



北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Energetic Cells Design Principles

含能元器件设计原理

焦清介 任慧 聂建新 闫石 严楠 朱艳丽 © 编著

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

含能元器件设计原理

Energetic Cells Design Principles

焦清介 任 慧 聂建新 编著
闫 石 严 楠 朱艳丽

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

含能元器件是构成各种类火工品和含能动力装置的基础,具有高储能密度、高功率输出和高动态响应的特性,广泛应用于导弹、火箭、卫星和飞船等发射控制、飞行控制、在轨控制和终端毁伤控制系统,是武器装备发射、飞行及毁伤控制的能源和动力源。本书以含能元器件的功能、作用原理和输出特点为主线,主要介绍储能器件、换能元件、发火组件、能量传递器件、能量放大器件和输出装置的基本构成、作用原理和设计原理。以各类含能元器件的功能为切入点,按照结构及构成、工作原理、输入/输出关系、影响因素及规律、设计方法、性能测试及性能评定等逻辑脉络,循序渐进,逐步深化,使学生树立起自主设计新型含能元器件的创新意识,培养其综合运用多学科知识和技术方法解决工程实践问题的能力,为学生从事火工品及动力源装置设计打下理论与技术基础。

本书注重微爆炸理论与现代含能元器件技术的相互交融,并大量引用国内外公开发表的相关学术成果,本书的出版旨在国防特色专业学生的培养,适用于特种能源技术与工程、弹药工程与爆炸技术、爆破工程、安全工程、航空宇航推进理论与工程等国防专业学生,也可从事火炸药、武器弹药研究的工程技术人员提供帮助和参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

含能元器件设计原理 / 焦清介等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2020.3
ISBN 978-7-5682-5100-6

I. ①含… II. ①焦… III. ①元器件-设计 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 316577 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 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 26.5

字 数 / 622 千字

版 次 / 2020 年 3 月第 1 版 2020 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 76.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 张海丽

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

作 者 序

本书的前身《火工品设计原理》属于“九五”国家级重点教材，曾荣获2002年全国普通高等学校优秀教材二等奖。自1999年出版至今一直是众多兄弟院校选用的本科生教材，也是行业内科研院所、工厂企业、部队等广泛使用的参考书。虽然近年来图书市场上出现了一些相关的著作，如《军用火工品技术》《火工品工程》《军用火工品设计技术》等，然而这些书籍都是从工程设计的角度编写的，主要针对工厂、企业以及科研单位的技术人员等读者群体，不适用于高等学校学生的专业基础教育。国外只有炸药学、含能材料学等的相关基础理论的专著，对于含能元器件设计原理介绍篇幅很少，难以满足火工品设计基础理论教学的需求。

随着火工品知识体系的更新换代，新产品、新技术、新材料的迅猛发展，火工品设计相关的技术近二十年来发生了深刻变革，沿用20世纪的旧教材已经无法满足火工品设计的基本要求，因此我们对原教材的设计思想、设计原理和设计方法进行大量的补充和完善；将火工品设计涵盖的内容划分为《含能元器件设计原理》和《火工品集成与测试》两个部分。其中《含能元器件设计原理》是设计理论和设计方法的基础。该教材关注构成复杂火工品的各类含能器件的基本作用原理，数学模型及求解；大量补充国内外21世纪新出现的新型含能元器件的设计方法；大幅删减和重组原本科生教学中简单的火工器件说明章节。新教材特色在于基础知识的扎实和创新技能的培养，更符合“双一流”大学的人才培养方针。本书既有鲜明的工程背景，又紧扣当代火工品发展的主旋律，适用于特种能源与工程、弹药与爆破工程、安全工程、航空宇航推进理论与工程等国防专业学生，也可为从事火炸药、武器装备工作的工程技术人员提供参考。

本书广泛吸收了国内外近十年来相关基础理论研究和部分工程实践成果。其中相当部分为编写组成员自主研究成果。第1、3、4、5章由焦清介编写，第2章由朱艳丽编写，第5、6章由任慧编写，第7章由严楠编写，第8章由闫石编写，第9章由聂建新编写。整书校对和审稿工作由焦清介、任慧完成。在编写过程中学科组博士生徐新春、杨贵丽、赵婉君、闫涛、李雅茹、王秋实、刘荣强以及硕士生宋海通、唐伟强、周庆、李小雷同学均承担了部分科研与编撰工作，在此对他们的辛勤劳动表示感谢。

目 录

CONTENTS

第 1 章 概论	001
1.1 火工品的种类与特点	001
1.1.1 火工品种类	001
1.1.2 火工品技术内涵	002
1.1.3 在武器装备中的地位	002
1.1.4 主要特点	002
1.2 火工品发展进程	003
1.2.1 古代火工品	003
1.2.2 近代火工品	004
1.2.3 现代火工品	005
1.3 火工品的军事用途	007
1.4 火工品分类及设计	008
1.4.1 火工品分类	008
1.4.2 含能元器件与火工品设计	009
1.5 火工品发展趋势	010
习题与课后思考	011
参考文献	011
第 2 章 储能元件基础	012
2.1 电容器	012
2.1.1 电容器的定义	012
2.1.2 电容器的特点	012
2.1.3 电容器的作用	013
2.1.4 电容器的分类	014
2.2 恒流源	015
2.2.1 恒流源的特点及基本原理	016
2.2.2 恒流源构成	018
2.2.3 恒流源分类	019
2.3 激光器	020
2.3.1 激光器的基本组成	020
2.3.2 激光器的种类	022

习题与课后思考	026
参考文献	026
第3章 换能元件	028
3.1 金属桥丝换能元	028
3.1.1 桥丝换能原理	028
3.1.2 金属桥丝换能实验	031
3.2 金属桥带换能元	036
3.2.1 换能模型	036
3.2.2 换能元换能实验	037
3.3 半导体桥换能元	040
3.3.1 工作原理	042
3.3.2 电阻理论计算	045
3.3.3 换能模型	052
3.4 爆炸箔冲击片换能元	060
3.4.1 工作原理	060
3.4.2 金属导体电爆炸现象	061
3.4.3 金属电爆炸模型	065
3.5 激光换能元	076
3.5.1 典型的激光换能元	076
3.5.2 激光能量传输规律研究	077
习题与课后思考	093
参考文献	094
第4章 发火组件	096
4.1 桥丝发火组件	096
4.1.1 桥丝发火组件发火原理	096
4.1.2 桥丝发火影响因素分析	100
4.1.3 临界发火电流实验	101
4.1.4 临界发火电压实验	102
4.1.5 实验与理论计算对比	103
4.2 金属桥带发火组件	107
4.2.1 金属桥带发火组件工作原理	107
4.2.2 发火组件发火实验	108
4.2.3 金属桥带发火组件影响因素分析	111
4.3 SCB 发火组件	113
4.3.1 SCB 发火组件发火模型	113
4.3.2 SCB 发火组件发火实验	117
4.3.3 SCB 发火组件发火的影响因素分析	122
4.4 爆炸箔发火组件	128
4.4.1 爆炸箔驱动飞片模型	128

4.4.2 一维流体力学模型	130
4.4.3 爆炸箔冲击片冲击试验方法	136
4.5 激光发火组件	140
4.5.1 激光作用于含能材料的能量转换	140
4.5.2 激光-介质-含能材料序列的换能原理	163
习题与课后思考	177
参考文献	178
第 5 章 传爆元件	179
5.1 爆轰传播元件	179
5.1.1 直线装药	179
5.1.2 拐角装药	184
5.1.3 弯曲装药	194
5.2 爆炸传递元件	201
5.2.1 空腔	201
5.2.2 隔板	210
5.2.3 飞片	225
习题与课后思考	234
参考文献	234
第 6 章 爆炸输出器件	235
6.1 同步爆炸网络	235
6.1.1 刚性面同步爆炸网络设计原理	235
6.1.2 刚性直线同步爆炸网络设计原理	238
6.1.3 刚性圆周线同步爆炸网络设计原理	241
6.1.4 柔性导爆索接头设计原理	244
6.1.5 柔性同步爆炸网络设计原理	250
6.2 爆炸逻辑网络	253
6.2.1 爆炸零门	253
6.2.2 爆炸与门	260
6.2.3 “多选一输出”爆炸逻辑网络	265
6.2.4 “二入四出”爆炸逻辑网络的模块化设计	270
6.2.5 “多选任意输出”爆炸逻辑网络	273
习题与课后思考	282
参考文献	282
第 7 章 动力输出器件	284
7.1 驱动器件	284
7.1.1 机械做功型驱动类火工器件	284
7.1.2 产气型驱动类火工器件设计	287
7.2 切割器件	291
7.2.1 聚能切割分离器件设计	291

7.2.2	膨胀管分离器件设计	293
7.3	推冲器件	296
7.3.1	短脉冲推冲序列原理研究	296
7.3.2	短脉冲推冲器燃烧做功原理	300
7.3.3	短脉冲推冲序列方法研究	302
7.3.4	原理与方法的验证	306
7.4	分离器件	312
7.4.1	爆炸螺栓设计	313
7.4.2	分离/解锁螺栓设计	316
7.5	点火器件	317
7.5.1	金属点火管设计	318
7.5.2	可燃点火管设计	319
7.5.3	双管点火管	320
	习题与课后思考	322
	参考文献	322
第 8 章	性能测试与试验	324
8.1	感度测试	324
8.1.1	撞击感度	324
8.1.2	摩擦感度	325
8.1.3	热感度	327
8.1.4	电磁环境试验	327
8.2	环境适应性试验	331
8.2.1	热环境适应性试验	331
8.2.2	潮湿环境试验技术	334
8.2.3	力学环境试验技术	341
8.3	传爆元件输出性能测试	357
8.3.1	爆压测试方法	357
8.3.2	飞片速度测试方法	363
8.4	发火组件输出性能测试	370
8.4.1	作用时间测试技术	370
8.4.2	发火能量测试	372
8.4.3	引燃型发火组件输出测试	377
	习题与课后思考	379
	参考文献	380
第 9 章	火工系统数值仿真	382
9.1	多物理场仿真软件	382
9.1.1	基本原理	382
9.1.2	软件介绍	383
9.1.3	仿真算例	387

9.2 非线性动力学仿真及软件	389
9.2.1 基本原理	389
9.2.2 仿真软件	392
9.2.3 经典算例展示	393
9.3 含能器件作动过程仿真	397
9.3.1 换能元设计	397
9.3.2 火工品力学响应仿真	400
9.3.3 换能元与发火件的有限元仿真	404
9.3.4 爆轰波在弯曲装药中的传播仿真	408
9.3.5 装药驱动飞片仿真	412
习题与课后思考	413
参考文献	414

第1章

概 论

含能元器件是一类具有高功率密度、高反应速率的化学能源器件，是构成各种类火工品的基本单元，广泛应用于点火、起爆和航天系统控制。含能元器件是确保武器装备安全、可靠地发挥作战效能的关键技术，也是一门多学科融汇、交叉性很强的技术，其涉及物理、化学、力学、机械、控制等基础技术领域。含能元器件通常要在高过载、极端热作用和强干扰环境下可靠工作，技术难度大，是各国武器装备竞相发展的制高点。

由各类含能元器件集成的现代火工品是武器装备发射控制、飞行控制和毁伤控制系统的终端执行机构。现代火工品通过换能元件将控制信息（或能量）转换为发火能量，经发火组件激发火工药剂化学反应，再使用传爆传火元件以及爆轰输出、燃烧输出和动力输出器件，为导弹、火箭、卫星、飞船的各类控制系统提供高能量密度化学能源和脉冲动力源^[1]。

依据使用的含能元器件种类和集成方式不同，火工品的种类多种多样，各类火工品的作用和性能也取决于含能元器件的性能。因此，设计火工品必须首先设计含能元器件。

1.1 火工品的种类与特点

1.1.1 火工品种类

火工品种类繁多、大小不一、形态各异，但都有共同的要素，即：火工品由换能元、用于发火和传爆传火的火工药剂，以及实现能量传递和放大的火工序列构成，如图 1.1 所示。

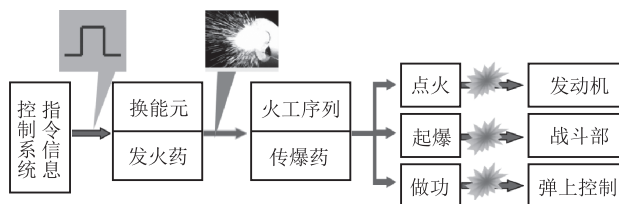


图 1.1 火工品的基本构成与作用

换能元是火工品的首发元件，它将控制系统指令信息（或能量）转换为发火能量，激发药剂化学反应而发火。在各种火工药剂中，用于接收换能元输出能量而发火的火工药剂称为发火药（包括起爆药、点火药、针刺药、击发药和特种炸药等）；用于传爆序列的火工药剂称为传爆药和传火药，包括导爆药、扩爆药等；用于传火序列的火工药剂称为传火药，包括引燃药、扩燃药、延期药等。在火工品中，各种火工药剂与换能元和火工序列一道构成发火组

件、传爆（传火）器件、能量传递器件、能量放大与输出器件等^[2]。

1.1.2 火工品技术内涵

1. 总体系统

总体系统主要分为发射点火系统、弹上做功系统和战斗部起爆传爆系统。总体系统技术以武器系统需求为背景，主要研究含能元器件总体设计、界面能量匹配与耦合、系统组合与集成、单元器件与输入、输出端的接口以及环境适应性等技术。

2. 换能元技术

换能元技术主要包括脉冲功率源、换能元材料与基体、嵌入式微芯片、换能元集成与封装等技术。主要研究换能元结构设计、高效敏感能量输入、能量转换、信息识别以及环境加固等技术。

3. 火工序列技术

火工序列技术主要包括传爆传火序列结构和装药、能量输出以及序列集成、加固等技术。主要研究柔性性与刚性爆炸网络爆轰传播、界面能量传递、能量放大技术，光纤网络的功率传输以及电爆网络电磁兼容等。

4. 火工药剂技术

火工药剂技术主要包括起爆药、传爆药、点（传）火药、延期药等技术。主要研究单质含能化合物分子设计与合成、晶体形貌与品质控制、微纳米材料制备等技术，以及药剂结构（分子结构、晶体结构、组分结构）与感度及能量的关系等。

5. 含能元器件与火工集成、测试与评估技术

含能元器件与火工集成、测试与评估技术主要研究含能元器件和药剂的性能分析与测试技术，其评估技术主要包括含能元器件安全性、可靠性，火工品环境适应性及寿命的试验与评估。

1.1.3 在武器装备中的地位

含能元器件与火工品是武器装备的首发元件和最敏感部件，在较小的外界刺激作用下易被激发，完成作用，实现预定的功能，广泛用于火炮、发动机点火，核武器、常规武器起爆，各种火箭、导弹、飞行器、航天器的姿态控制、分离、解锁等，对保障海、陆、空、火箭军等武器装备安全、可靠地发挥作战效能至关重要。

1.1.4 主要特点

武器系统从发射到毁伤整个作用过程均是从含能元器件的首发作用开始，几乎所有的弹药都要配备一种或多种元器件。作为决定武器系统最终效能的含能元器件，其具有以下特点：

（1）功能首发性。典型的点火火工品作用过程：底火→发射药或火帽→点火具（或传火管）→增程火药；典型的起爆火工品作用过程：电点火管（火帽）→火焰雷管→导爆管→传爆管和主装药或针刺雷管（或电雷管）→导爆管→传爆管和主装药，首发器件都是换能元与发火组件。

（2）作用敏感性。含能元器件在武器系统中是最敏感的元件。其中所装填的含能材料是武器系统所用药剂中感度最高的，如在点火序列中药剂火焰感度从高到低的顺序为点火药→

延期药→发射药或推进剂；在爆炸序列中药剂的冲击波感度从高到低的顺序为起爆药→传爆药→主装药。

(3) 使用广泛性。含能元器件广泛应用于常规武器弹药系统、航空航天系统及各种特殊用途系统。为有效打击各种目标，适应未来战争和作战环境，含能元器件的经典功能如点火、传火、起爆、传爆等已经无法满足日益发展的武器装备使用要求，目前已逐步拓展到可以实现定向起爆和可控点火等更高层次的用途。含能元器件的作用不仅仅体现在初始点火起爆这一环节，更全面体现在武器系统的战场生存、运载过程精确修正以及准确打击等众多环节。

(4) 作用一次性。含能元器件是一次作用元件，作用功效完成后，再次接受外界刺激时产品功能无法重现。

1.2 火工品发展进程

1.2.1 古代火工品

古代火工品的发展历经上千年的历史，它是伴随黑火药的使用而逐步发展起来的，史料记载公元 808 年古人发明了由硝石、硫磺和木炭组成的火药。之后宋代《九国志》记载公元 904 年使用“飞机发火”时采用的引线，是火工品的雏形^[3]。该产品在硬纸管中装黑火药制成引火柱（信管），或用软纸包黑火药制成纸绳用作引火线（信线），基本具备了近代传火管和导火索的形态和要素。以信管和信线为代表的古代火工品极大地促进了黑火药武器的发展。直到公元 19 世纪，黑火药一直是军事和民用唯一使用的炸药，而信管和信线是必不可少的引火装置。如图 1.2 所示为中国古代常用的热兵器。

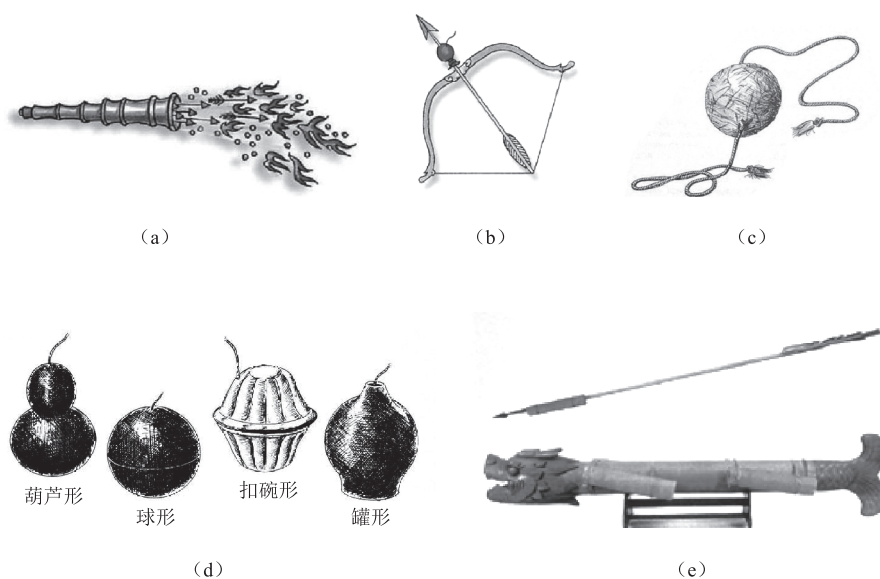


图 1.2 古代热兵器

(a) 突火枪；(b) 火药箭；(c) 火球索；(d) 震天雷；(e) 火龙

1.2.2 近代火工品

长期以来，黑火药在武器系统中是唯一的火工药剂，它既是点火药也是延期药，还用作发射药。1799年研制成功雷汞，雷汞雷管促进了近代高能炸药的发展。1807年苏格兰人首先发明了以氯酸钾、硫、碳混合的击发药引燃发射药，并获得带有击发机构的枪械的专利。将击发药放于两张蜡纸之间黏合，在手射武器的发射机构中，由撞机冲击发火。1814年美国首先试验将击发药装在铁盂中用于枪械。1817年英国人采用铜盂装击发药，并称装有击发药的铜盂为火帽。1844年法国人将硝化棉塑化制成单基发射药，1888年诺贝尔用硝化棉吸收硝化甘油制成双基发射药。自此使用了近千年的黑火药逐步退出炸药和发射药领域，炸药和发射药开始按各自的方向发展，由此丰富和带动了火工品的发展。

近代火工品发展划时代的里程碑是1866年瑞典工程师A. B. 诺贝尔发明的雷汞雷管，以及用雷管引爆炸药产生高级爆轰的技术。第一个火帽式枪械于1817年引入美国，1832年成为美国军队的装备^[4]。此后火帽成为手射武器引燃发射药的优良火工品，获得了迅速发展。火帽的应用对武器技术的发展有重要意义，成为后来改良武器的基础。火帽主要用于有金属壳的子弹，将其置于子弹药壳的中心，由枪机撞击发火。现代自动枪弹仍采用此结构。19世纪末的研究将撞击火帽装入传火管，用此组合件在火炮上点燃发射药。1897年由火帽和点火药组成的组合件发展成撞击式底火后，发射点火用火工品开始形成。1831年英国人W. 毕克福发明了导火索，外壳用皮、布和纸制成，药芯为火药。它是我国古代信线的发展。现用导火索的药芯装药为黑火药或烟火药，外壳用棉线、纸条、玻璃纤维、塑料等包缠。1908年法国最先制出了铅壳梯恩梯药芯导爆索。

19世纪末20世纪初又相继研制成氮化铅、四氮烯、三硝基间苯二酚铅等起爆药，为火工品性能改善与品种增加提供了有利条件。1907年德国人L. 维列里发明了装氮化铅起爆药的雷管，代替了雷汞雷管。19世纪初法国人发明了电火工品。1830年美国首先将电火工品用于纽约港的爆破工程，20世纪初开始用于海军炮。电火工品的出现促进了兵器和爆破技术的进步。图1.3所示为部分近代火工品。

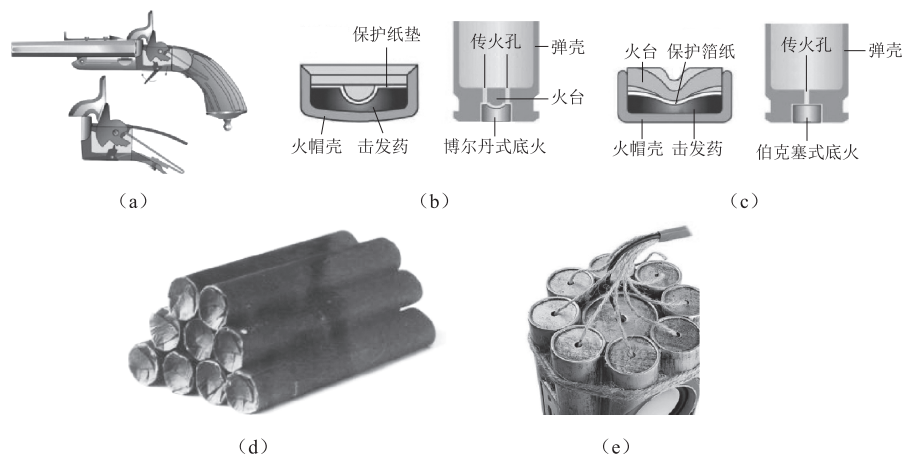


图 1.3 近代火工品

(a) 火帽枪械；(b) 博尔丹式底火；(c) 伯克塞式底火；(d) 雷汞雷管；(e) 导火索

1.2.3 现代火工品

随着现代武器不断出现，武器系统对火工品的控制方式及要求的功能不断增加。为保证其使用安全性、作用可靠性，火工品自身能量转换方式以及实现能量传递与放大的结构也不断更新。自 20 世纪初至今，火工品发展大致经历了以下四个阶段。

1. 第一阶段

第一阶段是以机械（撞击、针刺、摩擦等）方式刺激发火的引信火工品和枪炮发射点火工品，主要有引信雷管及其传爆序列和发射点火火帽、底火及其传火序列两类。典型产品为雷管、火帽、底火、传爆药柱和传火药包等。这一阶段火工品主要用于现代兵器，在第一次世界大战中发展迅速，到第二次世界大战后基本成熟。其特征为运用机械换能元——动能/热能换能原理，使用雷汞、糊精叠氮化铅等敏感药剂，采用单点输出序列。图 1.4 所示为手枪底火。



图 1.4 枪械类底火

2. 第二阶段

第二阶段是利用电能发热而激发的火工品，主要有电热桥丝、桥带和桥膜火工品，其中电热桥丝火工品最具代表性，最早应用于二战期间。由于破甲弹需要严格的炸高，对雷管的瞬发度要求极高，机械雷管已无法满足要求，出现电热桥丝雷管。二战后，随着火箭弹、导弹技术的发展，电热桥丝点火具和动力源火工品不断出现，到 20 世纪 60 年代末基本发展成熟。其特征为：运用电热换能元——电能/热能换能原理，使用叠氮化铅、斯蒂酚酸铅等敏感药剂，仍旧采用单点输出序列。图 1.5 所示为电雷管结构与实物。

3. 第三阶段

第三阶段是以电能输入，以等离子体、冲击片、激光等能量形式激发的光电火工品，主要有半导体桥火工品、爆炸桥丝火工品、冲击片火工品、激光火工品等。使用感度选择性药剂，采用网络、阵列等新型序列结构，具有多点起爆、多点点火，提高了本质安全性，加强了抗环境能力，能够更好地满足复杂武器系统的要求。典型产品是非隔断起爆与点火系统、半导体桥多点点火系统以及爆炸网络起爆系统。其特征为：运用短脉冲冲击、等离子体、激光等换能原理，使用感度选择性药剂，通过网络、阵列型非线性结构，可实现多点起爆与点火，有利于提高武器弹药的威力。图 1.6 所示为几种典型的第三代火工品。

4. 第四阶段

能适应信息化武器和微武器发展的新概念火工品，是火工品的发展方向。发达国家从 20 世纪 80 年代末开始基础研究，90 年代开始技术研究，目前仍处于应用研究阶段。主要有信息化可寻址集成式起爆系统、点火与脉冲推冲器系统、微机电（MEMS）火工系统等。

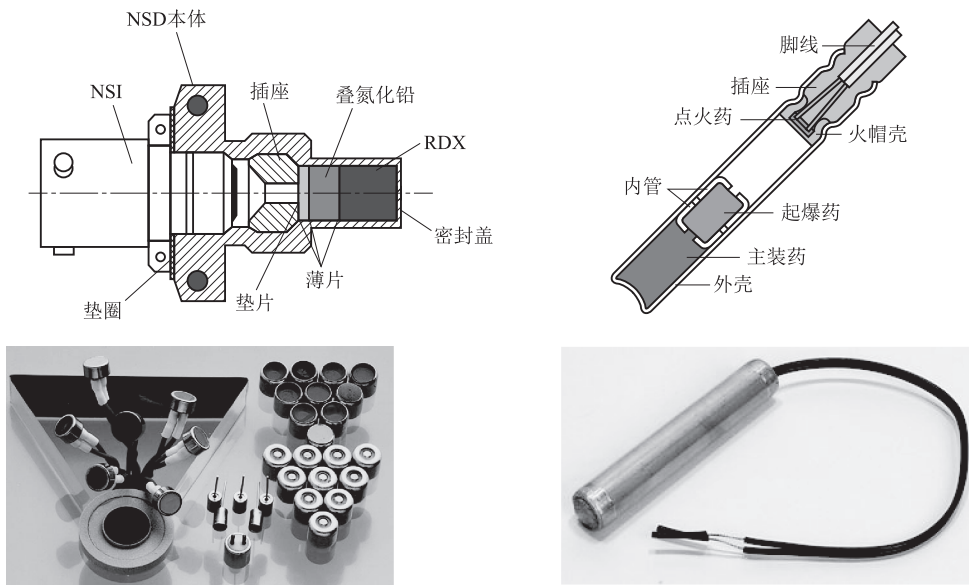


图 1.5 电雷管结构与实物

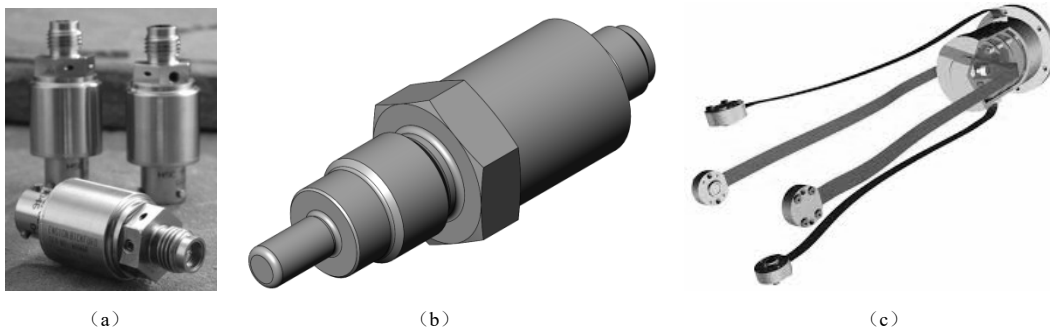


图 1.6 若干第三代火工品

(a) 半导体桥雷管；(b) 激光雷管；(c) 爆炸箔起爆装置

其特征为：换能元信息化、结构微型化、系统集成化。现代火工品如图 1.7 所示。

随着科学技术的进步，必将进一步推进火工技术新思想、新概念、新应用的产生与发展。第一阶段和第二阶段的火工品也称为传统火工品，先进火工品则包括第三阶段与第四阶段的火工品。二者的区别在于先进火工品能准确识别控制信息，最大限度克服环境干扰，具有高安全、高可靠与高效能。具体区别如表 1.1 所示。

表 1.1 传统火工品与先进火工品的区别

类别	传统火工品	先进火工品
换能方式	线性换能	非线性换能
药剂种类	敏感药剂	特征感度与特征功效药剂
输出模式	单点输出	多维、多点输出

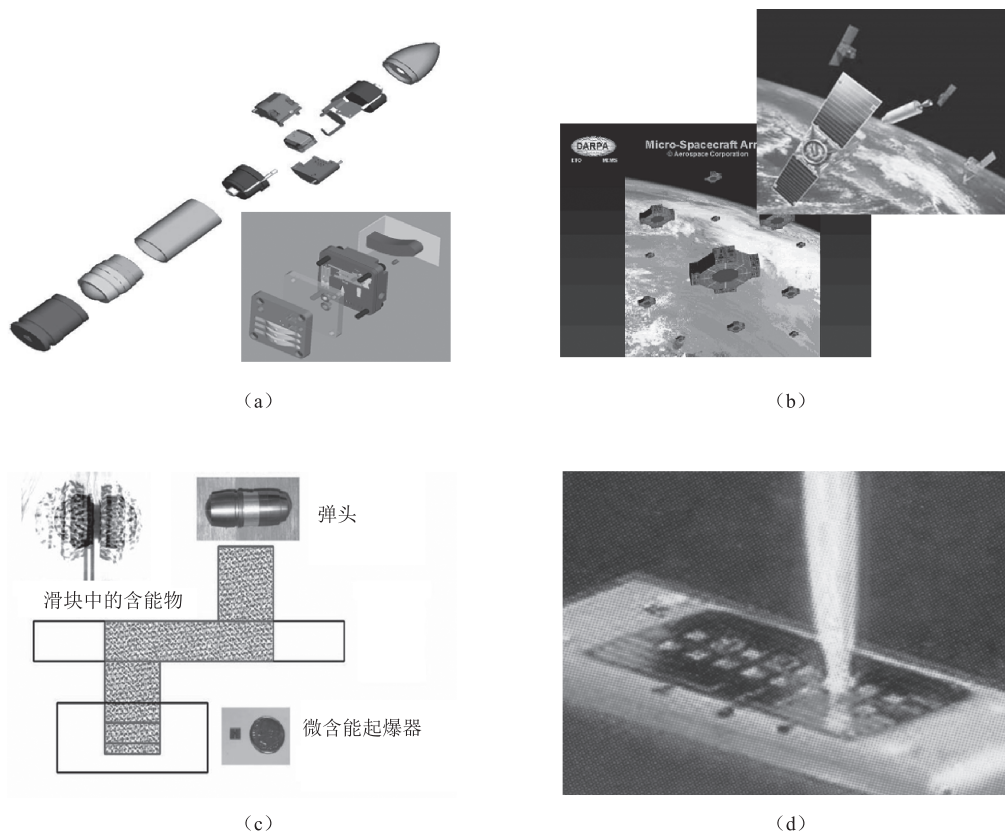


图 1.7 现代火工品（第四阶段）

(a) 小口径弹药；(b) 微飞行器 and 微卫星编队；(c) 微型起爆系统；(d) 微型推冲器阵列

1.3 火工品的军事用途

火工品在军用上主要是组成武器弹药的点火传火序列和引爆传爆序列。所谓序列，一般是通过一系列感度由高到低、威力由小到大的火工品组成的激发系统。它能将较小的初始冲能加以转换、放大或减弱，并控制一定的时间，最后形成一个合适的输出，适时可靠地引发弹丸装药^[5]。现举例说明^[6,7]：

1. 加农炮全装药杀伤榴弹

该弹上膛发射时，首先由点火系统起作用。即击针撞击 DJ-4 底火，底火发火点燃点火药，再引燃药筒内的发射药。发射药燃烧产生高压气体，把弹丸推出炮膛。弹丸到达目标后，则由榴-3 引信中火工品组成的引爆系统起作用，达到适时可靠地引爆弹丸中的猛炸药。

2. 火箭筒破甲弹

该弹扳机击发底火后，底火火焰点燃火箭筒中的发射药把火箭送出去，并点燃曳光管指示弹道。火箭发射的同时，火箭弹中的惯性点火装置使火帽发火，点燃点火具，经过一定时间的延期后点燃增程火药。增程火药燃烧生成的气体，由装在发射机头部外边的喷气孔喷出，使火箭加速并增加射程。火箭弹触及目标后，同样由引信中的引爆系统起作用从而使战斗部

发挥威力。

3. 榴-2 引信

这是具有远距离解除保险的全保险型弹头着发引信，配用于 57 mm 高射炮杀伤榴弹。该引信由着发机构、隔离装置、远距离解除保险机构、自炸机构和传爆装置等组成。隔离装置中有一个 U 形转动盘座，座上装有雷管座，供装 LZ-4 雷管。雷管座在转动盘中能绕轴转动。在雷管座侧面的下方有两个凹槽，分别供装两个离心子及保险药柱与弹簧。这两个离心子平时将雷管座固定在倾斜位置上，使雷管上与击针、下与导爆药都错开一个角度，处于隔离状态。远距离解除保险机构中装有膛内点火机构，内含击针、弹簧、HZ-2 火帽及保险黑药柱。发射时，火帽受惯性力作用碰击击针发火，点燃保险药柱。药柱燃烧时间能保证弹丸飞离炮口 20 m 以外，燃完后离心子飞开，雷管座转正，引信解除保险。自炸机构内装延期药盘，其上端装有点火接力药，下端装有加强接力药与导爆药柱相接。发火时点火机构将火焰从侧面传给保险药柱，从下面传给延期药盘，经过 9~12 s 后，弹丸未触及目标即起作用使导爆药爆炸。导爆药下面接传爆药柱。由此可见，榴-2 引信内装有雷管、火帽、保险药柱、接力药、延期药盘、导爆药、传爆药等多种作用的火工品。

由上述可见，火工品在弹药中的作用主要可分为三类：

- (1) 作为弹药点火系统和引爆系统的元件，如火帽、雷管、导爆药、传爆药、点火药、底火、传火管等。
- (2) 作为引信时间控制的元件，如延期药（控制引信到达目标一定时间发火）、火药保险（控制引信机构出炮口后一定时间解除保险）和时间药盘（控制引信机构适当时间后起作用）等。
- (3) 作为引信机构的能源和完成特种功能，如火药推进器（产生火药气体推动引信机构动作）和曳光管（指示弹道）等。

除了组成弹丸的点火、引爆系统外，火工品还用于切割、分离、气体发生、瞬时热量供给、遥测和遥控开关闭合、座舱弹射等多种工作^[8]，在军事国防和工业民用领域均发挥着重要的作用。

1.4 火工品分类及设计

1.4.1 火工品分类

根据使用要求的不同，火工品结构和形状各有差异，其输入冲能的形式和大小有差别，在输出方面也有较大的不同。

火工品分类方法大致有两种：一种是按换能元的种类划分，即分为热、机械、冲击波、电、光和其他换能方式的火工品，如针刺火帽、火焰雷管、电点火具、激光点火装置等；另一种是按输出器件的种类划分，即分为引燃类火工品（包括火帽、底火、引火头、点火具、导火索等）、引爆类火工品（包括雷管、导爆管、传爆管、导爆索等）、时间类火工品（包括延期管、时间药盘、保险药柱等）和其他火工品（包括曳光管、抛放弹、射钉弹、切割索、爆炸开关和气体发生器等）四大类。