

高等教育教学参考书

工业电子加速器及其 在辐射加工中的应用

[前苏联]E. A. 阿布拉勉

赵渭江 等译

刘经之 校

原子能出版社

工业电子加速器及其在辐射加工中的应用

原子

16
03

TL5
A03

412688

高等教育教学参考书

工业电子加速器及其在
辐射加工中的应用

(第一版)

[前苏联]E. A. 阿布拉勉 著

赵渭江

哈鸿飞

译

朱芝仙

刘经之

校



原子能出版社

北京

图字:01-96-0676号

图书在版编目(CIP)数据

工业电子加速器及其在辐射加工中的应用/赵渭江等译.

北京:原子能出版社,1996.12

ISBN 7-5022-1517-4

I. 工… I. 赵… III. 电子加速器-应用-辐射加工-高等学校-教学参考资料 IV. TL5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 09237 号

内 容 简 介

本书叙述了电子和物质的相互作用,其诱发的化学、生物、热效应,以及这些效应的应用。阐明了能量为 0.15~40 MeV 的各种类型的工业电子加速器的工作原理、结构特点、主要指标和典型产品。描述了辐射加工装置及工艺流程布局,对其主要应用领域(如热收缩材料、绝缘材料、涂层固化等)均以实例作详细介绍。全书包含插图 129 组,表格 41 个,参考文献 185 篇。

本书可作为高等学校加速器、核技术、辐射化学等专业的大学生、研究生的教学参考书,也可供从事研究、设计、使用工业电子加速器工作和电子束辐射工艺研究工作,以及从事放射治疗、环境保护、材料改性等工作的人员参考。

ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

© Энергоатомиздат, 1986

©原子能出版社,1996

原子能出版社出版发行

责任编辑:张仲兰

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 11 字数 271 千字

1996 年 12 月北京第一版 1996 年 12 月北京第一次印刷

印数:1—1000

定价:9.00 元

中文版序

我有幸将《工业电子加速器及其在辐射加工中的应用》一书奉献给中国读者,其目的主要是希望该书能够有助于发展贵国的辐照技术,有助于解决国民经济中一系列问题时节省资金和建立全新的加工过程。展望未来,电子加速器在清除电站及工业企业的污水、废气以及改进材料表面性能等领域可以获得广泛应用。中苏两国学者及工程技术人员之间的合作越紧密,上述问题以及众多其他问题的解决就将越顺利。

E. A. 阿布拉勉 教授
于中国北京 1990 年 7 月 11 日

前言

本世纪中期原子技术和工艺的发展使我们对电离辐射及其对物质的有利和有害影响的认识大大提高,从而推动了人们对新的强辐射源的研制。在经过 50 年代对辐射化学过程的实验研究并认识到其经济效益后,开始了对辐射工艺的大规模工业应用——起初利用同位素源,经过 5~8 年后转向了利用专门设计的电子加速器来实现大规模工业应用。以前被加速的电子流仅在个别仪器(如 X 光机)中应用,现今已形成几个独立的应用领域,且有自己的典型仪器和工艺手段。

在对物质结构——基本粒子的结构及核力的本质等的研究中,加速粒子束具有特殊的意义。这样就激励了电子加速器的出现和发展。起初是低能量——1 MeV 量级的,随后是中能和高能一直到 $10^5 \sim 10^6$ MeV 的。

作为应用,通常是使用能量不超过几十 MeV 的加速器。工业电子加速器是指建于工业企业内并用来辐照各种材料——主要是为了实现辐照——以及用于化学过程和消毒过程的加速器。有时它还包括用于探伤和医用的加速器装置。我们将遵循后一种说法,尽管对医用装置来说,使用“工业的”这个定语是有条件的。(就其参数和某些单独的技术解决办法来说,一些对材料进行电子束加工的设备也与我们所研究的加速器很接近,在这些设备中,通常使用能量不高于几十 keV 能量的电子。)

本书讨论的问题既涉及加速粒子的产生,也涉及电子束对物质的化学效应、热效应及其他效应的应用,是供设计和维护电子加速器,以及研究应用加速粒子的工艺过程方面的专家们使用的。由于加速器工作人员急剧增加,且其中可能包括一些未受过电子物理训练的人,所以在本书中也简单地叙述了带电粒子束、电子的加速方法及电子与物质的相互作用过程等基本知识。书中包含了对主要类型的工业加速器及一系列工艺设备的描述。除当前在工业中广泛使用的电子加速器外,还描述了一些实验型的和实验工业型的加速器。同样,在一些论述辐射工艺过程的章节中,我们既讨论了众所周知的并广泛使用的工艺,也讨论了一些刚刚超过实验阶段或仍在发展中的工艺过程。

作者以极其愉快的心情向在撰写手稿过程中提出了宝贵意见的 Г. Д. 库列绍夫, P. M. 阿列克萨亨与 Э. Э. 芬克列以及曾给予协助的全体同事表示感谢。

E. A. 阿布拉勉

目 录

前言

第一章 基本概念、术语和定义	(1)
1.1 电子加速器发展及电离辐射应用历史概述	(1)
1.2 辐射的种类和度量的单位	(4)
1.3 带电粒子束的加速	(4)
1.4 同位素源	(7)
1.5 加速了的带电粒子束及其他几种辐射的应用	(7)
第二章 射线与物质的相互作用和电子加速器的一些应用	(10)
2.1 电子束的电离作用	(10)
2.2 韧致辐射的产生	(13)
2.3 韧致辐射穿过物质的过程	(14)
2.4 光核反应	(15)
2.5 辐照材料中的电荷	(16)
2.6 射线探伤	(16)
2.7 活化分析	(17)
2.8 在电离激光器中维持非自持放电	(17)
2.9 同步辐射	(17)
第三章 电离辐射作用下的化学过程	(19)
3.1 辐射化学过程的特点	(19)
3.2 辐射聚合	(20)
3.3 聚合物的辐射交联	(22)
3.4 聚合物的辐射降解	(25)
3.5 综合过程	(26)
3.6 气相中的工艺过程	(27)
第四章 生物体的辐照	(29)
4.1 辐射生物过程的物理化学基础	(29)
4.2 医用材料消毒	(30)
4.3 食品保鲜	(31)
4.4 谷物杀虫	(32)
4.5 种子播前辐照	(33)
4.6 抑制农作物在贮存过程中发芽	(33)
4.7 辐射育种	(33)
4.8 辐射医疗	(34)
4.9 生物材料	(34)
4.10 污水净化	(35)

第五章 强流电子束在物质中的热效应	(36)
5.1 强流电子束与金属的相互作用	(36)
5.2 利用强流电子束进行金属热处理的工艺	(38)
5.3 用被加速的电子处理绝缘体	(41)
5.4 强流电子束在气体中的传播	(42)
5.5 被加速的电子束与激光辐射的比较	(43)
5.6 结论	(43)
第六章 高压加速器	(45)
6.1 在电位场中加速粒子	(45)
6.2 产生高电压的方法	(45)
6.3 静电发生器	(47)
6.4 单相高压变压器	(49)
6.5 单相变压器型直流电压发生器	(58)
6.6 电容耦合式直流电压串级发生器	(61)
6.7 三相变压器型直流电压发生器	(65)
6.8 脉冲电压发生器	(68)
6.9 高压发生器的结构元件	(72)
6.10 加速装置	(77)
第七章 感应加速器和谐振加速器	(85)
7.1 电子在涡旋场中的加速	(85)
7.2 感应加速器的结构和供电线路	(90)
7.3 电子的谐振加速	(95)
7.4 电子谐振加速器的电路和结构	(100)
第八章 辐照装置的部件	(104)
8.1 从真空室内引出加速电子的机构	(104)
8.2 产生韧致辐射的靶	(109)
8.3 辐照区和辐射防护	(112)
8.4 束流参数与辐照剂量的测量	(116)
第九章 以电子加速器为辐射源的典型辐照装置	(122)
9.1 聚乙烯辐射交联所用的电子束工业装置	(122)
9.2 电子束固化设备	(126)
9.3 纺织品的辐射加工设备	(130)
9.4 消毒和杀菌设备	(131)
9.5 探伤设备	(133)
9.6 辐射医疗设备	(136)
9.7 其他用途的辐射设备	(139)
9.8 相对论电子束在新应用领域中的展望	(142)
附录 实用电子加速器的参数	(148)
参考文献	(157)

第一章 基本概念、术语和定义

1.1 电子加速器发展及电离辐射 应用历史概述

研究电离辐射对物质作用的第一阶段开始于上个世纪末。在 1895 年伦琴发现轫致辐射及 1896 年贝克勒尔发现放射性以后,人们曾进行过对玻璃、陶瓷、水及其他材料的辐照实验,并开始将辐照用于医学透视及探伤。对于辐射效应的研究工作在 20 世纪初通常是用 α 的射线进行的。

下一个研究阶段是从出现了人工辐射源——能量为几百 keV 的粒子加速器开始的。1925 年库利兹曾用一个 250 kV 的电压源加速了电子,并用它辐照了一系列物质。1927 年他又用三级串联加速管首次获得了引至大气中的电子束,其能量为 900 keV。1930~1931 年在一个以泰斯勒变压器为基础的装置上加速电子使之能量达到 2 MeV,加速质子使之能量接近 1 MeV。在 30 年代初,范德格拉夫建立了电压为 1.5 MV 和电流为 25 μ A 的静电发生器,考克饶夫和瓦耳顿建成了 0.7 MV 和 10 μ A 的串级发生器,洛伦兹建成了能把氢离子能量加速到 1.25 MeV 的回旋加速器,同时还研制了直线谐振加速器。20 年代已阐明了粒子感应加速原理(尽管第一台工作的电子感应加速器是在 1941 年由科尔斯脱建成的)。实际上,仅在几年时间内就提出了一系列决定以后数十年加速器技术发展的基本的粒子加速方案。

与此同时,电子光学开始蓬勃发展,用聚焦电子束对金属作加工实验,真空技术及其他相关科学技术领域也在不断发展,没有这些,加速器的完善是不可能的。

此后,于 1944 年苏联物理学家维克斯列尔提出了自动稳相原理,它是粒子加速物理的一个最基本的思想(在美国马克·米兰独立地于 1945 年提出)。在此原理的基础上产生了一系列新型加速器——同步回旋加速器、直线加速器、电子回旋加速器等。大约与此同时产生具有自发射阴极的高压脉冲伦琴射线技术,40 年代初建成了第一台用于对快速流动过程作 X 射线照相的脉冲装置。

我们看到,与放射源相比,甚至最早的相对的弱电流加速器也已开辟了一些全新的可能性。例如,假定由 1 克镭发出的 α 粒子流在 4π 立体角中为 $3.7 \times 10^{10} \text{s}^{-1}$,那么由电流为 10 μ A 的加速器中得到的 α 粒子数则为 $3.125 \times 10^{13} \text{s}^{-1}$;而且他们在一个方向运动,形成一股有限截面的流。在近代工业电子加速器中的中等束流强度为 0.1~0.5 A,这相当于 10^{17}s^{-1} 的粒子流。

在 20 年代末到 30 年代初曾对于射线对细胞的遗传器官的作用进行了一系列的实验,并得到了一些新的植物形态。从 30 年代开始积极对研究利用射线消灭微生物的可能性,有人提出用过射线对食品进行消毒;但只是在 1947 年发表了对产品作辐射加工试验取得了成功之后才对此作集中的研究。在 40 年代末开创了聚乙烯和生橡胶的辐射交联工艺过程,并于 50 年代对此开始了积极的研究。在 40 年代中期,由于原子问题方面的工作而出现了一些对辐射化学进行广泛研究的科学集体。

开始于 50 年代的辐射在工艺和其他实用方面的大规模工业应用可以列为第三阶段。在此

期间出现了强辐射源及测定射线参数的新仪器,产生了研究强辐射对建筑材料作用的需求,开创了一系列以辐射工业工艺为基础的加工过程。

利用辐照作为工业中的一种加工工具是从对医用品作辐射消毒和对聚乙烯改性开始的。这样,在 50 年代后半期,在美国,丹麦及其他国家建立了以同位素源为基础的工业辐射装置。从 60 年代起为此开始利用加速器,例如,在丹麦的 DAE 和法国的 SRT1/CAR1 研究机构。自 1956 年通用电气公司(美国)组织了辐照的聚乙烯产品的生产。在 50 年代电子束也开始用于治疗目的。在此同一年代中,曾大规模地利用同位素辐射源在佛罗里达(美国)进行大面积的昆虫灭菌,以减少昆虫的种族。为进行油漆涂层的辐射固化及其他工艺处理,曾以电子加速器为基础建立了实验-工业装置,并继而发展为生产装置。

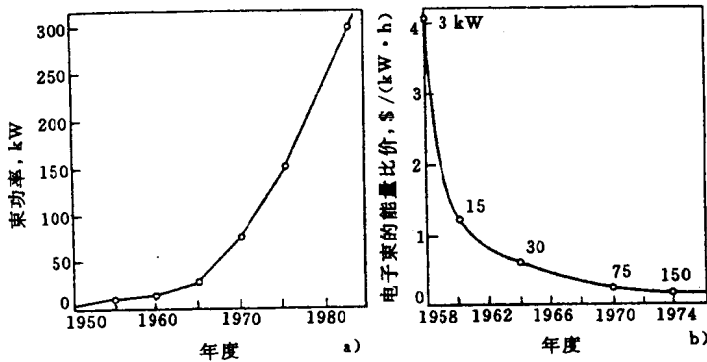


图 1.1 能量为 1 MeV 量级的工业用加速器的发展
a——工业用狄那米(Dnamic)加速器的功率的增长
b——电子束能量价格的下降

在 50 年代中期,工业中开始广泛应用能量为 0.03~0.05 MeV 的电子束对金属,首先是原子,航空和宇航技术产品中的金属进行热加工。对以实用为目的的电子加速器的研制主要沿着两个方向进行:对于辐射工艺装置,能量为 0.15~10 MeV,平均功率为 10 kW;对于探伤和辐射治疗装置,能量达 35~45 MeV,功率则显著地减小。对工业中用的装置要求有高的可靠性和有效利用系数,维护方便和价格低廉。图 1.1 示出了能量为 1 MeV 量级的加速器的发展情况。尽管图中所列曲线只是针对工业用加速器中的一种类型——美国辐射动力学公司(Radiation Dynamics)生产的地那米高频高压加速器,但可大致说明电子加速器和其他类型加速器的参数改进速度。与此同时,工业用加速器的研制在美国由高压工程公司(绝缘芯变压器)和通用电气公司(谐振变压器)承担。而用于涂料固化的加速器则由福特汽车公司研制。首批产品之一的强功率脉冲韧致辐射源由高压工程公司所属的离子物理公司(Ion Physics Corp)开始生产。在 60 年代末还建立了能源科学股份有限公司(Energy Science Inc., 美国)专门生产能量为 150~300 keV 的加速器,以及与此种加速器有关的工艺生产线。

在法国静电机械公司(Sames, 以后是 Tunzini-Sames)研制了转子发生器。在英国维舍斯有限公司(Vickers Lim)制造了工业用直线加速器。在瑞士布朗鲍维里(Brown Boveri)制造了电子感应加速器和其他加速器。以电子加速器为基础的工业用辐射装置产生的射线总功率在 1967 年为 300 kW,在 1970 年为 800~1000 kW。目前已大于 20 000 kW,加速器功率的年增长

率达 15%~20%。图 1.2 列出日本工业用加速器发展的数据。

在苏联第一批工业用加速器是在新西伯利亚的苏联科学院核物理研究所(ИЯФСО АН СССР)[埃尔脱(ЭПТ)-1.5 型,1964 年],列宁格勒以 Д. В. 叶弗列莫夫(Д. В. Ефремов)命名的电物理设备研究所[НИИЭФА,电子-3 型,1970 年],莫斯科的电子学研究所[埃罗(ЭЛУ)5-1.5 型,1965 年]研制的。在 50 年代托姆斯克工学院和莫斯科变压器厂研制了电子感应加速器。工业用电子加速器在苏联作辐射加工用是从 1968 年开始的,当时辐照聚乙烯电缆绝缘体的装置投入了运行。1975 年开始生产吸热的热收缩薄膜,1976 年开始对纺织品进行辐射——化学加工。

目前工业用电子加速器还在日本[尼辛高压公司(Nissin-HV)等],法国(通用放射学公司),德国[聚合物物理公司(Polymer Physik GMBH)],瑞士[哈弗莱公司(E. Haefaly)]生产;在中国、匈牙利、捷克斯洛伐克和其它国家也在研制工业用加速器。

用于医学治疗的电子和离子加速器的总数已超过 1500 台。这些加速器是由瓦里安(Varian,美国),辐射动力学(美国),飞利浦斯/米尔,(Philips/MEL,英国),史纳/埃米(SHIN/EMI,英国),三菱(Mitsubishi,日本),东芝(Toshiba,日本),通用放射学(法国),西门子(Siemens,德国),布朗鲍维里(瑞士),(CGR/AECL,加拿大),电物理设备研究所(苏联)等机构生产的。

利用电子加速器的韧致辐射进行工业探伤的装置是由瓦里安和休利特帕卡德(Hewlett Packard,美国),布朗鲍维里(瑞士),安德雷克斯(Andrex,丹麦),吉拉多尼(Gilardoni,意大利),西门子,菲里浦斯和米勒(Miller,德国),潘塔克(Pantak,英国),电物理设备研究所,“海燕”(НПО Буревесник),“光谱”(НПО Спектр),阿克丢勃伦根(Актюбрентген)和莫斯伦根(Мосрентген,苏联)等机构研制的。

由于脉冲高压装置的发展,人们制作了用于探伤的轻便式(重量为 1~2 公斤),便携式仪器,例如 ИРА,РИНА,МИРА 型(“海燕”厂,苏联)和超大功率韧致辐射发生器,其最大装置是美国的“极光”(Aurora),其电子能量为 15 MeV,电流为 1.6 mA,脉冲持续时间为 120 ns(装置重 7.5 千吨),“极光”和其他大功率脉冲辐射源的研制工作是在美国的国际马克斯韦尔物理

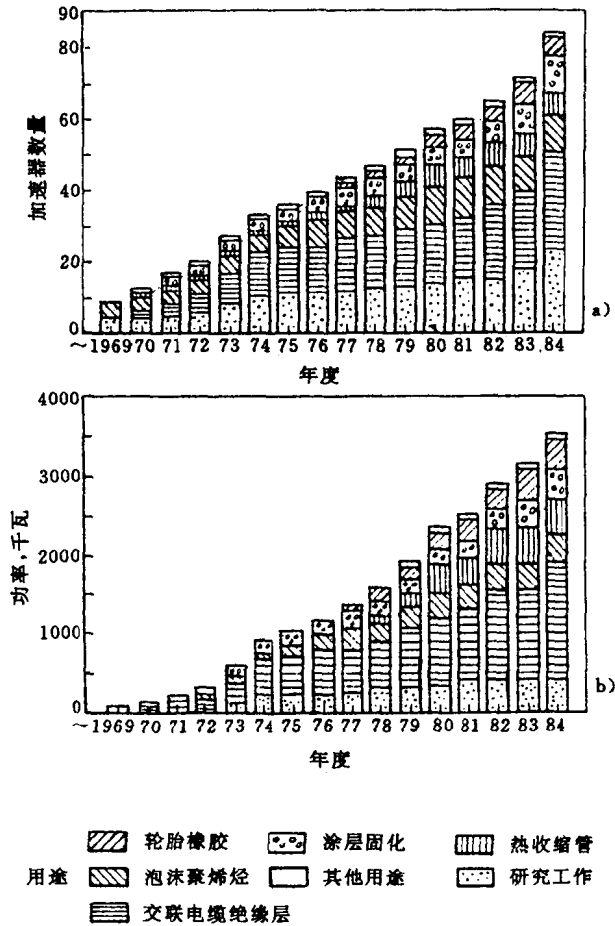


图 1.2 日本工业用加速器的发展
a——加速器数 b——加速器的总功率

公司(Maxwell Physics International)、离子物理公司进行的。

1.2 辐射的种类和度量的单位

各种不同形式的辐射——电子、质子、中子及较重粒子的粒子流,短波电磁辐射和微波辐射,光辐射和热辐射,相干电磁辐射(激光),以及将要出现的同步辐射都在不断找到各自的工业应用。本书主要阐述由电子加速器所产生并以工业规模应用的辐射——电子流和短波电磁(韧致)辐射。

为了度量射线基本性质之一的电离作用,需要测定射线穿过物质时所释放的能量,在国际单位制中度量吸收的辐射剂量采用单位戈瑞(Gy),相当于1 kg 物质吸收1 焦耳的能量;1 Gy=1 J/kg,与此相应的辐射加工装置的生产率(kg/h)为 $3.6 PD^{-1}\eta$,这里 P ——源的功率(kW); D ——吸收剂量(MGy); η ——辐射的利用系数。直到不久以前还一直采用拉德(rad),为吸收剂量单位,它相当于1 克物质吸收100 尔格(erg)的能量,即1 Gy=100 rad。

能量低于几百 keV 的电子的韧致辐射称为伦琴辐射。由放射性同位素所放出的 γ 光子流通常称为 γ 辐射。

吸收剂量的累积速度称为剂量率,剂量率的量度单位是1 Gy/s。为定义韧致辐射或 γ 辐射在空气中的电离作用,在国际单位制中采用曝光剂量的概念,用每公斤的库仑数表示:1 C/kg(库仑/公斤)等于韧致辐射或 γ 辐射在重量为1 公斤的干燥空气中电离形成每一种(符号)电荷量为1 库仑的曝光剂量。早些时候采用的曝光剂量单位是伦琴(R),它与单位C/kg 之间有以下关系:1 R=2.58 $\times 10^{-4}$ C/kg。当射线能量不大于3 MeV 时,1 R=0.88 rad。

为了定义生物机体的辐照后果,采用单位Sv(希沃特),称之为等效剂量,相当于1 公斤的活体组织吸收1 焦耳的能量:1 Sv= $\frac{1 \text{ J/kg}}{Q}$ 。系数 $Q \geq 1$ 并确定对机体辐射生物后果的水平。早期采用的单位是rem(生物伦当量);1 rem=10⁻² Sv。

为度量同位素源的放射性,在国际单位制中采用的单位是贝克勒尔(Bq),它相当于每秒进行一次放射性衰变:1 Bq=1 蜕变/秒。它与早期采用的单位居里(Ci)之间的关系为1 Ci=3.7 $\times 10^{10}$ Bq,也即1 居里相当于每秒3.7 $\times 10^{10}$ 次衰变。

加速基本粒子最常用的能量单位是电子伏特,1 eV 是指一个电子或带有1 个单位电荷($Z=1$)的任何质量的粒子通过电势差为1 伏的电场时所得到的能量:1 eV=1.6 $\times 10^{-19}$ J=1.6 $\times 10^{-12}$ erg。

1.3 带电粒子束的加速

所谓带电粒子束通常理解为一股粒子流,其中的粒子大体上彼此平行地沿着同一个方向运动。能量发散以及径向速度与纵向速度之比不大于百分之几。传播束流的最典型介质是真空(10⁻⁵~10⁻³ Pa)。在一种粒子束中可能还存在着与之相互作用的其他粒子。倘若这种相互作用如此之大,以致使束内的粒子具有很大的径向速度,那么上面提到的束流的基本特征就将消失。这种现象在高气压介质中尤为显著,尽管束流在稠密的介质中也能通过一定的距离。

在研究基本粒子的加速过程以及它们与物质相互作用时,至少应了解粒子的下述特性:静

止质量 m 。电荷 Ze ($e=1.6\times 10^{-19}$ C) 和动能 W (或总能量 ϵ)。在电磁场中运动的粒子会受到力的作用;在场强为 E 的电场中为 $F_E=ZeE$;而在感应强度为 B 的磁场中则为 $F_B=Zec^{-1}vB$ (洛伦兹力),这里的 v 和 c 分别是粒子的速度和光速。在电场中运动时粒子会改变能量;在势场中粒子能量的增大或减小正比于其运动轨道起点与终点间的电位差,即 $\Delta W=Ze\Delta U$ 。

能量约 1 MeV 及更高的电子的速度十分接近光速。在这种情况下粒子的运动由相对论力学公式来描述。粒子的总能量和质量之间的关系由 $\epsilon=mc^2$ 表示。电子的静止能量 $\epsilon_0=0.511$ MeV,质子的静止能量为 938 MeV (顺便提一下,电子的静止质量 $m_0=9.11\times 10^{-28}$ g,光速 $c=3\times 10^{10}$ cm/s)。

下列各种表示法都是通用的:粒子的相对速度 $\beta=v/c$,总能量 $\epsilon=\epsilon_0+W$,相对论因子 $\gamma=\epsilon/\epsilon_0=(\epsilon_0+W)\epsilon_0^{-1}$ 。 β 和 γ 之间的关系为 $\beta=\sqrt{1-\gamma^{-2}}=\sqrt{1-\epsilon_0^2(\epsilon_0+W)^{-2}}$ 。电子的相对速度 β 和动能 W 之间的关系示于图 1.3。相对论粒子的动能 W 和它的动量 $p=mv$ 之间的关系为 $W=\sqrt{c^2p^2+\epsilon_0^2}-\epsilon_0$ 。电子在磁场中运动轨道上的每一点的离心力 mv^2R^{-1} 等于洛伦兹力, $mv^2R^{-1}=ec^{-1}vB$ 。从而有 $p=ec^{-1}BR$,这里的 R 是轨道的曲率半径。这样, W 的上列关系式将具有以下形式。 $W=\sqrt{9B^2R^2+0.511^2}-0.511$,其中 W 的单位是 MeV, B 为 T, R 为 cm (见图 1.3);当 $W\gg 1$ MeV 时 $W\approx 3BR$ 。粒子的总能量,动能和动量可相应地写成 γm_0c^2 , $(\gamma-1)m_0c^2$, 和 $\beta\gamma m_0c$ 。

当我们再返回来研究粒子在电场和磁场中所受的作用力时,应指出,通常是用磁场使相对论粒子的轨道弯曲,因为在以大致相同技术难度实现的场中洛伦兹力要比电场力大很多。事实也是这样,即 $F_B/F_E=300\beta B/E$ (B 应为 T, E 为 MV/m),例如,对 $W=1$ MeV 的电子和 $B=1.5$ T, $E=15$ MV/m 的场来说, $F_B/F_E\approx 28$ 。

对于在束流中运动的粒子,除了受外电磁场的力作用外,还受束流自身电场和磁场的力 F_e 和 F_b 的作用。在束流中粒子密度 N (粒子/cm³) 达到某一定值以后,这种力可对粒子的运动发生极为重要的影响。使同性电荷相互排斥的库仑力可导致粒子流的横截面增大。磁收缩力却向相反的方向作用。于是,在以相对速度 β 飞行的粒子束中,如果该束具有均匀的密度 N (cm⁻³),和半径为 a (cm) 的圆形截面,则自身场将在束流表面具有最大强度。自身电场强度 $E_e=2\pi eNa$,自身磁感应强度 $B=2\pi eN\beta a$ (图 1.4a);作用于粒子的总力: $F_e-F_b=eE_e-e\beta B=2\pi e^2Na(1-\beta^2)=F_e\gamma^{-2}$ 。例如,对具有能量 $W=1$ MeV, $\gamma\approx 3$ 的电子,库仑排斥力 F_e 减弱约一个数量级。

自身空间电荷对束流的纵向运动也有重大的影响。譬如说,当在外电场中加速电子时,自身电荷将减弱阴极附近的加速场,并限制束流的强度。这种在二个本身被看作无限大平面的阳极和阴极之间的电流限制可由朗缪尔定律来决定,即 $j=2.3\times 10^{-6}U^{3/2}$,其中 j 为电流的极限密度 (A/cm²); U 为阳极和阴极间的电位差 (V)。对非相对论粒子来说,可能通过给定电子光学系统的极限电流 $I=\mathcal{D}U^{3/2}$,这里的 $\mathcal{D}$ 为导流系数,它是由系统的几何形状决定的。在相对论能量的情况下,电流和电压之间的相关特性将变为:当 $\gamma\gg 1$ 时, $I\approx \mathcal{D}U$ 。

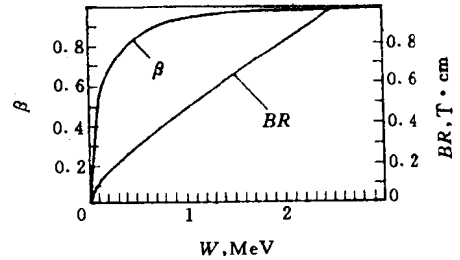


图 1.3 电子的相对速度 β 和参数 BR 与动能 W 的关系

束流内的电势与空间电荷密度有关,在粒子的流强和能量相同的情况下,束流中心和边缘处的电位差也取决于束流的尺寸和几何形状(图 1.4b)。在带状和管状束流中这种电位差是非常小的。与此相对应,在带状和管状束流中,可能比柱状束流通过较大的电流。

离子补偿束流空间电荷可对粒子运动产生很大的影响。当残余气体被束流的电子电离时形成正离子和慢电子。由于所形成的电子很快地飞离束流,束流的负电荷可以部分或全部被离子补偿,从而减小了静电斥力。在压力为 p 的介质中束流电荷的补偿时间 τ 大致由关系式 $\tau \approx 0.04p^{-1}$ 决定,这里 τ 应为 μs , p 为 Pa。这样,在机械真空($p = 10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa)情况下,出现束流后,经过 $10 \sim 100 \mu s$,束流区内的离子密度大致与电子密度相等。

电子沿束流截面的分布即与注入器的特性有关,也与输运条件有关,最典型的分布是高斯分布;在某种情况下,束流具有管状结构或被分割成一个个的细流。一般说来,电子流没有明显的轮廓边缘。在必要时,通常用带有小孔的膜片(光阑),切去包含有小量电流的外缘束流。束流通过光阑后就会具有较明显的轮廓。但在继续输运的过程中,束流的边界又会由于光阑边缘处散射的电子、电子与介质的相互作用以及其他效应而再度变得模糊不清。

在某一给定的瞬间内,束流的每一个电子可以用其在笛卡儿坐标系中的位置坐标 x, y, z 及动量在每一轴上的投影 p_x, p_y, p_z 来表征。所有电子的总合在六维相空间内所占的体积称作束流的相体积。根据刘维定理,它在整个粒子的径迹上是一个不变量,相体积在位移-斜率平面(R, R')上的投影的面积称为束流的发射度(ϵ)(这里 $R' = dR/dz$, z 是与束流方向相一致的坐标)。发射度是束流的定量特性,可用以确定束流的角度发散和外磁场聚焦能力等。定义发射度的准确表达式为 $\epsilon = \int dR dR'$ 。发射度的近似值可由束流的直径 d 乘以束张角 φ 得到,即 $\epsilon \approx d\varphi$ 。在轨迹满足旁轴条件且无加速的情况下,发射度沿着输运管道保持不变。因此,在束流具有最小直径的截面上,其张角最大。有时还使用束流“亮度”这一概念,它决定在单位立体角内、单位束流面积上通过的电流: $4I/\pi^2\epsilon^2$, 这里 I 的单位为 A, ϵ 为 $\text{rad} \cdot \text{cm}$ 。

在一系列专著中,例如文献[1,2,3],曾对决定带电粒子束在真空中运动的物理现象作了比较详细的描述。电子束和物质相互作用时所产生的物理和化学过程是工业中应用高速电子的基础,对此我们将在以后几章中予以研究。

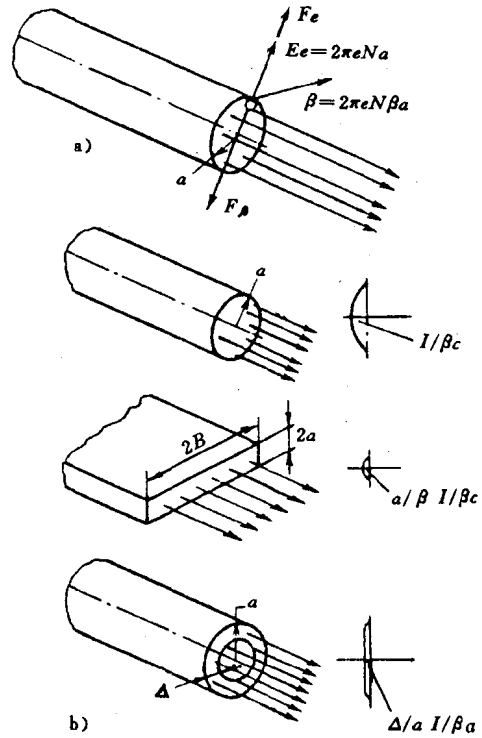


图 1.4 束流的固有场

a——具有均匀粒子密度 N (粒子/ cm^3)的圆形电子束的固有电场强度 E_e 和固有磁感应强度 B_e , F_e 和 F_β = 电子束固有场产生的力;

b——柱形,带状及管状束流的自身电场的分布,纵坐标为束流的纵向尺寸,横坐标为电子自身电荷的电势,束流边缘的电势等于 0, I = 总束流强度, β = 电子的相对速度。

1.4 同位素源

在当今的辐射装置中,采用两种类型的辐射源——放射性同位素和加速器。在对材料的大规模加工处理方面,前者的应用比加速器早。目前所运行的工业辐射装置中仍有约三分之一在使用放射性同位素。主要是 ^{60}Co 。 ^{60}Co 核在蜕变时放出能量为1.17 MeV和1.33 MeV的二个 γ 光子,半衰期为5.27年(每个月放射性约减少1%)。 ^{60}Co 是在核反应堆中用中子辐照装有 ^{59}Co 的特殊细颈玻管的方法制备的。 ^{137}Cs 用作同位素源的普及程度要差得多(其 γ 光子能量为0.66 MeV,半衰期约为30年)。按常规,在同位素源中使用的只是 γ 射线,因为蜕变时产生的电子已在源本身的物质厚度内吸收。基于 ^{32}P 和其他作为快电子源的放射性同位素的 β 辐射薄膜是例外。

核反应堆的释热元件也含有放射性同位素,并可用来进行营业性的辐照。但是由于这些释热元件的放射性衰减相当快,因而使用起来有困难。也可建成闭合回路,能在反应堆辐照作用下被活化的物质在这回路中循环;而被辐照的物品就放置在位于反应堆外的那部分回路上。在回路上工作的物质可以是液体、气体和固体(球形释热元件)。由于原子站的被推广,可能会出现一些综合装置,在这些装置中,人们将把核反应堆生成的核裂变产物的辐射用于辐射加工过程。

放射性为1居里(Ci)的 ^{60}Co 所释放的功率为 $3.7 \times 10^{10} \times (1.17 + 1.33) \times 10^6 = 9.25 \times 10^{16} \text{ eV/sec} = 14.8 \text{ mW}$ 。放射性为1 MCi = $3.7 \times 10^{16} \text{ Bq}$ 的钴源的辐射按其自电离作用等价于功率为14.8 kW的电子束。这种比拟仅从能量的观点是正确的,因为电子和 γ 射线的穿透本领有着本质的差异;与强同位素源的 γ 射线不同,电子流可以定位发射。与电子加速器相比较,同位素源结构简单。然而,加速器具有较大的功率,可以提供较高的辐照生产率,因而可装在工厂的传送带上。另外加速器还具有较高的有效利用功率和较低的辐照价格,停机状态时还有辐射安全的特点。钴源辐射的临界剂量强度是 $\sim 10^4 \text{ Gy/h}$,而现今工业加速器的辐照剂量强度超过 10^8 Gy/h 。一般说来,需用小剂量持续照射和对笨重产品照射时,使用同位素源是较为方便的。

1.5 加速了的带电粒子束及其他几种辐射的应用

快速带电粒子束具有多种多样、时而又是无二无二的特性。由于这些性质,可把它们用于大量的仪器和装置。在电子管中,电子流可接通电路,并按给定的规律改变电路的电阻。在微波仪器中,电子束可传送能量,将在空间某些区段接收到的能量在另一些区段内放出来。在电子焊接装置中,首先电子被加速,然后以热的形式给出能量,以熔化和焊接金属。阴极射线管(在电视机,示波器及其他仪器中)的作用主要是使加速电子引起荧光体发光。

在辐射化学装置和X射线仪中,所用的则完全是快电子的另外一些性质。第一,电子使物质电离,破坏分子键,从而改变这一物质的化学结构和性质,第二,产生高能电磁辐射,利用这种辐射的高穿透性可对材料的内部结构进行研究。被加速的电子及其韧致辐射可用于治疗,以及药物和物品的消毒。

用磁场使电子轨道弯曲时产生同步辐射,这种辐射可用于研究目的,将来也可用于加工过

程。现在人们正在研究利用电子束进行长距离传送能量的可能性,研究利用电子束和离子束在将来热核电站中加热等离子体的可能性。离子束的主要应用是离子注入和金属合金化,研究材料的辐照损伤,以及恶性肿瘤的治疗。表 1.1 中列出了一些典型的例子,以表明带电的基本粒子束的应用,以及由电子束和同位素源产生的辐射的应用。表 1.2 中列举了一些工业电子加速器在其中得到了重要应用的辐射化学和辐射生物过程。

表 1.1 基本粒子流以及电子束和同位素源产生的辐射的应用

辐射形式	特征能量, MeV*	过程或仪器
电子	0.0001~0.2 0.03~0.2(1~2) 0.010~0.025 0.02 0.1~0.3 0.05~0.1(3) 0.02~0.150 0.03~0.3 0.15~10(15) 4~40 1~30 (5~20) (0.5~5) 小于 3×10^4	电子管 微波仪器 阴极射线管 刻蚀 电离激光器 电子显微镜 材料的电子束辐射加工 金属表面加工 辐射化学与辐射生物工艺(见表 1.2) 射线治疗 探伤仪 远距离能量传送 受控热核反应的研究 物理研究
由电子束产生的二次辐射		
轭致辐射	0.03~0.15 0.05~25(35) 1~10(15) 1~2(10) 0.1~40	x 射线透视 探伤仪 医用设备的消毒 食品的储存 射线治疗
同步辐射	小于 10^4 MeV(光子能量可达 75 keV)	表面研究,光谱学研究等
^{60}Co 和 ^{137}Cs 同位素源的 γ 射线	0.66~1.33	辐射化学工艺过程 γ 探伤仪 γ 治疗 医用设备的消毒 食品储存时加工 种子辐照 放射性示踪
离子	0.03~0.5(5) 0.05 3~25 8~45 50~400 每核子 (0.5~5) 小于 4×10^5	离子注入 刻蚀 活化分析 放射性同位素生产 射线治疗 受控热核反应研究 物理研究
中子	14** 14 14	中子测井 中子活化分析 中子治疗

* 括号内列出的数据是指较少推广或是处于实验阶段的设备。

** 能量 14 MeV 的中子是用能量为 150~500 keV 的氘离子轰击氘靶,通过 $\text{T(d,n)}^4\text{He}$ 反应得到的。能量更高的中子则是利用回旋加速器或其他加速器得到的。

表 1.2 工业用加速器在辐射化学和辐射生物工艺中的应用

过程	能量, MeV	剂量, kGy
聚乙烯交联	0.3~4	50~300
热收缩产品的生产	0.3~4	100~250
涂层固化	0.15~0.5	20~500
接枝聚合	0.3~2.5	10~300
纺织品改性	0.3~1.5	5~50
玻璃钢纤维加工	0.5~1	10~400
生橡胶硫化	0.5~15	50~300
医用设备消毒	1~10(15)*	20~50
种子灭菌	1	0.5~1
污水处理	0.5~4	0.5~1
排放气体的纯化	0.3~1	10~15

* 见表 1.1 的附注。

第二章 射线与物质的相互作用和 电子加速器的一些应用

2.1 电子束的电离作用

快速电子射入物质后,与原子的电子和原子核相应发生互相排斥和吸引的静电作用。电子束流的大部分能量消耗在和轨道电子的相互作用——原子的激发和电离上。快电子在核附近通过时会发生弹性或非弹性散射,并在后一种情况下放出光子。当光子与某些物质的核相互作用时,可以引起核反应,其结果生成感应放射性和中子辐射。被物质吸收的能量主要部分最终转化为热,由此形成对被辐照样品的加热。

当与轨道电子相互作用时,初级粒子将自己的一部分能量传给它们,从而使它们过渡到半径较大的轨道上(激发)或脱离原子(电离)。每形成一对离子所消耗的平均能量实际上与入射电子的能量无关,对很多物质来说皆为 30 eV 左右(对于空气为 34 eV)。这个能量与电离辐射的类型(电子、光子或离子)的关系也很小。简单分子的电离势约为 10 eV。初始粒子的另外三分之二的能量就消耗在激发和其他过程上。因为由工业加速器产生的电子的能量大大超过形成离子对所需的能量,所以要经过多次碰撞后才能把全部能量消耗掉。在每次相互作用时,飞行电子的运动方向将随之变化。因而初始粒子的轨迹是一些折线(图 2.1)。电子在两次电离作用之间的飞行时间约为 10^{-15} s。从原子中打出去的相当大的一部分电子(次级电子或 δ 电子)都具有几十电子伏的能量,它们也将参与激发和电离过程。次级电子平均能电离 2~3 个分子。它们能移动 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ cm,并在附近组成离子团。

部分次级电子以不同的角度迎着初始束流从材料表面飞出(图 2.2)。当工业加速器运转时,这些次级电子带走了一些能量,减少了辐射

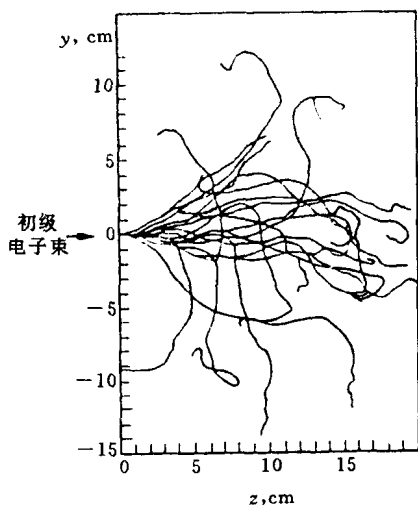


图 2.1 初始能量为 0.15 MeV 的电子发射到大气中时的典型径迹(用蒙特-卡罗法对空气的室温计算得到)

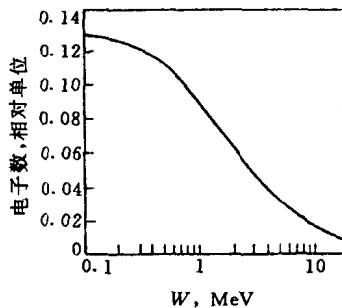


图 2.2 次级电子数和垂直射入铝表面的初始电子数的比值随初始电子能量的变化(厚靶)