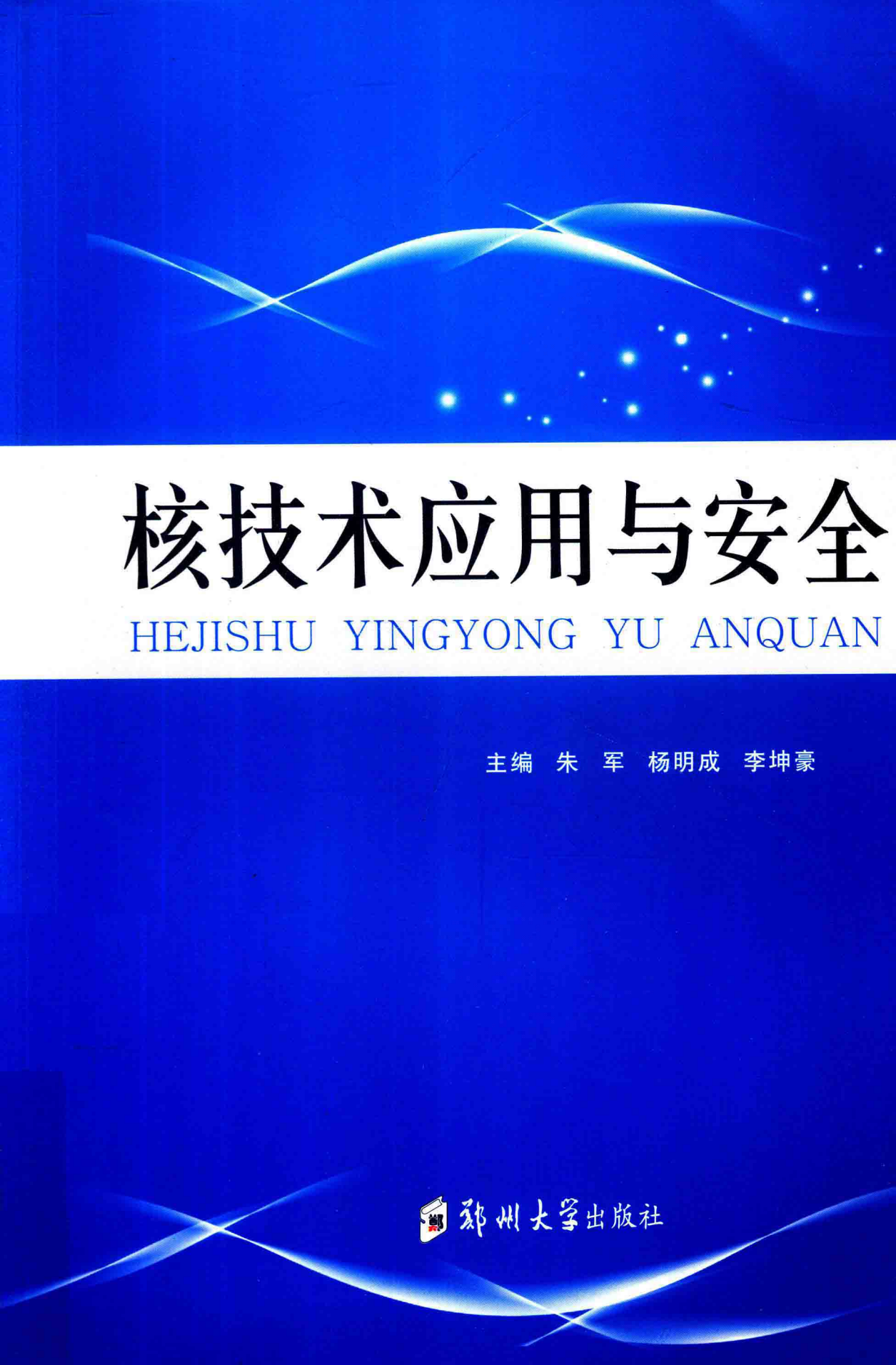




核技术应用与安全

HEJISHU YINGYONG YU ANQUAN

主编 朱 军 杨明成 李坤豪



郑州大学出版社

核技术应用与安全

HEJISHU YINGYONG YU ANQUAN

主编 朱 军 杨明成 李坤豪

 郑州大学出版社

郑 州

内容提要

为促进核技术及其应用的发展,提高核技术应用的安全水平,保障核技术的安全利用,作者通过两年多的调查研究,系统全面地查阅文献资料,结合多年来核技术应用领域的研究开发工作和产业化实际应用经验的积累,及对核技术应用发展趋势的把握,编写了本书。本书从基本原理、基本方法及特点入手,系统地介绍了放射性同位素及射线装置在医学、工业、农业、材料改性、环境保护领域中的应用及应用中的安全事件/事故和核安全文化。书中以大量的实例,浅显易懂的语言,重点阐述和展示了核技术应用的主要领域和最新研究成果。希望本书能对核技术相关专业在校学生及核技术应用研究人员和实际生产操作人员有所帮助。

图书在版编目(CIP)数据

核技术应用与安全/朱军,杨明成,李坤豪主编. —郑州:郑州大学出版社,2014.9
ISBN 978-7-5645-1841-7

I. ①核… II. ①朱…②杨…③李… III. ①核技术应用-研究②核安全-研究 IV. ①TL99②TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 100731 号



郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

河南安泰彩印有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:16.5

字数:383 千字

版次:2014 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371-66966070

印次:2014 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1841-7

定价:36.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

作者名单

主 编 朱 军 杨明成 李坤豪

副主编 张本尚 赵惠东 李召朋
郭东权 张宏娜

编 委 (按姓氏笔画为序)

王 允	王万里	朱 军
全彦君	刘克波	杨明成
李召朋	李坤豪	宋卫东
张 奕	张宏娜	张本尚
陈 超	周 杰	赵梅红
赵惠东	郭东权	樊红丽



前言

核技术是建立在核科学基础上的一门现代高新技术,是现代科学技术的重要组成部分,许多发达国家都把其作为科技制高点来大力开发应用。美国将核技术列入长期优先支持的 22 项关键技术之一,无论是理论研究还是产业化应用都处于国际领先水平。

广义上的核技术应用主要包括核能的利用和民用非动力核技术的利用,而通常所指的核技术应用主要指民用非动力核技术的利用,也称为同位素与辐照技术的利用。核技术应用已在国防现代化建设、工业、农业、生命科学、材料科学、信息科学、环境保护和人民健康等方面发挥着不可替代的作用。国际原子能机构(IAEA)的报告称:就应用的广度而言,只有现代电子学和信息技术才能与核技术相提并论。美国和日本的国民经济总产值中,核技术应用产业的贡献占 3%~4%,而我国只有 3‰~4‰,与发达国家相比有 1 个数量级的差别。不仅产业化规模上如此,在核技术科研开发及其发展上也与发达国家有较大差距。进入 21 世纪,核技术产业获得了新的发展机遇。“十一五”期间,国家发展改革委员会明确了民用非动力核技术应用高新技术产业化的目标,即加快高新技术成果的产业化,引导、推动民用非动力核技术应用产业的持续、快速、健康发展,促使我国核技术应用产业在 5 年左右达到 1 000 亿元的产业规模,保持年均 15% 的增长速度,加快产业结构调整,形成以具有自主创新能力的企业为主体的产业格局,促进五大类若干系列产品的产业化。

核技术应用中的关键问题是其本身的安全性,它直接决定着核技术的应用和发展。随着核技术的快速发展及其应用领域的日益广泛,核技术应用中的安全问题也日益突出。我国现有核技术应用单位多而且比较分散,政府监管难度大,安全意识淡薄,核技术安全事件/事故时有发生,并造成了重大社会影响和经济损失。因此,中华人民共和国环境保护部在“十二五”发展规划中明确提出加强核与辐射安全管理,核技术应用单位应树立并弘扬核安全文化,增强员工的安全文化素养,提高核技术应用安全水平,最大限度地保障核技术应用中的辐射安全。

本书的出版得到了河南省省属转制科研机构条件建设与服务专项资金的资助,在此表示衷心的感谢。郑州大学出版社给予本书的大力支持,以及书中所引用到的文献作者,在此也一并表示感谢。由于编者水平有限,书中难免存在疏漏及不妥之处,敬请读者不吝赐教。

编 者
2014 年 6 月



目 录

第 1 章 核技术概况	1
1.1 核技术应用的发展历史	1
1.2 核技术的发展趋势	3
第 2 章 核技术应用的安全与防护	5
2.1 核技术基础知识	5
2.2 辐射防护基础知识	13
2.3 工业中应用的防护与安全	48
2.4 核技术在医学方面的防护与安全	72
第 3 章 核技术应用	90
3.1 放射性同位素及射线装置在医学上的应用	90
3.2 放射性同位素及射线装置在工业中的应用	130
3.3 放射性同位素及射线装置在农业中的应用	159
3.4 核技术在材料改性中的应用	174
3.5 核技术在环保领域中的应用	195
第 4 章 核技术安全事件/事故	216
4.1 放射性同位素应用中的案例分析	216
4.2 射线应用中的案例分析	228
4.3 核辐射事故小结	233
第 5 章 核技术安全	235
5.1 核安全文化概述	235
5.2 安全文化组成	237
5.3 发展阶段及弱化识别	241
5.4 事故防范措施	250
参考文献	252

第1章

核技术概况

1.1 核技术应用的发展历史

核技术是建立在核科学基础之上的一门现代技术,因而泛称核科学技术。核科学技术作为现代化科学技术的组成部分,其渊源可以追溯到 1896 年贝克勒尔发现铀的天然放射性,从此诞生了一门新的科学——原子核科学技术,至今已有 100 多年的历史。带电粒子加速器的发现与核反应堆的建造为核科学技术的发展奠定了雄厚的物质基础。1919 年卢瑟福利用天然 α 射线轰击各种原子,确立了原子的核结构,随后又首次用人工方法实现了核反应。但是用天然射线源能够研究的核反应很有限,人们开始寻找一种可以产生具有不同能量的各种粒子束的装置,于是粒子加速器应运而生。同时,为了探测各种射线和核反应的产物,还需要有辨别粒子种类和能量的探测器及相应的电子学设备。在研究核物理的过程中人们发现,放射性一方面可能造成人体的伤害,另一方面它也可以在医学、工农业和其他方面有许多应用。于是相应地,辐射防护技术与射线应用技术也发展起来。此外,核物理的研究还导致了許多放射性核素的发现。它们的半衰期长至数千万年,短则不足 1 s。在不同场合下选择适当的放射性核素,可以做示踪剂、测年工具或药物使用。这就是放射性核素技术(或称为同位素技术)。上述粒子加速器技术、核探测技术与核电子学、射线和粒子束技术、放射性核素技术等,通常统称为核技术。概括而言,核技术就是利用放射性现象、物质(包括荷能粒子)和规律探索自然、造福人类的一门学科,其主要内容是研究射线、荷能粒子束和放射性核素的产生、与物质相互作用、探测核各种应用的技术。在我国现行的研究生培养体系中“核技术及应用”属于一级学科“核科学与技术”之下的一个二级学科。核技术还包括核武器技术与核动力技术(或称为核能技术)。核动力技术的核心是反应堆技术,反应堆可用来发电、供热、驱动运载工具等。反应堆还可以产生大量中子,故在有些核技术应用中亦可利用反应堆作为中子源,或利用反应堆中子做活化分析、生产放射性核素等。“核能工程与技术”和“辐射防护与环境保护”也是“核科学与技术”之下的二级学科。实际上核技术与核物理是密不可分的,这两个学科在发展过程中始终是互相依托、互相渗透的。同时,作为核探测技术和射线应用技术的基础,研究各种射线和荷能粒子束与物质的相互作用是十分重要的。其相互作用既可以产生物理的变化,也可以产生化学的变化,还可以产生生物学的变化。相

应的研究构成了辐射物理学、辐射化学和辐射生物学的主要内容。在核技术的应用中还经常要对放射性核素进行分离,或用放射性核素标记化合物,这属于放射化学的范畴。因此,核技术及应用这一学科与核物理学、辐射物理学、辐射化学、放射化学等学科有密切的联系,其中辐射物理往往也被纳入核技术的范畴内。近年来,核技术在医学中的应用得到迅速发展,相应地又产生了医学物理、核医学等学科。另一方面,核技术的研究经常涉及大型仪器设备的研制,其本身又是物理、机械、真空技术、电子学、射频技术、计算机技术、控制技术、成像技术等多种学科和技术的综合。故此核技术充分体现了多种学科的交叉这一特点,是现代科学技术的重要组成部分,也是当代重要的高技术之一。第二次世界大战之后核技术开始大规模地应用到国民经济之中,当前,核技术应用已在国防现代化建设、工业、农业(含粮食)、生命科学、材料科学、信息科学、环境保护和人民健康等方面发挥着重要作用,形成了许多新兴的产业,如辐射加工、无损检测、核医学诊断设备与放射治疗设备、同位素和放射性药物生产等。据统计,美国和日本的国民经济总产值(GDP)中核技术的贡献达3%~4%。美国核技术产生的年产值约为3 500亿美元,其中非核能部分约占80%,日本约为1 500亿美元(核能和非核能各占一半)。

现代很多科学技术成就的取得都是与核技术的贡献是分不开的。仅以诺贝尔奖为例,1931年美国科学家劳伦斯发明回旋加速器,为此获得了1939年诺贝尔物理学奖。1932年英国科学家Cockcroft和Walton制造了第一台高压倍压加速器并用其完成了首次人工核反应,获得了1957年诺贝尔物理学奖。此外还有8项诺贝尔物理学奖和化学奖是利用加速器进行实验而获得的。在探测器方面,威尔逊因发明云室探测器而获1927年诺贝尔物理学奖,其后布莱克特因改进威尔逊云室实现自动曝光而获1948年诺贝尔物理学奖,鲍威尔发明照相乳胶法并用其发现 π 介子而获1950年诺贝尔物理学奖,这之后格拉泽因发明气泡室使粒子探测效率提高1 000倍而获1960年诺贝尔物理学奖,阿尔瓦雷兹因改进气泡室并用其发现共振态粒子而获1968年诺贝尔物理学奖,沙帕克因发明多丝正比室和漂移室而获1992年诺贝尔物理学奖。在核分析技术方面,1948年美国科学家利比建立了 ^{14}C 测年方法并为此获得了1960年诺贝尔化学奖,穆斯堡尔因发现穆斯堡尔效应而获1961年诺贝尔物理学奖,布罗克豪斯和沙尔因发展了中子散射技术而获1994年诺贝尔物理学奖。核技术对于科学发展的重要推动作用由此可见一斑。

第二次世界大战期间核科学技术在军事领域的突破,体现了核科学技术发展的时代特征,即技术的科学化与科学的技术化。世界第一颗原子弹的爆炸显示了核能释放的巨大威力,开创了本世纪现代科学技术定向发展的新格局,即动用国家一级的权威,动员全社会的力量,精心规划部署,全力推进科学、技术、工程、产业、经济的一体化。由于核技术为多种学科的基础研究提供了灵敏而精确的实验方法和分析手段,自20世纪80年代以来各国竞相建造与核技术密切相关的大型科学工程,如大型对撞机、同步辐射装置、自由电子激光装置、散裂中子源、加速器驱动次临界反应堆、大型放射性核束加速器等,其造价动辄数亿美元乃至数十亿美元。美国能源部2003年11月发布研究报告《未来科学的装置》,列出了今后20年重点发展的28项大型科学工程,其中基于加速器的有14项,占了一半。我国自改革开放以来先后建造了北京正负电子对撞机、兰州重离子加速器、合肥同步辐射装置等大科学工程,辐照和放疗用电子加速器、大型集装箱探测装置、辐射

加工和同位素生产等也已形成了一定规模的产业。

放射性的发现及人类利用核技术大事记分别见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 放射性的发现

时间	事件
1895 年	伦琴发现 X 射线
1896 年	贝克勒尔发现物质的放射性
1898 年	居里夫人发现镭和钋
1899 年	卢瑟福发现 α 射线和 β 射线
1911 年	卢瑟福发现原子核

表 1-2 人类利用核技术大事记

时间	事件
1934 年	费米利用中子制造人工放射性核素
1942 年	世界上第一个核反应堆临界
1945 年	美国在广岛和长崎投下原子弹
1951 年	第一次核能发电在美国实现
1954 年	世界上第一座核电站运行
1957 年	国际原子能机构成立
1972 年	X 射线计算机断层扫描装置 (CT) 诞生

1.2 核技术的发展趋势

核科学与核技术在 20 世纪取得了辉煌的成就,核科学技术不仅对人类生活产生了巨大的影响,而且对世界格局都产生了巨大的影响。目前核科学技术仍然是现代科学中的一个非常重要的前沿领域,保持着旺盛的生命力,不仅具有重大的科学意义,而且在高新技术及交叉学科领域的研究中起着重要作用。展望新世纪,这一技术仍将是令人瞩目和充满希望的。

当前核科学与核技术发展的特点体现为:一方面对物质层次结构、宇宙起源等的探索不断深入,另一方面在能源、人口与健康、环境、信息、材料、农业、国家安全等领域以及多种学科的基础研究中的应用日益广泛。原子能的和平利用将最终解决人类的能源危机;癌症的早期诊断和放射治疗离不开核技术在医学中的应用;辐射育种方法培育了很多农业上的优良品种;航空航天工业中的无损探伤、同位素电池;地质年代的推断、人类社会的历史考古、文物艺术珍品的鉴定;矿产资源的勘探;海关检查;环境保护;新材料开发;甚至与我们生活息息相关的食品的消毒、保鲜储藏等,无不与核技术有关。核技术的

每一次重大突破,都预示着一一次新的技术革命。

核电站提供了当今世界的近 1/5 的电力,新世纪,具有固有安全性的新型核电站将逐步走上舞台。核电站利用的都是原子核的裂变能,而用作燃料的²³⁵铀的储量是有限的。要从根本上解决人类的能源问题,需要实现对原子核聚变能的可控利用。核聚变反应可以使 1 L 海水中的氘释放出相当于 300 多升汽油的能量,这样,海水中蕴藏的氘足以满足人类未来对能源的需求,而且它的反应产物是没有放射性的。目前,聚变研究已将走出科学实验阶段,如果进展顺利,聚变核电站可望在 2050 年左右实现商业化。

新世纪里,以同位素和辐射技术为代表的核技术将继续深入应用在能源、资源、环境,以及人类健康等各个方面,并将在与信息技术、生物技术、纳米技术、环保技术等方面的交叉渗透中发挥巨大的作用。

纳米技术发展的空间不可限量,纳米材料的制备是重要环节,运用辐射法制备纳米材料的技术已基本成熟。

利用辐射技术治理“三废”,可以改善人类生存环境。无论是燃煤烟气的脱硫、脱硝处理,还是污水及污泥的处理,都可以用辐射技术来有效实现。用辐射技术治理环境污染将形成新的环保工程产业。

在农业上,利用植物辐射诱变育种技术和生物技术、空间技术相结合,可以塑造大量优良突变种子资源和新品种。

在医学上,当代医学一些根本性的进展,如基因工程、遗传工程、分子生物学等学科的最新成就都与放射性同位素的应用密切相关。放射性同位素技术将在 21 世纪的主导产业之一——生物工程和医药研究中发挥重要作用。

作为一项已有 100 多年历史的应用技术,核科学技术具有超乎寻常的生命力,它的发展潜力是永无止境的。可以预言,核能和核技术必将在 21 世纪为人类做出更大的贡献!

第2章

核技术应用的安全与防护

2.1 核技术基础知识

2.1.1 核技术应用中主要使用的放射源

辐射是指以波动形式或运动粒子形式向周围空间或物质传播的能量,如声辐射、热辐射、电磁辐射、核辐射(包括射线和粒子辐射)等,由辐射体发射的辐射同时由另外的物体所接受,这是广义的辐射概念。而通常所说的辐射指的是与人体健康关系相对比较密切的电磁辐射和粒子辐射。辐射源指能产生电离辐射的物质或装置,主要有放射性核素、加速器、核反应堆等。

辐射加工的辐射源可以分为两大类:①放射性核素辐射源;②加速器辐射源(电子束辐照源和X射线辐照源)。

γ 辐射源:辐射加工中最常用的 γ 源来源于 ^{60}Co 放射性核素。 ^{59}Co 是天然存在稳定的核素,将它们制备成柱状或粒状,放置于核反应堆中接受中子撞击,最终获得一个中子得到了放射性同位素 ^{60}Co ,再将 ^{60}Co 小源串列成棒状柱体,用不锈钢筒双层严密焊接,制成标准元件,最终根据使用需要组装成各种形状。

2.1.1 放射性衰变的一般规律

^{60}Co 为放射性核素,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2-1所示。

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

$$-dN = \lambda N dt$$

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

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

式中, N_0 ——初始放射核的数目;

N ——经过 t 时间后的放射核的数目;

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(2.1)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。

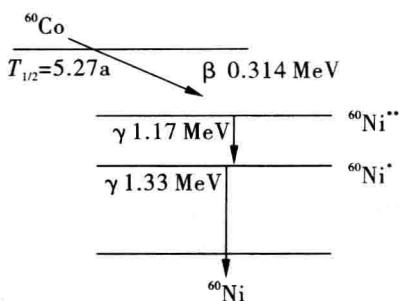


图 2-1 ^{60}Co 衰变过程图

2.1.1.2 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

$$N = 1/2 N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (2.2)$$

所以

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda \quad (2.3)$$

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 的半衰期为 5.27 a,放射性活度每年下降约 12.6%。

2.1.1.3 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 $-dN/dt$,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

$$A = -dN/dt = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

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 s 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)。 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。

2.1.1.4 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 为

$$P=kE(\text{MeV})\times A(\text{Ci}) \tag{2.5}$$

式中, $k=5.93\times10^{-3}$ 单位转换系数,kW/(MeV·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 射线的辐射功率为

$$P=kE(\text{MeV})\times A(\text{Ci})=5.93\times10^{-3}\times(1.17+1.33)\times10^6=14.8\text{ kW}$$

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 kGy·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。

2.1.1.5 电子束辐射源

工业辐照常用的电子加速器通常可以分为 3 类,如表 2-1 所示。

表 2-1 常用电子加速器的参数及用途

能量	能量范围 / MeV	束功率	主要机型	束流形式	主要用途
低能端	0.1~0.3	1~100 kW	电子帘加速器	连续束	农产品辐射灭菌、表面涂层固化等
中能端	0.3~5	10~400 kW	高频高压(地那米加速器)、高压变频加速器	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射交联,橡胶硫化,高强度耐温聚乙烯热缩管的辐照生产
高能端	3~10	1~500 kW	电子直线加速器、梅花瓣型加速器	脉冲	食品保藏、材料改性和医疗用品的辐射消毒等

电子加速器的电子枪发射出电子束后,在高压电场下经加速管的加速作用,将产生的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,产品的产量为 9 kGy·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如下:

(1) 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。

(2) 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,其平均束流强度的描述主要有脉冲频率、脉冲宽度、脉冲强度等参数。

(3) 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

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

加速器作为电子束的产生源,它所产生的电子束剂量率大,相比 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 源高出 3 ~ 4 个数量级,且方向集中、能量利用率高、辐照时间短、生产效率高。但电子束由于在穿过物体时,会产生韧致辐射和电子碰撞等效应,从而影响了其穿透性,使其应用受到一定限制,对于较厚的物件穿透存在一定难度。相对于钴源,加速器的辐射防护要简单一些,开机有辐射,停机(能量低于 10 MeV,不会产生感生放射性)很快就没有辐射了,这将大大降低事故发生的概率。

(4) X 射线辐射源 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线发射的是 2 种单能光子,在材料中的穿透是以指数形式衰减;辐照加工中采用的 X 射线来自于电子打重金属靶,发生韧致辐射发射具有连续能谱分布的光子,其最高能量等于电子的能量,它在材料中穿透是以准指数形式衰减。

(5) X 射线的穿透深度 X 射线的穿透深度与电子初始能量有关,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。IAEA 等国际组织规定,X 射线对食品的辐照应用,能量必须小于 5 MeV 的能量上限,以后随着防护技术和处理技术的提高,可能放宽到 7.5 MeV。因为过高的能量,可能产生光核反应,从而对空气、水和物质等产生感生放射性,对人体和周围环境不利。

(6) X 射线的能量分布 X 射线的能量分布与入射电子的能量大小有关,X 射线能量为连续能量,即 0 到最大值(最大值等于入射电子的能量),高能量的 X 射线光子数随电子能量的增加而增加。对于 5, 7.5, 10 MeV 三种不同电子能量产生的 X 射线,它们的峰值能量位置基本相同,都在 0.3 MeV 附近。

(7) X 射线的角分布 X 射线的发射主要集中在电子束的前进方向,而且能量越高相对越集中,这种效应加强了 X 射线在吸收材料中的穿透,并且有利于提高辐照能量的利用率。

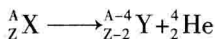
(8) X 射线的转化率 电子对 X 射线的转换效率与入射电子能量及靶材有关,有实验证明,金属钛是最佳的材料,它的转化率最高,当入射电子的能量 E 越高,转化率也高,5 ~ 10 MeV 的电子,转化效率为 8.2% ~ 16.2%,当然这只是个实验理论值,应用于辐射加工等实际应用过程中,关系多方面的因素,造成了实际的转化效率很低,运行成本高,在一定程度上限制了工业的应用。

2.1.2 射线与物质的相互作用

放射性研究是原子核物理学的起源,放射性同位素不断放出各种核辐射,人们通过辐射认识微观世界。核辐射给人类带来好处,同时也给人们带来不可预测的威胁和灾难。怎么把握好其优点,尽量避免事故的发生概率,一直是人们关注的重点。

2.1.2.1 常见核辐射粒子特征

(1) α 射线 通常也称 α 粒子,它是氦的原子核,由2个中子和2个质子组成;核电荷数为+2,质量数为4。 α 粒子以符号 ${}^4_2\text{He}$ 表示,天然 α 粒子来源于较重原子核的自发衰变,叫作 α 衰变。 α 衰变的过程:



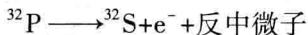
反应式中, ${}^A_Z\text{X}$ 是母核; ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ 是子核。

(2) β 射线 来自于原子核发射的 β 射线有2种。

1) β^- 射线通常是指电子,带有一个单位负电荷,以 e^- 表示,负电子是稳定的。

2) β^+ 射线就是正电子,带有一个单位正电荷,以符号 e^+ 表示。两种电子静止质量相同,其质量约为质子质量的1/1846。

β 粒子来源于原子核的 β 衰变, β 衰变有三种类型: β^- 衰变、 β^+ 衰变和轨道电子俘获。 β^- 衰变、 β^+ 衰变中发射的电子或正电子的能量是连续的,从0到极大值。以 ${}^{32}\text{P}$ 为例,其最大能量值为1.17 MeV, β^- 衰变的半衰期为14.3天,衰变过程如下:



反应式中, ${}^{32}\text{P}$ 为母核, ${}^{32}\text{S}$ 为子核。

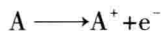
(3)X射线和 γ 射线 X射线和 γ 射线都是一定能量范围的电磁辐射,又称为光子。光子静止质量为0,不带任何电荷。单个光子的能量与辐射的频率成正比。X射线和 γ 射线的起源不同,从原子来说,X射线来源于核外电子的跃迁,而 γ 射线来源于核本身高激发态向基态的跃迁或粒子的湮灭辐射。

(4)中子 中子是原子核组成成分之一,它不带电荷,质量数为1,比质子略重。自由中子是不稳定的,它可以自发地发生 β^- 衰变,生成质子、电子和反中微子,其半衰期为10.6 min。中子不带电,当用它轰击原子核时,容易进入原子核内部引起核反应。人们利用核反应制造出了许多新的核素,随着中子活化分析、中子测水分、中子测井探矿、中子照相、中子辐射育种等技术的推广应用,今后对中子的需求将越来越多。

2.1.2.2 带电粒子与物质相互作用

(1)带电粒子能量损失方式之一——电离损失

1)电离与激发 任何快速运动的带电粒子通过物质时,由于入射粒子和靶原子核外电子之间库仑力作用,使电子受到吸引或排斥,使入射粒子损失部分能量,而电子获得一部分能量。如果传递给电子的能量足以使电子克服束缚,那么这个电子就脱离原子成为自由电子;同时,靶原子失去一个电子而变成带一个单位正电荷的离子——正离子,这一过程称为电离。电离过程可以表示如下:



反应式中的符号分别是原子、正离子和电子。

如果入射带电粒子传递给电子的能量较小,不足以使电子摆脱原子核的束缚成为自由电子,只是使电子从低能级状态跃迁到高能级状态(原子处激发态),这种过程叫原子的激发。处于激发态的原子是不稳定的;原子从激发态跃迁到基态,这种过程叫作原子退激,释放出来的能量以光子形式发射出来,这就是受激原子的发光现象。

2) 电离能量损失率 带电粒子与物质原子中核外电子的非弹性碰撞,导致原子的电离和激发,是带电粒子通过物质的动能损失的主要方式,把这种相互作用引起的能量损失称为电离损失。入射带电粒子在物质中穿过单位长度路程时,由于电离和激发过程所损失的能量叫作电离损失率。从物质角度来说,电离能量损失率也可以叫作物质对带电粒子的阻止本领。

3) 平均电离能 每产生一个离子对所需的平均能量叫作平均电离能,以 W 表示。不同物质中的平均电离能是不同的,但不同能量的 α 粒子在同一物质中的平均电离能近似为一常数。例如,在空气中的 W 值为 35 MeV。

(2) 韧致辐射 入射电子除了与原子中电子发生散射外,还会与原子核发生散射。当高速电子在原子核近旁掠过时,受库仑场的作用,而发射的电磁辐射称为韧致辐射。在入射电子与轨道电子相互作用时,轨道电子的电荷与质量都很小,产生韧致辐射的概率小到可以不计。故只有当高能电子经过原子核旁时,才考虑韧致辐射的能量损失,即韧致辐射可以描述为高能电子在与原子核发生非弹性散射时产生的电磁辐射。韧致辐射能谱具有连续分布的形式,从 0 一直到最大能量,其最大能量为电子动能。发射光子可以取任何方向,随电子能量的升高,向电子前进方向集中,辐射强度增加,高能电子入射时,发射光子倾向前方。电子辐照中,对轻物质(食品、医疗用品)的辐射能量损失可以忽略,但在辐射防护设计中,主要考虑韧致辐射。

(3) 电子在物质中的射程 一些电子可能不经过较大的能量损失与大角度散射,而沿着相当直的路径穿行较长的路程,另一些电子的运动方向可能经过多次大角度的改变,或者发生较大的能量损失后被阻停在原点附近,或偏离入射方向,甚至可能反向运动终止在原点的后方(反散射)。一定能量的带电粒子在它的入射方向所能穿透的最大距离叫作带电粒子在该物质中的射程,入射粒子在物质中行径的实际轨迹的长度称作路程。

对重带电粒子(α 粒子)由于其质量大,与物质原子的核外电子作用时,运动方向几乎不变,因此,其射程与路程相近;5.3 MeV 的 α 粒子在标准状态空气中的平均射程为 3.84 cm,同样能量的 α 粒子在生物肌肉组织中的射程仅仅为 30 ~ 40 μm ,人体皮肤的角质层就能将之阻挡。因此,绝大多数 α 辐射源不存在外照射危害问题,但它一旦进入生物体内时,由于它的射程短和高的电离本领,将造成集中在辐射源附近的损伤,所以要特别注意防止 α 粒子进入体内。

(4) 正电子湮灭辐射 原子核 β^+ 衰变会有正电子产生,快速运动的正电子通过物质时,与负电子一样,同核外电子和原子核相互作用,产生电离损失和韧致辐射损失以及弹性散射。能量相同的正电子和负电子在物质中的能量损失和射程大体相同,可是自由正