

文章编号: 1003-1480 (2024) 02-0008-06

非电传爆系统中不同尺寸雷管输出性能研究

刘群, 杨昭, 张威, 张丽梅, 许猛

(北京空间机电研究所, 北京, 100076)

摘要: 为合理设计非电传爆系统用雷管, 研究了不同尺寸对雷管输出性能的影响。基于不同尺寸雷管起爆两路导爆索的试验结果, 建立了雷管起爆两路导爆索的计算模型; 采用非线性有限元动力学方法, 对不同尺寸雷管起爆导爆索过程进行了数值模拟计算, 分析了起爆药厚度、传爆药厚度和雷管直径变化对雷管输出性能的影响。结果表明: $\Phi 3.0$ mm \times 3.8 mm 雷管不足以起爆 $\Phi 1$ mm 导爆索, $\Phi 3.85$ mm \times 6.50 mm 雷管可以可靠起爆 $\Phi 1$ mm 导爆索; 针对 $\Phi 3.0$ mm \times 3.8 mm 雷管, 增加起爆药厚度、传爆药厚度和雷管直径均可以可靠起爆 $\Phi 1$ mm 导爆索, 其中增大雷管直径还可以保证雷管体积最小, 对于提高雷管输出性能的贡献更大。

关键词: 非电传爆系统; 雷管; 起爆; 数值模拟

中图分类号: TJ45+6 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.02.002

Study on the Output Performance of Different Size of Detonators in Non Electric Detonation System

LIU Qun, YANG Zhao, ZHANG Wei, ZHANG Li-mei, XU Meng

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing, 100076)

Abstract: To design detonator reasonably for non electric detonation system, the effects of different sizes on the output performance of detonator were studied. Based on the test results of two detonating cords initiated by a detonator, a calculation model was established for the initiation of two detonating cords by a detonator. The nonlinear finite element dynamics method was used to numerically simulate the initiation process of detonating cords by the detonator with different sizes. The effects of changes in the thickness of primary explosive, the thickness of booster, and the diameter of detonator on the output performance of detonator were analyzed. The results indicate that $\Phi 3.0$ mm \times 3.8 mm detonator is not sufficient to initiate $\Phi 1$ mm detonating cord, $\Phi 3.85$ mm \times 6.50 mm detonator can be reliable to initiate $\Phi 1$ mm detonating cord. Based on $\Phi 3.0$ mm \times 3.8 mm detonator, increasing the thickness of primary explosive, the thickness of booster, and the diameter of detonator can all reliably initiate $\Phi 1$ mm detonating cord. In all of these, increasing the diameter of detonator can also ensure the detonator with the smallest volume, which contributes more to improve the output performance of detonator.

Key words: Non electric detonation system; Detonator; Initiation; Numerical simulation

非电传爆系统是将多个独立火工装置, 通过中间部件相互连接, 组成的一种火工品系统。它一般由起爆器、传爆元件和各种功能元件组成, 能够完成电起爆系统所能完成的起爆、传爆等功能, 具有结构简单、可靠性高和安全性好等特点, 在火箭、导弹等飞行器

上得到了广泛应用^[1]。雷管是非电传爆系统的重要起爆元件, 它通过激发装药反应而将爆轰能量传输给下一级传爆元件^[2], 因此雷管输出性能直接关系到非电传爆系统的可靠性。雷管的输出性能主要取决于其结构尺寸和装药量。结构尺寸太小、装药量小, 雷管难

收稿日期: 2023-08-14

作者简介: 刘群 (1983-), 男, 研究员, 主要从事火工机构方面研究。

引用本文: 刘群, 杨昭, 张威, 等. 非电传爆系统中不同尺寸雷管输出性能研究[J]. 火工品, 2024(2): 8-13.

以可靠起爆下一级传爆元件；尺寸太大、装药量过多，雷管的冲击波会对周围重要结构件产生破坏，同时也不利于非电传爆系统的小型化设计^[3-4]。因此，合理设计雷管尺寸是保证非电传爆系统可靠传爆和系统小型化的关键问题之一。

传统雷管设计方法主要基于工程经验公式估算雷管尺寸，通过铅板炸坑试验和输出压力试验^[5]评估雷管的输出性能，然后根据技术要求不断改进相关设计参数，最终确定满足要求的雷管尺寸。这种设计方法周期长、试验量大，在改进雷管尺寸上缺乏理论指导，难以合理的优化雷管设计参数。近年来，爆炸数值模拟技术的发展为研究雷管输出性能提供了有效的途径^[6-7]，不仅可以方便的更改雷管尺寸参数，给出尺寸变化对雷管输出性能的影响，而且能够更加高效合理的优化雷管结构尺寸。

为获得不同尺寸对非电传爆系统雷管输出性能的影响，本文首先进行雷管起爆两路导爆索试验，获得不同尺寸雷管对导爆索的起爆特征。然后建立雷管起爆两路导爆索的计算模型，采用非线性有限元动力学方法，对不同尺寸雷管起爆导爆索的过程进行数值模拟计算，分析起爆药厚度、传爆药厚度以及装药直径对雷管输出性能的影响，为雷管的优化设计提供理论指导。

1 雷管起爆两路导爆索试验

雷管起爆两路导爆索试验装置如图1所示。

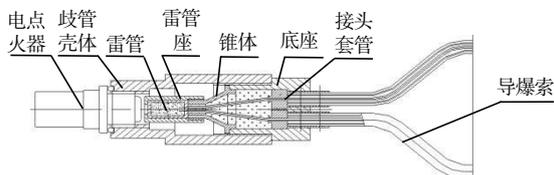


图1 雷管起爆两路导爆索试验装置示意图

Fig.1 Scheme of detonator initiating two detonating cords test devices

试验装置主要由电点火器、雷管座、雷管、歧管壳体、锥体、底座、接头套管和导爆索等部分组成。雷管座主要用于固定雷管位置以及约束雷管爆轰后的侧向膨胀作用。锥体注入J133胶，用于固定支撑导爆索。试验时，电点火器点燃雷管上层的点火药，

点火药依次引爆雷管内的起爆药和传爆药，雷管产生的冲击波起爆导爆索，产生的爆轰波沿两路导爆索传播一定距离后，引爆下一级传爆元件。

雷管起爆两路导爆索试验装置照片如图2所示。试验中，雷管采用2种尺寸，小尺寸雷管为 $\Phi 3.0\text{ mm} \times 3.8\text{ mm}$ ，大尺寸雷管为 $\Phi 3.85\text{ mm} \times 6.50\text{ mm}$ ，雷管由3层装药组成，按能量放大顺序依次为斯蒂芬酸铅、叠氮化铅和黑索今。导爆索采用限制性导爆索，药芯为六硝基芪，直径为0.5mm，外部套有银管，其内径为0.5mm、外径为1.0mm；银管外层包覆有一定厚度的编织层。此外，两路导爆索在锥体内有一定弯折，角度约为 40° 。



图2 试验装置照片

Fig.2 Photo of test device

2 雷管起爆两路导爆索数值模拟

采用非线性有限元动力学方法^[8]，对雷管起爆导爆索的过程进行数值模拟，分析雷管尺寸对其输出性能的影响。

2.1 计算模型

根据两路非电传爆试验装置，建立雷管起爆两路导爆索的三维计算模型，如图3所示。

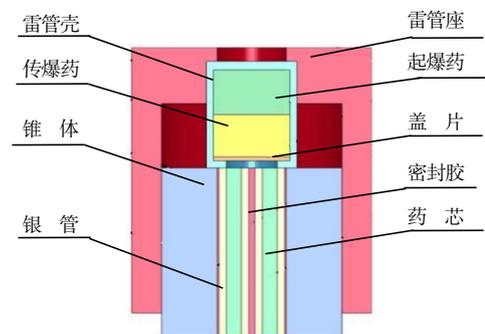


图3 雷管起爆两路导爆索计算模型

Fig.3 Calculation model of detonator initiating two detonating cords

已有的研究表明,电点火器对雷管可以可靠点火,导爆索在现有弯折角度下也可以可靠传爆,因此计算模型对物理模型进行了简化,只研究雷管对导爆索的起爆过程。

计算模型主要由雷管座、雷管、锥体、密封胶和导爆索组成。其中,雷管由雷管壳、起爆药、传爆药和盖片组成,由于点火药只是引爆起爆药,药量较小,模型中通过定义起爆药上表面点火方式来取代点火药的作用。模型中雷管壳厚度为 0.23 mm,盖片厚度为 0.15 mm,雷管内起爆药和传爆药厚度依雷管具体尺寸确定。模型中其他部件尺寸与试验装置完全相同。1/2 模型网格图如图 4 所示。

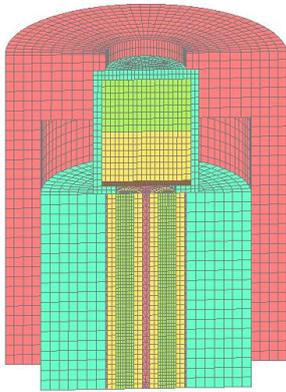


图 4 1/2 模型网格图

Fig. 4 1/2 Model grid diagram

2.2 材料模型

模型中雷管座材料为钢,雷管壳材料为铜,盖片和锥体材料均为铝,药芯外层套管材料为银,均采用塑性动力学材料模型描述。塑性动力学材料模型的应力应变关系^[9]为:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (1)$$

式(1)中: σ_0 为初始屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C 和 P 为 Cowper-Symond 应变率参数; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变; E_p 为塑性硬化模量。惰性材料模型参数如表 1 所示。

起爆药为叠氮化铅,采用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程描述。JWL 状态方程^[9] :

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

式(2)中: P 为爆轰产物的压力,Pa; V 为爆轰

产物的相对比容; E 为单位体积炸药的初始内能; A , B , R_1 , R_2 和 ω 为待定参数。表 2 为叠氮化铅 JWL 状态方程参数。

表 1 惰性材料模型参数

Tab. 1 Inert material model parameters

材料	密度 ρ_0 (g·cm ⁻³)	杨氏模量 E × 10 ² /GPa	泊松比 P	屈服应力 σ_0 × 10 ² /GPa
钢	7.83	2.060	0.30	0.005 0
铝	2.76	0.689	0.33	0.004 4
铜	8.93	1.170	0.35	0.004 0
银	10.50	0.732	0.38	0.003 8

表 2 叠氮化铅 JWL 状态方程参数

Tab. 2 JWL state equation parameters of PbN₃

$A \times 10^2$ /GPa	$B \times 10^2$ /GPa	R_1	R_2	ω	E_0
1.138 17	0.046 39	4.60	1.4	0.32	1.00

传爆药为黑索今(RDX),导爆索药芯为六硝基芪(HNS),均采用三项式点火增长反应速率方程描述。点火增长反应速率方程为^[10]:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d P^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g P^z \quad (3)$$

式(3)中: λ 为炸药反应度; t 为时间; ρ 为密度; ρ_0 为初始密度; P 为压力; I , G_1 , G_2 , a , b , x , c , d , y , e , g 和 z 为常数。RDX 和 HNS 点火增长反应速率方程参数见表 3。

表 3 RDX 和 HNS 点火增长反应速率方程参数

Tab. 3 Parameters of RDX and HNS ignition & growth reaction rate equation

材料	$I/\mu\text{s}^{-1}$	b	a	x	$G_1 \times 10^2 / (\text{GPa}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1})$
RDX	4×10^6	0.667	0.036 7	7	840
HNS	1.6×10^4	0.667	0.02	7	2 000
材料	d	y	$G_2 \times 10^2 / (\text{GPa}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1})$	e	g
RDX	0.333	2	800	0.667	0.667
HNS	0.667	2	4 000	0.333	1.0

3 结果分析与讨论

3.1 试验结果与讨论

$\Phi 3.0 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 雷管起爆导爆索试验后实物及 X 光照片如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,两根导爆索中一根成功传爆,而另一根没有成功传爆。由图 5(b)可以看出,未成功传爆的导爆索只有端部一小段发生变形,剩余部分装药较完整,表明这根导爆索只有端部一小部分药芯发生反应,爆轰波在成长过程

出现熄爆，并没有形成稳定爆轰。

Φ3.85 mm×6.50 mm 雷管起爆导爆索试验后实物照片如图 6 所示。由图 6 可以看出，锥体内的导爆索消失，雷管成功起爆导爆索。



(a) 实物照片 (b) X 光照片
 图5 Φ3.0 mm×3.8 mm 雷管起爆导爆索试验后实物及 X 光照片
 Fig.5 Physical photograph and X-ray photo of Φ3.0 mm × 3.8 mm detonator initiating detonating cords after test



图 6 Φ3.85mm×6.50mm 雷管起爆导爆索试验后实物照片
 Fig.6 Photo of Φ3.85mm × 6.50mm detonator initiating detonating cords after test

两根导爆索传爆同步性测量结果如图 7 所示。由图 7 可见两根导爆索输出端的时间差约 1 μs，表明爆轰波基本同时到达导爆索输出端，两路导爆索输出同步性较好。

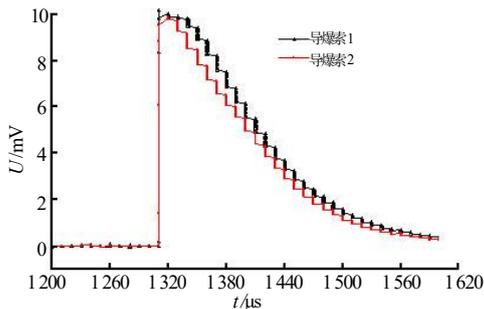


图 7 两根导爆索传爆同步性测量结果
 Fig.7 Measurement results of synchronous transmission of two detonating cords

以上试验结果表明，Φ3.0 mm×3.8 mm 雷管装药量较小，不足以可靠起爆导爆索，而Φ3.85 mm ×6.50 mm 雷管具有足够装药量，可以保证稳定传爆。因此，在Φ3.0 mm×3.8 mm 和Φ3.85 mm×6.50 mm 两种雷管之间应存在一个最佳尺寸，既能保证稳定传爆，又能有效减小雷管尺寸。

3.2 计算结果与讨论

3.2.1 大尺寸雷管起爆导爆索过程模拟

Φ3.85 mm×6.50 mm 雷管起爆导爆索过程不同时刻的压力分布如图 8 所示。

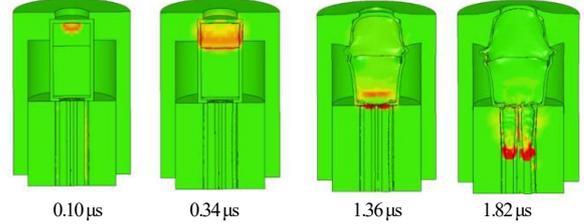


图 8 Φ3.85mm×6.50mm 雷管起爆导爆索过程不同时刻压力分布

Fig.8 Pressure distribution at different moments during the Φ3.85 mm × 6.50 mm detonator initiating detonating cords

由图 8 可以看出，初始时刻，起爆药上表面中心位置处发生起爆，0.10 μs 时，球面爆轰波在起爆药中传播；0.34 μs 时，爆轰波传播到起爆药和传爆药的界面处，导致传爆药发生爆轰，爆轰波开始在传爆药中传播；1.36 μs 时，爆轰波传播到盖片处，爆轰产物驱动盖片撞击导爆索，产生的冲击波进入导爆索药芯，导致药芯开始反应，爆轰波在药芯不断成长；1.82 μs 时，爆轰波传播到导爆索的中部，爆轰波在导爆索内形成稳定爆轰，以一定的速度向输出端传播。因此，Φ3.85 mm×6.50 mm 雷管可以可靠起爆Φ1 mm 导爆索。

3.2.2 两种尺寸雷管起爆导爆索特征

对Φ3.0 mm×3.8 mm 和Φ3.85 mm×6.50 mm 2 种雷管起爆导爆索的过程进行数值模拟计算，分析 2 种雷管对导爆索的起爆能力。2 种不同尺寸雷管起爆导爆索后药芯压力分布如图 9 所示。



(a) Φ3.0 mm × 3.80mm (b) Φ3.85 mm × 6.50 mm

图 9 不同尺寸雷管起爆导爆索后药芯压力分布
 Fig.9 Pressure distribution after different sizes of detonator initiating detonating cords

由图 9 可以看出，当药芯内爆轰波传播到距离冲击波入射面 1.5 mm 处时，采用Φ3.0 mm×3.8 mm 雷管起爆的导爆索药芯波阵面压力约为 3GPa，而采用

$\Phi 3.85 \text{ mm} \times 6.50 \text{ mm}$ 雷管起爆的导爆索药芯波阵面压力超过 30 GPa, 表明采用小尺寸雷管起爆后, 导爆索内爆轰波并没有成长, 出现熄爆, 而大尺寸雷管起爆后, 导爆索内爆轰波迅速成长为稳定爆轰。

在导爆索中心轴线上, 沿冲击波传播方向依次选取 5 个监测点, 各监测点到冲击波入射面距离依次为 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 mm, 监测点位置及各测点获得的压力曲线如图 10 所示。

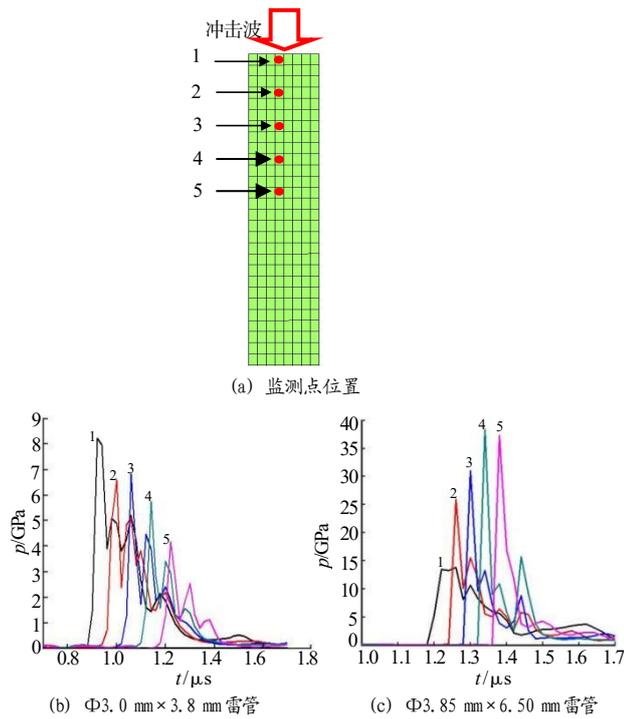


图 10 雷管起爆后导爆索内不同位置处压力—时间曲线
Fig. 10 Pressure vs time curve at different positions in the detonating cord after detonator initiation

由图 10 (b) 可见, $\Phi 3.0 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 雷管起爆后, 入射到导爆索中的初始冲击波压力为 8.3 GPa, 此后冲击波压力迅速降低, 当传播到 1.2 mm 处时, 冲击波波阵面压力降低到 4.1 GPa, 表明导爆索内爆轰波并没有成长, 导爆索无法成功传爆。由图 10 (c) 可见, $\Phi 3.85 \text{ mm} \times 6.50 \text{ mm}$ 雷管起爆后, 入射到导爆索中的初始冲击波压力为 13.4 GPa, 此后炸药开始快速反应, 爆轰波开始迅速成长, 传播到 0.3, 0.6 mm 时波阵面压力分别达到 25.2, 31.1 GPa, 当爆轰波传播到 0.9 mm 处时, 波阵面压力达到 38.4 GPa, 爆轰波成长为稳定爆轰, 导爆索成功传爆。

以上分析表明, $\Phi 3.0 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 雷管内装药量较小, 产生的冲击波压力较低, 低于小尺寸 HNS 的

临界起爆压力, 难以起爆导爆索内炸药; $\Phi 3.85 \text{ mm} \times 6.50 \text{ mm}$ 雷管可以产生 13.4 GPa 的入射冲击波压力, 足以起爆小尺寸 HNS。因此, 数值模拟结果与试验结果一致, 数值模拟能够较好的描述雷管起爆导爆索的特征, 可以用于非电传爆系统中雷管尺寸的优化设计。

3.2.3 雷管尺寸优化设计

雷管尺寸变化直接引起装药量的改变, 从而导致雷管的输出性能发生变化。即使在相同装药量下, 不同长径比雷管的输出性能也有一定差别。以 $\Phi 3.0 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 雷管的装药尺寸为基础, 通过改变起爆药厚度、传爆药厚度和装药直径, 分析各尺寸变化对雷管输出性能的影响, 以获得较优化的雷管尺寸。

针对 $\Phi 3.0 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 雷管, 只改变起爆药厚度 h_1 , 其他尺寸保持不变, 对雷管起爆导爆索过程进行数值模拟。起爆药厚度与入射到导爆索中冲击波压力的关系如图 11 所示。

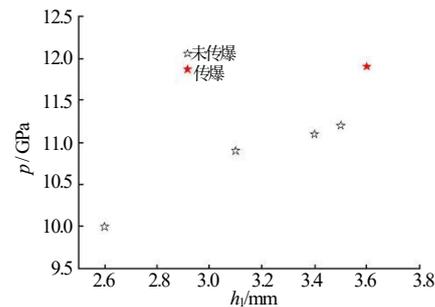


图 11 起爆药厚度与入射到导爆索冲击波压力的关系
Fig. 11 Relationship between the thickness of primary explosive and the pressure of incident shock wave on the detonating cord

从图 11 可以看出, 随着起爆药厚度 h_1 增加, 入射到导爆索中的冲击波压力逐渐增大, 当起爆药厚度增加到 3.6 mm 时, 雷管起爆后, 入射到导爆索中的冲击波压力达到 11.8 GPa, 雷管可以成功起爆导爆索。

同理, 只改变传爆药厚度 h_2 , 分析传爆药厚度对雷管输出性能的影响。传爆药厚度与入射到导爆索中冲击波压力的关系如图 12 所示。

由图 12 可以看出, 当传爆药厚度增加到 3.2 mm 时, 入射到导爆索中的冲击波压力达到 11.4 GPa, 雷管可以起爆导爆索。

保持 $\Phi 3.0 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 雷管内起爆药和传爆药厚度不变, 只改变雷管直径 D , 分析装药直径对雷管输出性能的影响。装药直径与入射到导爆索冲击波压

力的关系如图 13 所示。

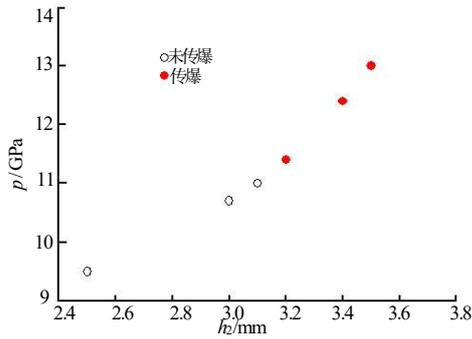


图 12 传爆药厚度与入射到导爆索冲击波压力关系

Fig.12 Relationship between the thickness of booster and the pressure of incident shock wave on the detonating cord

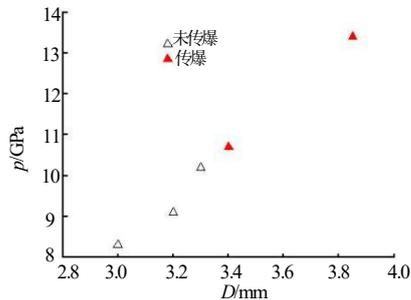


图 13 装药直径与入射到导爆索冲击波压力的关系

Fig.13 Relationship between charge diameter and the pressure of incident shock wave on the detonating cord

由图 13 可以看出,随着装药直径的增大,入射到导爆索中的冲击波压力逐渐增大。当雷管直径为 3.4 mm 时,入射到导爆索中的冲击波压力达到 10.7 GPa,导爆索可以稳定起爆。结果表明,改变起爆药厚度、传爆药厚度和装药直径都可以成功起爆导爆索。其中,起爆药厚度增加到 3.6 mm 时,雷管尺寸为 $\Phi 3.0$ mm \times 5.8 mm,雷管体积较 $\Phi 3.0$ mm \times 3.8 mm 雷管增大 52.6%;传爆药厚度增加到 3.2 mm 时,雷管尺寸为 $\Phi 3.0$ mm \times 5.5 mm,雷管体积较 $\Phi 3.0$ mm \times 3.8 mm 雷管增大 44.7%;雷管直径增大到 3.4 mm 时,雷管尺寸为 $\Phi 3.4$ mm \times 3.8 mm,雷管体积较 $\Phi 3.0$ mm \times 3.8 mm 雷管增大 28.4%。因此,增大雷管直径对提高雷管输出性能贡献更大,采用 $\Phi 3.4$ mm \times 3.8 mm 雷管既可以可靠起爆 $\Phi 1$ mm 导爆索,又能保证雷管体积最小。

4 结论

本文进行了雷管起爆两路导爆索的试验,获得了

不同尺寸雷管起爆导爆索的特征。基于试验数据,建立了雷管起爆两路导爆索的计算模型,对雷管起爆导爆索过程进行了数值模拟计算,分析了起爆药厚度、传爆药厚度和雷管直径变化对雷管输出性能的影响,获得了较优化的雷管尺寸,得到以下结论:(1) $\Phi 3.0$ mm \times 3.8 mm 雷管不足以起爆 $\Phi 1$ mm 导爆索, $\Phi 3.85$ mm \times 6.50 mm 雷管可以可靠起爆 $\Phi 1$ mm 导爆索;(2)增加起爆药厚度、传爆药厚度和雷管直径均可以可靠起爆导爆索,其中增大雷管直径对于提高雷管起爆能力的贡献更大;采用 $\Phi 3.4$ mm \times 3.8 mm 雷管既可以可靠起爆 $\Phi 1$ mm 导爆索,又能保证雷管体积最小。

参考文献:

- [1] 刘群,陈劲,等.非电传爆产品模块化仿真设计与分析[J].火工品,2023(6):71-78.
- [2] 蔡瑞娇.火工品设计原理[M].北京:北京理工大学出版社,1999.
- [3] 魏婧姝,袁长宏,钱石川.8 通道无起爆药非电传爆系统设计研究[J].兵器装备工程学报,2021,(S02):181-184.
- [4] 吴艳萍,魏华男,薛润华,周得才,吴青坡,张俊.柔性多点同步起爆装置设计与试验研究[J].火工品,2022(3):14-17.
- [5] 孙新波,梁纯,王海东.雷管起爆能力测试方法研究[C]//中国石油学会测井专业委员会射孔分会第五届年会,2006.
- [6] P. Clark Souers. A complete detonator, booster, and main charge study of LX-07/PBX9502[J]. Propellants Explosive, 2010(15):119-124.
- [7] DAI Kaida, KUNIHISA Katsuyama, YANG Jun. Numerical simulation of explosion process of a precise detonator[J]. Science and Technology of Energetic Materials,2007,68(2): 31-35.
- [8] LS-DYNA User's manual (nonlinear dynamic analysis of structures in three dimensions) [M].University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 2001.
- [9] LEE E, FINGER M, COLLINS W. JWLL Equation of state coefficients for high explosives[R]. UCLD-16189, 1973.
- [10] TARVER C M, HALLQUIST. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives [C]//8th International Symposium of Detonation,1985.