

546029

王之康等编著



真空电子束焊接设备 及工艺

ZHENKONGDIANZISHU
HANJIESHEBEIJI
GONGYI

原子能出版社

真空电子束 焊接设备及工艺

王之康 高永华 徐 宾 编著

原子能出版社

2000年 北京

内 容 提 要

《真空电子束焊接设备及工艺》全书共4章：电子束焊接方法；真空电子束焊机；真空电子束焊接工艺；真空电子束焊接的工艺过程。书中还介绍了真空电子束焊接的一些实例。

本书内容较为新颖丰富，对真空电子束焊接设备及工艺作了较为深刻的阐述，其中一些内容是多年的工作经验总结，有一定的参考价值。

本书可供厂矿、科研等部门从事电子束焊接工作的技术人员和大专院校有关专业师生参考，也可作为中级工人理论培训教材使用。

真空电子束焊接设备及工艺

王之康 高永华等编著
责任编辑 李盈安

原子能出版社出版
(北京2108信箱)

中国工程物理研究院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

* * *

开本787×1092 1/16·印张15 字数300千字
1990年9月第1版 印数1—1050

ISBN7—5022—0264—1

TB.7 定价：8.95元

前 言

真空电子束焊接是近30多年发展起来的一门新技术。随着真空电子束焊接设备以及工艺的不断改进和完善,这种焊接方法在许多工业部门得到了应用,成为一些先进的工业领域中必要的工艺方法之一。

在60~70年代,我国的真空电子束焊接技术还很落后,电子束焊机的数量寥寥无几,且为低压和中压的几个型号。近10多年来,由于四化建设的迅速发展及研制尖端产品的需要,电子束焊接技术才有了较为广泛的应用。

为了满足我国经济建设和技术发展的需要,中国工程物理研究院受核工业总公司的委托,组织编写了“真空电子束焊接设备及工艺”一书,供从事真空电子束焊接的工程技术人员、工人和大专院校有关专业的师生使用。

真空电子束焊接包含了真空、高电压、自动控制、机械及焊接等多门专业知识,在编写过程中,我们力求由浅入深、循序渐近,讲清问题。为了使本书更具有系统性和完整性,也编入部分有关学科的专业内容,帮助读者更好地理解。书内还收集了编著者多年从事真空电子束焊接工作的经验总结,具有一定的实用价值。

本书由中国工程物理研究院王之康担任主编,王之康、高永华、徐宾编著。编写过程中郭鹏也做了部分工作。全书由俞大光、朱庆飞审校。核工业总公司张兴铃、张宏钧以及中国工程物理研究院周学忠、郝金玺等也参加了本书的审查工作,提出了宝贵意见,在此谨致谢意。

由于本书内容比较丰富新颖,涉及的业务知识面较广以及编著者专业知识所限,时间仓促,在结构体系、文字叙述和内容取舍等方面未能臻于完善,缺点和错误在所难免,望读者不吝批评指正,以利今后改进。

编著者

一九八九年十二月

绪 论

1、什么是焊接

焊接是一种重要的，也是用途极广的金属加工方法。利用焊接可以连接上百种形状不同的钢材和合金。目前已被广泛采用焊接的金属材料有普通碳钢、低合金钢和不锈钢、铝、镍、铜、钛等有色金属及其合金以及铌、钼、钨等难熔金属。多种新型高温金属及其合金也都用焊接方法连接成各种特殊用途的零部件。实际上，目前世界各国所有工业部门都已离不开焊接这门技术。同时，随着现代化科学技术的发展，焊接这门技术也在不断完善，并发展成为一门独立的科学技术。可以说焊接已在现代生活中占有极为重要的地位。

在机械制造业中，使两个或两个以上的零件连接在一起的方法有螺钉连接、铆钉连接和焊接的方法。前两种方法是拆卸的机械连接，而焊接则是利用两个物体原子间产生的结合作用来实现的，是永久的、不能拆卸的连接。因此，“焊接”一词的含义是：两个被焊物体（通常指金属）的局部连接。这种连接是使被焊件相互接近到原子间的引力能发生作用的程度来实现的。因此焊接就需要加热、加压或同时加压加热的办法来实现，以获得永久性的连接。

目前实现焊接的方法有很多，按焊接过程的特点大致可归纳为三大类：

（1）熔化焊

这类焊接方法的特点是，将被焊金属的接合处局部加热到熔化状态，互相融合，冷却凝固彼此结合在一起，如气焊、电弧焊、埋弧焊、气体保护焊、电子束焊等。

（2）压力焊

这类焊接方法的特点是，在焊接过程中，对被焊金属施加一定的压力（也可同时加热或不加热），促使被焊件间的接合面紧密接触，使原子间产生结合作用，以获得永久性的连接。如电阻焊、摩擦焊、扩散焊等。

（3）钎焊

这类焊接方法的特点是，利用比焊件熔点低的钎料和焊件一起加热。使钎料熔化，而焊件本身并不熔化。熔化的钎料流入焊件结合表面的空隙与固态焊件产生结合作用，冷凝后连接起来。钎焊又分为硬钎焊和软钎焊二类。

2、焊接技术的发展现状

近代焊接技术，是从1882年出现碳弧焊开始，直到本世纪的30年代，在生产上还只是采用气焊和手工电弧焊等简单的焊接方法。由于它具有一系列技术和经济上的优越性，因此在近五十年内获得了迅速的发展。40年代初期，出现了优质电焊条，使长期停滞的焊接技术得到了一次飞跃。40年代后期埋弧焊和电阻焊的发明和应用，进一步推动了焊接技术的发展，并使焊接过程的机械化和自动化成为现实。50年代，由于锅炉工业的发展和航空工业的需要，又出现了电渣焊和各种气体保护焊。60年代以后，随着焊接新能

源的开发和焊接新工艺的研究, 等离子弧切割与焊接、真空电子束焊接、激光焊接等技术也陆续被应用到各工业部门, 使焊接技术达到了一个新的水平。近年来焊接工作者还对离子束焊接、太阳能焊接进行了不少研究, 并取得了一定的成就。

焊接领域内, 除了新的焊接方法的研究外, 在焊接工艺自动控制方面也有了很大发展。电子技术的飞跃, 促进了焊接自动化的发展, 目前世界各先进工业国家已普遍采用程序控制的焊接生产线, 或采用电子计算机控制的自动焊接机器人, 既提高了焊接质量, 又提高了焊接生产率, 使焊接工艺自动化达到了一个新阶段。

在焊接工艺研究方面, 近年来, 由于航空、宇航及原子能工业的需要, 不断提出具有特殊性能的材料焊接问题, 如高强度钢、超高强度钢、特种耐热耐腐蚀钢、高强度不锈钢、特种合金、难熔金属以及异种金属的焊接问题。这对焊接技术提出了更高的要求, 需要在这些方面开展焊接新工艺的研究。近年来随着焊接技术的进步, 在新工艺研究方面已经取得了不少成绩, 很多过去认为不能焊接或难以焊接的金属已经被制成了焊接产品。因此, 可以预料, 随着科学技术的进步, 焊接工艺技术也将获得新的发展。

3、电子束焊接的发展概况

电子束焊接是近30多年来新发展起来的一种熔化焊接方法。最初由德国学者首先提出以电子束进行焊接的设想, 1954年法国的斯托哥博士用自己设计和制造的一台电子束焊接装置, 为法国原子能委员会焊接了核反应堆的燃料包壳, 宣告了利用电子束能量焊接金属的方法获得成功。其后, 由于真空技术的完善、电子技术的发展, 又研制出了真空电子束焊接装置。真空电子束焊接的出现, 解决了许多常规焊接方法无法焊接的特种金属的焊接问题。使焊接技术又发展到一个新的阶段。这时, 世界各国对这种新的焊接方法十分关注, 相继投入力量进行研究和改进。联邦德国蔡司公司领先研制成功第一台生产性的7.5kW真空电子束焊机。1958年美国西屋公司进一步试制成功了150kV高压型的真空电子束焊机, 突破了制造高压电子枪的一系列难点。之后, 又经过了20多年的进一步改进。至今, 真空电子束焊机已为世界各国大量生产, 同时这种焊接方法已在各尖端工业部门中占有不可缺少的重要地位。目前电子束焊机的生产, 在发达的资本主义国家中, 已成为一个独立的专门行业。

近年来, 电子技术的飞跃发展, 真空技术、高压技术的不断完善, 使电子束焊接设备发展很快。焊机的稳定性、重复性以及自动控制功能等方面都已获得了很大的提高, 并且很多焊机已采用了电子计算机控制, 投入到各种复杂零部件的自动生产线中去。例如汽车工业、航空工业中的齿轮生产线中, 就采用了电子束焊接机。

当然, 电子束焊接并不是万能的, 还有不少问题有待解决。特别是, 工业的迅速发展, 给电子束焊接提出了不少新的要求。例如大型焊件的出现, 目前的焊接真空室已经不能满足, 要求生产具有更大容积焊接真空室的电子束焊机, 或采用非真空电子束焊机来完成大型部件的焊接。又如大厚度零部件的焊接, 要求有更大功率更高电压的电子束焊机来一次焊成200mm以上厚度的焊缝。另外很多新型金属或合金的电子束焊接工艺也有待进一步研究解决。这些问题正是当前各国正在努力解决的研究课题。

我国自60年代起开始研制真空电子束焊机, 先后试制出了多种不同型号的焊机。与此同时, 各工业部门(特别是尖端工业)从日本等国家引进真空电子束焊机。目前除了

专业电焊机厂外，还有不少科研单位都自行设计和制造了各类真空电子束焊机。从70年代后期，我国又先后引进了一批先进的真空电子束焊机，使真空电子束焊接方法进一步得到推广和应用。预料，在今后几年内，电子束焊接方法也将在我国得到广泛采用。

目 录

绪论

1、什么是焊接	3
2、焊接技术的发展现状	4
3、电子束焊接的发展概况	5

第一章 电子束焊接方法

1.1 电子束焊接的基本概念	1
1.2 电子束焊接的特点	1
1.3 电子束焊接的应用	2
1.4 电子束焊接设备的分类	3
1.4.1 高真空电子束焊机	3
1.4.2 低真空电子束焊机	3
1.4.3 非真空电子束焊机	4

第二章 真空电子束焊机

2.1 真空电子束焊机的结构原理	6
2.2 电子枪	7
2.2.1 电子枪的作用和基本原理	7
2.2.2 电子光学的基本原理	8
2.2.2.1 光的传播	8
2.2.2.2 电子在电场中的运动	9
2.2.2.3 电子在磁场中的运动	12
2.2.3 电子枪的理论基础	14
2.2.3.1 电子枪的静电部分——静电透镜	15
2.2.3.2 电子枪的电磁部分——磁透镜	22
2.2.3.3 偏转线圈	26
2.2.3.4 电子枪的分类	27
2.2.4 电子枪的供电系统	29
2.2.4.1 加速电压电源	29
2.2.4.2 灯丝加热电源	30
2.2.4.3 束流稳定及控制系统	34
2.2.4.4 磁透镜电源	34
2.2.4.5 偏转线圈电源	35
2.2.5 真空系统	36
2.2.5.1 真空泵	38

2.2.5.2 真空阀门	44
2.2.5.3 真空系统的密封	44
2.2.5.4 真空测量与检漏	47
2.2.6 电子束焦点的观察、测量与对中	54
2.2.6.1 电子束焦点的观察	54
2.2.6.2 电子束焦点的测量问题	54
2.2.6.3 电子束焦点的对中	58
2.2.7 国内外真空电子束焊机生产现状及发展趋向	59
2.2.7.1 国产真空电子束焊机	59
2.2.7.2 几种国外生产的电子束焊机	61
2.2.7.3 电子束焊机的发展趋向	62

第三章 真空电子束焊接工艺

3.1 熔化焊接过程的一般原理	65
3.1.1 焊接时焊件的加热和熔化过程	65
3.1.2 熔化金属的化学冶金过程	68
3.2 电子束焊接的焊缝形成过程	74
3.2.1 电子束焊接的加热特点	74
3.2.2 电子束焊缝的形成	74
3.2.3 关于电子束输入功率的分配	78
3.2.4 电子束焊接中熔池受力分析	79
3.2.5 脉冲电子束的作用分析	82
3.3 规范参数对焊缝成形的影响	83
3.3.1 功率密度的影响	83
3.3.2 影响成形的主要参数	85
3.3.2.1 加速电压	85
3.3.2.2 电子束电流	85
3.3.2.3 焊接速度	85
3.3.2.4 工作距离	86
3.3.2.5 焦点位置	86
3.4 电子束焊接的接头设计	86
3.4.1 对接接头	87
3.4.2 角接接头	88
3.4.3 丁字型接头	89
3.4.4 搭接接头	89
3.4.5 边接接头	90
3.4.6 圆柱体的对接接头	90
3.4.7 几种特殊的接头	91
3.5 真空电子束焊接	91

3.6 真空电子束焊接中的能量选择	94
3.7 金属材料的真空电子束焊接	96
3.7.1 金属材料的可焊性	96
3.7.1.1 金属材料的工艺可焊性	97
3.7.1.2 工艺可焊性的分类	98
3.7.2 电子束焊接中金属材料的可焊性讨论	98
3.7.3 碳素钢的焊接	99
3.7.3.1 碳素钢的分类	99
3.7.3.2 低碳钢的焊接特点	99
3.7.3.3 中碳钢的焊接特点	102
3.7.4 低合金结构钢的焊接	102
3.7.4.1 低合金结构钢的分类	102
3.7.4.2 低合金结构钢的焊接特点	103
3.7.4.3 低合金结构钢的焊前预热和焊后热处理	107
3.7.5 不锈钢的焊接	108
3.7.5.1 不锈钢的分类	108
3.7.5.2 不锈钢的特性	108
3.7.5.3 不锈钢的焊接特点	111
3.7.6 铝及铝合金的焊接	112
3.7.6.1 铝及铝合金的种类和机械性能	112
3.7.6.2 铝及铝合金的焊接特点	112
3.7.6.3 铝及铝合金的真空电子束焊接	116
3.7.7 铜及铜合金的焊接	117
3.7.7.1 铜及铜合金的分类及性能	117
3.7.7.2 铜及铜合金的焊接特点	117
3.7.7.3 铜及铜合金焊接中应注意的问题	122
3.7.8 钛及钛合金的焊接	123
3.7.8.1 钛及钛合金的种类、成分及性能	123
3.7.8.2 钛及钛合金的焊接特点	126
3.7.8.3 钛合金的真空电子束焊接	127
3.7.9 锆及锆合金的焊接	128
3.7.9.1 锆及锆合金的分类及性能	128
3.7.9.2 锆及锆合金的焊接特点	129
3.7.10 镁及镁合金的焊接	129
3.7.10.1 镁及镁合金的性能	129
3.7.10.2 镁合金的焊接特点	131
3.7.11 纯镍及镍合金的焊接	131
3.7.11.1 纯镍的性能	131

3.7.11.2纯镍及镍合金的焊接特点	133
3.7.11.3镍合金的真空电子束焊接	133
3.7.12铍的焊接	133
3.7.12.1铍的一般性能	133
3.7.12.2铍的焊接特点	134
3.7.12.3铍的电子束焊接	134
3.7.13难熔金属的焊接	134
3.7.13.1钨的焊接	135
3.7.13.2钼的焊接	135
3.7.13.3铌的焊接	135
3.7.13.4钽的焊接	136
3.7.14异种金属的电子束焊接	136
3.8 电子束焊接的缺陷及其防止	140
3.8.1 焊前工件准备和装配的缺陷	140
3.8.2 焊缝形状、缺陷和尺寸偏差	141
3.8.3 焊缝和接头的外部缺陷及内部缺陷	141
3.8.4 焊接接头组织、成分和性能的缺陷	147

第四章 真空电子束焊接的工艺流程

4.1 电子束焊接结构的合理性分析	149
4.1.1 意义	149
4.1.2 什么结构适合电子束焊接	149
4.1.3 电子束焊接的经济合理性	151
4.1.4 如何进行分析	151
4.2 焊接工装设计	152
4.2.1 概述	152
4.2.1.1 焊接夹具	152
4.2.1.2 焊接夹具的地位和作用	152
4.2.1.3 焊接夹具的分类	153
4.2.2 焊接夹具的选择和使用	154
4.2.2.1 对焊接夹具的基本要求	154
4.2.2.2 焊件在夹具上的定位与夹紧	154
4.2.3 支承件、定位器和夹紧器	162
4.2.4 应用举例	168
4.3 工艺参数的选择	171
4.3.1 工艺参数的选择方法	171
4.3.2 试件探伤	180
4.3.3 试件解剖	180
4.3.4 确定焊接参数	181

4.4 工件的调整	183
4.4.1 直焊缝的调整	183
4.4.2 圆周焊缝的调整	184
4.5 焊件的清洗和焊接	185
4.5.1 焊件的清洗	185
4.5.2 焊件的焊接	187
4.6 电子束焊接中的安全技术	188
4.7 真空电子束焊接应用举例	189
附录: ESW1002/7.5——150型真空电子束焊机的操作	200

第一章 电子束焊接方法

1.1 电子束焊接的基本概念

电子束焊接是用极致密的高速电子流打到被焊金属的接缝上，使其加热、熔化金属，形成焊缝实现焊接。

电子束是在高真空环境中通过电子枪产生的。电子枪通常由阴极、聚束极和阳极组成。当阴极被加热到2350℃左右或高于2350℃时，阴极连续发射出的电子通过聚束极和阳极间的电场，把电子聚集在一起，并加速到极高的速度形成一束电子流。电子束流穿过一个电磁线圈（或称电磁透镜）的电场，使电子束高度会聚成一点。聚焦线圈下面通常用一个磁偏转线圈可使电子束偏离正常轨道，并调整焦点在平面内的位置。

通常电子枪的额定电压约为30~175kV范围内，电子枪电流在1000mA以内，而电子束标准聚焦直径约为0.1~0.75mm范围内，因此，其功率密度可达 10^7 W/cm²，这足以使金属气化。电子束焊接过程中正是由功率密度极高的高速电子流与工件碰撞时，电子与金属晶格的整体也与金属原子、分子和电子相互作用，由于介质原子的电离与激发，电子的能量基本上传给被焊工件，电子的动能转化成热能，从而使被轰击的材料升温熔化，甚至气化，达到焊接的目的。

近年来，由于电子束焊接的大量推广和应用，对电子束穿透金属传递能量的规律及电子束焊接时焊缝成形的机制进行了大量的研究工作。但由于电子束传递能量，焊缝成形的时间极短，涉及的问题及需要考虑的因素很多，这给研究工作带来了很大的困难，有待于科学工作者进一步研究和探讨。

1.2 电子束焊接的特点

电子束焊接是一种高能量密度的焊接方法，它的迅速发展并为现代各工业领域广泛应用，这同它所具有的一系列优点是分不开的。

电子束焊接与其它方式的熔化焊比较，有下列优点：

(1) 高能量的电子束，束流直径小，能够形成一个深而窄的穿透焊缝，焊缝深宽比可高达20:1，如果采用脉冲焊接，甚至可达50:1。

(2) 高度聚焦的电子束流，所需输入能量较低。但功率密度极高。因此加热集中，热效率高，可焊接一般熔化焊方法难于焊接的特种难熔金属、热敏感性强的金属以及异种金属材料。

(3) 电子束焊接参数能够被精确控制，焊接时参数的重复性及稳定性好。因此，焊缝的穿透深度、尺寸及特征都能被严格控制，提高了产品焊接质量的稳定性。

(4) 真空电子束焊接是在真空室中进行的，排除了大气中有害气体（氢和氧）对熔化金属的影响，因此，熔化金属化学成分纯净，提高了焊缝质量，十分有利于活性金属材料和高真空熔炼的高纯度金属的焊接。

(5) 电子束焊接过程中, 电子束的能量可以调节。被焊金属的厚度可以从薄至0.05 mm到厚至300 mm, 不开坡口, 一次焊成, 这是其它焊接方法无法达到的。

(6) 比其它熔化焊方法有更高的焊接速度。因此, 焊接效率高, 有较高的生产率。

(7) 电子束焊接时束流的功率密度极高, 焊接速度快, 焊缝的深宽比大, 因而工件产生的变形极小, 焊缝的热影响区很窄。

电子束焊接虽然有上述各方面的优越性, 甚至某些特点是其它焊接方法无法相比的。但根据目前我国实际情况来看, 电子束焊接的普遍推广还受到一定限制。这是由于电子束焊接本身还存在某些缺点, 例如:

(1) 电子束焊机由于结构复杂, 控制设备精度高。因此成套设备价格很高, 一台中等功率包括所有的辅助设备的焊机费用约几十万人民币。设备费用高使电子束焊普遍推广受到限制。

(2) 电子束焊接的焊缝接头需进行专门设计和制作加工, 接头间隙需严格控制。对于一个焊深12 mm左右的窄焊缝, 接头间隙不能超过0.25 mm左右, 这就使接头制备的加工费用较高。

(3) 由于电子束焦点直径很小, 焊缝宽度很窄, 因此电子束与工件接缝的对准稍有偏差就可能使焊缝偏离工件接缝。

(4) 在真空电子束焊接中, 工件的大小受真空室尺寸的限制, 工件的焊接因每次装卸都要求工作室重新抽真空, 就相应使焊接生产率受到影响, 焊接费用相应有所增加。

(5) 由于电子束易受磁场的干扰, 因此, 焊接工装夹具的制作不能使用磁性材料。

1.3 电子束焊接的应用

综合上述电子束焊接的特点, 显而易见电子束焊接有独特的优越性。电子束的功率密度高, 焊接过程中工件的变形与收缩量可减到最小, 焊缝的热影响区最小, 焊接的精度高, 焊缝的深宽比大, 在真空电子束焊接中, 焊缝的化学成分纯净。因此可适用于下列各领域的焊接:

(1) 适用于焊接难熔金属、活泼金属和高纯度金属。

(2) 适用于通常熔化焊方法无法焊接的异种金属材料的焊接。

(3) 可焊接经淬火的或加工硬化的金属。

(4) 由于焊缝的热影响区小, 可焊接紧靠热敏感性材料的零件。

(5) 可对已经精加工到最后尺寸的零件进行焊接。

(6) 在电子束焊接中, 电子束可射出几百毫米的距离, 往往可以对其它焊接方法无法接近的部位进行焊接。

(7) 由于真空电子束焊接受到工作室尺寸的限制, 目前非真空电子束焊接也得到推广和使用。它不但可对大型零件进行全位置焊接, 同时还可进行高速度的焊接, 可大大降低大批量生产的开支, 提高工作效率。

电子束焊接经过20多年的推广和使用, 特别是近10年来由于电子工业的飞速发展, 使现代化的电子束焊机不断改进和完善, 性能也越来越好, 应用范围也越来越广, 因此, 已广泛应用于精密零件加工工业、航空工业、宇航工业、原子能工业, 以及电子工业等部门。

例如原子能工业中反应堆结构件的焊接，航空工业和宇航工业中发动机和火箭构件的焊接，燃料箱的焊接，操纵系统的焊接，电子工业中超导体、继电器、接触器的焊接，机械工业中的活塞、阀门、齿轮以及双金属零件等的焊接。

我国从60年代初开始试制电子束焊机，至今已有多种型号的电子束焊机生产。随着四化建设发展的需要，也陆续从法国、日本、联邦德国引进了一些较为先进的焊机。因此可以预料在不远的将来，电子束焊接也将在我国得到普遍应用，并在四化建设中发挥作用。

1.4 电子束焊接设备的分类

随着世界各国工业生产的不断发展，特别是近十几年来国防工业的飞速发展，对电子束焊接设备也相应地提出了各种新的要求，各国生产电子束焊机的厂商也不断推陈出新，制造出了各种类型的电子束焊机。归纳起来通常可把电子束焊机分成下列几种型式：

1.4.1 高真空电子束焊机

电子束的焊接是在高真空度的工作室内进行的。工作室的压力可保持在 $1.33 \times 10^{-1} \sim 1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 范围内，工作室保持选择高的真空度对电子束的物理性能，对焊缝性能和工件的热影响区都有重要影响。高真空电子束焊机的结构原理如图1-1所示。

其特点是：

(1) 工作室的压力可保持在 $1.33 \times 10^{-1} \sim 1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 范围内。电子枪和工作室可用一套真空机组抽真空，也可用两套机组分别对电子枪和真空室单独抽真空。为防止扩散泵油污染工作室，可采用离子镜，电子枪室与工作室通道口设有隔离阀。

(2) 加速电压范围一般为 $15 \sim 175 \text{kV}$ 。

(3) 最大工作距离，即离电子束出口最大可达 1000mm 。

(4) 电子束处在高真空室内，电子散射小，功率密度高，穿透深度大，焊缝深宽比可达 $20:1$ 以上，焊缝化学成分纯净，污染最小，焊缝质量高。

(5) 适用于难熔金属、活泼金属、高纯度金属，也可用于异种金属的焊接，以及各种形状复杂的小型零件的精密焊接。

1.4.2 低真空电子束焊机

工作室压力可保持在 $13.3 \sim 1.33 \text{Pa}$ 范围内，电子枪仍处在 $1.33 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 高真空室内工作。电子束通过气阻引出进入工作室，焊接在低真空室内进行。气阻为一组特殊设计的喷管，能使电子束通过。但又能限制气体从工作室进入电子枪室。低真空电子束焊机的结构原理见图1-2。低真空电子束焊机的特点是：

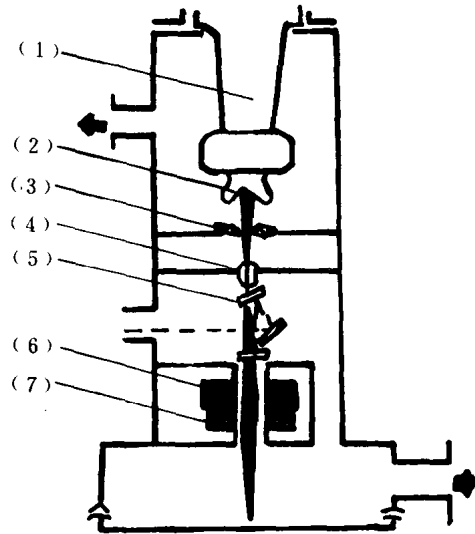


图1-1 高真空电子束焊机原理图

- | | |
|---------------|-------------|
| (1) —— 阴极 | (2) —— 聚束极 |
| (3) —— 阳极 | (4) —— 隔离阀 |
| (5) —— 光学观察系统 | (6) —— 聚焦线圈 |
| (7) —— 偏转线圈 | |

(1) 工作室压力可保持在 $13.3 \sim 1.33 \text{ Pa}$ 范围内。电子束从电子枪室出口进入工作室时由气阻引出。电子枪和工作室的排气系统各用一套独立的真空机组。

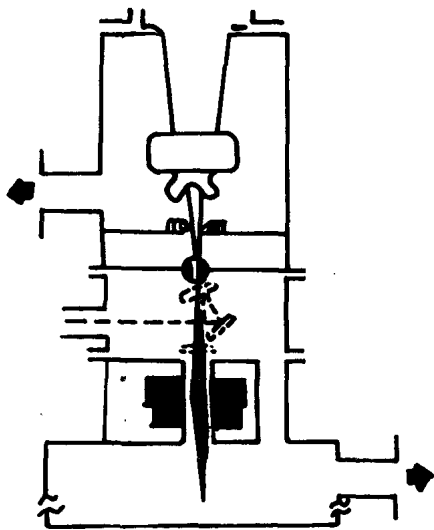


图 1-2 低真空电子束焊机原理图

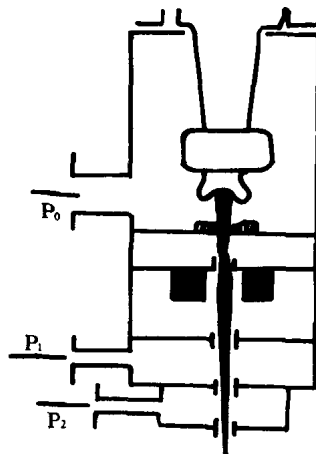


图 1-3 非真空电子束焊机原理图

(2) 加速电压的范围一般为 $40 \text{ kV} \sim 150 \text{ kV}$ 。

(3) 最大工作距离小于 700 mm 。

(4) 电子束有一定散射，焊缝的深宽比比高真空电子束焊机略有下降。对焊件清洁程度要求略低，工作室抽真空时间略短。

(5) 适用于大量生产，如电子元件、精密仪器零件、轴承内外圈、汽轮机隔板、齿轮等的焊接。

1.4.3 非真空电子束焊机

电子束焊机不带有真空工作室。电子束从电子枪射出后，焊接在正常大气压下进行。这大大简化焊机的结构，工作室及其抽真空系统可省略，降低焊机的成本，非真空电子束焊机的构造原理如图 1-3 所示。

非真空电子束焊机的特点是：

(1) 焊接在正常大气压下进行，电子束从电子枪射出。为防止大气进入电子枪室，并使电子束保持应有的能量密度，应设置电子束引出装置，该装置通常有四种形式：

a. 分段真空法：电子束经一组喷管后引入大气。喷管组的作用是在电子枪室和大气间建立若干个不同压强的区域，形成真空梯度，使 $P_2 > P_1 > P_0$ ； P_0 为电子枪室压力， P_1 为第一级真空室压力， P_2 为第二级真空室压力。各真空室采用独立的抽真空系统来保证各级真空室的压力。

b. 气流密封法：用高速气流在电子束引出孔外造成一个低气压区域，减少大气分

子从引出孔进入电子枪。

c c. 电子轰击法：以环形低速电子束轰击引出孔，以阻止大气进入电子枪。

d. 热塞法：加入某些压力低的不会分解的物质的热蒸气，使蒸气进入引出孔后冷却凝固，使电子枪内真空度提高。

(2)为防止焊接时有害气体进入熔池，工件表面可通过惰性气体（如氩或氦），使这股惰性气体包围着电子束柱，因此有类似于气体保护焊的特点。

(3)加速电压一般在150kV~175kV左右。高的加速电压能使进入到大气压力环境中的电子束流保持一段合理的工作距离，而不致引起过大的散射和能量密度降低。

(4)最大的工作距离在25mm左右。

(5)电子束引入大气，电子束要产生散射，因此，焊接工件距离电子枪出口处不能大于25mm。为减少束散射一般在10mm左右为最佳距离。功率密度较低，焊缝深宽比约大于5:1。

(6)适用于大型工件的焊接，如大型容器、导弹壳体、锅炉热交换器等。同时对原来不是在真空中熔炼，在真空电子束焊接中容易从熔化金属中逸出剩余气体而形成气孔的金属，在非真空电子束焊接中将不致出现气孔。

此外，根据电子枪加速电压的高低，也可把电子束焊机分为：

(1)高压型电子束焊机：加速电压一般在60~150kV范围内。高压电子束焊机特点是，加速电压高，可使电子束束斑直径小，从而提高了电子束的功率密度，使焊缝的深宽比大。高电压轰击工件时会产生硬X射线，工作室的屏蔽要求高。

(2)中压型电子束焊机：加速电压一般在40~60kV范围内。

(3)低压型电子束焊机：加速电压一般低于40kV。

根据生产的需要电子束焊机还可按电子枪固定方式分为：

(1)动枪式电子束焊机：电子枪在工作室上可移动位置，对不同位置的焊缝进行焊接。一般加速电压在60kV以下可制成动枪式。

(2)定枪式电子束焊机：电子枪固定在工作室上面不能移动位置。一般高压型电子束焊机由于要求较高的高压绝缘，因此，电子枪大都是固定式的。