

核反应堆屏蔽 工程学

[美] N. M. 谢弗 编

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述了辐射屏蔽的基本原理、物理计算方法以及核反应堆屏蔽系统的工程设计过程。为便于理解和应用,书中还列举了若干典型实例。在物理计算方面除详细介绍了离散纵标法、矩方法、蒙特卡罗法等近代计算方法外,还给出了大量常用剂量或通量减弱计算公式和数据图表,并在不少地方将计算结果与测量值作了比较。

本书主要供核反应堆屏蔽设计人员使用,也可供一般核工程技术人员、核物理实验人员、同位素应用人员和大专院校有关师生参考。

N. M. Schaeffer, Editor
**REACTOR SHIELDING FOR
NUCLEAR ENGINEERS**

Published by U. S. ATOMIC ENERGY COMMISSION
Office of Information Services

核反应堆屏蔽工程学

[美]N. M. 谢弗 编

华 平 译

汪鉴民 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092¹/₁₆·印张 35³/₄·字数 757 千字

1983年2月第一版·1983年2月第一次印刷

印数001—1200·统一书号: 15175·436

定价: 3.85元

译 者 的 话

本书由清华大学核能技术研究所屏蔽实验室同志集体翻译。张志康同志译第一章，金光宇同志译第二章，安福林和郭志萍同志译第三章，薛禹易同志译第四章，张宜宗同志译第五章，刘运昌同志译第六章，凌贵中同志译第七章，陈玲燕同志译第八章，刘以思同志译第九章，邢振华同志译第十章。凌贵中同志对全书做了初步校对，后来上海七二八工程研究设计院汪鉴民同志做了进一步校对，最后由金光宇同志对全书进行了加工整理。

在翻译过程中得到了北京大学孙山泽同志、清华大学高乃飞同志、二机部第二研究设计院华旦同志、原子能出版社蒋康铭同志的帮助，谨致谢意。

1981. 4. 24

序 言

随着核电站订货数目不断增长(目前,仅在美国每年就有三十多个),对核工程技术人员的需求也必然相应地增加,因此,人们早就期待着在反应堆屏蔽方面能有一本新的教科书。最近十年来,屏蔽技术已经相当成熟,而屏蔽物理学方面的成就也必须不断地反映到屏蔽设计中去。自1959年赫伯特·戈尔茨坦(Herbert Goldstein)所著的《Fundamental aspects of reactor shielding》一书出版以来,计算机技术的发展使人们有可能采用以前认为太费钱的某些设计方法,而且在测量方法上也有了許多新的发明。因此,无论在理论上还是在实际上,现在都可以对中子和 γ 射线在其整个输运过程中的角分布和能量分布进行研究。这样一些有效的工具给屏蔽界带来了很大的好处。

本书反映了屏蔽研究的这些新的进展及其基本原理,可以作为高年级大学生和研究生学习反应堆屏蔽课程用的为期两个学期的教科书。本书认为读者对偏微分方程等计算方法以及对粒子相互作用理论等核物理知识都比较熟悉。尽管如此,在第三章中对粒子相互作用理论的某些方面仍作了适当回顾。预计课程需两个学期;内容安排上,第一学期讲授到基本输运问题为止,第四章的部分内容可留到第二学期讲授。第二学期的内容主要是一些专题,诸如蒙特卡罗法、反照率、管道、屏蔽设计等。当然,教员可以按照自己的计划来安排教学。在第二章到第六章中附有一些习题,并在书的最后部分给出了答案。本书中只采用公制单位,避免引用保密文献,而且只有在没有杂志上的文献可供引证时才引用技术报告。

虽然这本教科书名为《反应堆屏蔽工程学》,但是本书也适用于以中子和 γ 射线减弱规律为主要研究内容的有关课题,例如核武器的屏蔽和同位素的应用。至于空间辐射和高能加速器屏蔽方面的研究,虽然与屏蔽这个题目密切有关,但已超出了本书的范围。

最早主张要搞这本书的是塞缪尔·格拉斯顿(Samuel Glasstone)博士,他认为这样的教科书是迫切需要的并首先提出了编写的建议。按照当初的计划,美国原子能委员会要我与格拉斯顿博士共同编纂。虽然对合作问题曾有多次磋商,但是,由于格拉斯顿博士要参加许多其它工作,他不得不放弃了他所承担的任务。对于他在本书的规划阶段所作出的贡献以及对初稿的有益审定,笔者深为感谢。并对我们之间的合作未能继续下去深感遗憾。

在初稿的编写过程中,我得到了许多人在各方面的大力协助。其中特别要提出的是已故的E. P. 布利泽德(Blizard),可以说,若没有他的广泛的影响现在要出版屏蔽方面的书是不可能的。布利泽德对于别人的工作所给予的热情鼓励和支持,是他在屏蔽技术发展上作出的许多贡献的一个重要方面。同样,在本书初稿的撰写过程中也得到了他的热情鼓励。

ORNL(美国橡树岭国立实验室)屏蔽资料中心的工作人员为本书的编写提供了很多方便和有益的建议,尤其在文献检索方面给予了许多帮助。此外,笔者还与ORNL的洛兰·艾伯特(Lorraine Abbott)、克莱德·克莱本(Clyde Claiborne)、查尔斯·克利福德(Charles Clifford)、保罗·斯蒂文斯(Paul Stevens)、戴夫·特拉比(Dave Trubey)等人进行过多次有益的讨论;除在本书中作过引证的以外,他们还提供了许多参考资料和数据。对此,笔者深表谢意。另外,我的同事迈克·韦尔斯(Mike Wells)和鲍勃·弗伦奇

(Bob French) 也为本书提供了许多数据和资料。

美国国家标准局 (NBS) 的卢·斯潘塞 (Lew Spencer) 对全书初稿作过详细的审阅并提出了许多有益的建议。对初稿的各个部分进行审阅的还有：伊利诺斯大学的阿瑟·奇尔顿 (Arthur Chilton) 及其学生，洛斯阿拉莫斯科学实验室的唐·达兹雅克 (Don Dudziak)，美国国家标准局的查尔斯·艾森豪尔 (Charles Eisenhower)，罗尔斯罗伊斯股份有限公司的克利夫·霍尔登 (Cliff Horton)，堪萨斯州立大学的理查德·福 (Richard Faw)，通用电气公司诺尔斯原子动力实验室的诺曼·弗朗西斯 (Norman Francis)、戴维·梅什 (David Mesh) 等，普渡大学的吉恩·亨格福德 (Gene Hungerford)，纽约大学的约翰·拉马什 (John Lamarsh)，ORNL 的弗雷德·梅恩谢 (Fred Maienschein)，加利福尼亚大学的埃德·普罗菲奥 (Ed Profio)，以及得克萨斯基督教大学的利·西克雷斯特 (Leigh Secrest) 等，笔者在此一并致谢。这些审阅者中的许多人根据他们在屏蔽学方面的教学经验提出了许多忠告。

美国原子能委员会的约翰·英格利玛 (John Inglima) 和罗伯特·皮金 (Robert Pigeon) 分别在本书的规划阶段和编写初稿时给予了指导并提出了许多宝贵意见。美国原子能委员会的琼·史密斯 (Jean Smith) 和玛丽安·福克斯 (Marian Fox) 承担了技术编辑工作。辐射研究协会的蒙西塔·夸维 (Monsita Quave) 完成了极为艰巨的初稿打字任务，西尔·谢弗 (Ceil Schaeffer) 则为我分担了许多繁重校对任务，对此一并表示衷心的感谢。

N. M. 谢弗

目 录

序 言	
第一章 历史背景	1
第二章 辐射源	7
2.1 γ 射线源和中子源	7
2.1.1 γ 射线源	8
2.1.2 中子源	10
2.2 基本的数学概念和物理概念	11
2.2.1 微分分布	11
2.2.2 平均值和最可几值	14
2.2.3 立体角	15
2.2.4 辐射强度的度量	16
2.3 空间和方向特性	23
2.3.1 空间分布	23
2.3.2 方向分布	25
2.4 能量分布	28
2.4.1 γ 辐射源的能量分布	29
2.4.2 裂变中子谱	32
2.4.3 介质对谱的影响	34
参考文献	35
习题	36
第三章 辐射与物质的相互作用	39
3.1 截面	39
3.1.1 微观截面	39
3.1.2 宏观截面	40
3.1.3 辐射的反应率	41
3.2 辐射与物质的相互作用	42
3.2.1 光子与物质的相互作用	42
3.2.2 中子反应	52
3.3 对辐射的响应	59
3.3.1 吸收剂量	60
3.3.2 首次碰撞剂量和比释动能	61
3.3.3 照射量	65
3.3.4 RBE剂量, 剂量当量	66
3.3.5 最大吸收剂量, 最大剂量当量	68
3.3.6 多次碰撞剂量	70
参考文献	71
习题	72
第四章 辐射输运	75
4.1 基本考虑	76
4.2 玻尔兹曼输运方程	78

II

4.3 球谐函数法	81
4.4 离散纵标 S_n 方法	83
4.4.1 输运方程和相空间几何条件	84
4.4.2 有限差分方程的推导	85
4.4.3 离散纵标方程的数值解	90
4.4.4 优点和缺点	92
4.5 矩方法	92
4.6 扩散理论的应用	100
4.7 不变量嵌入法	101
4.8 点核技术	105
4.8.1 γ 射线的计算	105
4.8.2 中子点核技术	111
4.9 分出扩散法	119
4.9.1 Spinney 方法	119
4.9.2 改型的 Spinney 方法	121
4.9.3 各种方法之间的差别	126
参考文献	127
习题	130
第五章 用于求解辐射输运问题的蒙特卡罗方法	132
5.1 从几率分布函数中抽样	133
5.2 积分值的计算	137
5.3 源参数	138
5.3.1 由能量分布选择初始能量	139
5.3.2 源粒子空间点的选择	139
5.3.3 源粒子初始方向的选择	140
5.3.4 源的偏置参数	141
5.4 路程长度	143
5.5 碰撞参数	148
5.6 碰撞后的粒子参数	149
5.6.1 中子的弹性散射	149
5.6.2 中子的非弹性散射	151
5.6.3 康普顿散射	151
5.6.4 粒子的吸收	152
5.6.5 出射粒子方向余弦的计算	152
5.7 粒子的记录	152
5.8 统计方差	156
5.9 蒙特卡罗示范程序	158
5.10 对编程的几点意见	160
参考文献	162
习题	163
第六章 屏蔽减弱计算	165
6.1 源项分析	165
6.2 直接求解法	166

6.3 参数化数据的应用	166
6.3.1 矩方法微分能谱	167
6.3.2 蒙特卡罗方法	170
6.3.3 测量数据	172
6.3.4 拟合得到的参数化数据	177
6.4 简化解	178
6.4.1 γ 射线积累因子的应用	178
6.4.2 中子分出理论点核的应用	180
6.4.3 点核在其它方面的应用	181
6.4.4 估算低能中子通量密度的方法	187
6.5 点核技术在计算二次 γ 射线剂量方面的应用	190
6.5.1 板状屏蔽层的计算公式	191
6.5.2 半无限屏蔽层的计算公式	193
参考文献	194
习题	196
第七章 反照率、管道和空隙	198
7.1 反照率引论	198
7.2 定义	199
7.2.1 微分剂量反照率	200
7.2.2 总剂量反照率	200
7.2.3 其它类型的反照率	201
7.3 中子反照率	201
7.3.1 快中子反照率	201
7.3.2 中能中子反照率	209
7.3.3 热中子反照率	210
7.4 γ 射线反照率	216
7.5 次级 γ 射线反照率	223
7.6 反照率的应用	225
7.7 管道	226
7.8 直穿成分	227
7.8.1 矩形管道	228
7.8.2 矩形缝隙	230
7.8.3 圆柱形管道	231
7.8.4 环形管道	233
7.9 管壁穿透成分	233
7.9.1 对圆柱形管道的应用	235
7.9.2 对部分贯穿圆柱形管道的应用	237
7.9.3 与实验的比较	238
7.10 管壁散射成分	238
7.10.1 模拟蒙特卡罗计算	238
7.10.2 反照率方法	240
7.10.3 其它的实验研究	254
7.11 空隙	258

IV

7.11.1 单个空隙	259
7.11.2 不规则分布的小空隙	264
参考文献	265
第八章 屏蔽发热、空气输运、屏蔽材料和屏蔽最佳化	269
8.1 屏蔽发热	269
8.1.1 γ 射线发热	269
8.1.2 中子发热	274
8.1.3 带电粒子的发热	275
8.2 辐射在空气中的输运	276
8.2.1 无限空气介质	277
8.2.2 关于空气-地面几何条件的计算	281
8.2.3 空气-地面界面效应	281
8.3 屏蔽材料	285
8.3.1 在选择材料时应考虑的各种因素	285
8.3.2 用于固定式反应堆系统的屏蔽材料	287
8.3.3 用于移动式反应堆系统的屏蔽材料	290
8.3.4 减弱性能的比较	292
8.4 屏蔽最佳化	294
参考文献	298
第九章 实验屏蔽学	303
9.1 屏蔽实验用的探测器	303
9.1.1 有源中子探测器	303
9.1.2 无源中子探测器	304
9.1.3 有源 γ 射线探测器	305
9.1.4 无源 γ 射线探测器	305
9.1.5 关于探测器测量结果的讨论	306
9.2 屏蔽材料测量	306
9.2.1 反应堆	306
9.2.2 加速器	318
9.2.3 同位素源	326
9.3 现象学实验	329
9.3.1 空气输运和空气-地面界面实验	329
9.3.2 孔缝穿透	333
参考文献	334
第十章 屏蔽设计	338
10.1 屏蔽设计的深化过程	339
10.1.1 初步概念设计	339
10.1.2 详细的概念设计	340
10.1.3 最终工程设计	341
10.2 恩里珂·费米快增殖堆	343
10.2.1 核电站	343
10.2.2 屏蔽设计标准	346
10.2.3 反应堆屏蔽系统	348

10.2.4 屏蔽造价	357
10.2.5 计算技术	358
10.2.6 测量与计算的比较	361
10.3 快增殖堆: 唐瑞快堆	365
10.3.1 整体屏蔽的计算模型	367
10.3.2 实验测量	368
10.3.3 泄漏的影响	370
10.4 重水天然铀反应堆: 阿杰斯塔	371
10.4.1 反应堆和屏蔽系统概述	371
10.4.2 计算模型	372
10.4.3 测量	374
10.5 沸水堆: “探险者”	377
10.5.1 计算	379
10.5.2 监查测量	380
10.6 船用核推进器: 核动力船“萨凡娜”号	381
10.6.1 船、反应堆及主体屏蔽	381
10.6.2 用于更换元件和检修控制棒的屏蔽	383
10.6.3 屏蔽设计标准	384
10.6.4 铅-聚乙烯屏蔽结构	385
10.6.5 减弱计算	385
10.6.6 测量	388
10.6.7 测量值与计算值的比较	389
10.7 空间动力堆: SNAP-10A的飞行试验	391
10.7.1 屏蔽分析	392
10.7.2 飞行试验的结果	394
参考文献	396
附录A 中子非弹性散射和裂变产生的 γ 射线	399
附录B 标准人体模型的中子注量-比释动能转换因子	405
附录C 圆柱形人体组织模型	409
附录D 坐标系、矢量运算和勒让德多项式	410
D.1 坐标系	410
D.2 坐标系变换	410
D.3 矢量算符和矢量函数	411
D.4 狄拉克函数	413
D.5 勒让德多项式	414
D.6 缩合勒让德多项式	415
D.7 缩合球谐函数	416
附录E 照射量积累因子	417
附录F γ 射线积累因子的各种系数	419
附录G 有关指数积分函数的图和公式	430
附录H 有限板状几何条件的减弱函数表	437
附录I 随机数产生器	448

VI

I.1 随机数产生器的性质	448
I.2 随机数产生器的递推方程	449
I.3 对随机数产生器的检验	451
I.3.1 Global 检验	451
I.3.2 均匀分布	452
I.3.3 非相关性	452
I.4 病态数	453
I.5 有用的随机数产生器	453
附录 J 蒙特卡罗示范程序	454
附录 K 裂变中子穿透铍、碳、甲烷、聚乙烯、氢和水时用矩方法得到的结果	468
附录 L 水和铅中的 γ 射线微分能谱	471
附录 M 用于中子减弱计算的图表	473
附录 N ψ 函数图	481
附录 O 反照率数据经验表达式中的各种常数	486
附录 P 圆柱形管道的辐射穿透	491
习题解答	492
名词索引	522

第一章 历史背景

N. M. SCHAEFFER

早期的反应堆屏蔽基本上是凭经验来估算的。如要精确设计屏蔽必须考虑一些极为复杂的现象，这在当时来说是做不到的。当时虽然对微观粒子的相互作用过程有了一定的了解，但由于截面参数不全，所以各种作用过程的相对重要性还不清楚。当时也不甚了解材料对感兴趣的两种主要辐射，即中子和 γ 射线的整体减弱规律。由于在战时曼哈顿计划的任务很重，没有机会对材料的辐射减弱性能作系统的研究，那怕是用经验方法也不允许。当时已经认识到，屏蔽中子显然需要含氢材料，而屏蔽 γ 射线则需要高密度材料。同时还知道，简单地用总截面来表征的指数减弱概念对于确定屏蔽厚度来说，是完全不合适的。1943年建成的美国阿贡国立实验室的石墨堆上的混凝土和浸石蜡木质屏蔽，对于 γ 射线是合适的，而对于中子则设计得过于保守了。ORNL的X-10堆有一个2.1米厚的混凝土屏蔽，其中间的1.5米含有掺杂着矿物素烧粘土填料(haydite)的特种混合物。这种素烧粘土填料含有大量的结晶水，对中子的减弱显得特别有效。这个屏蔽对于中子来说也过于保守，对于 γ 射线大体合适，但在穿过屏蔽层的孔道入口附近两种辐射的泄漏都很大[†]。

1944年，因受当时所能控制的铝管的最大长度的限制，不得不要求汉福特反应堆采用偏薄的屏蔽。1943年，E. 费米(Fermi)和W. 津恩(Zinn)在芝加哥做了一些临时性的减弱测量。第二年，H. 纽森(Newson)和L. 斯洛廷(Slotin)在X-10堆背面的堆芯孔道中，用金片测量了铁板和梅索奈特纤维板(masonite)的减弱特性。当时指定年青的工程师C. E. 克利福德(Clifford)协助他们工作。汉福特反应堆的屏蔽是用铁板和梅索奈特纤维板组成的。尽管开始时梅索奈特具有良好的中子减弱特性，但后来出现了严重的辐照损伤和分解。芝加哥3号堆(CP-3，建于1944年)的屏蔽是由普通混凝土构成的，虽然厚度超过实际需要，但性能很好。

这些早期的反应堆计划清楚地表明，要使屏蔽对中子和 γ 射线的减弱都达到最佳的、高效率的或经济的效果，需要研究很多问题。1946年，美国海军开始紧张地实施核动力潜艇研究计划，美国空军对核动力飞机也开始了类似的研究。将核反应堆用于这些方面时，重量和体积都受到很大限制，这就进一步推动了屏蔽方面的研究工作。1947年春，当时的海军物理工作者E. P. 布利泽德被海军上校H. 里科弗(Rickover)派往ORNL，奉命开始执行一项屏蔽实验计划。他提出了一项实验计划：在X-10堆背面的堆芯孔道(60厘米见方的方形孔道)中测量中子和 γ 射线在若干种混凝土内的减弱情况。ORNL的工作人员C. E.

[†] 本章所用的历史资料主要引自H. 戈尔茨坦为纪念E. P. 布利泽德而撰写的文章：Everitt Pinnel Blizard, 1916—1966, *Nuclear Science and Engineering*, 27:145(1967)。并蒙L. S. 艾博特夫人提供了ORNL中子物理部档案处的另外一些资料。承罗尔斯罗伊斯公司的C. C. 霍尔登先生提供了对英国研究工作的回忆。

克利福德，由于他有 1944 年在汉福特堆上从事测量工作的经验，被指派与布利泽德一起工作。他们把材料板放在孔道中，在板内和板外都放置了探测器。这是反应堆屏蔽方面的第一个有组织的研究计划。在上述活性区孔道中对螺旋管型孔道所做的模拟实验表明，只要设计适当，通道能够穿过屏蔽而又不致于有大的辐射泄漏。这些研究工作还使人们认识到，中子在屏蔽中产生的二次 γ 射线，在屏蔽设计中显然是需要给予高度重视的。

1948 年前，为配合各个反应堆计划所作的屏蔽研究，是在汉福特、诺尔原子动力实验室、贝蒂斯原子动力实验室和麻省理工学院（MIT）进行的。在 X-10 堆的堆芯孔道中进行的测量所得到的一个附带的结果是，使布利泽德感到对于精确测量来说样品周围的辐射漏束太强，因此需要有更好的实验装置。他断定，用一个薄的圆盘状浓缩铀裂变板，盖住堆芯孔道，便可提供一个局部的裂变中子源并使被测样品可以更加靠近源。克利福德建议，紧挨着裂变板放一个水箱，把材料和测量仪器浸在水里，这样就能大大降低辐射本底。基于这两个想法而建造的“盖槽”（Lid Tank）屏蔽实验装置于 1949 年开始启用。

英国的屏蔽研究工作开始于 1948 年，它与如下的英国反应堆发展特点密切相关：首先发展以生产钚为目的的大型气冷堆，接着把这些系统用于发电。那时，BEPO（英国实验性反应堆 O）刚刚建成；它有一个厚 15 厘米的铁热屏，热屏的外面是由重晶石混凝土组成的主体屏蔽，其布局和橡树岭的 X-10 反应堆相似。温茨凯尔反应堆 1948 年还在建造中，它有一个与 BEPO 相似的热屏，但采用硅酸盐混凝土，而不用重晶石混凝土。最初的设计计算是由 B. T. 普莱斯（Price）、D. T. 利特勒（Littler）和 F. W. 芬宁（Fenning）完成的。

在哈威尔设立了一个由 C. C. 霍尔登领导的屏蔽组，它是芬宁所领导的反应堆物理组的一个部分，其任务是研究与大型混凝土屏蔽、核发热效应和气冷堆系统的大型管道的辐射泄漏有关的屏蔽问题。当时已经认识到，在这些系统中，屏蔽层的前 30 厘米中的核发热是个极为重要的问题，霍尔登后来又同 K. 斯平尼（Spinney）一起，提出了若干种用以估算中子和 γ 射线的发热分布的模型。1952 年，哈威尔小组的霍尔登，J. R. 哈里森（Harrison）和 D. 哈利戴（Halliday）在 BEPO 装置上也开始实施一项管道漏束测量计划。

1949 年夏季，在 ORNL 召开的紧张的屏蔽工作会议上（其它机构的一些有兴趣的研究人员也参加了这次会议，这是由布利泽德组织的许多活动中的一个），麻省理工学院的 T. A. 韦尔顿（Welton）提出了用于处理中子在与含氢物质相混的重材料中的减弱的分出截面这一概念。布利泽德认为“分出”是个很重要的概念，为了进一步论证它的适用性和取得多种材料的分出截面数据，他在“盖槽”屏蔽实验装置上进行了一系列新的测量。分出截面概念很快就得到了广泛的应用并成为处理中子减弱的主要方法。甚至在二十年以后，在许多方面它仍是一种常用而有效的方法。由于对“盖槽”装置的需求越来越大，以致不得不在美国布鲁克海汶国立实验室的反应堆上建造了第二套裂变板装置，并在 R. 香伯杰（Shamberger）的指导下执行了一项新的分出截面测量计划（第四章）。

布利泽德建议另建一些试验装置以供完整的 4π 屏蔽试验用，因为在“盖槽”装置上这类实验无法实现。而对 MTR（材料试验反应堆）所作的模拟试验表明，这种反应堆可以为屏蔽试验提供有用的辐射源。他的建造计划得到了批准，并于 1950 年建成了 BSR（整体屏蔽反应堆）。这一实验装置的用途如此之广，以致成了遍布全世界的游泳池型研究反应堆的雏型堆。BSR 小组的成员有 L. 梅姆（Meem）、F. 梅恩谢（Maienschein）和 R. 皮尔（Peelle）。

不久，他们在屏蔽材料、屏蔽模型和裂变 γ 射线能谱的精确测量方面取得了很多基本的和有用的实验结果（第二章）。

英国的屏蔽工作人员也认识到了建造专门实验装置的必要性；为了设计动力堆的大型屏蔽，他们迫切需要有关数据。为了设计和建造屏蔽实验反应堆，在芬宁的指导下成立了一个小组。霍尔登负责物理设计和总体布置。就这样，1956年建成了LIDO（利多屏蔽试验反应堆）。和橡树岭的装置不同，LIDO的整个水池都建造在地面之上，这样，实验人员就可以接近位于屏蔽墙内的三个实验小室，在这些实验小室中可放置干的实验模型。反应堆可以在整个水池中移动，以便为这些实物模型提供辐射源，LIDO水池布置的一个重要设计准则是：当一个小室内的实验正在进行时，在另一个小室内可以进行实验模型的组装。

飞机屏蔽方面的研究，需要在空中进行实验测量。于是，布利泽德和克里福德在1952年设想了一种实验装置：将反应堆悬挂在足够高的地方，以消除地面散射的影响。后来，他们设计了一套实验装置：把四个铁塔按矩形排列，铁塔上装有卷扬机，可以把一个BSR型的反应堆和操作室提升到离地面60米的高度上。橡树岭的塔式屏蔽实验装置在克里福德的指导下，于1954年开始运行，并且事实已经证明它的用途极广，远远超出了多灾多难的核动力飞机计划的范围（第九章）。

ANP（飞机核推进器）计划虽然于1961年被迫撤消，但在其它方面取得了一些有用的研究成果。得克萨斯州沃思堡的康韦尔核空间研究设施拥有两个反应堆：GTR（地面试验反应堆）——这是BSR的翻版——和ASTR（航空屏蔽试验反应堆）。1954年，为了解决影响机身设计的重大屏蔽问题，B. 伦纳德（Leonard）和N. 谢弗（Schaeffer）提出了用这些反应堆作地面和飞行研究的计划。GTR是在一个小水箱中运行的，水箱被吊车吊在离地30米的高度处，以获得第一批地面散射的测量结果。后来，GTR又被放进一个用一架退役飞机（XB-36）的机身改装成的模型中，它有一个带屏蔽的用以模拟乘员舱的圆筒形结构。根据这些测量和与此同时在橡树岭塔上测得的空气输运实验的结果，在1955年第一次发现由中子在空气中的辐射俘获而产生的第二次 γ 射线的贡献很大。这些二次 γ 射线的重要程度使两个小组都感到意外；以前对由氮俘获中子所致的 γ 射线的产生几率的估计偏低，而上述测量则是第一次揭示了这一矛盾。自1955年到1957年，ASTR被放在经过专门改装的B-36的尾部炸弹舱中，进行了一系列飞行试验，飞行高度在海平面到一万一千米之间。这个实验计划，提供了辐射由反应堆出发经过空气和飞机结构的传输面到达带屏蔽的乘员舱的数据。后来，经过两个小组的成员在ORNL的共同努力，这一计划得以顺利完成，在那里，ASTR和乘员舱被挂在铁塔上，它们的相对位置与装在B-36上时一样（第八章）。

从1951年到1961年这十年是屏蔽工艺学的全盛时期。主要的屏蔽实验装置从1954年起都投入了运行，并有很多屏蔽组参加了ANP计划，其中有俄亥俄州辛辛那提通用电气公司、康涅狄格州汉福特联合飞机公司的普拉特和惠特尼飞机部（Pratt & Whitney Aircraft Division of United Aircraft Corporation）、得克萨斯州沃思堡的康韦尔公司以及佐治亚州马里塔的洛克希德公司的屏蔽组。而潜艇方面的工作则集中在宾夕法尼亚州匹兹堡附近西屋公司的贝蒂斯实验室和纽约州斯克奈塔第通用电气公司的诺尔斯原子动力实验室。橡树岭屏蔽组同时配合这两方面的工作，所以非常繁忙。这些屏蔽组对屏蔽工艺学作出了许多贡献：改进设计方法，测量辐射在屏蔽材料（包括各种屏蔽设计的实物模型）中的减弱，提出新的实验和分析方法。至于ANP计划的天折和核潜艇的成功也已众所周知。1955年1月美国海军

鸚鵡螺号潜艇首次以核动力航行。这个日子的重要性可同1954、1956和1957年相比，苏联、英国和美国的核电站就是分别在这三年开始并入电网的。

各种各样的核应用计划推动了屏蔽分析方法的发展，也促进了大规模实验研究的开展。早在五十年代初期，在U·法诺(Fano)的指导下，美国国家标准局就积极地实施了一项辐射物理方面的研究计划。G. W. 格罗德斯坦(Grodstein)发表了一套完整的X射线减弱系数，也第一次谈到了用L. V. 斯潘塞(Spencer)的矩方法求解玻尔兹曼方程的情况。不久，核发展协会的一个小组在H·戈尔茨坦的领导下，与斯潘塞和法诺一起，执行了一项关于矩方法计算的紧张计划，这一计划于1954年以戈尔茨坦和威尔金斯(Wilkins)联名发表 γ 射线积累因子的报告而告完成。后来R. 阿伦森(Aronson)、J. 塞尔泰恩(Certain)、M. 卡洛斯(Kalos)和P. 米特尔曼(Mittel'man)等与戈尔茨坦一起，又把这个方法应用于中子。1959年，法诺、斯潘塞和M. J. 伯杰(Breger)一起发表著作，对 γ 射线的穿透特性在理论上作了明确阐述，并简要地论及了矩方法和其它方法(第四章)。

在英国，有关中子减弱方面的研究工作所遵循的路线同美国多少有些不同。霍尔登和J. D. 琼斯(Jones)提出了分出-扩散方法，这个方法的第一批成果在1958年日内瓦第二届和平利用原子能会议上已有报道。1956年以来，A. 艾弗里(Avery)和J. 巴特勒(Butler)在哈威尔进一步发展了这种方法(第四章)。

尽管兰德公司的H. 卡恩(Kahn)早在1950年就发表了两篇论文，论述了蒙特卡罗方法在屏蔽方面的应用并对所有基本概念作了阐述。但是，这个方法的应用和进一步发展，却不得不有待于数字计算机的改进。在早期对阐述这些方法和概念做出贡献的人当中，比较突出的有LASL(洛斯阿拉莫斯科学实验室)的E. 卡什韦尔(Cashwell)和C. 埃弗雷特(Everett)以及核发展协会的G. 戈策尔(Goertzel)和M. 卡洛斯，卡洛斯和ORNL的F. 克拉克(Clark)发表了关于重要性抽样和有限方差估算技巧方面的理论。在美国国家标准局，E. 海沃德(Hayward)和J. 哈贝尔(Hubbell)于1953年发表了光子反照率的计算结果；M. 伯杰和J. 多格特(Doggett)在1955年又扩大了他们的成果。伯杰、ORNL的C. 泽拜(Zerby)以及康韦尔的M. 韦尔斯(Wells)，在1957年至1958年间，报道了第一批成功地应用蒙特卡罗方法计算空气散射的例子。应该把R. 科夫尤(Coveyou)于1958年在ORNL完成05R蒙特卡罗程序系统一事视作屏蔽工艺学的一个重大进展。尽管05R系统对使用者有很多要求，但它具有很大的灵活性，因而已被广泛采用。在1964年的日内瓦和平利用原子能会议上，布利泽德和米特尔曼就美国国内正在使用中的八个主要的蒙特卡罗程序作了介绍。E. 斯特雷克(Straker)、B. 斯蒂文斯(Sterens)、D. 欧文(Irving)和V. 凯恩(Cain)的MORSE蒙特卡罗程序完成于1969年；它给出的结果与解析方法的结果符合得极好(第五章)。

虽然蒙特卡罗方法已经是一种成熟的方法，但目前在屏蔽设计方面用得最多的仍然是点核方法。ORNL的布利泽德、J. 米勒(Miller)、D. 特拉比和G. 查普曼(Chapman)，以及通用电气公司(GE)的J. 麦克唐纳德(Mac Donald)、W. 爱德华兹(Edwards)和J. 莫特夫(Motteff)，对分出截面的应用做出了很大贡献。西屋电气公司的K. 舒尔(Shure)提出了一种适用于由金属含氢材料组成的屏蔽的解析方法，这种方法是点核法与利用球谐函数的某种数值方法的结合，而后者被叫做一维输运方程的 P_1 (后来是 P_3)多组解。在发展 γ 射线积累因子的概念并把它用于点核方法的工作中，西屋电气公司的J. 泰勒

(Taylor), 通用电气公司的 M. 卡波 (Capo), NBS 的 M. 伯杰和 J. 哈贝尔, 康韦尔的 R. 弗伦奇 (French), 阿贡的 M. 格罗坦修斯 (Grotenhuis), ORNL 的 F. 克拉克和 D. 特拉比, 以及伊利诺斯州立大学的 A. 奇尔顿做了很多工作, 他们提出了数据的经验表达式, 并简化了积累因子的应用步骤 (第四、六、八章)。

从一开始, 很多从事屏蔽分析的研究工作者就尽力探索求玻尔兹曼方程解析解的数值方法。所用的方法有: 矩方法、球谐函数法、数值积分法和不变量嵌入法等。但从目前使用情况来看, 大概要数离散纵标法为最重要。LASL 的 B. 卡尔森 (Carlson) 在 1955 年发展了一种适用于反应性计算的离散纵标法, 它后来被称为 S_n 方法, 并已成功地应用于各种运输问题。ORNL 的 F. 迈纳特 (Mynatt) 和 W. 恩格尔 (Engler) 在 1965 年提出了名为 ANISN 的程序, 该程序吸收了改进的差分方法与收敛技巧, 因而更适用于屏蔽应用。一年以后, F. 迈纳特、F. 马肯特勒 (Muckenthaler) 和 P. 斯蒂文斯提出了一个名为 DOT 的二维 ANISN 程序 (第四章)。

虽然 S_n 方法在某些几何条件下还有些问题, 但是在复杂的二维几何条件下, 用它来计算详细的辐射分布, 是十分成功的。最近有几个实验室已经着手探讨偶合蒙特卡罗和离散纵标的计算环的实用价值和适用范围。这样, 对于某种复杂几何条件, 就可以把离散纵标法用于其中能够简化成二维的那些部位, 而在另外一些必须用三维描述的部位则用蒙特卡罗方法来计算。

如要更加全面地论述屏蔽工艺学的历史, 还应该包括用于屏蔽研究的核子仪器的发展情况。正如屏蔽分析的进步有赖于数字计算机的发展一样, 屏蔽实验的进展与粒子探测器和快速电子学的革新紧密相连。在第九章, 对中子探测器和 γ 射线探测器作了评述。

在前面的历史回顾中, 我们局限于介绍美国屏蔽研究的发展概况, 只是在个别地方简单地提到了一些在英国所做的工作。其它国家也曾做过一些有意义的屏蔽研究工作, 而且有时甚至规模也很大, 其中主要的国家有: 比利时、加拿大、法国、意大利、日本、荷兰、挪威、苏联、瑞典和西德。尽管在文献中也有很多欧洲和亚洲国家在船用堆和空间堆方面的报告, 但这些国家进行屏蔽研究的目的主要是为了配合本国动力堆的发展。

在这里我们使用了一些使初学者不易明瞭其含意的术语。但是, 本章未给出的参考文献, 可帮助感兴趣的读者去寻找这类术语的出处, 了解其含意; 这样做的目的是为了追溯早期的屏蔽发展状况并介绍一些有关的著作。

下面列举的早期出版的屏蔽专题方面的一些书籍, 对于初学者来说, 是很有用的参考资料。第一本反应堆屏蔽方面的手册问世于 1956 年, 是由 T. 洛克韦耳 (Rockwell)^[1] 编著的, 他是橡树岭屏蔽小组的最早的成员之一。英国反应堆屏蔽小组的 B. 普莱斯、C. 霍尔登和 K. 斯平尼 (Spinney)^[2] 所写的第一本屏蔽教科书出版于 1957 年。戈尔茨坦^[3] 所写的教科书, 先在 1957 年以报告的形式发表, 到 1959 年又出版了精装本。布利泽德和艾博特^[4] 编著的《Reactor Handbook》(屏蔽部分) 出版于 1962 年。T. 耶格 (Jaeger)^[5] 写的名为《Principles of Radiation Protection Engineering》一书, 是用德文写的, 出版于 1960 年。1965 年由 ORNL 的 L. 德雷斯纳 (Dresner) 译成英文出版。从传播屏蔽资料的观点来看, 最重要的事件并不在于文献发表的日期, 而是在于 1962 年在橡树岭 RSIC (辐射屏蔽情报中心) 的建立。最初由 K. 彭尼 (Penny)、D. 特拉比和 B. 马斯基维茨 (Maskewitz) 组织起来的 RSIC, 在满足屏蔽机构对情报资料的需求方面已做了大量的工作。民防

的特殊要求使得辐射沉降防护成为一门独立学科,这方面的内容在1962年斯潘塞^[6]的专题论文及1966年由基梅尔(Kimel)^[7]所编的论文集中可以找到。

自1966年到1970年,ORNL出版了艾博特、克莱本和克利福德^[8]编著的《Weapons Radiation Shielding Handbook》的第2、3、4、5各章。这本手册的作者们将早期发表的材料作了修改之后编入了本书。最近,由R. G. 耶格(Jaeger)主编的《Engineering Compendium on Radiation Shielding》^[9]的第一卷和第三卷已于1968年和1970年相继出版,第二卷目前正在印刷之中。这本纲要是由维也纳国际原子能机构(IAEA)组织编著的,它对查找国际屏蔽文献提供了很好的线索。

因为在本书的其它各章很少引用苏联文献,所以在此有必要着重提一下苏联在屏蔽方面出版的大量文献。苏联文献的索引是在1968年由RSIC的J. 卢因(Lewin)、J. 格尼(Gurney)和D. 特拉比发表的^[10]。最近用计算机对RSIC书目中的苏联文献条目作了检索,查得的苏联文献有200多篇。这些文章的大多数,在俄文版发表后一至二年便可获得英译本。最新的报告,可以在苏联《Атомная Энергия》^[11]杂志上找到。由期刊中的有价值的报告汇编而成的论文集,可到名为《Problems in the Physics of Reactor Shielding》的丛书去找;这一丛书的第四卷,是英译本^[12]中可得到的最新的一卷。

参 考 文 献

- [1] T. Rockwell III (Ed.), *Reactor Shielding Design Manual*, USAEC Report TID-7004, 1956.
- [2] B. T. Price, C. C. Horton, and K. T. Spinney, *Radiation Shielding*, The Macmillan Co., New York, 1957.
- [3] H. Goldstein, *Fundamental Aspects of Reactor Shielding*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1959.
- [4] E. P. Blizard and L. S. Abbott (Eds.), *Reactor Handbook*, 2nd. ed., Vol. 3, Part B, Shielding, Interscience Publishers, a division of John Wiley & Sons, Inc., New York, 1962.
- [5] T. Jaeger, *Principles of Radiation Protection Engineering* (English translation by L. Dresner), McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1965.
- [6] L. V. Spencer, *Structure Shielding Against Fallout Radiation from Nuclear Weapons*, National Bureau of Standards, Monograph 42, Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1962.
- [7] W. R. Kimel (Ed.), *Radiation Shielding Analysis and Design Principles as Applied to Nuclear Defense Planning*, Report TR-40, Office of Civil Defense and Kansas State University, 1966. See also C. H. Koontz (Ed.), *Shelter Design and Analysis*, Vol. 1, Fallout Radiation Shielding, Report TR-20, Office of Civil Defense, Revised 1970.
- [8] L. S. Abbott, H. C. Claiborne, and C. E. Clifford (Eds.), *Weapons Radiation Shielding Handbook*, USAEC Report DASA-1892, Oak Ridge National Laboratory, 1970.
- [9] R. G. Jaeger (Editor-in-Chief), *Engineering Compendium on Radiation Shielding*, Springer-Verlag, New York, Vol. I, 1968; Vol. III, 1970; Vol. II, in press.
- [10] J. Lewin, J. Gurney, and D. K. Trubey, *A Survey of Recent Soviet Radiation Shielding Work*, USAEC Report ORNL-RSIC-23, Oak Ridge National Laboratory, 1968.
- [11] *Soviet Atomic Energy*, Consultants Bureau, New York, monthly.
- [12] D. Broder, A. Veselkin, Yu. Yegorov, A. Suvorov, and S. Tsypin (Eds.), *Problems in the Physics of Reactor Shielding*, Report JPRS-51083, Joint Publication Research Service, 1970.