

A technical diagram illustrating an electron beam processing system. At the top, a vertical tube is shown with a dashed line representing the electron beam's path. Two cross-sectional views of the tube are shown: one on the left and one on the right, both featuring a grid-like structure. Below the tube, a rectangular box represents the workpiece, with a dashed line indicating the beam's focal point. The beam is shown as a solid line that converges and then diverges, creating a star-like pattern of lines on the workpiece surface. The entire diagram is rendered in white lines on a dark background.

电子束加工

上海市科学技术编译馆

电 子 束 加 工

上海紡織科學研究院編

*

上海市科學技術編譯館出版

(上海南昌路59號)

新華書店上海發行所發行 各地新華書店經售

商務印書館上海廠印刷

*

開本 787×1092 1/16 印張 4 3/4 字數 140,000

1964年3月第1版 1964年3月第1次印刷

印數 1—6,000

編 號：6064·194

定 價：0.70 元

前 言

利用一种集束的、能量高的电子射线产生高温进而发展成为材料加工的一种方法，还是最近十年来的事情。1949年西德卡尔·蔡司光学仪器厂工程师施太格瓦耳德(Steigerwald)虽已在18-8不锈钢上利用电子束加工成0.2毫米直径的第一个孔，并于1953年在奥地利因斯布鲁克(Innsbruck)电子显微镜协会的年会中作过报告，但当时未被付诸实用。直至1959年蔡司工厂对电子束加工的一套工艺及一系列的装置试验成功，特别是证明对各种金属焊接和切削显出无比的优越性后，才广泛应用于各工业部门。

电子束加工方法是在真空中进行的。将具有很高速度和能量的电子射线会聚在被加工工件的表面上，电子的动能大部分变成热能，以使被击中材料的温度升高至熔点，甚至汽化点，以进行焊接或钻孔。对大面积或轮廓加工等可装用偏转装置，使电子束在工件上按需要的形状扫描。根据上述原理，也可用来作材料烧结、熔融和提纯以及合金的熔炼、渗透和重结晶。因此这种方法目前已为世界各国的一些工业部门所重视和采用。

为了使电子束加工这一项新兴工艺能广泛开展而加以利用起见，首先必须将目前各国有关研究电子束加工方面的资料予以介绍，使读者对形成电子束的原理、机器的结构、电源设备及电源控制方法、加工工艺及其效果等获得一概括性的认识。本专辑的选材以电子束加工应用方面的报道较多，对有关研究电子束机器上的电子光学和电气方面的技术问题所占篇幅较少，这是不足之处；另一方面，有关这项新兴工艺的资料，见于文献者还不多，资料收集极为不易，因此本专辑在内容上可能不够全面，翻译质量也存在着一定的缺点，希读者能多多提供宝贵意见，以便改正。

本专辑中一部分资料系由上海光学仪器厂过静宜、陈祥禎二位同志所提供，并参加编辑工作，特致谢忱。

2K530/17

上海紡織科學研究院

1963年12月

前 言

利用一种集束的、能量高的电子射线产生高温进而发展成为材料加工的一种方法，还是最近十年来的事情。1949年西德卡尔·蔡司光学仪器厂工程师施太格瓦耳德(Steigerwald)虽已在18-8不锈钢上利用电子束加工成0.2毫米直径的第一个孔，并于1953年在奥地利因斯布鲁克(Innsbruck)电子显微镜协会的年会中作过报告，但当时未被付诸实用。直至1959年蔡司工厂对电子束加工的一套工艺及一系列的装置试验成功，特别是证明对各种金属焊接和切削显出无比的优越性后，才广泛应用于各工业部门。

电子束加工方法是在真空中进行的。将具有很高速度和能量的电子射线会聚在被加工工件的表面上，电子的动能大部分变成热能，以使被击中材料的温度升高至熔点，甚至汽化点，以进行焊接或钻孔。对大面积或轮廓加工等可装用偏转装置，使电子束在工件上按需要的形状扫描。根据上述原理，也可用来作材料烧结、熔融和提纯以及合金的熔炼、渗透和重结晶。因此这种方法目前已为世界各国的一些工业部门所重视和采用。

为了使电子束加工这一项新兴工艺能广泛开展而加以利用起见，首先必须将目前各国有关研究电子束加工方面的资料予以介绍，使读者对形成电子束的原理、机器的结构、电源设备及电源控制方法、加工工艺及其效果等获得一概括性的认识。本专辑的选材以电子束加工应用方面的报道较多，对有关研究电子束机器上的电子光学和电气方面的技术问题所占篇幅较少，这是不足之处；另一方面，有关这项新兴工艺的资料，见于文献者还不多，资料收集极为不易，因此本专辑在内容上可能不够全面，翻译质量也存在着一定的缺点，希读者能多多提供宝贵意见，以便改正。

本专辑中一部分资料系由上海光学仪器厂过静宜、陈祥禎二位同志所提供，并参加编辑工作，特致谢忱。

2K530/17

上海紡織科學研究院

1963年12月

目 录

电子束作为切削工具.....	1
电子束作为焊接和切削材料的热源.....	8
电子束机械加工	13
电子束机器用于金属加工	21
用电子束加工材料	25
电子束用于制造微型电路	27
畸形纤维的喷丝头的制造	31
由电子束熔炉得到较好合金和较纯金属	33
最近电子束应用的概况	35
电子束加工装置电子光学系统的计算	41
对施太格瓦耳德所发展的远聚焦阴极的研究	46
装入另一电极以改进施太格瓦耳德所发展的远聚焦阴极	55
高压电子枪的特性	59
电子射线发生器的测量问题	65
稳定电子显微镜阴极电压的附加装置	68

电子束作为切削工具

S. Panzer K. H. Steigerwald

前言

电子束按照物理学上的特征及电子的微小质量(它的质量比最轻的元素还要小 1,840 倍),一般总是列入非物质性的射线之内的。因此一束载流射线作为刀具的术语来出现是一异乎寻常的情况,但若考虑一下刀具的主要任务是把能量的转移局限于极小范围而发生在加工件上,便可证实它的职责。用机械式刀具加工时,能量变换过程中所产生的热量是一件麻烦的事;而用电子束加工时,这种加速电子的动能在击中工件时所转变的热量恰恰可被用来加工工件。因此这种射线可以用作表面淬火、熔融、焊接、软焊、精炼,进而也可作为钻孔和切削之用。由于能够得到高的能量密度并可进行几乎无惯性和无功率损耗的电气控制,所以用电子束加工特别适宜。

将集束的电子射线作为能量载体及电荷载体来研究和利用早已在许多领域内进行了。从示波器一直到电视机,采用这种方法能把电信号转换成光象,从而使射线能量以可见射线的一部分在光屏内转换,并可将击中点的强度和位置无惯性的加以控制。电子管利用可控的电子流以放大电流和电压,而具有高加速电子动能的 X 射线管则产生波长短的、能够很好穿透物质的电磁辐射。

在电子显微镜内人们认识到电子辐射与光的辐射是相似的。因为和这种可见光线相对照的最小图象,基于电子辐射的较短波长,能提高光学上的分辨本领。

目前在所有已知的电子射线应用中这种在击中点上的热效应是最不受欢迎的。但相反地人们却正在努力研究电子束加工材料的方法,使它在射线的击中点上尽可能把能量全部转变成热能。

电子束加工方法的特征

在叙述之前举出一些有别于其它方法的特殊性,则对一种新方法的认识,是会减少一些困难的。电子束在材料加工方面计有下列一些特征:

能量密度高

电子束的密度在局部区域受到严格的限制,集中在工件的很小范围内。而在加工点上提供着到目前还未确定的能量密度。关于能量密度的数量与用于工件加工的其它热源相比,现已得出一个标准。电弧作为目前最强有力的热源,在最小的作用横断面 10^{-3} 厘米² 内能达到 10^5 瓦/厘米² 的能量密度;电子射线的数值约为 10^8 瓦/厘米²,而光点直径可以小到 10^{-7} /厘米²。

工件的变形小

更有决定性意义的是工件内的能量转变过程,这种过程用一般的热源几乎只在表面上完成,从而使那里所发生的热量仅仅径向地向工件的深处传导。可是用电子射线时可以在加工点上以电子一定的动能或能量密度直接辐射在工件之内,而使细槽的四周获得能量。射线截断之后(例如所通过的金属凝固)而又会立即接通。工件即使有很深的深度也能够在一分之一秒内熔融。因此加工点的周围热影响将保持在一个很狭小的区域内,使工件变形很小。

热源的开关时间特别短

电子束热源的开关速度也是值得注意的,在几分之一微秒的作用时间内能以精确剂量来变换能量。因此在射线发生器内采用韦氏电极,而这种电极几乎可以无功率地和无惯性地来控制射线的强度。采用具有可以调整重复频率的以及脉冲宽度的脉冲电压可使热源在工件上的作用时间有很大范围的变化,换言之,从连续辐射一直到 0.1 微秒脉冲。

刀具的控制速度高

工件加工时必须将刀具转动或是将工件移动。但由于质量惯性或热源惯性只能以极有限的速度来进行。电子束则由于可加以控制以及在工件内能量的瞬时转变能达到最高速度,而出现了一种新的可能性。射线的方向可以用电场或磁场来任意调整。因

此射线可以由一只大于 100 米/秒速度的电子定时控制器引到工件，而这种控制器只能在工件表面能量转变较小时，例如在半导体加工工作中加以考虑。

加工点上化学纯度高

由于具有极小光点直径及无惯性控制的高能量密度的电子射线只能在真空内产生，因此工件也就必须放在真空室内。现时真空技术的发展一日千里，制造大型真空室以容纳大的工件已毫无问题。而且用一只大型泵可使抽真空时间缩短到几分钟，就是在真空室内连续的封闭也已可能。真空对加工过程是有好处的，进行熔融时可防止由于气体，特别是空气中的氧化作用所产生的化学杂质。如果将焊接时利用真空与利用保护气体方法相比较，则可看得很清楚。 10^{-4} 毫米水银柱真空度是加工时所希望的数值，而且是可以毫无困难达到的，它只等于掺杂度为 0.0001% 的保护气体。

电子束加工方法的工艺设计

利用电子束作为工具现已可用于许多种工艺。在真空熔炼时对电子光学以及射线的控制方面只须有最低的要求——仅需一个电流大的阴极和 10~20 千伏的比较低的高压电源，而在其它如焊接、软焊、精炼、特别在最小尺寸的铣切和钻孔中则完全要求采用电子光学的和电气的方式。因此这种方法在工艺上的应用可以用目前出品的一台电子束焊接机和一台电子束铣床为例，详细地加以说明。

电子束焊接

热源对于焊接是必要的，它使二块接触的工件表面相互熔融而发生作用。一种热源是电子束，它在低能量密度时，也能象气焊或弧焊一样提供同样的热效应，换言之，能焊成一种比较宽的焊缝。当能量密度远远超过上述数值并增加到现时为止的已知数值时，材料不但会熔融，而且在极小范围内汽化，这就可以达到“电子束深焊”。狭的焊缝是它明显的标志。

图 1 示意地说明了这二种熔融区。这种阔的、传热近乎径向的熔融区 A_1 是在一般焊接及低能量的电子束时产生的，而狭小的熔融区 A_2 只会在电子束深焊时才形成。

为进一步了解这种加工过程起见，似乎将目前这种机器的原理图示意地叙述一下，还是有必要的。

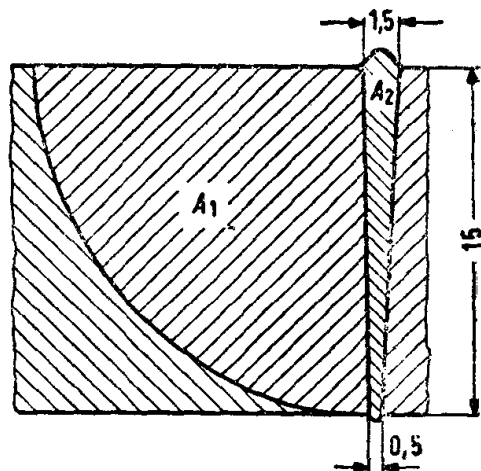


图 1 在 15 毫米厚的金属上电子束对焊的熔融区和在表面加热的熔融区的比较
 $A_1 = 353 \text{ 毫米}^2$; $A_2 = 15 \text{ 毫米}^2$; $A_1/A_2 = 23.5$

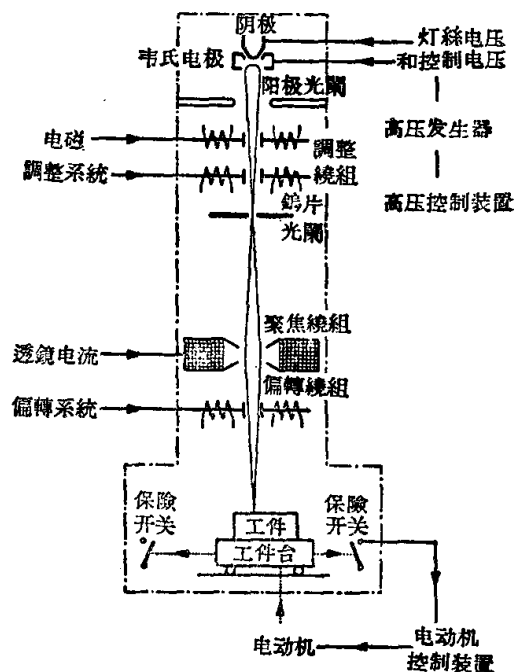


图 2 电子束焊接机的基本结构示意图

图 2 说明了具有射线源的电子光学柱、调整和聚焦元件以及用横截面表示的焊接室。

远聚焦系统的射线源是由一根用电加热到 $2,600^\circ\text{C}$ 的钨丝作为射线发生器的阴极和对着阴极的一个带负偏压的韦氏电极所组成，它的任务是完成电子束的预聚焦和强度控制。

电子通过高达 150 千伏的电压 U 得到动能 $\frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot U$ ，高电压组成了介于带高压绝缘的射线源和装在机架上的阳极光阑间的静电加速区。这种预聚焦的、加速的电子束以不减低的速度 v 穿过阳极光阑而为调整绕组的磁场调整在磁聚焦透镜的电子光学轴上，调整绕组是分别位于二个平面之上，每个平面上装以相互垂直的一对绕组。位于中间的钨

质光闌是水冷却的,而且可以从外面来移动,用作控制电子的接受,从而使射线具有重演性的、一定横截面的形状。磁透镜的焦距可以通过变更绕组电流来校正,它既可用于工作距离的配合,也可根据所用材料的种类、厚度以及焊缝形状来校正工件上的射线横截面。因此射线的直径可以在0.1~2毫米的范围内变化。

聚焦绕组之下为偏转绕组,它使射线在二块焊接工件的焊缝中心处可以完成自动的调整。此外,射线还可以用正弦形或矩形波电流通过偏转绕组对焊缝的横向进行扫描,使在焊缝上形成较为广泛的能量分布并对表面产生影响。

电子光学柱是装在焊接室上的,室的前面有三个观察窗,用以观察焊接过程。侧面装有可以装卸的罩子,作为送入工件之用。所需焊接的工件则可装在焊接室内的一只工作台上,而工作台可从外面用曲柄式摇手在二个坐标内移动。对每一方向装有一只带有无级变速联动机构的电动机,它使工件以6~120厘米/分的速度移动。如果工作台已走到尽头,则电动机通过限位开关会自动关车或变更它的转向。为了准确的调整射线,使它在所要焊接的焊缝上,并为判明焊好以后的焊缝质量起见,可以采用一只装在光学柱上可以放大到75倍的立体镜。为使工件的二块焊接面能够焊好,可在射线强度较弱时借助立体镜把它校准在中心处,并在全部射线功率使射线垂直地移动。

射线的脉冲控制对焊接极薄的板材、对缝焊接以及半导体元件焊接是有特殊意义的,因为可使射线极为精细而且达到精确的射线能量,并能使焊缝周围的热影响非常小。此外在韦氏电极上还附加了可以变更宽度的正电压脉冲,它抵偿了韦氏电极上的负电压,使能控制射线到最大的强度。

电子束铣切和钻孔

用电子束精密加工以制造形状复杂的铣切工件和微小的钻孔工件,以及在微模等的表面上加工等都可以采用类似焊接机上电子光学的结构原理来进行。可是对于工件上的 ≤ 10 微米直径的有效射线,必须要有附加的一种电子光学方法,以校正透镜象差,射线源所形成的交叉点必须缩小,以及必须有高度的电气稳定性。与焊接相反,能量密度必须提高到使电子束击中点发生汽化。

严格限制在直接加工点的热效应对加工质量是特别重要的,这是加工宽深比为1:40的槽缝的一个

先决条件。只须通过对热源的脉冲控制作用就可达到,例如通过电子束的一种强有力控制,经由一只具有降到几分之一微秒脉冲持续期的韦氏电极,以达到可以校正的脉冲比率。电子束脉冲的动能的瞬时转换到能量密度为每一平方厘米几兆瓦时,能正确控制材料的切削而对加工点的邻近区域具有极小的影响。

这种切削的形状,是由电子束用一种控制系统,例如用磁场控制系统来送发信号。对安装在聚焦透镜和工件间的线圈馈电后,使射线在所需的方向和时序内偏转。

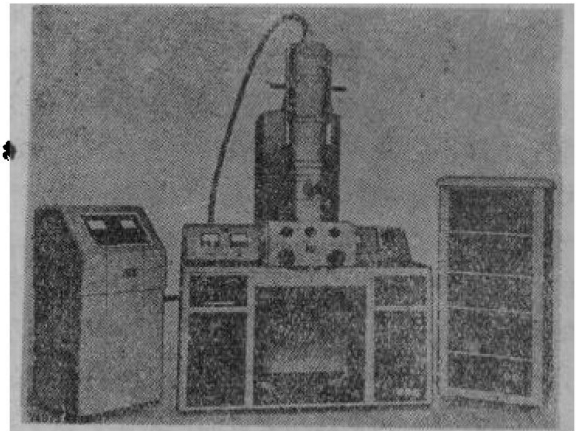


图3 电子束铣床

图3系表示一部电子束铣床,它具有装在加工室上的电子光学柱,加工室则为机座所托住,机床内计有真空泵、装在油箱内的辅助电器零件、脉冲发生器以及电子供电装置。立体镜则装在电子光学柱的前面,以便能检验工件在加工时和加工后的情况。立体镜上装有75倍的放大镜。左面装有稳定直流电压高达150千伏的高压设备以及用于高压和射线电流的仪表。在右面的柜内装有畸形截面的控制装置、脉冲仪以及电子射线成圆装置。

电子学问题

电子束工作机是以一系列的电子光学、高压技术以及电子学为基础所发展起来的电工仪器组成的。兹将有关电子学的一些问题加以叙述。

电子射线的能量是由150千伏直流电压的高压发生器所供给的。电子束焊接时所需的直流功率范围可从100瓦到几瓦,而用作铣切和钻孔所需的电子束功率则仅需80瓦。由于对高压直流电源的容许的波数值的要求以及对电网电压波动的稳定性的要求是与击中点上射线直径的容许误差有关,加速电压和电子光学图象间的关系要求对这种特殊情况

的电子光学的相关性加以考虑。

电子束是以一种定向射线来发出的，它应当尽可能在小的断面上集中高的电流密度，换言之，应有高的亮度值。射线的有效孔径 α 是小的，约 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ (毫米)。磁透镜的功用在于能将定向射线交叉点的象缩小于工件上。透镜焦距 b 以及加速电压 U 间的关系为

$$\frac{1}{b} = \frac{e}{8 \cdot m \cdot U} \int_{-\infty}^{+\infty} B_z^2 dz \quad (1)$$

或

$$b \approx \frac{100 \cdot U}{d \cdot H_0^2} \quad (2)$$

适用于“薄的”磁透镜。在这里，焦点是位于透镜磁场之外而与试验情况甚为符合。公式(1)及(2)中 e 系电子的电荷， m 为电子质量， B_z 系磁感应强度、 z 为轴向方向， d 为轴向场强分布的半宽度，而 H_0 为磁场强度。因此焦距的变化是与加速电压的变化直接成比例。象物理光学一样，在磁透镜的或静电透镜的电子光学象上也会产生象差，即使在射线截面上的能量分布有很少的扩展，可是在工件上已很显著，这对材料加工是不希望有的。从各种不同的透镜象差中看来，只有球面象差和色差是有重要影响的。

这种由透镜象差所引起的弥散圆，它的直径 δ_0 是可以近似地当作焦点的扩展来计算的，对球面象差则用 $\delta_0 = \alpha^3 \cdot C_0$ 来规定，也就是与球面象差 C_0 成正比。与透镜参数的相互关系是由透镜厚度

$$k^2 \approx \frac{H_0^2 \cdot d^2}{U} \quad (3)$$

以及

$$C_0 \approx \frac{2d}{\pi^3 \cdot k^6} \approx \frac{d}{4} \left(\frac{b}{d} \right)^3 \quad (4)$$

而决定的。换言之， C_0 是与 U^3 成比例的。弥散圆变化是以电压变化的三次方来进行，也就是说射线电压的差异到 10% 时，将会引起弥散圆直径差异约 30%。

电压差异对射线截面的另一影响是由色差 C_F 所引起的，这种色差应注意到成象时电子的不同速度而与色象或光线的各种不同波长相对应。色象弥散圆的直径是

$$\delta_F = \alpha \cdot \frac{\Delta U}{U} \cdot C_F \quad (5)$$

内中 $C_F \sim b \sim U$ 表示与 ΔU 成比例。

如果考虑到透镜及射线源已知参数的关系，则我们建议以约为 1% 容限的加速电压稳定性用于焊接机，这种稳定性，即使在 0.1~0.2 毫米的射线直

径时，也不会因电压差异而发生显著的缝宽变化。这种低的稳定性即使对几瓦输出功率的直流电压也不会有任何问题。

在有效射线直径 ≤ 10 微米的铣床上，象差的影响和它的电压关系较有重大意义，因此加速电压的差异不应超过额定电压的 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。高压直流电的最大波纹有时还应低于容许直流电压变化的数值。

选用铣床上的高压发生器时，必须注意到在精密加工中的最大射线功率很少会达到 100 瓦，这与电子射线焊接恰恰是相反的。因此采用高频的级联原理以提高直流电压显得最为合适，因为它能以最经济的费用在直流电压的剩余波纹低于 0.1% 时将达到只有 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 额定电压的差异，而且不仅输出功率小，就是负荷曲线也呈现出技术上的优点。

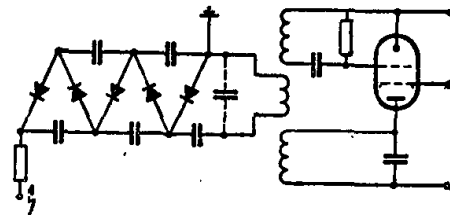


图4 用高频操作的直流电压多级级联装置线路图

按格赖因纳赫(Greinach)的倍压方式，是以许多级级联的而由一只具有 30~100 千赫交流电压的振荡器供电(图4)。输出直流电压 U 是由

$$U = 2 \cdot n \cdot \nu \cdot u \quad (6)$$

予以给定，内中 u 为输入交流电压峰值， n 为级的数目，而 ν 为系数，这一系数确定有效电压的增加倍数以及对杂散电容和级联损失的关系。高频供电的优点从波纹的关系中是可以看得很清楚的。

$$\delta_u = \frac{I}{2 \cdot C \cdot f} n(n+1) \quad (7)$$

换言之，对于给定的波纹、级数 n 以及使用电流 I ，如果输入电压的频率 f 愈高，可使级联电容较小。而小的级联电容的放电能量 $U^2 \cdot C / 2$ 相当小，即使在绝缘击穿时，例如真空不良时，在电子束机器的圆柱内经常会出现的那样，在击穿的地方有着 150 千伏的电位差也不会引起易于辨别的破坏。

如果振荡器工作于自激的情况下，则将得出十分合适的负荷曲线 $U = f(I)$ (图5)。在工作范围内电压是符合于阳极电阻(内电阻)和增加的负荷电流成比例而减弱。在超过一定电流时，阳极电阻突然会指数地上升，引起了为级联所给予的漏洩以及与此相关的自动调节振荡器内的相移。这种级联输出

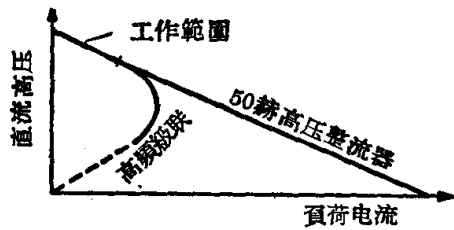


图5 50赫高压整流器和高频级联的負荷曲线图

电压以及取得的电流，恰恰与一般的整流设备相反，实际上为零。使在偶然事故中这只连接着的仪器对持续短路电流也发生保护作用。即使在装拆仪器时或在安全设备损坏时接触高压也不会流出致人于死亡的持续电流，因为最大持续电流仅有2毫安左右。

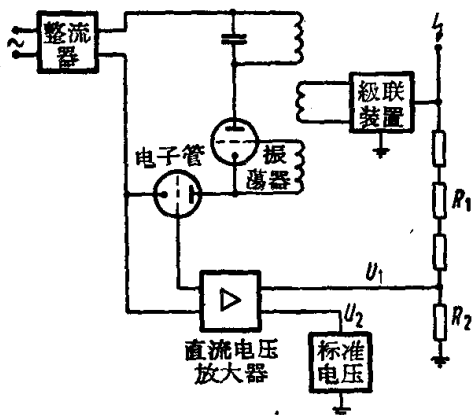


图6 稳定的高频直流电压级联装置线路图

为使电压稳定起见(图6)，将级联装置的直流输出高压经由高电阻的分压器 $R_1 + R_2$ 作为调节值与具有非常稳定的标准电压相比较，而将差数作为控制电压输送到直流电压放大器。经放大的差压控制着电子管，而这只电子管作为调整机构来控制着振荡器的输入电压，从而重行控制着直流高压的大小。调节设备应尽可能使实际值的差异在额定值中保持得小，而使不论从电源电压上的以及负荷上的差异都能得到调节。设备的调节系数为1,000时，10%的电源电压变化使高压变化只有额定电压的 10^{-4} 。从无负荷变化到全负荷时，高压的变化稍

多于 10^{-4} ，因为阳极电阻通过控制电路后，将会从100兆欧降低到0.05兆欧。如果负荷超过了1毫安，调节装置便会停止，通过指数上升的阳极电阻，电流得到自然的限制作用。

级联高压装置是装于30厘米直径和60厘米长的一只油箱内，并包括一只金属高压整流器，这种装置毋需有人照料，而且寿命很长。其最大输出功率约为80~100瓦。当最大差值约为额定电压的 10^{-4} 时，最大波紋计为 $5 \cdot 10^{-5}$ 。

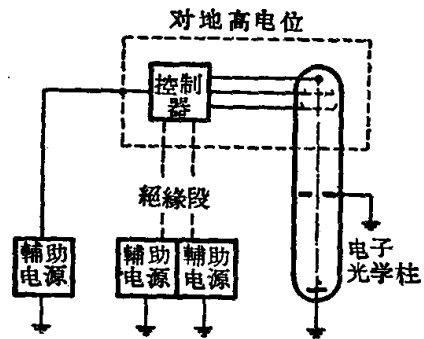


图7 对地高直流电位上的辅助电压装置示意图

高压技术的另一问题是使辅助电源对地位于高的直流电位上，而且必须从地电位方面来控制(图7)。可是阴极和韦氏电压必然对地位处于负的高直流电压上，而且除电子光学柱内的高电压绝缘结构外，对相应的输入电压要求有一种电源和绝缘线路上的控制。

关于控制方面，不论机械的、电气的或是光学上的方式，总是按照已知设计上的可能性以及绝缘电压的水平作为选择目标。例如在低于300千伏时直流电压的绝缘变压器证明最为合理，这只变压器能转换电源频率的能量，对接通在电源上的绕组，也就是说使在地电位上的原绕组的控制具有可能。

电子束的脉冲控制同样可以用绝缘变压器来完成。一方面能量将经由绝缘部分以正弦的电源频率送入，而这种能量仅被利用于有高压脉冲仪的供电(图8)。另一方面这种约有几百伏的脉冲电压也可

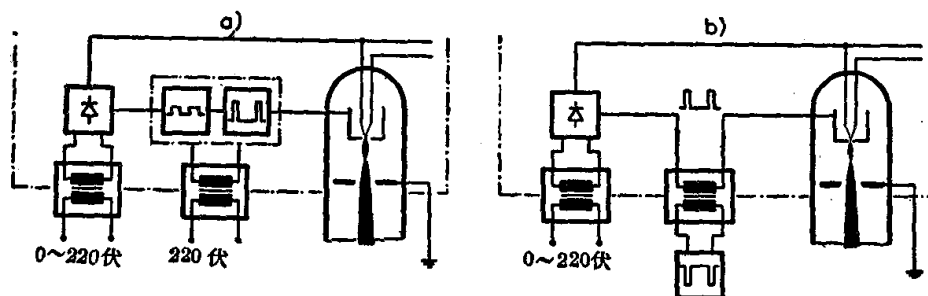


图8 电子束电源的脉冲控制

a) 在高压电位上的脉冲发生器 b) 在地电位上的脉冲发生器

在地电位方面发生而經由一只絕緣-脉冲变压器来傳送。

在控制設備的可能性中也可表示出电子束刀具的多样性，它在同一工件上可以进行各种不同的眼子的銑切工作。通过依次而定时的饋入偏轉繞組的鋸齒形、矩形或正弦形的組合电流，可以进行纵断面、侧面或平面的扫描工作，以完成所需的形状。在0.5毫米厚噴絲板上的各种不同的銑切形状，就是按組合原理用一只控制仪来完成的。槽縫的长度和寬度可以通过各个发生器的振幅变化来調整，而位置不在中心点的槽縫則經由附加的直流偏轉装置来确定。一只脉冲发生器控制着偏轉系統的自动时序或是一张图案的各种槽縫的連續加工。

与上述組合电流不相关連的一种方法是通过一只电视傳真仪对图案进行成行扫描，图案內容的光学数据轉变成电流而被用来控制电子束的强度。与电视用的阴极射綫电子管相类似，相应的偏轉电流連同电视摄象管将同步地饋入电子束銑床的偏轉繞組。可是所需扫描精密度和稳定度是比在电视机中要高一些的，而且要求振蕩器有一种坚实的頻率耦合。

与此原理完全相似，图案所要求的扫描方式是用光点来进行的，光点則同步地用电子束的偏轉光柵来控制。亮度数据将被利用为电的振幅以控制經由韦氏电极的射綫或用以开启脉冲发生器，这只发生器則脉冲地使射綫中断而消除負偏压，直至在相应的行列中扫描时的亮度值重行显著的变化为止，即直到图案的定位完成在这一部位为止。

如果射綫在图案加工时并不象輪廓扫描的形式那样从一点到另一点連接地进行，而是在完全不同的相离比較寬的截面部位上把能量轉化成热量，用电子束作为热源的最合适的加工是可以做到的。因此每一点只有很短時間得到一定的热量，直至下一加工阶段为止，由于反射和热傳导而产生热損失。加工周圍的加热区非常之小，因而对半导体加工是有它决定性意义的。

这种加工方法也可以在磁帶仪器上用一种程序装置和补偿装置来解决，它經由中間饋电装置来控制着一只数字-模拟轉換器，而使这只轉換器在电子束装置的偏轉繞組上給予工件加工面的每一点以附加的电流。对于位置或模拟数值的正确性的要求是高的，而且对于相当快速而又經濟的工件加工所必需的每秒位置調換的数字通过在偏轉繞組上的动力情况又将发生附带的問題。可是用这样的一种時間

控制是可以得到几乎毫无限制的多种可能性，即使最复杂的銑切和表面加工也可以完成。

使用范围和发展远景

电子束用于材料加工还是近几年发展起来的，因此对总的應用还不可能給以系統的綜述，可是从目前的一些实例中已能表現出它的优越性，例如用了电子束深焊就有可能提供設計人員以完全新型的結構，而在电子束銑切和表面加工中对于应用半导体技术的微型化方面也将发展成为一种主要的加工方法。

在焊接技术上，特别是高熔点金属的加工或是难以焊接金属的加工方面最能看出的它的进展。尽管电子束在各种不同材料中所能焊接的材料厚度和透入深度的极限值，在一些試驗中还没有得出結論，可是这些数值还是可作参考(表1)。材料厚薄所規定的数值将可在所有的接触面上完成对焊。

表1中所列举的金属焊接不但在反应堆技术和火箭技术的范围内有着很大的重要性，而且这种方法的初步成功也获得工业上应用的可能性。利用电子束深焊，已能达到焊接速度快、材料变形小的优点，使在焊接技术的任何应用范围内都能利用。

表1 各种不同材料的对焊深度

材 料	熔 点	深 度
鎢	3,377°C	2~3 毫米
鉭	2,997°C	6 毫米
鉬	2,577°C	4 毫米
鈳	1,859°C	15 毫米
鈦	1,672°C	10 毫米
鎳鉻鋼	1,425°C	25 毫米

用“透焊”方法可以通过不可分开的鉄板在所要接合的地方进行焊接，而用別种接合方法則有困难。图9是一种T字形的焊接实例，焊接时电子束从上

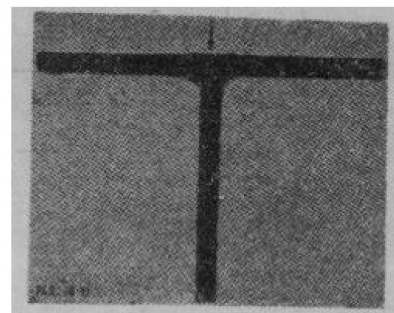


图9 T形焊接

面穿入橫向的鐵板內而和垂直的鐵板毫無疵病地焊接在一起。

就是極薄的薄膜也可和一块厚的鐵板用这种方法來焊接，这对飞机制造业特別有用。具有極不相同熔点的材料，例如銅和鋼的焊接也已成功。就是金属和陶瓷的接合，也有可能用这种方法來解决。精密焊接在电工工艺內，主要是在半导体技术領域內似乎最令人感到兴趣，因为这种焊接对周圍的温度影响很少。

这种方法还不局限于小型工件，因为大尺寸的焊接室对于目前的真空技术已不再存在任何問題，例如象一台长 20 米寬 1 米焊接室的电子束焊接机，在連續操作中已可焊接 8 米长的鋁合金工件。

这种簡單而又几乎沒有慣性的电气控制和較高焊接速度的电子束加工工具使高度自动化成为可能。

最后在焊接技术上的例子如图 10 所示，系表示一种鎳鉻鋼的对焊，由图中可以看到特別狹的焊縫。

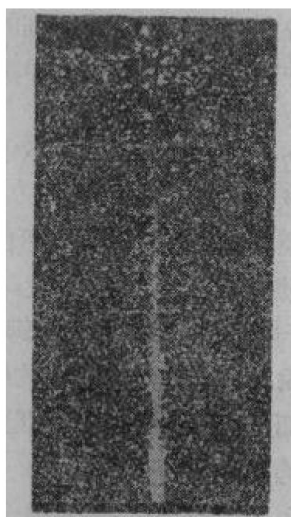


图 10 在电子束深焊时对焊焊縫的形状
18-8 鎳鉻鋼；厚 15 毫米

应用电子束对微型电子元件进行銑、钻、熔合以及汽化是具有特殊意义的。这种技术的推行可使单位体积內的电子結構元件数目增加，例如在一只体积为 1,000 厘米³的立方体内，微型元件和晶体管原为 2,000 件，現可提高到約 500,000 件。这种新工艺的基本元件是一块面积 8×8 毫米²及 0.25 毫米厚的陶瓷薄板，用作各种半导体的或导体的支架，通过进一步的加工变成电子結構元件。图 11 系表示这样的一种电子束加工，內中电阻层在回紋形的电阻上繞行。繞組用类似方法。通过中間汽化可以制成电容器，也可制成半导体二极管。陶瓷板是重迭放

置的，在中間装上微型晶体管。由微型振蕩器、双稳态多諧振蕩器和放大器形成一种“微模”結構。另一发展方向是以单晶体薄板作为支架，通过渗杂、熔合和汽化可以直接制成一种微型电子开关或电子計算机的双稳态触发器，从而使这样的一种元件只有 4×7×0.5 毫米的大小。最近分子圈也可由蒸发层組成。

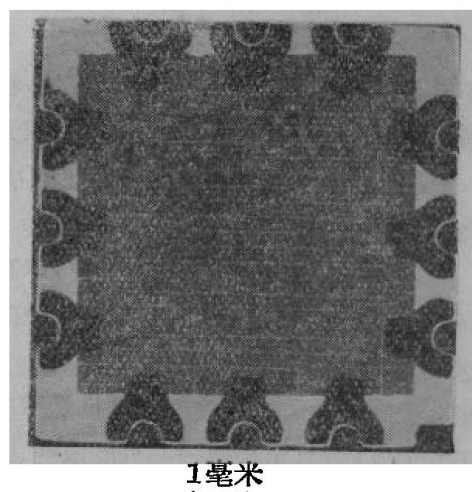


图 11 在 8×8 毫米陶瓷板上加工电阻层
縫寬为 0.01 毫米

为使这种先进方法得到利用，必須提供一种加工工具，以便在十分小的尺寸上制成一种足够精确的、能快速重复生产的成品。电子束方法对此显得最为合适，因为它滿足了三个主要先决条件：

1) 射綫的有效断面，相当于刀具作用面积的大小，可应用电子光学校正元件使直径縮小到微米以下。这种可能性已可在默倫西特 (Möllensiedt) 的微型控制器中得到証实。

2) 加工强度可用射綫的脉冲控制在很大範圍內变动，这就解决了半导体制造时最感困难的热影响問題。

3) 即使要达到高的电子束加工速度和精密的射綫控制不能用电气方法进行，电子束加工方法对微模技术还是特別合适的。

銑切各种不同排列的細縫，以制造縫寬为 50 微米的畸形孔紡絲板，而这些細縫是在 0.5 毫米厚和 0.5~1 毫米柱长的貴金属上进行加工的。这些不同的畸形孔給予人造纖維以优良的透气性，从而使它的性能与天然纖維相接近。图 12 系表示在非金属材料內加工成一个眼子的例子。它是一只钻有 50 微米直径眼子的紅宝石 (Al₂O₃) 制成的手表軸承。其它如鉄素体材料、陶瓷、石英玻璃等同样可用电子束來加工。
(下接 20 頁)

电子束作为焊接和切削材料的热源

S. Panzer

前 言

电子束对材料的熔融、焊接或汽化都是极为合适的热源，可就能量密度和工件上作用面积大小等特征加以比较。电弧作为目前最强烈的热源，在0.1毫米的最小作用面积上能达到0.1兆瓦厘米⁻²的能量密度；而用聚焦和加速的电子束，却可以在只有10微米的最小光点直径上（约0.0001毫米²的作用面积），达到1,000兆瓦/厘米²的数值。

加速电子穿透物质时的物理过程仍是带电原子基本粒子的相互作用，包含着一系列的散射、吸收以及电离过程。电子动能的转变早在极薄层内完全实现，对于“实际上射线到达距离” R 也已下了定义，

$$R \approx 2.2 \times 10^{-12} \times \frac{U^2}{\rho} \quad (1)$$

内中 U 是加速电压，而 ρ 则为被透射材料的密度。这样定义的射线到达的距离是与加速电子的电离作用的减弱有关。热变换还必须注意到另一些因素，这些因素总的说来在150千伏加速电压下对于各种金属会导致百分之几毫米的射线到达距离。薄层内电子束，通过导致在工件上电子反散射的一次散射和多次散射，全部被消散，从而使射线的能量绝大部分转变成热量。这并不是在射线到达距离内均匀地完成的，而是类似楞次关于电子在空气中散射（其强度呈对数地减少）所算出的电流密度分布那样。

用高能量密度的电子束作材料加工试验时已经得到证明，在很高能量密度时电子束在各种不同材料内所达到的透入深度，比之理论上射线到达距离会超出三个数量级。例如电子束能穿透30毫米厚的钢板。所产生的热作用，可能由于开始时固体材料的密度降低而引起，也可能象等离子区的电的集中作用或特殊的热力学过程，而这些过程将使射线的全部散射产生反作用。可是这种过程非常复杂，而且把它来解释清楚还必须有更详尽的试验。

但是电子束热源的可利用热量，对使用方面是最为主要的。当电子束在固体物质上击中后，其动能完全转变成热量时，根据假定，这种热量是由质量

m 和速度 v 的 n 个电子所发生，

$$W = n \cdot \frac{m}{2} \cdot v^2 \quad (2)$$

在具有电位差 U 的电场内，可由一个电荷 e 的加速度导出公式：

$$\frac{m}{2} \cdot v^2 = e \cdot U \quad (3)$$

因此加速电子的能量将直接以电子伏表示，1电子伏 = 1.59×10^{-12} 尔格 = 3.8×10^{-20} 卡。

电子束的热效应可由下式得出：

$$W = n \cdot e \cdot U = 0.239 \cdot I \cdot U_B \cdot t \text{ (卡)} \quad (4)$$

也就是说通过测定电子束的加速电压 U_B 、射线电流 I 及其作用时间，可将输入到工件上的焦耳热确定出来。

为电子束击中后，材料温度增高的数值早在伦琴管内靶子的许可负荷的相互关系中试验过。从导热的微分方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

使温度随时间变化的一种说法成为可能。内中 a 是由热传导 k 和热容量 c_v 相除的商数。根据西利格(Seeliger)关于电弧放电的见解，包佛尔(Bouwers)提出了电子束击中层上随时间变化的温度特性。

关于在表面上和射线中心随时间变化的温度特性关系可简化为微分方程

$$T = \frac{Q}{2k\sqrt{\pi}} \int_0^{a^2 t} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}} = \frac{Q \cdot a}{k \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{t} \quad (6)$$

式中 $a^2 t < 0.07$ ， Q 系每平方厘米的能量。

公式(6)系指出当高能量密度的电子束击中材料表面时，温度升高将非常快，这就使电子束进行材料加工。在钨的表面上，也就是在几微米的射线到达范围内，将能量转变为能达到3,300°C熔融温度的热量，例如在能量密度为100兆瓦/厘米²时，仅需20毫微秒左右的时间。

材料内电子束击中点上的温度梯度的短时过程对材料的汽化和切削是有较大意义的。材料内温度梯度的大小是与射线的功率成正比，而与材料的热传导成反比例，当然还必须考虑到热容量和密度。高能量密度的电子束温度降是相当陡的。关于有时

間性的温度特性,从热力学的观点来看,只須具有极高能量密度的一种脉冲形的能量变换,就能使射綫击中点的材料汽化(实际上的試驗也証实了这一点),而且不会在周圍熔融。因此对尖角的钻制和銑切以及不使钻边融合在一起的先决条件是电子束的脉冲控制,它具有能适应加工材料各种不同热性能的脉冲持續和脉冲程序范围。

特 征

綜合了电子束热源的这些特点,可看出这种热源适于作为材料加工工具。能量密度可以增高到大于 10^9 瓦/厘米²,而作用面积最小能达到 10^{-8} 厘米²。热源的轉換速度几乎可以調整到任何高的值,因为在实际中这种强度是可以无惯性地和无功地来控制的。作用時間可以在射綫持續期的整个範圍內降到几个毫微秒。这种控制速度(或最好称之为运动速度)是非常高的。用磁場或電場可使电子束几乎以任意快速度在固定工件上偏轉,經由电视扫描器以及編有程序的数字-模拟轉換器的一种簡單曲綫控制方式使工件加工表面可以預先加以規定。就是由于工件上作用面形状变化所引起的工具損耗問題,用电子束方法也能解决。电子束的断面并不会在加工时变异,即使加工最硬的材料也不会耗損工具,这与机械工具不同。

技术問題

用电子束加工材料的技术,要求电子光学、高压技术、电子学、真空技术及机械制造方面的相互合作。因此将这些問題加以叙述是很重要的。

选择电子束的加速电压是制造一部电子束加工机的出发点,而加速电压則系根据下面两个要求而定:即加工材料內射綫穿透深度要高,射綫击中点上能量密度要尽可能大(特别是材料切削时)。穿透深度按式(1)是以加速电压的平方来增长的。能量密度則与加速电压和焦点內的电流密度成正比,而焦点的直径应尽可能小。

单位立体角內的最大电流密度,朗繆尔(Langmuir)曾經用下式規定,

$$j_{理論} = \frac{j_k \cdot U_B}{\pi \cdot u_k} \quad (7)$$

这在理論上是可能的,式中 U_B 为加速电压, u_k 是由阴极所产生的电子速度(約1伏),而 j_k 則为阴极在

4厘米⁻²內的发射率。实用上,电子射綫源的特征可由亮度值来推算,而亮度值含有在射綫断面內高斯分布的一种相应因数 $z (< 1)$ 。

$$j = z \frac{j_k \cdot U_B}{\pi \cdot u_k} \quad (8)$$

式中 $z \approx 0.35$ 是射綫中心內的最大亮度值,而 $z \approx 0.12$ 則为全部射綫断面的平均亮度值。

阴极放射率 j_k 是和金属絲的温度有关的,金属絲一般是用鎢制成。可是由于温度不允許升高到超过某一数值,超过此值金属絲的寿命就因汽化很大地受到限制,而且 u_k 值是由金属絲的材料所决定,因此高的电流密度同样只能通过高的加速电压来达到。选择一种150千伏的电压是最符合要求的。如果采用再高一些的电压則在絕緣和射綫防护上的費用将增加得很多。

射綫偏轉控制方法

为使电子束工具的高控制速度能得到利用,必須将相对有慣性的工件在射綫沿着表面进行加工时予以固定。方法是各不相同的,而且不仅与所要加工的形狀有关,就是对材料以及热力学上的条件都有依賴关系。切削的最簡單方式是以固定的射綫钻制小孔,射綫的直径决定着眼子大小。对于直径大一些(> 30 微米)的眼子,如果以小横断面的射綫在圓形眼子的周圍进行加工,則会得到一种热力学上比較合适的方法。射綫的成圓方法是,由一只发生器饋給二面相互垂直的偏轉綫圈諧波极小的相移为 90° 的正弦电流。

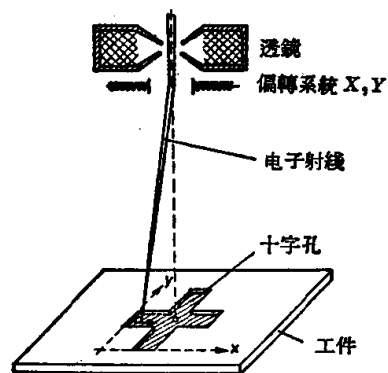


图1 电子束加工机的射綫偏轉装置

对于四方形的加工,射綫可随輪廓来进行,一只綫圈輸入一种綫性的鋸齿形电流,而另一只綫圈則輸入斜度极小的矩形波电流。在回程內这种鋸齿形曲綫的中断将被用来控制电子开关,而开关則使发生器与綫圈交叉連接,使射綫在矩形的长边扫描后

再对横向面进行加工。加工狭槽时轮廓的四周也足够使轮廓以内的残留材料加以切削掉。加工阔槽时可将矩形波曲线用正弦波曲线代替,例如使射线在 X 坐标上保持一个固定的值,它的频率比之锯齿形频率为高。因此所有槽宽都被扫描。由于有附加的直流电压(作为预偏转用),并装有调制过的正弦发生器和整流器以及继电器开关或电子式选择开关,因而可利用比较简单的电子束加工一系列的畸形孔。

对于复杂形状的加工,则不但要采用模拟控制方法,而且要应用数字控制方法。

所需要的形状轮廓可以作为图案来确定,并用一只坐标变压器来扫描。扫描的描针经由机械式引导装置和原来的变压器相耦合,例如与二只电位计的旋轴或与旋转电场发送器的转子相联结,对每一扫描点提供了电气的 x 值和 y 值。在最简单的情况下电气数值可以直接由射线偏转系统的交叉线圈供电,从而使电子束随描针跟踪图案的轮廓而转移在工件内作为铣切之用。

人们也用飞点扫描器对射线进行纯电子控制。加工所需形状的图象为一只示波器-扫描管的投影聚焦点所扫描,而这些相应的光值则为一只光电倍增器作为启动电压输入到脉冲发生器。示波器-扫描管的时间控制和图象控制的同步方式使铣床的电子束得能借助偏转线圈在工件上扫描,可是只能调



图2 在0.1毫米厚的金属薄膜上用电子束铣成的字母;字母长0.4毫米,笔划宽度70微米,用 Hamilton 标准型飞点扫描器控制射线

小。用飞点扫描器的加工方法如图2所示,表明在一块0.1毫米厚金属薄膜上一种活体字铣制的情况。字母长短约为0.4毫米。模型是由 Hamilton 标准型所发展的飞点扫描器所制造,仅作为第一次尝试,并没有提出加工精度的要求。

热力学上最适当的方法是以单脉冲来加工。在时序内的单脉冲尽可能使之相互距离远一些,使射线击中点周围的温升最小。此外,并将预定的加工范围分配在位置点上,建立一种形成位置的时间过程的程序,以适应工作截面形状和所需的脉冲分布,而位置的十进位数值将经由五进位制的打字电报机引到纸带上。这种任意长的带条经过扫描、变换而转移于二进位制电码的多迹磁带上。这根具有高速度的磁带扫描工件,从而使位置的数值经由中间存储器输入到一只数字-模拟转换器,而由此进入偏转线圈内作为各个位置的模拟电流值。因而位置的准确度可以达到0.5%。同时脉冲发生器将以偏转线圈上位置电流值的电荷启动单脉冲电荷(数字控制装置系由西德西门子电器公司所创制)。在所有的控制射线在工件上运动的方法中可以同步控制它的强度,也能达到制造畸形工件所需形状的切削。

材料切削(铣和钻)

这种具有数值重演性的多方面控制可能性,以及精确的能量和射线特别小的作用范围等,使电子束成为对于极小尺寸材料加工的一种主要的辅助工具,特别对于电子技术范围内电子元件的微型化、微型晶体管和二极管的制造以及微波技术都能作为例子而加以叙述。

用于电子计算机的微模和固体元件的目前发展方向是努力于将许多结构元件尽可能安放在极小的体积内。例如用于超小型器件的底板是8×8毫米和0.25毫米厚的一块陶瓷板,汽化层作为电阻或电容以及开关,将许多这样的陶瓷板在侧面连接在一起。它的铬-镍层是用电子束切割成回纹形的,使在二个接点间得到一条长的电阻通道。切割宽度是10微米,加工的持续时间还不到1秒。用电阻测量装置可以在电子束加工时自动控制其电阻数。图3是另外一个实际应用于微型化的例子。这里所有 Hamilton 标准型 OMEC 技术加法器元件都是由电子束精密焊接机焊接的。这种异常短促的热转换,似乎是电子束焊接的一种特殊优点,从而能精确的定位,以节省元件的地位。就是在制造电子计

制在这些位置上,通过一只在光电倍增器内的视频信号来表示出所要加工的形状,换言之,将它的强度以脉冲方式调节到汽化材料所需要的数值。为减少在扫描时的空载时间从而增高加工速度起见,可以用一种非常高的扫描速度进行加工,可是这种速度必须在加工位置上对有关材料所必要的数值予以减

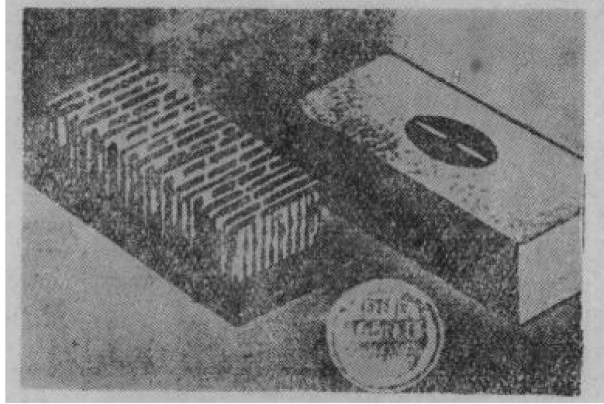


图3 OMEC技术加法器中用电子束焊接的元件

计算机的固体元件时用电子束当作熔炼、汽化以及切削的辅助工具也有很大意义。而在这些只有几个立方毫米体积的元件内必须包含全部双稳态多谐振荡器。在晶体管和二极管的制造中，尤其对于狭小范围的硅表面和锗表面的加工，用减速的高能量的电子束来加工提供了新的可能性。半导体材料的接合以及用精密焊接法将极细金属丝连接于正确的规定位置上，用电子束工具也特别容易解决。

对于甚高频电子管和蒸发模板加工范围内的极小尺寸的铣切和钻制，也是会吸引人们的注意的。

电子束加工不但能用于导电材料，即使绝缘优良的材料如石英玻璃、红宝石或是陶瓷也能进行精密的加工。可通过加工工件的温度增高，用一种散焦的电子束，使之产生一种足够的导电性能。图4表示一只用石英玻璃制造的有0.1毫米孔径和4毫米长的人造眼水晶体。它是在解剖灰内障时用以代替原来的水晶体的。眼子是缝制水晶体于眼睛内所需要的。就是在0.1毫米粗的特殊小针上钻制0.04毫米直径的小孔，这已能用电子束加工来完成。

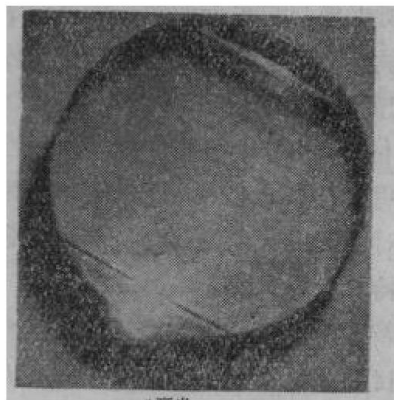


图4 石英玻璃制造的人造眼水晶体系用电子束钻制的0.1毫米直径小孔

象对陶瓷的腐蚀那样，通过汽化将材料一次熔融已有可能，从而使薄的陶瓷板焊接在一起。这一

点对于陶瓷的成分是有绝对关系。

电子束焊接

电子束焊接机的结构和铣床的结构大致相同。所不同者在于对电子光学上如透镜误差、光点直径、电压稳定度等显著有较低的要求，而在射线持续工作状态中，如果焊接较厚材料时，则必须有特别高的电功率(2~3瓦)。因此必须有一个高效能的高电压设备，它的相对电压误差约为 10^{-1} ，基于0.1~1毫米光点直径时与电压有关的透镜误差有较小的影响，因此比之铣床的电源可以大得多。

以及钎高熔点金属或活泼金属，象钨、钼、钽、钛以及铅等的焊接很困难，故都需要用电子束焊接方法，而且由于这些金属应用得愈来愈多，特别在反应堆和火箭技术上，因此这一方法愈将被人注意。将工件放在真空内焊接，毫无疑问是有必要的，在许多情况下目前的加工方法也必须在真空内进行。由于

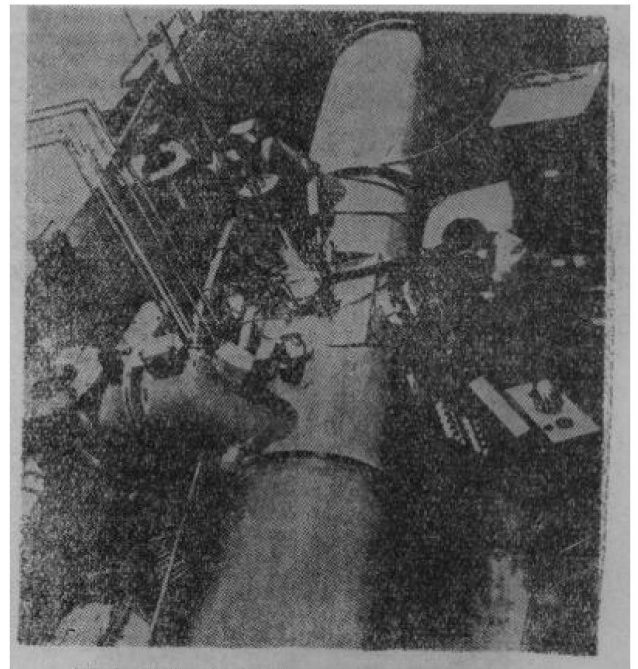


图5 具有12米长真空室的电子束焊接机

真空技术的进步，大型真空室(见图5)已能制造。这里一部ES 1002型焊接机的电子光学柱是装于一间12米长真空室内，以焊接烧红的元件。

就是一般的机械加工如熔炼以及耐高温钢材与其他材料的焊接、不同厚度材料的焊接、熔点不同的材料的焊接(如铜和钢的焊接)、或是硬度不同的材料的焊接(如钢和硬质合金的焊接)等等，也已使电子束为此领域提供了新的或是改进的加工方法。在电气技术中极薄膜的精密焊接也是使人极感兴趣能焊接测量仪表中极细金属丝以及不允许超过最高

的一件事,已經能使 50 微米厚的材料鈍焊。同样也热傳导值而距离又很小的焊件。例如一只功率晶体管的銅件和鋼罩焊接时,銅板的温度当焊接在晶体管上时就必须保持低于 80°C。

从多方面的可能性来看,似乎还没有其他方法能够达到电子束深焊法所具有的特殊性能,而且对設計人員来讲也提供了一种新的途徑。电子束还可以穿透坚固的材料,使之和其他工件在穿透鋼板的

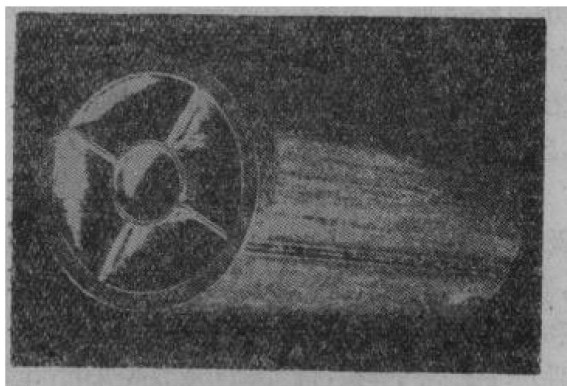


图 6 壁厚 3 毫米的贵金属圓筒,在它的內部用电子束焊接法兰

底面上焊接在一起,如图 6 所示。电子束在穿透了圓筒的外壁后,将里面的零件和內壁相焊接。在穿透时熔融材料的强度是不变化的。就是具有間距的許多碰接点的焊件也已能同时焊接,如图 7 所示。射綫通过一次就能使所有連接同时完成。所以在看不見的部位或是在封閉的容器中都可以用电子束从外面来焊接。

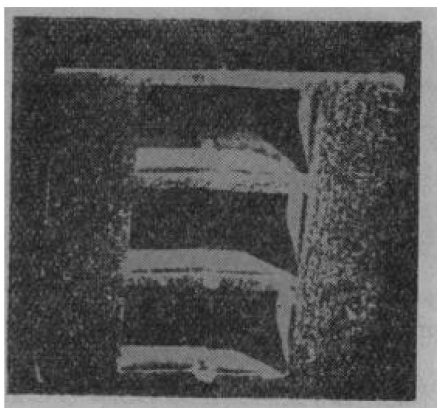


图 7 电子束深焊方法中同一时期的四种碰焊; 焊接深度 4×1 毫米,距离 3×5 毫米

电子束分割

用电子束来焊接和銑切时,主要是通过材料的熔融和汽化来达到的,而分割則是在这二种物质的物理状态的轉变过程中发生的。材料是部分地被汽化,但主要还是在熔融状态中从分割綫那里向下抛

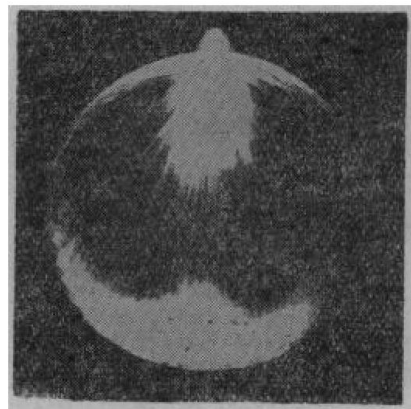


图 8 鋼筒用电子束分割。此照片系从真空室內的观察窗所摄

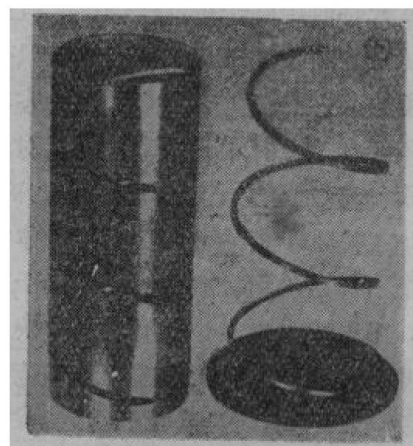


图 9 电子束分割表示工件轉动而射綫在固定的位置上

出一种很易看清的小点滴(图 8)。与焊接主要不同点在于,分割是以增高能量密度而在脉冲状态的电源下工作的。与电子束銑切則相反,脉冲持續时间与脉冲中断时间的比(約为 1:2)必须要小。这样一种分割綫的断面显出熔融区的扩展是向下的,与深焊过程时不同,因此得出結論,这是相似于蒸气压力內部的定向作用,而这种作用似乎也是为一种周期性的扩展所促成。它也会形成一种类似于煤气切割的作用。换言之,切割深度比在銑切过程中会大一些,因此切割速度必须要高一些,而且可以切割粗于 10 毫米的材料,但与能量密度以及材料性质有关。图 9 中說明工件在固定的电子束下不断地轉动。

切割对于硬质合金、鉄素体、高級合金鋼以及高級鑄鉄是特別有意义的。

这种新方法的使用可能性将来究竟会发展到何种程度,目前还很难推测。至少工程技术界熟悉了这种电子束材料加工的性能后,必将广为采用。上述的例子介紹了主要的情况,这反映了电子束作为工具和热源是可以完成許多任务的。

(周典礼节譯自西德《Elektronische Rundschau》
1961 年,第 15 卷,第 12 期,567~573 頁)