管并插入起爆针的木架如图 2 所示。

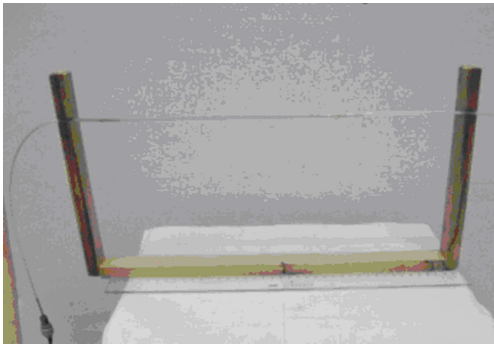


图 2 断药导爆管试验装置图
Fig. 2 Device set-up of explosive faults nonel tube experiment

试验时以 19cm 断药长度起始值,1cm 为步长进行试验。为使试验结果可靠,每组试验至少进行 10 次。每次试验都辅以高速摄像机记录其传爆过程。在正式拍摄前,以正常导爆管为对象进行预拍摄来调试相机,确定合适的拍摄参数。

3 试验结果与图像

3.1 传爆试验结果

对不同断药长度的导爆管,进行了多次的试验,每次试验后,通过观察分析试验后的导爆管及高速摄像图像来辨别是否传爆,其试验结果见表 1。

表 1 不同长度断药导爆管传爆情况

Tab. 1 Chart of different explosive faults nonel tube detonation propagating state

断药长度 /cm	19	20	21	22	23	24	25
试验次数	10	10	10	10	10	10	10
传爆次数	10	10	9	7	4	2	0

由表 1 可知,维持该导爆管可靠传爆的最大断药长度为 20cm,超过 25cm 必然导致传爆中断,断药长度在 20cm 与 25cm 之间时则可能传爆,也可能不会传爆。该试验结论只适合试验所选爆速为 1745m/s 的导爆管,与文献 [1-5] 的结论 (15 ~ 19cm) 稍有不同。

实际上,不同厂家生产的导爆管,其管内涂药品种、装药量、线密度及粒度不同,导爆管的起爆及传爆性能也不同^[6-7],因此维持导爆管可靠传爆的最大断药长度也不同。

3.2 高速摄像图像

由于每组不同断药试验的高速摄像图像具有相似性,这里只列出 3 组作为分析,如图 3、图 4、图 5 所示。其拍摄速率均为 12.5×10^4 帧/秒,物距均为 4.25m,视场宽度均为 41.0cm。20、23、24cm 断药

分别始于视场左起 7.7cm、6.6cm 及 2.5cm。

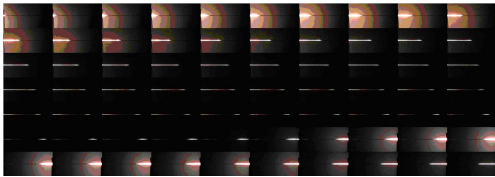


图 3 20cm 断药导爆管成功传爆的高速摄像图像
Fig. 3 High speed photographs of 20cm explosive faults nonel tube showing successful propagating detonation

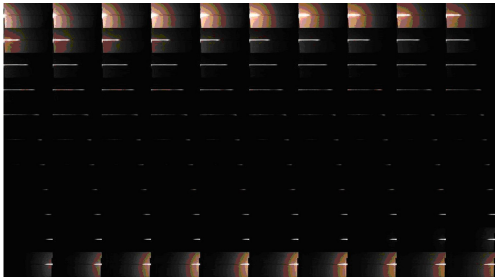


图 4 23cm 断药导爆管成功传爆的高速摄像图像
Fig. 4 High speed photographs of 23cm explosive faults nonel tube showing successful propagating detonation

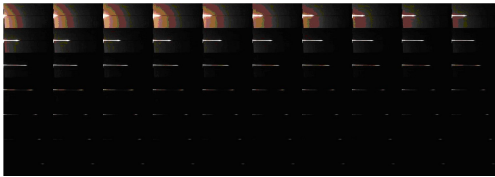


图 5 24cm 断药导爆管未成功传爆的高速摄像图像
Fig. 5 High speed photographs of 24cm explosive faults nonel tube showing unsuccessful propagating detonation

4 图像数据处理与分析

4.1 数据处理

为便于观察与测量,首先在计算机上对每幅图像进行统一的适当的放大及去雾处理。然后用尺寸测量软件测出经放大的每幅图像中光信号最前端离左边缘的距离及放大后图像的宽度,得到二者的比值;图像的实际视场宽度每次试验时可以测得,且在相机参数一定的情况下,视宽与物距成正比。从而可得每幅图像中光信号最前端离左边缘的实际距离;计算相邻两图幅间光信号的位移,而相邻图幅的时间间隔为拍摄速率的倒数,从而可得各相邻时刻间导爆管传爆的平均速度。按此方法多次试验计算,得到导爆管爆速在 1710 ~ 1770m/s 之间,均值为 1745m/s,且对于任意两根用透明胶布对接的正常导爆管,对接前后爆速几乎无变化。

为准确分析断药导爆管内爆轰波或冲击波的变化情况,对 20cm 断药导爆管内爆轰波的爆速进行了计算。

图 3 中第 56 幅图像开始其波阵面已传至拍摄

范围外,故仅对前 55 幅图像进行爆速计算与分析。为节省篇幅,这里只列出其中部分图幅对应的爆速,如表 2 所示。

表 2 20cm 断药导爆管爆速

Tab. 2 Chart of detonation propagating speed of nonel tube with 20cm explosive faults

图号	距离 S /mm	爆速 v/(m·s ⁻¹)	图号	距离 S /mm	爆速 v/(m·s ⁻¹)
2	32.5	1750	30	268.8	650
4	60.3	1738	32	278.8	613
5	74.2	1738	34	287.9	550
6	88.0	1725	36	296.3	525
8	113.6	1538	38	304.4	500
10	135.0	1263	40	312.1	475
12	153.4	1088	42	318.9	412
14	169.3	988	43	322.1	400
16	184.4	925	44	326.0	487
18	198.4	863	46	335.2	612
20	211.4	800	48	346.0	712
22	223.8	763	50	358.6	800
24	235.7	737	52	372.8	913
26	241.5	712	54	390.5	1225
28	258.3	688	55	403.3	1600

根据每幅图像对应的爆速,可以作出 20cm 断药导爆管的爆速与对应像幅的关系曲线,见图 6。

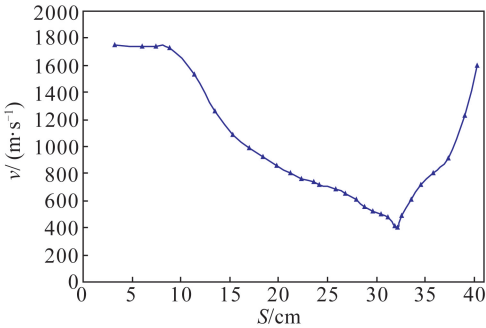


图 6 20cm 断药导爆管爆速变化曲线

Fig. 6 Chang curve of detonation propagating speed of nonel tube with 20cm explosive faults

4.2 图像结果分析

对比图 3 和图 4 可以看出,成功传爆的断药导爆管内爆轰波的变化特征很明显,且类似。在开始一段距离内,导爆管正常传爆,光区亮度较强;之后光区亮度逐渐且明显变暗,说明爆轰波传爆到断药部位;经过一个较暗的区域后,亮光又逐渐增强,说明导爆管又传爆到正常段。图中的光信号回传现象是由高温爆轰气体导致的。

两组图像又有着明显的不同,图 4 中暗图更多。其原因是由于图 4 中冲击波经历的无药历程较图 3

更长,波的衰减更严重,将导爆管重新激发的过程就更艰难。

图 5 管内冲击波由强变弱的特征与成功传爆时相似,所不同的是,光区亮度没有出现由暗变亮,而是越来越暗,直至完全湮灭。显然其原因是导爆管断药长度太长,冲击波能量得不到及时的补充,在重新进入涂药导爆管时,其强度已衰减得非常弱小,不能激起足够多的药粉参与化学反应,产生能量,维持冲击波传播,致使传爆终止。

图 3 中,断药始于像幅视场自左起 7.7cm,止于 27.7cm,从表 2 可以看出,7.7cm 对应于第 5 像幅与第 6 像幅之间(将图像放大观察也可看出),爆轰波在进入无药区后,由于缺乏有效的能量补充,冲击波强度及速度逐渐降低,光亮度逐渐减弱。27.7cm 对应于第 31 与第 32 幅图像之间,冲击波以 620m/s 左右的速度自无药区进入有药区,但图中并未显示出第 32 幅图像与其相邻图像有何明显不同,且之后一段时间其爆速和亮度仍继续降低。至第 43 幅图像,冲击波已进入有药管内约 4.5cm,波速降至最低值 400m/s,之后速度逐渐提高。自第 32 到第 55 幅图像,冲击波已进入有药管内约 12.6cm,据图像信号波亮度可知,至第 58 幅时爆轰波波速完全达到正常,此时离断药区距离约为 16.8cm。这一距离同另一高速摄像试验所测得的 18.5cm 以及文献[8]的 16.7cm 的导爆管在起爆针作用下的爆轰不稳定段长度接近。

导爆管内的冲击波自断药段进入到正常段并成功传爆的过程,实质是导爆管在轴向弱激发下的起爆过程。导爆管能否被轴向起爆,取决于导爆管本身性能和激发冲量的强度及作用过程。每种导爆管起爆时都要求起爆冲击波的传播速度达到或超过某一临界值,这是起爆导爆管的第一个必要条件。另一个必要条件是起爆冲击波对导爆管持续作用的时间必须足够长,以保证所引发的化学反应放出的能量使起爆冲击波阵面维持必要的压力。

当弱冲击波刚传入涂药管内时,其传播速度仍持续下降,图像亮度继续变暗,说明冲击波初进入涂药管阶段仅有少量炸药颗粒被激发。其原因就是由于未达到导爆管起爆的第二个必要条件,即起爆冲击波对导爆管持续作用的时间必须足够长。初始激发冲量越弱,炸药颗粒的爆发延滞期越长。在该弱冲击波继续衰减前行的同时,药粉虽然未被立即激发,但是一直在承受着该弱冲击波的持续作用,随着作用时间的增长,炸药颗粒的温度逐渐升高,越来越多的炸药颗粒逐渐达到活化状态并发生化学反应,

为该弱冲击波补充能量,冲击波能量的增强也将激发更多的炸药颗粒,最终促使弱冲击波转化为稳定的爆轰波,断药导爆管成功传爆。

以上分析可知,冲击波经过一定长度断药导爆管后仍能成功传爆的原因主要是导爆管内有效反应区长度较长^[8],且管道效应减轻了爆轰波能量的衰减,衰减后的冲击波速度大于某一临界值时,便能重新起爆涂药导爆管;若断药长度过长,爆轰波衰减至小于该临界值时,则不能重新起爆涂药导爆管,传爆终止。20cm 间距断药导爆管试验中,冲击波速度最低值为 400m/s 时,仍成功传爆,而 20cm 为可靠传爆的最大断药长度,因此可以认为该临界值为 400m/s。

总结爆轰波或冲击波在断药导爆管内的变化情况得出:从冲击波进入断药区直至进入涂药区区间内,其波速一直衰减,衰减至最低后,再逐渐上升至正常速度。波速由下降到上升的拐点,是出现在进入正常有药区一段不长的距离处。

5 结论

利用高速摄像机对不同长度断药的导爆管进行了试验研究,得到如下主要结论:

1)随着导爆管断药长度的增加,导爆管成功传爆的可能性逐渐减小。不同厂家生产的导爆管可靠传爆的最大断药长度值不同,本试验所用爆速值为 1745m/s 的普通塑料导爆管可靠传爆的最大断药长度为 20cm,超过 25cm 必然断爆,这一结果与其他研究者所得结果相近。这一结论对导爆管的生产及应用有一定的参考作用。

2)爆轰波或冲击波在小于最大断药长度的长断药导爆管内的传播过程中,其传播速度呈现先逐渐下降至最小,后又逐渐上升至正常的规律。且其波速由正常到最小再到正常的拐点并不出现在无药和有药的交界处,而是在进入正常有药导爆管一段

距离之后。

3)维持断药导爆管可靠传爆的管内冲击波速度的临界值约为 400m/s,低于该值将可能导致导爆管断爆。

参 考 文 献

- [1] 陈士海,胡峰. 影响导爆管传爆性能的若干因素探讨[J]. 爆破器材,1991(5):15-17.
- [2] 郝建春. 塑料导爆管非电起爆系统可靠性研究与分析[D]. 南京:南京理工大学,1992.
- [3] 廖小翠,郭学彬. 断药导爆管传爆过程的高速摄影试验研究[J]. 爆破,2009,26(1):89-91,95.
Liao Xiaocui, Guo Xuebin. Experiment study of high speed photography on detonation propagating of explosive faults nonel[J]. Blasting,2009,26(1):89-91,95.
- [4] 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.
- [5] Yang L C, Do I H P. Nonelectrical tube explosive transfer system[J]. AIAA Journal,2000,38(12):2260-2267.
- [6] 侯建华. 特殊使用条件下提高导爆管传爆可靠性研究[D]. 南京:南京理工大学,2004.
Hou Jianhua. Study on enhancing detonating reliability of detonating tube under special condition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology,2004.
- [7] 荆术祥,钱华,刘大斌,等. 装药量对塑料导爆管传爆性能的影响[J]. 爆破器材,2010,39(5):4-6.
Jing Shuxiang, Qian Hua, Liu Dabin, et al. Influence of the explosive charge on explosion propagation of the Nonel tube[J]. Explosive Materials,2010,39(5):4-6.
- [8] 陈士海,胡峰. 导爆管的起爆特性[J]. 爆破,1990(2):9-12.
Cheng Shihai, Hufeng. Initiating characteristic of nonel[J]. Blasting,1990(2):9-12.

Research on Detonation Propagating Process of Explosive Faults Nonel Tube by High Speed Photography

HU Shenghai, FANG Zefa, WU Yutian

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

[ABSTRACT] By high speed photography, detonation propagating of different explosive faults nonel tubes was studied. In faults nonel tubes of 1745m/s, the maximum explosive faults length for the reliable detonation propagation is 20cm, while above 25 cm it definitely results in blasting interruption. Through the analysis of high speed photographs, wave speeds for successful detonation in the tube which consist of long distance explosive faults tends to change from normal to a minimum and then returns to normal, where the knee point does not appear at the junction point of normal nonel and explosive faults nonel, but within a short distance in the normal tube. The conclusion that critical speed of shock wave that keep explosive faults nonel tube reliable is 400m/s has also been obtained.

[KEY WORDS] high speed photography, nonel tube, explosive faults length, detonation propagating process