

化学工程与技术



高等烟火学

潘功配 编著



哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

国防科工委「十五」规划专著



国防科工委“十五”规划专著

高等烟火学

潘功配 编著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社

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,2005

ISBN 7-81073-673-6

I. 高… II. 潘… III. 高等-烟火学 IV. V439

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 095887 号

高等烟火学

潘功配 编著

责任编辑 张彦 宋旭东

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南通大街 145 号 哈尔滨工程大学 11 号楼

发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001

新华书店经销

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:15.5 字数:386千字

2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷 印数:1000册

定价:34.00元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主任:	张华祝			
副主任:	陈一坚	屠森林		
编委:	王文生	王泽山	卢伯英	乔少杰
	刘建业	张华祝	张近乐	张金麟
	杨志宏	杨海成	肖锦清	苏秀华
	辛玖林	陈一坚	陈鹏飞	武博祎
	侯深渊	凌 球	聂 武	谈和平
	屠森林	崔玉祥	崔锐捷	焦清介
	葛小春			



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天器为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改



改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相



关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科



技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



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。

本专著在写作过程中得到了王雪博士、李毅博士后、周遵宁博士、关华博士、朱晨光博士、宋东明博士、陈宁博士、王玄玉博士、赵军博士、陈昕博士、彭志明博士、刘静平硕士、王述剑硕士、于松涛硕士、罗云硕士、林雪梅硕士、杨伟球硕士、凡夕永硕士、程年寿硕士等鼎力相助;周遵宁博士为作者提供了 7.4 节书稿素材;陈宁博士为本书纠正了很多错误,并和罗云硕士一道为本书稿出版付出了大量的辛勤劳动,在此一并表示诚挚的感谢。

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

2004年12月于南京



国防科工委
『十五』
规划专著

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	4
1.3 电子战与烟火光电对抗	7
1.4 烟火学面临的问题与发展动向	10
第 2 章 烟火药的类别、组成与配方设计计算	17
2.1 烟火药的类别	17
2.2 烟火药的组成	20
2.3 烟火药的配方设计计算	28
第 3 章 烟火化学	39
3.1 元素化学	39
3.2 电子传递反应	51
3.3 烟火热化学与热力学	56
3.4 烟火反应速率与活化能	67
第 4 章 烟火固体化学	69
4.1 固体化学与烟火学	69
4.2 烟火药固相反应特征	72
4.3 烟火药固相反应遵循的原则和规律	73
4.4 $S-KClO_3$ 烟火药反应机理	76
第 5 章 烟火药的燃烧	82
5.1 烟火药的燃烧形态	82
5.2 金属可燃剂的燃烧特性	85
5.3 烟火药的燃烧理论模型	90
5.4 烟火药燃烧反应平衡产物的计算	97
第 6 章 光	113
6.1 烟火光与色的原理	113



6.2 产生光效应的烟火药	127
6.3 发光烟火药的光辐射机理及其数值模拟	149
第7章 烟雾	177
7.1 发烟剂及其类别	177
7.2 烟幕消光理论模型	190
7.3 辐射在烟幕中的传输	230
7.4 抗红外发烟剂研究	249
7.5 抗毫米波发烟剂研究	273
第8章 热	292
8.1 燃烧剂及其类别	292
8.2 金属燃烧剂对木质弹药箱纵火的基本理论	310
8.3 点火药	323
8.4 点火时间方程	332
8.5 点火性能模拟	336
第9章 声响	342
9.1 烟火药的声响效应	342
9.2 烟火啸声剂的声响性能研究	346
9.3 烟火声响器材	350
第10章 花炮	354
10.1 花炮概述	354
10.2 黑火药的烟火效应和配方选择	373
10.3 礼花弹的类别及设计计算与弹道	382
第11章 新概念烟火技术及应用	403
11.1 烟火底排增程技术及应用	403
11.2 烟火灭火技术及应用	420
11.3 烟火人工防雹降雨技术及应用	427
11.4 宇宙探索烟火技术及应用	431
11.5 其它新概念烟火技术及应用	438
第12章 安全	448
12.1 烟火安全	448
12.2 含 $KClO_3$ 烟火药的安全性	450



12.3 烟火药危险性的评价与分类	456
12.4 安全管理	463
参考文献	472

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

早在公元前八世纪的周朝,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)，郑燔攻打豫章(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。“毒药烟珠”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花炮。

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