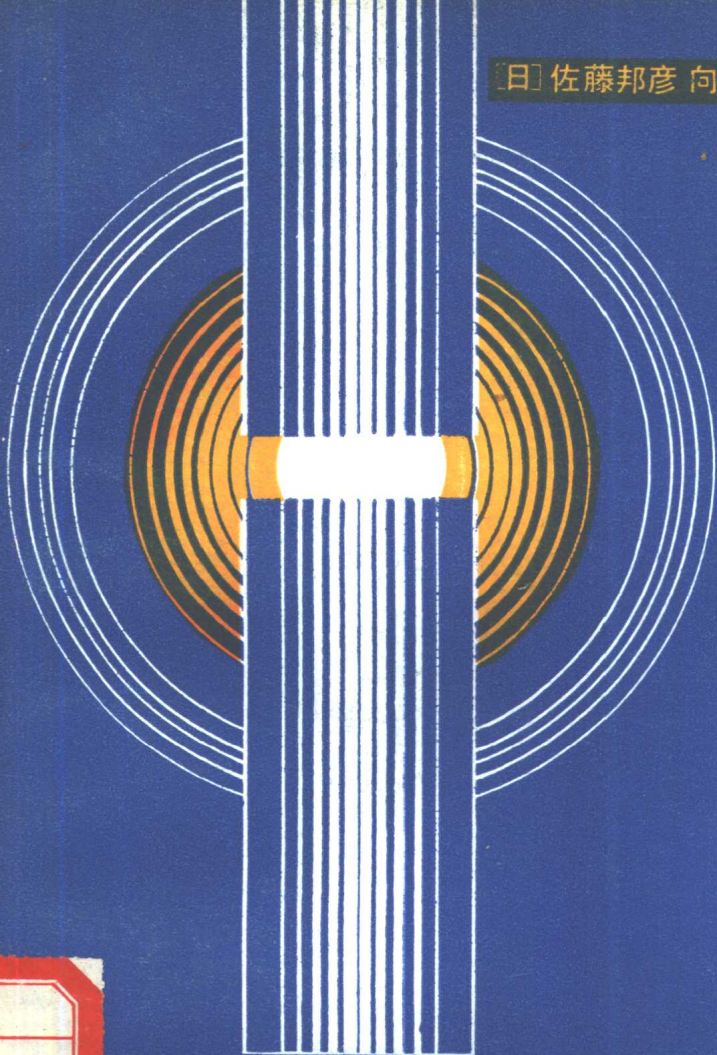


〔日〕佐藤邦彦 向井喜彦 豊田政男 著



焊接接头的 强度与设计

焊接接头的强度与设计

〔日〕佐藤邦彦 向井喜彦 豊田政男 著

张伟昌 严鸢飞 徐 晓 译

苏 毅 校



机械工业出版社

本书应用断裂力学的观点讨论了焊接接头的强度分析和设计计算,介绍了焊接应力、变形和裂纹产生的原因和防止方法。书中既有简明的理论叙述,又有实用的算式、图表和数据,同时还附有习题和答案。

本书宜作为大专院校教学参考书,也可供从事焊接结构设计、制造及研究人员参考。

溶 接 工 学

佐藤邦彦、向井喜彦、豊田政男 著
(根据日本“理工学社”1979年5月版译出)

* * *

焊接接头的强度与设计

〔日〕佐藤邦彦 向井喜彦 豊田政男 著

张伟昌 严鸢飞 徐 晓 译

苏 毅 校

*

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许可出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $10\frac{7}{8}$ · 字数 235 千字

1983年1月北京第一版·1983年1月北京第一次印刷

印数 00,001—10,500 · 定价 1.15 元

*

统一书号: 15033 · 5325

译者说明

焊接接头的强度计算、焊接结构的寿命判定及确保焊件可靠性的措施是焊接结构制造中的重要问题。随着焊接结构的广泛应用，这个问题正受到国内外工程技术人员，特别是焊接工作者的广泛重视。

为了能帮助国内解决这方面的问题，我们翻译了日本大阪大学教授佐藤邦彦先生等人合著的这本近著。书中讨论了焊接接头的强度分析和设计计算，焊接应力、变形和裂纹产生的原因和防止方法，并采用断裂力学的观点作出定量的分析。本书是作者在这方面进行长期研究、教学的总结，同时又搜集了国际上最新的研究成果。书中既有简明的理论叙述，又有实用的算式、图表和数据。1979年底佐藤邦彦先生来我国讲学时曾使用本书，受到听课者的好评。

本书的第一、二、六、七章及习题答案由张伟昌翻译，第三、五、八章由严鸢飞翻译，第四章由徐晓翻译。全书由张伟昌统一整理，并请苏毅校订。

译文不妥之处，请批评指正。

前 言

焊接是制造各种结构不可缺少的加工技术。为了提高焊接结构的可靠性,重要的是对焊接结构件中的接头性能问题,要从设计、材料、加工等各方面作综合考虑。本书就是根据这个概念编写的,目的是为从事结构设计、制造的技术人员提供确保焊接接头质量的基本原理和思路。

本书除一般技术人员外,还考虑到可用作大学、专科学校的教材和参考书,故在其内容上,作者大体参照了大阪大学工学院焊接(8个单元)[⊖]、造船(6个单元)、机械、冶金、金属、建筑(各2个单元)各专业目前采用的讲义内容。为了加深理解,在每章末附有习题,并在书后列出答案及提示。为利于深入学习、便于查找因本书篇幅所限而省略的内容,书内附有参考文献。因此,本书也适宜作为大学研究生和一般研究人员的参考书。

编写时由作者先对各章节内容进行了反复讨论,然后分别编写。第一章(佐藤),第二章(佐藤、豊田),第三、四章(佐藤),第五章(佐藤、豊田),第六章(向井),第七章(豊田),第八章(豊田)。再由佐藤通读整个原稿,并作了文句上的整理及统一、内容上的取舍及调整,使全书成为首尾相贯的整体。

书内图表大多根据作者的资料或者根据别的文献资料由作者自行绘制,但也有少量直接引自别的文献。在此,对这

⊖ 一个单元为15个学时。——译者注

VI

些被引用文献的各位作者逐一深表敬意和感谢。本书的出版是由于已故関口伝先生自《焊接力学及其应用》一书发行以来对作者的多年合作与帮助的结果，此外，在出版时还得到吉住久先生、加藤治義先生的照顾，在此一并表示谢意。

作者 1979年3月

目 录

第一章 结构的设计、制造和焊接技术	1
1.1 焊接结构设计、制造上的问题	1
1.2 焊接方法概要	8
1. 焊接方法分类	8
2. 有关电弧焊接的热参数	9
3. 结构制造中使用的主要焊接方法	12
1.3 焊接接头形式	17
1. 焊接接头的分类	17
2. 对接接头的坡口形式	17
3. 角接接头的形式	19
4. 焊接接头的图示方法	20
1.4 焊接结构用的材料和可焊性	25
1.5 影响焊接接头性能的因素	30
1.6 焊接接头设计的注意事项	33
第二章 焊接区的力学性能	36
2.1 结构制造时受到的各种热影响	36
2.2 焊接热传导基础	38
1. 焊接热源的特点	38
2. 瞬时热源的热传导	40
3. 移动热源的热传导	43
4. 峰值温度	45
5. 焊接区的冷却	49
2.3 热影响区的硬化	52
2.4 热影响区的力学性能	58
1. 热影响区的强度和塑性	58
2. 热影响区的韧性	60

3. 经受高温预应变钢材的强度、塑性、韧性	62
2.5 焊缝金属的力学性能	65
第三章 焊接应力和焊接变形	73
3.1 概述	73
1. 一般情况	73
2. 焊接残余应力的一般特点	74
3. 焊接变形的一般特点	76
4. 固有应力的特征	76
3.2 焊接应力、焊接变形产生的原因	80
1. 焊接残余应力、焊接变形产生原因的分类	80
2. 因母材热膨胀产生的错边	80
3. 在母材和熔敷金属中产生的塑性应变	82
3.3 焊接残余应力	87
1. 焊接过程中产生的过渡热应力	87
2. 焊接热输入对残余应力的影响	87
3. 钢的相变对残余应力的影响	92
4. 超厚板的焊接残余应力	95
5. 焊接残余应力的消除	96
3.4 焊接变形	98
1. 焊接热输入对焊接变形的影响	98
2. 熔敷量和比熔化热对焊接变形的影响	103
3. 钢的相变对焊接变形的影响	107
4. 焊接中的回转变形	108
5. 焊接引起的板件压曲变形	110
6. 构件的焊接变形	112
第四章 焊接裂纹	119
4.1 概述	119
1. 焊接裂纹的分类	119
2. 造成焊接裂纹的主要原因	123

3. 焊接裂纹的试验方法	124
4.2 钢的焊接裂纹敏感性	127
1. 冷裂纹敏感性	127
2. 层状撕裂敏感性	128
3. 热裂纹敏感性	130
4. 再热裂纹敏感性	131
4.3 焊接裂纹与应力、应变	132
1. 拘束焊接接头的应力、应变	132
2. 拘束对焊接裂纹的影响	134
3. 焊接接头的拘束应力、拘束度	137
4. 焊接区的局部应力与焊接裂纹	140
4.4 焊接裂纹与氢	143
1. 扩散氢对焊接裂纹的影响	143
2. 氢的扩散理论	145
3. 焊接区的局部氢集聚	149
4.5 焊接裂纹的防止	153
1. 氢致裂纹的临界值	153
2. 钢的焊接裂纹敏感性指数	155
3. 防止裂纹的预热温度	155
4. 热裂纹的防止	157
第五章 焊接接头的强度与断裂 (I)	166
5.1 概述	166
5.2 有裂纹板的强度和断裂	167
5.3 裂纹周围的应力、应变状态	171
1. 裂纹顶端的应力集中	172
2. 裂纹顶端附近的塑性变形	174
5.4 裂纹顶端伴有少量塑性变形的失稳断裂	177
1. 失稳断裂的开始条件	177
2. 应力强度因子和 COD 的临界值	180
5.5 裂纹顶端伴有大量塑性变形的失稳断裂	184

X

1. 稳定塑性裂纹的扩展	184
2. 断裂塑性	185
5.6 焊接接头的失稳断裂	190
1. 有裂纹焊接接头的强度和断裂	190
2. 焊接残余应力的影响	191
3. 初始变形的影响	195
4. 焊接接头低应力脆性断裂的发生温度	198
5. 焊后热处理的影响	200
6. 力学不均匀性的影响	201
第六章 焊接接头的强度与断裂 (II)	209
6.1 延时断裂的特点	209
6.2 有关疲劳强度的一般情况	210
1. 疲劳强度	210
2. 疲劳断裂的发生与扩展	215
6.3 焊接接头的疲劳强度	217
1. 疲劳强度的一般特性	217
2. 应力集中对疲劳强度的影响	221
3. 焊接残余应力对疲劳强度的影响	224
4. 高强钢焊接接头的疲劳强度	228
5. 有制造缺陷的焊接接头疲劳强度	229
6.4 蠕变	232
1. 蠕变强度	232
2. 缺口材料的蠕变强度	235
3. 焊接接头的蠕变强度	237
4. 有焊接接头构件的蠕变强度	238
6.5 在腐蚀环境下的强度	240
1. 腐蚀环境下裂纹的产生与扩展	240
2. 腐蚀疲劳	246
第七章 焊接接头中力的传递与应力计算	254

7.1 对接接头	254
1. 塑性强度的一般特性	254
2. 焊缝金属强度对塑性强度的影响	257
3. 焊接残余应力对塑性强度的影响	260
4. 焊接残余应力对压曲强度的影响	262
7.2 角接头	267
1. 角接头中力的传递	267
2. 角接头的塑性强度	271
7.3 部分熔透的焊接接头	275
7.4 焊接接头的应力计算	280
1. 应力计算的假定	280
2. 焊接接头的应力计算	281
3. 焊接接头的应力计算实例	284
4. 许用应力	284
第八章 确保接头性能的设计	290
8.1 结构用材料的选定	290
1. 根据却贝试验对韧性提出的要求	290
2. 防止失稳断裂所必须的材料韧性	292
3. 断裂韧性值和却贝试验结果的相互关系	297
8.2 焊接区的无损检测	298
1. 无损试验的方法	298
2. 焊接区的质量要求	298
3. 全长检验和抽样检验	301
4. 无损试验的可靠性	304
8.3 临界焊接缺陷判据	306
1. 防止失稳断裂的临界焊接缺陷尺寸	306
2. 防止发生疲劳裂纹的临界缺陷尺寸	311
8.4 母材和焊缝金属的匹配	314
习题答案和提示	321

第一章 结构的设计、制造和焊接技术

1.1 焊接结构设计、制造上的问题

结构在按指定的设计图纸进行制造时，有好几种加工工序。一般说来，结构种类和大小虽有很大差别，而这些加工工序的区别却并不大。无论是桥梁、建筑物、贮罐、压力容器等陆上结构，或者是船舶、海洋结构等构件，其全部或部分制造过程大致都要反复经过材料的切断、成形、连接等加工工序。对钢材而言，这些加工方法大体可按表 1.1 分类。其中，作为热加工方法的切割及焊接，目前在工作量上占有很大比重，将来也是结构制造上不可缺少的加工技术。

结构焊接时需要考虑的问题可如图 1.1 所示。也就是说，在确保结构部件上焊接接头质量的同时，为了满足加工条件，既要提高生产率，又要通过改善制造时的作业环境来增加安全性。因此，要求选择适当的材料、充实加工设备和技

表1.1 金属加工技术的分类及举例

类 别	切 断	成 形	连 接
热 加 工	熔化切断 { 气 割 等离子切 割等	线状加热	焊接 { 电弧焊接 电阻焊接等
机械加工	机械切割	爆炸成形、压制	螺栓连接
化学加工	—	—	粘 结

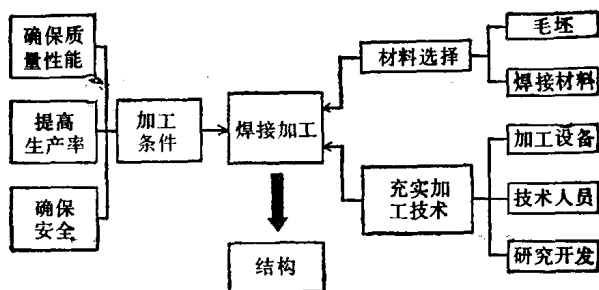


图1.1 结构制造中焊接工作问题的示意图

术人员的加工技术能力。这是赋予结构制造技术人员的重要职责。

另一方面，对结构设计的要求，则是结构的整体或各部分在其使用过程中不应产生致命的破坏（failure），其中，包括弹性失效（elastic failure），或者屈服（yielding），力学上的失稳（mechanical instability）、断裂（fracture），倒塌（collapse）。因此，如图 1.2 的左侧所示，对结构或结构件所要求的使用性能决定于以下因素：载荷的大小和种类、使用温度、使用环境以及由这些条件相应确定的设计原则（des-

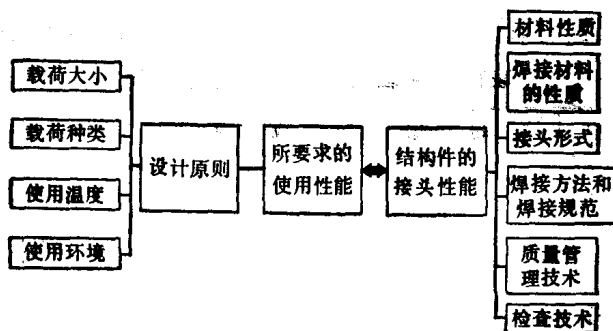


图1.2 焊接结构的设计与材料及加工的关系

ign concept) 所制约。所以, 确定载荷的大小和种类, 并分析与此相应的结构各部分所产生的应力, 在设计上是很重要的。更加重要的是, 要探讨对应于构件各部分产生的应力 (stress) σ 会不会导致发生上述破坏。设产生某种破坏现象的临界强度 (strength) 为 σ_r , 当应力 σ 达到 σ_r 时, 则在结构件产生某种破坏而使得结构丧失功能, 所以这个结构件必须按 $\sigma < \sigma_r$ 进行设计。为此, 可增加板厚使应力 σ 减小, 或者选择强度 σ_r 较高的材料[⊖]。不管结构的制造如何妥当, 如果设计者把 σ 和 σ_r 的推算搞错, 则破坏大多发生在结构接合部位。

结构破坏的典型事例及其简况列于表 1.2^[1-9]。表 1.3 是在 1950~1970 年的 20 年间建造的几百艘大型船舶, 在外壳板及加强甲板处发生裂纹的 144 个事例, 表中列有对于裂纹起因的调查结果^[10]。可以认为, 在这些航行中所产生的裂纹, 约有 60% 是从结构设计的应力集中区发生的。作为裂纹发生原因的制造上的缺陷, 大多与焊接接头有关, 因而, 有可能引起较大的破坏。表 1.4 为美国原子能发电站输配管事故的调查事例^[7]。表 1.2~表 1.4 的例子说明, 特别是在采用焊接作为连接手段时, 由于焊接是热加工方法, 所以影响焊接接头性能的因素, 除了材料选择外, 还受到一些加工技术的影响。影响接头性能的因素如图 1.2 的右边所示, 为了提高焊接结构的可靠性, 重要的是要对结构件的焊接接头性能问题, 从设计、材料、加工方面作综合考虑。

在结构设计人员中间, 一方面存在很容易听任制造技术人员处理焊接问题的倾向, 而另一方面, 当了解到焊接接头

⊖ 受压缩长杆的弹性压曲时例外, 压曲应力与材料的弹性模量有关, 与强度 σ_r 无关。

表1.2 结构的典型破坏事例

破坏年月 (月份)	结构类别 地点	破坏简况和主要原因等
1886 (10月)	给水塔(铆接结构) 美国, 纽约州, 长岛 (高 76 米, 底部直径 5 米)	在记载上为最早的脆性破坏。水压试验时, 由底部产生裂纹, 造成全破坏。原因是在应力集中区使用非常脆的材料
1919 (1月)	制糖容器(铆接结构) 美国, 马萨诸塞州, 波士顿 (高14米, 直径 30米)	从人孔附近开始破坏, 形成全破坏。原因是安全系数取得不够, 造成强度不足。由于这一破坏, 使12人死亡。可以看到人字形裂纹清楚地指向裂纹发生源
1936	祖奥(Zoo)桥(焊接 桁梁) 德国	角接区发生裂纹, 扩展到翼板和腹板。使用高强度钢(ST52)制成后 6 个月产生局部破坏
1938	鲁得道夫(Rüdersd- orf)桥(焊接桁梁) 德国	原因是焊接热影响区产生硬化和残余应力。用与祖奥桥相同的加筋板使残余应力增高
1938~1940	威林迪 (Vierend- eel)桁架桥 比利时	横跨阿贝特 (Albert) 运河上的威林迪全焊拱形桁架桥。焊接造成严重的残余应力, 从焊接区发生裂纹
1942~1946	EC 2 货船, T2油轮 等 美国	美国战争时期标准船的脆性破坏。在 5000 艘中约有 500 艘有很大的破坏, 根据详细的事故调查, 得出对于结构设计和材料要有必需韧性的原则
1943 (2月)	贮氢球罐 美国, 纽约州, 悉尼 泰迪(直径13米)	建造后三个月, 在急冷时完全破坏。原因是采用半镇静钢, 以及在人孔周边剪切加工造成的裂纹。根据对人字形裂纹发生源的分析, 指出了耐压试验的必要性
1943 (3月)	贮氮球罐 美国, 宾夕法尼亚州 (直径14米)	从局部存在焊瘤和气孔的焊接区因冲击试验而发生裂纹。裂纹与焊缝中心线成垂直方向扩展, 造成局部破坏

(续)

破坏年月 (月份)	结 构 类 别 地 点	破坏简况和主要原因等
1944 (10月)	圆筒形压力容器 美国, 俄亥俄州, 克利夫兰 (直径24米, 高13米)	双层液化天然气罐, 用3.5%Ni 铜, 造成128名死亡的大惨案。采用在 -163°C 有2.1公斤·米的却贝冲击值的板材, 但实际使用的材料要差得多。与焊接的关系不明
1948~1951	气体输送管线 (天然气) 美国	使用以冷作提高屈服强度的材料, 约有1000米长的蛇形裂纹。查明在脆性裂纹速度超过气体的弹性波动速度时, 在裂纹顶端处应力并不减少
1949~1963	商船 (非美国制造)	很多油轮、货船出事。事故大多发生在北大西洋、北太平洋。引起人们对钢材断裂韧性的重新评价
1951 (1月)	都伯里斯 (Duplessis) 桥 加拿大 魁北克	翼板使用不合格材料, 从经过一次补修的桁梁开始破坏, 而后形成全破坏。主要原因是材料使用不当
1952	油罐, 二个 英国, 富利	从施工不良的穿孔处补修焊接区发生裂纹, 说明补修焊接管理的重要性。后来废除了穿孔检查
1954	“世界和谐”号 (World Concord) 油轮 英国	当时最大的油轮, 在北大西洋折为两半。鉴于美国战时船舶用沸腾钢的经验, 采用了只有15英尺·磅却贝值的半镇静钢。开始对于确定必要的韧性值作详细研究
1962 (7月)	金斯 (Kings) 桥 (跨度30.5米) 澳大利亚, 墨尔本	桥在45.8吨卡车通过时坠落。钢材含碳量高, 可焊性差。在断面急剧变化部位的应力集中区发生破坏
1962	原子能容器 (核电站) 法国, 茨诺	Mn-Mo钢, 从板厚100毫米的压力容器环形焊接区发生破坏。由于消除残余应力退火, 使材料性能恶化

(续)

破坏年月 (月份)	结 构 类 别 地 点	破坏简况和主要原因等
1965 (12月)	贮氨罐 英国	使用厚度为150毫米的 Mn-Cr-Mo-V 钢板和锻钢。从一侧的10毫米三角形裂纹处引起破坏。应力退火温度管理不好造成脆化及锻钢件的偏析带是产生破坏的原因
1966 (5月)	锅炉封头 英国	使用板厚140毫米的Mn-Cr-Mo-V 钢。在贯通式接管焊接接头内部焊趾区发生裂纹。原因是设计上的毛病和消除应力退火初期的急速加热
1968 (4月)	球形罐(丙烯) 日本	使用板厚29毫米的80公斤级高强度钢。原因是补修焊接时使用80千焦/厘米的大热输入焊接,造成熔合区脆化。产生全破坏,脆性裂纹长6.2米
1974 (12月)	圆筒形大型石油贮罐 日本	用板厚12毫米的60公斤级高强度钢,在环形板的底角部有13米的裂纹,使大量的油流出。说明贮罐本体和地基间相互作用的重要性

表1.3 大型船舶在航行中船壳板和加强甲板发生裂纹

(144个例子) 原因的推断(应力消除研究委员会, 109

部委)(碰撞、爆炸、触礁除外)

推断原因	件 数	推断原因	件 数
结构设计	58%	设计和材料	4%
加 工	20%	腐 蚀	3%
设计和加工	9%	加工和腐蚀	1%
材 料	5%		