



# 结构抗疲劳设计

酈明 奥脱·布克斯鲍姆 哈茨·罗华克 编著

机械工业出版社

# 结 构 抗 疲 劳 设 计

酆明

奥脱·布克斯鲍姆 编著

哈茨·罗华克



机 械 工 业 出 版 社

疲劳破坏是工程中极为普遍的现象，尤其在交通车辆、航空、海洋工程、采矿冶金、机械制造等方面更为突出，它对工程结构的安全使用威胁很大。

本书是一本介绍近年来疲劳研究的最新基本情况的书，特别是在疲劳工作载荷谱的分析和疲劳寿命预测方面作了重点论述，对疲劳概貌、疲劳试验及各种因素对疲劳的影响也作了一定的介绍。本书在编写上注意实用性，叙述深入浅出，并有大量图表实例。

本书可供从事汽车、航空、机械、造船、冶金、化工机械及压力容器等工作的工程技术人员和研究人员及高等院校相应专业的师生阅读和参考。

## 结构抗疲劳设计

邵明

惠彤、柯克新编撰 绘卷

哈茨·罗华克

责任编辑：孙世坦

封面设计：刘

机械工业出版社出版（北京，百万庄南里一号）  
（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

煤炭工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

开本 $787 \times 1092^{1/4}$ ·印张 $9^{1/4}$ ·字数202千字

1987年9月北京第一版·1987年9月北京第一次印刷

印数 0,001—4,300·定价：2.35元

\*

统一书号：15033·6890

## 序 言

部件的抗疲劳设计，也就是设计能够在给定使用寿命期间承受时变载荷的部件，最初只用在象飞机这样的轻量结构的设计中。当今，由于能源问题和材料的价格日增，迫使大部分机械工程和建筑工程领域的工程技术人员也要运用这种方法以设计出既安全又经济的结构，并要在国际市场具有竞争力。

本书的目的是使工程技术人员获得这方面的基本知识，其中第一章至第四章介绍疲劳问题的概貌及各种疲劳试验方法；第五章至第十二章讲述和分析工作载荷的特性；第十三章至第十五章为评价及确定疲劳强度方面的有关问题；第十六章为各种疲劳寿命预测方法，第十七章介绍统计比较检验；最后第十八章为一些实例。

据我所知，这本书的大部分内容是第一次用中文发表。这本关于承受时变载荷的部件设计的书是由郦明教授于1981年至1982年及1985年两次访问德意志联邦共和国夫朗和费工作强度研究所（LBF）期间编写而成的，它包括了这个研究所多年来的大量研究资料。

德意志联邦共和国 教授，工学博士，LBF研究所所长  
奥脱·布克斯鲍姆  
(Otto Buxbaum)

1985年7月29日于达姆斯塔特

# 目 录

## 序 言

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....               | 1  |
| § 1.1 疲劳问题的概述及其重要性 .....   | 1  |
| § 1.2 历史的发展 .....          | 3  |
| § 1.3 疲劳问题的范围 .....        | 8  |
| § 1.4 疲劳强度设计的安全准则 .....    | 14 |
| 参考文献 .....                 | 17 |
| 第二章 金属疲劳的特性 .....          | 18 |
| § 2.1 疲劳断裂的特征 .....        | 18 |
| § 2.2 疲劳破坏表面的形态 .....      | 19 |
| § 2.3 材料的基本疲劳强度 .....      | 26 |
| § 2.4 疲劳特性和其他机械特性的关系 ..... | 28 |
| § 2.5 载荷形式对疲劳强度的影响 .....   | 30 |
| 参考文献 .....                 | 32 |
| 第三章 疲劳试验 .....             | 33 |
| § 3.1 疲劳试验的必要性 .....       | 33 |
| § 3.2 疲劳试验和设备的分类 .....     | 34 |
| § 3.3 等幅疲劳试验机 .....        | 37 |
| § 3.4 程序加载疲劳试验机 .....      | 44 |
| § 3.5 液压伺服疲劳试验机 .....      | 46 |
| 参考文献 .....                 | 50 |
| 第四章 疲劳试验试样的设计及制备 .....     | 51 |
| § 4.1 试样的设计 .....          | 51 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| § 4.2 试样的制备 .....                      | 53  |
| 参考文献 .....                             | 56  |
| 第五章 应力—时间历程 .....                      | 57  |
| § 5.1 应力—时间历程的分类 .....                 | 57  |
| § 5.2 确定的应力—时间历程 .....                 | 58  |
| § 5.3 随机应力—时间历程 .....                  | 61  |
| § 5.4 分析应力—时间历程的必要性和目的 .....           | 65  |
| 参考文献 .....                             | 67  |
| 第六章 统计计数法 .....                        | 68  |
| § 6.1 单参数统计计数法 .....                   | 69  |
| § 6.2 双参数统计计数法 .....                   | 76  |
| § 6.3 计数结果的整理和计数方法的选择 .....            | 82  |
| 参考文献 .....                             | 84  |
| 第七章 累积频次分布 .....                       | 85  |
| § 7.1 累积频次分布的标准表示方式 .....              | 85  |
| § 7.2 各种不同计数方法获得的累积频次分布<br>的比较 .....   | 89  |
| § 7.3 累积频次分布与概率纸 .....                 | 91  |
| 参考文献 .....                             | 97  |
| 第八章 累积频次分布的离散度和极端值分布 .....             | 98  |
| § 8.1 载荷段和局部累积频次分布 .....               | 98  |
| § 8.2 累积频次分布的参数 .....                  | 100 |
| § 8.3 极端值分布 .....                      | 102 |
| § 8.4 极大载荷的推导 .....                    | 106 |
| 参考文献 .....                             | 110 |
| 第九章 累积频次分布和功率谱密度之间的<br>关系；稳态随机过程 ..... | 111 |
| § 9.1 累积频次分布的统计参数 .....                | 111 |
| § 9.2 功率谱密度 .....                      | 112 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| § 9.3 高斯过程的莱斯 (Rice) 关系式 .....        | 114 |
| § 9.4 莱斯关系式在应力—时间历程上的应用 .....         | 115 |
| 参考文献 .....                            | 120 |
| 第十章 不同载荷源产生的应力的叠加 .....               | 121 |
| § 10.1 应力—时间历程的载荷源 .....              | 121 |
| § 10.2 区分来自不同载荷源的应力的方法 .....          | 122 |
| 参考文献 .....                            | 129 |
| 第十一章 工作过程的描述 .....                    | 130 |
| § 11.1 工作过程的定义 .....                  | 130 |
| § 11.2 工作段起始点和持续时间的描述 .....           | 133 |
| § 11.3 工作段内容的描述 .....                 | 135 |
| 参考文献 .....                            | 140 |
| 第十二章 不同点的应力—时间历程之间的关系 .....           | 141 |
| § 12.1 同时测得的几个应力—时间历程及其动态<br>效应 ..... | 141 |
| § 12.2 同时出现的应力增量的确定 .....             | 144 |
| § 12.3 用累积频次分布来说明动态特性 .....           | 147 |
| 参考文献 .....                            | 148 |
| 第十三章 等幅疲劳试验及 $s-N$ 图 .....            | 149 |
| § 13.1 等幅疲劳试验的意义及其对疲劳设计的作用 .....      | 149 |
| § 13.2 等幅试验方法及试验结果的整理 .....           | 151 |
| § 13.3 确定疲劳持久限的统计方法 .....             | 156 |
| § 13.4 平均应力图 ( $A-M$ 图) .....         | 162 |
| 参考文献 .....                            | 170 |
| 第十四章 影响疲劳的因素 .....                    | 172 |
| § 14.1 材料、制造过程及表面处理 .....             | 172 |
| § 14.2 工作环境条件 .....                   | 180 |
| § 14.3 应力幅值、平均应力及载荷循环次数 .....         | 188 |
| § 14.4 缺口及缺口效应 .....                  | 192 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 参考文献 .....                        | 203 |
| 第十五章 变幅疲劳试验 .....                 | 204 |
| § 15.1 程序块模拟试验 (程序加载试验) .....     | 204 |
| § 15.2 随机试验 .....                 | 211 |
| § 15.3 标准试验载荷序列 .....             | 218 |
| 参考文献 .....                        | 220 |
| 第十六章 损伤累积假说及疲劳寿命预测 .....          | 222 |
| § 16.1 影响疲劳寿命的因素 .....            | 222 |
| § 16.2 帕尔姆格雷-曼纳 (Palmgren-Miner)  |     |
| 损伤累积假说 .....                      | 223 |
| § 16.3 帕尔姆格雷-曼纳假说的修正 .....        | 227 |
| § 16.4 相对曼纳法则 .....               | 230 |
| § 16.5 局部应力—应变法 .....             | 234 |
| § 16.6 $p$ 型及 $q$ 型累积频次分布 .....   | 246 |
| 参考文献 .....                        | 252 |
| 第十七章 对比试验及统计分析 .....              | 255 |
| § 17.1 $F$ 检验 (标准离差检验、方差检验) ..... | 256 |
| § 17.2 $t$ 检验 (平均值检验) .....       | 259 |
| 参考文献 .....                        | 266 |
| 第十八章 实例 .....                     | 267 |
| § 18.1 标准载荷谱及相对曼纳法则在疲劳寿命预测        |     |
| 上的应用 .....                        | 267 |
| § 18.2 车轮的优化设计方法 .....            | 274 |
| § 18.3 加快疲劳试验 .....               | 283 |
| 参考文献 .....                        | 287 |
| 全书参考文献 .....                      | 288 |

# 第一章 绪 论

## § 1.1 疲劳问题的概述及其重要性

金属、塑料、木材、混凝土、玻璃、橡胶和复合材料等各种结构材料，在变载荷作用下，都会产生疲劳现象。在工程结构和设备中，疲劳破坏的出现是极为广泛的。据统计，至少有一半以上的机械破坏属于疲劳破坏。有些研究者认为所有的机械破坏当中有50%到90%是疲劳破坏。机器、设备、运输工具和建筑物的大部分构件和结构都承受随时间变化的

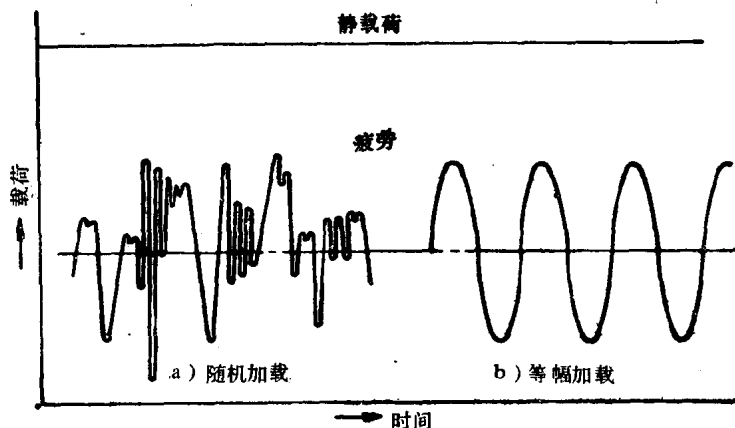


图 1-1 静载荷和变载荷

载荷, 这些载荷有些是由环境引起, 例如, 振动, 噪声, 不平坦的道路, 变化着的风力, 海上波浪的运动, 反复的温度变化等等; 载荷也可以由使用设备所引起, 例如, 起重机使重物升降, 压力容器的加载和卸载等等都会引起载荷的变化。图1-1是载荷的基本型式。

在工程中, 外界载荷很少是静态的。重复作用的载荷,

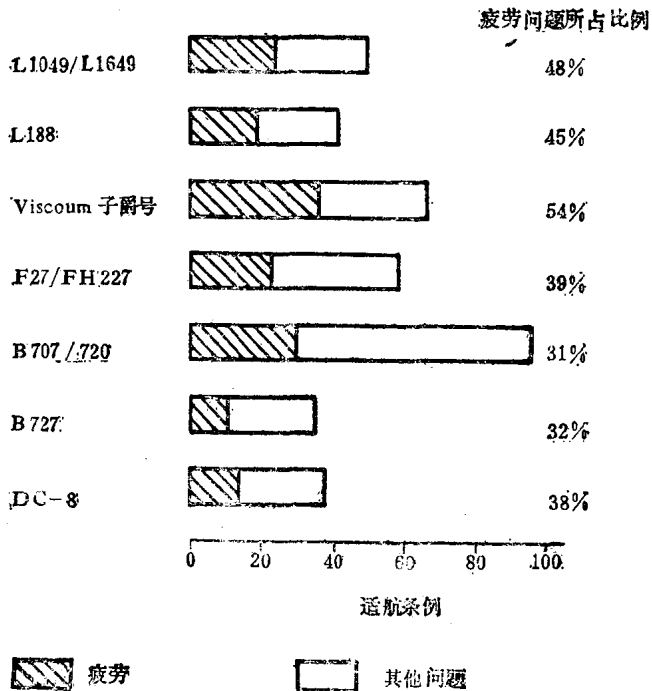


图 1-2 各种型号民航机的疲劳问题在适航条例中的比例

它所造成的应力水平虽然远低于强度极限和屈服极限，却会引起意料不到的和突然的破坏。某个结构可能完好地工作了许多年，然后出现了一个裂纹，又经过一定数量的变载荷次数之后，就会导致瞬间的断裂。这种断裂通常没有宏观塑性变形的痕迹。这样的破坏称为疲劳破坏。

近来，由于静态设计的方法愈来愈精确，高强度材料的使用愈来愈多，操作速度愈来愈高（即在同样的时间内载荷变化次数增多），设计中趋向采用更高的强度/重量比以及机器与结构的实际开动率的增高，疲劳问题日益显示出它的重要性。近年来，材料、机械零部件和结构的疲劳问题已经得到世界范围内的重视，每年都有相当数量的有关疲劳的各种国际会议和发表的论文。然而，疲劳破坏还不断造成一些不幸的事故，这表明在疲劳强度问题上还有许多地方没有得到完全的解决。例如，根据美国联邦航空署最近颁布的适航条例，疲劳问题在民航机适航条例中占相对较大的比例（30～50%），参见图1-2。

## § 1.2 历史的发展

工程技术人员对疲劳问题进行试验和研究的历史已经超过一个世纪。1829年，德国采矿工程师阿尔伯特（W.A.J. Albert）做了铁链的重复载荷试验，提出了第一个疲劳问题的研究报告。十九世纪三十年代，铁路在欧洲迅速发展起来，那时在铁路行业中，疲劳破坏常常出现在铁路车轮轴上，轮轴总是有规律地在轴肩处破坏。随着锻铁桥梁越来越多地代替砖和石块桥梁，桥梁的疲劳问题也引起人们的重视。1839年波克来特（Poncelet）首先使用“疲劳”（Fatigue）一词来描述“在反复施加的载荷作用下的结构破坏”。但是，

以疲劳一词作为题目的第一篇论文是由勃累士畏特 (Braithwaite) 于 1854 年在伦敦土木工程师学会上发表的。

在德国, 1852 年到 1870 年之间, 铁路工程师韦勒 (August Wöhler, 1819~1914) 在由他自己发明的试验机 (图 1-3) 上进行了许多重复变应力下的疲劳试验。韦勒的工作包括在整套铁路轮轴部件上进行的疲劳试验和首次对疲劳问题进行系统的研究。

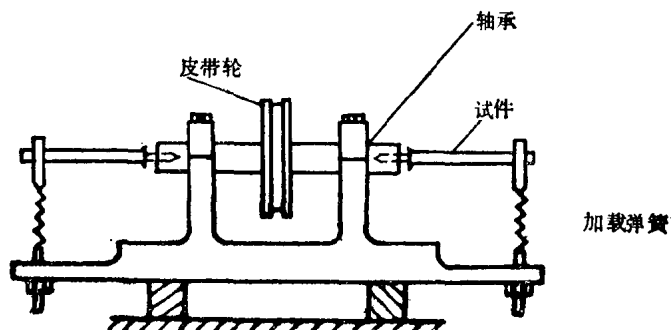


图 1-3 韦勒发明的旋转弯曲疲劳试验机

韦勒说明了疲劳寿命随着应力幅的增加而减少, 当应力幅低于某一数值时, 试件将不再断裂。这样他首次提出了  $s-N$  图和疲劳极限的概念。韦勒以前的研究者们主要考虑如何避免疲劳破坏, 例如, 1817 年英国的某一委员会受委托进行铁的疲劳试验, 以检验这种材料作为铁路结构材料的适应性。韦勒是第一个把工作应力和疲劳极限联系起来的人。他

还指出在疲劳问题上，应力的幅值远比应力的最大值来得重要。韦勒疲劳试验机的基本原理至今还在沿用。韦勒被人称为“疲劳试验之父”，为了纪念他，在德国和其他一些国家， $s-N$ 曲线又被称为“韦勒曲线”。

和韦勒同时代，英国的费尔巴尔 (Fairbairn) 在铆接的锻铁桁架上进行了一系列疲劳试验。1886年培克尔 (Baker) 报告了他在与韦勒试验机相似的机器上进行的一系列小试件疲劳试验的结果。1898年，法国的工程人员编著出版了一本有关钢筋混凝土对重复载荷的承载特性的书。1870年到1890年间，一些研究者发展了韦勒的经典研究工作：如盖尔培尔 (Gerber) 和其他一些人研究了平均应力的影响；古德曼 (J. Goodman, 1862~1935) 提出一个有关平均应力的简化理论等。

整个十九世纪，对疲劳问题的研究（发表了总共大约80篇论文）还是很有限的，几乎只集中在当时最常用的材料，铁和钢材上。二十世纪初，光学显微镜开始被用于疲劳机理的研究，人们观察到局部滑移线和滑移带引起的裂纹。1911年，埃丹 (Eden)，罗斯 (Rose) 和顾宁汉 (Cunningham) 三人在伦敦机械工程师学会上报告了他们研究热处理、表面粗糙度、试件的形状和其他许多因素对钢和非铁金属合金疲劳行为的影响的论文。二十年代和三十年代，伦敦国家物理实验室的赫尔伯特 (Herbert)、果夫 (J. Gough, 1890~1965) 和他的同事们在疲劳机理的研究上做出了重大的贡献，他们通过改变材料的内部组织结构来解释疲劳现象，他们还研究了弯曲和扭转载荷的复合效应。1920年，格里费希 (A. A. Griffith, 1893~1963) 发表了他的关于脆性断裂理论的著名论文，他发现玻璃的强度取决于微裂纹的大小，如果假设

$s$  是断裂时的名义应力,  $a$  是断裂时的裂纹尺寸, 则它们的关系是  $s\sqrt{a} = \text{常数}$ 。

二十年代和三十年代, 除了常用结构钢、铸铁、铅和其他非铁金属合金以外, 对镍、镶牙用金合金、橡胶和各种塑料也进行了疲劳试验。1929年到1930年哈埃(Bernard Haigh, 1884~1941) 合理地解释了高强度钢和软钢的缺口试件对疲劳的不同响应。二十世纪三十年代, 汽车工业采用喷丸工艺, 避免了在弹簧和车轴上经常发生的疲劳破坏。美国工程师阿尔门(O. Almen, 1886~1973) 正确地解释了这种现象: 由于喷丸工艺, 在零件表面层上产生了压应力, 从而显著地改善了疲劳特性。1936年, 荷尔格(O. L. Horgner) 指出表面辊压能够阻止裂纹的生长。1937年诺埃贝尔(Heinz Neuber) 提出了缺口处的应力梯度效应, 同时发现缺口根部附近小体积中的平均应力比缺口峰值应力来得重要。1938年, 加斯奈尔(E. Gassner) 首次提出了程序疲劳试验方法, 在这以前, 在超过半个世纪的时间里, 疲劳试验都是按照韦勒发明的等幅加载来进行的。

第二次世界大战年代里, 疲劳研究集中在提高构件和结构的疲劳强度, 探索新材料和改进材料的特性上。1945年曼纳(M. A. Miner) 在瑞典工程师帕尔姆格雷(A. Palmgren) 于1924年提出的球轴承疲劳准则的基础上发表了线性疲劳损伤假说, 这个著名的假说通常被称为帕尔姆格雷-曼纳准则。虽然存在一些缺陷, 这个法则在疲劳寿命预测中迄今仍然是一个重要的工具。在许多情况下, 实验结果和理论研究都认为这个线性损伤假说是个相当合理的建议。

第二次世界大战后, 疲劳学的研究提高到一个新的水平, 许多研究者从事于探讨与疲劳破坏有关的影响因素和机

理,对疲劳行为的研究范围,从接近原子尺度到庞大的实际工程结构。人们从一系列的灾难性事故中,逐渐认识到疲劳研究的重要性。战后特别在航空工业中广泛开展对材料和结构疲劳的研究。这方面的课题包括飞机结构材料,燃气轮机的新材料以及其他耐高温新材料的疲劳特性,由于大型燃气轮机和火箭发动机的高频噪声引起的所谓“噪声疲劳”和由于高频振动引起的导弹结构的破坏。1954年两架英国彗星式飞机(最早的喷气式客机)连续失事,灾难性地从高空坠毁。经调查,事故是由压力舱疲劳破坏引起的。事故发生以前,1953年9月对该种机舱的一个试件进行了一组试验,预先加30个循环的高压载荷以后,在 $57\text{N/mm}^2$ 的压力下(等于在高空时机舱所受的压力)加压18000次。 $57\text{N/mm}^2$ 的压力要比铝合金的强度极限低得多。后来的调查发现最先加的30个循环高载荷在试件中产生了足够的剩余应力,结果造成了提高疲劳寿命的假象。

在航空工业中,人们把更多的注意力集中在通过实验室里很近似地模拟实际载荷条件来预测结构的疲劳寿命上。从六十年代中期开始,电子计算机加上液压伺服系统使得我们能够更准确地模拟实际载荷谱。在工作条件下测出的大部分载荷谱是随机变化的,因此被称为随机载荷谱。许多研究工作者还致力于用统计方法来分析和应用实测的疲劳数据。

最近二十年来,电子显微镜已经使我们能够观察在重复载荷作用下细微的组织结构变化,扩展了人们更好地了解疲劳基本机理的新视野。这些是和薄膜技术,X射线衍射和先进的金相技术联系在一起的。

人们越来越多地把重点放在低循环疲劳和热应力疲劳间

题上。在这种情况下,载荷或温度的变化也许每天只有一到几个周期,疲劳破坏可以发生在只有五万次甚至几百次载荷作用次数之后。六十年代初期,由于描述塑性应变幅值和疲劳寿命之间的 迈松-柯芬 (Manson-Coffin) 公式的发表,使低循环控制应变疲劳特性的研究取得了突破,它是目前缺口应变疲劳分析的基础。六十年代末期, F-111 飞机失事事件以及其他美国空军飞机的疲劳破坏问题使得在七十年代开始的 B-1 轰炸机发展计划中应用了断裂力学。1967 年,美国西弗吉尼亚州的 Point Pleasant 大桥在完全没有任何预兆的情况下断裂,事后的调查表明断裂是由一个鱼眼杆的应力腐蚀裂纹引起的。七十年代中期以来,断裂力学作为研究疲劳问题的重要工具已经受到广泛的重视。

最近几年,随着核电站的发展,对液态金属在核辐射的影响下的高温疲劳以及材料的疲劳强度的研究受到了重视。热电站设备和燃气轮机叶片的疲劳加蠕变的复合问题的研究也有了新发展。

### § 1.3 疲劳问题的范围

国际标准化组织 (ISO) 推荐的“金属疲劳试验的总则”中对疲劳这个术语是这样描述的:“由于反复施加的应力和应复,金属材料中可能产生的性质上的变化,通常能引起断裂或破坏”。这个定义一般也适用于非金属材料,虽然后者的破坏模式可能不相同(层次剥离,粘结脱开等等)。美国材料试验学会 (ASTM) 对疲劳作出下面的定义:“在某些条件下,金属材料中不断地发展着局部的永久性的变化过程,这些条件是指在材料某个点或某些点上产生交变应力和应变,并且当交变的次数达到一定数量之后,会产生裂纹或

完全的断裂”（《疲劳试验和数据统计分析术语的标准定义》，ASTM发行，编号E206-72）。

疲劳破坏经常在下较长的作用时间和较多的载荷循环次数（约几亿次左右）之后发生，例如汽车发动机的曲轴。然而也有许多构件和结构会在较高的交变应变下经过较少的循环次数（几千次甚至几百次）就会疲劳破坏，例如大型高压容器。和腐蚀、磨损或蠕变不同，疲劳破坏主要是取决于作用载荷循环总数而不是和构件或结构的使用时间直接有关。

疲劳问题是比较复杂的，因为影响疲劳行为的因素很多。一些对材料或构件的静态特性影响很小的因素，在疲劳现象中却可以起到显著的作用，例如，疲劳对构件及结构的表面状态和缺口形式是非常敏感的。

影响因素可以分为四大类（见图1-4）：即材料特性，载荷，构件的形式和尺寸，以及环境。图1-5是迈松提出的一个生动的图象，这么多的影响因素使得要准确地预测疲劳寿命变得非常困难，有时甚至不可能。尽管对疲劳问题已经努力地研究了半个多世纪，对材料疲劳的物理化学本质还不是十分清楚。除此之外，近年来又发展了许多新材料，对它们的疲劳特性也没有很深的了解。更由于原子能，高能物理，超音速飞行，导弹，卫星，宇宙飞船，海底采矿，摩天高楼结构和新化学过程等的发展，设计师面临着更多的疲劳新问题。

图1-6表明构件和结构疲劳设计的主要步骤。总的说来，设计过程包括两个部分：一个是工作应力的描述，另一个是许用应力的确定。从构件危险截面的名义应力谱和应力寿命曲线，根据累积损伤疲劳准则可以预测疲劳寿命，这里应力寿命曲线通常可以从实验得到。