文章编号：1003-1480（2026）01-0029-06

发烟弹与爆震弹枪击安全性对比试验与机理研究

马永忠[1]，李新庄[2]，王城鑫[2] ，邓明祥[2]

（1. 武警工程大学 装备管理与保障学院，陕西 西安，710086；2.武警工程大学 研究生大队，陕西 西安，710086）

摘 要：为评估防暴弹药在枪击条件下的安全性，参考 GJB 6238.28-2021 的试验流程，在 12 m 射距、弹速（935 ± 5）m·s^{-1} 条件下，用 95-1 式自动步枪发射 5.8 mm 普通弹，分别对某型发烟弹和某型强光爆震弹进行枪击试验。采用高速摄影、破片测速及残骸称重等手段，记录不同着弹部位的响应。结果表明：发烟弹主装药被贯穿后未发生燃烧或爆炸，仅延期解保机构失效时出现可控发烟；强光爆震弹主装药一旦被击中即发生剧烈爆炸，最重破片（击发座，44.51 g）初始动能 297.4 J，按 98 J 致伤阈值计算杀伤半径 4.63 m；若枪弹仅击中爆震弹空腔或延期机构且传火通道被切断，则仅机构损坏而不引爆。研究认为，主装药感度与弹体结构是决定枪击安全性的关键因素，建议爆炸型防暴弹采用低感度药剂或双层壳体设计，并在储存及使用时设置≥5 m 安全隔离区，为防暴弹药的安全性评价与使用规程修订提供依据。

关键词：防暴弹药；枪击试验；安全性；发烟弹；强光爆震弹

中图分类号：TJ410.1；X932 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.005

Comparative Testing of Gunfire Safety for Smoke Grenades and Stun Grenades

MA Yong-zhong[1], LI Xin-zhuang[2], WANG Cheng-xin[2], DENG Ming-xiang[2]

（1.School of Equipment Management & Support，Engineering University of PAP，Xi'an，710086；2.Graduate Brigade，Engineering University of PAP，Xi'an，710086）

Abstract：To evaluate the safety of riot control munitions under gunfire, tests were conducted in accordance with the GJB 6238.28-2021. A Type 95-1 assault rifle was used to fire 5.8 mm ball cartridges at a specified distance of 12 m, achieving an impact velocity of（935±5）m·s^{-1} against both a smoke grenade and a stun grenade. The response from different impact locations was monitored using high-speed imaging, fragment velocity measurement, and debris weighing. Results indicated that perforation of the smoke grenade's main charge did not lead to combustion or detonation. Controlled smoke emission occurred only upon failure of the delay arming mechanism. In contrast, impact on the stun grenade's main charge caused violent detonation. The heaviest fragment (the firing base, 44.51 g) attained a kinetic energy of 297.4 J, resulting in a calculated injury radius of 4.63 m based on the 98 J criterion. No detonation was observed when the bullet hit only the air cavity or the arming mechanism, severing the fire-transfer path, causing only mechanical damage. It is concluded that the key factors determining bullet-impact safety are the sensitivity of the main charge and the structural design of the munition. Therefore, for explosive-type riot munitions, the use of less-sensitive formulations or double-layer casings is recommended, alongside maintaining a safety zone of no less than 5 m during storage and operation. This study provides a basis for safety assessments and the revision of operational protocols.

Key words：Riot control ammunition；Ballistic impact；Safety；Smoke grenade；Strong light stun grenade

防暴弹药作为非致命性警用装备的重要组成部分，广泛应用于反恐处突、维稳防暴及日常演练等非战争军事行动中，主要包括发烟弹、强光爆震弹、催泪弹和染色弹等类型[1]。在复杂实战环境中，防暴弹

收稿日期：2025-12-08
作者简介：马永忠（1970-），男，教授，从事防暴装备研发及试验测试研究。
通讯作者：李新庄（1992-），男，在读硕士研究生，从事警用装备研究。
基金项目：装备综合研究基金资助项目（xx2023B010100-13）；2023 基础前沿创新基金资助项目（WJY202331）。
引用本文：马永忠，李新庄，王城鑫，等. 发烟弹与爆震弹枪击安全性对比试验与机理研究[J]. 火工品, 2026(1): 29-34.

药可能因敌方火力误击或战场流弹作用而遭受枪弹冲击。一旦引发意外燃爆，不仅会导致装备失效，还可能对携行人员及周边群众造成严重伤害，构成重大安全隐患。

目前，针对军用主战弹药的不敏感性能（Insensitive Munitions, IM）已有较为系统的评估体系，其中枪击安全性是核心考核项目之一[2-3]。然而，防暴弹药因其非致命定位和特殊装药特性，尚未纳入 IM 标准体系，相关枪击安全性的基础试验数据十分匮乏。尤其对于不同装药类型（如燃烧型与爆炸型）及结构设计的防暴弹药，在枪击作用下的响应机制与危险等级缺乏系统对比与量化评估。

鉴于此，本文选取现役装备中具有代表性的某型发烟弹[4]（燃烧型）与某型强光爆震弹[5]（爆炸型）作为研究对象，参照轻武器典型威胁条件，在 12 m 距离上采用 5.8 mm 普通弹进行分区枪击试验，重点考察延期解保机构、主装药及弹体空腔等关键部位受击后的燃爆响应特性。通过高速摄影、残骸收集与动能计算等手段，定量分析其安全性差异，并评估爆炸破片的致伤风险。研究成果可为防暴弹药的安全性分类、储存使用规范修订及低感度/无破片化设计提供科学依据，对提升警用装备战场生存能力与人员防护水平具有重要现实意义。

1 枪击试验

1.1 试验准备

1.1.1 试验仪器、设备

试验所用仪器与设备如表 1 所示。

表 1 试验用仪器与设备

Tab.1 Test instruments and equipment

名称	型号	生产厂家
高速摄像机	天眼狼 XJ520	合肥富煌君达高科信息技术有限公司
激光测距仪	徕卡 X3	匈牙利徕卡测量系统公司
电子天平	JM-B2003	慈溪红钻衡器设备有限公司
摄像机	索尼 AX45A	索尼公司

试验样品及枪弹：某型发烟弹、某型强光爆震弹，95-1 式自动步枪，5.8 mm 普通弹。鉴于 95-1 式自动步枪及其配套的 5.8 mm 普通弹是我国军警常用的装备，故选择它们作为本次试验的辅助装备。

1.1.2 场地设置

考虑到两型防暴弹药弹体为塑料材质，在枪击后可能产生发烟、燃烧或爆炸现象，并且爆炸产生的碎片具有潜在危险性，因此选择了空旷、平坦且周围无障碍物的安全场地进行试验。试验现场布置如图 1 所示。

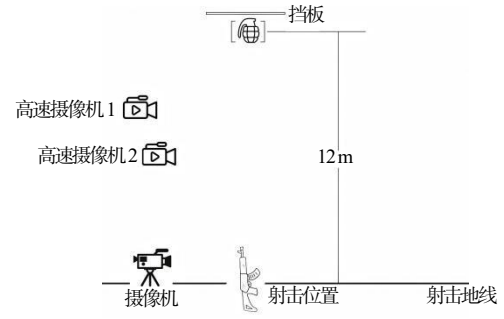


图 1 试验场地布置图

Fig.1 Layout of the test site

被试防暴弹药通过专用夹具固定于射击位置前 12 m 处，离地高度 0.3 m。为了准确记录子弹撞击防暴弹药的位置以及击中后的爆炸情况，在被试弹药后方 1 m 处设置了观察板，作为计算弹体残骸飞溅速度的参照物。同时，合理安排高速摄像机和普通摄像机的位置，以全程记录防暴弹药的发烟及燃爆过程。由于 5.8 mm 普通弹在出枪口 50 m 内的飞行速度变化极小（约 5 m·s^{-1}），对本试验结果影响不大。此外，根据射击精度的要求及场地条件，确定了射击位与目标的距离为 12 m。

1.1.3 试验气象条件

试验当日的环境温度为 5 ℃，湿度为 15%。

1.2 试验方案

1.2.1 枪击区域划分

本文选取现役的某型发烟弹和某型强光爆震弹作为被试对象，其实物外形如图 2 所示。

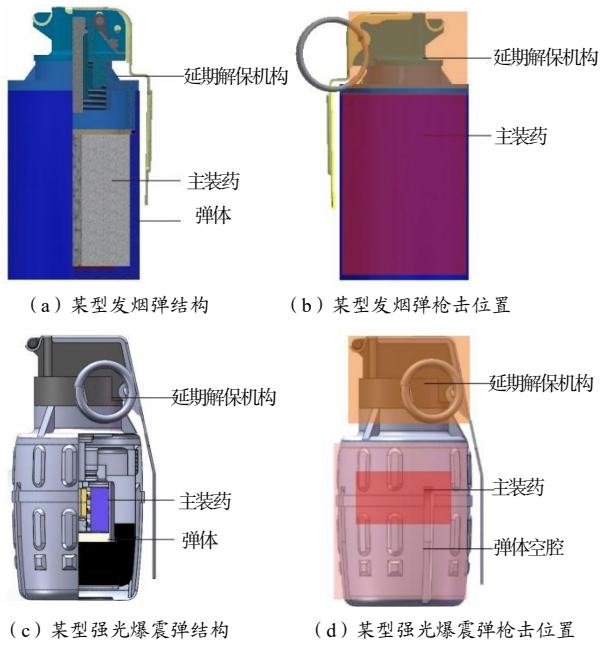
某型发烟弹由延期解保机构、弹体、主装药 3 部分组成，如图 3（a）所示。其主装药填充于弹体内部，呈空心圆柱状，包含氯酸钾等氧化剂和乳糖、蔗糖、淀粉等可燃剂以及蓝色着色剂[6]。试验前，将该型发烟弹的枪击区域划分为延期解保机构和主装药 2 个部分，分别进行分区射击，以观察不同部位受击后的响应效果，如图 3（b）所示。某型强光爆震弹的主装药装填于弹体中部的 ABS 塑料药盒内，药盒下部为配

重装填物。在弹体中部，塑料药盒与塑料弹体之间为空腔结构，如图 3（c）所示。主装药由高氯酸钾氧化剂和铝粉等还原剂组成[7]。试验前，将该型强光爆震弹的枪击区域划分为延期解保机构、主装药及主装药以外区域 3 个部分，进行分区射击，以观察不同部位受击后的反应，如图 3（d）所示。

（a）某型发烟弹　　（b）某型强光爆震弹

图 2　两型防暴弹实物图

Fig.2　Physical images of two types of riot control munitions



（a）某型发烟弹结构　　（b）某型发烟弹枪击位置

（c）某型强光爆震弹结构　　（d）某型强光爆震弹枪击位置

图 3　防暴弹药结构与枪击位置示意图

Fig.3　Schematic of munition structures and impact locations

1.2.2　枪击试验方案

为便于记录试验结果并确保数据准确可靠，试验前对被试样弹逐枚编号，并标记射击位置，以便实施分区射击。使用普通摄像机对枪击两型防暴弹药的全过程进行记录，同时利用高速摄像机捕捉防暴弹药燃爆及破片飞散的动态过程。此外，还通过拍照记录枪击前后防暴弹药的状态，收集并整理弹体残骸，用于分析和评估防暴弹药的枪击安全性。本次试验共消耗防暴弹药 24 枚，其中某型发烟弹 12 枚，某型强光爆震弹 12 枚。

2　试验结果与安全性分析

2.1　枪弹射击初速测定

根据高速摄像机记录的枪弹在 12 m 距离上的飞行时间，计算得出枪弹击中防暴弹药时的飞行速度为 935 m・s^{-1}。

2.2　枪击试验结果

对每枚防暴弹药的枪击位置及发烟、爆炸情况进行了详细统计，结果如表 2~3 所示。

表 2 发烟弹枪击响应结果统计

Tab.2　Response results of smoke grenades under gunfire

枪击位置	枪击结果	数量/枚	枪击情况说明
延期解保机构	发烟	2	枪弹击中延期解保机构，导致延期管发火，引燃主装药，弹体发烟
	未发烟	4	1.枪弹击中延期解保机构，导致延期管发火，但由于枪弹能量将延期解保机构与弹体传火通道切断，弹体未发烟 2.枪弹击中延期解保机构边缘部位，未导致保险机构失效，弹体未发烟
主装药	未发烟	6	枪弹均贯穿弹体主装药，弹药未产生发烟爆炸现象

表 3　强光爆震弹枪击响应结果统计

Tab.3　Response results of strong-light stun grenades under gunfire

枪击位置	枪击结果	数量/枚	枪击情况说明
延期解保机构	爆炸	1	枪弹击中延期解保机构，导致延期管发火，引燃主装药，弹体爆炸
	未爆炸	5	1.枪弹击中延期解保机构，延期管发火，但由于枪弹能量将延期解保机构与弹体传火通道切断，弹体未爆炸 2.枪弹击中延期解保机构边缘部位，未导致保险机构失效，未引起弹药爆炸
主装药	爆炸	3	枪弹击中主装药，导致主装药发火爆炸
弹体空腔	未爆炸	3	枪弹贯穿弹体空腔，弹药未产生爆炸现象

2.3　枪击安全性分析

结合枪击位置及主装药情况，分析两型防暴弹药的枪击结果及安全性。

2.3.1 枪击某型发烟弹安全性分析

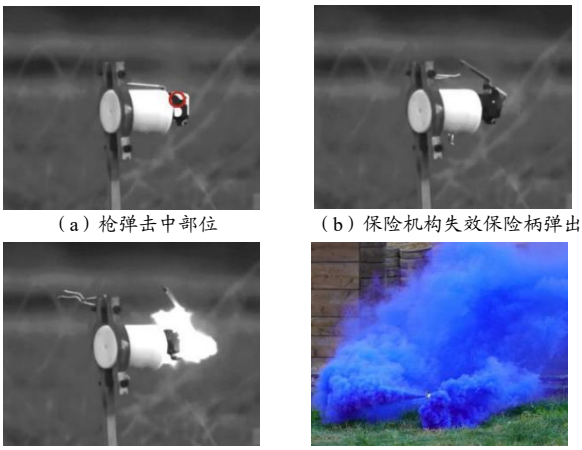
2.3.1.1 击中延期解保机构部位

枪弹击中某型发烟弹延期解保机构部位后，出现弹药发烟和未发烟 2 种情况。

（a）弹药发烟情况。分析高速摄像影像可知：高速飞行的枪弹击中延期解保机构，导致保险机构失效，翻板击针撞击延期管火帽，引燃主装药，致使发烟弹发烟。高速影像如图 4（a）~（c）所示，弹药发

烟情况如图 4（d）所示。

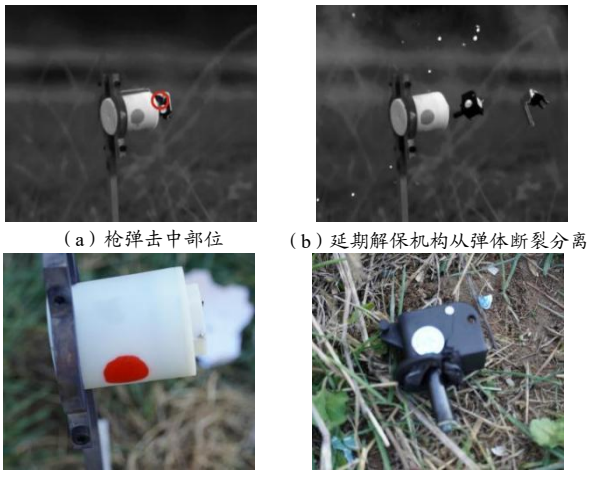
（b）弹药未发烟情况。高速飞行的枪弹击中发烟弹延期解保机构（图 5（a）红色标识部位），导致机构失效，延期管发火，但由于枪弹高速撞击的冲击力破坏了延期解保机构与弹体间的塑料螺纹连接，致使延期解保机构从弹体断裂分离，传火通道被切断，未能引起弹体发烟。



（a）枪弹击中部位　（b）保险机构失效保险柄弹出　（c）延期管发火　（d）弹体发烟

图 4　发烟弹延期解保机构受击高速影像与发烟现象

Fig.4　High-speed imaging and smoke emission from arming mechanism of smoke grenade under gunfire



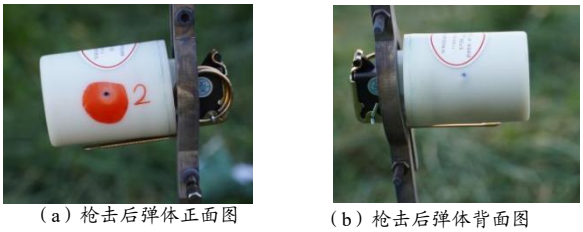
（a）枪弹击中部位　（b）延期解保机构从弹体断裂分离　（c）被切断延期解保机构的弹体　（d）断裂掉落的延期解保机构

图 5　发烟弹延期机构断裂分离高速影像与残骸

Fig. 5　High-speed imaging and debris of fractured arming mechanism from smoke grenade

2.3.1.2 击中弹体主装药部位

枪击发烟弹主装药部位时，枪弹贯穿弹体，枪击正面弹孔平整，后部弹孔较正面小，且均小于弹径。共 6 发枪弹穿透主装药，均未发生发烟及燃爆现象，实物图如图 6 所示。试验表明：发烟弹主装药剂摩擦、撞击感度较低，遭枪击后安全性高。



（a）枪击后弹体正面图　（b）枪击后弹体背面图

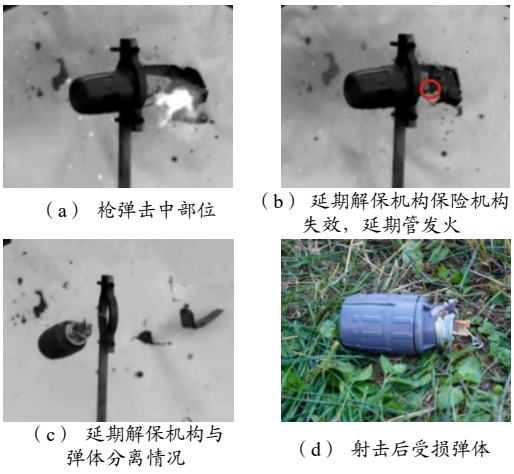
图 6　发烟弹主装药部位枪击后状态

Fig.6　Post-impact condition of main charge area in smoke grenade

2.3.2 枪击某型强光爆震弹结果及安全性分析

2.3.2.1 击中延期解保机构部位

1 发枪弹击中延期解保机构侧部，造成其外表损坏，但未导致保险机构失效，爆震弹未发生燃烧爆炸现象；2 发枪弹击中延期解保机构中部，枪弹的强大冲击力导致保险机构失效，翻板式击针打击火帽，延期管发火。冲击力同时导致延期解保机构与弹体断裂分离，破坏了传火通道，延期管火焰未引爆弹体主装药，未产生燃爆现象，如图 7 所示。



（a） 枪弹击中部位　（b） 延期解保机构保险机构失效，延期管发火　（c） 延期解保机构与弹体分离情况　（d） 射击后受损弹体

图 7　强光爆震弹延期解保机构受击高速影像与损伤状态

Fig.7　High-speed imaging and damage to arming mechanism of strong-light stun grenade under gunfire

2.3.2.2 击中主装药部位

1 发枪弹击中强光爆震弹中部主装药部位，如图 8（a）所示，爆震弹直接发生爆炸，产生强光、强声，如图 8（b）所示。

（a）枪弹击中部位　（b）亮光爆震弹枪击后爆炸

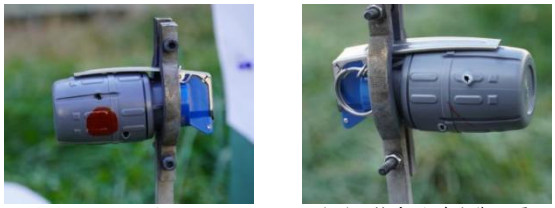
图 8　强光爆震弹主装药部位受击爆炸高速影像

Fig.8　Detonation of main charge in strong-light stun grenade under impact (high-speed imaging)

试验表明：枪弹高速穿透强光爆震弹弹体主装药，与主装药剂产生剧烈摩擦和撞击，超过药剂摩擦感度和撞击感度限值，引发爆炸。

2.3.2.3 击中弹体空腔部位

3 发枪弹击中弹体空腔部位并穿透，弹药未发生爆炸，正面弹孔平整，后部弹孔略微突起，较正面弹孔小，如图 9 所示。



（a） 枪击后弹体正面图　　（b） 枪击后弹体背面图

图 9　强光爆震弹空腔部位枪击后状态

Fig.9　Post-impact condition of cavity area in strong-light stun grenade

试验表明：枪弹击中弹体中部空腔部位并穿透，剧烈的摩擦和撞击未能引爆强光爆震弹主装药，弹药未爆炸。

2.4　枪击强光爆震弹致伤距离计算

当枪弹击中主装药部位时，弹药发生爆炸，弹体解体，产生大量残骸。收集并称重弹体残骸，结果显示该弹爆炸形成的残骸数量较多。其中质量最大的是橡胶包覆铁块制成的配重块，其次为铝合金材质的击发座。此外，上、下壳体为韧性较好的 PE 材质，装药盒为质地较脆的 ABS 塑料材质，爆炸导致盒体 80% 破碎成小碎片。试验中记录了主要破片距炸点的位置，并对其质量和面积进行测量，统计结果如表 4 所示。高速摄像机记录了弹体残骸的分散过程影像，如图 10 所示，红色标识为击发座残骸。

表 4　爆炸主要残骸参数统计

Tab.4　Parameters of primary explosion debris

名称	质量/g	距炸点最大距离/m	破片最大面积/cm^{-2}
击发座	44.51	29.2	4.91
上壳体	13.51	20.1	18.02
下壳体	31.26	26.26	12.15
药盒盖	13.22	12.28	3.81
配重块	31.78	28.01	12.14

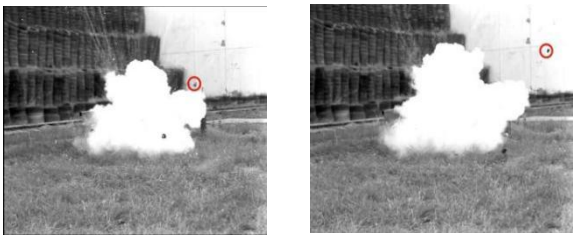
强光爆震弹受枪击爆炸时，击发座残骸飞散距离最远为 29.2 m，其余残骸质量较小，因此击发座对人员的安全隐患较大。对击发座残骸的动能进行分析。

根据高速摄像机拍摄画面，计算得到击发座残骸初速。强光爆震弹爆炸后残骸动能 E 的计算公式见式（1）：

$$E=0.5mv^2 \qquad (1)$$

式（1）中：m 为弹体残骸质量，本研究用强光爆震弹击发座残骸质量 m=44.51 g；v 为弹体残骸速度。

根据式（1）计算得到该残骸动能 E=297.4 J。



（a）击发座位置 1　　（b）击发座位置 2

图 10　强光爆震弹爆炸残骸飞散过程

Fig.10　Debris dispersion from detonated strong-light stun grenade

不同国家对动能的致伤标准界定有所不同。我国通常采用 98 J 作为评价对人员目标杀伤效率的标准[8]，而美军标（MIL-STD-2105C）采用的人员杀伤效率标准为 79 J[9-10]。鉴于试验对象主要在国内使用，不考虑外贸出口问题，因此采用 98 J 作为评价对人员目标杀伤效率的标准。

不同距离下弹体残骸的速度[11-12]，采用公式（2）~（3）计算。为简化计算，假定弹体残骸运动速度仅受空气阻力影响，忽略重力作用，且空气阻力系数与空气密度恒定。

$$v = v_0 \cdot \mathrm{e}^{-\alpha s} \qquad (2)$$

$$\alpha = (\ln v_1 - \ln v_2)/s_{12} \qquad (3)$$

式（2）~（3）中：v_0 为弹体残骸的初速；α 为衰减系数。

通过高速摄像机记录两个不同时间段 t_1、t_2 及其对应的位移 s_1、s_2，求得两个时间段的平均速度 v_1、v_2，并近似视为位移中点处的速度，两段位移中点的距离即为 s_{12} [13]。

如图 10 所示，经计算，位置 1 处击发座的速度为 101.6 m·s^{-1}，位置 2 处为 98.09 m·s^{-1}，二者相距 0.5 m，根据式（3）计算得 $\alpha \approx 0.07$。

以我国常用的 98 J 致伤动能标准为依据，通过式（1）计算得出此时残骸致伤速度。

此时破片的致伤距离 s 为：

$$s = -\frac{\ln \alpha}{v_h} \cdot v_0 \qquad (4)$$

将致伤速度 v_h 代入式（4），求得 s=4.63 m。即该弹体的击发座残骸在距离 4.63 m 处仍具有较强的致伤能力。

根据计算结果，当人员随身携带该型强光爆震弹时，若弹体主装药部位遭受枪击，会发生爆炸，其爆炸残骸对携带人员将产生严重伤害。在存储状态下被枪击后，其爆炸残骸在 4.63 m 范围内仍具有较大致伤能力，致伤距离为 4.63 m，建议设置不小于 5 m 的安全隔离区以覆盖不确定性及安全裕，。

3 结论

本文通过 12 m 距离下 5.8 mm 普通弹对某型发烟弹与某型强光爆震弹的分区枪击试验，系统研究了不同命中位置对防暴弹药安全响应的影响，得出以下结论：

（1）防暴弹药在枪击作用下的安全性高度依赖于主装药类型与命中部位。发烟弹所用燃烧型药剂（如氯酸钾/乳糖体系）摩擦与撞击感度低，即使主装药被贯穿亦未发生燃爆；而强光爆震弹所含爆炸型药剂（如高氯酸钾/铝粉体系）对枪击极为敏感，主装药一旦被击中即引发剧烈爆炸。

（2）延期解保机构受损可能导致两种截然不同的后果：或因意外激发引发功能动作，或因传火通道中断导致失效，但均不必然引发爆炸，其风险显著低于主装药直接命中。

（3）强光爆震弹爆炸后产生的最大残骸（击发座，质量 44.51 g）初始动能达 297.4 J，依据 98 J 人员致伤阈值计算，其致伤距离为 4.63 m，表明此类弹药在枪击引爆后仍具有显著二次伤害风险。

基于上述发现，建议：

① 对爆炸型防暴弹药（如强光爆震弹）在储存、运输及携行过程中设置不小于 5 m 的安全隔离区；

② 优先采用低感度主装药配方与无破片或弱破片结构设计，从源头提升固有安全性；

③ 在相关安全评估标准中，应将装药类型和关键部位防护等级纳入枪击安全性分类依据。

本研究为防暴弹药的实战安全使用、风险管控及下一代钝感化设计提供了试验支撑与理论参考。

参考文献：

[1] 翟浩龙, 崔晓萍. 防暴弹药任务安全性研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 12-17.

[2] 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.

[3] GJB 6238.28-2021 军用装备不敏感弹药试验方法 第 28 部分：枪击试验[S]. 中央军委装备发展部, 2021.

[4] 张兴高, 张开创, 李剑斌, 等. 特种弹药的发展现状[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(5): 1-6.

[5] 马永忠, 刘加凯. 强光爆震弹安全性优化设计[J]. 兵器装备工程学报, 2020,41(8): 63-67.

[6] 唐井爽, 朱晨光, 吴昊. $FeMnO_3$ 材料对高氯酸钾基彩色发烟剂的催化作用研究[J]. 火工品, 2024(3): 54-59.

[7] 田进, 武敬博, 袁有根, 等.一种高性能爆震剂的配方设计[J]. 广东化工, 2022, 49(18): 46-48, 30.

[8] 王树山, 韩旭光, 王新颖. 杀伤爆破弹综合威力评估方法与应用研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(7): 1 249-1 254.

[9] MIL-STD-2105D Test Method Standard for Insensitive Munitions [S]. Department of Defense, 2019.

[10] 王林, 李彤华, 李晓辉, 等. 人员目标特性的战斗部杀伤威力评价方法[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(11): 122-124.

[11] 王庚, 崔晓萍, 王瀚鹏, 等. 某眩晕手榴弹破片安全性试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(3): 93-96,141.

[12] 洪豆, 郑宇, 李文彬, 等. 破片战斗部杀伤面积影响规律研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 37-42.

[13] 郭三学. 爆震弹破片非致命效应研究[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(3):75-78.