

电子束加工及其装置

(譯文集)

第一机械工业部 电器科学研究所 編
技术情报所

第一机械工业部技术情报所

1965

目 录

綜述

1. 电子束加工 J. Kelly (1)
2. 一台工业生产用的电子束实验室装置 R. W. Morgan (5)
3. 电子束加工机的試制 小野貞正 (7)
4. 电子束精密加工 木村博一 (13)
5. 每小时加工 600 顆宝石的双枪电子束钻孔机 (19)
6. 利用低电压的精密电子束焊接机 K. Aaland; R. Hill (21)
7. 真空工艺过程中的电子束
..... E. S. Candidus; M. H. Hablanian; H. A. Steinherz (25)

物理过程与計算

8. 电子在高真空内用于加工材料 E. B. Bas (32)
9. 在各种不同电压下的电子束过程 H. Schwarz (38)
10. 电子束加工热过程的理論研究 C. K. Crawford (44)
11. 恒定空間电荷假設下的电子束发散 B. H. Wadia (50)
12. 中气压下电子束发散的計算 B. H. Wadia (54)

电子光学設計基础

13. 实验电子束加工机的設計 P. A. Einstein; D. R. Harver; P. J. Simmons (61)
14. 研究試制 X 射线微量分析仪的一些問題
..... A. M. Соловьёв; B. H. Верцнер (67)
15. X 射线微量分析仪的电子光学設計 T. Mulvey (69)
16. 电子光学探針系統最佳工作状态的选择問題
..... Г. Г. Дутов; А. М. Соловьёв (72)
17. 电子束钻孔 K. H. Steigerwald (74)
18. 关于电子束加工、切割和表面加工工具的电子束功率密度、总功率和
电子束电流的限制 H. Schwarz (81)
19. 空間电荷限制下最佳聚焦的电子束功率密度 H. Schwarz (83)

主要設計的工作原理及設計方法

20. 用于电子束加工的三种新型射线发生系統 K. H. Steigerwald (89)
21. 电子束加工用的电子光学元件 E. Hahn (95)
22. 关于用在熔炼、焊接、蒸发和钻孔加工的电子束設計問題
..... E. B. Bas; G. Cremosnik; H. Lerch (100)
23. 阴极射线管的理論极限 D. B. Langmuir (109)

24. 一系列磁电子透鏡的成像性质 G. Liebmann, E. M. Grad (116)
25. 磁电子透鏡特性的統一描述 G. Liebmann (126)
26. 非对称磁电子透鏡中的場分布 G. Liebmann (131)
27. 磁电子透鏡中极靴飽合的影响 G. Liebmann (133)
28. 具有最小球差的对称磁式电子显微鏡物鏡 G. Liebmann (140)
29. 磁透鏡的数值計算 E. Dwrand (144)
30. 电子显微鏡透鏡的磁路 T. Mulvey (153)
31. 电磁透鏡 P. Durardeau, C. Fert (157)
32. 在电子束装置中利用带有消像散器的无像散双磁偏轉合軸系統
..... 金谷光一 (173)
33. 磁透鏡用的电磁消像散器 M. Watanade, T. Someya (182)
34. 校正电子显微鏡中二級和三級象散用的磁消像散器 ... 川胜久三; 金谷光一 (187)

供电控制系統

35. 80千伏高压稳定电源 ... В. В. Полцванов, А. В. Иубюров, Н. И. Пятаков (196)
36. 一个电感耦合的串联式电子管直流高压調节器
..... R. Pepinsky, P. Jarmotz (199)
37. 分辨率为 5 埃的电子显微鏡透鏡电源
..... В. В. Поливанов, Р. В. Погудина, В. В. Ильин (205)
38. 用于磁式电子显微鏡的稳流器 A. Strojnik (208)
39. 带电粒子束脉冲調制系統 (210)
40. 电子束加工机的高速程序控制 T. E. Price (217)
41. 电子束加工机的自动停止装置 栋方忠輔 (221)
42. 电子束加工装置 (畸形加工) 田中光一 (222)

測量技术

43. 电子束的实验研究方法 Н. С. Зиченко (224)
44. 高压不稳定性測量仪 А. В. Изъюров (235)
45. 电子显微鏡加速电压不稳定性度的測量 В. В. Козелкин, Б. С. Колчев (238)
46. 利用电子衍射作高电压絕對測量的可能性 Г. Г. Степаненков (240)

电子束加工

J. Kelly

近来,制造越来越小的元件,特别是在电子学领域中感到日益需要。很多地方要求制造10~20微米宽的缝和孔,且其边缘清晰度为几个微米,对一般制造工作来说,这样的尺寸是太小了,而对电子束加工来说却是可能的。在实际工艺中是把高速电子束聚焦到待切割材料的小面积内,当电子打到材料上时,其能量大部分以热形式损耗,这样,便可把一仟瓦或更高的能量集中到直径为5~10微米的点内,而获得 10^9 瓦/厘米²左右的能量密度,如此高的能量密度使束附近的靶面材料在几分之一微秒内升高到摄氏几千度,若施加的时间足够长,就可把材料蒸发掉或有时以小团小球状态迁走。

早在1907年 Pirani 已发现了电子束作高能密度源的可能性,他用电子束成功的熔炼了钨。此后很多人都应用了这种技术:如 Wartenburg (1907), Parsons 和 Cambell (1908), Tiede (1903) 等人。用电子束进行机械加工则还是近几年来才发展起来的,1938年 Von Ardenne 成功的在电子显微镜的膜片上钻了小孔,1942年 Borries 宣布取得电子束加工工艺的专利。约在1948年西德的 K.H.Steigerwald 开始对电子束加工机器感到兴趣,并在1953~1959年制成第一台电子束铣床。

电子束铣床的基本元件

这种装置的基本部件在图1(a)中画出。顶部为电子枪,它产生一细电子束,一般加速电压用10~150千伏,使电子的速度达光速的20~63%。工作时此电子枪很像三级电子管,阴极常用发针形钨丝,当加热到2700°C,就从它的尖端发射电子。围绕阴极是一个杯状电极(即栅极),正对栅极下面是阳极,阳极相对阴极保持高电位,电子的最终速度就受此电位控制。而束电流则受栅极电压控制,这种枪发出的束电流在正常情况下为0~20毫安。

在电子枪下某一距离处电子穿过一个透镜,并把电子束聚焦在下面的工件上。此透镜可采用静电场或磁场形式。聚焦点可看作是交叉点A的像或阴

极的像,所以聚焦点的大小在某种程度上决定于阴极尺寸和透镜的缩小率。

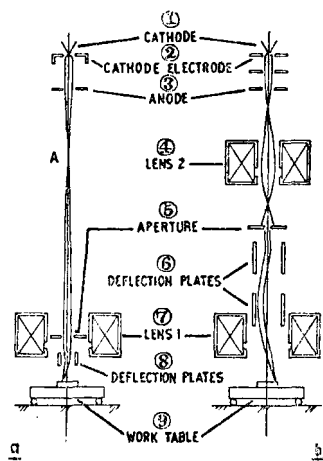


图1 电子束铣床的基本部件示意图。

左面, (a) 为最简单的形式。

右面, (b) 为更多用的机器。

- ①阴极 ②控制极 ③阳极 ④透镜2 ⑤光阑
⑥偏转板 ⑦透镜1 ⑧偏转板 ⑨工作台

在图1(a)聚焦透镜之下有一偏转系统,它由二块平行板来表示,与聚焦透镜一样,它也可以是静电的或电磁的。工件放在精密机械台上,因此把束偏转和工件的机械运动结合起来,就可进行大尺度的切割。

图1(b)中的方案较复杂,但可多方面的应用。其电子枪共有四个电极,这比三个电极好。用二个透镜代替了一个透镜后可能实现更大程度的缩小,而得到更小的焦点尺寸。偏转系统装在第二个透镜里,有两部分;第一部分使束偏离轴,第二部分使束对轴成一角度返回并穿过透镜中心。

目前发展情况

图2为 Mullard 研究室所制造的一台实验装置。Zeiss Hamilton 公司、日本物理化学研究所以及其它一些部门也作出了类似的装置。这些装置的性能大致相似。目前发展情况是:能形成的束尺

寸为5~10微米，并有足够的能量密度来加工任何一种可能加工的物件。图3是其工作能力的说明，

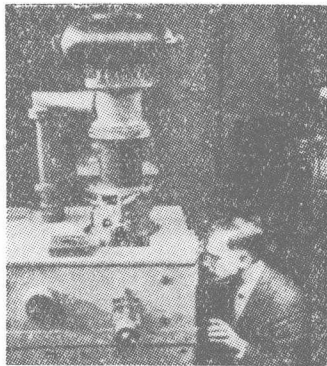


图2 一台实验电子束加工装置。高压接线在顶部的油箱内，操作者通过一台显微镜观察加工过程。

在1毫米厚的碳化钼上开出 250×200 微米的矩形孔，碳化钼的熔点约为 3900°C 。肯定可以形成更小的束尺寸，只是束密度要相应减小。表面加工所要求的能量比钻深而小的孔要小，这时可使光点小到1微米左右。*Mollenstedt* 把加工技术改进后成功

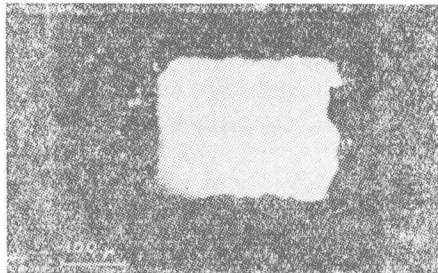


图3 碳化钼样品（熔点 3900°C ），样品厚度为1毫米，切割成 200×250 微米的缝，加工时间约为三分钟。

的将自己名字用电子束写成1微米高。还可以用电子束在工件上形成这种尺寸的电阻膜，然后再用普通方法或用分子束把不需要的物质蚀除，此处对这个题目不予讨论，读者可参考 *Shoulders* 的文章[1]。

电子束焦点尺寸较小时束偏转只限于几毫米，但若容许的焦点尺寸较大，则图2中的装置可得1厘米的扫描。前已指出，这不是一个严格的极限，因为作大尺寸切割时可把试样本身移动，事实上，工作台千分尺能使试样在几个微米的范围内定位。

为进行机械加工，常要应用短脉冲电子束，这样到达工件上的峰值能量可以很高，而平均能量却较低。实用中电子束的流通时间约为1~100微秒，而使材料冷却的时间却很长。调节脉冲工作比可控

制工件表面的温升，单个脉冲的宽度可控制束周围材料由于热传导而受热的面积。若用很窄的脉冲（1微秒或更短），加热面积就限于束本身的面积内，若用宽脉冲，受热面积就要比束尺寸大许多，在有些应用中，这一点很重要，因为束四周的材料实际上虽然不迁走，但结构会发生不希望有的变化。从上述可以证明，电子束技术的优点之一是整个加工过程有高精度，这也有利于它的自动化，目前有許多不同方案在考虑中。

加工过程

当电子束冲击工件表面时，随着电子的受阻减速，其动能大部分变成热能，部分能量损耗于二次电子发射、X辐射（如光）或被弹性散射的电子带走。转变成的热能可由表面辐射而被损失掉或通过传导进入材料内部，在所有的损耗内后一种常是最主要的。保留下来的有用能量可以加热固体，使束所接触到的材料熔化、蒸发，甚至分解。

这部分有用的能量并非全部在工件表面释出，因为电子要透入材料一段相当距离，透入深度随电子速度的增加而迅速增大，并近似地反比于材料的密度。表一为铝、铜、钼的透入深度。能量并不随着电子透入而均匀释出，而是在其行程终端时释出得更快些，这样一个作用应予着重说明，如此，在使用高速电子束时，大部分能量就在材料表面以内释出，引起固体的内部熔化，继而使表面层瓦解。

表 1

电压(千伏)	相对于光的速度	透入深度(微米)		
		铝	铜	钼
10	20%	1	0.33	0.27
50	41%	15	4	2.8
150	63%	97	22	14

整个铣切过程是极其复杂的，还没有充分了解。前曾指出，这不仅仅是简单的蒸发或沸腾，还有大量材料是以小团或小熔滴状态迁走的，有时这种小块的排出可以是由于上述表面下的熔化区而造成的。这些粒子常常像暴雨点那样出现，特别是在钻深孔时。来自下部的蒸发材料好像是凝集在靠近表面的孔壁处，由于孔常比束大10%，它并不立即再蒸发，此复层可不断增厚，直到再次截止住束而受到加工为止。这圈复层常以小粒雨点那样排出，这

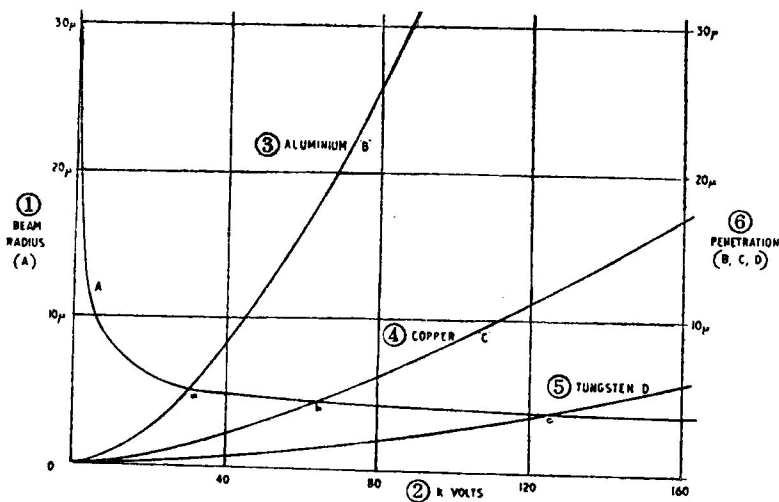


图4 电子束尺寸(A)和透入深度(B,C,D)随电压的变化关系。这里表示了铝、铜、钨的透入深度,它们代表电子在铝、铜、钨上失去90%的能量时的深度。

①束半径 ②束电压 ③铝 ④铜 ⑤钨 透入深度

可能是由于孔底出来的物质蒸气所致。绝缘体也与导体一样能被加工,但需要预热。绝缘材料由于带电而充上的电压,决定于达到稳定状态前的二次发射系数,有时必须在材料上复以导电层。

加工极限

加工的最明显的极限是电子束尺寸,它部分取决于阴极表面及几何缩小率,其次,从阴极发射的电子带有一定热速度,并由于发射密度有一定限制,故形成给定尺寸光点的电流值也受到限制(朗缪尔1937)[2],最后,如普通的光学透镜一样,所有的磁透镜和静电透镜都有像差。在电子束加工中球差是最主要的,这种像差使得束外缘的射线过聚焦,它和轴的交点比真正焦点更靠近透镜,结果加大了光点尺寸,加大多少则与在透镜处的束尺寸有密切关系。由于电子束加工中应用了高电压,故对束工作的另一影响,即空间电荷通常可以忽略。为把球差减到最小,应该用很小的束孔径角,但朗缪尔的极限电流对孔径角的要求却相反,结果采用折中方案,常用角度为 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 。由于这些作用而形成的光点尺寸是束电压的函数,在高压时可以获得束尺寸的最小值,此值决定于球差。图4中的曲线A表明了这一点,曲线表示典型工作条件下的束半径和束电压的关系。

束的大小不是电子束切割尺寸的仅有限制。上面已讲到过电子还要透入工件一段距离,但是当电

子在透入时也产生散射,扩散距离和透入距离在同一数量级。图4中的曲线B、C、D分别为铝、铜、钨中电子损失90%能量时相应的透入深度。显然,若要把切割尺寸减至最小,采用的束电压高于使透入距离和束半径为同一量级的电压是没有多大必要的。因此相应于a、b、c点的电压是使人们最感兴趣的,但常用的电压宁可比所讲的高些,因为此时的束虽扩散较大,但束的总能量却更高了。

切口边缘的清晰度

边缘清晰度部分取决于束尺寸和脉冲宽度,部分取决于束的功率。总的来说,要得到最好的边缘切割是相当慢的,用大能量时会导致粗糙的结果。边缘清晰度还在很大程度上依赖于在材料主要部分迁走后精制孔所需的时间,大多数金属在切口壁上要形成微滴,使得钻很小的规则的孔更为困难。图5是在25微米厚的钨上开直径为8~10微米的相当好的孔的照片。这个孔略呈锥形,其原因是:(a)束稍呈锥形。(b)由于从材料四周致冷不足,而使工件表面加工面积较大,(c)随着钻孔加深,束总会准直一些。避免这些因素的理想方法是采用比要求的孔或缝的尺寸小一个数量级的束,把它在整

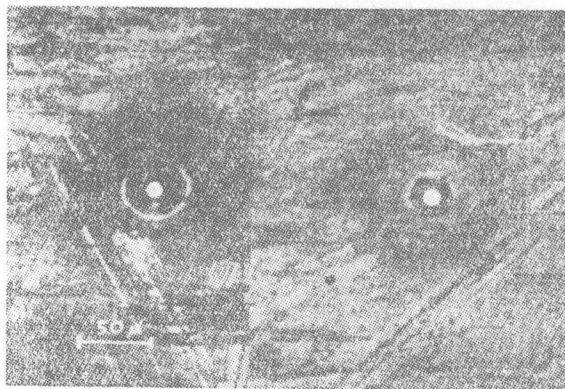


图5 在25微米厚的钨上钻直径为8微米的孔,图为束的进口和出口,左边是束进入的顶面,右边是同一孔的底面。

个待切割面上扫描。

应用

很多现代化器件如固体电路、磁或超导薄膜存储器等，都是通过高清晰度屏蔽罩用蒸发技术制成的，问题是要寻找一种可靠的、足够精确及价格合理的制造屏蔽罩的方法，直到最近才找到了相当满意的蚀刻技术，但由于元件尺寸的日益小型化，又需寻找一种更好的制造方法，电子束铣切可以满足大多数的要求。图6为一组屏蔽罩，它们是围着不需要的材料四周切制而成，不要求高清晰度，但必须在6毫米²内精确定出切口位置。制造这种屏蔽罩所需的时间在很大程度上与所用系统的自动化程度有关。例如，由于所要求的偏转和定位都必须用手来操作，这些屏蔽罩要化几小时才能作出。在完全自动化的系统上，切割工作直接由图形来控制完成，全部加工时间可缩到几分钟。

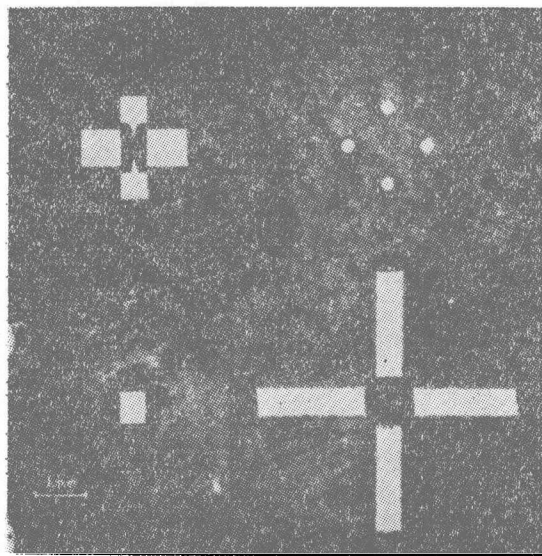


图6 四组屏蔽罩，沿着待切去的材料四周切成。良好的清晰度并不是主要的，而要求切口相对于参考线精确定位。

用蒸发方法不一定得到足够细的线，此时可用电子束来进行切割。如先在玻璃或云母基体上沉积一层镍铬铁合金薄膜，再用电子束把不需要的材料除去。图7为上述工作的一个例子，图中是一薄膜电阻器，沉积在玻璃上的薄膜已部分的被电子束加工掉，狭切口的宽度约为6微米。像这种表面加工能达到3微米的宽度，边缘清晰度为±0.5微米。

另一种应用是最近在RCA[3]的一篇文章中讲到的，其中讲到一台用铁淦氧薄片作的高速计算

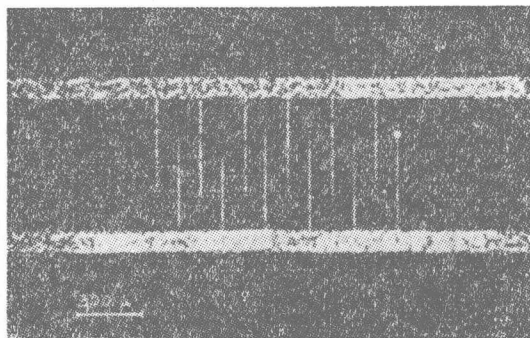


图7 真空蒸发在玻璃上的金属膜已被部分除掉，形成了薄膜电阻器。切口宽度约为6微米。

机用的存储器。为了构成记忆部件，用电子束通过铁淦氧体钻出几排小孔，再经由这些孔形成导体。若要大量制造这种元件，则可以造一台专用装置，例如钻一个孔后就按要求的距离移动铁淦氧片，这样一台装置每小时可钻3000个孔或更多些。

除了这些加工应用之外，一台通用型电子束加工装置还能用于微型焊接，可把导线焊到薄膜电路上去或焊接难焊的材料。

将来的发展远景和结束语

对这些装置的研究工作正以日益增长的速度进行，可能在几年之后就可制造出能切1微米或更小尺寸的装置。场致发射枪的发展有助于此，但它要求维持足够好的真空却带来了很大的困难。据说，莱塞提供了更加实用的加工方法，当然这种加工可能性是很令人感兴趣的，它可达到的最小光点在光波量级，即0.5微米左右，但这只有用很大的束角才能达到，这对表面加工来说尚能适用，但深加工却不行，另外的困难是偏转和控制问题。电子束装置的最大缺点可能是必须有一真空室，但这并不像所想像的那么严重，因为现在真空密封的应用已有很大的发展，抽真空所需的时间也不需很长，我们目前的装置只需4分钟就可抽至工作真空，适当的改进后还可进一步缩短时间。

参考文献

- [1] K. R. Shoulders "Advances in Computers, Vol. 2", Academic Press, P. 135, 1961.
- [2] D. B. Langmuir, "Proc. Inst. Radio Engrs." N. I., Vol. 25, P. 977, 1937.
- [3] R. Shahbender et al, "RCA Review" Vol. XXIII, No. 4, P. 539, 1962.

(金黛雯译自«British Communications & Electronics» 1964, 11, No. 1, 20-23 贺书文, 沈天孙校)

一台工业生产用的电子束实验室装置

Morgan W. Rider

L.R. Industries 公司在一年多以前就打算用蔡司电子束铣削机器加工小孔作为自己的业务。我们在去年六月份得到这台装置并在七月初投入运行。从那时起我们已经为一些客户完成了各种各样的任务。

蔡司电子束铣削机是由西德奥培科亨 (Ober-Kochen) 卡尔·蔡司公司制造的, 见图 1 所示。

从左到右我们可以看到高压电源, 示波器, 顶上有电子束柱体的工作室, 装有电子学线路的柜子和在最右角的机械真空泵的边缘。安装在工作室的背面是隔离变压器, 在图中没有表示出来。高压电源给出电压为 25 千伏到 150 千伏, 但目前我们还很少工作在 110 千伏以上。这台机组可以给出连续功率为 50 瓦、或短脉冲功率约为 500 瓦的束流。电子学线路的面板 (图 1) 由下到上各部分的作用如下: 最底下的面板是主开关和电压表。上面的一个面板是真空控制板。再上面的一个面板是使束在柱体中机械对准中心和控制束象散用的线路。其次的一个面板是控制灯丝电压和电子枪偏压的。这面板上也装有真空计。再其次的一个面板装有产生不同波形的线路, 这些波形用以程序控制不同的形状。

这程序控制是由不同的波形加到一组偏转线圈上来完成的, 这组偏转线圈安装在电子束柱体的底部, 并在工件的稍上面处。为了举例来说明如何实现程序控制, 可以想像有一个四极偏转器带有四个线圈, 其轴线指向一公共的中心并且相隔成 90° 排列。如果我们设想其中相隔 180° 的两个线圈串联连接并加上锯齿形电压, 那么通过轴线的公共交点的电子束将向场的垂直方向偏转并沿着一条直线前后扫描, 其速度取决于锯齿波的频率。如果我们在另外一组线圈上加上一矩形波, 这个波形产生的场将使电子束横过由锯齿波产生的直线前后偏转。如果这两个波形不是同步的, 那么电子束终将通过一个长方形的所有点, 这个长方形以锯齿形电压给出的偏转的长度和矩形波电压给出的宽度为界。如果有一个自动继电器系统接成这样一种状态, 即在这两

组线圈之间波形在交替互换 (譬如说在一秒的间隔内), 那么长方形在每一间隔时间将转过 90° 并将产生一正十字形。

所有由设备自动程序控制加工的图形是使用锯齿波, 矩形波, 和正弦波 (Sine Wave 原文误为 Sign Wave ——译者注) 形以及利用一个四极及六极偏转器系统等类似的方法产生的。用这个系统可以切割出若干种图形来, 包括丫形, 六腿星形, 三角形, 正方形, 普通的十字形, 马尔他十字形 (即卐形——译者注) 和在端部具有叠加短划的普通十字形。也可做出符点图案, 例如做成六点在一圆周上, 四点在一正方形的四角上等。其次的一个面板是控制电子透镜的, 最上面两个面板是控制脉冲发生器的。脉冲发生器的控制可触发束流断或通, 使具有从 50 周到 5000 周的可控频率及从 100 微秒到 5 微秒的脉冲宽度。由于脉冲变压器特性的限制不可能包括所有极限的频率和脉冲宽度的组合。束流的脉冲是设备的一个极其重要的特性, 因为它可以在短时间内得到一个强大的束流以用于切割。这样便可使材料在切割过程中和切割处紧靠着的区域不致受到严重的热影响。

让我们回到图 1 再看一看工作室和柱体。从柱体的顶部往下第一个灰色的部分包含有脉冲变压器, 第二部分是浸油的连接器室, 在其下端装有电子枪。其次一个深灰色部分是阳极室。下一个短节

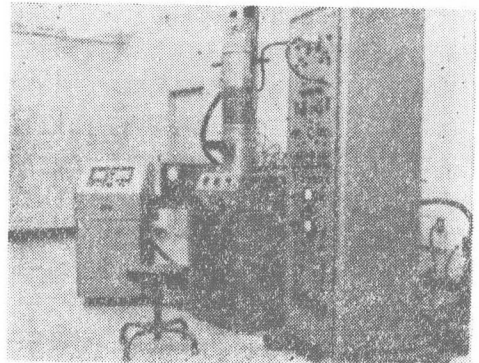


图 1

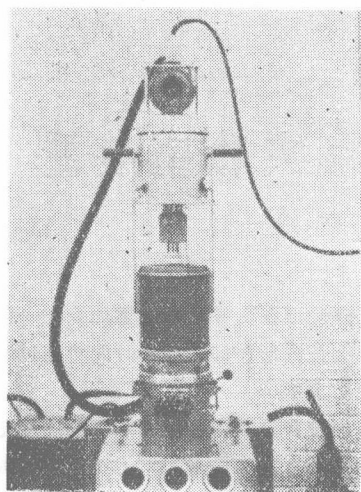


图 2

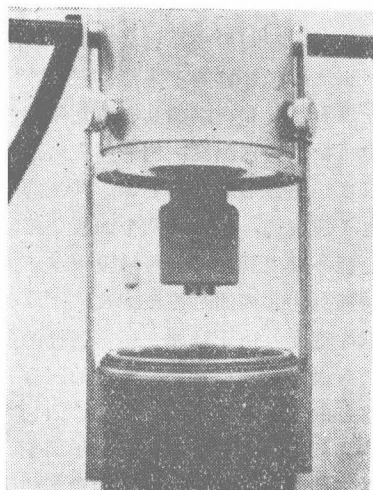


图 3

是闌孔室，最后一节在工作室的上面包含有光源和光学观察系统以及偏转机构。图 2 表示出整个阴极头被抬起支持在提升导轨上露出了电子枪。由此可以看出下部带有裙边的高压绝缘子，并能看到在绝缘子裙边下面的控制电极。可以看到脉冲变压器是装在阴极头的顶部。和脉冲变压器联结的线路是装在它的后面。图 3 是电子枪装配的特写照片并表示出控制电极已拿去以及阴极支持器和阴极突出在绝缘子裙边的下面。阴极是细小的髮针状灯丝突出在阴极支持器下面。

图 4 (上左)是由頂上看到拆下的阳极室内部，并可看出在中心的阳极小凸芯几乎是笔直指向图面外的。图 4 (上右)表示带有闌孔和联在一起的鉛屏蔽的闌孔支持器。图 4 (下左)表示观察器部分的頂部，显示出光源和显微镜目鏡的排列。图 4 (下

右)表示出观察器室的底部，給出装有偏轉系統的电子透鏡底部的视图。图 5 是工作室的视图，表示出支承工件的托架的排列。在这张照片上还可以看到若干連結引线和一個真空閥門。

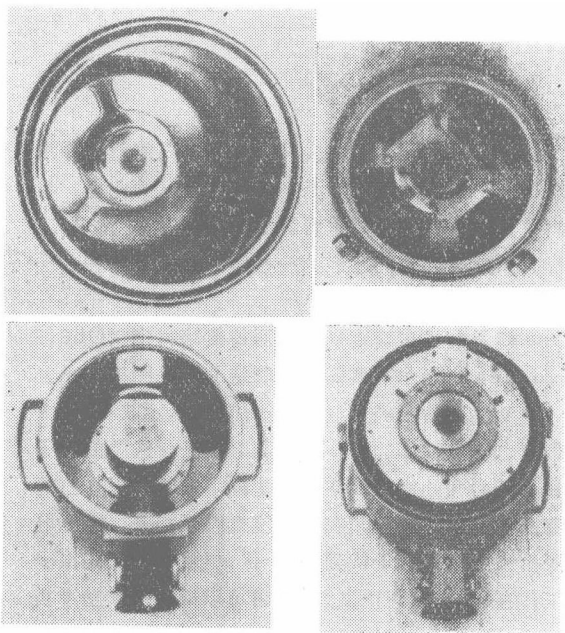


图 4

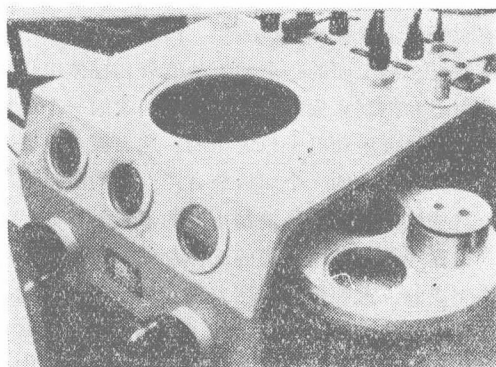


图 5

这台装置的一些技术性能如下：钻孔的深度約为1.6毫米，最小直径約为0.02毫米，孔宽度的公差和孔壁光洁度为0.005毫米。可以钻出的圓孔直径約为0.02毫米到0.05毫米。当然也可以建造能用程序控制加工2.5毫米以內圓孔的装置。

L. R. Industries 公司加工最多的工件是钻穿截面厚度在1毫米以內的孔。这台机器可以焊接薄片(大約为0.25毫米左右)，并且可以做相对粗糙的切槽或钻不通孔的活。目前这台机器不能钻具有方底的不通孔。几乎所有钻出的孔都带有一个喇叭

形的进口和一个喇叭形的出口，其斜边的角度约为 $1^{\circ}30'$ 。一般讲这台机器能钻出深度与孔径比为10:1范围的孔。实际上在钻孔径很小以及某些材料时可以达到更高的比值，甚至高达20:1。总之所有以上的技术性能只能作为参考，因为在特殊情况下



图6

可以得出一些不同的结果来。

遗憾的是我们没有收集大量的样品或加工的照片，但图6提供了一张喷丝头孔的照片。到现在为止这机器最满意的应用是在电子学元件的微小型化方面。这方面工作很多是保密的，所以也不能在此讨论。更感兴趣的应用之一是在半导体器件的极小面积上给以强的局部加热。

编者按：本文是作者在第二届电子束加工会议上的发言，发言后放映了用这机器实际钻孔的影片。影片是通过观察显微镜摄得的，加工的是一个喷丝头孔。被钻孔材料为300号系列的不锈钢，约有0.64毫米厚；电压为100千伏；电流为160微安；脉冲频率为1000周，脉冲宽度为20微秒。

〔王明译自《Proc. Second Symposium on Electron Beam Technology》，1960，25—31 沈天孙校〕

电子束加工机的试制

小野員正

一、緒 言

随着通讯机器结构的日益复杂，久已希望其部件小型化。近年来超小型元件或分子电子学的实用化，已从实际方面提出了许多具体问题，首先就是这些元件在制造过程中所必然遇到的细微加工方法的问题。

例如在切割薄膜电阻或在分子电子器件安装引线等加工中，都是要求以微米作加工的尺寸单位，用以往的加工方法是很难达到的。

但另一方面，在高真空中被加速的电子冲击物体时，其大部分动能将变成热能而使被冲击物体温度上升。这种情况在电子管工业中用电子轰击使材料去气，或在操作电子显微镜及X光机时是经常遇到的。

西德卡尔·蔡司公司对上述现象从积极方面进行了钻研，将之用于物体的加工，经过十多年的努力，终于制成了电子束加工机，并已向日本出口。

日本在电子束加工方面的研究，是以大阪大学工学部的菅田教授为中心，从1959年11月开始建立了包括研究所和生产厂在内的研究组织，并发表了

研究成果和交换了技术情报。

1960年夏，由日本电子工业公司给金属材料研究所（属于科学技术厅）制出了第一台电子束焊接机，并得到了有关的焊接实验数据。此后，由该公司加以改进后投入成批生产。

关于细微加工机由于结构复杂，约延迟了一年多直到1961年才由该公司与理工研究所共同合作制成，并进行了以钻孔为主的实验。

作者等在这种情况下感到非常有必要研究这种加工装置，尤其是用在半导体材料的细微加工方面，所以于1960年4月作者等便从使用者的角度，对这种加工装置进行了反复研究，当年12月便与日立公司交换了共同研究的协议书，并立即开始了试制。在参考资料不多的情况下，经日立中央研究所电子显微镜研究室的协助，终于在1962年2月完成了具有该研究所所要求性能的电子束加工装置。

该装置是供细微加工用的，与其叫作精密加工机不如叫作细微加工机更合适些。细微加工机的用途虽然非常有限，但在超小型元件或在半导体装置的生产中，却有其广泛的应用。

下面谈谈电子束装置的一般问题，同时也对作

者等試制的电子束加工机加以介紹。

二、电子束加工装置的特征

电子束加工装置比起有同样用途的机床有很多特点，其主要有：

1. 能量集中

从所周知，通过电或磁透鏡可以极准确而又容易的使电子束聚焦，这一性质对于以精密細微加工为目的的装置是非常重要的，与以往的加工方法相比，可称为突出的特点。

换言之，高速电子聚焦后，便可在微小的面积上集中較高能量，这对超小型元件或分子电子器件等細微加工是极其有效的手段。

表 1 所示为电子束加工热源与其它加工热源的大致比較。

表 1

热 源	最小加热面积 (厘米 ²)	最大能量密度 (瓦/厘米 ²)
焊 接 火 焰	10 ⁻²	10 ⁴
电 弧	10 ⁻³	10 ⁵
电 子 束	10 ⁻⁷	10 ⁹

由表中可知，电子束可以达到比焊接火焰或焊接电弧高一万或十万倍的能量密度，而获得极高温度，所以对高熔点的金属及化合物等有了广泛的加工可能性。此外，因其能量集中，故在焊接等加工中其宽度也是很窄的。

2. 加工温度容易控制

因为加工热源是电子束，故可通过对高速电子流的电气控制来准确而又容易的控制加工温度。如断开电子束，热源供应瞬时为零，在工件热容量范围内，可以进行驟热驟冷的操作，这就需要給特殊热处理的如江崎二极管* 等半导体装置或合金薄膜的制造，提供了极其优越的手段。

此外，因其温度易于控制，故在很大范围内可获得任意温度，这就意味着对高低熔点的物质，在其所需的温度下都可同时加工，这在电炉加热等方法中是困难的或是无法实现的。

3. 加工压力的机械应变小

在加工中电子束的压力一般是很微小的，因而

工件很少因加工压力而产生应变，也不会产生像一般机械加工那样的变形。

此外，由于加工工具是电子束，所以根本不必考虑加工工具的直接耗損問題，耗損的只是作为电子发射源的鎢絲而已。

对于工件沒有机械压力，这意味着对脆性材料也可加工。据作者等的经验，对粉末状的鋇氧化物，在常温下压固成块后即可自由的钻孔加工。可以預計像宝石等脆硬物质的加工，也会是一种有效的装置。

4. 加工所产生的污染少

整个加工是在真空度为 10⁻⁴~10⁻⁵毫米汞柱的加工室中进行的，因而几乎完全避免了像在空气中加工时的那些气体影响，即加工部分在高温时也不易氧化，因而不会因加工引起机械性质（如抗拉强度、弯曲性能等）发生显著的变化，这种特点說明，特别适合加工易氧化的金属及合金等材料。如果說象鋁、鈦、鉬等的焊接加工只有出现了电子束加工机后才可能实现，这并非言过其实。

此外，局部地除去氧化膜时，如果在真空中处理，很容易得到局部蒸发，比起化学方法其污染会显著减少。

总之，电子束加工装置可将能量高度集中，因而可作局部加工，同时其加工温度的控制容易并且范围广，所以对高低熔点的物质均可加工。此外，因加工压力可以忽略及在高真空中进行加工，对脆性物质及易氧化物质均可进行加工。

三、存在的問題

上面虽然介紹了一些該装置的特长，但实际上并不是沒有問題的，其概述如下：

1. 需要高真空

因为加工是用电子束，所以就需要高真空。按目前的真空技术來說，获得 10⁻⁴~10⁻⁵毫米汞柱的真空度并非难事，但为了对工件放出的气体和复杂传动机构的密封部分的漏气等現象采取有效措施，就需要抽速較大的泵，也就是說，为了减少加工束流或加速电压的变化，須使真空度严格地保持恒定，特别是真空度的降低所引起的放电，对加工精度有着决定性的影响，故須予以充分注意。

* 即隧道二极管的一种。

2. 加速电子需要高压

要想在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 毫米汞柱的高真空装置内, 为克服残余气体的影响而使电子束加速聚焦, 实际上最低也需一万伏左右的高压。尤其是细微加工机, 它需要 5~15 万伏的高压。

据作者等的经验得知, 如不用五万伏以上的加速电压, 则几乎不可能进行高精度的精密加工。这样的高压, 其所需的变压器是非常庞大的, 这无论是在使用上还是在制造上都是较麻烦的。

此外, 由于高速电子冲击物体时会产生 X 射线, 尤其是加速电压超过几万伏时, 会产生相当强的 X 射线, 其射线量也是不容忽视的, 因而操作人员的健康也是一个很重要的问题。

3. 加工位置的确定问题

因为电子束是眼睛看不见的, 这就带来了实际困难。如用大电流冲击时, 被冲击部分因发热而变色, 固然可以辨认冲击位置, 但当冲击电流较小时, 或对敏感物质不能用予先冲击的方法确认位置时, 这就需要对电子束及工件的位置采取其它措施, 尤其是高精度加工中就更为重要。希望今后能用简单的方法来准确地控制加工位置。

4. 蒸发物问题

由于在高真空中高温加热, 必然会引起工件的蒸发, 蒸发物附着在工件周围, 有时会得到与加工目的相反的效果。例如在制作半导体器件时, 如果发生这种蒸发现象, 就会给器件的电性能带来不良影响, 这就需要考虑用化学的或电化学的清洁处理方法。

这种现象, 不仅由于加工目的不同而成为相当麻烦的问题, 就是在一般情况下也须采取相应的解决方法。

5. 防止带电

如工件是绝缘物时, 往往会产生带电现象。这种现象会引起冲击位置的不准确, 同时电子束直径也会发生显著变化, 因而为了保证加工精度, 无论如何必须对此采取有效对策。

带电是一复杂现象, 不可能在任何情况下都可找到有效防止措施。

总之, 这种装置一定要在高真空、高电压下工作, 并要求对带电现象及蒸发物的处理采取适当的

措施。

四、应用装置

从上述的特点及存在的问题中, 大体上可以推测出电子束加装置的优缺点。

下面将扼要的介紹基于上述諸特点而具体化了的加工装置。

1. 焊接机和熔炼机

以焊接或熔炼为目的的加工机的共同特点, 除了特殊情况外, 一般都是用較低的加速电压 (2~3 万伏) 和較大的束流 (10 毫安以上)。

但也有像卡尔·蔡司公司所制的焊接机那样, 具有較高的加速电压 (最高 15 万伏)。据称在焊接中加速电压与熔深有关, 电压高则熔进深。

熔炼机用于难熔金属、合金錠或制造单晶等, 有时也用于高純度物质的区域提純。

2. 鍍膜装置

这种装置不需开坩埚蒸发, 因而对于严格避免杂质混入的半导体薄膜等生产, 效果极佳。

据作者等经验, 如蒸鍍硅时, 因为这是一种高熔点物质, 如果不用这种方法, 可以说是无法避免杂质影响的。

电子束蒸鍍方法分两种, 一种是在环状加热丝的中心放置被蒸鍍物; 一种是用电子束局部轰击被蒸鍍之材料。从避免杂质混入及局部升温的难易来看, 还是后一种方法較佳。

因为这种蒸鍍方法大多用于难熔物质或半导体材料, 故而希望蒸鍍容器内的真空度約在 10^{-6} 毫米汞柱左右, 或更高些。此外, 該装置对轰击位置或面积精度要求不甚严格, 因而可与焊接机一样采用較低的加速电压和較大的轰击电流。

3. 細微加工机

該装置的主要要求是能够极其精确地細微加工, 因而对电流的控制、冲击位置的确定, 防止真空度及电源发生变化等, 都必须既简单而又确实。

当然也要求电子束能充分聚焦, 因为装置中采用了几个磁透鏡, 所以加工电流大小必然会受到限制, 因而一般不用較大电流。也許是由于該装置的操纵机构比其它装置复杂, 或加速电压較高 (約 5 万伏以上), 到目前为止, 已发表过能实用的装置还只有西德卡尔·蔡司公司。日本电子工业公司正

与理工研究所合作，但目前尚处于試制阶段。

該裝置的突出特点是采用脉冲电子束，从而有效的提高了加工精度。冲击电子束是以脉冲状态还是連續的到达工件表面，这对冲击点周围溫度的分布有很大差别。如果是脉冲式的，其溫度上升是集中的，因而可以提高加工精度。

五、电子束加工机的試制

如前所述，用电子束作精密加工尚有許多問題尚待解决，因而电子束精密加工机严格的讲还没有得到实现。下面扼要的将作者所在公司（电信电话公司电气通信研究所）与日立公司中央研究所共同研究試制的細微加工机介紹如下。

1. 設計上的基本看法

首先有关人員討論确定的設計方面的基本看法大致說明如下：

（1）不急于自动化

討論的第一个問題是如何对待机构的自动化問題，按当时日立研究所的技术力量是可以作到相当高的自动化，但究竟那些部分需要如何程度的自动化还没有明确的依据，因而决定对于自动化的問題暫緩考虑。也就是說，因为該裝置的試制目的之一是确定电子束加工法的精度和范围，因而希望能早用簡而易行的手动操纵来进行加工試驗，以便对其性能加以充分探討，同时可以从中获得关于操纵如何自动控制的基础資料。当然我們也注意了各部件的机能或配备位置等問題，以便在必要时，随时可以实现自动化。

（2）据加工电流来划分裝置

所需的加工电流值据加工目的及工件的性质有很大不同，尤其是用于細微加工和用于焊接加工的电流，一般相差常达十倍以上。細微加工机要求数佰微安的电流，而焊接电流却需数安。像这样广泛的电流值很难在一个裝置內能够自由地互相協調地进行控制，而且电子束性质要求电子束能充分的聚焦，因而使問題更复杂化了。

作者等为了排除这个困难，采用了将裝置划分为小电流的細微加工部分和大电流的焊接加工部分，而电源采用共用方式。

（3）注意提高操纵性能

一般的想法是希望操纵簡單、性能优越，但两者同时滿足却非易事，也就是說高性能的裝置其操作往往較為复杂。作者等从使用的角度出发，在設

計时考虑了能連續观察工件加工状态、排气時間要短、試样的移动以及取換簡單等事項。此外，还注意到了在加工时能在很大范围内任意的控制加工电流值，并将电子束直径限制在一定范围内。其它如电流断路开关等也都经过了周密的设计。这类事看起来属于枝节問題，但在裝置实际运行时却很重要，这些問題的完备与否，会直接影响加工精度。

2. 規格与結構

該裝置虽然把加工机本身分成了小电流細微加工机部分和大电流焊接机部分，但所使用的高压电源等却是通用的。下面以此裝置的主体結構为中心加以說明。

裝置的主体主要由电子枪、会聚电子束用的聚焦透鏡、加工室等組成。細微加工部分还附有观察試样用的光学立体显微鏡及放大观察电子束状态的投影鏡和观察室等，此外，为了使电子束直径滿足加工要求，应用了二个聚焦透鏡。

对以上主要部分进一步詳述如下：

（1）电子枪

在細微加工机部分，主要的問題是将电子束充分聚焦，因而采用了即使加工电流很小也能提高电子束聚焦效能的結構。灯絲是直径为0.3毫米发針形鎢絲，比电子显微鏡的稍粗些，韦涅特电极等尺寸和結構也基本上与电子显微鏡常用的相同。

焊接机用的电子枪的鎢絲最大直径为0.5毫米，并且可以使用螺旋鎢絲，其尺寸比起电子显微鏡用的灯絲要大的多。

最高使用电压一般为10万伏，但对普通工件來說約几万伏就够了。特别是焊接机，它需要低压大电流，如何防止由于大电流所引起的韦涅特电极部分及其周围的溫度上升的問題，这比采用高电压的措施更为重要，因此我們避免了采用目前在这种高压加速裝置上常用的防雷击方式，而采用了易于散热的高压絕緣子外露方式。实际上从使用这些裝置所得到的結果来看，不一定非采取外露方式不可，防电击方式也有可能充分滿足要求。

（2）电磁聚焦透鏡

如果是仅仅为了得到聚焦的高速电子束，则电磁透鏡并非絕對必要，也就是說所需的聚焦程度不是很高时，适当地选择韦涅特电极結構及所加电压，便可充分滿足要求。作者等所制的細微加工机或焊接机，不仅需要高度聚焦的电子束，而也希望其直径可变范围广，因而前者使用二个电磁透鏡，

后者使用了一个电磁透镜。

这些透镜由于与光学观察系统有关，所以将其设计成长焦距的透镜。细微加工机所以采用两个聚焦透镜，目的是经两次会聚而能获得直径更小的电子束。

焊接机因要求加工电流大，其电子束直径也随之有某些增大。在该试制机上无疑也需要尽量使焊接宽度窄，所以对电流值与电子束直径兼控制才好，这就是采用一个聚焦透镜的最主要原因。

(3) 试样观察

在实际加工操作时，能否观察工件的被加工状态是极为重要的。尤其像没有自动化的该试验装置，有无观察试样装置，不仅关系着加工操作的难易，而也影响着加工精度。

基于上述理由，以细微加工为目的的小电流装置部分，应用了最大为160倍的双目立体显微镜来直接观察工件表面。

焊接机部分因经常要反复操作，并且加工精度要求也不高，所以采用了直接从试样室的正面和侧面玻璃窗上用肉眼观察的方法。

(4) 加工室

设计加工室的主要问题是：在真空系统外的操作，能得到怎样的工件移动精度。作者等是利用了光学显微镜的载物台，对于这种要求严格的细微加工机，获得了相当满意的结果。该载物台可以很准确的单独或同时进行平面移动（±10毫米）、上下移动（±10毫米）360°的旋转运动及45°的倾斜运动，这些运动可以在电子束冲击过程中进行。

工件运动是用手操作的，平面移动可容易地实现几微米左右的定位。这些结构部分的壳体是用青铜铸成的。

焊接机部分的试样运动，由于其加工精度要求不高，工件也较大，所以是用电机驱动的。它可作360°的水平旋转；纵向±80毫米、横向±40毫米的平面移动，均由电机独立控制，其移动速度决定于电机转速。所使用的作平面移动的电机最大转速为每分钟4000转，试样移动的最高速度为每分钟1500毫米；试样的圆筒状旋转机构像一般车床一样是用卡盘支承，它是用手操作的。与细微加工机相当的试样的上下运动是通过电子束焦距的变化来实现的。

此外，在细微加工机的加工室中，另一具有特点的机构是与电子显微镜中的一样，是由试样交换室进行试样的取换。

(5) 电气系统

如前所述，电流密度大时电子束直径必然会粗，因而要想使电子束直径细，就必须尽可能使电流小，从实用上的加工速度来看，为使电子束直径变小而用降低束电流的办法，并非上策。

此外，还必须考虑到所观察到的电子束直径与有效直径（加工宽度）之间，由于试验及加工速度的关系而会产生很大的差别。

电气系统的主要规格见表2

表 2

名 称	细 微 加 工 机	焊 接 机
加速电压	10~100千伏	10~100千伏
最大发射电流	1毫安	30毫安
电子光学系统	电磁透镜两级缩小	电磁透镜一级缩小
电子束最小直径	< 3微米	~50微米
电子束最大电流密度	>10安/厘米 ²	>10安/厘米 ²

除上述之外，装置的重要部分还有高压电源及排气系统，因在这次试制中这些部分没有采用新方案，故仅作扼要说明如下：高压电源变压器中用硒

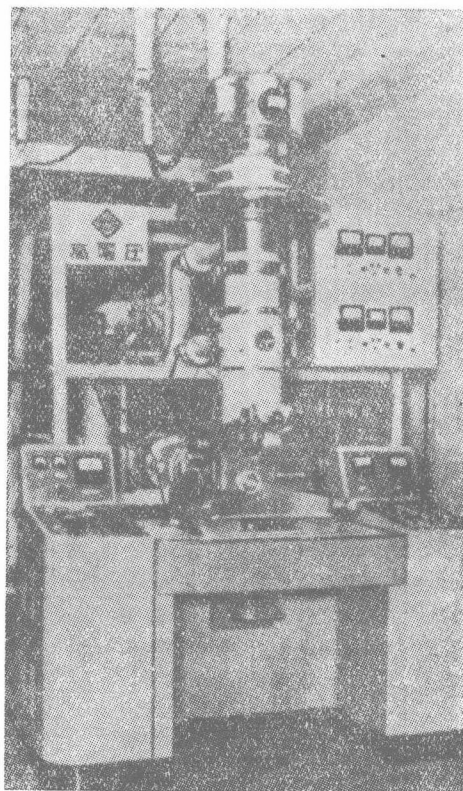


图1 细微加工机

整流器进行整流，虽然容量有10万伏30毫安之大，但制成的体积却是較小的。細微加工机的排气系統用了二台油扩散泵（102毫米和152毫米），三台油旋轉泵（每台抽速为250升/分）。焊接机的排气系統用了二台油扩散泵（203毫米和102毫米），一台油旋轉泵（抽速为1500升/分）。

图1和图2为試制的細微加工机和焊接机的外觀照片，排气系統与高压电流等都装配在主体的背面。

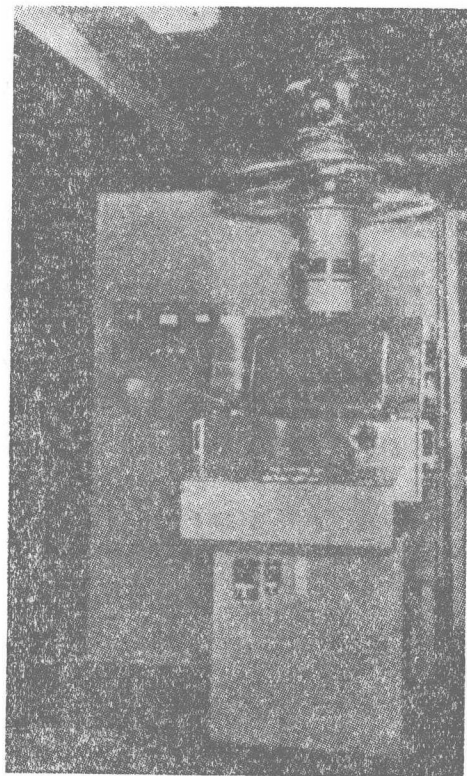


图2 大束流焊接机

参 考 文 献

(A) 蒸鍍方面

- [1] H. M. O'Bryan: P. S. I. 5, 125 (1934).
- [2] H. J. Smith: J. Sci. Instr. 26, 378 (1949).
- [3] J. Brochard etc: J. Phys. Radium, 12, 632 (1951).
- [4] N. Milleron: Fourth National Symposium on Vacuum Technology Transactions, 148 (1957).
- [5] R. M. Voitenko etc: Solid State Physics, 1, 2264 (1958).
- [6] Hart: Fifth National Symposium on Vacuum Technology Transactions, 230 (1958).
- [7] J. C. Kelley: J. Sci. Instr. 36, 89 (1959-2).

(B) 焊接方面

- [8] G. Burton etc: Amer. Mach., 103, No. 4, 95- (1959-2)
- [9] G. Burton: Weld. J., 38, No. 10, 401 (1959-10).

(C) 打孔、切割方面

- [10] 昭32-7198
- [11] 昭34-4247
- [12] R. T. Berg: Amer. Mach., 103, No. 5, 115 (1959-3).

(D) 电子学方面

- [13] Oliver C. Wells: Proceedings Third Symposium on Electron Beam Technology, March 23~24 (1961).
- [14] R. Haauind: Electronic Design Sept, 12~13. (1961).

(艾玉輝譯自《真空》(日), 1962, 5. No. 9, 13-20;
王振明校校)

电子束精密加工

木村博一

前言

如果被加速的电子向某一物体撞击，则几乎在一瞬间，电子的动能将在该物体的表面薄层中转变为热能。首先把这种现象应用到材料加工上的是德国。其后，美国、日本等国也相继展开了广泛的研究，预料这种技术的工业应用将会有进一步的发展。

拿焊接焰或电弧与电子束加工相比，则后者的能量密度要高得多，可达 10^9 瓦/厘米²。这一点是电子束加工的最大的特点。电子束的强度、形状及其轰击位置不但能够精确地保持不变，而且因为电子没有惯性，所以控制也极容易。此外，电子与离子不同，电子束不具任何化学性能，而加工又是在真空中进行的，所以被加工材料所受到的沾污极少。

电子束加工的应用范围极广，包括退火、淬火、合金化等热处理工艺以及材料的焊接、蒸发涂层、材料的钻孔、切割等机械加工。特别当应用了由电子显微镜所发展了的电子光学理论和技术以后，就能实现在几个微米到几十个微米的间距内进行钻孔、切割等精密加工了。就机构而论，电子束精密加工与电子束熔解、焊接及蒸发涂层等大电流加工是有区别的。本文仅讨论有关电子束精密加工的问题，至于电子束熔解、焊接等方面的问题，则将另文论述。

电子束精密加工装置的结构

1. 装置

如图1所示，电子束加工装置的结构大致分为以下几个部分：真空抽气系统、高压电源、透镜电源以及对电子束和加工物件的控制设备等。装置本体包括电子枪、电子透镜和加工室等几个部分。电子枪一般由灯丝、栅极及阳极组成，而栅极则呈平板形，也有用远聚焦的 Steigerwald 式电极或凹形电极（图2）。远聚焦电极的焦点较长，故特别对厚的加工件有利。加工试样所需电子流的密度，可用下式表示：

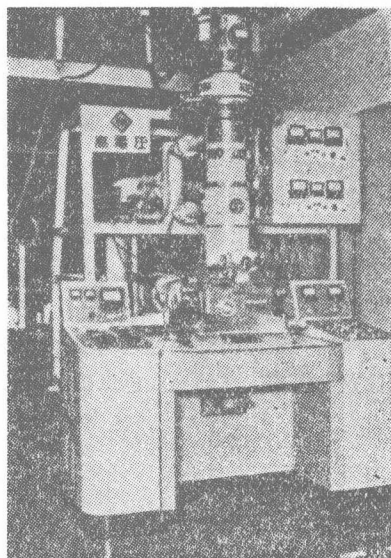
$$j = R\pi\alpha^2$$

式中： R ——电子枪亮度（Richtstahlwert），

α ——试样上电子束的入射角

Langmuir 用下式表示最大亮度 R_{max} ，即：

$$R_{max} = \frac{j_c}{\pi} \frac{U}{\Delta U}$$



电子束精密加工装置的外观

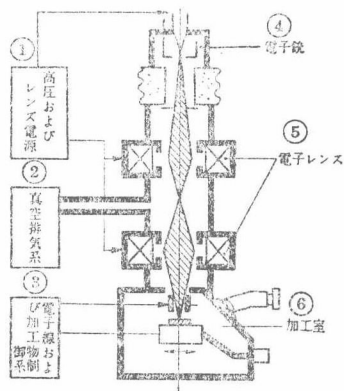


图1 电子束加工装置结构

①高压及透镜电源②真空抽气系统③电子束及加工工件控制系统④电子枪⑤电子透镜⑥加工室。

式中 j_e 为阴极电子流密度, U 为加速电压, $\angle U$ 为逸出电子的初速。如用钨丝做阴极, 使用温度为 2800°K , 则 $j_e=305\text{安/厘米}^2$, $\angle U=0.24\text{电子伏}$ 。当电子加速电压为 50 千伏, 则 $R=2.3\times 10^5\text{安/厘米}^2\cdot\text{单位立体角}$, 由此当试样上的入射角 $\alpha=10^{-2}$ 弧度时, 试样面上的电子流密度按上式可求得 $j=23\text{安/厘米}^2$, 而所获得的能量密度为 10^6瓦/厘米^2 。故而阴极的亮度 R 这一参数具有非常重要的意义, 它还决定于电子枪的结构尺寸以及栅偏压的大小。图 3 是图 2 中第 (3) 种型式的栅极的亮度 R 与电子束像斑之间的关系实测曲线。图 3 中所示交叉区域的直径约为 40 微米至 100 微米, 所以要想获得直径几微米至数十微米的电子束就必须把它缩小到 $1/10$ 乃至 $1/100$ 。为此我们采用了电子透镜。电子透镜有静电透镜和磁透镜两种型式, 其中以磁透镜较适宜, 这是因为不论当真空度下降一个数量级或当加速电压增高时磁透镜都能稳定地工作, 而且考虑到非点像差和提高工作的精度也以磁透镜为有利。

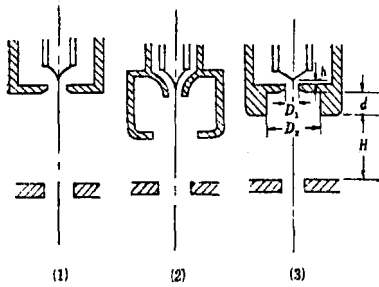


图 2 各种型式的栅极
(1) 平板型 (2) Steigerwald 型 (3) 凹型

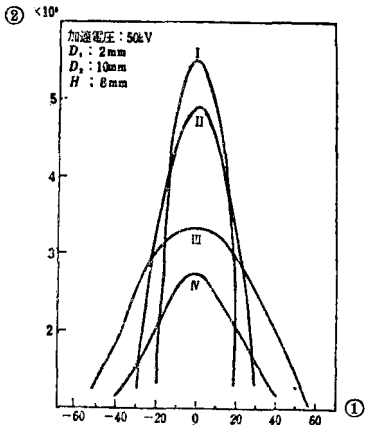


图 3 象斑的直径与亮度的关系曲线
①象斑交叉的直径 (μ)
②单位立体角内的电子流密度 R

静电透镜所产生的各种像差, 会使试样上电子束像斑的形状及亮度分布发生畸变。特别是透镜本身的球差、色差、像散以及基于轴心线调整不良所引起的彗形像差最成问题。关于这些问题, 用电子光学的理论就能究其所以, 这里不再论述, 但我们必须明确一点, 即电子透镜的强度和透镜的结构以及电子束像斑的缩小率都是由这几种像差来决定的。至于高压电源与透镜电源的稳定度, 则决定于加工所要求的精度。精密加工所要求的电压稳定度应达到 10^{-3} 至 10^{-4} 。如果要求加速电压能在大范围内变动, 像斑直径与电子流密度能大幅度改变, 则电子透镜应采用两级缩小的系统。第一透镜为短聚焦式, 将电子束的直径先缩小到几十分之一, 而后再由第二透镜将第一透镜所构成的像面投射到试样表面成像。另外, 作为实验之用也有装置第三透镜对像斑的形状进行控制的。图 4 是在两级缩小系统中将电子束聚焦在试样表面上成像的第二透镜的焦距 (原文误为第一透镜, 译注) 与第一透镜 (原文误为第二透镜, 译注) 的焦距的关系曲线。从图可知, 当第一透镜的焦距为某一定值时 (图示为 $f_1=80\text{毫}$

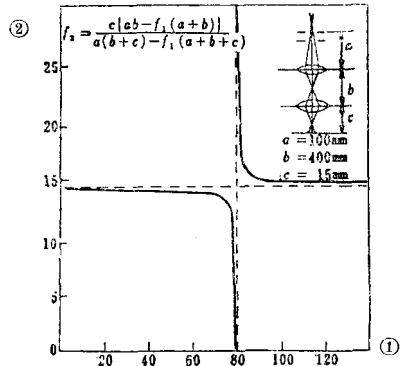


图 4 第一第二透镜的焦距之间的关系示例

- ①第一透镜的焦距 f_1 (mm)
②第二透镜的焦距 (mm)

米), 除接近于该值的数据以外, 第二透镜的焦距与第一透镜的焦距几乎不发生什么关系。这样根据要求将电子束缩小, 并使具有足够亮度而后引入加工室。又因要求能在加工室外观察试样的加工情况, 所以采用了放大倍数为几百倍的光学显微镜或电子束扫描显微镜, 将试样充分地放大, 以便进行观察和监视。扫描显微镜的像是这样获得的: 先将电子束的强度减弱并用 X, Y 两对偏转板使电子束沿试样平面扫描, 然后将从试样平面上反射出来的电子加于一闪烁器或者直接接到一电子倍增管上而在另一个示波管上形成亮度变化的图形。照片 1 就是扫