

探伤用 射线防护技术

石磊 主编

TANSHANGYONG
SHEXIAN
FANGHU JISHU

机械工业出版社

探伤用射线防护技术

石磊 主编

孔凡庚 审

机械工业出版社

本书内容包括无损检测中射线防护基础理论、实际防护技术知识,我国现行“放射卫生防护基本标准”,防护计算方法与实例,剂量监测技术以及探伤室的安全设计等。

本书可供生产岗位从事无损检测、安全环保、射线防护工作的技术人员参考使用,也可供其他射线应用工作者及有关专业设计、教学人员参考。

探伤用射线防护技术

石磊 主编

孔凡庚 审

责任编辑:方婉莹 责任校对:韩 晶
封面设计:郭景云 版式设计:吴静霞
责任印制:张俊民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

开本787×1092¹/₃₂·印张11⁵/₈·字数254千字
1990年3月北京第一版·1990年3月北京第一次印刷
印数0,001—1,580·定价:9.70元

科技新书目:213—018

ISBN 7-111-01818-4/TL·3

前 言

放射卫生防护的基本任务是保护环境,保障从事放射工作人员和一般居民的健康与安全,保护他们的后代,促进射线应用事业的发展。放射卫生防护的主要内容包括辐射剂量学、防护标准、防护监测、防护措施、防护评价及防护管理等。

随着我国无损检测事业的发展,X射线、 γ 射线、中子、加速器、电子、 β 射线检测技术在航天、航空、原子能、造船、铁道、冶金、石油、化工和机械等部门已广泛地应用,特别是火箭、反应堆压力壳、锅炉与压力容器等受力构件要求100%用射线检查,因此给射线探伤提出了更高的要求。为了促进射线检测技术,在国民经济建设中更好地发挥作用,同时又尽量避免射线可能带来对人体损伤作用和某些直接及潜在的危害,就必须认真搞好射线应用的放射卫生防护工作。

加强射线防护知识的宣传教育,是搞好放射卫生防护的重要方法之一。我国广大射线应用工作者、安全环保和有关管理工作人员,曾多次向专业学会呼吁迫切希望有一本介绍探伤用射线防护的专著,尤其是我国在实行无损探伤人员培训、考核、定级制度和贯彻GB4792—84放射卫生防护基本标准之后,这一需要显得更加突出。

射线防护是人们利用电离辐射、放射性物质和核能的过程中产生和发展起来的,射线的广泛应用给防护技术带来了一系列急待解决的问题,如防护标准、最大允许浓度和最大

剂量当量限值、辐射屏蔽、环境污染、辐射生物效应等。这些问题的解决又直接促进了辐射防护本身的发展。从我国无损检测实际情况来看,五六十年代曾引进一批国外 γ 探伤仪,由于当时缺乏防护知识的宣传教育,安全制度不健全,加上设备质量欠佳,致使一部分探伤人员直接受到辐射损伤。这曾一度给人们造成恐惧心理,致使我国当时所有的 γ 探伤仪都停止使用。与此同时,国外却大量使用 γ 探伤技术,如苏联仅推广 γ 探伤技术,每年创造的产值达3亿卢布。而且技术本身无论是选用新 γ 源、屏蔽材料,还是发展探伤工艺和扩大应用范围都有很大进展。在我国除经济上受到了损失之外,还直接影响了我国无损检测事业的发展。可见防护技术的重要性。

本书系根据无损检测实际应用的需要而编写的。全书分为十二章,前五章系统地介绍了射线检测中的X射线、 γ 射线、加速器、中子等相应的物理基础知识和剂量、防护技术。这些是理解、掌握射线检测Ⅰ级、Ⅱ级培训教材的重要参考资料。

本书第六至九章主要介绍了射线对人体的影响、我国现行防护标准、剂量和防护计算及其应用实例。电离辐射的生物效应是制定放射卫生防护标准的重要依据,了解生物效应和辐射损伤方面的发展情况,对认识射线与物质相互作用的规律,领会防护标准的精神,贯彻以预防为主方针是有益的。而防护标准是实施防护技术的依据,我国的现行防护标准是根据ICRP的一系列建议,结合我国具体情况而制定的。剂量计算是防护计算的基础;防护计算是制定防护措施的前提;计算实例是为了使读者更好地掌握防护技术的一次实践。

本书第十至十二章着重阐述了剂量监测技术、防护评价方法、探伤室的防护设计和安全防护管理等内容。防护效果必须通过剂量监测才能进行防护评价。而防护管理包括对放射源和电离辐射装置的管理、储运、使用制度，以及安全操作规程、事故处理方法等，它是保证一切防护设施发挥应有作用的重要手段。

本书还收集了大量图表，因此又是一本手册式的射线防护工具书。

总之，对放射卫生防护知识的认识，应以辩证唯物主义观点为指导，既要充分利用射线造福于人类，又不可忽视它对人体带来的危害；在射线应用中，既不能麻痹大意，也不必盲目恐惧。随着科学技术的发展，放射损伤的规律是可知的，射线的危害是可以预防的，只要认真注意改善防护设备的防护性能，坚持搞好防护安全操作，并加强防护管理，正确使用射线，则完全可以控制它的危害。

本书以实用为宗旨，主要是为生产第一线的无损检测人员、辐射防护工作者、有关探伤室及其它射线应用试验室的设计者、安全环保、其它射线应用工作人员而编写的，同时也可供高校有关师生参考。

参加本书编写的还有程才娥、石绢、石琳同志。本书承全国无损检测学会射线专业委员会主任孔凡庚高级工程师审阅和修改，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请广大读者指正。

编者

1988年12月10日

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 射线探伤中的辐射防护的目的和任务	1
第二节 射线探伤中辐射防护的主要内容	2
第二章 原子和原子核基础知识	4
第一节 原子和原子核	4
一、原子结构简述	4
二、原子核的基础知识	6
第二节 放射性同位素的基础知识	10
一、同位素	10
二、稳定和不稳定同位素	11
第三节 放射性	13
一、放射性衰变的主要类型	13
二、放射性衰变规律	27
第三章 探伤用主要辐射源及其特性	31
第一节 X射线	31
一、X射线的产生	31
二、X射线的特性	36
第二节 探伤用 γ 源	38
一、 γ 射线的定义	38
二、产生 γ 辐射的主要方式	38
三、 γ 射线的主要特性	41
四、探伤用 γ 源的常用单位	43
五、常用探伤 γ 源及其主要参数	43
六、国外探伤 γ 源发展趋势	44

第三节 常用探伤加速器	45
一、概述	45
二、常用探伤加速器	47
第四节 照相用中子源	58
一、基础知识	58
二、照相用中子源	66
第四章 探伤用射线与物质的相互作用	75
第一节 X、 γ 射线与物质的相互作用	75
一、综述	75
二、X、 γ 射线与物质相互作用的主要过程	76
三、X、 γ 射线与物质相互作用的其它过程	85
四、质量衰减系数、质能转移系数及质能吸收系数	87
第二节 中子与物质的相互作用	93
一、中子与物质的相互作用	93
二、中子与生物组织的相互作用	99
第五章 探伤防护中的几个常用辐射量和单位	100
第一节 描述射线探伤辐射场的物理量和单位	100
一、放射性活度	101
二、粒子注量和注量率	102
三、能注量和能注量率	104
第二节 吸收剂量和单位	106
一、吸收剂量和吸收剂量率	107
二、比释动能和它的应用	108
第三节 探伤中常用照射量的概念	113
一、照射量和常用单位	113
二、辐射剂量与照射量的区别	115
三、照射量与吸收剂量的关系	115
第四节 辐射防护专用物理量和单位	118
一、剂量当量和剂量当量率	118
二、集体剂量当量	120

三、吸收剂量指数和剂量当量指数	121
第六章 射线对人体的影响	124
第一节 射线对人体的影响	124
一、急性放射性损伤	127
二、远后效应	130
三、慢性小剂量照射的特点	136
四、影响辐射损伤的因素	138
第二节 本底照射与医疗照射	146
第七章 辐射防护标准	152
第一节 辐射防护标准发展简史	152
第二节 我国现行的辐射防护标准	154
一、概述	154
二、放射防护的基本原则	156
三、电离辐射的危害和剂量限值	158
第三节 ICRP防护标准的新建议	176
一、基本限值	176
二、推定限值和管理限值	181
三、参考水平	182
第八章 探伤常用剂量计算	186
第一节 X射线剂量计算	186
第二节 γ 射线剂量计算	189
一、点源的剂量计算	189
二、非点源照射率的计算	207
第三节 探伤加速器的剂量计算	213
一、加速器辐射危害分析	213
二、韧致辐射的描述	214
三、电子加速器剂量计算一般表达式	216
第四节 中子剂量计算	218
一、中子剂量有关的基本概念	216

二、中子通量、吸收剂量、剂量当量的关系	221
三、中子剂量计算	223
第九章 射线探伤中的外照射防护	227
第一节 外照射防护的一般方法	227
一、控制受照射时间	227
二、增大与辐射源间的距离	227
三、屏蔽	228
第二节 X射线的防护	229
一、X射线减弱规律	229
二、X射线的屏蔽计算	233
三、X射线屏蔽防护的近似计算	252
四、计算实例	266
第三节 探伤用 γ 射线的防护	269
一、 γ 射线在物质中的减弱规律	269
二、 γ 点源的屏蔽计算	285
三、非点源的屏蔽计算	292
第四节 中子辐射的防护	294
一、剂量当量	294
二、中子的屏蔽	295
三、注意事项	299
第五节 防护中的特殊问题	302
一、阴影屏蔽	302
二、屋顶厚度	303
三、门窗的防护	306
四、缝隙泄漏问题	307
第十章 剂量监测	309
第一节 原理和方法	309
一、电离法	309
二、闪烁法	311
三、量热法	311

四、化学效应	312
五、固体发光效应	313
第二节 剂量仪器及其校准	315
一、仪器选择	315
二、仪器校准	316
三、仪器种类简介	317
第三节 中子剂量测量	324
一、常用测量方法	325
二、典型的中子剂量仪器	326
第十一章 辐射测量的统计误差	329
第一节 二项式的分布	329
第二节 泊松分布和高斯分布	332
一、泊松分布	332
二、高斯分布	333
第三节 误差表示法	335
一、标准误差和可几误差	335
二、平均误差	336
第四节 误差的运算	336
一、计数率的标准误差	337
二、平均值的标准误差	337
三、合理分配测量时间	338
四、最小二乘法在核辐射测量中的应用	339
第十二章 射线探伤室设计与安全	345
第一节 探伤室地址选择和布局	345
一、选址资料	345
二、自然条件的选择	345
三、环境状况的选择	346
四、总体布局	347
第二节 放射工作场所分类与分级	347

一、工作场所的划分	347
二、工作场所的分级方法	348
第三节 射线探伤室的设计与审批	348
一、程序	348
二、对设计的主要要求	349
第四节 放射性物质的保管	350
第五节 安全操作的主要内容	351
一、主要内容	351
二、禁止从事放射性工作的条件	352
三、放射性工作者保健条例	353
第六节 事故的防止和处理	353
附录	355
一、主要辐射量单位对照表	355
二、放射性强度单位换算表	355
三、常用单位的换算	356
四、常用物理常数	356
五、基本辐射量和单位	357
主要参考文献	360

第一章 概 述

第一节 射线探伤中的辐射防护的目的和任务

任何新技术的发展，在给人类带来利益的同时，也可能带来某些危害。同位素与射线的应用，无疑地给人类带来了巨大的利益，但电离辐射对人体有损伤作用，它也给人类带来了某些直接或潜在的危害。

辐射防护是人类在发现和利用电离辐射、放射性物质及核能的过程中产生和发展起来的。特别是同位素和射线应用日趋广泛，这就给辐射防护提出了一系列急待解决的问题，如：辐射防护的标准，各种放射性同位素的最大容许浓度或摄入量限值，辐射屏蔽，环境污染，辐射的生物效应等等。这些问题的提出与逐步解决促进了辐射防护的向前发展。

辐射防护现已成为原子能科学技术中一个重要分支，它是研究人类免受或少受电离辐射危害的一门综合性的边缘学科。它涉及到原子核物理、辐射化学、辐射剂量学、核电子学、放射医学、放射生物学及放射生态学等学科。它对于射线探伤而言，其基本任务是保护环境，保障从事射线探伤人员和一般居民的健康与安全，保护他们的后代，促进无损检测事业的发展。

随着科学的发展和对辐射效应的了解和深入，国际放射防护委员会（ICRP）为了适应于核技术迅速发展的需要，于1965年发表了第9号报告。它是假定在剂量与效应之间存在

着线性关系，而剂量作用是积累的。在这个基础上提出了辐射防护的目的是防止急性辐射效应，并将晚期效应限制到一个可以接受的水平。随着发展和认识的深化，ICRP 于 1977 年发表了第 26 号出版物，指出辐射的生物效应可分为随机性效应和非随机性效应，辐射防护的目的在于防止有害的非随机性效应，并限制随机性效应的发生率，使之达到被认为可以接受的水平。

射线检测的历史证明，只要人们重视射线探伤中防护，采取科学的管理和适当的防护措施，射线检测中的安全是有保障的。

第二节 射线探伤中辐射防护的主要内容

辐射防护的主要内容包括辐射剂量学、防护标准、防护技术、防护监测方法、防护评价及防护管理等。而射线探伤除了上述之外，还有一个探伤室设计施工等一些特殊安全问题。

辐射剂量学是研究辐射剂量及如何测量辐射剂量的一门学科。它包括带电粒子剂量学、X 及 γ 射线剂量学、中子剂量学。如按照射方式又分为内照射剂量学和外照射剂量学。辐射剂量测量涉及到物理、化学、生物及核电子学等方面的内容。测量原理都是利用射线作用于物质产生电离、发光、发热现象，引起物质颜色的改变及化学组成的变化，引起生物体内血液组成和染色体的变化等。根据这些原理，制出了种类繁多、性能各异的能满足各种测量需要的剂量测量仪器及辐射监测系统。目前微电子的应用，使剂量测量仪器及辐射监测系统进入了一个新的发展阶段。

辐射防护标准是实施辐射防护的依据，各国的防护标

准,大都是根据ICRP的建议结合本国具体情况而制订的,随着各国的发展而不断地得到修正。自1958年以来ICRP有过一系列的建议,标准的基本概念比较有较大的改革。但全身均匀照射的年剂量当量限值未变,仍为 $50\text{msv/a} \ominus (5\text{rem/a})$ 。ICRP限制剂量制度,主要包括辐射实践的正当化,辐射防护的最优化和个人剂量当量限值三条基本原则,为彼此不可分割的一个完整体系。

对无损检测中的射线防护应该是以预防为主,在外照射为主情况下,应测量或预先计算工作场所的剂量分布,以便决定是否采取相应的安全措施,如屏蔽、远距离操作等。

防护技术主要包括射线探伤室的地址选择,屏蔽设计,建筑材料选择,通风选择气流的组织、泄漏及特殊问题的处理,探伤室的规章制度,体检等内容。X射线机、 γ 射线机、加速器、中子源通常都是采用屏蔽的方法将辐射剂量率降低到预定的控制水平以下。可以说辐射屏蔽是辐射防护的重要手段。目前,有关屏蔽材料和屏蔽计算的研究较为广泛和深入,某些复杂屏蔽计算问题需要应用高容量计算机来解决。

辐射防护评价是辐射防护的重要环节,它包括对辐射设备、装置的辐射安全及周围环境的污染水平的评价等内容。

辐射效应是人们极为关心的问题,虽然进行了大量研究工作,也有某些进展,但辐射危害本质问题至今尚未完全弄清楚。因此辐射效应阈值问题、慢性小剂量照射的远后效应及遗传效率等问题,有待继续深入研究。

总之,辐射防护是一门内容丰富、理论上和应用上都十分重要的科学。以往做了大量工作,有成绩,但仍有许多辐射防护问题待我们去研究解决。

⊖ 为国家选定的非国际单位制单位“年”的符号。——编者

第二章 原子和原子核基础知识

第一节 原子和原子核

一、原子结构简述

自然界中的各种物质，在一定的条件下，一种物质可以转变成另一种物质。物质是可分的，一种物质的最小单元就叫做该物质的分子。分子是由原子组成的，原子是元素的最小单元。在自然界中天然存在的元素有93种，加上人工制造的元素，截至目前已报道的也不过107种，这些元素的不同组合就构成了各种物质的分子。每种元素在元素周期表中都占有一位置，并且有一个序号，如氢(H)元素的序号是1，氦(He)、碳(C)、铅(Pb)、铀(U)的序号分别为2、6、82、92。元素的原子序数，通常用 Z 表示。在长期的科学实验过程中，人们归纳了近代的物质结构的原子学说，其主要内容是：

1) 物质是由分子组成的，分子是物质能独立存在的最小单元。

2) 分子是由原子组成的，原子是元素的最小单位，是用任何化学方法都不能分解的最小粒子。同种元素的原子具有相同的化学性质，不同元素的原子的性质是不同的。

3) 分子和原子都处于不停的运动之中。

4) 原子是非常微小的，但是它仍然具有很复杂的结构。

原子直径的数量级为 10^{-10}m 。原子的质量很小，氢原子的质量为 $1.6736 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，氧原子的质量为 2.656

$\times 10^{-28} \text{kg}$, 自然界中最重的铀原子的质量也只有氢原子的 238 倍。显然, 即使用 g 来表示原子的质量也是很很不方便的, 因此, 引入了原子质量单位。1960 年, 国际上作了关于原子质量单位的碳标准规定, 即把碳-12 原子的质量的 $1/12$ 定义为一个原子质量单位, 用 u 表示。现在物理和化学上都统一采用这一单位, 有时也把这种原子质量单位称为碳单位。一个原子质量单位等于 $1.660566 \times 10^{-27} \text{kg}$, 由此可推算出 1g 等于 6.022045×10^{23} 个原子质量单位。

我们把 6.022045×10^{23} 个原子定义为 1 摩尔原子。设某元素的原子量为 M , 则该元素的 1 摩尔原子的质量为 $1.660566 \times 10^{-27} \times M \times 6.022045 \times 10^{23} = M (\text{kg})$ 。可见, 任何元素的 1 摩尔原子的质量恰好等于 $M \text{g}$, M 是该元素的原子量。1 摩尔原子中包含的原子数—— 6.022045×10^{23} 称为阿伏加德罗常数, 通常用 N_A 表示。有了摩尔的定义, 便可计算一定质量的某种元素中所包含的原子数目。例如 m 克原子量为 M 的某种元素所包含的原子数目为:

$$N = N_A \frac{m}{M} \quad (2-1)$$

已知铁的原子量为 55.93, 根据式 (2-1) 可求出 1g 铁中含有 1.075×10^{22} 个铁原子。

在早期, 原子量是用化学方法测定的, 更精确的测定结果是后来用质谱仪方法测量的。用质谱仪测量时发现, 同一种元素的原子量也有差异, 而且用原子质量单位表示时, 所有原子的原子量都非常接近于整数。原子核中所含的质子数及中子数之和称为该原子核的质量数。如天然氖气中有 90.5% 的氖核的质量数为 20, 有 9.2% 的氖核的质量数为 22, 还有少量氖核的质量数是 21。天然氢中有 99.985% 的氢核的