

文章编号: 1003-1480 (2021) 06-0050-04

炸药摩擦感度研究和测试方法进展

郭惠丽, 黄亚峰, 金朋刚, 张为鹏, 付改侠

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 为了更深入地理解炸药摩擦感度的本质, 本文归纳分析近年来炸药摩擦感度研究和测试方法的进展。研究表明: 炸药的摩擦感度与分子结构间存在重要的关联性, 摩擦感度的理论研究有助于新型含能材料设计, 并减少实际测试量。炸药摩擦感度的新型测试装置可以使测试结果精度更高、重复性更好。

关键词: 炸药; 摩擦感度; 点火机制; 分子结构; 测试装置

中图分类号: TQ564 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.06.012

Development of the Research and Test Methods on Friction Sensitivity of Explosives

GUO Hui-li, HUANG Ya-feng, JIN Peng-gang, ZHANG Wei-peng, FU Gai-xia

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

Abstract: In order to understand the essence of friction sensitivity of explosives, the developments of research and test methods of friction sensitivity of explosives were summarized and analyzed. There is important correlation between friction sensitivity and molecular structure of explosives. The theoretical study is benefit to the design of new energetic material, and also reduce the test quantity. The new type of friction sensitivity test device can improve the accuracy and repeatability of the test results.

Key words: Explosive; Friction sensitivity; Ignition mechanism; Molecular structure; Test device

摩擦是最常见的外界刺激的形式之一, 由摩擦带来的热也是导致大量事故的一种能量形式。含能化合物设计和混合炸药的摩擦感度是研究者需要重点考虑的因素。影响炸药摩擦感度的因素包括炸药的粒度、晶型、添加剂种类和含量、包覆材料种类及包覆工艺、共晶、测试温度等, 已有大量文献进行了研究和分析^[1-7]。笔者从理论研究和测试方法两个方面总结分析近年来国内外炸药摩擦感度的最新研究成果, 为炸药研发和生产人员提供文献支持。

1 摩擦感度的理论研究

因为炸药分子的结构决定其性质, 所以炸药的摩

擦感度与分子结构间存在重要的关联性。常用的几种感度理论预测方法包括量子化学方法 (QM)、定量构效关系 (QSPR)、分形理论等, 通常使用电子结构、电荷值、带隙能、电子激发能、静电势等分子或晶体特征描述参数, 或者使用反应速率常数、酸碱相互作用、氧平衡等热稳定性参数, 以及粒度分形维数、表面分形维数等颗粒群分形特征量化参数以预测化合物的各种感度^[8]。

目前, 国内外的研究主要集中于对含能硝基化合物的撞击感度进行理论预测, 关于摩擦感度的研究相对较少。研究者发现分子结构、粒径和粒度分布、微观形态以及装药密度与摩擦感度具有明显相关性。例如 HMX 的摩擦感度是粒径的函数, 且变化趋势明显

收稿日期: 2021-04-26

作者简介: 郭惠丽 (1975-), 女, 高级工程师, 从事火炸药科技情报研究。

通讯作者: 黄亚峰 (1978-), 男, 研究员, 从事混合炸药技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (21805223)。

受微观形态的调控, HMX 的 d_{50} 减小, 球形样品的摩擦感度增加, 针状样品的摩擦感度则降低。Wang 等^[9]通过制备不同微观形貌的 HMX 微粒来研究机械感度和分形特征的相关性, 颗粒群表面的复杂程度可量化为表面分形维数 (DS), DS 影响颗粒群在受到摩擦刺激时的热导率。研究表明, 摩擦感度随着 DS 的增加而近似线性增加。根据热点学说, 粒子之间的界面摩擦会引发爆炸, 而爆炸又归因于热传导和热点形成。HMX 的 DS 值越高意味其颗粒群表面越粗糙, 当颗粒之间相互摩擦时, 摩擦产生的热量比热传导辐射的能量要大得多, 导致热量不能及时消散而过度积累, 从而容易引发爆炸, 所以, 采用 DS 这个参数预测 HMX 的摩擦感度是可行的。黄琛鸿^[10]通过对多种炸药的活性指数进行计算, 发现单质炸药活性指数与摩擦感度之间具有明显的相关性, 混合炸药活性指数与摩擦感度呈正向的增长关系。这个预测模型仅能定性地预估炸药的摩擦感度值。Keyhani AK 等^[11]用有限元方法研究 HMX 基 PBX, 研究结果显示高组分弹性及低内部摩擦样品不易点火。Jafari M 等^[12]设计了一种方法, 可以根据分子结构预测铵盐含能粒子的摩擦感度, 相关系数达到 0.905 7。

描述炸药分子或晶体结构的特征参数非常多, 需要对它们进行合理取舍、分类、加和, 明确不同参数对摩擦感度值的贡献, 分清主次影响因素, 同时结合各种统计建模工具和预测算法完善现有的理论, 提高预测精确度。目前摩擦感度的理论研究方法还有待于完善, 需要建立更精确和实用的理论预测模型, 以更精准地预测不同种类、不同形态的炸药的摩擦感度。

2 摩擦感度的新型测试方法

2020 年, 美国圣迭戈国家实验室的研究者^[13]报道了新型的摩擦感度测试仪, 并与现行的凸轮驱动摩擦感度测试仪进行了比较。数十年来, BAM 摩擦感度测试仪 (德国联邦材料研究与测试研究所) 是评估含能材料摩擦感度的最常用设备, 这种测试方法广泛见于多项标准。BAM 摩擦感度测试仪的测试机理如

图 1 所示。

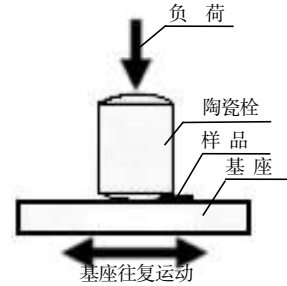


图 1 BAM 摩擦感度测试机理
Fig.1 BAM friction sensitivity test mechanism

测试时将少量样品 (约 10mm^3) 放置于陶瓷盘上, 固定于基座。通过夹具固定的圆形陶瓷栓施加负荷, 负荷可以调整大小, 以 kg 或者 N 表示。当打开开关后, 基座在 1cm 范围内往复运动。通过烟雾、闪光及不同类型的声音等现象来判断样品是否发生了反应。

在此之前设计的摩擦感度仪都是利用连接到凸轮和电机上的往复盘进行测试, 唯一与传统设计偏离的是 OZM 试验机, 其使用“数控步进电机”, 但仍采用凸轮机构。因此, 这种设计仍被称为“凸轮 BAM”。

最近, 美国圣地亚国家实验室的研究者报道了摩擦感度试验机的一种新的驱动机制, 并通过测试几种炸药与传统机制摩擦感度试验机进行了比较, 研究结果对新型摩擦感度试验机的设计具有重要参考意义。这种机器由 Reichel and Partners GmbH 公司制造, 采用程控伺服电机替代凸轮机构和电机, 被称为“伺服 BAM”。伺服机构中设计有“接近传感器”, 采用 TD290-5-5-W 直线运动传感器和 LabView GUI 系统采集数据。试验前进行无含能材料的空白试验。每发样品试验时间为 3s, 采样频率为 5kHz。为限制独立变量, 设计并制造了支架, 以固定直线运动的传感器在试验机上, 保持试验平台运动与传感器轴之间的平行关系。若是非轴向负载可能会造成传感器轴的静摩擦, 数据输出时产生过度噪音。选择不同粒度和形态的 PETN、RDX、HMX、CL-20 和 HNAB 5 种常用炸药, 在这两种试验机上进行测试, 由同一操作员在同一位置完成所有测试, 并采用高速相机记录整个测试过程。测试前所有试样于 65°C 真空干燥至少 48h。试样的粒度分析结果见表 1。统计分析采用连续 20 发不燃不爆的 TIL 法^[14], 既在一定级别能量刺激下, 连续

20 发样品没有响应，而临近的下一个级别能量刺激下，20 发样品中至少有 1 个样品发生响应。不同负载水平下两种 BAM 测试的运动位移结果见图 2。

表 1 粒度分析结果

Tab. 1 Particle size analysis results

材料	平均粒度/ μm	中等粒度/ μm
PETN	51.71	45.50
RDX	33.10	31.17
HMX	5.78	4.64
CL-20	21.27	17.37
HNAB	184.00	177.30

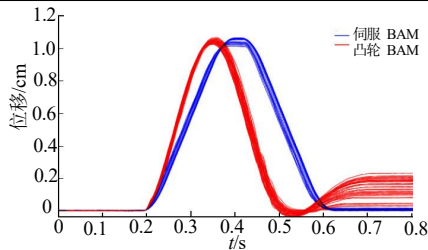


图 2 不同负载水平下在两种 BAM 测试的位移
Fig.2 Displacement in both BAM test under different load levels

由图 2 可以看出，对于不同的负载水平，位移左侧几乎没有区别，差异主要在右侧。凸轮 BAM 的设计使得样品盘经常相对于运动的起始点滑移，要求操作人员用工具手工复位电机室内样品盘。根据图 2 获得的速率曲线见图 3。由图 3 可见速率曲线近似于正弦曲线，在大约 0.52~0.72s 之间，滑移仍有可能发生。伺服 BAM 得到的运动曲线远比凸轮 BAM 得到的曲线光滑，在任何负载下均无滑移，因此测试结果的重复性更好。另外，伺服 BAM 测试效率更高，操作人员不再需要复位样品盘，并且伺服 BAM 的测试样品盘的运动持续时间增加了 0.1s。此外，凸轮 BAM 几乎没有明显的恒定速率阶段，而伺服 BAM 相对稳定，有相对长的恒定速率阶段。

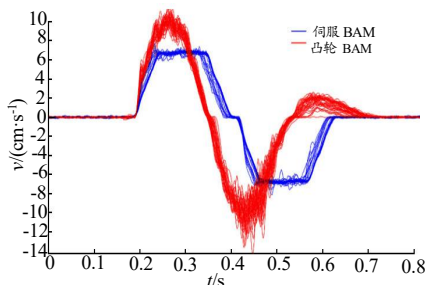


图 3 不同负载水平下两种 BAM 测试的速率曲线
Fig.3 Speed curve in both BAM test under different load levels

凸轮 BAM 峰值速率为 324N 负载时的 15.95m/s，而伺服 BAM 峰值速率为 252N 负载时的 9.53m/s。据文献[15]，采用 BAM 方法和 ABL 方法测试摩擦感度时，样品盘/砧的相对运动速率对测试样品的刺激水平

可能有显著影响。因此，采用伺服 BAM 测试应该更合理，与传统、法定凸轮 BAM 摩擦感度试验机相比，不仅消除了凸轮 BAM 摩擦感度试验机的滑移现象，而且对样品施加的摩擦刺激重复性更好，并可提高工作效率。由于最大运动速率不同造成的刺激差异，伺服电机驱动 BAM 摩擦感度试验机得到的摩擦感度测试结果略低于凸轮 BAM 摩擦感度试验机。

常双君等^[6]设计了一种新型摩擦感度测试装置，测试原理见图 4，采用 50%和 10%发火点表征不同炸药的摩擦感度，区分度较高。

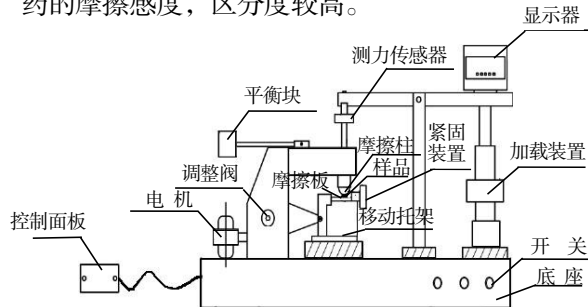


图 4 百分度法摩擦感度测试装置示意图
Fig.4 Schematic diagram of the friction sensitivity test device of the percentile method

邵明旺等^[17]设计了摩擦感度新型测试装置，测试原理见图 5，其特点是对样品施加的纵向压力连续可调，因此测试得到的数据更连续，更便于分析。采用响应面（Response Surface Methodology, RSM）模型法与摩擦感度试验相结合获得固体推进剂摩擦感度模型，对模型方差、误差以及残差分布进行分析，证明了该模型非常准确、可靠。

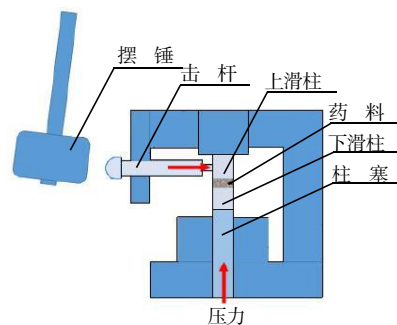


图 5 响应面模型法摩擦感度测试装置示意图
Fig.5 Schematic diagram of the friction sensitivity test device based on the response surface model method

3 结论及建议

通过对文献资料进行分析，可以得出以下结论：

(1) 大量研究者通过感度理论预测方法研究了炸药的摩擦感度,揭示了炸药的摩擦感度与分子结构间存在重要的关联性。

(2) 研究者设计了一些炸药摩擦感度的新型测试装置,并开发了新的测试方法,其中有些装置和方法得到的测试结果重复性更好、准确度更高,可以更可靠地反映炸药的摩擦感度。

相对撞击感度的研究,研究者对火炸药摩擦点火机制研究相对匮乏,对火炸药摩擦感度测试新方法的研究也相对较少,但新的研究方法对测试装置研发和测试方法改进有一定影响,值得深入研究。

参考文献:

- [1] Damiri S, Namvar S, Panahi H. Micro-seeding and soft template effects on the control of polymorph and morphology of HMX micro particles in solvent-antisolvent process[J]. Defence Technology, 2017, 13(7): 392-396.
- [2] Gao H, Hou X T, Ke X, et al. Effects of nano-HMX on the properties of RDX-CMDB propellant: higher energy and lower sensitivity[J]. Defence Technology, 2017, 13(5): 323-326.
- [3] Gupta S, Kumar P D, Sharma S, et al. Pressurized nozzle-based solvent / anti-solvent process for making ultrafine ϵ -CL-20 explosive[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(7): 773-783.
- [4] Niu C H, Jin B, Peng R F, et al. Preparation and characterization of insensitive HMX / rGO / G composites via in situ reduction of graphene oxide[J]. RSC Advances, 2017(7): 32 275-32 281.
- [5] Cai Y, Luo S N. Shock response of single crystal and nanocrystalline pentaerythritol tetranitrate: implications to hotspot formation in energetic materials[J]. Journal of Chemical Physics, 2013(139): 164 704.
- [6] Richard H B, Bouma B, Antoine D M, et al. The effect of RDX crystal defect structure on mechanical response of a polymer-bonded explosive[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(3): 484-493.
- [7] Heijden A E, Creyghton Y, Marino E, et al. Energetic materials: crystallization, characterization and insensitive plastic bonded explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2008, 33 (1): 25-32.
- [8] Roman V T, Sharia O, Kuklja M M. Molecular theory of detonation initiation: insight from first principles modeling of the decomposition mechanisms of organic nitro energetic materials[J]. Molecules, 2016, 21(2): 236.
- [9] Wang Y, Song Y, Song D, et al. Dependence of the mechanical sensitivity on the fractal characteristics of octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine particle[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2011, 36(6): 505-512.
- [10] 黄琛鸿, 刘玉存, 袁俊明. 炸药摩擦感度与活性指数的关系研究[J]. 科技信息, 2013(16): 136.
- [11] Keyhani AK, Kim S, Horie Y, et al. Energy dissipation in polymer-bonded explosives with various level of constituent plasticity and internal friction[J]. Computational Materials Science, 2019(159): 136-149.
- [12] Jafari M, Keshavarz MH, Joudaki F, et al. A simple method for predicting friction sensitivity of quaternary ammonium-based energetic ionic liquids[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(6): 568-573.
- [13] Phillips JJ, Ching ML. A comparative study of two BAM designs for friction sensitivity testing of explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(4): 628-636.
- [14] Warner K F, Sandstrom M M, Brown G W, et al. ABL and BAM friction analysis comparison[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015, 40(4): 583-589.
- [15] Recommendations on the transport of dangerous goods: manual of tests and criteria[Z]. United Nations, New York and Geneva, 2015.
- [16] 常双君, 徐俊杰, 陈三丽, 等. 用加载力表征不敏感单质炸药摩擦感度的研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(6): 2 218-2 222.
- [17] 邵明旺, 王建, 乔晓林, 等. 基于响应面中心复合设计的固体推进剂摩擦感度理论[J]. 含能材料, 2019, 27(6): 509-515.