

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目



先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编



严酷条件下的 焊接技术

史耀武 张新平 雷永平 编著



机械工业出版社
China Machine Press

46-1
3.00
机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编

严酷条件下的焊接技术

史耀武 张新平 雷永平 编著



3
机械工业出版社

DWS 116

在人类走向 21 世纪的新时代,随着开发海洋、利用核能以及探索宇宙空间的迫切需要,在严酷环境工作的海洋工程结构、核电站以及空间站等的现场组装与维修,将给焊接工作者提出越来越多在严酷条件下焊接施工的新课题。本书的主要内容涉及在严酷条件下施工的典型结构及其特征、焊接冶金与材料、焊接方法与技术、焊接装备与自动化、无损检测与评价,以及热切割技术等。目前,大量的研究成果都分散在浩瀚的期刊杂志或会议论文集中,国内外还没有一本全面讨论严酷条件下焊接技术及其进展的专著。因此,本书对从事海洋、原子能、宇航等工程结构设计与制造的技术人员和管理人员以及有关高校师生具有重要的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

严酷条件下的焊接技术/史耀武等编著. —北京:机械工业出版社, 1999. 10

(先进焊接制造技术丛书)

ISBN 7-111-07631-1

I. 严… II. 史… III. 特殊环境-焊接工艺 IV. TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 62945 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:何月秋 武江

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

赤峰森堡印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm/32·10.25 印张·263 千字

0001—3000 册

定价:20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话:(010) 68993821、68326677—2527

先进焊接制造技术丛书

编委会名单

顾问委员会成员

潘际銮 关 桥 徐滨士 林尚阳

斯重遥 田锡唐 周振丰

主 任 陈剑虹

副主任 邹增大 单 平 崔树森

委 员 王其隆 任家烈 史耀武 霍立兴

黄石生 李志远 汪建华 蒋力培

秘 书 康 龙 武 江

序

焊接作为制造业的基础工艺与技术，在 20 世纪为工业经济的发展做出了重要的贡献。在人类引以为自豪的各个领域，如航空航天、核能利用、电子信息、海洋钻探、高层建筑等，都利用了焊接技术的优秀成果。

在今天，焊接作为一种传统技术又面临着 21 世纪的挑战。

一方面，材料作为 21 世纪的支柱已显示出五个方面的变化趋势，即从黑色金属向有色金属变化；从金属材料向非金属材料变化；从结构材料向功能材料变化；从多维材料向低维材料变化；从单一材料向复合材料变化。新材料的连接对焊接技术提出了更高的要求。

另一方面，先进制造技术的蓬勃发展，正从信息化、集成化、系统化、柔性化等几个方面对焊接技术的发展提出越来越高要求。

为了充分反映 20 世纪焊接技术的发展成果和 21 世纪对焊接技术提出的新的挑战，中国焊接学会组织了焊接行业最重要的 10 个领域中卓有成就的知名学者编写、出版了《先进焊接制造技术丛书》。同时邀请了焊接界德高望重的著名专家作为丛书编写顾问。

本丛书旨在全面介绍国内外先进焊接技术的发展现状和趋势，对我国焊接制造技术的发展起引导作用。

本丛书是高层次的普及型丛书，以知识性为主，深层次地介绍相关领域的新技术内容和基本规律，面向广大的焊接工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域专家。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的渗透，有较高的收藏价值。

中国焊接学会在世纪之交以这套丛书奉献给广大的焊接工作者，是对焊接界为祖国经济腾飞及 20 世纪焊接技术的发展所做

贡献的回眸，也是焊接界对迎接 21 世纪新技术挑战的期盼。

原机械工业部技术发展基金委员会及机械工业出版社对本丛书的编辑出版提供了经济支持（97JA0401），在此一并表示深切的感谢。

丛书编委会主任

陈 剑 虹

前 言

从核能发电到微电子器件的发展,从宇宙空间的探索到海洋资源的开发,从汽车到家电产品的制造,均离不开材料的焊接。焊接结构的焊后服役条件各异,但结构制造通常是在工厂中进行的,有的还要在工地现场进行最后组装焊接,焊接操作是在常规外界条件下进行。本书所要讨论的是在严酷焊接操作条件下进行结构组装及维修焊接的技术。这里所说的严酷条件,也就是非常规的、极限的或极端恶劣的条件,是指在水下、核辐射、太空等特殊环境进行的结构组装焊接或焊接维修。

在人类走向 21 世纪的新时代,随着开发海洋、利用核能以及探索宇宙空间的迫切需要,在严酷环境工作的海洋工程结构、核电站以及空间站等的现场组装与维修,将对焊接工作者提出越来越多严酷条件下焊接的新课题。本书共分 4 章,内容分别是水下焊接、核辐射条件下的焊接、空间焊接及其它严酷环境的焊接。

水下焊接不论是在高压干燥环境还是在水环境中直接进行,其焊接技术与陆上焊接有显著差别。特别是海洋石油和天然气的开发,极大地推动了水下焊接技术的发展,目前水下焊接、切割及热喷涂技术已广泛用于海洋工程结构、海底管线、船舶、船坞、港口设施、江河工程及核电厂等方面。水下焊接的内容主要包括:水下焊接的发展与需求、国际当前的水下焊接技术、焊接接头的力学性能与焊接设计、焊接质量与评价、水下热切割等。

核工程结构的焊接维修与解体通常是在核辐射条件下进行的。为了防止核辐射对维修人员的危害并保证焊接维修的质量,开发应用遥控机械手和机器人及相应的灵巧焊接维修机具十分必要。本章主要涉及核电工程结构的构成、辐射环境下的焊接特点及核工程结构焊接时遇到的主要问题、焊接方法与装备、典型焊接维修工艺技术、焊接质量检查与评估、维修焊接工作的组织管

理等。由于核电事业的迅速发展,核电厂的维修任务日益增大,而且核电厂的维修焊接技术与核电厂的经济效益及运行安全密切相关。虽然本章所讨论的内容主要是针对核电站的,但其基本方法和思路也适于核动力舰船、核燃料生产与核废料处理等工程结构的焊接维修工作。

随着人类对宇宙空间探索的进展,用焊接方法在地球轨道或外层空间组装大型复杂空间结构的时代即将到来。为此,人们正在空间站或模拟空间条件开发和试验空间构件的连接方法与技术。从目前来看,电子束可能是未来太空焊接、钎接、切割及表面涂敷等最有前途的热源。本章的主要内容包括:空间站结构、空间焊接作业的环境与要求、零重力条件下的焊接冶金与焊缝成型、焊接与钎焊技术、空间焊接设备与装置等。

此外,结构在严寒环境下的焊接、输油管线的在线焊接、钢结构的负载加固焊接等,虽然很难说它们是在严酷条件下进行的,但至少是在很特殊的条件下进行的焊接,因此也单列一章加以介绍。

发展适应在水下、核辐射、太空等特殊环境下的焊接技术,对人类走向 21 世纪的科学发展与技术进步具有非常重要的意义。这是一个充满挑战的、需要不断探索和技术创新的领域。到目前为止,国内外还没有一本全面讨论严酷条件下焊接技术及其进展的专门书籍,大量的研究成果都分散在浩瀚的期刊杂志或会议论文集。因此,本书对从事海洋、原子能、宇航等工程结构设计、制造及运行的技术和管理人员具有重要的参考价值。

本书由北京工业大学教授史耀武主持编写,并编写第 1 章及第 4 章,第 2 章由西安交通大学副教授张新平编写,第 3 章由西安交通大学副教授雷永平编写,全书由史耀武统稿。陈建忠、常保华、胡宁双以及史轩等对本书的完成也做出了贡献。本书承哈尔滨焊接研究所宋宝天研究员级高工审阅并提出了宝贵建议,在此表示衷心的感谢。

编著者

目 录

序 前言

第 1 章 水下焊接	1
1.1 海洋工程结构	1
1.1.1 海洋开发	1
1.1.2 典型的海洋工程结构	3
1.1.3 结构材料与焊接	8
1.2 水下焊接的发展和应用	10
1.2.1 水下焊接方法的诞生	10
1.2.2 国外水下焊接技术的发展	11
1.2.3 我国水下焊接技术的进步	12
1.2.4 水下焊接方法的分类	13
1.3 高压干法水下焊接	19
1.3.1 焊接环境	20
1.3.2 焊接电弧	20
1.3.3 焊接方法	28
1.3.4 焊接冶金	33
1.3.5 焊接工艺	37
1.3.6 压力舱焊接模拟器	41
1.4 湿法水下焊接	43
1.4.1 电弧气泡与焊接电弧	44
1.4.2 焊接热循环	46
1.4.3 焊接方法与材料	49
1.4.4 焊接化学冶金	52
1.4.5 焊接物理冶金	57
1.4.6 焊接工艺	63

1.5 焊接接头的力学性能	65
1.5.1 高压干法水下焊接接头	66
1.5.2 湿法水下焊接接头	74
1.6 湿法水下焊接的设计	77
1.6.1 柔性连接板	78
1.6.2 系船板的焊接	83
1.6.3 舵管的焊接	86
1.7 焊接质量与评价	89
1.7.1 焊接工艺规范与质量要求	89
1.7.2 焊接接头的质量检查	91
1.8 水下热切割	101
1.8.1 氧弧切割	101
1.8.2 电弧水刨或弧水切割	104
1.8.3 氧-可燃气体切割	105
1.8.4 等离子弧切割	106
1.8.5 热割缆与热割矛切割	108
1.9 安全技术	110
1.9.1 一般要求	110
1.9.2 高压干法水下焊接	111
1.9.3 湿法水下焊接	112
1.9.4 水下切割	113
1.10 应用实例	114
1.10.1 平台水下桩的焊接	115
1.10.2 石油钻探平台的疲劳损伤修复	118
1.10.3 水下管线的修理	120
第2章 核辐射条件下的焊接	122
2.1 引言	122
2.2 核电站结构	126
2.2.1 类型与系统	126

2.2.2 回路结构	129
2.3 核电站设备的检修	136
2.3.1 核电站设备运行中的缺陷与检查	136
2.3.2 检修焊接时存在的主要问题	143
2.3.3 核电站用结构材料与焊接性	150
2.3.4 核电站维修焊接工作的组织实施	152
2.4 辐射条件下的焊接方法与技术	156
2.4.1 钨极惰性气体保护焊	157
2.4.2 熔化极惰性气体保护焊	165
2.4.3 螺柱电弧焊	169
2.4.4 激光焊	172
2.4.5 爆炸焊	178
2.4.6 手工焊	183
2.4.7 表面堆焊及表面重熔焊接	184
2.4.8 水下维修焊接	192
2.5 核电站维修的典型焊接技术与实例	195
2.5.1 换管及管-板接头焊接修理技术	196
2.5.2 堆焊敷层修理技术	198
2.5.3 回火焊道技术	205
2.5.4 覆层结构的焊接修理技术	210
2.5.5 爆炸焊堵塞修理	212
2.5.6 镶补焊接修理	212
第3章 空间焊接	218
3.1 空间探索与科学研究	219
3.2 我国的空间事业	223
3.3 空间站结构及空间结构的建造	225
3.3.1 空间站结构	225
3.3.2 空间结构的建造	230
3.3.3 空间站的维修	233

3.4 空间焊接作业的环境与要求	234
3.4.1 微重力	234
3.4.2 空间真空	237
3.4.3 明暗界限的存在	238
3.4.4 空间环境的其它特征	240
3.5 空间焊接与钎焊方法的技术发展	241
3.5.1 空间焊接方法的预选	241
3.5.2 空间焊接和钎焊技术的研究与发展	244
3.5.3 地面条件下的基础性研究	246
3.6 零重力条件下的焊缝成形与焊接冶金特性	250
3.6.1 液态金属的表面行为	251
3.6.2 空间钎焊	256
3.6.3 空间焊接	258
3.7 空间焊接与钎焊设备及工艺	262
3.7.1 空间焊接作业条件对焊接设备的要求	262
3.7.2 空间焊接设备过程参数检测和状态诊断	265
3.7.3 空间焊接设备的结构	265
3.7.4 空间焊接设备辅助装置、作业区配置和设备的空间位置	268
3.7.5 空间焊接设备	269
3.8 空间结构材料的焊接性	271
3.9 空间表面涂敷	272
3.10 空间焊接接头的性能与质量检测	277
3.11 空间维修技术和空间焊接实例	280
3.11.1 空间结构的缺陷类型和修复技术	280
3.11.2 空间焊接实例	282
第4章 其它严酷环境的焊接	285
4.1 寒冷环境的焊接	285
4.1.1 耐寒结构钢	285
4.1.2 焊接冷裂纹	286

4.1.3 寒冷环境的焊接技术	289
4.2 输油管线的在线焊接	291
4.3 钢结构的负载焊接加固	295
4.3.1 负载焊接加固原理与技术	295
4.3.2 负载焊接加固实例	297
参考文献	299

第 1 章 水下焊接

1.1 海洋工程结构

1.1.1 海洋开发

海洋的面积约 3.6 亿 km^2 ，占地球表面的 71%。海洋不但是生命的摇篮，而且有富饶的资源和广袤的空间。因此 21 世纪是人类开发利用海洋的时代，一场全球性的蓝色革命正在沿海各国兴起。

我国有 12 亿多人口，陆地自然资源人均占有量低于世界平均水平，我国作为一个发展中的沿海大国，国民经济要持续发展，必须把海洋的开发和保护作为一项长期的战略任务。1994 年《联合国海洋法公约》生效后，各海洋国家都面临着新的机遇和挑战，海洋及其资源的开发，无疑是解决当今人类社会面临人口剧增、资源匮乏和环境恶化问题的重要途径。1996 年我国制定的《中国海洋 21 世纪议程》，提出了有效维护国家海洋权益，合理开发利用海洋资源，切实保护海洋生态环境，实现海洋资源、环境的可持续利用和海洋事业协调发展的基本思路。

海洋油气勘探开发产业，综合了现代海洋开发中最有代表性的能源高新技术。地球上已知的石油天然气储量约 30% 存在海底，海洋石油与天然气资源，一般深埋海底数千米，要探测海底的油气构造，需要设备先进的地球物理调查船，选择最有希望的油气构造钻探打井，对有开采价值的油气田还需要打若干口生产井。因而，一个海上油气田从发现到开采，需要投入大量的资金、设备和装备。从油气勘查、平台钻探、生产井开采到油轮或海底管线输送，几乎全靠高新技术的支撑，所用设备的规模也比陆上更复杂，而且海上作业的风险也更大。

当今海上油气勘探开发的最大水深已达 872m, 并向陆坡区 1km 水深推进, 钻进海底的深度普遍超过 3000~3500m。目前的钻井平台已难适应深水区的作业, 现已出现少量轻型的自动化海上钻井平台, 它可用压臂将 15m 长的钻管从平放的管架上竖起来, 自动插入井眼中, 由一只自动扳手将管段连接在一起向井下钻进, 这种自动化钻井平台既质量轻, 又节省操作人员, 可钻进 6km。在挪威还有世界上第一座无人采气平台, 采用高 120m、直径 8m 的圆筒竖在海中, 柱顶两层为自动控制室和直升飞机起降台, 柱底装有万向节, 此大型圆筒能随着风浪自由摆动, 这种无人采气平台的造价比钢桩平台低一半, 也无需运送生活物资。

对水深超过 1km 的油田, 借助海底采油系统, 将油气开采设备从海面移到海底, 把生产井口安装在海底并通过海底管道集输输送油气, 将是一个重要方向。如巴西的 Marlim 油田, 在南太平洋 1709m 深的水下, 是当今世界上最深的高产油井, 仅该油田南部就蕴藏着 106 亿桶石油。目前正在海底设置油气开采设备, 遥控水下机器人在海底安装复杂的采油设施, 并用以防止井喷, 调节油气流的压力以及防止天然气冻结堵塞管道等。海底设施把各水平式油井联为一体, 采得的石油既可直接集中到海面的油库或运油船, 也可通过水下管道输送到浅水地带原有的平台上。

我国海域有 30 多个沉积盆地, 面积近 70km², 石油资源量约 250 亿 t, 天然气资源量约 8.4 万亿 m³。现在我国已形成了一定规模的海洋石油天然气产业。到 1997 年底, 已发现含油气构造 100 多个, 找到石油地质储量 17 亿 t, 天然气 3500 亿 m³, 已有 20 个油气田投入开发。1997 年我国海洋石油产量超过 1629 万 t, 天然气产量为 40 亿 m³ [1]。

随着海上油气田的开采, 海底管道得到了广泛应用。从 1954 年美国在墨西哥湾铺设了第一条海底管道以来, 世界各国已铺设了无数的海底管道。海上油气通过海底管道上岸, 对我国沿海地区经济的发展具有重要意义。1973 年我国首次在山东黄岛铺设了

500m 海底输油上岸管道,随后海底管线建设得到了迅速发展。1996 年建成投产的南海崖 13-1 气田,就是通过两条海底管线,分别向香港和海南供气,气田到香港的海底管线长 800km,每年为香港提供天然气 30 亿 m^3 。目前正在规划的还有:东海平湖油气田到上海浦东 370km 长输气管线,年输气 4 亿 m^3 ,到舟山的 300km 长输油管线,年输油 70 万 t;渤海渤西气田到天津塘沽的 40km 长输气管线,年输气 4 亿 m^3 ,以及南海北部湾气田到北海市涠洲岛的输气管道等^[2]。据统计,目前全国运行的海底天然气管道长 918km,到 1999 年底,在我国海域已铺设和正在铺设的海底油气管线将达到 2000km。而且,为解决沿海大城市的污水排放问题,也可建设大口径海底排污管道,污水排进深海净化。

另外,为了进行海底考察、搜索、打捞、水下采矿作业等,人们还在建造各种用途的深潜器。目前载人深潜器,最大潜水深度 6km。无人深潜器可达到水下 10km 的海底,采集岩石和沉积物等样品。现在研制的水下机器人在声纳和激光的引导下,可在数千米深的海底搜索失事飞机的残骸,打捞沉入海底的核弹头。而且沿海的城市建设也正向海洋大力扩展,填海造地,兴建海上城市、海上机场以及现代化的海洋农牧场等,人类正面临着开发海洋的新纪元。

1.1.2 典型的海洋工程结构

随着以海洋油气开发为中心的海洋开发产业的发展,在开发利用其它海洋能源、海底矿产和海洋生物资源等领域的进步,以及建设港口和海上机场等方面的需求,海洋工程结构的设计制造以及维修技术已取得相当的进展。以下介绍的是以海洋油气钻采为代表的海洋工程结构。

海洋工程结构与船体结构不同,常年在海上钻采石油天然气,工作环境极为恶劣,除受到结构工作载荷外,还要承受风暴、波浪、潮流引起的附加载荷、海水腐蚀、砂流的磨损、地震或寒冷地区冰流的侵袭。此外,石油天然气的易燃易爆性对结构也存

在威胁。因此，海洋工程结构通常尺寸很大，构件的厚度也大，而且多采用桁架式管子结构。接头形式复杂，应力集中严重。海洋工程结构的设计寿命一般 15~20 年，而且结构的主要部分在水下。服役后焊接接头的检查和修补很困难，费用也高，一旦发生重大结构损伤或倾覆事故，将造成生命财产的严重损失。所以对海洋工程结构的设计制造、材料选择以及焊接施工等都有严格的质量要求。

海洋工程结构按用途可分为勘探钻井用海洋结构及采油生产用海洋结构。根据钻探海域水深及气象海象条件的不同，钻井用海洋结构有自升式钻井平台、半潜式钻井平台及船式钻井平台；采油生产用平台主要是固定导管架式的。船式钻井平台的结构基本上和普通船舶相同，但在船体的中部设有钻探用的大开口，而且在设计上必须对开口进行有效的补强。

(1) 自升式钻井平台

自升式钻井平台在海底靠底座立柱支撑，用自身的质量保持结构稳定。根据承载能力，立柱插入海底土壤中 4~15m。其典型结构形式如图 1-1 所示。

自升式钻井平台适于水深 100m 以内的近海。作业时图 1-1 中的矩形浮箱甲板 1 处于海面上，由 4 根底座立柱 2 托起，立柱最下端是柱靴 3，柱靴坐于海底。矩形截面的立柱是开敞式的格栅桁架，并装有与升降机构啮合的齿条。由于立柱起支承平台的作用，所以是关键部件。如采用圆筒式的底座立柱，制造成本低，但适用水深不超过 75m。为减少波浪对立柱的冲击，现多采用桁架结构的立柱，适用水深范围大。立柱横截面有矩形和三角形两种。在现场安装时，为了简化节点的装配焊接，可采用铸钢节点过渡件。

我国拥有自升式钻井平台多种，如“渤海 8 号”，长 94m，宽 65m，立柱高 110m，排水量 6293t。拖航转移时，立柱升高，浮箱甲板浮在水面上。