金属材料的断裂与疲劳

林吉忠　刘淑华　编著

中国铁道出版社

金属材料的断裂与疲劳

林吉忠　刘淑华　编著

中 国 铁 道 出 版 社

1989年·北京

内 容 简 介

本书主要介绍金属材料疲劳和断裂的基本概念，侧重常用公式的推导和物理意义的阐述。全书共分六章，前三章介绍断裂过程的应力-应变关系，断裂力学基础和断裂理论，第四章专门介绍疲劳裂纹萌生，第五章以短裂纹扩展为主，并用简易方法绘出过载效应对裂纹扩展的影响，最后一章从材质、工艺及断裂性能综合分析车轴的使用寿命及发展方向。

本书可供有关专业的科研、设计及安全检查人员参考，也可作为相关专业大学生及研究生的参考书。

金属材料的断裂与疲劳
林吉忠　刘淑华　编著
中国铁道出版社出版、发行
责任编辑　宋黎明　封面设计　翟　达
各地新华书店经售
北京顺义燕华营印刷厂印
开本：787×1092 mm $\frac{1}{32}$ 印张：11.75　字数：269千
1989年6月第1版　　第1次印刷
印数：1—4,200册　定价：4.55元

前　言

本书是在作者为研究生讲授断裂力学与断裂理论基础上经过修改和增补后写成的。鉴于目前国内外已出版许多同类图书，在编写过程中，为了避免重复，着重从以下四个方面进行介绍：对基础概念着重阐明物理意义；对重要的基本公式进行详细推导；在疲劳部分侧重介绍裂纹萌生的规律和短裂纹的扩展；以车轴的疲劳和断裂作为理论应用于实际的例子。

全书共分六章，前三章是基础，分别介绍断裂过程中的应力-应变关系、断裂力学及常用的断裂理论，其内容以实用为目的，不追求系统性。第四章专门介绍疲劳裂纹的萌生规律和研究方法，为了防止断裂事故的发生，首先应当防止裂纹的产生，广义地讲，在应力不过大的情况下，没有裂纹的物体是不会断裂的。为了适应当前断裂学科的发展和实际工程的需要，在第五章中以短裂纹的扩展和门槛值为重点，同时对过载效应予以重视，而对其他参考书上大量介绍的长裂纹扩展和测试方法，本书就不重复了。第六章较为系统地介绍轴类的疲劳与断裂，从车轴受力状态的特点和断口检验来分析车轴产生横向疲劳裂纹的原因，计算裂纹萌生寿命和带裂纹使用的条件，提出车轴钢应当提高含碳量和改善热处理工艺，以防止过早产生疲劳裂纹。

本书除引用许多文献外，还将我们的研究成果编入书内。由于水平所限，错误难免，请读者批评指正。

作　者

1988年秋于北京

目　录

第一章　金属材料断裂过程中的应力与应变

金属材料的断裂是受多种因素影响的，其中应力是主要的外界因素；广义地讲，不受应力作用的金属材料是不会断裂的。在各种应力中，尤以拉伸应力最为普遍，也是最危险的。金属材料在外力作用下会发生变形，某种金属材料承受应力的能力体现在应变上，即外加应力与材料应变有对应关系。研究应力与应变关系的规律和特点是研究金属材料断裂的基础。

1.1　弹性变形与广义虎克定律

1.1.1　弹性变形

大多数金属材料，在低应力、短时间加载时，显示出弹性变形。所谓弹性变形，是指如果引起物体变形的外力去除之后，能完全恢复原状，这种性质叫做“弹性”。假如外力与变形之间又呈正比关系，这种弹性叫做“线性弹性”，其应力-应变关系可用虎克定律表达。

$$\sigma = E\varepsilon \qquad (1—1)$$

式中　σ——应力；

ε——应变；

E——弹性模量或杨氏模量。

弹性模量E表征材料抵抗正应变的能力，它是材料常数，取决于原子间作用力的强度，随原子结合键的形式而

异[1]。实验证明，E有两个特点：1. 对材料微观结构变化不敏感，改变合金元素的含量和热处理参数，能使合金钢的强度提高几倍，但E的变化一般不超过5%。2. E对温度变化不敏感，虽然弹性模量E与原子间距离或离子间距离的四次方或更高次方成反比，即温度升高，原子间距离增大，引起E值下降，但其值变化不大，E随温度降低的增长率仅为0.03%/K。例如，在绝对温度为4K时的E值仅比室温的高出10%左右。

在大多数工程结构设计中，只允许发生弹性变形，进一步了解弹性范围内的应力-应变关系是很重要的。在弹性范围内，横向应变与纵向应变的比值是常数，称为泊松比ν。

$$\nu=\frac{\text{横向应变}}{\text{纵向应变}} \tag{1—2}$$

法国数学家S.D·Poisson根据分子论计算出来的各向同性材料的$\nu=0.25$；实测金属材料的$\nu=0.25\sim0.35$。

若ν已知，可计算出体积变化。假定受拉的单元是立方体，边长为一个单位长度，一个方向上受拉会伸长，由于泊松效应，其他二个方向上要收缩，横截面积减少的比率为$(1-\nu\varepsilon):1$；而体积的增加比率为$(1+\varepsilon)(1-\nu\varepsilon)^2:1$，所以体积变化$\Delta V=(1+\varepsilon)(1-\nu\varepsilon)^2-1$，略去$\varepsilon$的高次项，$\Delta V=(1+\varepsilon-2\nu\varepsilon)-1$，最后求得：

$$\frac{\Delta V}{V}=\varepsilon(1-2\nu) \tag{1—3}$$

在拉伸载荷作用下，任何材料的体积都不会减少，由公式（1—3）可知，泊松比ν不会大于0.5。

如果是纵向压缩，必然伴随横向扩展，就工程精度来说，不论拉伸或压缩，泊松比ν值是相同的；弹性模量E的值

也是相同的，因此E也称拉压弹性模量。

虎克定律也可用位移δ和载荷P来表达，

$$P=k\delta \qquad (1-4)$$

三百多年前，虎克在金属丝伸长试验及其“关于弹簧”论文中给出公式（1—4）。因为$\varepsilon=\delta/l, \sigma=P/A$，所以虎克定律也可写成

$$\delta=\frac{PL}{EA} \qquad (1-5)$$

式中 L——试样的杆长；

A——试样的横截面积。

EA称为试杆的轴向刚性，而单位载荷产生的挠度L/EA称为顺性（或柔性），产生单位挠度所需的力EA/L称为刚性，因此刚性与柔性互为倒数。

由于弹性模量E是原子间键合力的反映，所以其值大小也是刚度大小的标志。E愈大，弹性变形愈小，刚度也愈大。由于E对温度变化不敏感；当温度改变100°C（或180°F）时，刚度的变化也不过百分之几。

在弹性变形中，除了拉压弹性模量E、泊松比ν之外，还有第三个重要的物理量G，称为剪切弹性模量。它也是材料常数，表征材料抵抗切应变的能力，其数学表达式为：

$$\tau=G\gamma \qquad (1-6)$$

式中 τ——剪切应力；

γ——剪切应变。

拉伸或压缩应力都是与作用表面垂直的，称正应力。正应力总是沿着作用面的法线方向，只需要在字母下加一个下标，就能说明它的作用面和方向。如σ_x表示正应力的作用面与x轴垂直，方向沿着x轴的方向。剪切应力就需要加两个下

标，前一个下标表示它的作用面与哪一个轴垂直，后一个下标表示它的作用方向与哪一个轴平行，如 τ_{xy} 表示剪应力的作用面与x轴垂直，它的方向与y轴平行。由于剪应力与作用表面相切，所以也称剪应力为切向应力。正应力与剪应力的主要区别是作用方向问题，剪应力的作用方向与特点见图1—1。假定切应力τ分布在上表面，若在水平方向保持平衡，必然有一个数值上相等、方向相反的切应力作用在下表面；为了使整个单元体处于静平衡状态，两个垂直面上的剪应力产生的力矩一定要等于上、下表面上剪应力产生的力矩，于是垂直面上的剪应力也必须等于τ，由此可得出：1. 作用在一个单元体上的剪应力总是数值相等、符号相反的成对产生；2. 剪应力总是在两个垂直平面上存在，其数值总是相等，其方向为两个应力都对着或都背着平面的交线。

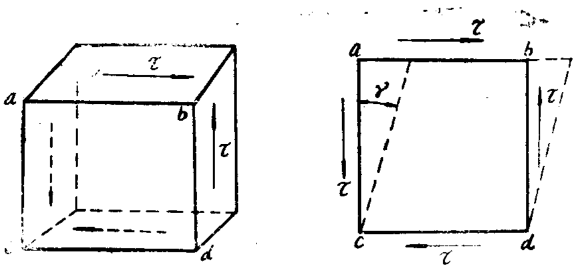

图1—1　剪切应力作用方向示意图

大多数工程脆性材料在承受拉伸应力或弯曲应力时，基本上处于弹性范围，这些材料的抗拉或抗弯强度受内部缺陷的影响很大，可以预计，强度与试样尺寸有关，试样大、缺陷多、强度低。根据统计理论，几何形状相似的试样，其强度与试样体积之间的关系为[2]

$$\frac{\sigma_{b1}}{\sigma_{b2}}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{1}{m}} \qquad (1—7)$$

式中 σ_{b1}，σ_{b2}——分别为两种试样的强度；

V_1，V_2——分别为两种试样的体积；

m——材料的常数。

根据公式（1—7），只要求出m值，任何尺寸试样的强度都可以求出来。但应指出，公式（1—7）对塑性材料不适用，因为塑性变形能降低缺陷的应力集中程度。

抗弯强度与抗拉强度之比约等于1.4左右，其数学表达式为

$$\frac{\sigma_{bb}}{\sigma_{bt}}=(2m+2)^{\frac{1}{m}} \qquad (1—8)$$

式中 σ_{bb}——抗弯强度；

σ_{bt}——抗拉强度。

对高磷钢，m约等于23，公式（1—7）和（1—8）与实验数据吻合。

1.1.2 广义虎克定律

在弹性平面问题中有三个基本方程：第一个是描述应力与体力关系的平衡微分方程，它只表达应力分量之间关系；第二个是应变与位移关系的几何方程，它只表达应变分量之间关系；以上两个方程互不相关，在解决实际问题中，还需要用第三个方程来表达应力与应变的物理关系，这个方程称为物理方程，用来阐明弹性体应力分量与应变分量之间关系。

单轴应力下的虎克定律可以推广到三轴应力状态，描述三轴应力状态中应力分量与应变分量之间关系的虎克定律称谓广义虎克定律。根据材料的泊松效应，不用烦琐的数学推导，就可以得出匀质各向同性弹性体的广义虎克定律公式，

其思路如下：

根据材料的泊松效应，一个方向上的应力，不仅引起同方向上的应变，同时在其他的两个重要方向上也要引起应变。例如σ_x在x方向上引起的应变为$\varepsilon_x=\sigma_x/E$，而在y、z方向上引起的应变分别为$-\nu\sigma_x/E$、$-\nu\sigma_x/E$（对各向同性材料）。如果在y、z方向上也存在应力σ_y、σ_z时，它们在x方向上引起的应变分别为$-\nu\sigma_y/E$、$-\nu\sigma_z/E$，所以三轴应力下的各方向应变为

$$\left.\begin{aligned}
\varepsilon_x&=\frac{[\sigma_x-\nu(\sigma_y+\sigma_z)]}{E} & \gamma_{xy}&=\frac{1}{G}\tau_{xy}\\
\varepsilon_y&=\frac{[\sigma_y-\nu(\sigma_z+\sigma_x)]}{E} & \gamma_{yz}&=\frac{1}{G}\tau_{yz}\\
\varepsilon_z&=\frac{[\sigma_z-\nu(\sigma_x+\sigma_y)]}{E} & \gamma_{zx}&=\frac{1}{G}\tau_{zx}
\end{aligned}\right\} \qquad (1\text{—}9)$$

式（1—9）就是广义虎克定律的数学表达式。

一个方向上的总应变是由该方向上的正应变和剪应变分量之和组成的，只有对各向同性材料，广义虎克定律才有（1—9）式的简单形式；若在各向异性材料中，弹性常数E、G、ν等都是结晶方向的函数，公式（1—9）就变得复杂了。因为在小应变情况下，剪应变比正应变小得可以忽略不计，所以广义虎克定律不仅对主应变适用，而且对任意三个互相垂直方向的应变都适用。

1.1.3 应力-应变普遍表达式

广义虎克定律公式（1—9）中三个关系式的左边相加为单位体积变化率$\Delta V/V=\triangle$，

$$\triangle=\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z \qquad (1\text{—}10)$$

右边相加

$$\frac{1}{E}(1-2\nu)(\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z)=\triangle$$

所以

$$\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z=\frac{E\triangle}{1-2\nu},$$

$$\sigma_y+\sigma_z=\frac{E\triangle}{1-2\nu}-\sigma_x$$

则

$$\varepsilon_x=\frac{1}{E}\left(\sigma_x(1+\nu)-\frac{\nu E\triangle}{1-2\nu}\right)$$

$$\sigma_x=\frac{E}{1+\nu}\varepsilon_x+\frac{\nu E\triangle}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

令$\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}=\lambda$，称为Lame常数。为了便于运用张量计算，引用下标记号i，j，当$i=j$时，有正应力-应变关系

$$\sigma_{ij}=\frac{E}{1+\nu}\varepsilon_{ij}+\lambda\triangle \qquad (1-11)$$

当$i\neq j$时，有剪切关系，并利用$E=2(1+\nu)G$，

$$\sigma_{ij}=2G\varepsilon_{ij} \qquad (1-12)$$

综合以上二式，便得出普遍应力-应变表达式

$$\sigma_{ij}=2G\varepsilon_{ij}+\lambda\triangle\delta_{ij} \qquad (1-13)$$

在不可压缩材料中，体积变化率为零，即公式（1—10）中的$\triangle=\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z=0$，对各向同性材料，$\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z=\varepsilon_x-\nu\varepsilon_x-\nu\varepsilon_x=(1-2\nu)\varepsilon_x=0$，由$1-2\nu=0$，可得出，不可压缩材料的泊松比$\nu=\frac{1}{2}$。只有$\nu<\frac{1}{2}$时，变形时才有体积变

化。例如在单轴拉伸时，$\Delta=\varepsilon_x(1-2\nu)=(1-2\nu)\sigma_x/E$；当$\nu<\frac{1}{2}$时，$\Delta>0$，拉伸时体积变大。又如单轴应变$\varepsilon_x\neq0$，$\varepsilon_y=\varepsilon_z=0$时，$\sigma_x=(\lambda+2G)\varepsilon_x$，$\sigma_y=\sigma_z=\lambda\varepsilon_x$，这些非零应力能防止在其他方向上发生收缩或膨胀。

1.2 均匀塑性变形

在金属材料的拉伸试验中，外载荷超过弹性部分之后，进入均匀塑性变形阶段。一般说来，这个阶段一直延续到外载荷达到最大值为止。深入研究各种金属材料均匀变形阶段的特点，对正确使用材料和防止断裂事故有重要作用。

1.2.1 应力-应变关系

作为金属材料力学性能的常规指标，习惯上采用工程应力-应变关系（或称条件值）。在表达应力、应变时，以试样原始截面积A_0、标距长度l_0为基础；例如在外载荷P作用下的工程应力定义为

$$\sigma_E=\frac{P}{A_0}$$

工程应变定义为

$$e=\frac{l-l_0}{l_0}$$

式中的P及l分别为瞬时值。工程应力、应变定义具有使用简便、容易计算的优点，但比较粗略，物理意义不明确，不能真实地反映断裂过程中的应力和应变，且随塑性变形量增大，误差增大。

真实应力定义为

$$\sigma=\frac{P}{A}$$

真实应变定义为

$$\varepsilon=\ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

式中的P、A、l都是变形过程中的瞬时值。在图(1—2)中显示出两种定义的关系。

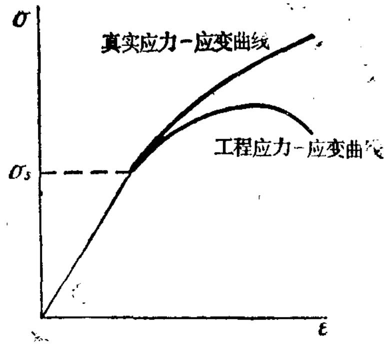

图1—2 拉伸应力-应变曲线

因为在加载过程中，外载荷P，试样标距l_0、横截面积A都在随时发生变化，真应力-应变直接与这些瞬时值有关。由于加载变形过程，纵向伸长伴随横向缩小，其瞬时值才能真正反映断裂过程。例如，真实应变$\varepsilon=\ln(l/l_0)=\ln(1+e)=e-\frac{1}{2}e^2+\frac{1}{3}e^3-\frac{1}{4}e^4+\cdots\cdots$，而工程应变$e=(l-l_0)/l_0$，只有将工程应变分成许许多多间隔，每个间隔的伸长量Δl为无限小时，其求和才能用积分代替，即

$$\sum_{i=1}^{\infty}\frac{\Delta l_i}{l_0}\longrightarrow\int_{l_0}^{l}\frac{dl}{l}=\ln\left(\frac{l}{l_0}\right)=\ln(1+e)=\varepsilon$$

将真应变用Taylor级数展开时可以看出，随着$e>10\%$，误差逐渐增大，这说明只有在应变小于10%时，工程应变才接近于实际应变。此外，真应变满足相加性，即$\varepsilon=\ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right)+$

$\ln\left(\frac{l_2}{l_1}\right)=\ln\left(\frac{l_2}{l_1}\right)$，而工程应变则不满足，因为 $(l_1-l_0)/l_0+(l_2-l_1)/l_1 \neq (l_2-l_0)/l_0$；进而，用瞬时值表达的应变值还能使衍生关系表达式简化，例如，体积不变条件用真应变表达为$\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z=0$，而用工程应变表达则 $(1+e_x)(1+e_y)(1+e_z)=1$。

1.2.2 均匀塑性变形中的两个基本方程

由于塑性变形是由剪切过程引起的，虽然受剪平面发生畸变，但各边长度不改变，所以试样体积不变，即$V=A_0l_0=Al$，其微分为

$$dV=dA\cdot l+dl\cdot A=0 \qquad (1—14)$$

因为$P=\sigma A$，在拉伸曲线上，当载荷P达到最大值$P\max$时，便有

$$dP_{max}=Ad\sigma+\sigma dA=0 \qquad (1—15)$$

在分析问题时，经常用到（1—14）、(1—15)两个基本方程。

由图（1—2）可以看出，均匀塑性变形过程对应一段光滑的抛物线，屈服后再增加应变，则应力也要随之增大，这种现象称为应变硬化。用应变硬化指数n代表材料抵抗进一步变形的能力。对于理想弹性材料$n=1$，对理想塑性材料，$n=0$，多数金属材料的n值介于0～1之间。

大多数强度较低的金属材料其均匀塑性变形阶段的真实应力-应变关系可用下面的经验公式表达：

$$\sigma=\sigma_0\varepsilon^n \qquad (1—16)$$

式中的σ_0是材料常数，它代表真应变为1时的真实应力，可用外推法求出。

$d\sigma/d\varepsilon$称为应变硬化率，即均匀塑性变形阶段曲线的斜

率，一般情况下，它比杨氏模量E小得多，换言之，塑性变形区域的应力-应变曲线的斜率比弹性部分的应力-应变曲线的斜率（E）小，因此这段曲线比较平坦。

应当提出，如果公式（1—16）对实际材料吻合的话，在应力-应变双对数坐标图上将得到一直线，其斜率为n；但实际上不经常如此，有时得到的是曲线，这时只好求某个特定应变值对应的硬化指数了。

由公式（1—15）可求出$d\sigma/\sigma=-dA/A$，再利用应变表达式$\varepsilon=\ln(l/l_0)=\ln(A_0/A)$，可导出

$$d\varepsilon=d[\ln(A_0/A)]=-\frac{dA}{A}=\frac{d\sigma}{\sigma} \qquad (1—17)$$

即在　$P=P_{max}$时，

$$\sigma=\frac{d(\sigma_0\varepsilon^n)}{d\varepsilon}=\sigma_0 n\varepsilon^{n-1}=\frac{n\sigma}{\varepsilon}，因而n=\varepsilon，$$

这时的ε为最大载荷时的真应变，记作ε_u

所以

$$n=\varepsilon_u \qquad (1—18)$$

同时在$P=P_{max}$时，$P_{max}=\sigma_u\cdot A_0$名义应力$\sigma_u$称为抗拉强度，经常记作$\sigma_b$。

最大载荷也可以用真实应力σ与瞬时面积A_u的乘积来表达，即

$$P_{max}=\sigma\cdot A_u=\sigma_0\varepsilon_u^n A_u=\sigma_0 n^n\cdot A_u$$

结合以上两式，

$$\sigma_u=\frac{\sigma A_u}{A_0}=\sigma_0 n^n\cdot\frac{A_u}{A_0}$$

又因为　$\ln\left(\frac{A_u}{A_0}\right)=\ln\left(\frac{l_0}{l_u}\right)=-\varepsilon_u=-n$