

电子加速器工业应用导论

史戎坚 主编

赖启基 审校

中国质检出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

电子加速器工业应用导论/史戎坚主编. —北京:中国质检出版社, 2012
ISBN 978-7-5026-3577-0

I. ①电… II. ①史… III. ①电子加速器 IV. ①TL54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 015208 号

内 容 提 要

本书全面系统地阐明了工业电子加速器的工作原理、基本结构、主要性能及其应用,介绍了辐射加工中辐射物理和辐射化学的基础知识,描述了辐射加工装置的组成布局、加工工艺、屏蔽设计及安全防护,并且对电子束辐射加工的主要应用领域做了介绍。

本书内容涉及专业面较宽,物理概念清晰,可作为高等院校核技术相关专业的教学参考书,也可供相关工程技术人员、各级管理人员以及企业培训人员参考,并可作为广大读者普及辐射应用相关知识的读物。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100013)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 389 千字

2012 年 4 月第一版 2012 年 4 月第一次印刷

*

定价:55.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

； 版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

前 言

21 世纪我们在发展、安全、健康、能源、环境等领域面临着诸多挑战,抓住这些挑战带来的机遇,将决定社会的未来。核技术的应用为人类迎接这些挑战提供了一条可能的途径。

粒子加速器是核技术应用中的重要设备。今天世界上超过 3 万台粒子加速器运行于医学、工业、安全、国防和基础科学领域,粒子加速器世界的“超级明星”是那些巨大的用于基础科学研究的加速器,例如美国费米实验室周长 6.3 千米的质子—反质子对撞机 Tevatron、布鲁克海文实验室周长 3.8 千米的相对论重离子对撞机 RHIC 以及最新建成的位于瑞士日内瓦的欧洲核子中心周长 27 千米的大型强子对撞机 LHC。在这些明星的后面是数以万计的小型加速器,它们每天工作在医院、制造企业、港口、印刷厂,甚至海上的轮船里。医用和工业加速器目前每年的市场超过 35 亿美元,并且仍以每年 10% 的速度在增长。制造集成电路的离子的注入,为离子加速器创造了 15 亿美元的市场份额。所有与粒子加速器相关的产品,包括辐射加工、治疗和安检,年产值均超过 5000 亿美元。

未来粒子加速器仍有希望带来巨大的机遇。新型粒子加速器设备将融入核能源,使得核电更加安全和洁净,更具低成本和绿色环保。电子束处理废气使得燃煤工厂更清洁,与环境更友好。电子束降解污水,使得生活用水更加安全。放疗设备已成为癌症治疗的主流手段之一,已能实现三维适形、调强和图像引导治疗,从而减小对正常组织的损伤。粒子加速器也是医用同位素生产的可靠替代源,用于取代污染大的核反应堆。在工业中,加速器是廉价和绿色的设备,可以替代数百种传统的工业加工。在安全领域,集成稳健的现场检测加速器可更安全和便捷地检测货物,监测禁止大气核试验的执行情况,粒子加速器在加强国家安全方面也会发挥越来越重要的作用。

作为核技术应用领域的重要组成部分,辐射加工是利用 γ 射线或加速器产生的电子束、X 射线辐照被加工物体,使其品质和性能得以改善。由于不产生放射性元素,在适当的能量控制下不会在照射物体上残留感生放射性物质,已广泛应用于医学灭菌消毒、农产品、食品保鲜、材料科学、环境保护、航空航天、石油化工等领域。目前,辐射加工产业年产值已达数千亿美元,且每年仍以 10% ~ 15% 的速度递增。

我国辐射加工产业经过四十多年的发展已初具规模,形成了一批掌握核心技术的企业,实现了钴⁶⁰批量化生产,具备了世界上第二大辐射加工装备研制、供货及工程建造能力,市场范围涉及中国、泰国、越南、欧洲、南美等国家和地区,年产值达300亿元人民币。正是因为我国众多科研工作者和一批核心企业的不懈努力,我国辐射加工产业获得了全球同行的高度关注和肯定。

近年来,我国的辐照加速器在数量、规格、质量、配套、应用等方面都有长足的发展。据中国同位素与辐射行业协会辐射加工专业委员会截至2009年年底的统计,我国在辐射加工生产线上的电子加速器已超过150台,总功率约8500kW;全国辐射加工产业规模达300亿元,预计2015年辐射加工产业规模将达700亿元。随着我国经济的快速发展,辐照工业和辐照加速器的市场规模将继续保持高增长态势。根据行业协会“十二五”发展规划的要求,要在现有的基础上,加强科技自主创新能力,建设并完善行业技术支撑平台,重点发展电子加速器辐照设备。辐照产业的发展战略,应包括辐照设备的研制、生产,辐照工艺的研究和辐照产品的开发并重推进。

为了配合粒子加速器应用技术的发展,我们组织编写了本书,目的是希望能够着重物理概念、深入浅出、形象生动、理论联系实际地论述相关内容,为促进电子束加工产业的发展提供知识储备。

全书内容分为7章。第1章简明综述电子束辐射技术的应用领域,使读者对电子束加工在国民经济可持续发展中的作用有一个基本的认识。第2章较详细地介绍常见的各类工业辐照加速器的原理结构及主要性能参数。第3章介绍辐射加工中用到的辐射物理及辐射化学方面的基础知识。第4章介绍辐照装置的组成、运行、加工工艺及辐照产品的质量控制等。第5章介绍电子辐照装置的屏蔽设计及计算方法。第6章介绍辐射的安全防护及生物效应。第7章介绍电子束辐射的主要工业应用,分别介绍了辐射消毒灭菌、食品的辐射保鲜、环境污染的辐射治理、高分子化合物的辐射材料改性。正文后附录I介绍了国内相关辐射加工企业;附录II简要介绍国外工业电子加速器的主要制造生产厂商及其产品性能参数,以利开放思路,研发有自己特色的新型产品。

本书涉及专业领域较宽,由于编者水平有限,错误在所难免,敬请广大读者指正。本书由史戎坚研究员主编,南京大学赖启基教授对全书作了仔细的审核和校对,第2章由刘林博士编写,其余各章由唐鄂生研究员编写。

本书的出版得到了中国同位素与辐射行业协会辐射加工专业委员会赵文彦主任及其团队的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

编 者
2011年11月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 电子束的产生	(2)
1.2 电子束辐照的特点	(2)
1.3 辐射技术的主要应用	(3)
1.3.1 医疗用品的灭菌消毒	(3)
1.3.2 食品保藏	(3)
1.3.3 农业中的应用	(4)
1.3.4 环境工程中的应用	(5)
1.3.5 高分子材料的辐射改性	(6)
1.3.6 X 射线应用	(7)
1.3.7 辐射加固和剂量仪器的校准	(8)
第 2 章 电子加速器	(10)
2.1 粒子加速器	(10)
2.2 电子加速器	(11)
2.2.1 电子加速器概述	(11)
2.2.2 电子加速器的基本组成	(12)
2.2.3 电子辐照加速器分类	(13)
2.3 高压加速器	(16)
2.3.1 基本构成	(16)
2.3.2 电子帘加速器	(22)
2.3.3 倍压加速器	(25)
2.3.4 高频高压加速器	(28)
2.3.5 绝缘芯变压器型加速器	(31)
2.3.6 空芯变压器型加速器	(32)
2.4 高频加速器	(34)
2.4.1 电子直线加速器	(34)
2.4.2 单腔谐振加速器	(55)
2.4.3 Rhodotron 加速器	(58)
第 3 章 辐射技术基础	(64)
3.1 辐射加工技术概述	(64)
3.2 电离辐射源	(64)

3.2.1	放射性核素辐射源	(64)
3.2.2	电子束辐射源	(66)
3.2.3	X 射线辐射源	(67)
3.3	电子辐射能量的转移和吸收	(69)
3.3.1	高能电子与物质的相互作用	(69)
3.3.2	高能电子在物质中的吸收	(71)
3.3.3	阻止本领 S	(73)
3.4	γ 射线和 X 射线与物质的相互作用	(74)
3.4.1	γ 射线和 X 射线的特点	(74)
3.4.2	相互作用的三种形式	(75)
3.4.3	γ 射线和 X 射线通过物质时的衰减	(79)
3.4.4	γ 能谱的展宽和 X 能谱的硬化	(80)
3.5	吸收剂量	(81)
3.5.1	线能量衰减系数	(81)
3.5.2	比释动能 K	(82)
3.5.3	吸收剂量 D	(82)
3.5.4	吸收剂量 D 与比释动能 K 的关系	(82)
3.5.5	照射量 X	(83)
3.5.6	吸收剂量 D 与照射量 X 的关系	(83)
3.5.7	当量剂量	(84)
3.6	辐射加工中常用到的单位	(85)
3.6.1	放射性	(85)
3.6.2	能量、质量、质能关系	(86)
3.6.3	功率	(86)
3.6.4	电荷与电流	(86)
3.6.5	吸收剂量 D , 当量剂量 H	(86)
3.6.6	照射量 X , 比释动能 K 与吸收剂量 D	(87)
3.6.7	照射量 X 与吸收剂量 D	(87)
3.7	辐射化学效应	(87)
3.7.1	自由基	(87)
3.7.2	辐射化学反应的特点	(87)
3.7.3	辐射化学产额(G 值)	(88)
3.7.4	辐射化学基本反应	(89)
第 4 章 辐射装置与辐射加工工艺		(93)
4.1	辐射装置	(93)
4.1.1	辐射装置的布局	(93)
4.1.2	辐射装置的设计原则	(97)

4.2	γ 射线辐射装置	(99)
4.3	电子束辐射装置	(100)
4.3.1	电子加速器辐射装置的特点	(100)
4.3.2	产品的传输系统	(102)
4.3.3	人员的辐射防护	(102)
4.3.4	辐射装置的加工参数	(102)
4.4	束下传送系统	(103)
4.4.1	基本辐照形式	(103)
4.4.2	电子辐照的两种辐照方式	(103)
4.4.3	产品传送系统的几种主要形式	(104)
4.4.4	传送链的控制要求	(104)
4.5	电子束辐射剂量的不均匀度	(105)
4.5.1	辐射剂量的不均匀度的定义	(105)
4.5.2	扫描方向的不均匀度	(105)
4.5.3	产品传送方向剂量均匀的必要条件	(108)
4.5.4	控制电子束在参考面上的二维剂量不均匀度	(110)
4.5.5	产品深度方向的剂量均匀性	(111)
4.6	温度的上升与吸收剂量	(115)
4.7	电子辐照产品中的最大及最小剂量的分布	(116)
4.7.1	单面辐照时剂量的极大极小值	(116)
4.7.2	双面辐照时剂量的极大极小值	(116)
4.7.3	吸收剂量极限值在辐照单元中位置的确定	(116)
4.8	电子辐照产能的估算	(117)
4.8.1	质量加工率的计算公式	(117)
4.8.2	束流能量有效利用率 $F(p)$	(118)
4.8.3	产品的最小吸收剂量 $D_{\min}$	(120)
4.8.4	辐照产品产率的估算	(120)
4.9	产品吸收剂量的控制	(121)
4.9.1	传送速度与运行参数的关系	(122)
4.9.2	运行参数的确定	(122)
4.9.3	传送速度及辐照控制	(123)
4.9.4	控制台显示	(123)
4.10	X 射线辐照加工	(124)
4.10.1	X 射线的能量转换效率及深度剂量分布	(124)
4.10.2	X 射线的能量利用率—双面辐照的最佳厚度	(124)
4.10.3	Palletron TM	(126)
4.11	辐射加工剂量学	(126)
4.11.1	辐射剂量学的重要性	(126)
4.11.2	吸收剂量值—辐射加工的定量指标	(127)

4.11.3	剂量测量系统	(128)
4.11.4	工作剂量计的选用	(128)
4.11.5	辐射显色染料薄膜剂量计	(129)
4.11.6	工作剂量计系统的校准	(129)
4.11.7	剂量计测量中的不确定度	(130)
4.11.8	可跟踪性(可比对性)	(131)
4.11.9	加工的可靠性	(131)
4.11.10	目标剂量值的选定	(131)
4.11.11	参考剂量计的位置	(132)
4.11.12	文件和论证	(133)
4.12	装置运行及加工控制	(133)
4.12.1	辐射装置的确认	(133)
4.12.2	加工确认	(133)
4.12.3	日常加工的控制	(133)
第5章	电子辐射装置的屏蔽	(134)
5.1	概 述	(134)
5.1.1	辐射装置的选址与规划	(134)
5.1.2	空间的利用	(134)
5.2	工业辐照加速器的辐射来源	(135)
5.2.1	电子加速器产生的辐射源	(135)
5.2.2	韧致辐射的强度和角分布	(135)
5.2.3	厚靶条件下 X 射线发射率的估计	(137)
5.2.4	散射光子	(137)
5.3	辐射的屏蔽	(138)
5.3.1	区域的类型及屏蔽标准	(138)
5.3.2	当量剂量限值	(138)
5.3.3	吸收剂量指数 D_r 及当量剂量指数 H_r	(139)
5.3.4	居留因子 T	(139)
5.4	X 射线屏蔽体厚度的计算方法	(139)
5.4.1	直射 X 射线束的辐射屏蔽	(139)
5.4.2	侧屏蔽墙厚度的屏蔽计算	(142)
5.4.3	散射 X 射线的屏蔽	(144)
5.4.4	屏蔽墙上的孔道	(145)
5.4.5	迷宫的计算	(146)
5.4.6	屏蔽门的典型结构	(147)
5.4.7	常用屏蔽材料的密度	(148)
5.5	天空反散射(天空反照)	(148)
5.5.1	天空反散射立体角的计算	(148)

5.5.2	辐射装置厂房屋顶屏蔽厚度的计算	(149)
5.6	通风	(151)
5.6.1	气体浓度单位的换算	(151)
5.6.2	臭氧浓度的计算方法	(151)
5.6.3	臭氧浓度的计算实例	(152)
5.6.4	长时间运行后辐照间空气中臭氧 O ₃ 的饱和浓度	(152)
5.6.5	换气次数的计算实例	(153)
5.7	安全联锁系统的设计	(153)
5.7.1	“最优切断”和“冗余”	(153)
5.7.2	联锁开关	(154)
5.7.3	警告信号	(154)
5.8	辐射监测	(154)
5.9	常用的蒙特卡罗程序简介	(155)
5.9.1	EGS	(155)
5.9.2	FLUKA	(156)
5.9.3	GEANT	(156)
5.9.4	ETRAN	(157)
5.9.5	ITS	(158)
5.9.6	MCNP	(158)
第 6 章	辐射防护与剂量安全	(160)
6.1	辐射防护的目的和任务	(160)
6.1.1	辐射对人体的危害	(160)
6.1.2	早期对辐射的防护措施	(160)
6.2	辐射源的种类	(160)
6.3	电离辐射对人体的作用	(161)
6.3.1	电离辐射对生物体的作用	(161)
6.3.2	辐射生物效应的演变过程	(161)
6.3.3	辐射对细胞的作用	(161)
6.3.4	辐射对 DNA 的损伤作用	(162)
6.4	辐射对人体的危害	(163)
6.4.1	躯体效应与遗传效应	(163)
6.4.2	随机性效应和非随机性效应	(164)
6.5	影响辐射生物学效应的因素	(166)
6.5.1	物理因素	(166)
6.5.2	生物因素	(167)
6.6	辐射防护标准和原则	(168)
6.6.1	防护标准	(168)
6.6.2	防护原则	(169)

6.7 辐射剂量监测	(170)
6.7.1 工作场所的监测探头	(171)
6.7.2 个人剂量监测	(171)
6.8 安全与事故管理	(172)
6.8.1 工作人员的管理	(172)
6.8.2 安全管理规章制度	(173)
6.8.3 放射事故管理	(173)
第7章 辐照技术应用	(174)
7.1 医疗用品的辐射灭菌	(174)
7.1.1 辐射灭菌概述	(174)
7.1.2 辐射消毒灭菌的特点	(175)
7.1.3 适于辐射灭菌消毒的医疗用品种类	(175)
7.1.4 辐射灭菌的原理	(175)
7.1.5 不同微生物的辐射敏感性不同	(176)
7.1.6 不同微生物的抗辐射能力	(177)
7.1.7 辐射灭菌过程中遵循指数灭活规律	(177)
7.1.8 灭菌剂量(SD)的选择	(179)
7.1.9 电子束灭菌技术	(180)
7.1.10 各种灭菌方法的比较	(181)
7.1.11 包装材料的灭菌	(181)
7.2 食品辐照技术	(181)
7.2.1 食品辐照保鲜的优越性	(181)
7.2.2 食品辐照的安全性	(182)
7.2.3 食品辐照的应用	(184)
7.2.4 辐照杀菌剂量	(188)
7.2.5 影响食品辐照效果的因素及条件控制	(189)
7.2.6 辐射保藏的实例——芒果的辐照保鲜	(190)
7.2.7 电子束辐照食品的特点	(191)
7.3 环境科学中的辐射技术	(191)
7.3.1 低碳经济	(191)
7.3.2 环境污染的分类	(191)
7.3.3 大气污染的严重性	(192)
7.3.4 水污染	(195)
7.3.5 固体废弃物污物	(200)
7.4 高分子化学物材料的辐射改性	(201)
7.4.1 高分子化合物	(202)
7.4.2 高分子化合物的辐射效应	(203)
7.4.3 辐射聚合	(204)

7.4.4 辐射交联	(204)
7.4.5 辐射降解	(212)
7.4.6 辐射接枝共聚合	(213)
7.4.7 辐射固化	(214)
7.4.8 其他应用	(216)
7.4.9 各种辐射加工所必需的辐射剂量	(218)
7.4.10 常见聚合物名称对照表	(218)

附 录

附录 I 国内主要辐照加速器厂商及其主要产品简介

(排序不分先后)	(221)
----------------	-------

1. 加速器研制生产单位	(221)
1.1 中国科学院上海应用物理研究所	(221)
1.2 同方威视技术股份有限公司	(221)
1.3 无锡爱邦辐射技术有限公司	(222)
1.4 江苏达胜加速器制造有限公司	(222)
1.5 北京机械工业自动化研究所	(222)
1.6 IBA	(222)
1.7 宁波超能科技股份有限公司	(223)
1.8 江苏海维科技发展有限公司	(223)
2. 工程设计单位	(223)
北京三强核力辐射工程技术有限公司	(223)
3. 应用单位	(224)
3.1 长园集团股份有限公司	(224)
3.2 深圳市沃尔核材股份有限公司	(224)
3.3 吉林市吉福新材料有限责任公司	(224)

附录 II 国外主要辐照加速器厂商及其主要产品简介

1. 美 国	(225)
1.1 Energy Sciences, Incorporated (ESI)	(225)
1.2 Advanced Electron Beams, Incorporated (AEB)	(225)
1.3 L&W Research, Inc.	(228)
1.4 L-3 Communications Pulse Sciences	(230)
1.5 BeamOne LLC	(231)
1.6 PCT Engineered Systems, LLC	(232)
2. 日 本	(234)
2.1 Nissin High Voltage Corporation (NHV)	(234)
2.2 Photon Production Laboratory (PPL)	(236)

2.3 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (237)

3. 俄罗斯 (238)

 Budker Institute of Nuclear Physics (BINP) (238)

4. 加拿大 (239)

 4.1 Mevex (239)

 4.2 IOTRON Industries Canada Inc. (244)

 4.3 I – Ax Technologies Incorporated (246)

5. 法 国 (247)

 5.1 VIVIRAD (247)

 5.2 LINAC TECHNOLOGIES (247)

6. 比利时 (250)

 Ion Beam Application (IBA) (250)

附录Ⅲ 辐射加工期刊和网站 (255)

主要参考文献 (257)

第 1 章 绪 论

核技术是以核素、核辐射和其他相关理论为基础的科学技术。通常包括核能技术、核动力技术、同位素技术、辐射技术、核燃料技术、核辐射防护技术等领域,它在国防现代化建设、工业、农业、医学、材料、信息、环保、健康等方面发挥着极其重要的作用。

民用非动力核技术是指除核武器与核电之外的核技术,民用非动力核技术包括各类加速器、核探测器、射线成像装置、放射医疗设备、医用放射性同位素及制品(治疗和显像药物)、辐射改性的材料等,应用领域涉及工业、农业、医疗健康、环境保护、资源和公众安全等。

民用非动力核技术中的辐射加工技术是利用电离辐射与物质相互作用产生的物理学、化学和生物学效应,对物质和材料进行加工处理的一种技术。这是一种高效的加工技术,具有穿透性强、可在常温下进行、节能、无残毒、无废物、易于控制、安全可靠及应用面广泛等特点,是无污染的绿色加工技术,因而在传统行业改造、功能材料开发、实现微细加工及三废处理中都具有重要作用,因此推广辐射加工技术,必将产生巨大的经济效益和社会效益。据 2010 年的报道,美国辐射产业的规模已达到 6000 亿美元,占到国民生产总值的 3%。日本辐射加工的特点主要在工业应用方面,如高性能线缆、电子器件、子午线轮胎的电子束辐照预硫化工艺等。发展中国家也积极发展辐射加工产业,印度、泰国、越南等采用辐照技术处理热带水果,实现大批量出口,并对进出口粮食检疫,以保证本国的物种安全。截至 2010 年年底,中国的辐射加工产业总产值为 350 亿元。

辐射加工技术包括同位素辐照及电子加速器辐照技术两大类。电子束辐照技术的应用和辐照产业的发展在我国也已经有了较长的历史。据中国同位素与辐射行业协会 2009 年年底统计,我国在辐射加工生产线上的电子加速器已超过 150 台,总功率约 8500kW,全国辐射加工产业规模达 300 亿元。我国辐射加工产业主要包括以下 4 个部分:辐射化工,辐射加工服务,环境治理与公共安全保障,辐射装置制造。其各类产业结构产值统计如表 1-1 所示。由此看出在“十一五”期间,辐射加工各类产值均翻了一番,有了很大的提高。但是辐射装置产值相对较低,装置设备的开发具有很大的空间。

表 1-1 我国各类辐射加工产业结构产值(2005 年和 2010 年比较)

门 类	产 业 构 成	产值(亿元)	
		2005 年	2010 年
辐射加工服务	农副产品及食品的辐射加工、医疗用品消毒灭菌、进出口检疫等	90	180
辐射化工	辐射交联线缆、热缩材料、发泡材料、轮胎预硫化、辐射接枝膜材料、印染涂料、表面处理固化材料等	52	110
环境与公共安全	重污水处理、有毒有害固体垃圾处理、烟气净化、违禁物的检测等	25	50
辐射技术装备	γ 与电子束辐射装置、离子注入装备、各种类型的检测装备等	5	10
总 计		172	350

电子束辐照在辐射加工行业中具有很大的开发潜力。根据行业协会“十二五”发展规划的要求,要在现有的基础上,加强科技自主创新能力,建设并完善行业技术支撑平台,重点发展电子加速器辐照设备。辐照产业的发展战略,应包括辐照设备的研制和生产与辐照工艺的研究和辐照产品的开发并重推进,主要是大力开发稳定的、能长期运行的、操作维修简便的、价格合理的加速器;建立相应的示范性辐照中心;开发新的辐照产品工艺,开拓辐照加工新市场;适时开展新型辐照加速器的研制,并努力开拓相应的国际市场。

1.1 电子束的产生

各类辐射技术的应用都需要电子束和 X 射线。电子加速器是用以提供能量高、流强大、品质好的电子束的关键设备。电子束轰击重元素靶可以转换成 X 射线。

电子加速器是辐射技术应用中的重要工具。辐射加工使用的电子加速器主要是高压加速器和电子直线加速器。

1.2 电子束辐照的特点

高能电子加速器产生的电子束有它如下固有的特点。

(1) 有强大的辐射加工能力。例如,对需要 1kGy 的加工剂量、密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 的物质的辐射加工产能为 $27\text{t}/\text{h}$ (设束流功率为 15kW,辐射效率为 50%)。因此,小批量的产品立等可取,大大节省了库存及周转的成本费用,更适合大规模的产业化生产。

(2) 辐照效率高。由于电子束是单向辐射,其辐照效率(40% ~ 60%)远优于各向同性辐射的钴源的射线利用率。平均功率 15kW 的电子束,其生产效率相当于 220 万居里^①的钴源。

(3) 10MeV 电子束对于密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 的物质,穿透深度为 3.5cm (从被辐照物表面起至射线剂量最大值的 60% 为其穿透深度),而双面辐照时穿透深度可达 9.5cm。对于一些密度低的物品 (例如医用输液器的密度为 $0.13\text{g}/\text{cm}^3$), 10MeV 电子束的穿透深度可达 30cm。

(4) 电子束打靶后产生的 X 射线的穿透力比钴源产生的 γ 射线还要大。10MeV 电子束产生的 X 射线加工产品的水当量厚度达 40cm。

(5) 加速器既可以水平辐照,又可以垂直向下辐照,因此易于安排各种类型的辐照物的传送。

(6) 物品的辐照时间很短 (一般以秒或分钟为计时单位),被照物 (特别是食品与中药类) 不会受到氧化等可能引起质的变化的过程,冰冻食品不会融化。

(7) 资金投入少,辐照加工量大,经济效益高。对于相当加工能力的钴源辐照,其成本会降低一半以上。

(8) 没有放射性物质残留,有利于环保,是“干净”的射线源,有利于安全生产。

^① 居里,放射性活度单位,1 居里 = 3.7×10^{10} 贝可勒尔。

1.3 辐射技术的主要应用

1.3.1 医疗用品的灭菌消毒

日本过去曾是肝炎高发区,但自从采用一次性医疗器械辐照灭菌消毒技术后,近年来已基本消灭了交叉感染,肝炎患者大为减少。

能够用辐射方法灭菌消毒的医疗用品种类很多,包括金属制品、塑料制品,主要是一次性使用的医疗用品,也可以是多次使用的物品等上千种。此外,中西药与化妆品也都可以用辐射方法灭菌。

辐射灭菌消毒要比传统的高压蒸汽、常规的 ETO(环氧乙烷)化学消毒方法具有更多的优点:

(1)辐射灭菌的处理是在常温下进行的,适用于对热敏感的塑料制品、生物制品和药物。

(2)辐射穿透力强,杀菌均匀彻底,能够穿透密封包装物,杀灭内部的微生物,不存在二次污染的问题。货架寿命几乎是无限的,取出即可使用。

(3)能耗低,无毒物残留,不污染环境。

(4)辐射灭菌速度快,可连续作业,适合于大规模加工。

(5)操作安全,加工易于控制。一旦加工参数确定,时间便是唯一可调因素,不像其他方法需同时控制很多因素。

受 1989 年保护环境的《蒙特利尔议定书》的制约,常规的化学 ETO(环氧乙烷)灭菌法,因具有强的致癌效应并污染环境,已逐步退出市场,辐射灭菌消毒逐渐成为主流。目前,在发达国家中,美国、欧洲、日本生产的一次性医疗器械,其中 60% 是用辐射方法灭菌消毒的。

据加拿大 MDS Nordion 介绍,化学灭菌法的市场份额从 1980 年的 90% 逐步递减至 2005 年的 51%;辐射灭菌是逐步上升的趋势,如 γ 射线辐照从 1980 年的 10% 上升至 2005 年的 43%,电子束辐照从 1980 年的 1% 上升至 2005 年的 6%。在美国,医疗保健产品的辐射灭菌大体上占 60% 的市场份额。

1.3.2 食品保藏

粮食、果蔬、肉食等在制作、运输、储存与销售过程中,常常因病虫害侵蚀、腐败、霉烂、高温发芽等而变质。据不完全统计,由此引起的损失可高达 20% ~ 30%。为此,长期以来人类采用干燥、腌制、冷藏与冷冻、高温蒸煮、真空、熏制以及化学防腐剂等多种方法保存食品,取得了良好的效果,但也存在不少问题。上述保藏方法的共同缺点是能耗大,且杀虫灭菌不彻底,不易保鲜。

食物辐照保鲜技术是指食品在电离辐射作用下,产生物理、化学、生物效应,使之抑制发芽、杀虫灭菌、控制寄生虫感染,以延长货架期,提高卫生质量的方法。

食物辐照保鲜已成为一个具有相当吸引力的食物储藏技术。食物辐照保鲜技术与非

核技术相比具有以下特点。

(1) 节约能源。据国际原子能机构统计,每吨冷藏食品能耗为 $3 \times 10^8 \text{J}$,巴斯德加热消毒法为 $8 \times 10^8 \text{J}$,而辐照法仅为 $2.2 \times 10^7 \text{J}$ 。后者的能耗只有常规方法能耗的十几分之一到几十分之一。

(2) 辐照保鲜延长了食品的货架期,极大提高了食品的远销能力,减少损耗,提高了经济效益。

(3) 辐照方法属于冷加工,在食品辐照过程中温升很小。辐照的这种冷加工特色,可使食品保持其原有的色香味,因而具有很强的竞争力。

(4) 穿透力强。电离辐射具有较强的穿透力,因而可深入到食品内部,杀灭隐藏很深的病菌和害虫,达到长期保存的目的。辐照杀菌的这一特点还特别适用于那些无法加热、蒸煮、熏制的食品。

(5) 安全卫生。食品辐照不需化学添加剂,不存在化学保存法带来的残留毒性。辐照处理过的食品在密封条件下几乎可无限期保存。由于杀菌效果好,辐照食品特别适用于航天员、舰艇海员、边防军人、野外作业人员以及特护病人等,作为无菌食品食用。

(6) 只要用很低的剂量就可以消灭大肠杆菌等食源性细菌的侵蚀。

(7) 改善食品品质。例如,经辐照的酒可加速其醇化过程,增加香味;辐照过的牛肉鲜嫩可口;辐照过的大豆易于消化吸收;脱水食品经辐照后烹调时间缩短;辐照面粉可改进其烘烤质量等。

(8) 操作简便,易于实现自动化。

辐照保鲜技术受到世界各国的高度重视,是国际原子能机构和世界卫生组织推荐的安全的食品加工方法。

1.3.3 农业中的应用

“农业的根本出路在科技进步”,这是西方发达国家已走过的道路,也符合我国人多地少这一国情。辐射技术在建立高效、优质农业方面具有不可低估的作用。辐射技术与农业的结合形成了一门独立的新学科——核农学。核农学为促进农业科学技术的发展,改进农业生产技术,加速农业现代化提供了科学基础,是农业现代化的重要标志之一。

辐射技术在农业中的应用,主要包括:辐照育种、抑制发芽、病虫害防治及低剂量辐射增产等。

(1) 辐照育种

辐照育种相对于传统育种的优点是突变率比自然变异率高 $100 \sim 1000$ 倍,方法简便,且育种周期短。由于利用中子、离子束、 γ 射线、电子束、X 射线等辐照,可引起生物体遗传器官的某些变异,如染色体或核酸分子的某种断裂,有可能使原品系遗传中的某些不良基因丢失而保持原来的优良基因,从而达到高产、早熟、增强抗病能力及改善营养品质的目的。

我国早在 1996 年就培育出首批辐照粮食作物和棉花的新品种,如“原丰早”水稻、“鲁棉 1 号”棉花、“鲁原早 4 号”玉米及“太辐 1 号”小麦等,社会效益显著。