

ENGINEERING DESIGN AND
TEST TECHNOLOGY
OF INITIATORS
& PYROTECHNICS

火工品

工程设计与试验

王期民 张学舜 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

火工品工程设计与试验

Engineering Design and Test Technology of Initiators & Pyrotechnics

王凯民 张学舜 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

火工品工程设计与试验 / 王凯民, 张学舜著. —北京:
国防工业出版社, 2010. 9

ISBN 978 - 7 - 118 - 07081 - 1

I. ①火... II. ①王...②张... III. ①火工品 -
设计 ②火工品 - 测试技术 IV. ①TJ45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 164204 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 21 $\frac{3}{4}$ 字数 385 千字
2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 60.00 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

序 一

火工品是武器、弹药及其他燃爆装置的基本元、器件,用于点燃、起爆火炸药,或对装置完成启动和做功等程序。在常规武器弹药、战略导弹、核武器及航空航天等领域均有大量的应用。火工品既是做功的元件,也是装置作用过程的控制器件,因此,它的安全性和可靠性将直接关系到武器、装置作用的精确性。这方面的任何偏离,都可能导致武器、装置的作用失效或重大事故。而且,随着高新武器的发展,对火工品安全性和可靠性的要求也越来越高。

《火工品工程设计与试验》就是以安全性和可靠性为重要内容,论述火工品设计方法和鉴定技术的专著。专著融入系统提出的可靠性指标,强化了安全性和可靠性,丰富了理论与计算的内容,是在传统、半经验性设计方法的基础上,发展和提升了火工品的工程设计技术,设计方法可以实际应用。作者又从武器使用和火工品应用环境的角度进行分析,归纳提出了火工品性能试验技术和鉴定检验与失效分析技术,技术获得验证和应用。

专著还充实了近年来作者的研究内容,包括火工品的可靠性与贮存寿命评估、定型试验设计、针刺火工品感度与作用性能试验等诸多方面的成果,有新的突破和创新。

我读过本书之后有不少收获,总的感觉是专著的特点明显,是火工品行业具有理论和工程应用价值的专著。由作者发展和提升的火工品工程设计技术,把工程设计、工程试验与火工品固有可靠性、本质安全性、产品精确性和产品质量评价建立了联系,所论述的内容是当前火工品需要探讨和需要解决的科学内容,对火工品在武器弹药和航天技术中的应用具有很强的现实指导意义。

专著的两位作者王凯民博士、张学舜博士,是知名的火工品专家,学术功底深厚、理论和实践成果丰硕。我相信,专著的出版,将对提高我国火工品工程设计与试验水平,产生积极、有效的促进作用;为火工品领域的科技人员,

武器弹药等有关的专家、研究生提供了学习、借鉴的手段和机会。

火工品的设计理论和设计方法还需深入发展,研究远没有结束。希望各位专家、学者,我们一起给予作者衷心的支持,对专著予以指正和批评。

预祝作者在后续研究中,取得更辉煌的成绩!

中国工程院院士



2010年6月15日

王泽山,著名火炸药专家,南京理工大学教授,博士生导师。

序 二

很高兴,再次看到王凯民博士有关火工品技术新著的出版。

随着火工品功能的不断拓展,它已成为武器和航空、航天系统不可缺少的重要组成部分。系统中的火药点燃,炸药起爆以及某些关键程序动作和任务的实现,都要由火工品来完成。这些系统小到手枪、手榴弹,大到人造卫星、宇宙飞船都会用到一个、几个、几十个,甚至几百个火工品。随着任务的需求,部分火工品又逐渐发展成为火工装置和火工系统,对火工品可靠性安全性要求也越来越高。相应的,火工品也越来越受到系统设计人员和使用人员的关注。这就更需要火工品首先能从工程设计上予以保证;其次,能在后续的鉴定或验收等工程试验中予以验证。可见,开展火工品工程设计与工程试验研究对保证火工品质量乃至整个武器装备质量都具有重要意义。

由于火工品尺寸小,且其内部装药的爆轰或燃烧反应又处于非稳定状态,通常很难用数值模拟或仿真等手段进行预先设计,因此,火工品高可靠性设计在国内外均还没有成熟的方法。在本书中,作者从使用者最关注的问题着手,以产品技术要求为依据,在设计计算时首次将火工品性能、安全性、可靠性指标及抗各种环境干扰要求,由传统的经验设计发展为理论与经验相结合的系统设计。这是一套全新的方法,科学、实用,简单易行。

为实现产品技术指标在鉴定或验收等工程试验中得到验证,作者在组织完成各类火工品设计定型试验及相关技术管理的过程中,成功地完成了火工品长贮寿命及高可靠性的验收方法研究。这是火工品技术的一项突破。此外,还创新性地提出了一套能综合反映火工品性能的,具有可操作性的试验设计和考核方法,有实用价值。特别是鉴定试验方法,许多已推广应用于陆海空各军兵种及外贸产品的鉴定考核,效果明显。

我读过不少火工品类的书籍,如此系统地综合论述火工品工程设计和试验的专著,在国内外尚属首次。相信这一新著的出版将为指导火工品工程设计与试验实践,发挥重要且积极的作用。

本专著是两位作者长期从事火工品技术研究和型号管理所取得丰硕成果的集中体现。在这普遍忙于完成任务,少于深入思考科学发展的状况下,作者能身处装备论证和技术管理第一线,在繁忙工作之余,静下心来,耐住性子,参阅二百余篇文献,提出自己的见解,精心撰写出在行业内有较大实用价值的专著,表明了他们的勤奋努力和事业心。

这些是我阅读本书原稿的体会,也是对两位作者多年辛勤工作成果的致意。火工学科仍处于不断发展中,还有许多问题有待更进一步探索。衷心希望两位作者再接再厉,为国防建设做出更大的贡献。

北京理工大学教授



2010年6月25日

前 言

火工品具有能量质量比高、体积小而结构紧凑、长期贮存好、输入输出能量可控等特点,作为一种特殊能源,能在短时间内完成起爆、点火及做机械功,因此,它广泛应用于各类武器装备和民用爆破工程。火工品在武器弹药中的首发性和作用敏感性决定了它必须具有较高的可靠性和安全性。这种要求首先要通过设计予以保证,又要最终通过试验验收予以证明。

但长期以来,国内外普遍认为火工品是一种技术或“技艺”,而非一门科学。其原因之一是火工品专业一直缺乏具有普遍适应性的、实用可行的设计指南,设计仍主要沿用传统的“画+打”手段。尽管历年来不断有经费支持进行过此类研究课题,但一直未有大的实质性突破。这种状况需要靠大量艰苦的工作才能改变。原因之二是火工品行业普遍对系统的使用与环境要求知之甚少,缺乏与总体系统设计及论证者的深入沟通与交流,低配套地位也使总体对火工品缺乏完整的全面认识。因此,火工品通常被认为是一个容易获得的、从属于所应用子系统的、使用而无须理解的元件。相信本书在一定程度上有助于改变这种状况,这也是作者历时六年艰辛完成本书的初衷。

2006年初,作者撰写出版了《军用火工品设计技术》一书,它较为全面地总结了各类火工品设计技术,既初步满足了科研人员对新产品设计信息的需求,又有效推动了使用人员对新火工品的了解。与之相比,本书在工程实践基础上总结的理论设计方法和鉴定试验技术,则是从工程科学角度上的一个全面的认识,并突出了火工品使用过程遇到的系统环境分析和试验验收技术。全书共分6章。第1章为绪论,简要介绍了火工品的特性和用途,回顾了火工品的发展历程,分析了火工品工程设计和工程试验的技术内涵;第2章、第3章分别系统阐述了火工品和火工系统的可靠性与安全性设计技术;第4章至第6章分别详细论述了火工品通用环境试验技术、性能试验技术和鉴定检验与失效分析技术。其中,火工品可靠性安全性设计技术、传爆序列破片起爆技术、电激发火工系统电磁安全性评估系统、火工品通用环境试验技术、针刺火工品感度与作用性能试验技术、火工品高可靠性验收技术、火工品贮存寿命评估技术、火工品设计定型

试验技术和抽样检验试验技术均是作者近年来苦心钻研的劳动结晶,有一定的原创性,愿与火工行业同仁共享。

本书第1章~第4章由王凯民同志撰写,第5章、第6章由王凯民、张学舜同志共同完成,全书由徐振相教授审阅。王泽山院士、蔡瑞娇教授在百忙中为本书欣然作序,并对作者给予奖掖、揄扬,在此致以深深的感谢;在撰写过程中,得到单位各级领导及同事们的大力支持和帮助,特别是沈晓军、游宁、孙韬等同志提出了诸多建议,也一并致谢。因作者水平有限,本书肯定会存在错误或不当之处,恳请批评指正,以便修订。

作者

2010年8月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 火工品概述	1
1.1.1 火工品特性与用途	1
1.1.2 火工品发展历程与类别介绍	2
1.2 火工品工程设计与试验技术内涵	3
1.2.1 火工品工程设计技术	3
1.2.2 火工品工程试验技术	4
1.2.3 工程设计与试验是火工品质量保证的重要环节	4
参考文献	5
第 2 章 火工品可靠性与安全性设计	6
2.1 概述	6
2.1.1 火工品可靠性、安全性与共性要求	6
2.1.2 火工品可靠性与安全性设计内容	7
2.1.3 火工品可靠性与安全性设计方法	8
2.2 电火工品输入可靠性设计技术	9
2.2.1 电火工品感度分布及变差系数分析	9
2.2.2 电火工品输入可靠性裕度设计方法	11
2.2.3 典型电火工品裕度法感度设计实例	14
2.2.4 电火工品发火件设计实例	16
2.3 机械火工品输入可靠性设计技术	24
2.3.1 机械火工品感度分布及变差系数分析	24
2.3.2 机械火工品输入可靠性裕度设计方法	25
2.3.3 典型机械火工品裕度法感度设计实例	27
2.3.4 机械火工品输入可靠性经验设计方法	31
2.4 起爆类火工品输出可靠性设计技术	32
2.4.1 小尺寸装药的爆轰传递	32

2.4.2	雷管装药基本要求及药量匹配	35
2.5	点火类火工品输出可靠性设计技术	40
2.5.1	点火类火工品装药量设计计算	40
2.5.2	点火器输出气体压力估算与应用	43
2.5.3	保证输出可靠的输入端结构强度设计	46
2.6	延期类火工品可靠性设计技术	51
2.6.1	秒级延期火工品设计技术	52
2.6.2	毫秒级延期火工品设计技术	60
2.7	火工品抗力学及热环境设计技术	65
2.7.1	火工品耐机械力设计技术	65
2.7.2	耐高过载火工品设计实例	67
2.7.3	火工品耐热环境设计	70
2.8	电火工品使用电磁环境及安全性设计要求	71
2.8.1	武器电磁环境及其对电火工品安全性的影响	71
2.8.2	电火工品安全性特征及其设计的一般考虑	76
2.8.3	电激发火工系统对电火工品的安全性要求	77
2.8.4	电火工品运输、装配过程的射频安全性	78
2.8.5	钝感电火工品的射频安全性	80
2.9	电火工品防静电设计应用	81
2.9.1	电火工品防静电设计技术	81
2.9.2	电火工品防静电设计应用	83
2.9.3	敏感电雷管生产、装配及使用过程中的防静电措施	88
2.10	电火工品抗电磁环境综合加固技术	88
2.10.1	桥丝式电火工品抗电磁环境加固设计	88
2.10.2	桥丝式电火工品综合抗电磁环境加固设计应用	90
2.11	桥带式钝感电火工品设计技术	91
2.11.1	桥带式电火工品设计原则与药剂选择	91
2.11.2	钝感电火工品发火件设计与制作	92
2.11.3	桥带式电火工品常见失效原因分析	95
2.11.4	桥带式电火工品作用时间和安全电流计算	96
2.12	半导体桥火工品设计技术	97
2.12.1	半导体桥火工品发火机理与特点	97

2.12.2	半导体桥形状及尺寸设计	99
2.12.3	钝感型半导体桥火工品设计技术	102
2.12.4	敏感型半导体桥火工品设计技术	104
2.13	火工装置输出可靠性设计技术	108
2.13.1	火工装置模块化设计技术	108
2.13.2	切割分离类火工装置可靠性设计技术	109
2.13.3	机械作用类火工装置可靠性设计技术	110
	参考文献	115
第3章	火工系统可靠性与安全性设计	118
3.1	概述	118
3.1.1	火工系统简介	118
3.1.2	火工系统可靠性与安全性设计内容	118
3.1.3	火工系统可靠性设计方法	119
3.2	传爆序列可靠性设计技术	120
3.2.1	传爆序列基本结构及要求	120
3.2.2	传爆序列冲击波爆轰传递可靠性设计	121
3.2.3	传爆序列破片撞击起爆理论及影响因素分析	126
3.2.4	典型传爆序列界面传爆试验及可靠性设计	130
3.3	引信传爆序列安全性设计技术	134
3.3.1	引信安全性设计与隔爆要求	134
3.3.2	传爆序列安全隔爆工程设计	135
3.3.3	引信传爆序列安全隔爆设计应用	136
3.3.4	传爆序列一点火序列转化中的安全性设计	138
3.4	火炮发射传火序列安全性设计	139
3.4.1	机械激发点火方式与射击安全性设计	139
3.4.2	某迫弹发射传火序列失效分析与改进设计	139
3.5	火箭发射传火序列设计技术	142
3.5.1	固体火箭发动机点传火装药匹配设计	143
3.5.2	固体火箭发动机点传火序列结构匹配设计	145
3.5.3	电点传火序列串联式装配界面设计	148
3.6	电发火系统电磁安全性总体设计技术	149
3.6.1	电发火系统设计总原则	149

3.6.2	电激发武器系统防静电设计技术	151
3.6.3	电发火系统防射频、防干扰设计技术	152
3.7	电激发点火系统电路射频接收理论计算	157
3.7.1	最不利情况下的射频接收特征曲线	157
3.7.2	非屏蔽电发火电路的射频接收计算	158
3.7.3	各类电发火电路接收射频计算说明	161
3.7.4	屏蔽电发火电路的射频接收理论计算	163
3.8	电激发点火系统电磁安全性评估系统	165
3.8.1	电激发点火系统电磁安全性评估系统设计概要	165
3.8.2	电激发点火系统电磁安全性评估系统使用介绍	166
3.9	典型电发火系统射频安全性能评估及改进设计	169
3.9.1	固体火箭发动机点火系统射频安全性能 评估及改进设计	169
3.9.2	具有滤波器的屏蔽电点火系统射频安全性能 评估及改进设计	171
3.9.3	导弹战斗部内电起爆系统射频安全性能评估	176
3.9.4	特定雷达场中内含电火工品弹药搬运时安全距离估算	178
3.10	火工系统冗余可靠性设计技术	181
3.10.1	复杂火工系统冗余可靠性设计	181
3.10.2	非电传爆系统完全冗余设计	182
3.10.3	简单火工系统冗余设计应用	183
	参考文献	187
第4章	火工品通用环境试验技术	189
4.1	火工品热环境试验技术	189
4.1.1	高温环境与试验	190
4.1.2	低温环境与试验	192
4.1.3	温度冲击环境与试验	193
4.2	火工品潮湿环境试验技术	194
4.2.1	火工品常温吸湿环境与试验	194
4.2.2	火工品湿热环境与试验	195
4.2.3	浸水环境与试验	197
4.3	火工品力学环境试验技术	198

4.3.1	火工品力学环境及其试验方法概述	198
4.3.2	刚性约束状态火工品运输试验	199
4.3.3	非刚性约束状态火工品运输试验	203
4.3.4	使用环境的火工品高频振动试验	205
4.3.5	火工品模拟发射环境高过载试验	208
4.3.6	火工品意外环境力的跌落试验	213
4.4	火工品电磁环境试验技术	214
4.4.1	电火工品杂散电流试验	214
4.4.2	电火工品静电感度试验	214
4.4.3	电火工品电磁辐照试验	216
	参考文献	217
第5章	火工品性能试验技术	219
5.1	火工品输入性能试验技术	219
5.1.1	电激发火工品输入性能试验	219
5.1.2	针刺火工品输入性能试验	220
5.1.3	其他火工品输入性能试验	227
5.2	火工品输出性能试验技术	229
5.2.1	火工品输出性能试验概述	229
5.2.2	火工品输出威力测试技术	229
5.2.3	火工品冲击波压力测试技术	234
5.2.4	雷管输出破片/飞片速度测量技术	240
5.2.5	火工品输出气体压力测试技术	246
5.2.6	火工品作用时间测试技术	248
5.2.7	底火强度模拟试验技术	251
5.3	火工品耐高过载性能测试技术	252
5.3.1	火工品惯性高过载性能测试技术	253
5.3.2	火工品组件高过载性能测试技术	255
5.4	火工品可靠性验收试验技术	258
5.4.1	火工品可靠性传统试验技术	258
5.4.2	火工品发火高可靠性验证技术	259
5.4.3	火工品发火可靠性试验程序及相关问题说明	263
5.4.4	可靠性结果表述与典型火工品作用可靠性验证	266

5.4.5	火工装置高可靠性验收试验技术	267
5.5	火工品加速寿命试验技术	271
5.5.1	加速寿命试验及火工品寿命影响因素概述	271
5.5.2	单一温度环境下火工品加速寿命试验技术	273
5.5.3	温湿度环境下火工品加速寿命试验技术	276
5.5.4	国外相关火工品标准加速寿命试验分析	279
5.5.5	火工品完整加速寿命试验程序及应用	282
5.6	火工品无损检测方法	285
5.6.1	电热响应性能无损检测技术	285
5.6.2	火工品结构无损射线检测技术	290
	参考文献	293
第6章	火工品鉴定验收与失效分析技术	295
6.1	火工品研制设计定型阶段的主要内容	295
6.1.1	火工品设计定型阶段的一般工作程序	295
6.1.2	设计定型研制工作总结报告实例	296
6.1.3	火工品设计定型审查资料要求	297
6.2	火工品设计定型试验技术	298
6.2.1	火工品设计定型试验大纲制定原则	298
6.2.2	火工品设计定型试验顺序及数量	300
6.2.3	典型火工品定型试验大纲实例	305
6.2.4	火工品定型试验报告实例	306
6.3	火工品抽样检验技术	307
6.3.1	抽样检验与抽样风险	307
6.3.2	火工品定型批抽样检验技术	310
6.3.3	火工品连续生产批抽样检验技术	311
6.3.4	火工品抽样检验实施中注意的几个问题	315
6.3.5	典型火工品一致性检验计数抽样方案实例	319
6.4	典型火工品失效分析技术简述	325
6.4.1	火工品失效分析程序	325
6.4.2	典型火工品失效分析	326
	参考文献	330
	后记	332

第 1 章 概 论

1.1 火工品概述

1.1.1 火工品特性与用途

火工品是在接收发火指令后,以较小能量激发其内装敏感药剂产生燃烧或爆炸,以其燃烧火焰、爆炸冲击波、高压燃气,实现点火、起爆、做功的一次性使用的元器件、装置和系统的总称。所以,火工品本质上是一种特殊能源,具有能量质量比高、作用时间短、起爆及输出能量可控、体积小及长期贮存好等特点。由于很少有其他能源能同时具备上述五种功能,所以,火工品在各类武器装备中广泛应用。作为各级控制系统与火力或动力系统之间的转换器和放大器,火工品能将控制信息转换为发射与推进系统的点火、武器毁伤系统的起爆及各种飞行器内部的做功功能等。随着高新武器装备及航空航天技术的发展,系统使用的火工品也越来越多,例如在美国的“水星”号飞船上使用了 46 件火工品,在“双子星座”号飞船上使用了 139 件,在“土星”号飞船上使用了约 150 件,在“阿波罗”飞船上使用了 314 件^[1]。从武器发射、飞行姿态调整到对目标的毁伤作用都离不开火工品的作用。

从火工品定义还可看出,火工品的另一特性是极端敏感性和使用一次性。这主要表现在内部装有敏感的爆炸材料,当遇到意外环境刺激时,可能提前作用;在发射前,不能完成功能检测等。但火工品的优点显然要远远大于其缺点,否则就不会被广泛应用。随着航天工程的实施及武器系统的复杂化,火工品内涵已经从最初的一个简单产品或元件发展到一种装置和作用分系统。在航天技术中,火工装置是指通过内装火工元件和装药的燃烧或爆炸作用,来推动一定的机构,完成释放抛放、切割破碎、驱动开关等机械功能的系列复杂装置的总称,而将其英文标准术语确定为 Pyrotechnics(简称 Pyros)而不是 Explosive device^[2],这主要是设计人员最初为减少航天工程管理者对使用火工品的担心而已。显然,我们常说的火工品在此只是火工装置中的一个元件。在航天设计中,除火工装置外,还大量使用了由多个火工元件及火工装置联成一体的、能完成一定功能的

火工系统,即非电传爆系统。所以,广义地讲,火工元件、火工装置和火工系统都称为火工品,它们是火工品应用中的三个重要层次^[3]。

1.1.2 火工品发展历程与类别介绍

1. 火工品发展历程

火工品主要由药剂和发火件的发火机理决定其性能,所以,应以最终性能发展或变化进行分代划分。第一代火工品是以雷汞为起爆药或含雷汞的药剂而制成的机械火工品和火焰类火工品,如最初的火帽、雷管、底火等,其安全性能不可控,不能适应武器的发展和使用;且雷汞本身有毒,这类火工品目前已完全淘汰。第二代火工品是采用氯化铅、三硝基间苯二酚铅(LTNR)为起爆药而制成的各类敏感型火工品,如电桥丝火工品、机械火工品和火焰类火工品,有一定的安全性,但其可靠性和安全性通常是一对矛盾体。就应用范围和数量而言,这类火工品在目前仍占绝对的统治地位。第三代为钝感火工品,其电安全性能满足1A/1W 5min不发火要求。主要产品有桥带式火工品、半导体桥火工品、爆炸箔起爆器及激光类火工品。所用药剂仍采用氯化铅、三硝基间苯二酚铅等常规起爆药或其他起爆炸药和点火药,可靠性和安全性具有独立设计特性。这些火工品已开始应用,但由于尺寸、发火能量及成本等限制,应用范围和数量均不大。第四代火工品是具有精确控制能量的集成产品或阵列,包括MEMS火工品、SMART火工品、数字化火工品等,以微装药、微输入/输出能为标志,所用药剂为小临界直径药剂、光聚合药剂、内嵌化合物和可反应复合膜材料,这一代火工品仍在发展和成熟过程中。

2. 火工品类别介绍

火工品种类众多,通常所说的火工品实质上是指火工元件,通用性最广,往往一种产品可以用于几十种弹药。火工元件以输出特性和用途分其类别,主要有火帽、点火头、点火管、点火具、点火器、传火药盒、底火、雷管、起爆器、传爆管、曳光管、拔销器、推销器、切割器、导火索、延期索、导爆索、切割索等18类;火工元件型别以输入特性划分,主要有针刺、撞击、摩擦、火焰、电、冲击波、惯性、火电、电撞、针电、激光、拉拔等12种^[4]。火工装置是由火工元件及装药组成且只完成一种功能的装置,航天火工装置一般由两部分组成:一是作为能源的火工元件,另一是满足导弹、运载火箭和航天器机械功能的机械结构。由于在航天系统有很大的通用性,所以,航天火工装置适合以输出特性和用途划分其类别,但一般不分型别。主要类别有爆炸螺栓、解锁螺栓、弹射装置、小型火箭发动机、切割