

文章编号:1006-9941(2009)02-0225-04

柔性多点同步爆炸网络设计技术研究

白颖伟, 张 蕊, 李 哲, 周琥彬, 王可暄, 褚恩义

(陕西应用物理化学研究所, 应用物理化学国家级重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要: 计算了柔性爆炸网络各部分的输出同步性误差, 分析了影响系统输出同步性的主要因素。试制了以银壳柔性导爆索为主要传爆元件能实现一入九出偏心起爆和一入十二出中心起爆的柔性爆炸网络样机。样机的扩爆药柱和导爆索的装药均为聚奥克托今 C III。对样机输出性能的测试分析表明, 同步爆炸网络均能可靠作用。系统的输出同步性为 200 ns 左右, 比同尺寸同类设计的同步性提高了 100 ns 以上。

关键词: 爆炸力学; 柔性爆炸网络; 同步爆炸网络

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.024

1 引 言

爆炸网络也称爆炸线路 (explosive circuit), 是一种由爆炸元件构成, 通过爆轰信号传递起爆指令的火工品^[1], 它是为了满足核武器、空间武器发展的需要和应对对空目标定向战斗部的定向起爆需求而发展起来的新型起爆技术。爆炸网络根据载体和爆炸元件的不同主要分为刚性爆炸网络和柔性爆炸网络两大类^[2]。刚性爆炸网络是以刚性基板为载体的沟槽型爆炸网络。柔性多点同步爆炸网络是以柔性爆炸元件为主要装药的同步网络。柔性爆炸网络已广泛应用于航空航天领域, 并且在一些武器战斗部中作为抗电磁干扰、防冲击的延期装置使用。

国外从 20 世纪 60 年代就开始爆炸网络的设计, 由于爆炸逻辑网络和多点同步起爆技术解密期较长, 目前只能得到一些专利^[3-5], 而且 90 年代后有关爆炸网络应用国外很少报道。从 20 世纪 70 年代起, 国内对爆炸网络进行了广泛研究与探讨, 在药剂开发、网络元件设计、组网工艺等方面都取得了阶段性成果^[6]。文献[7]介绍了一入四出和入八出的爆炸网络; 文献[8]介绍了一种一入二十七出的多点同步输出爆炸网络。从以上文献报道来看, 影响多点同步输出爆炸网络输出性能的主要因素是爆轰波输出同步性。本实验在上述工作的基础上, 结合对柔性导爆索输出性能研究成果^[9-10], 对柔性多点同步输出爆炸网络设计方法进行研究, 尤其是对影响柔性爆炸网络输出同步性

的主要因素进行研究, 通过严格控制影响因素, 提高多点同步网络综合输出性能。

2 柔性多点同步爆炸网络设计

2.1 输入设计

柔性多点同步爆炸传爆网络系统由输入接头、传爆线路以及多个终端输出火工装置组成。根据爆轰波汇聚原理, 终端输出火工装置产生的球形爆轰波在主装药中传播并叠加, 使爆轰波前沿达到一定的平面度。

系统设计无特殊要求的情况下, 输入端起爆点应位于多点同步爆炸传爆网络系统中心。这种方式能对多根导爆索实施同等条件下的起爆, 可减少输入引起的同步性误差。在系统总体设计使得输入端起爆点不能在轴向中心位置时, 应通过多发串联火工装置或一级传爆网络使输入点对称、均匀、等距离分布在爆炸网络轴心处。

为了便于进行试验, 用一个传爆药柱替代输入电爆装置, 该药柱可以用电雷管直接起爆, 在系统要求高压起爆时也可作为爆炸箔起爆器的主装药。本实验进行了两种输入设计, 一种是在一个传爆药柱轴向上均布多根导爆索, 一种是在传爆药柱侧向均布多根导爆索。经过大量试验, 证明在传爆药柱被可靠起爆的情况下, 能满足可靠起爆的要求, 典型的输入药柱与导爆索的连接件见图 1, 该输入件可同时引爆六分位上的导爆索。

从药柱开始作用到导爆索输入端所用时间为 $t_1 = L_1/D$, 同步时间 Δt_1 可以利用误差分析的方法从作用时间关系式(1)得到^[7,11],

$$\Delta t_1 = \pm \sqrt{(\alpha_1 \Delta L_1)^2 + (\alpha_2 \Delta D)^2} \quad (1)$$

收稿日期: 2008-08-26; 修回日期: 2009-01-12

作者简介: 白颖伟 (1972 -), 男, 硕士, 高级工程师, 从事火工品研制。
e-mail: baiyw@126.com

式中, ΔL_1 取决于长度的误差; ΔD 取决于装药截面尺寸和装药密度的误差。

α_1 和 α_2 可由多点作用时间关系式进行偏微分得到:

$$\alpha_1 = \frac{\partial t_1}{\partial L_1} = \frac{1}{D}, \alpha_2 = \frac{\partial t_1}{\partial D} = \frac{L_1}{D^2} \quad (2)$$

如图2所示,实际的起爆点会偏离起爆中心在 $(\Delta x, \Delta y)$ 处,通过分析可以得知,最不利的情况是起爆点最靠近某一输出点,此时最近点和最远点的距离差 ΔL_1 为:

$$\Delta L_1 = \sqrt{(\Delta x + R)^2 + h^2} - \sqrt{(R - \Delta x)^2 + h^2} \quad (3)$$

其中, R 是传爆药柱的半径, h 是药柱的高度。当使用爆速为 $8578 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 直径 $\Phi 6 \text{ mm}$, 高度为 5 mm 的传爆药柱时,按加工件的最大偏差 0.1 mm 作为 Δx 值, ΔD 取值为 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,可求得 Δt_1 为 5 ns 。

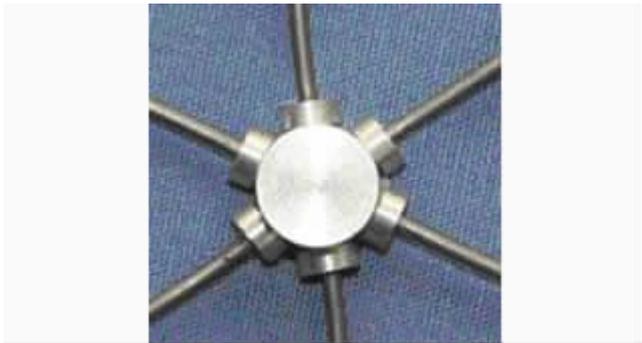


图1 典型的输入分束结构

Fig. 1 One in multi-point out configuration of explosive circuit

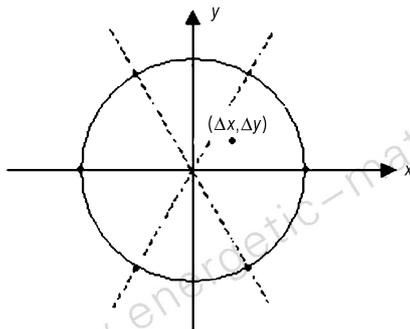


图2 真实起爆点示意图

Fig. 2 Sketch map of explosive point

2.2 柔性爆炸网络传爆线路设计

要实现多点同时起爆,就要通过设计合理的传爆线路来确保输出一致性。传爆线路由柔性导爆索作为主要装药,在起爆网络基板上由多个传爆元件和导爆索装配,连接形成完整的多点同步传爆网络。为了确保传爆线路准确,网络基板用来确保装配位置的准确性。

基板设计分为平面同步输出网络基板和立体空间结构基板。平面同步输出网络基板设计包括输入接头,沟槽和输出接头设计。输入和输出接头的设计应简单可靠。沟槽设计应确保导爆索安装到位,并且在沟槽拐弯处靠近内侧和底面选点局部涂胶,既可以确保导爆索装配到位,又使基板沟槽有更多的泄爆空间,减小导爆索爆炸时对基板和与沟槽网络板之间的输出传爆性能的影响。空间立体结构柔性爆炸网络基板可以是柔性基板,也可用限制性导爆索作为基板,在适当的位置点进行固定。

传爆线路的选择要尽量使每一个输出在一致的传爆条件下。在参考文献[7-8]所列的几种设计方案中,都以输出距离的一致作为保证同步性的主要手段。在实际设计中,由于传爆线路的曲度和拐点对爆轰波传递产生较大的影响^[12],如果不考虑这些因素,设计的网络输出同步性不会理想。图3是利用AUTODYN-3D对传爆线路长度均为 50 mm , 导爆索爆速为 $8358 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 标准偏差 $41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 但传爆线路不同的一入三出情况下的模拟图,由于输入爆轰传递方向和传递路线的不同,各线路的反应情况有很大的不同。模拟该传爆线路的输出同步性为 140 ns 。如果采用中心起爆,在三分位上直线传递的一入三出传爆线路,假定长度误差和接口误差为 0.1 mm ,按照作用时间关系式,可计算其输出同步性为 12 ns 。



图3 等长度不同线路模拟图

Fig. 3 One in three out points explosive circuit with different routes

按图3和中心起爆三分位直线传爆试制一入三出传爆线路,利用示波器测试其输出同步性,典型的测试波形见图4,测试结果见表1。从实际测试结果可以看出,中心起爆的输入接头和直线传递的传爆线路连接起来同步性很高,而等长度不同曲率线路的传爆线路同步性较差。

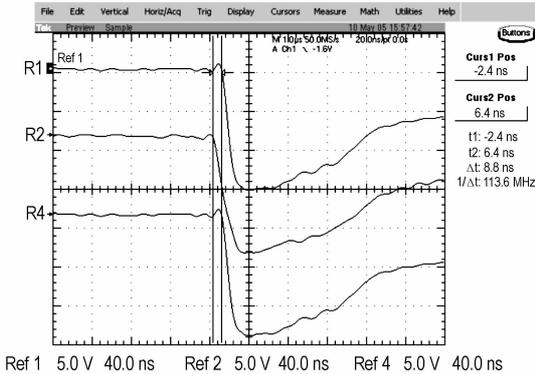


图 4 一入三出爆炸线路同步性测试曲线

Fig. 4 Testing waves of one in three out points explosive circuit

表 1 一入三出同步性测试值

Table 1 Synchronous testing results of one in three out points explosive circuit

No.	same route/ns	different route/ns
1	8.8	72
2	15.1	56
3	15.7	88.5

2.3 输出设计

由于柔性爆炸网络使用的是柔性导爆索传递爆轰,通常不能用导爆索自身的爆轰输出直接引爆下级功能装置,需要进行能量放大处理,一般利用输出接头进行能量放大。在技术条件允许输出含有起爆药时,其输出接头设计可直接利用成熟技术,一般采用导爆索直接连接一个装有起爆药的火帽进行输出传爆。

对一些安全性要求特别高,不希望含有比较敏感的起爆药的武器系统,可采用的输出接头形式有直插式结构、简易内锥套结构和结合这两种结构形成的内锥套结构(见图 5)。由于这几种输出接头对输入导爆索和输出装药有一定的限制,在使用时要经过一定的可靠性实验才能采用。

本实验主要对直插式结构和台阶形输出接头进行了试验验证,试验用铝凹进行输出验证,试件分别见图 6 和图 7。经过试验验证可知,对于直插式结构,当施主直径小于某阈值 d_{ic} 时,受主与施主面积比存在上限值 ξ ,当实际装配尺寸比值大于 ξ 时,不能传递爆轰波。但是当施主直径大于阈值 d_{ic} 时,不存在此值,比如一个直径 20 mm 的药柱能够起爆任意直径的主装药。

台阶药柱将爆轰传爆方向以 90° 拐角改变方向,实验证明该方式在施主装药直径大于阈值的下也能可靠起爆。

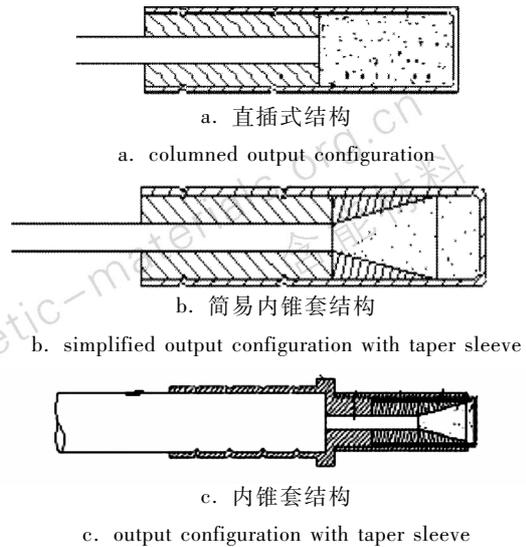


图 5 几种输出接头形式

Fig. 5 Output configurations in common use

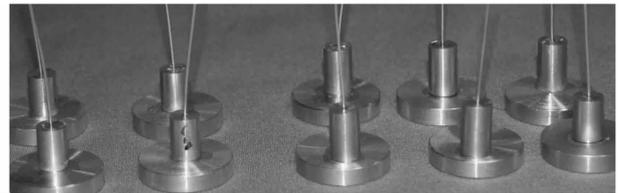


图 6 直插式输出接头试件

Fig. 6 Samples of columned output configuration

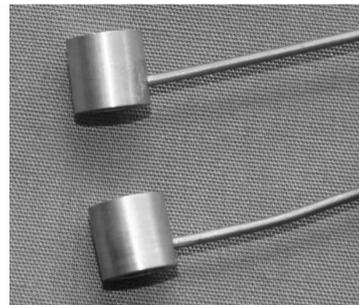


图 7 台阶形输出接头

Fig. 7 Step output configuration

采用直插式结构输出端的同步性可由式(1)推算。采用台阶药柱输出由于有拐角的存在应按式(4)计算作用时间, $t_{\pi/2}$ 位拐角的时间延迟,时间误差按式(5)计算。

$$t_3 = L/D + t_{\pi/2} \quad (4)$$

$$\Delta t_3 = \pm \sqrt{(\alpha_1 \Delta L_3)^2 + (\alpha_2 \Delta D)^2 + (\alpha_3 \Delta t_{\pi/2})^2} \quad (5)$$

3 柔性多点同步输出爆炸网络样机制

在第一节研究的基础上,又试制了两种柔性多点同步爆炸网络样机。一种是经过两次分级,侧向起爆的一入九出同步爆炸网络。该爆炸网络的起爆线路参

照参考文献[9]按图3设计,各点最后包括在连接的等边三角形里面。一种是经过两次分级,中心起爆的一入十二出同步爆炸网络,各输出点等距分布在一个圆上面。两种爆炸网络都采用台阶药柱轴向输出。

在样机装配过程中,为了保证样机的稳定性和一致性,设计了切的索模具、导爆索成型模具及工装夹具来确保各元件的精度。

网络设计完成后,采用三十二路多点时间间隔测试系统进行了同步性测试。测试结果见表2。

表2 一入多出同步性测试值

Table 2 Synchronous testing results of one point in multi-point out explosive circuit

No.	one in 9 out/ns	one in 12 out/ns
1	223	160
2	313	138
3	228	174
4	197	218
5	297	180

从测试结果来看,随着起爆点数和分级次数的增多,在相同尺寸条件下,结构一致时,单级分束同步性误差仅16 ns左右,而二级连接后同步性误差达到了200 ns左右。爆炸线路结构不一致的网络又比各线路方向一致的网络同步性差。

4 结论

与参考文献[7-8]相比,本实验设计的中心起爆柔性爆炸序列同步性极差较好,小于理论计算的值,达到了预期的设计目的。从试验结果来看,随着输出点数的增多,系统的同步性会变差,在保证起爆效果的基础上,应尽量减少输出点数。

对于设计的系统,目前只是进行了静态试验,在实际使用中,由于爆炸网络要承受较大的冲击,下一步将

在条件许可的情况下进行动态性能测试试验,进一步完善爆炸网络系统的设计。

参考文献:

- [1] 卢斌. 自锁式爆炸逻辑网络结构设计及其接口技术研究[D]. 北京:北京理工大学博士论文,2003.
- [2] 温玉全. 刚性爆炸网络若干应用研究[D]. 北京:北京理工大学博士学位论文,2000.
- [3] Courser D L. Explosive Means; USP 3095812[P],1963.
- [4] Silvia D A. Explosive Gate Dilde Switch; USP 3430564[P],1969.
- [5] Spencer J H. Mild Detonation Fuze Logic Component; USP 3669021[P],1972.
- [6] 温玉全,焦清介,蔡瑞娇,等. 一种“二入四出”爆炸逻辑网络研究[J]. 含能材料,2005,13(1): 22-25.
WEN Yu-quan, JIAO Qing-jie, CAI Rui-jiao, et al. Study on an explosive logic circuit with two-input-four-output[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(1): 22-25.
- [7] 胡双启,邵玲,曹雄. 环形传爆药多点同步起爆网络的应用研究[J]. 火炸药学报,2004,27(3): 62-65.
HU Shuang-qi, TAI Ling, CAO Xion. Application of multi-point synchronous explosive logic circuit of the ring propagating charge[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(3): 62-65.
- [8] 许碧英,李公法,高桂萍. 平面多点同时起爆网络的设计[J]. 火工品,2004(3): 1-4.
XU Bi-ying, LI Gong-fa, GAO Gui-ping. Design of multi-point simultaneous initiating circuit on a plane[J]. *Chinese Journal of Initiators & Pyrotechnics*, 2004(3): 1-4.
- [9] BAI Ying-wei, JIANG Zhuang-de, ZHAO Yu-long, et al. Study on the key factors interfered detonation velocity of detonating cords [C] // 2007 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Xi'an, 2007. 10.
- [10] BAI Ying-wei, JIANG Zhuang-de, ZHAO Yu-long, et al. Study on the shockwave pressure testing method for detonating cords [C] // 2nd Intergration and Commercialization of Micro and Nanosystems International Conference & Exhibition. Hong Kong, 2008. 6.
- [11] 肖鸣耀. 误差理论与应用[M]. 北京:计量出版社,1985.
- [12] 温玉全,焦清介. 小尺寸非理想装药爆轰波传播理论研究[R]. 火工技术研讨会报告,杭州,2006.

Design on Mild Multi-point Synchronous Explosive Circuit

BAI Ying-wei, ZHANG Rui, LI Zhe, ZHOU Xiao-bin, WANG Ke-xuan, CHU En-yi

(State Key Laboratory of Applied Physics-Chemistry Research, Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: By calculating the output synchronous error of the main parts of the flexible explosive circuit, the main factors affecting the output synchronization were analyzed. Two kinds of explosive circuit (one in nine out eccentricity explosive circuit and one in twelve out center explosive circuit) samples based on silver code were produced. The charge of the column and the code were HMX C III. The output performances of these explosive circuit samples were tested. The results show that the function of the explosive circuits can be accomplished. The synchronous error of the circuit is within 200 ns which is better than that of the similar circuit.

Key words: explosion mechanics; mild explosive circuit; synchronous explosive circuit