

低 易 损 性 发 射 药 的 发 展 和 近 期 研 究

兵器工业部第二一〇研究所

一九八五年二月

目 录

一、低易损性发射药的发展·····	(1)
二、近期的研究和今后的课题·····	(2)
1.总的情况·····	(2)
2.关于粘合剂系统的研究·····	(4)
(1) 化学交联弹性体粘合剂·····	(4)
(2) 溶剂法加工的塑性体粘合剂·····	(6)
(3) 热塑性弹性体粘合剂·····	(9)
3.混合硝胺氧化剂的研究·····	(10)
4.低易损性发射药烧蚀性的研究·····	(11)
5.原位凝结发射装药的研究·····	(14)
6.高点火温度无壳弹药的研究·····	(14)
7.低易损性液体发射药的研究·····	(14)
8.低易损性发射药的评价方法·····	(15)
9.激光点火技术用于发射药易损性分类·····	(17)
10.底火和可燃药筒材料对坦克炮弹药易损性的影响·····	(18)

 (此专题报告已列为本研究所正在陆续出版的《低易损性火炸药文集》
的第五集—编者)

低易损性发射药的发展和近期研究

阮 暉 包昌火 程普生 费北孙

低易损性发射药, 又称低易损性弹药 (LOVA) 发射药, 是一类近十年发展起来的新型发射药。其发展目的是改善安全性能, 提高武器的生存能力。其基本特点是点火温度比较高, 反应速度比较低, 故能有效地降低由高速碎片或火焰点火引起的易损性。在目前技术水平上发展起来的LOVA发射药主要配方是细粒硝酸炸药分散在惰性粘合剂中组成的硝酸发射药。

一、低易损性发射药的发展^{1、2、6、7}

美国陆军弹道研究所 (BRL) 十年前开始提出“低易损性弹药 (LOVA)”的设计思想来源于1967年和1973年的中东战争。战争中60%的坦克损坏是因装甲穿透后弹药仓发生爆炸造成的。使用硝化棉为基的单、双、三基药的坦克炮弹药对交战情况下坦克的生存具有十分严重的威胁。于是, 研制一种能将上述危害减少至最小程度的新型发射药成了当务之急。

1973年12月, 弹道研究所借助小口径武器系统研究所发展无壳弹药的技术提出了低易损性弹药 (LOVA) 的概念。1974年, 制成了一小批含75%奥克托今 (HMX) 和25%聚氨酯交联聚醚粘合剂的发射药, 并在易损性试验中作了评价, 证实了低易损性弹药概念的可行性。1975年, LOVA-X1A发射药在37毫米火炮试验中获得合格的内弹道特性, 并拟按比例扩大到105毫米坦克炮上。

1978财年, 开始执行美国陆军和海军联合发展低易损性弹药的计划。同年夏天, 在105毫米坦克炮上成功地证明了LOVA-X1A发射药和含80%黑索今 (RDX)、20%环氧固化的端羧基聚丁二烯-丙烯酸-丙烯腈共聚物粘合剂的第二批LOVA发射药的弹道特性。

1979年, 美国国防部和能源部又把不敏感炸药和低易损性发射药的研究计划结合起来, 制定了不敏感火炸药的联合研制规划, 对这种钝感的新一代含能材料提出了具体要求: (1) 对高速金属破片或空心装药射流穿透导致的引燃具有较低的易损性; (2) 一旦引燃, 在低压条件下燃速较低, 从而能使发射药在药筒被穿透的开放状态下灭火。

1981年2月, 在陆军研究发展局 (现改名为陆军军械弹药和化学局) 的赞助下开始了工程研究。此项研究包括三种低易损性发射药的大规模生产和试验等。9月, 在弹药生存能力联合技术协作组的协调下, 开始军种间、军种内LOVA发射药技术的协调和有效合作。

1984财年, 美国陆军将在优选的三种低易损性发射药中保留一种, 以便进行最后鉴定和批准试验, 美国海军则开始在5英寸、54倍口径和76毫米火炮系统实施低易损性发射药的弹药发展计划。

二、近期的研究和今后的课题

1. 总的情况

初期的LOVA发射药配方是Thiokol/Wasatoh公司为轻武器无壳弹计划 (CAP) 研制的一组聚氨酯 (PU) /HMX发射药。继该计划之后, 美国陆军弹道研究所“移花接木”, 将由无壳弹弹药研制中获得的技术成功地移植到降低弹药易损性研究中, 开始了低易损性弹药发射药的研究工作。

发展不敏感火炸药计划的第一项任务是加快低易损性发射药的发展, 把近期发展工作的重点放在坦克炮低易损性弹药的发射药上, 今后再考虑用于舰船武器、自行榴弹炮和直升飞机等方面。

美国陆军军械研究发展局弹道研究所的易损性研究表明, 发射药因空心装药射流碎片引燃的主要机理是一种热传导点火过程。弄清碎片点火机理对评价发射药易损性的研究是一个重大的突破。它既简化了新配方的试验程序, 还可以在对影响发射药易损性的诸多参数作出评价的同时, 将研究者的注意力引导到其它成分对热传导点火的影响以及对其它化学机理的理解等重要问题上。

迄今为止的易损性试验结果已对发展一种可供野战使用的火药应持何种方针等问题提供了一些极有价值的结论。

弄清了RDX和HMX作含能氧化剂的作用, 以及在某些配方中用RDX取代 HMX 的可能性。因为RDX虽然热安定性不及HMX, 但成本仅为HMX的 $\frac{1}{4}$, 所以一些采用混合硝酸氧化剂的配方对降低发射药成本有很大的意义。也就是说, LOVA 发射药能用作任何一种大口徑武器系统的弹药的话, 就将以 100 万公斤/年的需求量生产, 这就决定它使用的硝酸材料是RDX, 而不是HMX。

其次, 已经证实粘合剂的选择是具有适当能量的LOVA发射药设计中的关键, 理想的粘合剂可以更多地对热感度高于HMX的RDX进行补偿。近期的研究已确定了选择低易损性发射药用粘合剂的主要标准。这为发展最佳粘合剂创造了条件, 也为硝酸复合药的设计、试验及评价提供了极有价值的依据。

通常认为要获得高能量必须尽可能减少粘合剂含量, 但这样做往往使发射药的加工性能和机械性能变坏。粘合剂的研究结果表明, 12~15%的粘合剂用量对内弹道性能来说是完全可以接受的。

目前研究的含能氧化剂重点是HMX、RDX等。这类硝酸-惰性粘合剂系统的发射药因其较高的点火温度和较低的燃速, 能有效地降低由高速破片及火焰点火引起的易损性。

低易损性发射药的研究不仅是发展新型钝感发射药的动力, 还为发射药传统研究方式的改进、吸收新技术的综合性研究发挥了促进作用。过去, 在实验室之外从未对含80%固体炸药的材料进行过压伸, 既没有测定炮药易损性的方法和标准, 又没有对现有材料为何易损性较高的机理作出过权威性论证。如果LOVA发射药获得成功, 历来关于硝酸炸药不能用于炮药的先入之见似可消除。

易损性评价已成为低易损性发射药研究工作的重要组成部分。评价试验突破了火药传统评价试验的框框,采用模拟和受控的装置让发射药承受实战中空心装药产生的射流或碎片的威胁,以考核这些发射药在战场上的生存能力。一些从运输管理部门吸收而来的试验则用来评价发射药在火焰和静电威胁、运输撞击等情况下的易损性水平。

每种LOVA发射药的性能试验都是由密闭爆发器燃烧试验开始,继而通过药柱设计的内弹道计算机模拟,最后在M68型105毫米坦克炮上进行内弹道试验。这种程序已被证明是可行且有效的,可以考核LOVA发射药在低、常、高温条件下烧蚀性、炮口冲击波、炮口焰、压力和燃速的再现性。燃烧和烧蚀研究的结果表明,LOVA发射药的烧蚀较小,如果使用,不会显著影响炮口冲击波和炮口焰。LOVA发射药的燃烧性能跟历来使用的硝酸酯发射药不尽相同,但内弹道特性的评价可按照历来的方法进行。

最初的研究曾发现加硝胺的发射药的燃速-压力特性曲线会出现斜率突变现象。近期的实验研究了硝胺颗粒的大小、粒度分布及生产工艺对LOVA发射药斜率突变特性的影响。结果表明,采用2微米和10微米双级配(6.5:1)硝胺氧化剂和惰性粘合剂(如聚氨酯系统)组成的LOVA发射药不存在这种突变。由于双级配硝胺氧化剂的混合效应,使这类发射药具有线型燃烧特性,为制备性能良好的硝胺-惰性粘合剂发射药开拓了一条有效途径。

相对硝酸酯系发射药来说,LOVA发射药具有低燃速系数和高燃速指数。燃速系数低,说明LOVA发射药在低压下燃烧极慢,即低压下点火也极慢,有减小压力波的可能性。燃速指数高,说明可借助适当的药形设计和燃烧层厚度来改善发射药燃烧的渐增性。

最近,劳(Law)测定了传导点火后发射药燃烧的持续时间,发现最能抗传导点火的发射药燃烧也最慢,今后将进一步测定LOVA发射药的低压燃烧特性。因为迄今为止的研究都集中在防止破片冲击的点火上,评价LOVA发射药二次点火响应和确定影响的参数将是今后的研究课题。

近几年的研究表明LOVA发射药的特性适合应用于坦克炮弹药。为了调查LOVA发射药对带弹壳弹药具有吸引力的性质是否也适用新的自行榴弹炮等火炮装药,美国陆军弹道研究所已开始LOVA火炮发射装药的两相流研究。

迄今为止的研究重点都集中在发射药对付空心装药产生的射流和破片的威胁上,目前已开始着手研究动能穿甲弹的威胁。

目前,正在对按加速发射药研究计划发展的LOVA发射药进行工艺合格试验,完善其性能的工作也仍在继续进行。这些工作包括配方的局部变动、点火系统的改变等,如获成功,LOVA发射药将满足易损性显著下降、能量性能与现用发射药相当的要求。

在强调提高命中率和终点弹道性能的同时,必须重视使用不牺牲生存能力且能量更高的发射药。为满足这一需要,高能的LOVA发射药正在研制之中,它将有获得跟目前坦克炮弹药中任何一种发射药同样高的能量。

一些新的技术和材料正在用于LOVA发射药的研究,这将给LOVA发射药的发展工作带来意外的效果。激光作为一种红外热源正在用于LOVA发射药的点火研究,一套利用激光点火试验进行发射药易损性分类的标准正在确立。新型的点火药将适用于比较难燃的复合硝胺发射药,可有利于解决低温下出现相对较低的膛压和燃速这一难题。

2. 关于粘合剂系统的研究

低易损性发射药是在惰性粘合剂中分散细颗粒的HMX或RDX而成的复合材料。LOVA计划的主要技术目标之一就是要证明硝胺材料(HMX或RDX)的选择和粘合剂类型如何影响发射药的性能、易损性和成本。在固体含量水平相近的发射药中,选用不同的粘合剂可以使推力水平发生10%的变化。已经发现,粘合剂在抵抗热金属粒子产生的传导点火上起着关键的作用。使用吸热分解的粘合剂,发射药的抗传导点火能力极好。反之,则象标准的硝酸酯火药一样容易点火。

近期研究的粘合剂可分为三种工艺类型:(1)化学交联(固化)弹性体粘合剂,(2)溶剂法加工的塑性体粘合剂,(3)热塑性弹性体粘合剂。为了获得理想的性能,美国陆军弹道研究所对LOVA发射药用粘合剂系统提出的标准是:粘合剂的氧含量要在20%(以重量计)以上,应在200~350℃范围于酸催化作用下吸热分解(DSC试验),当其充填75~80%的固体填料时应呈韧性橡胶状,而且还应具有可逆加工性能。粘合剂的选择为第一代LOVA发射药的设计提供了最大的灵活性。

为了保证LOVA发射药的火药力和减少燃烧产物中固态碳的形成,含氧量为20%(重量)的粘合剂比较合适,过多则会提高燃气分子量,致使火药力下降。虽然已经发现阻燃冷却剂在防止LOVA发射传导点火上格外有效,但它们也会降低发射药的火药力。LOVA发射药没有必要“不可点燃”,它只需抗传导点火就行。也就是说,它不需要冷却剂的喷气散热,而需要散热的吸热反应。已经证明,发射药传导点火温度极大地取决于其粘合剂分解时的温度,含吸热分解的粘合剂的发射药传导点火温度高,而放热分解的则传导点火温度低。粘合剂在250℃下吸热分解的醋酸丁酸纤维素(CAB)发射药最难点火。端羟基聚丁=烯丙烯腈共聚物(CTBN)/RDX发射药因粘合剂CTBN放热分解,故传导点火温度最低。

(1) 化学交联弹性体粘合剂

第一种LOVA发射药配方是化学交联弹性体系统PPG-PEG/HMX,这是由无壳弹弹药计划移植过来的配方。近期美国和西德已发展了加聚聚氨酯(PU)、端羧基聚丁二烯丙烯腈共聚物(CTBN)和端羟基聚丁二烯(HTPB)等化学交联粘合剂的LOVA发射药。目前作为候选的配方有HTPB/HMX、PU/HMX、CTBN/HMX和CTBN/RDX。

这类粘合剂虽然在火箭推进剂生产中进行过不少研究,但推进剂的浇铸和炮药的压伸是不同的工艺过程。为了获得适于压伸的弹性体,粘合剂必须在压伸前进行强固化或部分固化,然后再将药条固化后切成药粒。这种工艺过程对发射药生产来说是新的,目前正在进一步研究。

使用这类弹性体的主要问题是预固化程度的判断和确定压伸的最佳时间。目前决定预固化程度的方法是测定发射药混合物的洛克威尔硬度和蠕变值。选择预固化值的时间取决于硝胺的颗粒尺寸、所用混合器的型号及尺寸、混合温度分布、混药时间、添加剂成分及混合的温度调节等。预固化不足,粘合剂会慢慢渗出。预固化过度,压伸时药条一出模子就发生膨胀变形。这种粘合剂在整个加工过程中只需极少量的溶剂,压伸后不需干燥,故药粒也不会收缩,而且粘合剂与填料相互作用好,制成的发射药强度好且有弹性,但是由于这种系统固

化的不可逆性使压伸前药料流变特性的调节十分困难，近期不可能扩大生产。

使用这类粘合剂的三种LOVA发射药一般情况介绍如下：

PU发射药

聚氨酯 (PU) 为粘合剂的LOVA发射药是美国陆军弹道研究所在为无壳弹弹药研制 HMX/PU发射药的基础上发展起来的。这类发射药跟常规炮药比，点火温度高，耐冲击起爆性好，火焰温度在M1和M30之间，目前试验的几种PU发射药火药力都高于M1，而且其中的LOVA-X3A的火药力比M30都高。

表1 几种PU系LOVA发射药与常规炮药的热化学参数比较

	M1	M30	LOVA-X1A	LOVA-X1B	LOVA-X3A
火药力 (焦耳/克)	912.0	1088.0	988.1	991.6	1113.3
火焰温度 (K)	2417	3040	2320	2326	2675
燃气平均分子量 (克/克分子)	22.06	23.21	19.51	19.49	19.96
比 热 比	1.2593	1.2385	1.2694	1.269	1.2693
主 要 组 份	三 基 药		PU/HMX	PU/RDX	PU/HMX

因为这类发射药的燃气平均分子量比较低，所以在较低的火焰温度下也能获得较高的火药力。其比热比稍微大些，但已有文献证明这对发射药影响较小。

美国陆军弹道研究所最近在密闭爆发器试验中研究了含75%硝酸胺和25%PU系粘合剂的LOVA发射药的燃烧特性。硝酸胺使用2微米和10微米双级配(6.5:1)的HMX混合物。粘合剂使用聚醚系固态聚氨酯、聚醚系液态聚氨酯、聚丁炔二醇缩甲醛为基的聚氨酯、端羟基聚丁二烯聚氨酯等四种聚氨酯。发射药装填密度为0.3克/厘米³。用无溶剂挤压工艺制得的发射药药柱质量较好，药孔孔形分布匀称，而且肉厚也符合设计的要求。采用不同粒度硝酸胺的级配，消除了发射药燃速-压力曲线上的斜率突变现象。

CTBN发射药

端羧基聚丁二烯丙烯酸酯液体共聚物(CTBN)为惰性弹性粘合剂的LOVA发射药是美国海军军械站发展的。目前研究的配方，一种是含增塑剂和80%E级HMX的高交联度发射药，另一种是无增塑剂、含56%研细RDX和24%E级RDX的高交联度发射药。

对1加仑试样的研究表明，加HMX的配方中如使用增塑剂，可降低混合物粘度，燃速指数无变化，而在加RDX的配方中则要使燃速指数增加。使用键合剂有可能增大燃速指数，贮存时间一长，药就出现老化问题。在立式混合器中混合500磅药量时发现药浆粘度有的高达89~94千泊(火箭推进剂的粘度才5~15千泊)。今后如混合更大药量时有必要使用卧式混合器。

CTBN发射药的一般特性

组份

HMX或RDX	70~85%
CTBN	15~30%

热化学特性

火药力 (英尺·磅/磅)	315,000~345,000
火焰温度 (K)	2,250~2,450
平均分子量	18.8~19.6
余容 (英寸 ³ /磅)	35.3~35.5
比热比	1.27

HTPB发射药

HTPB粘合剂通常只用于火箭推进剂。前一阶段曾对含80%的HMX和RDX的HTPB发射药进行过研究。发现增大交联度会降低燃速指数,使用非极性增塑剂能降低混合粘度,键合剂能产生可用电子扫描显微镜观测的有效键合作用,只有加HMX的配方才具有可接受的燃速性能。

目前研究的配方是增塑的高交联度的HMX/HTPB发射药,含有一种键合剂,奥克托今为60%细粒HMX和20%E级HMX的混合物。

HTPB发射药的一般特性

组份

HMX	70~85%
HTPB	15~30%

热化学特性

火药力 (英尺·磅/磅)	310,000~340,000
火焰温度 (K)	2,200~2,400
平均分子量	18.6~19.4
余容 (英寸 ³ /磅)	35.3~35.5
比热比	1.27

研究HTPB发射药是出于两个原因:其一是在硝胺含量相同的情况下其粘度比CTBN低些,其二是希望通过采用两种交联剂取消压伸之前的预固化过程。密闭爆发器燃速研究结果发现,细HMX和E级HMX比例为3:1时制成的药跟全部使用细HMX的相同。燃速、显微照片和粘接研究认为,采用HTPB粘合剂的粘合良好,而CTBN对HMX或RDX都没有有效的粘接作用,估计这是HTPB发射药燃速指数降低的主要原因。

(2) 溶剂法加工的塑性体粘合剂

这类粘合剂是醋酸纤维素(CA)、醋酸丁酸纤维素(CAB)、乙基纤维素(EC)等纤维素衍生物。由这类粘合剂制成的发射药可借用现有的发射药溶剂压伸工艺生产,只需作部分设备的改进便能扩大生产,但主要的问题是多孔性、闭孔和燃烧层厚度的不均匀性。另外,

由于这些塑料物质依靠物理作用来维持其形状和完整性,故比弹性体脆得多。也就是说,用这种物理溶胀性粘合剂生产的塑性LOVA发射药的机械性能仍需改进。

曾经研究过用EC作粘合剂的配方,但EC发射药要获得令人满意的特性,其硝胺含量根据热化学计算结果需在80%以上。这将使发射药易损性增高,便中止了EC发射药的研究。近期的研究表明,使用醋酸纤维或醋酸丁酸纤维素的配方能压伸出性能较好的药条。

在药条强度方面,发现采用粘度较高的增塑材料一般能使药条强度增大,较高的溶剂比有可能生产出强度较高的药条。

在药条胶粘性方面,研究发现低溶剂比会使药条胶粘性降低,而粘度较高的药条胶粘性却小。在药条的表面,粘度较高的药条表面比较光滑,低溶剂比会改善药条的表面特性。

溶剂的类型和溶剂的比率是影响工艺条件最重要的因素。这在LOVA发射药工艺的研究中得到证实。

在发射药开孔方面,曾进行过压伸速度从700英寸/分转向150英寸/分的试验。结果发现,低速有助于改善药孔成形和精整。从模具中挤压出来的药条如能得到支撑,将有助于药条成形,以避免药条本身重量产生的所谓“断面收缩”效应。

目前,使用这类粘合剂的候选LOVA发射药配方有CA/RDX、CAB/RDX、EC-NC/RDX、NC/RDX等。其中CAB/RDX配方已被美国大口径武器系统研究所选定为可扩大生产的配方之一。

CA发射药

醋酸纤维素(CA)发射药是一种塑性粘合剂系统的LOVA发射药。其加工方法可借用和通以硝化棉为基的炮药生产工艺设备(即溶剂法工艺设备)进行。目前已用增塑剂、溶剂普以不同溶剂比进行过研究,用作候选的CA系LOVA发射药是含75%研细RDX的CA发射药。

虽然其工艺过程跟普通炮药极为相似,但为了提高药条强度和表面光泽度,需要用工艺助剂——水。

CA发射药的一般性能

组份

黑索今 75%

CA 16%

三醋精、酒石酸二丁酯、硬酯酸丁酯、

乙酰基柠檬酸三乙酯 8%

硫酸钾 1%

热化学特性

火药力(焦耳/克) 999

火焰温度(K) 2,549

平均分子量 21.2

余容(厘米³/克) 1.15

比热比 1.27

CAB发射药

醋酸丁酸纤维(CAB)发射药也是一种塑性粘合剂系统的LOVA发射药。可借助通常的工

艺设备，目前已用若干增塑剂、溶剂和以不同溶剂比进行过研究，用作候选的CA系 LOVA 发射药是含75%研细RDX的CAB发射药。

跟CA发射药一样，为了提高药条的物理性能，也要使用工艺助剂——水。

CAB发射药的一般性能

组份	
黑索今	75%
醋酸丁酸纤维	14~18%
三醋精，乙酰基柠檬酸三乙酯， 酒石酸二丁酯，酞酸二丁酯	6~10%
硫酸钾	1%
热化学特性	
火药力（英尺·磅/磅）	307,000~347,000
火焰温度（K）	2,250~2,620
平均分子量	20.39~20.97
余容（英寸 ³ /磅）	32.04~35.06
比热比	1.27

NC发射药

这种发射药中的硝化棉（NC）粘合剂含氮量为11%，跟通常标准发射药生产使用的12.6%~13%含氮量不同。这是为了利用现有生产设备发展起来的一种LOVA发射药，目前研究的配方含有70%研细的RDX。

NC发射药的一般性能

组份	
黑索今	70%
NC（含氮量11%）	15%
二正丙基己二酸酯	13%
乙基中定剂	1%
硫酸钾	1%
热化学特性	
火药力（英尺·磅/磅）	360,000
火焰温度（K）	2650
平均分子量	20.48
余容（英寸 ³ /磅）	32.46

EC-NC发射药

乙基纤维素-硝化棉为粘合剂的含73.5%RDX的 LOVA 发射药，是美国大口径武器系统研究所试图把易损性、能量和工艺性能较好结合起来的一种配方。这种发射药的火焰温度在M6+2发射药和M30发射药之间，火药力跟M30相当。弹道试验的结果表明，该配方是LOVA发射药候选配方中最好的配方之一，但其易损性特性却比某些 LOVA 发射药稍差。目前仍在作配方研究，以便将这种发射药的易损性降至理想的水平。

研究中发现,增塑剂由酞酸二丁酯换成三醋精或乙酰基柠檬酸三乙酯后仍不能改善发射药的易损性,而降低硝化棉(NC)含量也无济于事。采用混合硝胺氧化剂的配方研究证明,HMX如占全部硝胺含量的30%将不会对弹道性能产生不良影响。

EC-NC/RDX发射药的典型配方LCIP-X3的一般情况

组份

黑索今(细碎状)	55.1%	} 73.5%
黑索今(E级)	18.4%	
NC(含氮量为12.6%)	7.4%	
乙基纤维素(粘度100)	11.7%	
酞酸二丁酯	6.7%	
乙基中定剂	0.7%	

热化学特性

火药力(焦耳/克)	1091
火焰温度(K)	2594
爆热(卡/克)	776
比热比	1.2764
余容(厘米 ³ /克)	1.02

这种含乙基纤维素的发射药压伸后比含醋酸纤维素的发射药更有韧性。在常温和低温条件下,这种发射药的力学性能良好。在 -60°F 至 160°F 温度范围内以 $0.3\text{克}/\text{厘米}^3$ 的装药密度进行密闭爆发器试验也未发现任何异常现象。对105毫米炮所作的计算表明,5.67公斤弧厚0.035英寸单孔的LCIP-X3发射药在415.8兆帕膛压下初速为1503.6米/秒,要达到同样的弹道效果则需5.67公斤弧厚0.070英寸的M30发射药。

(3) 热塑性弹性体粘合剂

热塑性弹性体是一种物理交联弹性体,它兼具了弹性体和塑料系统二者的最好特性,可以使发射药获得良好的加工性能和力学性能。这类材料可以如同塑料一样用溶剂压伸或热压的方法来处理,而且两种工艺都是可逆的。目前的主要问题是市售的可供选用的热塑性弹性体物质比较少。Kraton仅是其中之一,而用它制成的发射药还不能达到目前对工作性能和易损性的指标要求。

不含氧的Kraton只能提供一种能量偏低的LOVA发射药,而且它吸热分解温度在 450°C 以上,故对破片的易损性较高。所以,含氧量在20%(重量)以上、吸热分解温度在 350°C 以下的热塑性弹性粘合剂仍在探索之中。这种新的粘合剂有可能是Hycar(聚丙烯酸乙酯)。它具有良好的机械性能和工艺可逆性。如果能发现或设计出理想的热塑性弹性体粘合剂,则将如弹道研究所怀斯(Wise)所认为的那样,是对整个LOVA发射药技术的一次重大突破。

嵌段共聚物

美国和西德发展了Kraton嵌段粘合剂系统。Kraton系统是聚苯乙烯和聚乙烯-丁烯共聚物粘合剂,曾被用作塑料粘结炸药的粘结剂。聚苯乙烯作为一种端嵌段基团把聚乙烯-丁烯链联结在一起。该粘合剂在 100°C 以下呈弹性,在 100°C 的高温下表现为塑性,可压伸成型。

现已进入400磅级的批量生产,准备进行易损性评价试验和弹道试验。

Kraton发射药的一般性能

组份

黑索今	80%
Kraton	8~20%
石蜡油、苯乙烯、酞酸二丁酯	0~12%

热化学特性

火药力 (英尺·磅/磅)	325,000~353,000
火焰温度 (K)	2,280~2,420
平均分子量	19.04~19.09
余容 (英寸 ³ /磅)	35.15~35.74
比热比	1.25

Hycar发射药的一般性能

组份

黑索今	80.0%
Hycar-4051	18.3%
石墨	0.7%
增塑剂	1%

热化学特性

火药力 (焦耳/克)	1038
火焰温度 (°K)	2499
比热比	1.28
余容 (厘米 ³ /克)	1.21
平均分子量	20.02

Hycar是一种具有热塑性性能的聚丙烯酸乙酯弹性体(可固化的)。目前研究的重点是非交联系统,取得的工作性能和易损性是令人满意的。但固化的Hycar系统的传导点火温度(50~150℃)比较低,未能通过空心装药射流破片的试验。由于Hycar-4051/RDX发射药也可以如其它溶剂法压伸塑料一样混合、压伸和干燥,也有研究者认为它属于塑料粘合剂一类。

3. 混合硝酸氧化剂的研究

在黑索今的生产过程中,分离工艺之前的产品含有30%的HMX。如果这种混合的硝酸氧化剂能加以利用而不会损害LOVA发射药配方的主要特性的话,则有可能使发射药和RDX生产的成本大大降低。

美国大口径武器系统研究所采用这种混合硝酸氧化剂试制了LCP-A-6546、LCP-A-6547两种EC-NC系LOVA发射药。其一般情况见表2。

表2 使用混合硝酸氧化剂的发射药的一般情况

LOVA 发射药		LCP-A-6517	LCP-A-6546	LCP-A-6547
组 份	NC (含氮量: 12.6%)	7.4	7.4	7.4
	RDX (细碎品)	55.1	32.6	无
	RDX (E级)	18.4	10.9	43.5
	HMX (E级)	无	30.0	30.0
	乙基纤维素	11.7	11.7	11.7
	酞酸二丁酯	6.7	6.7	6.7
	乙基中定剂	0.7	0.7	0.7
热 化 学 特 性	火药力 (焦耳/克)	1090	1080	1081
	火焰温度 (K)	2594	2575	2577
	爆热 (卡/克)	774	767	768
	比 重	1.606	1.632	1.626

由于混有30%的HMX, 发射药的火焰温度降低了20K左右, 而火药力也降低了10焦耳/克。不管是否采用细碎的RDX, 比重都相同。HMX的30%混合量是以整个发射药含量而不是以整个硝酸氧化剂的含量为准计算的。

密闭爆发器试验发现, 含HMX的配方在21℃和71℃的压力指数均比较低。21℃时含HMX的发射药燃速比全部用RDX的LCP-A-6517高。另外, 含HMX的两种发射药在71℃至21℃、21℃至-51℃温度范围内, 温度系数都比LCP-A-6517好。

近期的研究结论是, 如混合硝酸氧化剂的HMX含量适当, 对发射药的弹道性能是不会产生不良影响的。这将为未经分离工序的粗制RDX的应用和降低硝酸氧化剂的成本提供了有效的途径。

4. 低易损性发射药烧蚀性的研究^{10,19}

采用RDX或HMX制成的炮用发射药, 曾被认为有极高的烧蚀性。在1980年陆海空三军及宇航局燃烧会议上对采用硝酸的LOVA发射药的烧蚀性也曾引起过一番争论。为此, 美国弹道研究所采用37毫米试验炮和在M68型105毫米坦克炮上测定热输入量的方法评价了LOVA发射药的烧蚀性。

105毫米坦克炮上热输入量的测定结果表明, 试验的六种LOVA发射药的烧蚀都低于M30。其中烧蚀最小的是氧化剂为RDX、粘合剂为Kraton的LOVA发射药。含80%RDX的聚氨酯发射药和含80%HMX的端羧基聚丁二烯-丙烯腈共聚物的发射药, 热输入量均大于采用了TiO₂-石蜡衬层的M735弹, 而其余的LOVA发射药热输入量都比较低。利用热输入量与

磨损的关系，可以从带添加剂的M392弹把测定的热输入量转换成磨损值。换算结果表明，热输入量大的上述两种LOVA发射药需要使用降低磨损的添加剂以保持烧蚀性跟M735、M774相当。其余的LOVA发射药，特别是含Kraton或乙基纤维素（EC）／硝化纤维素（NC）粘合剂的LOVA发射药即使没有添加剂磨损也很小。

37毫米试验炮的试验指出，参加试验的八种LOVA发射药中只有三种跟M30发射药的烧蚀性相同。这三种烧蚀性较高的原因很可能是测定试验炮试验装药量的密闭爆发器数据的问题，也就是说，是由于过高地估计了与M30峰值压力相匹配的所需发射药药量引起的。虽然大部分LOVA发射药的烧蚀性不象热输入数据所显示的那样低，但火焰温度超过2500K的LOVA发射药（如CA/RDX、CAB/RDX、EN/NC/RDX等）烧蚀性至少与M30相当。

LOVA发射药的低分子量燃烧产物是富燃性的（大多数是CO和H₂），这意味着二次炮口焰和爆炸潜在可能性比M30高得多。测试结果表明，大多数LOVA发射药出现炮口焰和爆炸可能性的程度与M30相当，只有Kraton/RDX、HTPB/HMX、CTBN/HMX三种LOVA发射药大约比M30大3～7倍，估计这是由于这三种发射药的燃烧产物伴有固体碳造成的。

目前的评价工作对烧蚀性问题提出的设计 requirements 是发射药火焰温度要在2500K以下。为了使二次炮口爆炸和炮口焰减至最小，粘合剂必须至少含有20%（重量）的氧，另外还要努力使粘合剂中的氢含量最大（使用饱和系统），这将有助于降低燃烧产物的分子量。

表3 M392弹药和LOVA发射药的热输入量和磨损值

弹药或发射药	添 加 剂	热输入量 (焦耳/毫米)	磨 损 量 (微米/发)	磨 损 寿 命 (发)
M392	无	449	18	80*
M392	聚氨基甲酸酯	416	4.1	350*
M392	TiO ₂ -蜡	381	0.18	7900*
LOVA-2		413	3.5	400
LOVA-3 } LOVA-4 }		358	0.3	4800
LOVA-5		301	<0.2	>8000
LOVA-7		236	<0.2	>8000
LOVA-8		405	2.5	570

表中*：当废弃极限为1.42毫米时获得的寿命数。

表4 LOVA 发射药热输入量和磨损值测定一览表

发射药	粘合剂 名称	氧化剂 (%)	火焰温 度(K)	火药力 (焦耳/克)	余容 (厘米 ³ /克)	比热 比	分子 量 (克/克分子)	装药 量(克)	校正系 数	重量 损失值* (毫克/发)	热输入量测量结果			
											热 量 (焦耳/毫米)	发射药 重 (公斤)	燃烧室 压 力 (兆帕)	初速 (米/秒)
M30			3016	1078	1.05	1.24	23.2	72.2	1.00	67.7±6.6	443	5.62	428	1506
LOVA-1	PU	HMX(75)	2170	926	1.27	1.28	19.5	84.7	1.10	1.4±0.6				
LOVA-2	PU	HMX(80)	2438	1038	1.23	1.28	19.5	71.5	1.00	21.0±10.7	413	5.53	418	1475
LOVA-3	CA	RDX(75)	2549	999	1.15	1.27	21.2	75.7	1.01	69.4±14.9	358	4.98	425	1425
LOVA-4	CAB	RDX(75)	2500	1018	1.18	1.27	20.4	77.6	1.06	51.3±19.4	358	5.94	421	1485
LOVA-5	EC/NC	RDX(73)	2536	1056	1.21	1.28	20.0	80.4	1.13	90.0±10.2	301	5.58	428	1493
LOVA-6	CTBN	RDX(79)	2379	1000	1.28	1.27	19.6	64.8	0.97	24.8±7.0				
LOVA-7	Kraton	RDX(80)	2283	971	1.30	1.25	19.5	80.4		8.4±3.5	236	5.75	415	1426
LOVA-8	CTBN	HMX(80)	2370	997	1.27	1.27	19.7	75.3	1.04	18.8±0.8	406	6.03	417	1468

表中*：用6.4毫米直径喷管测量的磨损值。

5. 原位凝結发射装药的研究²⁰

在评价中口径弹药对空心装药射流效应的易损性试验中,法国布尔日军械研究与制造中心研制了一种比其它装药钝感的30毫米口径的原位凝結装药。

这种装药的基本原理是通过加入粘度适当的粘合剂将单孔的圆柱形小药粒分布在多孔的圆柱形大药粒之间。它要求粘合剂发泡能力强,能把大小药柱之间的空隙填满,并保证装药具有良好的力学性能。

近期研究的结论是原位凝結装药的点火温度高于自由装填装药和压实装药,证明在保持105毫米弹药弹道性能不变的情况下通过装药结构的变化来降低装药感度是可行的。今后准备进行一些其它试验来确定这类装药爆燃之前空心装药射流的最大剩余能量。

6. 高点火温度无壳弹药的研究²⁰

无壳弹是六十年代积极发展的新型轻武器弹药,因烤燃和吸潮问题一直未获成功。近年来,西德黑克勒·科赫公司和代拿买特诺贝尔公司对G11型4.7毫米无壳弹步枪系统进行了充分的改进,将低点火温度的硝化棉发射药改为高点火温度的新发射药,药柱截面由原来的八边形(21×11×8毫米)改为正方形(9×9毫米),从而改善了性能,减少了烤燃的危险,已于1981年定型。西德计划在1983~84年进行部队试验,如果顺利,将于1986年开始生产。

所用的新型发射药,是诺贝尔公司研制的奥克托冈(Octogon),由奥克托今和粘合剂组成。1980年西德诺贝尔公司曾在专利中介绍过一种配方: HMX86份,乙酸乙酯、甲苯和乙酸丁酯构成的凝胶8份,多硝基聚苯粘合剂6份和部分碳纤维。

7. 低易损性液体发射药的研究

目前,美国通用电气公司军品部根据与美国陆军弹道研究所签署的合同,正在研究可用于大口径火炮和坦克炮上的液体发射药。由于没有适用的现成液体发射药,已发展了一组能溶于水、能量高、低毒性、性能稳定和低易损性的新型液体发射药。

据以前资料报道,美国通用电气公司早期研制的液体发射药使用的是一种“Otto”燃料。这种燃料有毒且不稳定。目前发展的低易损性发射药是以硝酸羟胺为基的。这种液体发射药溶于水,在压力条件下安全,低毒性,生产成本比标准发射药要便宜80%。

液体发射药并非新的技术概念,在历经多年挫折和搁置之后现在又重新展示出希望,已引起有关人士的密切注视。该发射药如能成功地用于火炮,据称将具有以下优点:(1)内弹道性能灵活,射程变化大且精度好;(2)初速高、射速快、燃烧完全、炮口火焰小;(3)能量大、低毒性、易损性低;(4)火炮携弹量增大;(5)勤务处理安全可靠,后勤支援手段简单;(6)能减小炮膛磨损和烧蚀、生产成本低、危险性小等。这项技术对未来野战火炮设计和性能将产生巨大的影响,其最终应用将是火炮技术的一次革命。

通用电气公司的液体发射药技术在直射武器方面可以说已获得相当丰富的经验,曾在25~105毫米各种火炮上进行过计1800次的发射试验。该公司最近宣称,其液体发射药技术要比

高速电磁炮技术领先10年。

除液体发射药外，该公司目前主要研究的项目是能将液体发射药精确地通过活塞表面的小孔注入炮膛内的泵装填系统。这种可重复喷注液体发射药的技术采用了类似内燃机前部点火直接喷射燃烧的原理，可以控制喷入炮膛内的液体发射药剂量，据称能解决内弹道性能不稳定的问题。

据有关资料报道，最近美国通用电气公司军品部又为美国陆军提出了一种可供21世纪使用的155毫米自行榴弹炮模型。这种火炮将使用低易损性液体发射药，可携带126枚自动装填的弹丸，而且由于发射装药的剂量可控多变，故火炮的射程也能灵活多变。最近，美国陆军弹道研究实验室已向通用电气公司提供资金，以便使此项技术在1984年就能进入高级工程发展阶段。

当发展工作结束时，通用电气公司还期望能为美国海军设计和生产一种5英寸口径、发射液体发射药的火炮。

8. 低易损性发射药的评价方法

美国国防部/能源部在执行1979年制定的不敏感火炸药联合研制规划过程中，为能尽快选出预先发展阶段试验使用的低易损性发射药提出了“易损性评价计划”。该计划包括试验的选择及评价，试验参数和基本设想，评价的程序等三个主要方面。评价的目标是为预先发展阶段工作抉择低易损性发射药候选配方提供依据，为评价弹药易损性确定一套方法，以及为机理研究提供数据库。

为了准确地评价低易损性发射药的易损性减小程度，美国陆军军械研究发展局弹道研究所对陆军火炮发射系统所面临的危险进行了分析。结论认为，发射药对系统生存能力的影响不仅取决于发射药本身的固有特性，也取决于武器系统的本身以及该武器系统可能碰到的威胁。因此，评价计划中列入的试验项目既考虑了海军军械站、大口径武器系统研究所、洛斯阿拉莫斯科学研究所、海军面武器中心Dahlgren实验室等专家的提议和意见，又是综合了弹道研究所近几年“立足于实战”的研究成果提出来的。其中，大型试验（或称实战试验）是根据装在坦克炮弹药中的发射药对实际或模拟危险的反应，对LOVA发射药候选配方进行分类而设计的。它在弹道研究所对装甲及其它陆军火炮系统面临的威胁进行危险性分析的过程中日臻完善。中小型试验有的是现成的火炸药安全性试验，有的则是工业贮存和运输试验借用而来，或者从研究火箭发动机运转故障过程推导出来的。

到目前为止，共有七种标准发射药和九种LOVA发射药进行过上述的大部分试验。其中因为缺乏材料还没进行过封闭试验，而未作坦克车体试验是由于至今尚未制订出比较完善的试验程序。

近期的研究成果：对一系列的受控破片试验和空心装药射流产生的碎片试验结果，跟实验室的热破片传导点火试验结果的综合分析，已经确定传导加热是发射药在射流碎片作用下点火的主要机理。DSC试验和TGA试验说明了粘合剂对降低发射药易损性的作用。初步的评价标准已经确立：（1）对空心装药射流碎片要象LOVA-X1A（即PU/HMX发射药）和LOVA-X1B（即PU/RDX发射药）一样钝感；（2）对高速穿透物的敏感度要低于M30发射药。