

〔美〕 M. M. 舍瓦尔兹 著

金属焊接手册

袁文钊 侯玉年 王世望 译 张延生 郝应其 校

国防工业出版社

金属焊接手册

〔美〕 M.M.舍瓦尔兹 著

袁文钊 侯玉年 王世望 译

张延生 郝应其 校

钢铁研究
院图书馆
藏书之章

国防工业出版社

217070

内 容 简 介

本书内容丰富, 文图并茂, 技术先进, 涉及焊接领域中许多先进技术。全书共分十章: 第一章是电子束焊; 第二章是激光焊; 第三章是等离子弧焊等; 第四章是高频焊; 第五章是爆炸焊; 第六章是摩擦焊; 第七章是超声波焊接和软钎焊; 第八章是胶焊; 第九章是真空钎焊; 第十章是扩散焊。

本书可供各个工业部门有关焊接技术专业的工程技术人员、高等院校焊接专业师生参考。

METALS JOINING MANUAL

M. M. Schwartz

McGRAW-HILL BOOK COMPANY

金 属 焊 接 手 册

〔美〕M. M. 舍瓦尔兹 著

袁文钊 侯五年 王世望 译

张延生 郝应其 校

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 印张23³/₄ 548千字

1988年1月第1版 1988年1月北京第1次印刷

印数: 0001—9600册

ISBN7-118-00234-8/TG22 定价: 5.15元

译者的话

这本《金属焊接手册》是由美国西科斯基飞机公司制造工艺主任M. M. 舍瓦尔兹编著，1979年正式出版，引起了广泛的重视。

手册的特点是引用的资料较新，大体反映出美国航空和航天制造及有关产业部门七十年代的工艺水平，它通过大量焊接实例着重介绍了新型焊接方法的推广应用，对材料的组配、接头的设计、工艺优缺点和经济性论述甚详。在这些工艺方法中，电子束焊、超声波焊、爆炸焊，胶焊和扩散焊等工艺发展的历史都很短暂，首先在航空和航天制造部门取得使用经验后才逐渐向民用工业部门转移，通过本书可以看到，这些技艺的精华仍属于航空和航天制造业，但在汽车、造船、电子等工业中的应用也日益普遍。

有关各种新型焊接工艺的资料，过去只零散地发表在一些期刊和特种文献中，读者收集起来很困难，这本书正好弥补了这方面的不足，内容广泛而又注意到了系统性，因此可以说是一本有实用价值的参考手册。

目前，我国各行各业正处于技术革命和改革之中，在推广使用新材料、新工艺方面本书可供借鉴之处甚多，但在使用中也希望考虑我国的具体情况而加以选择。

由于受专业和外语水平所限，译文中可能出现一些缺点和错误，对一些新词汇的试译也可能不够确切，欢迎读者批评指正。

译者 一九八四年五月

前 言

由于复合材料在使用上具有潜力,在次要性能方面又有很大利益,目前这两方面的发展时机已经成熟,在材料应用方面,盼望已久的工艺改革即将到来,材料应用的根本变革也即将发生。

目前,越来越强调结构的可靠性问题,使材料的发展状况正在发生变化。为了设计从未有过的高温高强度结构,工程师们在花费了多年精力以后开始认识到,只要这些结构达不到相当长的工作寿命,只要没有预测结构工作寿命的方法,那就毫无结果。

正如结构可靠性越来越重要一样,材料的一些次要性能,如应力腐蚀和疲劳强度,也日益受到人们重视。结构设计人员几乎一致认为,要使这些性能最佳化,对以前认为重要的性能,如极限强度和屈服强度,常常需要加以降低。现在迫切需要考虑的问题是什么呢?仍然是更广泛地应用冶金师与焊接工程师们的最新发现。当然材料使用者也关心新的加工技术,特别是连接方法的发展。

五十年代末和六十年代初,已发展了许多焊接和钎焊方法,现在就更多了。因为工程师们制造零件用的金属与以前相比有了很大变化,所以出现了一系列新的焊接方法。焊接导致“结合”,这个关键词意味着“生长(凝固)或结合(固态)成一体”。此种状态下的结合是冶金结合,焊接如同原子粘附在一起而构成一个整体金属件那样,越过界面形成相同性质的结合。因此,焊接是一种冶金连接方法。当一个物体上的诸原子与第二个物体上最邻近的原子层靠得足够近时,原子间能量的力便发生作用。上述情况对锻接和激光焊以及介于二者之间的其它方法也适用。

许多焊接方法之间的区别,主要取决于如何使分离原子的间距靠近。传统的办法是采用铸造方法,将金属填料注入接头处。现在,熔焊仍在广泛使用,但是除普通电弧外,等离子电弧、超声波、高能束、爆炸和摩擦热等方法也用于焊接中。另外,还出现了扩散焊和钎焊。采用这些焊接方法时,通过变形与界面扩散的某种结合,金属的点阵结构不经熔化或不用熔化金属钎料即可进行连接,但随后要采用扩散。

实际上,如果所采用的结合方法会使其中一块金属发生变形,或使合金之一处于不良的热处理状态,或损害零件的使用,则这样的焊接方法就得不到商业利益。焊接冶金活动的工程部分,在很大程度上并不使其本身与金属连接机理的发现发生关系,而较多地与连接过程中使副作用减至最小的技术发生关系。例如,从理论上讲,氧乙炔焊与电子束焊之间没有多大差别。两种方法都是熔化界面金属,而且液体金属能够克服或消除分离两个表面的障碍。然而,从商业上看,两种方法之间的差别则很大。电子束焊的加工费用大,但对焊接零件的不良影响(副作用)较小。

这种价值交换规律的原理是复杂的,市场中存在这么多截然不同的焊接方法就证实了这种复杂性。简而言之,几乎任何人都能将两块金属连接在一起。但是,有些人从事此项活动就可以获得商业上的利益,而另一些人就不行,不是因为代价太高而无竞争力,就是因为产品质量低劣、性能不佳而失去竞争力。

本手册介绍了可供读者选择的、能获得商业利益的各种焊接方法。

工程师们提出的问题是：“什么样的新材料对他们最有用，是性能改进得非常好的材料？还是能显著降低成本的材料？”另外一些工程师们面对有关连接方面的研究工作，他们的目标集中在第一次就能用最低的材料消耗和尽可能低的成本生产出无缺陷的连接件上。

全世界都在进行焊接和钎焊的研究，有些是个人探索，有些是团体组织研究，有些研究工作，政府有时也予以资助。有些研究是有实用价值的，如对专门产品又快又好的连接方法的研究；而另一些研究，严格地说，则是漫无边际的，一时还不能应用。总而言之，连接工业是很有发展前途的工业。

本手册中提到的许多方法，有的尚处于实验室研究阶段，有的已成为生产上可以接受的方法，有的只作为试生产或实验性的工厂设备，正在进行评价。工程师们通过研究开发工作不断改进技术，以便提供为全世界都可以接受的方法。

为适应需要而进行的研究开发工作，是永无止境的。工艺可以被看成一个永远在扩大的范畴，研究和开发的努力越扩大，被掌握的工艺就越多，为未来的尝试开辟广阔道路的范围也越大。虽然可能有先有后，但是探索先进水平新工艺的工作永远不会停止。

至于是否参与“竞争”，实在是没有选择的余地。个人可以选择先后，但对一家公司、一种工业或一个国家来说，为了保持昌盛和具有竞争力，不占领新的工艺领域，事实上是不行的，至少也要引进和充分利用别人的发明创造。一家公司能长期以同样的产品在同一市场上维持其交易，是罕见的。

未来的道路是在连接方法和设备方面，给积极上进的一些公司提供更多的选择机会。现在，工程师们是在刺激性和冒险性的气氛下工作的。科学家与工程师们总觉得他们正在商业方面从事着最得力的、举足轻重的、具有竞争性的工业尝试。

今后若干年内的挑战和变革至少有希望同过去一样，而且很可能超过过去。近十五年来，金属连接工业已创立了一门新的科学和工业，其中碰到的一些问题是如此新奇，以致没有一个人愿意打消任何革新的设想和表示“不愿做”。现在的任务是继续进行试验研究，使我们实验室与其他实验室所取得的研究成果迅速用于实际生产，同时不放过对连接方法及连接设备的任何改进。

衷心感谢帮助我准备手稿的 R. J. 布希-菲尔德，并感谢 T. 达维尔的协助。

M. M. 舍瓦尔兹

目 录

第一章 电子束焊	1
电子束焊的背景	1
电子束焊工艺	3
固定式和可移式电子枪	8
焊接环境	11
低真空电子束焊	13
非真空电子束焊	14
设备及夹具	16
接头设计	26
电子束焊的经济性	31
安全	31
修理	32
材料	34
机械性能和试验结果	53
应用	56
参考文献	72
第二章 激光焊	76
工艺理论及原理	76
主要参数	77
激光性能	79
焊接	80
设备及夹具	81
接头设计	84
优缺点及经济性	86
安全	87
材料	88
应用	97
参考文献	103
第三章 等离子弧、针弧(微束等离子)及等离子熔化极气体保护焊	105
等离子弧焊	105
理论及原理	105
等离子弧工艺的新的改进	108
设备及夹具	109
接头设计	110
优缺点及经济性	110
材料及其性能	114
应用	116

针弧(微束等离子弧)焊	120
工艺特点	120
操作特性	121
夹具与接头设计	123
保护	124
材料	125
等离子-熔化极气体保护焊	126
焊接工艺方法概述	126
焊缝熔透及成形	128
应用	129
参考文献	132
第四章 高频焊	134
原理及主要参数	134
基本工艺方法	140
设备及夹具	145
经济性	147
材料	149
接头设计	151
应用	152
参考文献	158
第五章 爆炸焊	160
原理及工艺参数	160
焊接参数	168
焊接质量	169
设备及夹具	172
经济性(优点和局限性)	173
接头设计	174
材料	177
应用	180
参考文献	184
第六章 摩擦焊	186
工艺基本原理	186
工艺特点	187
两种工艺方法的区别	191
温度分布	192
冶金特性	193
界面的结合	195
设备和夹具	196
接头的基本设计	205
优缺点及经济性	210
焊接质量和工艺过程的控制	212
材料	212
应用	221

参考文献	227
第七章 超声波焊接和软钎焊	229
超声波焊	229
原理	229
工艺方法	229
主要参数	230
接头设计	231
设备	232
优点和缺点	235
材料和性能	235
双金属接头	239
应用	239
超声波软钎焊	244
原理	244
早期发展	246
主要工艺参数	247
工艺控制	249
设备	252
钎料成分	254
润湿	255
接头特点	255
设计考虑	256
用超声波钎焊焊接的金属	256
应用	258
未来潜力	262
参考文献	263
第八章 胶焊	264
原理及主要参数	264
物理特性	265
胶粘剂的应用	266
胶接性能	267
金属胶粘剂	267
设备	268
设计	268
工艺的经济性	271
材料及其性能	272
应用	276
参考文献	278
第九章 真空钎焊	279
原理	279
机理和主要参数	280
设备及夹具	285
阻钎剂和隔离剂	290

优缺点及经济性	291
材料	292
应用	311
参考文献	319
第十章 扩散焊	323
扩散焊方法的理论及原理	323
主要工艺参数	325
中间材料	328
变形焊接	329
设备及夹具	334
接头设计	339
优缺点及经济性	342
材料	344
应用	359
参考文献	367

第一章 电子束焊

二十年前在原子能工业中诞生和在航空与航天工业中不断完善的电子束焊,已从青年时期发展为成熟的制造工艺(主要是在汽车及其有关领域)。然而,其它工业对电子束焊的优点的认识则比较缓慢。电子束焊的优点包括:焊接费用较低,输入工件的能量最少,畸变小,能焊接精加工的零件,不消耗焊接材料,生产率高,而且从铝到难熔材料、从箔到厚板各种金属的焊接质量都好。

但是,由于对这种焊接方法认识上的提高,已出现了高度复杂的用途。因此,就设备来说,电子束焊必须不断地和真空技术、电子控制、电源及夹具的最新发展结合起来。

研究电子束焊的原因很简单,因为没有其它能连接核燃料元件用的高熔点耐熔金属的方法。最初一些应用特点是质量很好,但生产率非常低。其它一些优点则日益明显。

电子束是洁净的,最初工件与电子枪共用一套真空系统,典型真空度为 10^{-4} Torr (0.0133 Pa), 沾污程度大约为 0.1 ppm。因此,焊接接头的冶金纯洁度极好。甚至在低真空和非真空电子束焊法出现之后,高真空电子束焊仍在广泛应用。专家们预见,在电子束工艺的应用方面,电子束焊的使用范围将来还要继续扩大。

电子束焊的背景

任何工艺上的突破都需要经过很长时间才能得到的。电子束焊作为一种工艺上的突破是最近才发生的,它是由德国人首先设想出来的,并于 1955 年在法国首先获得应用,这是值得注意的事实。就低真空电子束焊来说,这种突破实际上是倒退了一步,它只是利用了过去曾被忽略的真空环境的优点,而当时工业部门正忙于采用大气压力下的电子束焊。

工业电子束焊设备有一个电子加热源,由于电场作用使电子加速到极高的速度,通过静电或电磁场作用将电子聚成尖锐的电子束,可焊接金属的范围很广,厚度范围由箔至极厚截面。制成的焊接设备,用 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Torr (1.33~0.133 Pa) 的高真空、0.5~0.3 Torr (5.7~39.9 Pa) 的低真空或局部真空,以及在空气或惰性气体中的非真空中均可进行焊接。主焊机是按两种工作电压范围中的一种设计的。所谓低压焊机是指在 15~60 kV 电压下工作的焊机。无论低压或高压焊接设备都能在高真空或低真空中焊接(见图 1-1),只有高压焊机才能进行非真空电子束焊接。

在真空环境中的电子束焊与其它熔焊设备比较,其优点是:(1) 高能电子束可获得窄而深的穿透型熔化焊缝;(2) 利用高度集中的电子束可减少对材料的输入能量,因而材料的畸变和热影响最小;(3) 可准确控制焊接参数,以保持重复性;(4) 真空环境可保证焊缝不被气体沾污,因而活性金属也可以焊接;(5) 从箔至厚截面金属均可一道焊成;(6) 许多异种金属组合均可焊接;(7) 焊接速率比一般熔焊工艺快;(8) 电子束焊

● 1 Torr = (101325/760) Pa.

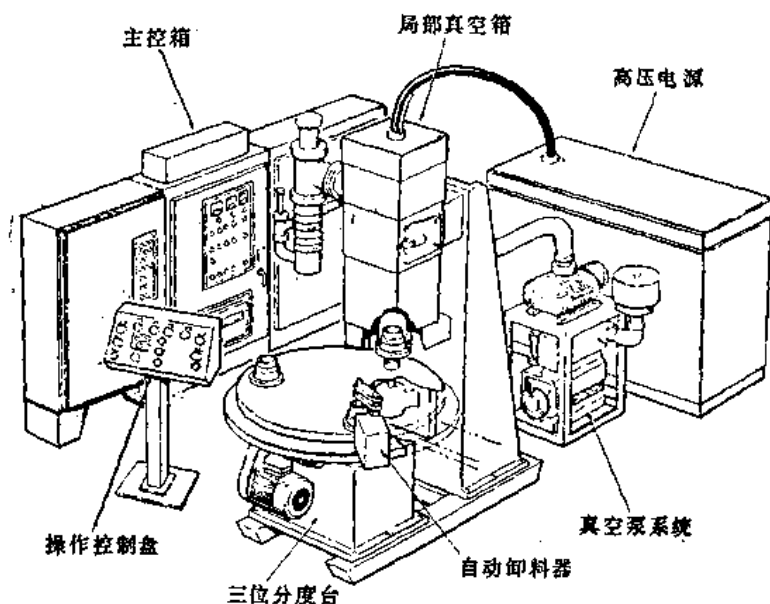


图1-1 7.5kW低真空焊接系统

对材料的影响最小。

电子束焊的缺点是：(1) 设备投资大；(2) 此工艺限于焊接特殊形式的接头；(3) 虽然通过加宽焊缝至 $0.275\text{in}(7\text{mm})$ 的办法，使 $0.030\text{in}(0.76\text{mm})$ 的接头间隙已经获得了完善的焊接接头，但对深度大于 $0.5\text{in}(12.7\text{mm})$ 的窄焊缝来说，金属接头的间隙仍不得超过 $0.010\text{in}(0.15\text{mm})$ ；(4) 如果电子束对得不准，则可能使焊缝错位；(5) 因为焊接接头窄，所以需采用准确的非破坏性试验来检查电子束焊的焊接接头，以保证焊接质量；(6) 焊前需仔细进行表面准备；(7) 真空室会限制待焊零件的尺寸；(8) 对于 300M 和 D6AC 这类合金钢的焊缝区，由于基体金属和夹具的淬火效应，焊后零件很硬；(9) 电子束焊用的夹具须用非磁性材料制造，以免电子束偏离焊缝。如果夹具已经过退磁，则不需要用非磁性材料制造夹具。

上述一些要求是保证原子能工业和航天工业产品质量不可缺少的，而在其它一些工业部门，为降低电子束成本，有利于竞争，可放宽要求。

在上述第 (3) 项缺点中，电子束焊焊接接头的间隙可随着新用途的出现而增大。例如，有关贮油罐及管道用的结构钢和压力容器用的钢的优质电子束焊。至于第 (6) 项贮油罐用的火焰切割板材，已成功地采用了电子束焊。

在真空环境中进行电子束焊的要求是，真空室能容纳下工件及其夹具。高真空焊接（通常是在真空室内）时，允许电子枪与工件间保持较大的距离，因为没有明显的电子散射。采用低真空焊接时，由于电子-分子的碰撞将产生电子束的散射。由于电子束的散射，焊缝区变得比高真空焊时宽，而气体含量则略有降低。在许多用途中，这种变化对工件的影响并不严重。然而，无论高或低真空焊都需要使用大的或复杂的真空室。两种形式的真空室都需要有专用的真空泵系统，以便在焊接时确定和保持所需的真空度。

非真空电子束焊时，工件置于大气压力下，电子束可脱离其形成环境，所以不需要真空室，并可大大提高生产能力。但是，从真空中射出的电子束经过差压泵的管道系统

射到工件上时, 将有 10% 的功率损失, 而且电子流逐渐被大气压力下的气体扩散。曾经采用了低密度的保护气体 (如氦), 但在多数情况下, 为了使电子的散射最小, 在电子束的周围使用空气还是令人满意的。非真空电子束焊时需要高加速电压, 会产生高强度的 x -射线, 操作人员必须加以防护。非真空电子束焊不限制工件的尺寸, 但限制形状, 因为在空气环境中, 从电子枪至工件的距离为 $0.375 \sim 0.5 \text{ in} (9.5 \sim 12.7 \text{ mm})$, 这是一种典型值。因此, 非真空电子束焊方法的应用受到工件形状的限制。

电子束焊机有商品供应, 焊机型号的选择, 主要取决于焊接要求和制造商的优惠条件。一般说来, 采用高真空或低真空的低压和高压设备, 都能对大多数金属材料进行类似的焊接。

电子束焊工艺

低压电子束焊机既可采用装在真空室上的固定式电子枪, 也可采用放在真空室内部的可移式电子枪。在真空中工作的高压电子束焊机有一只装在真空室上面的固定式电子枪。在特殊情况下, 为便于固定式电子枪移动, 可采用滑动型密封。参看“设备及冷却”一节中的滑动密封材料。高压非真空电子束焊用的电子枪, 既可以是固定式的, 也可以是可移式的, 由制造商决定。

在典型的低压高真空焊机上, 电子枪可固定放置, 也可沿工件作横向移动。典型的电子枪及工件的运动方式如图 1-2 所示。电子枪沿 y 轴和 z 轴移动, 工件滑动架沿 x 轴移动。电子枪的多轴向运动, 可由焊接操作人员或自动程序准确地控制。高压高真空焊机用的电子枪组件安装在真空室的壁上。

对规定的焊接用途来说, 电子枪的位置和移动是必须考虑的重要因素。但是, 不论是固定式电子枪, 还是可移式电子枪, 都需要有适当的夹具使工件移到电子束适宜的位置。真空室内安装的可移式电子枪与安装在真空室壁上的固定式电子枪比较, 应考虑另一个要点是引发电子束用的钨制元件更换问题。由于可移式电子枪位于真空室内部, 更换

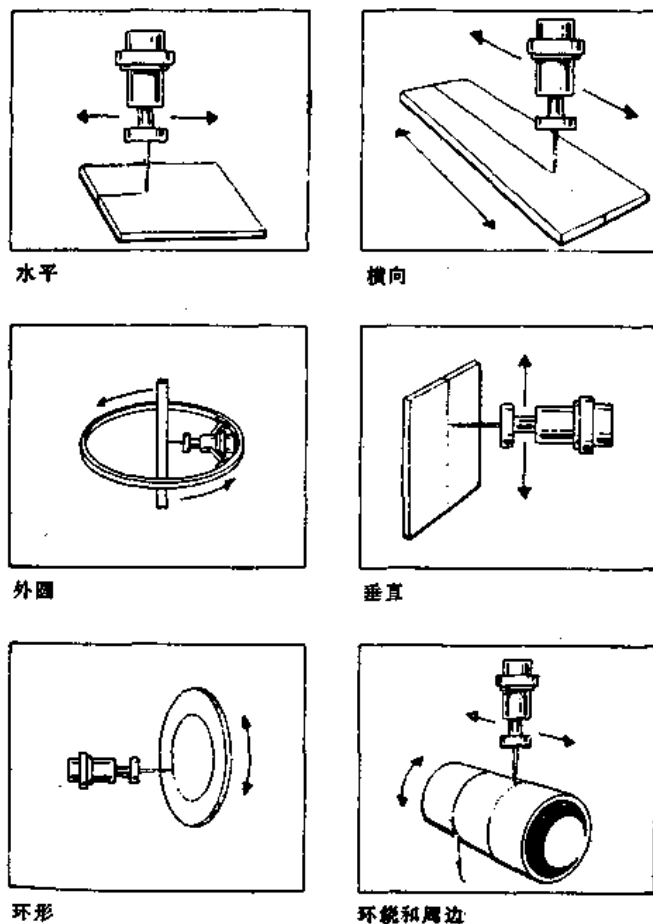


图1-2 用可移式电子枪进行电子束焊的位置

阴极时应解除真空, 取出电子枪。如果采用装在真空室壁上的固定式电子枪时, 使用单独的真空阀与真空泵系统, 可在不解除真空室真空的条件下更换阴极。当阴极失效时, 由于

有了上述条件，便可大大缩短重新开始焊接循环的时间。

使用低压或高压电子束焊时需要考虑的另一个因素，是由于电子束冲击工件表面而产生的 x -射线对人身有危害，需要防护。20kV以下低压焊机产生的 x -射线称为“软” x -射线，能被真空室的钢壁和铅玻璃所阻止。但高压焊机产生“硬” x -射线，操作人员必须用铅板或其它材料加以防护。如果电压大于20kV，则必须定期检查焊机的射线。在某些情况下，还需要采用遥控法（如使用光学系统或闭路工业电视）来观察焊接操作的情况。参看“安全”一节。

在进行电子束焊时，操作人员必须准确地调整电子束和夹具机构，使电子束正射到焊缝中心。因为根据电子束的类型、聚束电流（控制电子束聚焦长度的）、从电子枪至工件的距离、加速电压和电子束电流的不同，电子束斑点的尺寸可在0.005~0.060in（0.13~1.5mm）范围内变化，除非在焊前及焊接过程中操作人员能准确地看到电子束与焊缝，否则电子束斑点可能对不准接头。

参数

控制电子束焊的主要参数有：

1. 加速电压；
2. 束流；
3. 焊接（移动）速度；
4. 聚束电流；
5. 从电子枪至工件的距离。

提高束流的加速电压，可增加焊透深度；用这两个参数的乘积（称为电子束功率）即可确定熔融的金属量。在不改变另一参数的情况下，提高焊接（移动）速度，焊透深度几乎成比例地下降，而且焊缝宽度也略有减小。如果焊接速度不变，改变另外四个可控参数中的任一参数，就会增大斑点尺寸，使焊透深度减小，宽度增加。

偏转电子束可改变其冲击角度或产生电子束摆动的控制模式，从而获得较大斑点尺寸的效应或其它特殊效应，而且电子束可脉动，以降低有效的电子束功率。

非真空电子束焊时，所有这五个参数（除束流外）一般都是预定的，只能根据束流来控制。束流可以根据用途确定为固定值，可以根据工件的移动来通电和断电，也可按预定的模式变化程序。不可使用电子束偏转，电子束摆动也很少使用。

电子束跟踪

利用新的电子探头系统研究出一种不用目视光学仪器即可使电子束对准焊缝的精密调试方法。电子探头适用于各种电子束系统，利用电子束本身可直接显示出它与待焊焊缝的相对位置。由工件表面反射的电子可以被接收和探测到，并在阴极射线示波器上看到迹线。当电子束穿过焊缝时，电子束反射的角度发生变化，显示的图形也有所变化，并显示出工件的表面的外貌。另一最新发展是扫描记录的再现系统，它可以自动扫描待焊的焊缝，并在计算机储存器中将坐标记录下来。在进行焊接时，一旦发出指令后该系统可按照要求无限制地再现所记录下来的轨迹。

电子束的摆动

低压和高压电子束焊机设计，保证了能通过对电子束的各种操作来改进焊接方法。采用偏转线圈，可使电子束的幅度围绕中心线在 x 和 y 两个方向上发生变化。利用

偏转系统可使电子束产生波形、圆形、矩形和方形等。电子束的偏移可显著改进焊缝的完整性，同时由于免除了夹具操作而改进焊接方法。电子束摆动所获得的焊缝较宽，冷却速率较低，而且不必使电子束散焦即可获得均匀的接头形状。对于焊缝根部间隙较大或使用代用金属填充材料的接头，焊缝比正常焊缝要宽些。

由于焊缝较宽，冷却速率较慢，可以更有效地清除被沾污材料中的气体，从而有助于对气孔的控制。对快速冷却或冷却后产生脆性的金属焊接接头，可从电子束摆动和散焦得到益处。电子束摆动的一个更有效的作用，是普遍地改进了接头的形状。为了防止咬边和未填满，已采用了摆动加散焦或摆动不加散焦的方法。电子束的摆动虽然可用，但也不能常用。除非为了控制焊透深度，绝大部分的优点可利用散焦的电子束来再现。如果焊接箔材，则较宽的焊缝和较大的输入热也可能是缺点。增加一个具有各种脉冲宽度和频率的脉冲发生器或形成环形的发生器，对导热性良好的材料（如铝或铜）或蒸汽压低的金属（如镁），对获得完整的接头有一定的帮助。获得电子束脉冲的方法是在电子束的偏压栅极施加一个负信号这样就能切断电子束而形成脉冲。如果某些用途需要，也可用脉冲电子束驱散热量和金属蒸汽。在装有脉冲控制的焊机上，可将电子束的操作由连续式改成断续式。电子束的脉冲可降低热输入的速率，但与电子束的其它状态无关。所以，可将脉冲与摆动、偏转及移动速度结合起来，以便对焊接起作用。在极低的频率（如1 Hz）下，甚至在低的移动速度下，每一脉冲均可完成单独的一条焊缝。提高移动速度、调整脉冲频率及脉冲长度，可用正常的生产速率进行定位焊、点焊或断续焊。

高真空电子束焊

高真空焊的主要缺点之一是焊接一条焊缝的时间太长。首先，须将零件和夹具装在一起，如果夹具固定在真空室内部，则需将零件牢固地装在夹具内，并将所需的激冷块、引出导板、聚束块和夹板放在适当位置。然后将焊接接头或连接件放在与电子枪相对的适当位置上。在夹具与电子枪定位以后，将真空室抽至 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Torr ($0.0133 \sim 0.00133$ Pa) 的真空度。由操作人员将接头焊缝对准，按要求调整电子束焦距，接上传动机构并进行焊接。然后将真空室解除真空，并将零件或夹具和零件取出。在高真空电子束焊机上平均一个典型循环的时间是：

1. 在真空室内放置零件或夹具激冷块和夹板的时间为 5 min;
2. 将真空室抽至 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Torr 真空度的时间为 7 min;
3. 调整电子束、聚束和焊接的时间为 5 min;
4. 将真空室解除真空并取出工件的时间为 5 min。总共为 22 min。

上述典型接头焊接时间可能有较大的变化，要根据接头的复杂程度、所用夹具的类型、抽真空的能力，以及操作人员和完成焊接操作的技能而定。

低真空电子束焊

为加速焊接过程，研制出一种 $0.05 \sim 0.3$ Torr ($5.7 \sim 39.9$ Pa) 的低真空焊机。低真空焊接头的质量和大多数材料的高真空焊相似，并由于降低了抽真空的要求而使过程大大加快。除缩短抽真空的时间外，还可设计最小尺寸的真空室设备，进一步缩短抽真空的时间。低真空电子束焊方法正在使电子束焊成为一种独特的提高生产率的手段。正在使用这种形式的专用焊机生产小型的零件，其生产率高达每小时 1800 个零件。

低真空电子束焊设备由两个真空室和两台真空泵系统组成。一个真空室套在电子枪

外面,另一个真空室内装工件。无论低压或高压电子束系统,所用的电子枪室都使用机械泵和扩散泵抽真空至 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Torr。要求高真空的环境是为了最大程度地减少电子发射极的氧化。焊接室也是单独用一台机械泵抽真空至 $0.01 \sim 0.1$ Torr ($1.33 \sim 13.3$ Pa)。电子枪室与工作室的连接通道上有一个限制漏气速率的孔和一个使电子枪室保持高真空度的专用阀。当工作室被抽至所要求的真空度时,阀门便打开并触发电子枪。两个室内的真空度不相等,因为在 $0.01 \sim 0.1$ Torr ($1.33 \sim 13.3$ Pa)下,空气或气体分子的平均自由程长,只有少量气体分子偶然找到通往电子枪室的通道,并在那里通过扩散泵作用而被排除。焊接完毕后,将两室间的阀门关闭,使工作室解除真空。因为电子枪室保持高真空和尺寸极小的工作室能用机械泵迅速抽成真空,整个循环大约只需几秒钟,所以此法适用于成批生产。然而,这种类型的设备与一般用途的高真空焊机有所不同,因而常被列入专用焊机中。典型的低真空电子束焊机示于图1-1和图1-3中。

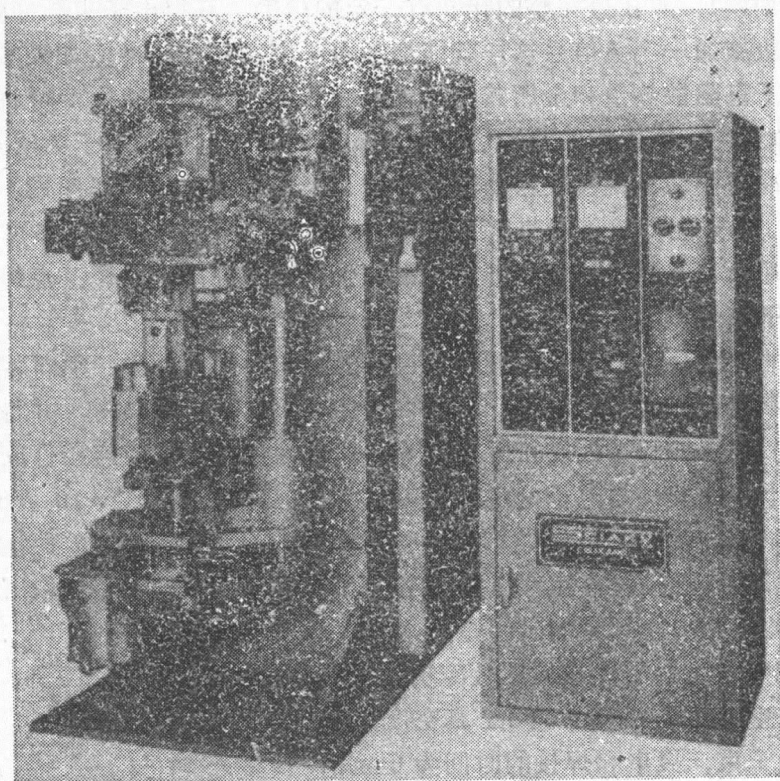


图1-3 低压低真空电子束焊机

当真空室足以容纳专门的零件及其夹具时,建议采用真正自动化的高生产率的低真空电子束焊机。

对操作人员 α 射线防护的要求,与上述高真空焊的防护措施相同。由于低真空电子束焊所需要的时间比高真空焊少得多,所以下一步的工作是去掉真空室或在空气中或在大气压力[760Torr (101.08 Pa)]的低密度气体中进行焊接。电子束是在高真空中产生的,然后通过几个小孔形成逐渐降低真空度的抽真空室,一直到使电子束到达大气压力。暴露在空气中的电子束,由于电子与气体分子相互撞击和相互接触而迅速减弱。为使这种现象减至最少的程度,可在电子束出射小孔的电子流周围喷射原子数为2的最轻

的惰性气体氦。因为电子束的散射为气体密度乘以电子束穿过气体距离的函数，所以电子束的行进距离增加会引起过多的能量损失和散射。因此，电子束（100~200kV）的工作距离不得大于0.75in（19mm），而且9kW功率对钢的实际焊透能力大约为0.5in（12.7mm）。现在，许多系统中已用空气代替氦气，工作距离约为0.375~0.5in（9.5~12.7mm）。在真空室外焊接时，待焊零件的长度可根据辐射防护区的要求加以限制。但

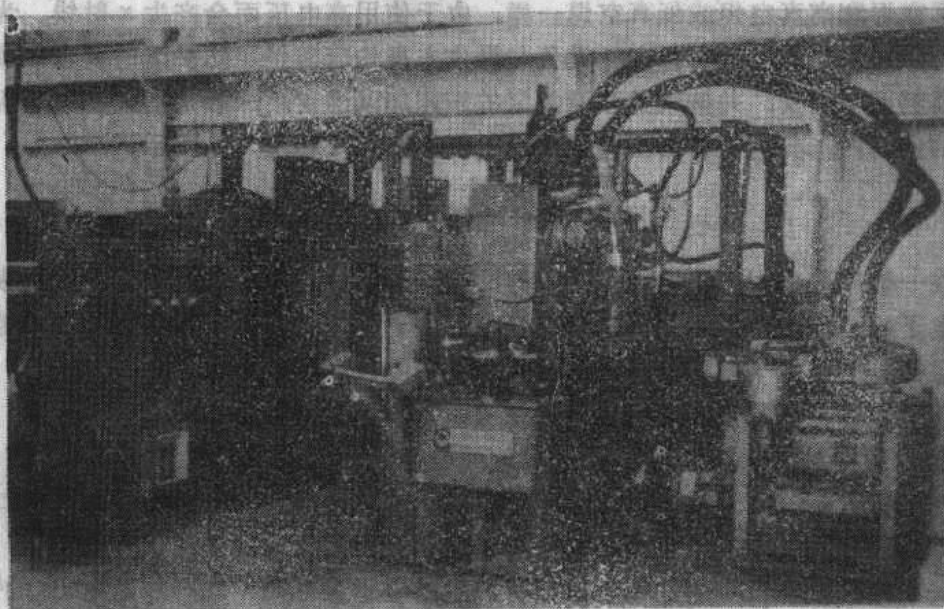


图1-4 高压非真空电子束焊设备

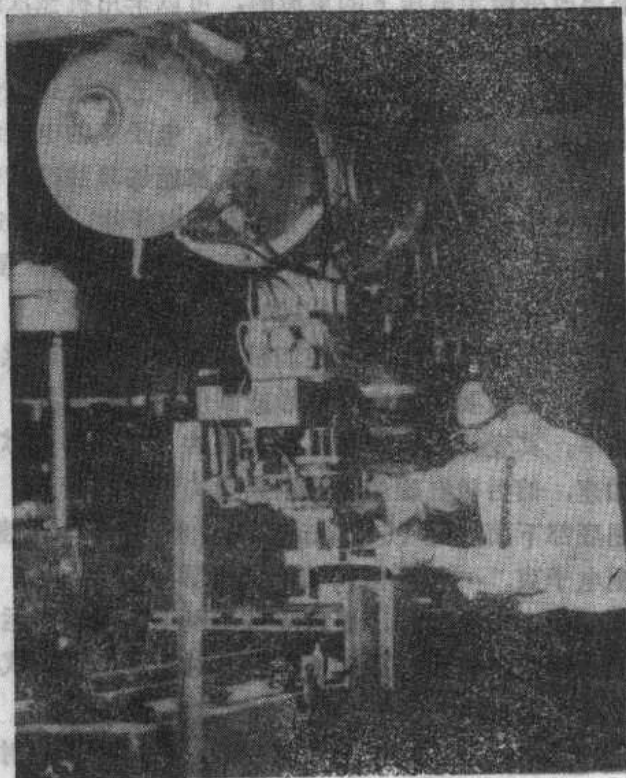


图1-5 高压非真空电子束焊设备