

文章编号: 1006-9941(2014)03-0401-05

一种柔性线同步起爆网络的设计与实验研究

张郑伟¹, 李晓刚¹, 温玉全¹, 侯会民², 吕江²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 北方特种能源集团西安庆华公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 为了减小柔性同步起爆网络设计时分束转换接头的尺寸, 保证爆轰波输出同步性和导爆索与转换接头之间的连接强度, 提出了一种导爆索分束方法, 设计加工了外观尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的转换接头, 加工了“一入二出”和“一入四出”线同步起爆网络原理样机, 进行了爆轰波输出时间同步性测试和同步性偏差分析。研究结果表明, 小尺寸转换接头作用可靠; “一入二出”和“一入四出”线同步起爆网络的爆轰波输出同步性偏差分别为不超过 34 ns 和不超过 73 ns; 分束转换接头间的传爆药柱-导爆索界面差异影响爆轰波输出同步性。

关键词: 特种能源理论与技术; 线同步起爆网络; 同步性; 柔性导爆索; 误差分析

中图分类号: TJ45*6; O389

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.024

1 引言

柔性同步起爆网络是以柔性导爆索为主体构成的起爆网络, 一般由柔性导爆索、输入接头、输出接头、转换接头(歧管)组成, 可用于定向战斗部、爆炸成型弹丸(EFP)战斗部和多爆炸成型弹丸(MEFP)战斗部的多点同步起爆^[1-2]。如柔性线同步起爆网络, 近年来广泛应用于各种破片式定向战斗部的定向起爆系统中, 对战斗部实施侧向多点同步起爆, 以提高破片的初速, 从而提高战斗部的毁伤效能。

柔性同步起爆网络组网时都需要通过转换接头对导爆索进行分束, 实现多点同步输出。常用的分束方式有两种: 一种是由转换接头轴向端面同时起爆多个导爆索实现分束^[3-4]; 另一种是由转换接头的径向同时起爆多个导爆索实现分束^[5]。文献[6]利用上述分束方法设计了“一入二出”柔性同步起爆网络, 并测试了爆轰波输出同步性偏差, 得出轴向和径向分束时爆轰波输出同步性偏差最大值分别为 200 ns 和 284 ns, 但该网络转换接头的外观尺寸较大, 给使用增加了难度。

为了减小转换接头的外观尺寸, 保证柔性同步起

爆网络的爆轰波输出同步性及连接强度, 以满足各种定向战斗部的使用要求, 本研究提出了一种新的导爆索分束方法, 进行了柔性线同步起爆网络的设计与组网试验研究, 测试并分析了爆轰波多点输出同步性偏差, 为柔性线同步起爆网络的工程应用提供了依据。也为面同步起爆网络或序贯起爆网络采用此分束方法进行设计提供理论或实验基础。

2 柔性线同步起爆网络设计

2.1 导爆索分束结构设计

如前所述, 柔性同步起爆网络设计中常用的导爆索分束方法如图 1 所示^[7-8], 即利用中心传爆药柱的侧向或轴向输出威力起爆导爆索, 传递爆轰波。为了实现转换接头的可靠作用, 需保证中心传爆药柱的尺寸, 使其有足够的输出威力。中心传爆药柱的尺寸确定后, 若要减小转换接头的外观尺寸, 必然使壳体变薄, 从而降低分束导爆索和转换接头间的连接强度, 也会对网络的爆轰波输出同步性产生影响。

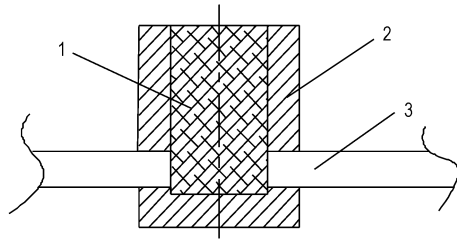
为了减小转换接头和其内置传爆药柱尺寸, 保证爆轰波输出同步性, 本文提出了一种用柔性导爆索直接贯穿转换接头的连接方式实现导爆索分束, 分束结构如图 2 所示。这种分束结构能显著提高导爆索与转换接头间的连接强度, 并最大限度地减小转换接头的尺寸及内部装药量; 此外, 这种连接方式也使转换接头与导爆索间爆轰波传递界面减少了一半, 有助于提高并保证爆轰波输出同步性。

收稿日期: 2013-07-15; 修回日期: 2013-09-01

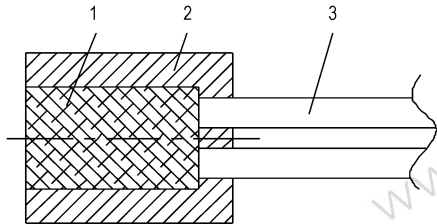
作者简介: 张郑伟(1988-), 硕士, 主要从事新型起爆技术研究。

e-mail: 173013019@qq.com

通信联系人: 温玉全(1965-), 男, 副教授, 主要从事火工系统理论与技术研究。e-mail: wyquan@bit.edu.cn



a. detonation fuses initiated by booster charge radially



b. detonation fuses initiated by booster charge axially

图1 常用导爆索分束方式示意图^[7-8]

1—中心传爆药柱, 2—转换接头, 3—导爆索

Fig.1 Diagrams of common detonation fuses splitting methods

1—central booster charge, 2—adapter, 3—detonation fuses

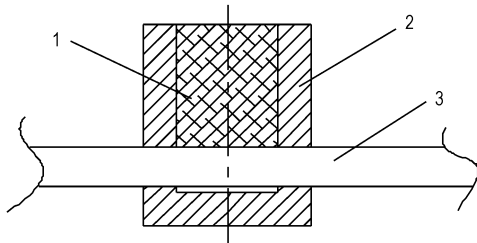


图2 本研究设计的导爆索分束方式示意图

1—中心传爆药柱, 2—转换接头, 3—导爆索

Fig.2 Diagrams of detonation fuses splitting way in this work

1—central booster charge, 2—adapter, 3—detonation fuses

2.2 模块化组网的设计

柔性同步起爆网络的模块化设计是指以某一柔性同步网络单元为基本模块, 通过对该模块的叠加组合, 设计结构更为复杂、输出点数更多的起爆网络。本研究按照 2.1 节提出的分束结构, 设计了“一入二出”柔性同步起爆网络, 结构设计如图 3 所示, 其中 I 为爆轰波输入端, O1 和 O2 为两个爆轰波输出端。

以该“一入二出”柔性同步起爆网络为基本模块, 参考文献[9]中刚性同步起爆网络的设计方法, 采取逐级放大的方式, 可以设计输出点数更多的起爆网络, 如利用 3 个“一入二出”柔性同步起爆网络为基本单元可以设计“一入四出”柔性同步起爆网络, 如图 4 所示, 其中 I 为爆轰波输入端, O1、O2、O3 和 O4 分别为四个爆轰波输出端。该柔性同步起爆网络根据需求既能实现同步线起爆功能, 也能实现同步面起爆功能。

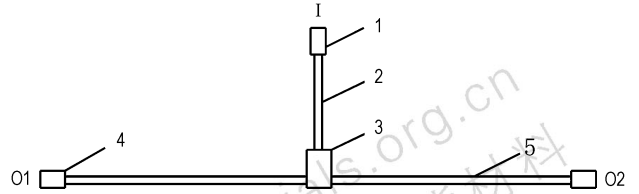


图3 “一入二出”柔性同步起爆网络结构设计图

1—输入管壳, 2—输入爆轰波导爆索, 3—内置中心传爆药柱的转换接头, 4—内置输出传爆药柱的爆轰波输出管壳, 5—输出爆轰波导爆索

Fig.3 Design drawing of “one input two output” flexible synchronous explosive circuit

1—input shell, 2—detonation fuse of input detonation wave, 3—adapter built-in a central booster charge, 4—output shell built-in a booster charge, 5—detonation fuse of output detonation wave

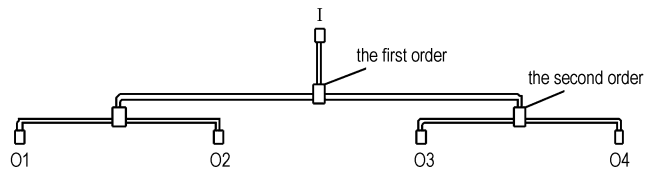


图4 “一入四出”柔性同步起爆网络结构示意图

Fig.4 Design drawing of “one input four output” flexible synchronous explosive circuit

依此原理, 可以“一入二出”柔性同步起爆网络为基本单元组建“一入 2^n 出”的柔性同步起爆网络, 其中 n 称为起爆网络的级数, $n=1$ 时, 为“一入二出”同步起爆网络; $n=2$ 时, 为“一入四出”同步起爆网络, 以此类推。采用这种模块化原理设计的柔性同步起爆网络具有转换接头与导爆索之间连接强度高、爆轰波分束时转换接头外观尺寸小、内部装药威力可控、爆轰波传递时经历的传爆界面少、爆轰波至各输出端传播距离相同等优点, 有利于提高爆轰波输出同步性。

2.3 爆轰波输出时间同步性偏差分析

爆轰波输出时间同步性偏差分析常用于多点同步起爆网络设计, 以分析各种设计参数对同步性偏差的影响, 很多学者对此开展了研究。本研究按照文献[10]中提出的误差分析方法, 对设计的同步起爆网络进行误差分析, 分析各影响因素的影响。

根据柔性同步起爆网络的设计方法, 用 t_n 表示爆轰波由输入端到输出端的传播时间, 其中 n 为柔性同步起爆网络的级数 ($n=1, 2, 3, \dots$), 则 t_n 的表达式为:

$$t_n = \frac{\sum_{i=0}^n L_i}{D_s} + \frac{nH_z}{D_z} + \frac{H_c}{D_c} + (n+1)t_{b_1} + nt_{b_2} + mt_c \quad (1)$$

式中, L_i 为导爆索长度, mm; D_s 为导爆索爆速, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; H_z 和 D_z 分别为转换接头传爆药柱的高度和爆速, 单位分别为 mm 和 $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; H_c 和 D_c 分别为输出接头传爆药柱的高度和爆速, 单位分别为 mm 和 $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; t_{b_1} 为爆轰波在导爆索-传爆药柱之间界面的传递时间, μs ; t_{b_2} 为爆轰波在传爆药柱-导爆索之间界面的传递时间, μs ; t_c 为导爆索弯曲装药爆轰延迟时间, μs ; m 为弯曲装药个数。

由于本研究设计的柔性同步起爆网络为对称结构, 因此分析所设计的柔性同步起爆网络的爆轰波输出时间同步性偏差时应从第一个分束节点后开始, 则爆轰波由第一个分束节点后至输出端的传播时间的

表达式为:

$$t_n' = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{D_s} + \frac{(n-1)H_z}{D_z} + \frac{H_c}{D_c} + nt_{b_1} + (n-1)t_{b_2} + mt_c \quad (2)$$

从式(2)看出, 按本文的柔性同步起爆网络设计方法, 对于某一确定级数的同步网络, n 和 m 为定值, 则 t_n' 是 L_i 、 D_s 、 H_z 、 D_z 、 H_c 、 D_c 、 t_{b_1} 、 t_{b_2} 和 t_c 这些独立变量的函数。若 ΔL_i 、 ΔH_z 和 ΔH_c 分别为加工组网时的导爆索、转换接头与输出接头传爆药柱的长度偏差, ΔD_s 、 ΔD_z 和 ΔD_c 分别是导爆索、转换接头与输出接头传爆药柱的爆速偏差, Δt_{b_1} 是爆轰波在导爆索-传爆药柱之间界面的传递时间偏差, Δt_{b_2} 为爆轰波在传爆药柱-导爆索之间界面的传递时间偏差, Δt_c 为导爆索弯曲装药爆轰延迟时间偏差, 则根据误差传播公式, 由式(2)可得多点同步起爆网络爆轰波输出同步性偏差的表达式为:

$$\Delta t_n' = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_i^2}{D_s^2} + \frac{(\Delta D_s)^2 (\sum_{i=1}^n L_i)^2}{D_s^4} + \frac{(n-1)^2 (\Delta H_z)^2}{D_z^2} + \frac{(n-1)^2 H_z^2 (\Delta D_z)^2}{D_z^4} + \frac{(\Delta H_c)^2}{D_c^2} + \frac{H_c^2 (\Delta D_c)^2}{D_c^4} + n^2 (\Delta t_{b_1})^2 + (n-1)^2 (\Delta t_{b_2})^2 + m^2 (\Delta t_c)^2} \quad (3)$$

当 $n=1$ 时, 由式(3)得“一入二出”柔性同步起爆网络爆轰波输出同步性偏差的表达式为:

$$\Delta t_1' = \pm \sqrt{\frac{\Delta L_1^2}{D_s^2} + \frac{(\Delta D_s)^2 L_1^2}{D_s^4} + \frac{(\Delta H_c)^2}{D_c^2} + \frac{H_c^2 (\Delta D_c)^2}{D_c^4} + (\Delta t_{b_1})^2} \quad (4)$$

当 $n=2$ 时, 由式(3)得“一入四出”柔性同步起爆网络爆轰波输出同步性偏差的表达式为:

$$\Delta t_2' = \pm \sqrt{\frac{(\Delta L_1)^2 + (\Delta L_2)^2}{D_s^2} + \frac{(\Delta D_s)^2 (L_1 + L_2)^2}{D_s^4} + \frac{(\Delta H_z)^2}{D_z^2} + \frac{H_z^2 (\Delta D_z)^2}{D_z^4} + \frac{(\Delta H_c)^2}{D_c^2} + \frac{H_c^2 (\Delta D_c)^2}{D_c^4} + 4(\Delta t_{b_1})^2 + (\Delta t_{b_2})^2 + 4(\Delta t_c)^2} \quad (5)$$

从式(4)和式(5)可以得出, 相对于其他变量的影响, 导爆索爆速偏差对同步性的影响最大。在柔性同步起爆网络设计时, (3)(4)(5)式中除 Δt_{b_1} 、 Δt_{b_2} 、 Δt_c 外, 其它各变量都是可测值, 或可通过对数据统计分析得出。因此若能给出 Δt_{b_1} 、 Δt_{b_2} 、 Δt_c 的经验估计值, 就能用(3)(4)(5)式对网络的爆轰波输出同步性进行计算, 以分析设计的合理性。

若按照 2.2 的组网设计方法分别设计“一入二出”和“一入四出”线同步起爆网络, 假设导爆索直径足够大, 可忽略 Δt_c 的影响, 给出 Δt_{b_1} 、 Δt_{b_2} 的值, 各变

量的取值见表 1 和表 2, 由式(4)计算得出“一入二出”同步起爆网络爆轰波输出同步性偏差为 $\Delta t_1' = \pm 38 \text{ ns}$; 由式(5)计算得出“一入四出”线同步起爆网络爆轰波输出同步性偏差为 $\Delta t_2' = \pm 58 \text{ ns}$ 。也就是说, “一入二出”同步起爆网络两个输出端爆轰波偏差最大值不应超过 76 ns, “一入四出”线同步起爆网络四个输出端爆轰波偏差最大值不应超过 116 ns, 若提高导爆索索芯的装药均匀性, 减少导爆索爆速偏差, 则各输出端的爆轰波输出同步性会进一步提高。

表 1 “一入二出”柔性同步起爆网络各变量的取值

Table 1 Parameters of “one input two output” flexible synchronous explosive circuit

L_1/mm	$\Delta L_1/\text{mm}$	$D_s/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$\Delta D_s/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$D_z/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$\Delta D_z/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	H_c/mm	$\Delta H_c/\text{mm}$	$\Delta t_{b_1}/\mu\text{s}$
80.00	0.02	8.1	0.03	8.2	0.03	3.00	0.02	0.01

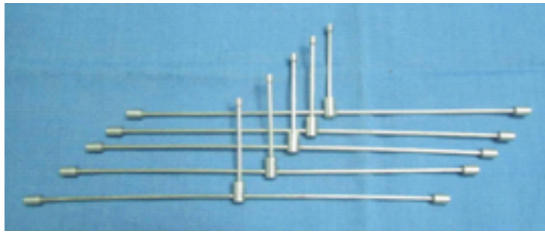
表 2 “一入四出”柔性线同步起爆网络各变量的取值

Table 2 Parameters of “one input four output” flexible linear synchronous explosive circuit

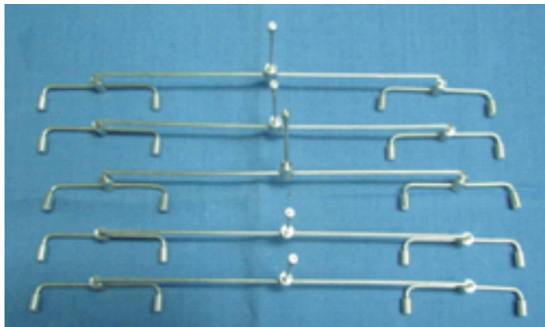
L_1/mm	$\Delta L_1/\text{mm}$	L_2/mm	$\Delta L_2/\text{mm}$	$D_z/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$\Delta D_z/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	H_z/mm	$\Delta H_z/\text{mm}$	$\Delta t_{b_2}/\mu\text{s}$
80.00	0.02	30.00	0.02	8.2	0.03	3.00	0.02	0.02

3 柔性线同步起爆网络同步性测试

为了验证本研究提出的同步起爆网络设计的合理性及误差分析方法的适用性,设计了外观尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的转换接头,并按照表 1 和表 2 中各变量的取值加工了“一入二出”和“一入四出”柔性线同步起爆网络原理样机,如图 5 所示。其中导爆索为索芯装药 JO-6 传爆药、外径 1.58 mm 的银壳柔性导爆索,输入端导爆索长 35.00 mm; 转换接头和输出端装药为 JO-9, 尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 、装药密度 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。



a. one input two output



b. one input four output

图 5 柔性线同步网络加工实物图

Fig. 5 Samples of flexible linear synchronous explosive circuit

采用探针法测试爆轰波从输入至输出端的传播时间。“一入二出”同步起爆网络的爆轰波传播时间如表 3 所示, t_1 、 t_2 为爆轰波从输入端至两个输出端的时间, Δt_1 为同步时间偏差。表 4 为“一入四出”线同步起爆网络的爆轰波传播时间, t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 分别表示爆轰波从输入端至四个输出端的传播时间, Δt_2 为同步时间偏差。

从表 3 可看出,“一入二出”柔性同步起爆网络爆轰波输出时间同步性偏差实测值最大为 34 ns, 平均值为 24 ns, 小于理论预计值; 从表 4 的数据可以看出, t_1 和 t_2 同一分束内爆轰波输出同步性偏差最大值 33 ns, 平均值为 21 ns; t_3 和 t_4 同一分束内爆轰波输出同步性偏差最大值 29 ns, 平均值为 19 ns。这些结果表明, 导爆索的长度对同步性的影响不大, 而导爆索的索芯

装药的爆速及均匀性才是影响同步性的主要因素, 提高导爆索的爆速, 减小其爆速偏差将有利于提高柔性同步起爆网络爆轰波输出同步性水平。

表 3 “一入二出”柔性同步起爆网络测试结果

Table 3 Results of “one input two output” flexible synchronous explosive circuit

No.	$t_1 / \mu\text{s}$	$t_2 / \mu\text{s}$	$\Delta t_1 / \text{ns}$
1	14.691	14.709	18
2	14.676	14.705	29
3	14.674	14.705	31
4	14.709	14.688	21
5	14.692	14.715	23
6	14.663	14.673	10
7	14.662	14.696	34
8	14.719	14.745	26
9	14.706	14.675	31
10	14.683	14.667	16

表 4 “一入四出”柔性线同步起爆网络测试结果

Table 4 Results of “one input four output” flexible linear synchronous explosive circuit

No.	$t_1 / \mu\text{s}$	$t_2 / \mu\text{s}$	$t_3 / \mu\text{s}$	$t_4 / \mu\text{s}$	$\Delta t_2 / \text{ns}$
1	18.701	18.675	18.646	18.673	55
2	18.731	18.719	18.687	18.699	44
3	18.664	18.697	18.715	18.737	73
4	18.702	18.675	18.698	18.709	34
5	18.660	18.677	18.692	18.721	61
6	18.652	18.631	18.583	18.604	69
7	18.704	18.672	18.716	18.696	44
8	18.573	18.584	18.614	18.602	41
9	18.669	18.654	18.648	18.632	37
10	18.685	18.672	18.635	18.651	50

分析表 4 中 t_1 和 t_2 、 t_3 和 t_4 两个分束之间的试验数据, 得出“一入四出”柔性线同步起爆网络爆轰波输出时间同步性偏差最大值来自于不同分束, 偏差的最大值为 73 ns, 平均值为 51 ns。分析本研究设计的“一入四出”柔性线同步起爆网络的结构, 得出产生这种同步性偏差增大的主要原因是两个分束转换接头间存在着传爆药柱-导爆索界面差异。爆轰波需经过银壳后起爆索芯装药才能实现分束传播, 当两个转接头间导爆索的壳体厚度存在差异时, 会影响爆轰波的传递时间及爆轰特性参数, 这会对爆轰波输出同步性偏差产生较大的影响。试验测试结果与文献[6]结果相比, 采用本研究的导爆索分束方法, 不仅能使转换接头的外观尺寸及内部装药量大幅度减小, 还由于减少了网络设计中的导爆索与传爆药柱的界面数量, 提高了

各输出端爆轰波输出同步性。综合分析表3和表4的试验数据,还可以大致估算出爆轰波经不同的传爆药柱-导爆索界面产生的同步性偏差平均值约为10 ns,也证明了表2给出的 Δt_{b_2} 估计值是合理的。

4 结 论

(1) 提出了一种导爆索的分束方法,设计了“一入二出”柔性多点线同步起爆网络,对其爆轰波输出同步性进行了分析,认为导爆索的爆速偏差是影响同步性偏差的主要因素。

(2) 设计加工了“一入二出”和“一入四出”柔性线同步起爆网络原理样机,其转换接头的外观尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,内置装药尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,与传统的分束方法相比,分束导爆索与转换接头间的连接强度有大幅度提高。

(3) 分别对“一入二出”和“一入四出”柔性线同步起爆网络原理样机爆轰波输出同步性进行了测试分析,得出“一入二出”柔性同步起爆网络爆轰波输出同步性偏差不超过34 ns,“一入四出”柔性线同步起爆网络爆轰波输出同步性偏差不超过73 ns。

(4) 综合分析了“一入四出”柔性线同步起爆网络爆轰波输出时间同步性偏差增大的现象,得出了主要原因是两个分束转换接头间存在着传爆药柱-导爆索界面差异,影响了通过该界面的爆轰波的传递时间及爆轰特性参数,从而对爆轰波输出同步性产生了较大的影响。

参考文献:

[1] Richard M L. Conventional warhead systems physics and engineering design [M]. Virginia: American Institute of Aeronautics

- and Astronautics, 1998: 388.
- [2] 尹建平. 多爆炸成型弹丸战斗部技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 10-11.
- YIN Jian-ping. Multiple explosively formed projectile warhead technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 10-11.
- [3] 樊武龙. 定向起爆网络应用技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2005.
- FAN Wu-long. Study on the applied technology of aimed explosive circuit [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005.
- [4] 赵文虎. 柔性同步起爆网络的设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- ZHAO Wen-hu. Design on mild synchronous explosive circuit [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [5] WEN Yu-quan, YE Yao-kun, YAN Nan. Detonation velocity deficit and curvature radius of flexible detonation fuses [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2012, 48(2): 209-213.
- [6] 叶耀坤. 柔性同步起爆网络设计 [D]. 北京: 北京理工大学, 2007.
- YE Yao-kun. Design of flexible synchronous explosive circuit [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007.
- [7] YE Yao-kun, WEN Yu-quan, YAN Nan. Study on detonation velocity deficits of bending flexible detonation fuses [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2011, 20(4): 427-432.
- [8] 郭洪卫, 温玉全. 柔性爆炸网络组网技术研究 [J]. *火工品*, 2010(3): 8-10.
- GUO Hong-wei, WEN Yu-quan. Study on network technology of flexible explosive circuit [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(3): 8-10.
- [9] 温玉全. 刚性爆炸网络若干应用研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2000.
- WEN Yu-quan. Some applications on rigid explosive circuit [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2000.
- [10] 温玉全, 焦清介, 卢斌. 刚性偏心式圆周线同步起爆网络的设计及同步时间分析 [J]. *兵工学报*, 2003, 24(2): 172-175.
- WEN Yu-quan, JIAO Qing-jie, LUBin. Structural design and time analysis of synchronous explosive circuit in rigid eccentric circumferential lines [J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(2): 172-175.

Design and Tests of a Flexible Linear Synchronous Explosive Circuit

ZHANG Zheng-wei¹, LI Xiao-gang¹, WEN Yu-quan¹, HOU Hui-min², Lü Jiang²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Xi'an North Qinghua Mechanical and Electrical Group Co. LTD., Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to reduce the size of adapter, ensure the output synchronization of detonation wave and increase the connection strength between adapter and detonation fuses, a new way of splitting detonation fuses was put forward, and a small adapter with $\Phi 5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ was designed. The prototypes of “one input two output” and “one input four output” flexible linear explosive circuit were manufactured, tested and analyzed. The results show that this small adapter can work reliably, and the output deviation of “one input two output” and “one input four output” flexible linear explosive circuit are less than 34 ns and 73 ns, respectively. Moreover, the interface between booster charge and detonation fuse in the adapter is found to affect the output synchronization of detonation wave.

Key words: special energy theory and technology; linear synchronous explosive circuit; synchronization; flexible detonation fuses; error analysis

CLC number: TJ45⁺6; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.024