

新世纪理工系列教材

高等烟火学

潘功配 编著

NEW CENTURY

哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

新世纪理工系列教材

高等烟火学

潘功配 编著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本专著共 12 章;第 1 章绪论,第 2 章烟火药的类别、组成与配方设计计算,第 3 章烟火化学,第 4 章烟火固体化学,第 5 章烟火药的燃烧,第 6~9 章分别介绍了烟火的光、烟、热、声响等特种效应的应用、机理与数值模拟,第 10 章花炮,第 11 章新概念烟火技术及应用,第 12 章烟火安全。

本书可作为高等院校兵器科学与技术、军事化学与烟火技术以及含能材料、应用化学等专业研究生教材,亦可作为从事烟火与特种弹药及火工品生产科研的工程技术人员参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

高等烟火学/潘功配编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007

ISBN 978 - 7 - 81073 - 673 - 2

I . 高… II . 潘… III . 高等 - 烟火学 IV . V439

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 095887 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 21.75
字 数 386 千字
版 次 2007 年 10 月第 2 版
印 次 2007 年 10 月第 2 次印刷
定 价 36.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

提起烟火,人们了解最多的是过年过节小孩子燃放的烟花爆竹这些玩艺儿。其实,这只是烟火之一斑,烟火的内涵很丰富。

自从盘古开天地,三皇五帝到如今,烟火在人类历史进程中始终洋溢着技术活力而经久不衰。它与时代发展同步,它与科技发展同行。特别是近几十年来,军需民用,一派生机盎然。在军事上,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。特别是高科技电子战光电对抗,将烟火技术应用推向了光电对抗高技术的领域,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。除此之外,军事上烟火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。在民用上,烟火技术应用日趋广泛,如工业上的超纯金属冶炼、焊接与切割等,农业上的杀虫、灭鼠、植物催长与人工降雨等,交通运输业的航海求救信号和铁路、高速公路烟火信号等,建筑业的无声近人爆破等,体育卫生业的发令纸、氧气烛、自热食品罐头等,以及烟火发电、烟火灭火、电影摄制和娱乐烟花爆竹等。除此之外,烟火越来越广泛地用于宇宙空间探索,如阿波罗飞船所用的烟火元件为 218 件,航天飞机升至 500 余件,而近年来空间探索飞行器的火箭发射、级间分离、姿态调整、返回地球等方面,已增至 600 余件。

烟火绝对是门科学,是介于化学和物理学之间的与众多学科知识交叉的一门科学。烟火所研究的主题内容是烟火药及其在燃烧或爆炸化学反应中的光、色、声、烟、热等烟火特种效应与应用。遗憾的是烟火理论研究落后于技术发展,其原因是多方面的,但其中之一是文献资料的匮乏。本专著写作的目的,一方面是解决烟火专业教材的缺乏,抛砖引玉,推进烟火学的发展;另一方面试图逐步提高烟火理论水平。因此,写作上就烟火化学原理、烟火反应机理和数值模拟等理论内容加大了篇幅。

限于水平、经验和篇幅,本书有很多的不足,其缺点、错误以及不尽如意之处在所难免,敬请学术界前辈、同行和广大读者赐教指正。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 烟火发展简史	1
1.2 高技术与现代烟火学	3
1.3 电子战与烟火光电对抗	4
1.4 烟火学面临的问题与发展动向	7
第 2 章 烟火药的类别、组成与配方设计计算	11
2.1 烟火药的类别	11
2.2 烟火药的组成	13
2.3 烟火药的配方设计计算	20
第 3 章 烟火化学	29
3.1 元素化学	29
3.2 电子传递反应	38
3.3 烟火热化学与热力学	42
3.4 烟火反应速率与活化能	50
第 4 章 烟火固体化学	52
4.1 固体化学与烟火学	52
4.2 烟火药固相反应特征	54
4.3 烟火药固相反应遵循的原则和规律	55
4.4 S-KClO ₃ 烟火药反应机理	57
第 5 章 烟火药的燃烧	61
5.1 烟火药的燃烧形态	61
5.2 金属可燃剂的燃烧特性	63
5.3 烟火药的燃烧理论模型	66
5.4 烟火药燃烧反应平衡产物的计算	71
第 6 章 光	83
6.1 烟火光与色的原理	83
6.2 产生光效应的烟火药	93
6.3 发光烟火药的光辐射机理及其数值模拟	109
第 7 章 烟雾	129
7.1 发烟剂及其类别	129
7.2 烟幕消光理论模型	138



7.3 辐射在烟幕中的传输	167
7.4 抗红外发烟剂研究	182
7.5 抗毫米波发烟剂研究	199
第8章 热	212
8.1 燃烧剂及其类别	212
8.2 金属燃烧剂对木质弹药箱纵火的基本理论	224
8.3 点火药	233
8.4 点火时间方程	239
8.5 点火性能模拟	242
第9章 声响	246
9.1 烟火药的声响效应	246
9.2 烟火啸声剂的声响性能研究	249
9.3 烟火声响器材	251
第10章 花炮	254
10.1 花炮概述	254
10.2 黑火药的烟火效应和配方选择	268
10.3 礼花弹的类别及设计计算与弹道	272
第11章 新概念烟火技术及应用	288
11.1 烟火底排增程技术及应用	288
11.2 烟火灭火技术及应用	301
11.3 烟火人工防雹降雨技术及应用	306
11.4 宇宙探索烟火技术及应用	309
11.5 其它新概念烟火技术及应用	314
第12章 安全	321
12.1 烟火安全	321
12.2 含 $KClO_3$ 烟火药的安全性	322
12.3 烟火药危险性的评价与分类	326
12.4 安全管理	331
参考文献	337

第 1 章 绪 论

中国是世界烟火技术的故乡,烟火在中国的发展由来已久,源远流长。

1.1 烟火发展简史

早在公元前 8 世纪的周朝,中国就有了“狼烟”烽火台,古人以狼粪燃烧生烟传递军事信号。周末(公元前 500 年)时《孙子兵法》就著有“火攻篇”。汉末三国战争,有著名的“火烧赤壁”。公元 227 年,魏、蜀交战时已使用了“火箭”,当时的火箭是将草艾、麻布浸渍上油料缚于箭上用弓射出。不过那时的烟火还只是一种“烟”和“火”的技术应用,它是直接应用自然界的可燃物质借空气中氧的燃烧来获得某种烟火效应的,并没有构成一种自供氧(即利用氧化剂)体系的类似当今的烟火药剂。

随生命科学发展对医药的需求,古代帝王为了长生不老而寻求灵丹妙药,古人在炼丹的过程中导致了黑火药在我国的发明。黑火药是具有自供氧体系的最初的烟火药剂,也是最初的炸药和火药,它的问世揭开了烟火学的发展序幕。

最初的黑火药是仅含两种成分的混合物,由可燃物质硫磺和自供氧氧化剂硝石混合制成。《丹经内伏硫磺法》即提到用“硫磺二两(62.5 g),硝石二两(62.5 g)”研成粉末,并放在锅里炒。文字记载的最早火药配方是唐宪宗元和三年(公元 808 年)清虚子在《铅汞甲庚至宝集成》提到的“伏火矾法”：“硫二两(62.5 g)、硝二两(62.5 g)、马兜铃三钱半(7 g)”,此时火药的组分已发展到了三元。唐宣宗大中四年(公元 850 年)《真元妙道要略》记载了火药配方的研究情况：“以硫磺、雄黄(As_2S_3) 合硝石并蜜,烧之焰起,燃面及烬屋宇者。”此后,火药的性能逐渐被人们认识,配方也不断地完善。古代我国民间流传最广的黑火药配方是“一硝二磺三木炭”,即 1 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 76 : 10 : 14,与当今黑火药标准配方 75 : 10 : 15 基本一致。

黑火药发明后,于 9 世纪起用于战争。最初的目的是用来纵火、灼伤和发生毒烟,其后发展用于爆炸,进而用作发射。宋、元、明、清时期用黑火药制造的各种火药兵器在战场上应用已相当广泛。有史记载的黑火药用于战争的是唐哀帝天德年间(公元 904 年),郑燧攻打豫章(今江西南昌)时使用“发机飞火”(是用黑火药作燃烧剂的火药兵器),火烧龙沙门。

到宋代(公元 960 ~ 1279 年)火药兵器发展规模宏大,拥有四万工人的军工作坊十个,能生产各种火药兵器。《武经总要》(公元 1044 年)详细记载了“毒药烟珠”、“蒺藜火球”和“火炮”三种燃烧性兵器的火药配方。“毒药烟球”是毒气弹的雏型,在黑火药配方中添加了巴豆、砒霜等



毒物,燃烧后成烟四散,使敌兵中毒。“蒺藜火球”是装有尖刺蒺藜的火药包,火药作用后铁蒺藜飞散出来,铺于路面,阻塞敌骑兵前进。“火炮”是用于攻城的燃烧弹。

北宋末年(公元1126年)，“霹雳炮”、“震天雷”一类的爆炸性火药兵器出现,黑火药已开始用于爆炸。此后管形火器“火枪”(公元1132年)和“突火枪”(公元1259年)被发明,黑火药又开始用于发射。金人曾用“突火枪”守城,它除了能喷火烧人外,其内加有铁粉,能产生“火花”,使人眼迷盲。

元朝(公元1332年),创造了金属的管形火器——铜火铳(现保存在北京的中国历史博物馆内),是世界上使用黑火药来发射弹丸的最古老的火炮。

至此,最初的烟火药——黑火药被发展为燃烧性兵器中的燃烧剂、爆炸性兵器中的炸药和引线装药及火炮的发射药。

黑火药导致了火药兵器的出现,推动了烟火技术的发展。明朝(公元1368~1644年),出现了“五里雾”、“神烟”、“五色烟”等古代的烟幕剂和彩色发烟剂,这已不是单纯黑火药的配方,而发展为应用更广泛的烟火药配方了。明代茅元仪《武备志》(公元1621年)记载了各种火药与烟火药的配方及其制法和效能。其中提到制线火药、烈火药、飞火药、火信、炮火药、杂药、慢药,以及烟幕剂、燃烧剂、信号剂等。并叙及到“五里雾”的配方及燃放方法,“硝石一百斤,硫磺一百斤,炭五十斤、松香三十斤、砒石(As_2S_3)五斤”,另加木屑、鸡粪等添加剂和粘合剂;遇敌军时,士兵卧倒地上,在上风处用引线点着即成霾雾,朦蔽五里,造成敌军在雾中自相践踏。

黑火药用于民间娱乐烟火滞后于军事。

娱乐烟火,包括爆竹和烟花。爆竹,现称炮竹或鞭炮。最初的爆竹为带节的竹竿,以火烧之而产生爆裂声响。黑火药发明后将之装入竹筒内,并用火线引燃,则成为名副其实的“爆竹”。随着造纸工业出现,竹筒改为纸筒。将很多小爆竹用药线串编在一起,即成了今日的鞭炮。烟花,又称焰火、花炮,它是继黑火药应用于军事之后而兴起的。南宋孝宗(公元1163~1189年)年间,宫廷常放烟花娱乐。宋理宗初年上元日,理宗和太后在庭中观赏烟花,“地老鼠”喷火窜至太后座下,太后惊惶而走。南宋周密《武林旧事》中记载着首都临安(今杭州)宫廷中燃放烟花盛况:“午后,修内司排办晚筵于庆瑞殿,用烟火,进市食,赏灯……”“官漏既深,始宜放烟花百余架,于是乐声四起……”明朝(公元1368~1644年)娱乐烟火发展到了相当高的水平。《金瓶梅》小说描绘了一二丈高的“木架烟火”,内部用药线连接,可连续燃放几个小时,能出现各色灯火、流星、爆仗等,还有重重帷幕下降,出现亭台楼阁等布景。清朝末年,慈禧太后嗜好娱乐烟火尤甚,新春正月,内苑炮竹烟花御用,以数十万金计。李鸿章进献大型烟花一盒,价值六万金。

13世纪我国的黑火药及烟火技术由丝绸之路经阿拉伯传到了欧洲各国。公元1543年又由海上传到了日本。

1786年法国化学家贝塞利特(Berthollet)发现了氯酸钾,烟火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,此后镨、钡、铜等及其化合物出现,烟火迈入了一个五彩缤纷的新时代。



19世纪,越来越多的烟火器材或装置成为了美国军队一般弹药的补给品。1849年的美国军械手册就记载有烟火信号、发光火炬、纵火火绳和其它照明装置,以及燃烧火球等烟火器材。

20世纪初,烟火发展的一个重要应用是曳光弹的出现,它能指示小型自动武器对快速移动目标进行有效射击。1906年德国海军首次应用化学遮蔽烟幕成功地进行了舰队调动。1915年德国在英国伦敦首次投掷了燃烧航弹。第一、二次世界大战期间烟火获得了快速发展,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的涌现。

20世纪中后期,烟火又有了突破性发展,被用于高科技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、科索沃战争和伊拉克战争均表明,烟火光电对抗(习惯称之为“无源干扰”,实际上“无源”本身不发出电磁辐射,技术含义是有区别的)能使敌方光电侦察器材迷茫、制导武器失控、观瞄探测失灵、通讯指挥中断。烟火在当今高科技战争中发挥了极其重要的作用。

1.2 高技术与现代烟火学

传统的烟火技术主要是研究常规的烟火药及其器材,如军事上的照明、信号、曳光、烟幕、燃烧等特种弹药以及民用上的烟花爆竹等。随着近代“高技术”的出现,现代烟火学应运而生。

20世纪60年代,在现代科学技术研究成果基础上,信息技术、生物技术、新材料技术、新能源技术、航空与航天技术、海洋开发技术、通信技术、微电子技术、自动化技术、激光与红外技术等迅猛发展,赫然形成了一个前所未有的新技术群——“高技术”。高技术是一个动态的相对意义的概念,它是相对于传统技术而言的一种新兴技术。

“高技术”的出现,改变了人们的时空观。首先在军事上,世界各国无一例外地蜂拥抢占军用高技术至高点,发展自己的高技术武器装备。特别是1983年3月23日美国里根总统提出了星球大战(SDI)计划,引起了世界轰动。一时间世界各国都审时度势,纷纷制定了各自的技术对策和发展战略规划。法国提出了“尤里卡”计划,原西德提出了“EDI”计划,原苏联制定了“东方尤里卡”计划,日本、韩国、印度也作出了相应战略发展计划,都想以最快的速度发展自己的高技术武器装备,抢占21世纪战略优势。

“高技术”在军事上的快速应用与发展,使各式各样的精确制导武器纷纷出现于现代战场,如红外制导导弹、激光制导导弹、巡航导弹、红外/毫米波复合制导导弹等。“高技术”武器使战争的突发性与突变性增大,战争的持续性缩短,作战空间也由陆地、海洋、空中扩展到外层空间。“高技术”使传统的作战模式发生了根本性变化,战争的战术采取了软硬攻击一体化方式,首先使用电子对抗和红外光、激光、光电、声电等“软杀伤”技术手段,使敌方指挥瘫痪、武器失控、通信中断、雷达迷茫,再用精确制导和动能武器实施“硬摧毁”,消灭敌人有生力量。

“高技术”武器装备,由于应用C³I、C⁴IRS系统及“全天候”卫星,实现了“发射后不用管”,且只要发现目标就能自动跟踪目标,一旦跟踪目标,就能击毁目标。面对这种格局的战争,一定



意义上是取决于战场目标不被发现的概率,或被发现而不被命中的机率。因此,“高技术”战争迫切需求电子战光电对抗技术装备和自防御的隐身干扰手段。此时此刻,古老的烟火技术发展遇到了契机,它能有效地对“高技术”的光电制导武器实现光电对抗与隐身干扰。

“高技术”的显著特征是多学科知识与技术相互融合,各学科间又有机地横向渗透、相互交错与综合。显然卷入到高技术浪潮中的烟火学除军事上外,还融合、渗透、交错于航天航空、宇宙空间探索、工农业生产、交通运输等领域中。如目前航天飞机上就使用了五百余种烟火元件,工业上采用烟火冶炼超纯金属,农业上利用烟火进行人工降雨,交通运输业上的烟火信号和汽车安全气囊等。高技术的确使得古老的烟火技术又洋溢出了青春的活力。有人把烟火比作是一棵稀世高龄的古树,高技术的春风雨露又使它发出了新芽,确信它必将再度枝繁叶茂,结出丰硕之果。

“高技术”促进现代烟火学在军事上的发展主要体现在,它使得传统的烟火及特种弹药不断地推陈出新,如照明弹药由供人眼用的可见光照明弹发展为供高技术战场夜战夜视器材用的红外照明弹;遮蔽目标的烟幕弹药由遮蔽可见光发展为遮蔽、干扰红外光、激光和毫米波;曳光弹药由可见光曳光发展为红外曳光等。“高技术”使得新原理、新技术、新应用的特种弹药涌现,如各类烟火无源干扰弹、电视侦察弹、石墨弹、声弹、光弹、温压弹、油气炸弹、电磁脉冲弹、底排增程弹、反器材特种弹、反机动特种弹等。“高技术”使得新概念烟火药剂纷纷出现,如红外照明剂、脉冲信号剂、红外诱饵剂、干扰烟幕剂、准合金燃烧剂、弹丸增程底排剂、软杀伤用金属脆化剂、强光致盲烟火剂、迷盲腐蚀烟火剂、熄燃或爆燃气溶胶等。

“高技术”还促进了烟花工业有了概念上的突破,如烟花科技工作者正在开发研制“高技术”的冷光烟花、无烟环保烟花和电子烟花等;还在创新研制纳米烟花、稀土烟花等。

由此可见,“高技术”使传统的烟火技术发展为现代烟火科学。“高技术”使得烟火学研究的领域更为广泛与深入。

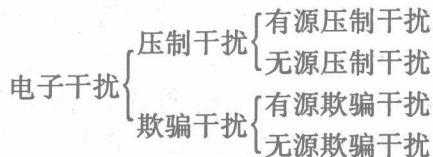
由此说明,席卷于高技术浪潮之中的现代烟火学是一门与众多学科相互融合、渗透、交错和综合的学科。现代烟火学研究建立在新材料学、辐射度学、光谱学、电磁理论、气溶胶物理、传热学、色度学、大气物理等基础学科之上,它已深入至现代光电子技术及红外、激光、微波等现代光电制导武器和光电对抗高技术领域。现代烟火学所研究的烟火药已成为一种特殊的含能材料,除需要研究其化学特性外,还需研究其导电、导磁、半导体与超导效应、等离子体效应、导热、能量的辐射及吸收、散射、反射、转移等效能。现代烟火学的发展已涉足于固态化学理论、界面化学物理、纳米材料技术等。

1.3 电子战与烟火光电对抗

电子战是敌对双方利用“高技术”的电子设备进行电磁频谱的战斗。它包括电子侦察(支援侦察、情报侦察)、电子攻击(压制干扰、欺骗干扰、反辐射武器、定向能)和电子防护(抗干

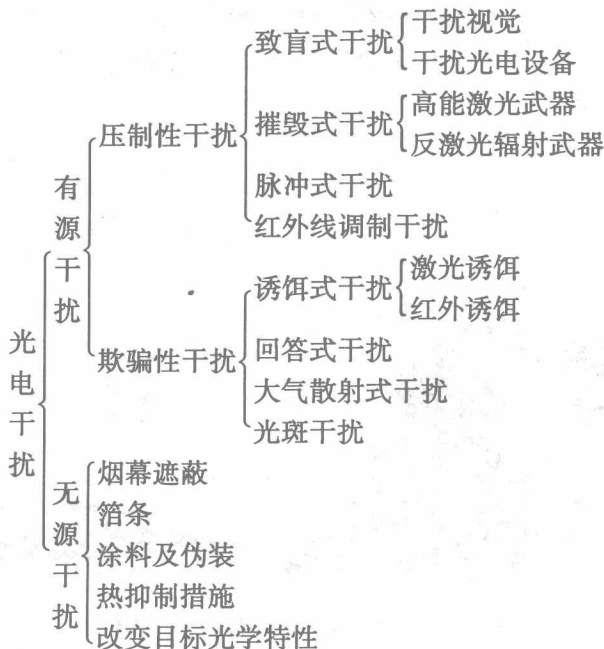


扰、反侦察、抗反辐射摧毁、电磁加固)。通常所说的电子攻击是指电子干扰,它有四种基本类型:



其中无源压制干扰、无源欺骗干扰及部分有源欺骗干扰(如红外诱饵)正是烟火技术发挥作用的属地。

光波是电磁波的一种,光波的频率远远高于一般雷达的工作频率。随着现代光学与电子学综合技术的发展,光电武器装备日趋增多,电子战光电对抗日趋激烈。光电对抗有如下的形式:



电子战光电对抗所使用的红外诱饵弹、烟雾弹、箔条弹、激光致盲弹等光电干扰装备,能有效地使敌方的光电制导武器失控、失灵或失效,因此,烟火光电对抗在高科技战争中占据了重要地位。越南战争、中东战争、英阿马岛之战、海湾战争、科索沃战争和伊拉克战争都充分显示出了现代烟火光电对抗的威力和发展前景。1972年春,越南使用苏制萨姆-7红外制导导弹对付美国飞机,头三个月内就击落美机24架,可当美国人使用红外诱饵弹时,萨姆-7对美机就失去了原有效能。同年,美军飞机在越南两小时内用20枚激光制导炸弹摧毁了17座桥梁。后来越南人使用了烟幕,美机轰炸河内富安电厂时,投下几十枚激光制导炸弹无一命中目标,仅有一枚落在围墙附近。1973年中东“赎罪日战争”,以色列使用从美国人手中得到的红外诱饵弹、



箔条弹,使埃及发射的大量苏制导弹引爆,苏伊士运河制空权再度被以色列夺取。同年,以色列与叙利亚在海上交战,结果叙方 50 枚反舰导弹又因以色列施放红外、箔条干扰弹而无一命中。1982 年英阿马岛之战,阿在未装备红外、箔条干扰弹的情况下被英军 27 枚“响尾蛇”击落了 24 架飞机,而在 5 月 25 日海战中,英“无敌号”却以红外、箔条干扰弹对付阿的两枚“飞鱼”导弹,结果一枚坠海,另一枚被引偏而击中了“大西洋运输者号”商船。海湾战争爆发后,多国部队飞机曾多次施放红外干扰弹,成功地避开了伊拉克地 - 空红外导弹攻击;施放大量箔条干扰剂,使得伊军通讯指挥一片混乱。

烟火光电对抗,是一项利用烟火药的光、声、烟、热及其电磁效应来对高技术的光电制导武器和观瞄探测器材,实施诱骗迷惑、隐身遮蔽干扰和软杀伤破坏的新概念烟火技术。现有的技术内涵包括诱饵(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)、烟幕(燃烧型和非燃烧型人工气溶胶和镀覆纤维毫米波干扰材料等)、软杀伤烟火(强光致盲烟火剂、腐蚀性气溶胶、熄燃或爆燃烟火剂、超级粘滞剂和润滑剂、石墨弹等)。烟火光电对抗战术应用原理如图 1-1 所示。



图 1-1 烟火光电对抗的战术应用原理

- 1—电磁波;2—箔条云;3—机载红外诱饵弹;4—舰载红外诱饵;
5—近程隐身干扰烟幕;6—远程遮蔽烟幕

烟火光电对抗干扰弹药已成为世界各国海、陆、空三军“必不可少”的装备。中东战争结束后的 1976 年,美国即成立了“烟幕局”,投入巨资以极快速度开发研制装备了多品种的光电对抗干扰弹药,诸如箔条弹、红外诱饵弹和烟幕弹等。西方其它国家紧随美国之后亦掀起了光电对抗干扰弹药研究热潮,其后,世界范围内各式各样的烟火光电对抗干扰弹药和器材或被研制、或被装备,紧接着,新概念的干扰弹药与器材纷纷涌现,如红外照明弹、碳纤维干扰弹、光弹、声弹,及发动机失能的烟火熄燃与爆燃弹、交通封锁弹等。



1.4 烟火学面临的问题与发展动向

1.4.1 面临的问题

如上所述,现代烟火学已融合、渗透、交错和综合于“高技术”行列中,但是其面临的问题亦很多。目前面临的突出问题是烟火理论落后于技术发展。

从化学的角度来说,烟火学研究的主题内容是烟火药。一提到烟火药配方研究,首先遇到的问题是原材料特性,即原材料自身的或其反应后产物的化学性质及其导电、导磁、导热、半导体与超导、能量辐射及吸收、散射、转换等物理特性;其次是化学反应问题,涉及到固态化学、界面化学物理、燃烧与爆炸、高温化学等基础理论;再次是配方应用问题,配方应用与红外、激光、微波等光电技术和弹药工程、航空航天、交通运输、工农业生产诸多领域技术相关。然而,烟火配方研究目前更多的仍是依赖于经验,而不是理论预测。一个配方的设计,首先是原材料的选择是否得当,是选“化学纯”还是“分析纯”,杂质是否有必要,目前并没有人能说得清楚。人们只知道材料性质与反应性密切相关,但反应过程是怎样的,影响反应过程的因素有哪些,真正的反应产物是什么,现阶段也很难有人将其说清楚。绝大部分的烟火反应产生火焰,那么火焰结构是怎样的,火焰成分是什么,火焰中每一个质点(气体或粒子)的速率变化与温度场的分布到底和火焰的哪些性质关联,人们也研究得很少。此外,为了解决配方的性能标准和安全问题,亟待有这方面的理论指导。否则弄不明白是试验结果有问题,还是指标规定得不合理。某些药剂敏感度高,原因何在,能首先从理论上予以解释吗?烟火理论发展的重要性实在是不言而喻的。假如我们搞配方试验研究,仍然是沿袭古老的尝试方法,有人统计过,用67种可燃剂和60种氧化剂配成二元混合物或三元混合物分别有4020种或25000种,若一星期试验一种混合物配方,试验完二元混合物需80年,试验完三元混合物需5000年以上。这与一个人的寿命相比简直是不寒而栗。由此可见,发展烟火理论,用理论来指导和预测配方试验的意义极其重大。

1.4.2 理论研究的现状

烟火理论研究目前已提出了界面化学物理、固态反应、光谱、气溶胶(烟幕)理论和烟火反应统计物理学等课题。

1. 烟火反应界面化学物理

由氧化剂、可燃剂等组成的烟火药,相与相之间构成多个界面,这些界面处的分子与内部分子所处环境不同,因此性质亦不同。当大块铝晶体被研磨成碎片时,反应性提高了,这就与界面化学物理作用有关。研磨使晶体产生了新的棱、角及表面,界面部位的原子配位数低于其饱和值,原子间结合力不如内部分子强,故反应性增强了。混合药剂点火反应实际上是发生在混合物粒子之间的界面上,与配方组分之间的界面反应动力学相关。由Al和 Cu_2O 构成的混合物



存在有两个界面区,点火反应就发生在 Al 和 Cu_2O 两种混合物粒子之间的活性界面上。延期药在贮存过程中燃速和延期精度的变化是与其氧化剂和可燃剂之间的界面作用有关,当界面作用达至“动平衡”后,延期精度才会稳定下来。

2. 固态反应

烟火药多数是由数种固体粉状物质构成的固态混合物。固态物质间的反应由来已久:穴居时代的陶瓷制造及其彩陶的烧制;青铜器的熔合、热处理和淬火;黑火药混合、密实与造粒;石灰石的开采、破碎与煅烧等。固体之间能起反应,且其反应按指数规律进行。由晶体组成的固体其晶体是非完美性的,是有缺陷的,它们促成了固体间的反应。固体反应性如何提高或降低,怎样才能人为地控制住这些反应,这正是烟火药固态反应面临的问题。

3. 光谱

烟火药的光、色、烟效应理论基础之一是烟火光谱学。广泛开展烟火材料及其配方药剂的光谱特性研究,建立起光谱数据库,是极其重要的。由光谱数据和分子结构参数即可计算药剂的标准熵、自由能状态函数的变化量,继而就能预测药剂各组元间的化学反应过程,并推断出所期望的烟火效应能否实现。干扰烟火剂的光谱特性与被干扰的光电观瞄器材和制导武器光谱特性的一致性,是获得有效干扰效果的基本保证。

4. 气溶胶(烟幕)理论

传统的气溶胶(烟幕)能遮蔽可见光,但要发展一种能遮蔽干扰红外、激光和毫米波的所谓“全波段”气溶胶(烟幕),现有概念和理论模型已不适用。气溶胶微粒从零点几微米增加至几十微米,其光学常数(折射率实部和虚部)都有很大变化,用单一的瑞利或米氏散射模型计算已不能满足要求,因此,气溶胶(烟幕)理论亟待发展。

5. 烟火反应的统计物理学

有关烟火药的化学反应速率过去一直使用阿仑尼乌斯公式 $k = A e^{-E_a/RT}$,它对烟火药点火反应研究起过重要作用,由于该公式仅适用于基元反应,同时活化能 E 的实验测定很难测准,作为非基元反应的烟火药在实际应用阿氏公式时是困难的。为此,一些学者提出借助统计物理学,首先构造出大量分子体系的微观分子运动模型,然后利用求微观量统计平均值的方法,推断整个体系的宏观量值。

1.4.3 技术发展的动向

随着烟火学的发展和高新技术相互渗透,应该说近十几年来烟火技术也在发生着日新月异的变化。新概念、新原理、新应用层出不穷。当今的烟火研究出现了前所未有的新局面。1991年第16届国际烟火讨论会上,Douda B E报告了中、美、俄、英、法等14个国家25个研究部门的研究近况,突出地反映出了烟火应用与人类生存环境保护与安全问题,以及新药剂、新工艺、新设备和新应用等状况。

1. 烟火器材的环境卫生与安全



这涉及到人类自然环境和生态平衡保护问题。各国正投入财力、人力大力开展研究。为解决烟火器材的环境卫生,已开展了对重金属、六价元素和战地发烟剂与气溶胶的毒性鉴定。正在研究取代延期药中铬酸盐和寻找六氯乙烷发烟剂的代用品。为了减少烟火药销毁时的污染问题,美国洛斯阿拉莫斯研究所建立起了“销毁烟火药用控制空气焚烧炉”。对于含红磷的药剂销毁先采用空气焚烧,然后用水吸收放出的气体来制成化肥,残余物用于制造水泥。为了提高烟火器材的安全,各国都在致力于“钝感烟火药”研究。

2. 新药剂

一种无毒烟幕剂在德国开展研究。它由15%的镁、30%的硝酸钾、15%的硝酸钙、32%的氯酸钾和8%的偶氮二酚胺所组成,对人和动物不产生毒害作用,不污染环境,对植物尚能提供养分。美国正在开展可反应金属混合物研究。以锆、铝、钨、钛、石墨、硼等金属的二元或三元混合物为基本组分的可反应金属混合物,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。日本研究了15种所谓的“负混合物”新概念烟火药剂,使用镁作为氧受体和水作为氧给体。其中一种用于海上求救信号的发光剂,用水作氧给体的“负混合物”配方为95%镁,5%冰晶石(Na_3AlF_6)。

3. 新工艺与新设备

英国正在研究用气相淀积法制造烟火制品。已有两种不同的制造方法:一种是在聚四氟乙烯片上连续淀积镁,另一种是采用像制造印刷线路板那样的工艺淀积多层材料。为了获得均匀的混合物,也为了安全制造,美国研制了混合、造粒和干燥用的多用途流化床设备。它的混合、加粘剂、干燥、滤气排污和卸出物料可自动遥控完成。混合方式是,气流使物料上升、翻滚、卷折,接着物料作 360° 旋转运动,整个混合、造粒、干燥直至卸料时间一般约23 min。美国聚硫橡胶公司制造了双螺杆挤压机,用于加工红外诱饵剂。它是一种组合筒式结构,挤压机筒中有3个调温区,模头中有4个调温区,调温区温度由泵压热水加热器控制。美国还研制了一种加工硼与硝酸钾混合的盘式造粒机。

4. 新应用

为了研究大气物理,俄罗斯已研究出能产生人造发光和电离云的烟火系统。它能形成具有长时间连续或断续踪迹的环形云(一片或数片)。利用烟火药燃烧产生氮气技术,俄罗斯正在研制新型烟火灭火剂。澳大利亚研制了一种铝热剂切割炬和目测水雷发火指示器。烟火激光点火是一种不爆炸的非电点火方法,抗电、热干扰能力强。美国正在鉴定用二极管激光器和气体激光器点燃铝/高氯酸钾、硼/硝酸钾和低氢化钛/高氯酸钾之类烟火药。有关抗红外烟幕剂、红外诱饵剂和新型无源干扰材料等在很多国家均广泛开展。一种用于对付先进红外威胁的改进型诱饵装置研究正在美国进行。

5. 其它

相当多的课题研究目的是解决一些特殊用途技术。例如,研究和改进笛音剂、硼/硝酸钾燃烧机理、烟火药的瞬变燃烧等,以及烟火药的变质和安定性研究、烟火药组分涂覆技术、骚乱



控制烟火器材研究、训练模拟器材研究、氢气烧尽点火器研究等。

电子战将对现代高技术战争产生重大影响。烟火光电对抗成为电子战光电对抗重要手段之一。

烟火光电对抗,除已出现的对抗红外、激光、微波的诱饵和烟幕外,尚包括利用烟火效应产生的“软杀伤”类技术。例如迷盲腐蚀燃烧剂,它是一种含有无机氧化物及易燃有机聚合物(聚酯、聚苯乙烯、聚醋酸乙烯酯或丁二烯共聚物等)的粘性燃烧材料。这种燃烧材料引燃后将释放出氟化氢和氟气,对光学玻璃有强烈腐蚀作用,可用于破坏战场光电观瞄的光学瞄准镜头。又例如,利用含有镁、铝等金属粉的烟火剂使之速燃,形成巨大声响和强烈闪光,使战斗人员在短时间内眩晕和失明。一种能产生极亮的宽带脉冲光辐射器材,不仅使战斗人员短时间失去战斗力,而且可使夜视仪、热像仪及导弹的光电敏感件器烧毁、受损或失效。还比如,一种熄燃或爆燃的气溶胶,在低空撒布成一片云层时,可以使飞近的直升机发动机熄灭或爆燃毁伤,在近地面上撒布时,可以使坦克等装甲车辆动力系统瘫痪。

烟火光电对抗技术成为当今烟火学发展的侧重点。烟火光电对抗技术研究的目的解决干扰剂的干扰机理与模型,不同电磁波谱的干扰材料(药剂)的制取、性能测试与科学评价。

面向太空战场,人们已研究了烟火材料在太空环境中的应用。真空、微重力条件下的烟火干扰材料的消光性能和动力学特性,成为烟火科技工作者关注的研究课题。

面向水下战场,人们正在探索研究水声对抗烟火技术,利用烟火的声效应来对抗水中声呐制导导弹——鱼雷。

民用上,烟火人工降雨、烟火冶炼、烟火发电、烟火灭火等技术的开发研究,对人类物质文明建设必将产生重大意义。

现代烟花融合了其它学科高新技术于一体,已形成了独具风格的花炮文化。

鉴于这些研究的重要性,也由于烟火理论发展需求,研究者在突破应用研究关键技术之时,特别注意获取反应过程中的微观信息。通过借助现代分析技术、测试技术和计算机,一场深入广泛地对烟火反应机理和数值模拟研究工作正在世界各国展开,这必将推动烟火学发展进入一个新的里程碑。

第 2 章 烟火药的类别、组成与配方设计计算

烟火学研究的主题是烟火药。烟火药是一种特殊的含能材料。

2.1 烟火药的类别

按产生出的烟火效应分类,烟火药可分成图 2-1 所示类别。

图中类别的烟火药主要用于制造各种军用的或民用的烟火制品和烟火器材。

照明剂 用于制造照明弹及其它照明器材。如照明枪弹、照明火箭弹、照明炮弹、照明航弹,以及照明跳雷、手持照明火炬和飞机着陆用照明光炬等,供夜间照明用。

闪光照明剂[摄影照明剂] 用于制造闪光照明弹(摄影航弹),供飞机航空摄影或电影摄制。

发光信号剂 军事上用于制造各种信号弹(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。花炮工业用于制造五颜六色的烟花或礼花,供人们娱乐观赏。

曳光剂 用于制造曳光弹,如曳光枪弹、曳光炮弹、穿甲曳光枪弹或炮弹、穿甲燃烧曳光枪弹等。曳光弹在飞行途中留下示踪轨迹,供射手校正射击方向和弹道跟踪用。

红外照明剂 用于制造红外隐身照明弹,供红外夜视仪和微光夜视仪大幅度提高视距用。

红外诱饵剂 用于制造红外诱饵弹。如红外诱饵掷榴弹、迫弹、火箭弹等,对红外制导导弹和红外探测、观瞄实施引诱,迷惑,扰乱等干扰。也可以对红外测角仪三点式制导系统实施致盲干扰。

爆音剂 军事上用于制造教练弹,供训练时模仿枪炮声和各种弹药的爆炸音响。民用上多用于鞭炮、双响炮、礼炮、拉炮、发令纸等,供娱乐和庆典用。

笛音剂 又称哨音剂。军事上用于制造呼啸声模仿训练器材,民用上用于制作笛音娱乐烟花制品。

声响模拟剂 它除具有声响效应外,同时伴随有闪光和烟雾效果,用于制造声、光、烟模拟烟火器材。

发烟剂 军事上用于制造烟幕器材。如烟幕弹、发烟罐、发烟车等,用以产生烟幕。民用上用以农作物防霜冻、杀虫灭鼠,也用于制造娱乐烟花制品。