武器弹药异常事故环境安全性试验技术进展

胡宇鹏,李明海,陈胜来,陈均,岳晓红,张军,黄海莹,

杨敏,张中礼,王军评,文勇,张荣,张志旭,毛勇建

(中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:为提升我国武器弹药异常事故环境安全性试验技术,完善武器弹药异常事故环境安全性试验能力建 设,建立武器弹药异常事故环境安全性试验方法体系,介绍了国外武器弹药异常事故环境安全性试验技术 发展与标准体系,以及我国武器弹药异常事故环境安全性试验技术与能力现状。分析了武器弹药异常事故 环境安全性试验技术的发展方向,建议持续发展安全性试验技术,创新现有技术手段,解决更多、更苛刻 事故场景对应的试验模拟能力覆盖问题,建立完善的武器弹药异常事故环境安全性试验能力体系与试验标 准体系。

关键词:武器弹药;异常事故环境;安全性;试验技术 中图分类号:TJ410 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2021)05-0011-10 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.003

Development of Abnormal Environmental Safety Test Technology for Weapons and Ammunition

HU Yu-peng, LI Ming-hai, CHEN Sheng-lai, CHEN Jun, YUE Xiao-hong, ZHANG Jun, HUANG Hai-ying, YANG Min, ZHANG Zhong-li, WANG Jun-ping, WEN Yong, ZHANG Rong, ZHANG Zhi-xu, MAO Yong-Jian (Institute of systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: In order to improve the environmental safety test technology for abnormal accidents of weapons and ammunition, improve the environmental testing ability, and establish the testing methods and evaluation system. This paper introduces the test technical ability and the corresponding standard system of foreign country and the test technical ability of China. The development direction of abnormal environmental safety test technology for weapons and ammunition is analyzed. The testing technology should be developed continuously, and the existing technological means should be innovated, which can solve the problem of covering the test simulation capability corresponding to more and more severe accident scenarios. A complete system of abnormal environmental safety test ability for weapons and ammunition and a corresponding test standard system is also established.

KEY WORDS: weapons and ammunition; abnormal environment; safety; test technique

• 11 •

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-04-21

Received: 2021-03-31; Revised: 2021-04-21

作者简介:胡宇鹏(1987-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为武器热安全、装备环境工程。

Biography: HU Yu-peng (1987—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: thermal safety of weapon, equipment environment engineering. 通讯作者: 李明海 (1970—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为武器安全性、装备环境工程。

Corresponding author: LI Ming-hai (1970—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: weapon safety, equipment environment engineering. **引文格式:** 胡字鵰, 李明海, 陈胜来, 等. 武器弹药异常事故环境安全性试验技术进展[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 011-020.

HU Yu-peng, LI Ming-hai, CHEN Sheng-lai, et al. Development of abnormal environmental safety test technology for weapons and ammunition[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 011-020.

安全性是武器弹药重要的通用质量特性^[1-2]。在 武器弹药的使用、测试、维护和维修过程中,面临冲 击、撞击、跌落、振动、高温、静电、雷击和电磁辐 射等外界力、热载荷引发的意外燃烧、爆炸、爆轰等 危险,易造成武器弹药损毁、人员伤亡和财产损失, 削弱战斗力。随着武器弹药复杂程度的增加,使用要 求的提高,作战威力的增强,上述事故发生概率也越 发增大。因此,需针对武器弹药全寿命周期内在力、 热、电磁等环境下的安全性开展深入研究^[3-4]。

20世纪50年代以来,武器弹药安全性事故频发^[5]。 事故调查研究表明,如在武器研制过程中忽视安全性 工作的开展,将会导致先天安全性隐患的存在,从而 增大事故发生的概率。20世纪50年代末期,美国在 井下弹道导弹研制中,因忽视了发射系统接口的安全 性设计,导致导弹贮存库房和发射阵地发生重大事 故,最终导致该型导弹报废而重新研制。因此,美空 军颁布了一系列武器弹药安全性文件[6-7]。例如 1962 年颁布的《空军弹道导弹系统安全性工程》,该文件 为民兵导弹研制工作实现系统安全性提供了依据,同 年颁布的《武器系统安全性标准》为多弹头弹道安全 性研制提供了依据。1966年,美国防部在上述空军 系列标准的基础上,修订颁布了 MIL-STD-882《系统 及其有关的分系统、设备的系统安全工作要求》,首 次较完善地规定了系统安全管理、设计、分析和评价 的基本要求。随后,美在经历"福莱斯特"航母爆炸、 "企业"号核动力航母爆炸、中东战争期间坦克、军舰 等装备爆炸损毁、伊拉克战争期间弹药库爆炸等常规 导弹弹药安全事故以及多起因飞机地面碰撞起火、飞 机起飞坠毁起火、飞机飞行期间核武器坠落、飞机坠 毁、舰载机从航母上坠落等核武器安全事故后,先后 5次对 MIL-STD-882 进行了修订,并在期间颁发和修 订了一系列指令(DODD5000.1、DODD5000.2、 DODD5000.36 等),从技术规范及行政法规上为有 效开展系统、全面的安全性工作奠定了坚实基础。

我国武器弹药安全性工作起步相对较晚。民用领 域的安全性相关工作开展则相对较早,从 20 世纪 50 年代起就开始了放射性物质运输安全研究工作,并于 1989年按照国际原子能机构 TS-R-1《放射性物品安 全运输规程》的要求制定了 GB 11806《放射性物品 安全运输规程》,从放射性物品运输容器设计、制造、 安全性能验证等方面都作了较为系统的规定。近年, 针对我国现有放射性物品运输容器安全性能的验证 试验设施不完善,试验项目不齐全,试验能力有限等 短板问题,开展了一系列放射性物品运输容器试验验 证相关研究工作^[8-9]。武器弹药安全性方面工作则在 借鉴国外先进经验的基础上,结合自身特点,正有序 开展。20 世纪 90 年代起,我国颁布了 GJB 900A— 2012《装备安全性工作通用要求》,以作为安全性顶 层标准。该标准明确了装备安全性研制的一般要求和 工作项目,强调了装备研制过程的安全性相关工作。 GJB 900A 为武器弹药安全性研制的顶层标准,从实 施层面讲,关于如考核验证试验等具体安全性工作的 规定较为宏观。文中综述了武器弹药在异常事故环境 的安全性试验技术,为今后研究和发展武器弹药异常 环境安全性试验考核技术提供参考。

1 典型事故场景

以往事故案列分析表明,武器弹药在全寿命周 期内会经历吊装转运、运输、贮存、使用等多种环 节,可能会受到跌落、碰撞、燃油火灾等异常环境 载荷^[10-12]。备战状态下,可能受到敌方武器袭击,即 可能受到子弹或碎片撞击,武器平台或弹药库着火甚 至爆炸^[13-15]。这些环境应力超载情况,致使武器弹药 出现意外损伤,可能引起安全性问题。

从武器弹药系统全寿命周期任务剖面角度,分析 可能遭遇的异常事故场景[5,16-19]。在吊装转运剖面下, 可能发生低高度跌落。在运输剖面下,根据运输方式 的不同,事故场景略有不同。公路运输时,可能发生 如车辆在高架桥产生碰撞或其他原因导致行驶路线 偏离,从高架桥坠落等跌落、撞击、翻车等事故场景, 以及电路故障、刹车故障、发动机着火、撞击等引起 的火灾事故场景。根据桥面高度以及行车速度,可以 确定相应跌落高度以及撞击速度。车辆在跨河桥梁上 可能发生如撞击等导致行驶路线偏移而从跨河桥梁 坠落后入水,水浸深度可根据途经水域最大深度确 定。此外,运输过程中还可能遭受枪击事故。铁路运 输时同样可能发生跌落、撞击、火灾、水浸等事故, 参考公路运输模式,其跌落高度为行驶过程途经高架 铁路路面距离地面的高度,水浸深度为途经高架铁路 桥下的水深。与公路运输不同,铁路运输火灾事故因 发生在车厢内,车厢壁面温度随时间升高,即环境热 沉相对公路运输较高。海上运输时,舰船行驶过程中 可能发生因碰撞或其他原因导致的翻船,继而导致武 器弹药系统下沉,下沉深度可根据航线所经海域位置 最大深度确定。舰船火灾事故受舱室内气体组分浓度 以及通风条件影响而发生变化。空中运输可能发生飞 机失事引发的跌落、火灾等事故, 空运跌落高度为飞 机飞行高度,空运火灾事故需将跌落造成的结构损伤 因素纳入考虑范围。武器弹药系统在贮存剖面下可能 发生低高度跌落、火灾等事故。当贮存场所发生火灾 时,武器弹药系统可能完全包覆于火焰中,即快速烤 燃模式,此时弹药外部环境温升较快;当临近贮存库 或飞机起火,武器弹药可能没有完全包覆于火焰中, 此时弹药外部环境温升较慢,即慢速烤燃模式。使用 剖面下,如导弹在发射剖面下可能出现发射后发动机 点火失败造成的跌落等事故,其跌落高度一般可根据 弹射高度确定。

2 试验加载技术

安全性试验需准确模拟武器弹药在现实中可能 出现的异常事故,例如跌落、火灾、枪击、碎片撞击 等,以考核武器弹药的安全性。美俄等国已将提升安 全性试验技术水平作为一项长期战略任务,并在工程 实践中不断总结,发展试验与测试技术,提升试验载 荷的模拟等效性以及测试先进性。结合前述典型事故 场景,对安全性试验技术开展如下讨论。

2.1 跌落试验

跌落试验主要考核吊装意外、运输事故下武器弹 药(以下简称试件)的安全性。一般情况下,试件跌 落后未发生燃烧或爆炸,则认为其满足跌落试验安全 性考核。跌落试验原理是将试件按要求姿态提升到规 定的跌落高度后,释放试验件,使其自由下落着靶, 同时获取试件碰靶过程的相关数据和信息。跌落姿态 包括水平、竖直或倾斜,试验具体跌落姿态往往以危 险性评估的最坏情况决定。试验前应根据试件的质 量、尺寸和结构确定起吊装置、释放装置,具体包括 提升装置的承载能力、试件与释放装置的连接方式、 试件的释放方式及跌落面的尺寸等。由于撞击可能使 武器弹药发生爆轰响应,产生冲击波和爆炸碎片,从 而导致试验人员伤亡及设备损坏,因此在跌落试验中 需进行冲击波安全距离和碎片安全距离测算,以便 对人员和设备进行安全防护。典型的跌落试验设备 结构如图 1 所示, 主要由塔架、提升机构、释放装 置、靶板、靶座等组成,可以实现自由跌落和姿态 控制跌落。

美国圣地亚实验室建有有效跌落高度为 52.5 m 的跌落塔,最大提升载荷为 680 kg,相应靶板包括强 化混凝土靶以及钢板。为模拟更高高度跌落,其在场 区内峡谷两个山峰间布有空中缆绳设施,缆绳总长度 超过 1524 m,依靠火箭撬高速拉拽牵引绳,从而使 得试件着靶,如图 2 所示。该缆绳能成比例地支撑较 重试件,36 t 试件的最大跌落高度是 30 m,较小试件 的最大跌落高度能达到 213 m,配有包括不锈钢靶、









土壤靶、混凝土靶、水靶、冰靶和模拟地形(火星、 月亮、山脉等)靶等不同靶板。

英国原子能管理局技术公司建有 150 t 履带式起 重机和一个 700 t 混凝土靶构成的跌落试验系统,以 实施重型导弹跌落试验。国内,中国辐射防护研究院、 中国核电工程公司针对核电领域用放射性物品运输 容器的跌落安全性试验考核,建立了相应跌落试验系 统。针对武器弹药跌落试验考核,中国工程物理研究 院总体工程研究所(中物院总体所)建有系列跌落塔, 如图 3 所示。





图 3 中物院总体所系列跌落塔 Fig.3 Drop towers in ISE of CAEP



2.2 快速烤燃试验

快速烤燃试验(火烧试验)主要考核运输、贮存、 战备状态下环境失火(弹药舱、仓库、飞机或运输工 具燃油火灾等)时武器弹药的安全性。一般采用野外 油池火烧试验(如图 4a 所示),即试件在液体燃料火 焰中被快速加热。一般情况下,试件未发生燃烧或爆 炸,则认为该试件满足火烧试验安全性考核。该试验 常用 JP-4、JP-5 等液态烃类和 NATO F-58 等商用煤 油作为燃料,燃油燃烧 30s 后,火焰温度须达到 550℃,随后火焰平均温度须在800℃以上。试件可 通过悬挂或支撑方式固定于燃烧区域中心,并应高于 燃面,完全浸没于火焰中,且包覆厚度在 1~3 m 为宜。 为保证试件放置位置不处于火焰过热或过冷区域,试 件底面与燃油表面距离在 0.6~1 m 为宜。燃油面与试 件的距离可通过压力软管加水控制,并可防护火焰高 温对油池底部地面的损坏。为迅速建立稳定燃烧区 域,在油池中央和四周设置点火器,由同步点火控制 系统控制实现同步点火。试验工装设计时,可视情采 取约束方式以防止试件在试验过程中可能发生的助 推。由于油池火烧的实质燃烧过程是燃油蒸汽和空气 发生的湍流扩散燃烧,燃烧过程中,周围空气主要通 过燃烧中心区的火焰进入油池,因此火烧试验还需关 注环境风的影响。研究表明, 野外油池火烧试验需在 风速低于2m/s环境下开展。

由于野外油池火烧试验污染较大,近年来发展了

加热炉火烧、石英灯加热等可在室内场所进行快速烤 燃试验的试验技术研究,相关试验装置如图 4b、c 所 示。当试件不含火工品、炸药等危险源,且尺寸较小 时(例如放射性物品运输容器缩比件),用加热炉和 石英灯加热装置进行火烧试验,具有成本低、重现性 好的优点。对于大尺寸运输容器,其热环境一致性还 需进一步研究提升。对于会释放有毒气体的产品火烧 试验,则只能选择密闭状态下的加热炉或电辐射热试 验装置。对于武器弹药,为更加真实地模拟试件所遭 受的意外火灾事故环境,如因大量燃料泄漏引起的全 包围或部分包围火灾,还是宜采用野外油池火烧试验 这一方式。

美国圣地亚实验室同时建有野外火烧试验场以 及室内火烧试验室。野外火烧试验场共计3个,最大 燃烧面积为9 m×18 m,可进行燃油、天然气及固体 推进剂等的火烧试验。此外,圣地亚实验室还建有专 门的包括静风火烧试验、电加热试验、侧风火烧试验 及数值仿真为一体的热综合体试验设施。静风火烧试 验室(见图 5a)完全避免了环境风的影响,有7层 楼高, 直径为18m, 并配有水冷壁以控制热沉温度, 可采用煤油、烷类、醇类燃料进行试验。电加热试验 室(见图 5b)建有单机 5.2 MW 的辐射热试验单元, 可快速热加载至1200 ℃。侧风试验室(见图 5c)引 入风的影响因素,可实现横流空气速度 15 m/s 下的 火烧试验。该热综合体还配有专门的空气净化系统, 以尽可能减少对环境的影响。









c 石英灯加热装置

图 4 火烧试验装置 Fig.4 Fire test device : a) field oil pool fire test system; b)heating furnace fire test system; c) lamp heating device



a 静风火烧试验系统



b 电加热试验系统 图 5 美圣地亚实验室热综合体设施



c 侧风火烧试验系统

Fig.5 Thermal complex facility in Sandia laboratory: a) static wind fire test system; b) electric heating test system; c) crosswind fire test system

• 15 •

国内目前武器弹药火烧试验主要采用野外油池 火烧试验方式,中物院总体所建立了配有系列油池的 火烧试验场,配有油库、供油子系统、自动点火子系 统、供排水子系统、远近程监控系统及测控间等设施。 油池由内圈油池和外圈冷却水池组成,该油池的设计 尺寸可从理论上保证试件所有外表面被火焰覆盖的 厚度在 1~3 m,以创造一个合理的火焰辐射环境。外 圈冷却水池由混凝土和耐火砖砌筑而成。火烧试验前, 先在油池内圈预加入一定高度的水,并在油池外圈注 满水,以避免试验过程中火焰高温导致钢油池变形。

2.3 慢速烤燃试验

慢速烤燃试验主要考核在运输、贮存和战备状态下,环境温度缓慢升高(如邻近弹药舱、仓库或者运输工具火灾)时武器弹药的安全性。一般来说,试件在试验后未发生比爆炸更剧烈的反应,则认为其通过慢速烤燃试验。慢烤试验试件一般先以大约5℃/min的升温速率升至 50℃,再以 3.3℃/h 的升温速率逐渐加热,直至反应。慢速烤燃试验技术发展主要集中在热加载手段的改进及创新。

早期的慢速烤燃试验在周围布置有加热丝的防 爆罐内进行,但在试验实施过程中发现,加热丝在高 温下容易变形,加热时还可能导致试件受热不均,从 而影响试验结果。随后,对于较小尺寸试件,将其放 入套管后,整体放入恒温的油浴中,套管和试件通过 热传递接受外部热量。该油浴加热方式虽然能解决试 件受热不均的问题,但试验安全性较低,一旦试验中 发生爆燃甚至爆炸,高温油就会加速燃烧,引起油飞 溅,会对试验人员构成危险。为提升慢烤试验的安全 性,北约 STANAG 4382《弹药慢速烤燃试验规程》 提出采用空气浴加热方式,即将试件放置在慢烤试验 箱内,用循环加热空气加热试件,流入流出空气温差 不大于5℃。为使试件受热均匀,试件距离慢烤试验 箱内壁每侧距离应大于 200 mm, 如图 6a 所示。该间 隙会形成环形空腔,加上壁面间的辐射换热,就会形 成内部空气对流。相比油浴导热加热方式,空气浴方 式属空气对流以及热壁辐射的复合传热。热传导方式 的不同,决定了试件发生反应的时间有所差异。此外, 慢烤试验箱的构造还需考虑试验中可能出现的一些 激烈反应。近年来,国内外学者大多采用空气浴加热 方法进行弹药慢速烤燃试验。对于尺寸较大的复杂装 药结构,可采用在试件表面贴敷电加热膜(见图 6b) 或电加热带的方式进行加热(见图 6c),但需考虑加 热膜或加热带对试件的约束效应。



图 6 慢烤试验装置

Fig.6 Slow heating test device: a) slow heating test chamber; b) electric heating film; c) electric heating belt

慢烤试验热加载装置还需配有相应温控设备,以 实现试验过程温升速率的控制。以慢烤试验箱为例, 试验箱内设有 K 型热电偶,试验箱内的温度变化由 热电偶传送至温控仪表转换至标准电信号。该实时采 集的温度信号与预设的温度控制信号进行比较,得出 偏差,利用仪表内部 PID 控制系统修正此偏差,继 而控制继电器以控制可控硅模块调节导通角,使得 慢烤试验箱内加热元件按规律导通、断开,最终实现 3.3 ℃/h 的温升速率控制。

2.4 中/高速撞击试验

中/高速撞击试验主要考核运输车辆以较高速度 撞击、空运事故高空坠落等场景下武器弹药的安全 性。由于跌落塔自身结构形式的影响,其试验最大加 载速度受限,仅能满足吊装等低高度跌落和部分公路 及铁路运输事故考核需求。为模拟更高速度的撞击事 故场景,可采用火箭撬试验系统开展武器弹药的高速 撞击试验。火箭橇是利用固体或液体火箭发动机作为 动力,推动火箭橇车在专用滑轨上高速前进,以获取 测试物体试验数据的大型地面动态试验系统。火箭撬 撞击试验是将被测件固定在火箭撬上,通过火箭撬加 速模拟设定的撞击速度,在轨道末端达到既定撞击速 度时,试件与火箭撬分离,试件以规定的姿态和速度 撞击在靶板上,以考核武器弹药系统的撞击安全性。

火箭撬撞击试验系统具体包括火箭撬运载设备 (火箭撬撬体、助推发动机、试件装配槽)、滑轨、 靶板、锁紧-分离装置等。火箭撬运载设备的运载能 力一般大于试件质量的 2 倍,速度控制精度应高于 10 m/s。滑轨应可靠稳定,滑轨靶板附近段能将火箭 撬准确导引致安全位置,防止试验发生爆炸对火箭撬 撬体造成损坏。靶板应平整,受撞面积应为试件撞击 面的 3 倍及以上,靶板强度和硬度应满足试件撞击后 无明显变形和位移,一般采用钢或混凝土材质。锁紧-分离装置在锁紧状态下应保证试件被固定在火箭撬 上不会脱落,在需要分离时,爆炸螺栓在接收到启动 信号后断开,令锁紧装置打开,实现试件与火箭撬的 瞬间分离。火箭助推发动机往往根据试件质量及撞击 速度确定,设计合适的工装以保证火箭撬加速运行时 试件与其可靠连接。撞靶阶段采用爆炸螺栓分离火箭 撬和试件,试件单独撞击靶体,而火箭撬分离后,沿 轨道滑行进行回收,如图7所示。试验开展前,应对地 面气候进行测量,尤其注意试验需在风速不大于5 m/s 时实施。



Fig.7 Schematic diagram of rocket sled test

美国是世界上最早开展火箭橇试验技术研究的 国家,经过70多年的发展,目前已拥有高精度火箭 橇滑轨 20 余条。2003 年,美霍洛曼空军基地试验速 度达到了马赫数 8.5, 共使用 4 级火箭, 13 台发动机, 该记录至今未能打破,如图8所示。目前美国正在研 制能够真实模拟高速推进飞行的火箭橇试验系统,最 高试验马赫数达 12,所需轨道长度达 20 km。俄罗斯、 英、法等国也都较早开展了火箭撬试验系统研制。俄 罗斯星辰科研生产联合体在莫斯科郊外建有一条 2 km 的火箭橇滑轨,英国马丁贝克公司在北爱尔兰朗福德 洛奇皇家空军基地建成一条 1.89 km 的火箭橇滑轨, 法国兰德斯导弹试验和发射中心建有一条 1.2 km 火 箭撬滑轨。相比国外,我国火箭橇研究虽起步较晚, 但经过多年发展,已取得长足进步,陕西华阴 051 基 地建有 1.8 km 火箭撬滑轨, 撬车最大速度可达 3 马 赫。考虑火箭撬试验往往成本过高,且其在中低速段 加载速度离散性大,可控性较差,中物院总体所研制 了基于气动加载的水平碰撞系统(如图 9 所示),以



图 8 美国霍洛曼空军基地火箭撬滑轨 Fig.8 Rocket sled track at Holloman Air Force Base



图 9 中物院总体所水平碰撞试验系统 Fig.9 Horizontal crash test system in ISE of CAEP

实现中低速准确加载。该系统可模拟车载运输及运输 机运输下的撞击事故场景。

2.5 枪击/碎片撞击试验

枪击试验主要考核轻型弹药攻击下武器弹药的 安全性,常用 5.56、7.62、12.7 mm 规格口径子弹进 行考核。最为严苛考核条件为试件经受 3 枚 12.7 mm 的 M2 穿甲弹射击,射击速度约为 850 m/s,子弹发 射间隔约为 80 ms,枪击位置需针对装药量最大部位 或冲击感度最高位置。试验系统主要为子弹发射装 置。枪击试验的开展主要受试验场地条件限制,试验 技术层面限制较少。

碎片撞击试验主要考核高速弹体碎片直接撞击 下武器弹药的安全性,常用 18.6 g 钢片以 2530 m/s 的标准试验速度对试件进行撞击。当具体场景分析表 明试件受到 2530 m/s 碎片撞击概率小于 0.01%时, 可 将撞击速度改为1830 m/s。同枪击试验一样,碎片撞 击试验的撞击目标点选择在装药量最大以及冲击感 度最高位置。碎片撞击试验的主要试验装置为可模拟 真实爆炸碎片材质、质量、形状、速度、侵彻深度等 因素的碎片发射装置。碎片发射装置主要分为枪炮系 统类和爆炸碎片发射装置类,常用枪炮系统类主要为 火炮和轻气炮,火炮以火药反应产生的高压燃气来推 动碎片。该碎片加速技术相对成熟,且该类装置体积 较小,较为经济,但碎片易受破坏。轻气炮以高温下 低分子量气体来推动碎片,碎片速度可达 13 000 m/s, 且碎片承受的加速度和应力较传统火炮小,不易破 坏。此外,随着电磁炮、激光炮技术的发展,其应用 于碎片撞击试验的技术问题正在攻关。爆炸碎片发射 装置主要通过起爆爆炸装置内部的装药以驱动预制 碎片飞散,其优点是可以实现多个碎片同时撞击试 件,但碎片状态控制难度较大。

2.6 深水压试验

深水压试验主要考核武器弹药系统在长时间深 海压力、深海异常侵入以及下沉和打捞上浮过程压力 变化时的安全性。武器弹药系统因运输舰船故障、装 卸事故而坠海,面临深海压力对其结构的物理破坏以 及长时浸没引起的海水浸入内部引起的化学反应作 用。国外对深水压力模拟试验技术研究起步较早,技 术水平较高,主要国家包括美国、德国、日本等。美 国海军造船厂目前建有内径为9.15 m、长度为22.9 m、 最大静水压力为84 MPa的深水压试验舱。日本防卫 厅技术研究所研制了可供整条重型鱼雷试验用的深 水压试验罐,并配有消声系统以提升高压环境参数测 试的有效性,该罐体尺寸长8.5 m,内径为2.2 m,容 积约40 m³,压力为0~18 MPa。中物院总体所现建有 系列深水压试验系统,如图10 所示。



图 10 中物院总体所深水压试验系统 Fig.10 Hydraulic pressure test system in ISE of CAEP

3 测试技术

对于异常环境安全性试验的测试,需同时考虑试 件高速撞击环境、高温环境下的力(应变、加速度等)、 热(温度、辐射率等)等常规物理量的测试问题,能 支撑辨识弹药反应程度(燃烧、爆燃、爆炸、部分爆 轰、爆轰反应程度)的测试信息捕获问题,以及安全 性试验极端力、热载荷下传感器的耐受问题。

跌落试验需要测量试件跌落过程中试件冲击地 面的加速度以及冲击地面瞬间各处的应变等参数,试 验全过程需使用高速摄影以监测试件跌落姿态、着地 点及试件的反应状况。跌落试验中加速度传感器量程 一般应不小于试件最大加速度的 1.5 倍,灵敏度不大 于 5%, 精度不大于 2%, 应变传感器的量程应为 20 000 µs。火烧试验主要涉及火焰温度测试、试件热 响应测试以及准确捕捉试件反应特征。火焰温度采用 铠装 K 型热电偶测试,试件内部离火焰较近处热响 应也采用 K 型热电偶, 经过热防护层, 传热路径较 深处可采用 T 型热电偶以及温度试纸。采用高速摄影 准确捕捉其发生反应的时间和反应状态,采用红外摄 影测量火焰辐射率以及监控试件发生燃烧、爆燃、爆 炸、部分爆轰、爆轰的热特征。验证板用来抵挡来自 试验爆炸冲击形成的碎片,试验后可根据验证板的损 伤程度来判断破坏效应,进而辨识试件反应烈度。对 于钢壳重型弹药, 宜采用 25 mm 厚钢制验证板; 对 于较薄钢壳或铝壳弹药,采用铝质验证板即可。此外, 验证板需避免放置在超压传感器方向上以影响冲击 波压力测量。慢烤试验测试系统包括温度测量装置、 录像设备、超压传感器以及验证板。其中, 慢烤试验 相比快烤试验,试件反应温度一般相对较低,温度测 量范围为 0~600 ℃。与火烧试验类似,录像设备仍包 括用于捕捉试件反应情况的高速摄影设备,以及实现 试验现场全局布控的普通摄像设备。慢烤试验箱的 存在将影响冲击波超压,因此慢烤试验箱体壁面应 尽可能薄,以使得超压传感器测量值在理想的爆炸 超压范围内。

高速撞击试验的测试设备包括冲击波超压测试、 加速度测试、着靶速度测试、高速摄影等。其中,冲 击波超压测试与高速摄影要求同上,加速度测试需考 虑火箭撬启动、加速以及撞靶产生的较大加速度,尤 其是撞靶瞬间加速度会达到上千个g。由于撞靶是在 瞬间完成,加速度传感器的响应频率需达到1kHz以 上。断靶法是目前火箭撬试验较为常用的速度测试方 法,其通过在轨道末端布置多道靶线,火箭撬运动过 程中先后切断靶线即可采集靶线断电信号时刻,从而 可算出试件着靶速度,该测试方法精度可达±1m/s。 此外,结合高速摄影和标尺也可判断出着靶速度。

在跌落、火箭撬、火烧、深水压等试验中,为减 少在线测量对试验状态的影响,相关科研机构着力研 制离线式内嵌测试系统,并开展应用。该内嵌式测试 系统常采用铝质材料,内壳采用钢质材料,核心部件 固态存储器通过缓冲材料灌封于钢壳内部,从而使其 可耐受高速冲击环境、高温环境、深水压环境。由于 试验时试件可能发生爆炸、燃烧转爆轰、冲击起爆等 反应,因此要求其响应速率要高,通常其瞬态采样率 不低于 200 kHz。此外,该测试系统还需设计断靶触 发功能,以防止试件反应提前造成的数据采集失败以 及试件反应延迟造成的数据存储已满的问题。中物院 总体所已成功研制可满足温度、图像、应变、过载、 位移、加速度等多参量测试需求的内嵌式测试系统, 具有抗高过载能力,性能指标先进,已成功应用于撞 击试验中,如图 11 所示。



a 大容量超长待机测试系统

b 内部视频存贮测试系统
 图 11 离线式内嵌测试系统

c 抗冲击测试系统

Fig.11 Offline embedded test system: a) large capacity and long standby test system; b) large capacity and long standby test system; c) impact protection test system

4 试验标准体系

目前,国外武器弹药安全性考核试验已形成较为 系统的标准体系,主要有北约的钝感弹药评估和试验 标准、美国的非核弹药危险评估试验标准。美体系是 在借鉴北约体系的基础上发展起来的,有一定联系性, 但也存在试验考核项目和试验通过准则上的不同。

针对武器弹药安全性问题,北约钝感弹药信息中 心于 1988 年在美国成立,主要成员包括美国、英国、 法国、荷兰、挪威、加拿大、意大利、葡萄牙、西班 牙、澳大利亚、芬兰、瑞典、丹麦和德国等。各国在 进行安全性研究的同时,先后制订了跌落、快速烤燃、 慢速烤燃等试验标准。在此基础上,北约标准化协议 STANAG 4439《钝感弹药介绍、评估和测试》于 1998 年颁布,明确了钝感弹药的安全试验项目、试验方法 以及通过准则,具有较强的可操作性。该体系包括安 全跌落、碎片撞击、子弹撞击、慢速烤燃、快速烤燃、 射流冲击、殉爆等单项试验标准。此后,北约又制定 了 AOP-38《与弹药、炸药和相关产品服役安全性与 适用性相关的术语和定义》,统一了术语和定义,出 版了盟军 AOP-39《钝感弹药的评估和研发指南》, 进一步指导了试验的开展与评估。同时,还制定了 STANAG 2895《北约部队装备在极端气候条件下的 试验设计准则》、STANAG 4370《环境试验》,为安 全性试验环境参数设置提供了依据。上述标准构成了 一套完整的武器弹药评估与试验方法标准体系[20-29],

如图 12 所示。该体系已被 15 个国家批准,应用广泛。

北约 4439 标准体系确定了武器弹药在全寿命周 期任务剖面可能遇到的事故场景,以及模拟这些典型 事故场景的试验项目。同时制定了开展这些试验的载 荷条件,即试验条件,并提出了钝感弹药在经历各典 型事故场景下的反应要求,即基准范围,见表1。



图 12 北约弹药安全性试验标准体系 Fig.12 Ammunition safety test standard system of NATO

表 1	北约 4439 标准体系事故场景	对应试验项目相关信息及	基准范围
Tab 1 Accident Scenari	ios and its corresponding test pro	oject information for Standa	ard System 4439 of NATO

	1		
事故场景	试验项目	试验条件	反应要求
弹药库着火或运载工具燃油起火	快烤	平均温度至少达到 800 ℃,燃油燃烧 30 s 后 火焰温度至少达到 550 ℃,直至弹药反应	响应类型不超过燃烧
邻近弹药库着火或运载工具燃油起 火	慢烤	加热速率 1~30 ℃/h, 直至弹药反应	响应类型不超过燃烧
小型武器攻击(子弹撞击)	枪击	3 发 AP 装甲弹,速度 400~850 m/s	响应类型不超过燃烧
碎片弹药攻击	碎片撞击	钢片 15 g, 2600 m/s; 65 g, 2200 m/s	响应类型不超过燃烧
聚能装药攻击	射流冲击	聚能装药口径最大 85 mm	响应类型不超过爆炸
弹药库、飞机或运载工具内发生爆轰	殉爆	主发装药配置符合要求	响应类型不超过爆炸

美国的 DOD-STD-2105^[30]非核弹药危险评估试 验标准体系在参考北约标准体系的基础上,形成了安 全性系列标准。该体系以美军标 2105D 为框架,试 验项目包括 4 项基本安全试验、6 项钝感弹药安全性 试验(与北约体系基本一致)和 42 项附加安全性试 验,这 52 项试验项目和 25 项标准形成了 2105 标准 体系的核心。此外,2105 标准体系还引用了如下标 准: MIL-STD-167 为舰载设备的机械振动标准; MIL-STD-331 为引信及引信组件环境和性能试验标 准; MIL-STD-810F 为环境工程及实验室试验标准; MIL-STD-882 为系统安全性程序要求的实施标准; MIL-STD-1670 为空射武器的环境准则和指南; MIL-HDBK-310 为军用武器产品的全球气候数据标准。

美标准体系共包括了 4 项基本安全试验、6 项钝 感弹药安全性试验及 42 项附件试验,见表 2。在具 体产品研制中,可根据具体型号寿命剖面实际面临的 威胁因素进行裁剪,特别是附加安全性试验。

表 2 美国 DOD-STD-2105 标准体系试验 项目及相关标准

Tab. 2 Test project and related standards for DOD-STD-2105 of USA

类别	序号	试验项目	标准
甘木	1	28 d 温湿度	DOD-STD-2105D
金平 安全	2	振动	DOD-STD-2105D
安王	3	4 d 温湿度	DOD-STD-2105D
14-1-1-1	4	安全跌落	STANAG4375
	5	快速烤燃	STANAG4240
钝感	6	慢速烤燃	STANAG4382
弹药	7	子弹撞击	STANAG4241
安全	8	碎片撞击	STANAG4496
试验	9	殉爆	STANAG4396
	10	射流冲击	STANAG4526
附安性验	11—52	加速度、声学、气动加热、 闪电、弹射、拦截着陆、 双馈弹药、粉尘、电磁干 扰、电磁辐射、电磁脉、电磁漏 、静电放电、之动 。本面,一应素氮、加压、和冰、 之体。 一应素氮、加压、和冰、 之体。 一应素氮、加压、和冰、 之体。 之体。 之体。 之体。 之体。 之、 之、 之、 之、 之、 之、 之、 之、 之、 之、 之、 之、 之、	DOD-STD-2105D

此外,还有法国的 DGA/IPE 弹药需求测试试验标准体系、英国的 JSP520 弹药安全性试验考核标准体系、德国的 BM-VG 弹药安全性试验考核标准体系和意大利的 DG-AT 安全性试验考核标准体系。与美体系相似,英体系、法体系和德体系也借鉴了北约4439 标准体系,英、德还引用了其钝感弹药评估和试验标准。意体系则融合了北约和法国的弹药安全性试验考核标准。对比分析可知,美国、法国、北约安全试验考核的试验项目不同,见表3。北约安全性试验包括跌落、快烤、慢烤、子弹撞击、殉爆、射流冲击、碎片撞击等7项试验。法国在北约7项试验项目基础上,将碎片撞击试验细化为轻型和重型碎片撞击试验,并增加了静电试验。美国则进一步细化分类,以6项弹药安全性试验为核心,增加了4项基本安全试验,以及42项附加安全性试验。

表 3 各国安全性试验考核项目比对

Tab. 3 Comparison of safety test and assessment items in different countries

国别	试验项目		
北约	跌落、快烤、慢烤 碎片撞击	、子弹撞击、殉爆、射流冲击、	
法国	跌落、快烤、慢烤、子弹撞击、殉爆、射流冲击、 轻型碎片撞击、重型碎片撞击、静电		
美国	基本安全试验	28 d 温湿度、振动、4 d 温湿 度、跌落	
	弹药安全性试验	快烤、慢烤、子弹撞击、殉爆、 射流冲击、碎片撞击	
	附件安全性试验	加速度、声学、气动加热等 42项	

5 结语

随着试验技术的发展,武器弹药异常事故环境安 全性会向着更加直观、安全和定量的方向发展,测试 手段也会更加丰富,可以获取更多以往试验中无法获 得的信息,从而更加准确地评估武器弹药异常事故环 境下的安全性。目前国外在武器弹药异常事故环境安 全性试验方法和评估准则方面已较为完善。相比而 言,国内武器弹药异常事故环境安全性试验技术领域 与国外存在一定差距,技术手段还需进一步创新,安 全性试验和评估标准体系还需建立完善。鉴于国内武 器弹药异常事故环境安全性试验技术的发展现状,建 议持续发展安全性试验技术,建立满足要求的配套试 验装置与测试系统,尽快提高武器弹药异常事故环境 安全性试验技术水平,形成体系完善的武器弹药异常 事故环境安全性试验能力, 解决更多、更苛刻事故场 景对应的试验模拟能力覆盖问题,并建立完善的试验 和评估标准体系。

参考文献:

- 赵延弟.安全性设计分析与验证[M].北京:国防工业 出版社,2005.
 ZHAO Yan-di. Safety design analysis and verification[M]. Beijing: National Defense industry Press, 2005.
- [2] 陈学楚. 装备系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
 CHEN Xue-chu. Equipment systems engineering[M].

Beijing: National Defense industry Press, 1995.

- [3] GJB 900A—2012, 装备安全性工作通用要求[S].
 GJB 900A—2012, General requirements for materiel safety program[S].
- [4] GJB 900A—2014,《装备安全性工作通用要求》实施 指南[S].
 GJB 900A—2014, "General requirements for materiel

safety program" implementation guidelines[S]. 李广武,赵继伟,杜春兰,等.常规导弹弹药安全性考

- [5] 李广武,赵继伟,杜春兰,等.常规导弹弹药安全性考核与技术[M].北京:中国宇航出版社,2015.
 LI Guang-wu, ZHAO Ji-wei, DU Chun-lan, et al. Safety assessment and technology of conventional missile ammunition[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2015.
- [6] MIL-STD-882, Standard practice for system safety program requirements[S].
- [7] MIL-STD-1670, Environmental criteria and guidelines for air-launched weapons[S].
- [8] 张建岗,李国强,孙洪超,等.放射性物品运输容器试验验证经验总结[J].辐射防护,2018,38(5):422-427. ZHANG Jian-gang, LI Guo-qiang, SUN Hong-chao, et. al. Safe test experience on radioactive material transport packages[J]. Radiation protection, 2018, 38(5): 422-427.
- [9] GB 11806—2019, 放射性物品安全运输规程[S].
 GB 11806—2019, Regulations for the safe transport of radioactive material[S].
- [10] QJ 20365—2014, 地(舰)空导弹武器系统安全性评审要求[S].
 QJ 20365—2014, Requirements for safety evaluation of surface (ship) to air missile weapon system[S].
- [11] QJ 20370—2014, 地(舰)空导弹飞行试验安全检查细则 [S].

QJ 20370—2014, Detailed rules for safety inspection of ground (ship) to air missile flight test[S].

 [12] 赵德仓. 导弹系统安全性分析[C]// 第八届全国爆炸与 安全技术学术交流会论文集. 南京:中国兵工学会, 2004.
 ZHAO De-cang. Missile system security analysis[C]//

Proceedings of the 8th national academic conference on explosion and safety technology. Nanjing: China Ordnance Society, 2004.

- [13] 伍俊英, 汪德武, 陈朗, 等. 炸药枪击试验和数值模拟 研究[J]. 高压物理学报, 2010, 24(6): 401-408.
 WU Jun-ying, WANG De-wu, CHEN Lang, et. al. Experiment and numerical simulations of bullet impact tests for explosives with shell[J]. Chinese journal of high pressure physics, 2010, 24(6): 401-408.
- [14] 李军强,申依欣,刘春,等.固体推进剂装药枪击试验数值模拟与试验[J].固体火箭技术,2019,42(4): 451-455.

LI Jun-qiang, SHEN Yi-xin, LIU Chun, et al. Numerical simulation and experiment on bullet impact characteristics of a solid propellant charge[J]. Journal of solid rocket technology, 2019, 42(4): 451-455.

- [15] 汪金军,易建政,段志强,等.野战弹药库战场生存能 力对策研究[J].装备环境工程,2010,7(3):96-98.
 WANG Jin-jun, YI Jian-zheng, DUAN Zhi-qiang, et al. Research on countermeasures of the field magazine battle field viability[J]. Equipment environmental engineering, 2010,7(3):96-98.
- [16] 吴阳辉, 涂加安, 占晓华. 常规导弹装备的运输管理
 [J]. 科技研究, 2018(6): 32-34.
 WU Yang-hui, TU Jia-an, ZHAN Xiao-hua. Transportation management of conventional missile equipment[J]. Technological studies, 2018(6): 32-34.
- [17] 张则敏, 王晓峰. 导弹武器装备运输性能与要求[C]// 第十二届全国可靠性物理学术讨论会. 成都: 中国电 子学会可靠性分会, 2007. ZHANG Ze-min, WANG Xiao-feng. Performance and requirements of missile weapons and equipment transportation[C]// Proceedings of the 12th national academic conference on reliability physics. Chengdu: Chinese Institute of Electronics, 2007.
- [18] 蒋超, 闻泉, 王雨时, 等. 不敏感弹药烤燃试验技术综述[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(2): 1-8. JIANG Chao, WEN Quan, WANG Yu-shi, et al. An overview on cook-off test technology for insensitive munitions[J]. Journal of detection & control, 2019, 41(2): 1-8.
- [19] 赵东平, 王峰, 余颜丽, 等. 铁路隧道火灾事故及其规模研究综述[J]. 隧道建设, 2015, 35(3): 227-231.
 ZHAO Dong-ping, WANG Feng, YU Yan-Li et. al. A review of fire accidents in railway tunnels and study on their scale[J]. Tunnel construction, 2015, 35(3): 227-231.
- [20] STANAG 4439, Policy for introduction, assessment and testing for insensitive munitions[S].
- [21] AOP-38, Glossary of terms and definitions concerning the safety and the suitability for service of munitions, explosives and related products[S].
- [22] AOP-39, Guidance on the development, assessment and testing of insensitive munitions[S].
- [23] STANAG 2895, Extreme climatic conditions and derived conditions for use in defining design test criteria for NATO forces materiel[S].
- [24] STANAG 4370, Environmental testing[S].
- [25] STANAG 4240, Liquid fuel/external fire, munition test procedures[S].
- [26] STANAG 4241, Bullet impact, munition test procedures[S].
- [27] STANAG 4382, Slow heating, munition test procedures[S].
- [28] STANAG 4396, Sympathetic reaction, munition test procedures[S].
- [29] STANAG 4496, Fragment impact, munition test procedures[S].
- [30] MIL-STD-2105C, Hazard assessment tests for non-nuclear munitions[S].