

高空核爆炸效应 参数手册

王建国 牛胜利 张殿辉 乔登江 编 著



原子能出版社

高空核爆炸效应 参数手册

王建国 牛胜利 编著
张殿辉 乔登江

江苏工业学院图书馆
藏书章

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

高空核爆炸效应参数手册/王建国等编著. —北京:原子能出版社, 2009. 7

ISBN 978-7-5022-4667-9

I. 高… II. 王… III. 高空爆炸:核爆炸—爆炸效应—参数—技术手册 IV. TJ91-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 120288 号

内 容 简 介

本书是一部系统阐述高空核爆炸现象和环境效应的工具书,内容主要包括高空核爆炸瞬发(中子、 γ 射线、X射线和电磁脉冲等)和长期性核环境(火球、碎片云、人工辐射带、电离层等)特点、规律、环境参数及毁伤效应等。

本书内容完整、充实,反映了我国在这方面的多年研究成果,是国内第一部系统阐述高空核爆炸效应方面的技术性专著。本书共分 11 章,既有对基本理论的描述,又包括必要的环境和效应参数数据,可作为教材和工具书,供核效应和抗辐射加固技术研究的单位使用和参考。

高空核爆炸效应参数手册

总 编 辑 杨树录

责任编辑 刘 朔

责任校对 徐淑惠

责任印制 丁怀兰 潘玉玲

印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 17.875 字 数 445 千字

版 次 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4667-9 定 价 55.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

序 言

美国和苏联在 1958—1962 年间进行过 19 次高空核爆炸试验,当时曾经引起重视,在科学期刊上发表过一系列文章,提供了许多数据资料,探讨了高空核爆炸的空间环境效应。但是,由于当时技术发展水平、人们认识水平以及高空核试验条件所带来的局限性,使得人们对高空核爆炸的认识尚存在着大量问题,也未取得满意的规律性的见解。此后,高空核爆炸研究的公开报道较少。但是为评估高空核拦截对导弹的破坏效应,需要掌握高空核爆炸对近区目标的各种效应;为评估核战争时先遣弹高空核爆炸对地面设施和空间卫星的破坏效应,需要掌握高空核爆炸的远区及长期效应。近些年,围绕这些需求,国内外在这个领域的研究又积累了较丰富的成果,但有关成果较为分散,查阅和使用极不方便,未见系统的、技术性强的专著,因此很有必要出版《高空核爆炸效应参数手册》。

1986 年,西北核技术研究所乔登江等人曾在《抗核加固》杂志上出版了“高空核爆炸”专刊,本手册在此基础上,增加了许多新的内容,更加全面、完整。手册对高空核爆炸产生的 X 射线、 γ 射线、中子、电磁脉冲以及核爆炸对电离层、辐射带的效应都进行了详细的介绍,既有对基本理论的描述,又包括必要的参数数据。虽然当年高空核爆炸时并没有获得详细的实测数据,本手册中许多曲线数据是经过理论推算得到的,但仍可作为从事核效应加固研究工作的参考资料。

本手册是一本有价值的高空核爆炸方面的参考书,可供武器研制部门、航天器研制部门、加固电子器件研制单位、核爆效应机理研究、核爆模拟研究单位中有关科技工作者使用和参考,它将有助于引导初始工作者入门,也可为有经验的工作者进一步深入研究提供参考。

吕敏

2008年10月

前 言

美国和苏联曾在 1958—1962 年间进行过 19 次高空核爆炸试验,其中有 3 次是配合世界地球物理学年的科学研究而进行的,其他都是为了军事目的。试验过程中观察到了大量与空间大气变化和地球物理效应有关的数据资料,获得了一些规律性认识。由于当时技术条件的局限,有些高空核爆炸现象尚未弄清,继后陆续有些研究成果见诸报道。我国未进行过高空核爆炸试验,对其产生的毁伤效应、长期环境和地球物理现象缺乏直接的试验数据。但近年来,围绕抗辐射加固技术研究的需求,借鉴国外高空核试验的数据资料,结合理论分析和数值模拟研究,积累了不少有关高空核爆炸效应方面的研究成果,但这些成果较为分散,查阅和使用极不方便,为此,编写这本参数手册,目的是为从事核爆炸效应和辐射加固技术方面的研究人员提供一本系统地介绍高空核爆炸效应的参考资料。

本书是一部系统阐述高空核爆炸现象和环境效应的工具书,内容主要包括高空核爆炸产生的 X 射线(第 3 章)、中子(第 5 章)、 γ 射线(第 6 章)、核电磁脉冲(第 8 章),以及火球和光辐射(第 4 章)、碎片云(第 7 章)、电离层(第 9 章)、增强辐射带(第 10 章)和空间天气效应(第 11 章)的特点、规律、环境参数及毁伤效应等方面。本书共分 11 章,既有对基本理论的描述,又包括必要的环境和效应参数数据,同时也给出一些典型的计算实例。本书在编写过程中,收集了国外高空核试验的数据资料和国内许多研究者的研究成果,也包含了作者多年的研究成果。

高空核试验次数较少,公开报道的成果更少,更由于空间环境和高空核爆炸本身的复杂性,有些效应和现象不能进行很清晰的描述,有不少问题难以总结出理论规律,而停留在经验公式上。此外,本手册所推荐的图表和数据大部分是经过理论推算得到的,缺乏直接的试验验证。

但从毁伤效应分析的角度来看,不会影响读者的应用。

本书是在许多同志工作基础上编写的,特别是参考了华鸣研究员在此方面的研究工作,编者在此表示感谢。

本书写成后承蒙吕敏院士和范如玉研究员审阅,并提出了一些宝贵的意见。在本书的编写过程中,得到了多位技术人员的大力协助,有关领导、机关同志们给予了很大的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

高空核爆炸效应不但涉及的面很宽,而且有些效应的物理机理是比较复杂的,尽管作者在编写的过程中做了努力,但仍不免存在错误和遗漏之处,诚望读者提出批评和建议,以便修改,使之更为完善。

编者

目 录

第 1 章 引言	(1)
1.1 相关技术发展背景	(1)
1.2 抗辐射加固技术发展的需求	(3)
1.3 本手册概要	(4)
第 2 章 概述	(6)
2.1 高空核试验概况	(6)
2.1.1 高空核试验场区及共轭区	(6)
2.1.2 高空核试验概况	(6)
2.2 高空环境概要	(10)
2.2.1 大气结构	(10)
2.2.2 电离层	(13)
2.2.3 高空磁场	(13)
2.2.4 Van Allen 辐射带	(15)
2.3 高空核爆炸景象	(17)
2.3.1 爆炸高度在 80 km 左右的核爆炸景象	(17)
2.3.2 约 400 km 高度的核爆炸景象	(18)
2.3.3 高空核爆炸光辐射现象的基本特点	(18)
2.4 核爆炸生成的瞬时高空核环境	(20)
2.4.1 核爆炸发展过程	(20)
2.4.2 瞬时毁伤因素	(21)
2.5 核爆炸生成的持续核环境和地球物理效应	(23)
2.5.1 持续核环境	(23)
2.5.2 空间天气和地球物理效应概况	(23)
2.6 高空核爆炸的毁伤作用	(25)
2.6.1 对空间飞行器的毁伤作用	(25)
2.6.2 对卫星的潜在威胁	(26)
2.6.3 对地面无线电通讯、雷达的影响	(28)

2.6.4 对信息网络系统的影响	(29)
参考文献	(30)
第 3 章 高空核爆炸 X 射线	(31)
3.1 引言	(31)
3.2 X 射线时间谱	(31)
3.3 X 射线能谱	(33)
3.3.1 核爆炸 X 射线的等效黑体温度	(35)
3.3.2 X 射线效应评估时黑体谱的区分	(36)
3.4 X 射线曝辐量(能注量)的空间分布	(36)
3.4.1 一般公式	(36)
3.4.2 Q_x 在总威力中所占比例	(37)
3.4.3 X 射线在冷空气中质量吸收系数 $K(u)$	(37)
3.4.4 曝辐量(能注量)随距离变化	(38)
3.4.5 X 射线能谱随传播距离的变化	(40)
3.5 高空核爆炸 X 射线在大气中的能量沉积	(41)
3.5.1 能量沉积的计算公式	(41)
3.5.2 裸核区半径	(41)
3.5.3 爆点下方的能量沉积	(42)
3.5.4 X 射线对大气的电离效应	(44)
3.6 X 射线在物质中的能量沉积	(45)
3.6.1 X 射线与物质相互作用概要	(45)
3.6.2 X 射线在平面靶上的能量沉积	(48)
3.6.3 X 射线在材料中能量沉积和传输	(49)
3.6.4 X 射线对高 Z 材料透过率和黑体谱变化	(51)
3.7 X 射线的毁伤效应	(53)
3.7.1 X 射线的热—力学效应	(53)
3.7.2 X 射线的核辐射效应	(55)
参考文献	(56)
第 4 章 高空核爆炸火球及光辐射现象	(57)
4.1 不同爆高条件下高空核爆炸光辐射景象	(57)
4.1.1 相关高空环境	(57)

4.1.2	高空核爆炸光辐射景象随高度的变化	(57)
4.2	高空核爆炸燃烧火球及荧光现象	(59)
4.2.1	燃烧火球	(59)
4.2.2	荧光现象	(63)
4.3	爆高低于 120 km 高空核爆炸火球的发展过程	(63)
4.3.1	火球发展过程	(63)
4.3.2	火球半径随时间变化过程	(64)
4.4	火球光辐射	(66)
4.4.1	火球光辐射总能量	(66)
4.4.2	火球光辐射光谱	(68)
4.4.3	火球的辐射时间及冷却过程	(69)
4.4.4	火球的曝辐射量	(72)
4.5	光辐射对地面的影响	(73)
4.5.1	地面的曝辐射量	(73)
4.5.2	光辐射对地面人员眼睛的烧伤	(74)
4.6	同温层核爆炸光辐射	(75)
4.6.1	引言	(75)
4.6.2	爆炸产物向真空飞散	(75)
4.6.3	Starfish 高空核试验早期光辐射景象	(77)
	参考文献	(78)

第 5 章	高空核爆炸中子	(79)
5.1	核爆炸中子源基本特征	(79)
5.1.1	中子总数	(79)
5.1.2	中子能谱	(80)
5.2	中子注量的空间分布	(82)
5.2.1	中子注量空间分布的计算	(82)
5.2.2	1 MeV 等效中子注量	(85)
5.3	中子与物质的相互作用	(89)
5.3.1	中子与原子核的相互作用	(89)
5.3.2	中子对材料的活化	(92)
5.4	中子的毁伤效应	(95)
5.4.1	位移毁伤效应	(95)

5.4.2 单粒子效应(SEE)	(99)
5.4.3 中子辐照材料的温升估算	(100)
参考文献	(101)

第 6 章 高空核爆炸 γ 辐射

6.1 高空核爆炸 γ 辐射源基本特征	(103)
6.1.1 γ 辐射源及其分类	(103)
6.1.2 γ 光子总数和峰值 γ 能量释放率	(103)
6.1.3 γ 辐射能谱	(105)
6.2 γ 辐射时间谱、 γ 剂量率	(107)
6.2.1 核爆炸早期 γ 辐射时间谱特征	(107)
6.2.2 γ 瞬发辐射时间谱	(108)
6.2.3 γ 剂量率	(110)
6.3 γ 电离辐射总剂量及其空间分布	(112)
6.4 γ 射线与物质的相互作用	(114)
6.4.1 光电效应	(114)
6.4.2 康普顿(Compton)散射	(116)
6.4.3 电子对效应	(119)
6.5 γ 辐射的毁伤效应	(121)
6.5.1 引言	(121)
6.5.2 γ 辐射总剂量毁伤	(121)
6.5.3 γ 剂量率毁伤	(125)
6.5.4 γ 辐照累积照射的影响	(125)
6.5.5 电缆和光纤的 γ 辐射效应	(127)
参考文献	(129)

第 7 章 高空核爆炸碎片云

7.1 高空核爆炸碎片云的基本特征	(130)
7.2 碎片云的扩展、上升	(132)
7.2.1 碎片云的扩展过程	(132)
7.2.2 碎片云的上升运动	(135)
7.2.3 碎片云在地磁场作用下的运动	(137)
7.3 碎片云的放射性	(139)

7.3.1 核爆炸裂变产物的放射性强度	(139)
7.3.2 碎片云放射性浓度随时间变化	(140)
7.4 碎片云对卫星的潜在毁伤效应分析	(141)
7.4.1 1 MeV 等效电子注量 Φ_e 和 γ 辐照受照量	(141)
7.4.2 卫星表面放射性污染	(142)
参考文献	(144)

第 8 章 高空核爆炸电磁脉冲及其效应

8.1 引言	(145)
8.2 核电磁脉冲产生机理	(148)
8.2.1 核电磁脉冲产生的基本概念	(148)
8.2.2 辐射源项	(149)
8.2.3 电流源项	(152)
8.2.4 大气电导率	(157)
8.2.5 球对称情况下的电磁脉冲	(159)
8.2.6 高空核电磁脉冲	(160)
8.2.7 中期电磁脉冲	(164)
8.2.8 磁流体动力学电磁脉冲	(164)
8.2.9 色散电磁脉冲	(168)
8.2.10 SGEMP 和 IEMP	(169)
8.2.11 数值计算方法	(169)
8.3 电磁脉冲参数	(170)
8.3.1 HEMP 波形的数学表示	(170)
8.3.2 Bell 实验室的 HEMP 波形标准	(171)
8.3.3 IEC 的 HEMP 波形标准	(172)
8.3.4 Bell 实验室和 IEC 波形标准的比较	(174)
8.3.5 其他 HEMP 标准	(177)
8.3.6 HEMP 的数值拟合	(177)
8.4 EMP 耦合效应	(181)
8.4.1 电缆耦合	(182)
8.4.2 天线耦合	(191)
8.4.3 SGEMP 耦合	(198)
8.5 仪器舱的 IEMP 效应	(210)

参考文献	(211)
第 9 章 高空核爆炸电离层效应	(214)
9.1 概况	(214)
9.2 爆炸高度对电离效应的影响	(215)
9.3 瞬发点源产生的附加电离	(217)
9.4 体源产生的附加电离	(219)
9.4.1 剩余 γ 辐射造成的附加电离	(219)
9.4.2 β 粒子产生的附加电离	(220)
9.5 附加电离的时空分布	(222)
9.6 电离效应对电磁波传播的影响	(225)
9.6.1 国外高空核试验的结果	(225)
9.6.2 影响电磁波传播的机理及特点	(226)
9.6.3 附加电离区对无线电通讯的影响	(230)
9.6.4 附加电离对雷达的影响	(232)
参考文献	(235)
第 10 章 高空核爆炸辐射带效应及电子辐射	(236)
10.1 高空核试验辐射带效应实测结果	(236)
10.1.1 Argus 试验	(236)
10.1.2 Teak 和 Orange 试验	(239)
10.1.3 Starfish 试验	(240)
10.1.4 前苏联高空核试验	(243)
10.2 辐射带基本理论	(245)
10.2.1 带电粒子在地磁场中的运动	(245)
10.2.2 磁壳参数	(247)
10.2.3 通量关系	(249)
10.2.4 带电粒子的扩散损失	(250)
10.3 电子辐射	(252)
10.3.1 同步辐射特征	(252)
10.3.2 辐射功率、同步辐射噪声	(252)
10.3.3 同步辐射在核查高空核试验中的应用	(256)
10.4 对低轨卫星可能造成的损伤	(258)

10.4.1	高空核爆炸人造辐射带对卫星毁伤效应分析·····	(258)
10.4.2	高空核爆炸人造辐射带环境对低轨卫星寿命的影响·····	(260)
	参考文献·····	(261)
第 11 章	高空核爆炸的空间天气效应·····	(263)
11.1	空间天气及其效应概况·····	(263)
11.2	高空核爆炸对空间天气的影响·····	(266)
11.3	地磁扰动·····	(267)
11.3.1	自然磁暴的基本特征·····	(267)
11.3.2	高空核爆炸引起地磁扰动·····	(268)
11.4	人造极光·····	(270)
11.4.1	自然极光基本特征·····	(270)
11.4.2	核爆炸产生的极光·····	(271)
	参考文献·····	(272)

第1章 引言

1.1 相关技术发展背景

高空核爆炸(High Altitude Nuclear Detonation, HAND),又称轨道核爆炸(Orbited Nuclear Detonation)。美国和苏联在1958—1962年共进行了19次高空核爆炸试验,其中有3次是配合世界地球物理学年的科学研究而进行的,其他都是为了军事目的。试验后获得了大量规律性认识,观察到了大量与空间大气变化和地球物理效应有关的规律。同时,在HAND对地面的影响和效应方面也取得了一些实用性资料,特别是对HAND的瞬时毁伤因素[如X射线、 γ 射线、中子、核电磁脉冲(HEMP)等诸多方面]的变化规律有了较深入的掌握,对某些长期效应(如电离效应、辐射带效应等方面)也有所认识。但是,由于当时技术发展水平、人们认识水平以及试验所带来的局限性,使得人们对HAND的认识存在着大量问题,也未取得规律性的见解。此外,有些宏观现象的解释尚无共识。特别是从20世纪五六十年代以来,科学技术有了突飞猛进的发展,HAND对这些新技术设备或装置会产生什么效应?带来什么后果?在军事应用上又有什么潜在的意义?这些问题又成为人们关注的内容。近年来,陆续有HAND方面的技术分析文章发表,是重新认识和评估HAND作战能力在技术层面上的反映。

与HAND效应有关的新技术发展背景可以概述如下:

信息技术。随着微电子技术、计算机技术、网络技术的发展而发展起来的信息技术已成为诸多新技术中的核心内容,特别是在现代信息化战争的场景中,从某种意义上讲,信息战的胜负可决定战争全局的胜负;另一方面,微电子、计算机、网络等对核辐射及电磁辐射的敏感性却明显增加。例如,半导体工艺进入深亚微米、纳米后,核辐射敏感性及其加固技术能否抗拒HAND诸毁伤因素的潜在威胁;再如,HAND所激励的长波电磁辐射可能会对地面电力系统构成威胁等等。这些都是人们极为关心的内容。

空间技术。卫星、星座及其构成的全球定位系统(GPS)、航天飞行器等技术都有了长足的进步,已成为军事技术的重要组成部分。这些空间技术的载体较长时间在空间工作。通过近几十年的研究,虽然对空间天气天然变化规律和地球物理天然变化现象已取得了不少认识,但是还谈不上完全掌握。在HAND的作用下,这些天然规律和现象将发生什么样的效应?持续多长时间?对空间技术载体

的功能会产生多么严重的影响?这些都是有待研究的课题。从过去对高空核试验的认识来判断,HAND会使这些载体发生瞬时和持续的功能降级。目前已有文献分析了在HAND使单个卫星功能失效后,为了保持星座的正常功能,补发新星所必需的时间间隔。该报道表明人们已关注到HAND反卫星的重要性。

导弹防御(MD)和突防技术。美国已从发展战区导弹防御(TMD)和国家导弹防御(NMD)技术转化为统一的导弹防御技术。由多种复杂装备系统构建导弹防御技术是企图构筑一个反导的天网,以防止任何导弹的袭击。可以采用动能或激光武器系统摧毁来袭弹头的战斗部。尽管导弹防御技术在快速发展中,控制、感知、识别等技术都可能有很大进展,但要想达到HAND所具有的大范围、多因素毁伤能力的可能性是比较小的。

有新盾就会有新矛。多弹头、多诱饵、隐身、变轨、释放干扰等针对导弹防御系统的突防技术也会有相应的发展和变化。

核武器技术。全世界禁核试条约虽然已经签订,但是核武器技术仍在不断发展中。在2006年美国著名的《外交》杂志上有文章声称,冷战时期的核威胁平衡已不复存在,美国已具有全面摧毁俄、中等核国家的能力。为了跨过核门槛,需要发展可使用的核武器;为了长期保存,需要发展可替换的核武器。由此可见,核大国仍然把继续发展核武器技术作为国家重要安全保证的手段。核不扩散条约的约束能力是有限的,已有若干国家掌握并发展了核武器技术。美国已有文献表示出对已有核武器国家在自己国土上空进行一次高空核爆炸以达到破坏信息技术、空间技术的目的,使其首脑指挥系统失控的担心。这虽是一种猜想,但也说明了人们对HAND毁伤作用的关注。

早在20世纪六七十年代,人们曾希望利用大威力(TNT当量为百万吨级)HAND来作为反导手段,以大规模进攻前的前驱爆炸作为战略手段。但它的可行性受到质疑,主要疑点在于:反导会对本土地面造成一定的破坏、损伤,甚至是灾难性的;全球诸多持续空间天气和地球环境效应会对全世界(包括本国)带来影响,因而既不能被本国居民所接受又不能被全世界所接受。因此,利用大威力的HAND作为作战手段遇到了障碍。尽管这类大威力HAND达到以核反核的可能性在减小,但已有的装备并未拆除,所以,HAND作为作战手段还不能排除。

随着小威力(TNT当量为5000吨以下)核武器技术的发展,核武器逐渐向可使用化方向发展。一旦跨过核门槛,核武器不仅可用来反恐、摧毁大规模杀伤性武器(生化武器、放射性武器、化学武器),同样可以用作反导、反卫系统中的空间武器。虽然这还是设想,但实现这个设想的技术路程并不长。从抗辐射加固技术发展的角度上看,不得不防。

1.2 抗辐射加固技术发展的需求

抗辐射(核辐射、电磁脉冲、激光等)加固技术经过几十年的发展和积累,已成为一门为空间技术载体、信息化技术载体、微电子技术、大型武器系统以及诸多配套工程服务的专门学科和技术。抗辐射加固技术路线大体可用图 1.1 来概括,也可简化为环境→损伤→加固→实验→仿真→验证→评估的途径。

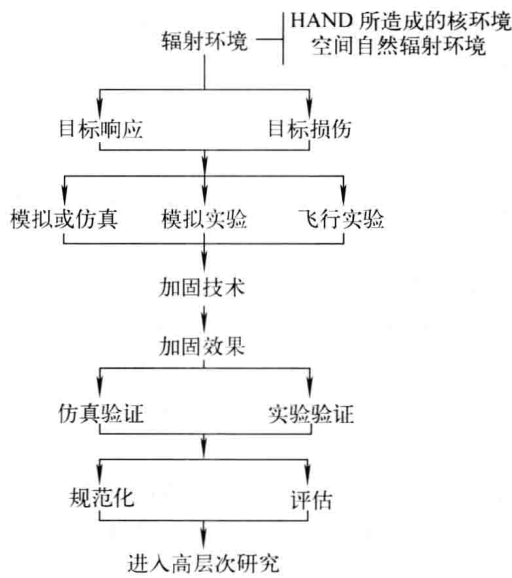


图 1.1 抗辐射加固技术路线框图

由图 1.1 可见,前三个层次都与辐射环境紧密相关。例如,HAND 对目标产生的 X 射线响应为:

