炸药缓慢加热条件实验技术进展

徐洪涛, 金朋刚

(西安近代化学研究所,西安 710065)

摘要:为降低炸药装药意外热刺激起爆后对武器平台、后勤系统和人员损伤的严重程度及概率,适应不敏 感弹药发展过程中对炸药热危险性综合评定的需要,有针对性地分析了以美国为主的炸药和弹药装药慢烤 燃实验相关文献、STANAG 4382 《北约弹药缓慢加热测试标准》调查报告以及西安近代化学研究所开展的 密闭系统的模拟弹慢速烤燃实验研究成果。分析结果发现,尚需解决的问题为 3.3 ℃/h 温升速率条件起源未 知,小型模型实验技术是目前开展的重点,可视化/量化反应状态的实验技术及仿真预测试验反应剧烈程度 的模型研究是发展重点,试验反应剧烈性抑制技术研究是未来的发展趋势。

关键词:炸药;炸药试验标准;烤燃实验 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.09.002 中图分类号:TJ450 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2019)09-0005-13

Development of Slower Cook-off Test for Explosives

XU Hong-tao, JIN Peng-gang (Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: To reduce the damage severity and probability to the weapon platform, logistics system and personnel in accidental thermal stimulation of explosive and to adapt to the need for comprehensive assessment on heat hazard of explosive during the development of insensitive ammunition, this paper focused on the analysis of US based literatures about slow cook-off, STANAG 4382 (NATO ammunition slow cook-off test) investigation report, and research results of slow cook-off of Xi' an Modern Chemistry Research Institute. Analysis results show that the origin of 3.3 °C/h temperature rise rate is unknown, the small model test is a main focus in the development of cook-off, the experimental technology of visualizing or quantifying the reaction state and the simulation prediction study on reaction severity are the developing priority, the suppression technology study of reaction violence is a developing trend.

KEY WORDS: explosives; test standard of explosives; cook-off test

航母用弹药的危险性直接影响航母航空弹药贮运系统设计^[1]。海军大型舰船如航母是海军主要的作战力量,装载着大量的各式弹药。在舰船意外发生火灾时,有可能导致舰船弹药库或飞机挂载的弹药发生爆炸,导致舰船部分或整体失能,甚至彻底摧毁和沉没。1967年7月29日上午,福莱斯特号航空母舰(USS Forrestal CV-59),美国海军的第一个"超级航母",在越南附近准备进行轰炸任务,杂散电子信号导致

F-4B"幻影"舰载战斗机的阻尼火箭发射,撞击 A-4"天 鹰"飞机外部油箱后,造成甲板火灾,引发连锁爆炸, 甲板炸穿,导致燃烧的燃料溢流到甲板下机库,火灾 一直持续到第二天,造成 134 名船员死亡,161 名船 员受伤,21 架飞机损毁,39 架飞机损伤,航母修缮 耗时两年耗资 7200 万美元,事故现场如图 1 所示^[2]。 航母用弹药的危险性直接影响武器平台的正常使 用,所以要求经过不敏感(IM)测试与评估。航母上

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-04-18 作者简介: 徐洪涛(1982—), 男,副研究员,主要研究方向为炸药安全性能评估。



图 1 福莱斯特航母爆炸事故

油料及弹药相对集中,其中由于火灾导致重大事故最 多。从 1966 年 10 月到 1988 年 11 月,在美国航空母 舰上发生了 4 起涉及火灾导致弹药爆炸的事故,202 名船员和飞行员死亡,单价耗资超过 2000 万的飞机损 毁 96 架,因此热刺激一直是不敏感测试与评估的重 点。1979 年詹姆斯·沃特金斯上将创造了"不敏感弹药" 的名称,并签署了一份海军作战要求文件,呼吁开发 和利用"不敏感高爆炸药",目标是制作"不敏感军械"。

不敏感测试与评估内容也随着技术的发展不断 演变,直到目前,美国主要研究机构对于炸药缓慢 加热条件实验技术,STANAG 4382《北约弹药缓慢 加热测试标准》争议极大^[3]。国内很多机构直接引用 STANAG 4382 的技术参数开展研究,STANAG 4382 只是不敏感测试与评估手段,而非研究手段,且烤试 验标准(STANAG 4382)技术参数已被质疑与讨论^[4-5]。

目前国内通过炸药小药量慢烤评估试验(或整弹 慢烤试验),根据试验现象,对照 STANAG 4382,得 出满足 IM 要求的结论。美国是通过模型实验,获取 特征参数,构建样品尺寸、形状与临界温度的关系式, 然后通过时间与临界温度函数,计算给定形状尺寸弹 药从 82 ℃(180 °F)开始到爆炸的时间超过 500 天 的技术信息(例如 2000 磅 MK84 炸弹),通过专门 IM 审查评估程序,得出满足 IM 要求的结论^[6]。

STANAG 4382 文件规定,测试进行 2 次。2 次 测试,即使产生相同的结果,也没有统计学数据支持, 无法确保下次试验产生同样的结果。要通过怎样的研 究,才能保证弹药慢速烤燃下的 IM 特性。为此文中 对慢烤试验标准、烤燃实验等相关研究发展进行介绍。

1 烤燃实验

1.1 相关标准

在 20 世纪,美国海军航空母舰发生了多起由于 火灾引起的弹药意外爆炸事件^[7],损失惨重。为此 1964 年美国发布了 WR50《海军武器要求空中、水面 和水下发射武器的弹头安全性测试》(快速烤燃实验-FCO、慢速烤燃实验-SCO、子弹射击试验-BI),其中 慢速烤燃制定了 3.3 ℃/h(6 °F/h)温升速率^[8]。1982 年,WR-50 改版为 DOD-STD-2105(海军)《非核弹 药危险性评估标准》。1983 年,詹姆斯·沃特金斯上将 到五角大楼担任海军作战部长,启动"不敏感弹药计 划"。1984 年,OPNAV 建立了 IM 的政策和程序, NAVSEA 发布技术要求(仅限高爆炸药和推进剂)。 1985年,NAVSEA在NAVSEAINST 8010.5《不敏感 弹药的技术要求》^[9]发表 IM 技术要求,由爆炸物发 展方案更名为不敏感弹药高级开发方案,重点改为考 虑完整弹药,而不只是高爆炸药试验(FCO、SCO、 MBI、FI、SD)。1991年,制定了 MIL-STD-2105A (海军)IM 技术要求。1994年,MIL-STD-2105B 成 为联合服务需求文档。1995年,北约确定 IM 政策和 技术要求。2003年,美国整合了 MIL-STD-2105C 北 约的技术要求(由个体 STANAG 测试要求组成)^[10]。 2011年,发布了 MIL-STD-2105D。

WR-50 的 SCO 测试中,规定弹药环境(空气) 温度以6°F/h的速率上升,直到炸药发生反应或弹药 结构发生破坏。在 WR-50 及 DOD-STD-2105 (海军) 中, SCO 测试为安全参考测试, 没有评判标准(合格 与否),根据武器系统爆炸物安全审查委员会 (WSESRB)的建议,确定弹药是否使用。在 NAVSEAINST 8010.5及MIL-STD-2105A 和随后的标 准中, SCO 测试的通过判据为在 6 °F/h 的加热速率 下,弹药不发生比燃烧(类型 V)更严重的反应。 MIL-STD-2105B 成立 IM 测试组,包含 SCO。 MIL-STD-2105C 中的 SCO 要求与美国 TB 700-2《弹 药和爆炸品危险性分级程序》和 UN—Manual of Tests and Criteria《联合国橘皮书/危险货物建议书》的缓慢 升温试验一致。MIL-STD-2105D 及在 MIL-STD-2105A 基础上编制的北约 STANAG 4439《不敏感弹 药研制、评估和试验政策》与配套指导文件北约 AOP-39《不敏感弹药研制、评估和试验指南》中, 一直延续了 WR-50 中 SCO 的设定。

综上相关标准,对弹药慢速烤燃评估试验方法的 测试要求总结如下。

1) SCO 目的是获取缓慢加热条件下弹药的反应 时间和反应状态,在发生危险前,爆炸物的主要成分 达到危险温度(自加速反应),随后反应 HD(危险性 级别)与较高速度升温条件下的试验结果更猛烈。

2)试验对象必须在特定的工装中或结构件中 (要有代表性),高能部分(炸药)可以单独测试, 也可以将含能构件(火箭发动机、弹头)进行测试。

3)测试用一次性加热箱,要求能在预定的温度 范围内按规定的温度进行升温,通过循环地加热空 气来加热被测对象。围绕测试对象,空气的温度应 尽可能均匀,加热箱要减小限制,避免加大反应剧 烈程度,最好有窗口允许视频监控,测量并记录多 点空气温度。

4) SCO 确定了 3.3 ℃/h(6 °F/h) 温升速率。

对美国及北约 SCO 的相关标准进行分析发现, 这些标准均是法律、政策和程序的开放性公开文件。 主要用于帮助政府、军队及北约成员国间,按 IM 特 性采购及使用 IM 弹药,提高使用方对 IM 弹药的信 心,方便决策者做出选择,通过标准可以减少或消除 重复检测降低成本。因为在没有标准化的测试中,很 难比较不同测试场所弹药 SCO 结果,所以 IM 测试中 SCO 标准化的最大价值是规定了试验条件。

1.2 STANAG 4382 标准与弹药慢速烤燃 IM 特性

STANAG 4382 标准使用最为广泛,北约采用 STANAG 4382 标准作为 SCO 的参考文件设计试验。 各机构试验装置如图 2-图 12 所示。



图 2 中国湖海军空战中心 (美国)



图 3 奎奈蒂克公司 (英国)



图 4 梅彭联邦国防军武器和弹药技术中心(德国)



图 5 陆军亚利桑那尤马试验场 (美国)



图 6 防卫厅爆炸物中心(芬兰)



图 7 奈克斯特公司(法国)



图 8 蒙特利尔通用动力军械与战术系统公司(法国)



图 9 阿丽亚娜发射公司(空中客车公司与赛峰集团合资,法国)



图 10 宇航系统公司(英国)



图 11 国防部 NLD/KCW&M(荷兰)



图 12 陆军红石测试中心 (美国)

从上述实验操作过程上看,试验对象多是弹药或 有装药的战斗部,为验证性工程试验。从北约的标准 方面来看,缓慢加热试验在 STANAG 4439、STANAG 4382 及 AOP-39 三个文件中都有定义,UN—Manual of Tests and Criteria 7(h)1.6 分级中也有缓慢加热试 验,见表 1。

通过表1可知,联合国橘皮书7(h)对应的待测样 品为包装件,其使用目的是考量物品运输安全;在北 约STANAG4382中,考量的是待测样品何时最危险, 所以待测样品的状态由国家主管部门商定。因此北约 STANAG4382、AOP39ed.3及UN7(h)中,所考量 的是特定状态待测样品在特定场所(环境)下的响应 评估,而非SCO条件下不敏感的控制技术评估(所 述控制技术多指装填较高分解温度的炸药、炸弹热环 境下的绝热技术、弹体泄压技术等,绝热技术多指弹 壁刷涂有遇热膨胀发泡型涂料、延缓升温过程,弹体 泄压,如在引信端添加低于炸药分解温度的熔化性螺 纹衬套,其熔化后,由于弹体压力将引信突出,使弹 药仅像燃料燃烧)。

国军标关于炸药烤燃实验采用标准"烤燃弹法", 均引用老版 GB/T 14372《危险货物运输爆炸品认可、 分项试验方法和判据》方法中的(2b)烤燃弹试验, 目前 GB/T 14372—2013 中,(2b)为克南试验,烤燃 弹试验已经废止。GB/T 14372—2013 中,(6f)EIS 及 11(d)缓慢升温试验,试验目的是规范运输的,试验升 温速率为 3.3 ℃/h,升温上限为 365 ℃,对于试验药 量超过 200 g的样品装药壳体强度无相关要求。GJB 8018—2013《地地常规导弹整体爆破弹头试验规程》 中有一项慢烤试验,试验目的是评估装药安全性的, 试验升温速率为 1 ℃/h,升温上限为 400 ℃,对壳体 强度无相关明确要求。国内标准未提及空气循环加热 的相关技术信息,对于待测样品的状态确定没有相关 表述,没有后延的审查评估程序。

表 1 STANAG 4382、AOP-39 及联合国橘皮书 7(h)试验的不同

	STANAG 4382 ed.2	AOP 39 ed.3	UN 7(h)
代替	右		沿右
过程	7H		议有
试验	2		2
次数	2		2
待测	裸露试样或包装件由	裸露试样、包	向准供
样品	国家主管部门商定	装件	包衣什
测试	.曰.		旦.
程序	定		定
升温	2 2 °C /h		2 2 ℃/h
速率	3.3 C/n		5.5 C/II
新办理	在 50 ℃条件下预热		比预测反应涅
沢廷珪	8h或在 50 ℃条件下		店顶砌及应值 审任 5 ℃
価反	达到热平衡		皮瓜50
最高			265 °C
温度			303 C
接受反	不反应武佛战		不反应武牌战
应级别	小区型以燃烷		小区型曳炂烷

在美国,完成慢速烤燃 IM 测试仅使武器厂商的 产品(炸药或武器系统)拿到"IM"签名,属于军方评 估审查的门槛试验。在 20 世纪 80 年代,美海军有军 械危害评估局和钝感弹药审查委员会对真实"IM"进 行审查评估。目前海军是军需评估局(Munitions Reaction Evaluation Board)负责审查评估,空军及陆 军也有相应的组织。评估是基于技术合理性而进行判 断的,对于慢速烤然试验而言,根本原因为试验设计 不是最优及合理的^[4]。对于一些炸药或装药,尤其是 陆基武器,试验表明,一些中间的加热速率更猛烈 的响应^[8]。

2018 年 4 月,北约弹药安全信息分析中心 (MSIAC)专门就慢速烤然升温问题召开研讨会,图 2—12 涉及的研究机构均进行了调查^[11]。会议中对可 能产生 3.3 ℃/h 加热速率的热源进行分析,仅可能是 蒸汽泄露。在一个更详尽的报告中,3个大气压下, 236 ℃蒸汽泄露会扩展为 165 ℃的过热蒸汽,在经历 过对流加热,样弹逐渐接近 165 ℃。45 h 后,一个 450 kg 的样弹会被加热到 164 ℃,该温度上升速率 近似 3.3 ℃/h^[5]。2018 年北约弹药安全信息分析中心 (MSIAC)组织的研讨议题跟一份关于慢速烤然的 联合调查报告有关,这份报告署名发起单位为海军空 战中心、海军军械安全和安保中心、陆军军械研究 发展与工程中心、空军研究实验室、桑迪亚国家实 验室。报告的重要议题是慢速烤燃加热速率是多少 时,对样品而言是最坏的情况^[3]。其本质问题是 WR50 中规定的 3.3 ℃/h 升温速率需求起源尚不清楚^[4]。根 据美海军的调查,对 3.3 ℃/h 升温速率科学的解释 是,这种条件近似实验室等温加热,采用烘箱就可 以获得类似的加热条件,而无需耗费更多就可以开 展试验^[12]。

目前 STANAG 4382 标准属于框架标准,出发点 是便于不同机构执行,减少重复试验,对炸药及装药 设置 IM 门槛,便于使用方(军方)审查评估。图 2 —12 所示涉及试验有些较为共性的试验信息,如加热 箱为绝缘一次性物品,入口与出口温差不超过 5℃, 加热箱与被测样之间空气间隙最小为 200 mm 等没有 在标准中被规定。在此标准下获得的试验结果没有统 计学数据支持,无法确保下次试验产生同样的结果。 美、英、法等国有专门机构及评估程序对 IM 特性进行 审查评估,其基本原则是测试设计与试验是最优及科学 的,基于技术上合理给出审查结果。国内 GB/T 14372 —2013 及 GJB 8018—2013 等标准,其使用目的也是 解决危险品运输与装药安全性(特定工况条件下的)。 STANAG 4382 无法保证弹药慢速烤燃 IM 特性, "最坏的试验情况"需要很多类型炸药慢速烤燃实验 研究来确定。

1.3 炸药慢速烤燃的试验

慢速烤燃实验(SCO-slower cook-off)一般采用 为最基础的工程实验装,如图 13 所示,通过壳体破 坏情况判断实验结果。实验通过较为缓慢的加热速率 模拟试样长时间间接暴露在热源下的环境状况。在大 多数情况下, 慢速烤燃(试样内部中心开始热累积, 产生自持自加速反应)与快速烤燃(反应发生在试样 表面)相比会产生更严重的后果。对于军械系统,试 验过程可以获得更多的显著信息,也可以看作是大型 稳定性与兼容性测试的形式。多年来, 慢速烤燃主要 由三个规格:超小型(样品量最大为 0.02 kg)、小型 (样本量最高为 0.7 kg)、大型(全尺寸武器系统)。 这不是一个正式的关于烤燃实验的定义,就如同没有 "慢"、"快"升温速率的公认定义。在过去几十年间, 全球很多国家开展广泛而分散的相关研究,文中主要 介绍美国相关机构的研究,及与在此基础上开展的研 究工作。因为美国是最早开始进行烤燃实验相关研究 的,并持续进行技术改进[13]。图 13 为国内外一般研 究机构所使用的烤燃弹烤燃实验装置,测温及控温热 电偶放置于烤燃弹外壁,通过电炉丝或加热套进行加 热,采用钢制壳体,两端螺纹端盖密封。图 14 采用 不同壳体约束强度、螺纹端盖密封强度获取的不同试 验结果。



图 13 SCO 试验装置



图 14 4 种烤燃实验结果

目前,工程烤燃实验对相同尺寸、不同试样在特定约束条件下的安全性可以进行相对比较,但是对于外推给定尺寸、几何结构的试样烤燃结果存在一定难度。美国海军炸药接受准则(NAVSEAINST8020.5C)要求^[6],对于给定的形状和尺寸,炸药临界温度应大于82℃(180°F),从82℃开始到爆炸的时间超过500天,装药尺寸一般按2000磅的MK84炸弹计算。 其计算方法需要特定条件下的临界温度、表观活化能、指前因子、尺寸、自加热反应发热量、比热、形 状因子、热扩散系数等多方面参数,慢速烤燃实验(烤 燃弹法)目前还不能给出所述的各项参数。获取这些 参数的改进慢速烤燃实验应是可借鉴及发展的。

19 世纪 70 年代初到 90 年代末,对优化烤燃实 验装置,改进实验条件的研究进入了一个新阶段,先 后出现了各类改进慢速烤燃实验。如一维热爆炸实验 (ODTX)、小型烤燃弹实验(SCB)、超小型烤燃弹 实验(SSCB)、可变约束下的烤燃实验(VCCT)和 改进的可变约束 TNO 烤燃实验等几种实验形式。

1970年在劳伦斯利弗莫尔(Lawrence Livermore National Laboratory)由 E. LEE、R. Mcguire 等人^[14] 建立了一维热爆炸试验(ODTX-One Dimensional Time to Explosion)。1993 年 Fisher 和 Benham 增加活 塞组件,通过 VISR 测试了试样反应时驱动活塞的速 度。活塞组件及底座采用 4340 钢, 用环路光纤的断 裂生成用于的的触发信号。2000年进行了技术更新, 主要包括温度检查与控制、快速装样、外部增加(液 压)压力传感器。2014年引入了压力测量单元 (P-ODTX),采用准静态 Kulite 应变式压力传感器 (型号 XT-190-500A),测量加热阶段压力的缓慢变 化,以1Hz的频率进行记录。2016年引入在线气体 分析能力(C-ODTX)^[15],装置控温范围为 100~400 ℃, 控温精度为 0.2 ℃。装置组合以 20.7 MPa 的水压进行限位,装置外壳破裂压力为 331.2 MPa, 被测试样约为2g,限制在一个直径12.7 mm的球体 中,目前已经成为模型实验的基础[14]。此实验可初步

获取表观活化能、指前因子等热分析参数。试验系统 如图 15 所示,样品及仿真模型如图 16 所示。

1980 年在海军武器中心(Naval Weapons Center),由 Pakulak、Cragin 等人^[7,16]建立了基于见证板的变形情况,评价烤燃实验反应剧烈程度的小型烤燃 禅试验(SCB-Small Scale Cook-Off Bomb)。海军武 器中心小型烤燃实验装置如图 17 所示。



图 15 ODTX 试验系统



图 16 样品及仿真模型



图 17 海军武器中心小型烤燃实验装置

SCB使用 10 mm×10 mm×0.3 mm 厚扁平的镍铬 合金带作为热电偶,试样装在一个体积为 400 cm³, 壁厚为 3 mm 的钢容器内。考虑到试样的热膨胀,在 试样上端预留 10 mm 高度的空间,见证板是直径为 135 mm、厚度为 12.7 mm 的钢板。多以 12 ℃/min 升 温速率,从 25 ℃加热至 400 ℃。此技术广泛应用于 美国(劳伦斯利弗莫尔国家实验室、桑地亚国家实验 室、海军面武器中心)及其他国家(荷兰的 TNO-PML、 澳大利亚 DSTO),后续被联合国《危险货物运输》 橘皮书采用。有些文献只取(Small Scale Cook-Off Bomb)的首写字母,将上述装置称为 SSCB,此实验 装置可获取临界温度、热扩散系数等计算参数。

1983年在美国海军武器中心,由 Pakulak、Cragin 等人建立了超小型烤燃弹实验 SSCB(Super Small Scale Cook-Off Bomb)。试验药量约为 20 g,试样浇 铸、压装或固化在内径为 1.5 cm、外径为 2 cm、长 为 3.2 cm 的两根钢管中,为热膨胀提供了 1.2 cm 的 空隙。钢管外套是内径为 2.0 cm、外径为 2.3 cm、长 为 7.6 cm 的铝制内衬套(使加热均匀),铝制内衬套 外装有内径为 2.3 cm、外径为 2.8 cm、长为 7.6 cm 的 钢管。小尺寸试样的反应和约束与实际武器零件中的 炸药反应结果之间存在经验关系,已证实大部分炸药 的反应在一定比例范围内是可度量的,可以验证全尺 寸武器零件的反应^[17-18],在配方设计阶段可使用此装 置^[19]。此装置结构较为复杂,但是试验药量较小,获 取的计算参数更多。海军武器中心超小型烤燃实验装 置如图 18 所示。



图 18 海军武器中心超小型烤燃实验装置

1996 年, Alexander 等人^[7,20-24]设计了可变约束 条件下的烤燃实验(VCCT—Variable Confinement Cook-off Test)。该试验也是最常用的烤燃实验之一, 其中试验药量约 60 g。Harold、Paul 等人^[19]使用 VCCT 对慢速烤燃实验的模型进行验证,样品为 RDX 基炸 药 PBXN-109 和 HMX 基炸药 PBXN-5^[23]。实验是将 约束在带有铝衬垫钢管中的试样用电线圈加热,装置 包括一个铝衬垫、一系列壁厚不断增加的钢管、加热 带、热电偶、钢制间隔垫圈、钢端面板和定位螺栓。 铝衬套厚度为 2.5 mm,钢管厚度在 0.375~3 mm 间以 0.375 mm 的增量变化,定位螺栓用(40.7±4) N·m 的扭 矩均匀拧紧。升温控制:试样在 1 h 内从室温加热到 100 ℃,在 100 ℃保温 2 h,然后以 3.3 ℃/h 升温到试 样点火。VCCT 试验装置如图 19 所示。

1991 年荷兰 TNO-PLM 实验室的 Gert Scholtes 和 Meer 等^[16,25]结合 ODTX 试验和 SCB 试验的特点, 用与 ODTX 试验类似的试验管和与 SCB 类似的加热 装置建立了一套可变约束 TNO 烤燃实验。使用 9.5 mm×9.5 mm×0.254 mm 的镍铬合金带作为热电 偶,试样装在一个体积为 400 cm³、壁厚为 3 mm 的 钢容器内。考虑到试样的热膨胀,在试样上端预留 10 mm 高度的空间。见证板是直径为 140 mm、厚度 为 12 mm 的钢板。一般使用时,平均升温速率约为 0.8 ℃/s。可变约束 TNO 烤燃实验如图 20 所示。这 两种可变约束烤燃实验,可以获取特定尺寸、结构、 约束强度下的计算参数,是其他小尺寸烤燃实验预估 大尺寸烤燃实验状态,进行安全性评价的一种补充。





图 20 可变约束 TNO 烤燃实验

慢速烤燃实验方法及装置已被广泛应用于弹药 及含能材料(包括炸药)全寿命周期内的热安全性评 估工作,在解决实际工程技术问题中,依据试验结果 对武器弹药的设计、使用和贮存条件提供建议。目前 国内一些研究机构,建立了相关的慢速烤燃实验装置

图 19 VCCT 试验装置

及方法^[26-39],对于试验结果的评估与国外标准相近, 如北约 STANAG4439《不敏感弹药介绍、评估和测试》 6 种反应等级^[40-41]。国内外研究人员通过研究发现, 影响烤燃的主要因素是试样的化学特性[14,20-21,31,42-44]、 升温速率[26,29,42,45-47]、限制条件[32,38-39,48-54]、样品尺寸 (大小、表面积/体积)^[28,30,32,36,55-57]等。其中升温速 率、限制条件、样品尺寸均与试验装置密切相关,试 验装置的设计直接影响试验的精度及准确性。试验也 要对试验对象进行考虑,不同炸药能量沉积过程不一 致, 塑料粘合炸药 (PBX), 熔铸炸药和含 AP 类炸 药,每个系统都有不同的属性和不同的传热机制。 PBX 需要考虑裂缝、热损伤演变(如孔隙度,渗透率 和表面积的变化)、通气/压力效应和化学性质。类似 于 PBX, 含 AP 类炸药的 AP 化学复杂性也需要考虑 粘合剂引起的效应,如溶胀、交联/硬化、颗粒剥离 和次要成分的影响。熔铸炸药能量沉积必须考虑液相

行为,如流动(可以是两相)、溶解和加速的化学效 应,其试验结果是否能外推应予考虑。

上述烤燃实验装置有着共性的技术特点:在试样 的几何中心或轴线上,至少安装一只热电偶,而另一 只放置于壳体的外壁;加热带、加热套紧箍样弹的外 壁,加热方式主要是热传导。可能是由于技术优势, 在样品到达或接近自加热温度条件下获取的热扩散 系数,所得的表观活化能及指前因子可能涉及自加热 反应具体的分解步骤,而不是化学反应全过程的值。 两只不同位置的热电偶可以实现样品中心自加热过 程的绝热控制,通过中心热电偶,可以获取自加热反 应的起始温度。

2 炸药慢速烤燃实验危险性研究

目前大部分烤燃实验结果是通过观察炸药反应 结束后的壳体碎片大小、反应残留物、对周围物体的 破坏程度等现象,来直接判断样品反应剧烈程度的, 带有一定的主观性。对于炸药慢速烤燃实验,有必要 对反应的剧烈程度进行定量研究,从而更准确地评估 其热危险性。

炸药烤燃条件下热点形成,反应点火,爆燃和反 应冲击波发展,以至达到爆轰转变的过程特征参数量 化,是炸药"耐烤"研究的基础。实际研究中,烤燃实 验对系统的破坏较大,实验成本较高,很多试验对炸 药的反应剧烈程度只能定性地评估。因此设计的出发 点是在达到实验目的同时,尽量降低实验成本,优化 实验装置,尽可能地量化试验结果。

模型实验装置简易化^[7]:实验场地(壁面 0.6 m 的混凝土,结构采用 BLASTX 进行计算及强度预判) 及防护装置小型化(外形尺寸 550 mm×550 mm× 550 mm,壁厚 25 mm),防护装置充足的排气,并能 收集反应的壳体碎片。烤燃装置采用包裹绝缘玻璃纤 维的镍铬合金电热丝进行加热,采用科尔顿 (Coulton)仪器仪表公司的 PZX4 温度控制器进行控 温。该控制器有两支 K 型热电偶(一只紧靠壳体内 壁、一只在试样中心),用紧靠内壁的热电偶控温。 试验场设计图及防护装置如图 21 所示。烤燃弹容积 大约可以放置 0.012 kg RDX/TNT,结构尺寸如图 22 所示。材料采用 EN3 低碳钢(Y_s=250 MPa),螺杆两 端各安装两个螺母,单螺杆强度为(386.8±5) MPa。螺 杆与螺母安装方式影响螺杆强度及断裂位置,见表2。

笔者利用 Ansys 建立模型(如图 23 所示),选用 AISI1018 钢(与 EN3 性能相近),其质量密度为 7.87 g/cm³,屈服强度为 250 MPa,极限拉伸强度为 354 MPa,杨氏模量为 207 GPa。设定内压力为 1000 MPa。根据安全系数(极限应力/许用应力),发 现烤燃弹破裂顺序为简体中部、螺杆、端盖、螺母位 置,不会出现试验简体未变形,端盖冲开的现象。笔 者的计算与原文设计趋势一致。两端是螺纹端盖的烤 燃实验管,试验过程由于端盖冲开,样品在喷出的过 程中会与管体发生剧烈摩擦,甚至引发点火,该装置 不会发生此类现象。典型 TNT 试验结果如图 24 所示, 装置装配如图 25 所示。



图 21 试验场设计图及防护装置



图 22 简易烤燃装置设计图

表 2 安装方式及破坏强度

螺母在螺杆安装方式	破坏强度/MPa
1+1	338±5
1+2	315±5
2+2	387±5

目前,笔者按上述试验步骤操作,采用岛津的调 功整机、岛津 FP 系列 PID 参数调节仪表及安徽圣希 康仪 0.5 mm 直径铠装 K 型热电偶(1级),可以较为 方便地搭建试验系统,进行烤燃实验。

在 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory),小型慢速烤然模型实验试样的药量为 10 g 左 右。为获取更高精度 ALE3D 热爆炸模型参数,采用 STEX (Scaled-Thermal- Explosion- eXperiment)试 验^[58],升温速度为 1 ℃/min。使用的参数诊断元件包 括嵌入式热电偶,嵌入式压力传感器、管体表面应变 传感器、壳体膨胀用微波干涉仪及高速摄像。试验管 直径为 5.08 cm,高度为 20.32 cm,材料采用 4130 钢。 试验中发现壳体膨胀速度是一种累加效应,壳体的膨 胀速度没有明显差别。STEX 试验装置如图 26 所示。 在 LANL (Los Alamos National Laboratory),小型
慢速烤然模型实验试样的药量为 5 g 左右。为获取更高精度 ALE3D 热爆炸模型参数,会采用 SSVT (Small-Scale Velocity Test)试验^[59-60]。试样直径为 10 mm,长 10 mm,采用K型号热电偶进行测温及控 温。样品被限制在金属的约束装置中,温控分三段, 首先在 30 ℃下稳定 20 min,以 5 ℃/min 升温至 170 ℃, 然后稳定 80 min,再以 2 ℃/min 升温至反应。在高温 高压气体作用下,试样会冲破装置的薄弱点,驱动金 属块向前运动,金属块触动探针,采用激光干涉测速仪 测量金属块的运动速度。SSVT 试验装置如图 27 所示。



图 23 装置及强度计算模型



图 24 TNT 试验结果









图 26 STEX 试验装置



图 27 SSVT 试验装置

采用激光干涉测速仪测量技术可以定量判断反应的位置和剧烈程度^[61],研究人员在试验管不同位置 布置8个通道激光干涉测速探头,通过管体不同位置 的膨胀速度对结果进行判断。试验布局和结果如图 28 所示,其中图 28a 是 8 路激光多普勒测速试验 设计图,图 28b 是试验前装置,图 28c 是试验后装 置,图 28d 是根据 8 路激光多普勒测速绘制的反 应状态。



图 28 8 路激光多普勒测速试验装置

在美国陆军军备研发中心 ARDEC (U.S. Army Armament Research, Development and Engineering Center)^[62-63],其烤燃实验药量约 60 g,采用 SSCV 试验 (Small Scale Cook-off Venting Laboratory Hardware Configuration)。其原理类似克南试验,烤 燃弹一端开有不同直径的孔,研究炸药通气需求与 弹药尺寸和加热速率的关系。该实验已发展成研究 弹头通气参数的模型实验,通过壳体破裂情况判断 试验结果。SSCV试验装置如图 29 所示。其中图 29a 是试验装置设计图,图 29b 是试验前装置实物图, 图 29c 是两个不同开孔尺寸,图 29d 是试验后装置 实物图。



a 装置设计

b 试验前装置

c 开孔 图 29 SSCV 试验装置 d 试验后装置

LANL、LANL 及 ARDEC 的精细化模型实验, 以 虽然相对复杂,但是更适用研究烤燃点火增长过程及 3.3 各种实际工况下的危险性分析。在试验层面,主要是 其

各种实际工况下的危险性分析。在试验层面,主要是 改进仪器,以获得更多的量化指标,用于对反应烈度 的级别划分。基于添加诊断工具,将可测量的量分配 给反应类型 1—5(爆炸,部分爆炸,爆炸,爆燃和 燃烧)。建议在可能的情况下和在近场压力下测量系 统内部(孔内)的炉内压力,利用平面多普勒测速仪 (PDV)和高速视频表征碎片速度,利用摩尔条纹确 定壁面应变率,用数字图像相关(DIC)照片的几何 图案(散斑)或标记点来观察弹体的扩展。冶金碎片 分析也可用于确定反应类型。添加额外的仪器将导致 测试花费更多,并且需要更长的时间来设置,但从长 远来看,可以降低成本。添加的仪器将帮助建模人员 将他们的模型与各种反应类型相匹配,这将有助于探 索在弹药定型阶段给出反应烈度,而无需进行额外的 测试。

3 趋势与可能存在的问题

慢速烤燃测试在 STANAG 4382 第 2 版测试系列 中定义了两种加热速率。标准测试定义了以 5 ℃/min 的升温到 50 ℃预处理 8 h 或直到物品达到热平衡, 以先发生者为准。在预处理之后,使测试项目逐渐以 3.3 ℃/h 速率升温至反应。第二种方法是定制测试, 其中不需要预处理,而是基于分析物品的适当加热速 率来对其进行利用。如果未进行分析,则将使用 25 ℃/h 的默认速率。在美国,将测试项目放入隔热的一次性 烤箱中,入口和出口之间的空气温差不超过 5 ℃。烤 箱的构造应使其尽可能少地受到限制。烤箱和物品之 间的气隙至少为 200 mm,以允许空气 循环。烤箱中 的四个热电偶将监测空气温度。该项目的响应将通过 空气爆炸超压、见证板、碎片、摄影和视频响应进行 评估。

1)加热速率的适当性。使用 3.3 ℃/h 的加热速 率是否会导致被测项目最强的反应烈度,加热速率是 否应按样本大小进行缩放。对于克或千克样品,毫克 样品是否需要不同的加热速率。炸药材料孔隙度、渗 透率、表面积、分解产物、热扩散率/电导率和燃烧 速率随温度和温度的变化而变化,反应烈度可能也会 随加热速率而发生变化,可能每种炸药材料最强反应 烈度对应的加热速率不一致,常规实验应选取多大的 加热速率,以前经过 3.3 ℃/h 加热速率的炸药材料是 否还要重新测试。

2) STANAG4382 没有定义烤箱的构造方式。烤 箱不应该驱动系统的反应。如果炸药材料通过排气塞 或其他类型的排气机构流出弹药,则烤箱应该构造成 使炸药材料不会落到加热元件上,点燃材料并导致更 具反应性或温和性反应。

3)反应烈度的模拟用参数量化表征。如炸药材料热损伤演变、热诱导膨胀以及用于烤燃响应相关性的可测量参数。为了准确地模拟热损伤演变,建模者需要关于孔隙率/渗透率/表面积的数据作为加热速率/温度/限制历程的函数以帮助参数化建模(例如对流燃烧模型)。此外还需要热损材料燃烧速率(通过燃烧弹和/或加压支架燃烧器),以获取热损伤演变与燃烧速率之间的联系。

4 结语

国外相关研究单位在热分解机理研究的基础上, 采用小型热爆炸试验验证动力学参数的合理性,进而 采用动力学参数对大尺寸实际装药的热响应进行了 模拟计算。通过精细化的模型实验,开展药柱加热时 与外界环境的传质、传热以及相变对点火时间的规律 研究,从简单的化学-热模型逐步发展到化学-热-力学 模型。目前美军各军种炸药接受准则,允许使用特定 尺寸炸药临界温度的计算值,当计算值满足一定温度 视为合格,但计算过程参数的来源,必须使用特定的 烤燃实验。对于炸药慢速烤燃 IM 特性的审查评估更 为严格,而不会根据 STANAG4382 标准结果给出 IM 结论。

随着不敏感弹药技术的发展,其中炸药的不敏感 特性研究也逐渐深入。烤燃实验可以作为炸药热安全 性、危险性评估的试验方法,在炸药设计和勤务处理 中使用得越来越频繁,实验技术本身也向着更加小 型、直观、安全和定量的方向发展。

国内还未发布炸药及装药慢速烤燃 IM 特性的试验评估标准,很多炸药慢速烤燃 IM 特性的结论是根据烤燃弹试验给出的,没有确定炸药及装药慢速烤燃 IM 特性审查评估程序及相应方法,对小型多参数慢速烤燃模型实验开展的研究工作较少。建议开展慢速烤燃模型试验标准及慢速烤燃 IM 特性评估标准的建立工作,慢速烤燃模型试验标准可以服务于 IM 特性审查评估,方便产品定型验收。正文

参考文献:

- [1] 李冠峰, 叶又东, 杨建军. 航母弹药贮运安全技术研 究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(11): 164-168.
- STEWART H P. The Impact of the USS Forrestal's 1967 Fire on United States Navy Shipboard Damage Control[R].
 USA: Army Command and General Staff College, 2004.
- [3] FORD K, ATWOOD A, FARMER A, et al. JANNAF

Slow Cook-off Consortium Workshop Findings[R]. Albuquerque, NM: Sandia National Lab, 2016.

- [4] CLARK K A. Rationalization of IM Test Requirements: The 6 °F SCO Test[R]. MD: NOSSA IM and HC Office, 2010.
- [5] HUBBLE D. An Investigation into a Proper Heating Rate for Slow Cook-off Testing[C]// Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Portland, OR, 2018.
- [6] PELETSKI C. NAVSEAINST 8020.5 C: Qualification and Final (TYPE) Qualification Procedures for Navy Explosives[R]. Arlington VA: Navy Insensitive Munitions Office, 1996.
- [7] FROTA O V. Development of a low cost cook-off test for assessing the hazard of explosives[D]. Cranfield: Cranfield University, 2015.
- [8] SWIERK T. IM Testing and Assessments[R]. United States: Naval Surface Warfare Center, 2014.
- [9] BAKER E L, STASIO A. Insensitive Munitions Technology Development[J]. Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa, 2014, 5: 7-20.
- [10] STANDARD M. Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear Ordnance[R]. MIL-STD-2105C, 1994.
- [11] BAKER E L. Slow Heating Testing Survey and Historical Events Review[J]. (请补充期刊名、卷、期、页码)2018.
- [12] FONTENOT J, JACOBSON M J N C L. Analysis of Heating Rates for the Insensitive Munitions Slow Cookoff Test[J]. (请补充期刊名、卷、期、页码) 1988.
- [13] JACOBS G. Naval Weapon Cook-off Improvement Concepts and Development[R]. DTIC Document, 1981.
- [14] NICHOLS I A, SCHOFIELD S. Modeling the Response of Fluid/Melt Explosives to Slow Cook-off[C]// 15th International Detonation Symposium. Grand Hyatt San Francisco, 2014.
- [15] HSU P C, JONES A, TESILLO L, et al. The Enhancement of Gas Pressure Diagnostics in the P-ODTX System[R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Lab (LLNL), 2016.
- [16] SCHOLTES J, VAN DER MEER B. Investigation into the Improvement of the Small-Scale Cook-off Bomb (SCB)[R]. DTIC Document, 1994.
- [17] PAKULAK J J M, Cragin S. Calibration of a Super Small-Scale Cookoff Bomb (SSCB) for Predicting Severity of the Cookoff Reaction[R]. DTIC Document, 1983.
- [18] PARKER R P. Establishment of a Super Small-scale Cookoff Bomb (SSCB) Test Facility at MRL[R]. Materials Research Labs Ascot Vale (AUSTRALIA), 1989.
- [19] TRZCIński W, BELAADA A. 1,1-Diamino-2, 2-dinitroethene (DADNE, FOX-7)–Properties and Formulations (a Review)[J]. Central European Journal of En-

ergetic Materials, 2016, 13(2): 527-544.

- [20] ZUNINO L, SAMUELS P, HU C. IMX-104 Characterization for DoD Qualification[C]// 2012 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Las Vegas, 2012.
- [21] PELLETIER P, LAVIGNE D, LAROCHE I, et al. Additional Properties Studies of DNAN Based Melt-pour Explosive Formulations[C]// 2010 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Munich, Germany, 2010.
- [22] BROUSSEAU P, BROCHU S, BRASSARD M, et al. RIGHTTRAC Technology Demonstration Program: Preliminary IM Tests[C]// 2010 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technical Symposium. Munich, Germany, 2010.
- [23] SANDUSKY H W, CHAMBERS G P, ERIKSON W W, et al. Validation Experiments for Modeling Slow Cook-off[C]// 12th International Detonation Symposium. San Diego, CA, 2002.
- [24] SANDUSKY H, CHAMBERS G, FURNISH M D, et al. Instrumentation of Slow Cook-off Events[C]// Shock Compression of Condensed Matter Meeting. American Physical Society, 2002.
- [25] SCHOLTES J, VAN DER MEER B. Temperature and Strain Gauge Measurements in the TNO-PML Cook-off Test[R]. DTIC Document, 1997.
- [26] 李文凤, 余永刚, 叶锐, 等. 不同升温速率下 AP/HTPB 底排装置慢速烤燃的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 46-52.
- [27] 杨筱, 智小琦. 炸药烤燃特性的隔热层效应研究[J]. 科 学技术与工程, 2016, 16(35): 198-202.
- [28] 杨筱,智小琦,杨宝良,等.装药尺寸及结构对 HTPE 推进剂烤燃特性的影响[J].火炸药学报,2016,39(6): 84-89.
- [29] 王洪伟,智小琦,郝春杰,等.升温速率对限定条件下 烤燃弹热起爆临界温度的影响[J].含能材料,2016, 24(4):380-385.
- [30] 王洪伟, 智小琦. 装药尺寸对限定条件下炸药热起爆 临界温度的影响(英文)[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2015(3): 234-239.
- [31] 姚奎光, 钟敏, 代晓淦, 等. 缓慢热作用下 PBX-9 炸药 的响应特性[J]. 火炸药学报, 2015(6): 56-60.
- [32] 于永利, 智小琦, 范兴华, 等. 自由空间对炸药慢烤响应特性影响的研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(5): 280-283.
- [33] 张亚坤, 智小琦, 李强, 等. 烤燃温度对凝聚炸药热起 爆临界温度影响的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(1): 69-72.
- [34] 雷瑞琛, 常双君, 杨雪芹. 低易损性 PBX 炸药烤燃试 验方法研究[J]. 广东化工, 2014, 41(4): 43-44.
- [35] 殷明, 罗观, 代晓淦, 等. 高固含量 HMX 基浇注 PBX 的烤燃试验研究[J]. 火炸药学报, 2014, 37(1): 44-48.

- [36] 智小琦, 胡双启. 炸药装药密度对慢速烤燃响应特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 221-224.
- [37] 陈朗, 马欣, 黄毅民, 等. 炸药多点测温烤燃实验和数 值模拟[J]. 兵工学报, 2011, 32(10): 1230-1236.
- [38] 张晋元. 壳体厚度对传爆药慢速烤燃响应的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(3): 61-64.
- [39] 智小琦, 胡双启, 李娟娟, 等. 不同约束条件下钝化 RDX 的烤燃响应特性[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 22-24.
- [40] 殷瑱,闻泉,王雨时,等.北约不敏感弹药标准试验方法[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(10):1-7.
- [41] 梁晓璐,梁争峰,程淑杰,等.不敏感弹药试验方法及 评估标准研究进展[J].飞航导弹,2016(6): 84-87.
- [42] 陈朗, 李贝贝, 马欣. DNAN 炸药烤燃特征[J]. 含能材 料, 2016, 24(1): 27-32.
- [43] 张亚坤, 智小琦, 李强, 等. RDX 基炸药热起爆临界温度的测试及数值计算[J]. 火炸药学报, 2014, 37(1): 39-43.
- [44] GLASCOE E A, HSU P C, SPRINGER H K, et al. The Response of the HMX-based Material PBXN-9 to Thermal Insults: Thermal Decomposition Kinetics and Morphological Changes[J]. Thermochimica Acta, 2011, 515(1): 58-66.
- [45] 刘文杰,李小东,王晶禹,等.升温速率对烤燃弹温度 影响的数值模拟[J].中北大学学报(自然科学版),2015, 36(4):440-445.
- [46] 向梅,黄毅民,饶国宁,等.不同升温速率下复合药柱 烤燃实验与数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2013,33(4): 394-400.
- [47] 代晓淦,黄毅民,吕子剑,等.不同升温速率热作用下 PBX-2 炸药的响应规律[J]. 含能材料, 2010, 18(3): 282-285.
- [48] 王洪伟,智小琦,刘学柱,等.限定条件下聚黑炸药烤 燃试验及热起爆临界温度的数值计算[J].火炸药学报, 2016, 39(1): 70-74.
- [49] 陈科全, 黄亨建, 路中华, 等. 一种弹体排气缓释结构 设计方法与试验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(4): 15-18.
- [50] 程波, 李文彬, 郑宇, 等. 不同约束条件下 ANPyO 炸药快烤试验研究[J]. 爆破器材, 2013(5): 53-56.
- [51] 董克要. 橡胶隔层对炸药烤燃速率的影响[J]. 科技信息, 2012(30): 425-426.
- [52] 徐双培,胡双启,王东青,等.壳体密封性对小尺寸弹药快速烤燃响应规律的影响[J].火炸药学报,2009, 32(3):35-37.
- [53] AL-SHEHAB N, BAKER E L, ARDEC U A, et al. Thermal Modeling the SCO Response of a TOW2B EFP[J].
 (请补充期刊名、卷、期、页码) 2015.
- [54] HAMEED A, AZAVEDO M, PITCHER P. Experimental Investigation of a Cook-off Temperature in a Hot Barrel[J]. Defence Technology, 2014, 10(2): 86-91.
- [55] 吴世永, 王伟力, 苗润, 等. 不同尺寸装药烤燃特性的

数值模拟研究[J]. 中国测试, 2016, 42(10): 85-89.

- [56] 安强, 胡双启. 装药密度对钝化黑索今快速烤燃特性 的影响[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(10): 64-66.
- [57] 冯晓军, 王晓峰. 装药孔隙率对炸药烤燃响应的影响[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 109-112.
- [58] GLASCOE E, DEHAVEN M, MCCLELLAND M, et al. Mechanisms of Comp-B Thermal Explosions[R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), 2014.
- [59] SORBER S, STENNETT C, GOLDSMITH M, et al. Developments in a Small Scale Test of Violence[C]// Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. United Kingdom, 2012.
- [60] BAUERL C L, RAEF P J, STENNETT C, et al. Small

Scale Thermal Violence Experiments For Combined Insensitive High Explosive And Booster Materials[C]// 14th International Detonation Symposium. Idaho, USA, 2010.

- [61] HOOKS D E, HILL L G, PIERCE T H. Small-scale Deflagration Cylinder Test with Velocimetry Wall-motion Diagnostics[R]. Los Alamos National Laboratory (LANL), 2010.
- [62] BAKER E, DEFISHER S, MADSEN T, et al. Warhead Venting Technology Development for Cook-off Mitigation[C]// Proc of 2006 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Bristol, United Kingdom, 2006.
- [63] MADSEN T, DEFISHER S, BAKER E, et al. Explosive Venting Technology for Cook-off Response Mitigation[R]. DTIC Document, 2010.