

doi: 10.7690/bgzd.2013.01.022

弹底总压 PVDF 传感器

王国平, 芮筱亭, 徐浩, 冯宾宾, 王燕
(南京理工大学发射动力学研究所, 南京 210094)

摘要: 为了测试发射环境下大口径火炮弹底发射装药的挤压应力和挤压破碎过程, 设计某型大口径火炮弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器。基于 PVDF 压电薄膜, 设计了新型弹底总压 PVDF 传感器; 应用发射装药动态挤压破碎试验装置, 进行了该新型弹底传感器标定试验; 应用该 PVDF 传感器测试获得了弹底发射装药挤压应力, 试验验证了弹底挤压应力 PVDF 传感器的可行性。试验结果表明: 该新型传感器具有灵敏度高、价格低、性能可靠、能大面积测试的优点, 为发射装药发射安全性研究提供了新的测试手段。

关键词: PVDF 压电薄膜; 挤压破碎; 挤压应力; 发射安全性

中图分类号: TJ410.5⁺² **文献标志码:** A

PVDF Sensor for Total Pressure of Projectile Base

Wang Guoping, Rui Xiaoting, Xu Hao, Feng Binbin, Wang Yan
(Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to test the compression process and compression stress of the propellant charge near projectile base of gun propellant charge, the PVDF sensor for compression stress acted on the projectile base was designed. Based on the PVDF film, the new PVDF sensor for total pressure of projectile base is designed. The calibration experiment has been done using the experiment instrument of dynamic compression and fracture of the propellant charge, the calibration experiment has been done. The compression stresses acted on the projectile base of propellant charge are obtained using the new PVDF sensor. The PVDF sensor is validated by the test. The test results show that the new projectile base sensor has the characteristics, such as high-sensitivity, cheap, reliable, large area measuring and so on. It provides a new measuring method for the study of the launch safety of propellant charge.

Key words: PVDF piezoelectric film; compression and fracture; compression stress; launch safety

0 引言

针对发射装药引起膛炸现象, 许多国家进行了大量的理论与实验研究, 并取得了一些显著成果。其中最重要的成果就是对发射装药引起膛炸的机理逐步形成了“发射装药挤压—破碎—燃面增加—燃气生成速率猛增—膛压猛增”的共识^[1-4], 即某装药结构下发射装药引起膛炸的主要原因是, 火炮发火后弹丸开始运动之前即弹底发射药颗粒被引燃前, 发射药颗粒在挤压应力作用下产生的破碎; 所以, 对火炮尤其大口径火炮发射环境下弹底发射装药颗粒间挤压应力的研究是判断发射装药发射安全性的重要依据。

大量研究经验表明, 发射装药在点传火初期发射药粒间应力作用可造成发射药粒破碎。在膛底点火压力的作用下, 发射药床产生挤压, 因为固相颗粒群的声速远远大于火药气体的传播速率, 所以当火药燃气还未到达弹丸底部时, 颗粒群挤压应力已

作用在弹丸底部。颗粒群挤压应力随着火药燃气压力增加而增加, 作用在弹丸底部的压力是颗粒群挤压应力和弹丸底部火药气体压力的合力。测定弹底发射装药挤压应力变化规律是研究火炮膛内力学环境和发射安全性的关键之一。为测得弹底发射装药固体颗粒间的挤压应力, 其测压面积应远大于固体颗粒的粒度。通常压力传感器测压面积小, 只能测量弹底附近的火药气体压力, 无法满足大面积测量需求, 也无法准确反映火炮击发后弹底发射装药的真实总压, 严重制约了发射装药发射安全性的研究。

笔者基于 PVDF 压电薄膜压电常数大、柔性好且容易被切割制成大面积测量敏感元件的特点^[5-8], 设计了新型弹底发射装药挤压应力 PVDF (polyethylene vinylidene fluoride, 聚偏二氟乙烯) 传感器, 其测压面积大, 可测量得到弹底总压(发射装药颗粒挤压应力与弹底火药气体压力的合力), 结合药室坡膛测到的气体压力和光纤测试信号, 即可获得弹底发射装药固体颗粒间挤压应力历程及最大挤

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-11-12

基金项目: 国防基础科研计划资助(A2620133008); 总装重点预研基金(9140C300501110C3006)

作者简介: 王国平(1976—), 男, 山西人, 博士, 副教授, 博导, 从事发射动力学、弹药发射安全性研究。

压应力,为发射装药发射安全性评估提供关键参数。

1 PVDF 传感器原理与设计

1.1 PVDF 压电薄膜测压原理

PVDF 是一种压电聚合物,其压电常数大,柔性好且容易被切割,可以被制成大面积测量敏感元件^[5-8]。由此种材料制成的压电传感器响应速度很快,一般在纳秒量级,能够在火炮发火时的复杂、快变环境下及时准确地捕捉到瞬变压力信号,灵敏度高,测压量程可达 20 GPa。所以,利用 PVDF 压电薄膜作为新型弹底压力传感器的敏感元件,可以满足对发射装药挤压应力测量的各项要求。

PVDF 压电薄膜的压电方程常表示为压电薄膜受到外力 F 作用时与在相应表面产生表面电荷 Q 间的关系,即

$$Q = dF \quad (1)$$

式中, d 为压电系数。它是描述压电材料在力作用下产生电荷能力大小的物理量。

PVDF 压电薄膜测压原理如图 1 所示,其压电系数矩阵如式 (2) 所示。当 PVDF 压电薄膜受外力作用时,其两表面将出现相应的表面电荷,表面电荷由低噪声电缆引入到后续电荷放大环节和数据处理系统,最终实现对压力的测量。

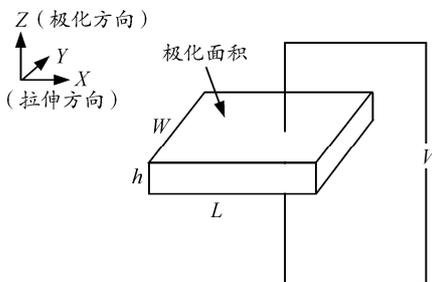


图 1 PVDF 压电薄膜测压原理

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

典型的 PVDF 压电薄膜厚度为 6~100 μm , 所以其厚度所导致的对压力缓冲的误差可以忽略不计,只考虑其轴向上的应力,式 (3) 为其产生电荷量与应变的关系式。

$$q(t) = q(t_0) + \iint_{\Omega} \left[\int_0^t \left(\sum_{j=1}^3 d_{3j} \frac{\partial \sigma_{jj}(x, y, t)}{\partial t} \right) dt \right] dx dy - \int_0^t \frac{q(t)}{RC} dt \quad (3)$$

式中: $q(t_0)$ 为初始电压; d_{3j} 为压电常数; $\sigma_{jj}(x, y, t)$ 为应力; R 为电荷放大器的输入电阻; C 为传感器

等效电容; Ω 为传感器的敏感面积。

1.2 敏感元件选取

新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器采用 PVDF 压电薄膜作为敏感元件,如图 2 所示。

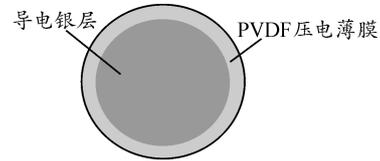


图 2 PVDF 压电薄膜

采用的压电薄膜上下两层都镀有银层,方便产生电荷的引出,中间 PVDF 压电薄膜的边缘超出量为 1 mm。这里之所以有边缘超出量,是因为压电薄膜的厚度为几十微米,如果没有边缘超出量,在后续的粘贴过程中,稍不注意就会使膜的上下电极导通,造成测量回路的短路,影响测量精度,严重时导致测试失败。

文献[5-6]中采用环氧树脂作为隔热材料,且采用带有引线的锥体引出电荷,但由于大口径火炮膛内发射环境异常恶劣,弹底发射装药挤压应力具有快变、值大的特点,膛内温度高达几千摄氏度,采用环氧树脂隔热不可靠,且在高冲击、高频响振动环境下引线锥体容易脱落,所以笔者采用高硬度的经过调制的 35CrMnSiO 材料制作成承压上盖,既可以隔热,又可以把弹底合力传递给压电薄膜;同时,由于特殊低噪声线内部丝线直径很细且压电薄膜本身柔性非常好,所以在传感器敏感元件部分直接把特殊低噪声线绝缘皮内的丝线粘在压电薄膜表面进行封装,以便更可靠的引出电荷。

对出厂后的压电薄膜封装时,使用带有粘性的硬塑料板。在放有镀银线的膜两极粘贴硬塑料板,完成压电薄膜的封装。封装好的压电薄膜如图 3。

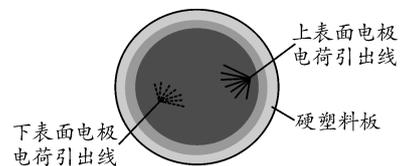


图 3 封装好的压电薄膜

1.3 新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器设计

设计的新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器,由承压上盖、弹丸本体、连接件、PVDF 测试单元、模拟弹带和加速度测试单元等组成。承压上盖端面面积与某型火炮弹丸弹底面积相同,以便感受弹底总压;加速度测试单元装有加速度计,测

量弹丸开始运动时的加速度值, 为测量得到的弹底挤压应力提供加速度修正数据。图 4 为设计的新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器结构图, 图 5 为设计的新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器实物。

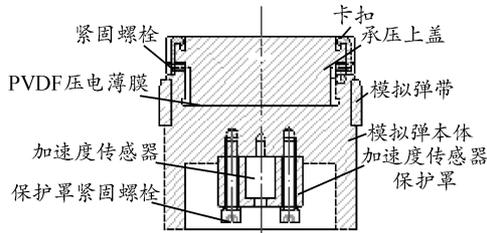


图 4 新型 PVDF 传感器结构

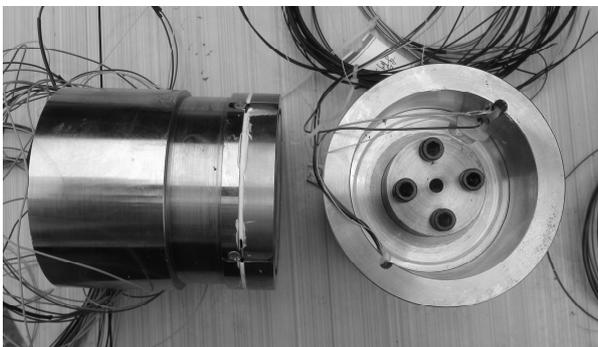


图 5 弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器实物

2 新型 PVDF 传感器标定试验

利用发射装药动态挤压破碎试验装置对新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器进行动态标定。

2.1 标定装置及工作原理

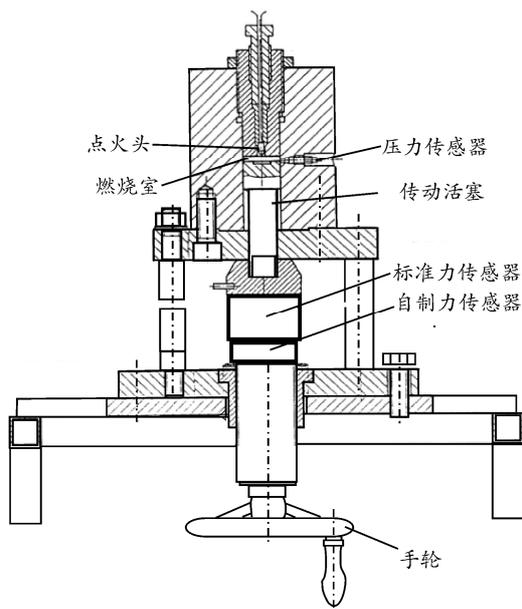


图 6 新型 PVDF 传感器标定装置结构

新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器动态标定装置主要部件包括: 点火头、半密闭爆发器燃烧室、传动活塞、间隔轴套、试样药室、底板、底座和调节手轮等。图 6 是新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器标定装置结构图, 图 7 是新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器标定装置实物。

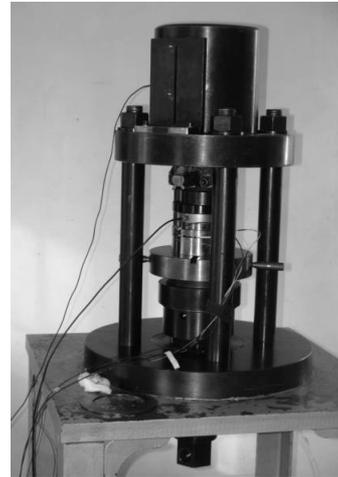


图 7 新型 PVDF 传感器标定装置实物

实验前, 按计划药量把称量好的某火药放入到半密闭爆发器燃烧室内, 然后将被标定的新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器放于底座, 上面放标准的 Kistler9071A 型力传感器, 使两者刚性接触。当点燃半密闭爆发器燃烧室内的火药后, 产生的高压燃气推动传动活塞向下, 活塞施加冲击力于标准力传感器, 同时, 标准力传感器再把感受到的冲击力传递给下面的被标定新型 PVDF 传感器, 由于标准力传感器与被标定新型 PVDF 传感器是刚性接触且力的作用时间极短, 认为两者受到的冲击力相同。

2.2 标定试验

新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器动态标定试验测试系统包括: 德维创多通道数据瞬态存储器、Kistler 电荷放大器、Kistler400kN 标准力传感器、计算机以及数据输出设备。标定试验中, 依次把不同药量硝化棉放入燃烧室中, 硝化棉药量从 1.2~3.0 g, 以每次 0.2 g 量递增, 提供不同的初始燃烧压力, 从而为压缩活塞体提供不同的压缩力, 此标定试验过程针对每个传感器重复 3 次。Kistler 力传感器测量结果作为标准压力, 新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器所测信号经电荷放大器转化输入到计算机, 显示为电压值。

获得 PVDF 传感器第一组标定试验结果数据如表 1 所示, 某发标定试验实测结果如图 8 所示, 图

9 为某 PVDF 传感器标定试验峰值拟合, 通过应用相关数据处理方法^[9-11], 获得了 PVDF 传感器的灵敏度系数。

表 1 标定试验结果数据

序号	装药量/g	Kistler1/MPa	压力峰值 2/MPa	压力峰值比(1/2)
1	1.2	11.16	0.396	28.18
2	1.4	14.47	0.523	27.67
3	1.6	18.39	0.628	29.28
4	1.8	19.25	0.596	32.30
5	2.0	22.16	0.741	29.90
6	2.2	25.34	0.854	29.67
7	2.4	29.15	0.950	30.68
8	2.6	33.50	1.066	31.43
9	2.8	35.28	1.119	31.53
10	3.0	38.30	1.204	31.81

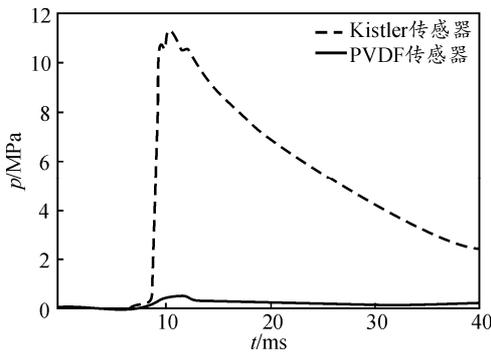


图 8 PVDF 传感器标定试验实测结果

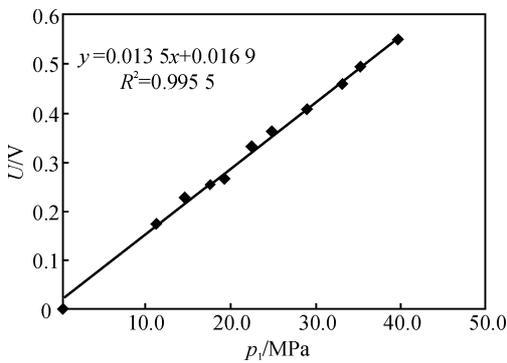


图 9 PVDF 传感器标定试验峰值拟合

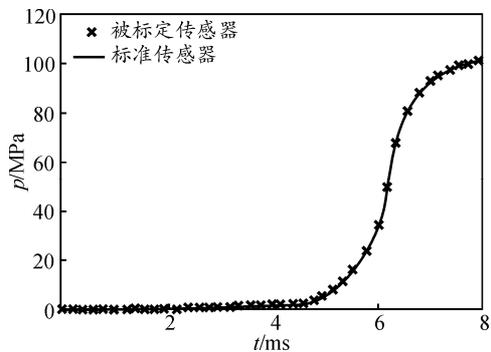


图 10 PVDF 传感器与标准力传感器实测曲线

应用获得的灵敏度系数进行动态挤压试验, 图 10 为新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器与标准力传感器实测动态挤压应力曲线。从图 10 可见,

PVDF 传感器所测得的应力上升时间历程与标准 Kistler 力传感器所测得的应力上升时间历程几乎重合, 表明标定出来的灵敏度比例系数正确、可靠。

3 PVDF 传感器验证试验

为了考核弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器测试弹底挤压应力的可行性, 笔者进行了 2 发射击试验: 一发为自然温度, 一发为低温(-40 °C)。应用发射装药燃烧与力学环境试验装置和弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器及其测试系统, 在弹重、装药量及点传火方式等试验条件与制式情况相同的前提下, 测试弹底压力、膛腔气体压力。图 11 和图 12 分别给出了自然温度、低温条件下弹底发射装药固体颗粒间挤压应力时间历程的实测结果。该结果进一步验证了弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器测试大面积弹底发射装药挤压应力的可行性。

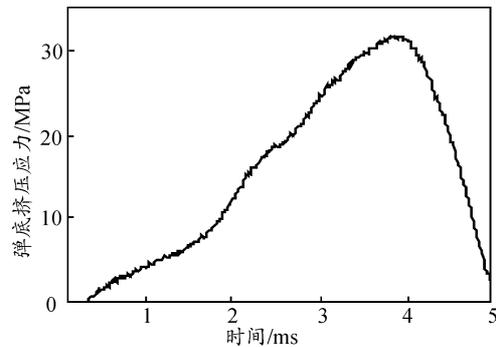


图 11 自然温度下新型传感器挤压应力的实测结果

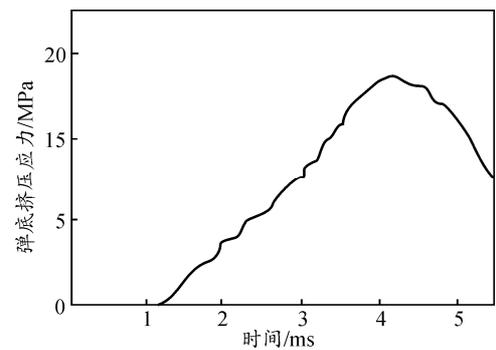


图 12 低温新型 PVDF 传感器挤压应力的实测结果

4 结论

笔者设计的新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器, 具有量程大、灵敏度高和能大面积测量等优点。笔者应用新型弹底发射装药挤压应力 PVDF 传感器进行了实弹射击试验, 通过测试获得了弹底发射装药颗粒间挤压应力, 解决了弹底发射装药挤压应力测试难题, 为发射装药发射安全性研究提供了重要测试手段。