

火药物理性能随温度变化的连续测试方法研究

叶耀坤¹, 丁 锋¹, 严 楠², 程 俊²

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京, 100094; 2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京, 100081)

摘 要: 针对火药随温度发生的物理变化过程难以连续测试的问题, 提出了基于高清数码相机和差示扫描量热仪相结合的方法, 将少量松散或压实火药试样置于坩埚中, 差示扫描量热仪从常温开始以一定变温速率连续升温或降温, 并用高清数码相机拍摄照片连续记录试样物理表现形貌, 以实现对火药物理性能随温度变化的连续测试, 为火药的安定性分析提供了新途径。

关键词: 火药; 物理性能; 连续测试方法; 温度适应性

中图分类号: TJ450.6 文献标识码: A

Study on Methods of Continuous Testing Pyrotechnic Composition's Physical Properties

YE Yao-kun¹, DING Feng¹, YAN Nan², CHENG Jun²

(1. Beijing Spacecraft Design Department, Beijing, 100094; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: In order to find a solution to continuously test the physical varying process of pyrotechnic composition with temperature change, a method based on the using of digital cameras and differential scanning calorimetry (DSC) was proposed, by putting a small amount of loose or compacted composition in the crucible of DSC, which continuously heat and cool the sample from room temperature at a certain temperature rate, and taking pictures with high-definition digital camera to record the physical appearance of the samples. The method achieves the purpose to test the physical properties of pyrotechnic composition varying with the temperature continuously, as well as provides a new way to analyze the stability of the pyrotechnic composition.

Key words: Pyrotechnic composition; Physical properties; Continuous testing method; Temperature adaptability

火药是火工品专用的特种含能材料, 它的作用是接受火工品换能元件给出的微弱刺激能量, 发生快速化学反应, 释放燃烧、爆燃或爆炸能量, 使火工品实现点火、传火、起爆、传爆、延期、作功以及烟火效应, 被广泛应用于飞船、卫星等航天器的姿态控制、分离与解锁、压紧与释放等机构中^[1-2]。火药是一类最敏感的炸药, 具有高能量密度、强自行活化和自供氧体系, 属于亚稳态物质, 在外界很小能量刺激下, 就能够发生爆炸反应^[3-4]。通常火药化学反应能量输

出有 3 种形式, 即爆轰型、燃烧型和气动力作功型。

对于过去研制的火药作功装置, 一般经历极限温度在 60 范围内。随着航天技术的迅速发展, 深空探测器开始面临 100 以上深空环境温度, 因此, 深空探测器对火药作功装置提出了更高环境适应性要求。对于火药燃烧作功装置而言, 火药的任何变化都关系探测器任务的成败, 因而关于火药的物理性能和化学性能随温度的变化过程研究就很重要。

目前, 火药的化学性能随温度变化的情况可以通

过差示扫描量热仪 (DSC) [5-7] 等设备测试, 但物理性能随温度变化情况尚无成熟测试方法, 主要是由于火药独特的爆炸、燃烧特征, 为实验人员在测试带来一定的危险性^[8]。因此, 如何安全、简单、有效地测试火药物理性能随温度变化情况, 成为一个技术难点, 也是一个迫切需要解决的问题。

1 现有测试方法分析

现有连续测试法主要是通过差示扫描量热仪 (DSC) 连续检测火药随温度的分解反应情况。如图 1 所示, 差示扫描量热仪主要由盖子、坩埚、加热块、热电偶组成。实验过程为: 称取少量试样和参比物, 轻放于坩埚中, 并盖上盖子, 打开差示扫描量热仪 (DSC) 电源, 加热块按照预先设定的变温速率 5 /min 给试样及参比物加热或降温, 热电偶测试试样及参比物的温度并反馈显示在 DSC 仪器的终端显示界面上, 连续监测试样随温度的分解反应情况^[7]。

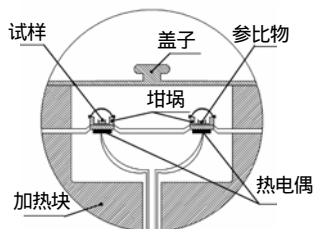


图 1 利用差示扫描量热仪检测火药随温度变化原理
Fig.1 The method to test the variety of pyrotechnic composition with temperature by DSC

其基本原理是在 DSC 仪器预先设定程序升温或降温下, 测量输入到试样和参比物的功率差与温度的关系, 当试样和参比物之间出现温度差时, 它不是直接记录下这一温度, 而是通过功率进行补偿, 在试样和参比物的温度差为零的条件下, 将补偿的功率记录下来, 并在 DSC 仪器终端显示界面上显示试样的热流率随温度变化曲线。热流率表示试样吸收和放出热量的速度, 以此监测试样品的起始分解温度和起始分解时间、最大分解温度和峰温时间等化学性能随温度变化情况。因此, DSC 热曲线图中, 峰对基线的偏离是以热流率表示的吸收和放出热量的速度。此种方法主要用于测试火药的化学性能随温度变

化情况。对于深空探测器中的火药做功装置而言, 不仅需要检测火药的化学性能随温度变化情况, 还需要观测火药的物理性能随温度变化情况, 而 DSC 法仅能反映化学性能随温度的变化情况。

2 新测试方法设计

为了从物理表观形貌角度测试火药随温度的连续变化情况, 本研究设计一种新的火药物理性能随温度变化连续测试方法, 其原理是: 敞开 DSC 仪器中置放试样的盖子, 将少量火药试样置于坩埚中, 用 DSC 仪器从常温开始以一定变温速率连续升温或降温, 并用高清数码相机拍摄照片, 记录试样物理表观相貌, 以此连续测试火药随温度发生的物理变化现象。该方法的原理如图 2 所示。

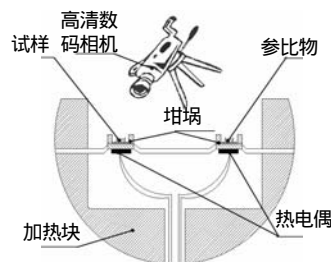


图 2 火药物理性能随温度变化的新测试方法原理
Fig.2 The new method to test the physical changes of pyrotechnic composition under different temperature condition

该方法实施步骤如下:

(1) 实验前, 将差示扫描量热仪的盖子敞开, 并将装有火药试样和参比物的两个坩埚均敞开, 称取 0.5mg 火药试样和等量参比物轻放于敞开的坩埚中, 既可以使火药试样处于被高清数码相机监测状态, 也可以保证火药试样和参比物处于相同的热环境, 不影响 DSC 仪器准确测试火药的起始分解温度和起始分解时间、最大分解温度和峰温时间等热力学参数; 然后将 DSC 仪器和高清数码相机一起尽可能放置在密闭空间环境内, 保持无通风状态, 保证火药试样及参比物的热环境严格按照 DSC 设备仪器预先设定的升温速率升温或降温速度降温。设定火药试样的起始加热温度和结束加热温度, 火药试样经历的最高温度要比药剂的爆发点至少低 30 , 最低温度不限, 以保证实验人员的安全。

(2) 火药试样应分为松散、压实两种状态进行实验,通过测试松散火药试样来反映药剂本身性能随温度变化情况,通过测试模拟火工装置中压实状态的火药来反映火工装置随温度变化情况。对于松散状态,火药试样的最佳质量为 0.5mg。对于压实状态,火药的装药方法及药量应根据火工装置的实际情况而定,一来可以准确测试火药物理性能随温度变化情况,二来可以准确模拟测试火工装置内部装药物理性能随温度变化情况。

(3) 实验时,将 DSC 仪器的加热速率或降温速率设定为 5 /min,加热块按照预先设定的变温速率 5 /min 从起始温度给火药试样和参比物加热或降温,既便于火药试样均匀受热,也给高清数码相机操作人员预留足够拍照时间,热电偶测试火药试样和参比物的温度并反馈显示在 DSC 仪器的终端显示界面上;

(4) 通过 DSC 仪器的终端显示界面监控火药试样的温度状态,每隔 10 通过高清数码相机拍摄一次火药试样的照片,并按顺序记录照片所对应的温度状态,保证连续拍摄的照片与拍摄时温度一一对应。拍摄照片时,应使高清数码相机精准对焦于火药试样,并保持相机的位置、焦距等拍摄状态不变,保证拍摄的照片具有可对比性。

(5) 通过高清数码相机连续拍摄的照片,对比分析火药的颜色、体积、颗粒大小等物理性能变化情况,从物理性能角度测试火药性能随温度变化情况。

(6) 通过 DSC 仪器测试的热分解曲线,分析火药的化学性能变化,从化学性能角度测试火药性能随温度变化情况。由于该种方法的测试设备不可能放在绝对的密闭空间环境内,其化学性能测试结果可能会存在一定偏差。

综上所述,本方法简单易行,只需具备高清数码相机和差示扫描量热仪两种设备即可,测试结果以物理性能测试为主,化学性能测试为辅。

3 新方法应用案例

基于火药物理性能随温度变化的连续测试方

法,对某航天火工装置中的起爆药^[5-6]进行了测试应用。典型测试结果如下:

(1) 图 3 是某起爆药松散状态连续升温过程物理性能变化的测试结果,从图中可以观测到该起爆药松散状态条件下,在 110 前颜色变化还不明显,到 110 时开始颜色变浅,到 180 时可明显观测到小部分药剂变成棕黄色,到 190 时基本全部变成棕黄色。由此可得出该起爆药松散状态下随温度升高颜色、颗粒大小等物理性能变化情况。

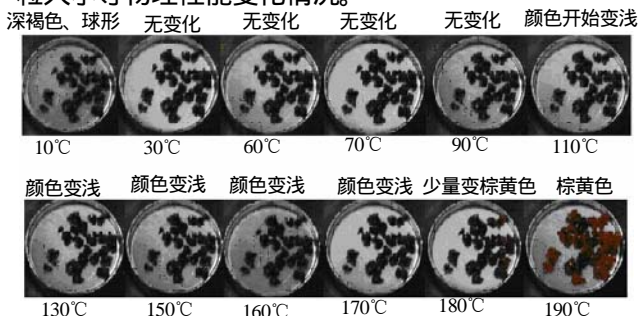


图 3 某起爆药松散状态连续升温过程物理性能变化过程

Fig.3 The physical change of certain loose primary explosive during the process of continuous heating

(2) 图 4 是起爆药压实状态连续升温过程物理性能变化的测试结果,从图 4 中可以观测起爆药在压实状态下,在 110 高温前颜色未变,到 110 时开始出现颜色变化,到 160 时可明显观测到压实药剂表面颜色变成浅棕黄色,到 180 时变成深棕黄色,并发生体积膨胀,出现明显鼓包、裂纹的现象。由此可得出该起爆药压实状态下的颜色、装药密度、表观形貌等物理性能变化情况,可间接反映火工装置内部装药随温度变化情况。

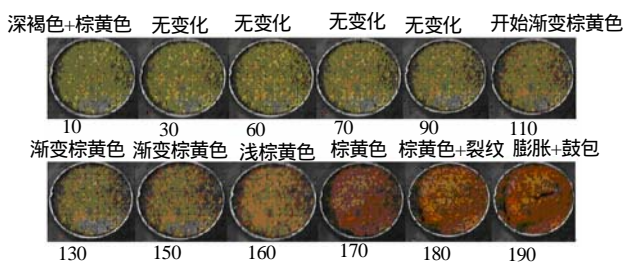


图 4 某起爆药压实状态连续升温过程物理性能变化过程

Fig.4 The physical change of certain compacted primary explosive during the process of continuous heating

(3) 图 5 是基于新方法对起爆药连续升温过程化学性能变化的典型测试结果,从图中可以观测到起爆药在 110 时开始吸热,160~180 时接近吸热峰温,表明药剂从 110 时开始发生了化学反应,在

160~180 时第 1 个化学反应速率达到峰值,由此可得出该起爆药的起始分解温度和起始分解时间、最大分解温度和峰温时间等热力学参数,并从化学角度测试该起爆药的化学性能随温度变化情况。

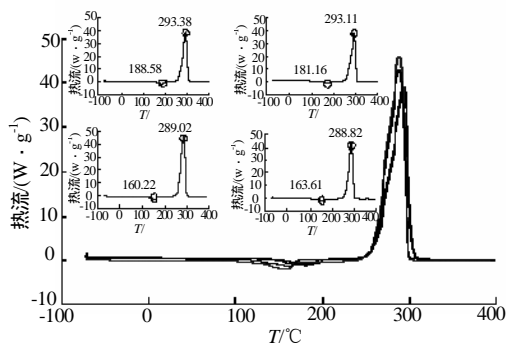


图 5 某起爆药连续升温过程化学性能变化的测试结果

Fig.5 The test result of chemical properties of a primary explosive after continuous heating process

4 结论

本文提出了一种基于高清数码相机和差示扫描量热仪相结合的方法,并应用该方法对某起爆药的物理性能随温度变化过程进行了探索实验,获得了松散、压实两种状态下的连续变化情况。

实验结果表明,该方法不仅实现了对火药物理性能随温度变化的连续测试功能,还兼顾了操作简

单、通用、安全的特性,为火药的安定性分析提供了新途径。

参考文献:

- [1] Joseph F.K., Bridgeport Conn. Method of forming lead styphnate ammunition priming mixture:USP,4029530[P]. 1977-9-23.
- [2] Dilhan D. Laser ignition systems for space applications[C]// Proceedings of 31st International Pyrotechnics Seminar.USA: Fort-Collins (CO), 2004.
- [3] 劳允亮. 起爆药化学与工艺学[M].北京:北京理工大学出版社,1997.
- [4] 劳允亮, 盛涤伦.火工药剂学[M].北京:北京理工大学出版社,2011.
- [5] GJB 772A-1997 火炸药试验方法[S].国防科学技术工业委员会,1997.
- [6] GJB 737.1-1989 火工品药剂真空安定性试验方法[S].国防科学技术工业委员会,1989.
- [7] GJB 5383.11-2005 烟火药安定性和相容性试验 差热分析和差示扫描量热法[S].国防科学技术工业委员会,2005.
- [8] 乌尔班斯基. 火炸药的化学与工艺学[M]. 欧育湘,秦保实,译.北京:国防工业出版社,1976.