

低易损推进剂机械刺激下的试验、机理、配方的研究进展

李海涛^{1,2}, 武卓^{1,2}, 汪越^{1,2}, 王拯^{1,2}, 李尚文^{1,2}, 黄印^{1,2}, 程红波^{1,2},
徐爽^{1,2}, 宋柳芳^{1,2}

(1.湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441003; 2.航天化学动力技术重点实验室,
湖北 襄阳 441003)

摘要: 基于我国的低易损推进剂试验和理论研究工作相比于国外起步较晚, 尤其是子弹冲击、破片冲击、聚能射流冲击等机械刺激作用下的低易损研究, 受到试验条件和评估标准的限制更为严重, 研究的滞后性尤为突出。为了给后续研究工作提供一些帮助, 总结了三个方面的研究进展。一是低易损推进剂子弹冲击、破片冲击、聚能射流冲击的试验结果; 二是低易损推进剂在机械刺激下的响应机理; 三是低易损推进剂的配方研究工作。最后提出了几点建议, 希望对国内的相关理论研究和生产实践有所帮助。

关键词: 低易损推进剂; 机械刺激; 子弹冲击; 破片冲击; 聚能射流冲击; 响应机理

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.09.010

中图分类号: V211 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)09-0057-06

Research Progresses of Experiment, Mechanism, and Formulas of Low Vulnerable Propellants under Mechanical Stimulations

LI Hai-tao^{1,2}, WU Zhuo^{1,2}, WANG Yue^{1,2}, WANG Zheng^{1,2}, LI Shang-wen^{1,2}, HUANG Yin^{1,2},
CHENG Hong-bo^{1,2}, XU Shuang^{1,2}, SONG Liu-fang^{1,2}

(1. Hubei Institute of Aerospace Chemical Technology, Xiangyang 441003, China; 2. Key Laboratory of Aerospace Chemical Power Technology, Xiangyang 441003, China)

ABSTRACT: The theoretical and experimental researches of low vulnerable propellants in China are hysteretic compared with other countries, especially in the fields of bullet impact, fragment impact, and shaped charge jet impact, because they are limited by experimental conditions and assessment standard. To provide assistants for subsequent researches, progresses in three aspects were summarized in this review, including the experimental results of bullet impact, fragment impact, and shaped charge jet impact, the response mechanism of low vulnerable propellants suffering mechanical stimulations, and formulas researches of low vulnerable propellants. Some advices were provided finally to help the theoretic researches and industry productions in China.

KEY WORDS: low vulnerable propellant; mechanical stimulation; bullet impact, fragment impact; shaped charge jet impact; response mechanism

低易损推进剂是固体火箭推进剂的研究前沿, 被广泛应用于舰载导弹和机载导弹中^[1]。低易损性试验

按照外界刺激条件可以分为三类: 热刺激, 包括快速烤燃试验和慢速烤燃试验; 机械刺激, 包括子弹冲击、

破片冲击和聚能射流冲击试验；综合威胁，包括殉爆试验^[2]。

相比于国外，我国的低易损推进剂研究起步较晚，低易损性试验方法和评估程序基本为空白^[2]，低易损性技术也发展得不够完善^[3]。在三类不同刺激条件下的低易损性试验中，机械刺激作用下的低易损性试验发展尤为滞后。一方面是试验条件的限制^[2]，子弹和破片的速度难以达到国外标准；另一方面，对于聚能射流冲击试验，北约各国还未达成一致，具体试验装置和步骤也未制定^[4]，这也导致国内的聚能射流试验难以标准化。因此，亟待开展和突破机械刺激作用下低易损性试验的研究工作。

文中总结了国内外相关研究进展，包括响应机理的研究成果^[1,5-6]，为后续的机理研究工作提供理论支持。所有的这些机理研究都是为了指导试验和生产，来提高推进剂低易损性和安全性能，从而避免推进剂意外事故导致的人员伤亡和财产损失。影响推进剂低易损性的因素有很多，其中推进剂配方的影响尤为突出^[1,5-6]，从调控推进剂配方的角度去提高低易损性，有着重要的理论意义和实践意义，因此还总结了低易损推进剂中的配方研究工作。

1 低易损推进剂机械刺激试验结果分析

目前，国外有很多低易损推进剂以及涉及到低易损性试验的固体推进剂^[2-4]，文中都将它们归为低易损推进剂，总结了其中有关机械刺激作用下的低易损性试验结果，并进行分析。李军等^[2]总结了一系列固体推进剂发动机的低易损试验结果。

1) 美国海军 AP 基复合推进剂发动机低易损性试验结果，其中子弹冲击和破片冲击的试验结果见表 1。从表 1 可以看出，子弹冲击和破片冲击试验的通过率分别为 27% 和 25%，都非常低。两项结果表明，这两项低易损性能要求，一般的 AP 基复合推进剂很难达到。子弹冲击试验 16 次，其中只有 1 次未完成，完成率 94%。破片冲击试验 16 次，其中 8 次未完成，完成率 50%。两项结果表明，子弹冲击试验完成难度较低，而破片冲击试验的难度较高，主要是破片发射的速度和角度都难以控制。同一型号发动机两次试验结果基本相同，但是两种 JATO 发动机的两次试验结果都不相同，这可能与它本身的特性有关。

2) 采用钝感弹药 (Insensitve Munition, IM) 技术的响尾蛇导弹发动机和 Mk 36 Mod 11 发动机的低易损试验对比结果，其中子弹冲击的结果分别是燃烧 (V) 和爆燃 (IV)；破片冲击的结果也分别是燃烧 (V) 和爆燃 (IV)。两项结果表明，采用 IM 技术后，子弹冲击和破片冲击试验响应结果都降低了一个等级，表明 IM 技术可以提高发动机的低易损性。

表 1 美国海军 AP 基复合推进剂发动机部分低易损试验结果

发动机代号	粘合剂	子弹冲击	破片冲击
AMRAAM	HTPB	失败	未完成
AMRAAM	HTPB	失败	未完成
HARM	HTPB	失败	失败
HARM	HTPB	未完成	未完成
MAVERICK	HTPB	失败	失败
MAVERICK	HTPB	失败	失败
NULKA	HTPB	通过	未完成
SIDEWINDER	HTPB	失败	通过
SIDEWINDER	HTPB	失败	通过
JATO	CTPB	通过	未完成
JATO	CTPB	失败	失败
JATO	STYRENE	失败	失败
JATO	STYRENE	通过	未完成
SHRIKE	PG/NQ	失败	失败
STDEMSSILE	PVC	通过	未完成
STDEMSSILE	PU	失败	未完成
通过率		4/15	2/8

3) 改进型海麻雀导弹 (ESSM) 的基准发动机和复合材料壳体发动机的低易损试验对比。其中子弹冲击试验结果都是是燃烧 (V)，破片冲击结果分别是爆燃 (IV) 和燃烧 (V)。两项结果表明，采用复合材料壳体后，破片冲击试验响应结果等级降低一级，而子弹冲击试验结果相同。这可能是子弹冲击的作用力比破片小，普通壳体和复合材料壳体都能有效地抵抗冲击，所以子弹冲击试验结果相同。破片冲击作用力较大，超出普通壳体的承受范围，但是复合材料壳体的抗冲击能力强于普通壳体，所以采用复合材料壳体后的低易损性试验响应等级降低。这些对比性试验结果表明，采用复合材料壳体技术可以在一定程度上提高发动机低易损性。

4) 爱国者先进能力-3 (PAC-3) 导弹低易损试验结果，其中子弹冲击和破片冲击试验结果见表 2。从表 2 可以看出，子弹冲击试验有 2 项通过，而破片冲击试验只有 1 项通过。这也表明破片冲击的作用力大于子弹冲击，固体火箭发动机的破片冲击试验通过率一般低于子弹冲击试验。

5) 标准-3 导弹 (SM-3) 低易损试验结果，其中子弹冲击和破片冲击的结果见表 3。从表 3 可以看出，子弹冲击试验和破片冲击试验的响应结果，都高于允许的反应等级燃烧 (V)，两项试验都没有通过。

杨琨等^[3]也总结了国外低易损推进剂的相关实验，比如钝感 NEPE 推进剂的子弹冲击和破片冲击实验，结果均是燃烧 (V)。报道中装备 NEPE 推进剂的型号武器有美国三叉戟 II (D-5) 潜地战略导弹的第一、二、三级发动机，平卫士 (MX) 导弹和小懈

表 2 PAC-3 导弹部分低易损试验结果

试验	试验描述	试验结果
枪击试验-自毁装置	试验对象为导弹的一个自毁段部分, 将 3 发直径为 7.62 mm 的子弹装入发射装置的发射筒中, 发射子弹射击自毁段, 子弹速度为 701 m/s	无比燃烧更剧烈的反应, 通过
枪击试验-姿控段	试验对象为导弹的一个姿控段部分, 将 3 发直径为 7.62 mm 的子弹装入发射装置的发射筒中, 发射子弹射击姿控段, 子弹速度为 701 m/s	无比燃烧更剧烈的反应, 通过
破片冲击-自毁装置	试验对象为导弹的一个自毁段部分, 将破片装入发射装置的发射筒中, 发射破片射击自毁段, 破片速度为 2004 m/s, 破片类型为战场破片	爆轰, 未通过
破片冲击-姿控段	试验对象为导弹的一个姿控段部分, 将破片装入发射装置的发射筒中, 发射破片射击姿控段, 破片速度为 2004 m/s, 破片类型为战场破片	无比燃烧更剧烈的反应, 通过
枪击试验-固体火箭发动机	试验对象为一发固体火箭发动机, 将 3 发直径为 7.62 mm 的子弹装入发射装置的发射筒中, 发射子弹射击固体火箭发动机, 子弹速度为 701 m/s	爆燃, 喷射, 产生破片, 有热流
破片冲击-固体火箭发动机	试验对象为一发固体火箭发动机, 将破片装入发射装置的发射筒中, 发射破片射击固体火箭发动机, 破片速度为 2004 m/s	爆燃, 喷射, 产生破片

表 3 SM-3 导弹部分低易损试验结果

试验	结果
子弹冲击	动能弹头: 爆燃 (IV) 第三级火箭发动机: 爆炸 (III)
破片冲击	动能弹头: 爆燃 (IV) 第三级火箭发动机: 爆炸 (III)

树导弹等。钝感 XLDB 推进剂的子弹冲击试验结果为燃烧 (V), 美国三叉戟 (TRIDENTI(C4)) 导弹采用三级固体发动机, 装备了钝感 XLDB 推进剂。这些结果表明, 国外型号发动机机械刺激低易损试验中, 子弹冲击和破片冲击研究较多, 而聚能射流冲击的研究非常少。这可能与北约各国未在此试验方面达成一致, 具体试验装置和步骤也未制定有关^[4]。

国内几乎没有报道型号发动机的子弹冲击、破片冲击、聚能射流冲击试验, 只报道了少数推进剂的相关试验。张超等^[7]完成了 HTPB 推进剂、改性双基推进剂、NEPE 推进剂的聚能射流冲击试验, 其结果分别为爆炸、部分爆轰、部分爆轰。只有 HTPB 推进剂通过了聚能射流冲击试验, 而改性双基推进剂和 NEPE 推进剂都没有通过。其原因可能是, 改性双基推进剂和 NEPE 推进剂的能量都高于 HTPB 推进剂, 在相同的冲击作用下, 它们的响应等级更高。

2 机械冲击作用下的响应机理

Bowden^[8]、Field^[9-10]、陈广南^[5]、达维纳^[1]等都总结了机械冲击作用下推进剂发生点火燃烧, 甚至爆轰等过程的反应机理。主要包含两个阶段, 第一个阶段是热点 (Hot Spot) 形成, 外部能量转化为热能后, 只是集中在推进剂药柱中局部一些小点上, 就是所谓

的热点。当热点温度足够高时, 在局部区域发生燃烧, 这就是点火 (Ignition) 过程。第二个阶段是燃烧的传播, 包括可能产生的燃烧转爆轰 (the Deflagration to Detonation Transition, DDT) 过程。

关于热点形成机理, Field 等^[9-10]将它归结为 10 种, 而陈广南等^[5]认为主要的是 6 种, 分别是摩擦机理^[8-12]、局部绝热剪切带机理^[13-19]、裂纹尖端加热机理^[20-21]、空洞坍塌机理^[22-27]、气泡绝热压缩机理^[28-30]、晶粒错位机理^[31-32]等。

摩擦形成热点的机理^[8-12]认为, 摩擦会产生局部加热, 使局部区域温度升高, 而能否形成热点则取决于局部温度是否达到临界温度, 而决定临界温度的因素有推进剂中固体颗粒熔点、热传导性能和硬度等。

局部绝热剪切带形成热点的机理^[13-19]认为, 固体推进剂的损伤会产生不均匀变形, 从而形成速度梯度。在某一个窄的宽度范围内, 推进剂的强度失效, 导致快速的粘塑性加热, 温度升高, 热量聚集, 而且无法分散, 就会形成“绝热剪切带”。当温度高于临界温度时, 就会形成热点。决定临界温度的因素有剪切速度、法向压力、推进剂力学性能等。

裂纹尖端加热形成热点的机理^[20-21]认为, 如果裂纹的扩展在不同的材料上, 产生的温度是不相同的, 只有到达临界温度才能形成热点。如果裂纹在 AP、RDX、HMX 等颗粒内部扩展, 无法形成热点, 因为这些颗粒是脆性材料, 断裂表面能很小, 快速扩展的裂纹尖端温度不够高。如果裂纹在聚合物内部扩展, 能够形成热点, 因为聚合物的断裂表面能比颗粒大很多, 有足够的韧性。

空洞坍塌形成热点的机理^[22-27]认为, 推进剂原材料的缺陷, 制备工艺不完善, 运输、检测、贮存等过

程中受到损伤等都会导致其内部产生大量孔隙。这些孔隙在外界机械刺激下会高速坍塌,在局部区域产生快速的塑性变形和粘塑性加热,最终形成热点。

气泡绝热压缩形成热点的机理^[28-30]认为,气泡压缩也会导致局部温度升高,当达到临界温度值时,就会形成热点。气泡升温速度由它的尺寸、压缩速度、热量传导速率等因素决定。气泡尺寸越大,压缩速度越小,热传导速率越小,那么形成热点越快,导致热爆炸的概率也越大。

晶粒错位形成热点的机理^[31-32]认为,热点的形成与晶粒本身的性质以及晶粒之间的界面状态有一定关系。一般情况下,晶粒位错、塑性流动都会形成热点。

热点形成后会导致推进剂局部区域燃烧,而燃烧会向推进剂未反应区域传播,直至整个推进剂发生燃烧,甚至更加剧烈的响应。一般认为,燃烧的传播方式主要有4种^[1]:传导燃烧、对流燃烧、爆轰、热爆炸。反应区通过热传导方式(也就是传导燃烧)进入初始物质,被称为“爆燃”。反应区以冲击波的方式穿过整个未反应的推进剂,被称为“爆轰”。对流燃烧是指,反应区是以受热气体渗入药粒间的空间这种方式来传播的,压强的上升可能导致 DDT,固体推进剂的损伤会导致对流燃烧状态。物质内部产生的热量大于它向周围的散热,就会导致热爆炸。

除了 DDT 机理外,向爆轰转变的机理^[1],还有通过冲击波而延迟爆轰(XDT)和冲击向爆轰转变(SDT)。SDT 是通过强冲击波在一维的方向上引爆,而 XDT 是通过弱冲击波在二维和三维的方向上引爆。可以看到,爆轰的产生与冲击波的传播直接相关,那么要阻止爆轰的产生,抑制冲击波传播是一种有效途径。

3 低易损推进剂配方研究

推进剂配方很大程度上决定着推进剂的各项性能,包括低易损性。许多研究表明,可以通过调控推进剂配方来提高其低易损性。配方中各个组分所起到的作用,受到研究者的关注和研究。

徐丹丹^[33]和雷安华^[34]总结了国外 HTPB、HTPE、HTCE、NEPE、XLDB 等推进剂配方调控对其低易损性影响的工作。其中,HTCE 是指四氢呋喃和己酸内酯的嵌段共聚物,可以作为 HTPE 推进剂的低成本替换物。其配方降低 AP 在粘合剂中的溶解度,从而降低推进剂敏感度。HTCE 推进剂中,氧化剂 AP 和燃料铝粉的质量比为 84%,剩余的 16%组分为聚醚/聚酯聚合物、交联剂、混合的增塑剂、粘合剂、固化催化剂、异氰酸酯等。HTCE 和 HTPB 推进剂被填充进直径为 203.2 mm 的石墨纤维复合材料壳体发动机,分别进行了子弹冲击和破片冲击试验,两种推进剂均

通过了这两项试验。

另外,AFC 推进剂是一种含铝(质量分数为 5%)、硝胺(质量分数为 65%),以 PEG 粘合剂为基础,并采用混合硝酸酯增塑的推进剂。相关试验表明,固体和液体组分之间的能量分布可能形成相对钝感配方。在子弹冲击和破片冲击试验中,分别采用厚刚壳体和薄刚壳体,子弹冲击试验结果都是燃烧(V),而破片冲击试验,薄刚壳体推进剂的结果是燃烧(V),厚刚壳体推进剂的试验未完成。这些试验的结果表明,调控推进剂的固/液组分比确实可以降低其易损性。

周桓等^[35]研究了影响推进剂低易损性的因素,结果表明,通过对推进剂力学性能的调节,提高推进剂的韧性,力学性能优良的推进剂可以有效吸收机械能,降低机械刺激对推进剂的影响,有利于推进剂通过聚能射流冲击试验。另外,推进剂燃速越大,聚能射流试验的响应程度越剧烈,低易损性越低。

徐丹丹^[33]和雷安华^[34]总结了国外报道中提高推进剂低易损性的方法。

1) 提高固体推进剂的力学性能,也就是韧性。最可行的方法是提高固体推进剂低温下的延伸性能,可以减少固体推进剂的损伤,从而避免对流燃烧导致的 DDT 现象。

2) 调控固体推进剂的粘合剂与氧化剂、金属燃烧剂之间的配比,从而实现能量在组分间的均衡分配,避免局部能量过高导致的热点形成现象。

3) 开发高密度新型氧化剂、添加剂,在保证推进剂能量性能不降低的前提下,降低固体填充物的质量分数和体积分,从而提高固体推进剂的力学性能。

4) 将硝胺进行精细化研磨,调控氧化剂和金属燃烧剂的粒径分布,从而改善粘合剂/颗粒润湿效果和颗粒/颗粒粘结强度。

5) 选择使用低感度的固体组分,可以开发新型钝感固体组分,也可以对已使用的固体组分进行钝感改性和重新组配。具体的方法包括,使用钝感氧化剂取代硝胺或者 AP,使用钝感的弹道改性剂等。

6) 研究可熄火的固体推进剂配方,这种推进剂在大气压下熄火或者只能闷燃,从而降低固体推进剂的低易损响应程度。

4 建议及展望

除了以上总结的几种提高推进剂低易损性的方法外,文中也提出了几种其他方法,为该领域的研究者们提供帮助。推进剂在机械刺激下的响应机理包括两个反应阶段,那么要提高推进剂的低易损性也应该从这两个方面入手:一方面是抑制热点的形成;另一方面是阻止燃烧传播过程中的 DDT 过程。从抑制热点方面来看,可以尝试的思路有以下几条。

1) 提高推进剂的热传导性能。热爆炸产生的原因是内部产热大于向周围散热, 如果要提高推进剂的散热来避免热爆炸, 那么就要提高它的热传导性能。另外, 摩擦形成热点机理也指出, 固体颗粒的热传导性能良好, 那么热量就难以累积而导致热点形成。

2) 减少固体颗粒的晶体缺陷。因为晶粒中的裂纹和位错等晶体缺陷都会加速热点的形成, 生产中应该使用晶体品质更高, 晶体缺陷更少的颗粒材料, 或者对已经使用的颗粒材料进行后处理, 尽量减少其晶体缺陷。

3) 改善固体推进剂制备工艺条件。因为推进剂中存在的孔隙和气泡都会加速热点的形成, 因此在推进剂的制备过程中, 应该尽量减少孔隙和气泡的形成, 不断改善制备工艺条件。

从阻止 DDT 的角度来看, 提高低易损性的方法包括以下几个。

1) 降低燃烧过程中的压强。因为压强的上升会导致 DDT 过程, 而压强与燃速互相影响, 调控推进剂燃速就能改变燃烧时的压强, 而选择合适的燃速调节剂就是一种有效的方法。

2) 抑制冲击波的传播。爆轰的基本特征就是冲击波穿过整个推进剂的未反应区域, 那么抑制冲击波就会阻止爆轰的发生。选择力学性能更好的原材料, 可以提高推进剂对抗冲击波的能力。

3) 降低推进剂贮存过程中的老化影响。老化会导致推进剂燃烧性能和力学性能大幅下降以及内部损伤, 这些都会导致 DDT 现象。因此, 需要选择合适的防老剂来降低老化对低易损性的影响。

从总体上来看, 推进剂的基本性能(能量性能、燃烧性能、力学性能、工艺性能、安全性能、贮存性能)和低易损性之间是相互影响的, 在提高其中一种或者几种性能的同时, 另外某种性能也可能会提升。因此, 提升推进剂的综合性能指标是提高其低易损性的有效途径。

从部分决定整体的角度来看, 推进剂组分的物理化学性质、组分配比、组分之间的界面状态, 是能够决定推进剂低易损性的三个因素。可以考虑从这三个方面去改善配方设计, 从而提高推进剂低易损性。

5 结语

我国低易损性试验和理论研究比国外起步晚, 其中机械刺激作用下的子弹冲击、破片冲击、聚能射流冲击试验及其相关研究更加滞后, 相关工作亟需开展。借鉴国外的研究成果, 结合相关的钝感弹药、钝感武器等方面的研究方法, 同时采用数值模拟计算等科学研究手段, 对试验过程中的数据进行采集、分析、反馈。

参考文献:

[1] 达维纳 A. 固体火箭推进剂技术[M]. 北京: 宇航出版

社, 1997.

- [2] 李军, 焦清介, 任慧, 等. 固体发动机低易损性试验方法研究进展[C]// 第二届弹药安全技术研讨会暨第六届固体推进剂安全技术研讨会论文集. 宜昌, 2017:17-30.
- [3] 杨琨, 徐秉恒, 郭云强, 等. 低易损固体火箭发动机技术发展展望[C]// 第二届弹药安全技术研讨会暨第六届固体推进剂安全技术研讨会论文集. 宜昌, 2017: 31-38.
- [4] 宋乙丹, 陈科全, 路中华, 等. 弹药安全性评估标准及试验方法研究进展[C]// 第二届弹药安全技术研讨会暨第六届固体推进剂安全技术研讨会论文集. 宜昌, 2017:10-16.
- [5] 陈广南, 张为华. 固体火箭发动机撞击与热安全性分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [7] 张超, 党永战, 李宏岩, 等. 固体推进剂对射流刺激的易损性响应[J]. 火炸药学报, 2014, 37(2): 69-72.
- [8] BOWDEN F P, YOFF A D. Initiation and Growth of Explosives in Liquids and Solids[M]. London: Cambridge University Press, 1952.
- [9] FIELD J E. Hot Spot Ignition Mechanisms for Explosives [J]. Acc Chem Res, 1992, 25: 489-496.
- [10] FIELD J E, BOURNE N K, PALMER S J P, et al. Hot-Spot Ignition Mechanisms for Explosives and Propellants[J]. Phil Trans R Soc Lond, 1992, A339: 269-283.
- [11] BONNETT D L, BUTLER P B. Hot-Spot Ignition of Condensed Phase Energetic Material[J]. Journal of Propulsion & Power, 1996, 12 (4): 680-690.
- [12] MELLOR A M, WIEGAND D A, ISOM K B. Hot Spot Histories in Energetic Materials[J]. Combustion and Flame, 1995, 101 (1): 26-35.
- [13] FREY R B. The Initiation of Explosive Charges by Rapid Shear[C]// Proceedings in 7th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1981.
- [14] KIPP M E. Modeling Granular Explosive Detonations with Shear Band Concepts[C]// Proceedings in 8th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1985.
- [15] GRADY D E, KIPP M E. The Growth of Unstable Thermoplastic Shear with Application to Steady-Wave Shock Compression in Solids[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1987, 35: 95-100.
- [16] KRINSHNA MV, JYOTHI B V C, FIELD J E. Role of Adiabatic Shear Bands in Initiation of Explosives by Drop Weight Impact[C]// Proceedings in 9th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1989.
- [17] BOYLE V, FREY R, BLAKE O. Combined Pressure Shear Ignition of Explosive[C]// Proceedings in 9th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1989.
- [18] COFFEY C S. Initiation of Explosive Crystals by Shock

- or Impact[C]// Proceedings in 9th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1989.
- [19] TOKMAKOFF A, FAYER M D, DLOTT D D. Chemical Reaction Initiation and Hot-Spot Formation in Shocked Energetic Material [J]. Journal of Physical Chemistry, 1993, 97: 1901-1913.
- [20] CHAUDHRI M M, FIELD J E. Deflagration in Single Crystals of Lead Azide[C]// Proceedings in 5th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1970.
- [21] FIELD J E, SWALLOWE G M, HEAVENS S N. Ignition Mechanisms of Explosives During Mechanical Deformation[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1982, A382(1782): 231-244.
- [22] PARTOM Y. A Void Collapse Model for Shock Initiation[C]// Proceedings in 7th Symposium (International) on Detonation. 1981.
- [23] KHASAINOV B A. Two-Phase Visco-Plastic Model of Shock Initiation of Detonation in High Density Pressed Explosives[C]// Proceedings in 7th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1981.
- [24] FREY R B. Cavity Collapse in Energetic Materials[C]// Proceedings in 8th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1985.
- [25] CHOU P C, LIANG D, RITMAN Z. The Viscoplastic Hot Spots in Pore Collapse[C]// Proceedings in 10th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1993.
- [26] KANG J, BUTLER P B, BAER M A. A Thermomechanical Analysis of Hot Spot Formation in Condensed—Phase, Energetic Materials[J]. Combustion and Flame, 1992, 89: 117-139.
- [27] BAILLOU F, DARTYGE J M, SPYCKERELLE C, et al. Influence of Crystal Defects on Sensitivity of Explosives[C]// Proceedings in 10th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1993.
- [28] CHAUDHRI M M, FIELD J E. The Role of Rapidly Compressed Gas Pockets in the Initiation of Condensed Explosive[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1974, A340(1620): 113-128.
- [29] ANDERSEN W H, GILLESPIE F L. Surface Ignition of Explosives and Propellants by a Hot, Stagnant Gas Pocket[J]. Combustion Science and Technology, 1980, 24: 34-42.
- [30] STARKENBERG J. Ignition of Solid High Explosive by the Rapid Compression of an Adjacent Gas Layer[C]// Proceedings in 7th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1981.
- [31] COFFEY C S, OAK W. Hot Spot Produced by Moving Dislocations in A Rapidly Deforming Crystalline Explosive[C]// Proceedings in 8th Symposium (International) on Detonation. 1985.
- [32] COFFEY C S, SHARMA J. Initiation of Crystalline Explosive Due to Energy Dissipated During Plastic Flow[C]// Proceedings in 11th Symposium (International) on Detonation. Dahlgren Va: Naval Surface Weapons Center, 1998.
- [33] 徐丹丹, 赵春来, 陈怡. 国外固体火箭发动机低易损性技术研究进展[R]. 西安: 中国航天科技集团公司四院, 2006.
- [34] 雷安华. 高能推进剂钝感机理、模拟与测试研究[R]. 西安: 中国航天科技集团公司四院, 2006.
- [35] 周桓, 李尚文, 李洪旭, 等. 影响固体推进剂的低易损性因素研究[C]// 中国宇航学会固体火箭推进专业委员会第三十二届年会论文集, 沈阳. 2016:449-454.