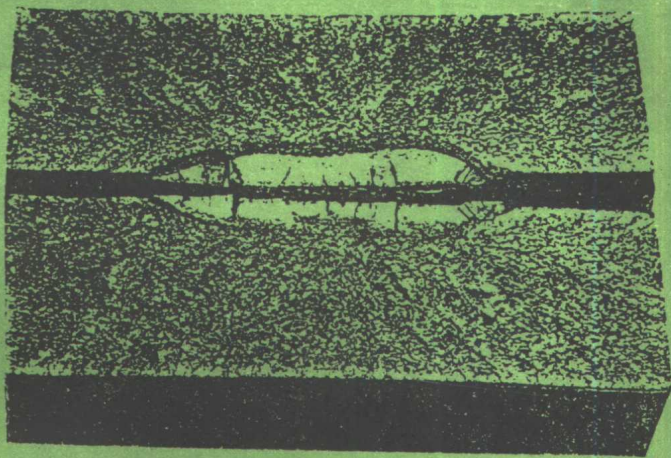


焊接结构的疲劳

[英] T.R. 格尔内 著



机械工业出版社

焊接结构的疲劳

〔英〕 T.R. 格尔内 著

周殿群 译

潘际炎 校



机械工业出版社

本书以研究简单接头的疲劳强度为基础,从而进一步研究整个焊接结构的疲劳强度。着重介绍了疲劳试验的方法及提高疲劳强度的措施和设计原理等实用经验。在疲劳强度计算方面,采用实地试验数据,不着重于纯理论性推导。

全书共分15章。第1~3章介绍疲劳试验的方法、裂纹扩展机理的分析及其影响因素;第4~7章介绍影响普通钢板、管接头的对焊和角焊疲劳强度的各种因素;第8~9章介绍影响高强度钢和铝合金的焊接疲劳强度的因素;第10~11章介绍残余应力与焊接缺陷对疲劳强度的影响;第12章介绍低循环应力对压力容器和管道工程中疲劳强度的影响;第13章介绍提高疲劳强度的各种方法;第14章介绍影响设计应力的某些因素;第15章介绍一些非常有价值的设计经验、改进措施和方法。最后三章为本书的重点,是典型焊接经验的总结,它对焊接工作者颇有实用价值。

Fatigue Of Welded Structures

(2nd edition)

T. R. GURNEY

The Welding Institute

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

LONDON, 1979

焊接结构的疲劳

英国焊接研究所

[英] T. R. 格尔内 著

剑桥大学出版社 1979

周殿群 译

潘际炎 校

责任编辑:何月秋 责任校对:孙志筠

封面设计:田淑文 版式设计:张伟行

责任印制:张俊民

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证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168¹/₃₂·印张147/8·字数426千字

1988年11月北京第一版·1988年11月北京第一次印刷

印数 0,001—3,500·定价:8.30元

ISBN 7-111-00484-1/TG·128

译 序

出版一本有关“焊接结构疲劳”方面的书，势在必行。近年来，焊接技术发展很快，且越来越广泛地应用于各个工业领域。如国防、机械、石油、化工、冶金、建筑、交通、动力和原子能等工业领域都日益大量地采用了焊接结构。钢结构的制造采用焊接代替过去的铆接，能简化结构构造，节约工时，节约材料，改善工人的工作条件，提高生产效率，缩短产品的生产周期，使结构轻盈美观。因此，目前飞机、船舶、桥梁、机车、车辆、锅炉、大型厂房、高层建筑等重要结构都大多采用了焊接结构。这些重要结构无一不是直接影响工农业生产、人民生命财产的安全和正常的社会秩序的。所以，如何提高这些结构的制造质量，保证其在正常使用时安全可靠，成了大家极为关心的问题。许多焊接结构在使用中，往往是承受重复的外力作用，从而使结构产生疲劳断裂。研究、分析焊接结构的疲劳断裂特性，减轻或消除其产生疲劳断裂危害的因素，估算和延长焊接结构的使用寿命，是提高和继续发展焊接结构的重要课题。但对焊接结构这方面进行系统论述的书籍，目前尚不多见。而英国焊接研究所T.R. 格尔内所著的这本《焊接结构的疲劳》一书，却是介绍焊接结构疲劳问题的第一本比较完整的书籍。本书具有如下特点：

1. 收集的资料丰富。从参考资料目录不难看出，他参阅了国际上许多试验研究资料，这些不但提供了许多研究的主要成果，并且为科研技术人员的进一步研究提供了参考资料索引。

2. 疲劳问题叙述的非常系统。从基本概念讲起，按先后顺序介绍了疲劳断裂的特征、疲劳试验的方法、应力集中及影响疲劳的因素、试验结果的分析、未焊接钢材的疲劳强度、各种焊接接头的疲劳性能、改进疲劳强度的措施、焊接残余应力的影响、焊接结构疲劳设计的基本原理及要点等。因此，这本书所谈的问

题都是由浅入深，既适合初学者的需要，又适合要深入研究者使用。

3. 本书既有实际资料，又结合了较完整的理论。断裂力学是近年来发展很快的学科，它的主要内容是研究带裂纹体裂纹尖端的应力问题。焊接结构不可避免的有各种各样的缺陷，因此是类裂纹体。焊接的钢结构的疲劳研究引进断裂力学之后，使疲劳理论有了很大的进展。本书第2章专门介绍了断裂力学的概念，并在其后的各章对钢结构及其细节的疲劳现象结合断裂力学作了理论上的阐述和分析，使人们对疲劳断裂现象的本质，有一个比较清楚的认识，对人们解决问题和深入研究问题都将有所帮助。

4. 焊接结构在使用期间承受的动载荷是随机的。本书详细地介绍了影响焊接结构疲劳性能三要素：即应力幅、应力循环次数及构造细节，并说明了它们的试验、分析和制定的办法以及其相互的关系。这些内容都可以作为制定各种结构疲劳设计准则的参考。

5. 本书以研究简单接头的疲劳强度为基础，从而进一步研究整个焊接结构的疲劳强度，说明了正在逐步优化的结构细节设计的考虑因素和步骤，可供焊接结构的设计工作者参考使用。

6. 书中就焊接缺陷对疲劳性能的影响以及改善疲劳强度的方法也做了十分详细的介绍。这对工厂焊接技术人员的质量管理和工艺改进都将有参考意义。

总之，这是一本很值得推广介绍的好书。随着我国工、农业生产和科学技术的迅速发展，焊接结构必然会越来越普遍地得到应用，其疲劳破坏问题也必将越来越为科研和工程技术人员所关注。我相信本书中译本的出版，将为我国从事焊接与焊接钢结构的科研、设计、制造、施工与教学的工作者提供系统的参考资料，为促进我国四个现代化建设作出一定的贡献。

我要感谢译者为我们焊接界提供了这样一本有参考价值的好书。同时也希望广大读者为此书多提宝贵意见，以利于焊接结构

的迅速发展。

中国钢协桥梁钢结构协会理事长
中国机械工程学会焊接学会第ⅧⅢ专业委员会
(疲劳试验)主任

潘际炎

1986年6月

前 言

自从10年前本书第一版出版以来，焊接结构疲劳特性的研究领域有了很大进展。确实，有关的资料是以指数关系发展着的。因此，本版对初版里的内容作了许多增补和更改。

在这个转变阶段，最重要的发展毫无疑问是疲劳领域里断裂力学的出现。由于断裂力学的有效应用是物体要有预先存在的裂纹，所以，一看就可以明白断裂力学是分析焊接接头疲劳强度的一种强有力的和现实的手段。因此，第二版编进了新的一章来介绍与疲劳有关的断裂力学的基本概念，并且说明了它在焊接接头上的应用情况。此外，在其他章节的有关论点里，由于采用了断裂力学，而能增加我们对各类特型焊接细节疲劳特征的了解。

另外一个主要发展与寻找和开发近海石油及煤气有关。在这些方面，工程上的方法就是采用许多焊接管结构的勘探和生产用井架，与之相配合还进行了广泛的试验安排，以便确定这些结构里焊接接头的疲劳强度。遗憾的是，在写这本书时，安排的这些试验只部分完成了，因此不可能包含我们所希望的那么多的细节。尽管如此，在这一版里还是增设了有关管接头的一章，不过在性质上，这一章只是目前工作的进度报告而已。

由于数量多而且涉及范围广，所以不可能把所有其他进行过的修改都在这里列出来。主要的修改部分包括残余应力的影响、提高疲劳强度的方法(这方面专有一节谈到TIG修整)以及影响设计应力的因素等章节。这些修改部分包括由英国焊接研究所提出的设计规范。这一规范已用作制定新的BS5400英国桥梁规范的依据。此外，可以说所有的章节都修改过了，对第一版里存在的许多不周密的地方也都作了补充修改。

我要再次对英国焊接研究所所给予的大量帮助表示感谢，特别要感谢他们允许我采用原先我在该所研究报告里发表过的材

料。

我还要同样感谢R. P. Newman先生，他花了许多时间全面校对了修改的内容，且对这些修改内容作了订正，以致最后许多潜在的模糊观点都被排除掉了，这是我所希望的，也是我最感谢他的。

还要更感谢我的秘书Lynda Cotgrove太太和Carol Hedge太太的全部协助。我几年来所写的手稿没有修改过，但是她们两人总是整理得极为令人满意。

最后还要感谢所有愿意并且慷慨地允许我采用他们试验结果的许多研究人员和研究组织。

T. R. 格尔内

初 版 前 言

这本书的基本内容标明了两个事实。首先无可置疑的是，不管怎样，目前在工程生产上，焊接是主要的联接方法。的确，如果焊接没有发明的话，许多结构，甚至坦率地说整个工业(例如原子能发电工业)是不会产生的。其次，结构在使用中，绝大部分的破坏(这种破坏的量是十分大的)确实就是疲劳破坏，这些破坏有许多是焊接结构方面的，只就英国来说，由于焊接结构的疲劳破坏所造成的损失估计每年要达到千万英镑。然而，直到现在还没有一本综合论述焊接结构疲劳问题的英国书籍。其原因是与疲劳问题的性质牢固地联系在一起。

实际结构和工程构件的疲劳强度是不能用理论方法求出来的。所以，要得出设计使用的定量数据就必须经过实地试验。但由于合适的试验设备的利用度是有限的，以及要想积累一般设计所用的可靠数据的充分依据，又需要广泛的试验工作，这两方面加起来实际上要连续进行好多年的研究。在好几个国家里已经有很多研究人员参加了这项研究，而且彼此之间已经顺利地进行了观点和资料的交换。这样一来，知识的积累就能做到对这个问题进行细致的审查，以便给许多负责生产焊接结构的工程师和设计人员的工作直接做出贡献。

对设计人员来说，许多现成的设计数据都可以从各种国家设计标准里找到。虽然这些标准可以满意地应用于特定形式的结构(例如桥梁或吊车)，但是疲劳问题却影响到很广泛的工程领域。此外，不管是什么样的领域都需要对这个问题有更多的分析了解，不光是从某一标准里的某些部分来进行推论。影响疲劳特性的因素很多，因而要进行综合评定时所涉及的范围就很广。特别是要记住，那些标准基本上反映的是许多试验工作所碰到的极限值。在准备写这本书的过程中就曾经想到，不仅要写出某些特定的设计数

议，而且还要详细论述它们的来源，以便有助于提供对其获得更为普遍了解的依据。

虽然这本书主要是为工程师与设计师们写的，但是希望这本书也会对教师和学生有用。介绍性的几章是专门用来讨论疲劳的某些基本概念的，然而将这些概念推广到焊接接头与焊接结构上，并不说明是一个高度专门化的派生领域。学工程的学生在以后的职业里不会遇不到需要考虑不同形式的焊接部件或焊接结构，并且不会不认为它们的疲劳特性是需要仔细研究的。

象前面阐述过的那样，即使与大多数焊接接头形式有关的资料是充分的，但是还有某些接头形式的资料明显不足。因此，任何提到管结构疲劳特征的都明显地从本书中删掉了。虽然对这类接头进行过几次试验研究，但都属于特定性质的，而且看来不可能从它们得出任何有用的一般性结论。同样，本书关于点焊接头疲劳强度的资料也很少，这并不是因为没有资料，而是因为在使用的时候，点焊似乎很少出事故。然而，即使在这些情况下，应用本书里列出的一般原理也应该有助于制造出令人满意的结构。

如果没有英国焊接研究所的帮助，这本书是不可能写出来的。非常感谢研究所允许我采用在出版的报告里所登载的许多图形和照片。

我要特别记下我对R.P.Newman先生的谢意。当我开始从事研究工作的时候，他就是我们部门的领导，他不仅教给我研究工作的“技艺”，而且还将他的一些关于焊接结构疲劳特征的渊博知识传授给我。没有这些知识，这本书是绝对不可能写成的。此外，我还要感谢他在这本书的编写过程中所提出的许多有价值的意见，而且要特别感谢他对原文的审阅与订正。

我也要感谢为我长期艰苦工作的秘书 Helen Matthews 太太与 Jean Gibson 太太，她们对稿件准确的打印，使我的工作进行得极为顺利，并且要感谢 F. Davis 先生整理了大部分图形，而且很明显，这些图形的绘制质量比较高。

最后，要对所有允许我采用他们试验结果的各位研究人员致以谢意。

T.R. 格尔内

目 录

译 序	
前 言	
初版前言	
引 言	1
第 1 章 疲劳的基本概念	4
§ 1-1 疲劳开裂的特征	4
§ 1-2 疲劳试验	7
§ 1-3 疲劳试验的符号	12
§ 1-4 $S-N$ 曲线与疲劳强度	14
§ 1-5 一些其他的试验方法	17
§ 1-6 试验结果的表示法	20
§ 1-7 应力集中	25
第 2 章 断裂力学与裂纹扩展	38
§ 2-1 断裂力学	39
§ 2-2 应力分析与应力强度因子	40
§ 2-3 塑性的近似校正	45
§ 2-4 焊接接头的应力强度因子	51
§ 2-5 断裂力学在疲劳上的应用	55
§ 2-6 断裂力学在实际问题中的应用	65
第 3 章 未焊接钢材的疲劳强度	68
§ 3-1 表面机加工未开缺口的试件	68
§ 3-2 缺口的影响	72
§ 3-3 非扩展裂纹	75
§ 3-4 轧钢氧化皮的影响	78
§ 3-5 气割的影响	81
第 4 章 钢的对接焊缝	83
§ 4-1 横向对接焊缝	84
一、焊缝形状的影响	86

二、机加工焊缝加强高的影响	96
三、板边整备的影响	98
四、焊接工艺和电焊条类型的影响	99
五、试件尺寸、残余应力和应力消除的影响	102
六、其他寿命和平均应力下的疲劳强度	106
§ 4-2 K形焊缝	108
§ 4-3 纵向连续对接焊缝	111
§ 4-4 纵向不连续对接焊缝	113
第 5 章 钢中角焊缝	115
§ 5-1 不承载纵向焊缝	117
§ 5-2 不承载横向焊缝	122
§ 5-3 承载的横向焊缝	128
§ 5-4 承载的纵向焊缝	138
§ 5-5 在其他平均应力时的疲劳强度	146
第 6 章 焊接的钢梁	150
§ 6-1 普通工字梁	151
§ 6-2 腹板加强肋的影响	155
§ 6-3 拼接的影响	164
§ 6-4 翼缘盖板的影响	168
§ 6-5 剪切联接器的影响	172
§ 6-6 门式吊车梁	174
第 7 章 管接头	177
§ 7-1 管接头中的应力	180
§ 7-2 对管子交叉接头进行的疲劳试验	191
第 8 章 高强钢焊接接头的疲劳和某些金属学因素	
的影响	198
§ 8-1 高强钢	198
§ 8-2 焊缝金属和热影响区材料	205
§ 8-3 焊趾上缺口几何特征的影响	210
第 9 章 焊接的铝合金	214
§ 9-1 材料	214
§ 9-2 平直的试件和开缺口的试件	216
§ 9-3 对接焊缝	217

§ 9-4	角焊缝	224
第10章	残余应力的影响	228
§ 10-1	残余应力的形成	228
§ 10-2	静态与疲劳两种条件之间的比较	231
§ 10-3	近似的理论分析	233
§ 10-4	焊接试件的试验	237
第11章	焊缝缺陷的影响	247
§ 11-1	静态加载与疲劳加载的比较	248
§ 11-2	未焊透	250
§ 11-3	裂纹	259
§ 11-4	未熔合	260
§ 11-5	密集气孔	262
§ 11-6	夹杂	270
§ 11-7	轴类修复	279
	一、堆焊轴的疲劳试验	279
	二、残余应力的影响	284
第12章	低循环疲劳、压力容器与管道工程	286
§ 12-1	低循环疲劳	286
§ 12-2	焊接接头的试验	291
§ 12-3	裂纹扩展	294
§ 12-4	压力容器	295
	喷嘴与开口的影响	296
§ 12-5	管道	299
	一、管道对接焊缝	300
	二、简单的和有加强板的弯头	303
第13章	提高疲劳强度的方法	305
§ 13-1	缺口外形的修整	307
	一、局部机加工	307
	二、TIG修整	311
§ 13-2	残余应力方法	314
	一、预先超载	314
	二、撞击硬化	322
	三、局部压缩	327

四、局部加热	331
五、Gunnert方法	337
§ 13-3 预防大气侵蚀——塑料涂层	338
§ 13-4 几种改善疲劳强度方法的比较	340
第14章 影响设计应力的一些因素	344
§ 14-1 设计的基本原理	344
§ 14-2 数据分散	348
§ 14-3 设计标准	353
§ 14-4 变载荷与积累损伤	371
一、应力循环计算	379
二、对未焊接的试件进行变载荷试验	390
三、对焊接试件进行变载荷试验	397
第15章 一些实际设计的要点	401
§ 15-1 角焊接头	401
§ 15-2 复合接头	402
§ 15-3 改善设计的例子	406
§ 15-4 各项建议的综述	413
附 录	416
A1 表类	416
§ A1-1 应力换算表	416
§ A1-2 研究焊接接头疲劳强度时所用一些钢材的详细情况	417
§ A1-3 2×10^6 次循环时横向对接焊缝的疲劳强度	419
A2 一些统计概念	419
§ A2-1 概率曲线	419
§ A2-2 高斯窄频带分布	421
A3 Paris疲劳裂纹扩展方程式的单位转换	422
参考文献	424

引 言

如果加载方式是静态时，金属部件和金属结构能够承受非常高的载荷，但在使用时还可能由于载荷变化或重复的载荷而发生破坏，这是一百多年来就承认了的。这种在变化的载荷作用下形成一条或多条裂纹的破坏形式就叫做“疲劳”破坏。所以，金属的疲劳破坏可以认为是由于重复地施加载荷形成了一条或多条的裂纹，而每次载荷本身是不足以引起正常静态破坏的。

在设计一个部件或一个结构时，设计人员需要使它们满足三个条件：

- (1) 必须尽可能有效地发挥其特定的作用。
- (2) 必须能经济地制造出来。
- (3) 必须具有满意的工作寿命。

由于第一个和第二个条件的直接影响，使得现代的工程设计趋向于把安全系数缩减到仅有的最小程度以减少质量和降低成本，并且增加机器与生产过程的³操作速度，以求得最有效地利用投资。遗憾的是，这两种趋向必然会与设计人员想获得满意的工作寿命的努力相对立，特别在很可能产生疲劳破坏的情况下更是如此。因此，估计工程部件中所发生的破坏大概有90%是由于疲劳造成的，这并不令人感到意外。

然而，要列出一份可能遭受疲劳破坏的结构形式的完整清单，实际上是不可能的。一般人很可能把疲劳看成是飞机特有的“病症”，从Nevil Shute的预言小说《艰险历程》中就可以看到，这种概念已经充满了他的头脑，而轰动一时的1954年彗星式飞机失事，又进一步加强了这种想法。直到几年前为止，从疲劳观点来说，对设计的成功与失败负主要责任的设计工程师与绘图人员，似乎在看法上并没有什么差别。如果要求阐述在³哪种结构里可能产生疲劳，在大多数情况下，他们都会把飞机放在清单的最

前面，因为除上面阐明过的“通俗的”道理以外，他们可能稍稍有了一些飞机工业对这个题目所进行的大量研究的启示。新近的确似乎有某些迹象表明，情况正在改善，更多的设计人员现在认识到，除飞机外，许多形式的结构都是易于遭到疲劳破坏的。即使这种事实是存在的，但是还有许多人并不能认识到已经发生而且的确还要发生疲劳破坏的各种形式的装配结构是品种繁多的。

如果我们只考虑用焊接或者可能用焊接来装配的结构，而且在这些结构里疲劳开裂已经是或者可能是破坏的原因，马上就想到在下面表里列出的那些结构。它们可以按照能够造成疲劳破坏的典型加载方式很方便地加以分类：

1. 波动的动载桥梁、门式吊车梁、运矿桥梁、柴油机框架、机车底盘框架、卡车底盘框架与轴、船舶、吊车、整地装置、农业机械、破碎机、各种冲压机械。
2. 压力波动：高压容器、管道工程、各种容器。
3. 温度波动：包括采用冷热的液体、气体或材料的加工设备。
4. 振动：转动机械、分级设备与传送装置。
5. 大气条件：海船平台及海上砧架(波浪)、烟囱(风)。

前面已经说明过，这个分类决不是详尽的，但也确实给我们指出在范围非常广泛的各种结构里，疲劳破坏的可能性必须在设计阶段就应予以考虑。

焊接结构的设计人员比起过去那些只采用铆接结构的设计人员有着更大的方便——那就是焊接工艺的多方面适用性。由于这种原因，他在接头的布置和详细设计上就有着更大的选择自由。不过以后还会说明，如果疲劳裂纹确实发生，这些裂纹必然发生在应力集中点上，而且事实上，一个结构的疲劳特征主要决定于它所包含的应力集中的严重程度。因为所有接头不可避免地是应力集中点，自然疲劳破坏很可能发生在接头位置上，而且受重复加载时，一个结构的特征在很大程度上取决于这些接头的细节设计。在疲劳加载条件下，不同形式焊接接头之间的特征，与不同形式铆接接头之间的特征相比，有更为大得多的差异。