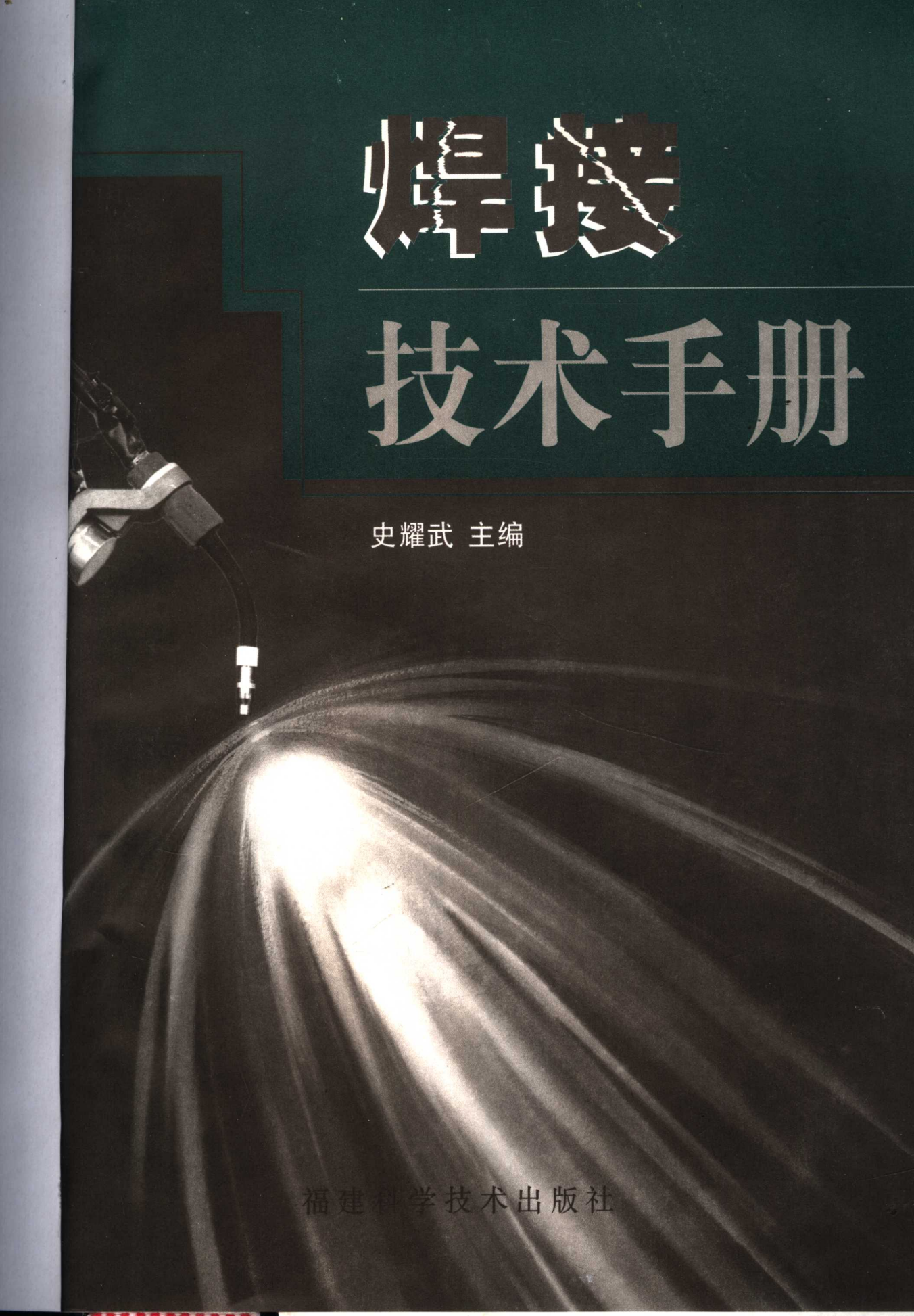




焊接 技术手册

史耀武 主编

福建科学技术出版社



焊接

技术手册

史耀武 主编

福建科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接技术手册/史耀武主编. —福州: 福建科学技术出版社, 2005. 4

ISBN 7-5335-2472-1

I. 焊… II. 史… III. 焊接—技术手册
IV. TG4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 101176 号

书 名	焊接技术手册
主 编	史耀武
出版发行	福建科学技术出版社 (福州市东水路 76 号, 邮编 350001)
经 销	各地新华书店
排 版	福建科学技术出版社排版室
印 刷	福建省地质印刷厂
开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
插 页	4
印 张	50
字 数	1589 千字
版 次	2005 年 4 月第 1 版
印 次	2005 年 4 月第 1 次印刷
印 数	1—3 000
书 号	ISBN 7-5335-2472-1/TG·8
定 价	89.00 元

书中如有印装质量问题, 可直接向本社调换

前 言

我国的焊接技术最早可追溯到春秋时期。著名的秦兵马俑出土的铜车马,采用了青铜铸焊技术,而且焊接质量上乘。现代意义的焊接技术出现在19世纪初的西方国家。近百年来,从核能发电到微电子技术,从探索宇宙空间到深海资源开发,从汽车制造到家电生产,均离不开焊接技术。焊接工艺技术的规模和范围之广,是别的任何工艺技术不能比拟的。当代很多重要的工程技术问题必须采用焊接才能解决,而且焊接接头可能在复杂、严酷条件下工作,甚至要在极限条件下实现材料连接。

焊接技术虽已取得了重大发展,能基本满足当前生产的需求,但仍存在很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,还需要科学的理论和方法的指导;焊工的劳动条件仍较差,应大力推进焊接机器人的应用,开发灵巧并有智能的焊接机械或自动化焊接设备;为了实现清洁生产及可持续发展战略,需要开发节能、无污染的焊接生产装备和焊接材料。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,需要焊接工作者的更大努力。为了使我国从制造大国迈向制造强国,焊接作为制造业的关键技术,将发挥越来越重要的作用。

本手册反映了当前焊接生产的现状和前沿技术,具有实用性、准确性和先进性,兼顾常规技术与先进技术,使读者对焊接新材料、新装备与新技术的运用有扩展思路的空间。读者可从中查找到与焊接技术相关的各种实用资料,是处理和解决焊接问题的必备工具书。本手册主要供工程技术人员、管理人员、高级焊接操作人员和大专院校师生使用。

高效优质地生产焊接结构是研究焊接问题的出发点与归宿。本手册介绍了焊接结构的特点、焊接工艺文件的编制方法和要求,对焊接结构生产中的应力与变形控制这一难点问题进行了分析并提出了相应的解决办法;介绍了焊接材料的特点,突出介绍焊接材料及高效药芯焊丝的选用和正确使用。在材料焊接技术中注意反映新发展的、焊接性优良的微合金钢等新型结构材料的焊接,并特别关注不同材料优势焊接方法的介绍。本手册除了介绍焊接新工艺、新设备及其典型设备型号与生产厂家外,还介绍相关设备的工作原理和控制技术;为保护工人健康,还介绍了焊接清洁生产的要求。

本手册由史耀武主编。具体编写分工如下:

史耀武(北京工业大学):第1章及附录2、3、5~9;

李晓廷(北京工业大学):第2章;

蒋力培(北京石油化工学院):第3章(参编人员:3.1吕涛,3.2蒋力培、

俞建荣, 3.3 王中辉, 3.4 黄军芬, 3.5 焦向东, 3.6 邓双成);

栗卓新 (北京工业大学): 第 4 章及附录 4;

邹贵生、任家烈 (清华大学): 第 5 章 (参编人员: 5.1~5.4、5.10 邹贵生, 5.5~5.9、5.12~5.14 张德库, 5.11 吴爱萍);

赵海燕 (清华大学): 第 6 章;

殷树言、陈树君 (北京工业大学): 第 7 章 (参编人员: 7.1 陈树君、黄鹏飞, 7.2、7.3 李西恭, 7.4 白韶军, 7.5、7.6 陈志翔);

夏志东 (北京工业大学): 第 8 章;

张建勋 (西安交通大学): 第 9 章;

王智慧 (北京工业大学): 第 10 章;

于洋 (北京工业大学): 附录 1。

由于作者实际工作经验和水平有限, 书中难免存在缺欠和错误, 恳切希望焊接技术人员对本书提出批评和建议, 以便重版时进一步修改和完善。

编著者

2004 年 9 月

目录

第 1 章 焊接技术的发展与应用	(1)
1.1 焊接技术的发展	(1)
1.2 焊接在现代制造业中的作用	(1)
1.3 新世纪焊接技术面临的挑战	(4)
第 2 章 焊接结构	(8)
2.1 焊接结构制造基础	(8)
2.1.1 焊接结构的特点	(8)
2.1.2 焊接结构制造的一般工艺过程	(9)
2.1.3 焊接结构的设计原则	(12)
2.2 焊接接头	(13)
2.2.1 焊接接头的基本形式	(13)
2.2.2 焊接接头的工程标注	(13)
2.2.3 实际结构中焊接接头的缺陷容限	(19)
2.3 焊接接头坡口设计	(23)
2.3.1 坡口的基本类型	(23)
2.3.2 常用焊接接头坡口的形式与尺寸	(24)
2.3.3 坡口设计的原则	(28)
2.4 典型结构的焊接制造	(29)
2.4.1 概述	(29)
2.4.2 立式储罐的焊接制造	(29)
2.4.3 厚壁压力容器的焊接制造	(31)
2.4.4 桥式起重机主梁的焊接制造	(33)
第 3 章 焊接方法与工艺	(36)
3.1 常用熔化焊方法	(36)
3.1.1 焊条电弧焊	(36)
3.1.2 埋弧焊	(43)
3.1.3 二氧化碳气体保护焊	(50)
3.1.4 熔化极气体保护焊	(57)
3.1.5 钨极氩弧焊	(72)
3.1.6 药芯焊丝电弧焊	(81)
3.2 高效熔化焊接方法	(87)
3.2.1 Tandem 法双丝高速焊	(87)
3.2.2 TIME 高效熔敷焊	(88)
3.2.3 活性焊剂 TIG 焊法 (A-TIG)	(91)
3.2.4 激光-MIG 复合焊	(93)

3.3 电阻焊	(95)
3.3.1 电阻焊的特点和应用	(95)
3.3.2 点焊	(96)
3.3.3 凸焊	(101)
3.3.4 缝焊	(105)
3.3.5 对焊	(109)
3.4 固相焊	(116)
3.4.1 扩散焊	(116)
3.4.2 超声波焊	(120)
3.4.3 摩擦焊	(125)
3.4.4 冷压焊	(132)
3.4.5 爆炸焊	(138)
3.5 高能束焊	(141)
3.5.1 等离子弧焊	(141)
3.5.2 电子束焊	(152)
3.5.3 激光焊	(160)
3.6 热切割	(166)
3.6.1 热切割方法的种类及特性	(167)
3.6.2 气割	(168)
3.6.3 等离子弧切割	(185)
3.6.4 激光切割	(191)
第4章 焊接材料	(195)
4.1 焊条	(195)
4.1.1 焊条分类	(195)
4.1.2 焊条的组成	(196)
4.1.3 焊条型号和牌号	(198)
4.1.4 焊条的性能	(204)
4.1.5 焊条的选用和用量计算	(206)
4.1.6 焊条检验	(233)
4.1.7 焊条的保管和使用	(236)
4.2 焊丝	(238)
4.2.1 焊丝分类、型号和牌号	(238)
4.2.2 焊丝的特性	(241)
4.2.3 焊丝的检验和保管	(244)
4.2.4 焊丝的选用	(249)
4.3 焊剂	(252)
4.3.1 焊剂的分类及作用	(252)
4.3.2 焊剂牌号和型号	(256)
4.3.3 焊剂的主要成分、性能及应用特点	(260)
4.3.4 焊剂的选择	(273)

4.3.5 焊剂的使用	(274)
4.4 焊接用气体	(275)
4.4.1 焊接用气体的基本性质及技术要求	(275)
4.4.2 焊接用气体的选用	(279)
4.5 钨极	(282)
4.5.1 钨极的性质和牌号	(282)
4.5.2 钨极的选用	(283)
4.5.3 非熔化极钨极氩弧焊焊接质量的控制	(284)
第5章 常用材料的焊接	(287)
5.1 碳钢的焊接	(287)
5.1.1 碳钢的种类、性能及国内外牌号对照	(287)
5.1.2 低碳钢的焊接	(293)
5.1.3 中碳钢的焊接与补焊	(296)
5.1.4 高碳钢的焊接与补焊	(297)
5.1.5 碳钢焊接举例	(298)
5.2 低合金钢的焊接	(301)
5.2.1 概述	(301)
5.2.2 热轧及正火钢的焊接	(302)
5.2.3 低碳低合金调质钢的焊接	(313)
5.2.4 中碳调质钢的焊接	(317)
5.2.5 低合金低温用钢的焊接	(319)
5.2.6 耐候钢及耐海水腐蚀用钢的焊接	(321)
5.3 耐热钢的焊接	(322)
5.3.1 概述	(322)
5.3.2 低合金耐热钢的焊接	(323)
5.3.3 中合金耐热钢的焊接	(328)
5.4 不锈钢的焊接	(331)
5.4.1 不锈钢的种类、性能与国内外牌号对照	(331)
5.4.2 奥氏体不锈钢的焊接	(337)
5.4.3 马氏体不锈钢的焊接	(340)
5.4.4 铁素体不锈钢的焊接	(342)
5.4.5 铁素体-奥氏体不锈钢的焊接	(343)
5.4.6 沉淀硬化不锈钢焊接	(344)
5.5 高温合金的焊接	(344)
5.5.1 高温合金的 TIG 焊与 MIG 焊	(345)
5.5.2 高温合金的电子束焊	(346)
5.5.3 高温合金的电阻焊	(346)
5.5.4 高温合金的钎焊	(347)
5.5.5 高温合金的扩散焊	(348)
5.6 铝及其合金的焊接	(349)

5.6.1	铝及其合金概述	(349)
5.6.2	焊接方法的选择	(350)
5.6.3	焊接材料的选择	(351)
5.6.4	焊前准备与焊后清理	(354)
5.6.5	焊接工艺	(354)
5.7	镁及镁合金的焊接	(363)
5.7.1	镁合金的分类、成分和性能	(363)
5.7.2	镁合金焊接时易出现的问题	(364)
5.7.3	镁及镁合金的焊接工艺	(364)
5.8	钛及其合金的焊接	(368)
5.8.1	钛及其合金的性能	(368)
5.8.2	钛及其合金的焊接性	(371)
5.8.3	钛及其合金的焊接工艺	(371)
5.9	铜及铜合金的焊接	(379)
5.9.1	常用铜及铜合金的分类和性能	(379)
5.9.2	铜及铜合金的焊接性	(380)
5.9.3	铜及铜合金的焊接工艺	(381)
5.10	热塑性塑料的焊接	(392)
5.10.1	塑料的种类与性能	(392)
5.10.2	热塑性塑料的焊接性	(393)
5.10.3	塑料焊接方法种类及主要焊接方法	(393)
5.11	工程结构陶瓷的连接	(399)
5.11.1	工程结构陶瓷的种类、性能及应用	(399)
5.11.2	工程陶瓷的连接	(402)
5.11.3	工程结构陶瓷的连接应用举例	(407)
5.12	异种材料的焊接	(408)
5.12.1	异种材料的焊接方法	(408)
5.12.2	钢与有色金属的焊接	(409)
5.12.3	异种有色金属的焊接	(417)
5.13	材料的堆焊	(425)
5.13.1	堆焊工艺方法及堆焊材料	(425)
5.13.2	铁基合金堆焊工艺	(426)
5.14	铸铁的焊接	(445)
5.14.1	铸铁焊接的应用及铸铁焊接方法	(445)
5.14.2	灰口铸铁的焊接	(445)
5.14.3	球墨铸铁的焊接	(448)
5.14.4	铸铁常见缺陷的焊补	(449)
第6章	焊接应力与变形控制	(454)
6.1	焊接应力和变形的产生	(454)
6.1.1	焊接应力和变形的概念	(454)

6.1.2	焊接应力和变形产生的机理	(457)
6.1.3	影响焊接应力和变形的因素	(463)
6.2	焊接应力和变形的基本形式及估算	(468)
6.2.1	焊接残余应力的典型分布	(468)
6.2.2	焊接残余应力的估算	(494)
6.2.3	典型构件的焊接变形	(498)
6.2.4	焊接变形的估算	(501)
6.2.5	焊接残余应力和变形对焊接结构的影响	(510)
6.3	焊接应力和变形的测量	(512)
6.3.1	焊接残余应力的测量	(512)
6.3.2	焊接变形的测量	(513)
6.4	焊接应力和变形的控制与消除	(515)
6.4.1	焊接残余应力的控制和消除	(515)
6.4.2	焊接变形的控制与消除	(526)
6.4.3	低应力无变形的焊接方法	(539)
6.4.4	焊接应力和变形的数值分析	(541)
第7章	焊接电源与设备	(543)
7.1	常用熔化焊电源与设备	(543)
7.1.1	弧焊电源基础知识	(543)
7.1.2	弧焊变压器	(546)
7.1.3	弧焊整流器	(549)
7.1.4	弧焊逆变器	(552)
7.1.5	弧焊发电机	(557)
7.1.6	交流弧焊电源	(560)
7.1.7	脉冲弧焊电源	(564)
7.1.8	弧焊电源常见故障与维修	(566)
7.2	电阻焊设备	(570)
7.2.1	电阻焊设备分类	(570)
7.2.2	电阻焊机的供电装置	(571)
7.2.3	点焊机和凸焊机	(575)
7.2.4	缝焊机	(578)
7.2.5	对焊机	(579)
7.2.6	电阻焊机的控制装置	(581)
7.3	固相焊设备	(583)
7.3.1	摩擦焊设备	(583)
7.3.2	超声波焊接设备	(585)
7.3.3	扩散焊设备	(587)
7.4	高能束焊接设备	(590)
7.4.1	电子束焊接设备	(590)
7.4.2	激光焊接设备	(596)

7.4.3 等离子束焊接设备	(600)
7.5 焊接辅机	(604)
7.5.1 焊接工装夹具	(604)
7.5.2 焊接变位机械	(606)
7.6 焊接机器人	(611)
7.6.1 概述	(611)
7.6.2 焊接机器人基础知识	(611)
7.6.3 焊接机器人应用	(614)
7.6.4 焊接机器人系统的基本配置	(616)
7.6.5 焊接机器人工作站	(620)
7.6.6 复杂机器人焊接系统	(622)
7.6.7 焊接机器人主要生产厂商	(625)
第8章 焊接质量检验与管理	(627)
8.1 概述	(627)
8.1.1 焊接质量及焊接缺陷	(627)
8.1.2 焊接质量检验方法分类	(630)
8.1.3 焊接检验过程及主要内容	(631)
8.1.4 焊接检验标准	(634)
8.2 焊缝金属及焊接接头性能检验	(635)
8.2.1 焊缝金属化学分析	(635)
8.2.2 金相分析	(636)
8.2.3 焊缝金属力学性能检测	(638)
8.2.4 焊接接头力学性能检测	(640)
8.2.5 使用性能检验	(651)
8.3 焊接质量非破坏性检验	(655)
8.3.1 外观检验	(655)
8.3.2 水压试验	(657)
8.3.3 致密性试验	(657)
8.3.4 钎焊接头缺陷非破坏性检验	(658)
8.4 常用无损检测技术	(659)
8.4.1 超声检测	(659)
8.4.2 射线检测	(662)
8.4.3 磁粉检测	(669)
8.4.4 渗透检测	(672)
8.4.5 涡流检测	(675)
8.4.6 检测方法选择	(677)
8.5 焊接质量管理	(680)
8.5.1 焊接质量管理项目	(680)
8.5.2 焊接质量保证标准简介	(681)
第9章 焊接生产工艺规程设计	(685)

9.1 概述	(685)
9.1.1 焊接结构特点	(685)
9.1.2 焊接生产发展趋势	(685)
9.2 焊接工艺设计基本概念	(686)
9.2.1 生产过程和工艺过程	(686)
9.2.2 工艺过程的组成	(687)
9.2.3 生产类型与规模	(687)
9.2.4 生产纲领和工艺文件	(688)
9.3 焊接生产工艺分析	(689)
9.3.1 焊接工艺分析原则	(689)
9.3.2 焊接工艺分析方法	(689)
9.3.3 方案论证与生产准备	(693)
9.3.4 提高劳动生产率	(694)
9.3.5 焊接热处理	(695)
9.4 焊接工艺评定与规程编制	(696)
9.4.1 焊接工艺评定程序	(696)
9.4.2 焊接工艺评定规则	(697)
9.4.3 焊接工艺规程编制	(698)
9.5 计算机辅助焊接工艺设计	(700)
9.5.1 焊接工艺设计系统	(700)
9.5.2 焊接软件开发步骤	(704)
第10章 焊接安全与清洁生产	(706)
10.1 焊接清洁生产	(706)
10.1.1 焊接清洁生产的意义和内容	(706)
10.1.2 清洁生产的定义和原则	(707)
10.1.3 清洁生产的实施途径	(707)
10.1.4 清洁生产的技术和方法	(708)
10.1.5 我国焊接清洁生产现状	(708)
10.2 焊接中的污染及卫生防护	(710)
10.2.1 焊接烟尘的污染	(710)
10.2.2 焊接中的其他污染	(713)
10.2.3 降低污染的措施	(714)
10.3 焊接安全生产	(716)
10.3.1 概述	(717)
10.3.2 气焊和气割安全	(718)
10.3.3 电焊安全	(727)
10.3.4 特殊焊接作业安全	(730)
附录1 常用单位换算	(735)
附录2 常用英文焊接缩略语	(736)
附录3 焊接标准	(738)

附录 4	国内外典型焊接材料对照表	(752)
附录 5	JB 4708-1992 钢制压力容器焊接工艺评定简介	(756)
附录 6	JB/T 4709-1992 钢制压力容器焊接规程简介	(763)
附录 7	锅炉压力容器压力管道焊工考试与管理规则	(766)
附录 8	美国 ASME 锅炉与压力容器规范简介	(781)
附录 9	国际焊接人员培训体系与资格认证	(783)

第 1 章 焊接技术的发展与应用

1.1 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 年美索不达尼亚人就开始用 Pb 或 Sn 来连接铜。公元前 350 年罗马人开始用 Sn-Pb 合金连接铅制水管或铜制金属工具。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公元前的中国焊接技术。我国在唐代就掌握了铁器的锻焊技术。据明代《天工开物》记载：凡铁性逐节黏合，涂黄泥于接口之上，入火挥锤，泥渣成屑而去，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 年前苏联的 Robinoff 发明了埋弧焊并取得专利，1936 年在美国出现熔化极惰性气体保护焊（MIG）技术，1939 年美国的 Reinicke 发明等离子喷涂，1948 年前苏联的 Chudikow 发明摩擦焊，1948 年德国的 Steigerwald 发明了电子束焊，1951 年前苏联的 Paton 发明了电渣焊，1953 年相继在前苏联、日本等国的企业采用 CO₂ 气体保护焊，1957 年前苏联的 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源。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，几乎是空白。

1.2 焊接在现代制造业中的作用

焊接俗称钢铁裁缝。中国的钢产量自 1996 年突破 1 亿吨后，连续六年居世界第一。从 2003 年起，我国钢产量已突破 2 亿吨，2003 年钢材实际消费量达 2.66 亿吨。如果 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，可以想象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。

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 3 110 亿 m^3 ,在库车以外的塔里木其他地区还有 1 006 亿 m^3 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紧张,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 4 200km。

西气东输工程焊管的管径为 1 016mm,管壁厚 14.6~26.2mm, 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,碳含量为 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,焊条手工焊为辅。技术关键是管道对口根部焊道的焊接成形。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。焊条手工焊主要为纤维素焊条向下向焊和低氢焊条向上向焊。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、管端坡口整型机等配套机具。

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 14 780 亿千瓦时,两者均占世界第 2 位。我国 1 000MW 以上装机容量的发电厂 92 座,其中水力发电 16 座。100MW 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。然而我国的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 3 882 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 18 200MW,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 16m,高 4m。转子直径 10m,重 450t,发电 700MW。转子材料为 410NiMo 马氏体不锈钢(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手工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 7~10t。对焊接接头的性能要求是:0℃最低恰贝冲击韧性 50J(热处理状态)及 20J(焊态);热处理后接头最低屈服强度 550MPa,抗拉强度 760MPa。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 40~60m 以上,焊接变形不得超过 5~10mm。

内蒙古自治区、山西及贵州等省的西部煤电基地建设中,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,焊接工作量大,且焊口可靠性的要求更高。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 T92/P92 钢,添加 W,620℃持久强度比 T91/P91 提高 40%。这些钢的焊接,要求严格控制焊接工艺。

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 $\phi 426 \times 80\text{mm}$;600MW 机组的主蒸汽管道使用 P91 钢,规格 $\phi 609\text{mm} \times 70\text{mm}$ 。

除了以上两大工程外,正在建设的青藏铁路是世界上海拔最高的铁路,2003 年的铁路建设已进入西藏境内。城市铁路及铁路的提速,要求采用耐候钢、不锈钢、铝合金等结构材料,也推动了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置的重大战略性基础设施,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。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,在此举出以下几个

领域简要说明。

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。钢桥型式很多,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度 1 385m,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度 628m,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 500m,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 50mm。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,实际上 14MnNbq 钢板供货的冲击韧性可达 234J,远高于冲击韧性的要求值 -40°C 大于 120J。

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 焊占焊接工作量的 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%。为了能焊透根部和背面成形,广泛应用了陶瓷衬垫。

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、韩国及中国的造船厂,这里已经是世界的造船基地。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。

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 5~35mm;对船体的分段构架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 CO_2 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 CO_2 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。

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 421m,居世界第 3 位,总建筑面积 289 500 m^2 ;深圳地王大厦高度 325m;正在建设的北京国贸三期,高度 300m。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 30mm 以上,如深圳发展中心大厦的箱型柱最大壁厚达 130mm,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。

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。“九·一一”事件后,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。

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突出。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。

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、提高抗冲击能力、延长疲劳寿命、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。汽车连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 71m,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,除了阻焊机器人外,熔焊机器人焊接也得到广泛应用,并配合各种高效焊接方法。如激光-MIG 复合焊,既可以减小激光器的功率,又能降低结构装配误差的要求,同时保持激光焊的深熔和快速、高效、低热输入的优点。

1.3 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,奋斗目标是实现焊接高效、低成本、自动化。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。

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。

2003 年我国电焊机产量为 46.9 万台。其中手工交流弧焊机 24 万台,手工直流弧焊机 7.4 万台,自动半自动弧焊机 11.1 万台,电阻焊机 1.7 万台。工业总产值 27.8 亿元。目前交流弧焊机仍是量大面广的产品,占总产量的 51%。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。2003 年全国生产逆变焊机 5 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。2003 年我国电焊机出口 10 万台,创汇 1 亿美元。

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 8m×8m 以上大型立柱横梁埋弧焊及窄间隙埋弧焊操作机、400t 重型滚轮架及重型、轻型自动防窜滚轮架、100t 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 12.5m×10m 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 2m。