



# 金属疲劳的定量理论

郑修麟 著

西北工业大学出版社

(陕)新登字 009 号

**【内容简介】**本书是集作者 20 多年在金属疲劳寿命方面的研究成果而写成的一本专著。作者在吸取了前人研究成果中的精华的基础上,建立了新的疲劳损伤的力学模型,进而导出了疲劳寿命表达式,包括新的应变疲劳公式、应力疲劳公式,疲劳裂纹起始寿命公式和疲劳裂纹扩展公式等;书中还包括了为研究疲劳裂纹起始寿命表达式而设计的局部应变范围的计算模型;书中给出的变幅载荷下构件疲劳寿命的估算模型,估算精度高于现有寿命估算模型;另外书中还综合了近两年国内外重要研究成果和冲击疲劳等内容。本书对预测疲劳寿命和优选材料及优化工艺等方面的工作者均有较高的指导作用及参考价值。

DWZS/12

## 金属疲劳的定量理论

郑修麟 著

责任编辑 王俊轩

责任校对 郭生儒

\*

©1993 西北工业大学出版社出版发行

(西安市友谊西路 127 号 邮编 710072)

陕西省新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0636-4/TG·23

\*

开本 850×1168 毫米 1/32 8.3125 印张 201 千字

1994 年 1 月第 1 版 1994 年 1 月第 1 次印刷

印数:1-2 000 册 定价:精装 14.50 元 平装 10.0 元

## 序

自从上个世纪 60 年代,德国工程师 Wöhler 为了解决火车断轴问题,在严格控制载荷的条件下测定出第一条  $S-N$  曲线以来,对于金属材料和机、构件疲劳行为的研究已有 100 多年的历史。但迄今仍不断有由于疲劳断裂而造成的重大以至灾难性的事故发生。随着各类大容量、大功率、轻重量、高速度、高效能的机械、动力、化工等装备的出现,承受循环或振动载荷零部件的工作条件愈来愈苛刻,许多承受变幅以至随机载荷与温度、介质、幅照等环境因素的叠加,使疲劳断裂问题更加突出,因而疲劳问题的研究一直为科技工程界所关注。每年有数以千计的论文发表,有关专著也不断出版问世,而每一部专著都有所侧重,各有特色。本书就是其中的一部。

疲劳问题的早期研究主要集中于疲劳失效的宏观规律方面。本世纪 50 年代以后,各类电子显微镜及其他先进测试仪器的出现并得到广泛应用,大大促进了疲劳微观机理的研究。微观机理只能解释宏观现象及规律并指导其变革方向,而宏观规律则是指导生产实践的依据。为了克服或防止疲劳失效,我们寻求的客观规律简言之即在各种服役条件下载荷与寿命之间的关系。获取这种关系的传统作法是通过大量严格控制的试验,取得足够的试验数据,以确立一定载荷条件下的疲劳寿命或一定有效寿命要求下的载荷条件。然而疲劳试验要求严格,费事费时,而且数据散乱性大,要求得疲劳数据的概率分布,例如  $P-S-N$  曲线,则需要更大量的疲劳试验数据。至于全尺寸部件在变幅载荷下的疲劳试验,因其周期之长、耗费之巨,只有极重要的情况下才不惜工本地少量进行。因此,

多年来许多研究工作者致力于疲劳宏观理论的研究,建立各种公式用以计算各种服役条件下的疲劳寿命,其中参数有的从简化疲劳试验求得,有的利用静载下的性能数据,以避免疲劳试验。其中著名的如早期的 Basquin 方程、Goodman - Gerber 方程,近期的 Coffin - Manson 公式,Paris 公式等均得到科技界的公认并加以运用,取得了一定的效果。但是这些公式都有一定的适用范围,准确性也有一定限度。然而为了节省人力、物力、财力这个研究方向显然是正确的,有重要价值和意义的。

郑修麟教授多年来致力于金属疲劳定量理论的研究,取得了丰硕的成果,本书就是这方面的系统论述。正如作者在绪论中所说的,此项研究的根本目的在于解决定寿、延寿和简化疲劳试验三个方面的问题。这三个问题正是疲劳研究需要解决的要害,也是本书价值之所在。

为了精确估算机、构件的疲劳寿命,作者吸取前人研究成果中的精华,结合自己的学术观点,建立了新的疲劳损伤力学模型,进而导出了一系列疲劳寿命表达式。其中分别建立了疲劳裂纹起始寿命和裂纹扩展寿命公式,提出了应变疲劳公式并综合成应力疲劳寿命公式。对于变幅载荷寿命的估算,作者引入一个超载效应因子,用以定量表达载荷谱中的大、小载荷的交互作用效应,从而提出了变幅载荷下构件疲劳寿命的估算模型和相应的计算公式。所有公式中引用的材料参量主要来自静拉伸试验或简化疲劳试验,而应用这些公式达到了精确估算疲劳寿命的效果。本书内容已基本覆盖了疲劳定量理论与应用的各个主要问题,同时作者也坦率指出书中不足之处。

应当指出,本书有下列几个特点:

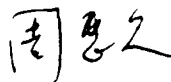
一、本书内容主要来自作者自己的研究成果,它是一本名副其实的专著。

二、书中对前人的工作给予了恰当的评价,但不满足于前人

的成果,为了提高疲劳寿命计算的准确度,对即使公认的权威公式也敢于并善于提出修正。

三、有人认为不存在没有宏观裂纹的金属件,因而只重视疲劳裂纹的扩展。本书作者却对疲劳裂纹起始寿命进行了深入研究,有独到之处。对某些重要机、构件而言,疲劳裂纹起始寿命为估计安全寿命和制订安全检修期的主要依据,特别是高强度材料制件其始裂寿命占总寿命的大部分,始裂寿命的估算有重要的实用意义。

四、理论结合应用。实际上许多机件在运行中承受的是变幅载荷。本书大部分内容论述变幅载荷下的疲劳寿命估算模型,如上所述,提出了新的变幅疲劳寿命公式,其估算精度高于现有估算模型,这是难能可贵的。



1993年10月

---

---

## 作者自序

疲劳理论研究具有很大的工程实用价值。它的第一个作用是，精确地估算或预测构件的疲劳寿命，预防结构的灾难性的失效，避免生命和财产的巨大损失。第二个作用是，优选材料和优化工艺，延长构件的疲劳寿命，也为研制新的抗疲劳材料提供依据。众所周知，实验测定材料的疲劳性能，要耗费大量的人力、物力和财力；尤其是构件以至全尺寸结构在服役载荷下的疲劳试验，耗费更大。因此，疲劳理论研究的第三个并非不重要的作用是，用简单的力学性能参量，如拉伸性能，估算材料的疲劳性能，简化以及取代疲劳试验；缩短构件以至全尺寸结构的疲劳试验周期，以节约人力、物力和财力。作者近 20 年的研究工作，是为解决上述三个问题而进行的。

精确地估算构件的疲劳寿命，其主要依据之一，是材料的疲劳寿命公式。作者吸取了前人研究成果中的精华，建立了新的疲劳损伤的力学模型，进而导出疲劳寿命表达式，包括新的应变疲劳公式、应力疲劳公式、疲劳裂纹起始寿命公式和疲劳裂纹扩展公式等基本疲劳公式。这些工作构成了本书第二章、第三章、第五章和第七章的基础。这些基本的疲劳公式，均表明了疲劳性能与拉伸性能间的关系，使我们有可能根据材料的拉伸性能，精确地估算材料的疲劳性能，并获得很大的成功。同时，也可利用上述基本疲劳公式，在构件设计的初始阶段，评价并优选材料。为导出疲劳裂纹起始寿命公式，也为研究疲劳裂纹起始的超载效应，还设计了局部应变范围的计算模型并导出了近似计算公式，此即本书的第四章。

理论研究的目的在于应用。因此,本书大部分内容是论述变幅载荷下的构件疲劳寿命的估算模型。首先,根据构件的实际服役条件,研究了疲劳裂纹起始的超载效应,定义了超载效应因子,并进一步实验证明超载效应因子可定量地表征载荷中的大、小载荷交互作用效应。在上述工作的基础上,提出了变幅载荷下构件疲劳寿命的估算模型,估算精度高于现有的寿命估算模型。这些工作包含在第六、第八和第九章中。第九章是近两年内的研究结果,已为国内外重要的学术会议和著名学术刊物接受发表。第十章“冲击疲劳”,在飞机起落架构件设计中有重要的应用价值。

综上所述,可以认为,本书内容基本上覆盖了疲劳理论与应用的各个主要问题,符合 90 年代疲劳研究的主流和需要。应当指出,本书也有明显的不足,即变幅载荷下构件疲劳裂纹扩展寿命的估算,没有包含在内。一则因为国内外对这一专题进行了大量的研究,出版了不少文献和专著,再则由于精力和经费所限,作者未能开展这方面的研究。

过去,作者关于疲劳研究的论著,散布于国内外期刊和会议论文集,将它们汇集、整理成书出版,奉献于广大读者,为祖国的“四化”大业尽自己微薄的努力,是作者近年来的心愿。1989 年春,作者即着手整理文献资料,开始撰稿。四年之内,三易其稿。尽管如此,本书在内容、结构的细节上仍有不尽如人意之处,敬希专家、学者和读者批评指正,以便改进我们的研究工作,进一步提高本书的质量。

在近 20 年的研究工作中,作者曾获得原航空工业部“六五”预研经费、铁道部科学研究院和大桥工程局基金、国家自然科学基金、国家教委博士点基金、航空科学基金等多方面的资助。在实验工作中,红原锻铸厂力学性能室的同志们,给予了宝贵的无私的帮助。作者所在课题组的不少成员、硕士生和博士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。作者谨对上述各单

---

位和个人表示诚挚的谢意。

中国科学院学部委员、西安交通大学教授周惠久老先生，在百忙中审阅了本书的手稿，为本书作序，作者对周老先生表示衷心的感谢！

郑修麟

1993年8月于西北工业大学



---

---

# 目 录

第一章 绪论.....	1
第二章 应变疲劳公式.....	5
2.1 引言 .....	5
2.2 关于应变疲劳公式的研究 .....	6
2.2.1 关于应变疲劳的假设 .....	6
2.2.2 Manson - Coffin 公式 .....	7
2.2.3 应变疲劳寿命与拉伸性能间的关系 .....	9
2.3 新应变疲劳公式.....	11
2.3.1 疲劳损伤模型.....	11
2.3.2 实验数据的再分析.....	13
2.4 应变疲劳寿命的估算.....	17
2.5 低温应变疲劳公式.....	21
2.6 高温应变疲劳公式.....	24
2.6.1 新的高温应变疲劳公式.....	24
2.6.2 关于频率修正函数.....	24
2.6.3 实验数据的再分析.....	25
2.7 结束语.....	26
第三章 应力疲劳公式 .....	28
3.1 引言.....	28

3.2	关于应力疲劳公式的研究	29
3.2.1	应力疲劳公式	29
3.2.2	关于疲劳极限	29
3.3	交变对称循环应力下的疲劳寿命公式	30
3.3.1	公式的导出	30
3.3.2	高强度低合金钢的疲劳实验结果与分析	31
3.3.3	某些疲劳实验数据的再分析	33
3.4	应力疲劳寿命的普遍公式	35
3.4.1	公式的导出	35
3.4.2	公式的校核	36
3.5	疲劳极限与疲劳图	41
3.5.1	理论疲劳极限	41
3.5.2	疲劳图与等寿命图	42
3.5.3	疲劳极限与拉伸性能的关系	45
3.6	微动疲劳寿命表达式	45
3.7	复合材料疲劳寿命表达式	48
3.8	结束语	49
<b>第四章</b>	<b>局部应变范围的近似计算</b>	<b>51</b>
4.1	引言	51
4.2	关于局部应变范围的计算	52
4.3	局部应变范围的计算模型	54
4.3.1	单向加载时局部应变的计算	54
4.3.2	局部应变范围的计算模型	55
4.3.3	应用拉伸性能计算局部应变范围的可行性 及证明	57
4.4	局部应变范围的通用的近似计算公式	60
4.5	超载对局部应变范围的影响	61

---

4.6	结束语	63
<b>第五章</b>	<b>疲劳裂纹起始寿命表达式</b>	<b>64</b>
5.1	引言	64
5.2	关于疲劳裂纹起始寿命和门槛值的研究	65
5.2.1	关于始裂寿命的定义和测定	65
5.2.2	关于疲劳裂纹起始寿命的经验表达式	66
5.2.3	关于疲劳裂纹起始门槛值	67
5.3	疲劳裂纹起始的力学模型	68
5.3.1	基本假设	68
5.3.2	疲劳裂纹起始寿命表达式	68
5.4	金属材料的疲劳裂纹起始寿命与门槛值	70
5.4.1	实验数据的分析方法	70
5.4.2	铝合金疲劳裂纹起始寿命与门槛值	71
5.4.3	高强度低合金钢的疲劳裂纹起始寿命	73
5.4.4	超高强度钢的疲劳裂纹起始寿命	76
5.4.5	钛合金的疲劳裂纹起始寿命	79
5.5	疲劳裂纹起始抗力系数与门槛值	80
5.5.1	疲劳裂纹起始抗力系数	81
5.5.2	疲劳裂纹起始门槛值	83
5.6	金属材料疲劳裂纹起始寿命的估算	85
5.6.1	基本参数的估算	85
5.6.2	疲劳裂纹起始寿命的估算结果	86
5.7	金属材料疲劳裂纹起始抗力的评估	87
5.8	结束语	92

## 第六章 疲劳裂纹起始的超载效应与变幅载荷下疲劳

裂纹起始寿命的估算模型 .....	93
6.1 引言 .....	93
6.2 关于疲劳裂纹起始超载效应的研究 .....	94
6.2.1 超载方向的影响 .....	94
6.2.2 超载对焊接接头疲劳寿命的影响 .....	96
6.2.3 超载对铆接接头疲劳寿命的影响 .....	97
6.2.4 超载对结构疲劳寿命的影响 .....	97
6.3 高强度铝合金疲劳裂纹起始的超载效应 .....	99
6.3.1 疲劳裂纹起始超载效应的实验方法 .....	100
6.3.2 超载对铝合金疲劳裂纹起始寿命的影响 .....	101
6.3.3 疲劳裂纹起始门槛值与超载当量应力幅 的关系 .....	103
6.3.4 完善的疲劳裂纹起始寿命表达式 .....	105
6.4 变幅载荷下铝合金构件疲劳裂纹起始寿命的 预测模型 .....	106
6.4.1 超载后加载方式对始裂寿命的影响 .....	106
6.4.2 超载后停歇时间对始裂寿命的影响 .....	108
6.4.3 超载后疲劳裂纹起始门槛值的物理意义与 工程实用意义 .....	108
6.4.4 变幅载荷下构件疲劳裂纹起始寿命的 估算模型 .....	109
6.5 高强度低合金钢疲劳裂纹起始的超载效应 .....	111
6.5.1 超载对高强度低合金钢疲劳裂纹起始寿命 的影响 .....	112
6.5.2 超载对高强度低合金钢疲劳寿命的影响 .....	113
6.5.3 关于高强度低合金钢超载效应的机制 .....	116

---

6.6 铝合金孔挤压件疲劳裂纹起始的超载效应与 寿命估算 .....	117
6.6.1 超载对铝合金孔挤压件疲劳裂纹起始寿命 的影响 .....	117
6.6.2 变幅载荷下孔挤压件疲劳裂纹起始寿命的 估算方法 .....	119
6.7 结束语 .....	120
<b>第七章 疲劳裂纹扩展的力学模型与公式</b> .....	<b>122</b>
7.1 引言 .....	122
7.2 关于疲劳裂纹扩展的一般规律和表达式 .....	123
7.2.1 疲劳裂纹扩展的一般规律 .....	123
7.2.2 疲劳裂纹扩展速率表达式 .....	125
7.3 疲劳裂纹扩展的力学模型 .....	127
7.3.1 关于疲劳裂纹扩展的假设 .....	127
7.3.2 疲劳裂纹扩展的静态断裂模型 .....	127
7.3.3 疲劳裂纹扩展速率的数学表达式 .....	130
7.3.4 疲劳裂纹扩展系数 .....	131
7.4 应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响 .....	132
7.5 钢的疲劳裂纹扩展速率 .....	135
7.5.1 实验结果的分析方法 .....	135
7.5.2 高强度低合金钢的疲劳裂纹扩展速率 .....	135
7.5.3 超高强度钢的疲劳裂纹扩展速率 .....	139
7.5.4 各类钢疲劳裂纹扩展速率实验数据 的再分析 .....	140
7.6 铝合金的疲劳裂纹扩展速率 .....	144
7.6.1 实验结果及分析 .....	144
7.6.2 铝合金疲劳裂纹扩展速率的一般表达式 .....	147

7.7	钛合金的疲劳裂纹扩展速率 .....	148
7.8	疲劳裂纹扩展速率的估算 .....	150
7.8.1	铝合金疲劳裂纹扩展速率的估算 .....	151
7.8.2	钢的疲劳裂纹扩展速率的估算 .....	152
7.9	结束语 .....	156
<b>第八章 焊接件的疲劳寿命估算</b> .....		
8.1	引言 .....	158
8.2	关于焊接件的疲劳寿命估算模型 .....	159
8.3	16 Mn 钢焊接件的疲劳寿命 .....	163
8.3.1	16 Mn 钢对焊接头的疲劳寿命 .....	163
8.3.2	16 Mn 钢焊接盖板梁的疲劳寿命 .....	165
8.3.3	锤击对 16 Mn 钢焊接盖板梁疲劳寿命 的影响 .....	165
8.4	焊接件寿命估算应考虑的因素 .....	168
8.4.1	焊接缺陷的影响 .....	168
8.4.2	焊接残留应力的影响 .....	169
8.4.3	应力集中的影响 .....	170
8.4.4	焊趾显微组织的影响 .....	170
8.5	等幅载荷下焊接件疲劳寿命的估算 .....	172
8.5.1	16 Mn 钢对焊接头始裂寿命的估算 .....	172
8.5.2	16 Mn 钢对焊接头疲劳裂纹扩展寿命 的估算 .....	174
8.5.3	疲劳寿命的估算 .....	177
8.6	变幅载荷下焊接件疲劳寿命的估算 .....	178
8.6.1	超载对 16 Mn 钢对焊接头疲劳寿命 的影响 .....	178
8.6.2	16 Mn 钢对焊接头变幅载荷下的	

疲劳寿命 .....	179
8.7 经锤击的焊接件的疲劳寿命估算 .....	182
8.7.1 经锤击的焊接件的疲劳寿命表达式 .....	182
8.7.2 经锤击的焊接件的寿命估算 .....	184
8.8 关于典型焊接件的疲劳设计曲线 .....	186
8.9 结束语 .....	188
<b>第九章 疲劳强度的概率分布与具有给定存活率的</b>	
<b>寿命估算方法 .....</b>	<b>190</b>
9.1 引言 .....	190
9.2 疲劳强度的概率分布 .....	191
9.2.1 一般原理和方法 .....	191
9.2.2 16Mn 钢疲劳寿命的概率分布 .....	192
9.2.3 应力疲劳抗力系数和理论疲劳极限的分布 .....	194
9.2.4 疲劳强度的分布 .....	196
9.3 疲劳寿命分布与疲劳强度分布间的关系 .....	198
9.4 $P-S-N$ 曲线的表达式 .....	201
9.5 确定疲劳强度概率分布和 $P-S-N$ 曲线表达式 的简便方法 .....	203
9.5.1 铝合金 LY12CZ 的疲劳强度概率分布 .....	204
9.5.2 铝合金 LY12CZ 的 $P-S-N$ 曲线表达式 .....	207
9.6 具有给定存活率的寿命估算方法 .....	208
9.6.1 旧桥梁钢的疲劳实验结果及概率分布 .....	208
9.6.2 旧桥梁钢的具有给定存活率的疲劳寿命 表达式 .....	211
9.6.3 具有给定存活率的疲劳寿命估算 .....	213
9.6.4 旧桥梁钢疲劳强度的概率分布 .....	217
9.7 结束语 .....	217

---

第十章 冲击疲劳	218
10.1 引言	218
10.2 试件柔度和冲击力的计算与实验标定	219
10.2.1 基本假设	219
10.2.2 试件的柔度计算与实验标定	220
10.2.3 冲击力的计算与测定	223
10.3 冲击疲劳试验条件下 $K_I$ 的表达式	224
10.4 冲击疲劳载荷下的裂纹起始寿命	226
10.4.1 冲击疲劳裂纹起始寿命的测定方法	226
10.4.2 30 CrMnSiNi 2 A 钢的冲击疲劳裂纹 起始寿命	227
10.4.3 冲击疲劳裂纹起始的超载效应	227
10.5 冲击疲劳载荷下的裂纹扩展速率	230
10.5.1 冲击疲劳裂纹扩展速率的测定方法	230
10.5.2 超高强度钢的冲击疲劳裂纹扩展速率	230
10.6 结束语	231
参考文献	233



## 第一章 绪 论

自从德国工程师 A. Wöhler 实验测定第一条疲劳曲线,开创现代疲劳研究以来,已有 100 多年的历史。各个时期,疲劳研究的重要成果,在文献[1—5]中作了论述。然而,疲劳研究,尤其是寿命预测,在 90 年代仍然是受到广泛重视的研究课题<sup>[6]</sup>。疲劳失效是机械和结构零件常见的失效形式,约占机械事故的 50% 以上<sup>[3,4]</sup>。文献[7]对 1934 至 1979 年间,西方国家灾难性的飞机事故作了统计分析,说明疲劳失效几乎遍及飞机各主要部件,如机翼、机身、尾面,发动机,直升机的旋翼、尾桨等。

为保证机械和结构在服役期内的运行安全,需要从力学、材料与工艺、结构设计以及应用数学等学科,对疲劳失效问题进行多学科的综合研究<sup>[1—3,8]</sup>。疲劳研究要解决的主要问题(或曰目的)有二:① 精确地估机械和结构的寿命和安全检修周期<sup>[9,10]</sup>,使机械或结构在设计预定的寿命期内安全地运行,即所谓的定寿。② 从零构件的细节设计、材料选用、制造工艺优化、质量控制以及保养维修等各个环节,采取有效而经济的技术与管理措施,以延长机械和结构的使用寿命,即延寿。简化疲劳试验,尤其是缩短全尺寸结构在变幅载荷下的疲劳试验周期,也是疲劳理论研究的又一个重要的问题。根据材料的比较容易测定的力学性能(如拉伸性能)和微观结构参数,预测材料的疲劳性能,是非常有意义的研究工作,长期以来,受到国内外研究者的重视。这不仅可简化,以至取代疲劳试验,节约大量的人力和经费,而且可用于生产过程中监控产品的质量。全尺寸结构在谱载荷下的疲劳试验要耗费大量的人力和财力,时间长达数年。因此,建立“小载荷省略准则”,省去那些不