

火工品可靠性技术

—— 基础与管理

徐振相 秦士嘉 编著

R

兵器工业出版社

火工品可靠性技术

——基础与管理

徐振相 秦士嘉 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书由两部分构成,即可靠性基础知识、可靠性管理知识部分和可靠性工程部分。书中较系统地介绍了可靠性技术各主要领域的基本内容,以及这些内容在火工、烟火技术中的运用。本册为基础知识和管理知识部分,共分8章,内容包括:可靠性数学基本知识、可靠性基本概念及其特征量、可靠性保证大纲、可靠性评定、可靠性抽样检验、火工品可靠贮存寿命的评定以及可靠性管理等。

本书可作为高等院校火工、烟火专业的教材或参考书,也可作为从事火工、烟火专业和相关专业的工程技术人员的参考书。

前 言

可靠性技术是近几十年发展起来的一门新兴学科。60年代开始,我国航天工业和电子工业率先推广和应用了可靠性技术,并取得了很大成功,现在,我国的航天技术已跻身于世界先进行列。海湾战争中,美国武器装备的可靠性技术水平令世人惊讶;当今俄罗斯武器装备中的火工品可靠性指标之高,也是出乎我们的预料。人们如此重视军工产品尤其是武器装备的可靠性,是因为可靠性对武器装备产品具有特殊重要的意义。它影响到其性能的正确发挥和人员的安危。可靠性技术水平已是武器装备科学研究和管理水平高低的重要标志,是衡量武器装备性能、质量的重要指标。

火工品,简单地说是武器装备系统中引燃、引爆、完成特殊功能以及适时控制的一次作用的含能器件或系统。广义的火工品还包括烟火技术器材。火工品可靠性工作起步晚,基础差,经验少,但火工品确是武器系统能否适时正确作用的关键件,因此,重视和开展火工品可靠性工作更具有特殊的重要性和紧迫性。一般来说,火工品件小,成本低,对于武器系统来说又是可以以较低的投入,起到较好的可靠性结果,因而开展火工品可靠性工作具有较高的效费比。

鉴于火工品可靠性技术水平低,普及程度差,熟悉和掌握可靠性技术的人员又较少的现实,在编写此书过程中特别注意做到既考虑从事火工品可靠性工作者学习的需要,又考虑一般技术员可靠性知识入门的需要。该书注意面向实际,重点不是放在理论阐述和数学推导证明上,书中以较大的篇幅叙述可靠性大纲和可靠性管理就是出于这种考虑。该书的另一

个特点是注意了各章具有相对独立性,以利于阅读学习。更注意了全书的系统性,进行系统的论述可靠性知识。这可能有脱离火工品具体可靠性之虞,但目前微电子火工品的兴起和迅速发展的趋势,提醒我们把电子工业中广泛推广应用的可靠性知识引入到火工品之中应该提到日程上了。微电子火工品的出现是火工品发展的一个新阶段,将使火工品的可靠性和安全性出现飞跃的发展。这个发展阶段将大量引入电子技术,其中也包括电子技术应用的可靠性技术。适应这种发展趋势,本书叙述中既注意了传统火工品的可靠性特殊性问题,又注意了适应新火工品对可靠性知识需要的系统性,这是完全必要的。基于这种认识,在编写本书时有不少内容是参照和引用了电子行业的可靠性标准和著作中的内容和资料。同时《兵器可靠性技术与管理》和《弹药可靠性技术》两本书是与本书关系更为密切的著作,本书得益于这两本著作的内容也很多。在此谨致以谢意。

本书是火工品可靠性技术的基础知识和管理知识部分,内容包括可靠性数学基本知识、可靠性基本概念及其特征量、可靠性保证大纲、可靠性评定、可靠性抽样检验、火工品可靠贮存寿命的评定以及可靠性管理等。

编写过程中得到了秦志春、王成、周彬、田桂蓉等同志的帮助,特此感谢。

本书由吴幼成教授主审。

可靠性技术在发展之中,尤其是应用于解决火工品的实际问题,还有不少问题需要我们研究和解决。由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 概 述	(1)
§ 1.1 研究火工品可靠性的必要性.....	(2)
§ 1.2 火工品可靠性技术的发展简况.....	(13)
§ 1.3 可靠性与质量管理、质量保证	(17)
§ 1.4 研制和生产中的可靠性工作程序.....	(21)
§ 1.5 可靠性与标准化.....	(27)
第二章 可靠性数学的基本知识	(35)
§ 2.1 概率论基本知识.....	(35)
§ 2.2 抽样和抽样分布.....	(43)
§ 2.3 统计判决理论.....	(47)
第三章 可靠性概念及特征量	(69)
§ 3.1 可靠性与可靠度.....	(69)
§ 3.2 关于失效的几个概念.....	(78)
§ 3.3 关于寿命的几个概念.....	(82)
§ 3.4 寿命剖面与任务剖面.....	(85)
§ 3.5 可靠性特征量修饰语.....	(87)
§ 3.6 维修度、有效度以及与可靠度的关系	(89)
§ 3.7 可靠性参数和可靠性指标的确定.....	(91)
第四章 可靠性保证大纲	(99)
§ 4.1 概述.....	(99)
§ 4.2 一般要求	(101)
§ 4.3 可靠性管理工作	(107)
§ 4.4 可靠性设计与评价	(120)
§ 4.5 研制与生产试验	(128)

第五章	可靠性评定	(133)
§ 5.1	系统可靠性计算	(136)
§ 5.2	单元可靠性评定	(137)
§ 5.3	成败型试验时环境因子的评定	(195)
§ 5.4	系统可靠性综合评定	(204)
§ 5.5	二项成功率增长的贝叶斯方法	(222)
第六章	可靠性抽样检验	(228)
§ 6.1	主要术语、符号及代号.....	(229)
§ 6.2	计数标准型抽样检验	(231)
§ 6.3	计数序贯抽样检验	(248)
§ 6.4	串联系统成功率抽样检验	(259)
§ 6.5	计量标准型抽样检验	(267)
§ 6.6	计量序贯抽样检验(σ 已知)	(283)
§ 6.7	抽样检验用参数的选取	(293)
第七章	可靠贮存寿命的评定	(296)
§ 7.1	试验与评定程序	(296)
§ 7.2	出厂不可靠性的评定	(297)
§ 7.3	不同贮存时间的不可靠性的评定	(298)
§ 7.4	失效分布的确定	(303)
§ 7.5	可靠贮存寿命的评定	(307)
§ 7.6	正态单元的贮存期评定	(311)
§ 7.7	加速贮存寿命试验的统计评定	(315)
第八章	可靠性管理	(322)
§ 8.1	概述	(322)
§ 8.2	可靠性管理的内容	(327)
§ 8.3	可靠性组织机构	(330)
§ 8.4	可靠性管理循环	(334)

§ 8.5	设计阶段的可靠性管理	(339)
§ 8.6	生产阶段的可靠性管理	(341)
§ 8.7	使用阶段的可靠性管理	(342)
§ 8.8	可靠性评审	(344)
附表 1	正态分布表	(351)
附表 2	正态分布分位数表	(353)
附表 3	χ^2 分布分位数表	(355)
附表 4	F 分布分位数表	(367)
附表 5	t 分布分位数表	(375)
附表 6	二项总体可靠性非随机化最优置信 下限(部分)	(379)
附表 7	超几何总体可靠性非随机化最优置信 下限(部分)	(380)
附表 8	正态总体单侧规格限经典置信 下限(部分)	(381)
参考文献		(382)

第一章 概述

90 年代初,在海湾进行的一场战争是一场高技术战争。战争所用的装备包括航天飞行器、隐形作战飞机、精确制导武器、电子战装备,是陆、海、空军作战人员、武器和装备对战场全方位的覆盖,其特点是立体、大纵深、多层次、大批量和高强度。多国部队大威力、高精度、高机动、高效侦察和快速反应的地面火力与空中优势有效配合构成了空地一体化的压倒优势,而这场战争是在气温高达 $40\sim 46^{\circ}\text{C}$,地面可达到 70°C ,昼夜温差悬殊很大,经常性八级以上的风沙和严重的沙暴等恶劣的环境下进行的。但美军武器装备性能的发挥确是正常的,比如美国海军舰载飞机在海湾战争中出动约 25000 架次,六艘航空母舰平均起降近 4200 架次飞机,全部无一故障损失。美第三装甲师一次夜间推进 200km,300 多辆坦克无一发生故障等等。由此可以看出,美军武器装备突出的特点是具有很高的可靠性。美国武器装备的可靠性(以及维修性)从论证阶段开始就是由国防部和各军种的一系列指令、法规和政策来保证的,形成了一套完善的可靠性和维修性的保障体系,因而装备完好的先天性得到了保证。

而与之成为鲜明对照的是第二次世界大战之前,武器装备的设计、制造、贮存、运输以及使用维护中则着重于性能指标,虽然也考虑到可靠性范畴的问题,但与今天重视可靠性的程度不可同日而语。比如德军向英国发射的 V1 飞弹多数在中途爆炸,有的甚至在发射场上空爆炸,美国运往远东地区的

装备故障率高达 60%~70%。这固然与新武器装备研制初期有认识尚待深入的因素,但今天的高技术武器装备的高可靠性,却是人们高度重视可靠性的结果。

在今天,从事武器装备及所包括的各分系统以至部件的研究、生产和使用的有关部门和人员,学习、研究和应用可靠性知识的任务突出地摆到了我们的面前。

§ 1.1 研究火工品可靠性的必要性

如果将武器装备看作一个系统,则这个系统是由一系列分系统或子系统以及某些部件组成的。火工品及其系列是其中的子系统或部件之一。

火工品是起爆、引燃元件或系列,或由它们作为小型能源和作功元件的总称。它是兵器、航空及航天飞行系统中不可缺少的部件或子系统。对这些系统,可靠性的研究必然要包括火工品部件或子系统可靠性的研究。广义的火工技术还包括通过烟火效应实现特殊功能的烟火技术,烟火技术也是某些武器系统的组成部分,在近些年来发展起来的无源干扰的光电对抗是其中重要的分系统。

火工品虽然对于武器系统而言,体积小、质量轻,但对于其可靠性要求却是很高的。火工品的可靠性是使用上提出的迫切要求,特别是使用性质决定的。例如,一个火箭或导弹系统,如果火工件或火工系统可靠性不高,在发射时,可能发射不出去,或者发射后不能作用或者不能适时作用,这不但将导致经济损失,而且将导致不良的政治后果。设想,象阿波罗宇宙飞船用火工品 300 多件,航天飞机用火工品 500 多件,如果火工品没有高的可靠性,其后果不堪想象。所以火工品的可靠

性在武器系统和其它应用场合中都占有重要的地位。

火工品及其系统是用在武器系统之中的。因此,在讨论火工品可靠性时必然要涉及到火工品所在的系统,所以有必要将火工品放到武器装备系统中去考虑和讨论。

随着时间的推移和武器弹药的发展,火工品的可靠性逐渐被人们所重视,这也与人们普遍重视质量直接相关,人们常说的质量问题,说到底就是可靠性问题。同时,武器装备中的电子器件的可靠性逐渐提高后,火工品(以及引信)的可靠性问题就显得突出了。

社会发展到今天,已经将质量问题提高到“质量兴国”的高度。质量本身代表一个国家的形象,一个民族的精神,质量工作是千秋万代的民族事业。

近几年来,有关部门已明文规定,凡新研制的装备必须有定量的可靠性指标。有关部门提出了“以可靠性为中心的定购验收,以可靠性为中心的维修和以可靠性为中心的贮存保管”。这是因为可靠性很差的武器,即使其性能再先进,也是没有使用价值的。而国军标 GJB450《装备研制与生产的可靠性通用大纲》(以下简称大纲)的颁布和实施,标志着国防科技工业的质量管理进入了一个新的阶段。《大纲》把可靠性作为产品质量的重要特征和研制过程质量控制的重要内容,《大纲》是开展可靠性工作的重要技术法规和总体规划。对《大纲》的宣传、贯彻、实施涉及到可靠性的许多方面知识和工作内容,也涉及到许多其它相关标准的贯彻和实施。因此,火工品虽是装备中的子系统,在贯彻《大纲》过程中同样也涉及到可靠性的各方面的知识,尤其是高技术火工品中引入很多微电子技术,对可靠性知识的需求更为全面。本书将较系统地叙述可靠性知识。

引入微电子、激光等高新技术火工品,正使火工品技术以崭新的面貌改变着传统的火工技术。高技术火工品的突出特点是高性能、高安全性和高可靠性。因此,在今天,研究火工品的可靠性不但是武器系统的要求,也是火工品自身发展的必然。这些要求已经以或正在以各种标准的形式确定下来和反映出来。从这个意义上讲,研究火工品的可靠性也是贯彻和实施各种标准的要求。

美国对 2000 年弹药(尤其是导弹)的要求是超可靠性和灵巧化^[1],其意思是从固有可靠性和使用可靠性两个方面,大幅度地提高武器弹药的可靠性。研制适应武器弹药这种超可靠性、灵巧化要求的火工品,是我们面临的艰巨任务,这对可靠性知识提出了更深、更广的要求。

1.1.1 研究武器及火工品可靠性的意义

1.1.1.1 需要“质量大堤”的保护

人们知道,现代人类的健康与安全、生活与福利以至生存与发展等等方面都不能不依赖于电力供应、交通工具、通讯设备、生产设备、药物、国防装备以及诸多日常消费品的可靠性与质量的稳定性。所以说,人类是生活在“质量大堤”保护之下的。

武器装备是用于战争的,现代装备在战场上可靠与否可能直接影响战争双方的力量对比,在战场上关键时刻有几发炮弹打不响,就可能影响整个战斗。在平时的训练中,武器装备可靠与否也直接影响并危及战士的生命,造成严重的经济损失和不良的政治影响。对于火工品,可靠性问题显得更加突出,因为火工品即便在平时由于所装的火工药剂在贮存、运输和使用过程中在不同环境应力作用下将产生各种物理或化学变化,轻者导致功能下降,造成产品失效,重者可造成人员伤

亡,武器装备损坏。所以对于武器装备,其“质量大堤”的保护作用更为重要。因此可靠性已做为武器装备(包括火工品)的主要质量指标提出。有人明确提出,对于武器装备的主要指标不是它的技术性能和费用,而是它的可靠性。在研究过程中,从方案论证到试验的整个过程始终把提高和保证产品的可靠性作为一个根本的原则。

1.1.1.2 武器装备复杂程度日益增加

科学技术的迅速发展为提高武器装备的性能提供了充分的条件,但同时却使武器装备的复杂程度大大增加了。结构与系统的复杂化、功能要求的多样化,必然带来了武器装备中零部件数量的增加。同时,也对大量零部件提出了协调工作的性能要求,从而对每个零部件提出了提高可靠性的要求。因为在复杂的武器装备中,一个或几个零部件发生的故障,就会导致整个武器系统发生故障的概率增加。这就在武器系统中隐藏着一种降低可靠性的潜在趋势,为抵消这种潜在趋势,就必须提高零部件的可靠性与子系统的可靠性。

现在一些结构复杂的产品的零部件数是以数量级来计算,如彩电是 10^3 ,汽车是 10^4 ,计算机是 10^5 ,导弹是 10^6 ,阿波罗宇宙飞船是 10^7 等。如果考虑成套系统则数量级更大。对于这些复杂系统,即使单个元件或零件的失效率很低,整个系统发生故障的概率也是相当惊人的。而且随着功能要求的多样化也将使这些产品零部件的数量级在增加,例如,汽车制造企业为满足汽车无公害、节能、安全的社会要求,为满足轻量、舒适、平稳、方便等多样化的用户要求,已使汽车结构日益复杂,组成零件数目已从万件向十万件逼近。又如坦克,现在与 50 年代相比,普遍增加以计算机为中心的火控系统、双向稳定器、自动灭火系统、红外、激光和热成象等观瞄装置,这就要增

加数以千计的接点和焊点、元件和零件,而其中任何一个发生失效,都可能导致坦克不能完成规定的功能。

由后面介绍的可靠性知识知道,对于一个由 150 万个零件组成的导弹系统,如果是一个简单的串联系统,其零件的不良率即使只有百万分之一,导弹也难以实现其预定功能。因为其可能正常运行的概率为:

$$(1 - 10^{-6})^{1.5 \times 10^6} \approx 0.223 \approx 22\%$$

这表明,每发射 100 发导弹,平均只有 22 发成功。

同时,随着武器装备的日趋复杂,所用火工品的件数也增多了,甚至形成了火工品系统,所用的火工件的增多,出现失效的可能性也随之增加,由此造成的损失也增大。

再者,随着设备复杂程度的增加,设计、制造、销售和使用该设备的有关单位和人员必然增多,因而在他们之间的联系配合中更易出现差错,也会增加不可靠的因素。

随着设备复杂程度的增加,人-机关系也就更加复杂。由于人的能力存在一定的限度,即使写出详细的设备使用说明书和操作程序,也不可能完全避免过失和错误。虽可使操作更加自动化来解决这个问题,但这样一来设备将变得更加复杂,于是又将使可靠性降低。

总之,随着产品复杂程度的增加,提高其可靠性的迫切性和必要性也增加。

1.1.1.3 使用环境日趋严酷

许多弹药的标准或技术条件中都规定:“除另有规定外,一般应满足 15 年贮存期的要求”。而国军标 GJB167《火帽、雷管制造与验收技术条件》中规定:“密封包装的产品,贮存期一般为 25 年。”这是由于火工品生产出来,不会马上装配于引信中,引信也不会马上配于弹药上,所以对火工品的贮存期要求

更长。

武器装备,包括弹药以及火工品的存放和工作条件往往是很恶劣的。以往我们要求既要在 50°C 高温环境下正常作用,还要在 -40°C 下正常作用。如果按照美军标的要求,则条件更为严酷,高温提高到 107°C ,低温降到 -62°C 。还要在高原低气压和风沙中正常作用,又要在海上和沼泽地工作。如海湾战争中经常性的八级以上的风沙和严重的沙暴,昼夜悬殊的温差、遇大雨后地面的一片泥泞等。

作为弹药用火工品,在使用时还要经受发射时高冲击的作用;飞行时,尤其是远程导弹在高空中飞行时环境又是非常严酷的;当弹药落地时还要承受与发射反向的冲击力。在这些使用环境中的可靠性要求显然是很严格的。

电磁环境的日益严酷,是二次世界大战以来日益突出的问题。高技术弹药所用火工品以电火工品居多。在电磁环境中,防止失效和事故的迫切性不亚于防止在恶劣的自然环境中的失效和事故。

据报导^[2],同一装置,在实验室条件下,单位时间内失效数若为 1,而在野外地面上使用则为 2,军舰上使用则为 10,飞机上使用则为 20。以往研制的武器装备定型时几进靶场,往往都是因为可靠性问题,而可靠性问题相当多的是由使用环境条件恶劣所致。

面对日益严酷的工作环境,仅仅用提高裕度系数的方法来获得可靠性是远远不够的,必须采用新技术、新材料、新工艺,并利用可靠性技术才能保证其作用的确实性。

1.1.1.4 火工品的不可修复性和一次使用使可靠性研究具有特殊性

弹药、火工品的可靠性有其独特之处,它不同于一般的寿

命型产品,也不同于一般可修复性的产品,由于其一次性作用,不可修复,可靠性试验一般为成败型的特点,它们的失效一般来说是不可能再现的,这形成了弹药、火工品可靠性研究的特殊性。这就给可靠性研究带来了一定的困难。发生非正常爆炸(如早炸)等故障,现场不易留下实物,这就给查找故障(事故)原因带来了困难。

1.1.1.5 可靠性必须与安全性同时考虑

火工品的作用可靠性和安全可靠性直接关系到武器装备的性能的正确发挥和人员安危。这是由于火工品是一种特殊的含有火工药剂的装置,在其贮存、运输和使用过程中不同环境应力作用下将产生各种物理或化学变化,从而导致功能下降,造成装备作用失效,甚至出现人员伤亡和武器损坏事故。又由于火工品是一种不可修复的非机电产品,其可靠性研究不仅难度大,而且相当耗资和费时。

1.1.2 对可靠性的研究不是直觉知识所及的

毋庸置疑,无论对于使用者、研制者、还是生产者,故障或失效都是不希望发生的。

在可靠性成为一门技术和学问之前,当研制者或生产者对研究和制造作出了极大的努力之后,一旦产品偶然发生故障,常常看作是自己工作的失败。对于使用者来说着重于处理因故障带来的损失并要追究有关人员的责任。因此形成了一种躲避搞清直接造成产品故障事实真相的风气。这种情况,即使通过对立双方的谈判来解决也总是在为如何处理以及责任问题互相推诿。

如果有责任可追究,当然及时处理和弄清责任是重要的。但对于一个设计正确,加工正常的产品所出现的故障或失效,不是要去追究责任,而是要查清故障的原因和研究防止故障

再次发生的措施,这才是从根本上解决问题的途径。

其实,一种进行了正确设计和正确制造并进行正确使用产品,当产量很大时,是难以保证无故障出现的。对这种故障的分析和处理仅仅归罪于某一方,以加害者、被害者的意识来考虑和处理问题的观点是与事物的客观规律不符的,也是与当今的时代极不适应的。正确的态度应该是超越设计者、生产者和使用者的责任和立场,承认故障是客观存在的,通过客观的调查、协商和分析,进行改进设计和重新制定贯穿于生产、使用全过程的管理措施,这就是现代化的可靠性和可靠性管理技术的精神。

故障是可靠性之母。在研究可靠性时,归纳了与故障有关的多种多样的情况,按照概括的,普通的,也是更深刻的规律进行处理与故障有关的问题。

至于定量的去研究和解决可靠性问题,只有在科学技术发展到一定阶段时才能有解决的办法,可靠性科学的发展和系统工程学、安全工程学、运筹学、价值工程学、环境工程学、人-机工程、质量管理、生产组织技术、电子计算机技术和其它的管理技术有着密切的联系,是和概率论与数理统计、物理学、化学、机械学的发展密切相关的。

由上述可见,如果单纯地只是生活知识的积累,根本就不能预防和处理现今的复杂系统在大量使用的要求下的产品故障问题,适应不了今后所面临的武器装备的日益现代化和复杂化。因此,研究一种高于常识范围的可靠性技术就显得非常必要了。同时,要使武器装备具有实际上的高可靠性,往往由少数人来从事可靠性方面的工作是远远不够的,一定要让所有参与设计、生产、贮存和使用的人们都认识到可靠性工作的重要性,并具有应用可靠性知识的能力。