

疲劳分析方法及应用

曾春华 邹十践 编译

国防工业出版社

疲劳分析方法及应用

曾春华 邹十践 编译

湖南人民出版社

一九九一年七月一日

内 容 简 介

疲劳是现代工业中急待拔除的隐患，疲劳分析是解决疲劳问题的重要手段。本书对疲劳的基本概念、疲劳分析的基本原理和方法、疲劳寿命估算、特别是疲劳分析方法的应用作了详细的阐述，对一些特殊问题的分析也作了简单介绍。

本书可供从事航空、宇航、造船、压力容器、冶金、机械等工作的技术人员和管理人员参考，也可供高等院校相应专业师生阅读与应用。

疲劳分析方法及应用

曾春华 邹十践 编译

*

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张13⁷/₈ 354千字

1991年2月第一版 1991年2月第一次印刷 印数：0,001—2,500册

ISBN 7-118 00597-5/0·49 定价：10.50元

绪 言

现代工业正在向着高速、高温、高压的方向发展。严重威胁着现代工业设备安全的疲劳破坏问题日益突出。据有关统计，在现代工业各个领域，大约有 80% 以上的结构强度破坏都是由疲劳破坏造成的。

第二次世界大战前后，约有 20 架英国“惠灵顿”号重型轰炸机连续失事，1948 年美国“马丁 202”运输机在正常航行中突然坠毁，1951 年英国的“鸽式”飞机在澳大利亚出事，1952 年美国“F-86”歼击机在空中爆炸，1953~1954 年英国“维金”和“慧星”号喷气客机又接连发生机毁人亡的事故，1979 年美国“DC-10”大型客机在芝加哥奥黑尔国际机场起飞不久坠毁。这一连串的飞机事故，引起世界各国特别是航空工业部门的极大震惊。经过事故的调查分析，发现这些事故都是由于疲劳破坏造成的。

疲劳破坏不仅威胁着航空工业，也给造船、桥梁、交通运输、动力机械、化工机械、工程机械等造成威胁。现代工业中的许多关键性动力设备，如蒸汽机的涡轮转子和壳体，核压力容器，燃气轮机的转子、叶片和盘，核燃烧元件等都严重地遭到疲劳的袭击。就电站设备来说，西德从 1971~1974 年蒸汽轮机设备共发生过 1393 起事故，法国核电站的压力容器和英国核电站的大型锅炉都发生过爆炸事故。至于高压贮罐、氧气顶吹转炉主轴、输石油的各种管道、阀门，机械中的曲轴、连杆、齿轮、轴承及焊铆接件的疲劳破坏事故，就更无法统计了。

疲劳破坏在现代工业中是十分普遍的，尽管人们对疲劳问题已引起重视，但是，近年来疲劳破坏事故仍然不断地发生。因此克服疲劳、消除隐患，用疲劳分析方法去指导设计已成为现代工业技术中的重要课题。

目 录

绪言	V
第一章 疲劳的基本概念	1
§ 1 疲劳的定义	1
§ 2 疲劳破坏的特征	1
§ 3 疲劳载荷	3
§ 4 交变应力和交变应变	4
§ 5 疲劳强度, 疲劳极限与疲劳寿命	7
§ 6 疲劳曲线	8
§ 7 疲劳破坏的过程	10
第二章 疲劳分析的基本原理	11
§ 1 疲劳分析	11
§ 2 疲劳破坏的形式与过程	13
§ 3 抗疲劳性能的测定	19
§ 4 疲劳累积损伤理论	26
§ 5 疲劳裂纹扩展理论	35
第三章 疲劳分析的基本方法	47
§ 1 金属的单一特性与疲劳特性	47
§ 2 现场数据的分类与分析	55
§ 3 应力分析	65
§ 4 腐蚀和磨损分析	73
§ 5 疲劳裂纹形成的分析	80
§ 6 疲劳试验方法及结果分析	84
§ 7 现行的疲劳设计方法	93
第四章 疲劳寿命估算	120
§ 1 疲劳寿命估算的概念	120
§ 2 疲劳寿命估算方法	122
§ 3 疲劳寿命估算方法的评价	143

IV

§ 4	影响疲劳寿命的重要因素	179
第五章	一些特殊问题的疲劳分析	242
§ 1	噪音疲劳问题	242
§ 2	低周疲劳问题	246
§ 3	热疲劳问题	250
§ 4	高温和低温疲劳问题	255
§ 5	非金属的疲劳分析	263
第六章	疲劳分析方法的应用	282
§ 1	断裂力学和断裂控制	282
§ 2	钢的疲劳特性分析	287
§ 3	高强度钢的疲劳分析	290
§ 4	铝合金的疲劳分析	294
§ 5	焊接结构的疲劳分析	299
§ 6	疲劳分析方法在汽车上的应用	315
§ 7	疲劳分析方法在飞机上的应用	327
§ 8	疲劳分析方法在直升飞机上的应用	362
§ 9	疲劳分析方法在火车钢轨上的应用	371
§ 10	疲劳分析方法在压力容器上的应用	381
§ 11	疲劳分析方法在海洋工程结构中的应用	398
§ 12	疲劳分析方法在机械设计中的应用	407
结束语		417
参考资料		418

第一章 疲劳的基本概念

疲劳是一门综合性学科，涉及的知识面很广，它不仅跟固体力学中的弹性力学、塑性力学、断裂力学、应力分析关系很密切，还跟数学、物理、化学、冶金、机械、金属物理等学科有千丝万缕的联系。疲劳，是固体力学的一个分支，它主要研究材料或结构在交变载荷作用下的强度问题，研究材料或结构的应力状态与寿命的关系。

§ 1 疲劳的定义

疲劳是一种十分有趣的现象，当材料或结构受到多次重复变化的载荷作用后，应力值虽然始终没有超过材料的强度极限，甚至比弹性极限还低的情况下就可能发生破坏，这种在交变载荷重复作用下材料或结构的破坏现象，就叫做疲劳破坏。

疲劳，顾名思义就是因作用时间过久而不能继续工作的意思，例如飞机的起落架，由于经常受到与地面相冲击的载荷作用，次数较多，虽然其应力值没有达到强度极限，也可能使起落架发生破坏，这就是飞机结构的疲劳破坏。

§ 2 疲劳破坏的特征

在现代工业中，很多零件和构件都是承受着交变载荷作用的。过去，这些零件或构件一直是采用材料力学公式，即基本上按静不变载荷才适用的公式来进行设计和计算的，有的部门直到今天还在沿用这种传统的方法。

众所周知，材料力学是根据静力试验来确定材料的机械性能

(比如弹性极限、屈服极限、强度极限)的, 这些机械性能没有充分反映材料在交变应力作用下的特性。因此, 在交变载荷作用下工作的零件或构件, 如果还是按静载荷去设计, 在使用过程中往往就会发生突如其来的破坏。

疲劳破坏与传统的静力破坏有着许多明显的本质差别:

1. 静力破坏是一次最大载荷作用下的破坏; 疲劳破坏是多次反复载荷作用下产生的破坏, 它不是短期内发生的, 而是要经历一定的时间, 甚至很长时间才发生破坏。

2. 当静应力小于屈服极限或强度极限时, 不会发生静力破坏; 而交变应力在远小于静强度极限, 甚至小于屈服极限的情况下, 疲劳破坏就可能发生。

3. 静力破坏通常有明显的塑性变形产生; 疲劳破坏通常没有外在宏观的显著塑性变形迹象, 那怕是塑性良好的金属也这样, 就像脆性破坏一样, 事先不易觉察出来, 这就表明疲劳破坏具有更大的危险性。

4. 在静力破坏的断口上, 通常只呈现粗粒状或纤维状特征; 而在疲劳破坏的断口上, 总是呈现两个区域特征, 一部分是平滑的, 另一部分是粗粒状或纤维状 (见图 1-1)。因为疲劳破坏时, 首先在某一点产生微小的裂纹, 这个裂纹的起点叫做“疲劳源”, 裂纹从疲劳源开始, 逐渐向四周扩展。由于反复的变形,

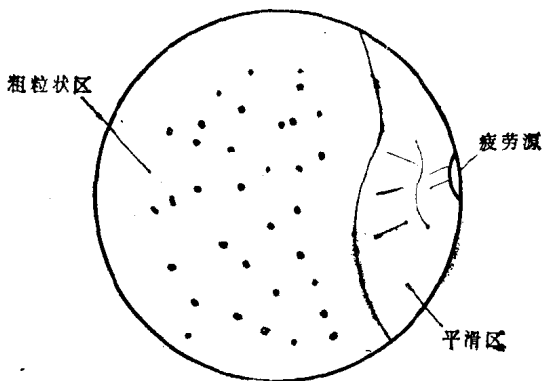


图1-1 典型的疲劳断面特征

裂开的两个面，时而挤紧，时而松开，这样反复摩擦，形成了一个平滑区域。在交变载荷继续作用下，裂纹逐渐扩展，承载面积逐渐减少，当减少到材料或构件的静强度不足时，就会在某一载荷作用下突然断裂。这种突然性的破坏，常使材料的断裂面呈粗粒状或纤维状。

5. 静力破坏的抗力主要取决于材料本身；而疲劳破坏的抗力与材料的组成、构件的形状或尺寸、表面状况、使用条件以及外界环境都有关系。

§ 3 疲 劳 载 荷

造成疲劳破坏的重复变化载荷，就叫做疲劳载荷。

疲劳载荷与静载荷是不同的，静载荷是载荷的一次作用并且

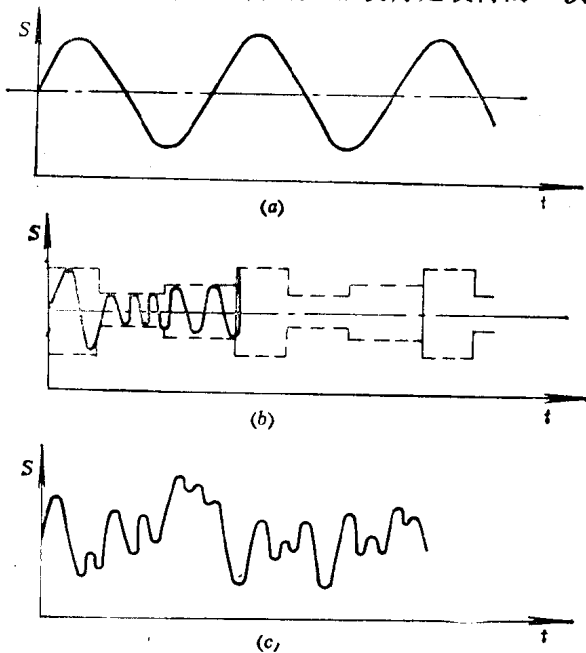


图1-2 疲劳载荷分类

(a) 常幅载荷；(b) 程序载荷；(c) 随机载荷。

是逐渐加上去的，载荷的大小和方向是不变化的。疲劳载荷是多次重复作用，载荷的大小和方向是变化的。

疲劳载荷一般分为确定载荷和随机载荷两种。确定载荷又分为两类：一类是载荷幅值永远不变的叫等幅载荷或常幅载荷（如图 1-2 a 所示）；另一类是载荷幅值按一定规律变化的叫程序载荷或阶梯载荷（如图 1-2 b 所示）。随机载荷就是指载荷幅值随机任意变化的载荷（如图 1-2 c 所示）。

我们通常所遇到的绝大多数载荷都是随机载荷。严格地讲，在机件上所受的载荷是没有绝对的静载荷，都得带某种成分的动载荷，甚至动载荷成分很大，即使如此，如果这种载荷并不多次重复作用，过去人们还是把它认作为静载荷，这当然并不是很科学的，也充分说明了为什么会经常出现疲劳破坏事故。

§ 4 交变应力和交变应变

随时间而交替变化的应力叫交变应力。

交变应力是十分常见的应力，例如蒸汽机上的活塞和连杆，就是承受拉压交变载荷的作用，活塞杆内和连杆内的应力就按一定周期交替变化着。又如齿轮齿根上的应力，是按一定周期由零变到一个最大值的。

交变应力有时又定义为在两个极值之间随时间作周期性变化的应力。为了清楚地看出应力的变化规律，我们可将应力 S 随时间 t 的变化规律绘成图形的形式，如图 1-3 所示的正弦波就是其中的一种。

应力的每一周期性变化叫一个应力循环。在应力循环中，代数值最大的叫做最大应力 S_{\max} ，代数值最小的叫做最小应力 S_{\min} 。最大应力和最小应力的代数平均值叫做平均应力 S_m 。最大应力与平均应力的差值，或平均应力与最小应力的差值的绝对值叫做应力振幅 S_0 。最小应力与最大应力之比叫做循环特征或应力比 R ，它是应力变化情况的一种表征。应力振幅 S_0 的二倍叫做应力范

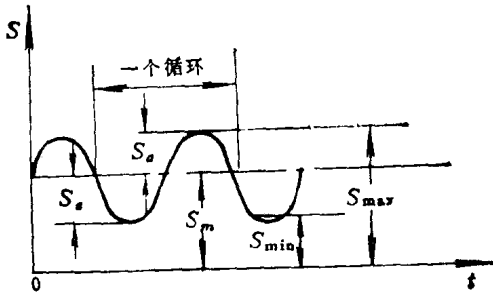


图1-3 应力循环图

围 ΔS 。

上面这些应力之间存在着下列关系：

$$S_{\max} = S_m + S_a$$

$$S_{\min} = S_m - S_a$$

$$S_m = \frac{1}{2} (S_{\max} + S_{\min})$$

$$S_a = \frac{1}{2} (S_{\max} - S_{\min}) = S_m \left(\frac{1 - R}{1 + R} \right)$$

$$R = S_{\min} / S_{\max}$$

同样，交变应变也是在两个极值之间作周期性变化的应变，如图 1-4 所示。

图中 ϵ_{\max} 称为最大应变， ϵ_{\min} 称为最小应变， ϵ_m 称为平均应

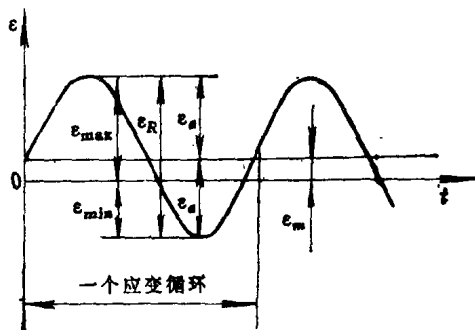


图1-4 应变循环图

变, ϵ 称为应变振幅。

当循环特征 $R = -1$ (此时 $S_m = 0$), 称为对称循环, 如图 1-5 所示。当循环特征 $R = 0$ (此时 $S_{\min} = 0$), 称为脉动循环, 如图 1-6 所示。当循环特征 R 等于其它任意数值时, 称为非对称循环, 如图 1-3 所示。

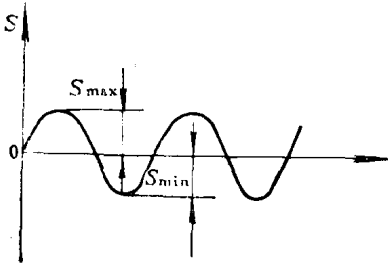


图1-5 对称循环

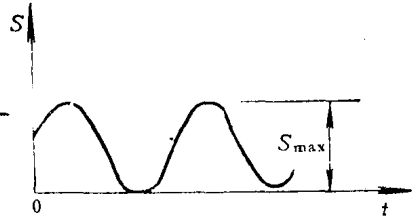


图1-6 脉动循环

我们可以把常遇到的对称和非对称应力循环图列成表格的形式, 如表 1-1 所示。

表1-1 常见的对称与非对称应力循环图

循环名称	特 征	R
静力	$S_m = S_{\max} = S_{\min} \begin{cases} < 0 \\ > 0 \end{cases}$	$R = +1$
对称循环	$S_{\max} = -S_{\min} = S_a$ $S_m = 0$	$R = -1$
应力变号拉应力循环	$S_m > 0, S_{\max} > S_{\min} $	$R < 0$
应力变号压应力循环	$S_m < 0, S_{\min} > S_{\max}$	$R < 0$
应力不变号拉应力循环	$S_m > 0, S_{\max} > S_{\min} > 0$	$R > 0$
应力不变号压应力循环	$S_m < 0, S_{\max} < 0, S_{\min} < 0$ $ S_{\max} < S_{\min} $	$R > 0$
脉动拉应力循环	$S_m = S_a = S_{\max} / 2$ $S_{\min} = 0$ $S_{\max} > 0$	$R = 0$
脉动压应力循环	$S_m = S_a = S_{\min} / 2$ $S_{\max} = 0$ $S_{\min} < 0$	$R = \infty$

§ 5 疲劳强度, 疲劳极限与疲劳寿命

材料或构件疲劳性能的好坏是用疲劳强度来衡量的, 所谓疲劳强度就是指材料或构件在交变载荷作用下的强度。

疲劳强度的大小又是用疲劳极限来衡量的, 所谓疲劳极限是指在一定循环特征 R 下, 材料或构件可以承受无限次循环而不发生疲劳破坏的最大应力 S_{max} 。

高循环时的疲劳极限称为耐久极限或持久极限。

疲劳极限主要通过疲劳试验测定, 有时也可以从其它机械性能 (比如屈服极限 σ_y 和强度极限 σ_B) 来推算, 例如

碳钢 (光滑试件、对称循环下)

$$\text{弯曲疲劳极限 } S_{-1\text{弯曲}} = 0.4\sigma_B$$

$$\text{拉伸疲劳极限 } S_{-1\text{拉伸}} = 0.7S_{-1\text{弯曲}} = 0.28\sigma_B$$

$$\text{扭转疲劳极限 } S_{-1\text{扭转}} = 0.55S_{-1\text{弯曲}} = 0.22\sigma_B$$

而材料的屈服极限 σ_y 和强度极限 σ_B 又存在下列关系:

碳钢

$$\text{拉压时 } \sigma_{y\text{拉压}} = (0.56 \sim 0.60)\sigma_B$$

$$\text{弯曲时 } \sigma_{y\text{弯曲}} = 1.2\sigma_{y\text{拉压}} = (0.67 \sim 0.72)\sigma_B$$

$$\text{扭转时 } \sigma_{y\text{扭转}} = 0.60\sigma_{y\text{拉压}} = (0.34 \sim 0.36)\sigma_B$$

合金钢

$$\text{拉压时 } \sigma_{y\text{拉压}} = (0.75 \sim 0.80)\sigma_B$$

$$\text{弯曲时 } \sigma_{y\text{弯曲}} = 1.11\sigma_{y\text{拉压}} = (0.83 \sim 0.89)\sigma_B$$

材料或构件在某一限度以下作应力振动时, 有时可以经过长期振动而不发生疲劳破坏, 这种不引起疲劳破坏的最大振幅也称为疲劳极限。而发生疲劳破坏时的应力循环次数, 或从开始受载到发生断裂所经过的时间称为该材料或构件的疲劳寿命。

§ 6 疲 劳 曲 线

表示应力振幅或最大应力与疲劳寿命之间关系的曲线称为疲劳曲线或 $S-N$ 曲线。

在交变应力作用下，材料抵抗疲劳破坏的能力有时也用疲劳曲线来衡量。疲劳曲线一般是通过试验测定的，即在一定的循环特征 R 下，用一组标准的试件，分别在不同的最大应力 S_{\max} 下受交变应力作用，直至破坏，记下每根试样破坏时的循环次数 N ，然后以 S_{\max} 为纵坐标，以 N 为横坐标作出的曲线，就是材料在指定循环次数下的疲劳曲线，如图 1-7 所示。

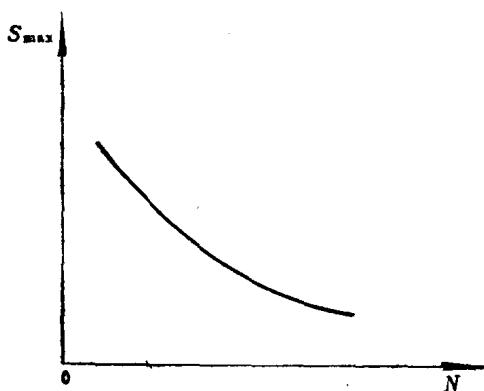


图1-7 材料的疲劳曲线

对于黑色金属及其合金来说， $S-N$ 曲线有一水平渐近线，水平渐近线的纵坐标，就是疲劳极限 S_f （见图 1-7）。当 S_{\max} 大于 S_f 时，试件经过一定循环次数后即发生疲劳破坏。当 S_{\max} 小于 S_f 时，试件可经受无限次循环而不破坏。一般规定，黑色金属及其合金经过 $2 \times 10^6 \sim 10^7$ 次循环仍不破坏，就可认为它能承受无限次循环。

有色金属及其合金（如铝和铝合金）的疲劳曲线没有这样的一条渐近线，一般就人为地规定 $10^7 \sim 10^8$ 循环次数对应的最大应

力为条件疲劳极限。

$S-N$ 曲线在直角坐标纸上是一条双曲类型的曲线。有时为了明显表示到达疲劳极限所需要的最少循环次数，可把 $S-N$ 曲线画在半对数坐标或双对数坐标纸上，在半对数或双对数坐标纸上， $S-N$ 曲线近似为一条直线，如图1-8所示。

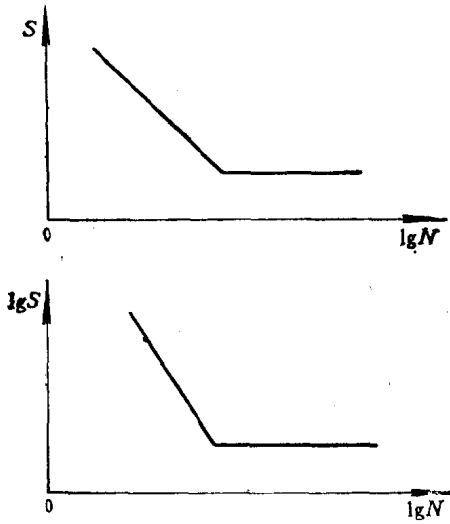


图1-8 半对数和双对数坐标上的 $S-N$ 曲线

上面说过， $S-N$ 曲线一般是根据试验结果作出的，但是各种材料的 $S-N$ 曲线由于形状有很大的差别，特别对铝合金材料，即使是同类型材料的 $S-N$ 曲线，也常常差异很大，因此人们极力想从 $S-N$ 曲线的变化规律中找出 S 与 N 的数学关系，避免作试验。目前已提出的公式有下列几个：

指数函数公式 $e^{aS}N = C$

其中 a 和 C 是两个待定常数， $e = 2.718$ 。对上式两边取对数便得：

$$aS \lg e + \lg N = \lg C$$

令 $a \lg e = \alpha$ ， $\lg C = \beta$

即得 $\alpha S + \lg N = \beta$

公式表明，指数函数相当于在半对数坐标中， S 与 $\lg N$ 成线性关系。

幂函数公式 $S^a N = C$

将上式两边取对数便得

$$a \lg S + \lg N = \lg C$$

公式表明，幂函数相当于在双对数坐标中， $\lg S$ 和 $\lg N$ 成线性关系。

§ 7 疲劳破坏的过程

疲劳裂纹一般是由构件表面或内部某一缺陷处开始的，当受力构件内部应力传递不均匀时，局部地区就会出现较大的应力，这就叫应力集中。在应力集中处，材料能够承受反复载荷的次数最少，因此在使用载荷的反复作用下，这里最先出现裂纹。裂纹使构件的一部分材料丧失承载能力，使余下能够承力的材料中的平均应力提高。由于构件一般都有一定的剩余强度，所以出现裂纹并不会立刻造成破坏，但是裂纹的尖端形成尖锐的缺口，又造成新的应力集中区。在连续使用中，此处又会继续裂开，这样裂纹变得越来越大，构件上能够传递应力的材料越来越小，直到剩下的材料不足以传递载荷时，构件就突然破坏了。因此，疲劳破坏的过程大致为：应力集中→产生裂纹→造成新的应力集中→促使裂纹扩展→最后断裂。或者把疲劳破坏过程划分为疲劳成核→微观裂纹生长→宏观裂纹出现→最后断裂。

第二章 疲劳分析的基本原理

可以说，机器和结构上所有的应力分析基本上都是疲劳分析，所不同的只是所施加应力的循环次数多少而已。理论上的静载荷可以作为单一的循环来处理，但完全不承受交变应力的机器和结构是极少的。一个完整的疲劳分析原理应该包括疲劳应力分析、疲劳破坏的形式、抗疲劳性能的测定以及预计疲劳寿命的理论（其中最重要的是疲劳累积损伤理论和疲劳裂纹扩展理论）。

§ 1 疲劳分析

几十年来，航空结构因疲劳而引起的破坏引起工程师们的极大关注，并且进行过大量的研究工作，这种研究工作十分有助于目前我们对疲劳过程的理解，而且十分有助于我们掌握疲劳分析的基本原理。

在现实环境中，由于某些原因，疲劳常常是十分令人头痛的破坏形式。疲劳，它是一种难以觉察的隐蔽过程，往往是由于结构中局部地区反复塑性应变的结果而产生疲劳现象，但在出现灾难性破坏之前，很明显，这种疲劳不出现任何可以觉察的特征，人们常常把这种情况称为隐蔽过程。疲劳对于材料的不均匀性和制造参数是十分敏感的，而且，疲劳也可能发生在通常认为是安全的应力水平上，即低于材料的屈服极限就能发生，因此疲劳分析就显得更为重要了。

一般说来，疲劳分析首先需要收集有关部件的几何形状、材料和加载的资料，并且通过计算和工程判断，获得构件工作寿命的一个估算值。然后根据所得资料的数量与质量去确定工艺规程的细节以及确定估算值的可靠程度。最后，在部件设计的各种不