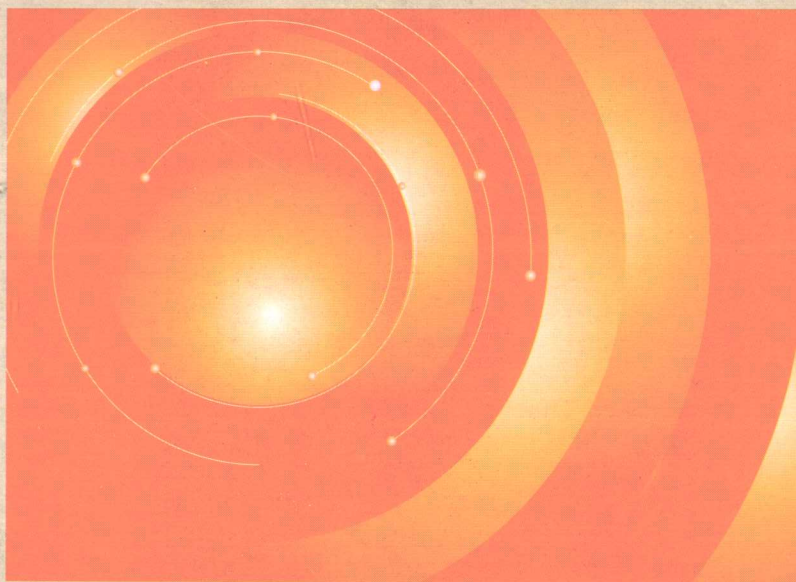


烟火辐射学

RADIOLOGY OF PYROTECHNICS

焦清介 霸书红 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

烟火辐射学

RADIOLOGY OF PYROTECHNICS

焦清介 霸书红 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

烟火辐射学 / 焦清介, 霸书红著. —北京: 国防工业出版社, 2009. 9

ISBN 978 - 7 - 118 - 06250 - 2

I. 烟... II. ①焦... ②霸... III. 烟火剂—辐射 IV. TQ567

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 034803 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 12 1/8 字数 302 千字

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	宋家树	蔡 镛	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	彭华良	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	吴有生	吴宏鑫
	何新贵	张信威	陈良惠	陈冀胜
	周一宇	赵万生	赵凤起	崔尔杰
	韩祖南	傅惠民	魏炳波	
本书主审委员	陈冀胜			

序

烟火辐射学是烟火学的一个重要分支,它是研究含能氧化还原体系通过快速化学反应产生热、光、色等宏观物理效应的一门科学。古代烟火辐射学的发展是建立在黑火药基础上的经验传承,多局限于观赏性焰火的制作。自近代化学和辐射学出现后,烟火辐射学逐渐发展成为一门科学,烟火辐射技术也从纯粹观赏性焰火扩大到照明、信号传递、红外诱饵、闪光干扰等多种军事用途,诸如照明弹、闪光弹、发光信号弹、曳光弹和诱饵弹等烟火光电对抗弹药,这些已成为世界各国海、陆、空三军“必不可少”的装备,在高科技战争中发挥了重要的作用。

尽管烟火辐射技术发展迅速,应用十分广泛,但其理论还相对落后,缺少专门性论著,远不能适应技术发展的需求,这无疑将会影响烟火辐射学的传承和发展。

自20世纪80年代以来,我国烟火科技工作者在进行烟火辐射技术应用研究的同时,也开展了部分烟火辐射理论的研究。尽管我国现代烟火辐射学的研究起步较晚,但取得了一定的研究成果,尤其在高强度可见光、红外照明、红外诱饵、闪光辐射等方面的理论研究更是取得了长足的进步,这对促进烟火辐射技术的进一步发展提供了理论指导。

《烟火辐射学》这部专著既阐述了烟火辐射技术领域的前沿问题,又介绍了传统辐射效应的应用;既有烟火辐射理论的研究成

果,又有相关烟火技术的说明。因此,该专著具有较强的理论性、前沿性和系统性。相信本专著对烟火辐射理论的进一步发展将起到促进作用,对从事烟火辐射技术研究的人员是一本有价值的参考书。

徐更光 2008年12月1日

前 言

烟火学是介于化学、物理学和力学之间的一门交叉科学,主要研究烟火药及其在燃烧或爆炸化学反应中产生的光、声、色、热、烟等特种物理和力学效应。烟火辐射学是烟火学的重要内容,在军事和民用方面应用广泛,并有着广阔的发展前景和空间。随着当今光电观瞄器材和光电制导武器的迅速发展,现代烟火技术在光电对抗/无源干扰方面的应用日益广泛。传统的烟火器材(如照明弹、曳光弹、信号弹等)不断推陈出新,新概念烟火药(如红外诱饵剂、红外干扰剂、强光致盲剂、脉冲信号剂等)层出不穷;烟火技术的应用研究也从陆地和空中战场转向水下和太空作战平台。民用上,烟火技术被广泛应用于工农业生产、交通运输、电影摄制、文化娱乐等。随着烟火学的发展和高新技术的相互渗透,通过烟火科技工作者的不断努力和创造,烟火领域的研究已呈现全新的局面。

目前烟火辐射理论研究落后于技术发展,文献资料系统性差,缺少专门性的著作,这在一定程度上影响了烟火辐射理论和技术发展。为了进一步推进烟火技术快速稳定发展,使之更好地服务于国防建设和工农业生产,专门编写了《烟火辐射学》这部专著。该专著以近20年来的科研成果为基础,吸取了烟火学、辐射度学和光度学、色度学、燃烧学等众多相关理论,紧密结合实际应用,系统深入和较全面地阐述了该类烟火药配方设计、烟火药燃烧、辐射

及光谱、烟火辐射效应原理及应用等内容。该专著在重点阐述烟火辐射前沿问题的同时,也给出了传统辐射效应的应用,因此,该专著具有较强的理论性、前沿性和系统性。最后,对在本书编著过程中提出宝贵意见和给予帮助的人员表示衷心感谢。

由于时间匆忙,水平所限,书中疏漏、错误之处在所难免,敬请学术界前辈、同行和广大读者批评指正。

作 者
2009年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 烟火光电对抗	1
1.2 烟火辐射学的研究内容	3
1.3 烟火辐射理论基础	6
1.4 烟火辐射效应的应用	11
第 2 章 辐射度学和光度学基础	15
2.1 度量辐射度和光度的参量	15
2.1.1 立体角	15
2.1.2 辐射度量的定义、符号及单位	16
2.1.3 光度量的定义、符号及单位	19
2.2 人眼的视觉特性	22
2.2.1 人眼的黑白视觉特性	22
2.2.2 人眼的颜色视觉特性	26
2.2.3 颜色视觉理论	30
2.2.4 环境对色彩的影响	32
2.3 黑体辐射的基本定律	33
2.3.1 吸收、反射、透射率及系数	34
2.3.2 普朗克定律	36
2.3.3 维恩位移定律	37
2.3.4 斯蒂芬—玻耳兹曼定律	38

2.4	非黑体辐射	38
2.4.1	基尔霍夫定律	38
2.4.2	影响发射率的因素	41
2.4.3	方向、半球、光谱、总发射率与吸收率的关系式 ...	44
2.5	光辐射测量中的朗伯定律	48
2.6	两种典型光辐射量的计算	51
2.6.1	点光源照度的计算	52
2.6.2	面光源照度的计算	53
第3章	烟火药的配方设计	56
3.1	原材料选择	56
3.1.1	氧化剂	56
3.1.2	可燃物	59
3.1.3	黏合剂	61
3.1.4	附加剂	62
3.2	氧平衡计算	62
3.3	燃烧反应方程式的建立	64
3.4	配方配比计算	66
3.4.1	零氧平衡药剂的配比计算	66
3.4.2	负氧平衡药剂的配比计算	68
3.5	烟火药的制造工艺	69
3.5.1	原材料准备	69
3.5.2	烟火药制备工艺流程	71
3.6	配方优化试验	75
3.7	药剂基本性能测试	75
3.7.1	烟火药的吸湿性	76
3.7.2	化学安定性测定	76
3.7.3	烟火药的感度试验	77

3.7.4	烟火药的抗过载能力	79
第4章	烟火药的燃烧	87
4.1	烟火药燃烧的基础知识	87
4.1.1	烟火药的燃烧本质	87
4.1.2	烟火药的燃烧过程	88
4.1.3	烟火药的燃烧形态	89
4.1.4	烟火药燃烧速度及其影响因素	93
4.2	烟火药的燃烧理论	95
4.2.1	埃利·弗里曼稳态燃烧模型	95
4.2.2	希特洛夫斯基燃烧模型	96
4.2.3	Ladouceur 数值模拟模型	97
4.2.4	Kubota 燃烧模型	98
4.3	烟火药燃烧反应平衡产物的计算	99
4.3.1	平衡产物计算的基本原则	100
4.3.2	最小吉布斯自由能法	100
4.4	烟火药燃烧的性能表征	102
4.4.1	烟火药的燃烧热	102
4.4.2	烟火药的燃烧温度	105
4.4.3	烟火药燃烧生成物的气、固量	110
4.4.4	燃烧性能参数和平衡产物的计算	111
第5章	烟火辐射及其光谱分布	117
5.1	燃烧火焰	117
5.2	辐射光谱形成原理	118
5.2.1	原子光谱	118
5.2.2	分子光谱	123
5.2.3	自发发射、受激发射和吸收	124

5.3	光谱分布	126
5.3.1	线状光谱	126
5.3.2	带状光谱	128
5.3.3	连续光谱	128
5.4	辐射源	129
5.4.1	热辐射源	129
5.4.2	发光	133
5.5	烟火药燃烧产物的辐射机理	137
5.5.1	气体产物辐射机理	137
5.5.2	凝聚相燃烧产物辐射机理	142
5.6	几种烟火药的火焰辐射光谱	148
5.6.1	发光信号剂的辐射光谱	148
5.6.2	红外烟火药的辐射光谱	151
5.6.3	闪光药燃烧的可见光辐射光谱	154
第6章	烟火辐射照明效应	159
6.1	照明烟火药火焰辐射机理	159
6.2	照明烟火药技术要求及配制原则	162
6.2.1	照明烟火药技术要求	162
6.2.2	照明烟火药的配制原则	163
6.2.3	典型照明烟火药配方	166
6.3	照明烟火药的发光性质	168
6.3.1	照明烟火药的火焰特性	168
6.3.2	照明烟火药的发光性能	169
6.3.3	影响照明烟火药发光性质的因素	170
6.4	照明效应的计算	172
6.4.1	照明烟火药的照度	172
6.4.2	最大照明半径与发光强度和照度的关系	173

6.4.3	能见距离	174
6.5	照明器具	175
6.5.1	用途和要求	175
6.5.2	结构特点	176
6.5.3	照明器具使用中应注意的问题	181
6.5.4	存在问题及发展方向	182
6.6	红外照明烟火药	183
6.6.1	对红外照明烟火药的技术要求	183
6.6.2	红外照明烟火药的配制	184
6.6.3	红外隐身照明弹	185
第7章	烟火辐射闪光效应	187
7.1	烟火闪光辐射	187
7.1.1	烟火药爆燃辐射现象	187
7.1.2	烟火药闪光辐射模型	188
7.1.3	辐射强度与其燃烧温度和火球半径的关系	189
7.2	闪光烟火药技术要求及配方设计	190
7.2.1	闪光烟火药技术要求	190
7.2.2	闪光烟火药的配制原则	191
7.3	闪光烟火药的辐射性能表征	196
7.3.1	可见光测试结果	197
7.3.2	近红外测试结果	198
7.3.3	中红外测试结果	199
7.3.4	远红外测试结果	200
7.4	影响烟火药闪光效应的因素	201
7.4.1	铝粉的粒度和形状	201
7.4.2	点火药量	203
7.4.3	装药量	203

7.4.4	装药密度	204
7.4.5	黏合剂	204
7.4.6	弹壳强度	205
7.5	装药结构	205
7.5.1	装药要求	205
7.5.2	壳体强度的数值模拟	206
7.5.3	水压试验	209
7.5.4	点火管设计	210
7.5.5	点火药	211
7.5.6	闪光器具的装药结构	212
7.6	闪光辐射的破坏机制与效应	214
7.6.1	对眼睛的损伤	214
7.6.2	对传感器的损坏	215
7.6.3	对光学器件的损坏	216
第8章	烟火辐射色光效应	218
8.1	色度学的技术基础	218
8.1.1	颜色的基本术语	218
8.1.2	格拉斯曼定律	219
8.1.3	颜色匹配方程	221
8.1.4	三刺激值和光谱三刺激值	222
8.1.5	色品坐标和色品图	223
8.1.6	CIE 1931—RGB 标准色度系统	224
8.1.7	CIE 1931—XYZ 标准色度系统	226
8.2	发光火焰颜色的数学描述	229
8.2.1	微粒云的发射率	229
8.2.2	发光火焰的色系数方程和颜色方程	230
8.3	发光信号剂的技术要求	232

8.4	发光信号剂的光学性质	233
8.4.1	发光信号剂的辐射特性	233
8.4.2	发光信号剂火焰的比色特性	234
8.4.3	发光信号剂发光强度的确定	235
8.5	发光信号剂的配方设计	236
8.5.1	影响发光信号剂色彩和比色纯度的因素	236
8.5.2	发光信号剂的配制原则	238
8.5.3	发光信号剂的基本组成	239
8.5.4	有色发光剂配方的举例	240
8.6	发光信号器具	244
第9章	烟火红外辐射诱饵效应	248
9.1	红外诱饵的应用原理	248
9.2	对红外诱饵的技术要求	250
9.3	红外诱饵的光学性质	252
9.4	红外诱饵剂的配方设计	255
9.4.1	原材料选择	255
9.4.2	配方的性能参数计算	257
9.4.3	诱饵剂红外辐射强度的计算	261
9.5	红外诱饵剂的类型	271
9.6	红外诱饵干扰效果的评估	272
9.6.1	飞机运动方程	273
9.6.2	红外诱饵弹运动方程	274
9.6.3	红外辐射强度变化	274
9.6.4	质心运动方程	275
9.6.5	导弹运动方程	275
9.6.6	质心与导弹距离	275
9.7	红外诱饵技术的新发展	276