

文章编号: 1006-9941(1999)02-0093-04

电火工品发火感度无损检测的展望

胡学先, 蒋罗珍

(淮南工业学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 介绍了电火工品瞬态脉冲试验的基本原理, 回顾了电火工品发火感度无损检测技术的发展历史, 认为该技术目前仍处于统计性处理的阶段, 今后应拓展该技术应用领域, 加强电火工品发火性能的单发预报并研制相应的仪器。

关键词: 电火工品; 无损检验; 瞬态脉冲试验; 发火感度

中图分类号: TQ560.72

文献标识码: A

1 引言

火工品系一次性使用的产品, 其性能只能通过抽样检验方法进行统计评估。从 80 年代开始人们对 100% 检验的无损检测方法给予了很大关注, 其中, 瞬态脉冲试验 (Transient pluse test, TPT) 就是无损检测电火工品发火感度的一种方法。本文介绍了该方法的原理, 分析了它的发展历史和现状, 提出了发展方向。

2 瞬态脉冲试验的基本原理

桥丝 (或桥片或桥膜) 式电火工品的发火过程, 是电能转变成热能, 桥丝升温, 热能向药剂传递, 形成热点自持化学反应, 一直到爆炸的过程, 即所谓的“电热过程”。这个过程的特性决定了该火工品的发火感度。影响桥丝和药剂电热过程的因素很多, 对于同一发电火工品来说, 无论通入大电流还是通入小电流, 热能都通过同一桥丝和药剂的界面, 影响电热过程的因素是一样的。因此, 利用通入小电流所得的温升曲线, 可以预估通入大电流时这些因素的作用。只要通入的电流足够小, 脉冲时间足够短, 对电火工品是无损的。这就是电火工品发火感度无损检测的基本思路。即对电火工品输入一个小的恒流脉冲电流, 测得桥丝的温升曲线, 称为响应曲线, 用响应曲线来评估电火工品的发火性能。对响应曲线的简化处理方法是 Rosenthal L A 提出的集总参数方程^[1]和 70 年代报道的电热参数计算方法^[2]。桥丝及周围药剂的温升 T 与各种因素

的关系如 (1) 式所示。

$$T = \frac{I^2 R_0}{\gamma - \alpha I^2 R_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma - \alpha I^2 R_0}{C_p} t\right) \right] \quad (1)$$

式中, C_p 为集总热容; γ 为集总热损失系数; R_0 为桥丝初始电阻; I 为恒定电流值; α 为桥丝材料电阻温度系数; t 为通电时间。

随着桥丝温度的升高, 电阻也变大。若通过桥丝的电流脉冲是恒流的, 并假定桥丝上的温度是均一的, 则桥丝温升曲线可表现为桥丝两端电压的变化 [见 (2) 式]。桥丝的电阻变化量 (ΔR) 按 (3) 式计算, 桥丝的温升 T 按 (4) 式计算。

$$V(t) = \frac{\alpha I^3 R_0^2}{\gamma - \alpha I^2 R_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma - \alpha I^2 R_0}{C_p} t\right) \right] \quad (2)$$

$$\Delta R = V(t) / I \quad (3)$$

$$T = V(t) / \alpha I R_0 \quad (4)$$

当 $t \rightarrow \infty$, 输入桥丝的电能与桥丝的热损失达到平衡时, $V(t)$ 达到最大值 V_m , 则 (2) 式变为

$$V_m = \frac{\alpha I^3 R_0^2}{\gamma - \alpha I^2 R_0} \quad (5)$$

当 $t \rightarrow 0$ 时, 响应曲线的初始斜率 S_0 为

$$S_0 = \frac{\alpha I^3 R_0^2}{C_p} \quad (6)$$

由 (6) 式可求得 C_p 。由于实际测量中, $V(t)$ 曲线的起始端变化很快, 而绝对值很小, 又受检测时输入恒流脉冲的上升时间影响, 因此不可能获得准确的 S_0 值。而 V_m 则可以比较精确地测得, 所以一般都从 V_m 求 C_p 。

电热响应曲线是一条指数函数曲线, 曲线上升的时间常数, 就是桥丝的升温时间常数 τ 。

收稿日期: 1998-05-18 修回日期: 1998-08-10

作者简介: 胡学先, 男, 1935 年生, 教授。

$$\tau = \frac{C_p}{\gamma - \alpha I^2 R_0} \quad (7)$$

当曲线上升到最大值的一半时,即 $V = 0.5V_m$ 时所对应的时间为 $t_{1/2}$,则可从(2)、(5)、(7)式求得:

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{(d)2} \quad (8)$$

再从(7)式可得

$$C_p = \tau(\gamma - \alpha I^2 R_0) \quad (9)$$

由此不难看出,利用无损检测的响应曲线可以求得该发电火工品桥丝的电阻增量、桥丝温升、集总热损失系数、升温时间常数和集总热容。

3 TPT 技术现状分析与应用前景展望

3.1 技术现状分析

国际上从 60 年代到 70 年代,热衷于利用电热方程计算电火工品的感度和发火时间。文献[2~8]对输入信号的类型,幅值和脉冲宽度进行了研究,提出了瞬态脉冲试验的基本原则,并研究了电火工品中桥丝和药剂界面处疵病与响应曲线的关系。美国于 1972 年颁布了相应军标 MIL-STD-1512,对“热时间常数”试验作出了相应的规定。利用此法可对电火工品实行 100% 检测。1976 年报道了无损检测装置^[9],1979 年生产了不带计算机的“605B 型热瞬态试验仪”(605B thermal transient test)。该仪器有九种检测功能^[10],即:桥丝焊接质量、装药密度、界面(桥丝和药剂间)的空气间隙、炸药中的杂质、沿桥丝的气体夹杂物、热时间常数、热容、桥丝电阻和桥丝温度的检测。该仪器已开始在生产线上使用,成为生产质量控制的手段^[11]。80 年代开始向薄膜式和导电药火工品发展^[12,13]。控制发火感度和性能预报的方法,已有一些进展,但还没有成熟的方法^[14,15]。对 Rosenthal 方程也在探索改进^[16]。最近两次(1994 年和 1997 年)国际炸药和烟火(E&P)会议都将该领域的研究作为征文的主要内容^[17],例如:电爆装置发火特性的热模型;电爆装置热参数评估的正确性、精度和可重复性;在批与批偏差、质量控制及存贮寿命评估中电爆装置热参数的使用;使用热参数和 Monte-Carlo 模拟处理电爆装置发火可靠性方面的论文^[18,19]已陆续发表了不少。

我国从 80 年代开始研究电火工品的电热过程和 TPT 的无损检测技术^[20,21],自行设计了电火工品无损检测仪,并将各种桥丝式电火工品的热参数作为设计、

生产的一种控制手段^[22],将一批电火工品按发火感度的高低筛选成几组不同感度的产品^[23],用于对长期贮存电火工品进行性能评估^[24]。随着电子技术和计算机技术的发展,TPT 无损测技术也在不断发展,1992 年开始研究用人工智能(artificial intelligence)办法处理响应曲线,已取得良好的效果^[25],并提出了计算机神经网络在电火工品无损检测中的应用^[26]。分析了该项技术用于工业电雷管的可能性^[27,28]。该项技术的应用范围可以概括为:生产过程中的质量监控和批质量的比较;设计时产品性能的实测反馈指导;发火感度的分级与控制;产品贮存过程的质量监控;使用过程中产品意外故障的监控等。1996 年该项技术已正式用于火箭弹的无损检测并有了专用的仪器。我国在该领域已有成熟的技术,在常规兵器中已得到使用。

3.2 存在的问题

该技术尚处于统计性处理阶段,在使用过程中有时会出现个别数据偏离现象。例如,作感度分类处理时,个别产品可能会偏离实际的感度分类等级;在高温高湿加速寿命试验时,有的产品热参数的变化不明显等^[29]。在电火工品加电过程中采集的信息,经数据处理后所得到的结果与破坏性试验实测结果差异较大,因此影响了 TPT 技术的广泛应用。为避免被测样品的热参数反映不灵敏或个别数据偏离带来的安全问题。美航天系统又于 1984 年颁发了 MIL-STD-1576《航天系统电爆分系统的安全要求和试验方法》以取代 MIL-STD-1512,在 MIL-I-23659C《电起爆的通用规范》及 MIL-STD-322A《电起爆爆炸元件的基本评定试验》中也没涉及热时间常数的测定,但这决不意味着否定 TPT 这种测定方法,只不过说明该方法还有不足之处,不能作为各种型号产品的统一判据。

就测试仪器而言,我国第一代无损检测仪由恒流源、电桥、A/D 变换、放大器和微机组成。近些年来,虽然技术有很大改进,但测试原理上并没有取得突破性进展。

从理论上分析,只要试验所用的电流脉冲适当大,桥丝有温升,还是能得到理想的电热响应曲线。但至今还没有对钝感电火工品进行 1A1W 的安全试验。

3.3 展望

随着电子技术和计算机技术的发展,电火工品发火感度无损检测将有更大的发展前途。矩阵分析、模糊数学、图象识别和人工智能技术的应用,都会使响应

曲线数据处理的方法产生巨大的变化。计算机技术的应用将从根本上拓宽设计的思路。近期内,一是扩大 TPT 技术的应用领域,二是加强电火工品发火性能的单发预报。直接测定单发产品发火所需的能量(即相应发火冲能的发火电流和发火时间),不必用常规的统计方法(如升降法)来测定一批产品的 50% 发火电流(或最大安全电流和最小发火电流)。如果通过 X 射线、 γ 射线或工业 CT 等方法,电火工品的生产将可 100% 检测,可靠度可以大大提高。电火工品检测环境可以实现无爆炸污染。在瞬态脉冲试验的基础上提高无损检测仪的功能,结合数据处理软件,就有可能研制出通用或专用的发火性能预报仪。

参 考 文 献

- [1] Rosenthal L A. Electrothermal characterization of electro-explosive device[C]. Proc. of the 4th Electric Initiation Symposium. Philadelphia USA, 1963.
- [2] Rosenthal L A, Menichelli V J. Nondestructive testing of insensitive electroexplosive devices by transient techniques [R]. JPL Technical report 32-1553, 1972.
- [3] Rosenthal L A, Menichelli V J. Response of EED to impulsive waveforms [C]. Proc. of the 7th Symposium on E&P, Philadelphia USA, 1971.
- [4] Menichelli V J, Rosenthal L A. Fault determination in EEDs by nondestructive techniques [R]. JPL Technical report 32-1553, 1972.
- [5] Menichelli V J, Rosenthal L A. Interrelationship of nondestructive testing to fault determination [C]. Proc. of the 7th Symposium on E&P, Philadelphia USA, 1971.
- [6] Steele B R, Strasburg A C. New methodology for transient pulse testing [C]. Proc. of the 8th Symposium on E&P, Los Angeles, USA, 1974.
- [7] Sipes W J. Thermal response testing of EEDs [C]. Proc. of the 9th Symposium on E&P, Philadelphia USA, 1976.
- [8] Strasburg A C. Methodology for computation of interface parameters of a hot wire explosive device from the electrothermal response analog [R]. SLA 73-1034 Sandia Lab, 1973.
- [9] Menichelli V J. Computerized thermal transient test console [C]. Proc. of 9th Symposium on E&P, Philadelphia USA, 1976.
- [10] Pasadena Scientific Industries. Model 605B thermal transient test set installation and operation. Pasadena, California 91105, 1979.
- [11] Cook J R. Development of transient pulse thermal tester for EED production line [C]. Proc. of the 11th Symposium on E&P, Philadelphia USA, 1981.
- [12] Rosenthal L A. Thermal transient measurements in thin films [C]. Proc. of the 11th Symposium on E&P, Philadelphia USA, 1981.
- [13] Burchett O L, Strasburg A C, Munger A C. Electrothermal response testing of EED with electrically conducting explosives [C]. Proc. of the 7th International Pyrotechnics Seminar, 1980.
- [14] Davey C T, Heffron J F. Electrothermal analytical response inspection of electroexplosive devices [R]. AD A112 328, 1981.
- [15] Davey C T, Heffron J F. Digital analysis of electrothermal parameters of electroexplosive devices [C]. Proc. of the 15th international Annual Conference of ICT, Karlsruhe Germany, 1985.
- [16] Taylor J G. Thermal property determination for bridgewire ignition modeling [C]. Proc. of the 12th Symposium on E&P, San Diego, California, USA, 1984.
- [17] Meeting notice and call for papers. 15th Symposium on explosive and pyrotechnics, 1994. 16th Symposium on Explosive and Pyrotechnics, 1997.
- [18] Leeuw M W, Bal E A, Prinse W C. Parametric analysis of the reliability of igniter systems - PARIS [J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(6).
- [19] Oarga G H, Cepisca C, Grigorescu S D. The automatic testing of the electrothermal characteristics of high voltage fuses [J]. Cucerarile ICPE, 1995(1-2).
- [20] 胡学先等. 电火工品电热起爆的数学模型(一) [J]. 火工品, 1979(1): 22 ~ 57.
- [21] 胡学先等. 电火工品电热起爆的数学模型(二) [J]. 火工品, 1980(1): 27 ~ 53.
- [22] 胡学先, 王道有. 电火工品电热参数的测定 [J]. 兵工学报·火化工分册, 1984(1): 16 ~ 24.
- [23] 胡学先, 朱玉. 用无损试验技术对电点火器进行感度分类的新方法 [J]. 兵工学报·火化工分册, 1985(3): 1 ~ 5.
- [24] Hu Xuexian, Zhu Yu. The application of transient pulse testing in aging evaluation of EEDs [C]. Proc. of the 13th Symposium on E&P, Hilton Head Island, South Carolina, USA, 1986.
- [25] 杨鸿春, 胡学先. 电火工品性能预报的探索 [J]. 火工品, 1992(3): 14 ~ 19.
- [26] Hu Xuexian. A search of the nondestructive inspection of EED [C]. Proc. of the 15th Symposium on E&P, Philadelphia USA, 1985.

- delphia USA, 1994.
- [27] 胡学先, 蒋罗珍. 电雷管的无损检验[J]. 炸药与爆破, 1993(1): 1~4.
- [28] 胡学先. 提高工业电雷管发火电流精度的方法[J]. 爆破器材, 1996(4): 16~19.
- [29] 张福印. 电火工品瞬态脉冲试验的发展和今后趋势[J]. 火工品, 1985(4): 12~23.

Prospect of Nondestructive Inspection of Firing Sensitivity of EED

HU Xue-xian, JIANG Luo-zhen

(Huainan Institute of Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The basic principle of transient pulse test of EED and the development history of nondestructive inspection of the firing sensitivity of EED are briefly reviewed. It is recognized that this kind of non-destructive test so far is still a statistic method; the further necessity is to develop a technique being able to individually forecast the property of EEDs and, therefore, the related instrumentation should concurrently be developed.

Key words: EED; firing sensitivity; nondestructive inspection; transient pulse test

(上接第 78 页)

- [7] Kosowski B M et al. New processing aid and emulsifier for energetics [C]. The 27th ICT, 1996, Karlsruhe.
- [8] Salyes D C. Method of generating crosslinking sites on the surface of ammonium perchlorate in solid interceptor propellant [P]. USP 4 708 754, 1987.
- [9] 谈景煜. 高燃速丁羟推进剂配方研究[J]. 固体火箭技术, 1993(3): 59~64.
- [10] 肖金武. 提高丁羟高燃速推进剂低温力学性能研究: [硕士学位论文][D]. 航天工业总公司, 1995.
- [11] Braun J D et al. Gossypol an abundant, low-cost iron deactivator, pot-life extender, and processing aids for HTPB propellants [P]. USP 3 953 260, 1976.
- [12] Graham P. Evaluation of potential propellant pot life extenders. AIAA 78-123, 1978.
- [13] 唐汉祥. 苯乙烯对推进剂力学贮存性能的影响研究[J]. 推进技术, 1988(3): 50~54.

Processing Aids Used in Manufacturing Solid Propellants

LI Hong-xu

(Red Star Institute of Chemistry, Xiangfan 441003, China)

Abstract: The processing aids used in manufacturing solid propellants and the principle of their choice are reviewed, including rheological property, approximate surface tension, polarity, solubility and reaction kinetics to the propellant ingredients. Some views on the development of processing aids are presented by the author.

Key words: processing aid; processibility; solid propellant