



黑火药设计与 制造技术

崔庆忠 黄玉平 徐洋◎编著

DESIGN AND MANUFACTURE
TECHNOLOGY OF BLACK
POWDER



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

黑火药设计与制造技术

崔庆忠 黄玉平 徐 洋 编著

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

内 容 提 要

本书在简述黑火药概念、分类、用途、历史演变及发展趋势的基础上,针对传统黑火药燃烧产物的污染腐蚀性、燃烧热力学参数的一致性及防潮能力提升等突出问题,从原材料性能表征及替代物优选、基于神经网络的系列配方组成结构设计、基于基元反应的热分解机理研究及热力学参数优化、基于吸附机制的表界面参数优化及防潮包覆技术等方面,系统阐述了现代黑火药的配方设计准则、热力学参数优化技术及性能改性方法,有效提升了黑火药的设计水平和产品质量。同时,为了本书知识结构的完整性,在充分吸收已有成果的基础上,对黑火药的制造技术、性能分析方法及安全生产要素也进行了简要介绍。

本书可作为从事黑火药及其制品设计、生产及管理人士的参考书,也可作为高等院校含能材料相关专业学生进行配方优化设计、火工器件及弹药组件开发的参考教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

黑火药设计与制造技术/崔庆忠,黄玉平,徐洋编著. —北京:北京理工大学出版社,2019.8

ISBN 978-7-5682-7322-0

I. ①黑… II. ①崔… ②黄… ③徐… III. ①黑火药-设计 ②黑火药-生产工艺 IV. ①TQ562

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第152792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/保定市中华美凯印刷有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/11.25

彩 插/2

字 数/203千字

版 次/2019年8月第1版 2019年8月第1次印刷

定 价/49.00元

责任编辑/陈莉华

文案编辑/陈莉华

责任校对/杜 枝

责任印制/王美丽

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

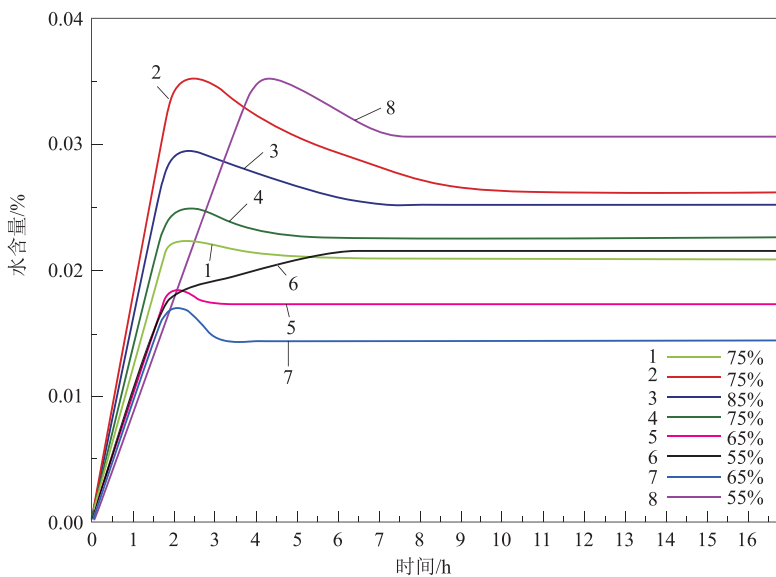


图 2-3 硝酸钾等温吸湿曲线

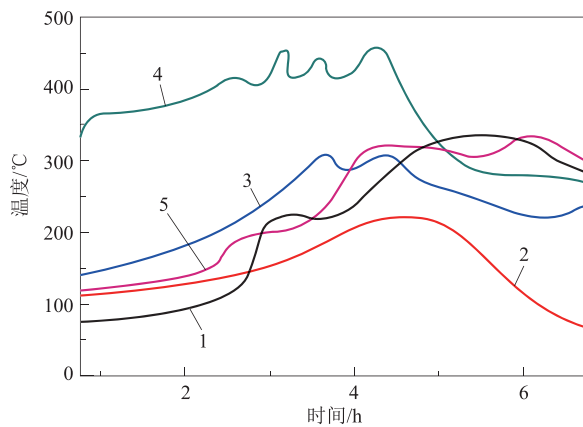
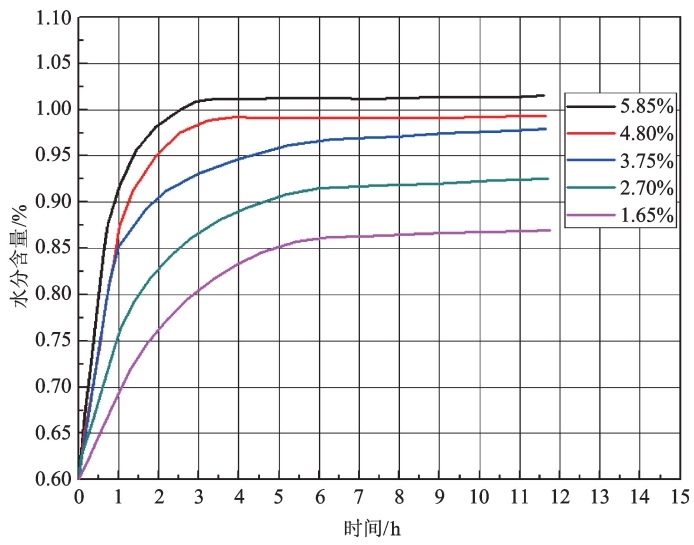
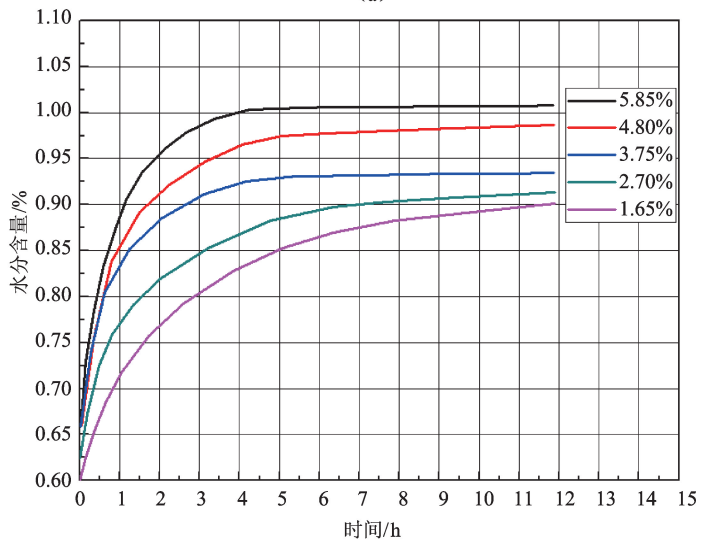


图 2-20 木材炭化时,炭化炉内温度变化曲线

1—中心热电偶;2—废气温度;3—左边温度;4—炉的温度;5—右边温度



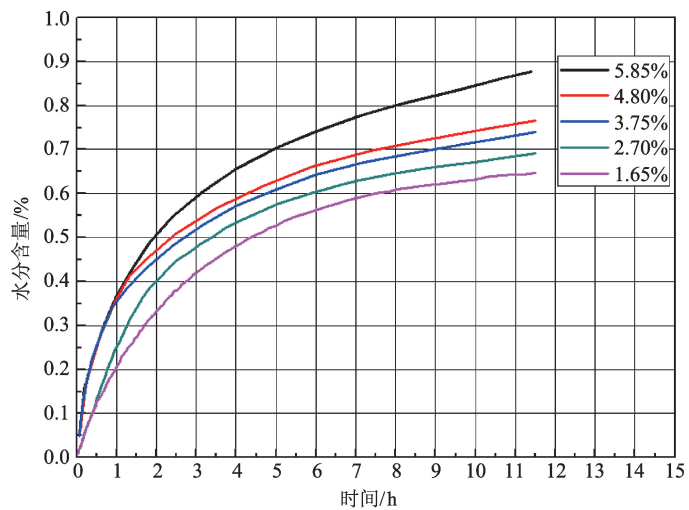
(a)



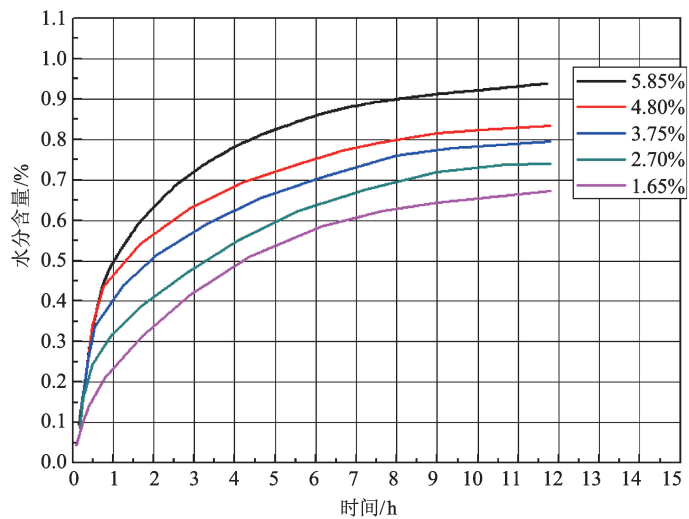
(b)

图 7-1 黑火药的吸湿曲线

(a) HY-6, 30 °C; (b) HY-6, 35 °C;



(c)



(d)

图 7-1 黑火药的吸湿曲线(续)

(c)HY-1,30 °C;(d)HY-1,35 °C

前言

黑火药是我国古代的四大发明之一,具有火焰感度高、传火速度快等优点。在使用过程中,其固有缺陷逐渐暴露出来:一是燃烧产物具有污染和腐蚀性,黑火药燃烧产物中含有大量的碳、硫氧化物和酸性物质,会污染环境并腐蚀相关器件;二是输出参数一致性差,黑火药燃烧性能受天然木炭来源及环境因素影响大,固体颗粒物含量高,造成燃烧热动力学参数不稳定、烟尘含量高;三是防潮能力差,在一般的储存条件下,很容易造成弹药失效和安全事故。

针对上述问题,在组成结构、工艺路线及燃烧特性等方面保持传统黑火药基本架构的基础上,本书从天然木炭表征及其替代物优选、基于经验数据的配方组成结构设计、燃烧热力学参数耦合及表界面形貌参数优化等方面,对现代黑火药的设计及制造技术进行了系统阐述。全书共分8章:第1章介绍了黑火药的概念、分类、用途、历史演变及发展;第2章介绍了黑火药用原材料性能及其替代物优选技术;第3章基于人工神经网络技术,阐述了黑火药的配方设计方法;第4章基于多相基元反应,阐述了黑火药的热分解机理及热力学参数优化技术;第5章基于传统工艺路线,介绍了黑火药的制造技术;第6章基于孔结构吸附理论,阐述了黑火药的吸湿机制、防潮材料优选及表面包覆技术;第7章介绍了黑火药的性能表征方法;第8章在晋东编《黑火药》的基础上,介绍了黑火药生产的安全技术。

编著者首先感谢为本书的出版提供试验条件的张夫明、李满两位师傅,正是他们的付出和对试验数据的精益求精,才使得本书的特点得到充分的发挥;其次感谢编著过程中对本书提出修改意见的学者、前辈,正是由于他们不吝赐教,才使得本书顺利出版。

由于编著者学识所限,书中定有不妥之处,恳请读者批评、指正。

编著者

2019年6月6日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 黑火药的概念	1
1.2 黑火药的分类及用途	1
1.2.1 黑火药的分类	1
1.2.2 黑火药的用途	3
1.3 黑火药的演变	3
1.3.1 古代黑火药的产生	3
1.3.2 古代黑火药的西传	5
1.3.3 古代黑火药的制造	6
1.3.4 近代黑火药技术	6
1.3.5 现代黑火药技术	7
1.4 黑火药的发展	8
1.4.1 环保型黑火药技术	9
1.4.2 燃烧一致性控制技术	10
1.4.3 防潮黑火药技术	10
第 2 章 黑火药用原材料及其替代物	12
2.1 氧化剂	12
2.1.1 硝酸钾的理化性质	12
2.1.2 硝酸钾的作用	16
2.1.3 硝酸钾的技术要求	16
2.1.4 硝酸钾的制备	16
2.1.5 硝酸钾的精制	17
2.1.6 硝酸钾的粉碎	19
2.2 硫黄	20
2.2.1 硫黄的理化性质	20

2.2.2	硫黄的作用	21
2.2.3	硫黄的技术要求	21
2.2.4	硫黄的制备	22
2.2.5	硫黄的精制	22
2.3	木炭	23
2.3.1	木炭的种类	23
2.3.2	木炭的结构	24
2.3.3	木炭的性能	31
2.3.4	木炭的技术要求	34
2.3.5	木炭的制备	35
2.4	木炭替代物	42
2.5	燃烧调节剂	44
第3章	黑火药的配方设计	46
3.1	基于BP神经网络算法的黑火药配方设计	46
3.1.1	模型建立	46
3.1.2	参数设计	48
3.1.3	神经网络的训练	51
3.1.4	仿真结果对比	54
3.2	黑火药配方优化设计	57
3.2.1	传统黑火药($\text{KNO}_3/\text{C}_{12}\text{H}_4\text{O}_2/\text{X}$)体系	57
3.2.2	酚酞型黑火药($\text{KNO}_3/\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4/\text{X}$)体系	62
3.2.3	对硝基苯酚型黑火药($\text{KNO}_3/\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3/\text{X}$)体系	66
3.3	无毒无腐蚀燃烧控制技术	70
3.3.1	污染物生成机理及控制技术	70
3.3.2	无毒无腐蚀配方优化	71
第4章	黑火药的热分解机理	73
4.1	试验仪器和测试条件	73
4.1.1	差示扫描量热法分析	73
4.1.2	热重法分析	73
4.2	传统黑火药体系($\text{KNO}_3/\text{C}_{12}\text{H}_4\text{O}_2/\text{X}$)的热分解机理	74
4.2.1	$\text{KNO}_3/\text{C}_{12}\text{H}_4\text{O}_2$ 的热分解机理	74
4.2.2	$\text{KNO}_3/\text{C}_{12}\text{H}_4\text{O}_2/\text{S}$ 的热分解机理	75
4.2.3	$\text{KNO}_3/\text{C}_{12}\text{H}_4\text{O}_2/\text{NC}$ 的热分解机理	77
4.2.4	$\text{KNO}_3/\text{C}_{12}\text{H}_4\text{O}_2/\text{X}$ 体系的热分解特性	78

4.3 酚酞型黑火药体系($\text{KNO}_3/\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4/\text{X}$)的热分解机理	79
4.3.1 $\text{KNO}_3/\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ 的热分解机理	79
4.3.2 $\text{KNO}_3/\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4/\text{S}$ 的热分解机理	80
4.3.3 $\text{KNO}_3/\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4/\text{NC}$ 的热分解机理	81
4.3.4 $\text{KNO}_3/\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4/\text{X}$ 体系的热分解特性	83
4.4 对硝基苯酚型黑火药体系($\text{KNO}_3/\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3/\text{X}$)的热分解机理	83
4.4.1 $\text{KNO}_3/\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3$ 的热分解机理	83
4.4.2 $\text{KNO}_3/\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3/\text{S}$ 的热分解机理	84
4.4.3 $\text{KNO}_3/\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3/\text{NC}$ 的热分解机理	86
4.4.4 $\text{KNO}_3/\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3/\text{X}$ 体系的热分解特性	87
第5章 黑火药的制造技术	89
5.1 组分混合	90
5.1.1 球磨机的构造原理	90
5.1.2 二料混合	94
5.1.3 三料混合	95
5.2 压制造型	97
5.2.1 药粉的装封袋	98
5.2.2 压药	99
5.2.3 拆封袋与药片的打碎	101
5.3 造粒	102
5.3.1 造粒机的构造及药料的成型过程	102
5.3.2 工艺要求	103
5.3.3 操作程序	104
5.4 后处理	104
5.4.1 光药	105
5.4.2 筛选	107
5.5 混同及包装	108
5.5.1 混同	109
5.5.2 除杂质	111
5.5.3 包装	112
5.6 不合格品的返修和处理	113
5.6.1 药粒中的杂质	113
5.6.2 水分含量不合格	113
5.6.3 密度不合格	113

5.6.4	包装不合格	113
5.6.5	废药的处理	114
第6章	黑火药的防潮技术	115
6.1	黑火药吸湿模型及吸附性能分析	115
6.1.1	Langmuir 单分子层吸附模型	115
6.1.2	BET 多分子层吸附模型	116
6.2	黑火药吸附性能分析	116
6.2.1	黑火药微观介孔孔径求解	118
6.2.2	黑火药表面分形特性分析	120
6.3	易燃型高效防潮材料设计	121
6.4	防潮层界面结合技术研究	122
6.5	性能对比研究	123
第7章	黑火药的性能评估技术	125
7.1	理化性能	125
7.1.1	外观	125
7.1.2	密度	125
7.1.3	水分	126
7.1.4	吸湿性	127
7.1.5	粒度	131
7.2	感度性能	131
7.2.1	热感度	132
7.2.2	撞击感度	133
7.2.3	摩擦感度	134
7.2.4	火焰感度	135
7.2.5	静电感度	136
7.3	安定性及相容性	138
7.3.1	黑火药的安定性	138
7.3.2	黑火药的相容性	138
7.3.3	测试方法	138
7.4	燃烧性能	139
7.4.1	黑火药的燃烧特性	139
7.4.2	燃烧性能参数测试	139
7.4.3	影响黑火药燃烧性能的因素	143
7.5	爆炸性能	147

7.5.1	爆炸反应方程式	147
7.5.2	爆速	148
7.5.3	比容	148
7.5.4	爆热	149
7.5.5	爆温	150
7.5.6	火药力	150
7.5.7	威力	151
7.6	弹道性能	152
7.6.1	外弹道性能	153
7.6.2	内弹道性能	154
第8章	黑火药生产的安全技术	157
8.1	概述	157
8.2	工厂建设方面的安全要求	157
8.2.1	工厂危险等级的划分	157
8.2.2	对生产区的安全要求	158
8.2.3	工房建筑与布置	159
8.2.4	防火、防爆及避雷设施	160
8.3	生产中的安全要求	161
8.3.1	对生产设备的安全要求	161
8.3.2	对生产过程的安全要求	161
8.3.3	对管理制度的安全要求	162
8.4	黑火药的储存、运输和使用	162
8.4.1	黑火药的储存	163
8.4.2	黑火药的运输	163
8.4.3	黑火药的使用	164
	参考文献	165

第1章 绪 论

1.1 黑火药的概念

黑火药简称黑药,是由硝酸钾、硫黄、木炭混合而成的异质火药,因燃烧(爆炸)后产生大量烟雾,亦称有烟火药,是人类最早使用的含能材料,我国古代的四大发明之一。黑火药具有火焰感度高、传火速度快等特点,在军事上,广泛应用于弹药的点火、传火及作动部件的基本装药,民用领域主要应用于猎枪弹抛射药、矿山爆破药及烟花类产品的引燃药、抛射药等。黑火药存在能量输出不稳定、安全性差、吸湿性大、产物腐蚀性强等缺陷,调整组分的种类和配比,可得到满足不同使用要求的黑火药衍生物;以醋柳木炭代替杨木炭,可得到延期黑火药(634、675 延期药);以石炭(煤的干馏产物)代替木炭,可得到低成本缓燃黑火药;以富碳酚类(如酚酞、对硝基苯酚等)取代木炭,可得到洁净燃烧型无木炭黑火药;以硝化棉取代硫黄,可得到环保输出型无硫黑火药;在黑火药表面滚涂硅脂基可燃材料,可得到防潮黑火药等。因此,现代黑火药已突破传统黑火药的内涵,泛指由硝酸盐、类木炭材料及黏结组分混合而成的,具有传火微孔结构,并与传统黑火药具有相似宏观特性的混合含能体系。

1.2 黑火药的分类及用途

1.2.1 黑火药的分类

按物理状态划分,黑火药分为粒状黑火药和粉状黑火药两种。粒状黑火药又分为大粒黑火药和小粒黑火药,大粒黑火药有三种品号(按粒度大小,命名为1号、2号、3号大粒黑火药),小粒黑火药有四种品号(按粒度大小,命名为1号、2号、3号、4号小粒黑火药)。国军标将黑火药分为8类(按粒度大小,以HY-1~HY-8表示,见表1-1),其中,HY-1~HY-3对应大粒黑火药,HY-4~HY-7对应小粒黑火药,HY-8为粉状黑火药。

表 1-1 黑火药的分类(摘自 GJB 1056—1990)

类(品号)	代号	筛网孔基本尺寸/mm	
		筛上物	筛下物
1	HY-1	10.0	5.00
2	HY-2	5.60	2.80
3	HY-3	4.00	2.00
4	HY-4	2.24	1.00
5	HY-5	1.18	0.630
6	HY-6	0.850	0.400
7	HY-7	0.500	0.260
8	HY-8	0.250	—

按组成结构划分,分为传统黑火药(硝酸钾/硫黄/木炭)、无硫黑火药(硝酸钾/木炭/添加剂)及无木炭黑火药(硝酸钾/木炭替代物/添加剂)等。

按防潮能力划分,分为传统黑火药、石墨包覆的防潮黑火药、硅脂包覆的防潮黑火药等。

按使用环境划分,分为点传火药、抛射药、延期药、导火索药及爆破药等。其中延期药是黑火药的一个重要品种,质量指标要比一般黑火药高,制造时所用的原材料质量也高,加工工艺条件也更严格,生产中通过降低木炭含碳量或选用燃烧速度慢、点火性能好的醋柳木炭和杨树皮木炭等方法来保证燃烧精度。延期药的理化性能指标应符合表 1-2 中的要求。

表 1-2 延期药的理化性能指标

指标名称		指标要求	
		634 延期药	675 延期药
吸湿性/%		≤1.5	≤1.6
水分含量/%		0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1
药粉含量/%		≤0.1	≤0.075
假密度/(g · cm ⁻³)		≥0.8	≥0.9
药粒密度/(g · cm ⁻³)		1.65 ~ 1.75	1.77 ~ 1.83
1 号药粒	12 号筛(0.60 mm)筛上物/mm	≤5	
	17 号筛(0.41 mm)筛下物/mm	≤5	
2 号药粒	17 号筛(0.41 mm)筛上物/mm	≤5	
	19 号筛(0.36 mm)筛下物/mm	≤5	

1.2.2 黑火药的用途

在军事领域,黑火药的主要用途如下:

(1)HY-1~HY-3类黑火药:用于发射装药及火箭推进剂的点火药。

(2)HY-4~HY-7类黑火药:用于引信非定时部分及发射装药的传火药,燃烧弹、照明弹、宣传弹等特种弹药的抛射药等。

(3)HY-8类黑火药:用于制备粒状黑火药、压制延期管和延期药盘及其他特殊用途等。

在民用领域,黑火药主要用于猎枪的抛射药,制造导火索及烟花爆竹的抛射药、爆破药等。另外,还可用于筑路、采矿的爆破药等。

1.3 黑火药的演变

1.3.1 古代黑火药的产生

黑火药是人类最早使用的含能材料,其含义是着火的药:黑火药的主要成分是硝石(硝酸钾)、硫黄,是很重要的药材。在《神农本草经》中,硝石被列为上品药的第六位,能治二十多种病;硫黄被列为中品药的第三位,也能治十几种病。因此,黑火药发明之初,被列为医药类,可治疮、杀虫、去瘟疫等,火药的“药”字就是这样得来的。“着火”是这种药剂的一种重要特性,火药遇火即燃,还产生大量的气体和一定的热量。

在两汉时代,劳动人民掌握了伐木烧炭和硝石、硫黄的采集技术。当时,在湖南、四川、河南、山西等地,发现了大量天然硫黄矿,在华北各地,人们掌握了提炼硝石的技术,并在实践过程中,逐步掌握了硝石、硫黄的物理与化学性能,为黑火药的发明奠定了物质基础。

大约在公元7世纪初,中国古代方士在炼丹过程中,发明了原始的黑火药。隋末唐初炼丹家孙思邈在其所著的《丹经内伏硫黄法》中记载了黑火药的制作要领:用硝石、硫黄各二两研细,再加三个碳化皂角子,这是我国最早配制黑火药的方法。唐末《真元妙道要略》中记载:拿硫黄、硝石、雄黄(As_2S_3)和蜜混合后一起燃烧,会发生焰火,甚至会烧毁房屋。唐宪宗(公元806—820年)时期,清虚子采用硝石、硫黄各二两,并用三钱五分的马兜铃代替三个皂角,制造出了黑火药。随着经验的积累和认识的提高,人们逐渐掌握了黑火药的配制方法,民间至今流传有“一硝二黄三木炭”的简易配法。

黑火药最初应用于军事大约在 10 世纪初,我国古代的军事家常采用火箭作为火攻武器,《魏略辑本》记载:“诸葛亮进兵汞郝邵,起云梯,冲东以临城,邵以火箭逆射其云梯,梯燃,梯上人皆烧死”。锥形火箭(见图 1-1(a))是在竹箭头部涂覆油脂、松香、硫黄等,然后射出,以点燃敌人粮草、军械和达到杀敌的目的,它的燃烧速度慢,火力小,杀伤效果有限。宋初冯继升、岳义方等人用黑火药制成火药箭(见图 1-1(b)),其燃烧速度快,火力大,杀伤力强。王应麟编《玉海》记载:“开宝二年二月,冯继升、岳义方上火箭法,试之,赐束帛”;《宋史》记载:“开宝三年,兵部令史冯继升等进火箭法,命试验,且赐衣物束帛”;赵万年编《襄阳守城录》记载:“开禧二年四月,公令先用火药箭射烧番贼所搬竹木草牛”;《宋史》记载:“咸平三年八月,神卫水军队长唐福献所制火箭、火球、火蒺藜”。

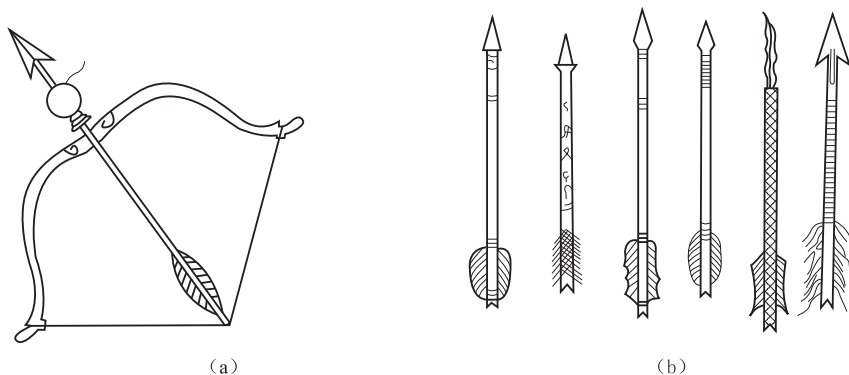


图 1-1 古代锥形火箭和火药箭

(a)锥形火箭;(b)火药箭

黑火药武器的使用,也推动了黑火药的研制,北宋曾公亮等人编写了《武经总要》,详细描述了多种火药武器的制造方法以及毒药烟球、蒺藜火球以及大炮的配方(见表 1-3)。表中所述的大炮即为大火药包;蒺藜火球也是火药包,除装填黑火药外,还混有带尖刺的铁蒺藜,黑火药爆炸后,铁蒺藜飞散出去,杀伤力大增,特别是对付骑兵,威力更大;毒药烟球是装填混有砒霜、巴豆等毒物的黑火药,爆炸后的烟气可使敌人中毒,达到削弱其战斗力的目的。

表 1-3 古代黑火药配方

火器种类	硝石/%	硫黄/%	木炭/%	其他
大炮	40	14	14	桐油、黄蜡、干漆等
蒺藜火球	40	20	5	竹茹、麻茹等
毒药烟球	30	15	5	巴豆、砒霜、狼毒等

北宋末年,出现了装填黑火药的火炮(霹雳炮,见图1-2(a)),爆炸威力大,声如霹雷。后又发明了铁火炮(震天雷,见图1-2(b)),采用铁制外壳,爆炸威力巨大,声大如雷,对敌威慑作用大。据《金史》记载:“正大九年,大兵又为牛皮洞,直至城下,掘城为瓮,间可容人,人有献策者,以铁绳悬震天雷,顺城而下,至掘处火发,人与牛皮皆碎迸无迹”;《明实录》记载:“洪武四年,廖永忠进兵瞿塘关,发大炮、火箭夹击,大破之,其将郑兴中火箭死”。这些武器或是用抛射机将火药包抛向敌方,或是用绳索悬吊,与现代身管武器的差异很大。公元1132年,出现了装填黑火药的火枪:将黑火药装入竹管内,作战时,点燃的黑火药喷射出去,以烧伤敌人。公元1259年,出现了用粗竹筒制作的突火枪(突火枪,见图1-2(c)),筒内除装黑火药外,还装有“子窠”,火药点燃后,起初产生火焰,接着“子窠”发射出去,“子窠”就是原始的子弹,但这种竹制的火枪承受不了太大的压力,火药装多了就可能破裂,寿命很短。元朝时,出现了用铜或铁铸的筒式火炮(火铳,见图1-2(d)),是当时威力最大的火药武器,被人们尊之为“铜将军”。

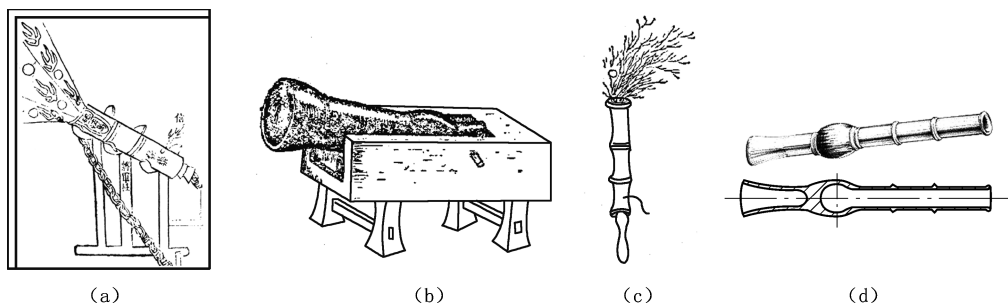


图1-2 古代火炮

(a) 霹雳炮;(b) 震天雷;(c) 突火枪;(d) 火铳

我国古代用黑火药制成最初的地雷、水雷和定时炸弹。据记载:“曾铎(明)在边又制地雷,穴地丈许,柜药于中,以石满覆,更覆以砂,令与地平,伏火于下,可以经月,系其发机于地面,过者蹴机,则火坠药发,石飞坠杀人,敌惊以为神”。这是有关地雷的最早记载。宋应星所著的《天工开物》上记载:“混江龙,漆固皮囊果炮,沉于水底,岸上带索引机,囊中悬吊火石火镰,索机一动,其中自发,敌舟行过,遇之则败”。这显然是一种最早的水雷。古书上还载有:“曾铎在边,置慢炮法,炮圆如斗,中藏机巧,火线至一二时才发,外以五彩饰之,敌拾得者,骇为异物,聚观传玩者墙拥,须臾药发,死伤甚众”。这就是现代定时炸弹雏形。

1.3.2 古代黑火药的西传

唐朝时期,我国与阿拉伯、波斯等国家的贸易往来频繁,硝随同炼丹术由我国传到中东,当时埃及人把硝叫作“中国雪”,波斯人把硝叫作“中国盐”,这些国家只知