
孟 萃 著

瞬态电离辐射 激励强电磁脉冲

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书讲述了电离辐射的概念以及物质作用的种类,核爆炸的电离辐射激励电磁脉冲环境的物理机理、分类以及空间分布规律,以激光惯性约束装置为例讲述地面大科学装置中的电离辐射激励强电磁脉冲环境的物理机理与分类,数值模拟方法、瞬态强电磁脉冲环境准确测量的手段与方法,最后介绍了电离辐射总剂量与强电磁脉冲协和效应的研究方法以及强电磁脉冲国际标准概况。

本书可供从事电磁环境效应、电磁兼容以及抗辐射加固领域研究的科研人员参考,也可作为高等院校从事电磁环境效应、电磁安全领域相关专业的本科生、研究生和教师的参考书。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

瞬态电离辐射激励强电磁脉冲/孟萃著. —北京:清华大学出版社,2022.7
ISBN 978-7-302-59839-8

I. ①瞬… II. ①孟… III. ①电离辐射—激励—电磁脉冲 IV. ①TL91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 007304 号

责任编辑:朱红莲

封面设计:常雪影

责任校对:欧 洋

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:16

字 数:386 千字

版 次:2022 年 7 月第 1 版

印 次:2022 年 7 月第 1 次印刷

定 价:98.00 元

产品编号:092354-01

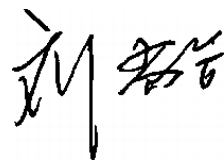
序

随着科技的发展,电子技术在各行各业得到了广泛应用,电磁兼容及电磁环境效应问题日显突出。2020年12月26日,《中华人民共和国国防法》修订通过后,电磁空间安全被列入重大安全防卫领域,成为国家安全战略的关键要素之一,是国家安全体系的重要组成部分。中国工程院发布的“中国电子信息工程科技发展十六大技术挑战(2020)”中,电磁场与电磁环境效应被列为十六大挑战之一。

随着各种装备的建设和大功率电磁能量的广泛应用,电磁辐射源越来越多,电磁环境日益复杂,强电磁辐射给人们的生活和工作带来的影响日益严重。核爆炸产生的核电磁脉冲因为场强高、能量大、覆盖范围广,这种强场、高功率、广域范围的电磁辐射,不仅会影响人们的生活和生命安全,对武器装备和重要基础设施会造成强干扰甚至毁伤效应,而且对国民经济发展和国防安全造成重大威胁;另外,核爆炸产生的瞬态电离辐射会与电磁脉冲同时作用到人体或武器装备,这种协和效应还未被充分关注和深入研究,因此,人体和装备的安全防护要求更高。

本书作者孟萃常年深耕于该研究领域,编制的高空核电磁脉冲数值模拟程序,全面数值仿真了高空核爆炸向地面、卫星轨道产生电磁脉冲的分布与传播规律,计算结果为我国制定相关标准提供了技术支撑,也为国际标准的制定提供了依据。近年来该团队围绕激光惯性约束装置的电磁环境产生机理开展了国际前沿的研究工作,将靶室空间的电磁脉冲科学分类,按照逃逸的超热电子产生电磁脉冲、腔体系统电磁脉冲、线缆系统电磁脉冲以及房间的源区电磁脉冲进行划分,并开展理论与实验研究,为我国激光惯性约束装置的电磁兼容设计提供依据。该团队提出的瞬态强电磁场传感器时域联合校准方法,准确度高、工程操作简便。在电离辐射与电磁脉冲的协和效应方面开展了研究,已得到重要研究成果。本书基于该团队上述创新性研究成果,书中内容丰富、新颖,图文并茂,是一本难得的专业好书。

本书可以作为电磁环境效应、电磁兼容以及电磁防护科研人员、教师及研究生的重要参考书。



2021年5月

前 言

瞬态电离辐射激励强电磁脉冲的物理概念来源于核爆炸产生的各类核电磁脉冲,随着科学技术的发展,激光惯性约束聚变以及核辐射模拟等大科学装置面临的电磁兼容问题中同样存在与核电磁脉冲物理机理类似的电磁脉冲环境,这类电磁脉冲激励的初始源都是瞬态的电离辐射,不需要天线发射,环境更加复杂。这类电磁脉冲环境峰值场强高、频谱范围宽、作用范围广,有时与瞬态电离辐射同时存在,带来更多的机理、测量、效应以及防护问题。本书作者孟萃长期从事电离辐射激励电磁脉冲的物理机理及效应等研究工作,参加了国际电工委员会 IEC SC77C 分会的标准制定、修改,负责制定了我国的高空核电磁脉冲辐射环境国家标准,这本专著是作者及其团队多年研究成果的总结。

本书共分 13 章,重点讲述瞬态电离辐射激励强电磁脉冲的分类、物理机理、数值模拟方法、瞬态强电磁脉冲的准确测量与校准方法、电离辐射总剂量与强电磁脉冲协和效应以及国际标准概况。

本书由孟萃负责,提出了著作的章节目录,完成本书的编写工作,钟媚青博士参与编写了第 2 章和第 13 章,徐志谦博士参与编写了第 4 章、第 6 章和第 8 章,张茂兴博士参与编写了第 7 章,金晗冰硕士参与编写了第 9 章,姜云升博士参与编写了第 10 章和第 11 章,吴平博士参与编写了第 12 章。

本书的内容是团队成员多年来的科学研究成果,感谢参与该方向研究的所有同学,他们是张晓明硕士、谭兆杰硕士、杨超硕士、金晗冰硕士、李鑫博士、姜云升博士、吴平博士、黄刘宏博士、程二威博士、徐志谦博士、张茂兴博士、钟媚青博士、冯博伦博士以及在本团队开展本科科研训练的杨大龙、陈荣梅、卢志永等同学。感谢我的导师 陈雨生 研究员,是他把我带入核电磁脉冲的研究领域,他的严谨求实的学术风范一直影响着我。感谢多年来支持、指导以及帮助我的同事、领导和业界同行与前辈,与你们的交流讨论让我收获颇丰。感谢我的家人们,你们的厚爱以及支持是我一直前行的动力。感谢各项目资助管理单位的大力支持。

由于作者水平有限,书中不当之处恳请大家不吝赐教,给予宝贵意见。

孟萃

2021 年 5 月于清华园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 核爆炸产生的电磁脉冲	3
1.3 辐射模拟装置产生的电磁脉冲	4
1.4 强电磁脉冲国际标准	7
参考文献	8
第 2 章 电离辐射的种类及其与物质的相互作用	10
2.1 基本概念和术语	10
2.1.1 原子的结构	10
2.1.2 电离辐射的能量	10
2.2 电离辐射的种类	11
2.2.1 常见电离辐射的种类及属性	11
2.2.2 常见的瞬态电离辐射来源	12
2.3 带电粒子与物质的相互作用	13
2.3.1 带电粒子与物质的相互作用概述	13
2.3.2 重带电粒子与物质的相互作用	14
2.3.3 快电子与物质的相互作用	19
2.4 光子与物质的相互作用	21
2.4.1 作用截面	22
2.4.2 光电效应	22
2.4.3 康普顿效应	25
2.4.4 电子对效应	28
2.4.5 三种效应的比较	29
2.4.6 γ 射线窄束的衰减规律	29
2.5 中子与物质的相互作用	30
2.5.1 中子的分类	30
2.5.2 宏观截面和平均自由程	31
2.5.3 弹性散射	31
2.5.4 非弹性散射	32

2.5.5 中子与空气的相互作用	32
参考文献	32
第 3 章 时域有限差分算法	34
3.1 研究背景与现状	34
3.2 时域有限差分方程	34
3.2.1 直角坐标系差分公式	35
3.2.2 收敛性和稳定性分析	37
3.2.3 柱坐标系差分公式	39
3.3 吸收边界条件	41
3.3.1 Mur 吸收边界	42
3.3.2 完全匹配层吸收边界	43
3.4 时偏 FDTD 算法	44
参考文献	45
第 4 章 PIC 粒子模拟算法	47
4.1 研究背景与现状	47
4.2 粒子推动方程	48
4.3 电磁场与粒子的耦合	50
4.4 电流密度的数学表达	52
参考文献	56
第 5 章 高空核爆炸激励电磁脉冲的物理机理与规律	58
5.1 核爆电磁脉冲物理机理	58
5.1.1 核爆炸 γ 辐射源	60
5.1.2 γ 射线与物质相互作用的衰减规律	60
5.1.3 康普顿效应	61
5.2 高空核爆炸向地面产生的电磁脉冲	62
5.2.1 早期 HEMP-E1 的数值模拟	63
5.2.2 结论	69
5.3 高空核爆炸向卫星轨道产生的色散电磁脉冲	70
5.3.1 爆心附近核电磁脉冲环境	72
5.3.2 爆高的影响	73
5.3.3 爆炸当量的影响	74
5.3.4 电离层对电磁脉冲信号的影响	75
5.3.5 高频电磁波通过电离层的衰减	81
5.3.6 卫星轨道电场峰值	81
参考文献	83

第 6 章 腔体系统电磁脉冲的物理机理与规律	85
6.1 研究背景与现状	85
6.2 腔体内 SGEMP 仿真模型	86
6.2.1 二维仿真模型	87
6.2.2 三维仿真模型	87
6.3 二维模型的仿真结果及规律	88
6.3.1 典型的时域波形	88
6.3.2 X 射线能注量的影响	89
6.3.3 X 射线脉冲宽度的影响	89
6.3.4 X 射线能量的影响	90
6.4 三维模型的仿真结果及规律	90
6.4.1 典型的时域波形	91
6.4.2 腔体内 SGEMP 的空间分布	91
6.4.3 腔体内 SGEMP 的频率特性	92
6.5 腔体外部 SGEMP 的仿真结果及规律	94
6.5.1 研究现状	94
6.5.2 三维仿真结果及规律	97
参考文献	99
第 7 章 线缆系统电磁脉冲的物理机理与规律	102
7.1 研究背景与现状	102
7.2 线缆系统电磁脉冲的物理机理	103
7.3 时域有限差分法的仿真结果与规律	103
7.3.1 时域有限差分方程	103
7.3.2 仿真结果与规律	106
7.4 传输线+有限元方法仿真结果及规律	108
7.4.1 简化模型	110
7.4.2 有限元法	111
7.4.3 仿真结果与规律	115
参考文献	116
第 8 章 源区电磁脉冲的物理机理与规律	118
8.1 研究背景与现状	118
8.2 地面核爆炸 SREMP 理论分析	120
8.2.1 早期波过程	120
8.2.2 饱和扩散过程	121
8.2.3 后期准静态过程	123

8.3 靶室房间 SREMP 数值模拟	124
8.3.1 靶室房间 SREMP 仿真模型	124
8.3.2 靶室房间 SREMP 仿真结果及规律	125
参考文献	127
第 9 章 激光惯性约束装置的强电磁脉冲	128
9.1 激光惯性约束装置强电磁脉冲的分类	128
9.2 靶室内电磁脉冲	130
9.2.1 激光打靶中的电磁脉冲现象	130
9.2.2 超热电子产生电磁脉冲的主要机制	132
9.2.3 超热电子激励电磁脉冲模拟	134
9.3 能库电磁脉冲的实验研究	141
参考文献	142
第 10 章 瞬态强电磁脉冲测量	144
10.1 D-Dot 传感器	145
10.1.1 D-Dot 电场传感器原理	145
10.1.2 等效电荷法用于 D-Dot 探头形状设计	147
10.1.3 D-Dot 传感器尺寸设计	149
10.2 E-field 传感器	150
10.2.1 E-field 电场传感器原理	150
10.2.2 传感器信号接收电路	151
10.2.3 电光调制电路	152
10.2.4 光接收机	153
10.3 B-Dot 磁场传感器	154
10.3.1 SSL 磁场传感器	156
10.3.2 MSL 磁场传感器	159
10.3.3 CML 磁场传感器	161
10.4 MGL 磁场传感器	163
10.4.1 差模 MGL 传感器	163
10.4.2 共模 MGL 传感器	164
10.5 瞬态强电磁脉冲测量系统的组成	166
10.6 信号反演算法	168
10.6.1 微分传感器的软硬件信号处理方式	168
10.6.2 基于 MAP 的信号处理算法	169
10.6.3 基于 MAP 算法的实验验证	171
10.6.4 不同波形的适应性验证	175

参考文献	176
第 11 章 瞬态强电磁脉冲传感器校准	178
11.1 基本校准方法	179
11.2 标准电磁场产生装置	180
11.2.1 TEM 小室	180
11.2.2 GTEM 小室	183
11.2.3 镜面单锥 TEM 小室	185
11.3 频域校准方法	186
11.4 时域联合校准方法	187
11.4.1 幅度灵敏度校准	188
11.4.2 上升时间校准	189
参考文献	192
第 12 章 电离辐射及强电磁脉冲协和效应	194
12.1 电离辐射总剂量效应	194
12.1.1 SiO ₂ 介质材料辐射损伤机理	195
12.1.2 Si-SiO ₂ 界面电荷	196
12.1.3 MOS 器件电参数变化	198
12.2 强电磁脉冲效应	201
12.2.1 电路各结构的强电磁脉冲效应	201
12.2.2 典型的半导体器件的电磁脉冲损伤机理	204
12.3 电离辐射总剂量与强电磁脉冲协和效应	206
12.3.1 协和效应测试方法	207
12.3.2 器件级研究现状	209
12.3.3 ADC 芯片的实验结果	218
12.4 概率阈值分析	223
参考文献	225
第 13 章 国际标准概况	227
13.1 IEC SC77C 发布的 HPEM 相关标准	227
13.2 其他国际组织发布的 HPEM 相关标准	230
13.2.1 ITU-T 发布的电信中心的 HPEM 防护建议	230
13.2.2 IEEE 制定的公共可访问计算机的 HPEM 防护标准	232



- 13.2.3 CIGRE 制定的高压变电站电子设备的 HPEM 防护建议 232
- 13.3 欧盟发布的 HPEM 相关文件 232
- 13.4 各国发布的 HPEM 相关标准 235
 - 13.4.1 美国军用 HEMP 标准 235
 - 13.4.2 中国的 HPEM 相关标准 237
 - 13.4.3 其他各国发布的 HPEM 相关标准 239
- 参考文献 241

第 1 章

绪 论

1.1 引言

强电磁脉冲(也称为高功率电磁脉冲, High Power Electromagnetic Pulse, HPEM)指峰值场强大于 100 V/m 的电磁脉冲。强电磁脉冲主要有如图 1-1 所示的几大类: 自然界的雷电 (Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP), 静电放电 (Electro-Static Discharge, ESD), 大功率雷达及开关工作等产生的高强度辐射场 (High Intensity Radiated Field, HIRF), 核爆炸产生的核电磁脉冲 (Nuclear Electromagnetic Pulse, NEMP), 高功率微波 (High Power Microwave, HPM) 及超宽带 (Ultra Wide Band, UWB)^[1,2]。这种强电磁脉冲具有峰值场强高、幅度动态范围大、上升沿快、脉宽较宽的时域特性以及超宽带的频域特性, 见图 1-2。强电磁脉冲对电子设备造成干扰或毁伤效果明显, 与常规电磁兼容的骚扰源有很大不同。在 1962 年的核试验中强电磁脉冲效应首次被发现, 经过美国军方组织的专家组分析认定这些效应是高空核爆炸产生的高空核电磁脉冲 (High-altitude Electromagnetic Pulse, HEMP) 造成的^[3,4]。在此之后, HEMP 的机理、效应和防护研究受到各个国家的重视, 大量关于军事系统在 HEMP 下的效应试验和评估技术得到迅速发展。后来随着脉冲功率技术、等离子体技术等的发展, 高功率微波以及超宽带的强电磁脉冲研究及应用得到各大国的重视。核电磁脉冲、非核电磁脉冲对国家重要基础设施、武器装备的影响的研究日益重要。

近年来, 随着科学技术的发展, 瞬态强电磁脉冲在辐射模拟、聚变能研究等大科学装置中的产生机理、物理规律和造成的影响也受到越来越广泛的关注。例如在脉冲功率系统运

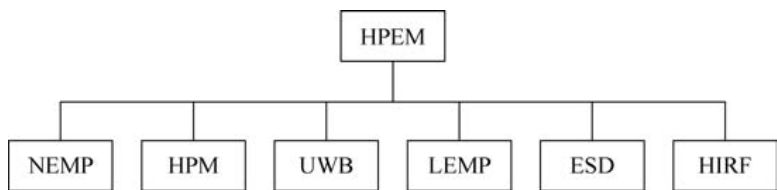
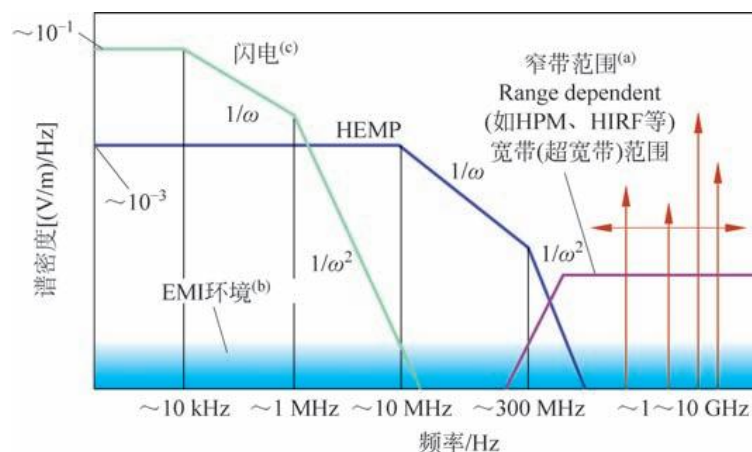


图 1-1 强电磁脉冲分类



- (a) 窄带范围0.5~5 GHz
 (b) 不需要HEMP
 (c) 符号相关光谱成分到约10 MHz, 取决于范围和应用

图 1-2 强电磁脉冲频谱图

行、激光惯性约束聚变打靶等物理过程中都存在强电磁脉冲环境,物理诊断设备以及其他仪器设备的电磁防护水平面对严峻考验。在激光惯性约束聚变打靶实验中,研究人员发现在高能激光器运行过程中,新物理机理的瞬态强电磁脉冲引起诊断设备失效、数据丢失甚至控制设备死机等问题^[5]。

国际上对瞬态强电磁脉冲环境的研究受到越来越多的重视。1996年,IEC TC (Technical Committee)77(电磁兼容技术)成立了分技术委员会 IEC/SC(Subcommittee)77C 专门研究强电磁脉冲相关的标准化问题^[6]。欧盟也在第七框架计划(Seventh Framework Programme,FP7)中重点开展了对重要基础设施,如能源系统、通信系统、高铁运输系统应对电磁恐怖袭击的专项研究。此外,在2020年12月26日修订的《中华人民共和国国防法》中也提及电磁空间安全——“维护在太空、电磁、网络空间等其他重大安全领域的活动、资产和其他利益的安全”,正式将电磁安全列为我国的国家安全战略之一。

在这些强电磁脉冲环境中,核爆炸产生的电磁脉冲与地面辐射模拟、聚变能研究等大科学装置产生的电磁脉冲的机理与其他电磁脉冲在物理机理上截然不同,都是由瞬态电离辐射与周围物质(包括空气)作用产生的强电磁脉冲环境,图 1-3 给出了瞬态电离辐射产生电

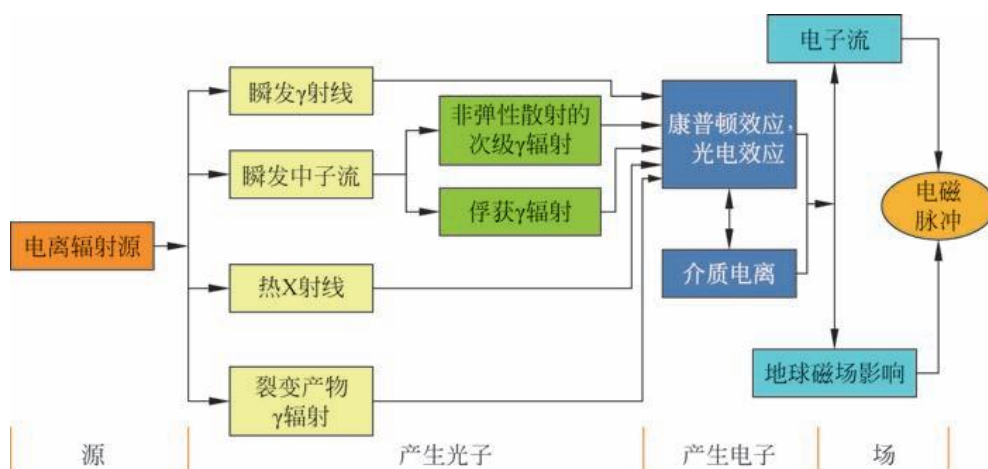


图 1-3 瞬态电离辐射激励电磁脉冲物理过程

电磁脉冲的物理过程。这种电磁脉冲有时与电离辐射同时存在,使得环境复杂性更大、对电子学系统造成的干扰、毁伤效应更严重,防护手段及方法要求更高。本书重点针对这类电磁脉冲的物理机理、数值仿真、实验测量及效应等进行阐述^[7]。

1.2 核爆炸产生的电磁脉冲

随着科学技术的发展,高新技术在军事领域的应用极大地提高了部队的作战能力,但是,核武器在当今世界的武器队伍中仍稳坐头把交椅。虽然核武器仅在第二次世界大战末期使用了两颗,但并不表明它已退出战争舞台,核武器仍是当今军事斗争的“杀手锏”。随着各种半导体器件和集成电路的广泛应用,电子设备对外界的电磁环境更为敏感。因此,近年来,核电磁脉冲在军事上的应用更为引人注目。在攻击守方的 C³I 系统的干扰对抗中可能采用电磁脉冲,尤其是战争初期,如果用导弹在守方上空爆炸形成特殊的离子云和辐射脉冲,可能使守方电子设备失效、瘫痪,造成通信中断,指挥失灵,为后续弹头突防和攻击开路。较实用的是利用高、中空核爆瞬时释放的大量 γ -光子在吸收区内形成的电磁脉冲对守方防御和指挥系统造成破坏,使其失去监控能力,从而实现攻方突防打击目标的目的。核电磁脉冲弹就是减少核武器的其他辐射效应,增强电磁脉冲产生的一类电磁武器。

核爆炸时,弹体释放出大量的 γ 射线、X 射线、中子和其他放射性粒子。这些 γ 射线和 X 射线在向外辐射中,与周围空气(空中爆炸)、岩土(地下爆炸)或水(水下爆炸)相互作用,产生康普顿电流和光电流,激励出强弱不等的电磁脉冲,叫作核电磁脉冲(Nuclear Electromagnetic Pulse, NEMP)。其中高空核爆炸激励的电磁脉冲(HEMP)因场强高、频谱丰富、达到的地域广而造成的危害最大^[8,9]。

图 1-4 给出高空核电磁脉冲产生的机理图。早在 1945 年 7 月 16 日的“三位一体”核试验之前,物理学家费米就预言了核电磁脉冲的存在,但直到 20 世纪 60 年代初期才成为人们认真研究的课题。到目前为止,全世界进行了 2000 余次核试验,几乎都观测到了电磁脉冲现象。例如,1960 年苏联在北方的新地岛上进行了一次 5000 万吨级的高空核爆炸,使阿拉斯加和格陵兰的预警雷达和 4000 km 范围内的通信系统失灵达 24 小时之久。还有几次高空核试验,使人造卫星的电子设备和太阳能电池受到损坏,以至停止了工作。1962 年 7 月 9 日美国在太平洋约翰斯登岛上进行了一次高度为 400 km、当量为 140 万吨的高空核爆炸,使远在夏威夷奥阿胡岛上的变压器被强大的电流烧坏,岛上的 30 条路灯立刻全部熄灭,变电所电力线路

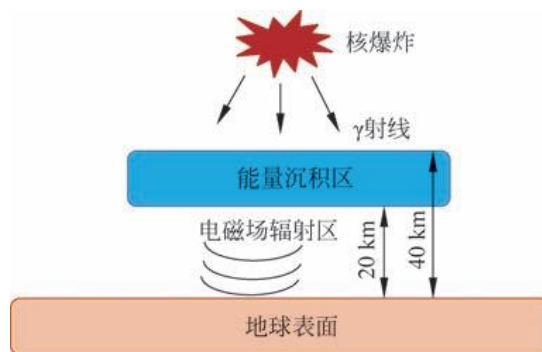


图 1-4 高空核电磁脉冲产生机理图

的断路器一个个地跳闸。这就是所谓的核爆电磁脉冲效应。美国在 1958—1962 年进行了“百眼巨人”、ORANGE、STARFISH 等不同爆炸高度、不同当量的高空核试验,获得了大量的核电磁脉冲数据^[10],苏联也进行了大量的试验,也获得了大量宝贵数据,为他们后来的数值模拟工作提供了试验支撑。图 1-5 是美国高空核爆炸试验的景观图^[2]。



图 1-5 美国核爆炸景观图

据资料报道,威力 5000 万吨级的氢弹,在 300 km 高空爆炸时能使整个美国大陆的电子系统线路受到破坏。表 1-1 给出爆炸高度与核电磁脉冲覆盖半径的关系图。美国在 1958 年进行了 5 次高空核试验,相隔 4 年,在 1962 年又恢复了高空核试验,其主要目的就是研究高空核爆对电子预警系统的破坏效应。高空核电磁脉冲的相关研究出现于 20 世纪 50 年代末期,以 Karzas、Longmire 等为代表,从各种角度对核爆炸产生电磁脉冲的机理进行了诠释^[3]。若要提高武器系统的抗电磁脉冲能力,了解其将面临的电磁脉冲环境是问题的关键。只有深入地了解武器系统所面临的核电磁脉冲环境的波形特征,了解特征波形对武器系统的耦合效应,才能有目的、有方向地解决武器系统的抗核电磁脉冲加固的关键问题,用最优的性价比,来提高武器系统的生存能力。

表 1-1 爆炸高度与核电磁脉冲的覆盖半径关系图

爆高/km	核电磁脉冲覆盖半径/km
40	712
50	796
100	1121
200	1576
300	1918
400	2201

1.3 辐射模拟装置产生的电磁脉冲

地面的核辐射模拟装置及聚变能研究装置运行过程中会产生 X 射线和 γ 射线,与空气分子、周围的金属物质等作用也会激励出与核电磁脉冲物理机理类似的电磁脉冲。下面以激光惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)装置为例说明该类电磁脉冲在大科

学装置中的存在。

激光惯性约束聚变,是以能量为兆焦耳量级的脉冲激光作为驱动源,利用内爆的方式压缩靶丸中的氘氚燃料,从而实现热核聚变的一种方法。目前,美、法、中、日等国都建造了高功率的激光惯性约束聚变装置。表 1-2 给出世界上已建成的激光惯性约束聚变装置。美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF),见图 1-6,由位于美国加利福尼亚州劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)研制。国家点火装置主要用于惯性约束聚变和进行高能密度(high-energy-density, HED)科学研究的相关实验。2009 年 3 月 30 日,经美国能源部确认,NIF 建造完成^[11,12]。



图 1-6 美国 LLNL 实验室 NIF 装置

除了支持能源部的核武器储备管理项目外,NIF 也为国内外的研究人员提供前所未有的机会,探索“前沿”基础科学,涉及的领域包括天体物理学、行星物理学、流体动力学、非线性光学物理和材料科学。

表 1-2 世界上已建成激光 ICF 装置

激光装置	国家及实验室	输出能量	束数	建成时间
GEKKO-Ⅲ	日本大阪大学	15 kJ	12	1983 年
NOVA	美国利弗莫尔国家实验室	40 kJ	10	1984 年
OMEGA	美国罗彻斯特大学	30 kJ	60	1995 年
Vulcan	英国	1021 W/cm ²	8	2005 年
NIF	美国利弗莫尔	1.8 MJ	192	2002 年
LMJ	法国	1.8 MJ	240	2002 年
Iskra-6	俄罗斯	300 kJ	128	
SG-Ⅰ	中国	1.6 kJ	2	1986 年
SG-Ⅲ	中国	150~200 kJ	48	2012 年

高功率激光与固体靶作用后伴随着许多次级效应,例如很强的 X 射线辐射,以及中子辐射和 γ 射线等。这些辐射效应对靶上内爆压缩和聚变反应过程的诊断与监控具有重要意义。实验表明,电离辐射的强度和波形与入射激光的能量和脉宽、靶的材料与形状等因素都有关系,实际的辐射环境是复杂多变的。靶室内的 X 射线大部分为能量低于 3 keV 的软 X 射线,还有一部分是由靶中质子数较大的 Ti、Fe、Ge、Kr 等元素产生的能量在 4~15 keV 范

国内的 K 层发射。目前在实验中经常使用的靶包括金属箔 (metal foils)、气体靶 (gas-filled)、金属掺杂气凝胶 (metal-doped aerogels) 等,激光向 X 射线的转换效率 (laser-to-X-ray conversion efficiencies, CE) 都小于 10%。为了对不同能带内的 X 射线分别进行测量,美国国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF) 和圣地亚国家实验室 (Sandia National Laboratories, SNL) 研发了 HENWAY、DANTE 和 PCD 等多种诊断仪器;而神光-III 装置对 X 射线诊断的动态响应范围要求是 0.1~10 keV,使用配接晶体谱仪的 X 射线条纹相机记录时间分辨的发射谱^[13]。

实验测量和理论计算都发现,等离子体中高 Z 带电离子的 X 射线发射与靶的温度有显著的相关性,而且不同的能带对应着不同的最佳打靶温度。靶的温度受入射激光的能量密度直接影响,而能量密度又与激光能量、脉冲宽度、靶密度和体积等参数相关。由于激光打靶后 X 射线的产生受各种实验条件影响,所以靶室内的 X 射线环境是复杂多样的。

高功率激光打靶时往往会在靶室中产生强电磁脉冲,对测试设备和信号带来很强的干扰,有时甚至会引起数据丢失和设备损坏。NIF 的研究人员发现诊断设备进行了规范的电磁兼容设计后,仍会出现死机、数据丢失等严重问题,关于激光惯性约束装置内的电磁脉冲环境产生机理的研究引起各国科学家的重视^[14]。

2000 年左右,国内外研究人员对高功率激光装置中电磁脉冲问题以及电磁兼容设计开展了相关研究工作。2003 年,英国原子能武器机构 (Atomic Weapons Establishment, AWE) 研究人员在卢瑟福实验室 (Rutherford Appleton Laboratory) 的 Valcun 拍瓦激光器内测量产生的电磁脉冲,得到了中心频率 63 MHz、最大磁场强度 4.3 A/m 的信号。研究人员提出了谐振腔模型来解释 EMP 的产生。从靶发射出的电子脉冲打在靶壁上,使整个金属靶室像电容器那样充放电,并产生谐振腔本征频率的电磁振荡。尤其是电子以电子束的方式,从一个方向出射,打在靶壁一侧时,产生的 EMP 最强。在捷克布拉格的 PALs (Prague Asterix Laser System) 激光装置中,激光器功率 3 TW,脉宽 300 ps,人们在靶室外测得电场强度约 7 kV/m,磁场强度约 15 A/m,测得的电磁场频率最高达到 1 GHz。劳伦斯·利弗莫尔国家实验室分别对长脉冲激光器 NIF 和短脉冲激光器 Titan 产生的电磁脉冲展开了研究。研究人员利用不同频带和量程的电场传感器 D-Dot 和磁场传感器 B-Dot 分别记录电磁脉冲的电场和磁场时域波形,进而分析得到电磁脉冲的强度和频谱(受限于带宽 6 GHz 的示波器和 5 GHz 的衰减器,高于 5 GHz 的信号无法被有效记录)。在 NIF 激光打靶实验中(233 kJ, 2 ns, 116 TW)距靶心 4 m 处测得 EMP 的电场强度为 10 kV/m 量级,峰值位于 1 GHz 左右,EMP 频率范围很宽,延伸至 5 GHz 及以上。短脉冲 Titan 激光(脉宽 2 ps,能量 123~155 J,平均功率约 75 TW)与银靶作用产生的电磁脉冲测得 EMP 电场强度在 100 kV/m 量级,持续时间长达 100 ns,频率超过 5 GHz。进一步分析得到电磁脉冲约有一半的能量分布在频率高于 2 GHz 的信号中。在靶室外测得的 EMP 强度较靶室内显著降低,频率最高只到 1 GHz。实验发现,在短脉冲激光器中测得的电磁脉冲强度和频率明显高于长脉冲激光器,EMP 强度随激光能量增加而明显增强,在激光能量不变的情况下,改变激光脉冲持续时间,EMP 强度无明显变化^[13]。

清华大学团队在国家惯性约束专项的支持下,独立开展了自主的研究工作。团队认为激光惯性约束装置靶室中电磁脉冲环境的产生机理类似于核爆炸中的核电磁脉冲环境,一是 X 射线打在电缆和电子器件的金属外壳激励的系统电磁脉冲 (System Generated EMP, SGEMP),二

是与高能电子运动有关的超热电子-电磁脉冲,如图 1-7 所示。清华大学自主开发了激光惯性约束装置的电磁脉冲环境数值仿真软件并开展了测量工作,在本书中有详细阐述^[14]。

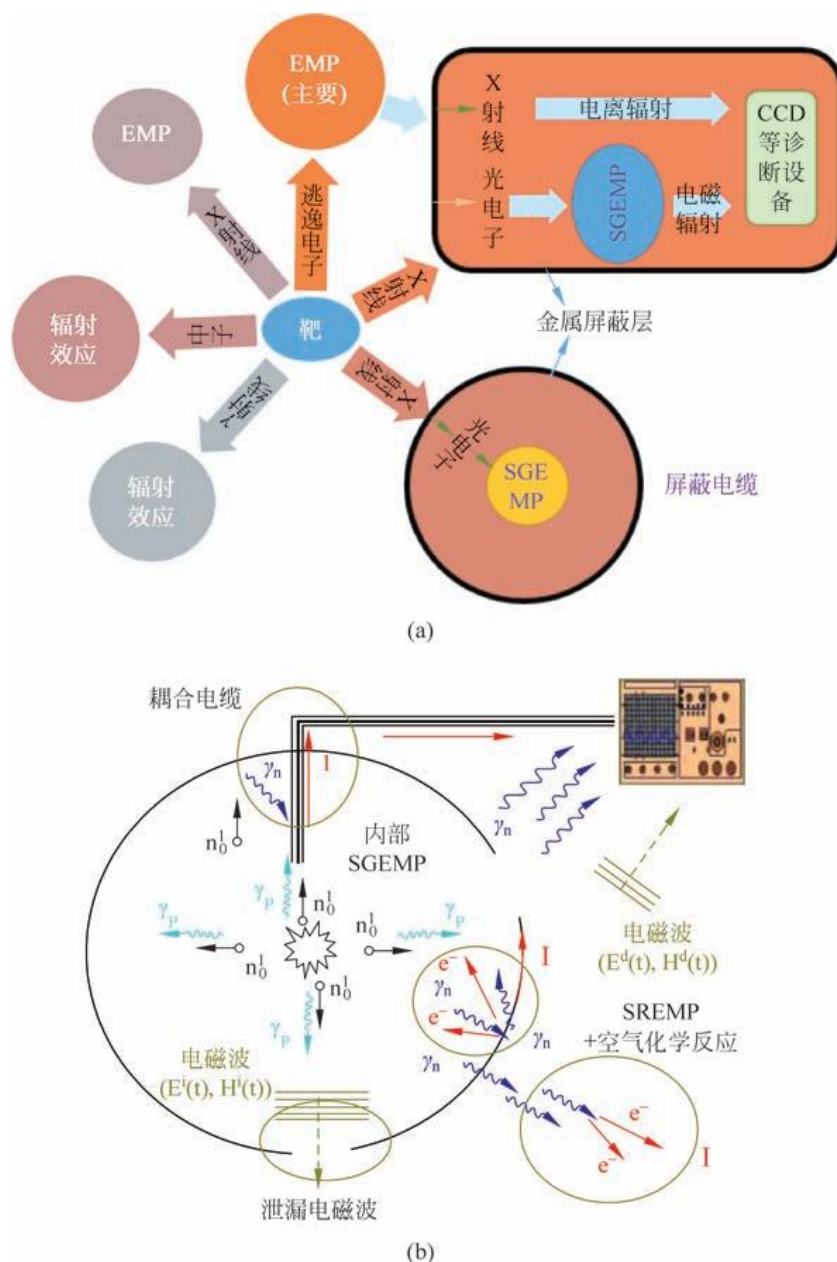


图 1-7 激光惯性约束装置靶室中的电磁脉冲

(a) 清华团队的分类; (b) NIF 的分类

1.4 强电磁脉冲国际标准

1989 年国际电工委员会(International Electromagnetic Commision, IEC)为编写 HEMP 的标准规范在 TC(Technical Committee)77 下成立了 SC(Subcommitte)77C 分会。后来该分会逐渐发展为针对人为的高功率电磁暂态现象的国际标准委员会。美国军用标准也编写了针

对核电磁脉冲、高功率微波以及超宽带的公开或保密的标准,中国、俄国以及德国等都编写有相应的国家标准^[6,15]。

国际电工学会于 1996 年公布了最新的 HEMP 标准。新的 HEMP 标准由一系列的数值计算结果拟和得到,与过去的任一标准相比,前沿变陡、半宽变窄,峰值都在 50 kV/m 左右,具体见表 1-3^[16,17]。

表 1-3 各种 HEMP 标准

标准名称	制定时间	前沿	半宽	脉宽
贝尔实验室	1975 年	4.1 ns	171.9 ns	587.7 ns
美国国防部标准 DOD-STD	1985 年	6.3 ns	84 ns	247 ns
美国军用标准 MIL-STD-461D	1997 年	小于 10 ns	后沿大于 75 ns	
IEC 标准	1996 年	2.5 ns	23 ns	64 ns
中国国家标准	2018 年	2.5 ns	23 ns	64 ns

电磁兼容的三大要素:环境、耦合、敏感设备,环境是第一重要因素。不同的电磁脉冲时域波形耦合进入复杂电子系统的途径和耦合规律不同。更窄、更快的电磁脉冲容易通过系统的孔缝耦合,从小的孔、缝耦合进入系统的电磁脉冲能量取决于入射波形高频分量的多少,而波形的尾部即低频部分是无法进入系统内部的;更宽、更慢的波形对长线缆的耦合更严重^[18,19]。因此,依据不同的电磁环境的标准波形对电子系统进行防护是必要的。

本书围绕瞬态电离辐射产生的电磁脉冲的物理机理、波形特征、波形准确测量、国际标准等开展论述。

参考文献

- [1] Baum C E. From the electromagnetic pulse to high-power electromagnetics[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(6): 789-817.
- [2] 孙景文. 美苏高空核试验述评[J]. 核武器与高技术, 1999(2): 24.
- [3] Latter R, Karzas W J. Electromagnetic Radiation from a Nuclear Explosion in Space[J]. Phys Rev, 1962, 126(6): 40.
- [4] 孟萃. 高空核爆炸电磁脉冲的产生、传播及耦合的理论和数值研究[D]. 西北核技术研究所, 2003.
- [5] Brian McGowan. The NIF Ignition Campaign [EB]. https://laser.llnl.gov/newsroom/project_status/index.php.
- [6] 孟萃. IECSC77C2009 年工作组会议综述[J]. 安全与电磁兼容, No. 4, 2009.
- [7] 孟萃. 瞬态电离辐射激励强电磁脉冲的研究[C]. 电子学会复杂电磁环境及效应年会, 2019.
- [8] Meng C, Chen Y S. Numerical Simulation of the Early-time High Altitude Electromagnetic Pulse[J]. Chinese Physics. Vol. 12, No. 12, 2003.
- [9] Meng C. Numerical Simulation of the HEMP Environment [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, no. 3, pp. 440-445, June 2013.
- [10] Environment-Description of HEMP-radiated Disturbance Basic EMC publication [S]. International Standard 61000-2-9. 1996.
- [11] 张均, 常铁强. 激光核聚变靶物理基础[C]. 北京: 国防工业出版社. 2004.
- [12] Lindl J D, Hamme B A. 美国 ICF 点火计划和惯性聚变能源计划[J]. 国外核武器研究, 2004 增刊: 30-46.

- [13] 徐志谦. 激光惯约装置辐射环境及 SGEMP 模拟[D]. 清华大学综合训练论文, 2017.
- [14] Meng C, Xu Zhiqian, Jiang Y S, Zheng W G, Dang Z. Numerical Simulation of the SGEMP Inside a Target Chamber of a Laser Inertial Confinement Facility[J]. IEEE trans. On Nuclear Science, 2017.
- [15] A Code to Model Electromagnetic Phenomena[R]. LLNL S&TR November 2007.
- [16] DOD-STD-2169, High-Altitude Electromagnetic Pulse Environment, DOD, June, 1985.
- [17] IEC 61000-2-9, Environment-Description of HEMP-radiated Disturbance Basic EMC publication, 1996.
- [18] 孟萃, 陈雨生, 俞汉清. 复杂结构目标核电磁脉冲效应的数值模拟[J]. 抗核加固, Vol. 16, No. 2, 1999.
- [19] 孟萃, 陈雨生, 王建国. 瞬态电磁脉冲对多孔洞目标耦合规律的数值研究[J]. 强激光与粒子束, Vol. 12, No. 6, Nov. 2000.

电离辐射的种类及其与物质的相互作用

2.1 基本概念和术语

2.1.1 原子的结构^[1]

原子是保持元素化学性质的最小粒子。1869 年,俄国化学家门捷列夫发现了元素周期律:各种元素的性质随原子量的增加而呈周期性的变化。这一规律是建立原子结构理论的重要基础。1897 年,汤姆逊研究阴极射线时发现了电子。紧接着,科学家们逐渐确定了电子的各种基本特性,并确定了电子是各种元素的原子的共同组成部分。1911 年,卢瑟福通过 α 粒子在金属箔上的散射实验,提出了原子的核式模型:原子中央是带正电的原子核,电子在核外围绕原子核运动。1913 年,玻尔基于原子的核式模型,并结合原子光谱的经验规律以及普朗克的量子概念,提出了关于原子结构的新假设:原子只能较长久地停留在一些不连续的稳定状态。处于这些稳定状态的电子虽然有加速度,但是不会放出辐射。一切原子能量的改变,都是由于吸收或放出辐射或者是碰撞,使原子从一个稳定状态跃迁到另一个稳定状态。1925 年,海森堡和薛定谔等,根据微观粒子不仅具有粒子性同时还具有波动性的实验事实,提出了量子力学理论,该理论是现代微观体系的基本理论。1932 年詹姆斯·查德威克发现了中子。不久,海森堡提出了原子核是由质子和中子组成的理论。

原子是电中性的。如果 1 个原子有 Z 个电子,每个电子所带的电荷量为 $e=1.602\,189\,2\times 10^{-19}\text{ C}$,则原子所带负电荷为 Ze ,而原子核所带正电荷为 Ze 。原子核是由 Z 个带正电荷的质子和 N 个不带电的中子所组成。原子核的质量用原子质量单位 u 来表示, $u=1.660\,565\,5\times 10^{-27}\text{ kg}$ 。质子的静止质量 $m_p=1.007\,276\,44\text{ u}$,中子的静止质量 $m_n=1.008\,665\,22\text{ u}$ 。

原子的质量绝大部分集中于原子核,且原子核的半径仅为原子半径的万分之一到十万分之一。组成原子核的各个核子通过远大于库仑排斥力的核力紧紧地结合在一起。

2.1.2 电离辐射的能量^[1]

在研究电子的运动时,发现电子的质量随电子运动速度的增加而增加。狭义相对论

指出：如果物体静止时的质量为 m_0 (静止质量)，那么物体运动速度为 v 时，它的质量增大到 m ，有

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (2-1)$$

式中， c 为光在真空中的速度， $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ 。

爱因斯坦的质能方程式指出，物体的质量 m 和能量 E 的关系为

$$E = mc^2 \quad (2-2)$$

根据能量守恒定律，可以求出运动速度为 v 的物体的动能 E_k 为

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right] \quad (2-3)$$

在核辐射物理中，电离辐射的能量通常用 eV 和 MeV 来表示。

一个电子在真空中通过 1 V 的电位差所获得动能，记为 1 eV。

$$1\text{ eV} = 1.602\,189\,2 \times 10^{-19}\text{ J}$$

$$1\text{ MeV} = 10^6\text{ eV}$$

由爱因斯坦的质能方程式可以计算出，电子的静止能量为 0.511 003 4 MeV，与一个原子质量单位相应的能量为 931.5016 MeV。

2.2 电离辐射的种类

2.2.1 常见电离辐射的种类及属性

能直接或间接使物质发生电离的辐射，统称为电离辐射。电离辐射按其电荷性质，分为带电的和不带电的。带电的电离辐射，在穿过物质时，主要通过库仑力与介质原子的核外电子、原子核发生弹性和非弹性碰撞。不带电的电离辐射与物质的相互作用，是通过产生出带电粒子，产生出的带电粒子再通过库仑力与介质原子发生相互作用。

带电的电离辐射根据其静止质量的大小，又可分为重带电粒子 (α 粒子、质子等) 和快电子。重带电粒子是指质量为一个或多个原子质量单位，并具有相当能量的带电粒子，一般带正电荷。重带电粒子实质上是原子的外层电子被完全或部分剥离的原子核。电子带单位负电荷，其反粒子带单位正电荷，称为正电子。常见的快电子有： β 衰变产生的 β 射线、内转换电子、 γ 射线与物质相互作用产生的次级电子、由加速器产生的具有相当高能量的电子束。

不带电的电离辐射主要有 γ 射线、X 射线和中子。 γ 射线是指由核发生的或由物质与反物质之间的湮灭过程中产生的电磁辐射，前者称为特征 γ 射线，后者称为湮灭辐射。X 射线是指处于激发态的原子退激时发出的电磁辐射，或带电粒子在库仑场中慢化时所辐射的电磁辐射，前者称为特征 X 射线，后者称为轫致辐射。中子不带电，一般由核反应、核裂变等核过程产生，易与物质发生核反应。

表 2-1 所示，为常见电离辐射的一些特性^[1]。

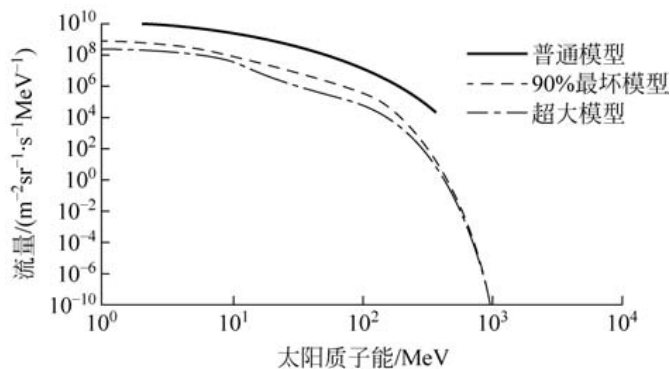
表 2-1 常见电离辐射的特性

粒子种类	符号	电荷/ e	质量/ m_e	寿命/s
电子	$e^- (\beta^-)$	-1	1	稳定
正电子	$e^+ (\beta^+)$	+1	1	稳定
质子	p	+1	1836.12	稳定
中子	n	0	1838.65	1.04×10^{-3}
α 粒子	α	± 2	7294	稳定
γ 射线	γ	0	0	
X 射线	X	0	0	

2.2.2 常见的瞬态电离辐射来源

2.2.2.1 太阳质子事件

太阳光球中的强磁场达到临界不稳定状态时,会突然调整、释放以便消除这种不稳定状态,将发生太阳耀斑。太阳耀斑发生时释放的能量高达 10^{32} ergs,占太阳总输出能量的 0.1%。太阳耀斑的持续时间从几分钟到数小时,使日冕温度提高到 2×10^7 K。伴随这种高温变化,大流量密度的粒子被加速并从太阳表面喷出,粒子成分主要是 1 MeV~10 GeV 的高能质子,因此称为太阳质子事件^[2]。图 2-1 列举了不同太阳质子事件模型的能谱^[3]。能量高于 500 MeV 的质子从太阳到地球的传播时间在 1 小时之内,能量低于 500 MeV 的质子的传播时间为几十分钟到几十小时。

图 2-1 太阳质子事件能谱^[3]

2.2.2.2 大科学装置

为了满足能源等研究的需要,世界各国先后研制了大小不同的激光惯性约束聚变实验装置。其中采用最多的驱动方法为间接驱动,将激光能量转换成 X 射线能量,X 射线再与靶丸相互作用,使靶丸内的 D-T 燃料压缩到高温高密度以达到点火燃烧。图 2-2 给出了我国神光Ⅲ装置,归一化的激光功率波形 P_L 和 X 射线波形 P_X ^[4]。各种加速器都会产生电离辐射。

2.2.2.3 核爆炸

核爆炸时,核反应会产生瞬发 γ 辐射、中子,中子与弹壳及空气作用时又会产生 γ 辐射。图 2-3 为裂聚变比为 0.1 : 0.9 的百万吨当量氢弹爆炸时,产生的 γ 瞬发辐射的时间谱^[5]。

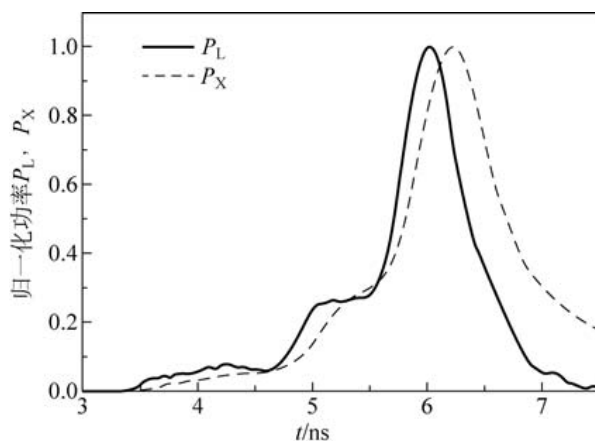


图 2-2 我国神光Ⅲ装置,归一化的激光功率波形和 X 射线波形比较^[4]

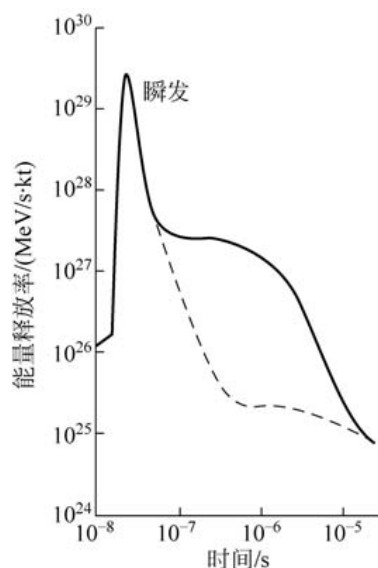


图 2-3 核爆炸产生的 γ 瞬发辐射的时间谱^[5]

其中,虚线为无传播介质影响的真空中爆炸的时间特征, 10^{-6} s 以前主要为伴随裂变 γ 和中子在弹体介质中的非弹性散射 γ ,到达峰值后迅速衰减。在空气介质中爆炸时, 10^{-7} s 时,中子在弹体和空气中非弹性散射 γ 使得 γ 辐射大为增强,一直维持到 10^{-6} s 才开始下降。

2.3 带电粒子与物质的相互作用

带电粒子穿过介质时,损失能量的形式主要为通过库仑力与介质原子的核外电子、原子核发生弹性或非弹性碰撞。弹性碰撞过程中,动能守恒。非弹性碰撞过程中,动能不守恒,粒子的动能转化为介质原子的激发、电离能,或转化为电磁辐射能。当然,入射带电粒子也有可能穿透原子核的库仑势垒而发生核反应,但概率很小,在这里不讨论。

2.3.1 带电粒子与物质的相互作用概述

2.3.1.1 与核外电子的非弹性碰撞

带电粒子进入任何一种介质后,均会通过库仑力的作用,使介质原子的核外电子获得能量,使介质原子发生电离或激发。电离是指核外电子通过非弹性碰撞得到的能量足够高,使它能够克服原子核的束缚成为自由电子。这样,介质原子就分离为一个自由电子和一个正离子,二者的总称叫离子对。激发是指核外电子通过非弹性碰撞得到的能量不足以克服原子核的束缚,仅使电子从能量低的壳层跃迁到能量较高的壳层。处于激发态的原子是不稳定的,它将自发地跳回基态,这个过程叫作退激。退激时,多余的能量通常以光子的形式释放出来^[6]。

无论电离还是激发,都将导致带电粒子损失动能,速度逐渐减慢,直到最后停止。使一个原子电离所需的平均能量称为平均电离能。平均电离能要比原子的电离电位大,因为它包

括了带电粒子穿过物质时由于激发作用而损失的能量。在同一种气体中,同一种带电粒子的平均电离能与该带电粒子的动能无关。不同种类的物质的平均电离能虽然不相同,但是差异不大。如 α 粒子在空气中的平均电离能为 34.98 eV,在氩气中的平均电离能为 26.3 eV。把带电粒子使物质原子电离或激发而损失的能量称为电离能量损失。带电粒子在物质中单位路程上的电离损失称为电离能量损失率,常用符号 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 表示。 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 也反映了物质原子的电子对入射带电粒子的阻止能力,所以又称为电子阻止本领。

2.3.1.2 与原子核的非弹性碰撞

入射带电粒子进入介质后,也会与介质原子的原子核发生库仑相互作用,使入射带电粒子的运动速度和方向发生改变。

经典电动力学的理论指出,带电粒子的速度发生变化时,会伴随辐射的产生。因此,带电粒子与介质原子的原子核发生非弹性碰撞,导致带电粒子骤然减速时,将会产生电磁辐射,称为轫致辐射。把带电粒子产生轫致辐射的过程中损失的能量称为辐射能量损失。辐射能量损失率用符号 $(-dE/dx)_{\text{rad}}$ 表示。只有当带电粒子的动能大于它的静止能量时,辐射能量损失才成为重要的能量损失形式。因此,前面已经指出,与一个原子质量单位相应的能量为 931.5016 MeV,因此,对于重带电粒子,轫致辐射的能量损失可以忽略。而对于快电子,轫致辐射的能量损失则占重要地位。

2.3.1.3 与原子核的弹性碰撞

入射带电粒子进入介质后,还会通过与介质原子的原子核的库仑相互作用发生弹性散射,这就是卢瑟福散射。该过程既不会使原子核激发也不产生轫致辐射,只是使原子核反冲而带走入射带电粒子的一部分能量。这种能量损失称为核碰撞能量损失,用符号 $(-dE/dx)_n$ 表示。把原子核对入射粒子的这种阻止作用称为核阻止。

卢瑟福散射公式给出了入射带电粒子与介质原子核发生弹性散射的截面 $d\sigma/d\Omega \propto z^4/E^2$, 其中 z 和 E 分别为入射带电粒子的电荷数和动能。可以看到,当入射粒子能量较低、电荷数较大时,这种能量损失方式才比较重要。

带电粒子与介质原子核发生弹性碰撞时,原子核获得反冲能量,使晶格原子发生位移,形成介质的辐射损伤。对于快电子,由于它的质量比较轻,因此与介质原子核发生弹性碰撞时,能量损失非常小,可以忽略不计;但是运动方向会发生严重偏转,造成严重的散射。

2.3.1.4 与核外电子的弹性碰撞

入射带电粒子在与介质原子的核外电子的弹性碰撞过程中,只有很小的能量转移。而且,只有极低能量(小于 100 eV)的电子,才需要考虑这种相互作用机制,因此,一般不予考虑。

2.3.2 重带电粒子与物质的相互作用

根据前面的介绍可知,重带电粒子最主要的能量损失形式是与介质原子的核外电子发生非弹性碰撞。由于重带电粒子的能量远大于电子在介质原子内的结合能,因此可以将电子近似看作自由电子。按照弹性碰撞理论,质量为 m 的重粒子与质量为 m_0 的电子发生碰撞后,电子能获得的最大能量为 $4Em_0/m$ (E 是重带电粒子的能量)。当重带电粒子为质子时,这个值为 $E/500$ 。对于质量数更大的重带电粒子,这个数值将更小。可见,重带电粒子

与介质原子的核外电子的每次碰撞,只转移极小部分的能量。一个 1 MeV 的重带电粒子在损失其全部能量之前,要发生 10^5 次碰撞。能量范围在 10 keV~10 MeV 的重带电粒子穿透物质时,在气体内最多穿透几个厘米(cm),耗时约为几个纳秒(ns);在液体和固体内最多穿透几十微米(μm),最多耗时几十皮秒(ps)。在这个过程中,由于重带电粒子主要是与介质原子的核外电子相互作用,而重带电粒子的质量远远大于电子的质量,因此,重带电粒子在介质中的径迹除了末端以外都是非常平直的。

2.3.2.1 能量损失率与 Bethe 公式

电离损失是带电粒子与物质相互作用时最主要的能量损失形式。因此,科学家们很早就开始了对电离能量损失率的研究。描述 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 与入射带电粒子、靶物质参量的关系的经典公式称为 Bethe 公式。该公式是贝特在 1930 年用碰撞的量子理论推导出的,后人又对该公式进行了多次完善。

在 Bethe 公式的推演中,作了如下假定^[7]:

(1) 入射带电粒子与介质原子的核外电子的每一次碰撞中,介质原子的核外电子获得的能量远大于它的结合能。也就是说,入射带电粒子的运动速度远大于介质原子中轨道电子的运动速度。因此,可以将介质原子中的核外电子看作是自由电子;

(2) 在碰撞过程中,不考虑入射带电粒子从介质原子中拾取电子的情况,也就是说,入射带电粒子的电荷态在碰撞过程中是恒定的;

(3) 由于重带电粒子的质量远远大于电子的质量,因此可以认为入射重带电粒子在与介质原子的核外电子发生碰撞后,仍然按照初始的入射方向作直线运动。

在上述假定下,可以推导出相对论情况下的 Bethe 公式为^[7]

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{4\pi e^4}{m_e} \frac{z^2 NZ}{v^2} \left[\ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) - \ln(1 - (v/c)^2) - (v/c)^2 \right] \quad (2-4)$$

式(2-4)中, m_e 为电子的静止质量; E 、 z 和 v 分别为入射重带电粒子的能量、电荷数和运动速度; N 为单位体积内的靶物质原子数; Z 为靶物质原子的原子序数; I 为靶物质原子的平均电离能,由实验测定,一般为几十电子伏(eV)。

在非相对论情况下,可以化简为^[7]

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{4\pi e^4}{m_e} \frac{z^2 NZ}{v^2} \ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) \quad (2-5)$$

根据 Bethe 公式可以得出以下几个关于重带电粒子的电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 的重要结论:

(1) 重带电粒子的电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 与它的速度 v 有关,和它的质量 m 无关。

这是因为,重带电粒子的质量远大于电子的质量。因此,在重带电粒子与介质原子的核外电子的每次碰撞中,电子获得的能量最多约为 $4Em_e/m \approx 2m_e v^2$ (在非相对论情况下,重带电粒子的能量 $E = mv^2/2$),可以忽略重带电粒子的质量的影响。

(2) 重带电粒子的电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 与它的电荷数的平方(z^2)成正比。

例如, α 粒子的电离能量损失率是相同速度的质子的四倍。

(3) 重带电粒子的电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 与它的能量 E 的关系分为三部分。

图 2-4 给出了重带电粒子在不同能区的电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 与其能量 E 的

关系^[7]。图中,横坐标表示的是入射粒子中每个核子的平均能量 E/n , n 为入射粒子所含的核子数。图中的 b 段,即 $500I < E/n \leq m_p c^2$ 的范围, $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 近似正比于 $1/E$ 。这是因为该能区的相对论效应很小, Bethe 公式中的对数因子变化不大。图中的 c 段,相对论效应变大, Bethe 公式中的对数因子的影响变大, $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 值开始增加,在 $3m_p c^2$ 处出现极小值(m_p 为质子的质量)。图中的 a 段,即 $E/n < 500I$ 的范围,入射粒子和介质原子的电荷交换作用变得不可忽略,带正电的入射粒子从靶物质原子中拾取电子,使入射带电粒子的有效电荷降低,电离能量损失率减小, Bethe 公式不再适用。

(4) 重带电粒子的电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 与靶物质的电子密度 NZ 成正比。

因此,物质的密度越大,原子序数越高,该物质对重带电粒子的阻止本领也越大。

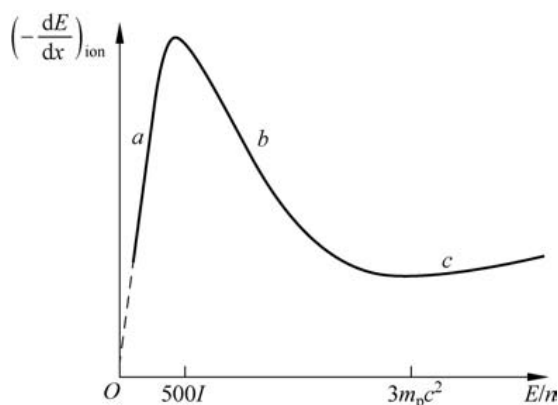


图 2-4 重带电粒子的电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 与其每个核子的平均能量 E/n 的关系^[7]

2.3.2.2 Bragg 曲线与能量歧离

重带电粒子的电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 沿其径迹的变化曲线,称作 Bragg 曲线。图 2-5 所示为 α 粒子的 Bragg 曲线(初始能量为几电子伏(MeV))^[7],刚开始的时候,电离能量损失率随穿透距离的增加而增加,这是因为刚开始的时候电离能量损失率近似正比于 $1/E$,相应于图 2-4 的 b 区。接近径迹末端的时候,由于拾取电荷的影响,带电粒子的有效电荷下降,电离能量损失率迅速减小至零。

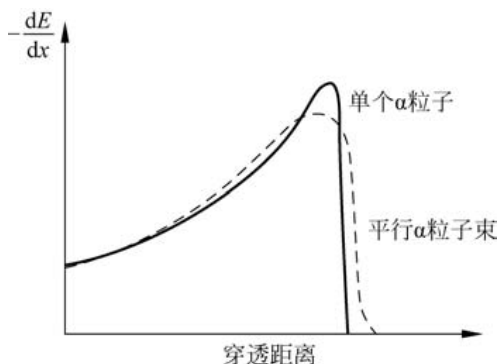


图 2-5 电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 沿其径迹的变化^[7]

此外,从图 2-5 中还可以看出,平行 α 粒子束的 Bragg 曲线与初始能量相同的单个 α 粒子有所差异。这是因为入射带电粒子与介质原子的微观相互作用是随机的。因此入射带电粒子的能量损失是一个随机过程,Bethe 公式只是该随机过程的平均值。一束初始能量相同的带电粒子穿过一定厚度的介质后,各个粒子损失的能量会有所差异。这种能量损失的统计分布称作能量歧离。

如图 2-6 所示为 3 MeV 的单能质子束在穿透 3.3 mg/cm^2 的金箔时的能量歧离现象^[7]。质子束在表面处的能量分布很窄,在穿透一定厚度的介质后,能量减小,分布变宽,能量歧离严重。

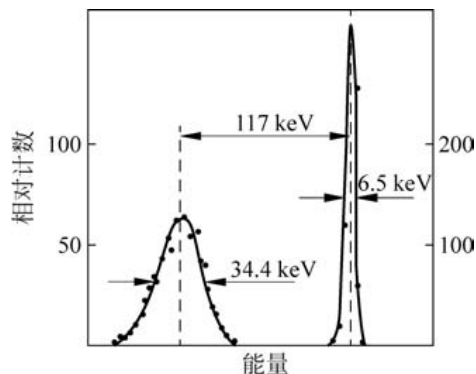


图 2-6 单能质子束穿过一定厚度的介质后的能量歧离现象^[7]

2.3.2.3 Bragg 加法法则

电离能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 除以原子密度称为电离阻止截面 Σ_{ion} , 单位是 $\text{eV} \cdot \text{cm}^2$ 。由于电离损失是与电子碰撞引起的, 因此电离阻止截面又称为电子阻止截面 Σ_e :

$$\Sigma_e = \frac{1}{N} \left(-\frac{dE}{dx} \right)_e \quad (2-6)$$

对于快速重带电粒子, 核阻止截面 Σ_n 可以忽略, 因此, 电子阻止截面 Σ_e 即为原子阻止截面 Σ 。

化合物或混合物的阻止截面可由 Bragg 法则求得。例如, 由 a 个 X 原子和 b 个 Y 原子组成的某化合物 $X_a Y_b$, 每个该化合物分子的阻止截面 $\Sigma_{X_a Y_b}$ 为^[7]

$$\Sigma_{X_a Y_b} = a\Sigma_X + b\Sigma_Y \quad (2-7)$$

对于多元素化合物, 可以推导出^[7]

$$\frac{1}{N_c} \left(-\frac{dE}{dx} \right)_c = \sum_i w_i \frac{1}{N_i} \left(-\frac{dE}{dx} \right)_i \quad (2-8)$$

式中, w_i 、 N_i 和 $(-dE/dx)_i$ 分别为化合物的第 i 种成分元素的原子份额、原子密度和阻止本领。

需要强调的是, Bragg 加法法则未考虑化合物分子中原子之间的相关性, 因此只是近似的表达式, 和真实值相差 $10\% \sim 20\%$ ^[7]。

2.3.2.4 径迹特征

重带电粒子入射到靶物质后, 通过不断地与靶物质原子的核外电子发生碰撞而损失能量, 最后能量耗尽而停留在物质中。在其运动的轨迹上, 会留下被电离或激发的靶物质原子, 从而形成径迹, 该径迹已借助核乳胶观测到。图 2-7 所示为模拟计算得到的 2 MeV 的质子、8 MeV 的 α 粒子在水中的径迹片段^[7]。图中的分叉是带电粒子产生的高能电子引起介质原子电离所形成的径迹, 该电子称为 δ 电子或 δ 射线。

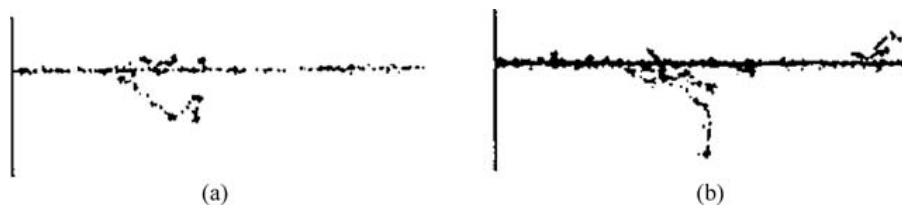


图 2-7 模拟计算得到的(a)2 MeV 的质子; (b)8 MeV 的 α 粒子在水中的径迹片段^[7]

如前所述,带电粒子在穿过介质时,会产生电子-离子对。带电粒子穿透单位距离的介质时产生的平均离子对数,称为比电离。对于给定能量的入射带电粒子,它的比电离等于阻止本领除以产生一个离子对所需的平均能量。例如,5 MeV 的 α 粒子在空气中的阻止本领为 $1.23 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^{-1}$,产生一个离子对所需的平均能量为 36 eV,则它在空气中的比电离为 $1.23 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^{-1} / 36 \text{ eV} = 34\,167 \text{ cm}^{-1}$ 。

2.3.2.5 射程

入射粒子在靶物质中沿其入射方向所行经的最大距离,称作它在该物质中的射程。入射粒子在靶物质中行经的实际轨迹长度,称作它在物质中的路程。前面已经提到重带电粒子在穿透物质的过程中几乎沿直线运动,所以它在物质中的射程近似等于路程。理论上可以通过 Bethe 公式求出入射能量为 E_0 的重带电粒子在物质中的射程 R 为

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{(-dE/dx)_{\text{ion}}} \quad (2-9)$$

但是,由于 Bethe 公式的复杂性,以及 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$ 在低能部分并不清楚,因此主要是通过实验来测定带电粒子在物质中的射程。

根据 α 粒子在空气中的射程数据总结出的半经验公式为

$$R_0 = 0.318 E_{\alpha}^{1.5} \text{ cm} \quad (2-10)$$

式中, E_{α} 为 α 粒子的初始能量, MeV。此半经验公式仅适用于入射能量为 3~7 MeV 的 α 粒子。

对于具有相同速度的两种重带电粒子,它们的射程的比值为

$$\frac{R_1(v)}{R_2(v)} = \frac{z_2^2 m_1}{z_1^2 m_2} \quad (2-11)$$

因此,对于没有射程数据可用的重带电粒子,可以先算出它的初始速度,再查出初始速度相同的任一种其他重带电粒子在同一吸收材料中的射程,再根据上式求出该粒子在该种材料中的射程。

对于全部组分元素的射程数据已知的化合物,粒子在该化合物中射程为

$$R_c = M_c \left/ \sum_i n_i \left(\frac{A_i}{R_i} \right) \right. \quad (2-12)$$

式中, R_i 、 n_i 和 A_i 分别为化合物的第 i 元素的射程、原子数和原子量; M_c 为化合物的分子量。

对于不能得到全部组分元素的射程数据的化合物,可以按下面的半经验公式进行估算:

$$\frac{R_i}{R_0} \approx \frac{\rho_0 \sqrt{A_i}}{\rho_i \sqrt{A_0}} \quad (2-13)$$

式中, ρ 和 A 表示密度和原子量,下标 0 和 i 表示不同的吸收材料。当两种材料的原子量差别太大时,估算的精度会下降。因此,应尽可能使用与所关心吸收体的原子量相近的材料的吸收数据。

对于质量为 m , 能量为 E 的非相对论重带电粒子,它阻止在吸收体内所需要的时间可以用下式进行估算:

$$t \approx 1.2 \times 10^{-7} R \sqrt{m_a/E} \quad (2-14)$$

式中, t 、 R 、 m_a 和 E 的单位分别为 s、m、原子质量单位 u 和 MeV。