

核安全系列丛书

工业电离辐射 防护与安全

Gongye Dianli Fushe Fanghu Yu Anquan

肖铮●主编



兰州大学出版社



国家安全生产标准

工业电离辐射 防护与安全

GBZ 130-2013

2013-10-01

中国标准出版社



核安全系列丛书

工业电离辐射 防护与安全

Gongye Dianli Fushe Fanghu Yu Anquan

肖铮●主编

兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工业电离辐射防护与安全/肖铮主编. —兰州:
兰州大学出版社, 2011. 12
(核安全系列丛书)
ISBN 978-7-311-03780-2

I. ①工… II. ①肖… III. ①电离辐射—辐射防护
IV. ①R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 256875 号

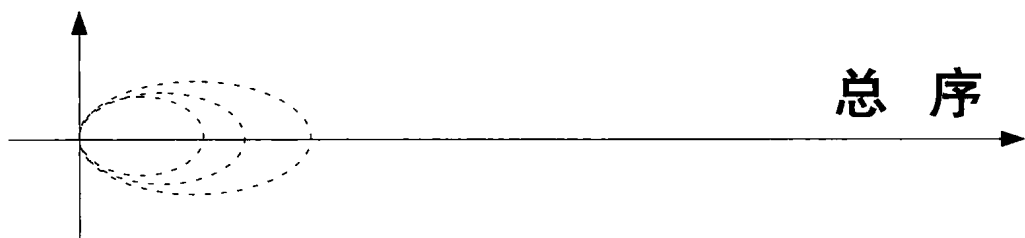
策划编辑 张爱民
责任编辑 郝可伟
封面设计 刘 杰

书 名	工业电离辐射防护与安全
作 者	肖 铮 主编
出版发行	兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路 222 号 730000)
电 话	0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心) 0931-8914298(读者服务部)
网 址	http://www.onbook.com.cn
电子信箱	press@lzu.edu.cn
印 刷	兰州奥林印刷有限责任公司
开 本	710mm×1020mm 1/16
印 张	13.75
字 数	217 千
版 次	2011 年 12 月第 1 版
印 次	2011 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-311-03780-2
定 价	45.00 元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

《核安全系列丛书》编审委员会

主 任	武德凯					
副主任	肖 铮	张志宏				
主 编	肖 铮					
副主编	张志宏	汪 源	葛宏英			
编 委	杜立新	宗 凌	高志民	李 宏	王福军	
	陈 璞	闫德坤	李小飞	张学东	梁兰庆	
审 稿	陈熙萌					
校 对	焦 翔					



总 序

自 20 世纪人类发现核能并开始利用核能作为新型能源,核能与核技术的发展突飞猛进,为人类社会的进步和文明做出了重大的贡献。核能技术应用产业,是一个以众多学科为基础发展起来的综合性战略产业,它与现代航天技术、微电子技术、生物工程等一样是当代高技术的重要领域之一,属于安全、清洁的高技术产业。20 世纪 80 年代初,我国实行改革开放政策,核工业开始走上新的发展道路,开发核电和推广核技术应用成为核工业的重要方向。20 多年来,我国核工业立足自主开发,扩大对外开放,核科学技术研究不断取得进展,核电开发与建设成就显著,核技术应用产业化初具规模。目前核技术已应用于我国国家安全、产业发展等方面,在工业、农业、医学等领域的广泛应用,创造了巨大的经济效益、社会效益与生态效益,推动了社会的进步。但在人类应用、发展核技术来造福社会的同时,不可避免地出现了一些辐射事故,这使得人们不得不考虑发展核能与核技术所带来的负面效果。人类环境是很容易受污染损害的,这又需要我们在大力应用核技术的同时,还要保障我们的社会安全稳定、环境不受污染,以求社会平稳、健康地发展。

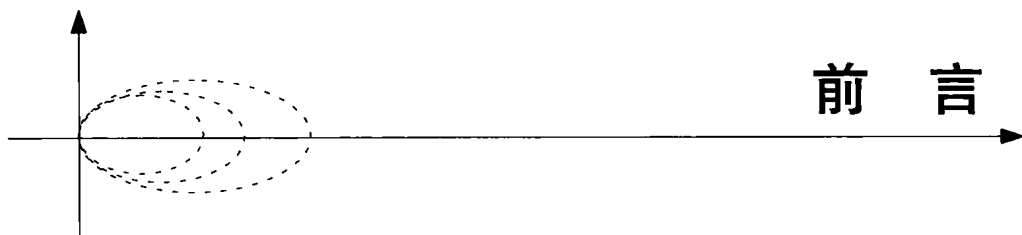
甘肃省是我国最早的核工业和核试验基地,辖区内核工业和核技术利用项目按照国家核事业发展的整体布局,起步早、发展快。目前甘肃省

核设施涉及铀矿的开采水冶系统、铀浓缩、铀转化、放射性废物的处置等行业;核技术利用涉及探伤、辐照加工、医用放射性诊疗、核仪表生产、地质勘探等业务;以镍、铅、锌、稀土和贵金属为主的矿产是甘肃省的优势资源,随着伴生放射性矿产资源的开发、利用,一些自然界的放射性污染进入人类生活的环境中;社会已进入飞速发展的信息化时代,伴有电磁辐射的设施和活动在逐步增多,甘肃省有各类伴有电磁辐射的设备(设施),涉及广播电视发射塔台、中波广播电台、卫星地球站、移动通信基站、高压输变电工程等项目,增加了辐射环境管理工作的内容,对辐射环境管理工作提出了更高的要求。

“核与辐射”作为一个人们心中比较神秘的话题,人们常常谈核色变。为了使更多读者了解并认识日常生活中所遇到的核与辐射的基础知识,了解国家法律法规在核与辐射监管与应用方面的相关要求,我们特编写了这套《核安全系列丛书》,包括《常用放射性同位素基础知识》、《工业电离辐射防护与安全》、《医用电离辐射防护与安全》、《电磁辐射防护与安全》、《核技术利用法律法规汇编》共5本。此套丛书亦适用于核技术利用单位核与辐射知识的普及,为他们提供必要的理论基础知识,为今后开展核与辐射相关工作提供便利。

武德凯

2011年10月



当前,放射性同位素与射线装置被广泛用于工业、农业、医疗、国防、教学和科研等领域,并且已在我国逐步形成产业化,为国民经济和社会发展作出了重要贡献。

《中华人民共和国放射性污染防治法》和《放射性同位素与射线装置安全防护条例》已经颁布实施,明确了国务院环境保护主管部门对放射性污染防治工作实施统一管理,规定了放射性污染防治的基本原则、制度、措施及监督管理体制等重大问题。为加强辐射环境监管提供了法律依据。为了适应当前核安全与辐射环境安全监管工作的需要,针对放射性同位素与射线装置安全与防护监管的实际情况,以及放射性同位素与射线装置应用单位对现行法律法规规定的要求了解和掌握相对缺乏的现实,我们组织有关人员编写了《工业电离辐射防护与安全》一书。

本书适用于核技术应用单位放射性知识的普及,也可作为读者了解放射性知识的参考书籍,了解并认识放射性同位素和射线装置的应用和发展,为开展相关方面的工作提供便利。

本书主要内容包括核技术工业应用概述、辐射加工防护与安全、工业探伤防护与安全、核仪器仪表及其他应用装置、开放性放射性同位素的利用等。在编写过程中,虽然经过反复斟酌和努力,但由于时间紧迫,难免存在不足之处,诚望广大读者提出宝贵意见,以便再版时修订完善。

编者

2011年8月



第一章 核技术工业应用概述	001
第一节 国外核技术应用概况	001
第二节 国内核技术应用概况	003
第二章 辐射加工防护与安全	005
第一节 辐射加工技术及应用	005
第二节 γ 辐射加工防护与安全	015
第三节 加速器辐射加工防护与安全	047
第四节 辐射加工事故与应急	071
第三章 工业探伤防护与安全	086
第一节 探伤用辐射源	086
第二节 γ 射线探伤	091
第三节 X 射线探伤	118
第四节 事故预防与应急处理	151
第四章 核仪器仪表及其他应用装置	157
第一节 核仪器仪表的特点	157
第二节 核仪器仪表及其他应用装置的介绍	163
第三节 安全防护与监测	181
第四节 辐射事故应急	194

第五章 放射性同位素示踪技术	198
第一节 概述	198
第二节 可活化示踪技术	203
第三节 放射性工业示踪应用	205
第四节 放射性同位素示踪技术的进展	211
参考文献	213

第一章 核技术工业应用概述

随着经济的飞速发展和人民群众生活水平的不断提高,一方面核能和核技术的应用日益广泛,核电不仅可满足不断增长的电力需求,而且是改变我国能源结构、减少二氧化碳和二氧化硫排放的有效手段之一。核技术的应用领域、深度和广度是前所未有的。

核技术应用是指密封性放射源、非密封性放射源和射线装置在工业、医疗、农业、地质、科研和教学等领域的应用。

密封性放射源是指密封在包壳里的或紧密地固结在覆盖层里并呈固体状态的放射性物质;非密封性放射源是指不满足密封性放射源定义中所列条件的放射源,也称非密封性放射源物质。

射线装置是指 X 射线机、加速器、中子发生器以及含放射源的装置。

第一节 国外核技术应用概况

一、国外核技术应用总体概况

全世界用于辐照的加速器有 1500 台套,总功率达 45 MW。大型钴源装置有 250 座,装源量达 2.5 亿居里。辐射化工产品的年产值超过 1000 亿美元。

离子注入/表面加工用加速器有 7000 台,其中用于集成电路的离子注入机有 3000 台,其产值达 1470 亿美元。

全世界辐照食品的销售量为 30 万吨。

70 个国家在 186 种植物上诱发新品种 2252 个。

全世界半数以上国家采用辐射雄性不育法对 200 多种害虫进行杀灭处理。

全世界每年有 3 亿~4 亿人次接受放射性诊断和治疗。

全世界有 94 座反应堆用于生产同位素,56 台加速器用于生产普通同位素;159 台加速器用于生产正电子发射断层技术(PET)用同位素、28 台用于生产多用途同位素;共生产 3000 多种放射性同位素及其制品。

二、研究堆应用概况

现今,全世界有 277 座运行中研究堆,有 17 座计划或在建中。发展中国家拥有 85 座。

研究堆主要用于教学和培训、材料研究、同位素生产,少量用于科学研究、半导体掺杂、放射线照相、中子活化分析、材料改性……

三、加速器应用概况

全世界有 15000 台加速器,新加速器安装速率为 700 台/年。

医用电子直线加速器用于治疗癌症。

辐照电子加速器用于生产高级聚合物与化工产品、医疗用品消毒、食品辐照。

回旋加速器用于生产同位素。

小型加速器用于材料研究、爆炸物品和毒品检测、新材料开发、环境污染治理研究、生物医学研究、地质学、考古定年学……

四、放射性同位素应用概况

已知 8000 多种放射性同位素中,150 多种已有广泛应用。

使用反应堆和加速器生产、辐照合适靶件,使用专用放射化学设施进行处理,制备成多用途产品。

一些特定的放射性标记化合物可用于人体健康研究,对选定的器官亲和,可发现器官和骨骼中的病变或转移。

基于放射性同位素的免疫方法,用于测定血液或其他体液中的激素和药品的浓度。大约 30% 的生物医学研究要使用同位素。

放射性药物研究与应用领域包括:

1. 感染显像

区分有菌感染与无菌发炎过程。

2. 癌显像

早期筛选→初步诊断→疾病分期→测定对治疗的影响→最优治理安排和鉴定。

3.神经受体显像

PET→SPECT。

4.放射性药物化学

^{99m}Tc γ 成(显)像; ^{131}I 、 ^{213}Bi 标记的单克隆体。

第二节 国内核技术应用概况

一、国内概况

1.规模

核技术应用产业规模达 600 亿元(2006 年),其中:辐射化工 75 亿元,辐射育种和示踪 50 亿元,离子注入 240 亿元,同位素仪器(仪表)35 亿元,放射性药物 60 亿元。

2.核农学

累计育成突变品种 638 个(截至 2002 年底);辐射诱变良种年种植面积占各类作物种植面积的 10%;每年增产粮食近 40 亿千克、棉花 1.5 亿~1.8 亿千克、油料作物 0.75 亿千克;累计对 10 多种害虫进行辐射不育研究(如柑橘大实蝇)。

3.核医学

年核医学检查超过 80 万人次,治疗近 1000 万人次;有 250 台 X 刀、67 台 γ 刀、560 台医用加速器、100 台 γ 相机、3300 台全身 X 射线断层扫描仪、300 台化学发光免疫分析仪、60 台荧光免疫分析仪、460 台钴-60 治疗仪、400 台后装治疗仪、2000 台放射免疫分析仪、28 台 PET、500 台 SPECT;开展了 BNCT(硼中子俘获治疗)研究。

4. γ 辐射装置

到 2006 年年底,30 万居里以上商用 γ 辐照装置达 101 座,总设计装源量约 1 亿居里,至 2006 年年底实际装源 3600 万居里。

用途:食品辐射,医疗用品和中成药辐射消毒灭菌,辐射化工……

5.工业电子加速器

到 2006 年年底,已安装功率 5 千瓦以上工业用电子加速器 105 台。

用途:辐射交联,大型工业 CT,消毒灭菌,烟气脱硫脱硝……

6. 辐射化工产品

聚合物辐照改性。

二、若干应用领域概况

1. 辐射加工服务

食品和农产品的辐照检疫处理,消毒灭菌、保鲜、防止农业虫害传播。

2. 医疗卫生用品和中成药

用辐射消毒替代化学法消毒。

3. 射线检测与控制

2003年年底同位素仪器仪表产值约35亿元;常规同位素仪表使用量超过2.5万台套,以核子秤、料位计、水分计、厚度计、成分分析仪等为主;离子感烟火灾报警已生产系列产品;2003年大型集装箱货物检测系统销售额达4.3亿元;国内已有2、4、6、9 MeV系列高能X射线无损检测用加速器产品。随着走私、贩毒和非授权武器及火工品贩运,随着恐怖爆炸活动日趋猖獗和隐蔽,在线、实时、可靠、有效的射线(如中子、X、 γ)无损检查与控制产品需求更趋多样化。

4. 环保应用

我国70%的电力来自燃煤发电,我国优质煤(低硫、低灰分)资源总体偏少,我国燃煤锅炉及工艺总体技术水平偏低,因此,由燃煤释放到环境的 SO_2 、 NO_x ,是一大污染源。北京、上海、绵阳、兰州等地已建立了电子束加速器辐照烟道气脱硫脱硝示范装置;辐射法处理城市废水,尤其是工业废水中的有机卤代物(强致癌物)具有明显优势;低温(热)等离子体特别适合于处理危险废弃物(如石棉废弃物的减容)和有害废气。

5. 放射性示踪服务

放射性示踪能有效地对化学农药在农作物的各个部位以及土壤、水体中的分布和残留进行定量分析;能用于新药物研发的药代动力学、药理、药物筛选、受体分别等环节的研究;示踪法对天然气、石油等大型输送管网的检漏特别有效;示踪法测量油田回采的剩余油饱和度是其他技术难以胜任的。当前的关键是研究开发好的示踪剂。

6. 离子注入

我国已有100多台套离子注入机用于半导体和集成电路生产,2006年销售额达240亿元。

第二章 辐射加工防护与安全

辐射加工通常包括 γ 辐射加工和加速器辐射加工两种。作为核技术的工业应用,辐射加工在现代社会中正发挥着巨大的作用,促进了国民经济的发展和人民生活质量的提高。与此同时,由于辐射加工用 γ 辐射源的活度大、加速器功率强,所以它们所带来的辐射防护与安全问题显得十分重要,它不仅是个人的安全问题,而且会影响周围环境甚至会引起社会安定问题,为此,国家有关部门一直很重视,特别是《放射性污染防治法》出台后,环境保护部门更加强了这方面的安全管理工作,本章就辐射加工装置及其安全防护问题进行讨论。

第一节 辐射加工技术及应用

一、热缩材料制品

目前,热缩材料制品在电力、电子、通讯、电讯、交通、建筑、石油、化工、汽车、船舶、国防、军工、航空航天等部门都获得了广泛的应用,主要用于绝缘、防腐、防潮、密封、标识、电线电缆接续、分支、线束、终端和机械等。热缩材料的辐射加工产业已成为国民经济发展中必不可少的组成部分。

聚合物与辐射(^{60}Co γ 辐射,电子加速器的电子束)相互作用,发生的主要化学及结构变化是大分子链间交联键的生成和主链断裂,同时伴随着小分子产物(如 H_2 , CO_2)的生成和不饱和度的变化等。聚合物受到辐射时,是以交联为主还是以裂解为主,与其分子链的结构、聚集态、添加剂以及环境(物理、化学)等条件有关。

研究证明,对于半结晶聚合物(如聚乙烯、乙烯与醋酸乙烯共聚物、聚酰胺

胺类),其辐射导致的化学反应和结构变化主要发生在非结晶区,几乎不发生在结晶区。聚乙烯(PE)的辐射交联区域示意图 2-1。

辐射交联是指聚合物由有限的线性分子通过大分子间共价键的生成和积累,转化为相对分子质量很大的三维网状结构的过程和结果。交联度达到一定程度的聚合物,再不能为溶剂所溶解(只能溶胀),温度即使达到结晶熔点以上也不会熔融、流动,能保持加热前的形状,这就是“形状保持效应”。

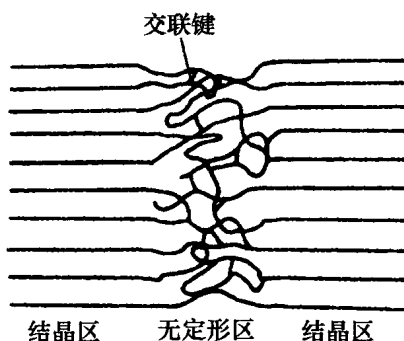


图 2-1 半结晶聚合物辐射交联区域示意图

热缩材料制品用 γ 辐射和电子束辐射加工。 γ 辐射常用于大尺寸制品和异形结构元件的辐射加工。但 γ 源功率较低,辐射周期长(可长达数小时),伴随的辐射氧化较严重。电子束是荷电粒子,在物质中的穿透力有限,它更适合于管材等连续的长制品的加工。另一方面,电子束功率很高,辐射是在短时间内完成的。

热缩材料的交联结构与产品质量是密切相关的,交联度亦影响下一道工序(扩张或拉伸)和产品的热收缩性能(收缩力、残留变形率)。产品的交联度决定于吸收剂量,不同聚合物材料体系所需的吸收剂量是不同的。

辐射加工热缩制品各部位的交联度(或吸收剂量)的均一性是非常重要的。交联度的均一性与产品在电子束下的传输方式、束流电子的能量以及产品的密度、几何尺寸等因素有关。若管形制品的交联度分布不均,会导致加热扩张产品的偏壁(即厚薄不均)现象,这是辐射加工中要尽力避免的。

二、辐射交联在电线电缆中的应用

电线电缆工业是机械、电力和电子工业的一个极其重要的组成部分。随着社会城市现代化的进程,无论是微电子、家电、汽车、航空、通讯、电力等系统,还是交通运输和建筑领域,为了提高产品运行的可靠性和安全性,对电线电缆都提出了更高的要求,如耐温性、耐环境老化性和耐开裂性等都要很好,这些都是常规电线电缆所满足不了的。电线电缆绝缘层的交联改性,能大大提高电线电缆的工作温度,耐溶剂、耐环境老化、耐开裂等性能。如普通聚乙烯(PE)绝

缘电线电缆,由于它的绝缘层是线形聚合物,受熔融温度限制,只能在 70℃以下场合使用,耐溶剂性和耐开裂性也较差。而绝缘层交联后,其耐温性和耐化学试剂腐蚀性性能等显著提高,力学性能和耐开裂性也获得改善。PE 通常在 70~90℃软化,在 110~125℃熔流,而交联后的 PE 即使达到 250℃仍然不会改变形状。辐射交联还可使绝缘材料的电学性能发生变化,并使机械性能提高。

由于辐射交联受电子束能量与穿透能力所限,主要适用于中小型电线电缆的辐射交联加工。对于大型电线电缆,辐射中的热效应、静电或电荷沉积效应会产生危害,故不宜用辐射交联生产。化学交联则仅适用于大截面电线电缆绝缘层的交联,而对于小型线缆,易造成偏壁、针孔而难以生产出合格的产品。辐射法与化学法两者是相辅相成的,可相互补充但不能相互取代。

辐射法在中小型电线电缆和特种电线电缆的绝缘层交联加工改性中占绝对优势。20 世纪 70 年代以来,随着工业电子加速器的发展及其在辐射加工中的应用,电线电缆绝缘层的辐射交联已成为辐射技术应用中最大的领域。

聚合物的辐射加工所用的辐射源有两类:放射性同位素 γ 射线源和电子加速器产生的电子辐射源。虽然 γ 辐射源具有较高的穿透能力,但不适合于电线电缆辐射加工。在电线电缆工业中,实际采用的辐射源是电子加速器,它可提供比 γ 源高得多的剂量率,辐射加工在短时间内完成,更有利于电线电缆的连续加工。

三、聚烯烃发泡材料

1931 年,瑞典的 Munters 和 Tandberg 发明了泡沫聚苯乙烯并于 1935 年获得了美国专利。1940 年前后,德国的 Otto Bayer 发明了聚氨酯泡沫塑料并且在第二次世界大战中首先用于军用飞机上,现在上述两种泡沫塑料已经成为年产百万吨以上的大宗商品。聚烯烃泡沫的产业化较前面的两大品种要晚大约 20 年。1958 年,美国的 DOW 化学公司用挤出法生产出高发泡的聚乙烯,但是这种方法仅能生产薄的片材。20 世纪 60 年代初,聚乙烯的化学交联方法问世,可用来提高聚乙烯的熔体强度,同时采用化学发泡剂生产大块的聚乙烯泡沫。20 世纪 60 年代中期,日本的积水化学公司与东丽公司各自独立开发了用辐射交联的方法生产聚乙烯泡沫。据 1999 年的统计,日本辐射交联聚乙烯泡沫塑料的年产量已达 15 000 t。20 世纪 70 年代,前联邦德国 BASF 公司又发明了注射成型聚烯烃泡沫塑料。目前聚烯烃泡沫材料已经成为泡沫塑料的第三大品