

# 金属的疲劳

· 刘禹门 编著

· 陕西科学技术出版社

---

# 金属的疲劳

---

刘禹门 编著

陕西科学技术出版社

**金属的疲劳**

**刘禹门 编著**

**陕西科学技术出版社出版**

(西安北大街 131 号)

**陕西省新华书店发行 国营五二三厂印刷**

**850×1168 毫米 32 开本 8 印张 1 插页 字数 170,000**

**1986 年 3 月第 1 版 1986 年 3 月第 1 次印刷**

**印数: 1—3,520**

**统一书号: 15202·121 定价: 1.95 元**

## 内 容 提 要

本书应用现代金属疲劳理论，力学与金属学相结合，宏观与微观相结合，理论与实际相结合，综合地叙述金属疲劳的一般规律，金属疲劳断裂过程，疲劳裂纹的萌生和扩展的宏观规律与微观机理，各种因素对疲劳强度的影响，以及改善抗疲劳能力的各种方法。

本书适合工程技术人员，科学研究人员，高等学校金属物理专业，材料专业，金属热处理专业，机械工程各有关专业师生阅读。



钢中珠光体的疲劳位错结构



钢中铁素体的疲劳位错结构

# 序 言

---

许多机械和工程结构均承受疲劳载荷。研究金属材料的疲劳断裂规律和寻求改善零件和构件抗疲劳断裂的途径，对发展机械制造业，提高机械产品质量具有重要的意义。

金属的疲劳强度与其化学成分、显微组织和晶体缺陷有密切关系。因此，在力学与金属学的基础上研究疲劳断裂规律是解决材料疲劳问题的根本途径。

本书首先分析一般疲劳试验所获得的金属疲劳的宏观规律，进而根据断裂力学和晶体缺陷理论，宏观与微观相结合地综合讨论金属材料疲劳裂纹萌生和扩展的基本规律。然后叙述各种因素对疲劳强度的影响。最后介绍提高金属材料抗疲劳性能的方法。

本书应用现代疲劳理论对常用的结构材料和常见的疲劳现象给予较多的阐述，并着重分析显微组织对金属疲劳的影响，以期建立清晰的概念，熟习基础理论，逐步掌握分析问题的能力，为解决工程技术实际问题打下初步基础。

本书在编写过程中，曾得到西安交通大学周惠久教授的支持，在此表示感谢。

# 目 录

---

<b>第一章 金属疲劳的一般规律</b> .....	( 1 )
1.1 高周疲劳和低周疲劳 .....	( 1 )
1.2 完整的疲劳曲线 .....	( 20 )
1.3 多次重复冲击 .....	( 33 )
1.4 疲劳实验数据的统计性质 .....	( 37 )
<b>第二章 金属疲劳断裂过程</b> .....	( 47 )
2.1 疲劳裂纹的萌生与扩展 .....	( 47 )
2.2 疲劳裂纹扩展模型 .....	( 54 )
2.3 疲劳裂纹扩展曲线 .....	( 61 )
<b>第三章 疲劳裂纹扩展的分析</b> .....	( 75 )
3.1 一般情况 .....	( 75 )
3.2 混合型载荷的疲劳裂纹扩展 .....	( 81 )
3.3 邻近分布裂纹的扩展 .....	( 84 )
3.4 疲劳裂纹扩展速率的位错动 力学分析 .....	( 86 )
3.5 疲劳裂纹的张闭和有效应力 强度因子 .....	( 87 )
3.6 弹塑性和全屈服条件的疲劳 裂纹扩展 .....	( 88 )



## 金属的疲劳

### 第四章 形状因素、加载制度、介质和温度对

疲劳强度的影响…………… ( 95 )

4.1 缺口和表面状态…………… ( 95 )

4.2 介质和温度…………… ( 103 )

4.3 加载频率对疲劳强度的影响…………… ( 109 )

4.4 扭转疲劳和复合应力疲劳…………… ( 113 )

4.5 非恒载疲劳…………… ( 119 )

### 第五章 显微组织对应变疲劳的影响…………… ( 123 )

5.1 循环硬化和循环软化…………… ( 123 )

5.2 钢的显微组织对应变疲劳的影响…………… ( 139 )

### 第六章 变形和断裂过程疲劳位错结构的变化…………… ( 153 )

6.1 面心立方金属的疲劳位错结构…………… ( 154 )

6.2 体心立方金属的疲劳位错结构…………… ( 157 )

6.3 奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的疲劳  
位错结构…………… ( 158 )

6.4 显微裂纹萌生过程位错结构的变化…………… ( 162 )

6.5 疲劳裂纹扩展阶段位错结构的变化…………… ( 165 )

6.6 停滞疲劳裂纹顶端的位错结构…………… ( 172 )

### 第七章 冶金因素对疲劳强度的影响…………… ( 177 )

7.1 概述…………… ( 177 )

7.2 显微组织对疲劳强度的影响…………… ( 179 )

7.3 淬火回火钢的疲劳裂纹扩展…………… ( 188 )

7.4 熔铸和压延对疲劳强度的影响…………… ( 205 )

### 第八章 提高疲劳强度的途径…………… ( 216 )

8.1 表面下层疲劳裂纹的理论分析…………… ( 216 )

8.2 预应变效应…………… ( 217 )

8.3 普通热处理和形变热处理 .....	( 224 )
8.4 化学热处理和高频表面淬火 .....	( 229 )
8.5 喷丸强化和滚压强化 .....	( 234 )
8.6 复合强化 .....	( 238 )

**附 录**

一、常用单位的换算 .....	( 243 )
二、主要符号表 .....	( 244 )

# 第一章

## 金属疲劳的一般规律

---

### 1.1 高周疲劳和低周疲劳

#### 1.1.1 引言

当金属试样施加疲劳载荷时，可在疲劳载荷即循环应力  $\sigma$  或  $S$  与试样达到整体断裂的循环次数  $N$  之间建立关系而绘制疲劳曲线。疲劳载荷范围从抗拉强度到疲劳极限，即  $\sigma - \lg N$  坐标上的完整疲劳曲线的一般形式示于图 1.1。这样的曲线可以分为几个区间和拐点 [1-4]。

整个曲线首先可以分为两个主要区域：小循环数的低周疲劳和大循环数的高周疲劳。这两个区域的界限并不很明显，这个界限就是动屈服极限，即以疲劳试验的加载速度测定的屈服强度。亦可称为动屈服强度。

低周疲劳范围占据着  $\sigma_B > \sigma > \sigma_2$  的应力范围，即图 1.1 中  $ABCD$  折线。在这样的应力作用下，从最初的加载循环起，外加能量便已用在显微裂纹的萌生上。低周疲劳范围还可以再分为三个区段。第 I 和 II 区段的断裂具有形成颈缩的准静载断裂特性，扭转和弯曲时不形成颈缩。第 III 区段称为循环蠕变断

## 金属的疲劳

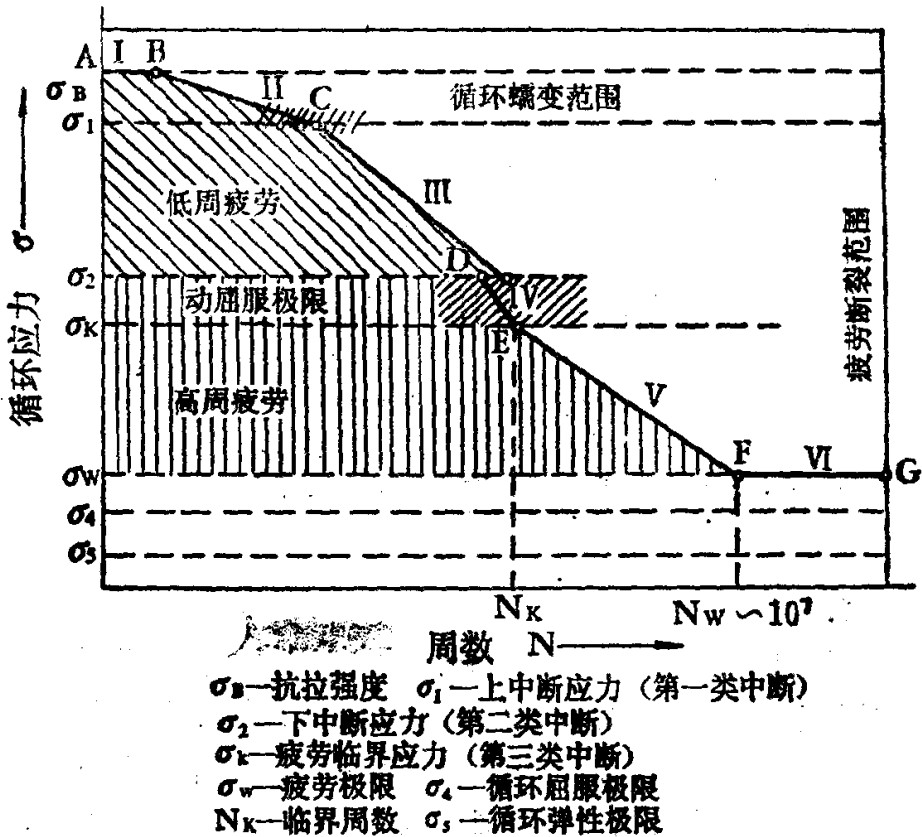


图 1.1 完整疲劳曲线示意图

裂，即循环载荷作用下的蠕变。在第Ⅲ区段断裂试样的表面上已经可以明显地看到疲劳断裂特征。

在低周和高周疲劳区之间是过渡区，疲劳应力  $\sigma_2$  和  $\sigma_K$  之间的疲劳断裂区域便是这个过渡区。应力  $\sigma_2$  可与动屈服极限一致 [2]。

在低于过渡区的疲劳应力作用之下发生的疲劳断裂属于高周疲劳，即图 1.1 中的曲线  $EFG$  所代表的区域。临界周数  $N_K$  大约为  $10^4$  周。

### 1.1.2 高周疲劳

(一) 疲劳曲线 (S-N 曲线) 和疲劳强度

为了定量地测定疲劳断裂抗力就需要在一定的条件下进行试验。试验载荷多为正弦波形, 参看图 1.2。把试验结果用疲劳应力, 即应力幅和载荷循环次数之间的曲线关系表示。这样的曲线称为疲劳曲线, 即 S-N 曲线。亦称为 Wöhler 曲线, 参看图 1.3 和图 1.4。

一般, 在疲劳试验时应力周期保持不变, 即应力循环频率保持不变, 因此所施加的应力条件可以写成:

$$\sigma_m \pm \sigma_a$$

$$(1.1)$$

式中  $\sigma_a$  是静应力或

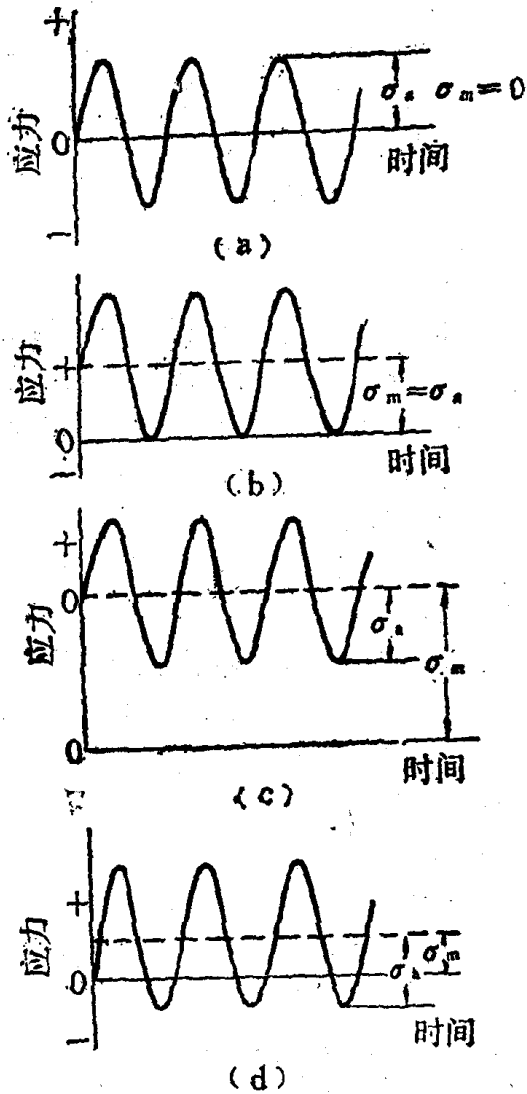


图 1.2 疲劳应力的类型

## 金属的疲劳

平均应力； $\sigma_a$  是交变应力， $\sigma_a$  等于应力范围的一半。用正号表示拉应力，用负号表示压应力。 $\sigma_m$  和  $\sigma_a$  的一些可能配合方式示于图 1.2。当平均应力  $\sigma_m = 0$ ，即图 1.2 (a) 所示情形时，最大拉应力等于最大压应力，这时称为对称交变应力或称完全反复应力。当  $\sigma_m = \sigma_a$  时，即图 1.2 (b) 所示情形时最小应力为零，这时称为脉动拉应力或反复拉应力。这类应力也可以是脉动压缩应力。

此外还有各种应力的配合方式：例如，起伏拉应力，参看图 1.2 (c)，或起伏压应力，这时平均应力为拉应力或压应力，以及从拉伸到压缩的起伏应力，参看图 1.2 (d)。这些应力可以一般地称为循环应力或疲劳应力。

上述应力条件也可用每一应力循环，即应力周期中的最大应力  $\sigma_{max}$  和最小应力  $\sigma_{min}$  之比，用  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  表示， $R$  称为应力比。

如果在某种加载条件下，试样中的应力，由于几何形状及断面变化而不是均匀分布的，通常使用名义应力表示。这个应力是指不考虑各种几何不连续的情况时的应力。这种几何不连续有试样中的裂纹，缺口，零件中的断面变化过渡，台肩，孔，键槽和螺纹等。

通常测定疲劳强度的步骤是采用一组相同的试样，在不同的恒定载荷所产生的循环应力作用下试验到断裂。这样便可以获得疲劳载荷或应力  $\sigma$  或  $S$  和达到试样整体断裂时的周数  $N$  间的关系曲线。典型的应力一周数曲线示于图 1.3 和图 1.4。因为  $N$  的数值变化范围比较大，所以横座标  $N$  一般采用对数坐标。

材料的疲劳强度一般是指在给定加载周数下不发生断裂

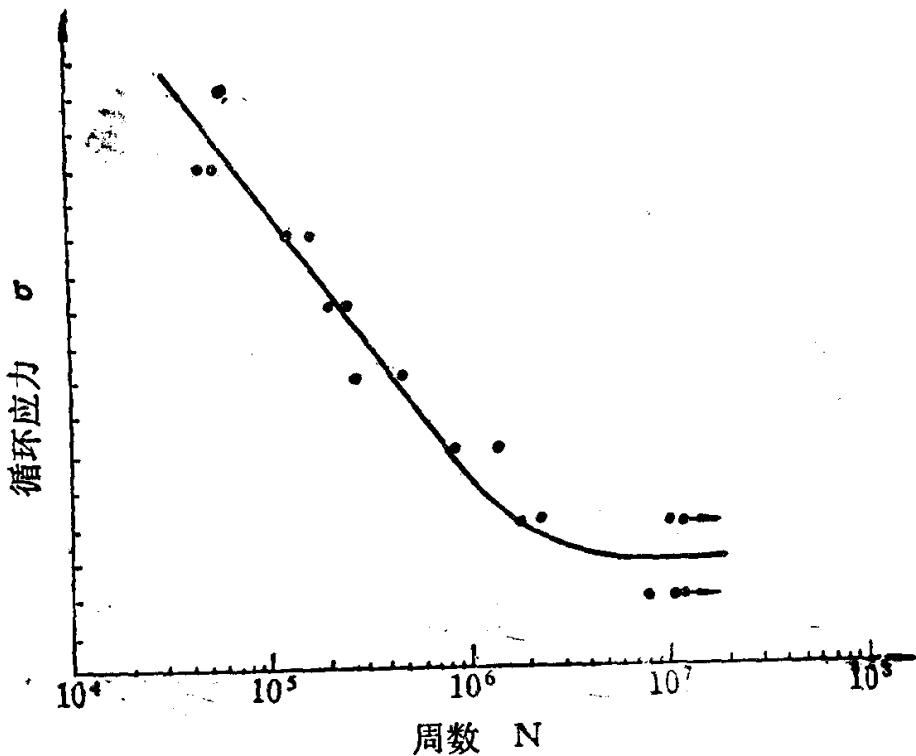


图 1.3 钢的 S—N 曲线示意图

的、抵抗最大循环应力的能力。例如在图 1.4 中对于经过  $10^7$  周后才断裂的材料来说，疲劳强度等于  $\sigma_1$ 。对于经过  $10^6$  周后才断裂的材料来说疲劳强度等于  $\sigma_2$ 。由此可知，疲劳强度的数值和断裂周数有关，当采用疲劳强度时必须说明其周数。

通常都是确定  $10^5 \sim 10^8$  周的疲劳强度。如果需要测定更多周数的疲劳强度，可采用加载频率较高的疲劳试验机。

有些材料，例如一般的结构钢，经过  $10^7$  周至  $10^8$  或  $10^9$  周试样还不发生疲劳断裂。这时曲线由两部分构成。一部分是倾斜线，它代表试样经过一定周数的断裂。另一部分是水平线，在此线应力之下试样不断（图 1.3）。这条水平线所代表的应力称为疲劳极限，或称耐久极限。由此可知，对于具有象

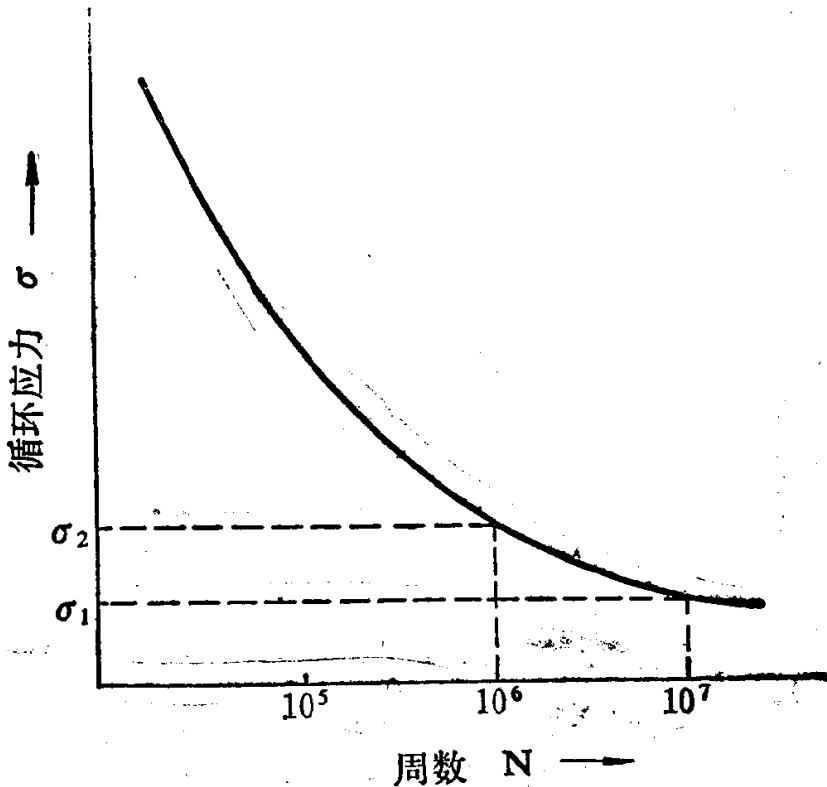


图 1.4 铝合金的 S—N 曲线示意图

图 1.3 那样疲劳曲线的材料比较其疲劳强度的大小时，主要是指不同材料的疲劳极限的高或低。对于另外一些材料，如多数有色金属合金，其 S—N 曲线无水平部分，即无明显上述的疲劳极限。因此，比较各种材料的疲劳强度大小时，可以采用条件疲劳极限，即对应一定循环周数可允许的最大应力，如图 1.4 中的  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  等。此外，也可指相同疲劳应力时寿命的长或短，亦即断裂周数的大或小。此后者用于具有明显疲劳极限的材料而承受的应力超过疲劳极限，即达到 S—N 曲线的斜线部分时，称为疲劳过载持久值。

应用 S—N 曲线也可以表示疲劳裂纹萌生和扩展的过程。



图 1.5 表示疲劳裂纹由小到大，一直到整个试样断裂过程的情况。其中每一条曲线代表一定的裂纹长度。通过这一组曲线便可看出在不同疲劳应力作用下裂纹的扩展过程。

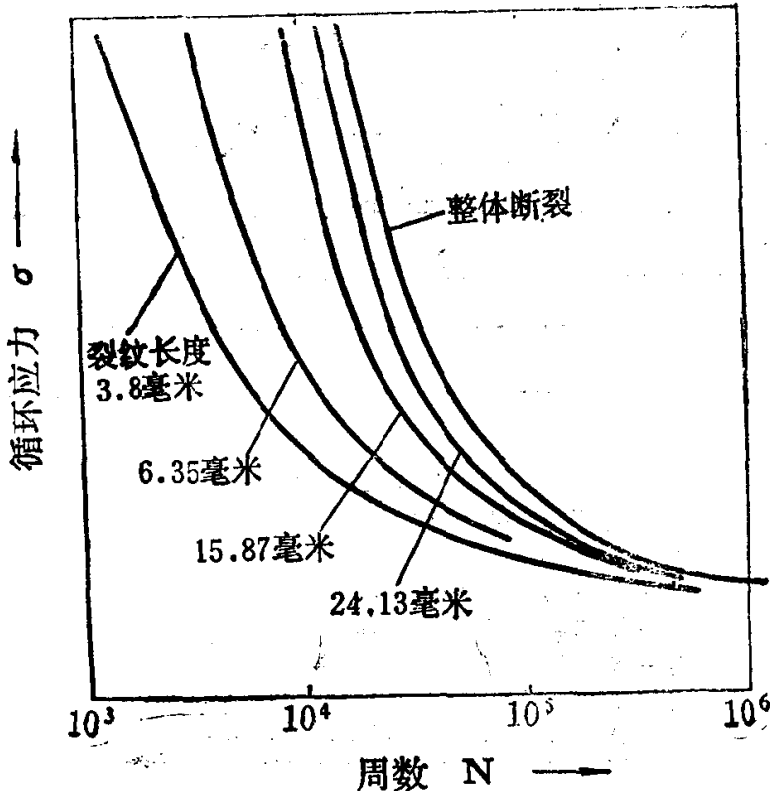


图 1.5 表示裂纹长度的 S—N 曲线

一般情况，以退火状态的金属为例，其疲劳过程是由四个基本阶段构成（图 1.6）。Ⅰ—孕育阶段，在这个阶段中晶体的畸变逐渐增加。Ⅱ—金属连续性的破坏，形成亚显微裂纹和它的发展。Ⅲ—显微裂纹发展到临界尺寸的宏观裂纹。Ⅳ—最终的破断，即试样的整体断裂，这个阶段是疲劳裂纹的失稳扩展。

此外，由于疲劳损伤的局部性和材料内部组织不均匀性，