

工程训练·工程实践

焊接成形技术

雷玉成 于治水 主编 ●



化学工业出版社
教材出版中心

工 程 训 练 · 工 程 实 践

焊 接 成 形 技 术

雷玉成 于治水 主编

戈晓岚 主审



化 学 工 业 出 版 社
教 材 出 版 中 心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接成形技术/雷玉成, 于治水主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 7

(工程训练·工程实践)

ISBN 7-5025-5964-7

I. 焊… II. ①雷…②于… III. 焊接-成型 IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 081871 号

工程训练·工程实践

焊接成形技术

雷玉成 于治水 主编

戈晓岚 主审

责任编辑: 刘俊之 陈 丽 邹 宁

责任校对: 李 林 靳 荣

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 17½ 字数 360 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5964-7/TB·62

定 价: 33.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

工程训练·工程实践

编委会主任 杨继昌

编委会副主任 袁银南 戈晓岚

编委会委员 杨继昌 袁银南

肖田元 梅 强

张永康 卢章平

陆一心 李金伴

戈晓岚 马汉武

序

人类进入 21 世纪前后,以信息技术为重要标志的高新技术的飞速发展,正在改变着人类的社会、经济和生活方式。“天翻地覆慨而慷”,世界范围内的激烈竞争,已越来越明显地表现为人才的竞争,特别是创新人才的竞争。1998 年 10 月,联合国教科文组织在巴黎召开了首届世界高等教育大会,会议达成了共识:高等教育的根本使命是促进社会的可持续发展与进步。目前,教育开始求新求变,要求坚持以人为本,更具有前瞻性。对学生的人文素质、科学素质、实践能力和创新能力的培养更显重要。

“问渠哪得清如许,为有源头活水来。”技术是工程的基础,科学是技术的源泉,科学技术相互支持,但直接作用于生产实际的是技术。因此,面向经济建设要高度重视工程人才的培养,高度重视工程教育,要努力加速建立科学、技术、经济和管理相结合的工程教育体系,强化工程意识,重组工程训练,提高工程素质,培养创新精神、创新人格和实践能力,以实现知识创新、技术创新、管理创新和市场开拓型的工程人才培养。

近年来,尽管各国的国情不同,面临的问题也不同,在工程教育的体制和运作上互有差异,但对工程教育的认识、做法和发展方向上都强调“综合、创造、实践”,强调“工程教育工程化”、“工程教育为工程实际服务”、强调人文关怀、创新精神、实践能力和工程师素质的培养。

另一方面,我国加入世界贸易组织后,对外开放更将进一步扩大,中国将更加深入地参与国际分工,越来越多的产品将打上“中国制造”,制造业是工业的主体,装配制造业是制造业的核心。没有装配制造业就没有制造,没有制造就没有获得物质财富的基本手段。制造首先要依靠直接从事制造的技能人才。从而,培养“中国制造”的技能人才就成为关键。我国已经成为了一个高级蓝领即银领制造业人才稀缺的国家。

我国“十五”计划提出,要在 5 年内将职工中的高级技能人才的比例提高到 20%。一个合格的银领人才应当具备比较深厚的理论基础与相当丰富的实际经验,并能够针对生产第一线的实际需要,具备很强的技术革新、开发攻关、项目改进的能力。这种人才应具有高度的责任感,不但关心产品,更加懂得团结人、关怀人;不仅是某些关键生产环节中的操作者,还是整个生产环节的组织者;同时还能高度关怀、有效带动和组织协调其他技术人员一起动手进行应有的技术攻关,把优秀的设计变成一个高质量的产品。

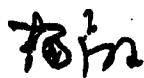
针对工程人才的需求，江苏大学工业中心组织编写了工程训练·工程实践系列图书，希望成为联接科学、教育与工程技术、生产实际的桥梁之一。在本系列图书规划过程中，作者针对“各种技能对工作的重要性”，对相关企业和历届毕业生进行了调查，证实在工业生产中，对技术交流、设计制造、工程经济、项目管理、质量控制、计算机等技能均有较高的要求。

本系列图书以工程类本科生（尤其是高职学生）和制造业银领的培训为对象，包括机、电、管三个领域。在内容上注重实践性、启发性、科学性，强调诸如制造、环境影响、质量、商务和经济等工程实践的多重功能。从当前工程人才的素质需求和实际出发，努力做到理论与实践并重，理论与实际相结合，基本概念清晰，重点突出，简明扼要，深入浅出，通俗易懂，以现代工程训练为特色，重视能力培养，面向生产实际，并考虑与国际教育交流，反映新技术、新工艺、新材料的应用和发展。

本套丛书的编写是适应我国制造业发展形势，在教育上的一个创新，值得鼓励。由于是一个创新，其中就不会没有问题，没有不足之处。我与编者的心情一样，希望读者能及时指出其中的问题与不足之处，有助于本系列图书不断改进，编者的水平不断提高。

谨以为序。

中国科学院院士
华中科技大学教授



2004年4月

前 言

人类进入 21 世纪,世界经济发展有一个突出的趋势,这就是知识经济化,科技进步在经济发展中越来越表现出强大的作用,高科技向现实生产力的转化越来越快,科技革命推动着世界经济的增长,这是从工业经济进入知识经济的主要标志。

焊接成形技术是现代工业生产中不可缺少的先进制造技术。随着科学技术的发展,焊接成形技术越来越受到各行各业的密切关注,并广泛应用于机械、冶金、建筑、桥梁、船舶、汽车、电力、电子、锅炉和压力容器、航空航天、军工和军事装备等产业部门。

为了适应焊接成形技术的发展,本书系统阐述了电弧焊、电阻焊、激光焊等重要焊接方法的基本原理、工艺特点和设备选用,总结了其适用范围和常用金属材料、典型零件的焊接技术要点。同时系统地阐述了焊接冶金的基本原理、常用金属材料的焊接性和焊接结构基础,并在此基础上介绍了焊接结构装配及焊接工艺装备、焊接过程自动化技术和焊接无损检测技术。

本书在编写过程中,力求理论联系实际,归纳和突出焊接成形技术的基本问题,注重思路和能力的培养,适当反映国内外的新技术和新的发展趋势。书中许多图表均引自最新的国内外标准和典型企业成熟经验,因此,本书既可作为工科院校本科生(尤其是高职本科生)的选修教材,也可供工程技术人员、企业高级技术工人、技师参考。

全书由雷玉成(江苏大学)统稿,并负责编写第一章至第四章、第九章、第十章等。于治水(江苏科技大学)编写第五章和第八章,李晓泉(江苏科技大学)编写第六章和第七章。参加本书编写工作的还有江苏大学的袁为进、朱飞(第二章),李彩辉(第三章),郁雯霞(第四章),张成(第九章和第十章)。

本书在编写过程中得到了江苏大学戈晓岚教授的悉心指导并担任全书主审,在此特致谢意。此外向关心本书出版的人士及所援引文献的作者表示诚挚的谢意,这些文献资料充实了本书的内容,推动了我国焊接成形技术的发展和应

限于作者水平,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2004 年 6 月

内 容 提 要

本书系统阐述了电弧焊、电阻焊、激光焊等重要焊接方法的基本原理、工艺特点和设备选用,总结了其适用范围和常用技术材料、典型零件的焊接技术要点。同时系统阐述了焊接冶金的基本原理、常用金属材料的焊接性和焊接结构基础。并在此基础上介绍了焊接结构装配及焊接装备、焊接过程自动化技术和焊接无损检测技术,并归纳和突出焊接成形技术的基本问题,注重思路和能力的培养,适当介绍了国内外新技术和新发展趋势。

本书可作为工科院校及高职高专学生的相关课程教材,也可供工程技术人员、企业技师、技术工人参考。

目 录

第一章 绪 论	1
一、焊接成形技术的特点	1
二、焊接方法及其在现代工业中的应用	2
第二章 电弧焊	5
第一节 焊接电弧	5
一、电弧的形成和组成区域	5
二、焊接电弧的静特性	6
三、焊接电弧力	7
第二节 弧焊电源	10
一、弧焊电源的分类	10
二、对弧焊电源的基本要求	11
第三节 手工焊条电弧焊	18
一、手工焊条电弧焊的焊条	18
二、手工焊条电弧焊工艺要领	20
第四节 氩弧焊	22
一、概述	22
二、钨极氩弧焊	23
三、熔化极氩弧焊	28
第五节 CO ₂ 气体保护电弧焊	32
一、概述	32
二、CO ₂ 焊的冶金特点	33
三、CO ₂ 焊的熔滴过渡形式及规范参数的选择	35
四、减少 CO ₂ 焊飞溅的措施	38
第六节 等离子弧焊接	40
一、等离子弧的形成及应用特性	40
二、等离子弧焊接工艺	41
第七节 气体保护电弧焊设备的选择	45
一、钨极氩弧焊设备的选择	45
二、熔化极气体保护焊设备的选择	47

第三章 电阻焊	53
一、概述	53
二、电阻焊的分类	53
三、电阻焊的优缺点	53
第一节 电阻焊的加热	53
一、电阻点焊的加热	54
二、对焊的加热	55
三、高频对接缝焊的加热	57
第二节 电阻点焊	59
一、概述	59
二、点焊的原则	60
三、点焊循环	60
四、点焊焊接参数及其相互关系	61
五、常用金属材料的点焊	63
六、凸焊	66
第三节 电阻对焊和闪光对焊	66
一、电阻对焊	66
二、闪光对焊	67
三、典型零件的对焊	71
第四节 高频对接缝焊	72
一、概述	72
二、高频对接缝焊焊接参数及选择	73
三、常用金属的高频纵缝焊接	74
四、高频螺旋缝焊管	74
第五节 电阻焊设备的选择	75
一、概述	75
二、电阻焊电源的电气性能	77
三、点焊机和凸焊机	77
四、对焊机	78
五、高频对接缝焊设备的选择	79
 第四章 激光焊	 81
第一节 激光焊原理、特点、应用范围及分类	81
一、原理	81
二、特点	81
三、应用范围	81

四、激光焊分类	82
第二节 激光焊设备	86
一、固体激光焊机	86
二、气体激光焊机	87
第三节 激光焊工艺参数	89
一、脉冲激光焊焊接工艺及参数	89
二、连续激光焊焊接工艺及参数	92
第四节 常用金属材料的激光焊	98
一、材料激光焊的焊接性	98
二、典型材料的激光焊	100
第五章 焊接冶金基础	104
第一节 电弧焊热过程	104
一、电弧焊热过程的特点及其影响	104
二、焊接温度场	105
三、电弧焊过程中的热循环	108
第二节 电弧焊的冶金过程	110
一、焊接冶金过程的特点	111
二、气体对焊缝金属的影响	111
三、焊缝金属的脱氧、脱硫和脱磷	112
四、焊缝金属的掺合金	115
第三节 焊缝金属的结晶	115
一、焊接熔池的一次结晶	116
二、焊缝中的偏析现象	116
三、焊缝金属的二次结晶	117
四、改善焊缝金属组织的措施	117
五、焊缝金属的夹杂物	118
六、焊缝金属中的气孔	119
第四节 焊接热影响区的组织和性能	122
一、焊接热影响区加热过程中的组织转变	122
二、焊接热影响区冷却过程中的组织转变	123
三、焊接热影响区的组织和性能	126
四、焊接接头熔合区的特征和性能	127
五、影响焊接接头组织与性能的因素	128
第五节 焊缝和热影响区中的裂纹	130

一、热裂纹	130
二、再热裂纹	133
三、层状撕裂	134
四、冷裂纹	135
第六章 金属材料焊接性	139
第一节 金属材料的焊接性	139
一、金属焊接性的概念	139
二、焊接性试验方法	139
第二节 合金结构钢的焊接性	143
一、热轧及正火钢的焊接性	143
二、调质钢的焊接性	145
第三节 耐热钢的焊接性	147
第四节 不锈钢的焊接性	147
一、焊接接头晶间腐蚀	147
二、焊接接头热裂纹	148
三、焊接接头的应力腐蚀开裂	149
四、奥氏体焊缝的脆化	149
五、奥氏体钢的焊接工艺特点	149
第五节 有色金属的焊接性	150
一、铝及其合金的焊接性	150
二、钛及钛合金的焊接性	151
三、铜及铜合金的焊接性	152
第七章 焊接结构	155
第一节 焊接应力与变形	155
一、焊接应力与变形的基本概念	155
二、焊接应力与变形产生原因	156
三、焊接残余变形的分类	158
四、焊接应力和焊接变形对焊接结构的影响及防止措施	158
第二节 焊接结构的脆性断裂失效	160
一、焊接结构的特点	160
二、焊接结构的脆性断裂	161
第三节 焊接结构的疲劳断裂失效	163
一、疲劳断裂及其断口特征	163

二、影响焊接接头疲劳强度的因素	165
三、提高疲劳强度的措施	165
第八章 焊接结构装配及焊接工艺装备	167
第一节 焊接结构的装配	167
一、装配基本条件及装配基准	167
二、装配用工夹量具与设备	168
三、装配中的测量	170
四、结构的装配工艺	173
五、装配基本方式与方法	175
第二节 焊接工艺装备的作用及分类	179
一、焊接工装的地位和作用	179
二、焊接工装的分类	179
三、焊接工装的特点	180
第三节 工件的焊接夹具	181
一、焊件的定位及定位器	181
二、焊件在夹紧机构中夹紧	187
三、工装夹具设计的基本知识	192
第四节 焊接变位机械	198
一、焊件变位机	198
二、焊机变位机	204
三、焊工变位机	207
四、变位机械装备的组合应用	208
第九章 焊接过程自动化技术	209
第一节 电弧焊自动控制技术	209
一、弧焊电源输出特性控制	209
二、电弧焊的自动跟踪控制	211
第二节 电阻焊质量监控技术	220
一、概述	220
二、恒电流监控技术	221
三、超声波监控	224
四、红外辐射监控技术	226
五、智能质量监控	227
第三节 计算机辅助焊接技术	231

一、焊接专家系统	231
二、人工神经网络在焊接中的应用	236
第十章 焊接无损检测技术	238
第一节 超声检测技术	238
第二节 焊缝射线检测	245
一、射线的产生	245
二、射线输入的选择	246
三、射线检测的灵敏度	246
四、射线检测裂纹的灵敏度	247
五、射线检测实时显示技术	248
第三节 焊缝涡流检测	251
一、涡流检测技术基础	251
二、缺陷信号的分析与提取	252
三、焊缝的涡流检测技术	257
主要参考文献	261

第一章 绪 论

焊接成形是现代工业高质量、高效率制造技术中一种不可缺少的加工工艺。由于焊接制造工艺具有多学科技术综合的特点,使得焊接技术能够更多更快地融入最新科学技术的成就而具有时代发展的特征。据统计,大多数发达国家利用焊接加工的钢材量已超过钢材产量的一半,大量的铝、铜、钛等有色金属及其合金的结构件也是用焊接方法制造的,因此,材料学科的发展大大推动了焊接技术的发展。近半个多世纪以来,焊接技术发生了很大的变化,为提高生产率、缩短生产周期和降低成本等,焊接技术正向着智能化的机器人焊接方向发展,同时,为满足高新技术中新材料日益发展的需求,还要求焊接技术能够连接各种特殊的新型材料。正是受到材料学科和信息学科新技术的影响,焊接技术已具有数十种焊接新工艺,也使得焊接工艺操作经历着从手工焊到自动焊,自动化、柔性化到智能化的过渡。目前,焊接技术已广泛应用于锅炉与压力容器、船舶、工程机械、航空航天、电力、石油化工、建筑、电子、海洋开发等各个工业部门。

一、焊接成形技术的特点

焊接(welding),是通过加热或加压,或两者并用,并且用或不用填充材料,使工件达到结合的一种方法。其实质就是通过适当的物理-化学过程,使两个分离固体表面的金属原子接近到晶格距离($0.3\sim 0.5\text{nm}$),形成金属键,从而使两个分离的固体实现永久性的连接。与其他材料加工工艺,如铸造、锻压、铆接相比,焊接成形技术具有如下特点。

① 焊接可以将不同类型、不同形状尺寸的材料连接起来,可使金属结构中材料的分布更合理。此外,焊接结构中各零部件间通常可直接用焊接连接,不需要附加的连接件,焊接接头的强度一般也能达到与母材相同。因此,焊接结构产品的质量轻,生产成本低。

② 焊接接头是通过原子间的结合力实现连接的,刚度大,整体性好,在外力作用下不像机械连接(如铆接、销子连接等)那样产生较大的变形;而且,焊接结构具有良好的气密性、水密性,这是其他连接方法无法比拟的。

③ 焊接加工一般不需要大型、贵重的设备。因此,是一种投资少、见效快的方法。同时,焊接是一种“柔性”加工工艺,既适用于大批量生产,又适用于小批量生产。而产品结构变化时,设备可基本不变。

④ 焊接连接工艺特别适用于几何尺寸大而材料较分散的制品。例如船壳、桁架等;焊接还可以将大型、复杂的结构件分解为许多小型零部件分别加工,然后通过焊接连成整体结构,从而扩大工作面,简化金属结构的加工工艺,缩短加工周期。

随着焊接工艺方法的发展及焊接结构形式的改进,现在不仅已经制成了各种机械化、自动化及有专门用途的自动焊机,而且还创造了大量的焊接辅助装置、单机自动化的焊接机械装置,焊接生产流水线和生产自动线早已成为现实。在整个机械制造行

业中，焊接机器人比其他类型机器人应用更广泛，焊接生产的机械化、自动化，不仅可以提高焊接结构的生产率，降低生产成本，提高产品质量，同时也使生产工人的健康进一步得到保障，环境污染也有所减轻。然而，由于焊接结构产品的多样化及生产过程的复杂性，目前国内焊接生产过程的机械化、自动化的程度还不是很高，手工操作在某些产品中仍占有相当大的比例。

二、焊接方法及其在现代工业中的应用

根据母材在焊接过程中是否熔化，将焊接方法分为熔焊、压焊和钎焊三大类。然后再根据加热方式、工艺特点或其他特征进行下一层次的分类，见表 1-1。

表 1-1 焊接方法的分类

第一层次 (根据母材是否熔化)	第二层次 (根据热源特点)	第三层次	第四层次	代号	是否易于实现自动化
熔焊:利用一定的热源,使构件的被连接位局部熔化成液体,然后再冷却结晶成一体的方法	电弧焊	熔化极电弧焊	手工电弧焊	111	△
			埋弧焊	121	○
			熔化极气体保护焊(GMAw)	131	○
			CO ₂ 焊	135	○
			螺柱焊		△
		非熔化极电弧焊	钨极氩弧焊(GTAW)	141	○
			等离子弧焊	15	○
			氢原子焊		△
	气焊	氧-氢火焰		311	△
		氧-乙炔火焰			△
		空气-乙炔火焰			△
		氧-丙烷火焰			△
		空气-丙烷火焰			△
		铝热焊			△
	电渣焊			72	○
	电子束焊	高真空电子束焊		76	○
		低真空电子束焊			○
		非真空电子束焊			○
	激光焊		CO ₂ 激光焊	751	○
			YAG 激光焊		○
	电阻点焊			21	○
	电阻缝焊			22	○
压焊:利用摩擦、扩散和加压等物理作用,克服两个连接表面的不平度,除去氧化膜及其他污染物,使两个连接表面上的原子相互接近到晶格距离,从而在固态条件下实现连接的方法	闪光对焊			24	○
	电阻对焊			25	○
	冷压焊				△
	超声波焊			41	○
	爆炸焊			441	△
	锻焊				△
	扩散焊			45	△
	摩擦焊			42	○

续表

第一层次 (根据母材是否熔化)	第二层次 (根据热源特点)	第三层次	第四层次	代号	是否易于实现自动化
钎焊:采用熔点比母材低材料作钎料,将焊件和钎料加热至高于钎料熔点但低于母材熔点的温度,利用毛细作用使液态钎料充满接头间隙,熔化钎料润湿母材表面。冷却后结晶形成冶金结合的方法	火焰钎焊			912	△
	感应钎焊				△
	炉中钎焊	空气炉钎焊			△
		气体保护炉钎焊			△
		真空炉钎焊			△
	盐浴钎焊				△
	超声波钎焊				△
	电阻钎焊				△
	摩擦钎焊				△
	金属熔钎焊				△
	放热反应钎焊				△
	红外线钎焊				△
	电子束钎焊				△

焊接用的热源主要有电弧、火焰、电阻热、电子束、激光束、超声波、化学能等。电弧是应用最广泛的一种焊接热源,主要用于电弧焊、堆焊。电渣焊或电阻焊是利用电阻热进行焊接的。锻焊、摩擦焊、冷压焊及扩散焊等是利用机械能进行焊接。气焊是依靠可燃性气体(如乙炔、氢气、天然气、丙烷、丁烷等)与氧混合燃烧产生的热量进行焊接。热剂焊是利用金属与其他金属氧化物间的化学反应所产生的热量作热源,利用反应生成的金属作为填充材料进行焊接,应用较多的是铝热剂焊。爆炸焊是利用炸药爆炸释放的化学能及机械冲击能进行焊接。

随着科学技术的发展,新的焊接方法仍在不断出现。如英国焊接研究所发明的搅拌摩擦焊方法,不仅可以焊接铝、镁、锌、铜等有色金属及其合金,而且已成功焊接了25mm的钢板,是一种很有发展前景的新方法。又如俄罗斯汽车工业科学研究所发明的氙灯焊接新工艺,为金属、非金属材料的焊接提供了广泛的可能性,其生产成本远低于激光焊。

众所周知,机械制造业是国民经济的基础工业,它决定着国家的生产能力和水平,而焊接技术则是机械制造业的关键技术之一。工业发达国家的焊接结构用钢均在其钢产量的一半以上,我国每年亦有6000万吨以上的钢材用于制造各种用途不同的焊接结构,并对焊接质量和自动化水平有着越来越高的要求。

在能源工业,如石油、天然气、煤炭等,这些工业中都需要制造大量的化工容器、分流装置和各种管线,焊接加工占有重要地位;各类采油平台和炼油设备不仅焊接工作量大,而且技术要求也高。在水电站、火电站、核电站等发电装置的制造方面,焊接技术也是最重要、最关键的技术,在这里,现代焊接方法——MAG/MIG、TIG、CO₂焊、电子束焊、激光焊等都获得了广泛的应用。