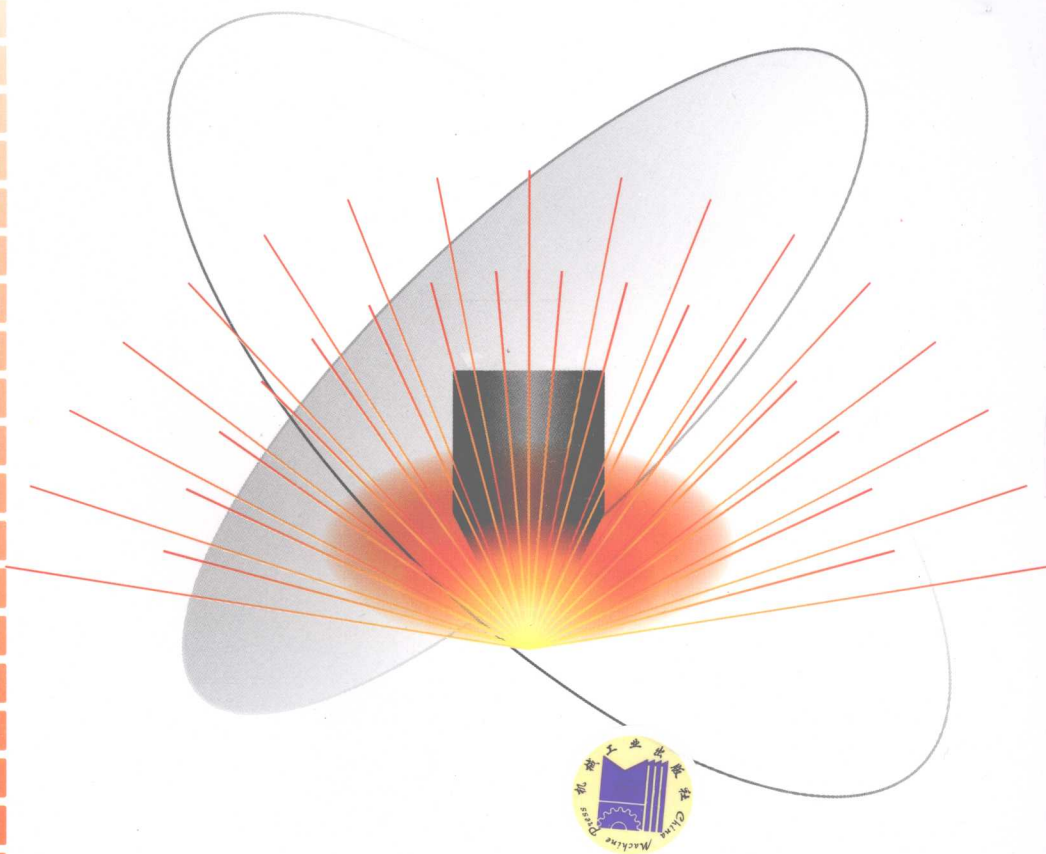




职业教育“十一五”规划教材
焊接专业“双证制”教学改革用书

特种焊接技术

曹朝霞 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书以特种焊接方法为主线,系统讲授电子束焊、激光焊、扩散焊、摩擦焊、高频焊、超声波焊、爆炸焊及变形焊的基本原理、工艺特点及应用范围。为适应职业教育的需要,本书以培养焊接操作高技能人才为出发点,着重职业岗位能力的培养,力求体现高职教育的特色。同时,注重吸收前沿技术,以拓展学生视野,适应焊接技术的新发展。本书在编写过程中,听取了企业专家和技术人员的宝贵意见,并选取生产实践中常用的金属材料、典型焊接结构件作为案例讲授,使教材内容更贴近工程实际。

本书编写模式新颖,根据培养目标,将所需知识点进行分解,按单元、综合知识模块、能力知识点作为层次安排编写内容。每单元开始安排有“学习目标”,单元末安排有“综合训练”。为便于教学,本书还配备了电子教案和部分习题答案,选用本书作为教材的教师可来电(010-88379201)索取,或登录 www.cmpedu.com 注册免费下载。

本书可作为高职高专、各类成人教育焊接专业教材或培训用书,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

特种焊接技术/曹朝霞主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 2
职业教育“十一五”规划教材. 焊接专业“双证制”教学改革用书
ISBN 978-7-111-26179-7

I. 特… II. 曹… III. 焊接-技术-职业教育-教材 IV. TG456

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 013795 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:齐志刚 版式设计:霍永明 责任校对:刘志文
封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军
北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)
2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·12.25 印张·298 千字
0001-3000 册
标准书号:ISBN 978-7-111-26179-7
定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379182
封面无防伪标均为盗版

信息反馈表

尊敬的老师：

您好！为了进一步提高我社教材的出版质量，更好地为我国职业教育发展服务，欢迎您对我社的教材多提宝贵意见和建议。如贵校有相关教材的出版意向，请及时与我们联系。感谢您对我社教材出版工作的支持！

您的个人情况								
姓名		性别	男 ☐ 女 ☐	年龄		联系电话	O	
职称		职务		学历			H	
工作单位及部门					M			
从事专业						E-mail		
详细通信地址						邮政编码		
您讲授的课程情况								
序号	课程名		学生层次、人数/年		现使用教材		出版社	
1								
2								
3								
贵校在本专业领域内的相关情况（可另附纸）								
1. 在哪些方面有优势、特色？精品课程、特色课程有哪些？ 2. 有哪些新的专业方向？新开设了哪些课程？是否缺乏相应的教材？ 3. 您觉得贵校在本专业开设的这些课程中是否存在教材短缺或不适用的情况？都有哪些？ 4. 贵校老师在此领域或相关领域是否有独创性的教材希望出版？如何联系？								
对我社教材出版工作的其他意见和建议（可另附纸）								

请用以下任何一种方式返回此表（此表复印有效）：

联系人：齐编辑

通信地址：100037 北京市西城区百万庄大街 22 号 机械工业出版社中职教育分社

联系电话：010-88379201

传真：010-88379181

E-mail: cnbook@163.com

前 言

为了进一步贯彻《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》文件精神,加强职业教育教材建设,满足职业院校深化教学改革对教材建设的要求,机械工业出版社于2006年11月在北京召开了“职业教育焊接专业教材建设研讨会”。会上,来自全国十多所院校的焊接专家、一线骨干教师研讨了新的职业教育形势下焊接专业的课程体系,确定了面向中职、高职层次两个系列教材的编写计划。本书是根据会议所确定的教学大纲和高等职业教育培养目标组织编写的。

新材料、新结构、新工艺等日新月异的发展,对焊接质量、接头性能及生产效率等提出了更高要求,而采用传统熔焊方法已不能完全满足应用要求。在这种情况下,特种焊接技术的研究、开发和应用得到了快速发展。特种焊接技术是指除焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等常规熔焊方法之外的电子束焊、激光焊等先进的高能束流焊接方法及扩散焊、摩擦焊、高频焊、超声波焊、爆炸焊、变形焊等固相焊接方法。特种焊接技术的推广应用,扩大了焊接技术在工业领域中的应用范围,带来了巨大的经济效益和社会效益,推动了焊接技术向着高质量、高效率、低能耗、无污染的方向发展。

本书重点介绍特种焊接方法的基本原理、工艺特点和应用范围,并结合实际案例说明焊接设备的选用原则和工艺设计与实施的基本方法。同时,注重吸收前沿技术,以拓展学生视野,适应焊接技术的新发展。

本书旨在培养学生掌握特种焊接技术所需的基础知识和职业能力,坚持理论知识以应用为目的,以够用为度,注重内容的精选,力求突出实用性、先进性和适应性。本书以单元、综合知识模块、能力知识点作为层次结构安排编写,每单元开始安排有“学习目标”,单元末安排有“综合训练”,编写体例新颖,符合职业教育的特点和教学目标。

本书共八个单元,绪论及第三、四、五单元由曹朝霞编写,第一、二单元由武丹编写,第六单元由王新民编写,第七、八单元由邵建中编写。全书由曹朝霞统稿,西华大学屈金山教授主审。为便于教学,本书配备了电子教案和部分习题答案,选用本书作为教材的教师可来电(010-88379201)索取,或登录 www.cmpedu.com 注册免费下载。

编写过程中,作者参阅了国内外出版的有关教材和资料,得到了有关专家和同行的有益指导,在此一并表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一单元 电子束焊	4
-----------------	---

综合知识模块一 电子束焊概述	4
----------------------	---

能力知识点 1 电子束焊的基本原理	4
-------------------------	---

能力知识点 2 电子束焊的特点及分类	5
--------------------------	---

能力知识点 3 电子束焊的应用	8
-----------------------	---

综合知识模块二 电子束焊设备	9
----------------------	---

能力知识点 1 电子束焊机的组成	9
------------------------	---

能力知识点 2 电子束焊机的选用	13
------------------------	----

综合知识模块三 电子束焊工艺	14
----------------------	----

能力知识点 1 焊前准备	14
--------------------	----

能力知识点 2 焊接接头设计	15
----------------------	----

能力知识点 3 主要焊接参数及其选择	17
--------------------------	----

能力知识点 4 电子束焊技术要点	19
------------------------	----

综合知识模块四 典型材料的电子束焊	21
-------------------------	----

能力知识点 1 钢的电子束焊	22
----------------------	----

能力知识点 2 非铁金属的电子束焊	22
-------------------------	----

能力知识点 3 难熔金属的电子束焊	24
-------------------------	----

能力知识点 4 异种金属的电子束焊	24
-------------------------	----

综合知识模块五 电子束焊的安全与防护	25
--------------------------	----

【综合训练】	26
--------------	----

第二单元 激光焊	27
----------------	----

综合知识模块一 激光焊概述	27
---------------------	----

能力知识点 1 激光焊原理及特点	27
------------------------	----

能力知识点 2 激光焊的分类	30
----------------------	----

能力知识点 3 激光焊的应用	31
----------------------	----

综合知识模块二 激光焊设备与焊接工艺	32
--------------------------	----

能力知识点 1 激光焊设备	32
---------------------	----

能力知识点 2 激光焊工艺	36
---------------------	----

综合知识模块三 典型材料的激光焊	45
------------------------	----

能力知识点 1 钢的激光焊	45
---------------------	----

能力知识点 2 非铁金属的激光焊	47
------------------------	----

能力知识点 3 异种材料的激光焊	49
------------------------	----

综合知识模块四 激光焊的安全与防护	50
-------------------------	----

能力知识点 1 激光对人体健康的危害	50
--------------------------	----

能力知识点 2 激光的安全与防护	51
------------------------	----

【综合训练】	51
--------------	----

第三单元 扩散焊	53
----------------	----

综合知识模块一 扩散焊概述	53
---------------------	----

能力知识点 1 扩散焊的基本原理	53
------------------------	----

能力知识点 2 扩散焊的特点及分类	55
-------------------------	----

能力知识点 3 扩散焊的应用	56
----------------------	----

综合知识模块二 扩散焊工艺	57
---------------------	----

能力知识点 1 焊前准备	57
--------------------	----

能力知识点 2 扩散焊焊接参数的选择	59
--------------------------	----

综合知识模块三 扩散焊设备	65
---------------------	----

能力知识点 1 扩散焊设备的分类 与组成	65
-------------------------------	----

能力知识点 2 典型扩散焊设备及其技术 参数	66
---------------------------------	----

综合知识模块四 典型材料的扩散焊	68
------------------------	----

能力知识点 1 同种材料的扩散焊	69
------------------------	----

能力知识点 2 异种金属材料的扩散 焊接	71
-------------------------------	----

能力知识点 3 陶瓷材料的扩散焊	75
------------------------	----

【综合训练】	79
--------------	----

第四单元 摩擦焊	81
----------------	----

综合知识模块一 摩擦焊概述	81
---------------------	----

能力知识点 1 摩擦焊的基本原理	81
------------------------	----

能力知识点 2 摩擦焊的分类及特点	82
-------------------------	----

能力知识点 3 摩擦焊的应用	87
----------------------	----

综合知识模块二 传统摩擦焊的工艺 与设备	88
-------------------------------	----

能力知识点 1 传统摩擦焊的工艺流程	88
--------------------------	----

能力知识点 2 传统摩擦焊工艺及参数	92
--------------------------	----

能力知识点 3 典型材料的摩擦焊接 工艺	96
-------------------------------	----

能力知识点 4 传统摩擦焊设备	101
-----------------------	-----

能力知识点 5 传统摩擦焊质量控制与 安全技术	104
----------------------------------	-----

综合知识模块三 搅拌摩擦焊	105
---------------------	-----

能力知识点 1 搅拌摩擦焊的焊接过程 及特点	106
---------------------------------	-----



能力知识点 2 搅拌摩擦焊工艺	109	综合知识模块一 爆炸焊概述	158
能力知识点 3 搅拌摩擦焊设备	112	能力知识点 1 爆炸焊的基本原理	158
能力知识点 4 搅拌摩擦焊技术的应用	114	能力知识点 2 爆炸焊的类型、特点及应用	160
【综合训练】	122	综合知识模块二 爆炸焊工艺	164
第五单元 高频焊	123	能力知识点 1 爆炸焊工艺流程	164
综合知识模块一 高频焊概述	123	能力知识点 2 焊接参数的选择	167
能力知识点 1 高频焊的基本原理	123	综合知识模块三 常用材料及典型工件的爆炸焊	168
能力知识点 2 高频焊的特点及应用	125	能力知识点 1 钛-钢复合板的爆炸焊接工艺	168
综合知识模块二 高频焊设备与工艺	126	能力知识点 2 铝合金-不锈钢管接头的爆炸焊接	171
能力知识点 1 高频焊设备与安全技术	126	综合知识模块四 爆炸焊质量检验及安全防护	172
能力知识点 2 高频焊制管工艺	128	能力知识点 1 爆炸焊接头的质量检验	172
综合知识模块三 典型材料的高频焊	133	能力知识点 2 爆炸焊安全与防护	173
能力知识点 1 螺旋缝管的高频焊	133	【综合训练】	174
能力知识点 2 螺旋翅片管的高频焊	133	第八单元 变形焊	175
能力知识点 3 型钢的高频电阻焊	134	综合知识模块一 变形焊概述	175
能力知识点 4 板(带)材的高频电阻焊	135	能力知识点 1 变形焊的分类及原理	175
【综合训练】	135	能力知识点 2 变形焊的特点及应用	176
第六单元 超声波焊	137	综合知识模块二 冷压焊	177
综合知识模块一 超声波焊概述	137	能力知识点 1 冷压焊工艺	177
能力知识点 1 超声波焊基本原理	137	能力知识点 2 冷压焊的应用	181
能力知识点 2 超声波焊的种类	139	能力知识点 3 冷压焊设备	182
能力知识点 3 超声波焊的特点及应用	141	综合知识模块三 热压焊	183
综合知识模块二 超声波焊的工艺与设备	143	能力知识点 1 热压焊工艺与设备	183
能力知识点 1 超声波焊的工艺	143	能力知识点 2 热压焊的应用	185
能力知识点 2 超声波焊接设备	148	【综合训练】	185
综合知识模块三 典型材料的超声波焊	151	参考文献	187
能力知识点 1 同种材料的超声波焊	151		
能力知识点 2 异种材料的超声波焊	155		
【综合训练】	156		
第七单元 爆炸焊	158		

绪 论

1. 特种焊接技术的应用现状及发展趋势

近年来,焊接技术得到了突飞猛进的发展,已由传统的热加工工艺发展成为集材料、冶金、结构、力学、电子等多门类学科为一体的焊接工程和焊接产业。装备制造业是国民经济的基础工业,能源工程、海洋工程、航空航天工程、石油化工工程等,无不依靠装备制造业提供装备,因而它决定着整个国家的工业生产能力和水平。焊接技术是装备制造业中关键技术之一,被视为“制造业的命脉,未来竞争力的关键所在”。

随着现代工业的发展,对结构和材料的要求越来越高,如造船和海洋工程要求解决大面积拼板、大型立体框架结构自动焊及各种低合金高强钢的焊接问题;石油化学工业要求解决各种耐高温、耐低温及耐各种腐蚀性介质压力容器的焊接问题;航空航天工业中要求解决铝、钛等轻合金结构的焊接问题;重型机械工业中要求解决大截面构件的拼接问题;电子及精密仪表制造工业要求解决微型精密焊件的焊接问题。工业产品的结构调整及技术进步对焊接技术提出了更高要求,同时也促进了传统焊接工艺的变革与新型焊接技术的开发与应用。优质、高效、节能的现代焊接技术正逐步取代能耗大、效率低和工作环境差的传统焊条电弧焊焊接工艺,焊接技术结构性的转变必将对装备制造业技术水平与生产能力的提升发挥更加重要的作用。

特种焊接技术是指除焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等传统焊接方法之外的非常规焊接方法,主要包含电子束焊、激光焊等先进的高能束流焊接方法及扩散焊、摩擦焊、高频焊、超声波焊、爆炸焊、变形焊等固相焊接方法。特种焊接技术对于一些特殊材料及结构的焊接具有非常重要的作用,成为实现新材料选用、新结构设计和新产品制造不可或缺的技术保障。特种焊接技术在航空航天、核动力、电子信息等高新技术领域中得到广泛应用,并已扩大到工业生产的许多部门,创造了巨大的经济效益和社会效益,推动了社会和科学技术的进步。

高能束流焊是指利用高能量密度的束流,如等离子弧、电子束、激光束等,作为热源的液相焊接方法总称。高能束流功率密度在 $10^5 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 范围内,远远高于常规的氩弧焊或 CO_2 气体保护焊,将其应用于焊接,则以高能量密度、可精确控制的微焦点和高速扫描技术等特性,实现对材料和构件的高质量、高效率焊接。高能束流焊接被誉为 21 世纪最具有发展前景的焊接技术,是当前发展较快、研究较多的领域。如电弧激光复合焊接技术的发展以及大功率激光器的出现,使激光焊接技术进入了长期以来一直被传统焊接工艺所垄断的汽车车身制造领域并占据重要地位。

固相焊接可分为两大类。一类是通过加压使工件产生塑性变形,促进工件表面达到紧密接触,并破碎氧化膜,最终形成焊接接头。摩擦焊、爆炸焊和冷压焊均属于这类焊接方法。



该类方法的特点是温度低、压力大、时间短,塑性变形是形成接头的主导因素;另一类是在保护气氛或真空中进行,焊接时工件仅产生微量的塑性变形,通过界面原子的扩散形成接头,如真空扩散焊、瞬间液相扩散焊、超塑性成形扩散焊等。该类方法的特点是温度高、压力小、时间相对较长,界面扩散是形成接头的主导因素。固相焊接方法的优点在于无熔化所导致的气孔、夹杂等各种缺陷,从而使接头区的力学性能接近母材,因此固相焊接技术以其独具的优势,在各种新型结构材料,如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料、非晶材料等的焊接中,显现出蓬勃生机。特别是近年来开发的搅拌摩擦焊新技术,使铝合金等非铁金属的焊接技术发生了重大变革。由于其具有焊接工艺简单,焊接接头晶粒细小,疲劳性能、拉伸性能和弯曲性能良好,无需焊丝,无需使用保护气体以及焊后残余应力和变形小等优点,在航空航天、交通运输和汽车制造等领域被广泛应用,并具有很好的发展前景。

特种焊接技术是一项与新兴学科发展密切相关的先进工艺技术。计算机技术、电子信息技术、人工智能技术、数控及机器人技术的发展为特种焊接技术的发展提供了强有力的技术基础,并已渗透到焊接技术的各个领域。新技术、新材料的不断涌现与推广应用以及各种特殊环境对产品性能要求的不断提高,将推动对特种焊接技术更加深入地开发研究,其应用前景将更加广阔。

特种焊接技术的应用范围见表0-1。

表0-1 特种焊接技术的应用范围

焊接方法	材料		接头形式			板厚			焊件种类									
	钢铁	非铁金属	对接	T形接头	搭接	薄板	厚板	超厚板	建筑	机械	车辆	桥梁	船舶	压力容器	核反应堆	汽车	飞机	家用电器
电子束焊	A	B	A	B	A	B	A	B	B	A	B	B	B	B	B	A	B	B
激光焊	A	A	A	C	A	A	B	C	B	B	B	C	C	B	B	A	A	B
等离子弧焊	A	B	A	B	A	A	B	B	B	A	A	B	B	A	A	B	B	C
扩散连接	A	A	B	B	A	B	A	C	B	A	B	B	B	B	B	B	A	B
摩擦焊	A	B	A	C	D	B	C	C	B	A	B	C	C	C	C	B	C	C
超声波焊	A	A	D	C	A	A	C	D	D	C	D	D	D	D	C	B	B	B
爆炸焊	A	A	A	B	A	B	A	A	B	B	B	B	A	B	B	B	C	C
冷压焊	B	B	C	C	A	A	C	D	D	C	D	D	C	D	C	C	C	B
热压焊	A	D	A	B	C	C	A	C	B	C	C	C	C	C	D	C	C	D

注: A 表示最佳; B 表示较好; C 表示差; D 表示最差。

2. 本课程的教学目标和要求

教学目标: 通过本课程的学习, 使学生能较好地掌握特种焊接技术的基本原理、工艺特点, 能根据金属材料的性能分析焊接性, 结合典型零件的结构特点制订焊接工艺, 实施



操作。

教学要求：

- 1) 掌握各类特种焊接方法的基本原理、工艺特点及应用范围。
- 2) 能合理选用各类特种焊接方法所使用的焊接材料及设备。
- 3) 了解工程材料及典型零件的特种焊接工艺特点，并能结合产品技术要求合理制订焊接工艺。
- 4) 掌握特种焊接方法的基本操作技术。
- 5) 了解特种焊接技术的新工艺、新设备。

第一单元 电子束焊

【学习目标】 通过本单元的学习，了解电子束焊的基本原理、工艺特点及应用范围，熟悉电子束焊接设备，能够分析金属材料对电子束焊工艺的适应性，并制订焊接工艺，掌握电子束焊的基本操作方法与安全防护知识。

综合知识模块一 电子束焊概述

电子束焊 (Electronic Beam Welding, EBW) 是指在真空或非真空环境中，利用汇聚的高速电子流轰击焊件接缝处所产生的热能，使被焊金属熔合的一种焊接方法。电子束焊在工业上的应用已有 50 余年的历史，其技术的诞生和最初应用主要是为了满足核能工业及宇航工业的焊接要求。目前，电子束焊应用范围已扩大到航空、航天、造船、汽车、电机、电子电器、机械、医疗器械、石油化工、能源等领域。几十年来，电子束焊创造了巨大的经济效益及社会效益。

能力知识点 1

电子束焊的基本原理

电子束焊是一种高能束流焊接方法。一定功率的电子束经电子透镜聚焦后，其电流范围为 $20 \sim 1000\text{mA}$ ，焦点直径为 $0.1 \sim 1\text{mm}$ ，功率密度可达 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 以上，比普通电弧功率密度高 $100 \sim 1000$ 倍，属于高能束流。

电子束由电子枪中产生。电子枪中的阴极以热发射或场致发射的方式向外发射电子，电子在 $30 \sim 150\text{kV}$ 的加速电压作用下，被加速到光速的 $0.3 \sim 0.7$ ，具有较高的动能，然后高速运动的电子经电子枪中静电透镜和电磁透镜的作用，汇聚成功率密度很高的电子束。图 1-1 为电子束发生的原理图。

电子束撞击到焊件表面，动能转变为热能作用于焊件，使接合处金属迅速熔化、蒸发。在高压金属蒸气的作用下，熔化的金属被排开，电子束就能继续撞击焊件深处的固态金属，于是很快在被焊件上“钻”出一个匙孔，如图 1-2 所

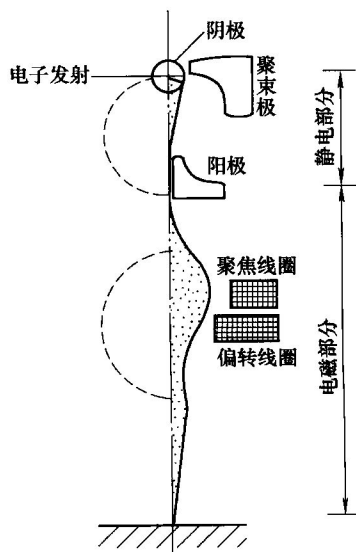


图 1-1 电子束发生原理图



示, 小孔的周围被液态金属包围。随着电子束与焊件的相对移动, 液态金属沿小孔周围流向熔池后部, 逐渐冷却、凝固形成了焊缝。在电子束焊接过程中, 焊接熔池始终存在一个匙孔。正是由于匙孔的存在, 从根本上改变了焊接熔池的传热规律, 使电子束焊由一般熔焊方法的“热导焊”转变为“穿孔焊”。这是包括激光焊、等离子弧焊在内的高能束流焊接的共同特点。

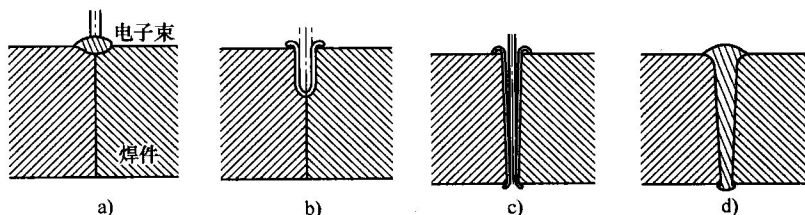


图 1-2 电子束焊接焊缝形成的原理

- a) 接头局部熔化、蒸发 b) 金属蒸气排开液体金属, 电子束“钻入”母材, 形成匙孔
c) 电子束穿透工件, 匙孔由液态金属包围 d) 电子束后方形成焊缝

在大功率的电子束焊接中, 电子束的功率密度可达 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$, 足以获得很深的穿透效应和很大的深宽比。当电子束的功率密度低于 10^5 W/cm^2 时, 电子束的穿透能力较小, 金属的熔化过程与电弧焊时相似, 焊缝熔深较浅。

电子束焊接质量与束流强度、加速电压、焊接速度、电子束斑点质量以及被焊材料的热物理性能等因素有密切的关系。

能力知识点 2

电子束焊的特点及分类

一、电子束焊的特点

电子质量极小, 仅为 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 其荷质比高达 $1.76 \times 10^{-11} \text{ C/kg}$, 通过电场、磁场均可对电子作快速而精确的控制, 因而电子束作为焊接热源, 除具有高能量密度外, 还能够精确控制, 快速反应, 在这方面电子束焊明显优于激光束, 后者只能用透镜和反射镜控制, 反应速度慢, 因而在真空条件下利用电子束进行焊接, 具有下列特点。

1. 电子束焊的优点

图 1-3a 所示是电子束焊接过程的示意图, 上部是电子枪的出口, 中部的亮带是高速的电子束流, 下部是铝合金活塞上电子束焊缝截面的照片, 其标尺显示焊缝深度为 70mm, 而焊缝的宽度仅为 1mm 左右, 焊缝深宽比约为 70:1。图 1-3b 所示是电子束焊缝形状的金相照片, 焊缝两边缘基本平行, 温度横向传导

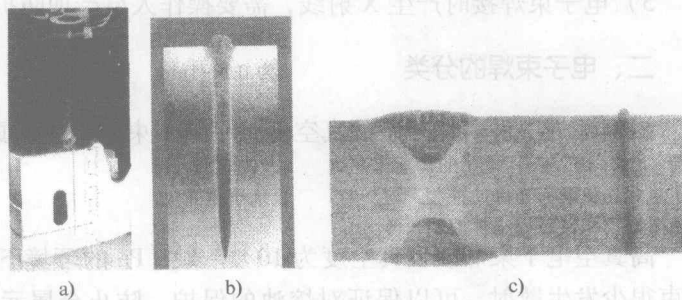


图 1-3 电子束焊接过程示意图及焊缝的特征

- a) 电子束焊接过程的示意图 b) 电子束焊缝截面形状
c) 电子束焊缝与电弧焊缝的比较



几乎不存在。图 1-3c 所示是厚度为 25mm 的钢板电子束焊缝与电弧焊焊缝的照片。由此可见，与其他传统电弧焊方法相比较，电子束焊具有功率密度大，穿透能力强，可实现不开坡口单道大厚度材料的焊接，节约大量填充材料，降低能源消耗等优点，具体内容归纳于表 1-1 中。

表 1-1 电子束焊的优点

优 点	内 容
焊缝深宽比大	电子束斑点尺寸小，功率密度大，焊缝深宽比达 60:1，可一次焊透 0.1 ~ 300mm 厚度的不锈钢板
焊接速度快，焊缝组织性能好	能量集中，熔化和凝固过程快，高温作用时间短，合金元素烧损少，能避免晶粒长大，使接头性能改善，焊缝耐蚀性好。例如，焊接厚度为 125mm 的铝板，焊接速度达 40cm/min，是氩弧焊的 40 倍
焊接变形小	功率密度高，输入焊件的热量少，焊接变形小，焊后工件仍可保持足够高的尺寸精度，对精加工的工件可用作最后连接工序
焊缝纯度高，接头质量好	真空电子束焊对焊缝有良好的保护作用，不仅可以防止熔化金属受氢、氧、氮等有害气体的污染，而且有利于焊缝金属的除气和净化，因而尤其适合焊接钛及钛合金等活性材料，也可用于焊接真空密封元件，焊后元件内部保持真空状态
工艺适应性强	焊接参数易于精确调控，电子束流便于偏转，可以实现复杂接缝的自动焊接。电子束在真空中可以传到距离约 500mm 的较远位置上进行焊接，因而可以焊接难以接近部位的焊缝。对焊接结构具有广泛的适应性
可焊材料多	不仅能焊接同种或异种金属材料，也可焊接陶瓷、石英玻璃等非金属材料
再现性好	电子束焊的焊接参数可独立地在很宽的范围内调节，易于实现机械化、自动化控制，重复性、再现性好，提高了产品质量的稳定性
可简化加工工艺	可将复杂的或大型整体结构件分为易于加工、简单或小型部件，用电子束焊将其焊接为一个整体，减少加工难度，节省材料，简化工艺

2. 电子束焊的缺点

- 1) 设备复杂，一次性投资大，费用较昂贵。
- 2) 电子束焊要求接头位置准确，间隙小而且均匀，焊前对接头加工、装配要求严格。
- 3) 真空电子束焊接时，被焊工件尺寸和形状常常受到工作室的限制。
- 4) 电子束易受杂散电磁场的干扰，影响焊接质量。
- 5) 电子束焊接时产生 X 射线，需要操作人员严加防护。

二、电子束焊的分类

根据被焊工件所处环境的真空度可将电子束焊分为高真空电子束焊、低真空电子束焊和非真空电子束焊三种。

1. 高真空电子束焊

高真空电子束焊接在真空度为 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Pa 的环境下进行，具有良好的真空条件，电子束很少发生散射，可以保证对熔池的保护，防止金属元素的氧化和烧损，适用于活性金属、难熔金属和质量要求高的工件焊接，也适用于各种形状复杂零件的精密焊接。

这种方法的不足之处是工件尺寸受真空室容积限制。此外，抽真空需要辅助时间，影响生产效率。



2. 低真空电子束焊

低真空电子束焊接在真空度为 $10^{-1} \sim 10\text{Pa}$ 范围内进行。由图 1-4 可知, 压强为 4Pa 时束流密度及其相应能量密度的最大值与高真空时最大值相差很小。因此, 低真空电子束焊的束流密度和能量密度也较高。由于只需要抽到低真空, 减小了抽真空的时间, 从而加速了焊接过程, 提高了生产效率。此方法适用于大批量零件的焊接和生产线上使用。例如, 汽车变速器组合齿轮多采用低真空电子束焊。

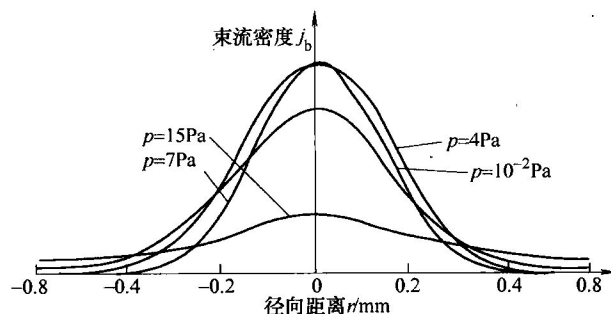


图 1-4 不同压强下电子束斑点束流密度的分布

3. 非真空电子束焊

在非真空电子束焊接中, 电子束仍是在真空条件 ($\leq 10^{-1}\text{Pa}$) 下产生的, 然后穿过一组光阑、气阻通道和若干级预真空小室, 射到处于大气压力下的工件上。在压强增加到 $7 \sim 15\text{Pa}$ 时, 由于散射, 电子束功率密度明显下降。在大气压下, 电子束散射更加强烈, 即使将电子枪的工作距离限制在 $20 \sim 50\text{mm}$, 焊缝深宽比最大也只能达到 $5:1$ 。随着气压的升高, 发散逐渐增大, 焊缝深宽比减小。目前, 非真空电子束焊接能够达到的最大熔深为 30mm 。

这种方法的优点是不需真空室, 因而可以焊接大尺寸工件, 生产率较高。近年来出现的移动式真空室或局部真空电子束焊接方法, 既保留了真空电子束高功率密度的优点, 又不需要真空室, 因而在大型工件的焊接工程上有很好的应用前景。

图 1-5 分别示出电子束焊的三种基本类型。

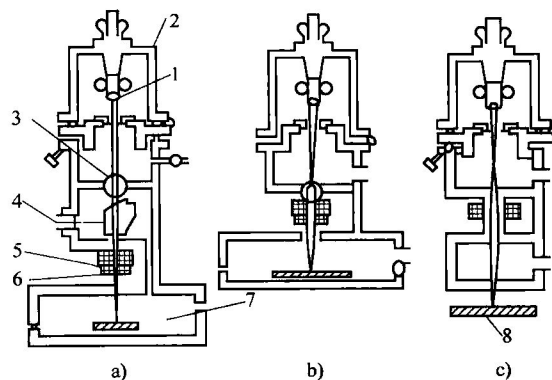


图 1-5 电子束焊的基本类型

a) 高真空电子束焊 b) 低真空电子束焊 c) 非真空电子束焊
1—电子枪 2—上枪体 3—枪体阀 4—观察窗
5—电磁透镜 6—偏转线圈 7—焊接室 8—工件

表 1-2 归纳了不同类型电子束焊的技术特点及适用范围。

表 1-2 不同类型电子束焊的技术特点及适用范围

类 型	真空度/Pa	技术 特点	适用 范围
高真空 电子束焊	$10^{-4} \sim 10^{-1}$	加速电压为 $15 \sim 175\text{kV}$, 最大工作距离可达 1000mm 。电子束功率密度高, 焦点尺寸小, 焊缝深宽比大、质量高。可防止熔化金属氧化, 但真空系统较复杂, 抽真空时间长 (几十分钟), 生产效率低, 焊件尺寸受真空室限制	适用于活性金属、难熔金属、高纯度金属和异种金属的焊接, 以及质量要求高的工件焊接



(续)

类 型	真空度/Pa	技术 特点	适用 范围
低真空 电子束焊	$10^{-1} \sim 10$	加速电压为 40 ~ 150kV, 最大工作距离小于 700mm。不需要扩散泵, 焦点尺寸小, 抽真空时间短 (十几分钟以内), 生产率较高。可用局部真空室满足大型焊件的焊接, 工艺和设备得到简化	适用于大批量生产, 如电子元件、精密仪器零件、轴承内外圈、汽轮机隔板、变速箱、组合齿轮等的焊接
非真空 电子束焊	大气压	不需真空工作室, 焊接在正常大气压下进行, 加速电压为 150 ~ 200kV, 最大工作距离为 30mm 左右。可焊接大尺寸焊件, 生产效率高、成本低。但功率密度较低, 散射严重, 焊缝深宽比小于 5 : 1, 某些材料需用惰性气体保护	适用于大型焊件的焊接, 如大型容器、导弹壳体、锅炉热交换器等, 但一次焊透深度不超过 30mm
局部真空	根据要求确定	用于移动式真空室, 或在焊件焊接部位制造局部真空进行焊接	适用于大型焊件的焊接

能力知识点 3

电子束焊的应用

由于电子束焊接具有焊接熔深大、焊缝性能好、焊接变形小、焊接精度高并有较高的生产率等特点, 因此, 在航空航天、汽车制造、压力容器、电力及电子等工业领域中得到了广泛的应用, 能够实现特殊难焊材料的焊接。目前, 电子束焊可应用于下列材料和结构。

一、可焊接的材料

在真空室内进行电子束焊时, 除含有大量高蒸气压元素的材料外, 一般熔焊能焊的金属, 都可以采用电子束焊, 如铁、铜、镍、铝、钛及其合金等。此外, 还能焊接稀有金属、活性金属、难熔金属和非金属陶瓷等。也可焊接熔点、热导率、溶解度等物理性能差异较大的异种金属。焊接热处理强化或冷作硬化的材料时, 接头的力学性能不发生变化。

二、焊件的结构形状和尺寸

电子束焊可以单道焊接厚度超过 100mm 的碳素结构钢, 或厚度超过 400mm 的铝板, 焊接时无需开坡口和填充金属, 也可焊接厚度小于 2.5mm 的薄件, 甚至薄到 0.025mm, 亦可焊厚度相差悬殊的焊件。焊件的厚度与所采用的电子束加速电压和功率有关。

真空电子束焊时, 焊件的形状和尺寸必须控制在真空室容积允许的范围内, 非真空电子束焊不受此限制, 可以焊接大型焊接结构, 但必须将电子枪底面出口到焊件上表面的距离控制在 12 ~ 50mm。

三、有特殊要求或特殊结构的焊件

可以焊接内部需保持真空度的密封件、靠近热敏元件的焊件、形状复杂且精密的零部件, 也可以同时施焊具有两层或多层接头的焊件, 这种接头层与层之间可以间隔几十毫米。

表 1-3 列出了电子束焊部分应用实例。



表 1-3 电子束焊部分应用实例

工业部门	应用实例
航天航空	喷气发动机部件、起落架、机舱段框架、精密传动件、火箭助推器、高压气瓶、火箭发动机部件等
汽车制造	变速箱齿轮、行星齿轮框架、后桥、气缸、离合器、发动机增压器涡轮等
核能工业	燃料原件、反应堆、压力容器及管道、加速器部件、燃料棒、支架、导向筒、蒸发器等
电子器件	集成电路、密封包装、电子计算机的磁芯存储器、行式打印机用小锤、微型继电器、微型组件、薄膜电阻、电子管、加热器等
电力	电动机整流子片、双金属式整流子、汽轮机定子、电站锅炉联箱与管子的焊接等
化工	压力容器、球形储罐、热交换器、环形传动带、管子与法兰的焊接等
重型机械	厚板焊接、超厚板压力容器的焊接等
再制造	修补修复有缺陷的容器、设计修改后要求的返修件、裂纹补焊、补强焊、堆焊等
其他	双金属锯条、钨坩埚、波纹管、管道精密加工、切割等

综合知识模块二 电子束焊设备

能力知识点 1

电子束焊机的组成

电子束焊机一般可按真空状态和加速电压分类。按真空状态，可分为真空型、局部真空型、非真空型三种类型；按电子枪加速电压的高低分类，可分为高压型（60 ~ 150kV）、中压型（40 ~ 60kV）、低压型（≤40kV）。在实际应用中以真空电子束焊机居多。图 1-6 为典型真空电子束焊机组成示意图。由图可见，真空电子束焊机主要由电子枪、工作室（也称真空室）、电源及电气控制系统、真空系统、工作台以及辅助装置等部分组成。

一、电子枪

1. 电子枪的作用及结构组成

电子束焊机中用以产生电子并使之汇聚成电子束的装置称为电子枪。它是电子束焊接设备的核心部件。电子枪主要由阴极、阳极、栅极和聚焦线圈等组成。电子枪有二极枪和三极枪之分，现代电子束焊机多采用三极电子枪。图 1-7 为三极电子枪枪体结构示意图，其电极系统由阴极、偏压电极和阳极组成。阴极处于高的负电位，它与接地的阳极之间形成电子束的加速电场。偏压电极相对于阴极呈负电位，通过调节其负电位的大小、改变偏压电极形状及位置可以调节电子束流的大小和改变电子束的形状。聚焦线圈又称电磁透镜，其作用是将电子束流聚焦到工件的焊缝上，这样既增加了电子束焊接的工作距离，而且又易于对其控制和调节。偏转线圈的作用是使电子束的束斑对准被焊工件的接缝或在焊缝区作有规律的周期性运动。偏转方向和偏转量可通过改变偏转线圈中的电流方向及大小来调节。

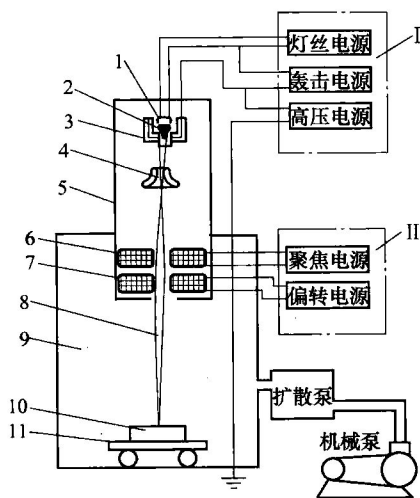


图 1-6 典型真空电子束焊机组成示意图

I—高压电源系统 II—控制系统

1—灯丝 2—阴极 3—聚束极 4—阳极 5—电子枪
6—聚焦线圈 7—偏转线圈 8—电子束 9—真空室
10—焊件 11—焊接台

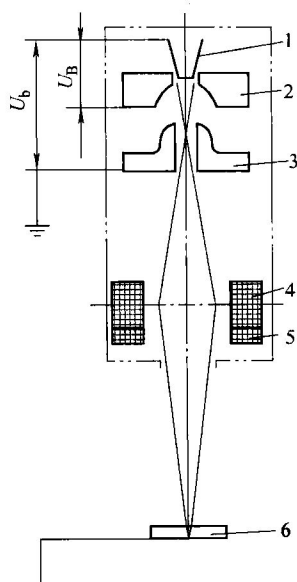


图 1-7 三极电子枪枪体结构示意图

U_b —加速电压 U_B —偏压

1—阴极 2—偏压电极 3—阳极 4—聚焦线圈
(电磁透镜) 5—偏转线圈 6—工件

2. 电子枪中的阴极

电子枪中的阴极应采用热电子发射能力强而且不易“中毒”的材料，常用的材料有钨、钽、六硼化镧（LaB6）等。

六硼化镧在较低的工作温度下具有很强的发射电子的能力，常用作大功率电子枪的间接加热式阴极。这种阴极在工作过程中遭受离子的轰击，会改变其形状和成分，使发射电子的能力随着阴极使用的时间有所变化。含钽的钨极，热电子发射能力强，但在长期工作中，正离子的轰击也会使表面成分发生变化，影响其发射电子的稳定性。

用钨或钽制成的直热式阴极结构简单，但要防止阴极的热变形和补偿加热电流的磁场对电子束的偏转作用。

3. 电子枪的稳定性、重复性

电子枪的稳定性、重复性直接影响焊接质量。影响电子枪稳定性的主要原因是高压放电，特别是大功率电子枪（>30kW）在焊接过程中产生的放电现象，易造成高压击穿。为了解决高压放电现象，可设置两个聚焦线圈并在电子束通道上设置小直径光阑，以减少金属蒸气和离子对电子枪工作稳定性的影响。同时，双聚焦还增加了调节电子束形状的可能性。

电子枪的重复性取决于电子枪的设计精度、制造精度以及控制技术。

4. 电子枪的安装

电子枪通常安装在真空室外部。垂直焊时，位于真空室顶部；水平焊时，位于真空室侧面，根据需要可使电子枪沿真空室壁在一定范围内移动。有时电子枪安装在真空室内可移动的传动机构上，被称为动枪。



二、高压电源及控制系统

1. 高压电源

高压电源为电子枪提供加速电压、控制电压和灯丝加热电流。高压电源控制原理如图1-8所示。电源应密封在油箱体内，以防止伤害人体及干扰设备的其他控制部分。纯净的变压器油既可作为绝缘介质，又可作为传热介质，将热量从电器元件传送到箱体外壁。电器元件都装在框架上，该框架又固定在油箱的盖板上，以便维修和调试。

近年来，半导体高频大功率开关电源已应用到电子束焊机中，工作频率大幅度提高，用很小的滤波电容器，即可获得很小的波纹系数。该类电源放电时所释放出来的电能很少，减少了其危害性。另外，开关电源通断时间比接触器要短得多，与高灵敏度微放电传感器联用，为抑制放电现象提供了有力手段。该类电源体积小，质量轻，如15kW高压油箱，外形尺寸为1100mm × 500mm × 100mm，质量仅600kg。

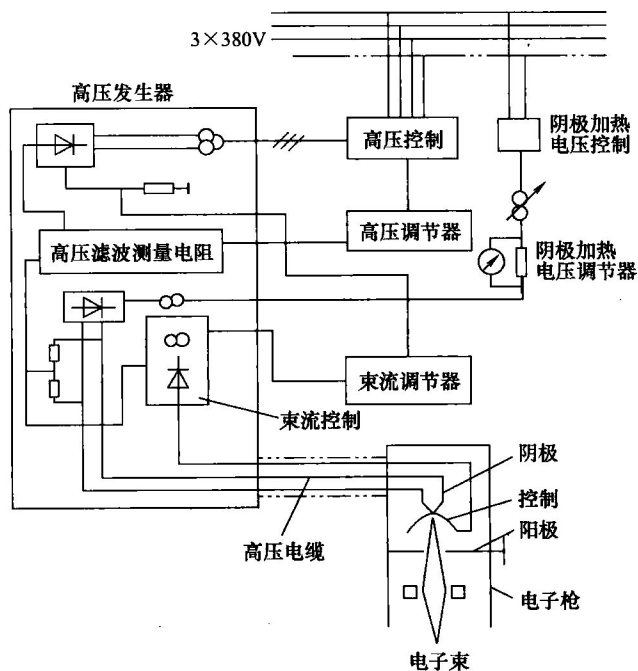


图 1-8 高压电源控制原理图

2. 控制系统

早期电子束焊机的控制系统仅限于控制电子束流的递减、电子束流的扫描及真空泵阀的开关。目前可编程控制器及计算机数控系统等已在电子束焊机上得到应用，使控制范围和精度大大提高。计算机数控系统除了控制焊机的真空系统和焊接程序外，还可实时控制电子参数、工作台的运动轨迹和速度，实现电子束扫描和焊缝自动跟踪。

三、真空系统及真空室

1. 真空系统

真空系统是对电子枪和真空室抽真空用的。图1-9为一种通用型高真空电子束焊机真空系统的组成。真空系统大多使用三种类型的真空泵：一种是低真空泵，也称为活塞式或叶片式机械泵，能够将电子枪和工作室从大气压抽到10Pa左右。另一种是油扩散泵，用于将

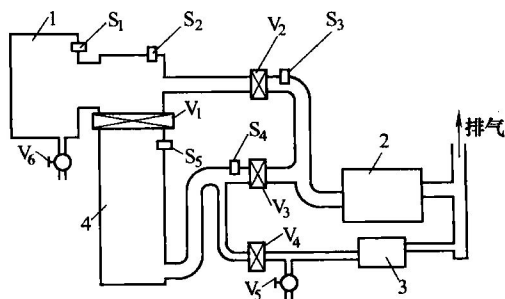


图 1-9 电子束焊接真空系统

$V_1 \sim V_6$ —真空阀门 $S_1 \sim S_5$ —真空计

1—真空室 2—大机械泵 3—小机械泵 4—扩散泵