



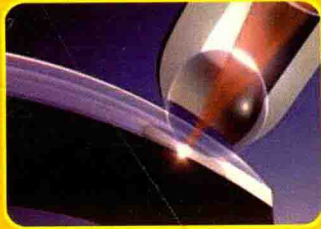
“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

特种焊接技术

第2版

曹朝霞◎主编

TEZHONG HANJIE JISHU



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

配电子课件



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

特种焊接技术

第2版

主 编 曹朝霞

副主编 曹润平

参 编 张家龙 张 发 孙文程

主 审 王瑞乾(企业) 高 平(企业)



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是“十二五”职业教育国家规划教材,是根据《教育部关于“十二五”职业教育教材建设的若干意见》及教育部新颁布的《高等职业学校专业教学标准(试行)》,同时参考最新《焊工》国家职业资格标准修订编写的。

本书共八章,主要介绍了电子束焊、激光焊、扩散焊、摩擦焊、高频焊、超声波焊、螺柱焊及爆炸焊等特种焊接方法的原理、设备、工艺及应用,注重对特种焊接技术应用能力的培养,以满足现代焊接产业发展与技术升级对技能型人才提出的新要求。同时,本书注重吸收前沿技术,以拓展学生视野,适应焊接职业岗位的新变化。为便于教学,本书配套有电子教学资源包,选择本书作为教材的教师可来电(010-88379197)索取,或登录 www.cmpedu.com 网站,注册、免费下载。

本书可作为高等职业院校焊接技术及自动化专业教材,也可作为企业焊接技术岗位培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

特种焊接技术/曹朝霞主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2014.12
“十二五”职业教育国家规划教材
ISBN 978-7-111-48805-7

I. ①特… II. ①曹… III. ①焊接—高等职业教育—教材 IV. ①TG456

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第288892号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:齐志刚 责任编辑:齐志刚 王海霞

版式设计:赵颖喆 责任校对:肖琳

封面设计:张静 责任印制:刘岚

涿州市京南印刷厂印刷

2015年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm·12.5印张·293千字

0001—2000册

标准书号:ISBN 978-7-111-48805-7

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第2版前言

本书是按照教育部《关于开展“十二五”职业教育国家规划教材选题立项工作的通知》，经过出版社初评、申报，由教育部专家组评审确定的“十二五”职业教育国家规划教材，是根据《教育部关于“十二五”职业教育教材建设的若干意见》及教育部新颁布的《高等职业学校专业教学标准（试行）》，同时参考最新《焊工》国家职业资格标准修订编写的。

本书主要介绍特种焊接技术的基本原理、工艺特点和应用范围，结合实际案例说明焊接设备的选用原则，以及焊接工艺的制订与实施方法。同时，本书注重吸收引用焊接技术领域的新材料、新工艺、新设备、新标准，适应焊接技术的新发展。

本书旨在使学生掌握特种焊接技术基础知识，培养特种焊接技术应用能力。本书坚持理论知识以应用为目的，剔除了对纯学术理论的探讨，力求做到理论与实践相结合，突出科学性、实用性和先进性。本书基于工作过程，按照“方法的认知”“设备的选用”“工艺的制订”“典型应用”四个环节组织内容，便于实施“四步法”教学模式。书中设计了“导入案例”，配置了丰富的图片，使教材更加生动、直观。同时，书中增加了安全防护的知识内容，注重对安全文明生产意识的培养。

本书在第1版的基础上，主要从以下几方面进行了修订：

- 1) 根据专业教学标准，调整了教学目标，重组了教学内容，以更好地满足教学要求。
- 2) 引用国家最新标准及国际焊接标准，结合特种焊接技术应用的最新资讯，更新和补充了教学内容，以适应焊接技术的新发展。
- 3) 结合近五年的教学反馈，吸收广大读者的有益建议，对原书的内容和编写体例作了进一步修改，力求第2版教材更加符合技能型人才培养的需要。
- 4) 内容上充分考虑中高职的有机衔接，并与职后教育相衔接。

全书共8章，由包头职业技术学院曹朝霞任主编。具体分工如下：包头职业技术学院曹润平编写第1章、第5章，内蒙古机电职业技术学院张发编写第3章、第6章，渤海船舶职业学院张家龙编写第7章，黑龙江林业职业技术学院孙文程编写第8章，其余由曹朝霞编写，全书由曹朝霞统稿。本书由西安北方华山机电有限公司王瑞乾、中国兵器第52研究所高平主审。全书经全国职业教育教材审定委员会专家滕宏春、崔西武审定，他们对本书内容及体系提出了很多宝贵的建议，在此对他们表示衷心的感谢！

在本书的编写过程中，编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！

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

第1版前言

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

2009年3月

目 录

第2版前言

第1版前言

绪论	1
----------	---

第1章 电子束焊	4
-----------------------	----------

1.1 认知电子束焊	4
1.1.1 电子束焊的原理及特点	4
1.1.2 电子束焊的分类及应用范围	6
1.2 电子束焊设备的选用	9
1.2.1 电子束焊机的组成	9
1.2.2 电子束焊机的选用	13
1.3 电子束焊焊接工艺的制订	14
1.3.1 焊前准备工作	14
1.3.2 焊接接头的设计	15
1.3.3 焊接参数的选择	17
1.3.4 电子束焊技术要点	19
1.4 电子束焊的典型应用	21
1.4.1 钢的电子束焊	21
1.4.2 非铁金属及难熔金属的电子束焊	22
1.4.3 异种金属的电子束焊	23
1.5 电子束焊的安全与防护	24
1.5.1 防止高压电击的措施	24
1.5.2 X射线的防护	24
综合训练	25

第2章 激光焊	26
----------------------	-----------

2.1 认知激光焊	26
-----------------	----

2.1.1 激光与物质的作用	26
2.1.2 激光焊原理	27
2.1.3 激光焊的特点及应用	28
2.2 激光焊设备的选用	31
2.2.1 激光焊接设备的组成	31
2.2.2 激光焊机的选用原则	35
2.3 激光焊工艺的制订	36
2.3.1 连续激光焊工艺	36
2.3.2 脉冲激光焊工艺	41
2.3.3 激光复合焊技术	42
2.4 激光焊的典型应用	44
2.4.1 钢的激光焊	44
2.4.2 非铁金属的激光焊	45
2.4.3 异种材料的激光焊	46
2.5 激光焊的安全与防护	47
2.5.1 激光的危害	47
2.5.2 激光的安全防护	48
综合训练	49

第3章 扩散焊 50

3.1 认知扩散焊	50
3.1.1 扩散焊的原理及特点	50
3.1.2 扩散焊的类型及应用	53
3.2 扩散焊设备的选用	54
3.2.1 扩散焊设备的分类与组成	54
3.2.2 典型扩散焊设备及其技术参数	56
3.3 扩散焊工艺的制订	57
3.3.1 接头形式设计	57
3.3.2 焊件表面的制备与清理	57
3.3.3 中间层材料及其选择	59
3.3.4 工艺参数的选择	60
3.4 扩散焊的典型应用	64
3.4.1 同种材料的扩散焊	64
3.4.2 异种材料的扩散焊	66
3.4.3 陶瓷材料的扩散焊	69
综合训练	72



第4章 摩擦焊	74
4.1 认知摩擦焊	74
4.1.1 传统摩擦焊方法及原理	74
4.1.2 摩擦焊的特点及应用	79
4.2 传统摩擦焊设备的选用	82
4.2.1 传统摩擦焊设备的组成	82
4.2.2 摩擦焊机的选用	83
4.3 传统摩擦焊工艺的制订	84
4.3.1 焊接过程及热源分析	84
4.3.2 传统摩擦焊工艺	88
4.3.3 摩擦焊应用实例	94
4.4 传统摩擦焊质量控制与安全技术	96
4.4.1 焊接质量及其控制	96
4.4.2 安全技术	98
4.5 搅拌摩擦焊	98
4.5.1 搅拌摩擦焊的原理及特点	98
4.5.2 搅拌摩擦焊工艺	101
4.5.3 搅拌摩擦焊设备	103
4.5.4 搅拌摩擦焊技术的应用	107
综合训练	113
第5章 高频焊	115
5.1 认知高频焊	115
5.1.1 高频焊的基本原理	115
5.1.2 高频焊的特点及应用	117
5.2 高频焊设备的选用	118
5.2.1 高频焊设备	118
5.2.2 高频焊的安全技术	120
5.3 高频焊管工艺的制订	121
5.3.1 典型高频焊制管工艺	121
5.3.2 高频焊工艺要点	122
5.3.3 焊接参数的选择	123
5.4 高频焊典型应用实例	125
5.4.1 螺旋缝焊管的高频焊	125
5.4.2 螺旋翅片管的高频焊	125
5.4.3 型钢的高频电阻焊	126
5.4.4 板(带)材的高频电阻焊	127

综合训练	128
------------	-----

第6章 超声波焊

6.1 认知超声波焊	129
6.1.1 超声波焊的原理及特点	129
6.1.2 超声波焊的类型及应用	132
6.2 超声波焊工艺的制订	135
6.2.1 焊前准备	135
6.2.2 焊接参数的选择	136
6.3 超声波焊设备的选用	140
6.3.1 超声波焊设备的组成	140
6.3.2 部分国产超声波焊机的型号及技术参数	142
6.4 超声波焊的典型应用	143
6.4.1 同种材料的超声波焊	144
6.4.2 异种材料的超声波焊	147
综合训练	149

第7章 螺柱焊

7.1 认知螺柱焊	150
7.1.1 螺柱焊的分类及原理	150
7.1.2 螺柱焊的特点及应用	153
7.2 电弧螺柱焊	155
7.2.1 电弧螺柱焊工艺	155
7.2.2 电弧螺柱焊设备	158
7.3 电容放电螺柱焊	161
7.3.1 电容放电螺柱焊工艺	161
7.3.2 电容放电螺柱焊设备	163
7.4 螺柱焊方法的选择与质量控制	165
7.4.1 螺柱焊方法的选择	165
7.4.2 焊接质量的检验	165
综合训练	170

第8章 爆炸焊

8.1 认知爆炸焊	171
8.1.1 爆炸焊原理及特点	171
8.1.2 爆炸焊的类型及应用	174



8.2 爆炸焊工艺的制订与实施	177
8.2.1 接头形式设计	177
8.2.2 焊接参数的选择	178
8.2.3 爆炸焊操作流程	179
8.3 爆炸焊的典型应用	181
8.3.1 钛-钢复合板的爆炸焊工艺	181
8.3.2 锆合金-不锈钢管接头的爆炸焊	183
8.4 爆炸焊的质量控制及安全防护	184
8.4.1 爆炸焊接头的质量检验	184
8.4.2 爆炸焊安全与防护	185
综合训练	186
参考文献	188

绪 论

1. 焊接技术的发展

装备制造业是国民经济的基础，也是现代工业的支柱，能源工程、海洋工程、航空航天工程、石油化工工程等，无不依靠装备制造工业提供装备。因此，装备制造业发展水平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的关键技术之一，被视为“制造业的命脉，未来竞争力的关键所在”。之所以这样说，是因为焊接这种加工方法在现代装备和工程结构的方方面面都越来越多地显示出了其适应性和优越性。首先体现在它的经济实用，符合高效率 and 低成本的要求；其次表现在它的质量可靠，焊接结构的安全性和可靠性能够得到保障而取得了人们的信赖。

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、电子等多门学科为一体的焊接工程和焊接产业。焊接技术的发展，根本上缘于新材料的应用，作业环境、条件的变化，加工质量要求的提高，以及新时期工业生产模式的转变对企业带来的全方位、更苛刻的要求。这本身就是对焊接技术的挑战，而这种挑战无处不在，例如：造船和海洋工程要求完成大面积拼板、大型立体框架结构自动焊及各种低合金高强钢的焊接；石油化学工业要求完成各种耐高温、耐低温及耐各种腐蚀性介质压力容器的焊接；航空航天工业中要求完成铝、钛等轻合金结构的焊接；重型机械工业中要求完成大截面构件的拼接；电子及精密仪表制造工业要求完成微型精密焊件的焊接；兵器工业的装备制造和弹药产品开发要求不断提高高强金属、高温金属的焊接质量和可靠性等。加之现代企业已不单单着眼于企业经济运行状况的好坏，而是更加注重发展的健康性、长久性以及社会效应，用优质、高效、节能的现代焊接技术逐步取代能耗大、效率低、工作环境恶劣的传统手工焊接工艺的呼声越来越高。

也正是在这种技术进步和产业发展的挑战当中，一些新型焊接技术或连接技术应运而生。它们的开发和应用，使材料焊接性的定义和范围发生了明显变化及拓展，使一些传统意义上不具备焊接性或焊接性极差的材料以及一些新型材料的焊接作业成为可能，高强金属、高温合金、活性金属、难熔金属的焊接不再难以进行，甚至半导体材料以及陶瓷、塑料等非金属材料的焊接也不再是难以解决的问题。新型焊接技术的开发和应用，使焊接结构设计、接头形式选择及工艺排列摆脱了许多禁锢和束缚，使一些大熔深构件或薄壁器件的焊接问题解决起来游刃有余，一些结构上位置条件差乃至密闭空间都不排除作业的可能，对于变壁厚接头、变径接头、异种金属接头、金属-非金属接头可以放心地进行设计和使用的。因为这些

新的焊接方法在技术原理和实际操作方法上都有其独到之处,加上焊前焊后处理、能量输入、熔深控制、保护方式等方面的控制措施更为严密,可以明显提升焊接产品的质量稳定性,使产品内的低缺陷、零缺陷成为可能,发生结构故障的几率大幅降低。

这些新的焊接方法中,有些完全可以实现流水线作业和自动化生产,有些因具有较高的能量密度,适用于高速加工和专业化集中生产的组织,有些借助设备保障甚至近似于机械加工,可以明显缩短焊件的成形加工时间,无不体现了新型焊接技术的高生产率。新型焊接设备的操作自动化水平大幅提高,操作简便易学,极大地降低了工人的劳动强度、劳动密度以及残次品出现的概率。这些新的焊接技术和焊接方法更多地利用了光能、声能和机械能,明显降低了电能的消耗,在节省能源的同时降低了加工成本。此外,应用这些新的焊接技术,很大程度上规避了有毒、有害气体的产生和排放,降低了烟尘污染和噪声污染,对于焊接操作者而言,减少了职业病的损害,保护了他们的身心健康;从企业的角度看,不仅降低了技术安全事故的发生频率,减轻了企业的职业病防治负担,而且使企业的发展更加符合资源节约型、环境友好型的时代要求,体现出良好的经济效益、环保效益和社会效益。

2. 特种焊接技术简介

随着现代工业的发展,铝合金、钛合金、镁合金、陶瓷、金属间化合物、复合材料等轻质高强材料正逐步成为高端装备制造的主要材料,由于这些材料物理、化学性能的特殊性,采用常规的焊接方法很难实现可靠连接。新产品、新结构和新材料对焊接技术提出了新的要求,促进了传统焊接技术的不断改进与创新。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、气体保护焊等传统焊接技术之外的新型焊接方法,主要包含电子束焊、激光焊等先进的高能束流焊接方法,以及高效率、低成本、应用广泛的螺柱焊及扩散焊、摩擦焊、爆炸焊等固相焊接技术。特种焊接方法对于一些特殊材料及结构的焊接具有非常重要的作用,已逐渐成为实现新材料选用、新结构设计和新产品制造所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了广泛应用,并已扩大到工业生产的许多领域,创造了巨大的经济和社会效益,推动了社会和科学技术的进步。

高能束流焊是将高能量密度的束流,如电子束、激光束等作为热源的熔化焊技术的总称。高能束流的功率密度在 $10^5 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 范围内,远远高于常规的氩弧焊或 CO_2 气体保护焊,将其应用于焊接生产,可以高能量密度、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。例如,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,使其在汽车车身的制造过程中占据了重要地位。

金属结构加工制造技术的高速发展和进步,对将金属螺柱、螺栓、螺钉等焊到构件上形成 T 形接头的连接方法不断提出新的要求,于是逐渐产生并形成了一种特殊的焊接技术,即螺柱焊。由于螺柱焊可以将不同规格的螺柱方便快捷地焊接在金属工件表面而不需复杂的传统焊接工艺及大量焊后处理,且焊接强度高于金属母材和螺柱本体,使其很快在航空航天、船舶制造、车辆制造、建筑等领域得到了推广使用。

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技术。该类焊接技术的特点是温度低、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,焊接时工件仅发生微量的塑性变形,通过界面原子扩散形成接头,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、夹杂等缺陷,从而使接头区的力学性能接近母材,因此其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了蓬勃生机,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。由于固相焊接具有连接工艺简单,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、保护气体以及焊后残余应力和变形小等优点,故其在航空航天、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。

3. 本教材的教学目标和要求

(1) 教学目标 通过本课程的学习,使学生较好地掌握特种焊接方法的基本原理和工艺特点,能根据金属材料的性能分析其焊接性,结合典型零件的结构特点制订焊接工艺并实施操作。

(2) 教学要求

- 1) 掌握各类特种焊接方法的基本原理及工艺特点。
- 2) 能够合理选用焊接材料及设备。
- 3) 能够分析制订工程材料及典型构件的焊接工艺。
- 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1章 电子束焊



学习目标

知识目标	1. 掌握电子束焊的原理及工艺特点。 2. 熟悉电子束焊的焊接设备。 3. 掌握典型材料电子束焊焊接工艺的制订与实施方法。 4. 掌握电子束焊的安全防护知识。
能力目标	1. 能够分析金属材料对电子束焊的适应性。 2. 能够合理选用电子束焊焊接设备。 3. 能够制订并实施电子束焊焊接工艺。 4. 能够按照安全操作规程文明生产。

1.1 认知电子束焊



导入案例

20 世纪, 美国已将电子束焊技术应用于航空航天领域, 主要用于制造飞机上的重要零部件。美式 F-14 战斗机上的钛合金中央翼盒就是典型的电子束焊焊接结构。中央翼盒长 7m, 宽 0.9m, 整个结构由 53 个 TC4 钛合金件组成, 共 70 条焊缝, 全部用电子束焊焊接而成。焊件厚度为 12~57.2mm, 全部焊缝长达 55m, 采用电子束焊使整个结构质量减轻了 270kg, 同时焊缝精度高、强度好, 构件的整体化制造水平也得到了极大提高。

1.1.1 电子束焊的原理及特点

电子束焊 (Electronic Beam Welding, EBW) 是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 60 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, 电子束焊的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。



1. 电子束焊的原理

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 $\phi 0.1 \sim \phi 1\text{mm}$ ，功率密度可达 10^6W/cm^2 以上，比普通电弧的功率密度高 $100 \sim 1000$ 倍。

电子束由电子枪产生。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，在 $30 \sim 150\text{kV}$ 加速电压的作用下，电子的速度被加速到光速的 $30\% \sim 70\%$ ，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 所示为电子束发生原理图。

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。

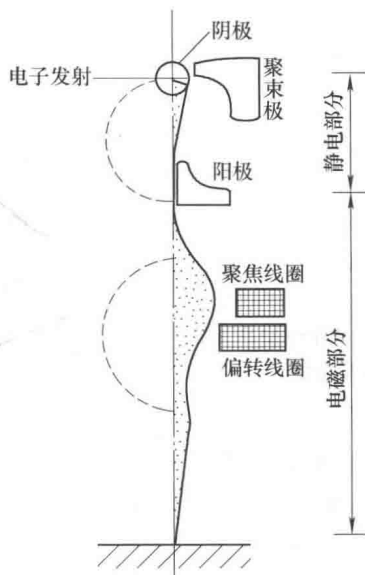


图 1-1 电子束发生原理图

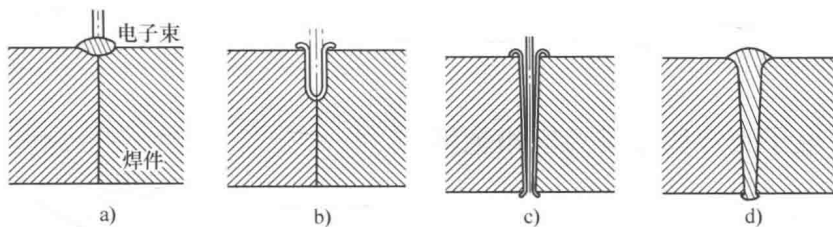


图 1-2 电子束焊接焊缝形成的原理

- 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，匙孔被液态金属包围 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 $10^6 \sim 10^8\text{W/cm}^2$ ，足以获得很强的穿透效应和很大的深宽比。当电子束的功率密度低于 10^5W/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。

电子束焊的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。

2. 电子束焊的特点

电子的质量极小，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，还能够被精确控制、快速反应。在这方面，电子束焊明显优于激光束焊，后者只能用透镜和反射

镜控制，反应速度慢。表 1-1 归纳了与其他传统焊接工艺方法相比，电子束焊所具有的特点。

表 1-1 电子束焊的特点

特 点	内 容
电子束穿透能力强，焊缝深宽比大	电子束斑点尺寸小、功率密度大，可实现高深宽比（即焊缝深而窄）的焊接，深宽比达 60:1，可一次性焊透厚度为 0.1~300mm 的不锈钢板；与常规电弧焊比较，可节约大量填充材料，降低了能源消耗
焊接速度快，焊缝组织性能好	能量集中，熔化和凝固过程快。例如焊接厚度为 125mm 的铝板，焊接速度可达 40cm/min，是氩弧焊的 40 倍；高温作用时间短，合金元素烧损少，能避免晶粒长大，使接头性能得到改善，焊缝耐蚀性好
焊件热变形小	功率密度大，输入焊件的热量少，焊件变形小，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，因而特别适用于钛及钛合金等化学性质活泼的金属的焊接，也可用于焊接真空密封元件，焊后元件内部保持真空状态
再现性好，工艺适应性强	可独立地在很宽的范围内调节焊接参数；易于实现机械化、自动化控制，重复性、再现性好，产品质量稳定；通过控制电子束的偏移，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	不仅能焊接金属和异种金属材料的接头，也可焊接非金属材料，如陶瓷、石英玻璃等
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的、简单的或小型部件，用电子束焊将其焊为一个整体，减少加工难度，节省材料，简化工艺
不足之处	设备复杂，一次性投资大，费用较昂贵；要求接头位置准确，间隙小且均匀，焊前对接头加工、装配要求严格；被焊工件尺寸和形状常常受到工作室的限制；需要专门加工焊接工装夹具，夹具及焊件必须是非磁性材料，否则要进行完全退磁处理

1.1.2 电子束焊的分类及应用范围

1. 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。图 1-3 所示为电子束焊的三种基本类型。

(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作用，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的焊接，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

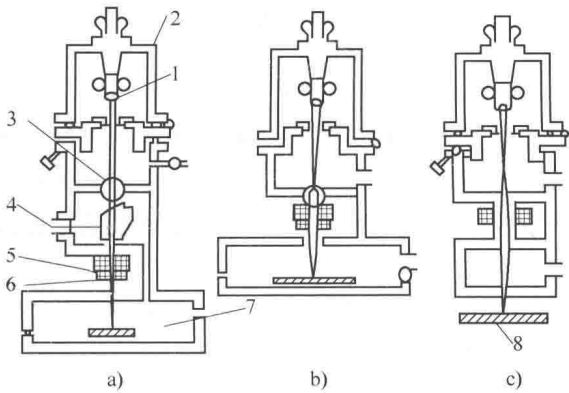


图 1-3 电子束焊的基本类型

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



空室容积限制。此外，抽真空需要辅助时间，影响了生产率。

(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的最大值相差很小。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，减少了抽真空的时间，从而加速了焊接过程，提高了生产率，适用于大批量零件的焊接和在生产线上使用。例如，汽车变速器组合齿轮多采用低真空电子束焊。

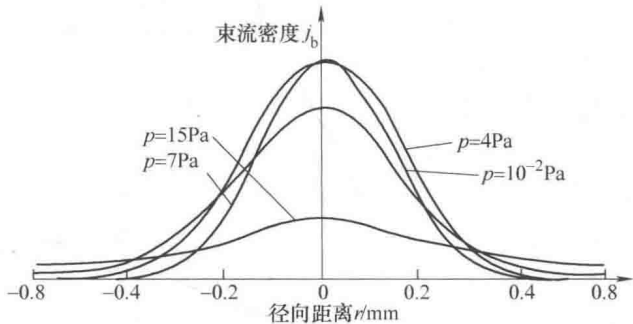


图 1-4 不同压强下电子束斑点束流密度的分布

(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 $20 \sim 50\text{mm}$ 范围内，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，非真空电子束焊能够达到的最大熔深为 30mm 。

这种方法的优点是不需要真空室，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方法，既保留了真空电子束焊功率密度高的优点，又不需要真空室，在大型工件的焊接工程上有很好的应用前景。

不同类型电子束焊的技术特点及适用范围见表 1-2。

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），生产率低，焊件尺寸受真空室容积限制	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的焊接
低真空 电子束焊	$10^{-1} \sim 10$	加速电压为 $40 \sim 150\text{kV}$ ，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，工艺和设备得到了简化	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、变速器、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 $150 \sim 200\text{kV}$ ，最大工作距离在 30mm 左右。可焊接大尺寸焊件，生产率高、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 电子束焊	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