

文章编号:1006-9941(2009)02-0178-05

## 铸装 TNT/RDX 爆轰过程导电性及反应区厚度实验

焦清介, 金兆鑫, 徐新春

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**利用冲击起爆方式改进了炸药爆轰过程电导率的同轴测试方法,推导出其电导率计算公式。采用输入冲击波压力匹配的方法减小了反应区内波的反射作用和爆轰成长过程的不稳定性对其电导率的影响,进而测得铸装 TNT 炸药和 TNT/RDX 混合炸药爆轰过程中随时间变化的电导率曲线。通过分析曲线中拐点出现的原因,推导出炸药的化学反应时间和反应区厚度。研究表明,RDX 的增加会降低铸装 TNT/RDX 炸药的最大电导率;得出铸装 TNT 炸药的化学反应时间约为 0.08  $\mu\text{s}$ ,反应区厚度约为 0.41 mm;几种铸装 TNT/RDX 炸药的反应区厚度均在 0.5 mm 附近。

**关键词:**爆炸力学;电导率;同轴测试方法;TNT/RDX;反应区

**中图分类号:**TJ55; O389

**文献标识码:**A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.012

### 1 引言

传统 ZND 模型认为爆轰波是一种后面带有高速化学反应区的强冲击波,它由前沿预压冲击波和爆轰反应区构成,反应末端对应为 CJ 点的状态<sup>[1]</sup>。在反应区内,存在大量具有导电性的中间反应产物;而在反应区以外,化学反应基本结束,中间产物很少,基本不具备导电性。因此若能准确测量爆轰过程中随时间变化的电导率,就可以从中得出化学反应时间和反应区厚度。目前普遍采用的测试方法主要有:电接触技术、非接触电磁法、磁流体力学方法、分离电极技术和波阵面上超高频辐射光谱反射法等,其中应用最多的电接触技术主要包括同轴测试方法和平面测试方法<sup>[2-3]</sup>。

同轴测试方法结构简单,所测爆轰反应区结构稳定,在几微妙时间内爆轰波及产物对电极的机械破坏作用较小,环形电极外侧其它信号的干扰较小,电极与电缆线安装接线方便,且接线电缆易受保护。但其爆轰波阵面后产物的旁路电阻效应、附加电感造成电流在并联回路中重新分配的时间延迟、侧面卸载导致压力下降、炸药和电极之间的接触电阻、以及中心铜电极对爆轰波的反射作用等<sup>[4]</sup>对电导率测试结果有较大影响,使同轴测试电导率的精度不高。而平面测试方法具有电流系统更接近于一维、分流电路中的附加电

感较小、测试区域中的接触阻抗效果被抑制、爆轰过程不会造成测试回路变形等优点。但由于依靠冲击波起爆,其爆轰成长的稳定性和化学反应程度不宜保证,且爆轰波及产物会导致电极的变形和机械破坏,爆轰产物的状态又受到外界绝缘盒的影响,以及冲击波在电极中的反射作用等都会影响测试结果的精度。

文献[5]对原有同轴测试系统进行了改进,提高了测试信号的质量。但仍然存在旁路电阻效应,只能测量平均电导率,且精度不高。本文对其进行进一步了改进,使中心铜电极和环形电极的顶端平齐,消除了旁路电阻效应的影响,并推导出该方法的电导率计算公式。利用冲击波起爆压力不低于被测炸药爆压的方法减小了反应区内波的反射作用和爆轰成长过程的不稳定性。测量了铸装 TNT 和 TNT/RDX 混合炸药爆轰过程的电导率;通过对电导率曲线中拐点的分析,得出了其化学反应时间和反应区厚度。

### 2 实验模型及电导率计算

#### 2.1 改进同轴实验模型

本文设计的改进同轴实验原理图如图 1 所示,中心铜电极和环形电极的一侧端面相平,并与绝缘隔板紧密连接,外侧套以绝缘套管。炸药试件回路中串联匹配电阻  $R_s$ ,通过示波器记录炸药试件两端电压的变化  $V(t)$ 。在炸药未起爆前,恒定电流流过并联匹配电阻  $R_p$ ,并在炸药试件两端形成电压;当平面冲击波经过绝缘隔板衰减而进入炸药试件以后,炸药起爆并导通中心铜电极和环形电极,从而在炸药试件回路中形成电流,其爆轰过程如图 2 所示。

收稿日期:2008-10-23;修回日期:2009-02-10

作者简介:焦清介(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事军事化学与烟火技术相关研究。e-mail:jqj@bit.edu.cn

通讯联系人:金兆鑫(1982-),男,在读博士研究生,主要从事爆轰电效应研究。e-mail:jzx\_19821118@163.com;jzx0124@bit.edu.cn

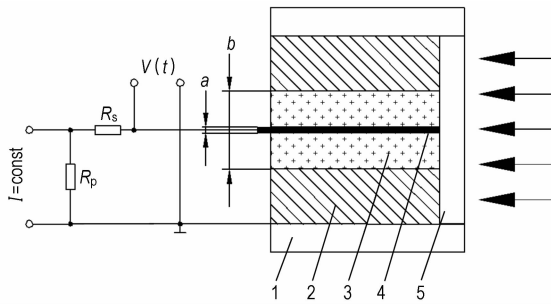


图 1 改进同轴实验方法原理图

1—绝缘套管, 2—环形电极, 3—炸药装药试件,  
4—中心铜电极, 5—绝缘隔板

Fig.1 Principle chart of improved coaxial measurement method

1—dielectric tube, 2—conductive cupreous tube,  
3—explosive sample, 4—cupreous pole, 5—dielectric cushion

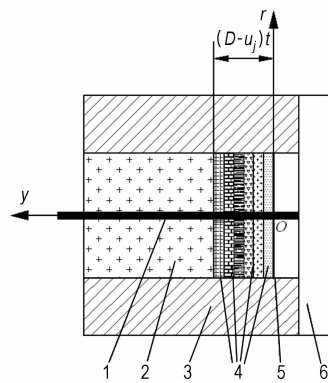


图 2 改进同轴实验方法爆轰过程简图

1—铜电极, 2—炸药装药试件, 3—铜管,  
4—爆轰过程的产物, 5—端面炸药产物面, 6—绝缘隔板

Fig.2 Detonation process of improved coaxial measurement method

1—cupreous pole, 2—explosive sample,  
3—cupreous tube, 4—detonation products,  
5—detonation products at  $y=0$ , 6—dielectric cushion

## 2.2 爆轰过程电导率计算

本计算方法基于以下几种假设:

(1) 装药均匀一致,任一轴向位置处的炸药爆轰反应历程均相同。

(2) 炸药被冲击起爆时,与隔板接触的端面炸药不存在爆轰成长过程,即达到正常爆轰。

(3) 环形电极的内径和壁厚值足够大,中心铜电极的直径足够小,不影响炸药的爆轰过程。

(4) 忽略隔板因冲击波极化而引起的旁路电阻效应。

(5) 反应区内的粒子速度取为反应结束面的粒子速度  $u_j$ 。

如图 2 所示,建立固连在右侧端面炸药产物面上的空间直角坐标系  $O_{yr}$ ,该坐标系随炸药产物面一起

运动,其速度也为  $u_j$ ;  $t$  时刻,速度为  $D$  的爆轰波达到轴向位置  $y$  可表示为:

$$y = (D - u_j)t \quad (1)$$

设右侧端面炸药的起爆瞬间为时间零点,其在爆轰过程中随时间变化的电导率为  $\sigma(0, t)$ ,其它轴向位置炸药在起爆之前电导率为 0。则对于分层有序进行的爆轰反应,爆轰过程中任意轴向位置处的炸药产物随时间变化的电导率可由  $\sigma(0, t)$  导出:

$$\sigma(y, t) = \begin{cases} 0 & \text{当 } t < (y/D - u_j) \text{ 时} \\ \sigma(0, t - y/(D - u_j)) & \text{当 } t \geq y/(D - u_j) \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

设中心铜电极和环形电极之间爆轰过程中的等效电导为  $G(t)$ ,其值即为所输入的脉冲电流与所测两极之间电压  $V(t)$  的比值。取某一轴向位置为  $y_0$  处的薄层炸药产物为研究对象,其厚度为  $dy$ ,如图 3 所示,其等效电导可表示为:

$$dG(y_0, t) = (dR(y_0, t))^{-1} = \left( \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{1}{\sigma(y_0, t)} \frac{dr}{2\pi r dy} \right)^{-1} = \frac{2\pi\sigma(0, t - y_0/(D - u_j))}{\ln(b/a)} dy \quad (3)$$

式中,  $a$  为中心铜电极直径;  $b$  为环形电极内径。则任意轴向位置处的炸药产物随时间变化的等效电导可表示为:

$$dG(y, t) = \frac{2\pi\sigma(0, t - y/(D - u_j))}{\ln(b/a)} dy \quad (4)$$

两极间随时间变化的总电导可表示为:

$$G(t) = \int_0^{(D-u_j)t} dG(y, t) = \frac{2\pi}{\ln(b/a)} \int_0^t \sigma(0, t) (D - u_j) dt \quad (5)$$

因而,右侧端面处炸药在爆轰过程中随时间变化的电导率可表示为:

$$\sigma(0, t) = \frac{\ln(b/a)f(x)}{2\pi(D - u_j)} \frac{dG(t)}{dt} \quad (6)$$

式中,  $f(x)$  为由于环形电极膨胀变形而引入的修正系数。将其带入公式(2)即可求出任意轴向位置处的炸药产物随时间变化的电导率。又由文献[6]中利用高速摄影技术对电导率的修正结果可知,在最初几微秒的时间内环形电极膨胀变形引起的修正系数  $f(x)$  对电导率结果影响较小,本文中忽略不计。

## 3 实验研究

### 3.1 实验装置及测试条件

实验装置如图 4 所示,包括采样速率不低于  $1 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$  的数字存储示波器(DSO)、脉冲恒流源(constant-current pulse source, CPS)、测试爆轰过程电导率的铸装炸药试件、传爆药柱、电雷管等。其导电回路的等效电路如图 5 所示,其中  $L_0$  和  $L_2$  为分布电感,由于

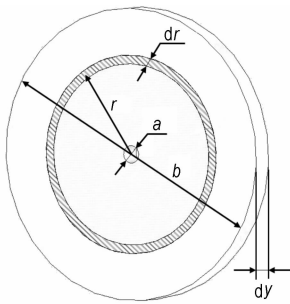


图3 某一轴向位置  $y_0$  的薄层炸药产物

Fig.3 Detonation products at the location of  $y_0$

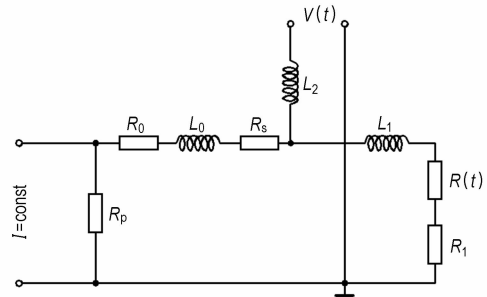


图5 爆轰过程电导率测试等效电路

Fig.5 Equivalent circuit for measuring electrical conductivity of detonation process

铜电极和电缆座之间相距很近,分布电感  $L_0$  和  $L_2$  可以忽略<sup>[7]</sup>;  $R_0$  为三通和连接导线的电阻,由于所测量的电压  $V(t)$  并未加在其两端,故其值的大小不影响测试结果;  $R_1$  和  $L_1$  分别为连入回路的中心铜电极及环形电极的电阻和电感;  $R(t)$  为所测炸药爆轰过程的电阻。脉冲恒流源输出电流为 9 A, 并联匹配电阻阻值为  $0.1 \Omega$ 。而串联匹配电阻阻值的选取必须考虑到电流在回路中重新分配的时间延迟,由文献[4]可知,延迟时间  $t \approx L/R$ , 其中  $L$  为回路的电感,  $R$  为回路的电阻。通过计算得出本实验的回路电感约为  $0.012 \mu\text{H}$ 。而引入串联匹配电阻  $R_s = 0.1 \Omega$  以后,回路的总电阻大于  $0.25 \Omega$ ,故电流重新分配的延迟时间  $t < 0.05 \mu\text{s}$ 。

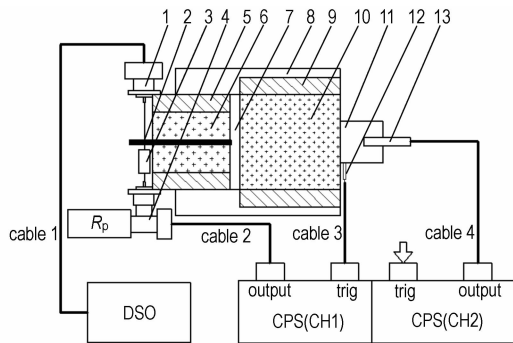


图4 爆轰过程电导率测试系统配置示意图

- 1—Q9 座, 2—中心铜电极, 3—串联匹配电阻  $R_s$ , 4—三通,
- 5—环形电极, 6—炸药试件, 7—有机玻璃隔板,
- 8—有机玻璃套管, 9—匹配铜管, 10—加载炸药,
- 11—传爆药柱, 12—触发探针, 13—8# 电雷管

Fig.4 Experimental set-up for measuring electrical conductivity of detonation process

- 1—Q9 seat, 2—cupreous pole, 3—matched resistance, 4—tee,
- 5—conductive cupreous tube, 6—explosive sample,
- 7—PMMA cushion, 8—PMMA tube, 9—matched cupreous tube,
- 10—loading explosive, 11—transmission explosive,
- 12—trigger probe, 13—8# primer

由于中心铜电极和环形电极的一侧端面平齐,且被测炸药由平面冲击波经绝缘隔板衰减冲击起爆,因而消除了最初爆轰波阵面后产物的旁路电阻效应和中心铜电极的反射作用对爆轰过程的影响;通过在炸药试件回路中串联匹配电阻  $R_s$ ,减小了电流在并联回路中重新分配的时间延迟;采用厚壁环形电极,并套以绝缘套管的方法,且环形电极也受到了冲击波的压缩作用,从而减小了侧面卸载导致的压力下降;环形电极和中心铜电极均用硝酸和硫酸清洗掉表面氧化层,并经过表面镀银处理,减小了炸药和电极之间的接触电阻对电导率测试造成的影响。

对于凝聚炸药的冲击波起爆,当输入的冲击波压力低于爆压时爆轰将不能在与隔板相接触的炸药界面发生,而移向被发炸药内部<sup>[8]</sup>。而对于如图4所示的测试系统,当冲击波通过有机玻璃隔板左右两个界面时都会发生波的反射和透射,并且冲击波在绝缘隔板中传播时会发生衰减。因此本文根据冲击波通过界面反射和透射后的压力计算公式<sup>[9]</sup>和冲击波在密实介质中的衰减方程<sup>[10]</sup>的相关计算,选取了合适的加载炸药及隔板厚度,使起爆被测炸药的冲击波压力不低于被测炸药自身的爆压,从而减小了反应区内波的反射作用和爆轰成长过程的不稳定性,使测量得出的炸药爆轰过程的电导率与稳定爆轰状态下的结果基本一致。

### 3.2 实验结果

分别对铸装 TNT 及几种不同配比的铸装 TNT/RDX 炸药进行了爆轰过程的电导率实验测量。所测得的电压信号实验结果如图6所示,从图6中可以看出,当加载炸药的冲击波到达有机玻璃隔板以前,电压处于稳定状态;当冲击波进入隔板以后,出现了电压信号的波动,这可能是由于有机玻璃在强冲击波作用下极化产生电压造成的;炸药起爆后,由于爆轰反应区内的物质具有高电导率,电压迅速降低,而后处于缓慢减小的状态。

由于爆轰过程中高电导率主要存在于紧邻爆轰波阵面的狭窄区域内<sup>[2]</sup>,因此认为电压迅速降低的初始时刻为炸药爆轰并开始导电的时刻,即为图 6 中的时间零点。而由于电压信号存在噪声干扰,使用数据分析软件 Origin 所附带的快速傅立叶变换滤波器平滑方法对其进行必要的平滑处理,得到曲线如图 7 所示。经计算得到与隔板接触的端面炸药在爆轰过程中的电导率变化曲线如图 8 所示,其它情况类似从略。

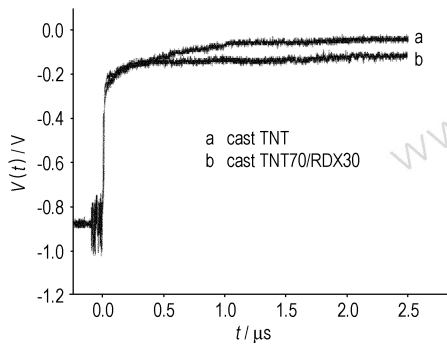


图 6 实验所得电压信号

Fig. 6 Experimental voltage signals

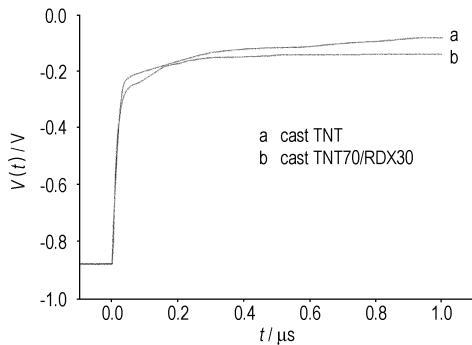


图 7 平滑后的电压信号

Fig. 7 Smoothed voltage signals

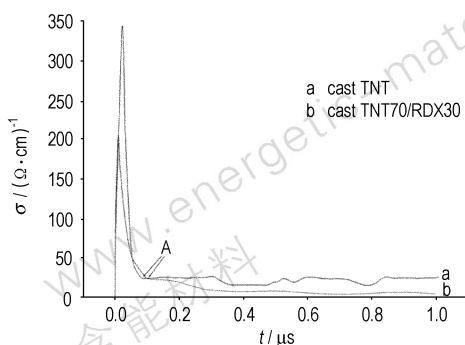


图 8 炸药爆轰过程的电导率曲线

Fig. 8 Electrical conductivity curves of detonation process

对于爆轰反应主要在 C-J 面内进行的 TNT/RDX 炸药,爆轰反应区内物质的空间结构有明显的区别。反应区内的化学反应程度不同,则电导率明显不同;而反应

区外爆轰产物处于等熵膨胀过程中,其电导率很小。因此可认为图 8 中电导率变化的拐点 A 即为炸药爆轰的 C-J 点,对应的时间为化学反应时间  $\tau$ 。表 1 中列出了几种炸药爆轰过程的最大电导率  $\sigma_{max}$  和  $\tau$  的实验值与文献中用平面测试方法得到的实验值。由于不同方法的测试条件存在明显差异,且电导率是通过微分计算得出的结果,对电压的变化非常敏感<sup>[11]</sup>,故表 1 中所得电导率结果表明,实验重复性相当好,即本测试方法可用于测量炸药爆轰过程的电导率。另外,随着 RDX 含量的增加,TNT/RDX 的最大电导率逐渐降低,这说明 RDX 的增加,使得反应区内导电相的自由碳减少,而生成非导电相的金刚石,使其爆轰过程的电导率下降<sup>[12]</sup>。

根据炸药的化学反应时间  $\tau$ ,利用公式(7)即可推算出其反应区厚度  $x_e$ ,其计算值与文献中实验值的对比结果如表 2 所示。从表中可以看出,铸装 TNT 的反应区厚度与文献[13]吻合较好,铸装 TNT/RDX 比同类压装炸药的反应区厚度略小,且随着 RDX 含量的增加,铸装 TNT/RDX 的反应区厚度略有增加。

$$x_e = (D - u_j)\tau \quad (7)$$

表 1 TNT 和 TNT/RDX 炸药爆轰过程的电导率

Table 1 Electrical conductivity of detonation process for TNT and TNT/RDX

explosive	No.	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$\sigma_{max}/\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$	$\tau/\mu s$
TNT (cast)	1 <sup>#</sup>	1.618	344	0.08
TNT (cast)	2 <sup>#</sup>	1.620	332	0.08
TNT (pressed)	Ref. [2]	1.634	310	0.11
TNT (cast)	Ref. [11]		280	~0.10
TNT 90/RDX 10 (cast)	3 <sup>#</sup>	1.633	288	0.08
TNT 80/RDX 20 (cast)	4 <sup>#</sup>	1.645	232	0.09
TNT 70/RDX 30 (cast)	5 <sup>#</sup>	1.655	216	0.10
TNT 60/RDX 40 (cast)	6 <sup>#</sup>	1.669	201	0.10
TNT 35/RDX 65 (cast)	Ref. [2]	1.714	190	

表 2 TNT 和 TNT/RDX 炸药的反应区厚度

Table 2 Reaction zone widths of TNT and TNT/RDX

explosive	No.	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$x_e/mm$
TNT (cast)	1 <sup>#</sup>	1.618	0.41
TNT (cast)	2 <sup>#</sup>	1.620	0.41
TNT (cast)	Ref. [13]	1.615	0.42
TNT (pressed)	Ref. [14]	1.620	0.60
TNT (pressed)	Ref. [2]	1.630	0.60
TNT90/RDX10 (cast)	3 <sup>#</sup>	1.633	0.42
TNT 80/RDX 20 (cast)	4 <sup>#</sup>	1.645	0.48
TNT 70/RDX 30 (cast)	5 <sup>#</sup>	1.655	0.55
TNT 60/RDX 40 (cast)	6 <sup>#</sup>	1.669	0.57
TNT 60/RDX 40 (pressed)	Ref. [8]	1.690	0.70

## 4 结论

本文对同轴测试方法进行了改进,减小了旁路电阻效应等因素对测试结果的影响,提高了测试精度。铸装 TNT 和几种 TNT/RDX 混合炸药电导率的实验结果表明,其最大电导率出现在反应区中的爆轰波阵面附近,且其值随着 RDX 含量的增加而逐渐降低。通过对电导率变化曲线中拐点的分析,得到铸装 TNT 炸药的化学反应时间约为  $0.08 \mu\text{s}$ ,其反应区厚度约为  $0.41 \text{ mm}$ ; 几种铸装 TNT/RDX 炸药的反应区厚度均在  $0.5 \text{ mm}$  附近。

### 参考文献:

- [1] 陈朗,龙新平,冯长根,等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京:国防工业出版社,2004: 18-19.
- [2] 蒋治海. 凝聚炸药起爆过程的电导率研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2006.
- [3] Gilev S D, Anisichkin V F. Interaction of aluminum with detonation products[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2006, 42(1): 107-115.
- [4] Gilev S D, Trubachev A M. Detonation properties and electrical conductivity of explosive-metal additive mixtures[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2002, 38(2): 219-234.
- [5] 金兆鑫,焦清介,陈曦,等. 含 TNT 注装混合炸药爆轰产物电导率实验研究[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 420-423.  
JIN Zhao-xin, JIAO Qing-jie, CHEN Xi, et al. Electrical conductivity for the detonation products of some explosives with cast TNT[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(4): 420-423.
- [6] 宋春芳. 燃烧与爆轰产物导电特性的研究[D]. 北京:北京理工大学,2006.
- [7] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006: 194-196.
- [8] 张宝钺,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社, 2001: 228-230, 152.
- [9] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2002: 325.
- [10] 王海福,冯顺山. 密实介质中冲击波衰减特性的近似计算[J]. 兵工学报, 1996, 17(1): 79-81.  
WANG Hai-fu, FENG Shun-shan. An approximate theoretical model for the attenuation of shock pressure in solid materials[J]. *Acta Armamentarii*, 1996, 17(1): 79-81.
- [11] Gilev S D, Trubachev A M. Study of physical-chemical transformations in detonation wave by the electric conductivity method[C] // Proc. 12th Symposium (International) on Detonation, 2002: 240-248.
- [12] 周霖,廖英强,徐更光. 爆轰产物导电性的实验测量[J]. 含能材料, 2005, 13(3): 148-149.  
ZHOU Lin, LIAO Ying-qiang, XU Geng-guang. Experimental measurement of conductivity for the detonation product[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3): 148-149.
- [13] Cooper P W. Explosives engineering[M]. New York: Wiley-Vch, 1997: 275-277.
- [14] Stesik L N, Akimova L N. An indirect method of estimating the reaction zone width of a detonation wave[J]. *Russ J Phys Chem*, 1959, 33: 148-151.

## Electrical Conductivity and Reaction Zone Width Measurement of Detonation Process for Cast TNT/RDX Compositions

JIAO Qing-jie, JIN Zhao-xin, XU Xin-chun

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The coaxial measurement of electrical conductivity was improved by using shock initiation method, and the conductivity formula was derived. The suitable shock wave pressure was input to limit the shock wave reverberation in reaction zone and instability in detonation growth. And the conductivity curves of cast TNT and TNT/RDX compositions were studied. The chemical reaction times and the reaction zone widths were acquired by analyzing the inflexions in curves. Results show that the maximal conductivity decreases with the increasing of RDX in cast TNT/RDX compositions. The reaction time of cast TNT is about  $0.08 \mu\text{s}$ , and the reaction zone widths of cast TNT and several TNT/RDX compositions are about  $0.4 \text{ mm}$  and  $0.5 \text{ mm}$  respectively.

**Key words:** explosion mechanics; electrical conductivity; coaxial measurement method; TNT/RDX; reaction zone