

材料疲劳理论与工程应用

郑修麟 王 泓 鄢君辉 乙晓伟 著



科学出版社

013026128

TG111.8
01

材料疲劳理论与工程应用

郑修麟 王 泓 鄢君辉 乙晓伟 著



科学出版社

TG111.8
01



北航

C1632986

221020610

内 容 简 介

本书扼要介绍了疲劳断裂的微观机理,重点论述了材料疲劳失效的宏观规律及其工程应用。主要内容包括宏观力学模型的建立、基本疲劳公式的导出、应变疲劳公式、应力疲劳公式、疲劳裂纹起始寿命公式、疲劳裂纹扩展速率公式、特殊服役环境中的疲劳、疲劳试验数据的统计分析、变幅载荷下的疲劳寿命、典型结构件的寿命预测、疲劳延寿技术和非金属材料的疲劳等。

本书可作为材料、机械、结构和强度等学科大学生、研究生和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

材料疲劳理论与工程应用 / 郑修麟等著. —北京: 科学出版社, 2013. 2
ISBN 978-7-03-036648-1

I. ①材… II. ①郑… III. ①金属疲劳—研究 IV. ①TG111.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 022313 号

责任编辑: 张海娜 吴凡洁 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 2 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013 年 2 月第一次印刷 印张: 36 3/4

字数: 736 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

19 世纪 60 年代德国工程师 Wöhler 试验测定了第一条疲劳寿命曲线，成为现代疲劳试验与理论研究的起点。自那时起，随着交通运输、机械制造、能源、化工、造船和航空等工业的发展，疲劳研究日益显示其重要性。对金属材料的宏观疲劳性能和微观机理的研究，深入到疲劳损伤的各个阶段，提出了改善金属材料疲劳抗力和延长金属结构疲劳寿命的技术措施。在工程应用的研究中，形成了金属结构抗疲劳设计、抗疲劳制造的若干准则和寿命预测模型，对保证结构的安全运行、减少财产和生命的损失，起了重要的作用。高新技术的发展，以及新材料在高新技术领域中的应用，给疲劳研究注入新的活力。一方面，金属疲劳的研究领域不断扩大；另一方面，新型材料，如结构陶瓷材料、高分子材料、复合材料、生物材料和电子元器件等的疲劳研究不断进行，以图解决高新技术的发展带来的疲劳问题。

由此可见，疲劳研究源于工业生产，又服务于工业生产。虽然疲劳研究的历史已有一个半世纪了，取得了一系列的重大成果，但疲劳研究仍是当前学术界和工业界所关注的重要课题之一，因为现代工业和高新技术的发展会给疲劳研究提出新的课题。高新技术的发展是无止境的，疲劳研究也会不断向前发展。

疲劳试验与理论研究的发展，不仅需要疲劳研究者的努力，还有赖于相关学科、技术和工业的发展。电子显微镜在疲劳研究中的应用，使人们对疲劳损伤的各个阶段的微观机理有了全面而深入的认识。电液伺服疲劳试验机与电子计算机的应用，不仅可在等幅载荷下进行控制波形、频率、温度和环境介质的应力和应变疲劳试验，提供精确、可靠的疲劳试验数据，还可在随机谱下进行结构件以至全尺寸结构的疲劳试验，获得的试验数据可用于验证疲劳寿命的预测模型。最近，新的物理测试仪器如红外热像仪，与疲劳试验相结合，可以半定量甚至定量地探测材料或结构件的疲劳损伤，快速地测定材料的疲劳极限以及疲劳极限的概率分布。

对疲劳失效宏观规律的认知和把握，是预测或估算结构件疲劳寿命的首要条件，涉及结构件的载荷谱、材料疲劳寿命曲线以及相应的表达式、累积疲劳损伤定则和小载荷省略准则。固体力学是导出材料疲劳寿命表达式的力学基础。对材料疲劳损伤微观机理的认识，为建立材料疲劳的力学模型提供了物理基础。20

世纪 50 年代,电子显微镜在疲劳研究中的应用和线弹性断裂力学的发展,对疲劳裂纹扩展的研究起了巨大的推动作用。先后建立了疲劳裂纹扩展的力学模型,导出了疲劳裂纹扩展速率表达式,而且还提出结构的损伤容限设计准则和疲劳裂纹扩展寿命的预测模型。

在工程应用中,结构的疲劳寿命通常分为疲劳裂纹起始寿命和疲劳裂纹扩展寿命,两者相加即得疲劳总寿命。疲劳裂纹起始寿命是估计安全寿命和制订安全检修期的主要依据,高强度构件始裂寿命占总寿命的 80% 以上,始裂寿命的估算有重大的实用意义。工程结构常在变幅载荷下服役,为精确地预测构件在变幅载荷下的疲劳裂纹起始寿命,需要对金属中疲劳裂纹起始的过程和机理、疲劳裂纹起始寿命的定义和测定方法,以及疲劳裂纹起始的力学模型和公式进行相关研究和试验验证。

结构工程师所使用的材料疲劳性能数据,都是在等幅载荷下测定的,而实际的构件承受的是变幅载荷,因此需要一个法则,只有将变幅载荷下的疲劳损伤换算为等幅载荷下的省略疲劳损伤,才能进行结构的寿命预测或估算,这个法则就是累积疲劳损伤定则和小载荷省略准则。累积疲劳损伤定则和小载荷省略准则的研究,均有赖于对材料疲劳损伤微观机理的认识和疲劳宏观力学模型的建立。

可以认为,对材料疲劳损伤微观机理和疲劳宏观力学模型的研究,是疲劳理论研究的核⼼,而疲劳理论的研究又是为了解决工程应用问题——结构疲劳寿命的预测和延寿,这是编写本书的主要思路和出发点。本书主要是总结作者及其团队近 30 年所作的疲劳研究,主要是材料疲劳的宏观规律,包括基本的疲劳公式、疲劳裂纹起始寿命、特殊服役环境中的疲劳、变幅载荷下疲劳寿命及其概率分布的预测模型,以及构件的延寿技术等诸多方面。同时,本书也适当地总结或介绍国内外同行的研究成果,并力图给出理论上的说明。作者希望本书的出版,有助于材料科学与工程、机械与结构设计、制造专业的研究生和工程师学习材料疲劳的基本知识、疲劳研究工作的思路和方法以及材料疲劳研究的新成果,也有助于与国内外同行进行疲劳研究方面的经验交流。同时,对于书中可能存在不足之处,恳请读者给予批评指正。

在近 30 年的研究工作中,作者曾获得原航空工业部“六五”预研经费、中国铁道科学研究院基金、原铁道部大桥工程局基金、国家自然科学基金、国家教育委员会博士点基金、航空科学基金等多方面的资助。在试验工作中,红原锻铸厂力学性能室的同志给予了无私的帮助。作者所在课题组的许多成员,其中包括博士研究生和硕士研究生参加了很多研究工作,他们的研究成果是本书的重要组成部分。作者对他们表示真诚的谢意。

需要特别致谢的是瑞士洛桑理工学院金属结构研究室 Badoux 教授、Hirt 教授在 1980~1982 年对作者的支持与帮助，以及中国航空研究院 623 所王俊扬总工程师、中国铁道科学研究院史永吉研究员，以及课题组徐振华等同志的支持。

我还要感谢我的家人，尤其是我的夫人谢玉铉女士几十年对我工作的支持，她教育子女并承担了全部家务，让我安心研究课题。

最为重要的是，在我身患重病已不能写作期间，承蒙王泓、鄢君辉等慨然允诺完成尚未完成的书稿，并审阅全部书稿。在此，我诚挚地邀请他们作为本书的共同作者，以报答他们于万一。

郑修麟

2008 年 1 月 26 日

主要符号对照表

材料力学性能符号

E : 弹性模量
 σ_s : 屈服强度
 $\sigma_{0.2}$: 条件屈服强度
 σ_b : 抗拉强度
 σ_f : 断裂强度
 ϵ_f : 断裂延性
 ψ : 断面收缩率
 δ : 延伸率
 n : 应变硬化指数
 K : 强度系数
 K' : 循环强度系数
 n' : 循环应变硬化指数

疲劳公式中符号

$S-N$ 曲线: 应力疲劳寿命曲线
 N_f : 疲劳寿命
 S : 作用于切口试件上的名义应力, 即净断面平均应力
 $S_{\max}$: 循环最大名义应力
 $S_{\min}$: 循环最小名义应力
 ΔS : 名义应力范围, $\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$
 S_a : 名义应力幅, $S_a = \Delta S / 2$
 S_m : 循环平均名义应力, $S_m = (S_{\max} + S_{\min}) / 2$
 R : 应力比, $R = S_{\min} / S_{\max}$
 $\Delta \epsilon$: 循环总应变范围, 或切口根部的局部总应变范围
 ϵ_a : 循环应变幅, 或切口根部的局部应变幅
 $\Delta \epsilon_p$: 循环塑性应变范围
 $\Delta \epsilon_e$: 弹性应变范围

σ_{as} : 饱和应力幅
 $\Delta \epsilon_{ps}$: 饱和塑性应变范围
 ϵ_{as} : 饱和塑性应变幅, $\epsilon_{as} = \Delta \epsilon_{ps} / 2$
 α, β, γ : 通常表示由试验确定的常数
 b : 疲劳强度指数
 σ'_f : 疲劳强度系数
 c : 疲劳延性指数
 ϵ'_f : 疲劳延性系数
 σ_{-1} : 实验测定的疲劳极限
 $\Delta \epsilon_e$: 理论应变疲劳极限
 A : 应变疲劳抗力系数
 $\Delta \epsilon_D$: 损伤应变范围
 k : 频率修正函数中的指数
 K_t : 弹性应力集中系数, 简称应力集中系数
 K'_t : 有效应力集中系数或复合应力集中系数
 K_σ : 弹塑性应力集中系数
 K_ϵ : 弹塑性应变集中系数
 ΔK_{Ia} : 表观应力强度因子范围
 ρ : 切口根部半径
 a_i : 初始裂纹长度
 N_i : 疲劳裂纹起始寿命
 $(\Delta \sigma)_{th}$: 用名义应力幅表示的疲劳裂纹起始门槛值
 $\Delta \sigma_{eqv}$: 当量应力幅, 当 $K_t = 1.0$ 、 $R = -1$ 时, $\Delta \sigma_{eqv} = S_a$, 即为名义应力幅
 C_i : 疲劳裂纹起始抗力系数
 $(\Delta \sigma_{eqv})_{th}$: 用当量应力幅表示的疲劳裂纹起始门槛值
 r : 相关系数
 s : 标准差
 σ : 通常表示加于光滑试件上的应力, 或切口根部的局部应力

σ_a : 加于光滑试件上的应力幅

σ_{ac} : 用应力幅表示的理论疲劳极限

C_f : 应力疲劳抗力系数

ΔS_{eqv} : 当量应力范围

$(\Delta S_{eqv})_{th}$: 当量应力范围门槛值

K_{max} : 应力强度因子的最大值

K_{min} : 应力强度因子的最小值

ΔK : 应力强度因子范围, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$

ΔK_{th} : 疲劳裂纹扩展门槛值

da/dN : 疲劳裂纹扩展速率

K_{IC} : 平面应变断裂韧性

B : 疲劳裂纹扩展系数

ΔK_{th0} : $R=0$ 时的疲劳裂纹扩展门槛值

K_{op} : 裂纹张开应力强度因子

K_{cl} : 裂纹闭合应力强度因子

目 录

前言

主要符号对照表

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 疲劳研究的目的	2
1.3 疲劳研究的内容和方法	3
1.4 疲劳研究中应考虑的因素	6
1.5 本书编写的目的与主要内容	9
1.6 结语	11
参考文献	11

第一部分 基本的疲劳公式

第 2 章 应变疲劳公式	17
2.1 引言	17
2.2 应变疲劳的由来与发展	17
2.3 应变疲劳寿命曲线与表达式	19
2.4 应变疲劳公式	24
2.5 应变疲劳寿命的预测	29
2.6 高温应变疲劳表达式	33
2.7 结语	36
参考文献	36
第 3 章 循环局部应变范围的近似公式	40
3.1 引言	40
3.2 切口的应力-应变分析	40
3.3 局部应变范围的近似计算公式	46
3.4 局部应变范围的通用近似计算公式	51
3.5 超载对局部应变范围的影响	52
3.6 结语	53
参考文献	54

第4章 疲劳裂纹起始寿命公式	57
4.1 引言	57
4.2 疲劳裂纹起始的过程和机理	58
4.3 疲劳裂纹起始寿命	62
4.4 疲劳裂纹起始的力学模型	66
4.5 铝合金的疲劳裂纹起始寿命与门槛值	68
4.6 高强度低合金钢的疲劳裂纹起始寿命	70
4.7 超高强度钢的疲劳裂纹起始寿命	73
4.8 钛合金的疲劳裂纹起始寿命	75
4.9 疲劳裂纹起始抗力系数与门槛值	75
4.10 金属材料疲劳裂纹起始寿命的预测	79
4.11 结语	82
参考文献	83
第5章 应力疲劳寿命公式	88
5.1 引言	88
5.2 应力疲劳寿命公式与疲劳极限的研究	89
5.3 应力疲劳寿命的一般公式	91
5.4 金属材料在交变对称循环载荷下的应力疲劳寿命与表达式	94
5.5 金属材料不同应力比下的应力疲劳寿命与表达式	99
5.6 理论疲劳极限	103
5.7 等寿命图及表达式	108
5.8 疲劳切口敏感度	114
5.9 切口试件的疲劳寿命表达式	116
5.10 复合应力状态下金属材料的疲劳强度	118
5.11 结语	120
参考文献	121
第6章 疲劳裂纹扩展速率公式——疲劳裂纹扩展的力学模型	124
6.1 引言	124
6.2 疲劳裂纹扩展的一般规律	125
6.3 影响疲劳裂纹扩展速率的因素	126
6.4 疲劳裂纹扩展的机理	129
6.5 疲劳裂纹扩展的力学模型	135
6.6 钢的疲劳裂纹扩展速率	140
6.7 铝合金的疲劳裂纹扩展速率	145
6.8 钛合金疲劳裂纹扩展速率	147

6.9 疲劳裂纹扩展门槛值	149
6.10 金属材料疲劳裂纹扩展速率的预测	153
6.11 描述材料完整疲劳裂纹扩展行为的新公式	155
6.12 关于疲劳短裂纹问题	166
6.13 结语	169
参考文献	169
第7章 热疲劳寿命表达式	174
7.1 引言	174
7.2 模具钢的热寿命表达式	174
7.3 热障涂层的热疲劳寿命表达式	177
7.4 结语	180
参考文献	180

第二部分 特殊服役条件下的疲劳

第8章 金属的低温疲劳	185
8.1 引言	185
8.2 低温下金属材料的拉伸性能与疲劳极限	186
8.3 低温下金属材料的应变疲劳	188
8.4 金属材料的低温疲劳裂纹起始寿命	192
8.5 低温疲劳裂纹起始寿命的预测	196
8.6 低温下金属材料疲劳裂纹扩展的一般规律	199
8.7 低温下铝合金的疲劳裂纹扩展速率	205
8.8 低温下高强度低合金钢的疲劳裂纹扩展速率	207
8.9 低温下金属的疲劳裂纹扩展门槛值	210
8.10 具有面心立方晶格金属的低温疲劳裂纹扩展速率的预测	213
8.11 低碳钢的低温疲劳裂纹扩展速率的预测	215
8.12 低温下疲劳裂纹扩展的韧脆转变	216
8.13 结语	218
参考文献	219
第9章 金属的腐蚀疲劳	222
9.1 引言	222
9.2 气体环境对金属疲劳性能的影响	223
9.3 液体环境对金属疲劳性能的影响	229
9.4 腐蚀环境中金属的应变疲劳寿命	236

9.5	金属材料的腐蚀疲劳裂纹起始寿命	240
9.6	关于腐蚀疲劳裂纹起始抗力系数和门槛值	244
9.7	腐蚀环境中金属的疲劳裂纹扩展一般规律	245
9.8	腐蚀环境中铝合金的疲劳裂纹扩展速率	248
9.9	钛合金的腐蚀疲劳裂纹扩展速率	254
9.10	腐蚀环境中钢的疲劳裂纹扩展速率	255
9.11	结语	257
	参考文献	258
第 10 章	金属在冲击载荷下的疲劳	261
10.1	引言	261
10.2	关于冲击疲劳的研究	261
10.3	试件柔度的计算与试验标定	264
10.4	冲击力的计算与测定	268
10.5	冲击疲劳试验条件下 K_I 的表达式	269
10.6	冲击疲劳载荷下的疲劳裂纹起始寿命	270
10.7	预测冲击疲劳裂纹起始寿命的可能性	273
10.8	冲击疲劳载荷下金属的疲劳裂纹扩展速率	274
10.9	结语	276
	参考文献	276
第 11 章	金属的微动疲劳	278
11.1	引言	278
11.2	微动损伤的特征与机理	278
11.3	微动疲劳的试验方法	281
11.4	影响微动损伤的因素	282
11.5	微动疲劳寿命表达式	286
11.6	微动疲劳损伤的防治	289
11.7	结语	291
	参考文献	291

第三部分 疲劳数据的统计分析 with 带存活率的疲劳寿命曲线表达式

第 12 章	疲劳试验数据的统计分析方法	295
12.1	引言	295
12.2	疲劳试验数据的分散性	295
12.3	疲劳试验数据的统计分析基础	297

12.4	正态分布	300
12.5	韦布尔分布	306
12.6	绘制安全寿命曲线的作图法	307
12.7	疲劳极限的试验测定	310
12.8	结语	313
	参考文献	314
第 13 章	带存活率的疲劳寿命曲线与疲劳强度的概率分布	315
13.1	引言	315
13.2	绘制带存活率的疲劳寿命曲线的解析法 (I)	315
13.3	疲劳强度的概率分布	319
13.4	疲劳寿命概率分布对 $P-S-N$ 曲线和疲劳强度概率分布的影响 ..	320
13.5	绘制带存活率的疲劳寿命曲线的解析法 (II)	323
13.6	确定带存活率疲劳寿命曲线和疲劳强度概率分布的简化解析法 ..	325
13.7	确定带存活率的疲劳寿命曲线的三种方法的趋同性	329
13.8	关于疲劳裂纹扩展速率的分散性与 $P-\Delta K-da/dN$ 曲线	334
13.9	结语	335
	参考文献	336

第四部分 变幅载荷下疲劳寿命估算模型

第 14 章	疲劳裂纹起始的超载效应	339
14.1	引言	339
14.2	疲劳裂纹起始的超载效应研究的简要回顾	339
14.3	高强度铝合金疲劳裂纹起始的超载效应	344
14.4	超载效应因子	346
14.5	高强度低合金钢疲劳裂纹起始的超载效应	348
14.6	中碳钢疲劳裂纹起始的超载效应	353
14.7	铝合金孔挤压件疲劳裂纹起始的超载效应	354
14.8	结语	355
	参考文献	355
第 15 章	变幅载荷下疲劳寿命及概率分布的预测	358
15.1	引言	358
15.2	寿命预测中应考虑的因素	359
15.3	变幅载荷下铝合金切口件疲劳裂纹起始寿命的预测模型	363
15.4	变幅载荷下低合金高强度钢的切口件疲劳裂纹起始寿命的预测 ..	366

15.5	变幅载荷下中碳钢切口件的疲劳寿命的预测	369
15.6	铝合金孔壁挤压件的寿命预测	372
15.7	变幅载荷下铝合金疲劳裂纹起始寿命概率分布的预测	373
15.8	变幅载荷下高强度低合金钢疲劳寿命概率分布的预测	377
15.9	中碳钢切口件变幅载荷下疲劳寿命概率分布的预测	380
15.10	白铜丝两级载荷下疲劳寿命概率分布的预测	386
15.11	结语	389
	参考文献	390
第 16 章	疲劳寿命预测中的小载荷省略准则	392
16.1	引言	392
16.2	关于疲劳损伤的研究	393
16.3	小载荷省略准则研究的理论基础	394
16.4	高强度低合金钢切口件的小载荷省略准则	395
16.5	中碳钢切口件的小载荷省略准则	396
16.6	中碳钢摩擦焊接头的小载荷省略准则	400
16.7	结语	407
	参考文献	407
第 17 章	变幅载荷下铝合金腐蚀疲劳裂纹起始寿命的预测	410
17.1	引言	410
17.2	铝合金腐蚀疲劳裂纹起始的超载效应	411
17.3	变载下铝合金切口件腐蚀疲劳裂纹起始寿命的预测模型与验证	414
17.4	结语	418
	参考文献	418

第五部分 某些典型结构件的疲劳与寿命预测

第 18 章	焊接件的疲劳寿命预测	423
18.1	引言	423
18.2	关于焊接件的疲劳寿命估算模型	423
18.3	焊接件中的疲劳裂纹起始与扩展	426
18.4	含缺陷的 16Mn 钢对焊接头的疲劳寿命及预测模型	428
18.5	16Mn 钢焊接件的疲劳寿命	432
18.6	焊接件寿命估算应考虑的因素	435
18.7	等幅载荷下焊接件疲劳寿命的估算	437
18.8	机械和工程结构的安全检修周期的预测	441

18.9 变幅载荷下焊接件疲劳寿命的预测	442
18.10 变幅载荷下经锤击的焊接件的疲劳寿命及概率分布的预测	444
18.11 关于典型焊接件的疲劳设计曲线	453
18.12 结语	454
参考文献	455
第 19 章 扭转疲劳寿命表达式与半轴构件的疲劳寿命预测	459
19.1 引言	459
19.2 扭转疲劳寿命公式	460
19.3 平均扭转应力对扭转疲劳极限和扭转疲劳寿命的影响	462
19.4 带存活率的扭转疲劳寿命表达式	465
19.5 扭转疲劳强度的概率分布	470
19.6 半轴的具有给定存活率的扭转疲劳寿命公式	471
19.7 拖拉机半轴的带存活率的扭转疲劳寿命表达式	473
19.8 变幅载荷下拖拉机半轴的扭转疲劳寿命预测	476
19.9 结语	479
参考文献	479
第 20 章 老龄桥铆接钢结构件的剩余疲劳寿命预测	481
20.1 引言	481
20.2 老龄桥梁钢板疲劳性能的疲劳试验计划	481
20.3 老龄桥梁钢板的疲劳性能与蜕化	484
20.4 老龄桥梁钢板的疲劳裂纹扩展速率	489
20.5 老龄桥梁钢板带原状铆钉孔试件变幅载荷下的疲劳寿命预测	491
20.6 老龄桥钢梁铆接件模拟件的疲劳寿命与表达式	493
20.7 结语	497
参考文献	498

第六部分 某些非金属材料的疲劳

第 21 章 陶瓷材料的疲劳	501
21.1 引言	501
21.2 陶瓷材料的疲劳寿命曲线	501
21.3 陶瓷材料疲劳损伤的控制参数	504
21.4 陶瓷材料的带存活率的疲劳寿命曲线和疲劳极限	507
21.5 陶瓷材料的疲劳切口敏感性	511
21.6 陶瓷材料切口件的疲劳寿命曲线	512

21.7 陶瓷材料的循环疲劳裂纹扩展速率	515
21.8 陶瓷材料的静疲劳裂纹扩展速率	519
21.9 陶瓷结构件的抗疲劳设计	521
21.10 结语	522
参考文献	522
第 22 章 树脂基复合材料的疲劳与寿命预测	525
22.1 引言	525
22.2 短纤维增强的树脂基复合材料的疲劳	526
22.3 变幅载荷下短纤维增强的树脂基复合材料的疲劳寿命预测	528
22.4 结语	531
参考文献	531

第七部分 结构件的延寿技术

第 23 章 延寿技术	535
23.1 引言	535
23.2 金属材料疲劳性能的评估	535
23.3 提高冶金质量改善金属材料的疲劳性能	539
23.4 提高疲劳极限的途径	545
23.5 延长疲劳裂纹扩展寿命的途径	550
23.6 变幅载荷下金属结构件的延寿技术	557
23.7 结构件的加工和管理	563
23.8 结语	565
参考文献	565
后记	568

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

在工程应用中,结构件所受的应力总是低于材料的屈服强度 $\sigma_s(\sigma_{0.2})$ 。通常,在低于屈服强度的应力作用下,材料既不会发生塑性变形,更不会发生断裂。但是,在应力的重复作用下,即使所受的应力低于屈服强度,材料也有可能发生断裂。这种现象,称为材料的疲劳。引起疲劳断裂的应力常低于材料的屈服强度,在这种情况下,疲劳断裂前不发生明显的塑性变形。所以,疲劳断裂通常属于低应力脆性断裂。

自 19 世纪德国工程师 Wöhler 为解决火车轴的断裂问题,在控制载荷的条件下测定第一条疲劳寿命曲线(S-N 曲线)以来,对材料和结构件疲劳的研究已有 160 多年的历史。但迄今仍不断有因结构件疲劳断裂而造成的重大以至灾难性事故。因此,对材料和结构件疲劳的研究,仍被世界各国科技和工程界所关注。每年有数以千计的有关疲劳的论文发表,有关疲劳的专著仍陆续出版问世,每年都有关于疲劳的国际学术会议,包括美国空军和海军研究院所赞助的国际疲劳学术会议召开。所有这些都说明,结构件的疲劳失效问题,仍是科技界和工程界需要努力加以解决的问题。

材料的失效(failure),包括疲劳失效仍是造成重大经济损失的一个主要原因。1983 年美国商务部和国家标准局完成的研究报告表明^[1],每年由于材料失效而造成的经济损失,按 1982 年美元值计算,达到 1190 亿美元,约占当年美国国内生产总值(GDP)的 4%。而飞机和发动机结构件的失效所造成的经济损失约占总经济损失的 5%。在上述报告中,失效的形式包括结构零部件的过量变形、分层、开裂以至完全断裂,但不包括腐蚀和磨损;其中零部件的断裂会造成灾难性的后果,必须尽力防止。在其他工业发达国家,由于材料失效而造成的经济损失约占国内生产总值的 4%^[2]。这表明,材料的失效耗费了大量的资源和人力。

研究认为^[1]:①更好地应用现有技术可以消除约 1/3 由于材料失效而造成的经济损失;②在较长的时间内,通过研究与发展,也就是获取新知识并提出利用新知识的途径,可以消除第二个 1/3;③若无重大技术突破,最后一个 1/3 则很难消除。统计分析表明^[3,4],飞机和发动机结构件的失效大部分是由疲劳和腐蚀疲劳造成的。而材料的缺陷、加工质量差和结构设计不良又是引起结构件疲劳失效的主