

文章编号: 1006-9941(2008)04-0420-04

含 TNT 注装混合炸药爆轰产物电导率实验研究

金兆鑫¹, 焦清介¹, 陈 曦², 曾 亮¹

(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. 中国北方工业公司研究发展部, 北京 100053)

摘要: 改进了炸药爆轰产物电导率的同轴测试系统, 测量了 TNT 注装炸药中加入 RDX、Al、KCl 等药剂后爆轰产物的平均电导率, 得出了不同 RDX 含量的 TNT/RDX 炸药平均电导率最大值变化曲线。结果表明: TNT 中加入 RDX 后会减少其爆轰产物的电导率, 而加入 Al 后 TNT 炸药爆轰产物的电导率明显高于不含 Al 炸药, 加入 5% Al 粉平均电导率最大值即可增大 4 倍以上。另外, 加入 KCl 也会增大 TNT/RDX 混合炸药的电导率。

关键词: 爆炸力学; 电导率; 爆轰产物; 同轴测试方法; TNT/RDX

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引 言

凝聚炸药爆轰反应机理是爆轰物理学研究的一个重要内容, 而研究炸药爆轰波后爆轰产物的电导率, 不仅能够扩展炸药反应机理领域新的研究内容, 而且为炸药化学能转化电能的研究和应用提供了科学基础^[1]。电导率测量技术是爆轰研究中的一项重要技术, 它为爆轰物理和爆炸化学提出了新的研究途径。运用电导率测试方法研究爆轰过程中的物理-化学转变, 具有灵敏度高、时间精度高、获得的数据可用于物质相态和传导相空间结构研究, 并能对快速化学反应进行诊断等优点^[2]。国外对凝聚炸药爆轰产物电导率的研究有近五十年的历史^[3-6], 但国内在这方面的研究相对较少。目前, 用于研究炸药爆轰产物电导率的测试方法主要有: 电接触技术、非接触电磁法、磁流体学(MHD)方法、分离电极技术和波阵面上超高频辐射光谱反射法, 而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^[7]。其中平面测试方法主要测量炸药冲击起爆初期爆轰产物的电导率, 同轴测试方法主要测量炸药稳定爆轰时爆轰产物的电导率。本研究对已有的同轴测试系统^[8]进行了改进, 测量了不同组分和配比的几种含 TNT 的注装混合炸药电导率, 初步得到了不同 RDX 含量的 TNT/RDX 混合炸药电导率变化规律, 以及 Al 和 KCl 等添加剂对含 TNT 的混合炸药电导率的影响, 并分析了这种变化产生的原因。

2 同轴测试方法

2.1 实验原理

图 1 为测试爆轰产物电导率原理图^[8]。其中铜管(环形电极)的内径和壁厚值较大, 而中心铜电极的直径较小, 因而其对炸药爆轰波形状及波后压力、温度等的影响较小, 本实验中忽略不计。当爆轰波达到铜电极顶端时, 铜电极与铜管通过爆轰产物开始导电; t 时刻, 速度为 D 的爆轰波达到 x 位置, $x = Dt$, 铜电极与铜管之间的爆轰产物电阻为 $R(t)$, 其值为所测铜电极和铜管之间电压 $V(t)$ 与所输入的脉冲恒流的比值。根据欧姆定律, 该爆轰产物的电导率 $\sigma(t)$ 可表示为^[9]:

$$\sigma(t) = \frac{\ln(b/a)f(x)}{2\pi D} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R(t)} \right) \quad (1)$$

式中, a 为铜电极直径, b 为铜管内径, $f(x)$ 为由于爆轰产物飞散, 铜管发生膨胀变形而进行修正所得修正系数。

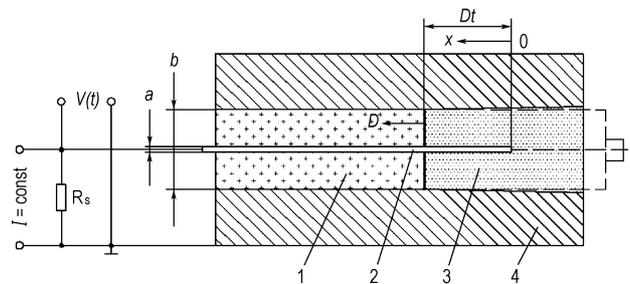


图 1 爆轰产物电导率测试原理图

1—炸药装药试件, 2—铜电极, 3—爆轰产物, 4—铜管

Fig. 1 The principle of measurement

1—explosive sample, 2—cupreous pole,
3—detonation products, 4—cupreous tube

收稿日期: 2008-01-28; 修回日期: 2008-06-23

作者简介: 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: jzx0124@bit.edu.cn

从公式(1)可以看出,电导率 $\sigma(t)$ 与电阻 $R(t)$ 随时间的变化率密切相关,即受所测电压随时间变化率的影响较大,而铜电极顶部方向爆轰产物的旁路电阻效应、外界的干扰及爆轰产物中电导率的不均匀性都会造成电压信号出现波动,故所得电导率值的精度较低。因此这里引入平均电导率 $\bar{\sigma}_{(0-t)}$, 见式(2)。即为爆轰波传过铜电极顶端以后,包含爆轰波阵面在内的 Dt 区间内所有爆轰产物电导率的平均值。这样可以相对减小干扰因素对计算结果的影响。另外,由文献[10]中利用高速摄影技术对电导率的修正结果可知,在几微秒的时间内铜管膨胀变形引起的修正系数 $f(x)$ 对电导率的计算结果影响较小,因而忽略不计。最终利用下式可求出爆轰产物的平均电导率 $\bar{\sigma}_{(0-t)}$ 。

$$\bar{\sigma}_{0-t} = \frac{\ln(b/a)}{2\pi DtR(t)} \quad (2)$$

2.2 实验装置及测试条件

实验装置如图 2 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)、测试爆轰产物电导率的注装炸药试件、三通、Q9 座、 0.033Ω 匹配电阻 R_s 、触发探针、同轴电缆和电雷管等。其等效电路如图 3 所示。其中 L_0 和 L_1 为分布电感,由于铜电极和电缆座之间相距很近,分布电感 L_0 和 L_1 可以忽略^[8]。 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 为连入回路的铜电极和铜管等的电阻之和。

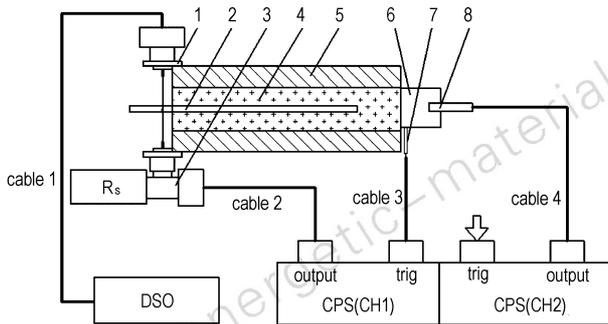


图 2 爆轰产物电导率测试系统配置示意图

1—Q9 座, 2—铜电极, 3—三通, 4—注装炸药, 5—铜管, 6—传爆药柱, 7—触发探针, 8—8# 电雷管

Fig. 2 Sketch of measurement

1—Q9 seat, 2—cupreous pole, 3—tee, 4—cast explosive, 5—cupreous tube, 6—transmission explosive,

7—trigger probe, 8—8# primer

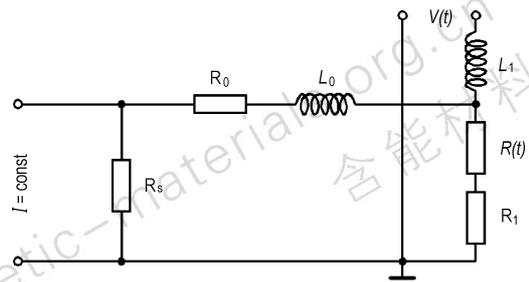


图 3 爆轰产物电导率测试等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of measurement

3 实验结果与分析

所测得的电压信号实验结果如图 4 和图 6 所示,其中点 A 对应的时刻为铜电极和铜管之间开始导电的时刻 t_0 。相应的炸药爆轰产物平均电导率变化曲线如图 5 和图 7 所示,其时间零点分别对应图 4 和图 6 中的 t_0 时刻,其它图类似从略。又由公式(2)可知,本文计算得出的电导率均为爆轰波后 Dt 区间内爆轰产物的平均电导率,从图 5 和图 7 中可以看出,该平均电导率在点 B 处出现明显的峰值,称之为平均电导率最大值,记为 $\bar{\sigma}_{\max}$,其出现的时刻记为 t_{\max} 。

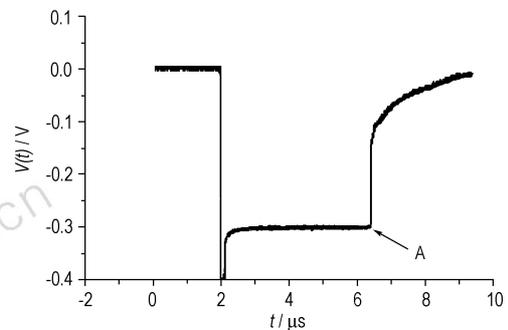


图 4 TNT 80/RDX 20 的电压信号

Fig. 4 Voltage signal of TNT 80/RDX 20

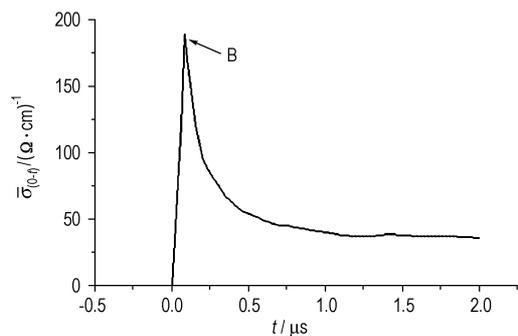


图 5 TNT 80/RDX 20 的平均电导率变化曲线

Fig. 5 Average electrical conductivity of TNT 80/RDX 20

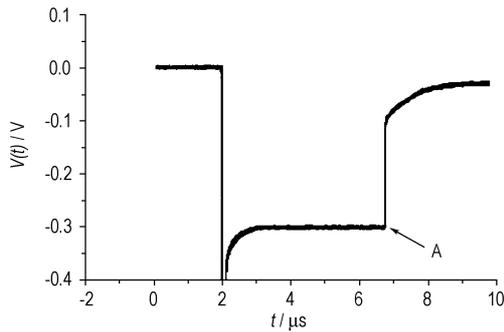


图6 TNT 85/RDX 15 的电压信号

Fig. 6 Voltage signal of TNT 85/RDX 15

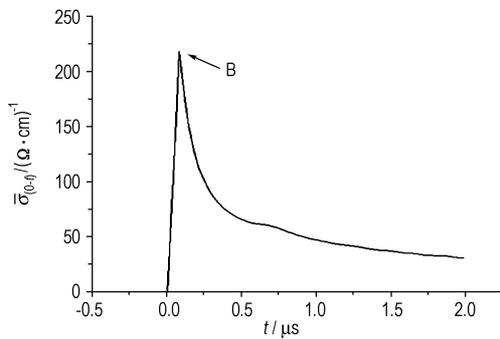


图7 TNT 85/RDX 15 的平均电导率变化曲线

Fig. 7 Average electrical conductivity of TNT 85/RDX 15

表1列出了根据实验结果计算得到的不同组分和配比下,炸药爆轰产物平均电导率最大值 $\bar{\sigma}_{\max}$ 及出现的时刻 t_{\max} 。另外,不同RDX含量 α 的TNT/RDX混合炸药 $\bar{\sigma}_{\max}$ 值变化曲线如图8所示。

对于化学反应主要在C-J面内进行的混合炸药来说,在 $0-t_{\max}$ 时间内,平均电导率逐渐增大至最大值,这说明在此区间内化学反应形成的中间产物中导电物质的浓度较高。如图9所示同轴测试方法爆轰反应过程中,假设炸药的化学反应是分层有序进行的,不同层的化学反应程度不同,即电导率不同,且对于单层炸药的整个化学反应过程来说,电导率总是先增大后减小,而铜电极顶部方向爆轰产物的旁路电导从 t_0 时刻以后是逐渐减小的,则最大电导率出现的时间应落在 $0-t_{\max}$ 区间内,若忽略旁路电导的影响^[8],则爆轰产物电导率的最大值应大于 $\bar{\sigma}_{\max}$ 。 t_{\max} 时刻以后,平均电导率逐渐下降,这主要是由于爆轰产物的扩散等作用造成的,该区间内平均电导率值的意义不大。

对于TNT及TNT/RDX混合炸药,化学反应区中释放出的自由碳是爆轰产物具有高电导率的主要原因^[5]。随着RDX的含量的增加,混合炸药的 $\bar{\sigma}_{\max}$ 值明显减小。这说明RDX的加入,使得导电相的自由碳减

少,而生成非导电相的金刚石,从而使得其爆轰产物电导率下降。

表1 几种含TNT混合炸药爆轰产物的平均电导率最大值
Table 1 Maximal average electrical conductivity of detonation product for some explosives with cast TNT

No.	explosive	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\bar{\sigma}_{\max}/\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	$t_{\max}/\mu\text{s}$
1	TNT	1.618	320	0.07
2	TNT 85/RDX 15	1.634	240	0.07
3	TNT 80/RDX 20	1.641	189	0.07
4	TNT 70/RDX 30	1.652	177	0.07
5	TNT 60/RDX 40	1.660	123	0.08
6	TNT 50/RDX 50	1.685	87	0.08
7	TNT 95/Al 5	1.662	1340	0.80
8	TNT 45/RDX 45/KCl 10	1.692	107	0.08
9	TNT 40/RDX 40/KCl 20	1.727	147	0.08

Note: Size of particles: RDX ($<300 \mu\text{m}$), Al ($<75 \mu\text{m}$).

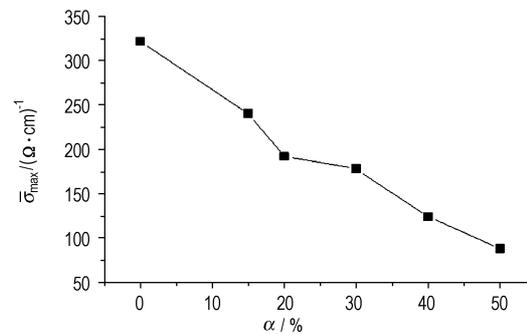


图8 不同RDX含量的TNT/RDX混合炸药平均电导率最大值

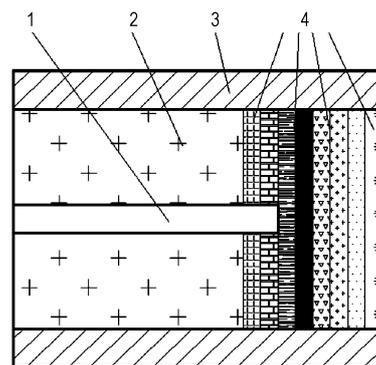
Fig. 8 The maximal average electrical conductivity vs RDX fraction α in cast TNT/RDX compositions

图9 同轴测试方法爆轰过程简图

1—铜电极, 2—炸药装药试件, 3—铜管, 4—爆轰产物

Fig. 9 Detonation process of the coaxial measurement

1—cupreous pole, 2—explosive sample, 3—cupreous tube, 4—detonation products

对于加入Al粉的TNT炸药,由于反应中爆温的增加和Al的电离,电子浓度明显增加,爆轰产物处于

一种低温等离子体的状态,爆轰产物具有很高的电导率。又其 t_{\max} 值明显大于 TNT 炸药,说明 Al 参与反应主要是在 C-J 面之后,爆轰产物膨胀时才开始并逐渐完成的,这符合含铝炸药二次反应理论^[7]。

对于加入 KCl 的 TNT/RDX 混合炸药, $\bar{\sigma}_{\max}$ 值有所增大, t_{\max} 值没有显著变化,这说明其高电导率的主要影响因素仍然是导电相自由碳的释放,而高温下 KCl 的电离作用是造成其电导率增大的主要原因。

4 结 论

与平面测试方法不同,同轴测试方法主要测量炸药稳定爆轰时爆轰产物的电导率。由于现有同轴测试方法的中心铜电极顶端爆轰产物的旁路电阻效应,所以测量结果精度仍然不高,但引入平均电导率对不同组分和配比的炸药爆轰过程进行分析,仍然可以得出一些有益的结论。TNT/RDX 混合炸药的电导率最大值随 RDX 含量的增加明显减小,这说明 RDX 的加入会减少导电相自由碳的释放,而生成了非导电相的金刚石。加入 Al 会使 TNT 炸药的电导率明显增大,加入 5% Al 粉平均电导率即可增大最大值 4 倍以上。另外,加入 KCl, TNT/RDX 混合炸药电导率也可以增大。

本实验对原有爆轰产物电导率同轴测试系统^[8]进行了改进,简化了测试回路,减小了三通等器件对测试结果的影响,提高了测试信号的质量。以后的研究将进一步考虑使用薄壁铜管,并使其顶端和铜电极顶端平齐,再在外部套以绝缘管的设计方法,从而尽量减小爆轰产物旁路电阻的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 蒋治海,龙新平,何碧,等. TNT 和 RHT-906 炸药起爆过程的电导率研究[J]. 含能材料,2007,15(2): 169-171.
JIANG Zhi-hai, LONG Xin-ping, HE Bi, et al. Electrical conductivity of TNT and RHT-906 explosives in initiation process[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 169-171.
- [3] Brish A A, Tarasov M S, Tsukerman V A. Electrical conductivity of explosion products of condensed explosives[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1959, 37(6): 1543-1549.
- [4] Hayes B. On the electrical conductivity in detonation products[C] // In Proc. 4th Symposium (International) on Detonation, Office of Naval Research, ACR-126; Washington, 1967: 595-601.
- [5] Gilev S D, Trubachev A M. Study of physical-chemical transformations in detonation wave by the electric conductivity method[C] // In Proc. 12th Symposium (International) on Detonation, 2002: 240-248.
- [6] Gorshkov M M, Grebenkin K F, Zherebtsov A L, et al. Kinetics of electrical conductivity of TATB detonation products as an indicator of growth of carbon nanoparticles[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, 43(1): 78-83.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Gilev S D, Trubachev A M. Reaction zone in detonations of dense explosives [C] // Proc. 12th Symposium (International) on Detonation, 2002.
- [10] 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.

Electrical Conductivity for the Detonation Products of Some Explosives with Cast TNT

JIN Zhao-xin¹, JIAO Qing-jie¹, CHEN Xi², ZENG Liang¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Research & Development Department, China North Industries Corp., Beijing 100053, China)

Abstract: The coaxial measurement system of electrical conductivity for the detonation products was improved. The average electrical conductivities of cast TNT mixed with RDX, Al, KCl were studied, and the curves of maximal average electrical conductivity vs RDX fraction α in cast TNT/RDX compositions were obtained. Results show that the maximal average electrical conductivity decreases with the increasing of RDX fraction α in cast TNT/RDX compositions. The electrical conductivity of aluminized TNT is obviously higher than that of TNT, and the maximal average electrical conductivity of TNT 95/Al 5 (density $1.662 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) is over 4 times of cast TNT (density $1.618 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Also the electrical conductivity of TNT/RDX increases when KCl is mixed in TNT/RDX compositions.

Key words: explosion mechanics; electrical conductivity; detonation product; scheme of coaxial measurement; TNT/RDX