

文章编号: 1006-9941(2007)02-0165-04

高量程压力传感器在含能材料燃烧转爆轰实验中的应用

文尚刚¹, 龚晏青¹, 董树南², 王世英², 汤世友³

(1. 中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065;

3. 四川省绵阳市奇石缘科技有限公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 在三种不同的含能材料(JO-9159、B 炸药和某推进剂)燃烧转爆轰实验中,使用高量程 Y-YD-1254 型压电式压力传感器对燃烧转爆轰(DDT)实验中管内不同位置处的压力进行测量。实验结果表明,这种压力传感器测量的压力幅度可以从几个兆帕到十个吉帕,适用于测量固体炸药或推进剂在燃烧转爆轰过程中不同位置处的压力变化,尤其适用于测量燃烧过程中的压力变化。

关键词: 爆炸力学; 压力传感器; 含能材料; 燃烧转爆轰; 压力

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引言

在含能材料的燃烧转爆轰过程中,不同位置处的压力不同,其变化范围可以从数兆帕到数十吉帕,但一般的压电传感器测量的最高压力仅为几百兆帕,很难达到上千兆帕;一些压阻型压力传感器(如锰铜压力计),虽可以测量较高压力,但很难用在压力变化幅度较大的 DDT 实验中。因此,压力传感器在含能材料的燃烧转爆轰实验测试中一直未能得到广泛应用。McAfee^[1]在研究颗粒状 HMX 炸药燃烧转爆轰实验用锰铜压力计测量点火室附近的压力,最高压力不到 200 MPa;郝新红^[2]在研究烟火药燃烧转爆轰实验用压电传感器测量 DDT 管内某一位置处的压力变化,测量的压力更低,最高压力不到 80 MPa。

近几年来,我们与某传感器厂家合作,研制出高量程的 Y-YD-1254 型压电压力传感器,将其用于 JO-9159、B 炸药和某推进剂三种固体含能材料 DDT 过程中的压力测试,经过多次尝试,基本获得成功。

2 压力传感器简介

Y-YD-1254 型压力传感器是一次性使用的超高压动态压力传感器,该传感器量程为 0~10 GPa,具有量程大、精度高、响应速度快、稳定性好等特点,主要用于

爆炸物理试验。其主要参数见表 1,传感器如图 1 所示。其工作原理是在较高压力作用下,压电器件(石英晶体或 PVDF 膜)将释放电荷,再通过电荷放大器将电荷放大为一定幅度的电压信号,最后通过示波器将对应的电压波形记录下来。值得指出的是该传感器具有一定的过载能力,能测量超过 10 GPa 的压力,但此时的压力值与灵敏度系数之间不具有线性关系,由给定的灵敏度计算压力值将有较大的误差。

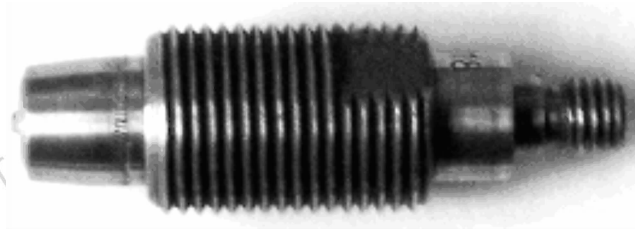


图 1 Y-YD-1254 型压力传感器

Fig. 1 Photograph of pressure gauge

表 1 Y-YD-1254 型压力传感器的主要参数

Table 1 Main parameters of Y-YD-1254 pressure gauge

pressure range/GPa	0 ~ 10
sensitivity/pC · MPa ⁻¹	~ 4
nonlinearity/%	≤ 0.8
inherent frequency/kHz	≥ 150
rise time/μs	≤ 2
shock limit/g	≤ 2000
temperature range/°C	- 25 ~ 150

3 实验测试

用这种型号的传感器分别对 JO-9159 炸药、混合 B 炸药及某推进剂三种含能材料燃烧转爆轰实验进行

收稿日期: 2006-05-30; 修回日期: 2006-09-01

基金项目: 西安近代化学研究所火炸药燃烧国防科技重点实验室基金(51455040104ZW0101); 中国工程物理研究院 42105 基金(4210501)

作者简介: 文尚刚(1968-), 博士, 副研究员, 主要从事爆轰物理研究。

e-mail: wensg@21cn.com

了压力测试,共进行了燃烧转爆轰实验 10 多发。现将其中一些典型的实验结果进行介绍,在这些实验中同时还采用了其它测试技术(如探针技术等),本文的重点只是介绍压力测试技术,对其它的测试内容及结果将另文讨论。

3.1 JO-9159 炸药的 DDT 实验

JO-9159 炸药的 DDT 管中压力测试试验装置如图 2 所示。材料为 45 号钢的 DDT 管内径为 20 mm、外径为 60 mm、长度为 150 mm,管内装入 6 块 $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 、密度为 $1.840 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 JO-9159 炸药,点火方式采用电点火头 + 小粒黑黑火药,其中小粒黑的质量为 1.3 g; 压力传感器为 Y-YD-1254 型 PVDF 传感器与石英传感器,其中 PVDF 传感器安装在距点火端 120 mm 处的 DDT 管壁上,而石英传感器则安装在下固定座上(即 DDT 管尾部),距点火端为 150 mm。这两只传感器用来测量 DDT 管内不同位置处的压力变化。记录压力信号的测试仪器为 SK2000T 程控电荷放大器与泰克 5054 示波器。

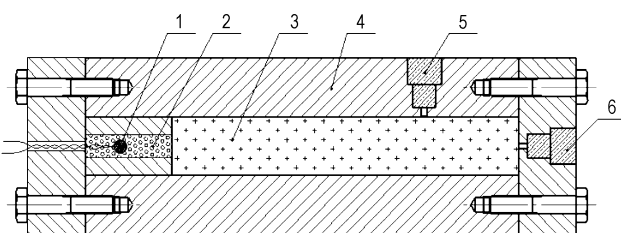


图 2 测量 DDT 管中压力实验装置示意图

1—点火头, 2—小粒黑, 3—JO-9159 炸药, 4—DDT 管,
5—PVDF 压力传感器, 6—石英压力传感器

Fig. 2 Schematic of DDT experiment set-up

1—igniter, 2—black power, 3—JO-9159 explosive,
4—DDT tube, 5—PVDF pressure gauge, 6—quartz pressure gauge

共进行了两发试验, PVDF 压力传感器测得的典型压力曲线如图 3 所示, 石英压力传感器测得的典型压力曲线如图 4 所示。这些压力曲线表明, 在压力传感器所处位置的 JO-9159 炸药发生了非常强的反应, 压力出现了强间断, 在炸药中已形成了强冲击波, 并且 DDT 管内压力随着与点火药的距离增大而增大(压力峰值由点火处不到 1 GPa 增加到 DDT 管尾部近 10 GPa), 在反应即将完成之际, 反应已接近爆燃或爆轰。这表明这两种压电式压力传感器都可以较好地记录 DDT 管中的压力变化历程。由于 PVDF 传感器加工比较复杂及其它原因, 后来的试验均采用了石英压力传感器。

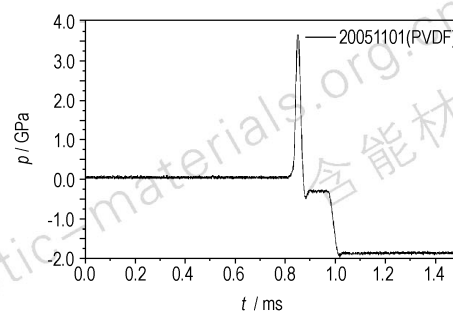


图 3 PVDF 压力计测得的压力曲线

Fig. 3 Pressure curve measured by PVDF gauge

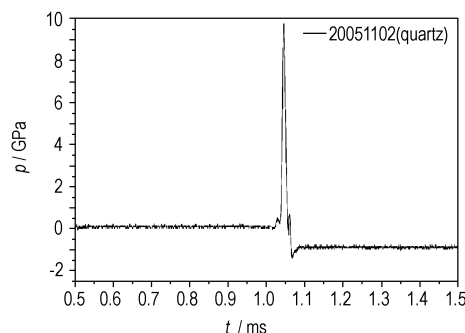


图 4 石英压力计测得的压力曲线

Fig. 4 Pressure curve measured by quartz gauge

3.2 B 炸药的 DDT 实验

在内径为 20 mm, 外径为 64 mm, 长度为 500 mm 的 DDT 管(材料为 45 号钢)内装入长度约为 450 mm, 外径为 20 mm 的 B 炸药(由 20 多块药柱组成), 点火方式仍采用电点火头 + 小粒黑黑火药, 其中小粒黑的质量为 1.1 g。两只石英压力传感器到点火药末端距离分别为 40 mm 与 430 mm。实验装置如图 5 所示。用 SK2000T 程控电荷放大器、TDS544 数字示波器及石英压力传感器记录 DDT 管两个不同位置处的压力历程。

实验所用 B 炸药的密度分别为 $1.597 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.681 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 两种密度的 B 炸药各作两发实验。其中密度为 $1.597 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 B 炸药的压力曲线如图 6 所示。距离点火药 40 mm 处的传感器(见图 6a)测得的压力峰值为 1.23 GPa, 在此处的压力逐渐上升, 并且压力变化幅度不大, 表明此处的炸药是处于低速燃烧阶段。距离点火药 430 mm 处的传感器(见图 6b)测得的压力峰值为 22.3 GPa(此值只是一个参考值, 是按给定的灵敏度计算, 且信号幅度超过了示波器设置的量程, 实际压力值应大于 22.3 GPa), 表明此处的炸药已经发生了爆轰。由此可见, 在这发试验中, 在 DDT 管内随着距离的增加, 压力逐渐增加, 反应逐渐加强, 直至炸药发生爆轰。此发实验中 B 炸药形成了

燃烧转爆轰现象。另一发相同密度的 B 炸药也得到类似的实验结果,也形成了燃烧转爆轰现象。

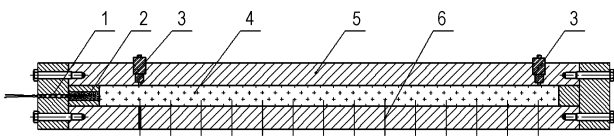
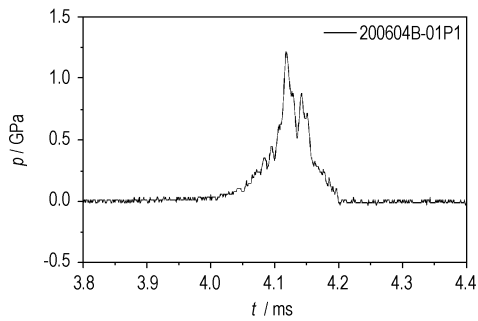


图 5 B 炸药的 DDT 实验装置示意图

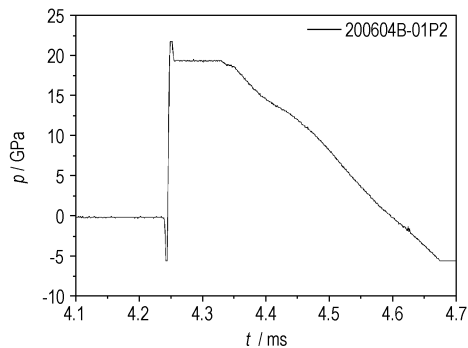
1—点火头, 2—小粒黑, 3—石英压力传感器,
4—B 炸药, 5—DDT 管, 6—电探针

Fig. 5 Experimental set-up for Composition B

1—igniter, 2—black power, 3—quartz pressure gauge,
4—Composition B, 5—DDT tube, 6—electrical pin



(a) $d = 40 \text{ mm}$



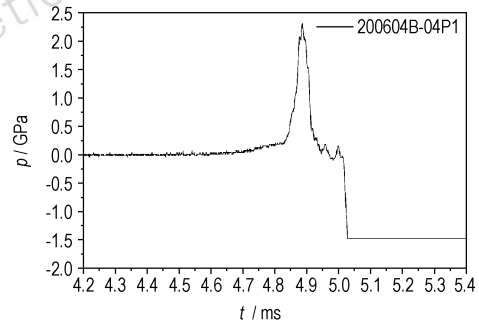
(b) $d = 430 \text{ mm}$

图 6 密度为 $1.597 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 B 炸药不同位置处压力曲线

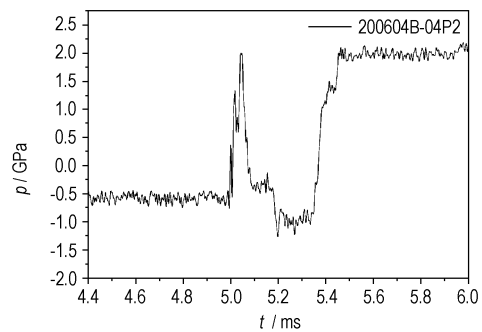
Fig. 6 Pressure curves at different position for composition B with density of $1.597 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

密度为 $1.681 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 B 炸药的压力曲线如图 7 所示。距离点火药 40 mm 处的压力峰值为 2.311 GPa, 此处的炸药是处于低速燃烧阶段。距离点火药 430 mm 处的压力峰值为 2.332 GPa, 此处的炸药也是处于低速燃烧阶段。前后两处的压力基本接近, 表明在 DDT 管内前后压力变化不大, 低速燃烧反应从开始一直维持到反应结束。此发实验中 B 炸药没有形成燃烧转爆轰现象。另一发相同密度的 B 炸药也得到类似的实验结果, B 炸药未形成燃烧转爆轰现象。

两种不同密度的 B 炸药在相同的实验条件下得到不同的实验结果, 表明密度对固体炸药的燃烧转爆轰性能有较大的影响, 不同密度炸药的 DDT 性能是不一样的, 较低密度的炸药可能更容易发生 DDT 现象。在相同的约束条件下, 固体炸药可能存在一个燃烧转爆轰的临界密度值。



(a) $d = 40 \text{ mm}$



(b) $d = 430 \text{ mm}$

图 7 密度为 $1.681 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 B 炸药不同位置处压力曲线

Fig. 7 Pressure curves at different position for composition B with density of $1.681 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

3.3 某推进剂的 DDT 实验

实验所用的推进剂为颗粒状, 平均密度为 $1.057 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 实验装置及测试系统与 B 炸药的完全一样 (见图 5)。共进行了 5 发试验, 其中一发试验中两只压力传感器测得的压力曲线如图 8 所示, 40 mm 处的压力出现两个峰值 (见图 8a), 第一个峰值为 0.636 GPa, 第二个峰值为 1.0 GPa, 两个峰值对应的时间相差 $34 \mu\text{s}$, 表明此处的反应比较复杂, 但反应仍为低速燃烧反应。430 mm 处的压力峰值为 22 GPa (见图 8b, 此值为修正值), 表明此处推进剂已发生了爆轰。

其它 4 发试验均使用了同一类型的推进剂, 只是助燃剂的比例不同, 其它实验条件与测试方法均相同。所得的实验结果与第一发实验结果基本类似: 在离点火药较近位置的压力传感器 ($d = 40 \text{ mm}$) 测得的压力曲线比较平缓, 一般都会出现多个峰值, 第一个压力峰

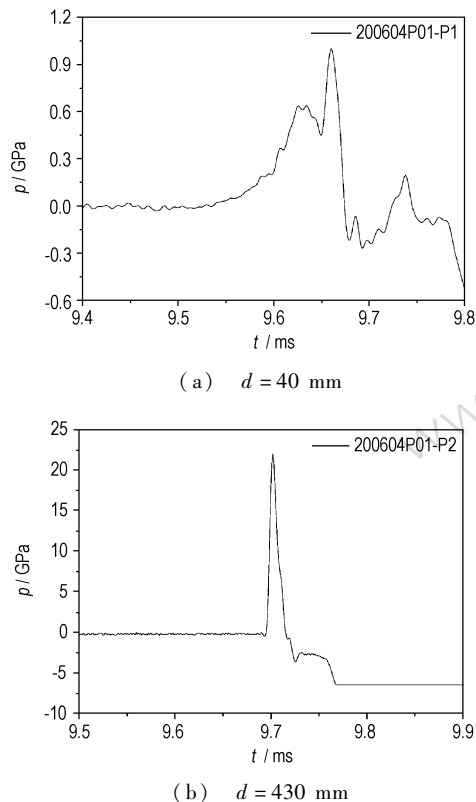


图8 某推进剂不同位置处压力曲线

Fig. 8 Pressure curves at different position for propellant

值不高(均不到 1 GPa),第二个压力峰值均比第一个压力峰值有较大幅度增加,表明此处反应为低速燃烧反应,反应是逐渐加强的;在远离点火药且靠近 DDT 管尾部的压力传感器($d = 430$ mm)测量的压力曲线均为单一的爆轰波压力曲线,压力峰值均超过 20 GPa,

表明此处推进剂已发生了爆轰。由此可见,在这种推进剂的燃烧转爆轰实验中,DDT 管内压力逐渐增加,推进剂的反应逐渐加强,直至发生爆轰。用 Y-YD-1254 型高量程压力传感器也可以较好地记录 DDT 管内压力变化历程。

4 结论

对三种不同类型的含能材料燃烧转爆轰实验进行了压力测试,结果表明新研制高量程压电式压力传感器可以应用于压力变化幅度较大的固体炸药或推进剂的燃烧转爆轰实验研究中,有助于了解固体炸药或推进剂在燃烧转爆轰过程中不同位置处的压力变化。但由于量程限制,该传感器无法准确测量转爆轰后 DDT 管内的压力。如果用此压力测试技术与其它燃烧转爆轰实验测试技术(如探针技术、X 射线技术等)相结合,将可以得到含能材料在燃烧转爆轰实验中更为全面的实验数据。

致谢:中物院流体物理研究所的蒲正美、何智、黄文斌,西安近代化学研究所的姚保学、王胜强、肖玮、王兴安等参加了实验工作,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] McAfee J M, Asay B W, et al. Deflagration to detonation in granular HMX [A]. 9th Symp (Int.) on Detonation [C], Arlington, Va.: OCNR, 1989, 265 - 278.
- [2] 郝新红,汪佩兰. 烟火药燃烧转爆轰研究[J]. 火工品, 1999(3): 16 - 21.
HAO Xin-hong, WANG Pei-lan. Study of the DDT process of pyrotechnic compositions [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1999(3): 16 - 21.

Application of Wide Range Pressure Gauge to DDT Experiments on Energetic Materials

WEN Shang-gang¹, GONG Yan-qing¹, DONG Shu-nan², WANG Shi-ying², TANG Shi-you³

(1. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China;

3. Mianyang Qi Shi Yuan SCI. & TECH CO., LTD, Mianyang 621000, China)

Abstract: A wide range piezoelectric pressure gauge was used to measure the pressure at different position in some DDT experiments on three kinds of energetic materials (JO-9159, composition B, and one propellant). The peak value of pressure for JO-9159 ($\rho = 1.840 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) is 2.311 GPa ($d = 40$ mm) and 10 GPa ($d = 430$ mm). The peak value of pressure for composition B ($\rho = 1.597 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) is 1.23 GPa ($d = 40$ mm) and 22.3 GPa ($d = 430$ mm), and that for composition B ($\rho = 1.681 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) is 2.311 GPa ($d = 40$ mm) and 2.332 GPa ($d = 430$ mm). The propellant ($\rho = 1.057 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) is 1.0 GPa ($d = 40$ mm) and 22 GPa ($d = 430$ mm). Results show that the pressure gauge can be used in some DDT experiments of solid explosive or propellant. The technology is useful to explore the pressure change during the DDT process, especially to measure the pressure change during the process of burning. The maximum pressure measured by the piezoelectric pressure gauge is up to 10 GPa.

Key words: explosion mechanics; pressure gauge; energetic materials; deflagration to detonation transition; pressure