

焊接结构 强度和断裂

天津大学 孟广喆 贾安东 著



HANJIE JIEGOU QIANGDU HE
DUAN LIE

焊接结构强度和断裂

天津大学 孟广喆 贾安东 著



机械工业出版社

本书介绍了现代焊接结构强度和断裂的基本理论, 包括焊接结构的特点, 焊接结构缺陷和它对结构承载能力的影响, 焊接结构的疲劳、应力腐蚀及脆性断裂的产生、特点和防止办法, 合于使用原则的焊接结构安全评定等内容, 书中提供了国内外这方面的大量研究成果。以便从焊接结构的设计、制造和使用维护等方面提高现代高强、大型焊接结构的可靠性。

本书供从事焊接工作的工程技术人员、科学工作者参考, 也可作为高等学校高年级学生的参考书。

焊接结构强度和断裂

天津大学

孟广喆 贾安东 著

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

四川省金堂新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 · 印张 $16\frac{1}{8}$ · 字数 355 千字
1986年10月北京第一版 · 1986年10月成都第一次印刷
印数 0.001—5,970 定价 3.80元

*

统一书号: 15033 · 6184

前 言

焊接结构近年来已成为机械制造业对国民经济建设提供重要装备的主要组成部分,例如,化工和石油设备、压力容器、巨型船体、重型机械、核容器及航天器等,都是利用焊接结构才能完成的。这就要求焊接工作者在焊接结构设计、材料选用、制造工艺和质量控制各方面应当具有广泛的力学和冶金等知识,以适应现代焊接结构的大型化、高强度以及日益重要的安全性要求。近年来国内外制造的许多大型焊接结构,由于结构设计上或材料工艺上考虑不当,在结构使用过程中,不断出现灾难性破坏事故,给经济建设造成极大损失。为了总结国内外关于防止焊接结构突然破坏的重要科研成果和经验,以供我国焊接工作人员的参考,我们特编写了这本书。

本书综合了近年来国内外在这方面的研究成果和文献资料,结合近年来我们的科学研究成果,介绍了现代焊接结构强度和断裂的基本理论,脆性断裂,疲劳断裂,应力腐蚀开裂和低温脆断在焊接结构中产生的机理和特征,以及设计、制造和使用中防止结构脆断的方法。本书除了从力学角度和结构特点介绍传统的设计方法之外,还应用现代工程断裂力学的成果,综合了焊接结构的设计、材料的选择、制造工艺及质量控制等因素对提高现代焊接结构可靠性及适用性的影响,为使焊接结构更加广泛应用,还专门介绍了防止焊接结构发生破坏事故的评定标准。

本书初稿曾蒙工学博士霍立兴同志进行详细校订,对于不足之处我们作了一些修正,特此表示衷心的感谢。由于作

者的实际经验不足,理论知识有限,书中错误之处在所难免,
希望读者不吝指教!

作者

1984 年 12 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
一、焊接技术的发展	1
二、焊接结构的发展趋势	5
三、焊接结构的断裂事故	15
第二章 焊接结构强度和断裂的基本理论	24
一、典型焊接结构设计计算方法	24
二、焊接应力与变形	30
1. 焊接应力和变形的产生	32
2. 焊接残余应力	38
3. 焊接变形	66
三、断裂力学的基本知识	81
1. 线弹性断裂力学	82
2. 弹塑性断裂力学	106
四、金属材料的断裂机理、形态特征和影响因素	125
1. 金属材料断裂的机理和形态特征	126
2. 影响断裂的因素	136
第三章 焊接缺陷及其对结构承载能力的影响	145
一、焊接不连续	146
1. 未熔合	147
2. 未焊透	148
3. 裂纹	148
4. 夹渣	148
5. 夹钨	149
6. 气孔	149
7. 咬边	150
8. 满溢	150

9. 烧穿	151
10. 焊缝成形不良	151
二、焊接裂纹	152
1. 焊接裂纹的分类	152
2. 热裂纹	154
3. 冷裂纹	162
4. 裂纹的试验方法	184
三、焊接缺陷对结构强度的影响	190
1. 焊接缺陷产生应力集中的机理	191
2. 焊接缺陷对结构静载非脆性破坏的影响	195
3. 焊接缺陷对结构脆性破坏的影响	199
第四章 焊接结构的疲劳强度	202
一、疲劳断裂的实质、断口特征和表示方法	203
1. 疲劳断裂发生和扩展的三个阶段	203
2. 疲劳断裂的断口特征	205
3. 疲劳问题概述	208
二、影响疲劳断裂的因素和焊接接头的疲劳强度	227
1. 应力集中的影响	227
2. 残余应力的影响	241
3. 不同强度金属及其焊接接头的疲劳强度	245
4. 平均应力和峰值应力对接头疲劳强度的影响	247
5. 其他影响因素	252
三、防止焊接结构疲劳破坏的设计计算方法	254
1. 我国现行规范中有关疲劳强度的设计计算	255
2. 国外疲劳设计计算的改进	264
3. 按照裂纹扩展速率估计疲劳寿命	273
四、疲劳断裂的试验研究	279
1. 材料疲劳性能的测试	280
2. 疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的测定方法	281
3. 结构的疲劳试验	285
第五章 焊接结构的应力腐蚀开裂	286

一、应力腐蚀及氢脆的机理	289
1. 电化学腐蚀	289
2. 应力腐蚀裂纹	290
二、断裂力学在应力腐蚀研究中的应用	294
1. 应力腐蚀的临界应力强度因子 K_{ISCC}	295
2. 应力腐蚀裂纹的扩展速率	297
三、影响介质环境开裂的因素	300
1. 影响应力腐蚀开裂的因素	300
2. 影响腐蚀疲劳的因素	310
四、应力腐蚀的实验研究	321
1. 常用的应力腐蚀试验方法简介	321
2. K_{ISCC} 和应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt 的测定	325
五、焊接结构的应力腐蚀开裂	332
1. 防止焊接结构产生应力腐蚀的措施	333
2. 估计结构的安全性和寿命计算	335
第六章 焊接结构的脆性断裂	337
一、脆性断裂的过程和影响因素	338
1. 脆性断裂的过程	338
2. 影响脆性断裂的因素	341
二、防止结构脆断的试验研究方法	344
1. 临界转变温度和断裂判据	344
2. 防止裂纹发生和阻止裂纹扩展的原则	347
3. 转变温度类型的缺口韧性试验	348
4. 断裂力学试验	377
三、各种试验结果之间的相互关系	410
1. 一些转变温度类型试验结果的关系	411
2. 一些转变温度类型的试验与断裂力学试验结果的关系	416
四、焊接结构的设计和制造工艺特点对脆断的影响	420
1. 焊接结构的特点	421
2. 焊接结构制造工艺的影响	424
第七章 防止焊接结构脆断的设计	449

VIII

一、防止脆断应当遵循的基本原则	449
1. 设计	449
2. 材料选择	451
3. 严格执行制造工艺和质量监督	455
二、缺陷的安全评定	456
1. 国外的合于使用评定标准	458
2. 我国焊接缺陷评定标准的拟定情况	498
参考文献	500
附录一 主要公式符号对照表	504

第一章 绪 论

一、焊接技术的发展

就历史而论,公元以前已经出现了金属焊接。但是,现代的焊接技术是由十九世纪末才开始发展起来的。1880年以来,一些重要的发明更促进了焊接技术的进步,例如碳弧、金属弧、氧乙炔焰以及电阻加热过程等。而促使工业中大规模采用焊接,至今仍为焊接结构主要制造工艺之一的药皮焊条焊接约在1910年才得到推广^[1]。生产发展和国民经济以及军事工业的需求是科学技术发展的重要推动力,当然焊接技术包括焊接结构强度和断裂的理论也不例外。

本世纪十至二十年代,金属电弧焊接技术才首次用于金属结构的生产,例如锅炉及压力容器、桥梁、船舶等。但最初只不过是用于修理。第一艘全焊的远洋船是在1921年建成的。随后,焊接技术稳步发展,焊接结构的应用也逐渐得到推广。到了三十年代,世界上各工业先进国家已经开始大规模制造焊接结构了。由于工业技术的发展,如全焊油罐,全焊锅炉和压力容器,全焊桥梁等都已大量制造出来。第二次世界大战的需要,促使船舶结构实现铆改焊的急骤变化,大吨位全焊船舶在短时期内大量制造出来。但是当时由于缺乏设计和制造大型焊接结构的知识和经验,对于它们的强度和断裂的性质及特征尚不十分清楚,以致相当多的焊接结构出现了各种破坏事故。在此期间,美国建造的五千多艘商用船中,就约有一千多艘损坏了,有的船从中央断成两截。一些建筑金属结构相继发生事故,例如焊接桥梁,气温急骤下降时,甚至在没有

任何载荷条件下,一声巨响,整个坍断,这些灾难性事故阻碍了焊接技术和焊接结构的应用;促使焊接工作人员对焊接结构的强度和断裂理论进行大规模的调查和研究,这就大大促进了焊接技术的发展。到了六十年代,各国绝大多数的锅炉及压力容器、船舶、重型机器(如化工石油设备、发电设备、起重机械等)、汽车、飞机等几乎都采用各种焊接工艺进行制造。

目前各工业先进国家已经制定出各种焊接结构的设计及制造规范、标准和工艺。近年来又发展了许多新的焊接工艺,如:CO₂气体保护焊、惰性气体保护焊、电渣焊、摩擦焊、扩散焊、电子束焊、激光焊、等离子弧焊等。许多新型结构和新型结构材料不断提出新的要求,又促进了许多新焊接工艺方法的诞生。例如在航天器的制造中,为了解决航天器结构的高强金属及合金的焊接,加速了惰性气体保护焊和等离子弧焊等工艺的发展。反过来新的工艺又使制造各种复杂的、大型的、尖端的结构产品成为可能。可以说,现有的尖端设备不用焊接结构就不可能制造出来,象原子能电站的核容器(图 1-1)、深海探测潜艇(图 1-2)、航天器、各种化工石油合成塔,和万吨级至数十万吨级的远洋油轮(图 1-3)等,都属于这一类。

焊接结构所以能获得如此飞速的发展,主要是由于它具有许多优于其他各种结构的特点。由于现代的焊接结构取代了铆接结构,它的设计和制造的一些方面还多少受到传统铆接结构的影响,所以,首先对这两种工艺加以评比。

焊接结构的优点是:

(1) 接头构造合理,应力集中系数较小,接头工作效能比较高。如用下式表示接头工作效能,

$$\frac{\text{接头破坏强度}}{\text{基本材料断裂强度}} \times 100\%$$

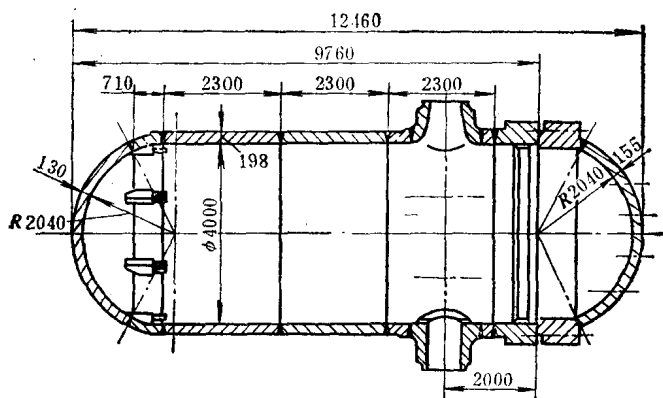


图 1-1 原子能电站核容器

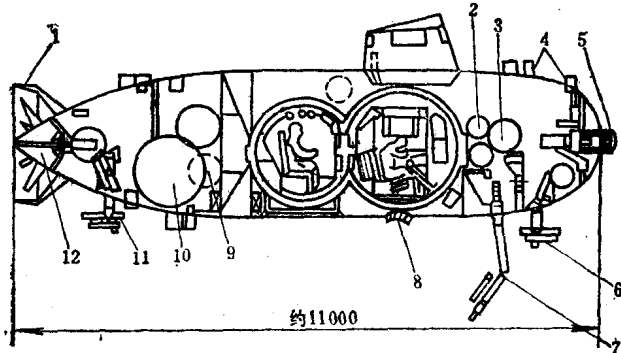


图 1-2 6100m 深海搜索器(DSSV)示意图

- 1—倾斜罩 2—液压系统 3—压力舱 4—声纳 5—螺旋桨系统
6—支承和摄影装置 7—操纵器 8—多普勒声纳 9—压水舱
10—燃料舱 11—支承和摄影装置 12—螺旋桨系统

则一般情况下对接接头的工作效能可达 100%，而铆接接头由于构造上的原因，很难达到 70%。

(2) 节省金属，减轻结构本身重量。据不完全统计，在同样承载条件下，焊接的桁架结构比铆接结构节省金属 10~

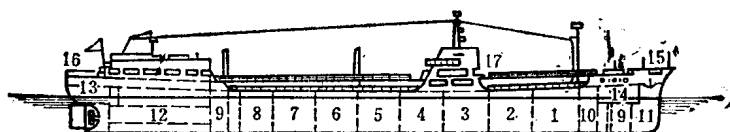


图 1-3 万吨油轮示意图

1~8—油货舱 9—燃油舱 10—锚链舱 11—首尖舱 12—机舱
13—尾尖舱 14—空舱 15—首楼 16—尾楼 17—桥楼

20%；在起重机中，节省 15~20%；在壳体结构中节省 10~20%；在容器中节省 15~25%。因而相应地降低了结构成本。

(3) 水密性和气密性好。制造铆接结构时必须捻缝以防止渗漏。即使这样，在使用期间也很难保证水密性和气密性要求。而焊接结构是理想的具有水密性和气密性的结构，因此可以用它来制造各种压力容器、船舶和潜艇。

(4) 厚度没有限制。铆接结构板厚大于 50 mm 时，铆接将会十分困难。但焊接结构在厚度上基本没有限制，有些现代高压容器的单层壁厚可以达到 300 mm。

(5) 一些情况下设计比较简单。铆接结构的连接部分在设计上相当复杂，而焊接结构则可以将结构元件比较简单地对接、角接、T 形接或搭接起来。

(6) 制造周期短，成本低，经济效益好。焊接结构的制造工艺比铆接结构简单得多，采用现代分部件制造工艺，很容易实现专业化和批量生产。有些大型结构可以在工厂内先装配成部件，并进行整个结构的预装，然后运到工地总装，大大地提高了生产效率，从而缩短了制造周期。例如现代化造船厂用焊接工艺建造载重 20 万吨油轮时，可以在短短三个月内下水。而同样大小的油轮，如果用铆接工艺制造，将需要一年以

上的时间。焊接结构还能省去许多比较贵重的机械加工设备。

焊接结构与铸造结构相比,更具有形式多样化、节省金属、降低成本和机械性能高等优点,这里就不多作评比了。

二、焊接结构的发展趋势

现代焊接结构正在向大型化和高参数方向发展,工作条件越来越苛刻,要求越来越严格。这是因为焊接结构具有一系列优点,使得各类焊接结构往往成为重要的大型成套设备中的关键部件。例如化肥设备中的合成塔,炼油设备中的加氢反应器,原子能电站的反应堆压力壳,潜水艇(核潜艇)承压壳,各种全焊的桁架桥梁,大型水力及火力发电设备中的水轮机、蜗壳、电机、汽轮机、锅炉等等。

焊接结构的大型化可以 50 万吨级油轮为例。该全焊油轮长 382 m, 宽 68 m, 高 27 m。采用低碳钢和普通低合金钢制造, 最大钢板厚度达 140 mm。又例如建造现代高层建筑的焊接钢屋架, 通常都是将零部件在工厂内建成, 然后再运到工地安装的, 所用材料强度级别达 490 MPa (50 公斤级) 以上, 厚度达 100~150 mm。

现代焊接结构除了尺寸越来越大之外, 往往是在高温、高压或低温、深冷环境下工作的, 有的是在动载或冲击条件下使用的。例如: 利用最新焊接技术而成功制造出来的先进工业设备, 象核电站应用的单机功率高达 1.2 GW 的电站锅炉(工作压力为 32.4 MPa, 蒸汽温度为 650 °C) 和汽轮机, 以及配套的高压容器, 单机功率高达 0.675 GW 的水轮机组, 以及配套的进水管和蜗壳; 容积达 5080 m³ 的钢铁工业大型高炉, 每炉能炼 420 t 钢的氧气顶吹转炉; 直径达 33 m, 容积为

100000 m³ 的贮油罐；容积达 20000 m³，压力为 0.49 MPa (5 kgf/cm²) 的球形容器等；都是有名的复杂工作条件下的巨型结构。

在现代焊接结构中，高强钢获得广泛应用。图 1-4 所示为日本统计的部分大型焊接结构所用钢材强度等级与采用的板厚规格。表 1-1 所列为日本制造焊接结构用高强度钢板的主要规格。大阪的港大桥，就是用 784 MPa 级高强度钢建造的。

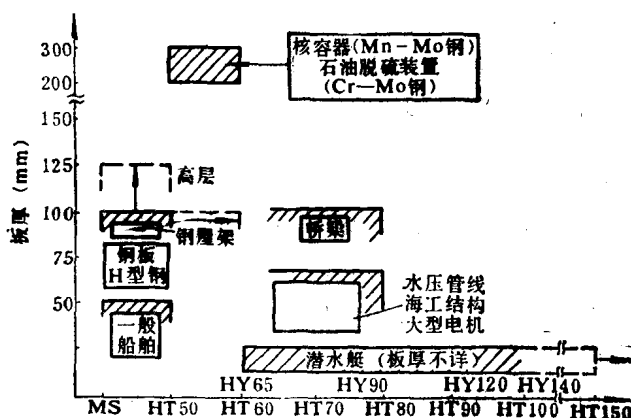


图 1-4 日本大型结构物所用钢材强度级别及板厚的范围

潜水艇壳是海洋工程中要求十分严格的焊接结构。二次世界大战期间，各国的潜艇多用低碳钢来制造，屈服强度只有 219.5 MPa，到了 1958 年才采用了屈服强度为 345 MPa 的中强钢；随后又使用了屈服强度为 552 MPa 的调质高强钢；最近使用了最小屈服强度为 689 MPa 的调质高强钢。

为了进行深海探测制造了深潜器，深潜器采用强度与密度比较大的钢材特别有利。1969 年，国外第一个深潜到

表 1-1 日本焊接协会标准 (WES3002-1970) 规定部分用于焊接结构的高强钢板规格⁽²⁾

种 类	状 态	化学成分(%)			碳当量① (%)	维氏硬度 HV	屈服强度 σ_s MPa(kgf/mm ²)	强度极限 σ_b MPa(kgf/mm ²)	夏 比 冲 击 值	
		C	P	S					吸 收 能 J (kgf·m)	温 度 (°C)
HW36	热轧、正 火及调质	0.20	0.035	0.040	0.47②	390	353.1(36)	519.8~637.5 (53~65)	47.1 (4.8)	+15
									47.1 (4.8)	0
									47.1 (4.8)	-5
HW40	热轧、正 火及调质	0.20	0.035	0.040	0.49②	400	392.3(41)	559~676.7 (57~69)	47.1 (4.8)	+15
									47.1 (4.8)	0
									47.1 (4.8)	-5
HW45	热轧、正 火及调质	0.18	0.035	0.040	0.44②	380	441.3(45)	588.4~706.1 (60~72)	47.1 (4.8)	+10
					0.48③	400			47.1 (4.8)	-5
					0.50④	410			47.1 (4.8)	-10
HW50	热轧、正 火及调质	0.18	0.035	0.040	0.46②	390	490.4(50)	608~725.7 (62~74)	47.1 (4.8)	+5
					0.50③	410			47.1 (4.8)	-10
					0.54④	420			47.1 (4.8)	-15
HW56	正火及调质	0.18	0.035	0.040	0.53②	420	549.2(56)	666.9~804.2 (68~82)	47.1 (4.8)	+5
									47.1 (4.8)	-10
									47.1 (4.8)	-15

(续)

种类	状态	化学成分(%)			碳当量① (%)	维氏硬度 HV	屈服强度 σ_s MPa (kgf/mm ²)	强度极限 σ_b MPa (kgf/mm ²)	夏比冲击值	
		C	P	S					吸收能 J (kgf·m)	温度 (°C)
HW63	正火及调质	0.18	0.035	0.040	0.57②	435	617.8(63)	706.1~843.4 (72~84)	39.2 (4.0)	0
									39.2 (4.0)	-15
									39.2 (4.0)	-20
HW70	正火及调质	0.18	0.030	0.035	0.63②	450	686.5(70)	784.6~931.7 (80~95)	35.3 (3.6)	-5
									35.3 (3.6)	-15
									35.3 (3.6)	-20
HW80	正火及调质	0.18	0.030	0.035	0.69②	470	784.6(80)	863~1029.7 (88~105)	27.5 (2.8)	-5
									27.5 (2.8)	-20
									27.5 (2.8)	-25
HW90	正火及调质	0.18	0.030	0.035	0.76②	480	882.6(90)	951.5~1127.8 (97~115)	27.5 (2.8)	-10
									27.5 (2.8)	-25
									27.5 (2.8)	-30

① 碳当量按下式计算: $C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$ (%)。

② 调质钢厚 50 mm 以下。③ 调质钢厚 50~75 mm。④ 非调质钢。