

中国材料 工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会

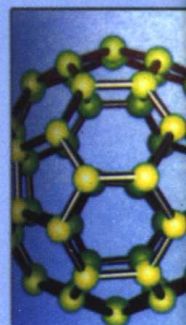


中国材料工程大典编委会

第**22**卷

材料焊接工程(上)

史耀武 主编



化学工业出版社

CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

中国材料 工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会



中国材料工程大典编委会

第**22**卷

材料焊接工程（上）

史耀武 主编



化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

内 容 简 介

中国材料工程大典是中国机械工程学会和中国材料研究学会共同组织全国 39 位院士、百余位各学科带头人、千余位材料工程专家共同执笔编写, 全面反映当今国内外材料工程领域发展的最新资料和最新成果, 集实用性、先进性和权威性于一体的大型综合性工具书。中国材料工程大典包括材料工程基础、钢铁材料工程、有色金属材料工程、高分子材料工程、无机非金属材料工程、复合材料工程、信息功能材料工程、粉末冶金材料工程、材料热处理工程、材料表面工程、材料铸造成形工程、材料塑性成形工程、材料焊接工程、材料特种加工成形工程、材料表征与检测技术等内容, 涵盖了材料工程的各个领域, 将最新的实用数据 (特别是与国际接轨的标准数据)、图表与先进实用的科研成果系统地集合起来, 并附应用实例, 充分展示了材料工程各领域的现状和未来。中国材料工程大典不仅可以满足现代企业正确选材, 合理用材, 应用先进的材料成形加工技术, 提高产品质量和性能, 降低产品成本, 增强产品市场竞争力的需要, 而且对推动中国材料科学与材料成形加工技术的不断创新, 促进制造业的发展, 提高我国制造业的竞争能力, 具有重要的现实意义。

本书为第 22 卷, 材料焊接工程 (上)。主要内容包括材料焊接加工技术基础、焊接方法与设备等。

本书主要供具有大专以上文化水平, 从事材料工程研究的工程技术人员在综合研究和处理材料焊接工程各类技术问题时使用, 起备查、提示和启发的作用, 也可供研究人员、理工院校的有关师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国材料工程大典. 第 22 卷, 材料焊接工程. 上/史耀武主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 8
ISBN 7-5025-7324-0

I. 中… II. 史… III. ①材料科学 ②金属材料—焊接 IV. ①TB3 ②TG457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 094413 号

中国材料工程大典

第 22 卷

材料焊接工程 (上)

中国机械工程学会

中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会

史耀武 主编

责任编辑: 周国庆 陈志良 李骏带

责任校对: 陈 静

封面设计: 雷嘉琦

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码: 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

北京蓝海印刷有限公司印装

开本 880mm × 1230mm 1/16 印张 52¼ 字数 2436 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7324-0

定 价: 170.00 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

序

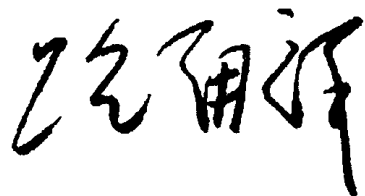
材料是当代社会经济发展的物质基础，也是制造业发展的基础和重要保障。进入 21 世纪以来，随着经济全球化的发展和中国的崛起，现代制造业的重心正不断向中国转移。据统计，今天中国制造业直接创造国民生产总值的 1/3 以上，约占全国工业生产的 4/5，为国家财政提供 1/3 以上的收入，占出口总额的 90%。但是与发达国家相比，我国制造业的水平不高、自主创新能力不足、高端市场竞争力还不强。我国虽然已是世界制造业大国，但还不是世界制造业强国。在有关因素中，材料工程基础薄弱是制约我国制造业发展的关键因素。广义的材料工程包括材料制备、测试和加工成形过程。为了提高我国制造业的水平和竞争力，突破材料工程这个薄弱环节，中国机械工程学会和中国材料研究学会牵头，会同中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会共同组织编撰《中国材料工程大典》（简称《材料大典》），其目的是力图为我国制造业提供一部集科学性、先进性和实用性于一体的综合性专业工具书。以满足广大科技工作者的迫切需求，为科技自主创新和我国制造业的崛起加强技术基础。

经过 5 年多的艰苦努力，《材料大典》终将出版了。这部共 26 卷约 7000 万字的巨著，是 39 位两院院士和 1200 余位参编专家教授们辛勤劳动的智慧结晶。有的作者为此牺牲了健康，如一位退休了的总工程师，为了把他多年的研究成果和实践经验写成书稿，由于长时间写作，导致眼睛视网膜脱落……。这种敬业精神与坚强毅力是值得我们学习铭记的。借此机会，我们要感谢中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会的支持。这些学会的众多专家教授积极参与了《材料大典》编写工作，与中国机械工程学会和中国材料研究学会的专家教授一起完成这项艰巨任务，从而使《材料大典》在完整性与先进性、科学性与实用性的结合上得到了加强；我们要感谢科学技术部、国防科学技术工业委员会、国家自然科学基金委员会、中国科学技术协会、中国科学院、中国工程院，以及各协作单位对编写工作的大力支持和积极帮助；我们也要感谢师昌绪院士等顾问的殷切指导，他们在编委会的两次工作会议上提出了许多重要的意见和建议，平时也给予了经常关心和指导，使我们少走了许多弯路；我们还要对关心和支持《材料大典》编写工作的科研院所、院校、企业以及有关人员表示感谢。没有大家的支持与协同，就不可能有《材料大典》的成功编写和顺利出版。

《材料大典》既总结了 10 多年来在材料工程方面的最新数据、图表及科研成果，还汇集了国内外在材料工程方面的成熟经验和先进理念，它体现了科学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院校的师生参考。

编撰《材料大典》涉及范围广，难度大，书中不可避免地会存在一些缺点和不足之处，恳请各位读者指正。

中国机械工程学会理事长
中国材料工程大典编委会主任



2005 年 9 月 23 日

前 言

《材料焊接工程》卷是《中国材料工程大典》中的卷目之一。

焊接技术的应用涉及能源、交通、航空航天、建筑工程、电气工程、微电子等几乎所有现代制造业。焊接俗称钢铁裁缝。如40%的钢铁材料需经过焊接加工才能成为有用的结构或产品。可以想象焊接在国民的生产生活、财富创造、国防建设及劳动就业中将起到多么重大的作用。

随着冶金及材料科学的发展、计算机及网络技术的广泛应用,材料焊接理论及焊接制造技术得到了空前的迅猛发展,现代焊接技术已能基本满足当前生产的需求。但目前仍存在诸多迫切需要解决的问题,如焊接技术仍过分依赖经验和试验,需要科学的理论和方法指导;焊工的劳动条件仍较差,应大力推广焊接机器人的应用,开发灵巧并有智能的焊接机械或自动化焊接设备,使工作脱离艰苦的工作环境。为了实现清洁生产及可持续发展战略,需要开发节能、节材、无污染的焊接生产装备和焊接材料,降低焊接制造成本,提高企业管理水平和人员素质。特别是在新能源、太空及海洋的开发中,焊接技术仍面临巨大的挑战。为此,《中国材料工程大典》中的《材料焊接工程》卷的编写和出版,正是适应了这一形势发展的需求。

《材料焊接工程》卷(上、下卷)是一部集实用性、先进性和权威性于一体的焊接专业技术工具书。主要内容包括:概论、材料焊接加工技术基础、焊接方法与设备、材料焊接、焊接生产过程自动化、焊接结构设计、焊接结构制造、焊接生产质量管理与无损检测、焊接结构服役与再制造等9篇共67章,约600余万字。来自全国著名大学、研究院所及企业的80余位专家教授,历时3年多时间共同完成这部著作的编写工作。本书全面系统地反映了我国焊接技术的发展及取得的成就和经验,并介绍了国内外的先进焊接技术。在内容安排上,既立足全局,又突出重点。本书主要供从事制造业和材料工程的科技人员在工作中查阅使用,也可以供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

感谢中国机械工程学会、中国材料研究学会、中国材料工程大典编委会、中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会对本卷编写工作的指导与大力支持,感谢有关单位及个人对编写工作的积极参与和热情帮助,使得编写工作能顺利完成。由于编写时间紧迫和编者水平所限,书中的不当之处,恳请读者指正并提出宝贵意见。



2005年9月9日

目 录

第 1 篇 概论 1	8 电子束焊焊缝成形及影响因素..... 70
第 1 章 焊接技术的发展 3	8.1 电子束深熔焊机理..... 70
第 2 章 焊接在现代制造业中的作用 4	8.2 电子束焊焊接工艺参数对焊缝成形的影响..... 70
1 西气东输工程..... 4	9 激光焊焊缝成形及影响因素..... 70
2 西电东送工程..... 4	9.1 激光焊的能源参数..... 70
3 钢桥建设..... 5	9.2 脉冲激光焊工艺参数及对焊缝成形的影响..... 71
4 船舶制造..... 5	9.3 连续 CO ₂ 激光焊工艺参数及对焊缝成形的影响..... 72
5 建筑钢结构..... 6	10 新型焊接工艺及焊缝成形..... 72
6 汽车制造..... 6	10.1 铝合金穿孔型等离子弧立焊及焊缝成形..... 72
第 3 章 新世纪焊接技术面临的挑战 7	10.2 活性助焊剂 - TIG 焊..... 74
1 焊接设备与装备..... 7	第 4 章 焊接冶金与材料焊接性 76
2 焊接材料..... 7	1 焊接化学冶金..... 76
3 新型材料的焊接..... 8	1.1 焊接化学冶金过程特点..... 76
4 焊接生产信息化技术..... 8	1.2 焊接时对金属的保护..... 76
5 焊接结构的寿命评估与延寿技术..... 8	1.3 焊接冶金反应区及其反应条件..... 77
第 2 篇 材料焊接加工技术基础 11	1.4 气相对金属的作用..... 77
第 1 章 焊接热源与焊接方法分类 13	1.5 熔渣及其对金属的作用..... 84
1 概述..... 13	2 焊接材料..... 89
1.1 焊接热源..... 13	2.1 焊条..... 89
1.2 焊接方法的分类..... 14	2.2 焊剂..... 102
1.3 焊接方法介绍..... 16	2.3 焊丝..... 107
第 2 章 焊接热循环与焊接温度场 21	3 材料焊接性..... 116
1 焊接热循环..... 21	3.1 材料焊接性概述..... 116
1.1 焊接热循环及其特征参数..... 21	3.2 材料焊接性的影响因素..... 116
1.2 焊接热循环的特征参数..... 21	3.3 金属焊接性的研究方法..... 117
1.3 多层焊接热循环..... 22	3.4 焊接性的试验内容及方法..... 118
2 焊接温度场..... 24	3.5 常用的焊接性试验方法..... 118
2.1 焊接热作用特点..... 24	第 5 章 焊缝与热影响区的组织与性能 123
2.2 热传播的基本定律..... 25	1 焊缝和热影响区的形成..... 123
2.3 焊接温度场的计算..... 25	1.1 熔池的形成..... 123
第 3 章 焊缝成形 60	1.2 焊缝的形成..... 123
1 焊接材料的熔化与焊缝形成..... 60	1.3 焊接热影响区的形成..... 124
1.1 填充金属的熔化与熔池的形成..... 60	2 焊缝的组织与性能..... 124
1.2 熔池的形状与焊缝的形成..... 60	2.1 焊缝金属一次结晶的结构形态..... 124
2 焊条电弧焊焊接工艺和操作技术对焊缝成型的影响..... 61	2.2 焊缝金属的二次结晶及其组织..... 128
2.1 工艺参数对焊缝成形的影响..... 61	2.3 焊缝金属的性能及其控制..... 133
2.2 焊条电弧焊操作技术对焊缝成形的影响..... 62	3 焊接热影响区的组织与性能..... 141
3 埋弧焊中的焊缝成形及其影响因素..... 63	3.1 熔合区结晶组织特征..... 141
4 钨极氩弧焊 (TIG) 的焊缝成形及影响因素..... 65	3.2 焊接热影响区的转变..... 142
5 熔化极气体保护焊的焊缝成形及影响因素..... 65	3.3 焊接热影响区的组织及其对性能的影响..... 143
5.1 熔化极惰性气体保护焊接 (MIG) 工艺参数对焊缝成形的影响..... 65	3.4 焊接热影响区晶粒粗化现象..... 146
5.2 CO ₂ 气体保护焊焊接工艺参数对焊缝成形的影响..... 67	3.5 焊接热影响区的硬化现象..... 149
5.3 药芯焊丝气体保护焊工艺参数对焊缝成形的影响..... 68	3.6 焊接热影响区的软化现象..... 151
6 气电立焊的焊缝成形及影响因素..... 68	3.7 焊接热影响区的脆化..... 152
7 等离子弧焊焊缝成形及影响因素..... 69	3.8 焊接热影响区组织性能和 CCT 图..... 155
7.1 等离子弧焊的工艺特点..... 69	第 6 章 焊接缺陷 157
7.2 等离子弧焊焊接工艺参数对焊缝成形的影响..... 69	1 焊接裂纹..... 157
	1.1 焊接裂纹的分类..... 157
	1.2 焊接热裂纹..... 157
	1.3 焊接冷裂纹..... 163
	1.4 特殊条件下的裂纹..... 171
	1.5 焊接裂纹的预测及诊断..... 178
	2 焊缝中的气孔..... 180

2.1 气孔的类型及形成	180	2.2 焊条电弧焊接的熔滴过渡	296
2.2 气孔形成的机理	181	3 焊条电弧焊设备及工具	296
2.3 影响气孔形成的因素及防止措施	182	3.1 弧焊电源基础知识	296
3 焊缝中的偏析与夹杂	184	3.2 弧焊变压器	298
3.1 焊缝金属的偏析	184	3.3 弧焊发电机	300
3.2 焊缝中的夹杂物	185	3.4 弧焊整流器	301
第7章 焊接接头力学性能	187	3.5 弧焊逆变器	302
1 焊接接头的均匀性	187	3.6 焊条电弧焊常用辅机具	303
2 焊接接头的基本力学性能测试方法	188	4 焊条	304
2.1 焊接接头力学性能试验试样的取样方法	188	4.1 焊条的组成	305
2.2 焊接接头的拉伸性能	189	4.2 焊条的分类与型号	305
2.3 焊接接头的弯曲性能	190	4.3 焊条的工艺性能	306
2.4 焊接接头的冲击性能	191	4.4 焊条的选用	306
3 焊接接头的断裂和及其表征参量	192	4.5 焊条消耗量计算	307
3.1 断裂力学的基本思想	192	4.6 专用焊条简介	308
3.2 焊接接头断裂表征参量	193	5 焊接工艺	309
4 焊接接头的疲劳性能	196	5.1 焊接工艺参数选择	309
4.1 金属疲劳破坏的基本概念	196	5.2 基本操作技法	309
4.2 焊接接头力学不均匀体疲劳裂纹扩展规律	197	6 焊接缺陷及防止措施	311
4.3 焊接接头疲劳强度评定	198	6.1 外观缺陷	311
5 焊接接头的蠕变性能	200	6.2 内部缺陷	312
5.1 金属蠕变的一般概念	200	第2章 埋弧焊	314
5.2 焊接接头的蠕变断裂性能	201	1 埋弧焊原理及特点	314
第8章 焊接过程物理模拟与焊接性试验方法	202	1.1 埋弧焊原理和应用	314
1 焊接过程物理模拟技术	202	1.2 埋弧焊的特点	314
1.1 焊接过程物理模拟的基本概念及其 主要参数	202	1.3 埋弧焊的应用	315
1.2 焊接过程物理模拟技术对热/力模拟试验装置 的基本要求及常用设备简介	202	2 埋弧焊电弧自动调节原理	315
1.3 物理模拟技术在焊接领域中的应用	203	2.1 埋弧焊对自动调节的要求	315
2 金属材料焊接性主要试验方法	210	2.2 电弧自身调节系统	315
2.1 焊接性试验方法分类	211	2.3 电弧电压反馈调节系统	316
2.2 金属材料主要焊接性试验方法	211	3 埋弧焊设备	318
第9章 焊接应力与变形控制	225	3.1 埋弧焊设备分类和结构	318
1 焊接应力和变形的产生	225	3.2 埋弧焊电源	319
1.1 焊接应力和变形的概念	225	3.3 埋弧焊辅助设备	319
1.2 焊接应力和变形产生的机理	226	4 埋弧焊工艺参数及焊接技术	322
1.3 影响焊接应力和变形的因素	230	4.1 影响焊缝形状及性能的因素	322
2 焊接应力和变形的基本形式及估算	233	4.2 自动埋弧焊工艺	325
2.1 焊接残余应力的典型分布	233	4.3 半自动埋弧焊工艺	330
2.2 焊接残余应力的估算	244	4.4 埋弧焊接头的基本形式	331
2.3 典型构件上的焊接变形	246	5 埋弧焊主要缺陷及防止	331
2.4 焊接变形的估算	247	5.1 气孔	331
2.5 焊接残余应力和变形对焊接结构的影响	254	5.2 裂纹	331
3 焊接应力和变形的测量	257	5.3 夹渣	332
3.1 焊接残余应力的测量	257	6 埋弧焊材料——焊丝、焊剂及选配	332
3.2 焊接变形的测量	259	6.1 焊丝	332
4 焊接应力和变形的控制与消除	260	6.2 焊剂	334
4.1 焊接残余应力的控制和消除	260	第3章 钨极惰性气体保护焊	337
4.2 焊接变形的控制与消除	266	1 钨极惰性气体保护焊 (TIG)	337
4.3 低应力无变形的焊接方法	273	1.1 概述	337
4.4 焊接应力和变形的数值分析	274	1.2 TIG 焊的工艺特点	337
参考文献	288	1.3 TIG 焊的电流种类和极性	337
第3篇 焊接方法与设备	293	1.4 TIG 焊的引弧、稳弧和收弧	338
第1章 焊条电弧焊	295	1.5 TIG 焊的应用范围	339
1 概述	295	2 TIG 焊焊接系统	339
2 焊接电弧物理	295	2.1 TIG 焊的弧-源特性	339
2.1 焊接电弧的电特性	295	2.2 TIG 焊焊接设备配制及技术性能	339
		2.3 TIG 焊炬	341
		2.4 TIG 焊供气系统	344
		2.5 TIG 焊控制系统	344

2.6 TIG 焊设备的维护	344	3.3 常用金属材料的缝焊	451
2.7 TIG 焊的焊接材料	345	4 对焊	454
2.8 TIG 焊焊接工艺	349	4.1 闪光对焊	454
3 特种 TIG 焊接方法	351	4.2 电阻对焊	460
第 4 章 MIG/MAG/CO₂ 焊	354	5 电阻焊设备	462
1 概述	354	5.1 电阻焊设备分类和组成	462
2 熔化极气体保护焊的冶金基础	354	5.2 电阻焊设备的主要技术参数	470
2.1 MIG 焊的冶金特点	354	5.3 电阻焊设备的电极	475
2.2 CO ₂ 焊的冶金特点	356	5.4 点焊机器人	478
3 气体保护焊的基本原理	358	6 电阻焊技术新发展	480
3.1 电弧特性	358	6.1 电阻焊接头形成理论研究进展	480
3.2 熔滴过渡	359	6.2 电阻焊质量控制技术	481
3.3 焊丝的加热与熔化	363	6.3 电阻焊新工艺	482
3.4 工艺参数	364	6.4 电阻焊新设备	482
3.5 药芯焊丝气体保护焊的基本原理	367	6.5 新型点焊机器人	483
4 设备	368	第 7 章 固相焊接	484
4.1 焊接设备的组成	368	1 摩擦焊	484
4.2 送丝系统	369	1.1 概述	484
4.3 焊枪	371	1.2 摩擦焊原理	484
4.4 焊接电源	373	1.3 摩擦焊特点	484
4.5 气路系统	375	1.4 摩擦焊分类	485
4.6 控制系统	376	1.5 摩擦焊设备	488
4.7 熔化极气体保护焊机的介绍与选用	378	1.6 摩擦焊材料	493
4.8 熔化极气体保护焊机的常见故障及维修	380	1.7 摩擦焊工艺	497
5 消耗材料	381	1.8 摩擦焊质量控制	502
5.1 焊丝	381	1.9 摩擦焊工业应用	506
5.2 保护气体	394	2 扩散连接	510
6 应用	398	2.1 扩散连接的特点	510
6.1 焊丝的选择	398	2.2 扩散连接原理	511
6.2 保护气体的选择	398	2.3 扩散连接设备	512
6.3 实心焊丝气体保护焊时工艺参数设定	398	2.4 扩散连接工艺	514
6.4 接头设计	398	2.5 典型材料的扩散连接及其应用	518
6.5 药芯焊丝气体保护焊时工艺参数设定	405	3 爆炸焊	520
7 特殊应用	407	3.1 爆炸焊的原理	520
7.1 熔化极气体保护电弧点焊	407	3.2 可爆炸焊的金属材料	521
7.2 气电立焊	408	3.3 爆炸焊的特点	522
7.3 双丝气体保护电弧焊	409	3.4 爆炸焊的方法及工艺安装	522
7.4 T.I.M.E 焊	410	3.5 爆炸焊的检验和缺陷	524
8 焊接缺陷及其防止措施	411	3.6 爆炸焊的应用	526
第 5 章 高效熔化焊接方法与技术	413	3.7 爆炸焊的安全与防护	532
1 高熔敷率焊接工艺	413	4 冷压焊	532
1.1 改变保护气体成分提高熔敷速度	413	4.1 冷压焊	532
1.2 采用磁控电弧提高焊接熔敷速度	417	4.2 冲压连接	535
2 高速焊接工艺	418	4.3 其他冷压机械连接方法	538
2.1 焊缝形成咬边的理论	419	5 热压焊	540
2.2 高速焊接工艺的实现方式	420	5.1 气压焊	541
第 6 章 电阻焊	426	5.2 锻焊和滚焊	542
1 点焊	427	5.3 热压焊工艺及应用	542
1.1 点焊基本原理	427	5.4 热压焊接头性能与质量控制	545
1.2 点焊一般工艺	429	6 超声波焊接	545
1.3 常用金属材料的点焊	434	6.1 概述	545
1.4 特殊情况的点焊工艺	440	6.2 金属超声波焊接方法	546
2 凸焊	442	6.3 塑料的超声波焊接方法	547
2.1 凸焊基本原理	442	6.4 金属超声波焊接的机理	548
2.2 凸焊一般工艺	444	6.5 焊接设备	549
2.3 常用金属材料的凸焊	445	6.6 焊接工艺	550
3 缝焊	448	6.7 工业应用	551
3.1 缝焊基本原理	448	第 8 章 高能束焊	554
3.2 缝焊一般工艺	449	1 等离子弧焊接与切割	554

1.1 概述	554	5.1 胶焊技术的特点	697
1.2 等离子弧	554	5.2 胶焊工艺形式	698
1.3 等离子弧焊接	555	6 胶接接头质量检验及接头的耐久性	698
1.4 等离子弧切割	562	6.1 胶接接头的质量检验	698
1.5 安全防护	567	6.2 胶接接头的耐久性	699
2 电子束焊	567	第 11 章 其他焊接方法	701
2.1 概述	567	1 气焊	701
2.2 电子束焊的基本原理	567	1.1 气焊用气体及装备	701
2.3 电子束焊的特点	570	1.2 焊炬、焊嘴及回火防止器	701
2.4 电子束焊的焊接设备	570	1.3 减压器	702
2.5 电子束焊的焊接工艺	578	1.4 气焊工艺	703
2.6 电子束焊接接头的组织	579	1.5 气焊材料	704
2.7 电子束焊接接头的残余应力	579	2 螺柱焊	705
2.8 钛合金的电子束焊	579	2.1 螺柱焊接工艺与设备	705
2.9 铝合金的电子束焊	580	2.2 焊接质量检验	708
2.10 电子束焊的应用实例	580	2.3 焊接专用螺柱	710
2.11 电子束焊的焊接技术现状与发展前景	585	3 电渣焊	711
3 激光焊接与切割	588	3.1 电渣焊的发展史	711
3.1 激光焊接与切割设备	588	3.2 电渣焊的基本原理、分类及特点	711
3.2 激光与物质相互作用	595	3.3 电渣焊的特点及局限性	713
3.3 激光焊接	599	3.4 电渣焊焊接过程的稳定条件	714
3.4 激光切割	603	3.5 电渣焊的冶金	714
第 9 章 钎焊	608	3.6 电渣焊金属熔池的结晶	715
1 钎焊基本理论	608	3.7 电渣焊的热影响区	716
1.1 钎焊基本原理及特点	608	3.8 电渣焊设备及辅助机具	716
1.2 液态钎料对母材的润湿与铺展	608	3.9 电渣焊的焊接材料	717
1.3 液态钎料填缝过程	612	3.10 电渣焊工艺参数	720
1.4 钎焊接头的形成	613	3.11 电渣焊的操作	724
1.5 钎剂与钎料的选择与搭配	623	3.12 各种金属材料的电渣焊	728
1.6 钎焊方法	625	3.13 检查与质量控制	734
1.7 钎焊工艺	629	3.14 电渣焊补焊	735
1.8 钎焊试验方法	630	3.15 电渣焊常见缺陷的预防	736
2 硬钎焊	636	3.16 电渣焊的安全技术与劳动保护	736
2.1 铝及铝合金的钎焊	636	3.17 电渣焊技术的发展	737
2.2 铜和铜合金的钎焊	644	4 气电立焊	737
2.3 碳钢和低合金钢的钎焊	648	4.1 基本原理	738
2.4 不锈钢的钎焊	649	4.2 设备	739
2.5 高温合金的钎焊	654	4.3 焊接材料—气电立焊用焊丝	740
2.6 其他金属及合金的钎焊	656	4.4 保护气体	742
2.7 陶瓷材料的钎焊	660	4.5 气电立焊的焊接工艺	743
3 软钎焊	663	4.6 气电立焊的焊缝组织和力学性能	745
3.1 电子工业中的软钎焊	663	4.7 气电立焊操作程序	747
3.2 铜及铜合金的软钎焊	686	4.8 气电立焊典型的焊接工艺参数	747
3.3 铝及铝合金的软钎焊	687	4.9 缺陷的预防和返修	748
3.4 贵金属及其合金镀层的软钎焊	690	4.10 应用	749
3.5 不锈钢的软钎焊	691	5 高频焊	751
第 10 章 胶接	692	5.1 高频焊原理	751
1 胶粘剂的选用	692	5.2 高频焊管设备	752
1.1 胶粘剂的分类	692	5.3 高频感应焊管工艺及参数的选择	757
1.2 胶粘剂的选用原则	693	5.4 其他材料的高频感应焊接	758
2 胶接接头的失效形式	693	5.5 高频焊接质量	761
3 胶接接头设计	693	5.6 典型产品的高频焊接	761
3.1 对接接头设计	694	5.7 安全与环境保护	763
3.2 角接和 T 形接头设计	694	6 热剂焊	763
3.3 平面贴接接头设计	694	6.1 热剂焊的基本原理及特点	763
4 被胶接材料的表面处理及接头固化	695	6.2 铝热剂焊材料	764
4.1 被胶接材料的表面处理	695	6.3 热剂焊工艺及应用	765
4.2 胶粘剂的固化	696	7 聚焦光束焊接及堆焊	769
5 复合连接技术——点焊胶接	697	7.1 聚焦光束加热设备	769

7.2	聚焦光束焊接工艺特点及其应用范围	769	1.6	水下焊接与切割的安全技术	788
7.3	聚焦光束堆焊工艺特点	770	1.7	水下焊接应用实例	788
7.4	聚焦光束堆焊材料和工艺对堆焊层性能的影响	771	2	核辐射条件下的焊接	790
7.5	聚焦光束焊接及堆焊的安全与防护	774	2.1	核动力装置运行中的缺陷	790
第 12 章	严酷环境下的焊接	775	2.2	辐射防护与安全	790
1	水下焊接	775	2.3	辐射条件下焊接技术的要求	791
1.1	湿法水下焊接	775	2.4	常用的维修焊接方法	792
1.2	高压干法水下焊接	781	2.5	核电站维修的典型实例	799
1.3	局部干法水下焊接	785	3	空间焊接	800
1.4	水下焊接的质量要求与质量检验	786	3.1	空间焊接环境与要求	801
1.5	水下切割	787	3.2	空间焊接技术的发展	802
			参考文献		807

中国材料工程大典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

第22卷 材料焊接工程(上)

第
一篇

概 论

主 编 史耀武

编 写 史耀武

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

第 1 章 焊接技术的发展

人类历史上应用最早的焊接技术是钎焊。公元前 4000 年美索布达尼亚人就开始用 Pb 或 Sn 来连接铜，公元前 350 年罗马人开始用 Sn - Pb 合金连接 Pb 制水管或 Cu 制金属工具。我国在春秋中晚期就开始采用 Sn 或 Sn - Pb 合金作为钎料。安徽舒城九里墩春秋墓出土的鼓座，上面的龙身就是先铸造成若干段再钎焊起来，焊接处还残留有大块焊锡；曾侯乙墓出土的铜尊，就采用了 53Sn - 41Pb 的钎料，钟荀铜套的钎料成分为 39Sn - 61Pb，已与现今的某些钎料成分接近。著名的秦兵马俑出土的铜车马还采用了青铜铸焊技术，焊接质量上乘，为英国焊接杂志推崇为 2000 年前的中国焊接技术。1000 年前的唐代，我国更掌握了铁器的锻焊技术，正如《天工开物》所述：凡铁性逐节黏合，涂黄泥于接口之上，入火挥锤，泥渣成枵而去，取其神气为媒合，胶结之后，非灼红斧斩，永不可断。

现代意义的焊接技术出现在 19 世纪初的西方国家。1802 年，俄罗斯的 Petrow 发现电弧现象；1867 年，美国的 Thomson 发明电阻焊；1885 年，俄罗斯的 Benardos 发明碳弧焊。从此焊接技术开始得到迅速发展，成为现代制造技术的重要组成部分。

应该提到的重要发展阶段有：

1888 年，俄罗斯的 Slavianoff 发明金属电极电弧焊；

1890 年，法国出现了氧乙炔焊；

1895 年，德国的 Goldschmit 发明热剂焊；

1908 年，瑞典的 Kiellberg 开始采用药皮电焊条；

1930 年，苏联的 Robinoff 发明了埋弧焊并取得专利；

1936 年，在美国出现熔化电极惰性气体保护焊（MIG）技术；

1939 年，美国的 Reinicke 发明等离子喷涂；

1948 年，苏联的 Chudikow 发明摩擦焊；

1948 年，德国的 Steigerwald 发明了电子束焊；

1951 年，苏联的 Paton 发明了电渣焊；

1953 年，相继在苏联、日本等国的企业采用 CO₂ 气体

保护焊；

1957 年，苏联的 Kazakov 发明扩散焊；

1960 年，美国的 Maiman 发明激光焊。

传统意义上焊接的概念，是指采用物理或化学的方法，使分离的材料产生原子或分子结合，形成具有一定性能要求的整体，不包含铆接等机械连接。发展至今，各种焊接工艺技术近百种，采用了力、热、电、光、声及化学等一切可以利用的能量。焊接技术的应用涉及能源、交通、航空航天、建筑工程、电气工程、微电子等几乎所有工业领域。

随着冶金及材料科学的发展，计算机及网络技术的广泛应用，材料连接的理论及焊接制造技术得到了空前的迅猛发展，现代焊接技术已能适应当前制造业的基本需求。但对异种材料的连接、微电子及微机械的连接、特殊环境条件下的焊接等方面还面临严重的挑战，至于像生物材料的连接技术，更几乎是空白。

今天焊接技术的应用如此之广，是因为焊接结构有一系列的优越性。焊接结构不受外形尺寸限制，可以方便地拼成尺寸很大的工程结构。与铆接或螺栓连接相比，焊接结构的重量较轻，没有铆钉或螺钉的附加重量。与铸造相比，可方便的制成空心结构或封闭结构。焊接结构的整体性、完整性好。焊接结构的密封性好，这对压力容器或真空容器的制造是不可缺少的条件。可根据结构服役及设计的需要，在不同的部位采用不同材质或不同级别的材料，也可采用不同厚度的材料，从而节省材料，包括节省贵重的材料，发挥材料的最大效能，而且结构也更为轻巧，降低成本。

焊接结构的整体性好虽是优点，但有时也带来问题，如止裂性能差，扩展的裂纹很容易穿过焊缝，可能导致灾难性的后果。另外，焊接结构及焊接接头的应力集中较大，焊接接头区域有可能存在缺陷，又是焊接残余应力较大的部位。必须采取科学的工艺设计进行控制，提高焊接接头的强韧性和结构寿命。

编写：史耀武（北京工业大学）

第2章 焊接在现代制造业中的作用

焊接俗称钢铁裁缝。中国钢产量自1996年突破1亿吨后,连续五年居世界第一,我国2002年的钢产量已超过2亿吨,钢材消费量更大。如40%的钢铁材料要经过焊接加工才能成为有用的构件或产品,可以想像将有多大的焊接加工量,焊接在国民的生产生活、劳动就业、财富创造及国防建设中将起到多么重大的作用。

制造业的整体能力和水平,直接关系到国家的经济实力、国防实力、综合国力和在全球经济中的竞争与合作能力,也决定着我国的实现现代化和民族复兴的进程。经过几代人的前仆后继,数亿人的奋发努力,我国已拥有相当规模和较高水平的制造体系,能够为国民经济和社会发展提供先进的产品和装备。这些成绩的取得均离不开焊接技术的发展和运用。下面结合我国近年的重大工程项目说明焊接在现代制造业中的作用和意义。

1 西气东输工程

在新疆塔里木盆地北部库车附近,近年发现五个大中型气田,天然气的地质探明储量为3110亿立方米,在库车以外的塔里木其他地区还有1006亿立方米的地质储量,而且随着勘探工作的深入,油气的地质储量还将增加。为了缓解东部经济发达地区的能源需求,改善东部地区的环境压力,开发西部,中央政府及时地提出了西气东输的发展战略。西气东输管线西起轮南,与陕北气田汇合,经郑州、南京至上海,全长4200 km。图1.2-1为西气东输的中卫黄河跨越工程。



图 1.2-1 西气东输的中卫黄河跨越工程

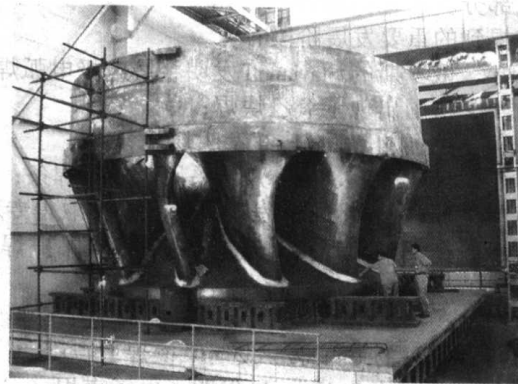
西气东输工程焊管的管径为1016 mm,壁厚14.6~26.2 mm, X70级管线钢。其中螺旋埋弧焊管约占80%,其余为直缝埋弧焊管,管线钢用量170万吨。X70级管线钢符合美国石油学会标准, $w(C)$ 为0.1%~0.14%,钢中除Mn、Si外,尽量降低S、P等杂质含量,还加入Ti、V、Nb等微量合金元素,通过控轧控冷工艺,细化晶粒,显著改善钢材的强韧性能。应该说,管线钢的碳含量低,淬硬倾向小,焊接性是好的。但在野外现场焊接时,还是要采取必要的措施,防止可能的冷裂纹倾向。

在西气东输工程中,由于钢的强度等级较高,管径和板厚较大,管线建设中应以自动焊和半自动焊为主,焊条电弧焊为辅。技术关键是管道对口根焊道的焊接成形。自动焊主要涉及熔化极气体保护焊、自保护药芯焊丝电弧焊。焊条电弧焊主要为纤维素焊条下向焊和低氢焊条上向焊。在大直径厚壁管道施工中,自动焊的优势是非常明显的,也是当今世界大直径管道焊接施工的主流,但需要内对口机、管端坡口成型机等配套机具。

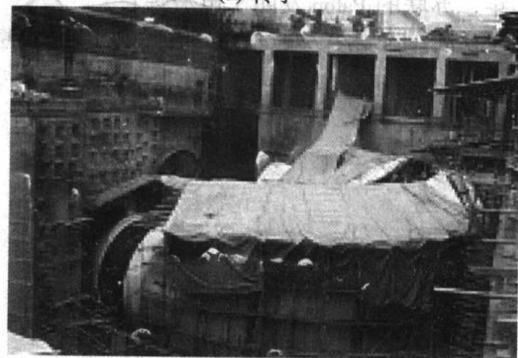
2 西电东送工程

我国已是世界电力大国,至2001年底,我国电力装机容量达3.38亿千瓦,年发电量14780亿千瓦时,两者均占世界第2位。我国1000 MW以上装机容量的发电厂92座,其中水力发电16座。100 MW以上的火力发电机组848台,大型机组已是我国发电的主力机组。然而我国能源分布和能源消费地区间的不平衡,决定了实施“西电东送”的必然性。西部可开发水能资源约2.743亿千瓦,占全国的72%。西部已探明煤炭资源保有量为3882亿吨,约占全国的39%。“十五”计划明确提出:建设西电东送的北、中、南三条大通道,推进全国联网。

三峡水电工程是举世瞩目的,三峡水电站总装机容量18200 MW,相当18座大型核电站,是世界最大的水电站。2003年首批机组发电,2009年全部建成。由26台轴流式水轮机组成,每台水轮机的座环外径16 m,高4 m。转子直径10 m,重450 t,发电700 MW。蜗壳进水口直径12.4 m,总重750 t。图1.2-2为三峡水轮机转子及蜗壳。



(a) 转子



(b) 蜗壳

图 1.2-2 三峡水轮机转子及蜗壳

转子材料为410NiMo马氏体不锈钢(质量分数)(13%Cr、4%Ni、0.5%Mo),焊接用于转子部件的组装和铸造缺陷的修补。主要焊接方法是焊条电弧焊及双丝埋弧自动焊,焊丝有实心及金属粉芯两种,每个转子的组装需焊接材料7~10吨。对焊接接头的性能要求是:0℃最低冲击吸收功50 J(热处理状态)及20 J(焊态);热处理后接头最低屈服强度550 MPa,抗拉强度760 MPa。另外,金属结构的焊接工作量也很大。光各种闸门就有282扇,闸门长度在40~60 m以上,焊接变形不得超过5~10 mm。

在内蒙古、山西及贵州等西部煤电基地的建设中,由于机组容量大,参数提高,使用的钢材及焊接材料品种规格复

杂,焊接工作量及焊口可靠性的要求很高。以 12CrMo、12Cr2Mo (德国的 10CrMo910 等)、12Cr1MoV 等低合金热强钢,调质状态,使用温度 545℃ 以下。为了使工作温度能提高到 600℃ 以上,曾采用 9Cr-1Mo (瑞典的 HT7 等) 和 12Cr-1Mo 钢 (德国的 F12、F11 等),焊接性很差,近年来已广泛为改良型 9Cr-1Mo 所替代,如 T91/P91,钢中添加了 Nb 和 V,600℃ 持久强度比 F11 及 F12 提高 70%。最近还出现了以 W 代 Mo,并配合 Nb、V 沉淀强化的 T23/P23 钢以及 T122/P122 钢,进一步大幅提高 600℃ 及 650℃ 的持久强度,可用于超临界机组。

另外,随着机组容量和参数的增加,钢管的直径及壁厚也增加。如 500MW 超临界机组的主蒸汽管道,使用 15Cr1Mo1V 钢,规格 $\phi 426 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$; 600 MW 机组的主蒸汽管道使用 P91 钢,规格 $\phi 609 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。

为适应能源结构调整的需要,我国核电建设正进入一个新的发展时期。江苏田湾核电站今年即将投入运营,广东岭澳核电站二期工程及浙江三门核电站一期工程即将开工建设。以田湾核电站主岛安装工程为例,每个核岛涉及主管道 36 个焊口,辅助管道 15 余万米,焊接条件复杂,焊接及无损检测工作量十分巨大。图 1.2-3 为秦山第二核电厂 2 号机组核反应堆厂房,2004 年 5 月已投入商业运行。至此,我国自主设计、自主建造、自主管理和自主运营的第一座大型商用核电站全面建成投产,实现了由自主建设小型原型堆核电站到自主建设大型商用核电站的重大跨越。



图 1.2-3 秦山第二核电厂 2 号机组厂房

除了以上两大工程外,正在建设的青藏铁路是世界上最高的铁路,2003 年的铁路建设已进入西藏境内。城市铁路及铁路提速,要求采用耐候钢、不锈钢、铝合金等结构材料,推动铁路专用焊接设备与焊接技术的发展。现已启动的南水北调工程是世界上最大的水利工程,是优化我国水资源配制的重大战略性基础实施,事关中华民族兴旺发达的长远利益,焊接工程量同样十分巨大。图 1.2-4 南水北调工程的丹江口水库。



图 1.2-4 丹江口水库

此外,近年来我国在道桥建设、交通工具、大型钢结构建设等领域也取得了重大进展,焊接技术进步很快,举以下几个领域简要说明。

3 钢桥建设

随着我国铁路与公路建设的需要,钢桥建设得到了飞速的发展,设计与制造技术已接近世界先进水平。钢桥形式很多,大跨度公路桥主要是悬索桥和斜拉桥;铁路桥多为梁桥和拱桥。就公路桥来说,已建成的江阴长江大桥主跨 1385 m,为全焊钢箱梁悬索桥,居世界第 4 位,采用全焊钢箱梁斜拉桥的南京长江二桥主跨 628 m,居世界第 3 位。世界全部斜拉桥排名前 10 位的焊接钢桥中,我国就占有 6 座。铁路桥的发展也很快,铁路钢桥的跨度将达到 500 m,钢桥的制造将从栓焊向全焊过渡,即从节点栓接过渡到全焊整体节点。

钢桥用材料由 16Mnq 发展到 14MnNbq,钢板厚度发展到 50 mm。14MnNbq 有较低的碳含量,加入 Nb 等微量元素,降低杂质含量,控温控轧,正火细化晶粒,降低了 16Mn 的板厚效应,保证了桥梁的焊接性能和抗断性能。以芜湖长江大桥为例,采用了先进的钢材生产技术,实际 14MnNbq 钢板供货的冲击吸收功可达 234 J,远高于冲击吸收功的要求值 -40°C 大于 120 J。

钢桥的制造先在工厂分段进行,再运到工地现场组装。在公路斜拉桥和悬索桥钢箱梁的制造中,高效的 CO_2 自动焊和半自动焊得到了广泛应用,据润扬长江大桥建设统计, CO_2 焊已用到焊接工作量的 75%,埋弧焊约占 15%,其余为焊条手工焊;对于桁梁式铁路桥或公路铁路两用桥,主要采用埋弧焊,如芜湖长江大桥,埋弧焊占 60%。 CO_2 焊约占 15%。为了根部焊透和背面成形,广泛应用陶瓷衬垫。图 1.2-5 为世界上最长的杭州湾跨海大桥,全长 36 km,为全封闭六车道公路桥,将于 2008 年建成,届时将把嘉兴到宁波原长 200 km 的路程缩短到 80 km,成为上海、杭州、苏州、宁波四大城市的交通枢纽。

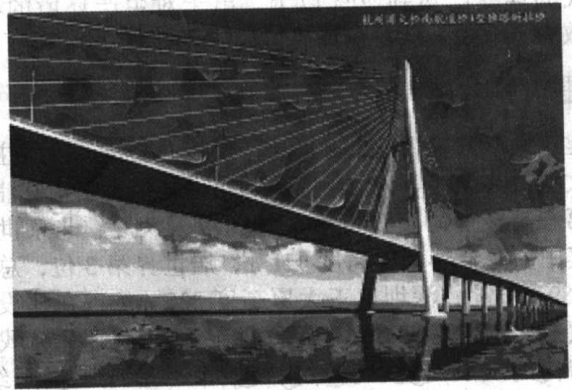


图 1.2-5 杭州湾跨海大桥

4 船舶制造

按吨位计算,目前世界上 80% 的船舶在东亚地区制造,特别是日本、韩国及中国的各造船厂,这里已是世界的造船基地。预计 15 年后中国将成为世界第一造船大国。目前沪东中华造船公司还正在建造液化天然气运输船和豪华邮轮,外高桥船厂已能承造 30 万吨级大型油轮、23 万吨级好望角型散货船,以及海上浮式生产储油装置等超大型、高附加值船舶。2002 年还建成了用于越海铁路的大型轮渡船。图 1.2-6 为我国建造的 30 万吨大型油轮,长 333 m,宽 58 m。图 1.2-7 是导弹驱逐舰“哈尔滨号”。



图 1.2-6 我国建造的 30 万吨大型油轮



图 1.2-7 导弹驱逐舰“哈尔滨号”

焊接技术在船舶制造中占有举足轻重的位置,是最主要的工艺技术。目前在下料工序中普遍采用数控火焰切割及数控水下等离子切割;在大拼板工序中采用多丝埋弧焊,单面焊双面成形,焊接的板厚为 5~35 mm;对船体的分段构件装焊采用自动及半自动气体保护焊。船厂已普遍采用药芯焊丝 CO₂ 气体保护焊。造船厂是我国药芯焊丝的主要用户,目前我国船厂 CO₂ 气体保护焊的应用比例已达 65%。

应该说,我国船厂的劳动生产率及企业效益仍与发达国家有差距,必须加大企业技术改造。自动化焊接生产系统及大型龙门式机器人已在日本及欧洲船厂得到广泛应用,机器人完成的焊缝已达到 20% 以上。出于对生产环境的考虑,还在致力于低尘、低污染焊接材料的开发。

5 建筑钢结构

建筑钢结构包括:工业厂房、商用办公楼、民用住宅及其他大型公共设施等。近年完成的重要建筑钢结构有浦东的中华第一高楼上海金茂大厦、深圳地王大厦、北京世纪坛等。其中上海金茂大厦高度 421 m,居世界第 3 位,总建筑面积 289 500 m²;深圳地王大厦高度 325 m;正在建设的北京国贸三期,高度 300 m。自 20 世纪 80 年代以来,我国高层钢结构的发展迅速,在一些大城市已形成了楼宇经济。2003 年北京全面启动了奥运场馆建设。

大型建筑钢结构广泛采用 H 形及箱形截面构件,由厚钢板焊接而成。常用材料为低碳结构钢 Q235、低合金结构钢 Q345、Q390 等牌号。广泛采用高效埋弧焊及气体保护焊。焊接构件的尺寸大、焊接工作量大是高层钢结构制造安装的突出问题,一般焊接梁柱的截面厚度都在 30 mm 以上,如深圳发展中心大厦的箱型柱最大壁厚达 130 mm,焊接工作量达 35 万延长米;深圳地王大厦的焊接工作量达 60 万延长米。在制造安装过程中,对装配、焊接应力和变形的控制要求也十分严格。

图 1.2-8 为建设中的国家大剧院。国家大剧院是中国在 21 世纪第一个投资、兴建的大型现代文化设施项目。椭球形穹顶东西向长轴跨度 212.2 m,南北向短轴跨度 143.64 m,高度为 46.285 m。穹顶采用金属钛板饰面。壳体钢结构总重

6 750 t,网壳面积 3.5 万平方米,没有立柱,全靠 148 根弧型钢梁承重,主桁架由 60 mm 厚钢板组焊而成。



图 1.2-8 建设中的国家大剧院

由于 1995 年日本阪神大地震的教训,为了防止发生钢结构的脆断,新型抗震钢结构十分注意梁柱节点设计,采用韧性良好的焊接材料及焊垫、合理设计焊缝金属与母材的强度匹配、采用合理的焊接工艺及无损检测制度。高层建筑等重要钢结构大都采用刚性连接,梁翼缘与柱现场焊接,梁腹板与柱用高强度螺栓连接或角焊缝焊接,注意熔透、焊接缺陷及应力集中。911 事件之后,对高层建筑钢结构又提出了耐火问题,这些无不对重要钢结构的设计与焊接施工带来影响。

6 汽车制造

随着汽车销售在中国市场的日益红火,汽车制造业对中国工业生产的拉动作用日益凸现。2002 年 8 月份,以汽车制造业为主的交通运输设备制造业首次跃升为中国 40 个工业行业之首,成为对工业增长拉动作用最大的行业。2003 年我国年产汽车突破 400 万辆。图 1.2-9 为北京现代生产的索纳塔轿车。

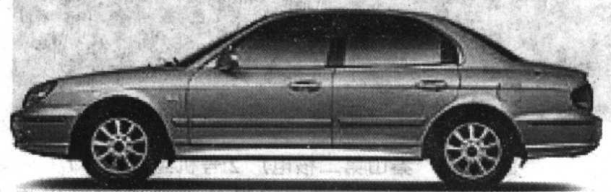


图 1.2-9 北京现代生产的索纳塔轿车

焊接技术广泛用于车身制造。目前我国广泛采用的车身材料是汽车专用薄钢板,包括涂层钢板,焊接生产以熔化极气体保护电弧焊、电阻点焊及点焊胶接、激光焊为主。为了减少油耗,又发展了汽车用高强度钢板、铝合金、镁合金、复合材料等多种新型车身材料。车身结构的不同部位,采用不同厚度或不同级别的钢板,焊接后整体冲压成形,还采用了铝钢混合结构等设计方法。目前的汽车车身结构正朝着减轻质量,增加刚度和抗冲击能力,提高疲劳寿命,降低成本的方向发展。

由于铝合金焊接性能不好,同时由于异种材料的混合应用,又开发了多种自铆等机械连接方法。汽车的粘接技术也变得更为重要。以奔驰 CL Coupe 铝钢混合结构车身为例,各种机械连接及胶接连接缝的总长度已达到 71 m,结构静刚度增加 15%。为了提高焊接质量、车身整体尺寸的制造精度和生产率,除了电阻焊机器人外,熔化焊机器人焊接也得到广泛应用,并配合各种高效焊接方法。开发的激光-MIG 复合焊,即可以减少激光器的功率,又能降低结构装配误差的要求,同时保持了激光焊的深熔和快速、高效、低热输入的优点。

编写:史耀武(北京工业大学)

第3章 新世纪焊接技术面临的挑战

近百年来,焊接已成为应用最广的材料加工技术之一。从核能发电到微电子技术的发展,从探索宇宙空间到深海资源开发,从汽车到家电产品制造,均离不开焊接技术。焊接工艺技术的应用规模和范围之广,是别的工艺技术不能比拟的。当代许多最重要的工程技术问题必须采用焊接才能解决,而且焊接接头要在各种条件,甚至严酷条件下工作。焊接技术在新世纪仍面临重大挑战。

可以认为,钢铁及铝等有色金属,在今后相当长的时间内,仍是人们使用的主要结构材料,也是焊接工作者面对的主要焊接加工对象,焊接工艺将仍以熔化焊为主,实现焊接高效、低成本自动化是奋斗目标。对采用特殊工艺制备的新型材料,如电子信息材料、纳米材料、金属间化合物、工程陶瓷及复合材料等,常要采用特殊的连接方法,而且难度很大,要求很高。在高新技术的发展过程中,焊接与连接技术面临新挑战。

1 焊接设备与装备

焊接设备与装备是实现焊接技术工程应用的条件和手段。目前我国焊接设备行业厂家有900余家。产品种类包括交流弧焊机、直流弧焊机、自动半自动弧焊机、电阻焊机、特种焊机、各类成套焊接设备、辅机具等22大类45个系列,560个品种,800多种规格。

2001年我国电焊机产量为30.4万台。其中手工交流弧焊机19.2万台,手工直流弧焊机4.7万台,自动半自动弧焊机4.7万台,电阻焊机8700台。工业总产值17.5亿元。目前交流弧焊机仍是量大面广的产品,占总产量的60%。高效节能的逆变焊机、CO₂气体保护焊机正逐渐扩大市场比例。2001年全国生产逆变焊机2万台,MIG/MAG焊机2.8万台。随着企业的技术改造,我国焊接设备制造业已有显著进步,通用产品的生产技术水平已与国际先进水平接近,个别产品已达到国外同类产品水平。2000年我国电焊机出口1.8万台,创汇4300万美元。

电弧焊仍是焊接生产的重要基础技术。为了充分发挥机器人及其他自动化生产设备的效能,在确保焊缝成形的基础上,提高焊接生产率,是人们长期关注的发展方向。在提高电弧焊生产率的技术中,不外是提高焊接熔敷率或提高焊接速度。对厚板接头,更常用窄间隙焊工艺,从接头设计上减小截面尺寸。

在薄板焊接中主要是实现高速焊。通常MIG/MAG的焊接速度只有0.3~0.5 m/min。当焊接速度超过1 m/min以上时,就将产生咬边或驼峰焊缝成形缺陷。为了提高焊接速度,必须研究熔池的熔化和流动特性以及与电弧特性的关系。虽然研究了多种电弧控制方法,要使焊接速度超过1.5 m/min已非常困难。近年出现的双弧焊,焊接速度可达5 m/min以上。两根焊丝采用两套电源供电,两套独立的送丝系统,从同一焊枪喷嘴送出,焊接参数可分别控制或协同调节。由于两根焊丝的电弧在同一熔池上燃烧,提高了焊接总电流,而且改变了热量分配特征,能向熔池两侧供应充足的热量和液体金属,从而避免咬边,保持良好的熔池金属润湿性。

为了增加熔深,MIG/MAG焊接电流较大时,熔滴将由射流过渡转变为旋转射流过渡。此时焊丝端头十分柔软,在金属蒸汽的作用下,焊丝端头旋转,伴随很大飞溅,成形恶化,过程不稳定,因此限制了送丝速度的增加。传统MAG

焊,采用 $\phi 1.6$ mm的低碳钢焊丝,最大许用电流450 A,最高送丝速度为16 m/min,最高熔敷速度可达8.1 kg/h。国外出现的T.I.M.E.混合气体保护焊, $\phi 1.2$ mm的低碳钢焊丝,最大许用电流700 A,送丝速度可达50 m/min,熔敷速度可达30 kg/h。但在混合气体中必须减少或不用He,才能符合我国的国情。

焊接时向熔池添加金属粉,也能提高熔敷率,并在生产中得到应用。为了提高TIG焊接的熔深和效率,近年来还开发了活性化TIG焊接技术。在焊接表面涂上活性剂,可增加TIG电弧的收缩,改变熔池的表面张力,在正常规范下,熔深可提高1倍以上,现已用于不锈钢及钛合金的焊接。同样也可在激光焊接时使用活性焊剂。还有混合热源方法,如采用激光加TIG或MIG电弧混合热源,能促进熔池对激光能量的吸收,效果不是两个能量的简单叠加,还降低了激光焊对坡口定位精度的要求。

用于焊接领域的高能束流主要是电子束、激光束和等离子弧。焊接方法有熔透型及小孔型两种。电子束和激光束的能量密度达到 10^{11} W/m²以上,在热源能量密度高的情况下,束流与材料的相互作用对焊接成形有重要影响。电子束以深穿透能力著称,特别适于厚板焊接。加速电压600 kV、功率300 kW的超高压电子束焊接,一次可焊200 mm厚的不锈钢,深宽比达70:1。对大功率激光焊接而言,影响穿透深度的因素很多,特别是光致等离子体的屏蔽作用影响很大,直接影响能量的传输效率。YAG激光,采用光纤传输,给加工带来方便。另外激光/电弧混合焊接技术发展很快,正如前面所述,能在焊接效率、焊缝成形等多方面带来好处。

今后的主要任务,包括大功率设备的研制,如大功率半导体激光器、高压大功率及局部真空或非真空电子束焊机、千瓦级准分子激光器等,进一步提高束流的品质及诊断技术,高能束流与其他热源的混合技术,研究束流与材料的相互作用,扩大应用领域。

应该指出,我国成套焊接装备制造行业的生产技术水平有了长足发展。焊接设备的成套能力、自动化程度、制造精度和质量明显提高。现在我国成套焊接装备生产厂家10余户,年产值约5亿元。现已能生产8 m×8 m以上大型立柱横梁埋弧焊及窄间隙埋弧焊操作机、400 t重型滚轮架机及重型、轻型自动防窜滚轮架、100 t大型变位机和大、中型翻转机等。能批量生产H型钢和箱型梁的焊接生产线等。在成套焊接装备中,广泛采用交流变频调速技术、PLC技术、伺服驱动及数控系统,提高了焊接设备的自动化程度,某些操作机还配备了焊缝自动跟踪系统和工业电视监视系统。但整体水平与先进国家仍有差距。

发达国家的焊接装备,多数采用了先进的自动控制系统、智能甚至网络控制技术,广泛采用焊接机器人作为操作单元,组成焊接中心、焊接生产线、柔性制造系统或集成制造系统。近年来,我国进口焊接设备仍不断增加,2000年已达2.36亿美元,其中60%以上是专用成套焊接设备。这也说明,我国的专用成套焊接设备的生产技术水平还远不能满足国内用户的需求。例如我国最近从瑞典ESAB公司进口的12.5 m×10 m超大型焊接操作机和用于焊接潜艇椭圆形外壳的操作机,机头Z向自动跟踪的最大行程为2 m。

2 焊接材料

我国是世界焊接材料生产大国,总产量100余万吨,占