

环境保护部电离辐射安全与防护培训系列教材

电离辐射

工业应用的防护与安全

DIANLI FUSHE GONGYE YINGYONG DE FANGHU YU ANQUAN

何仕均 主编



原子能出版社

环境保护部电离辐射安全与防护培训系列教材

电离辐射工业应用的 防护与安全

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

电离辐射工业应用的防护与安全/何仕均主编. —北京:原子能出版社,2009.3
ISBN 978-7-5022-4584-9

I. 电… II. 何… III. 电离辐射—辐射防护 IV. R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 037021 号

内 容 简 介

《电离辐射工业应用的防护与安全》全面系统地介绍了工业辐照、工业探伤、核子仪和放射性测井等领域的电离辐射防护与安全。全书包含三篇,共 12 章。其中,第一篇主要介绍了 γ 辐照装置和电子加速器辐照装置的防护与安全;第二篇主要介绍了工业探伤或辐射成像的防护与安全;第三篇主要介绍了各种应用的核子仪和放射性测井的防护与安全。此外,本书的每篇都列举了一些国内外发生的相关案例,期望每位读者能够从中吸取经验和教训。

本书不仅可用于从业人员的辐射防护与安全知识培训,还可供从事辐射环境保护监管与监测的技术人员参考使用。

电离辐射工业应用的防护与安全

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 孙凤春

责任校对 冯莲凤

责任印制 丁怀兰

印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 17.125

字 数 427 千字

版 次 2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4584-9

印 数 1~5 000 定 价 58.00 元

版权所有 侵权必究

网址:<http://www.aep.com.cn>

总 序

中国是核技术利用大国,随着经济技术的发展,核技术在工业、农业、医学、资源、环保、军事,以及科学研究等方面得到了广泛的应用,取得了瞩目的成就,同时,也发生了一些辐射事故。为了保护辐射工作人员和公众的安全与健康,国家对核技术利用的安全与防护实施监管。从1960年颁布《放射性工作卫生防护暂行规定》以来,核技术利用的安全与防护管理已走过了近50个春秋。其间,积累了丰富的管理经验,也有不少挫折与教训。2005年国务院颁布了449号令《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》,核技术利用的安全与防护监管工作得到了进一步的加强。

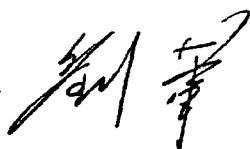
为了适应核技术利用和辐射安全监管的发展要求,快速提高从业人员和监管人员的专业水平,提高培训质量和规范培训工作,环保部辐射安全管理司委托清华大学牵头负责,组织7家电离辐射安全与防护培训机构(清华大学、中国原子能科学研究院、中国辐射防护研究院、四川大学、苏州大学、南华大学、浙江省辐射环境监测站)有关专家结合我国实际,参考国际原子能机构(IAEA)有关培训资料,编撰出版一套全国统一的培训教材。我相信,这套培训教材的使用,将对提高我国电离辐射安全与防护水平,促进核技术在各行各业的安全有着积极意义。

值此培训教材即将问世之际,谨向所有参加此套培训教材

编写、审稿和出版等工作的各有关单位领导和专家表示诚挚的感谢。

时间匆匆,加之作者学识有限,历经两年努力完成的此套培训教材仍有许多不尽如意之处,敬请读者批评指正。

环境保护部辐射安全管理司司长



2009年1月22日

前 言

我国核技术的开发应用始于 20 世纪 50 年代。随着我国科学技术和社会经济的持续快速发展,核技术在我国国防、医疗、能源、工业、农业、科研等领域得到了广泛利用。这对于维护国防和国土安全,促进国民经济和社会发展,增强我国的综合国力,起到了十分积极的作用。但是,核能与核技术是一把双刃剑,在核技术开发利用过程中的安全问题和放射性污染防治问题也越来越突出。如果安全防护方法不当或放射源失控,会给环境安全带来潜在危险,甚至危及人员身体健康和生命安全,严重时可能引起社会恐慌。

为了解决上述问题,做好放射性污染防治工作,2003 年 6 月第十届全国人民代表大会常务委员会第三次会议通过了《中华人民共和国放射性污染防治法》。2005 年 9 月国务院又颁布了《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》,规定国务院环境保护主管部门对全国放射性同位素、射线装置的安全和防护工作实施统一监督管理。为了贯彻落实《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》及有关法律、法规,促进核技术的和平利用和造福人类,我们在环境保护部的领导和支持下,组织有关专家编写了电离辐射防护与安全知识丛书。该套丛书不仅可用于从业人员辐射防护与安全知识培训,还可供从事辐射环境保护管理与监测技术人员参考。

丛书编审委员会对整套丛书的编写大纲、内容、深度和广度等方面进行了多次广泛讨论,力求满足在专业性、实用性、准确性和通俗性等方面的高度统一。

在丛书编写过程中,得到环境保护部核与辐射安全司的专项经费支持和直接关怀,在此表示衷心感谢。此外,本套丛书承蒙北京市射线应用中心、北京核二院比尼新技术有限公司、上海伽马星科技发

展有限公司、赛默飞世尔科技(上海)有限公司、无锡爱邦辐射技术有限公司等单位提供了有关的技术资料和大力支持,在此向以上企业表示诚挚谢意。

在丛书的编写过程中,虽然经过反复斟酌和努力,但由于时间紧迫,经验有限,难免存在不足之处,希望广大读者提出宝贵意见,供再版时修改完善。

《电离辐射工业应用的防护与安全》共分三篇,共 12 章,包含了工业辐照、工业探伤、核子仪和放射性测井等三方面工业应用的电离辐射防护与安全。其中,第一篇由清华大学何仕均、刘海生、曲静原、李大庆、陈坚等人编写,第二篇由南华大学邱小平、屈国普、周剑良、于涛、肖德涛、赵桂芝、赵修良等人编写,第三篇由浙江省环保局黄国夫和吉林大学王祝文等人编写。最后,全书由清华大学何仕均负责统一审校。此外,中国原子能科学研究院肖雪夫,环境保护部核与辐射安全中心周启甫、刘怡刚,中国辐射防护研究院卢金祥等人审阅了全书,并提出了许多建设性修改意见。编写者对以上所有参与人员为本书付出的辛勤劳动深表谢忱。

《电离辐射工业应用的防护与安全》编委会

2008 年 6 月

目 录

第一篇 工业辐照装置的防护与安全

第 1 章 概述	(1)
1.1 工业辐照所用的辐射源	(1)
1.1.1 γ 辐射源	(1)
1.1.2 电子束辐射源	(3)
1.1.3 X 射线辐射源	(4)
1.1.4 总结	(5)
1.2 工业辐照的各种应用	(6)
1.2.1 医疗用品的灭菌消毒	(6)
1.2.2 食品保鲜	(7)
1.2.3 辐射化工	(8)
1.2.4 农业应用	(9)
1.2.5 环境治理	(10)
第 2 章 工业 γ 辐照装置的安全与防护	(12)
2.1 工业 γ 辐照装置发展概述	(12)
2.2 工业 γ 辐照装置的组成	(13)
2.2.1 辐射源	(13)
2.2.2 源架及其升降系统	(15)
2.3 工业 γ 辐照装置的分类	(25)
2.3.1 固定源室湿法贮源 γ 辐照装置	(25)
2.3.2 固定源室干法贮源 γ 辐照装置	(26)
2.3.3 自屏蔽式干法贮源辐照装置	(27)
2.3.4 水下 γ 辐照装置	(28)
2.4 γ 辐照装置的防护与安全	(28)

2.4.1	辐射安全原则	(28)
2.4.2	辐射防护准则	(29)
2.4.3	辐射工作场所的分区	(30)
2.4.4	γ 辐照装置的设计	(30)
2.4.5	γ 辐照装置的运行与管理	(44)
2.4.6	γ 辐照装置的监督检查	(49)
2.4.7	γ 辐照装置的倒、装源	(54)
2.4.8	放射源的管理	(57)
2.4.9	γ 辐照装置的退役	(57)
第3章	工业辐照电子加速器的防护与安全	(59)
3.1	工业辐照电子加速器的发展概述	(59)
3.2	工业辐照电子加速器的组成	(60)
3.2.1	电子枪	(60)
3.2.2	加速管	(61)
3.2.3	高压系统	(62)
3.2.4	电子束流引出装置	(62)
3.2.5	真空系统	(63)
3.2.6	束下装置	(65)
3.2.7	冷却系统	(65)
3.2.8	绝缘气体介质	(65)
3.2.9	控制系统	(66)
3.2.10	联锁系统	(66)
3.3	工业辐照电子加速器的分类	(67)
3.3.1	按加速电场的形式分类	(67)
3.3.2	根据电子束辐照装置的屏蔽和出入口控制分类	(67)
3.3.3	几种常见的辐照用电子加速器	(68)
3.4	工业辐照电子加速器的防护与安全	(75)
3.4.1	电子加速器设计的特殊安全性能要求	(75)
3.4.2	加速器辐照室的屏蔽设计	(76)
3.4.3	工业辐照用电子加速器的安全运行	(80)
第4章	事故案例与经验教训	(87)
4.1	概述	(87)
4.2	事故案例	(88)

4.2.1 意大利斯蒂莫斯事故·····	(88)
4.2.2 挪威切勒事故·····	(89)
4.2.3 萨尔瓦多圣萨尔瓦多辐射事故·····	(91)
4.2.4 上海辐射事故·····	(96)
4.2.5 山东济宁事故·····	(97)
4.2.6 越南河内的电子加速器事故·····	(97)
4.3 事故原因与经验教训·····	(99)
4.3.1 事故原因·····	(99)
4.3.2 经验教训·····	(99)
4.4 监管与管理·····	(100)
参考文献·····	(100)

第二篇 工业射线探伤辐射安全与防护

第1章 工业射线探伤系统概述·····	(102)
1.1 工业射线探伤系统检测原理及应用·····	(102)
1.1.1 工业射线探伤照相检测系统·····	(104)
1.1.2 工业射线探伤实时成像检测系统·····	(107)
1.1.3 ICT检测系统·····	(112)
1.1.4 康普顿散射成像检测系统·····	(115)
1.2 工业射线探伤辐射设备·····	(117)
1.2.1 X射线机·····	(118)
1.2.2 γ 射线机·····	(120)
1.2.3 爬行器·····	(123)
1.2.4 加速器·····	(124)
1.2.5 中子照相常用中子源·····	(126)
第2章 工业射线探伤的辐射安全与防护·····	(127)
2.1 工业射线探伤的辐射安全与防护实践·····	(127)
2.1.1 γ 射线探伤的辐射安全与防护·····	(127)
2.1.2 X射线探伤的辐射安全与防护·····	(137)
2.1.3 工业射线探伤工作人员及公众的辐射安全与防护·····	(139)

2.1.4	工业射线探伤的辐射监测	(141)
2.1.5	工业射线探伤的管理要求	(147)
2.2	工业射线探伤辐射事故处理与应急	(148)
2.2.1	工业射线探伤辐射事故的处理	(149)
2.2.2	工业射线探伤辐射事故的应急	(151)
2.2.3	应急工作人员防护的措施	(156)
第3章	工业射线探伤事故案例及经验教训	(157)
3.1	概述	(157)
3.2	工业探伤放射事故概况	(157)
3.3	工业探伤放射事故案例	(158)
3.3.1	两起工业探伤放射事故的概况	(158)
3.3.2	X射线误照事件	(160)
3.3.3	高能加速器误照事故	(161)
3.4	经验教训	(162)
参考文献		(163)

第三篇 核子仪与放射性测井的辐射安全与防护

第1章	核子仪与放射性测井概述	(164)
1.1	核子仪与放射性测井的概念	(164)
1.1.1	核子仪的概念	(164)
1.1.2	放射性测井的概念	(164)
1.2	核子仪与放射性测井的应用	(166)
1.2.1	核子仪的应用	(166)
1.2.2	放射性测井	(168)
1.3	常见的核子仪及测井用放射性同位素简介	(169)
1.3.1	常见的核子仪	(169)
1.3.2	放射性测井	(175)
第2章	核子仪的辐射安全与防护	(181)
2.1	各类放射源的屏蔽防护	(181)
2.1.1	α 放射源的防护	(181)

2.1.2	β 放射源的防护	(181)
2.1.3	γ 放射源的防护	(184)
2.1.4	中子源的防护	(189)
2.2	核子仪应用过程的辐射安全	(192)
2.2.1	核子仪密封源运输过程中的安全与防护	(193)
2.2.2	安装、使用、操作和维护过程中的安全和防护	(194)
2.2.3	放射源的存放	(195)
2.2.4	辐射单位的防护状况	(196)
2.3	核子仪使用的辐射防护监测	(196)
2.3.1	监测的类别	(196)
2.3.2	放射性监测仪器及监测方法	(201)
2.3.3	实验室放射性测量	(203)
2.3.4	个人剂量监测	(203)
第3章	放射性测井的安全与防护	(208)
3.1	密封放射源测井的操作	(208)
3.1.1	准备工作	(208)
3.1.2	装、卸放射源	(209)
3.1.3	密度(γ)源装源过程	(210)
3.1.4	中子源装源过程	(210)
3.1.5	中子源卸源过程	(211)
3.1.6	密度源卸源过程	(211)
3.2	放射性同位素示踪的操作	(212)
3.2.1	测井前的准备	(212)
3.2.2	注水管柱种类及放射性同位素示踪剂施工方法	(212)
3.2.3	施工步骤	(214)
3.2.4	放射性同位素的选择	(216)
3.2.5	^{131}Ba -GTP 微球示踪剂的技术指标、颗粒直径及用量的选择	(218)
3.2.6	^{113}Sn - $^{131\text{m}}\text{In}$ 同位素发生器	(221)
3.3	示踪剂配制与分装的防护	(223)
3.3.1	放射性同位素实验室的选址与内部设施	(223)
3.3.2	示踪剂的配制分装与剂量监测	(224)
3.3.3	放射性同位素示踪剂的包装与运输	(225)
3.4	放射性同位素示踪现场作业的辐射安全	(226)

3.4.1	准备工作中的安全防护	(227)
3.4.2	测井施工中的安全防护	(228)
3.4.3	测井施工完毕后的安全防护	(228)
3.4.4	废液废物的贮存和处理	(229)
3.5	密封放射源测井的辐射安全	(229)
3.5.1	测井用密封型放射源的辐射防护要求	(229)
3.5.2	测井用密封型放射源与载源设备性能的检验	(232)
3.6	随钻测井(MWD,LWD)	(233)
3.7	放射性测井的辐射防护监测	(237)
第4章	核子仪与测井辐射事故案例及其教训	(239)
4.1	核子仪辐射事故案例及其教训	(239)
案例1	水泥厂停产疏于管理而丢失放射源	(239)
案例2	疏于管理而造成6组放射源丢失	(240)
案例3	料位计放射源拆下无人看管而丢失	(242)
案例4	^{137}Cs 源被盗	(243)
案例5	放射源料位计丢失事故	(245)
案例6	一起24枚放射源丢失事故	(245)
案例7	放假期间放射源被盗	(247)
案例8	拆下源未入库而丢失	(248)
案例9	闲置放射源保管不善而被盗	(249)
案例10	无证使用放射源而造成的放射源丢失事故	(250)
案例11	违章运输丢失放射源事故	(251)
案例12	新购 ^{60}Co 放射源在运输途中丢失	(253)
4.2	测井辐射事故案例	(255)
案例1	××油田勘探局放射源落井事件	(255)
案例2	测井用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源丢失事故	(256)
案例3	中子刻度源遗留在仪器中造成的意外受照事故	(257)
参考文献		(259)

第一篇

工业辐照装置的防护与安全

第1章 概述

工业辐照,又称辐射加工,是指利用电离辐射与物质相互作用产生的物理效应、化学效应和生物效应,对物质和材料进行加工处理的一种核技术,以(1)消毒医疗用品(灭菌);(2)提高农作物产量、食品质量以及储存食品;(3)得到优质的化工产品、新材料或材料改性;(4)处理工业三废等为目的。为了达到上述目的,需要进行与之相关的辐射化学与辐射生物学的研究,辐照设备的设计以及生产及辐照工艺的研究。辐射加工通常包括 γ 辐射加工和加速器辐射加工。

1.1 工业辐照所用的辐射源

辐射源是指可以通过发射电离辐射或释放放射性物质而引起辐射的一切物质或实体。常见的辐射源有:放射性核素,加速器辐射源,核反应堆等。工业辐照的辐射源可以分为两大类:

- (1) γ 辐射源,包括 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 。
- (2) 加速器辐射源,包括电子束和X射线。

1.1.1 γ 辐射源

工业辐照中最常用的 γ 放射源是从 ^{60}Co 放射性核素获得。自然界存在的是稳定状态的 ^{59}Co ,把它们制备成粒状或柱状,置于核反应堆中接受中子辐照,得到放射性同位素 ^{60}Co 。将 ^{60}Co 小源串列成棒状柱体,用不锈钢筒双层严密焊封,制成棒状标准元件。然后根据使用需要组装成各种形状,例如排成筒状源和平板状源等。

1.1.1.1 放射性衰变的一般规律

^{60}Co 是一种不稳定的放射性核素, 它会自发地发生衰变, 放出 β 射线(电子), 变成另外一种核素 ^{60}Ni 。处于激发态的 $^{60}\text{Ni}^*$ 放出 2 个能量相近的 γ 射线(光子)跃迁到基态, 变为稳定的 ^{60}Ni 。 ^{60}Co 每次衰变的同时发射的 2 个光子, 能量分别为 1.17 MeV 和 1.33 MeV。 ^{60}Co 的衰变过程如图 1-1 所示。

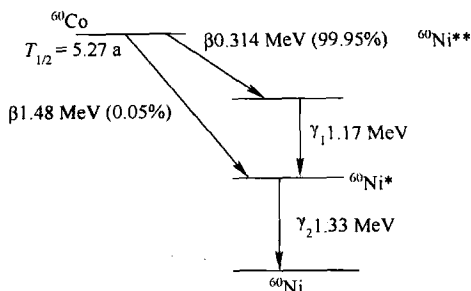


图 1-1 ^{60}Co 衰变纲图

实验表明, 原子核的衰变具有统计的性质, 即在大量的放射性核素中, 并不是同时发生衰变的,

而是有先有后, 相互独立的。设零时刻原子核的数目为 N_0 , t 时刻有 N 个原子核未衰变, 那么在 t 到 $(t+dt)$ 时间间隔内发生衰变的原子核数 $-dN$ 应与 N 和 dt 成正比, 即: $-dN \propto Ndt$ 或 $-dN = \lambda Ndt$ 。

式中的负号表示原子核数随着时间的增加而减少。 λ 为比例常数, 称为衰变常数。将上式两边积分得

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

式中, N_0 ——初始放射核的数目 ($t=0$);

N ——经过 t 时间后的放射核的数目 ($t=t$);

λ ——衰变常数, s^{-1} 。

上述公式表明, 放射性核素的原子核数目, 随时间按指数规律衰减, 这一关系式是对任何单一的放射性核素衰变都适合的基本规律。用这个公式可求出任何时间内尚未衰变的原子核数。公式(1.1)是核自发衰变的一种统计规律, 是对大量的原子核做实验测量得来的。

实验表明, λ 值与外界条件无关, 仅由核素本身的性质决定, λ 的物理意义表示单位时间内放射核发生衰变的概率。 λ 的大小反映了放射性衰变的快慢。

1.1.1.2 半衰期 $T_{1/2}$

半衰期 $T_{1/2}$ 是指放射性原子核数衰减到原来数目的一半所需的时间。当 $t = T_{1/2}$ 时,

$$N = \frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (1.2)$$

所以

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.3)$$

可见 $T_{1/2}$ 与 λ 成反比, 这是因为 λ 越大, 放射性原子核衰减得越快, 自然它衰减到一半所需的时间就越短。常用的放射源 ^{60}Co 的半衰期 $T_{1/2}$ 为 5.27 a, 放射性活度每年下降约 12.6%。

1.1.1.3 放射性活度及单位

上述衰变规律研究的对象是放射源内未衰变的放射性原子核的数目随时间的变化关

系。实际上,人们更关心的是放射源放出的射线的数目的多少。所以通常改为测量放射源在单位时间内发生衰变的核的数目,即 $\frac{-dN}{dt}$,我们称之为放射源的放射性活度 A ,它可以通过测量放射源放射出的射线的数目来决定。放射性活度的定义为:

$$A \equiv \frac{-dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.4)$$

A_0 是某一个初始时刻 $t=0$ 时的放射性活度。可见,放射性活度与放射性核数具有相同的指数衰变规律。放射性活度的 SI 单位:贝可(Bq)表示放射性核素 1 秒钟内发生 1 次衰变, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ 。放射性活度的专用单位:居里(Ci)。 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。

1.1.1.4 γ 辐射源的加工能力

辐照中习惯于用辐射功率来表示 γ 辐射源的加工能力。 ^{60}Co 每次衰变释放出 2 个 γ 光子(1.17 MeV, 1.33 MeV),衰变放出的总能量为 2.5 MeV。以千瓦(kW)为单位的辐射功率 P

$$P = kE(\text{MeV}) \times A(\text{Ci}) \quad (1.5)$$

式中, $k = 5.93 \times 10^{-3}$ 单位转换系数, $\text{kW}/(\text{MeV} \cdot \text{Ci})$;

E ——每次衰变放出的总能量, MeV;

A ——该核素的放射性活度, Ci。

例如, 1 MCi 的 ^{60}Co 产生的 γ 射线的辐射功率

$$P = kE(\text{MeV}) \times A(\text{Ci}) = 5.93 \times 10^{-3} \times (1.17 + 1.33) \times 10^6 = 1.48 \text{ kW}$$

辐射源发射的功率不可能全部被利用起来,由于立体张角、辐照均匀性等的限制,能量吸收利用率约为 20%~40%。如果以能量利用率为 25% 计算,则 14.8 kW 的有效功率约 3.7 kW,变换为产品的产量 $3.7 \text{ kGy} \cdot \text{kg/s}$ 。如辐照加工要求产品吸收剂量为 10 kGy,则产品的加工量为 0.37 kg/s 或约 1.3 t/h。

1.1.2 电子束辐射源

辐照所用的电子束来自电子加速器,工业辐照常用的电子加速器见表 1-1。电子束从电子枪发射出来后,在加速管内受到高压电场的加速作用,将电子能量提高到额定值(例如 3~5 MeV),然后经磁铁偏转扫描再通过钛窗射出。因为电子束单向发射,能量相对集中,能量吸收利用率约为 50%~80%。如果以能量利用率为 60% 计算,对发射功率 15 kW 的加速器,产品的产量 $9 \text{ kGy} \cdot \text{kg/s}$ 。如辐照加工要求产品吸收剂量为 10 kGy,则产品的产量为 0.9 kg/s 或约 3.2 t/h。与电子加速器有关的主要参数:

电子能量 E : 电子能量一般指加速器输出电子束的最可几能量,习惯以 MeV(兆电子伏)为单位来表示。辐射加工用的电子束流能量从 0.1~10 MeV。电子束流能量低于 0.1 MeV,束流引出存在困难;电子束流能量高于 10 MeV 可能发生光核反应,受照物质产生感生放射性(如同位素 ^{14}N 的光核反应阈值为 10.65 MeV)。以此为据,按能量把电子辐照加速器分为低、中、高三个能区。

电子束流强度 I : 指单位时间内被加速电子的数量,即电流,常以 mA(毫安)为单位。低能或中能加速器的束流,通常为恒定束流(直流),高能直线加速器输出为脉冲束流,其平均

表 1-1 工业辐照常用的电子加速器

能量	能量范围/MeV	束功率	主要机型	束流形式	主要用途
低	0.15~0.3	几 kW~100 kW	电子帘加速器	连续束	涂层固化, 细线、薄膜、片状物的辐照, 烟气脱硫和污水处理等
中	0.3~3	几十 kW~400 kW	高频高压加速器(地那米); 高压变压器型加速器	连续束	电线电缆的聚乙烯绝缘材料和聚乙烯发泡塑料的辐照交联, 橡胶硫化; 辐照生产高强度耐温聚乙烯热缩管等
高	3~10	几 kW~几百 kW	电子直线加速器; 梅花瓣型加速器	脉冲	医疗用品的辐射消毒, 食品保藏, 电子元器件改性, 材料改性等方面等

束流强度由脉冲频率、脉冲宽度、脉冲强度等参数描述。

电子加速器的输出功率 P : 表示其加工能力, 它由加速器的高压和电子束流强度所确定

$$P(\text{kW}) = E(\text{MeV}) \times I(\text{mA})$$

与 ^{60}Co 源相比, 电子加速器的功率大, 一般为几 kW 到几百 kW, 能量和束流强度根据需要选择确定。加速器作为电子束辐射源, 产生的剂量率要比 ^{60}Co 辐射源高出 3 到 4 个数量级, 方向集中, 能量利用率高, 照射时间短, 生产效率高。适合于大批量的辐照加工, 可形成规模产业。但电子束的穿透能力低, 应用亦有一定的局限性。

任何辐射源都必须采取防护措施。相对而言, 加速器源的辐射防护比较容易, 开机时有辐射, 停机就没有初级辐射了, 这使辐射安全事故的概率大大降低。能量低于 10 MeV 的电子, 也不会产生感生放射性。

1.1.3 X 射线辐射源

X 射线是用高能电子撞击高原子序数的重金属靶(如钨靶)而转换产生的。X 射线与物质作用的形式与 γ 射线的基本相同, 有较强的穿透力。相比之下, γ 射线发射的是单能光子, 它在材料中的穿透以单指数形式衰减。而电子打靶产生的 X 射线, 发射具有连续谱分布的光子, 其最高能量等于电子的能量, 它在材料中的穿透以准指数形式衰减。

1.1.3.1 X 射线的穿透深度

不同能量的 γ 和 X 射线在水中的穿透深度不同, 见图 1-2。5 MeV 电子打靶产生的 X 射线对水的 1/10 减弱层厚度为 39 cm, ^{60}Co 对水的 1/10 减弱层厚度为 31 cm, 因此 X 射线的穿透

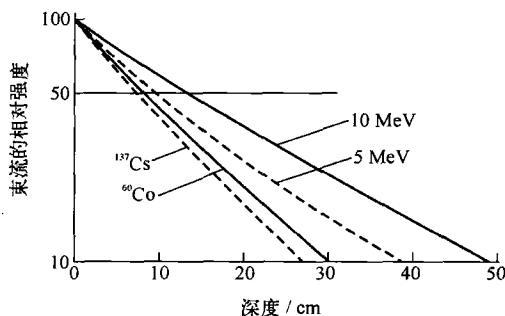


图 1-2 不同射线在水中的穿透深度