

文章编号: 1006-9941(2011)05-0483-08

特约来稿

# 烟火药的创新与发展

潘功配

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

**摘要:**烟火药的发展由来已久,20世纪中后期的突破性发展为高技术战争光电对抗无源干扰,进入21世纪发展步入了理论研究与技术创新的新阶段。新型烟火药红外照明剂、脉冲信号剂、声纳诱饵剂、弹丸增程底部排气剂、强光辐射迷盲干扰剂、熄燃或爆燃的软杀伤烟火剂、“冷光”烟火剂、微烟/无烟烟火剂等,创新发展特色鲜明。烟火药理论研究的突破、技术研究概念的更新、应用研究领域的拓展、配方研究凸现出新原理、新材料、新工艺和安全环保与军民两用,应成为烟火药的未来发展方向。

**关键词:**军事化学与烟火技术;烟火药;创新;发展

**中图分类号:** TJ5; O69

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.001

## 1 引言

烟火药在本质上是火炸药的一种,是一种特殊的含能材料。

烟火药作为一种药剂并获得不断发展,归功于黑火药的发明。黑火药就是最初的烟火药,也是最初的火药和炸药。我们的祖先在炼丹的过程中炼着了火,从而导致了黑火药的发明。中国古代的黑火药配方是“一硝二磺三木炭”,即一斤(500 g)硝酸钾,二两(62.5 g)硫磺,三两(93.75 g)木炭,其百分比为 $\text{KNO}_3 : \text{S} : \text{C} = 76 : 10 : 14$ ,与当今标准的黑火药配方 $\text{KNO}_3 : \text{S} : \text{C} = 75 : 10 : 15$ (质量比)基本一致。黑火药作为最初的烟火药一出现即被用于战争,起初是用来纵火、灼伤和发生毒烟,其后发展用于爆炸,进而用作发射。

1786年法国化学家贝塞利特(Berthollet)发现了氯酸钾,烟火药发展进入一个崭新的阶段。19世纪后期,电力工业开发出用电解法制造出金属镁、铝,此后随着锶、钡、铜等及其化合物出现,烟火药迈入了一个五彩缤纷的新时代。烟火药的品种越来越多,所制备出的烟火器材或装置成为了军队弹药装备补给品。1849年的美国军械手册就记载有烟火信号、发光火

炬、纵火火绳、照明装置、燃烧火球等。

20世纪初,烟火药发展的一个重要应用是曳光弹,它能指示小型自动武器对快速移动目标有效射击。1906年德国海军首次应用化学遮蔽烟幕成功地进行舰队调动。1915年德国在英国伦敦首次投掷了燃烧航弹。一、二次世界大战期间烟火药获得了快速发展,各种照明弹、信号弹、曳光弹、烟幕弹、燃烧弹等烟火特种弹药在战场上如雨后春笋般地涌现。

20世纪中后期,烟火药又有了突破性发展,被用于高技术战争光电对抗无源干扰。越南战争、中东战争、英阿马岛之战、海湾战争和科索战争均表明,烟火光电对抗(泛指烟幕、诱饵、软杀伤等,相对于电子有源干扰被习惯称之为“无源干扰”)能使敌方光电侦察器材迷盲、制导武器失控、观瞄探测失灵、通讯指挥中断<sup>[1]</sup>。烟火在当今高技术战争中发挥了极其重要的作用。

进入21世纪,烟火药的发展又步入了一个新阶段:烟火药的固体化学反应原理研究引起烟火科技工作者极大的兴趣;烟火气溶胶灭火、烟火发电、冷光烟火等技术研究在概念上又有所更新;采用固相反应原理、可反应金属混合物、纳米材料与稀土材料以及多用途硫化床工艺制备烟火药剂的研究,体现出了烟火药发展的新原理、新方法、新材料和新工艺的理念;与此同时,烟火药的应用研究领域也拓展至真空微重力外层空间和水下非大气层的介质环境中;除此之外,烟火药发展还凸现出了军、民两用和安全、环保。

收稿日期: 2011-05-25; 修回日期: 2011-06-30

作者简介: 潘功配(1945-),男,博导,教授。

e-mail: pangongp@163.com

## 2 烟火药的发展现状<sup>[2]</sup>

### 2.1 军用烟火药的发展现状

#### 2.1.1 照明剂的发展现状

传统的可见光照明剂已由钡盐(白光)照明剂发展至钠盐(黄光)照明剂。钡盐(白光)照明剂主要由  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  和 Mg 粉混合而成,其单位质量光量不高,约为  $(12 \sim 18) \times 10^4 \text{ lm} \cdot \text{s/g}$ ,显色性亦不佳,为此钠盐(黄光)照明剂获得发展。钠盐(黄光)照明剂主要由  $\text{NaNO}_3$  和 Mg 构成,它的单位质量光量可达  $(50 \sim 62.5) \times 10^4 \text{ lm} \cdot \text{s/g}$ 。由  $\text{NaNO}_3$  36%, Mg 55%, 聚酯树脂 9% 组成的钠盐(黄光)照明剂的单位质量光量超过  $60 \times 10^4 \text{ lm} \cdot \text{s/g}$ 。通过配方改进和新的粘合剂应用,目前钠盐(黄光)照明剂的单位质量光量可达  $(81.25 \sim 87.50) \times 10^4 \text{ lm} \cdot \text{s/g}$ 。

可见光照明剂研究与制造工艺息息相关。目前已研制出了可浇铸的照明剂,它克服了压装照明剂工艺成型较困难和生产不够安全的弱点。一种由顺丁烯二酸酐作催化剂,二硝基三乙基二醇作增塑剂的浇铸照明剂,单位质量光量达到  $62.5 \times 10^4 \text{ lm} \cdot \text{s/g}$ 。

国外开展过气体照明剂技术研究。气体照明剂的氧化剂、可燃剂和附加物均为气体,它克服了固体照明剂一旦点燃将不可控的缺点。气体照明剂通过改变气体流量即可控制火焰大小和燃烧时间,重现性好,通过使用抛物面反射镜使单位质量光量可提高十多倍。例如,对单位质量光量只有  $18.0 \times 10^4 \text{ lm} \cdot \text{s/g}$  的气体照明剂,使用抛物面反射镜后质量光量提高了 12 倍,达到  $212.5 \times 10^4 \text{ lm} \cdot \text{s/g}$ 。

开展照明剂高温可逆反应时的可逆温度和照明剂的显色性研究,对进一步提高可见光照明剂的性能和配方改进具有重要作用。当前可见光照明剂研究工作,侧重于开展钠盐(黄光)照明剂配方优化,以提高其单位质量光量。

鉴于夜战战场红外、微光、热像仪的大量使用,为提高夜视器材的视距和扩大视野,可见光照明剂被发展为红外照明剂。

#### 2.1.2 燃烧剂的发展现状

燃烧剂的战场破坏力大于猛炸药,这是因为它除能借空气中氧进行燃烧使得武器有效载荷提高外,重要的是它能对目标构成连环式纵火毁伤破坏,炸药则是瞬间冲击波的毁伤作用。

燃烧剂按其点燃过程分类,可分为基本燃烧剂和

辅助燃烧剂。基本燃烧剂是直接传火于可燃目标的燃烧剂,辅助燃烧剂是用来点燃基本燃烧剂的药剂。例如,镁基合金燃烧弹中的镁合金外壳是基本燃烧剂,而其中所装填的特种铝热剂“则梅特”(Thermate)是辅助燃烧剂。则梅特是由 80% 的铝热剂和 20% 的硝酸钡、铝粉和硫黄混合而成,其作用是引燃镁合金外壳。燃烧剂按含氧化剂与否分类,还可分为含氧化剂的燃烧剂和不含氧化剂的燃烧剂。含氧化剂的燃烧剂有:以金属氧化物为主要氧化剂的高热剂;含氧盐类作氧化剂的燃烧剂。不含氧化剂的燃烧剂主要有:石油产品、金属及其合金(如锆、钛、镁、铝及其合金)、磷及其化合物,其它一些燃烧物质和混合物等。

燃烧剂的发展,已由应用最为广泛的黄磷基、石油基燃烧剂发展为赤磷基、锆基、镁基、稀土合金以及准合金类高能燃烧剂。南京理工大学研究了稀土燃烧剂,含 Ce 45% ~ 50%、La 22% ~ 25%、Nd 18% ~ 20%、Pr 5% ~ 7% 及少量其它金属元素的混合稀土合金研制的稀土燃烧剂,密度可达  $6.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,呈金属特性。将该稀土燃烧剂加工成试样,装填于 53 式 7.62 mm 步枪子弹上,射击时纵火效果如表 1 所示。

表 1 稀土燃烧剂在 7.62 mm 枪弹上的纵火效果

Table 1 The incendiary effect of rare-earth incendiary in the 7.62 mm cartridge

number	mass of cartridge /g	mass of propellant /g	mass of incendiary /g	inflammables	inflaming rate /%
1	8.85	1.1	2.37	gasoline	100
2	8.85	1.6	2.37	gasoline	100
3	10.347	1.2	2.58	gasoline	100
4	10.347	1.6	2.58	gasoline	100
5	10.347	1.6	2.58	aircraft-gasoline	100
6	10.347	1.6	2.58	kerosene	80
7	10.347	1.6	2.58	diesel-oil	71.4

将稀土燃烧剂用于破甲弹,通过改变药形罩的锥角,增加稀土燃烧剂隔板,不仅能扩大破甲孔径,而且能提高火焰贯穿能力和高温流体持续时间,从而提高了对目标内部易燃物的纵火能力。稀土燃烧剂隔板所形成的大块火种,对目标附近的易燃物也具有较好的纵火效果。美军航炮用的稀土合金燃烧弹,直径为 20 mm,采用聚四氟乙烯弹头,弹芯由稀土合金制成,该稀土合金由 87% 的混合稀土和 13% 的铝合金组成,混合稀土是 50% 的 Ce、25% 的 La 以及其它稀土元素的混合物。

由金属与线性分子粘结剂混合制成的准合金(quasi alloy,即QA合金)被用作燃烧剂。QA合金成分包括主体活性金属(如Zr、Ti、Ce等)和与主体活性金属制成合金的其它金属。主体活性金属用英文名称第一个字母表示,如QAZ表示准合金锆(Zirconium),QAT表示准合金钛(Titanium)。QA合金有两种形态:一种是浆状(代号S),制备前在稠浆中加入催化剂,并加热加压,在(20+5)℃时,适用期大约为60min;另一种是干粉(代号D),即可由单一粉混制,应用时再加热加压。含锆的准合金QAZ与大多数火炸药相容,贮存期限在15年以上,燃速 $0.6 \sim 1.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,燃温 $1927 \text{ }^\circ\text{C}$ ,可点燃柴油,可加工成套环,套在外部构件或传爆药柱上,也可以直接涂覆于弹壁上使用。

此外,钨钼镍铁合金、锆锡合金也被应用。美国海军提出用钨钼镍铁合金制造穿甲弹弹芯可提高燃烧后效,认为以钨85%、锆10%、镍2.5%、铁2.5%制造的弹芯有较好侵彻与燃烧性能。锆锡合金也被用来制造穿甲弹的燃烧件,其最佳配比是:锆85%~90%,锡10%~15%。

### 2.1.3 发烟剂的发展现状

军用发烟剂主要用于形成烟幕(人工气溶胶),起遮蔽隐身或眩惑干扰作用。

最传统的发烟剂是黄磷发烟剂。黄磷遇空气自燃,当空气中的氧充足时则生成 $\text{P}_4\text{O}_{10}$ (即 $\text{P}_2\text{O}_5$ ),氧不足时则生成 $\text{P}_4\text{O}_6$ (即 $\text{P}_2\text{O}_3$ ),燃烧温度为 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,其发烟过程如下:

黄磷 $\rightarrow$ 磷酸酐蒸气 $\rightarrow$ 磷酸酐微粒(白色烟) $\rightarrow$ 磷酸微粒(白色烟) $\rightarrow$ 磷酸的水溶液微粒(白色雾)。

大量实验已表明,黄磷烟雾只能遮蔽可见光( $0.4 \sim 0.76 \mu\text{m}$ ),而对近( $1 \sim 3 \mu\text{m}$ )、中( $3 \sim 5 \mu\text{m}$ )、远( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ )红外和毫米波( $1 \sim 10 \text{ mm}$ )的遮蔽基本无效。随着光电技术的快速发展,现代光电观瞄探测器材和制导武器的工作波段已由可见光发展至激光、红外和毫米波。因此,开发研究遮蔽干扰波段覆盖可见光至红外( $0.4 \sim 14 \mu\text{m}$ )、激光( $1.06 \mu\text{m}$ 、 $10.6 \mu\text{m}$ )和毫米波( $3 \text{ mm}$ 、 $8 \text{ mm}$ )的多频谱乃至“全波段”发烟剂,成为当今发烟剂发展的主流。目前,“多频谱”、“全波段”发烟剂研究的技术着眼点,一是新配方研究,二是基于现有药剂的装药技术研究。后者是对已有的各种波段的遮蔽材料进行“组配”,构成所谓“组合烟幕”或“宽频烟幕”。

“多频谱”、“全波段”发烟剂,按生成烟幕方式可分为烟火燃烧类、爆炸撒布类、机械喷洒类等。烟火燃烧类包括改进型HC发烟剂、赤磷基发烟剂、钛粉基发

烟剂等。其中赤磷基发烟剂已成为主体的发烟剂,但它也存在对激光、红外的干扰效果较差的问题,很多人正在致力于增强其对激光、红外消光能力的研究工作。爆炸撒布类和机械喷洒类多采用金属粉(如铜粉、铝粉等)、陶瓷粉、膨胀石墨和导电纤维材料等。导电纤维材料,如碳纤维、镀金属纤维等对毫米波具有良好的干扰效果,纤维直径细,在空中飘浮性能好,易于爆炸分散。德国研制了一种赤磷基添加导电纤维的发烟剂,它产生的烟幕具有多频谱干扰效果<sup>[3]</sup>。德国公司研制的称之“全波段”发烟剂配方为<sup>[4]</sup>:可膨胀石墨48%;高氯酸钾23%;镁粉16%;石墨粉6%;燃速调节剂(黑火药或偶氮二酰胺)4%;粘合剂(硝化纤维素或酚醛树脂)3%。

### 2.1.4 曳光剂的发展现状

曳光剂是介于照明剂与信号剂之间的一种光效应药剂。常规的曳光剂仍由氧化剂、金属可燃剂和粘合剂组成。曳光剂的氧化剂通常选用 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 或 $\text{BaO}_2$ 。红光曳光剂一般用 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 或 $\text{SrO}_2$ 作氧化剂。由于曳光剂直接受到发射器膛内的高温高压火焰气体的猛烈冲击,极易造成速燃,故高氯酸盐和氯酸盐不宜作曳光剂的氧化剂。高空火箭及导弹用曳光剂的要求更高,它既要耐高压高温,又要抗震动和加速惯力,还应在低压真空环境中稳定燃烧。用于高空火箭及导弹的曳光剂宜用金属钙、硝酸钠、聚乙烯或四硝基咪唑作组分,或采用可反应金属。试验证明,在33km的高空使用含钙20%、硝酸钠80%的曳光剂,有良好的燃烧性能(在此高空中含硝酸锶的曳光剂则难于点火和稳定燃烧)。为了可靠点燃曳光剂,可采用强点火药。例如 $\text{BaO}_2$  80%、Mg 18%、粘合剂2%或者 $\text{BaO}_2$  30%、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  48%、Mg 13%、酚醛树脂9%。

新型曳光剂的研究主要是采用金属氢化物(如 $\text{MgH}_2$ 、 $\text{TiH}_2$ 、 $\text{ZrH}_2$ 等)代替单质金属(如Mg、Ti、Zr等)作可燃剂,采用自燃式火箭燃料(如铝烷与金属粉)以及采用金属(间)互化物(如TiB、NiAl、PdAl)作曳光剂等。值得提出的是用金属(间)互化物作曳光剂,它具有长贮性能稳定和点火可靠等特点。

鉴于红外技术的快速发展,红外曳光剂研究成为曳光剂发展的新方向。

### 2.1.5 信号剂的发展现状

信号剂分发光信号剂(夜用)和彩色发烟信号剂(昼用)。发光信号剂用于各种信号弹(枪弹、榴弹),供远距离传递信息和联络用,交通运输业用于制造各种手持信号火炬和信号火箭,供遇险求救或险情预报

用。彩色发烟信号剂用于制造昼用信号器材,供白天远距离传递信息与联络,也用于制造手持信号烟管,供飞行员跳伞着陆联络,航空表演用于空中形成彩色飘带等,航海用于制造海上飘浮信号器材,供海上遇险求救传递信号。

发光信号剂的新近发展是脉冲信号剂,用于计算机编码。脉冲信号剂燃烧时既不是定速燃烧,也不是渐增燃烧,而是周期性的脉冲燃烧<sup>[5]</sup>。当改变药剂的组分时,脉冲频率可在 0.1 ~ 1000 Hz 范围内变化。两种有代表性的红光脉冲信号剂及其频率如表 2 所示。

表 2 两种红光脉冲信号剂

Table 2 Two red pulsating flares

number	proportion of formula × 100			frequency $\nu$ /Hz
	strontium perchlorate tetrahydrate	methacrylic acid-methyl ester	pentaerythritol dinitrate diacrylate	
1	50	10	40	100
2	50	25	25	0.2

### 2.1.6 光电干扰药剂的发展现状

光电干扰药剂,包括诱饵(雷达诱饵、红外点源或扩张源诱饵、激光诱饵、双色双模和红外成像诱饵等)药剂、烟幕(燃烧型和非燃烧型人工气溶胶和镀膜纤维毫米波干扰等)药剂和软杀伤烟火药剂(强光致盲烟火药剂、腐蚀性气溶胶药剂、熄燃或爆燃烟火药剂、超级粘滞剂和润滑剂)等,品种较多。目前,光电干扰药剂发展追求其干扰“宽频谱”、“多波段”与一剂“多功能”。“环保型”也提到议事日程。南京理工大学陈昕<sup>[6]</sup>等已探索研究出了一种可降解的竹纤维干扰箔条,它以竹纤维为基进行化学覆膜金属,通过爆炸分散形成有效的雷达反射截面,同时亦能燃烧形成特定波谱的红外辐射。此外,基于水基泡沫的环保型宽频雾化幕障干扰烟幕也被研究出<sup>[7]</sup>。

### 2.2 民用烟火药的发展现状

应用量最大的民用烟火药是烟花爆竹用烟火药剂。烟花爆竹用烟火药剂发展重点,一是安全,二是环保。鉴于氯酸钾氧化剂在烟花爆竹产品上的禁用,替代氯酸钾的安全氧化剂研究成为烟花爆竹用烟火药发展的当务之急,又因为烟花爆竹的环保问题决定着整个产业的今后走向乃至生死存亡,环保型烟花爆竹用烟火药发展刻不容缓。

目前,以高氯酸钾、硝酸钾、硝酸钡氧化剂替代感度高的氯酸钾氧化剂研究已获得成功;环保型代硫可燃

剂获得应用;海绵钛及其合金粉可燃剂材料已成功开发并应用于冷光烟火;铬(Cr)、锰(Mn)、钒(V)、镍(Ni)、钼(Mo)、钨(W)、铋(Bi)以及稀土合金等可燃剂材料应用有了新进展;使用赛璐珞、环氧树脂、酚醛树脂、虫胶清漆、聚乙烯醇等取代易吸湿霉变的淀粉材料,既增强了烟花制品的安全性,又提高了发光星体的着火率、燃烧性以及亮度和色度;已用聚氯乙烯、氯化橡胶、氯化石蜡取代有毒的六氯代苯;已研究出了不吸湿、易点燃、发声效果良好的第四代苯二甲酸盐作哨声剂;军用单基药、双基药等被选作无烟烟花材料;膨胀珍珠岩粉被用作为爆竹药的疏密调整剂;如此等等。

民用烟火药除烟花爆竹用烟火药剂之外,还包括有超纯金属冶炼用烟火药剂、焊接与切割用烟火药剂、安全气囊气体发生剂、植物催长和杀虫与灭鼠用烟火药剂、人工防雷降雨用烟火药剂、无声近人爆破用烟火药剂、气溶胶灭火用烟火药剂、发电用烟火药剂、宇宙探索用烟火药剂、反恐用烟火药剂等。鉴于民用烟火药应用与众多学科相互融合、渗透、交错和综合,目前的发展势头较好,尤如雨后春笋,生机勃勃。

## 3 烟火药的创新发概况

烟火药的发展在内涵上总在不断地出新,因之烟火药的创新发特色十分鲜明。例如红外照明剂、脉冲信号剂、声纳诱饵剂、弹丸增程底部排气剂、强光辐射致盲干扰烟火剂、熄燃或爆燃的软杀伤烟火剂、“冷光”烟火剂、微烟/无烟烟火剂等等。特别是高科技电子战光电对抗,将烟火药应用推向了光电对抗高技术行列,对现代高科技的光电制导武器和探测观瞄器材实施光电对抗无源干扰,与此同时烟火药还被用于外层空间飞行器的隐身干扰和 underwater 战场水声对抗反鱼雷等。

创新发展的红外照明剂,是一种在近红外区(0.7 ~ 1.3  $\mu\text{m}$ )辐射强度高而在可见光区发光强度低的一种光效应烟火药剂。与可见光照明剂一样,红外照明剂也是由氧化剂、可燃剂和粘合剂等组成。一种由硝酸钾 58.75%、硝酸钠 9.79%、六次甲基四胺 15.67%、硅粉 6.85%、硼粉 1.98%、氧化铁 0.98% 和 WITCO 1780 6.00% 组成的红外照明剂已被美军用于 M-257 型 70 mm 航空火箭红外照明弹,该弹的红外照明炬装填密度为 1.75 ~ 1.85  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,红外辐射强度为 1060 W/sr,可见光光强为 3000 cd(而原 M-257 可见光照明弹光强为  $10 \times 10^5$  cd)。吊伞与红外炬落速为 4.26  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,留空燃烧时间为 180 s。它使直升机驾驶员用的 M912A 型二代夜视眼镜看见吉普车的距离由原 161 m 增至 644 m,

即视距提高 4 倍,可识别吉普车的距离由原 32 m 增至 483 m,即提高了 15 倍。南京理工大学研究出的 A 型红外照明弹及红外照明剂技术,经实际应用可使某夜视仪对吉普车视距提高 7 倍<sup>[8]</sup>。

创新发展的声纳诱饵剂,是一种在水下脉动燃烧并产生 0.5 ~ 4 kHz 的声频效应的烟火药剂<sup>[9]</sup>。由声纳诱饵剂研制出的烟火声纳诱饵装置,对声频探测器以及声寻的鱼雷、水雷可实施有效诱骗干扰,能为海军潜艇和水面舰艇提供一种有效的声纳诱饵自防御装备。南京理工大学已开展了水下烟火声纳诱饵剂研究,当以  $\text{NH}_4\text{ClO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-添加剂}$  为声纳诱饵剂基础配方开展研究时,通过加入不同含量的高热剂(其含量分别为:1<sup>#</sup>-100%、2<sup>#</sup>-75%、3<sup>#</sup>-50%、4<sup>#</sup>-25%、5<sup>#</sup>-0%),经国家水声重点实验室测试结果如图 1 所示。

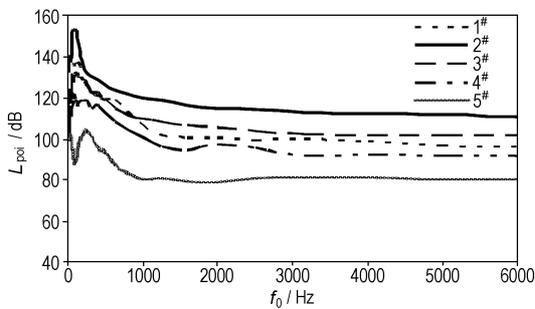


图 1 烟火声纳诱饵剂水下燃烧的频谱图

Fig.1 Spectrum of pyrotechnical-type sonar decoy combustion underwater

创新发展的弹丸增程烟火底排剂,是一种在弹丸底部区域进行低动量的“添质加能”燃烧排气而减阻增程的新概念烟火药剂,它在不改变火炮系统、发射装药和弹形结构的前提下,使炮弹射程提高 30%。南京理工大学研发使用的烟火底排装置及底排药柱如图 2 所示。

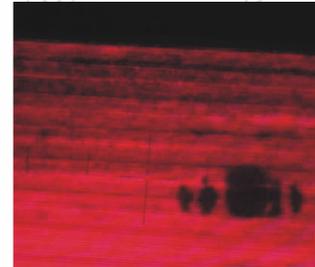


图 2 烟火底排装置及底排药柱

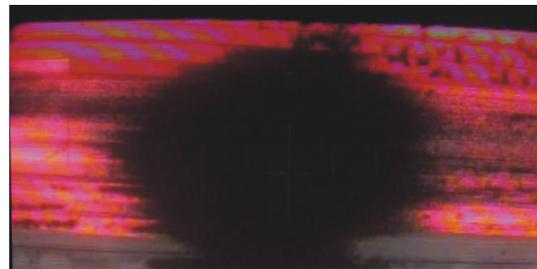
Fig.2 The pyrotechnics base bleed unit and base bleed grain

创新发展的强光辐射迷盲干扰剂,是一种光谱分布覆盖 0.4 ~ 14  $\mu\text{m}$  波段(即可见光至红外区)的强

光辐射烟火药剂,它使敌前沿战场的光电器材致盲、失灵、光敏元件溢出直至烧毁,以此瘫痪敌观瞄、指挥、控制和通信系统,同时使敌战斗人员眼睛迷盲、无法正常工作而失去作战能力。南京理工大学研发使用的强光辐射迷盲干扰烟火剂对热相仪、微光夜视仪干扰效果如图 3 所示。



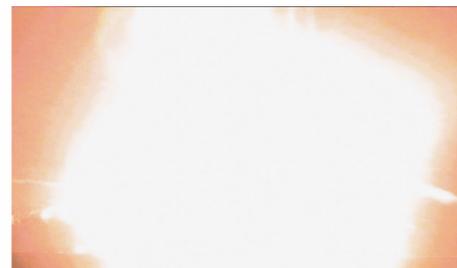
a. infrared image of the original target image



b. infrared image after exposure to intense infrared radiation



c. intense infrared radiation effect of the jamming bomb



d. Jamming effect of intense infrared radiation  
jamming bomb to LLL night vision device

图 3 强光辐射迷盲干扰烟火剂对热像仪、微光夜视仪干扰效果

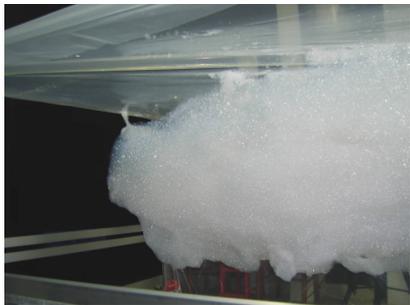
Fig.3 The jamming effectiveness of pyrotechnic intense flash in thermal equipment and LLL night vision device

创新发展的宽频雾化幕障干扰烟幕药剂,是南京理工大学研发出的一种遮蔽干扰波段覆盖可见光(0.4 ~

0.76  $\mu\text{m}$ )、红外(1~3  $\mu\text{m}$ , 3~5  $\mu\text{m}$ , 8~14  $\mu\text{m}$ )、激光(1.06  $\mu\text{m}$ , 10.6  $\mu\text{m}$ )、毫米波(3 mm, 8 mm)和厘米波(2 cm, 3 cm)的新型烟幕药剂<sup>[6]</sup>,它基于水基泡沫形成一种环保型特种泡沫云,如图4所示。厚度为20 cm的泡沫云可见光透过率为0%;厚度为15 cm的泡沫云红外透过率:1~3  $\mu\text{m}$   $\leq$  1.83%、3~5  $\mu\text{m}$   $\leq$  5%、8~14  $\mu\text{m}$   $\leq$  10%;厚度为10 cm、泡径为4~7 mm的泡沫云激光单向透过率:1.06  $\mu\text{m}$  激光  $\leq$  6.02%, 10.6  $\mu\text{m}$  激光  $\leq$  7.63%;厚度为80 cm的泡沫云毫米波衰减效果:3 mm波衰减值为14.9 dB;8 mm波衰减值为31.4 dB;厚度为60 cm的泡沫云厘米波衰减效果:2 cm波的衰减值为12.5 dB,衰减率为81.2%;3 cm波的衰减值为17.4 dB,衰减率为92.3%。



a. special foam cloud floated in the sky



b. special foam cloud in testing

图4 特种泡沫云

Fig. 4 Special foam cloud

创新发展的无烟焰火药剂,是一种以军用硝化棉、硝化甘油无烟药(即单基粉、双基粉)为主体的微烟/无烟烟花药剂,已用于舞台焰火。

#### 4 烟火药的发展方向

烟火药的发展在于创新,而创新发展需定位于:理论研究要突破;技术研究概念要更新;应用领域应拓展;配方研究要凸现新原理、新材料、新工艺;与此同时要安全、环保和军、民两用。

#### 4.1 理论研究要突破

大多数的烟火药是大量的固-固粒子混合而成,其聚集状态是固-固相的。从固体化学角度来研究烟火药的化学反应机理,意义极其重大。只有依据固体化学反应原理来研究烟火药反应机理,才有可能使烟火药创新发展产生质的飞跃<sup>[10]</sup>。

人们在研究 S-KClO<sub>3</sub> 烟火药意外爆炸时发现,“在凝聚相中开始,在气相中结束”的经典学说,是无法解释 S-KClO<sub>3</sub> 为何超前反应?按经典学说,S-KClO<sub>3</sub> 要发生反应,首先 KClO<sub>3</sub> 应在其熔点附近(365~370  $^{\circ}\text{C}$ )熔融分解,放出 O<sub>2</sub> 后才与 S 反应,即先 KClO<sub>3</sub>  $\rightarrow$  KCl + O<sub>2</sub>, 然后 O<sub>2</sub> + S  $\rightarrow$  SO<sub>2</sub>。但 S-KClO<sub>3</sub> 差热分析的热谱图(如图5)证明 S-KClO<sub>3</sub> 反应在 142~144  $^{\circ}\text{C}$  即开始,150  $^{\circ}\text{C}$  时即出现激烈的放热反应峰,反应并未等到 KClO<sub>3</sub> 熔融分解即开始。KClO<sub>3</sub> 在其熔点前是不会分解的,即便加有 MnO<sub>2</sub>、CuO 或 Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂的 KClO<sub>3</sub>, 不到 200~220  $^{\circ}\text{C}$  也不会分解,由此说明 S-KClO<sub>3</sub> 的反应机理不是经典理论的说法。实际上 S-KClO<sub>3</sub> 烟火药剂反应是基于固体可燃物与固体氧化剂之间的电子传递的固相反应,KClO<sub>3</sub> 与 S 混合时由于 S(熔点 119  $^{\circ}\text{C}$ )使得 KClO<sub>3</sub> 晶格松弛,反应性提高了,药剂的发火温度降低了,反应并没有等到 KClO<sub>3</sub> 熔融(365~370  $^{\circ}\text{C}$ )即开始了,这是由于固相反应下 KClO<sub>3</sub> 晶格松弛在反应性中起了支配的作用。由此说明,烟火理论研究的突破对烟火药创新发展的重要性。

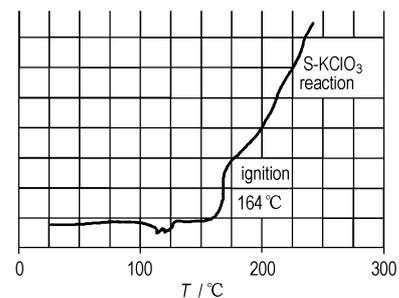


图5 S-KClO<sub>3</sub> 差热分析的热谱图

Fig. 5 DSC spectrum of S-KClO<sub>3</sub>

#### 4.2 技术研究概念要更新

传统的烟火特种弹药概念已在更新,如照明弹药已由可见光照明发展为红外照明,发烟弹药已由遮蔽可见光发展为抗红外、激光、毫米波,曳光弹药已由可见光曳光发展为红外曳光,信号弹药已由传统烟火信号发展为烟火信息编码信号。

技术研究概念更新的烟火信息编码信号药剂,是

一种脉冲频闪烟火信号剂,它在燃烧和爆炸反应过程中,以 1~1000 Hz 频率变化和 multispectral wavelength 交替的形式给出类似 [0,1] 二进制数据信息,从而实现计算机编码,由此获得编码脉冲频闪烟火信号弹药模块,通过信号弹发控与编码和信号探测处理及其指令发布操作,即可实现战令通信指挥。其基本工作过程的第一步是发送方按照作战指令传递数据信息,驱动程控库调出与数据信息相对应者编码烟火信号弹;第二步是发射脉冲频闪烟火信号弹至空中,发出特定的频闪光;第三步是一个或多个接收方采用特定的装置接收光信号,进行信号转换、辨识和处理;第四步是数据信息的重构,复现发送方的原始信息<sup>[11]</sup>。

#### 4.3 应用领域应拓展

拓展烟火药应用领域也是烟火药发展面临的任务。

极端环境条件下(低温、低压、缺氧、高风速、大雨雪等)和真空微重力的外层空间战场和水中战场烟火药应用需求背景明确。环境的变化,介质的不同,药剂的性能将发生显著变化。作者参与 HJG-2 北京 2008 奥运会珠峰火炬研究,珠峰环境条件是从 6300 m 高度开始就是冰川,常年气温为  $-35 \sim -45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,气压在 0.3 Pa 左右,严重缺氧,通常伴有风向不定的  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  巨风和  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的大雪。我们知道,真空微重力的外层空间烟幕微粒的扩散规律和速度公式与大气层的差异很大<sup>[12]</sup>,水介质亦不同于空气介质,因此拓展烟火药应用领域研究势在必行。

#### 4.4 配方研究要凸现新原理、新方法、新材料、新工艺

配方研究要凸现新原理、新材料、新工艺。例如,日本人研究了一种用于海上求救信号的发光剂,系采用“负混合物”的配方原理,用水作氧给体,镁 95%,冰晶石 ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) 5%<sup>[13]</sup>。美国人以锆、铝、钨、钛、石墨、硼等金属为基本组分制备可反应金属混合物的方法,具有不用氧化剂的优点,它是在已广泛使用的铝、钡可反应金属混合材料基础上发展起来的<sup>[9]</sup>。配方研究要凸现的新材料,例如可供光电干扰剂配方研究的新材料就有纳米粉体材料<sup>[13]</sup>、烟火纳米复合含能材料、单体异质宽波段复合干扰材料、碳纳米管磁性复合吸波材料、无机纳米粒子/石墨烯复合隐身干扰材料、红外-微波多功能诱饵材料等。用化学气相沉积和物理气相沉积制备烟火制品、用悬浮沉淀法和磨混法制备红外烟火药等新工艺对烟火药的性能提高意义重大。

#### 4.5 安全、环保和军、民两用

安全、环保是烟火药发展的永恒主题。“十一五”期间南京理工大学研究了水雾光电干扰剂,结果表明

水雾遮蔽干扰剂是一种较为理想的安全、环保的遮蔽干扰剂,其消光性能如图 6 所示。

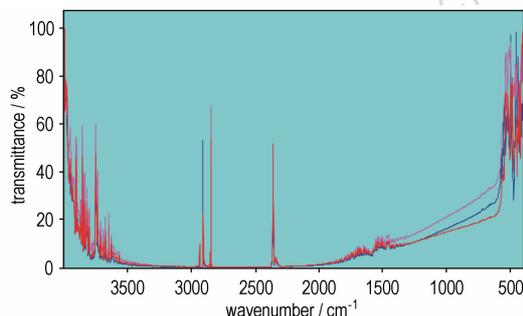


图 6 安全、环保的水雾遮蔽干扰剂透射光谱图

Fig. 6 Transmission spectra of safe and environment-friendly water mist masking agent

军、民两用在于营造烟火药发展的空间。我们可以利用发烟烟火药技术原理研究出烟火灭火气溶胶,既可以军用亦可民用,其烟火灭火效率是哈龙的 3 倍,其最大特点可绕过障碍物以全淹没的方式灭火且不导电、经济性好。我们还可以利用熔融金属烟火遇到冷水产生蒸汽爆炸现象,制造出的液体爆炸装置,既军用亦可制造一种新型工程爆破器材,用于水下爆破。

## 5 结 语

烟火药的研究是建立在固态化学理论、界面化学物理、材料学、光谱学、电磁理论、气溶胶物理、传热学、计算机科学等基础学科之上,除需要研究其化学特性外,还需研究其导电、导磁、半导体与超导效应、等离子体效应、导热、能量的辐射及吸收、散射、反射、转移等效能,其应用研究涉及到弹药工程、光电电子技术、红外、激光、微波、光电制导与对抗等。目前,烟火药军需民用甚为活跃。军用上传统的烟火器材(燃烧弹、照明弹、曳光弹、信号弹、烟幕弹等)不断推陈出新,新概念烟火药(红外照明剂、脉冲信号剂、红外诱饵剂、干扰烟幕剂、准合金燃烧剂、弹丸增程底部排气剂、软杀伤烟火剂等)层出不穷,特别是电子战将烟火推向了光电对抗高技术行列,还被用于外层空间飞行器的隐身干扰和下水水声对抗反鱼雷等。民用上,烟火应用日趋广泛,如超纯金属冶炼、焊接切割、无声近人爆破、杀虫与植物催长、人工降雨、反恐驱暴、发电、灭火、电影摄制、烟花爆竹等。此外,还用于空间飞行器的点火、级间分离、姿态调整、目标指示等宇宙空间探索。由此可见,烟火药的创新与发展空间较大,创新与发展势在必行。

## 参考文献:

- [1] 国防科工委情报研究所. 外军武器装备现状与发展趋势[M]. 北京: 解放军出版社, 1984.
- [2] 潘功配. 高等烟火学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005.
- [3] 付伟, 侯振宇. 红外干扰弹的干扰机理与战术应用[J]. 激光与红外, 2000, 30(3): 171-174.  
FU Wei, HOU Zhen-yu. Operation principle of IR decoy[J]. *Laser & Infrared*, 2000, 30(3): 171-174.
- [4] Krone, Uwe, Moller, et al. Pyrotechnic smoke composition for camouflage purposes: UP5656794[P], 1997.
- [5] Blunt R M. Thoughts on pyrotechnics[C]//Proceedings of The 7th International Pyrotechnics Seminar, Chicago. IIT Research Institute, 1980.
- [6] 陈昕, 潘功配, 曹传新, 等. 金属化轻质基体制备微波干扰材料的性能研究[C]//第十四届光电对抗与无源干扰学术年会论文集, 济南. 2006.
- [7] ZHAO Jun, PAN Gong-pei, CHEN Xin. A novel potential medium of broadband PPECM: Aqueous foam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 394-397.
- [8] 潘功配. A型红外隐身外照明剂技术[R]. GF报告, 2001.
- [9] 欧阳的华, 潘功配, 关华, 等. 具有脉动燃烧效应的烟火药水下燃烧声频特性[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 603-605.  
OUYANG Di-hua, PAN Gong-pei, GUAN Hua, et al. Experimental study on acoustic frequency property of pulsating combustion underwater for pyrotechnic composition [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 603-605.
- [10] 潘功配. 固体化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2009.
- [11] 潘功配, 戴跃伟. 烟火编码信息指控技术[C]//中国工程院科技论坛第56场兵器科技创新论坛论文集, 北京. 2006: 166-169.
- [12] 陈宁, 潘功配, 陈厚和, 等. 真空和微重力下烟幕粒子的动力学特性研究[J]. 空间科学学报, 2006, 26(1): 43-47.  
CHEN Ning, PAN Gong-pei, CHEN Hou-he, et al. Study on dynamics property of smoke particles in vacuum and microgravity [J]. *Chin J Space Sci*, 2006, 26(1): 43-47.
- [13] 张丙辰. 国外军用烟火技术研究动态[J]. 火工品, 1994(1): 38-42.
- [14] 王玄玉, 潘功配, 何艳兰. 几种纳米氧化铝的红外消光性能研究[J]. 含能材料, 2005, 13(5): 312-315.  
WANG Xuan-yu, PAN Gong-pei, HE Yan-lan. Infrared extinction characteristic of nanometer aluminum [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(5): 312-315.

## Innovation and Development of Pyrotechnic Composition

## PAN Gong-pei

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Pyrotechnic composition is a kind of propellants and explosives. The development of pyrotechnic composition in China has endured long history, as a breakthrough, it is used in the high-tech war against for passive optical interference in the late 20th century, then the new phase of theoretical research and technological innovation is emerging in the 21st century. New infrared illuminants, pyrotechnic pulse signal agents, sonar decoy agents, extended-range projectiles at the bottom of the exhaust agents, light radiation blind interference pyrotechnics, put out the burning or deflagration of the pyrotechnic soft kill, "cold" pyrotechnics, minimum smoke/smokeless pyrotechnic agent have distinctive characteristics of innovation and development. The breakthrough of the theoretical study on pyrotechnics, technology concept updates, the expansion of applied research fields, new research highlights the principle of new materials, new technology and safety and environmental protection and dual-use were embodied in the formulation design are the developing directions of pyrotechnics in the future.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; pyrotechnic composition; innovation; development

**CLC number:** TJ5; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.001