

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.06.005

# 电点火器输出 $p-t$ 曲线出现负压的异常情况分析\*

袁长宏 袁玉红 谭玉明 曹平

安徽红星机电科技股份有限公司(安徽合肥,230011)

[摘要] 针对某型导弹发动机用电点火器在发火测试时出现的负压情况,进行了故障树分析排查、等效电路分析和试验验证,最终找到了该故障的原因是产品发火后绝缘性能失效,造成发火电路与测试电路耦合,形成电流回路,进而使电荷放大器输出端形成负压。对历次火工品发火测试时出现负压的情况进一步理论分析和试验验证表明,仅在使用压电式传感器的测试过程中出现负压,而应变式传感器则不会出现该故障。对分析电点火器类产品输出  $p-t$  曲线异常提供了参考。

[关键词] 电点火器; $p-t$  曲线;负压

[分类号] TQ560.5

## Analysis of Abnormal Conditions of Negative Pressure in the Output $p-t$ Curves of the Electric Igniter

YUAN Changhong, YUAN Yuhong, TAN Yuming, CAO Ping

Anhui Hongxing Electromechanical Technology Co., Ltd. (Anhui Hefei, 230011)

[ABSTRACT] Fault tree analysis, equivalent circuit analysis, and experimental verification were conducted to investigate the negative pressure situation that occurred during the ignition test of an electric igniter for a certain type of missile engine. Finally, the cause of the fault was found to be the insulation performance failure of the product after ignition, resulting in the coupling of the ignition circuit and the testing circuit to form a current loop, which in turn caused negative pressure at the output terminal of the charge amplifier. Further theoretical analysis and experimental verification were conducted on the occurrence of negative pressure during the ignition tests of various pyrotechnic devices. The results indicate that negative pressure only occurs during the testing process using piezoelectric sensors, while it does not occur when using strain gauges. It could provide a reference for analyzing the abnormal output  $p-t$  curve of electric igniter products.

[KEYWORDS] electric igniter;  $p-t$  curve; negative pressure

## 0 引言

压力-时间( $p-t$ )曲线的测试方法是判定点火类火工品工作性能最常用的测试手段。通过数据采集系统采集火工品在密闭容器中发火时的  $p-t$  曲线,提取特征参数,并与合格火工品的  $p-t$  曲线特征参数进行比较,利用数理统计的方法对某一批次火工品进行品质鉴定<sup>[1]</sup>。

在进行点火类火工品发火测试的过程中,经常会遇到  $p-t$  曲线测试异常的现象,有时还会出现在电点火器正常发火时测出负压的情况,这可能会对该发火品的工作性能作出误判,甚至可能会影响

整批次产品的正常交付。因此,需要对这种测试异常情况进行研究,从而不断规范测试过程,降低测试异常对产品工作性能的误判。

电点火器在密闭容器内正常发火时会出现高温、高压气体, $p-t$  曲线测试结果应该表征出有一定的正压。因此,负压的出现从理论上很难说通,最后往往会笼统归结到测试传感器工作不正常或测试系统工作不正常等意外因素。通常未能认识到出现该问题的根本原因。

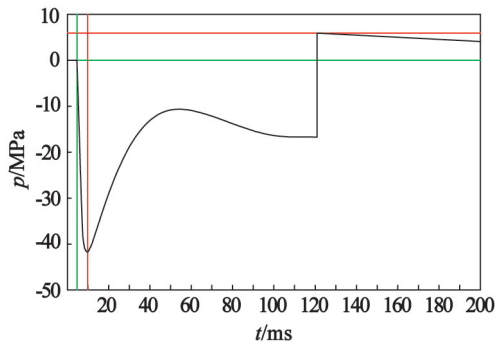
本文中,针对某型导弹发动机使用电点火器在发火测试时出现的负压情况,进行了故障树排查、理论分析和试验验证,最终找到了造成该现象的真正原因。

\* 收稿日期:2024-01-12

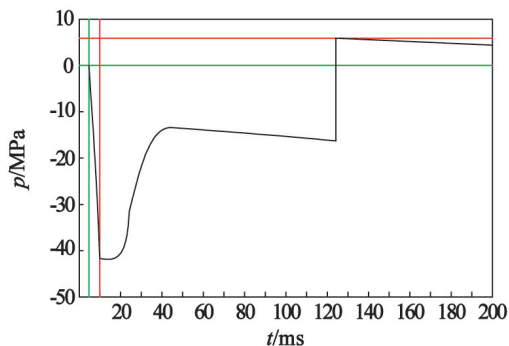
第一作者:袁长宏(1972—),男,高级工程师,主要从事军用火工品工程技术研究。E-mail:yuanch569@163.com

## 1 试验部分

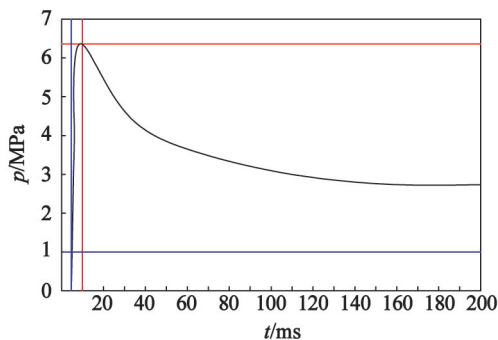
在进行某型导弹发动机用电点火器(以下简称产品)出厂交验的发射输出性能试验时,参试的15发产品中出现2发输出  $p-t$  曲线异常的情况,即在前100 ms 时间段里记录的压力均为负压。2发故障产品的发射输出  $p-t$  曲线见图1(a)和图1(b);正常产品的输出曲线见图1(c)。



(a) 1#故障产品



(b) 2#故障产品



(c) 正常产品

图1 产品的发射输出  $p-t$  曲线

Fig. 1 Ignition output  $p-t$  curves of the products

2发故障产品的发射输出  $p-t$  曲线与正常曲线相比差异非常大。但2个故障产品的输出  $p-t$  曲线本身具有很强的一致性,即在测试系统采集的100 ms 内的有效曲线均表现为负压。

为排查故障原因,对发射试验后的15发产品分

别编号1#~15#,并进行了电阻和绝缘电阻检测。除发射曲线异常的产品外,其余13发产品的绝缘电阻均在正常范围内,见表1。2发发射输出  $p-t$  曲线异常的产品在发射前绝缘电阻均正常,实测电阻分别为596、1 158 M $\Omega$ (要求电阻不小于20 M $\Omega$ ),而在发射后,绝缘电阻为欧姆级,基本处于导通状态。经初步分析,该2发产品发射后的绝缘电阻异常可能与产品发射输出  $p-t$  曲线异常之间存在一定的联系。

表1 产品发射后的绝缘电阻

Tab. 1 Insulation resistance of the products after ignition

编号	发射后绝缘电阻/M $\Omega$	发射输出 $p-t$ 曲线情况
1#	325	正常
2#	288	正常
3#	310	正常
4#	198	正常
5#	245	正常
6#	520	正常
7#	$1.5 \times 10^{-5}$	异常,出现负压
8#	312	正常
9#	298	正常
10#	356	正常
11#	512	正常
12#	705	正常
13#	$3.6 \times 10^{-5}$	异常,出现负压
14#	882	正常
15#	650	正常

在电火工品发射后,绝缘电阻处于不可控的状态,即大部分产品的绝缘电阻仍然能够保持在兆欧级别,但有少部分产品可能因为金属残渣使脚-壳之间导通,从而失去绝缘性能<sup>[2]</sup>。鉴于此时火工品的工作任务已经完成,在总体设计时,大多数的导弹武器系统往往通过控制电路来管控火工品发射后因绝缘失效可能造成的短路影响。基于上述原因,用户并未对该产品发射后的绝缘性能提出要求。

## 2 结果与讨论

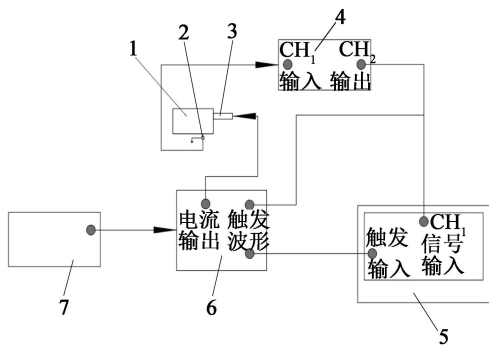
### 2.1 故障树排查结果

对故障树底事件进行分析、排查,除了产品发射后绝缘电阻超差可能造成故障不能排除外,产品发射不正常的原因、测试系统的问题和传感器损坏等各类底事件均可排除。可以判断,产品发射后,绝缘电阻失效对测试系统的采集信号造成了干扰,进而导致采集信号曲线的异常。

### 2.2 机理分析

火工品发火输出压力测试的原理是:对装在测压装置内的火工品施加规定的激发能量,火工品发火后产生的气压作用在压力传感器上,产生了一个和压力变化相对应的电信号,经电荷放大器放大后,由记录系统处理并给出  $p-t$  曲线。火工品输出压力测试系统由  $p-t$  触发采集系统、恒流源、测压装置、压电传感器、电荷放大器等组成<sup>[3]</sup>,见图 2。图 2 中:测压装置通过传感器外壳及导线接地;产品外壳通过测压装置接地。

由图 2 画出的等效电路如图 3 所示<sup>[4]</sup>。图 3 中: $R_1$  为电点火器电阻; $R_2$  为传感器电阻; $R_F$  为反馈电阻; $C_F$  为反馈电容; $A$ 、 $B$  为输出端。



1 - 测压装置;2 - 传感器;3 - 点火器;4 - 电荷放大器;  
5 -  $p-t$  触发采集系统;6 - 发火脉冲发生器;7 - 恒流源。

图 2 电点火器的  $p-t$  测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of  $p-t$  test system of the electric igniter

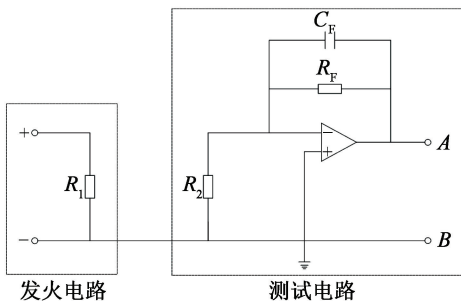


图 3 发火测试电路的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of the ignition test circuit

对等效电路进行分析可知:

1) 在正常情况下,产品发火后的绝缘电阻正常,恒流源与电点火器形成独立的发火电路,产品外壳、测压装置与传感器外壳等相连部位均无电位差。此时,电荷放大器两极输出正相电压,即  $A$  显示为“+”、 $B$  显示为“-”。因此,该情况下测试系统采集到的为正电压波形,如图 1(c)所示。

2) 在异常情况下,产品发火后绝缘性能失效,

恒流源、火工品外壳、测压装置及传感器外壳等形成电流放电回路,传感器输出参考电位发生变化,输出信号相位也发生变化,电荷放大器输出反向电压,即  $A$  显示为“-”、 $B$  显示为“+”。因此,该情况下测试系统采集到的为负电压波形,如图 1(a)和图 1(b)所示。

通过对发火测试等效电路进行分析,找出了测试系统采集到电点火器输出  $p-t$  曲线显示负压的原因,从而为测试过程中采集到负压曲线提供了理论依据。

### 2.3 同类问题延伸与分析

在统计历次点火类产品输出  $p-t$  曲线测试出现负压的情况时发现:负压只是在使用压电式传感器测试的环节出现,在应变式传感器的测试过程中,却未出现过该现象;且同一种产品在发火测试过程中,使用压电式传感器测试时曾经出现过负压的异常现象,而在使用应变式传感器测试时未出现负压现象。这说明了这种情况的出现还与传感器的选型有关。

压电式传感器的工作原理:基于压电效应,当压电材料受到外力作用时,表面会形成电荷;电荷通过放大器、测量电路的放大以及变换阻抗后,被转换为与所受到的外力成正比关系的电量输出;再经测试系统换算,将电压信号转换为压力信号,表征出压力曲线<sup>[5]</sup>。压电式传感器只应用在动态测量当中,原因是受到外力作用后产生的电荷,当回路有无限大的输入阻抗时,才可以得以保存下来。因此,该类型传感器易受到外部电信号的干扰。测试原理如图 4 所示。

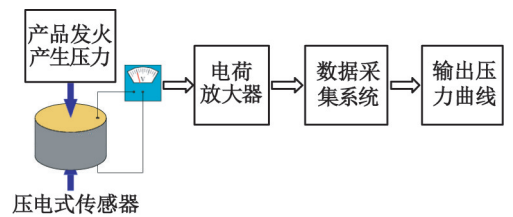


图 4 压电式传感器的测试原理

Fig. 4 Testing principle of the piezoelectric sensor

应变式传感器主要工作原理是基于压阻效应,即感应受到机械式应力时所产生的电阻变化。不同于压电效应,压阻效应只产生阻抗变化,并不会产生电荷。应变式传感器一般通过引线接入惠斯登电桥中。该电桥封闭于传感器中,不与外部电场直接接触,所以不易受到外部电信号的干扰<sup>[6]</sup>。敏感芯体没有外加压力作用时,电桥处于平衡状态(称为零位);当传感器受压后,芯片电阻发生变化,电桥将失去平衡;给电桥加一个恒定的电流或电压源,电桥

将会输出与压力对应的电压信号,通过电桥转换成压力信号输出,经过放大后,再经过电压与电流的转换,变换成相应的电流信号。测试原理见图5;等效电路见图6<sup>[7]</sup>。

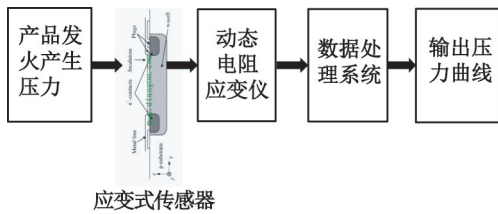


图5 应变式传感器的测试原理

Fig.5 Testing principle of the strain gauge transducer

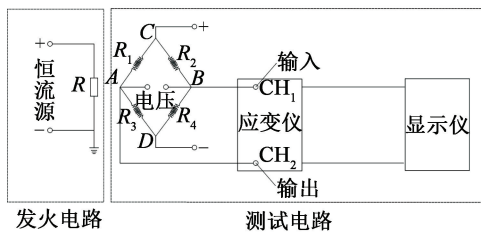


图6 应变式传感器测试系统的等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of the strain gauge sensor testing system

图6中： $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 分别为惠斯登电桥4个桥路电阻； $R_1$ 、 $R_2$ 和 $R_3$ 为固定电阻； $R_4$ 是可变电阻； $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 为输出端。当 $R_4$ 感应外界施加的压力发生变化时， $A$ 、 $B$ 之间的电压发生变化。采集电压变化，即可换算成外界环境中物理量的变化，从而实现测试目的。

从图6的等效电路可看出，应变式传感器与测试产品不共地，发火电路与测试电路互为独立的电路控制系统，即便出现产品发火后绝缘性能失效的情况，也不会对测试电路造成任何影响。

根据2种传感器工作原理的分析，基于自身的特性，2种传感器分别应用到不同场景。对瞬发度高（作用时间一般为10 ms）的小型点火具、电点火器、电爆管等火工品，压力作用时间和峰值压力上升时间短，峰值压力较大，要求测试系统必须频带宽，不受温度影响。所以，应选择容积较小的密闭爆发器和谐振频率较高的压电晶体式压力传感器构成的测试系统（频率大于150 kHz），从而保证系统对输出压力的变化速率反应快、灵敏度高。而对体积较大的点火具和动力源火工品，压力作用时间和峰值压力上升时间较长，峰值压力相对较小。因此，应选择容积较大的密闭爆发器和谐振频率不高（频率大于20 Hz）的应变式压力传感器构成测试系统，这样

可使  $p-t$  曲线稳定、平滑、波动小<sup>[8]</sup>。

分析可知，本次出厂验收试验中电点火器的输出压力测试选用压电式传感器是合适的，测试结果是能得到保证的。但由于选用的压电式传感器自身更易受到发火电路干扰的特性，造成了当产品发火后绝缘性能失效时，将发火电路输入电流经产品脚线、产品外壳、金属测压装置耦合到传感器信号采集回路中，使传感器采集信号时受到干扰，从而表征输出  $p-t$  曲线呈现负压的异常现象。

## 3 验证

### 3.1 验证方案

1) 静态测试。针对发火后绝缘电阻失效的试验产品残骸，按照正常发火试验条件施加相应的电流信号。同时，利用压电式传感器和应变式传感器，分别测试2种传感器上的电压信号。

2) 发火测试。正常火工品在发火后绝缘电阻异常的情况并不会必然出现，而是存在一定的概率。因此，特选用发火前绝缘电阻不合格的产品进行测试。同时，利用压电式传感器和应变式传感器，分别测试2种传感器上的电压信号。

需要引起重视的是，在将绝缘电阻异常的产品安装到测压装置上时，应避免产品壳体与发火电源正极（非接地一极）共地的情况。通过万用表检测电阻可进行有效判断。因为产品壳体与发火电源正极（非接地一极）共地情况下出现绝缘电阻故障时，可能会影响产品的发火性能<sup>[9]</sup>。

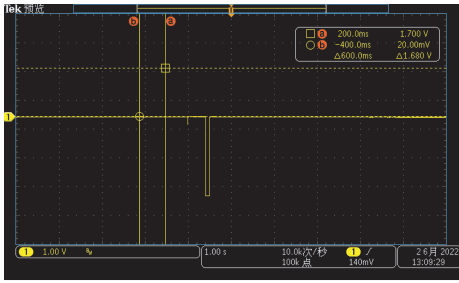
### 3.2 验证结果

#### 3.2.1 静态测试

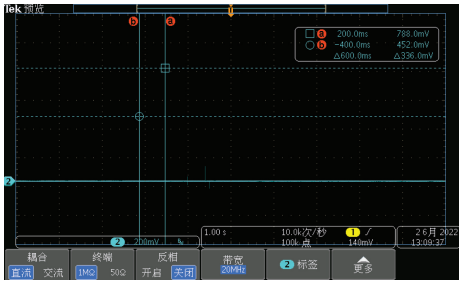
将发火后绝缘电阻失效的同款电点火器残骸（绝缘电阻为0.2 k $\Omega$ ）装到测压装置上。在测压装置的对称部位分别安装了量程均为0~30 MPa的Z3-Y1型压电式传感器和6215型应变式压力传感器，分别连接示波器，同时进行信号采集。按照正常起爆试验条件对产品施加5 A、20 ms的电流，用示波器测得2种传感器上的电压信号，如图7所示。测试结果表明，从压电式传感器上可测到3 V、20 ms的干扰信号，而应变式传感器上未采集到任何干扰信号。

#### 3.2.2 发火测试

将发火前绝缘电阻失效的同批次电点火器（绝缘电阻为112  $\Omega$ ）装到测压装置上。在测压装置的对称部位分别安装了量程均为0~30 MPa的ZQ-Y1型压电式传感器和6215型应变式压力传感器。压



(a) 压电式传感器



(b) 应变式传感器

图 7 不同传感器测试的电压

Fig. 7 Voltages tested by different transducers

电式传感器连接  $p-t$  数据采集系统采集发火输出  $p-t$  曲线,应变式传感器连接示波器来采集发火输出  $p-t$  曲线。从试验现象和试验后的残骸判断,该发电点火器发火正常。通过压电式传感器和  $p-t$  测试系统采集的发火输出  $p-t$  曲线异常,同样出现了负压现象(图 8);而通过应变式传感器和示波器采集的发火输出  $p-t$  曲线正常(图 9)。

### 3.3 测试小结

从验证试验结果可见,不论是进行静态测试还是发火动态测试,在产品出现绝缘性能失效的情况下,使用压电式传感器均会造成在采集信号时受到干扰,使输出  $p-t$  曲线呈现负压;而使用应变式传感器,即使在产品绝缘性能失效的情况下则依然能采集到正常的发火输出  $p-t$  曲线。上述理论分析结果

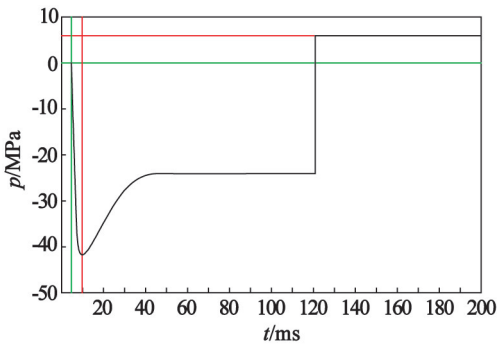


图 8  $p-t$  测试系统采集的输出压力

Fig. 8 Output pressures collected by the  $p-t$  test system

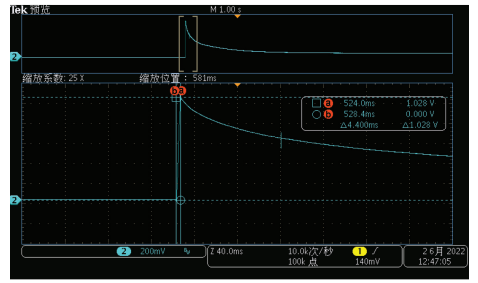


图 9 应变式传感器采集的电压

Fig. 9 Voltages collected by the strain gauge transducer

与试验验证结果是完全一致的。

## 4 结论

对某型导弹发动机用电点火器在发火测试时出现负压的异常情况,进行了故障树排查、理论分析和试验验证,最终找到了造成该故障的原因是产品发火后绝缘性能失效,导致发火电路与测试电路耦合,形成电流回路,进而使电荷放大器输出端形成负压。

通过对历次火工品发火测试时出现的负压情况进行梳理发现,负压仅在使用压电式传感器的测试过程中出现。进一步分析压电式传感器和应变式传感器的工作原理可知,压电式传感器更易受到发火电路干扰。最后,通过静态测试和发火测试验证了本次发火输出  $p-t$  曲线出现负压情况的故障原因,理论分析与试验验证结果一致。

对分析电点火器类产品发火输出  $p-t$  曲线异常的现象提供了参考。

## 参 考 文 献

[1] 姚良, 张世英, 华明军. 基于  $p-t$  曲线的导弹火工品品质测试 [J]. 宇航计测技术, 2004, 24(4): 14-16.  
YAO L, ZHANG S Y, HUA M J. Quality testing of initiating explosive device in missiles based on  $p-t$  curve [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2004, 24(4): 14-16.

[2] 孙霖, 马爱武, 郭崇星, 等. 火工品作用后开路电阻的动态测量 [J]. 火工品, 2007(1): 54-56.  
SUN L, MA A W, GUO C X, et al. Dynamic measurement of shutdown resistance of initiating explosive device after function [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2007(1): 54-56.

[3] 宁心怡. 压电式加速度传感器电路原理 [J]. 科技创新与应用, 2019(32): 42-45, 47.

