

doi: 10.7690/bgzdh.2025.11.001

战斗部装药侵彻安定性试验评估方法研究进展

李东伟, 刘俞平, 王昭明

(重庆红宇精密工业集团有限公司研究一所, 重庆 402760)

摘要: 针对炸药装药安定性和安全性评估, 对炸药安全性/安定性试验评估工作的研究进展进行分析。通过探讨实验室规模的装药安全性评估方法及试验装置, 对炸药在发射或侵彻等使用过程做出充分评价, 且该装置在一定程度上解决了过载环境下炸药装药安全性评价的技术难题。结果表明: 该研究对基于模拟载荷环境的炸药安定性和安定性评估方法具有较大的工程应用价值, 是未来装药安定性评估的发展方向。

关键词: 侵彻战斗部; 装药安定性; 侵彻环境模拟; 安定性评估

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Research Progress on Evaluation Methods of Warhead Charge Penetration Stability Test

Li Dongwei, Liu Yuping, Wang Zhaoming

(No. 1 Research Institute, Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: This paper analyzes the research progress in the evaluation of explosives' safety and stability, focusing on the assessment of explosives' charge stability and safety. It discusses the laboratory-scale methods and test devices for evaluating the safety of explosives charges, providing a comprehensive evaluation of explosives during launch or penetration processes. This device has solved, to some extent, the technical challenges associated with evaluating the stability of explosives charges under overload conditions. The results indicate that this research holds significant engineering application value for evaluating explosives' stability and safety based on simulated load environments, and represents the future direction for charge stability evaluation.

Keywords: penetration warhead; charge stability; penetration environment simulation; stability evaluation

0 引言

发射和侵彻是战斗部装药在使用过程中的 2 种典型。发射和侵彻过程中炸药装药所承受的载荷特点具有相似性, 均为惯性冲击载荷(过载), 也有独特性, 两者脉宽和幅值不同。炸药装药在发射和侵彻过程中, 即过载条件下的安定性评估是研究的重点与热点。

炸药落锤撞击感度试验是最常见、最传统的模拟炸药在受外界低速撞击时产生中等应变率的炸药安全性评估方法。试验装置一般为落锤仪, 如 BAM 落锤仪、卡斯特落锤仪等^[1], 试验时, 炸药粉体堆放在由击柱、击柱套、底座组成的撞击试验件中, 通过测试落锤在某固定高度落下撞击炸药样品后, 炸药样品爆炸概率或 50% 爆炸特性落高, 来表征并评价炸药的落锤撞击感度性质^[2]。由于炸药颗粒/粉末与实际应用中的炸药装药在力学性能等方面有着巨大的差别, 随着炸药工业的发展以及不敏感炸药研究工作的开展, 目前, 广泛使用的落锤仪已不能

满足需求^[3], 只有用大尺寸药柱才能对炸药在发射或侵彻等使用过程的安全性做出充分的评价。笔者基于近年来的发展, 分析了大尺寸炸药装药的安全性/安定性试验评估方法。

1 撞击感度试验

自 20 世纪 60 年代开始, 美国、德国、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、法国和中国等先后建立了一系列针对大尺寸药柱而进行的炸药安全性评估试验装置。

1.1 PA 激励器试验装置及方法

20 世纪 50 年代, 美国匹克汀尼兵工厂 (US army picatinny arsenal, PA)^[4]建立了炸药药柱撞击试验装置, 名称为“PA 激励器”(PA Activator)。该装置结构如图 1 所示, 通过药室内火药燃烧产生的气体作为动力驱动活塞, 并通过活塞将动力传递至被试样品。冲头与模套之间的间隙为 0.102 mm, 样品质量约为 5 g。作用在被试样品上的冲击载荷大小由发

收稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2024-11-10

基金项目: 兵装集团军品科研开发基金资助

第一作者: 李东伟(1989—), 男, 山西人, 博士。

射药量和针形阀组件来调节。通过探入药室内的测压计记录作用在炸药样品上的冲击加载大小，并以此为依据，不断调节发射药量及针形阀，直至与炮弹发射时底部所受的冲击加载大小和时间接近。

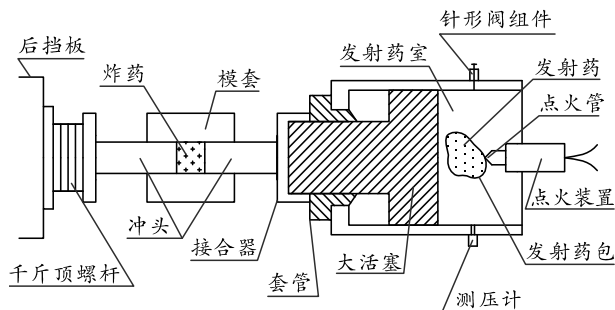


图 1 PA Activator 结构

20 世纪 80 年代，美国弹道研究所^[5]在 PA Activator 基础上，对其进行了改进：1) 主体装置方面，将冲头与模套之间的间隙缩小为 0.02 mm，并在炸药与冲头之间加了一块聚合材料，有效防止药柱与药室之间的空气泄漏与药柱-模套-冲头之间摩擦导致的意外点火；2) 测试方面，在样品后面装上锰铜压力传感器，对作用在样品上的压力直接进行测量；3) 建立模拟试验装置，称为“BRL 激励器”。BRL 激励器药柱承载部件如图 2 所示。

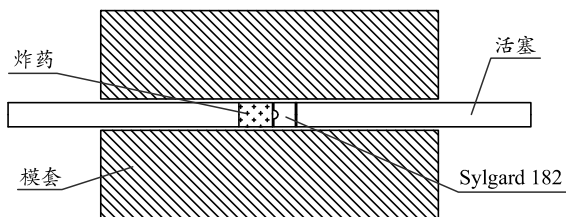


图 2 BRL 激励器药柱承载部件

1.2 后座模拟试验装置及方法

20 世纪 70 年代开始，我国开始从事炸药装药安全性研究。黄正平^[6]仿美国弹道研究所的 BRL 激励器，并对其重新设计，于 2000 年建成“小型后坐冲击模拟试验装置”^[2]研究工作历时 13 年。该后座模拟器实物如图 3 所示。



图 3 小型后坐冲击模拟试验装置实物照片

该装置主要特点是使用压缩气体加速重锤，通

过向带有人为预置缺陷(如气泡等)的炸药药柱施加撞击载荷来研究药柱的过载条件下的安全性。该试验装置结构由上打击和下试验弹 2 部分组成。试验时，在气室中充入压缩空气，当气室内压力达到一定值时连接销钉被剪切断，重锤下落，撞击试验弹部分的活塞杆，活塞杆将撞击作用力传递至被试药柱。被试药柱中预置气泡的空气受到快速压缩作用导致温度升高，形成“热点”。通过调节重锤的打击行程，可使炸药受到不同加载应力和应力率的作用。采用 50 Ω 螺旋型锰铜压阻传感器可对作用在炸药样品上的应力进行测试。试验中，被试药柱采用“三明治”结构(聚乙烯垫+药柱+聚乙烯垫)，聚乙烯垫为炸药试件提供保护，防止边角处的炸药试样挤入驱动活塞与约束套或约束套与见证块之间的缝隙中，避免了边角摩擦的意外点火，保证试验结果的可靠性。

随后，西安近代化学研究所与俄罗斯联合开展研究并建立了大落锤试验装置^[7]。该装置与“小型后坐冲击模拟试验装置”结构及原理相似，不同之处是该装置未采用压缩空气驱动，而是改用质量更大的大重锤(200~1 200 kg)。大质量重锤的采用增加了加载应力的幅值和脉冲的宽度，但是实验装置体积大，应力的幅值和脉冲调节相对困难。典型加载应力时间曲线如图 4 所示。

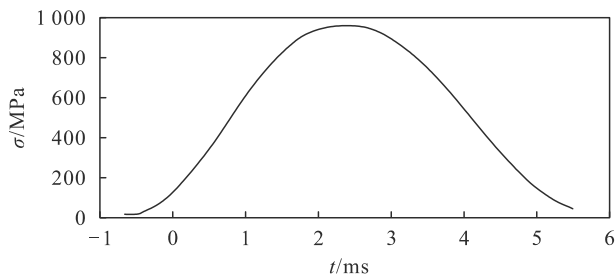


图 4 大落锤典型加载应力时间曲线

王世英等^[8-10]采用大落锤试验装置对浇注 PBX 的安定性进行了试验，采用大落锤试验装置对压装和熔注 B 炸药的安定性进行了试验。张涛等^[11]通过大落锤试验装置，对熔注、压装、浇注 3 种不同装药条件下的炸药进行了加载应力试验，并考核了 3 种装药的抗过载性能。该装置通过调整重锤的落高、质量、药柱及缓冲垫的厚度等来改变加载应力的。高立龙等^[12]利用 400 kg 大落锤试验装置对 TNT、B 炸药和钝化黑索今进行了撞击感度试验。随后，王世英^[13]对大落锤试验装置应力响应测试方法进行了改进，完善了对炸药装药落锤加载响应应力测试。许志峰等^[14]对大落锤试验装置可提供的应

力脉宽进行了调整,实现了炸药加载最大应力与加载脉宽同时接近过载条件下装药过载应力参量,提高了模拟试验的准确度。

中国工程物理研究院(CAEP)在美国海军武器中心(NSWC)建立的“NSWC 早炸模拟器”基础上,研制了“模拟弹落锤试验装置”^[15-16],该装置结构原理如图 5 所示。试验弹装配如图 6 所示。

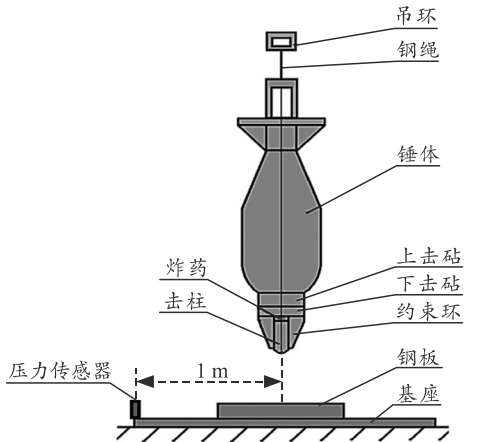


图 5 落锤装置

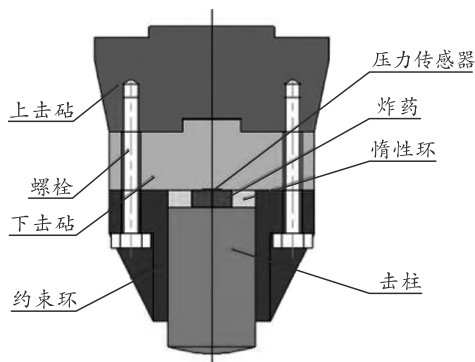


图 6 落锤试验弹装配

该装置与“小型后坐冲击模拟试验装置”及西安近代化学研究所的“大落锤”装置结构稍有不同,但原理相似。该装置将落锤和试验弹装配在一起,试验弹位于落锤头部,试验时,剪断吊起落锤的钢绳,落锤附带试验弹同时自然下落,位于试验弹头部的撞击杆与固定在地面的钢板相撞,撞击杆将撞击作用力传递至带有惰性材料约束环的药柱。该试验装置通过向炸药药柱试件施加撞击载荷来研究药柱的安全性。试验装置参数:落锤质量为 20~100 kg,落高为 2~12 m,药柱 $\Phi 20\sim 40$ mm。该装置测试得到典型加载应力时间曲线如图 7 所示。该试验装置存在的最大问题在于其试验缓冲垫由聚四氟乙烯(PTFE)制成,PTFE 在高温下具有强氧化性,在冲击作用下会诱导被试炸药发生反应,因而无法准确地判断炸药真实的安定性。

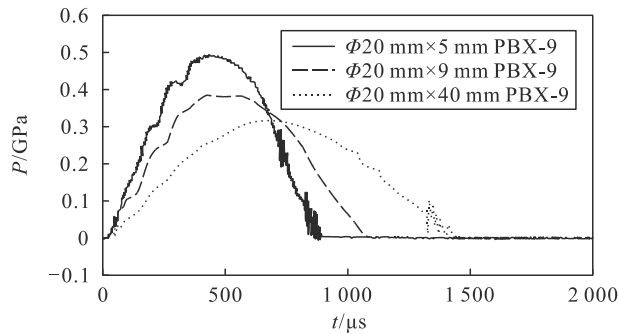


图 7 落锤典型加载应力时间

上述炸药安全性评估试验装置主要针对战斗部装药低幅值惯性冲击作用对炸药装药的安定性影响。其设计原理基本相似,主要是利用大质量重锤对炸药药柱进行冲击加载来模拟发射环境。这类试验装置本质上虽为撞击感度试验,但原理已明显区别于传统针对炸药颗粒进行的机械感度试验,而更加接近真实的使用环境。

2 侵彻过载环境模拟试验

2.1 剪切压缩试验装置及方法

法国火炸药公司(SNPE)Lecume 等^[17-19]分析了弹丸侵彻混凝土靶板时炸药装药的受力情况及其损伤特性。得到了弹丸侵彻混凝土靶板过程中产生的惯性载荷不同于一般的冲击载荷,其强度较低(小于 1 GPa),持续时间较长(约 1 ms)。研究认为剪切和压缩耦合作用是炸药装药侵彻过程主要受力特点,建立了炸药侵彻安全性评估装置,称为“剪切压缩试验装置(S&C)”,该装置装配及实物如图 8 和 9 所示。

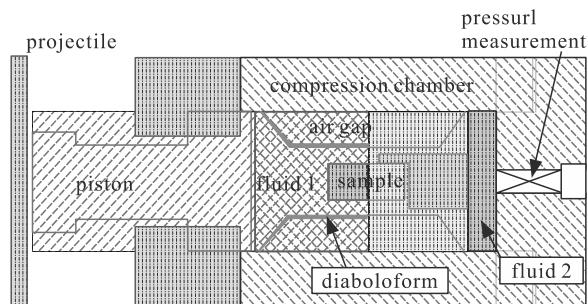


图 8 剪切压缩试验装置装配

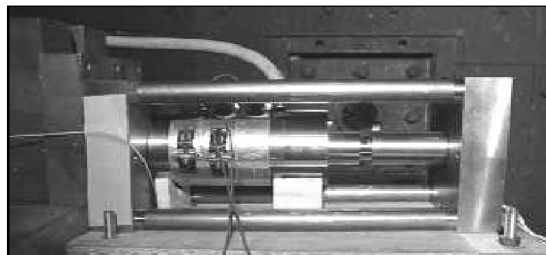


图 9 剪切压缩试验装置装配实物照片

该装置组成部件包括:大质量弹丸(projectile)、活塞(piston)、壳体(compression chamber)、可压缩材料制成的夹持装置(fluid 1)、可压缩缓冲垫装置(fluid 2)和压力传感器(pressure measurement)。炸药试样为圆柱形,尺寸为 $\Phi 18\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,外面包覆涂一层 PBHT 粘接剂。样品被放置在一个“空竹”形状夹持装置的腔内。“空竹”形装置是该剪切压缩装置的关键部件,该装置由 2 块 Teflon 拼接而成。在活塞打击下,通过它们的变形来产生剪切、压缩加载。“空竹”形装置使得炸药样品与装置外壁之间有一间隙,该间隙大小可调,该装置间隙的最大尺寸为 27 mm,这一间隙需要做抽真空处理(真空度 0.5 mbar)。通过改变空竹形装置的形状来改变间隙大小,以此获得作用在炸药样品上不同水平的载荷。测试时的温度通过保温环和液氮来控制。

试验时,轻气泡发射一枚较重的飞片撞击活塞,活塞运动使得可压缩材料产生变形,进而作用于处于可压缩材料中的炸药试样。该剪切压缩试验装置可以使剪切作用和压缩作用独立进行:1) 在弱压缩作用下的变形过程,加载模拟战斗部内部炸药装药在侵彻过程中炸药内部裂纹、孔洞的闭合。2) 在炸药试样上的强压缩过程,加载模拟战斗部内部炸药装药在较高减速度作用下的强压缩作用。这 2 步加载是战斗部内部炸药装药在侵彻过程中的典型受力形式。装置主要研究以 RDX 为基的 PBX 炸药的安全性。试验完毕后炸药装药状态如图 10 所示。装置尾部压力记录仪记录的典型的压力-时间曲线如图 11 所示。装置产生的应力率大约在 1 000 GPa/s,压力幅值小于 1 GPa,作用时间 2.5 μs 。



图 10 剪切压缩试验后炸药装药状态

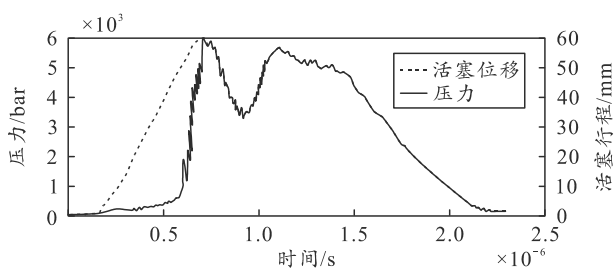


图 11 活塞位移、压力时间历程曲线

2.2 侵彻环境模拟试验装置及方法

李东伟^[20]通过分析战斗部在侵彻过程中装药的受力状态,基于动量守恒定律和单自由度受迫振动模型,研制出了涵盖力学加载、应力测试的侵彻环境模拟试验装置及系统。侵彻环境模拟试验装置系统组成和实物如图 12 和 13 所示。

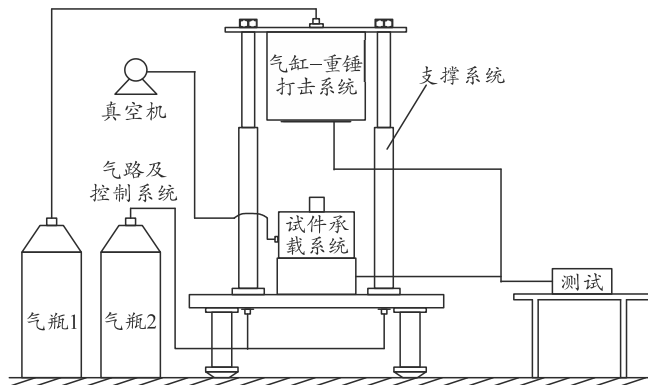


图 12 侵彻环境模拟试验装置系统组成



图 13 侵彻环境模拟试验装置主体

侵彻环境模拟试验系统主要由 5 大部分组成:

1) 气缸-重锤打击系统。功能是通过高压气瓶在封闭气缸内建立一定压力,驱动重锤以一定速度向下运动,打击被试炸药,为被试炸药装药试件提供一定加载动力。2) 试件承载系统。功能是使炸药处于被测状态,用于限制打击过程中的炸药装药试件,使其获得炸药装药对应侵彻时所承受的应力。3) 支撑系统。功能是固定装置相应各部件,使装置各部件处于各自的相对位置。4) 气路及控制系统。功能是为气缸-重锤打击系统和支撑系统的运行提供动力。5) 测试系统。功能是记录被测炸药装药试件所承受载荷的时间历程。

该装置最大高度 1.6 m,总重量 638 kg,重锤质量 50 kg,可提供最大应力 1.6 GPa,应力脉冲宽度 2 ms 左右。该试验装置采用压缩空气作为动力,

使得缩小装置尺寸的同时,提高了模拟装置输出压力幅值。并通过设计新型试验承载部件,使得打击过程炸药承压的同时可产生大变形,较为真实地模拟了侵彻过程炸药的受载及变形情况。侵彻环境模拟试验装置,较前述模拟装置具有尺寸小、产生载荷条件范围大的优点。该装置所产生的载荷可以模拟跌落、发射、侵彻等诸多低速、高速撞击过程炸药的受载情况,一定程度上解决了过载环境下炸药装药安定性评价的技术难题。

2.3 炮击评估试验装置及方法

苏珊(susan)试验^[21]是一种实弹撞击试验,用于评价弹丸与靶面撞击时的内部炸药装药的安全性。阮庆云等^[22]详细论述了苏珊试验的基本方法和原理。试验时,将炸药试样装入苏珊试验弹内,以水平方式发射,使之垂直撞击距炮口 3.7 m 处直立的钢靶板上。撞靶后,弹内炸药受到冲击、挤压及摩擦等因素的综合作用,机械能迅速转化为热能,部分试样受热分解,最终可能引起点火,甚至成长为爆轰。通过光电测速系统测量试验弹撞靶的速度,通过空气冲击波超压测试系统测量试样爆炸后形成的空气冲击波超压;通过高速摄影系统记录试验弹撞靶至点火爆炸的过程。根据这些测量结果,经过综合分析以评价炸药药柱的撞击感度。以弹丸撞靶速度与超压对应的 TNT 当量之间的关系曲线称为苏珊感度曲线^[23]。

苏珊试验弹结构如图 14 所示。试验弹重 5.44 kg,口径 82 mm。

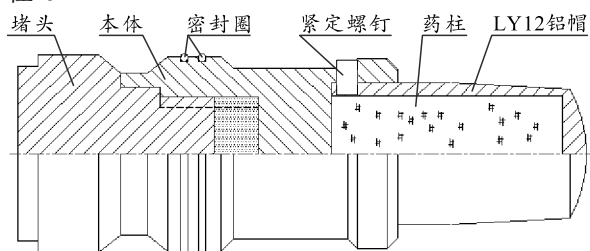


图 14 苏珊试验弹结构

李玉斌^[24]采用苏珊试验测试了 HMX 基压装 PBX 炸药在低速撞击下的感度,考察炸药粒度及品质对撞击安全性的影响。罗观等^[25]采用苏珊试验测试了浇注固化 PBX 类含铝炸药的苏珊感度。

李涛等^[26]在前人苏珊试验获得的几种炸药相对释能评定结果和苏珊感度的基础上,结合数值模拟计算和高速摄影及空气冲击波压力历史记录,对试验过程被试炸药样品化学反应释能速率进行定量评估,指出了苏珊试验在评估炸药装药安定性的不

足之处:在低幅值冲击过程中化学反应历程持续时间较长,平均能量释放率较爆轰反应的释能功率差别较大,其对外做功驱动相邻金属壳壁的能力大幅下降。在苏珊感度曲线已知的情况下,还需对受试炸药的放能速率特征有定量的认识,才能在安全性分析中更全面和切合实际地给出综合评估结论。

3 结论

综上所述,PA Activator、BRL 激励器、小型后坐冲击模拟装置、NSWC 早炸模拟器、模拟弹落锤试验装置等试验装置工作原理类似,主要是利用质量较大的重锤下落,重力势能转变为动能,打击炸药药柱,模拟低过载条件下弹丸内部炸药装药的作用,研究炸药装药内部缺陷对其安全性的影响,同时给出控制炸药质量的标准。剪切压缩试验装置所能提供的打击应力幅值及应力率较高,与侵彻环境较为接近,但是其打击力作用时间较短,对于炸药装药侵彻混凝土靶装药安定性情况,同样不能做出很好的评价。苏珊试验感度评估方法,以 TNT 爆轰空气冲击波超压为标准,对比炸药的感度。苏珊试验可在一定程度上对比不同炸药的撞击感度,但存在炸药起爆/点火时所受载荷不能记录的问题,难以对炸药的侵彻安定性给出定量评价。

对于侵彻环境下炸药装药安定性评估而言,仅北京理工大学和 SNPE 初步建立了评估方法与装置,但试验装置对侵彻环境载荷模拟和装药受载模拟仍与真实环境有一定差距,需进一步改进。

参考文献:

- [1] 肖忠良. 火炸药的安全与环保技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 20-25.
- [2] 胡庆贤, 吕子剑. 钝感高能炸药撞击感度测试方法的探讨[J]. 含能材料, 1994(1): 39-44.
- [3] 尹孟超. 炸药的安全性评价方法与撞击感度试验鉴定技术[J]. 火炸药, 1991(3): 23-32.
- [4] 连舜华. B 炸药的后座感度及其测试方法[J]. 火炸药, 1988(3): 34-45.
- [5] STARKENBERG J J, MCFADDEN D L, LYMAN O R. Cavity Collapse Ignition of Composition B in the Launch Environment[R]. Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground MD, 1986.
- [6] 黄正平. 小型后座冲击模拟试验总结报[R]. 北京: 北京理工大学机电学院, 2000.
- [7] 王世英, 胡焕性. B 炸药装药发射安全性落锤模拟加载试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003(3): 275-278.