

精密加工丛书

范玉殿 主编

电子束和 离子束加工



机械工业出版社

内 容 简 介

《电子束和离子束加工》是《精密加工丛书》之一，它的内容共分十章，全面地阐述了电子束加工和离子束加工的原理、设备、工艺及其应用。本书有助于读者对这两种新型加工技术获得初步的、但是比较全面的了解。

本书可供从事精密加工的工程技术人员参考，也可供高等院校有关专业师生阅读。

电子束和离子束加工

范玉殿 主编

*

责任编辑：韩庆 版式设计：霍永明

封面设计：姚毅 责任校对：熊天荣

责任印制：郭炜

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业登记出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 11³/₈·字数 252千字

1989年6月北京第一版·1989年6月北京第一次印刷

印数 0,001—1,290·定价：9.00元

*

ISBN 7-111-00789-1/TN·16

前 言

随着生产和科学技术的不断进步，精密加工技术有了更大的发展并得到广泛的应用。近几年来，精密机械和仪器仪表业对零件的加工精度和表面粗糙度提出了更高的要求。飞速发展的电子工业、航空工业、航天工业、生物工程、医疗器械制造等更离不开精密加工技术。为了适应形势的需要，总结、介绍国内外精密加工技术和先进经验，我们决定组织出版这套《精密加工丛书》。这套丛书的内容包括：精密磨削、精密研磨、精密电火花加工、激光精密加工、电子束和离子束加工、超声加工等。

本书为《精密加工丛书》的分册之一，涉及电子束加工及离子束加工的原理、设备、工艺和应用。

本书并不企图详尽讲解电子束和离子束加工的物理本质，而主要是介绍与加工技术密切相关的原理。

在设备方面，只对整机进行简单介绍，而着重讲解其中的关键部件——电子枪和离子源。

在工艺方面，除有专门章节加以介绍外，还配合各个应用实例加以阐述。

电子束加工和离子束加工已经渗透到各个工业部门，并在某些特殊领域取得独占地位。从事精密加工工作的读者，都希望了解其应用现状和前景。考虑到这点，本书除了比较成熟的实例外，还介绍一些目前正在进行的课题。

本书作者为范玉殿（前言、第六章、第八章）、林达（第

IV

一章、第二章、第四章)、曹鑫德(第一章、第三章、第五章)、金维新、尤大伟和孟宪光(第七章)、朱庄德(第九章)、张效忠(第十章)。

全书由范玉殿校阅。

目 录

前言

第一章 电子束加工简介	1
第一节 电子束加工的发展	1
第二节 电子束加工工艺	3
第三节 电子束加工的特点	4
第四节 电子束加工的意义	6
第二章 电子束加工的电子光学基础	7
第一节 电子的运动	7
第二节 电子枪	9
第三节 磁透镜和磁偏转器	19
第三章 电子束精微加工	38
第一节 高能量密度电子束加工	38
第二节 电子束精微加工机	43
第三节 电子束精微加工工艺	50
第四节 电子束精微加工的应用	55
第四章 电子束焊接、镀膜、熔炼和热处理	62
第一节 电子束焊接	62
第二节 电子束镀膜	82
第三节 电子束熔炼	86
第四节 电子束热处理	88
第五章 微细加工中的曝光技术	94
第一节 电子束曝光	94
第二节 扫描电子束曝光	98
第三节 投影电子束曝光	120
第四节 软X射线曝光	129

VI

第六章	离子束加工简介	137
第一节	离子束加工原理	137
第二节	离子束加工设备	139
第三节	离子束加工的应用	143
第七章	离子束刻蚀	147
第一节	离子束刻蚀原理	147
第二节	离子束刻蚀工艺	158
第三节	离子源	186
第四节	离子束刻蚀的应用	212
第八章	溅射镀膜	230
第一节	溅射镀膜原理	231
第二节	溅射镀膜工艺	245
第三节	溅射镀膜技术的应用	259
第九章	离子镀	266
第一节	离子镀技术基础	267
第二节	离子镀的类型	277
第三节	离子镀设备	286
第四节	离子镀的应用	290
第十章	离子注入	299
第一节	离子注入的特点	299
第二节	离子注入原理	302
第三节	离子注入装置	314
第四节	离子注入工艺	319
第五节	离子注入的应用	321

第一章 电子束加工简介

第一节 电子束加工的发展

电子束作为高能量密度热源，早已为人们所注意。但直至1949年，联邦德国的斯太格瓦尔德才在0.5mm厚的不锈钢薄板上，用电子束钻制出直径为0.2mm的孔；接着，于1952年研制出加速电压为125 kV、功率为2.5kW的电子束装置，并钻制出人造纤维喷丝板孔。1957年，法国原子能委员会萨克莱核子研究中心的斯托尔研制成功世界上第一台用于生产的电子束焊接机。原来用氩弧焊焊接的原子反应堆燃料元件锆包套封口，废品率达30%，而采用电子束焊接后，所制产品全部合格。这一成果，显示出电子束加工的潜在前景，引起了各国的重视。1959年，联邦德国蔡司厂研制出多种用途的电子束加工机，可以用来进行钻孔、铣切和焊接；接着，又研制成功加工宝石轴承孔的电子束打孔机和加工化纤喷丝板的异形孔加工机等专用设备。

与此同时，美、苏、日、英等国也相继开展了电子束加工技术的研究。60年代初，电子束打孔、铣切、焊接、镀膜、熔炼、区熔等技术，已成功地应用到原子能、航空、航天、电子和精密机械等部门中，促进了尖端技术的发展。目前，用电子束铣切加工，可制出缝宽仅 $10\mu\text{m}$ 的薄膜电阻器，而且，功率达1500kW的大型电子束熔炉也已经问世。

从60年代初开始，电子束加工技术又在新的领域内得到应用。这一新工艺即电子束曝光。随着微电子学的发展、

集成度的提高，要突破常规光刻工艺所达到的最小线宽—— $2\mu\text{m}$ 的极限，必须探索新的光刻工艺。受到扫描电镜高分辨率的启发，人们利用扫描电镜在光致抗蚀剂上进行曝光，终于得到了高分辨率的线条。例如华尔夫等曾曝光出线宽为 45nm 的单线条。

60年代中期，英国剑桥科学仪器公司的飞点扫描电子束曝光机研制成功，并作为商品投入市场。在1967年，首先由日本电子公司研制成JBX-2型扫描电子束曝光机。此后不久，美国和法国也先后研制成扫描电子束曝光机。

70年代人们开始致力于扫描电子束曝光机在微电子器件生产线上实用化的研究，以提高微电子器件的生产效率和成品率。此外，还开始进行成形束和变形束扫描电子束曝光的研究。全部扫描电子束曝光机都是用计算机控制图形的制作，同时，扫描方式采用了矢量扫描，研制出了硼化镧(LaB_6)电子枪、场致发射电子枪，以进一步提高图形分辨率，并开展了敏感性高而且反差好的电致抗蚀剂的研究工作。目前，扫描电子束曝光技术在微电子学工艺中制作掩模或器件所能达到的最小线宽，已小于 $0.5\mu\text{m}$ 。

我国对电子束加工技术的研究始于1960年。最初是从电子束焊接和打孔着手。60年代初，先后研制成电子束焊接机、宝石轴承电子束打孔机以及人造纤维喷丝板电子束打孔机。当时用我国自行研制的电子束加工机制造的玻璃喷丝板，曾用于生产。

60年代中期，我国除研制和生产电子束焊接机外，还研制出多种电子束熔炉、区域熔炼炉、镀膜机等设备。

70年代以来，随着我国半导体技术的发展，又进行了电子束曝光技术的研究。曾先后研制出电子束布线机、扫描

电子束曝光机、投影电子束曝光机、X射线曝光机，并研究了相应的工艺技术。近年来，我国又开展了半导体材料的电子束退火和金属材料的电子束热处理的研究。

第二节 电子束加工工艺

电子束加工是特种加工中的一个分支。它利用电子束的能量对材料进行加工，是完全不同于机械加工的一种新型加工方法。加工这一名词，不仅是进行尺寸、形状加工，还包括完成表面改性、曝光、焊接、镀膜、熔炼等工艺过程。

电子束加工工艺按其对材料的作用原理，可分为两大类。

一、电子束热效应的利用

这是将电子束的动能在材料表面转换成热能而对材料实施工加工。其中包括：

1) 电子束精微加工。可完成打孔、切缝和刻槽等工艺。这种设备一般都用计算机来控制，并且常为一机多用。

2) 电子束焊接。与其它电子束加工设备不同之处在于，除高真空电子束焊机之外，还有低真空、非真空和局部真空等类型。

3) 电子束镀膜。可蒸镀金属膜和介质膜。

4) 电子束熔炼。包括难熔金属的精炼，合金材料的制造以及超纯单晶体的拉制等。

5) 电子束热处理。这是电子束技术的重要新应用。包括金属材料的局部热处理以及对离子注入后的半导体材料的退火等。

上述各种电子束加工总称为高能量密度电子束加工。高能量密度的电子束由电子枪产生。电子枪的阴极发射出电子，

并会聚成电子束，在电子枪的加速电场（通常由15~175kV的直流高压形成）作用下，电子被加速到接近或达到光速的一半，从而得到很高的动能。电子束再经电磁透镜的聚束作用，会聚成为更细的细束。束斑直径为数微米至一毫米，而在某些应用场合下，束斑直径可小至数十分之一微米，因此能量非常集中。电子束的功率密度（即单位时间内输入单位面积材料中的能量）可高达 $10^7\text{W}/\text{mm}^2$ 。当电子束轰击材料时，能量大部分转换成热能，使材料局部区域温度急剧上升熔化，甚至气化而被除去，从而实现材料的加工。

二、电子束化学效应的利用

这是利用电子束代替常规的紫外线照射抗蚀剂，以实现曝光。其中包括：

1) 扫描电子束曝光。用电子束按所需的图形，以电子计算机控制进行扫描曝光。其特点是图形变换的灵活性好，分辨率高。

2) 投影电子束曝光。这是一种大面积曝光法，由光电阴极产生大面积平行束进行曝光。其特点是效率高，但分辨率较差。

3) 软X射线曝光。软X射线由电子束产生，所以是一种间接利用电子束的投影曝光法。

电子束曝光是利用电子束对电致抗蚀剂产生化学作用，一般不希望在材料表面产生热效应。电子束的能量应足以使材料曝光而又不产生熔化或热变形，否则，会影响曝光精度，甚至使工件报废。

第三节 电子束加工的特点

电子束的能量密度可高达电弧的一万倍，足以使被轰击

的任何材料迅速熔化或气化。这就易于对钨、钼或其它难熔金属及其合金进行加工。用电子束还可以对某些熔点较高、导热较差的非金属材料，如石英和陶瓷进行打孔或焊接。

电子束的能量密度高，因而加工生产率很高。例如，每秒钟可以在 2.5mm 厚的钢板上钻制 50 个直径为 0.4mm 的孔。涡轮叶片的蒸发冷却孔，其直径为 0.4mm，深度为 5mm，每个叶片共需 3 万个孔。目前只有电子束的加工生产率能满足它的加工要求。又如，厚度达 200mm 的钢板，电子束可用 4 mm/s 的速度一次焊透，这是目前其它方法所望尘莫及的。

电子束加工速度快，因而加工点向基体散失的热量少，所以工件热变形小；电子束本身不产生机械力，无机械变形问题。这些优异性能，对于打孔、焊接和零件的局部热处理来说，尤为重要。

电子束的能量和能量密度的调节，很容易通过调节加速电压、电子束流和电子束的会聚状态来实现。电子束还便于用偏转系统来使其偏转。电子质量极小，其运动几乎无惯性，产生偏转的力来源于磁场。调节励磁电流便可使电子束高速地进行光栅或矢量扫描。利用这些有利条件，易于对电子束实行数控。数控的电子束设备可以在发动机混油器上打出双向的斜孔；可以焊接任意形状的焊缝；或者为复杂的集成电路图形进行曝光。

电子束加工是在真空条件下进行的。因此带来了一些有利的因素，主要表现在良好的保护作用上。因为熔融材料在真空中不会氧化和污染，基于这一点，因此大多数工艺使用电子束加工。

电子束可将 90% 以上的电能转换成热能，而同样具有高

能量密度的激光，其电热转换效率通常不足10%。此外，电子束的能量集中，损失较小。例如，在进行厚板焊接时，用电子束焊接所需能量大约只有电弧焊接的2%。

电子轰击材料时，会产生X射线。不过，在设计电子束加工设备时，都已考虑到对X射线的防护。除此之外，电子束加工既不产生粉尘，也不排放有害气体和废液，对环境几乎不造成污染。

第四节 电子束加工的意义

作为一种新的加工工艺，电子束加工具有两方面特殊意义。

电子束加工实现了原有加工工艺难以达到的特殊要求。例如，电子束可以钻制径深比达1:10至1:20的微孔；还可钻制斜孔或弯孔；可制作线宽小于 $0.5\mu\text{m}$ 、集成度达256K以上的超大规模集成电路；可以对零件进行局部的、能量分布可控的热处理。

电子束加工改变了原有的某些设计思想。例如，原来很多对精度要求很高的复杂或巨型零件，耗费工时，甚至无法整体加工。现在可以将其分为若干易于加工的单元，在完成全部精加工甚至热处理后，由电子束将其焊为整件。用扫描电子束退火技术制造摄像管硅靶的大面积二极管阵，无需掩膜，缺陷可在退火过程中消除。这是一步完成的处理过程，无需复杂的对中和打定位标记，完全不同于原有工艺。

电子束加工目前不但已进入了各个加工领域，并已成为近代加工技术中迅速发展的独立学科。

第二章 电子束加工的电子光学基础

第一节 电子的运动

电子在电场中要受到电场力的作用。电场力是一个矢量，即

$$F_e = -eE \quad (2-1)$$

式中， E 为电场强度，也是一个矢量； $-e$ 为电子电荷，负号表示电子带负电荷。

由式 (2-1) 可以看出，电场对电子的作用力 F_e 与电场 E 的方向相反。电场是一个位场，电场中各点都有各自的电位。 E 反映了电场中的电位变化。若空间两点相距 ds ，它们之间存在电位差 $d\varphi$ ，则

$$E = -\frac{d\varphi}{ds} \quad (2-2)$$

当电子在电场的作用下，由点 A 运动到点 B 时，电场对电子所作的功为

$$W = \int_A^B F \cdot ds = e\varphi_B - e\varphi_A \quad (2-3)$$

式中， φ_A 和 φ_B 分别为 A 点和 B 点的电位。

由式 (2-3) 可以看出，功 W 不取决于电子的路径，而只取决于起点和终点的电位 φ_A 及 φ_B 。按照能量守恒定律，电子位能的变化应与其所具有的动能的变化相等，即

$$e\varphi_B - e\varphi_A = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2$$

式中， m 为电子质量； v_A 和 v_B 分别为电子在 A 点和 B 点的速率。

设 A 点的电位为零，并设电子在这一点速度亦为零，则上式成为

$$\frac{1}{2} m v^2 = e\varphi \quad (2-4)$$

这结果表明，电子的动能取决于它所在地点的电位。电子束加工正是依据这一原理，使电子在直流高压电场中获得足够高的动能。

电子在磁场中受到的磁场作用力

$$\mathbf{F}_m = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2-5)$$

式中， \mathbf{v} 为电子运动的速度（矢量）； \mathbf{B} 为磁感应强度（矢量）。

磁场作用力 \mathbf{F}_m 的方向同时垂直于 \mathbf{v} 及 \mathbf{B} ，使电子产生横向运动。图 2-1 用右手坐标系表示上述三个矢量的方向：食指表示磁场的方向；中指表示电子运动速度的方向；拇指表示磁场作用力的方向。

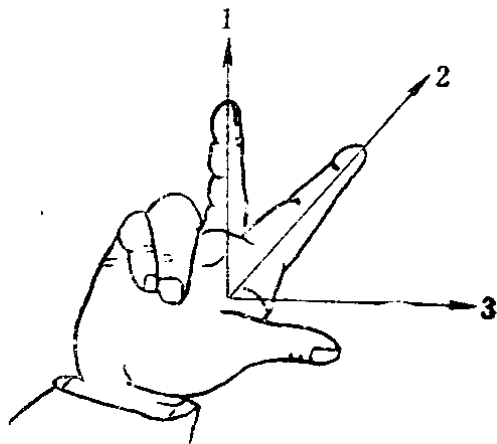


图2-1 右手坐标系

1—中指（电子速度方向） 2—食指（磁场方向） 3—拇指（磁场作用力方向）

磁场作用力的数值为

$$F_m = eBv \sin\theta \quad (2-6)$$

式中， θ 为矢量 \mathbf{v} 与 \mathbf{B} 之间的夹角。

与电场中的情况不同，磁场不能改变电子的能量，只改变电子的运动方向，这是非常重要的特点。电磁透镜及电磁

偏转系统正是利用了这一原理。

第二节 电 子 枪

一、热电子发射

阴极是产生电子束的电子源。电子束加工设备中，通常采用热阴极作为电子源。在外电场的作用下，被加热到很高温度的金属或某些化合物会发射电子，即热电子发射。

在金属内部，原子的外层电子不是固定于某一个原子，而是在整个金属内部作无规则运动。在金属表面附近运动的这种“自由”电子一旦离开金属表面，便受到镜象力的作用，而重新回到金属内部。然而，总会有一些能量较大的电子能够逃离金属表面。温度越高，逃离金属表面的电子数量越多。电子离开金属时，在金属内部对应的位置出现一个正电荷“镜象”，形成阻止电子逃离金属的镜象力。它反比于电子离开金属的距离。只有当电子具有足够的能量而远离金属表面时，镜象力才减弱到近似于零。这时，电子才是真正逸出金属。把镜象场的电位写作 φ_0 ，则电子逸出金属所需要的能量为 $e\varphi_0$ 。这是电子逸出金属所需要的最低限度的能量，称作逸出功。加热阴极，便可提供这一能量。

阴极发射电流密度（或称发射率） J_e ，可衡量阴极发射能力。 J_e 是用阴极发射面上单位面积所发射的电子流来度量的。理论推导出的热电子发射方程，即理查森-杜什曼方程为

$$J_e = AT^2 e^{-\frac{e\varphi_0}{kT}} \quad (\text{A/cm}^2) \quad (2-7)$$

式中， J_e 为发射电流密度 (A/cm^2)； A 为常数 [$\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$]，理论值为 60，实际上对于不同的材料其值不等； T 为阴极工作温度 (K)； $e\varphi_0$ 为逸出功 (eV)； k 为波耳兹曼常数，

$8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ 。

表 2-1 给出了电子束加工设备中常用的几种阴极材料的 A 和 $e\varphi_0$ 值。

表2-1 几种常用阴极材料的 A 和 $e\varphi_0$ 值

材 料	$A [A / (\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)]$	$e\varphi_0 (\text{eV})$
钨(W)	60	4.52
钽(Ta)	37	4.13
铼(Re)	52	4.94
硼化镧(LaB ₆)	60	2.66

二、阴极

由式 (2-7) 可看出, 阴极材料应具有尽可能低的逸出功和较高的熔点, 以便提高阴极的工作温度; 阴极材料的蒸发率低, 可获得较长的寿命。此外还要求阴极材料的机械强度高, 便于成形, 成本低。对电子束加工设备来讲, 还要求阴极能在较低的真空中工作; 冷态时可暴露于大气中; 耐离子轰击和耐高电压。

实际上, 能同时满足上述要求的阴极材料并不多, 最主要的还是表 2-1 所列的几种。

阴极按其加热形式分为直热阴极 (直接加热) 和间热阴极 (用电子轰击加热)。用于电子束工艺设备的阴极如图 2-2 所示。

三、电子枪的工作原理

电子枪有多种结构, 但均可归入两大类, 即高导枪 (高导流系数电子枪) 和高亮度枪。前者在较低的加速电压下可以获得大电流; 后者则能获得直径很小的束斑和很高的电流密度。高导枪主要用于微波管和电子束熔炼等设备中。此

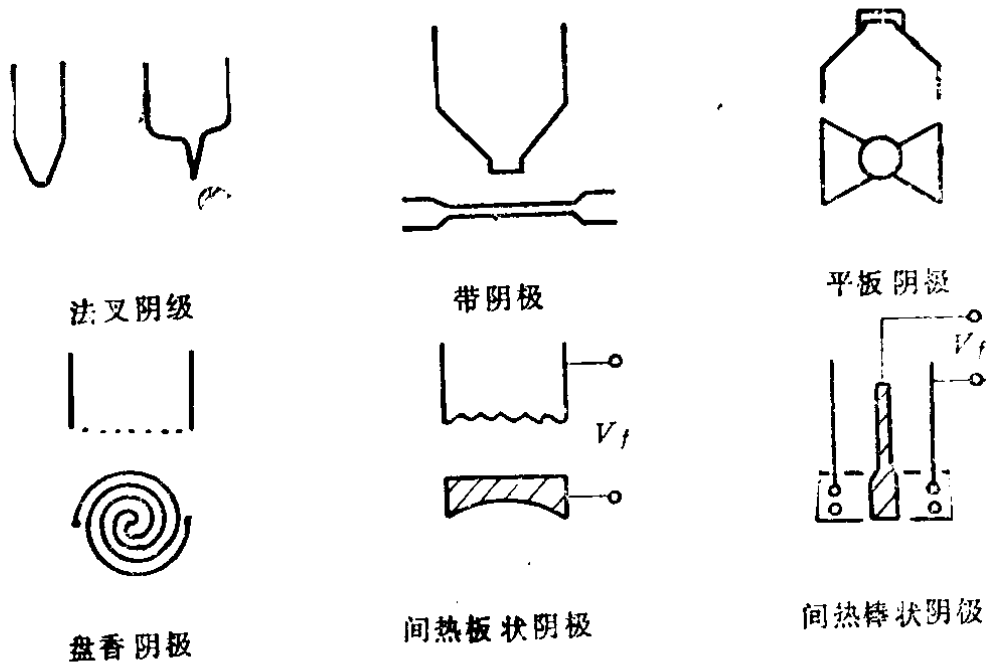


图2-2 电子束工艺设备中的阴极

外，电子束焊接机的电子枪导流系数虽不高，但其基本原理和结构仍属于此类。高亮度枪主要用于电子束管、电子显微镜和电子束曝光机等。电子束加工机亦属此类，不过电子束流要大得多。

1. 皮尔斯枪

皮尔斯枪是一种典型的高导电子枪，图 2-3 是这种电子枪的示意图。

下面以图 2-4 所示的平板二极管来说明导流系数的物理意义。

令平板二极管的阴极电位为零，阳极电位为 V_0 ，则在两电极间具有均匀电场，电位分布为一直线（图 2-4 中所示的直线 1）。阴极加热发射电子后，在两电极之间出现空间电荷，空间各点电位降低，电位分布曲线成为曲线 2。此时，极间各点电位均高于阴极表面电位，由阴极发射的电子受加