

奇妙的疲劳现象

曾春华 编著

科学出版社

1986

内 容 简 介

人会疲劳,金属和非金属也会疲劳。把铁丝来回弯折几次,铁丝就会断裂,这就是疲劳现象。疲劳现象几乎遍及各个方面。本书是专门介绍疲劳现象的一本中级科普读物。书中系统地叙述了疲劳现象的产生和构成,危害和预防,对疲劳现象的预测、研究和实验等,并探讨了疲劳与其它相关学科的联系,以及在工业中的广泛应用。

本书内容丰富、深入浅出、通俗易懂。不仅叙述了基本概念,还通过许多实例介绍了各种方法。

本书可供具有中等文化程度的读者阅读,亦可供从事这方面研究的工程技术人员参考。

奇妙的疲劳现象

曾 春 华 编 著

责任编辑 徐一帆

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年10月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1986年10月第一次印刷 印张: 7

印数: 0001—4,100 字数: 154,000

统一书号: 13031·3310

本社书号: 4347·13—2

定价: 1.30 元

前 言

一辆高速奔驰在公路上的自行车，突然“咔嚓”一声，车翻人伤，走近一看，原来是前叉子断了。在我们的日常生活中，还经常可以看到类似的现象。一根铁丝，来回弯几次后就会突然断裂。炒菜的铝铲、挖地的铁锹、施工的铁镐在使用过程中也会突然断裂。马车的大轴、拖拉机的前梁在行驶途中或作业过程中也会突然破坏。这些在重复载荷作用下突然破坏的现象，就是“疲劳”破坏。

疲劳，顾名思义就是疲乏的意思。我们都知道，一个人经过紧张的劳动会感到腰酸腿痛，一个运动员经过剧烈的比赛会感到十分疲劳。材料，特别是金属材料和机器构件，也会和人体一样，在反复载荷的连续作用下也会产生疲劳。但是，人体疲劳与金属的疲劳有着本质的差别。人体肌肉的疲劳，经过适当的休息后，可以得到恢复。然而，金属和机器构件一旦疲劳后，就会产生破坏，而且疲劳在材料和机器构件中是潜移默化地进行着的，直到快发生破坏时，还没有明显的破坏迹象，事先不易察觉，甚至在远小于静强度极限的情况下，就可能产生疲劳破坏。因此，疲劳破坏具有严重的威胁性，在人们对它还缺乏认识的时候，可能会感到有些恐惧。

疲劳不仅跟我们日常生活关系密切，它还跟工业、农业和国防也都息息相关，比如航空、造船、交通运输、建筑、工农业机械、核设备和现代飞行器中都普遍存在着疲劳问题。自从第二次世界大战以来，世界上已有几千艘焊接船

船、几十座桥梁建筑毁于疲劳破坏，几百起铁轨疲劳造成的翻车事故。航空工业中的疲劳问题更是屡见不鲜，第二次世界大战以来，英美等国接连发生几十起机毁人亡的重大事故。现代工农业和国防中许多关键的动力设备，比如蒸汽轮机的转子和壳体、燃气轮机的叶片和盘子、核燃烧元件，经常受到疲劳的袭击。至于高压贮罐、氧气顶吹转炉主轴、工农业机械中的曲柄、连杆、曲轴、弹簧、齿轮、轴承、螺栓、铆钉接头中的疲劳破坏更是无法统计。据有关部门统计，绝大多数零构件（达80%以上）的强度破坏都是疲劳引起的。如果我们对疲劳问题缺乏足够的了解，就可能招致很大的损失。随着现代工业日益向高温、高压、高速方向发展，疲劳问题也显得越来越突出。

疲劳是力学的一个分支，它主要研究在交变载荷重复作用下材料和构件的强度问题，研究应力状态与寿命的关系。疲劳强度计算是很重要的，掌握它，就可能对某些按疲劳强度设计的机器达到能力大、用料少、寿命长、成本低的要求。疲劳又是一门综合性学科，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、振动、应力分析有关系，跟数学、物理、化学、冶金、机械和金属物理等学科也有密切联系。它既包括微观领域，又包括宏观模型，既有机理和理论的研究，又有实验科学的分析，所以，疲劳是一门十分有用和有趣的学科。

几十年来，国际上对疲劳问题曾进行过大量的研究，各国都成立了疲劳研究和情报交流的专门组织，投入了大量的人力和物力。目前，疲劳仍然是世界各国努力攻克的学科堡垒之一。

我们研究疲劳，了解疲劳就可以变害为利，为四个现代化服务，加速科学技术的发展，进一步开辟人们认识自然的

道路

由于作者水平有限，加之经验不足，书中难免有不少错误和缺点，热切盼望读者批评指正。

作 者

1986.1.

目 录

前言	i
一、什么是疲劳	1
1. 疲劳现象的发现	1
2. 疲劳的定义和疲劳破坏的特征	2
3. 疲劳载荷	5
4. 交变应力和交变应变	6
5. 疲劳强度、疲劳极限和疲劳寿命	10
6. 疲劳曲线	14
7. 等寿命曲线	17
8. 疲劳破坏的过程	21
二、为什么会产生疲劳	23
1. 疲劳破坏的原因	23
2. 有关疲劳过程的理论	24
3. 疲劳过程中组织及性质的变化	27
4. 疲劳断口形态	30
5. 疲劳微观裂纹生长机理	42
6. 显微组织对微观裂纹的影响	48
附录	49
三、疲劳跟哪些因素相关	52
1. 应力集中	52
2. 几何尺寸	62
3. 表面加工和表面处理	64
4. 温度	74
5. 腐蚀	77
6. 工作频率	79

7. 材料的强度和塑性情况	80
8. 材料组织的均匀性和稳定性	81
9. 其它因素	82
四、疲劳破坏规律的探索	83
1. 疲劳的累积损伤理论	83
2. 疲劳的裂纹扩展理论	97
3. 疲劳的剩余强度理论	117
4. 疲劳寿命的估算方法	119
5. 断裂力学与疲劳研究的关系	129
五、怎样进行抗疲劳设计	133
1. 静强度设计思想	133
2. 无限寿命设计思想	134
3. 安全寿命设计思想	134
4. 破损——安全设计思想	135
5. 损伤容限设计思想	138
6. 连接件的细节设计	139
六、怎样进行疲劳试验	146
1. 疲劳试验的目的	146
2. 疲劳试验机的种类	147
3. 疲劳试件的设计	154
4. 疲劳试验的方法	158
5. 疲劳试验结果的分析 and 处理	163
七、一些特殊的疲劳问题	169
1. 低周疲劳	169
2. 腐蚀疲劳	175
3. 擦伤疲劳	180
4. 噪音疲劳	182
5. 热疲劳	184
6. 高温疲劳和低温疲劳	186
八、非金属的疲劳现象	189

1. 木材的疲劳·····	189
2. 塑料的疲劳·····	193
3. 橡胶的疲劳·····	197
4. 混凝土的疲劳·····	199
5. 复合材料的疲劳·····	201
结束语·····	209
主要参考资料·····	210

一、什么是疲劳

疲劳破坏现象是十分普遍的。它对工业、农业和国防工业都有极大的危害性，所以我们对于疲劳应有足够的认识。那么，到底什么是疲劳？疲劳破坏有什么特征？疲劳用什么量来衡量呢？现在就让我们从疲劳的最基本概念谈起吧。

1. 疲劳现象的发现

我们认识事物的本质总得有一个过程，对于疲劳，人们正是经历了漫长的时间才逐渐认识的。

在现代工业中，很多零件和构件都是承受交变载荷作用的（交变载荷就是随时间而作周期性变换的载荷）。过去，这些零件或构件一直是采用材料力学公式，即基本上按静的不变载荷才适用的公式来进行设计和计算的。有些部门直到今天，还在沿用这种传统的方法。

大家知道，材料力学是根据静力试验来确定材料机械性能（如后面将要介绍的弹性极限、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。因为交变应力作用下的破坏不仅跟应力（应力就是作用在单位面积上的力）的大小、应力的分布有关，还跟零构件尺寸的大小、制造工艺、使用条件和环境有关。因此，在交变载荷作用下工作的零构件，如果还是按不变载荷公式去设计，在使用过程中往往就可能发生突如其来的破坏，事实恰恰证明了这点。起初，人们对于这种破坏现象感到困惑不解，

材料和构件已充分保证了静强度的设计要求，为什么还会破坏呢？后来，才逐渐发现，这突然的破坏是由于“疲劳”引起的。

早在一百多年前，铁路工程方面就出现过疲劳破坏。从那时起，人们就开始对机车车轮进行疲劳试验的研究。随后，在活塞机械的曲柄、连杆，汽车的车架、车轴和弹簧，蒸汽涡轮的叶片、盘子和轴，齿轮等地方相继出现疲劳问题，促使人们进一步的去研究疲劳，从而逐渐了解到一些疲劳破坏的过程。但这些研究仍然是表面的，肤浅的，对疲劳本质并没有进行深入的研究。又经历了几十年，一直到航空工业中发生了一连串的重大事故，如第二次世界大战前后，约有20架英国“惠灵顿”号重型轰炸机接连出现疲劳破坏。从1951年到1954年又连续发生美国“马丁202”运输机、“F-86”涡式歼击机，英国“鸽式”、“维金”和“彗星”式喷气机等几十架疲劳破坏的灾难性事故，才使世界特别是航空界震惊。至此，人们才普遍感到疲劳是个极其重要的问题。

2. 疲劳的定义和疲劳破坏的特征

在谈疲劳问题以前，首先让我们回顾一下材料力学中有关强度的一些基本概念，因为这些概念在疲劳研究中常常用到。用一根标准钢棒做拉伸试验，当作用在试棒上的拉力 P 由零逐渐增加时，试棒就逐渐被拉长。作用在单位面积上的力就叫做应力。当试棒被拉力 P 拉伸时，所产生的应力称为拉应力，当试棒被压缩时产生的应力称为压应力。如果以拉力 P 为纵坐标，试棒的绝对伸长 Δl 为横坐标，就可以得出像图1-0所示的拉伸图或拉伸曲线。

图 1-0 中从 O 到 A 是条直线，表示外力 P 与绝对伸长 Δl 成线性关系，这 OA 段就叫弹性变形阶段。当达到 B 点时，试棒发生了明显的塑性变形（塑性变形就是永久变形），此时称为“屈服”，B 点的外力除以试棒的横截

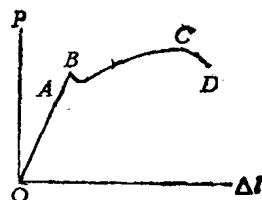


图 1-0 钢棒的拉伸曲线

面所得到的应力称为屈服极限 σ_s 。到达 C 点时，外力 P 最大，此时试棒某一部分横截面积开始明显的收缩，产生“颈缩”现象，C 点的应力称为强度极限 σ_b 。过了 C 点，试棒很快就断裂了。

疲劳是一个十分有趣的现象。人们发现，当材料或构件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 σ_b ，甚至比屈服极限 σ_s 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构件的破坏现象就叫做疲劳破坏。

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 σ_b ，也可能使起落架发生破坏，这种现象我们称它为结构的疲劳破坏现象。

研究疲劳，首先要知道疲劳破坏有什么特征。研究表明，疲劳破坏有着鲜明的特点。它是由于长期受交变应力作用的结果，疲劳破坏与传统的静力破坏有着本质的区别，主要表现在下列几个方面：

(1) 静力破坏大多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，它不是在短期内发生的，而是要经历一定的时间，甚至很长的时间才破坏

的。

(2) 当静应力小于屈服极限 σ_s 或强度极限 σ_b 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发生; 疲劳破坏通常没有外在的(宏观的)显著的塑性变形迹象, 那怕是塑性(塑性就是材料在载荷作用终止后, 完全地或者部分地保留在载荷作用下所得变形的能力)良好的金属也这样, 就象脆性破坏一样, 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; 而且在疲劳破坏的断口上, 总是呈现两个明显的区域。一部分是平滑的, 另一部分是粗粒状或纤维状的, 见图 1-1。因为疲劳破坏, 它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

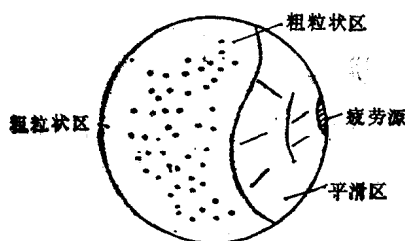


图 1-1 典型的疲劳断面

向四周扩展, 由于反复的变形, 开裂的两个面, 时而挤紧, 时而松离, 这样反复摩擦就形成了一个平滑区域。在交变应力作用下, 裂纹逐渐扩展, 承受载荷的面积

被削得越来越小, 当削到材料或构件的静强度不足时, 就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现粗粒状或纤维状特征。在实际使用中, 如果交变应力的变化是不规则的, 有时在较大的应力范围内变化, 有时在较小的应力范围内变化, 这时在光滑区域上还可以观察

到贝壳状的纹迹。

(5) 静力破坏的抗力，主要决定于材料的本身，疲劳破坏，则对于材料的组成，构件的形状、尺寸，表面状态，使用条件，外界环境等都十分敏感。

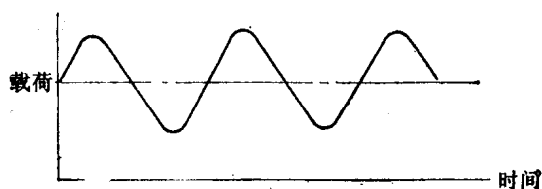
如果我们掌握了疲劳破坏的特征，就可以从断口和外形上判别零构件的破坏是静力引起的还是疲劳引起的，这对我们分析零构件的强度和进行疲劳设计都是十分有用的。

3. 疲 劳 载 荷

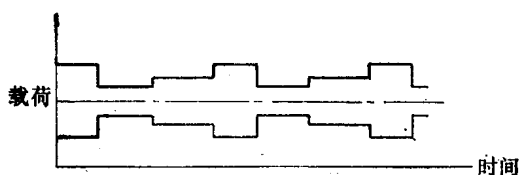
造成疲劳破坏的重复变化载荷，就叫做疲劳载荷。疲劳载荷与静载荷是有严格区别的，静载荷是载荷的一次作用，并且是逐渐地加上，且载荷的大小和方向不变化；疲劳载荷是多次的重复作用，载荷的大小和方向都在变化。

疲劳载荷一般分为确定载荷和随机载荷两种。在确定的疲劳载荷中，有一种是幅值永远不变的，这种载荷通常叫做等幅疲劳载荷或常幅疲劳载荷，如图 1-2 a 所示。还有一种是幅值按一定规律变化的，这种载荷通常叫做程序载荷或阶梯载荷，如图 1-2 b 所示。随机载荷就是指幅值随时间任意变化的载荷，这种载荷是没有规律性的，如图 1-2 c 所示。

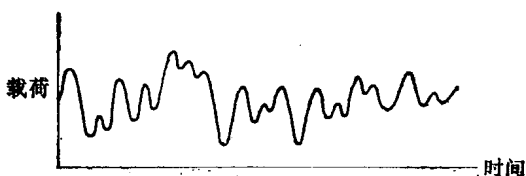
我们通常所遇到的载荷绝大多数都是变载荷或随机载荷。严格的讲，在零构件上所承受的载荷是没有绝对静载荷的，都得带某种程度的动载荷成分，甚至所带的动载荷成分较大。即使如此，如果这载荷并不是多次重复作用，我们还是令它为静载荷。这当然不是十分科学的，实际上，正是由于绝大多数零构件都承受着交变载荷，所以疲劳问题就显得十分重要了。



(a) 等幅疲劳载荷



(b) 程序疲劳载荷



(c) 随机疲劳载荷

图 1-2 疲劳载荷图

4. 交变应力和交变应变

单位面积上的力叫应力，单位长度的伸长量叫做应变。随时间而交替变化的应力叫做交变应力。那么什么是交变呢，一般来说应力最大值为正，最小值为负，称为交变。

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作用的，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，也是

按一定的周期由零变到一个最大值。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。

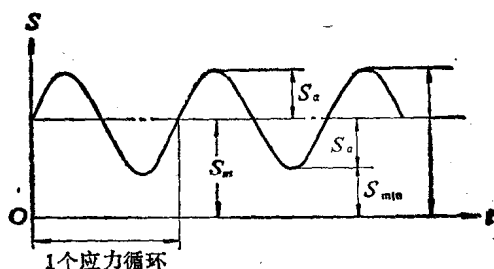


图 1-3 应力循环图

应力的每一周期性变化叫做一个应力循环。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，叫做应力振幅 S_a 。最小应力与最大应力之比叫做应力比 R ，或叫做循环特征，它是应力变化情况的一种表征。应力振幅 S_a 的二倍叫做应力范围。

注意，上面提到的一些参数，如最大应力、最小应力、平均应力、应力振幅、应力比、应力范围等，是疲劳研究中经常要用到的参数。首先要把它们的定义搞清楚，不过，这些参数并不是孤立的参数，它们之间存在着下列关系：

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

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

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

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

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

同样，交变应变也是指在上下两个极值之间随时间作周期性变化的应变，如图 1-4 所示。在图 1-4 中所标的参

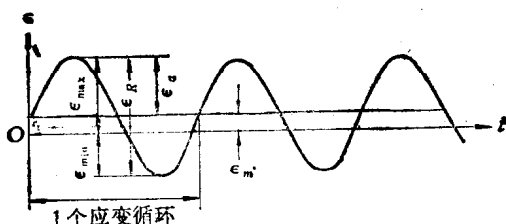


图 1-4 应变循环图

数： ε_{max} 为最大应变， ε_{min} 为最小应变， ε_m 为平均应变， ε_a 为应变幅， R 为应变比，这些参数之间也存在着下列关系：

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_m + \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_{min} = \varepsilon_m - \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{2} (\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min})$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2} (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) = \varepsilon_m \left(\frac{1-R}{1+R} \right)$$

$$R = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}}$$

当循环特征 $R = -1$ 时（此时 $S_m = 0$ ），叫做对称循环或称为完全交变，如图 1-5 所示。当循环特征 $R = 0$ 时（此时 $S_{min} = 0$ ），叫做脉动循环或称为脉冲循环，如图

1-6所示。当循环特征 R 等于其它任意数值时，通常就叫做非对称循环，如图1-3所示。

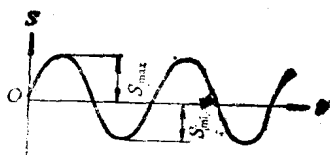


图1-5 对称循环



图1-6 脉动循环

表1-1 几种常见的对称与非对称应力循环图

循环名称	特征	应力比 R
静力	$S_m = S_{\max} - S_{\min} < 0$ $S_m > 0$ <u>应力变号对称循环</u>	$R = +1$
对称循环	$S_{\max} = -S_{\min} = S_a$ $S_m = 0$ <u>应力变号非对称循环</u>	$R = -1$
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	$S_m < 0, S_{\min} > S_{\max}$ <u>应力不变号非对称循环</u>	$R < 0$
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} $ <u>应力不变号脉动循环</u>	$R > 0$
脉动式拉应力循环	$S_m = S_a = S_{\max}/2$ $S_{\min} = 0, S_{\max} > 0$	$R = 0$
脉动式压应力循环	$S_m = S_a = S_{\min}/2$ $S_{\max} = 0$ $S_a < 0$	$R = \infty$