

# 电子束焊接

国防工业出版社



79.87  
961

# 电 子 束 焊 接

[苏]B. B. 巴申柯、Г. H. 克列巴诺夫 编

钟思安 译 邹 僖 校

国防工业出版社  
1975.17

## 内 容 简 介

本书汇编了近几年来一些国家内电子束焊接科研、生产和使用方面的一些情况。叙述了电子束焊接的基本原理和电子束焊接设备及电子束焊接在工业上的应用。

本书可供从事焊接工作的技术人员阅读参考。

ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ СВАРКА

В. В. Башенко, Г. Н. Клебанов

«ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ»

1974

\*

## 电 子 束 焊 接

钟思安译 邹 禧校

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 2<sup>9</sup>/<sub>16</sub> 52千字

1976年8月第一版 1976年8月第一次印刷 印数：00,001-15,500册

统一书号：15034·1530 定价：0.23元

## 译 序

电子束焊接是近廿年来新发展起来的高能量密度的熔焊方法。最初的应用是从原子能工业开始的,到六十年代中期,已大量地应用于航空、宇航、电子技术等国防工业部门,目前又在一些机械制造部门得到了应用。

电子束焊接的迅速发展是同它所具有的一系列优点分不开的。如电子束焊缝化学成分纯净,热影响区小,焊接接头强度高,焊接零件变形小,焊接过程精确度高,特别是焊接大厚度(100~200厘米)部件时生产效率高,生产过程容易自动化和程序化等。

遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导,为适应当前焊接技术领域日益发展的需要,我们翻译了“电子束焊接”一书,供从事焊接工作的技术人员参考。对原书内为资本主义吹捧和为厂商做宣传的一部分内容,我们酌情作了某些删改。希望读者以毛泽东思想为武器,根据我国实际情况,批判地吸取有用的东西。

由于水平所限,译文会有错误或不妥之处,希望读者批评指正。

译稿承邹僖同志作校对,谨表谢意。

译 者

# 目 录

一、电子束与金属的相互作用和焊缝的成形·····	5
1. 电子穿过物质·····	6
2. 电子束焊接的熔池形成过程·····	10
3. 电子束焊缝的形成和缺陷的产生·····	27
4. 室内压力升高时的电子束焊接·····	30
二、电子束焊接设备和它在工业上的应用·····	32
1. 电子束的发生和形成系统·····	32
2. 电子束的聚焦系统和控制系统·····	45
3. 电子束焊接的工业设备和生产工艺·····	57
4. 电子束焊接结构材料工艺的研究·····	69

# 一、电子束与金属的相互 作用和焊缝的成形

近年来电子束焊接不仅在焊接难熔金属和化学性能活泼的金属，而且在焊接普通的碳钢、不锈钢、铝基和钛基轻合金的结构方面都获得了愈来愈广泛的应用。这是由于电子束焊接具有如下的一些优点：

- 1) 焊缝金属的化学成分纯净和热影响区小；
- 2) 焊接接头具有高的强度特性；
- 3) 焊接零件变形小；
- 4) 焊接过程的精确性高；
- 5) 生产率高，特别是连接大厚度（100~200 毫米）的结构部件；
- 6) 具有焊接异种金属的可能性；
- 7) 焊接过程容易自动化和程序化；
- 8) 可焊接其它焊接方法不能完成的复杂接头。

具备这些优点是由于电子束的密集性、高比功率和有准确调节输入焊接材料的功率的可能性。

虽然世界各国对电子束焊接的理论和过程进行了研究，但还有许多问题仍然是不清楚的和有争论的。这就说明在电子束焊接时发生在焊接熔池内的过程的复杂性和多样性。这些问题目前还没有综合的考虑。此外，焊接熔池尺寸小、过程的同时发生和瞬时性也阻碍着试验研究。

可以提出下述一些基本问题, 这些问题的解决可以保障完善的电子束焊接过程理论的建立。

1. 探讨热过程计算的简单方法。
2. 研究焊接熔池内的流体动力学现象。
3. 研究发生在电子束和材料相互作用时的二次过程(蒸发、电子反射、电子的二次发射和热发射等等)。
4. 研究用电子束的熔化焊接的冶金特点, 这些特点主要与真空对金属中元素含量在焊接时的变化的影响以及与焊接熔池内金属的温度有关。研究上述问题同样有助于提出对设备的要求: 保证电子束的动力参数、热源沿着工件移动, 及时控制束流并操纵和稳定焊接过程。

### 1. 电子穿过物质

虽然电子束焊接已经获得广泛的实际应用, 但目前对于在这些条件下电子与它运动过程中碰到的物质之间的相互作用的细致研究还仅是开始。这种相互作用规律的准确知识能使计算金属中的热过程、电子束作用区的温度分布的方法更趋完善, 并提出对设备的要求和扩大设备工艺使用的可能性。例如, 研究电子束在真空室中通过的情况导致在几年前提出在预真空中 ( $10^{-1} \sim 10^{-2}$  毫米汞柱) 焊接的规范, 因而简化了设备结构, 提高了焊接过程的生产率, 而在许多情况下并不降低接头的质量<sup>(1)</sup>。

在工作室内, 至焊接工件的路途上, 电子与残余气体的以及加热金属的蒸气的原子和分子相遇。通过被加工物质时, 电子既与晶格的整体, 也与单个的粒子: 固体物质的原子、分子和电子相互作用<sup>(2)</sup>。由于介质原子的电离和激发, 电子

的能量 (10~200 千电子伏特) 基本上传给物质, 导致放出大量的热量、使被轰击的材料升温 and 熔化。

近来, 对于确定电子沿穿透金属深度  $\delta$  放出能量的规律给予了很大的注意, 所谓深度应理解为电子外推行程和它们对熔化区成型的影响<sup>(3)</sup>。

这里的困难主要是难于把一个电子放出能量的特点推广到高比功率的电子束上去。解决这个问题可以提出两个主要途径: 计算电子束能量在材料中的损耗 (为此最近以来成功地采用了 Монте-Карло 方法); 对电子束作试验研究, 并在此基础上找出功率在材料中放出规律的经验公式。

把 Монте-Карло 法用于电子穿透的局限性在于, 为了计算一条轨迹需要考察  $10^4 \sim 10^5$  次相互作用的基本动作 (重型粒子或  $\gamma$ -量子时, 常采用这种方法, 此时需考察这样的动作  $\leq 10 \sim 20$  次)。当每次相互作用之后, 运动电子的参数变化轻微 (如发散角或能量) 时, 可以减少工作量。此时可以利用电子多次散射的理论公式 (Мольер公式等)。图 1 所列的是计

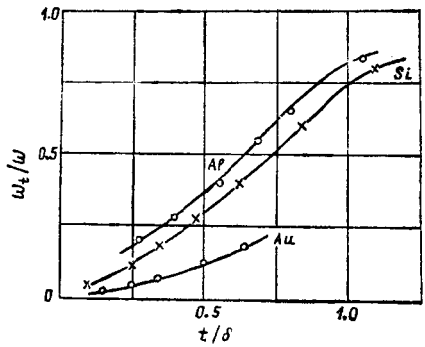


图 1 厚度  $t$  层内吸收束流能量  $w$  的相对部分  $w_t/w$  与这层相对厚度  $t/\delta$  的关系

算得到的电子束通过不同材料时的能量吸收曲线 (一次电子能量 0.1~2.0 兆电子伏特)<sup>(4)</sup>。借助于同一方法, 还可以计

1105806



算电子反射、它们的能量分布，也就是说，能够更准确地确定在材料中转化为热的那部分电子束能量。

为了确定热源的形状而计算物质内吸收的能量时，还须考虑金属内用于激励等离子振荡的损耗<sup>(5)</sup>。这就导致某些在加热区域内放出能量（总数的10%范围内）的再分配。研究指出，对于 $\leq 0.02\delta$ 的厚度，可观察到放出能量与熔层厚度的直接依赖关系。例如对于电子能量为六万电子伏特的束流，在铜中、在这些范围内放出能量为 $3 \pm 0.3$ 电子伏特·毫克<sup>-1</sup>·厘米<sup>2(6)</sup>。

对于电子的能量吸收和穿透深度得出了数学分析式<sup>(7,8)</sup>。在图2上提供了电子穿透深度 $\delta$ 与加速电压的关系曲线。这些曲线是不同的研究者在电子能量为10~100千电子伏特时得到的数据。

按最小平方数法处理这些曲线，可以确定最近似的关系<sup>●</sup>。曲线1-5是根据文献〔9〕的公式得到的。曲线6-9是依照试验数据作出的<sup>〔10,11,12,13〕</sup>。曲线10是按在已知条件下最可能的关系表达式

$$\delta = \frac{7.97}{\rho} \times 10^{-8} \cdot U_a^{1.64} \text{ (厘米)} \quad (1)$$

对铅求出的。

式中  $\rho$ ——材料的密度 (克/厘米<sup>3</sup>)；

$U_a$ ——加速电压 (千伏)。

当电压低于8~10千伏时，得到的数据表明曲线1、6、7、8、9、10之间的偏差不超过 $\pm 6 \sim 7\%$ 。在低密度电子束

● Н. Н. Децик作了必要的计算。

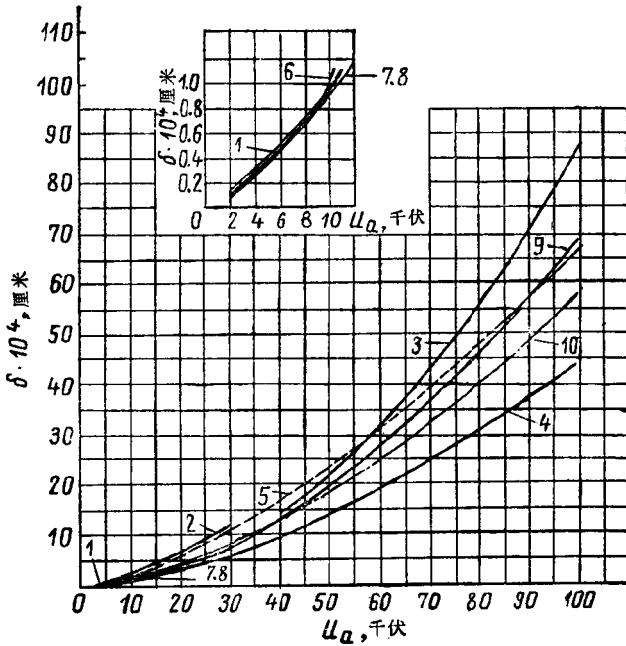


图2 电子在铝中的穿透深度（外推行程）和加深电压的关系

上进行的所有这些研究表明，在开始的瞬间，用电子束加工的金属表面下面形成一个单位热能析出高于表面的区域（见图1）。这种过热金属区的存在，成了解释电子束焊接时焊接熔池、液体金属中金属蒸气渠道的形成机理，以及焊接熔池中伴随焊缝成型过程的各种不固定现象的各种假说<sup>(14,15)</sup>的基础。

对于低密度的电子束来说，可以把热作用简单地理解为在自由行程深度内，物质从每个电子吸收的热量作用之总和。在焊接时使用的高密度束流情况下，相互作用和吸收能

量的特点则有本质的变化，因而要确定相应的一些规律是有困难的。最大的能量析出区域在开始的时候对材料熔化区的形成有决定性的影响<sup>[14]</sup>。熔化以后，凝固相的边界位置有所变化，而且产生一些决定焊接熔池形成的动力学方面的新现象。

在焊接熔池渠道内部和靠近被焊零件的熔化表面总是有加热金属的蒸气。电子束打到金属之前就先与这些蒸气作用而失去部分功率，并引起某种程度的散射。由于研究电子束与物质作用的公式（确定电子行程长度、能量传递和束流散射规律）不考虑物质粒子之间的相互作用和物质热物理特性的变化，因此它们同样适用于研究渠道内部甚至靠近金属表面的束流特性。上述的一些研究工作在确定渠道内部和加热金属表面功率的分配方面对于探讨电子束焊接条件具有首要的意义。

## 2. 电子束焊接的熔池形成过程

如果只把电子束的作用归结为一种点状热源对被轰击表面的作用，那么，即使把相变和焊接表面的各种合理的边界条件考虑在内，单用热量在金属内的传导规律也无法解释电子束焊时焊缝系数（熔化深度与焊缝宽度之比） $\geq 10$ 的现象。只有考虑到一些作为用高密度电子束加热金属的结果而具有的附加物理现象后才能近于从本质上解释电子束焊接时焊缝深宽比大的反常现象。

现在，研究工作者已经不否认在熔化金属中有渠道存在了。电子束就是通过渠道而达到熔池底部的。由于电子束对凝固相的相互作用发生在低于熔化金属的外表面处，因此具

有大的深宽比焊缝的电子束焊接状态也就获得了浸入束的电子束焊接的名称。热量不仅在熔化表面层，而且沿着整个渠道析出。但是沿着渠道深度析出热量是不均匀的（在时间上也是这样），甚至以高度的准确性保持全部规范参数为常数时也是如此。这样的规范是在把电子束轰击处的热功率析出密度增至  $10^5 \sim 10^6$  瓦/厘米<sup>2</sup> 或更大时得到的<sup>(16)</sup>。当电子束加热时作用于熔化表面的有：电子束的压力  $P$ ，和从表面蒸发走的原子的反作用压力  $P_{\text{отл}}$ <sup>(17)</sup>。这些力力图压凹液态表面；熔化金属表面张力  $P_{\text{поб}}$  和凹陷底部的流体静压力  $P_{\text{гидр}}$  力图拉平液体表面。计算表明，电子束的压力值很小（每平方厘米上不到 1 克），因而可忽略不计。根据力的平衡条件可写成：

$$P_{\text{отл}} = P_{\text{поб}} + P_{\text{гидр}} \quad (2)$$

根据 H. Tong, W. Giedt<sup>(18)</sup>，力平衡方程式可表达为：

$$P \geq (2\sigma_{\text{n}}/r) + \rho gh$$

或

$$h \leq \frac{P}{\rho g} - \frac{2\sigma_{\text{n}}}{r\rho g}$$

式中  $P$ ——蒸气压力；

$g$ ——重力加速度；

$\sigma_{\text{n}}$ ——表面张力。或者个别项用加热材料的热物理特性来表示，我们就可得出渠道深度  $h_{\text{к}}$  与其底部半径和温度的关系式。在底部电子束与金属直接相互作用且析出功率的密度为最大

$$h_{\text{к}} = \frac{v_{\text{исп}} \sqrt{\frac{2kT}{M}} - \frac{2\sigma_{\text{n}}}{r_{\text{к}}}}{\rho} \quad (3)$$

式中  $v_{\text{исп}} = v_{\text{исп}}(T)$ ——金属蒸发速度；  
 $T$ ——渠道底部熔化金属表面温度；  
 $r_{\text{к}}$ ——渠道底部的曲率半径；  
 $M$ ——蒸发原子的质量；  
 $\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\text{н}}(T)$ ——表面张力；  
 $k$ ——玻耳茨曼常数；  
 $\rho = \rho(T)$ ——焊接熔池内熔化金属密度。

金属熔化以后，在低功率密度的电子束情况时，由于蒸发速度  $v_{\text{исп}}$  小，在熔化温度时未观察到熔化表面凹曲现象。增加束流功率密度时，蒸气压力增加，产生凹入并形成渠道。当渠道底部处束流的比功率降低到使底部温度下降、蒸气压力等于反作用力时，即达到平衡<sup>[19]</sup>。这样考察焊接过程虽然是可信的，但是没有考虑到电子束和渠道内部以及至工件路途中的物质相互作用特点有关的许多偶然现象。此外，渠道内部金属的温度和温度沿着渠道表面的分布情况事实上仍然是不清楚的。与此同时，金属表面温度决定蒸气粒子的浓度、蒸气的压力，因而决定了电子路途上束流参数变化的特点。在大功率强烈聚焦的束流情况下，当形成相当深度的渠道时，它的形状和尺寸在焊接过程中经常变化着。这与液体金属强烈地移动及导致液体浸灌渠道、使渠道消失并随后又形成的其它现象有关。浸灌的频率可能是不同的，它们决定于金属性能和在渠道中及焊接熔池上面电子束与蒸气相互作用的特点。只有在通常确定加入焊缝热量时可以认为这个过程是介稳定的。但是，由于在焊接熔池中，特别在它的根部区域，液体金属质量小，这种动态过程导致了熔化深度的摆动，并且有时是很显著的<sup>[20, 18]</sup>。考虑到渠道内存在的金属蒸

气有屏蔽电子束的可能性就可以解释这种摆动的原因。提出了在束流作用下被焊零件移动时形成焊缝的图表<sup>(15)</sup>。电子束发射以后（在脉冲状态下工作），经过了厚度等于电子穿透厚度  $\delta$  的基本层蒸发所必须的一段时间，形成的蒸气即要改变束流参数。这个时间决定于比功率和物质的热物理性能并由下式确定。

$$t \approx \frac{\rho L \delta}{g_s} \quad (4)$$

式中  $L$ ——蒸发热（卡·克<sup>-1</sup>）；

$g_s$ ——电子束的比功率（卡·厘米<sup>-2</sup>·秒<sup>-1</sup>）。

在  $t_n$  时间内蒸气腾出金属中的渠道，其时间取决于渠道的最大深度  $H$  并由以下关系式确定。

$$t_n = \frac{\rho H d_x^2}{\rho^* v_n d_k^2} \quad (5)$$

式中  $d_x$  和  $d_k$ ——束流直径和相应的渠道上面部分直径（厘米）；

$v_n$ ——蒸气分子速度（厘米/秒）；

$\rho^*$ ——蒸气临界密度，相当于在束流  $g_s^*$  内能量密度不足以使金属继续蒸发时的状态（克·厘米<sup>-3</sup>）。

$$\rho^* = \frac{\ln(g_s/g_s^*)}{\alpha H} \quad (6)$$

而且电子束的吸收与散射系数决定于加速电压

$$\alpha = 2.4 \times 10^6 U_a^{-2} \quad (7)$$

式中  $U_a$ ——加速电压（伏）。

如果束流作用的脉冲时间不超过  $t$ ，且在等于或大于  $t_n$  的时间关闭束流以便蒸气腾出渠道，发生的将仅是带走物质，

而液态相的数量将是最小的。脉冲焊接时增加脉冲时间，缩短休止时间可以得到需要的焊缝形状（深度和宽度）。在这种情况下脉冲时间部分用于基本层的蒸发，犹如在加工时一样，而在脉冲的剩余部分时间内发生能量流散射在渠道壁上。散射流的比功率大约为入射流的比功率的  $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{100}$ ，它导致了规定数量的液态相。事实证明，正确地选择脉冲规范可以免除电子束的特有缺陷：焊缝根部的孔穴和熔化深度的变化。

众所周知，在渠道内和焊接熔池上面由于金属蒸气电离的结果形成等离子。解释它形成的一种说法见文献〔14, 21〕，由于在电作用区域（在穿透深度上）内金属过热的结果形成蒸气气泡，它上升到液态金属表面与电子束相遇。在这种情况下在气泡内蒸气压力增加到如此程度，以致接近表面时气泡发生爆炸式的破裂而使它的成分飞散开来。假设气泡存在的时间内它的成分几乎完全电离成为带电荷的等离子体。在评价这个过程现实性的时候未考虑到气泡自形成处至金属表面运动时间内它的动态性能。在这过程中气泡必须经过比它形成地方温度要低很多的区域。如果气泡真由蒸气组成，那么就应当估价随着周围介质温度的降低时气泡消失的速度。迫使气泡向表面运动的原因也是不清楚的。这可能是由于气泡和周围金属密度之间的差别，但是初生气泡的密度等于固体的密度<sup>(21)</sup>。在熔化金属内部气体或蒸气的气泡实际上是在重力作用下逸至表面的，因为焊接时在失重的条件下它们保留在凝固的金属里面<sup>(22)</sup>。那么，O. Д. Смирян的假说<sup>(14, 21)</sup>不能解释为什么在电子束焊接时在不同的空间位置上焊缝形

成的条件是一样的<sup>(23)</sup>。

研究电子束焊接时渠道里发生的过程可以用直接观察的方法，也可以采用模拟的方法，模拟的目的是尽可能研究过程的某一方面并消除外来的或从属的原因对所研究的相互关系的影响。为了直接观察拟定了并且使用着不同的方法。直接比较在不同的焊接条件下得到的熔化试件的纵向和横向磨片是最重要的。这是传统的研究方法，但是在大多数情况下它不能研究过程的动态情况。

电子束焊接时渠道的形成和变化能用自辐射 X-射线照相<sup>(20、24)</sup>，或外加的 X-射线辐射源对工件作 X-光照相<sup>(19、25、26)</sup>的方法来证实。对二次电子流和反射电子流变化的研究也可以判断渠道中发生的过程的动态情况<sup>(27、28、29)</sup>。在最近研究电子束与金属蒸气电离时形成的等离子体相互作用时发生的无线电频率振荡可以判断电子束焊接时某些对渠道特性有影响的现象<sup>(30、31)</sup>。最后，在确定某些动态规律性时，焊接熔池特性和形成过程的电影摄影也是有用的<sup>(32)</sup>。

已经研究了 30~40 毫米厚的不锈钢不开坡口电子束焊接时重力对焊缝成型的影响<sup>(23)</sup>。采用了电压为 23~25 千伏、束流 230~360 毫安的强烈聚焦电子束、以焊速 15 和 24 米/小时在不同空间位置时进行了上述实验。依据所得焊缝磨片，在评价试验的结果时，可以作出下述的结论：在所有空间位置强烈聚焦束流焊接的熔化深度保持不变，在熔化深度很大时出现金属瘤，这是由于仰焊和自下向上立焊时焊缝加强的高成型不稳定所引起的。在整理试验结果的基础上确定，利用长焦距枪时，熔化形状可以用高斯函数相当准确地表示出来。把与熔化深度  $h$  间隔  $1/e$  距离处的渠道半径作为渠道



的特性(有效)半径。不考虑壁上液体金属层的厚度,而把磨片上的焊缝宽度就看作渠道直径。实验同样确定,  $r_{\kappa} = (1 \sim 2)r_{\Phi\Phi}$ , 而表面熔池半宽度  $r_B = (3 \sim 5)r_{\kappa}$ 。因为束内电流同样认为是按高斯函数分布的,所以  $r_{\Phi\Phi}$  就是电流值降低为轴心处电流值的  $1/e$  处的束流半径。如果是强聚焦的电子束焊接,那么,可达的最大熔深与焊缝的空间位置无关,而为  $h_{\max} = 2.5\sigma/g\rho r_B$ 。增加束流直径,不能不估计到液体金属的流体静压(对钢来说当  $r_{\kappa} \approx 5$  毫米或更大时就出现这种情况)。

实验确定,保持束流截面的比功率和总功率不变时,熔化深度随着加速电压的升高而增加<sup>(33)</sup>。焊接规范:  $U_a = 30 \sim 100$  千伏;束流功率  $\leq 15$  瓦;  $v_{\text{进}} = 10 \sim 80$  米/小时。焊接材料——厚度 80 毫米的 1X18H9T 不锈钢。用线性探测器来检查束流的几何参数。在所有的试验中束流的最小直径是一常数并等于 0.25 毫米,其横截面上的比功率保持为 50 千瓦/毫米<sup>2</sup>。加速电压对熔化深度的影响具有下述形式:

$$\frac{h_1}{h_2} \approx \sqrt{\frac{U_{a1}}{U_{a2}}} \quad (8)$$

式中  $h_1$  和  $h_2$  是当加速电压为  $U_{a1}$  和  $U_{a2}$  时相应的熔化深度。这种关系为实验所证实,而且根据横向磨片测量熔化深度确定,在相等的束流功率时熔化金属的体积保持一常数值。随着提高加速电压,焊缝形状系数跟着增加。P.J.Konkol, P.M.Smith 和其他研究者研究了熔化深度与加速电压(75~125 千伏)的依赖关系,对钢来说这种关系可用  $h \approx U^{1.76}$  表示<sup>(34)</sup>。但是 R.Armstrong 研究表明<sup>(35)</sup>,在用铀作试验时,阳极电压在 110 到 150 千伏范围内变化,不影响熔化深度。