

烟火技术及应用

Pyrotechnics and Application



◎ 常双君 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

烟火技术及应用

常双君 编著

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

烟火技术及应用/常双君编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019. 10

ISBN 978 - 7 - 5682 - 7662 - 7

I. ①烟… II. ①常… III. ①军用器材 - 烟火器材 - 高等学校 - 教材 IV. ①TJ53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 222769 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 20.75

字 数 / 487 千字

版 次 / 2019 年 10 月第 1 版 2019 年 10 月第 1 次印刷

定 价 / 56.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

烟火是指“烟”与“火”的艺术与科学，也是一门被称为烟火学的科学。烟火技术的发展由来已久，源远流长，它与时代发展同步，与科技发展同行。烟火技术是一门与众多学科相互融合、渗透、交错和综合的学科，烟火技术的研究建立在光度学、材料学、固体化学、辐射度学、光谱学、电磁理论、气溶胶物理、燃烧学、色度学、大气物理等基础学科之上，在现代“高技术”迅猛发展的今天，烟火技术在军事上得到了迅速发展和应用，传统的烟火器材不断推陈出新，新概念烟火药层出不穷，特别是高科技电子战中的光电对抗，将烟火技术应用推向了光电对抗高技术的领域，可以有效地对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，军事上烟火技术还被用于外层空间飞行器的隐身干扰和 underwater 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、导轨焊接与切割等，农业上的杀虫、灭鼠、除霜与人工降雨等，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，烟火技术还被广泛应用于宇宙空间探索，如“阿波罗”飞船所用的烟火元器件有 218 件，航天飞机升至 500 余件，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。

本书共有 13 章，主要内容包括绪论、烟火药的组成、烟火药的性质及性能试验、烟火药的配方设计及计算、烟火药的燃烧、烟火技术的理论基础、烟火技术的光效应、烟火技术的热效应、烟幕遮蔽效应、黑火药和延期药制造、烟火药制备工艺、烟火药配方的性能评估、烟火技术在工农业生产中的应用等。

本书在编写过程中参考了大量已公开出版的文献资料，对相关内容进行了整理分类，在此对文献作者表示衷心感谢。

由于作者自身学术水平、经验有限，本书有诸多不足之处，敬请学术界前辈、同行和学生批评指正，多提宝贵意见。

作者

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001
1.1 烟火技术发展概况	001
1.1.1 古代烟火技术的发展	001
1.1.2 西方烟火技术概况	003
1.1.3 近代烟火技术的发展	004
1.2 高技术与现代烟火学	005
1.3 烟火药的种类	006
1.4 烟火药与火炸药的比较	008
1.4.1 烟火药与火炸药的共同点	008
1.4.2 烟火药与火炸药的不同点	008
1.5 烟火技术的发展方向	009
1.5.1 目前面临的问题	009
1.5.2 理论研究的现状	010
1.5.3 烟火技术的发展方向	010
1.6 新型烟火药材料的发展趋势	012
1.6.1 新型高能黏结剂、增塑剂和氧化剂	012
1.6.2 锂、铷和铯的盐及其配方	012
1.6.3 碱金属的二硝酰胺盐及其配方	013
1.6.4 金属粉末的抗吸湿涂层	014
1.6.5 替代木炭的新型燃料	014
1.6.6 用于烟火药配方的高能量高氮含量的材料	015
1.7 烟火技术面临的挑战	015
第 2 章 烟火药的组成	017
2.1 氧化剂	017
2.2 可燃剂	022
2.3 黏结剂	024

2.4	功能添加剂	026
2.5	烟火药组分的性能参数	027
2.5.1	密度	027
2.5.2	吸湿性	027
2.5.3	熔点和分解温度	027
2.5.4	氧化剂的氧含量	028
2.5.5	可燃剂的热导率	028
2.5.6	燃烧产物的性质	028
2.5.7	烟火药组分的毒性	028
第3章	烟火药的性质及性能试验	030
3.1	烟火药的物理性质	030
3.1.1	烟火药的外观	030
3.1.2	烟火药制品的密度	030
3.1.3	烟火药制品的机械强度	031
3.1.4	烟火药的吸湿性	031
3.2	烟火药的化学性质	033
3.2.1	烟火药的化学安定性	033
3.2.2	影响烟火药剂化学安定性的因素	034
3.2.3	防止烟火药剂吸湿的措施	035
3.2.4	某些影响烟火药化学安定性的成分	036
3.2.5	烟火药化学安定性和相容性的测定	037
3.3	烟火药的固相反应	040
3.3.1	烟火药固相反应特征	041
3.3.2	烟火药固相反应遵循的原则和规律	041
3.3.3	S - KClO ₃ 烟火药反应机理	043
3.4	烟火药的燃烧性质	046
3.4.1	燃烧速度	046
3.4.2	影响烟火药燃烧速度的因素	047
3.4.3	温度系数	048
3.5	烟火药的爆炸性质	048
3.5.1	烟火药爆炸的必要条件	048
3.5.2	烟火药的爆炸性质	049
3.5.3	烟火药爆炸性能测定	050
3.6	烟火药的感度测定	054
3.6.1	机械感度测定	054
3.6.2	热感度的测定	059
第4章	烟火药的配方设计及计算	064
4.1	烟火药的氧平衡及其计算	064
4.2	烟火药燃烧反应方程式的建立	065

4.3 烟火药零氧平衡药剂的配方计算	066
4.3.1 二元混合物的配方计算	067
4.3.2 三元混合物的配方计算	067
4.3.3 含卤素混合物的配方计算	068
4.4 负氧平衡混合物的配方计算	070
第5章 烟火药的燃烧	073
5.1 烟火药燃烧的理论基础	073
5.1.1 烟火药的燃烧本质	073
5.1.2 烟火药的燃烧过程	073
5.1.3 烟火药的燃烧形态	074
5.2 烟火药的燃烧模型	077
5.2.1 火焰结构物理模型	077
5.2.2 稳态燃烧模型	078
5.2.3 希特洛夫斯基燃烧模型	079
5.2.4 Ladouceur 数值模拟模型	079
5.2.5 Kubota 燃烧模型	080
5.3 烟火药燃烧热效应的计算	081
5.3.1 烟火药的燃烧热	081
5.3.2 烟火药的燃烧温度	083
5.3.3 烟火药燃烧生成物的气、固相含量	086
5.4 烟火药燃烧平衡产物的计算	087
5.4.1 平衡产物计算的基本原则	088
5.4.2 最小吉布斯自由能法	088
第6章 烟火技术的理论基础	090
6.1 辐射度学基础知识	090
6.1.1 度量辐射度和光度的参量	090
6.1.2 辐射度量的定义	091
6.1.3 黑体辐射定律	093
6.2 光度学基础知识	096
6.2.1 度量光度学的基本参数	096
6.2.2 光辐射测量定律	097
6.3 色度学基础知识	102
6.3.1 颜色的表示方法	102
6.3.2 人眼的视觉特性	109
6.3.3 大气效应和能见度	111
第7章 烟火技术的光效应	115
7.1 照明剂	115
7.1.1 照明剂的技术要求	116
7.1.2 照明剂的火焰特性	117

7.1.3	照明剂的发光示性数	117
7.1.4	影响照明剂发光性质的因素	119
7.1.5	照明剂的配制原理	121
7.1.6	照明效应的计算	127
7.1.7	照明剂燃烧和火焰辐射机理	130
7.1.8	照明弹药和照明器材	133
7.2	发光信号剂	139
7.2.1	发光信号剂的技术要求	139
7.2.2	发光信号剂的光学性质	140
7.2.3	发光信号剂的配制原理	143
7.2.4	发光信号器材	146
7.3	曳光剂	149
7.3.1	曳光剂的技术要求	150
7.3.2	曳光剂的配制原理	150
7.3.3	曳光剂反应机理研究	151
7.3.4	曳光剂的曳光性能	154
7.3.5	曳光弹药	156
7.4	红外诱饵剂	158
7.4.1	红外诱饵剂的技术要求	158
7.4.2	红外诱饵剂的光学性质	158
7.4.3	红外诱饵剂的类型及其发展趋势	160
7.4.4	红外诱饵反导干扰原理	161
7.4.5	红外诱饵弹药	162
7.5	红外照明剂	165
7.5.1	红外照明剂的技术要求	166
7.5.2	红外照明剂的配制	167
第8章	烟火技术的热效应	169
8.1	燃烧剂	169
8.1.1	燃烧剂的技术要求	169
8.1.2	高热剂	171
8.1.3	高热燃烧剂	174
8.1.4	混合燃烧剂	175
8.1.5	合金燃烧剂	176
8.1.6	石油基燃烧剂	178
8.1.7	新型高能燃烧剂	179
8.1.8	燃烧弹药和燃烧器材	180
8.2	点火药	183
8.2.1	点火药的技术要求	183
8.2.2	点火药的制备	183

8.2.3 点火药点火性能试验测定	187
8.2.4 点火时间方程	188
第9章 烟幕遮蔽效应	194
9.1 气溶胶的动力学性质	194
9.1.1 气溶胶粒子的力学问题	194
9.1.2 气溶胶动力学	195
9.1.3 气溶胶粒子的界面现象	200
9.2 烟幕消光理论	202
9.2.1 烟幕消光的“朗伯-比尔”定律	202
9.2.2 消光系数的物理意义	203
9.3 烟幕的特征物理量	210
9.4 烟幕的光学特性	212
9.4.1 烟幕对可见光的遮蔽效应	212
9.4.2 烟幕的红外消光	213
9.4.3 烟幕红外消光评定	214
9.5 烟幕的动力学特性	215
9.5.1 微粒的蒸发	215
9.5.2 微粒的运动	215
9.5.3 凝结作用	216
9.5.4 气象和环境条件对烟雾稳定性影响	217
9.6 烟幕剂类型及原材料要求	217
9.6.1 烟幕剂类型	217
9.6.2 烟幕剂用原材料	218
9.6.3 磷的化学性质	220
9.7 常规发烟剂	224
9.7.1 吸湿性发烟剂	224
9.7.2 磷发烟剂	226
9.7.3 燃烧型混合发烟剂	227
9.7.4 其他新型发烟剂	229
9.8 抗红外发烟剂	229
9.8.1 烟火燃烧类抗红外发烟剂	231
9.8.2 爆炸撒布类抗红外发烟剂	234
9.8.3 机械喷撒类抗红外发烟剂	234
9.9 有色发烟剂	235
9.9.1 有色发烟剂的技术要求	236
9.9.2 有色发烟信号烟云的光学性质与观察条件	237
9.9.3 有色发烟剂的配制原理	238
9.10 催泪烟幕剂	242
9.11 无毒和环境友好型烟幕剂	242

第 10 章 黑火药和延期药制造	244
10.1 黑火药	244
10.1.1 黑火药的组成及分类	244
10.1.2 黑火药的物理化学性质	245
10.2 影响黑火药燃速的因素	246
10.2.1 组分配比对燃速的影响	246
10.2.2 其他因素对燃速的影响	247
10.3 黑火药的生产工艺	248
10.3.1 制造黑火药的原材料	248
10.3.2 制造黑火药工艺流程	250
10.3.3 黑火药的生产工艺	251
10.4 延期药	252
10.4.1 延期药配方组成	253
10.4.2 延期药配方的类型	254
10.4.3 延期药的燃烧	256
10.4.4 影响延期药燃烧性能的因素	256
第 11 章 烟火药制备工艺	259
11.1 原材料技术要求	259
11.1.1 原材料的检验	259
11.1.2 原材料的预干	260
11.1.3 原材料的粉碎	260
11.1.4 原材料的干燥	261
11.1.5 原材料的过筛	261
11.1.6 原材料的其他技术处理工艺	262
11.2 烟火药的制备工艺	262
11.3 烟花爆竹	265
11.3.1 烟花爆竹分类	265
11.3.2 花炮药剂及其配方	266
11.3.3 典型花炮产品制造	277
第 12 章 烟火药配方的性能评估	286
12.1 发光强度的测定	286
12.2 热效应的测定	287
12.2.1 燃烧热的测定	288
12.2.2 燃烧温度的测定	288
12.3 遮蔽效应的测定	293
12.3.1 常规发烟剂的性能测试	293
12.3.2 抗红外烟幕的性能测试	295
12.4 红外辐射强度的测定	298
12.4.1 红外探测器及其工作原理	299

12.4.2 红外光谱辐射计的标定	299
12.4.3 红外光谱辐射计的工作原理	300
12.4.4 烟火药红外辐射强度的测定	301
第13章 烟火技术在工农业生产中的应用	303
13.1 自蔓延燃烧合成技术	303
13.1.1 自蔓延高温合成铁氧化物研究	304
13.1.2 自蔓延高温合成工艺	305
13.2 汽车安全气囊	308
13.3 冷光烟花	310
13.4 除霜剂	311
13.5 杀虫剂	312
13.6 灭鼠剂	313
参考文献	314

第 1 章

绪 论

1.1 烟火技术发展概况

烟火技术 (Pyrotechnics) 一词由两个希腊单词 pry (火) 和 techne (技术) 组成, 因此烟火技术可以定义为制造和使用火的技术。但是在近代, 烟火技术的定义发生了变化, 它不是一种单纯的技术, 而是形成了一门独立的技术科学——烟火学。与其他自然学科发展相比, 烟火学的技术阶段经历了漫长的岁月, 究其原因, 主要有以下三个方面: 一方面是它一度成为少数烟火工匠人的财产与生计, 配方及工艺依照“传男不传女”的传统理念进行传承, 很长一段时间属于“子承父业”的家族产业模式; 一方面是有素养的化学家中从事烟火技术研究人数历来较少; 第三个方面是大多数烟火技术工作者普遍关心的是烟火制品的制造艺术与技巧。因此, 烟火学者为之叹息, 并为烟火学长期处于技术阶段而不像其他学科那样快速将技术升华成理论而深表遗憾。

正因为如此, 一个为国际公认的并能包络现代烟火技术内涵的烟火学定义迄今尚在研讨之中。烟火学家为烟火学下过各种各样的定义, 比如下面几个定义。

(俄) 希特洛夫斯基 (Shidlovsky) 定义烟火学是“研究烟火剂、烟火品和烟火具生产方法及性能的一门科学”。

(美) 爱伦 (Ellern) 定义为: “烟火学是产生和利用主要来自固体混合物或化合物的放热反应热效应和产物的技术和科学, 除有些例外, 反应是非爆炸性的, 反应速度较低, 并且是自持和自给反应。”

(美) 布伦特 (Blunt) 于 1980 年第七届国际烟火研讨会上提交了大会讨论的烟火学定义: “烟火学是研究用来制得定时装置、声响效应、气溶胶 (烟幕) 分散、高压气体、高热、电磁辐射 (包括可见光和红外辐射) 或以上这些效应的综合, 并以最小容积产生最大效应的可控放热化学反应的科学。”

布伦特的定义基本上反映出了现代烟火技术的内涵, 能为大多数烟火学家所接受。

1.1.1 古代烟火技术的发展

中国是世界烟火技术的发源地, 是烟花爆竹的故乡。中国烟火技术的发展由来已久、源远流长。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”, 当时的火箭是将艾草、

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气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。

随着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意外炼着了火，从而导致了黑火药的发明。中国古代的黑火药配方是“一硝二硫三木炭”，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 $\text{KNO}_3:\text{S}:\text{C}=75:10:15$ 基本一致。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发展的序幕。

黑火药的出现首先被用于战争，最初是用来纵火、灼伤和产生毒烟，其后用于爆炸，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。有史记载黑火药用于战争的是唐哀帝天德年间，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4万工人的军工作坊10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”3种燃烧性兵器的火药配方。“毒药烟珠”是毒气弹的雏形，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），铜火铳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，这已经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“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、砒石五斤”，另加木屑、鸡粪等添加剂和黏结剂；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，将其装入竹筒内，并用火线引燃，则成为名副其实的“爆竹”。随着造纸工业的出现，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……”，“宫漏既深，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》小说中描绘了一二丈高的“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。

1.1.2 西方烟火技术概况

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。

在15世纪和16世纪，在圣埃卡纳瑟的长诗中有了烟火会的描述。如烟花和火箭所产生的花环，银白色的效果及嘶嘶的声响。到了18世纪，烟火会已达到了豪华的程度。英国的第一次烟火会于1790年在印度的勒克瑙附近举行，据说为了准备这次烟火会就花费了6个月的时间。

在欧洲紧跟着黑火药就出现了烟火药，意大利是欧洲第一个制造观赏烟火的国家，也是最早举行烟火晚会的地区。在1500年以前的宗教节日及公众庆祝会上，烟火已得到了广泛的应用。经常性的烟火晚会已成为一种民间的娱乐，佛罗伦萨是当时烟火生产的中心。在这个时期以前，烟火已用在戏剧舞台上。在古罗马时期的大剧院里，是把燃烧的火炬或类似的物品当作一种艺术的装饰品。今天烟火制造已成为一个重要的行业，但精巧的艺术舞台及艺术建筑仍然是展示烟火艺术的场所。

16世纪末叶以前，英国的烟火会还很少。在莎士比亚的剧本中有几个场面涉及烟火，在这个时期的其他文学作品中也常常叙述“绿衣人”的故事。“绿衣人”在举着火把的队伍的前头，施放着火花开道。

在1572年，为了庆祝王后伊丽莎白一世访问，在沃里克城堡举行了一个大型的烟火会，这是英国本土上最早的烟火会。王后赞许了这次烟火会，说看到了无限美妙的情景。这一赞许促使了更多的烟火会的举办。1575年，为了接待皇帝陛下参观，在凯尼尔沃思城堡及沃里克郡两地举办了两个烟火会。1613年，为了庆祝国王詹姆女儿依丽莎白的婚礼，在泰晤士河也举办了一个烟火会，所使用的场地至今仍然很完整。英国早期的烟火会主要是由法国和意大利的烟火商经办的。特别是意大利的烟火商，一直经办到17世纪末叶。英国的烟火制造者开始担当地面指挥还是相当晚的事情。烟火会的组织及烟火展品的准备工作由军队负责，烟火大师则指挥工兵装药。

长期以来，日本的烟火仅仅是用黑火药制成的。大约在1880年，氯酸钾由欧洲引入后，日本就掌握了彩色烟火的配方。日本烟火历史上的一个里程碑，是仪作青木于1926年创造出了双花瓣的菊花图案。两年以后，为庆祝天皇就位所举办的烟火会上，青木燃放了三层花瓣的菊花图案，花心是红的，内层花瓣是蓝的，边缘花瓣是琥珀色的。此后，这种多瓣的菊花火花得到了广泛的发展，成为日本最具代表性的烟花。日本烟火制造商也以他们所生产的

特大型礼花弹而出名。制造一个直径为 36 吋^①的礼花弹要花费几周的时间，其中包括了多层星体和一些较小的球体。

烟花的特定品种和烟火会的形式，常常带有每个国家各自的特征。例如，典型的英国烟火会是从容不迫地进行的，随着烟火会的进程，展出吸引人的展品，并且还有许多架上烟火，并且这些架上烟火的规模还是相当庞大的。在莱茵河上和在法国举办的烟火会，采用典型的欧洲大陆的方式，具有短小壮观的特点，燃放着精彩的架空烟火，并且有许多的烟火同时燃放。为了更好地控制点火，在欧洲大陆及美国已广泛地用电点火。但在英国比较晚才开始采用电点火，主要还是采用手工点火的方式。各个国家的烟火会都拥有其独具特色的烟火品种。日本的特艺是齐放的菊花弹。法国和德国的是一种长长的“光环转轮”，在英国的烟火会上仍然可以见到。西班牙烟火会的特色是火箭。

在不同的国家里，或在同一国家之内所生产的烟火产品之间，都存在着许多细小差别。差别虽小，但行家却能识别出来。在烟火会上有些节目会给观众留下很深的印象，而印象一般的节目将被淘汰。烟火会的专业人员观看的更多。为了获得壮观的效果，通过实践，他们了解制造厂要解决什么问题，关键何在，在多大程度上能得到成功。有经验的老工人能客观地比较星体彩色的质量、火箭的效力及球体爆炸的范围。他们将注意到，火箭或球体是在到达顶点之前还是到达顶点之后才爆炸，照明星体是否送到足够的高度，或者是落到地面上还在燃烧。烟火制造显然是一项危险的工作，它不像其他的业余爱好那样，能随便处理。因此，爱好者及专家就比较少。现代的交通工具使专家之间的意见及情报能比较容易地交换，如在戛纳、摩纳哥、圣塞瓦斯蒂安和的里雅斯特召开的国际烟火会议及烟火竞赛，也促进了这些交流。偏僻的地方可能倾向于保持其独特的效果及燃放方法，先进交通工具有助于减少这种倾向。

烟火行业的进步，是通过创造新的效果来体现的。一种新的配方，能产生一种崭新彩色的星体；一种新的金属的利用能产生一种新的效果，如钛的应用就是一例；用一种新的方式将彩色组合起来就能创造一种新颖的图案等。

总之，烟火技术至今能如此普及，是因为它能为庆祝会或节日增添精彩壮观的气氛。无疑，今后烟火技术将会不断地向前发展。

1.1.3 近代烟火技术的发展

1786 年，法国化学家贝塞利特发现了氯酸钾，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，此后锶、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、纵火火绳和其他照明装置，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

^① 1 吋 = 2.53 厘米。

笋般地涌现。

20世纪中后期,烟火才有了突破性发展,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(习惯上称之为“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盲、制导武器失控、观瞄探测失灵、通信指挥中断。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,如军事上的照明弹、信号弹、曳光弹、烟幕弹、燃烧弹等特种弹药及民用的烟花爆竹等。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制高点,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,苏联制定了“东方尤里卡”计划,日本、韩国、印度也做出了相应的战略发展计划,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在现代战场,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的方式。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、雷达迷盲,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”武器装备由于应用了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概率。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，它已深入到红外、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经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经涉及固态化学理论、界面化学物理、纳米材料技术等理论领域。

1.3 烟火药的种类

烟火药是一种混合类的火药与炸药，根据其燃烧与爆炸化学反应所产生的烟、光、声、热、颜色、气动等烟火效应分类，烟火药可分成如图 1.1 所示的类别。

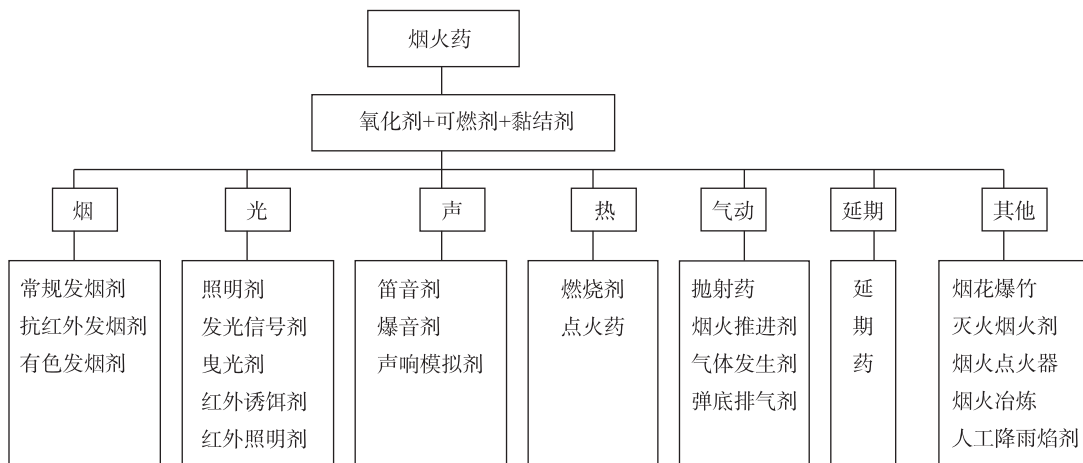


图 1.1 烟火药类别