



青年科技创新人才学术文库

高分子材料辐射加工技术及应用

GAOFENZI CAILIAO FUSHE JIAGONG JISHU JI YINGYONG

主编 杨明成 朱 军



郑州大学出版社

高分子材料辐射加工 技术及应用

河南省科学院同位素研究所有限责任公司

郑州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高分子材料辐射加工技术及应用/杨明成,朱军主编.
—郑州:郑州大学出版社,2010.9
ISBN 978-7-5645-0268-3

I. ①高… II. ①杨…②朱… III. ①高分子材料-
核技术应用 IV. ①TB324

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第181575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

新乡市凤泉印务有限公司印制

开本:710 mm×1 010 mm 1/16

印张:24.5

字数:496千字

版次:2010年9月第1版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2010年9月第1次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-0268-3

定价:46.00元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

作者名单

主 编 杨明成 朱 军
副主编 宋卫东 赵惠东 李坤豪
李召朋 陈海军 张宏娜
编 委 (以姓氏笔画为序)
王 允 王万里 吕峰和 朱 军
全彦君 刘克波 杨明成 宋卫东
李召朋 李坤豪 张本尚 张宏娜
陈海军 周 杰 赵梅红 赵惠东
郭东权



前 言

PREFACE

高分子材料辐射加工是辐射加工产业的重要组成部分,主要利用 ^{60}Co 源产生的 γ 射线或电子加速器产生的高能电子束进行高分子材料的制备与改性,是一种新型的绿色加工技术。

目前,我国辐射加工产业主要由高分子材料辐射加工、辐射加工服务和辐射技术装备三部分构成。截至2009年底,我国已有140多座 γ 辐照装置和150多台电子加速器用于辐射加工,2009年度我国辐射加工总产值达300亿元,其中高分子材料辐射加工总产值已超过110亿元,产品主要包括辐射交联线缆、热缩材料及制品、发泡材料、辐射接枝膜材料和环保型印染涂料等。然而,我国的高分子材料辐射加工仍处于产业化的初级阶段,产品种类少,规模化程度低,对国民经济的贡献还比较低。

为了促进高分子材料辐射加工的普及应用,在长达一年多的时间里,作者通过对多年的研究成果的总结和规整,大量最新文献的调研,现编辑成书《高分子材料辐射加工技术及应用》。本书由杨明成、朱军组织编写,共分为8章。其中,第1章主要介绍了辐射加工技术基础知识,如辐射聚合、辐射交联、辐射接枝、辐射降解等技术原理;后面章节则更侧重于产学研的结合,着重叙述和分析高分子材料辐射加工的研究现状、产业化生产应用和技术发展前景,涉及的产品主要包括电线电缆、热缩材料、发泡材料、聚四氟乙烯(PTFE)、轮胎、电池隔膜、纤维材料等。本书以大量的实例,浅显易懂的语言,重点阐述和展示了高分子材料辐射技术领域取得的研究成果及产业化应用情况。希望本书能为辐射加工从业人员和对高分子辐射加工技术感兴趣的读者有所帮助。

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,以及中国科学院上海应用物理所吴国忠研究员为本书部分章节提出的修改意见,在此表示衷心的感谢。对郑州



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,在此一并表示感谢。由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者不吝赐教。

编 者
2010 年 8 月



目 录 CONTENTS

第 1 章 概述	1
1.1 辐射源及辐射剂量学	1
1.2 辐射化学效应	13
1.3 高分子辐射化学	24
第 2 章 辐射聚合的应用	49
2.1 辐射乳液聚合及应用	50
2.2 水凝胶的辐射制备及应用	64
2.3 塑木复合材料的辐射制备	78
第 3 章 辐射交联的应用	89
3.1 辐射交联在塑料改性方面的应用	89
3.2 辐射交联在橡胶硫化方面的应用	135
3.3 辐射交联在制备生物医用材料方面的应用	148
3.4 辐射交联技术在高性能碳化硅纤维 制备中的应用	153
第 4 章 辐射接枝的应用	160
4.1 电池隔膜	160
4.2 纤维材料的辐射接枝	170
4.3 膜材料的辐射接枝	196
4.4 丝绸的辐射接枝	206
第 5 章 辐射降解的应用	215
5.1 聚四氟乙烯的辐射降解	215
5.2 聚多糖的辐射降解	223

5.3 辐射法再生丁基橡胶	255
第6章 纳米材料的辐射制备	260
6.1 纳米材料概述	260
6.2 纳米凝胶的辐射制备	262
6.3 聚合物-金属纳米复合材料的辐射制备	275
6.4 碳纳米管复合材料	286
6.5 聚合物与无机纳米复合材料	301
第7章 辐射固化	311
7.1 辐射固化基础知识	311
7.2 辐射固化的应用	329
第8章 聚合物离子注入表面改性	356
8.1 聚合物离子注入的特征	357
8.2 离子注入聚合物表面改性的应用	365
参考文献	376

第 1 章



概 述

1.1 辐射源及辐射剂量学

1.1.1 辐射源

辐射是以粒子束或波的形式发射和传播能量的过程,而辐射源是提供电离辐射的基本设备,电离辐射源按产生辐射的方式大致可分为三种类型:放射性核素源,如 ^{60}Co 、 ^{137}Cs γ 辐射源;机器源,如 X 射线机、电子或粒子加速器;反应堆和中子源。在此仅介绍 γ 辐射源及加速器。

1.1.1.1 γ 辐射源

常用的 γ 辐射源有 ^{60}Co 源和 ^{137}Cs 源,见图 1.1。

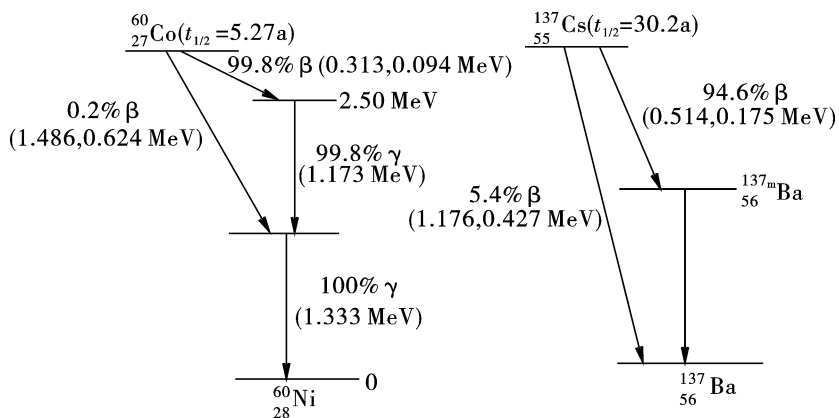


图 1.1 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的衰变图

^{60}Co 每次衰变放出两个光子, 能量分别为 1.17 MeV 和 1.33 MeV (平均 1.25 MeV), 半衰期为 5.27 年, 即钴源的功率每月下降 1%, 所以照射室的场剂量要经常修正, 源也需补充、更新。

^{137}Cs 的衰变则要复杂一些, γ 射线的能量为 0.6 MeV, 半衰期为 30.2 年, 不必经常更换。但 ^{137}Cs 源以 CsCl 形式存在, 射线的自吸收严重, 射线利用效率低; 另外, CsCl 形式的源封在不锈钢管中泄漏的潜在危害大, 易造成井水放射性污染。因此, 铯源的工业应用远不及钴源普及。

γ 辐照装置一般都设置在固定的地点和辐照室内进行辐照。

钴源室通常以高密度 ($2.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 的混凝土屏蔽, 防护墙厚度为 1.5 ~ 2.0 m, 放射源则储于约 4 m 深的水井中, 使用时拉出井面, 在钴源室进行辐射。有严密的连锁装置和严格的操作程序保证操作人员的安全, 而辐射化学工作者则可完全不接触辐射源。

(1) 照射室 照射室一般为圆形或方形, 内设有辐射装置, 是辐照工作的中心场所。辐照室的防护墙两面一般是用砖砌成的, 中间夹有混凝土。为提高混凝土屏蔽 γ 射线的效能, 还可在混凝土中加以适当的填料, 如铁矿石、铁块、重晶石等, 做成不同密度的重混凝土。防护墙的厚度应根据可使用的防护材料和辐射源的最大容量而定, 并给予足够的安全系数, 以保证安全。一般要求防护墙外附加的照射量率等于本底水平。

照射室一般都采用迷宫作为进出通道。迷宫是减少辐照室入口处照射量率的回转道路。迷宫一般可分为两种: 一种是短迷宫, 一次转折, 称为 L 形迷宫; 另一种是长迷宫, 二次或多次转折, 称为 Z 形迷宫。

迷宫减弱辐射强度的效果取决于壁的散射, 它与迷宫的截面大小、形状、结构、材料, 辐射源的位置、辐射能量等有关。一般说来, 迷宫越窄, 转折次数越多, 减弱辐射强度的效果就越有效。通常迷宫每节有 2 ~ 5 m 长, 迷宫拐弯次数和墙厚度要根据辐射源活度大小而确定, 一般有 2 ~ 3 个拐弯就够了。

迷宫入口处要根据实际需要设屏蔽门, 以挡住散射射线和阻止人员进入正在照射的辐照室。屏蔽门常用不太厚的铅皮或铁板制成, 也可在铅皮或铁板间装填混凝土、重晶石等防护材料。照射时防护门外射线的照射量率应为本底水平。

在考虑辐照室建筑方面的安全问题时, 还要注意防止射线从水、电、煤气、提源绳索等孔道中泄漏到控制室和其他地方。

(2) 储源室 一般工业和科研用辐照装置的照射室中央设一水井, 利用水吸收射线较好的特点, 把辐射源放在水井中, 用以储存或装配辐射源。

水井储源结构简单、装卸方便、安全可靠, 不会溶解的固体放射源和封装严密的其他放射源都可用水井存放。照射不怕水泡的样品, 也可直接在水中操作辐照。

水井的水深要根据辐射源活度的大小而定, 一般水深在 3 ~ 5 m 以上即能满足



中等活度辐射源的要求。井壁要能防止渗水,并有较好的去污性质。

(3)安全设施要求 辐照装置应设有观察、连锁、报警、强迫降源、剂量监测、通风等安全装置和设施以确保辐照安全。

1)观察设施 观察设施是操作人员直接或间接观察照射室内辐射源位置及设备、被照样品运转情况的设施,一般有反射镜、潜望镜、窥视窗和闭路电视等。

2)连锁装置 安全连锁装置是保证人员不受照射的重要保护系统。它的作用是安全防护门关上并锁住,整个装置才能接通电路,辐射源才能从储源室中提升出来;而辐射源被提升起来在辐照位置时,安全防护门则无法开启。这样在照射时,人员无法进入辐照室。

在设置安全连锁装置的同时,还要考虑在辐照室内安装停闭启动放射源装置,并设置明显标志。万一有人被关在辐照室内无法出来时,可以在辐照室内自己关闭紧急制动电闸,使辐射源无法升起。

3)报警装置 报警装置是指示辐射源处于辐照位置或即将处于辐照位置时的声、光报警讯号。

报警装置可设在辐照室门口、操纵室、操纵台和辐照室内等处,还有随身携带的便携式报警器。辐照室入口处要设置红灯和音响讯号。在辐射源处于辐照位置时或将要处于辐照位置时,警告人员不要进入辐照室内。在操纵室或操纵台上也要设置声光讯号,以提醒操纵人员辐射源处于照射位置。在辐照室内要设有射线监测和报警装置,以指示室外操纵人员辐射源是否确实进入储源室内和在升源前提醒人员尽快离开辐照室。便携式报警器是工作人员随身携带的,以指示工作人员进入辐照室时辐射源是否处于安全位置,在水下操作的辐照装置,水面必须有连续的辐射报警仪。

4)迫降装置 迫降装置是指在任何情况下,都可把辐射源收回到安全位置的装置。辐照装置的升降系统应该设有强迫降源的装置。迫降装置的操纵开关应设置在操纵台和辐照室内以及其他有必要设置的地点,如果有人员误入辐照室或发生机械故障等情况,可在任何地点操纵迫降开关,使辐射源回到安全位置。也可将踏板式开关置于迷宫入口处或将光电监测装置安装在迷宫入口两端,如果辐射源在辐照位置时有人员进入辐照室,踏板开关或光电监测装置会启动迫降装置,使辐射源回到安全位置。

5)通风装置 辐照室应有良好的通风装置。通风装置可以排出辐照室内因辐照产生的臭氧、一氧化二氮以及其他有害气体。

通风装置可位于迷宫通道顶上,排风管应高出屋面,下端与照射室立形风管相连,形成排风系统。对中等强度的辐射源,所需风量不大,所以通常在屋檐下加个轴流风机就能满足要求。风机和风管的布置要防止有大量射线束泄漏,风管直径不能太大,必须做成斜筒式,以减少直射而出的射线。总之,在整个辐照装置的设

计中,应采取多重安全措施,这样才能确保辐照安全。

1.1.1.2 电子加速器

(1)加速器的基本原理 自由电子可被电场直接或间接加速到很高能量,形成高能电子束而被工业应用。直接加速需要与加速电子最终能量相当的高压,而间接加速则通过随时间不断变换的电磁场将电子加速到高能量,直接加速器主要用于低、中能电子束,当需要 5 MeV 以上能量的电子束时,使用间接加速技术更经济。

电子加速器给出的主要指标为电子束能量(MeV)、流强(mA 或 μA)及输出功率(kW)。不同加工内容要选择不同参数,如涂层辐射固化需较低电子束能量(≤ 0.25 MeV)、较高流强(≤ 100 mA)和较宽的电子束宽度。用自屏蔽电子帘加速器最为合适。

加速器的类型很多,其基本原理都是利用电磁场使带电粒子(如电子、质子、氦核和氮核及其他重离子)获得高能量。

粒子加速器是一种高技术工程设备,大体上由 4 个基本部分及若干辅助系统构成。

1)粒子源 用来提供待加速的各种粒子束,如各种类型的电子枪、离子源以及极化离子源等。

2)真空加速结构 这是一种装有加速结构的真空室,用以在真空中产生一定形态的加速场,使粒子在不受空气分子散射的条件下得到加速。如各种类型的加速管、射频加速枪和环形加速室等。

3)导引聚焦系统 用一定形态的电磁场来引导并约束被加速的粒子束,使之沿着预定的轨道受加速场的加速,如圆形加速器的主导磁场与四级透镜场等。

4)束流输运、分析系统 这是由电、磁场透镜、转弯磁铁和电、磁场分析器等器件构成的系统,用于在粒子源与加速器之间或加速器与靶室之间输运并分析带电粒子束。当多个加速器串接工作时,它用来在加速器之间分析、输运粒子。

除了上述 4 个基本部分之外,通常还设有各种束流监测与诊断装置、电磁场的稳定控制装置、真空设备以及供电与操作设备等。

加速粒子所达到的能量是表征加速器性能的重要参数之一,它的基本单位是电子伏(eV),但在加速器中常用的单位还包括有千电子伏(keV)、兆电子伏(MeV)、吉电子伏(GeV)和太电子伏(TeV)。它们之间的换算关系为:

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1\,000 \text{ keV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1\,000 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} = 1\,000 \text{ GeV}$$

(2)加速器的分类 加速器按照能量划分可分为:低能加速器、中能加速器和高能加速器。即能量在 $1 \sim 10 \text{ MeV}$ 以下的加速器我们称为低能加速器,能量在 $100 \text{ MeV} \sim 1 \text{ GeV}$ 之间的称为中能加速器,能量在 $1 \sim 100 \text{ GeV}$ 间的为高能加速器,在此之上的统称超高能加速器。

按加速粒子的种类也可把加速器分为:电子加速器、轻离子加速器、重离子加速器和微粒子团加速器。

加速器电厂和粒子轨道的形态是反映加速器原理、决定加速器结构的关键因素。据此可将加速器分为:直流高压型、电磁感应型、直线共振型和回旋共振型 4 种类型的加速器,它们分别适用于不同的能量范围,加速不同粒子。

加工对象不同,加速器辐射程序亦有差异,图 1.2 给出了中能电子加速器辐射装置。

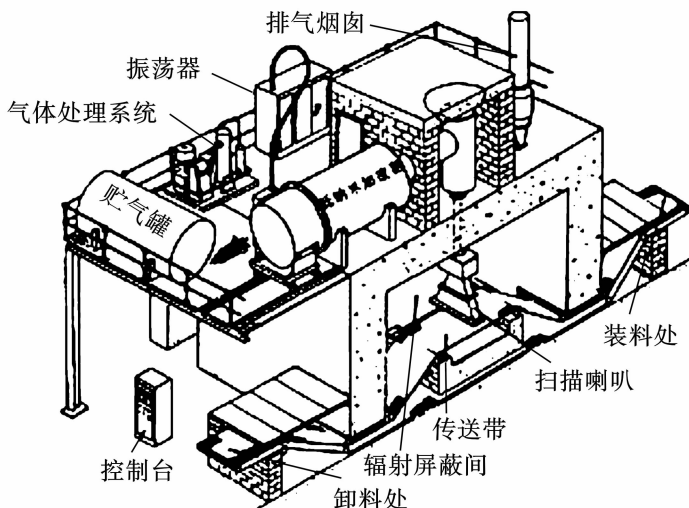


图 1.2 中能电子加速器辐射装置

1.1.1.3 辐射危害

在加速器中被加速的高能带电粒子与物质相互作用产生瞬发辐射,包括初级辐射(X 射线、 γ 射线和中子等),产生的这些辐射与周围物质相互作用产生感生放射性(如 γ 射线等),即缓发辐射。前者只有加速器开机时产生,停机后就消失;后者在加速器关机后仍然存在,而且随着加速器运行时间的增加而累积。加速器的主要危害因素如下。

(1)贯穿辐射 被加速的高能带电粒子与结构材料相互作用,会产生强度很

高的贯穿辐射(中子和 γ 射线)。加速器运行时产生的中子和 γ 射线在设计上必须用足够厚的屏蔽材料才能将其减弱到较低水平,它们是加速器屏蔽设计考虑的主要对象。

1)中子 在加速器里,中子是由多种核反应产生的,中子的发射率、能量和角分布与入射粒子种类和能量有关。中子具有很强的穿透能力,它们会穿过屏蔽层对人引起直接的辐射剂量,而且中子还会穿过建筑物屋顶进入天空,由于中子散射(称为天空散射)也对设施周围的人引起辐射剂量。

2) γ 射线 在加速器里由多种核反应产生的中子辐射总是伴随着发射 γ 射线。这是因为产生中子的核反应一般要放出 γ 射线,而快中子和慢中子在各种材料上辐射俘获反应也放出 γ 射线。 γ 射线也会穿过屏蔽层对人引起直接的辐射剂量。

(2)感生放射性 加速器感生放射性是由中子引起的,这是因为不管中子能量如何均会产生活化,感生放射性的辐射水平取决于加速粒子的能量、种类、流强和加速器的运行时间等因素。感生放射性主要产生在加速的结构材料、冷却水、周围土壤以及加速器厅、束流传输隧道和治疗室的空气中。

1)结构材料活化 加速器部件的感生放射性水平与加速粒子的种类、能量和束流强度以及靶材料的性质和开机运行时间等诸多因素有密切关系,特别是受到高能量和强束流的离子或高能量和大剂量 γ 射线照射的部件,如靶部件、限束光栏,还有束流损失较大处的束流管、偏转磁铁、结构材料以及出束位置的照射头等。更换或拆卸这些靶件和活化部件时会存在照射危害,因此要按放射性废物管理,不得随意处理。

2)空气活化 加速器厅、束流传输隧道的空气活化后,产生的感生放射性核素主要是 ^{41}Ar 、 ^{11}C 、 ^{15}O 、 ^{16}N ,半衰期是7.3 s~1.83 h。

3)冷却水活化 中子引起加速器冷却水活化,产生的感生放射性核素主要是 ^{15}O 、 ^{16}N ,半衰期分别是2.1 min和7.3 s。只要放置一段时间,其活度就可衰减到可忽略的水平。如果循环水是去离子,就要关注去离子树脂中长寿放射性核素的积累。一般每产生 3.7×10^{10} Bq的放射性,在树脂中就约有185 Bq的放射性积累。

4)土壤的活化 穿过设备底层屏蔽而进入土壤的中子会引起土壤的活化,土壤中的核素成分十分复杂,活化产生的放射性核素很多。使用高能量的加速器时应注意这个问题。

1.1.1.4 辐射防护

加速器的建设应符合国家法律法规和相关标准的规定,满足城市区域规划和布局要求,辐射防护应做好以下工作。



(1) 屏蔽设计

1) 加速器大厅、束流传输隧道是产生各种辐射的地方,要做好屏蔽设计,这是加速器辐射防护中最重要的环节。而且必须按照不同工作状态下可能的最大辐射量,设计屏蔽墙的厚度。除了屏蔽墙的设计外,还应注重屋顶的屏蔽设计,保证穿过屋顶辐射经天空反射到地面后的辐射水平不超过国家有关剂量限值。

2) 加速器系统的通风管道、电缆管道、辐照材料传输管道等可能穿越屏蔽墙。设计时,这些管道的取向应尽可能避开被加速射束的方向或辐射发射率峰值方向。为了防止辐射经管道泄漏,管道应取“S”形或“U”形,在地沟的入口或出口处应有一定的屏蔽盖板。

3) 为了搬运大型设备,有时需要在屏蔽墙上预留足够大孔洞。这些孔洞位置要用可能避开被加速射束的方向或辐射发射率峰值方向。填塞孔洞时,混凝土块之间的垂直缝隙要错开,缝隙要用灰浆填充。

4) 迷宫要合理布局和设计,迷宫入口位置应尽可能避开来自靶上的直接辐射,或应避开被加速射束的方向或辐射发射率峰值方向。迷宫不应设计成直线形,而应带有2~3个拐弯。

5) 屏蔽门的厚度应和邻近的屏蔽墙有相同的屏蔽效果,门和墙之间应有足够的搭接,以减少辐射散射的泄漏。通常门的两侧和顶部,门与墙的搭接至少为缝隙的10倍。

(2) 安全连锁装置 连锁装置是指加速器存在某种危险状态或人员误入加速器大厅、束流传输隧道和辐照(治疗)室时能立即自动切断电源或束流的电器线路,其目的就是使人员避免误照射。安全连锁装置要符合以下条件:

1) 加速器大厅和辐照(治疗)室门均为连锁门,只有关门才能出束、辐照(治疗)。

2) 在任何时刻,可由厅和室内开启已关闭的防护门。

3) 电控防护门关门过程中,遇有人员穿过,门自动前进或返回。

(3) 警告装置 警告装置的作用就是最直观地告诉人们加速器工作状态,通常使用的警告装置有目视装置(状态指示灯、放射性标志)、声响装置、警告装置和闭路电视监视装置。

(4) 辐射监测装置 在可能存在着辐射危害的区域,如加速器大厅、束流传输隧道、辐照(治疗)室和候诊区以及控制室都应安装辐射监测装置,并要求这些装置与门等安全连锁装置结合。

当辐射水平超过预定值时,辐射监测装置应给出警告信号并切断束流。

(5) 活化空气过滤装置 为控制活化空气以气态流出物方式排入环境,应该设置通风系统。通风系统排放口前应安装过滤器,以保证气态流出物符合国家规定的排放限值。

(6)放射性固体废物管理 更换或拆卸下来的靶件和活化部件必须严格遵守有关操作规程和放射性废物管理的管理制度,将它们暂存在具有一定屏蔽条件的存储间,定期送专业部门集中收储。另外,如果循环水是去离子,就要关注去离子树脂中长寿期放射性核的积累,更换下来的树脂要按放射性废物处理。

1.1.1.5 两种辐射源性能比较

从表 1.1 可以看出, γ 射线的穿透能力强, 适合加工厚而不规则的样品, 常用于医疗器械的辐射消毒、食品保鲜、辐射聚合、木塑材料深度交联固化等。相比之下, 加速器电子束的优越性更多, 如高剂量率、高产率、可变的能量、开关自如和高利用效率, 因此在辐射加工中, 加速器作为辐射源更为普遍。 γ 辐射的传统领域也有被高能加速器取代的趋势。降低加速器造价是一个重要的任务, 我国不少辐射加工单位由于无力购买价格高昂的加速器, 使得钴源装置的应用还相当普遍。然而从辐射加工业发展的需要看, 这种状况需尽快改善。

表 1.1 两种辐射源性能对比

特征	γ 辐射	电子束
能量	1.17 ~ 1.33 MeV	0.2 ~ 10 MeV
功率	1.48 kW/3.7 pBq	1.5 ~ 400 kW/unit
剂量率	低(~ 10 kGy/h)	高(10 kGy/s)
穿透性	高(水中 43 cm)	低(~ 0.35 cm/MeV)
能量利用率	低(~ 40%)	10% ~ 90%
产率	低	高
保养	需更换	需技术人员管理
	(每年衰变 12.3%)	

1.1.2 离子束

离子束是以近似一致的速度沿几乎同一方向运动的一群离子,可以从离子源和加速器获得离子束。

1.1.2.1 离子源

用以获得离子束的装置。在各类离子源中,用得最多的是等离子体离子源,即



用电场将离子从一团等离子体中引出来。这类离子源的主要参数由等离子体的密度、温度和引出系统的质量决定。属于这类离子源的有:潘宁放电型离子源、射频离子源、微波离子源、双等离子体源、富立曼离子源等。另一类使用较多的离子源是电子碰撞型离子源,主要用于各种质谱仪器中。此外,离子源还有表面电离源、光致电离离子源、液态金属离子源等类型。

离子源的主要参数有如下。

(1)离子束流强 即能够获得的有用离子束的等效电流强度,用电流单位 μA 或 mA 表示。

(2)有用离子百分比 即有用离子束占总离子束的百分比。一般来说,离子源给出的总离子束包括单电荷离子、多电荷离子、各种分子离子和杂质元素离子等的离子束。

(3)能散度 由于离子的热运动和引出地点的不同,使得离子源给出的离子束的能量对要求的单一能量有一定离散,一般希望能散度尽量小,在高精度的离子束应用中尤其是这样。

(4)束的聚焦性能 以离子束的截面和张角表示。聚焦不好的离子束在传输过程中会使离子大量丢失。获得良好聚焦特性的离子束的最终障碍是束中离子之间的静电排斥力,为了克服这一障碍,应尽早使离子获得较高能量。

(5)离子源的效率 以离子束形式引出的工作物质占总消耗的工作物质的比例。

(6)工作寿命 离子源一次安装以后使用的时间。

1.1.2.2 加速器

从离子源获得的离子束的能量一般从几百电子伏到几万电子伏。因为要获得较高能量的离子束受到击穿的限制,所以必须使离子在电场和磁场中加速,这类装置叫做加速器(见粒子加速器)。使用各种加速器可以使离子获得很高的能量(如几百吉电子伏),也可以使离子减速,以获得能量较低的(如几十电子伏)但流强很高的离子束。

1.1.2.3 应用

(1)离子掺杂与离子束改性 从 20 世纪 60 年代开始,人们将一定能量的硼、磷或其他元素的离子注入半导体材料中,形成掺杂。掺杂的深度可用改变离子的能量来控制;掺杂的浓度可通过积分离子流强度来控制。离子注入方法的重复性、可靠性比扩散法好。离子注入掺杂在半导体大规模集成电路的生产中已成为重要环节,用离子注入法取代旧的扩散等工艺在有些器件中已成为必然趋势。

离子注入在金属材料的改性中获得的结果十分引人注目。在常用金属的离子