

金属材料的腐蚀疲劳

王荣著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是作者吸取前人在腐蚀疲劳研究成果的基础上,总结近 10 年的研究成果而撰写的。书中内容包括:(1)根据局部应变法的基本假设,建立了切口件腐蚀疲劳裂纹起始的力学模型,并导出了腐蚀疲劳裂纹起始寿命表达式。(2)基于裂纹扩展是由裂尖假设材料元断裂引起的思路,考虑腐蚀过程的影响,建立了腐蚀疲劳裂纹扩展的腐蚀-钝化-断裂模型,导出了腐蚀疲劳裂纹扩展速率表达式。(3)系统地研究了腐蚀疲劳裂纹起始的超载效应,建立了变幅载荷下切口件腐蚀疲劳裂纹起始寿命的估算模型。(4)根据腐蚀疲劳裂纹扩展超载迟滞效应量化描述,建立了周期超载条件下腐蚀疲劳裂纹扩展速率计算模型,进而建立了变幅载荷下腐蚀疲劳裂纹扩展寿命预测模型。(5)总结了化学短裂纹现象的主要研究结果。本书对从事腐蚀疲劳研究、腐蚀疲劳寿命预测、环境敏感性断裂及腐蚀环境中结构安全性评估等相关领域的技术人员和高等院校师生具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料的腐蚀疲劳/王荣著. —西安:西北工业大学出版社,
2001.9

ISBN 7—5612—1391—3

I. 金… II. 王… III. 金属材料—腐蚀疲劳 IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 059855 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072 电话:029—8493844

网 址: <http://www.nwpup.com>

印 刷 者:西北工业大学出版社印刷厂

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32

印 张:5.75

字 数:138 千字

版 次:2001 年 9 月 第 1 版 2001 年 9 月 第 1 次印刷

印 数:1~2 000

定 价:15.00 元



作者简介

王 荣 陕西礼泉人。1994年毕业于西北工业大学材料科学与工程学院，获工学博士，现在西安石油学院任教。主要从事材料的环境敏感性断裂、腐蚀疲劳的定量规律、材料腐蚀机理与工程应用等领域的科研和教学工作。曾获省部级科技进步奖4项，并在《固体力学学报》、《中国腐蚀与防护学报》、《航空学报》、“Engineering Fracture Mechanics”等重要学术刊物及国内外学术会议发表论文30余篇。其中代表性学术论文有《腐蚀疲劳裂纹起始的力学模型》、《腐蚀疲劳裂纹扩展的断裂模型》、《变幅载荷下铝合金的腐蚀疲劳裂纹起始寿命》、“On the corrosion fatigue crack initiation model and expression of metallic notched elements”、“Overloading effects on corrosion fatigue crack initiation life and life prediction of aluminum notched elements under variable amplitude loading”等。

序

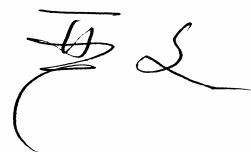
自从 1917 年 Haigh 首次提出腐蚀疲劳现象以来，人们对这一开裂现象已作了大量的研究。但由于腐蚀疲劳的复杂性，其涉及力学、化学、电化学、金属材料学及冶金学等学科的内容，尚有很多理论问题没有得到很好地解决，尤其是腐蚀疲劳的工程应用方面。在工程实践中，很多构件是在腐蚀性环境中工作的，如海洋结构、飞机结构及石油化工设备等，常因受循环载荷和腐蚀环境的交互作用发生腐蚀疲劳破坏。因此，腐蚀疲劳已成为工程实践中的一个十分重要的问题，腐蚀疲劳的研究也一直为科技工程界所关注，每年都有相当数量的论文发表。

对腐蚀疲劳的早期研究，主要是集中在腐蚀疲劳裂纹形成和扩展机制、各种环境因素对疲劳 $S-N$ 曲线和裂纹扩展的影响方面。虽然针对环境影响裂纹形成和扩展过程的不同机制，分别给出了腐蚀裂纹形成寿命和裂纹扩展速率的模型和表达式，但难以满足对腐蚀环境中结构设计和寿命预测的要求，其主要原因是缺少对腐蚀疲劳形成寿命和裂纹扩展定量规律的研究，腐蚀疲劳的定量理论还不很完善。腐蚀疲劳的定量描述是解决腐蚀疲劳工程应用的基本理论依据，本书正是针对这一重要问题的归纳与总结，也是它的价值之所在。

为了正确表述腐蚀疲劳裂纹起始寿命和裂纹扩展的定量规律，作者在吸取前人研究成果的基础上，结合自己的学术观点，将腐蚀疲劳过程中的疲劳损伤和腐蚀损伤及其交互作用综合考虑，抓住腐蚀疲劳断裂的主要控制因素，分别建立了工程上普遍存在的切口件腐蚀疲劳裂纹起始寿命的力学模型和裂纹体腐蚀疲

劳裂纹扩展的腐蚀-钝化-断裂模型，并导出了腐蚀疲劳裂纹起始寿命和腐蚀疲劳裂纹扩展速率表达式。对于变幅载荷下腐蚀疲劳寿命的估算，书中比较系统地研究了腐蚀疲劳裂纹起始和裂纹扩展的超载效应，分别建立了变幅载荷下腐蚀疲劳裂纹起始寿命和腐蚀疲劳裂纹扩展寿命的定量估算模型和具体步骤。同时，本书对腐蚀疲劳过程的化学短裂纹现象也进行了很好的总结。

本专著的内容基本上包含了腐蚀疲劳定量理论的主要方面，充分体现了理论与实践的结合，反映了腐蚀疲劳定量规律研究的学科前沿状况。书中的大部分内容来自作者自己的研究成果，一些观点已经得到同行专家的认可。同时，作者也坦率指出书中的不足。本书的出版对腐蚀疲劳的定量研究及其工程应用将会起到重要的推动和促进作用。



2001 年 6 月

作者自序

腐蚀疲劳研究的工程应用主要包括两个方面，一是精确地估算或预测实际构件的腐蚀疲劳寿命，对腐蚀环境中服役结构的安全性和耐久性进行评估，预防结构因腐蚀疲劳失效所产生的巨大经济损失；二是对材料的抗腐蚀疲劳性能进行评价，优选材料和优化工艺，延长构件的腐蚀疲劳寿命，同时也为开发新的抗腐蚀疲劳材料提供依据。要很好地解决这两个方面的问题，必须建立腐蚀疲劳定量理论的基础，本书正是围绕这一主题而撰写的。

随着断裂力学的发展，构件腐蚀疲劳过程主要包括裂纹形成和扩展两个阶段，其腐蚀疲劳寿命的预测也分为两部分进行。因为这两段的机理和控制参量不同，所建立的定量理论模型也应不同。

根据局部应变法的基本思路，首先验证了应变疲劳公式在腐蚀疲劳中的适用性，进而根据切口根部局部应变范围的计算，导出了切口件腐蚀疲劳起始的断裂模型和裂纹起始寿命表达式，这些内容构成了本书的第 2，3 章。

虽然线性叠加模型和其各种修正形式仍作为求取腐蚀疲劳裂纹扩展速率的经典方法，但基本是把疲劳过程和腐蚀过程单独处理，没有给出腐蚀疲劳裂纹扩展速率公式。在总结和吸收前人研究精华的基础上，我们认为裂尖应力强度因子幅、裂尖裸露金属的腐蚀溶解和裂尖钝化是控制腐蚀疲劳裂纹扩展的基本因素，因而建立了腐蚀疲劳裂纹扩展的腐蚀-钝化-断裂模型，导出了腐蚀疲劳裂纹扩展速率的表达式，同时探讨了材料性能和氢脆对裂纹扩展速率的影响，这些内容构成本书的第 4 章。

本书第 5 章主要论述了变幅载荷下腐蚀疲劳寿命的估算模型。根据腐蚀疲劳裂纹起始的超载效应和 Miner 累积损伤定则,建立了变幅载荷下腐蚀疲劳裂纹起始寿命的估算模型并进行了验证。第 6 章系统分析了腐蚀疲劳裂纹扩展的超载效应,建立了腐蚀疲劳裂纹扩展寿命的估算模型。这些研究工作是集中在铝合金结构材料上的。对腐蚀疲劳过程中化学短裂纹现象在本书第 7 章中进行了介绍,包括化学短裂纹定义、主要结果和影响因素。

本书引用的试验数据大部分是由作者亲自完成的。书中没有包含对腐蚀疲劳的加载波形效应,是本书的不足。

本书的内容主要集中在腐蚀疲劳的定量描述方面,基本覆盖了腐蚀疲劳研究工程应用的各个主要方面。其中的研究结果曾得到原航空航天工业部“八五”项目《AFFD》系统工程、国家自然科学基金的资助。本书的成功完成,得益于前人研究基础的启发、我的导师郑修麟先生的悉心指导、路民旭博士的通力协作以及各个方面的支持和帮助,作者在此谨致谢意。

西安工业学院材料科学与工程系严文教授在百忙中详细审阅了本书的每个章节,并为本书作序,在此表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中错误和疏漏之处在所难免,恳请同行和读者不吝赐教。

王 荣

2001 年 2 月

目 录

第1章 腐蚀疲劳断裂	1
1.1 引言	1
1.2 腐蚀疲劳现象	2
1.2.1 腐蚀疲劳的定义	2
1.2.2 腐蚀疲劳的类	3
1.2.3 腐蚀疲劳的特征	4
1.2.4 腐蚀疲劳的过程	5
1.3 腐蚀疲劳机理	6
1.3.1 气相腐蚀疲劳理	6
1.3.2 液相腐蚀疲劳机理	7
1.4 腐蚀疲劳的工程应用.....	8
1.4.1 构件腐蚀疲劳寿命估算的基本思路	9
1.4.2 结构抗腐蚀疲劳损伤设计	10
1.4.3 减缓腐蚀疲劳的措施	11
1.5 小结	14
第2章 应变腐蚀疲劳裂纹起始寿命	15
2.1 引言	15
2.2 应变腐蚀疲劳裂纹起始寿命	16
2.2.1 应变疲劳假设	16

2.2.2	腐蚀疲劳损伤模型	17
2.2.3	模型验证	20
2.3	裂纹起始寿命的频率效应	21
2.4	应力腐蚀疲劳裂纹起始寿命公式	24
2.4.1	表达式的引出	24
2.4.2	模型验证与试验结果再分析	25
2.5	小结	28
 第3章 切口件腐蚀疲劳裂纹起始寿命		29
3.1	引言	29
3.2	裂纹起始寿命的试验方法	31
3.2.1	裂纹起始寿命的定义	31
3.2.2	常用切口件	31
3.2.3	腐蚀疲劳加载	32
3.3	常见腐蚀疲劳裂纹起始寿命模型	32
3.3.1	Kim 裂纹起始模型	32
3.3.2	位错偶极子模型	33
3.4	切口根部局部应变范围的计算	34
3.5	腐蚀疲劳裂纹起始的力学模型	36
3.5.1	基本假设	36
3.5.2	腐蚀疲劳裂纹起始寿命表达式	36
3.6	试验验证	37
3.6.1	试验方法	37
3.6.2	试验结果与分析	38
3.6.3	加载频率的影响	40
3.6.4	腐蚀疲劳裂纹起始寿命的一般表达式	41
3.7	文献中结果再分析	41
3.8	腐蚀疲劳裂纹起始抗力系数与门槛值	44

3.8.1 裂纹起始抗力系数	44
3.8.2 裂纹起始门槛值	47
3.9 腐蚀环境对裂纹起始寿命影响的定量评价	51
3.10 小结	53
第 4 章 腐蚀疲劳裂纹扩展	54
4.1 引言	54
4.2 裂纹扩展试验方法	55
4.2.1 常用试件	55
4.2.2 载荷环境谱	55
4.2.3 裂纹测量	55
4.2.4 降载法	56
4.2.5 数据处理	57
4.3 腐蚀疲劳裂纹扩展的过程	58
4.3.1 腐蚀疲劳裂纹扩展的过程	58
4.3.2 腐蚀疲劳裂纹扩展的一般规律	59
4.4 腐蚀疲劳裂纹扩展速率模型	61
4.4.1 叠加模型	61
4.4.2 过程竞争模型	62
4.4.3 位错偶极子模型	63
4.4.4 求腐蚀疲劳裂纹扩展速率的工程方法	64
4.5 腐蚀疲劳裂纹扩展的断裂模型	65
4.5.1 腐蚀疲劳裂纹扩展的假设	65
4.5.2 腐蚀疲劳裂纹扩展的断裂模型	66
4.5.3 腐蚀疲劳裂纹扩展速率表达式	69
4.6 试验验证	70
4.6.1 试验条件	70
4.6.2 试验结果与分析	71

4.6.3	应力比的影响	74
4.6.4	加载频率的影响	74
4.6.5	LY12CZ 和 LC4CS 铝合金裂纹扩展性能的评价	75
4.6.6	铝合金腐蚀疲劳裂纹扩展速率的一般表达式	79
4.7	文献中试验结果再分析	83
4.7.1	铝合金腐蚀疲劳裂纹扩展速率	83
4.7.2	钢的腐蚀疲劳裂纹扩展速率	87
4.7.3	钛合金腐蚀疲劳裂纹扩展速率	88
4.8	关于腐蚀疲劳裂纹扩展系数	90
4.8.1	裂纹扩展系数	90
4.8.2	阳极溶解的影响	91
4.8.3	氢脆的影响	93
4.8.4	环境温度的影响	100
4.9	关于腐蚀疲劳裂纹扩展门槛值	101
4.9.1	裂纹扩展门槛值	101
4.9.2	应力比的影响	103
4.10	小结	104
第5章 变幅载荷下腐蚀疲劳裂纹起始寿命		106
5.1	引言	106
5.2	腐蚀疲劳裂纹起始的超载效应	106
5.2.1	超载试验方法	106
5.2.2	超载后的腐蚀疲劳裂纹起始	108
5.2.3	腐蚀疲劳裂纹起始门槛值与超载幅度间的关系	113
5.2.4	超载后加载方式的影响	115
5.2.5	周期超载的影响	117
5.2.6	关于腐蚀疲劳裂纹起始超载效应的机制	120
5.2.7	完善的腐蚀疲劳裂纹起始寿命表达式	122

5.3	变幅载荷下腐蚀疲劳裂纹起始寿命	124
5.3.1	变幅载荷谱	124
5.3.2	裂纹起始寿命试验结果	128
5.4	腐蚀疲劳裂纹起始寿命估算模型	129
5.4.1	寿命估算应该考虑的问题	129
5.4.2	Miner 损伤定则	130
5.4.3	变幅载荷下切口件腐蚀疲劳裂纹起始寿命估算模型	131
5.4.4	估算与试验结果对比	132
5.4.5	变幅载荷下腐蚀疲劳裂纹起始寿命统计分析	134
5.5	小结	136
 第6章 变幅载荷下腐蚀疲劳裂纹扩展		138
6.1	引言	138
6.2	腐蚀疲劳裂纹扩展效应	138
6.2.1	超载试验条件	138
6.2.2	单次超载效应	139
6.2.3	周期超载条件下的裂纹扩展	142
6.3	周期超载裂纹扩展速率估算模型	145
6.3.1	超载模型	145
6.3.2	最大迟滞点的确定	146
6.3.3	超载迟滞循环数的计算	148
6.3.4	周期超载裂纹扩展速率估算模型	149
6.3.5	预测结果与试验结果对比	151
6.4	变幅载荷下腐蚀疲劳裂纹扩展估算模型	154
6.4.1	变幅载荷谱	154
6.4.2	变幅载荷下腐蚀疲劳裂纹扩展估算模型	155
6.4.3	试验验证	155
6.5	小结	157

第 7 章 化学短裂纹	159
7.1 引言	159
7.2 短裂纹的划分与定义	159
7.3 化学短裂纹的主要现象及结果	161
7.3.1 化学短裂纹尺寸效应	161
7.3.2 化学短裂纹尺寸限	163
7.3.3 电化学电位的影响	164
7.3.4 力学参数的影响	167
7.3.5 加载条件的影响	168
7.4 化学短裂纹效应的机制	170
7.5 小结	173
附录 常用裂纹体试件的应力强度因子.....	174
F.1 单边拉伸裂纹试件.....	174
F.2 中心裂纹拉伸试件 (CCT)	174
F.3 紧凑拉伸试件 (CT)	174
F.4 三点弯曲试件.....	175

参考文献

第 1 章 腐蚀疲劳断裂

1.1 引言

承受交变应力作用的结构或构件，虽然所受的应力小于材料的屈服极限，但经一定时间的服役过程后，常因发生疲劳破坏而损坏。疲劳理论与试验研究已取得了巨大的进展，它为工程上结构或构件无限寿命或长寿命疲劳设计，以及为减轻重量而采用的有限寿命疲劳设计提供了依据。

实际工程结构、工业设备以及各类承载构件都在一定的环境中服役。大多数使用环境均不同于试验室环境，都存在不同程度的腐蚀性。构件所产生的疲劳破坏大多与服役的环境相关，疲劳破坏前的服役时间随环境介质腐蚀性的增强而缩短，即腐蚀加速疲劳破坏。这时，疲劳破坏在循环应力和腐蚀环境协同作用下发生，即产生了腐蚀疲劳。

腐蚀疲劳是结构件既受循环应力的作用，又受腐蚀环境的侵蚀，是在两者协同作用下的一种更为严重的腐蚀-机械破坏形式，是工程实践中的各种承受循环载荷的结构所面临的严重问题。诸如海洋结构、石油化工设备、飞机结构等，常因受循环载荷和腐蚀环境的复合作用发生疲劳破坏，往往造成灾难性事故。

严格地讲，实际工程中遇到的绝大多数疲劳破坏，都属于腐蚀疲劳。不受环境影响的“纯”疲劳，只可能出现在真空条件下。

许多试验研究业已证明，即便在干燥、纯净空气的环境下，也会降低疲劳强度和加快疲劳裂纹扩展。只不过大气的这种影响比起其它强腐蚀性环境要小得多。因此，通常将试验室大气或干燥大气环境中的疲劳按“纯”疲劳处理。

腐蚀疲劳现象早在 1917 年就已由 Haigh 首先提出，后来 Evans V. R. 认为它是工程实践中的一个很重要的问题。可见，国外学者对腐蚀疲劳已做了长期的研究，其研究成果在 20 世纪 70 年代末和 80 年代初得到了很好的总结^[1~4]。在这些文献中，主要报道了腐蚀疲劳裂纹的形成和扩展机制，以及各种因素对疲劳的 $S-N$ 曲线和裂纹扩展速率曲线的影响。

进入 20 世纪 80 年代以后，随着海洋工程的发展，腐蚀疲劳的研究更注重实际工程的应用^[5]。在飞机结构的腐蚀疲劳研究方面，美国海军和北大西洋公约组织做了大量的试验研究^[6,7]。在国内，原航空工业总公司专门设立《AFFD》系统工程，从 1988 年起开展了飞机结构抗腐蚀疲劳损伤设计技术研究，并组织出版了有关飞机结构腐蚀疲劳方面的专著^[8]。这些工作，无疑地将会推动我国对腐蚀疲劳的研究及其在工程中的应用。但是，在腐蚀疲劳的工程应用方面，其研究结果还远不能满足实际工程的需要。

1.2 腐蚀疲劳现象

1.2.1 腐蚀疲劳的定义

在循环载荷和腐蚀环境协同、交互作用下，工程结构或构件因开裂或断裂提前失效的现象，称为腐蚀疲劳。

通常，可以将干燥、纯净的空气或试验室大气环境视为“惰性”介质，把空气中的疲劳看成“纯”疲劳，并把空气中的疲劳

数据当作研究腐蚀疲劳的对比依据。

一般的腐蚀疲劳定义为由循环应力和腐蚀环境同时起作用的金属材料断裂。但实际工程构件发生腐蚀疲劳并不一定是两者同时作用的，可能会出现另外两种情况，一是腐蚀介质间隔作用，即腐蚀环境是变化的；二是预先发生腐蚀，然后产生疲劳。

预先经过腐蚀的试件，在空气中进行疲劳试验，也会明显降低疲劳寿命，如图 1.1。可见，这种预先腐蚀的作用，也会明显降低材料的疲劳强度。

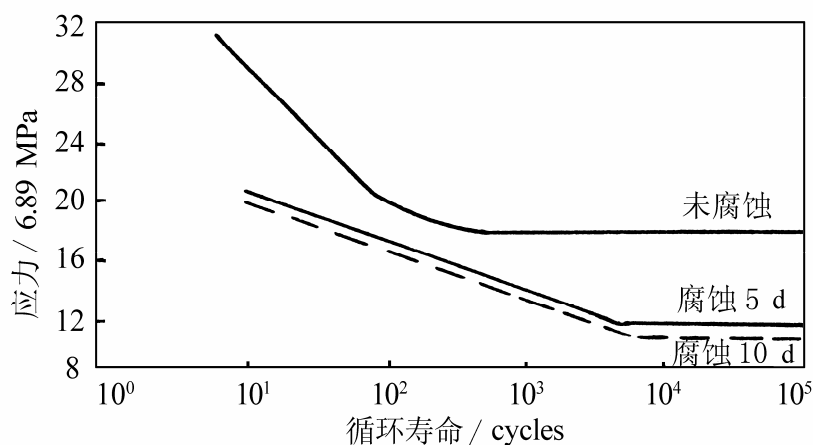


图 1.1 经 20%NaCl 喷雾后硬铝的疲劳特性^[9]

1.2.2 腐蚀疲劳的分类

腐蚀疲劳一般按腐蚀介质进行分类，有气相腐蚀疲劳和液相腐蚀疲劳。从腐蚀介质作用的化学机理上分，气相腐蚀疲劳过程中，气相腐蚀介质对金属材料的作用属于化学腐蚀；而液相腐蚀疲劳通常指在电解质溶液环境中，液相腐蚀介质对金属材料的作用属于电化学腐蚀。

腐蚀疲劳按试验控制的参数，又分为应变腐蚀疲劳和应力腐蚀疲劳。前者是控制应变变量，得到应变变量与腐蚀疲劳寿命的关系；后者是控制试验应力，得到应力与腐蚀疲劳寿命的关系。

1.2.3 腐蚀疲劳的特征

腐蚀疲劳除具有常规疲劳的特点外, 由于受腐蚀性环境的侵蚀, 是一个很复杂的材料或构件失效现象, 影响因素众多, 包括冶金、材料、环境、应力、时间、温度等, 其中任何一个因素的变化都会影响到腐蚀疲劳性能。

腐蚀疲劳损伤的特征之一表现为: 材料或机体抗疲劳性能的降低, 如图 1.2 所示。在相同的应力水平, 尤其在接近空气疲劳极限的情况下, 腐蚀疲劳寿命远较一般疲劳寿命短, 往往要缩短许多倍。因此, 在腐蚀疲劳条件下, 金属材料往往没有明显的疲劳极限, 通常采用给定循环次数下的条件疲劳极限。对有些金属材料, 表现不出疲劳极限的现象。

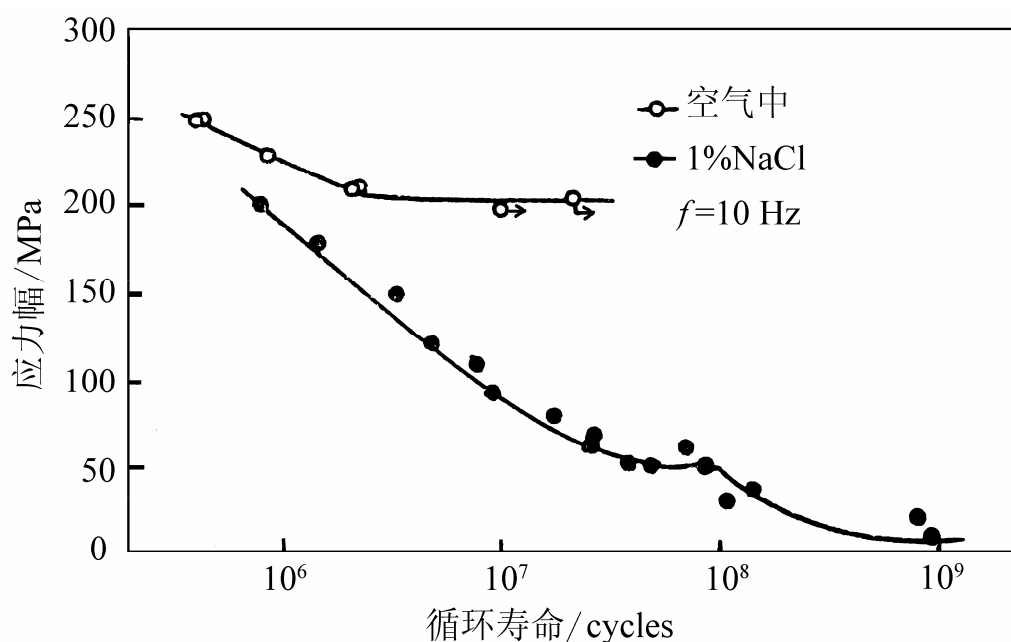


图 1.2 0.16C-0.49Mn-0.27Si 钢的旋转弯曲疲劳性能曲线^[10]

腐蚀疲劳的条件疲劳极限同金属材料在大气中的机械性能没有直接的关系。常规疲劳中, 常常采用的一些提高材料疲劳强度的措施, 如提高材料屈服强度或极限强度, 对腐蚀疲劳的条件