

高 等 学 校 规 划 教 材
工 科 电 子 类

强流荷电粒子束 技术与应用

唐敦乙 林书铨 刘志敏



电子工业出版社

强流荷电粒子束技术与应用

4

11

高等学校工科电子类规划教材

强流荷电粒子束 技术与应用

唐敦乙 林书铨 刘志敏

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 简 介

本书全面系统的介绍了强流带电粒子束技术及应用。主要内容有强流带电粒子束的形成与控制、强流带电粒子束与固体相互作用时发生的现象及其利用;还介绍了强流带电粒子束的应用及设备。本书有助于读者认识和系统了解强流带电粒子束加工技术。

本书为物理电子技术专业的规划教材,也可作为电子材料与元器件、半导体物理与器件等专业的教学参考书,也可供机械工程、材料科学与表面科学等专业的工程技术人员参考。

高等学校工科电子类规划教材
强流荷电粒子束技术与应用

唐敦乙 林书铨 刘志敏

责任编辑 平 凡

*

电子工业出版社出版
北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)
电子工业出版社发行 各地新华书店经销
天津市双峰印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 15.5 字数:390 千字

1995 年 4 月第 1 版 1995 年 4 月河北第一次印刷

印数 600 册 定价 8.40 元

ISBN7 5053 2738-0/G · 217

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系按电子工业部的工科电子类专业教材编审规划,按照“电子物理与器件”教材编审委员会提出的要求编写而成,内容大体上分为强流束技术基础、强流电子束技术和强流离子束技术三大部分。强流束技术基础部分主要包括带电粒子的运动、束的形成与带电粒子和固体的相互作用等。强流电子束技术与强流离子束技术部分主要介绍它们在不同领域中的应用及特点。

强流束技术在 60 年代就开始得到重视,世界技术先进国家都大力开发并应用于工业生产,现在已在电子工业、光学与光导通讯、机械加工、冶金、塑料及装饰工艺等方面获得广泛应用。近年来强流束技术的发展更加迅速,但在我国还不为人们广泛知晓。国内虽已先后出版过少许专著与书籍,但均未全面的介绍强流束技术及其应用,也缺乏工科电子类适用的教材。编者的意图是想通过本书的出版,让广大科技人员认识和系统了解强流电子束与强流离子束技术,首先是物理电子技术专业的学生,让这一先进的技术在国内得到推广应用。在内容处理上我们注重基本原理与物理概念的阐述,也介绍实际应用的情况,力图体现科技发展与教学相互促进的思想。

强流束技术的发展方兴未艾,有关这方面的国际学术会议不断召开,新的内容正不断涌现,本书不可能将所有的有关内容全部编入,只能介绍基本的与目前工业上开始应用的内容。

本书第二、三、四、五、八章由唐敦乙编写,第一、六、七、九章由林书铨编写,第十章由刘志敏编写,全书由林书铨统编定稿。由东南大学童林凤教授担任主审。

由于强流束技术是一门多学科交叉的技术,牵涉学科面极宽,许多内容还在不断发展之中,加之编者水平有限,书中缺点、错误在所难免,恳切希望读者批评指正,在此,对主审与本书参考文献的作者致以衷心的感谢。

编 者

1993 年 7 月于上海交通大学

绪 论

在近代高科技的发展进程中,电子束、离子束、激光束(简称为“三束”)技术起了巨大的作用,其发挥作用的领域由材料科学、冶金技术扩展到大规模、超大规模集成电路、光电子集成等方面,近20余年来,离子束技术的发展更为迅速。

高速度的带电粒子携带大量能量早为人们所认识,但以高能带电粒子束作为加工的工具还是近40年的事。随着科学技术的发展,对加工手段的要求越来越高,加工精度越来越高,这些用传统的机械加工方法是不可能做到的,强流带电粒子束加工技术的发展成功的解决了许多精密加工的难题。

带电粒子束分电子束与离子束两大类,强流电子束在加工中都以高能量密度热源的形式进行工作。1949年德国的斯太格瓦尔德在0.5mm厚的不锈钢板上打出直径0.2mm的孔,开始了电子束加工的应用。1957年法国用电子束焊机焊接原子能反应堆燃料元件锆包套封口成功。这些成果,显示出强流电子束作为加工手段的潜在能力,引起各国科技界人员的重视,各国竞相开展强流电子束加工技术的研究。60年代初,电子束打孔、铣切、焊接、熔炼、镀膜等技术相继发展,并在工业生产中推广应用,促进了先进技术的发展。

60年代开始,电子束加工技术又在半导体加工领域中得到应用,并应用到集成电路的加工制造中,但这些应用都不是大功率的。

高能量密度大功率电子束加工都是将电子束的动能在材料表面转换成热能来进行加工的,其能量密度可高达 $10^7\text{W}/\text{mm}^2$,功率大小可到上千千瓦。由于能量与能量密度非常高,足以使任何材料迅速熔化或汽化。因此,不仅可以加工钨、钼、钽等难熔金属及其合金,还可对陶瓷、石英等材料进行加工。目前,难熔金属的精炼与提纯几乎全用电子束熔炼法。

电子束的能量密度很高,因此生产率很高,例如,板厚1.5mm的不锈钢板钻直径1mm的孔,每个只要15秒钟。板厚0.4mm的镍合金板,钻直径 $120\mu\text{m}$ 的孔,孔密度2000孔/ cm^2 ,电子束打孔速度 $45\mu\text{s}/\text{孔}$,这些孔其他方法无法加工。还有一些加工,也非电子束不可,例如厚200mm的钢板,用窄焊缝一次焊透也只有电子束可以做到。

电子束加工无机械力,故无机械变形、加工速度快、热量散失少、热影响区少、工件变形小,这些都是难得的。电子束加工控制方便,便于实现计算机控制与自动控制。电子束加工是在真空中进行的,因此工件不会氧化与污染,这也是许多加工方法没有的优点。电子束加工可以达到传统加工方法难以达到的要求,例如径深比1:20的微孔零件的局部热处理等等。由于电子束可作精密加工,可以将一些无法整体加工的零件,分成单元,精加工后拼焊。

国内从60年代初开始研究电子束焊接,随后开发了电子束熔炼,到八十年代,电子束热处理的研究与开发也迅速发展,电子束镀膜机,熔炼炉等设备均已能生产。

强流离子束是强流带电粒子束的第二大类,是利用高能离子束射到固体表面时产生的

溅射效应与注入效应来工作的。这二个效应是同时发生的，以那个效应为主，要看离子能量的大小。离子能量为 $50\sim 500\text{keV}$ 时是注入效应为主，注入可以改变工件表面结构与化学成分，形成传统冶炼方法无法形成的合金，改变表面的性质。溅射效应用来镀膜与做刻蚀，是现在最有前途的加工方法之一。溅射用的离子能量为 $0.1\sim 5\text{kV}$ ，国外现在离子镀膜方面仍在不断的开发新的技术。

19 世纪就已发现了溅射现象，但当时是要尽量防止它，随着科学技术的发展，开始利用溅射现象来制取薄膜。60 年代 Bell 实验室和 Western Electric 公司利用溅射方法制取集成电路的 Ta 膜，从而开始了在工业上应用的先例，随后各种镀膜方法的研究越来越多，现代电子工业中的镀膜几乎全是采用干式的方法。和溅射技术相关的溅射刻蚀技术随后也迅速发展，目前也成了电子工业中的关键技术之一。

离子注入的研究从 50 年代开始，首先用于半导体器件作为掺杂的手段，随后在注入物理、注入装置、注入应用方面开展了许多工作，取得了许多重要成果，推动了微电子工业的发展。随后发展到金属材料领域作为表面改性的一种重要手段，现代离子注入技术已向高分子材料的改性领域内扩展。

目前国外通常两年召开一次学术会议交流研究信息，国内也基本上两年召开一次三束学术年会，这些学术会议大大的促进了强流束技术的发展。

目 录

绪论	(1)
第一章 荷电粒子在电磁场中的运动	(3)
§ 1-1 电磁场对荷电粒子的作用	(3)
§ 1-2 荷电粒子束的偏转	(4)
1-2-1 静电偏转	(4)
1-2-2 磁偏转	(6)
§ 1-3 带电粒子在正交的均匀电场与磁场中的运动	(7)
§ 1-4 荷电粒子束的形成与控制	(10)
1-4-1 荷电粒子束的形成	(10)
1-4-2 荷电粒子束的引出系统	(12)
1-4-3 等离子体发射源的一些问题	(16)
1-4-4 引出极孔的散聚作用	(17)
1-4-5 多电极引出系统	(18)
1-4-6 单电极引出系统	(18)
1-4-7 多孔引出系统	(19)
1-4-8 荷电粒子束的控制	(20)
第二章 强流束加工的物理基础	(21)
§ 2-1 强流束和物质的相互作用	(21)
2-1-1 电子束和固体的相互作用	(21)
2-1-2 离子束与固体的相互作用	(22)
§ 2-2 在作用点上的能量转换	(24)
2-2-1 X射线、荧光与磷光的产生	(25)
2-2-2 二次电子发射和热电子发射	(28)
2-2-3 功率与功率密度	(30)
2-2-4 化学变化	(32)
§ 2-3 加工过程中热的产生与传输	(34)
2-3-1 热的产生	(34)
2-3-2 热的传递	(34)
第三章 电子束焊接	(36)
§ 3-1 电子束焊接的概况	(36)
3-1-1 电子束焊接的特点	(36)
3-1-2 电子束焊接的应用	(37)
3-1-3 电子束焊机的发展	(38)

§ 3-2 电子束焊接的过程	(39)
3-2-1 电子束焊接时熔池的形成	(40)
3-2-2 电子束焊缝的形成	(43)
3-2-3 电子束焊中输入能量的转换与熔池受力分析	(44)
§ 3-3 电子束焊接装置	(46)
3-3-1 电子束焊接设备的分类	(48)
3-3-2 电子束焊接机用的电子枪	(51)
3-3-3 电子束焦点的对准与跟踪	(56)
§ 3-4 电子束焊的理论分析	(58)
3-4-1 电子束焊机的工作参数对束流特性的影响	(58)
3-4-2 电子束参量的稳定性对焊缝的影响	(61)
3-4-3 电子枪结构与气压对焊缝的影响	(62)
3-4-4 影响穿透深度的因素	(64)
3-4-5 电子束振荡与扫描	(65)
§ 3-5 电子束焊接应用实例	(66)
第四章 电子束蒸镀技术	(68)
§ 4-1 电子束蒸镀特点	(69)
§ 4-2 电子束蒸镀的机理	(70)
§ 4-3 影响成膜质量的因素	(71)
§ 4-4 电子束蒸镀的加热法和装置	(74)
4-4-1 材料阳极型电子束加热法	(75)
4-4-2 电子枪型电子束加热法	(76)
§ 4-5 电子束蒸镀的工业应用	(80)
第五章 电子束热处理	(81)
§ 5-1 电子束热处理技术	(81)
5-1-1 电子束热处理与激光热处理的比较	(81)
5-1-2 电子束热处理的分类	(83)
§ 5-2 电子束热处理对设备的要求	(86)
§ 5-3 电子束热处理中的主要参数以及相互关系	(91)
§ 5-4 电子束热处理的应用	(93)
5-4-1 电子束热处理的优点	(93)
5-4-2 半导体材料的电子束热处理	(94)
第六章 电子束熔炼技术	(95)
§ 6-1 引言	(95)
§ 6-2 电子束熔炼工艺	(96)
6-2-1 铸锭	(97)
6-2-2 滴流熔炼	(98)

6-2-3 区域熔炼与拉单晶	(100)
6-2-4 制造颗粒与制粉	(101)
6-2-5 金属小块熔炼	(102)
§ 6-3 熔炼中的热分析	(103)
6-3-1 真空度的影响	(103)
6-3-2 能量平衡与热效率	(103)
6-3-3 电子束的运动	(105)
6-3-4 观察与控制	(106)
§ 6-4 电子束熔炼的现状和展望	(107)
第七章 离子束加工技术基础	(108)
§ 7-1 离子束加工原理	(108)
§ 7-2 离子束加工的应用	(110)
§ 7-3 离子束加工设备	(112)
7-3-1 离子源	(112)
7-3-2 真空工作室	(112)
7-3-3 充排气系统	(113)
第八章 离子束刻蚀技术	(114)
§ 8-1 离子束刻蚀原理	(114)
8-1-1 高能离子与靶的作用	(115)
8-1-2 固体表面溅射	(117)
§ 8-2 离子束刻蚀工艺	(124)
8-2-1 离子束刻蚀	(125)
8-2-2 离子束刻蚀的特点	(128)
§ 8-3 离子束刻蚀的应用	(129)
8-3-1 电子工业中的应用	(129)
8-3-2 试样制备	(131)
8-3-3 生物医疗应用	(131)
§ 8-4 离子束刻蚀设备	(132)
8-4-1 刻蚀加工对设备的要求	(132)
8-4-2 抽气系统组成	(132)
8-4-3 气体输入系统	(134)
§ 8-5 离子束刻蚀用的离子源	(139)
8-5-1 刻蚀机对离子源的要求	(139)
8-5-2 离子束刻蚀用的离子源工作过程	(139)
8-5-3 离子源中的阴极设计	(143)
8-5-4 引出电极	(147)
8-5-5 微波离子源	(147)
8-5-6 微波等离子体阴极离子源	(151)

第九章 离子束镀膜与离子镀	(155)
§ 9-1 材料的表面	(155)
9-1-1 表面与界面	(155)
9-1-2 气相与固相	(155)
9-1-3 薄膜的生长	(159)
9-1-4 膜与基底的结合和界面	(163)
§ 9-2 离子束镀膜	(164)
9-2-1 离子束溅射沉积	(165)
9-2-2 反应离子束溅射沉积	(168)
9-2-3 离子束直接沉积	(169)
9-2-4 离子束辅助沉积	(170)
9-2-5 离子束溅射沉积设备	(171)
§ 9-3 离子镀的物理原理	(172)
9-3-1 物理与化学过程	(172)
9-3-2 离子轰击的作用	(173)
9-3-3 离化率的讨论	(174)
9-3-4 镀料的气化	(175)
§ 9-4 离子镀的类型	(177)
9-4-1 离子镀的特点	(177)
9-4-2 直流放电型离子镀	(179)
9-4-3 射频放电型离子镀	(180)
9-4-4 活性反应离子镀	(181)
9-4-5 空心阴极放电离子镀	(182)
9-4-6 多弧离子镀	(183)
§ 9-5 溅射镀膜	(186)
9-5-1 离子轰击表面时的溅射现象	(188)
9-5-2 离子轰击与薄膜生长同时存在情况下的沉积	(189)
9-5-3 直流二极溅射	(190)
9-5-4 三极、四极溅射	(192)
9-5-5 射频溅射	(192)
9-5-6 磁控溅射	(194)
9-5-7 溅射镀膜的特点	(200)
§ 9-6 离子镀膜的应用举例	(200)
第十章 离子注入	(207)
§ 10-1 引言	(207)
§ 10-2 离子注入原理	(209)
10-2-1 注入离子的能量变换	(209)
10-2-2 离子束混合	(211)
10-2-3 注入离子的射程	(212)

10-2-4 注入离子的浓度分布	(214)
10-2-5 溅射与平衡	(215)
10-2-6 辐射损伤	(216)
§ 10-3 离子注入的工艺方法	(217)
10-3-1 离子直接注入	(217)
10-3-2 反冲注入	(217)
10-3-3 离子束混合	(218)
§ 10-4 离子注入设备	(218)
10-4-1 离子注入机的结构与类型	(219)
10-4-2 离子源	(220)
10-4-3 质量分析器	(221)
10-4-4 偏转、扫描和聚焦	(222)
10-4-5 靶室	(223)
§ 10-5 离子注入在无机材料中的应用	(223)
10-5-1 半导体材料的离子注入	(223)
10-5-2 硅酸盐材料的离子注入	(224)
§ 10-6 金属材料的离子注入改性	(225)
10-6-1 离子注入改善金属表面机械性能	(225)
10-6-2 应用举例	(226)
10-6-3 离子注入改善金属材料耐腐蚀与抗氧化性能	(227)
10-6-4 离子注入金属材料改性的机理	(227)
§ 10-7 高分子材料的离子注入	(229)
10-7-1 高聚物的电性质	(229)
10-7-2 高聚物的光学性质	(229)
10-7-3 离子与聚合物的相互作用	(230)
10-7-4 一种高聚物薄膜的注入结果	(230)
10-7-5 注入中材料的损伤	(230)
主要参考文献	(231)

绪 论

在近代高科技的发展进程中,电子束、离子束、激光束(简称为“三束”)技术起了巨大的作用,其发挥作用的领域由材料科学、冶金技术扩展到大规模、超大规模集成电路、光电子集成等方面,近20余年来,离子束技术的发展更为迅速。

高速度的带电粒子携带大量能量早为人们所认识,但以高能带电粒子束作为加工的工具还是近40年的事。随着科学技术的发展,对加工手段的要求越来越高,加工精度越来越高,这些用传统的机械加工方法是不可能做到的,强流带电粒子束加工技术的发展成功的解决了许多精密加工的难题。

带电粒子束分电子束与离子束两大类,强流电子束在加工中都以高能量密度热源的形式进行工作。1949年德国的斯太格瓦尔德在0.5mm厚的不锈钢板上打出直径0.2mm的孔,开始了电子束加工的应用。1957年法国用电子束焊机焊接原子能反应堆燃料元件锆包套封口成功。这些成果,显示出强流电子束作为加工手段的潜在能力,引起各国科技界人员的重视,各国竞相开展强流电子束加工技术的研究。60年代初,电子束打孔、铣切、焊接、熔炼、镀膜等技术相继发展,并在工业生产中推广应用,促进了先进技术的发展。

60年代开始,电子束加工技术又在半导体加工领域中得到应用,并应用到集成电路的加工制造中,但这些应用都不是大功率的。

高能量密度大功率电子束加工都是将电子束的动能在材料表面转换成热能来进行加工的,其能量密度可高达 $10^7\text{W}/\text{mm}^2$,功率大小可到上千千瓦。由于能量与能量密度非常高,足以使任何材料迅速熔化或汽化。因此,不仅可以加工钨、钼、钽等难熔金属及其合金,还可对陶瓷、石英等材料进行加工。目前,难熔金属的精炼与提纯几乎全用电子束熔炼法。

电子束的能量密度很高,因此生产率很高,例如,板厚1.5mm的不锈钢板钻直径1mm的孔,每个只要15秒钟。板厚0.4mm的镍合金板,钻直径 $120\mu\text{m}$ 的孔,孔密度 $2000\text{孔}/\text{cm}^2$,电子束打孔速度 $45\mu\text{s}/\text{孔}$,这些孔其他方法无法加工。还有一些加工,也非电子束不可,例如厚200mm的钢板,用窄焊缝一次焊透也只有电子束可以做到。

电子束加工无机械力,故无机械变形、加工速度快、热量散失少、热影响区少、工件变形小,这些都是难得的。电子束加工控制方便,便于实现计算机控制与自动控制。电子束加工是在真空中进行的,因此工件不会氧化与污染,这也是许多加工方法没有的优点。电子束加工可以达到传统加工方法难以达到的要求,例如径深比1:20的微孔零件的局部热处理等等。由于电子束可作精密加工,可以将一些无法整体加工的零件,分成单元,精加工后拼焊。

国内从60年代初开始研究电子束焊接,随后开发了电子束熔炼,到八十年代,电子束热处理的研究与开发也迅速发展,电子束镀膜机,熔炼炉等设备均已能生产。

强流离子束是强流带电粒子束的第二大类,是利用高能离子束射到固体表面时产生的

溅射效应与注入效应来工作的。这两个效应是同时发生的，以那个效应为主，要看离子能量的大小。离子能量为 $50\sim 500\text{keV}$ 时是注入效应为主，注入可以改变工件表面结构与化学成分，形成传统冶炼方法无法形成的合金，改变表面的性质。溅射效应用来镀膜与做刻蚀，是现在最有前途的加工方法之一。溅射用的离子能量为 $0.1\sim 5\text{kV}$ ，国外现在离子镀膜方面仍在不断的开发新的技术。

19 世纪就已发现了溅射现象，但当时是要尽量防止它，随着科学技术的发展，开始利用溅射现象来制取薄膜。60 年代 Bell 实验室和 Western Electric 公司利用溅射方法制取集成电路的 Ta 膜，从而开始了在工业上应用的先例，随后各种镀膜方法的研究越来越多，现代电子工业中的镀膜几乎全是采用干式的方法。和溅射技术相关的溅射刻蚀技术随后也迅速发展，目前也成了电子工业中的关键技术之一。

离子注入的研究从 50 年代开始，首先用于半导体器件作为掺杂的手段，随后在注入物理、注入装置、注入应用方面开展了许多工作，取得了许多重要成果，推动了微电子工业的发展。随后发展到金属材料领域作为表面改性的一种重要手段，现代离子注入技术已向高分子材料的改性领域内扩展。

目前国外通常两年召开一次学术会议交流研究信息，国内也基本上两年召开一次三束学术年会，这些学术会议大大的促进了强流束技术的发展。

第一章 荷电粒子在电磁场中的运动

§ 1-1 电磁场对荷电粒子的作用

荷电粒子在电磁场中会受到电磁场给予的作用力, 在电场强度为 E 的静电场中带电量为 q 的荷电粒子所受的力为电场力 F_e 。

$$F_e = q \cdot E \quad (1.1)$$

当 q 为正电荷时, 力 F 与电场强度方向相同, 如 q 为负电荷时 F 与 E 方向相反, 如电场的方向为 x , 用电位梯度来表示, 则

$$E = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad (1.2)$$

那么

$$F_e = -q \frac{\partial V}{\partial x} \quad (1.3)$$

由式 (1.3) 可知, 带正电的粒子受力的方向为 $+x$ 方向, 由高电位处向低电位处运动; 带负电的粒子受力方向为负 x 方向, 由低电位处向高电位处运动。

电场中荷电粒子受电场力而运动, 动能得以增加, 增加的动能大小为

$$\int_i |F_e| dx = \int_i +q \frac{\partial V}{\partial x} dx = +qV \quad (1.4)$$

上式表明, 动能的增加来源于位能的减少。如果带电粒子的初始速度为 0, 则在总电位差为 V 的电场中被加速后获得的速度 v 可由能量守恒定律求得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv^2 &= qV \\ v &= \sqrt{\frac{2qV}{m}} \end{aligned} \quad (1.5)$$

对于电子, 电荷量 $q=e=-1.6 \times 10^{-19}\text{C}$, 质量 $m=9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$, 若 V 以伏 (V) 为单位, 可得

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = 5.93 \times 10^5 \sqrt{V} \text{ (m/s)} \quad (1.6)$$

式 (1.5) 在计算电子束或离子束的能量时经常用到。当电位差 V 很高时便可获得带巨大动能的粒子, 用这些高能粒子可进行刻蚀、注入、焊接、熔炼等等加工。

荷电粒子在磁场中所受的力称为洛伦兹力, 洛伦兹力的大小为

$$\begin{aligned} F_m &= q|\mathbf{v} \times \mathbf{B}| \\ &= qv \sin(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \end{aligned} \quad (1.7)$$

式中 $\mathbf{v}$ 为带电粒子的运动速度, $\mathbf{B}$ 为磁场的磁感强度, $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})$ 为 $\mathbf{v}$ 与 $\mathbf{B}$ 之间的夹角, 由于

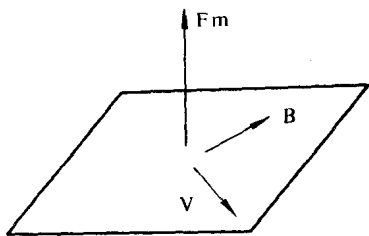


图 1-1 罗伦兹力

是矢量积所以力 F_m 的方向垂直 v 和 B 组成的平面，并与 v 、 B 构成右手螺旋关系，如图 1-1 所示。

由于磁场力 F_m 的方向与 v 相垂直，所以 F_m 的作用不改变带电粒子的运动速度，而只改变它的运动方向，由此可见带电粒子的动能在磁场中不会改变。

垂直于带电粒子运动方向的磁场力的作用构成了带电粒子束偏转的基础。

§ 1-2 荷电粒子束的偏转

用荷电粒子束作为工具进行加工时，束在工件上的斑点必须按照加工要求沿一定的图形运动，这样就要用静电场或磁场使带电粒子产生垂直原来运动方向的偏移，下面将分别讨论静电偏转与磁偏转。

1-2-1 静电偏转

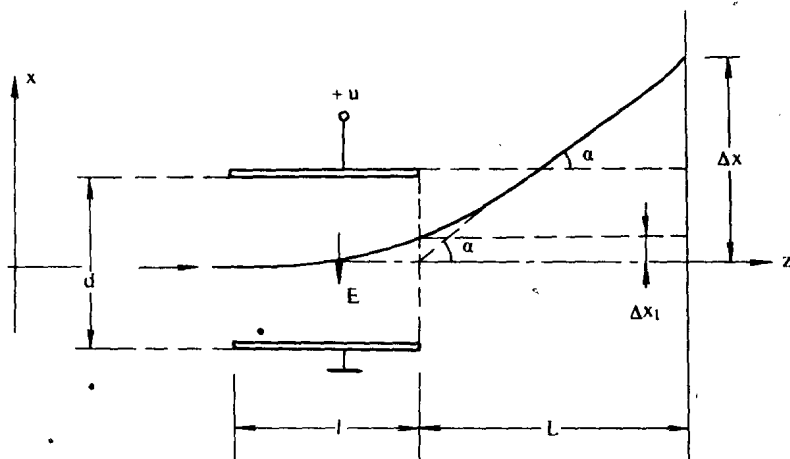


图 1-2 静电偏转

静电偏转用一对偏转极板来实现，以电子为例来说明，一对偏转板之间加有电压 u ，称偏转电压，电子受电压 u_a 的加速后以速度 v_0 沿 z 方向进入偏转板空间，受到偏转电压的作用产生 x 方向的运动，根据牛顿第二定律，带电粒子的运动方程为

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = eE \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \end{cases}$$

将上式改写成

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{e}{m}E \\ \frac{d^2z}{dt^2} = 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

作简化假设, 不考虑偏转板场在板边缘处的畸变, 解出以上方程式, 设初始条件为 $t=0$ 时, $z=0$, $v=v_0$, $x=0$, 可得

$$z = v_0 t \quad (1.9)$$

$$x = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} E t^2 \quad (1.10)$$

现在求束斑在工件上的偏转距离 Δx 。电子在偏转板长度 l 内运动时, 运动轨迹为抛物线, 在 $z=l$ 处, 在 x 方向的偏移量为 Δx_1

$$\text{如 } t=t_1 \text{ 时 } z=l, \text{ 则 } t_1 = \frac{l}{v_0}, E = \frac{u}{d}$$

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= \frac{1}{2} \frac{e}{m} E t_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{e}{m} \cdot \frac{u}{d} \left(\frac{l}{v_0} \right)^2 \end{aligned}$$

在电子跑出距离 l 后, 在到达工件的距离 L 内是在无场空间中作漂移运动, 不受力, 故为直线运动。其运动速度在 z 方向为 v_0

$$v_z = v_0$$

在 x 方向的运动速度为

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{e}{m} E t_1 \\ &= \frac{e}{m} \cdot \frac{u}{d} \cdot \frac{l}{v_0} \end{aligned}$$

在电子走完距离 L 打到工件上时, 所需的时间为 $\frac{L}{v_0}$, 电子在 x 方向的偏移距离为

$$\Delta x - \Delta x_1 = v_x \cdot \frac{L}{v_0} = \frac{e}{m} \cdot \frac{u}{d} \cdot \frac{Ll}{v_0^2}$$

总的偏移量为

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{e}{m} \cdot \frac{u}{d} \cdot \frac{lL}{v_0^2} + \Delta x_1 \\ &= \frac{e}{m} \cdot \frac{u}{d} \cdot \frac{lL}{v_0^2} \left(L + \frac{l}{2} \right) \\ &= \frac{lu}{2d u_a} \left(L + \frac{l}{2} \right) \quad (1.11) \end{aligned}$$

式 (1.11) 中 $\frac{l}{2d} \left(L + \frac{l}{2} \right)$ 这部分只与偏转系统的结构有关, 一旦加工完成就不可变更, 此外电子的加速电压 u_a 与偏转电压 u 的大小

均影响偏转量的大小, 式 (1.11) 是理想化后推得的结果, 实际上由于偏转板边缘处场发生了畸变, 使场沿 z 方向分布不均匀, 如图 1-3 所示, 有场区的有效长度增长, 所以偏转量

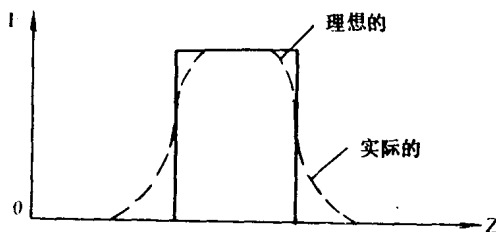


图 1-3 平行板中电场沿轴向的分布