

# 金属的疲劳与断裂

## FATIGUE FAILURE OF METALS

S. 戈康达 著

颜鸣皋 刘才穆 译

# 金属的疲劳与断裂

S. 戈康达 著

颜鸣皋 译  
刘才穆

上海科学技术出版社

**Fatigue failure of metals**

**S. Kocanda**

**Sijthoff & Noordhoff International Publishers**

**1978**

封面设计 卜允台

**金属的疲劳与断裂**

S. 戈康达 著

颜鸣皋 刘才穆 译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海中华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 插页 1 字数 430,000

1983年11月第1版 1983年11月第1次印刷

印数 1-10,000

统一书号: 15119·2290 定价: (科五) 2.35元

## 内 容 提 要

本书是关于金属的疲劳与断裂方面的一本专著。书中对金属的疲劳理论、疲劳现象、疲劳与位错的关系、疲劳裂纹的扩展与断裂进行了深入的阐述。

本书图文并茂。辅有大量的、分析研究金属疲劳的金相和电子显微镜照片。并选列了近期来本学科的参考文献 867 篇，其中一些主要论点及有关研究报导已在正文中作了述评。

本书的主要读者对象为：从事金属疲劳断裂研究的工程技术人员；宇航、机械制造设计人员；大专院校有关专业师生。

## 英语版前言

在 1972~1974 年间,有关金属的疲劳现象,特别是裂纹的形成和扩展速率的研究,以不断增强的趋势进行着。他们的结果有助于扩大我们的知识,并且也给予我们对这一高深学科领域——金属疲劳的范畴一种新的洞察力。这样就使得不断地改进和修正那些有关金属疲劳的书籍成为必不可少的了。不幸的是要改变人们的意见和早已建立起来的某些重要分析见解,所涉及的任务绝不是轻而易举的。在准备我的这一版书时,上述目标是我所关心的,在这本书中采用了经过精心选择的 1972~1973 年间的资料及一部分 1974 年的报告。这些新资料中的一些重大事实和发现仅部分地被包括在本书的例证中,因为,有限的篇幅不允许我对它们给予应当得到的重视。

本书进一步采用了合作者 J. Kozubowski 所进行的微观研究的结果作为补充,对此,我应该向他表示特别的谢意。我也要感激斯图加特的 H. Mughrabi 先生,蒙他允许在我的这本书中,发表他的非常有意义的位错结构的显微图片。最后,我应该对 E. Lepa 先生表示衷心的感谢,由于他的关怀我的这本书才得到这样一本很好的英译本。

作 者

## 波语版前言

金属疲劳这一概念可能是 J. V. Poncelet 在 1839 年巴黎大学讲课时首次采用的。在阐述材料的物理-化学性质时, 这位 Ecole 理工学院前院长指出, 由于钢构件经受了周期地拉伸与压缩载荷后将使其强度耗损。十几年以后, 某些系统的疲劳研究开始了, 首先应感谢 A. Wöhler(1852)的工作。对承受变载的构件中材料的结构发生变化的过程和本质的研究, 可以追溯到很久以前。它们的开始与 J. A. Ewing 和 J. C. W. Humfrey (1901) 的试验有关, 他们描述了铝单晶体和铁多晶体受到周期应力时的滑移线痕迹。其次, 在固体物理的基础上对疲劳现象进行更为精细地研究是从五十年代开始的。这个时期作为一个打开局面使疲劳研究蓬勃发展的开始时期, 有关这一课题的大量的出版物和会议可以证明。在飞机、特别是宇航飞行器的发展中, 为了确保高度可靠性的需要, 导致一些研究人员从事于疲劳本质的认识 and 了解。从而, 促使了宇航工程得到极快、极大的发展。

目前, 深入发展的主要目标, 在于寻求零部件以及整机的疲劳损伤程度的预测。各种系统的有效和安全服役期的预测, 越来越需要以疲劳“微观世界”的知识作为手段。在这个微观世界中大量的复杂因素在作用, 形成一系列相互渗透, 相互依从的因果关系。

目前已有的大量文献, 对这个数十年来使科学工作者困惑的材料疲劳本质的基本问题, 仍然没有得到解决。许多不同的假说, 还不能十分肯定地以一种普遍形式阐明疲劳过程的物理成因、起源和微观机制。另一方面, 还有不少正式的数学表达式; 许多新的有关疲劳变化的出版物就显得更为频繁了。根据 G. Z. Libertiny<sup>[1.1, 2.130]</sup> 采用 J. Y. Mann(1954)、S. S. Manson(1965)给出的资料, 目前已发表的文献可达 11000 份左右。在 1880~1940 年间, 记载有 150 篇; 到 1960 年该数字跃进到 3500 篇。从 1960~1970 年间, 估计出版的至少有 7000 篇以上。这一估计还可能是不全面的, 因为早期的记载并未包括全世界所有的文章, 他们也不可能做到这一点。目前也难以说出有多少文章正待发表。缺乏对知识的筛选, 使得人们感到很费力, 为此迫使一个人要浏览大量的文献, 从中找出最重要的情报。

R. B. Heywood 在他的一本书中<sup>[1.2]</sup>。曾列出以英文为主的 50 多个专题的 1040 篇文章。W. Weibull<sup>[1.3]</sup>给出约 1100 篇参考文献, 大多数是英文的, 也有一些德文或法文的。

R. Cazaud 等<sup>[1.4]</sup>认为在法国出版约 1000 种(根据不同来源)。V. S. Ivanova<sup>[1.5]</sup>列举了 476 篇参考文献, 其中有 250 篇是苏联作者写的。在收集的各种文献中<sup>[1.60~1.63]</sup>讨论过苏联研究者的许多工作。德国文献在 H. Hertel<sup>[1.6]</sup>的书中列举最多, 约有 600 篇。

金属疲劳的波兰文献也非罕见, 包括许多专著<sup>[1.7~1.10], [1.15~1.16]</sup>以及其他一些书中的单独章节<sup>[1.11~1.14]</sup>。专门介绍疲劳的出版物中, 应该提到这些书<sup>[1.11~1.14]</sup>和一些现有的疲劳会议文集<sup>[1.16~1.63]</sup>以及部份涉及疲劳的会议文集<sup>[1.64~1.75]</sup>。

材料科学的成长, 导致疲劳成为一个较为狭窄的专门学科。传统分类为四组研究课题(疲劳载荷谱的研究和测定, 疲劳应变与应力分布的研究, 设计和根据金属物理及疲劳性质的观点来研究有关疲劳的现象)。一般来说, 这仍然是一种初步的分类法。但是, 局部范性应变的起始和累积的问题, 迄今已被明确地分开, 同断裂力学相联系的微裂纹和裂纹扩展的问题, 以及疲劳断裂的显微组织问题, 也都是如此, 更不用说不同加载条件及其计算问题。材料和零件的

低周疲劳强度这一较新的领域也被分成一些专门学科。疲劳计算的某些问题，特别是随机载荷的计算问题，目前只有某些研究集团和中心，才有解决的能力。这就是有关材料疲劳的书一些变化特征的概述。

作者提出了一种与以往书籍不同的安排，即遵照疲劳过程中由起始，痕迹与滑移带的阻塞，显微裂纹形成和扩展，一直到元件的破坏。也注意到过程的一般外观的变化，滑移带和显微裂纹的结构，疲劳位错的结构，裂纹扩展速率以及显微断口技术，疲劳断口表面的微观研究。后一种在认识与实践性质上，在一些书本中从未作过较多的讨论。很明显，上述这些课题不可能在一本书内作彻底的讨论，因此仅可能对这些课题作一回顾。本书重点放在说明一些概貌，对一些新发展和物理本质有意加以省略，为此，这些材料仅限于一般条件下的研究。一些疲劳现象的实例及在其他状态下(如在低温、高温和腐蚀介质等)的结果，仅作为对比加以评述。对一些在波兰文献中已进行了适当讨论的也未作保留。因此，要求读者在金属物理概念和材料力学，包括金属缺陷知识方面有一定的基础。

采用的文献是在过去10年中首次和最初发表的，未曾列入许多著名的早期文献。对于波兰已有的文献和其他作者寄来的大都采用了，对于这些作者的善意应特别提出。特别是对一些目前还不易得到的文章，如许多作者：美国密西根 Dearborn 城的 P. Beardmore，芬兰 Tampere 城的 P. O. Kettunen，加拿大 Toronto 城的 J. T. McGrath，Ottawa 城的 A. B. Mitchell，捷克 Brno 城的 P. Lukáš 和 M. Klesnil，瑞典 Uppsala 城的 O. Vingsbo，奥地利 Vienna 城的 B. Weiss，英国 Cambridge 城的 M. A. Wilkins 和 Salford 城的 D. G. Teer 寄来的在第三章复制的某些位错结构的原始照片，谨致以深切的谢意。

这本书大部分根据我自己以及我的同事们自1951年以来的研究工作写成，特别是应用在第一、第二和第五章中。因此，在图中未曾角注参考文献。

我很高兴借此机会对所有参加共同研究过程中的一些同事们，和我的一些在电镜方面做研究工作的朋友 Barbara Malkiewicz-Pietrzyk、Jan Kur 和 Jan Kozubowski 表示感谢!

Stanisław Kocanda

# 目 录

英语版前言	
波语版前言	
<b>第一章 基本概念及疲劳过程</b> .....	<b>1</b>
1.1 疲劳应力 .....	1
1.2 Wöhler 疲劳图 .....	3
1.3 低循环范围 .....	4
1.3.1 一般试验方法; 基本公式 .....	4
1.3.2 各种因素和试验条件的影响; 硬化与软化假说 .....	12
1.4 疲劳过程的阶段 .....	16
参考文献 .....	28
<b>第二章 疲劳现象</b> .....	<b>35</b>
2.1 引言 .....	35
2.2 滑移带 .....	35
2.2.1 在疲劳极限以上区域的滑移带 .....	38
2.2.2 在疲劳极限以下区域的滑移带 .....	42
2.3 挤出物与挤入槽 .....	46
2.3.1 在铁与铜多晶体中的挤出物与挤入槽 .....	46
2.3.2 挤出物与挤入槽形成的模型及假说 .....	49
2.4 疲劳裂纹 .....	55
2.4.1 裂纹起源与扩展 .....	55
2.4.2 多晶体铁中的微裂纹 .....	58
2.5 研究疲劳现象的补充方法 .....	62
2.5.1 疲劳现象与物理性能的变化 .....	62
2.5.2 离子轰击(刻蚀)法 .....	63
2.5.3 热浸蚀法 .....	64
2.5.4 疲劳现象与表面显微光洁度 .....	67
2.6 不同金属的疲劳变化研究述评 .....	71
2.6.1 面心立方金属及合金 .....	71
2.6.2 体心立方金属及合金 .....	78
2.6.3 密排六方金属 .....	84
2.6.4 电镀钢试样中的微裂纹萌生 .....	89
2.7 疲劳理论 .....	90
2.7.1 一般评述和早期的理论 .....	90
2.7.2 位错理论和裂纹萌生模型 .....	92
2.7.3 统计理论 .....	96
2.7.4 能量理论 .....	97
参考文献 .....	99
<b>第三章 疲劳的位错结构</b> .....	<b>107</b>
3.1 引言 .....	107
3.2 面心立方金属及合金的位错结构 .....	109



3.2.1	铜及铜合金	109
3.2.2	铝及铝合金	119
3.2.3	奥氏体钢	124
3.2.4	其他金属及合金	127
3.3	体心立方金属及合金的位错结构	127
3.3.1	铁及铁合金	127
3.3.2	非铁金属及合金	136
3.4	密排六方金属及合金的位错结构	136
3.5	综合论述	136
	参考文献	138
<b>第四章</b>	<b>疲劳裂纹扩展</b>	<b>144</b>
4.1	概述	144
4.2	裂纹扩展的描述	145
4.3	确定疲劳裂纹扩展速率的基本关系式	151
4.4	加载条件对疲劳裂纹扩展速率的影响; 各种问题(示例)	163
4.5	非扩展疲劳裂纹	184
	参考文献	187
<b>第五章</b>	<b>疲劳断裂</b>	<b>196</b>
5.1	引言	196
5.2	断口的分类及其形态特征	197
5.2.1	断口的一般分类	197
5.2.2	断口的基本类型	198
5.3	疲劳断裂的宏观组织	210
5.3.1	断裂表面的特征	210
5.3.2	断口的宏观组织与加载方式(示例)	212
5.4	疲劳断口的显微组织	218
5.4.1	概述	218
5.4.2	疲劳条纹	219
5.4.3	轮胎痕迹	234
5.4.4	断口显微组织及其解释(示例)	238
5.4.5	结束语	259
	参考文献	260
<b>译后记</b>		<b>266</b>

# 第一章 基本概念及疲劳过程

## 1.1 疲劳应力

所有机器和设备经受的典型的交变载荷称为疲劳载荷，与其相应的应力称为交变应力或疲劳应力，该交变载荷的变化过程称为载荷谱，它可能是无规律的、混乱的或者（最常见的）随机的，即可能表现出某些规律性。我们现在介绍一些非恒定的或恒定的过程。一个载荷谱在确定的时间间隔内呈规律性的、相等的重复叫做周期，这种具有周期性交变特征的载荷称为循环载荷。因此，每一循环包含着一个载荷变化的完整周期和相应的应力变化的完整周期。正弦载荷是周期性变载的一种特殊情况，已将它作为测定结构材料和元件疲劳性能的基础。

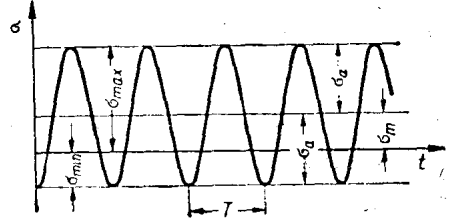


图 1.1 正弦疲劳应力谱示例

一个正弦应力周期(图 1.1) 是用该循环的最大应力  $\sigma_{\max}$ 、最小应力  $\sigma_{\min}$ 、变化周期  $T$  或它的倒数——频率  $f$  来描述的。某些有关的标准中就包含着用于金属疲劳试验中的这些或其他一些基本概念。

周期应力的变化特征是由该循环的平均应力  $\sigma_m$  确定的，

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1.1)$$

这相当于周期性应力的静力分量，并以交变应力幅表示

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1.2)$$

$\sigma_a$  是一个可变量(为一个全反复的动态变量)，因此， $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ ； $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$ ，而应力范围是

$$2\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (1.3)$$

一个循环的非对称性用应力比表征

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1.4)$$

在疲劳计算中，W. Moszyński 等也曾采用过一个载荷恒定系数  $\kappa$

$$\kappa = \frac{1+R}{1-R} \quad \text{或者} \quad R = \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \quad (1.5)$$

上述概念和符号可以写成循环应力与时间  $t$  的函数关系及其普遍方程，

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a F(t), \quad (1.6)$$

式中： $F(t)$  代表与时间有关的应力幅的变化，当应力是正弦变化时，在谐振的情况下

$$F(t) = \sin(\omega t + \varphi)$$

这里  $\omega$  表示应力变化的角频率 ( $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ )， $\varphi$  表示起始相位角，

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.7)$$

用这些方程可以求出任何瞬时的循环应力。

表 1.1 所列的一些应力循环的不同类型，其区别如下：

表 1.1 疲劳应力的各种类型

$\sigma=f(t)$ 图 形	循环名称	应 力 系 数				
		最大与最小 $\sigma_{\max}$ 与 $\sigma_{\min}$	平 均 $\sigma_m$	应 力 幅 $\sigma_a$	应 力 比 $R=\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$	恒 定 比 $\kappa=\frac{\sigma_m}{\sigma_a}$
	恒 定 (正值)	$\sigma_{\max}=\sigma_{\min}$ $>0$	$\sigma_{\max}=\sigma_{\min}$	0	+1	$+\infty$
	循环拉伸	$\sigma_{\max}>0$ $\sigma_{\min}>0$	$>0$	$\neq 0$	$0 < R < 1$	$1 < \kappa < +\infty$
	循环拉伸 (零到拉伸)	$\sigma_{\max}>0$ $\sigma_{\min}=0$	$\frac{1}{2}\sigma_{\max}$	$\frac{1}{2}\sigma_{\max}$	0	1
	交 变	$\sigma_{\max}>0$ $\sigma_{\min}<0$ $\sigma_{\max}> \sigma_{\min} $	$>0$	$\neq 0$	$-1 < R < 0$	$0 < \kappa < 1$
	全反复	$\sigma_{\max}=-\sigma_{\min}$ $>0$ $\sigma_{\min}<0$	0	$\sigma_{\max}= \sigma_{\min} $	-1	0
	交 变	$\sigma_{\max}>0$ $\sigma_{\min}<0$ $\sigma_{\max}< \sigma_{\min} $	$<0$	$\neq 0$	$-\infty < R < -1$	$-1 < \kappa < 0$
	循环压缩 (零到压缩)	$\sigma_{\max}=0$ $\sigma_{\min}<0$	$\frac{1}{2}\sigma_{\min}$	$\frac{1}{2} \sigma_{\min} $	$\pm\infty$	-1
	循环压缩	$\sigma_{\max}<0$ $\sigma_{\min}<0$	$<0$	$\neq 0$	$+1 < R < +\infty$	$-\infty < \kappa < -1$
	恒 定 (负值)	$\sigma_{\max}=\sigma_{\min}$ $<0$	$\sigma_{\max}=\sigma_{\min}$	0	+1	$-\infty$

在一个单向循环中, 应力大小有变化, 但保持相同符号, 这种循环称为脉动, 如周期拉伸、周期压缩等, 单向循环的一个特殊情况就是零到拉伸循环, 即  $\sigma_{\max}=0$  或  $\sigma_{\min}=0$ , 从而  $|\sigma_m|=\sigma_a$ 。

在双向循环中, 应力的大小和符号均发生改变, 这种类型的一个特殊情况就是全反复循

环, 即  $|\sigma_{\max}| = |\sigma_{\min}|$ , 因此这是一个对称循环。这一类型的另一循环是非对称的, 即  $\sigma_{\max} \neq \sigma_{\min}$ , 从而  $|\sigma_m| \neq 0$ 。

具有相同应力比  $R$  的循环是相似的。

疲劳极限或疲劳强度  $S_D$  是在 (按常规限定的) 周期极限数值  $N_L$  内元件不致于失效的最大应力  $\sigma_{\max}$  (对一定的应力循环), 因此这是一个实用的疲劳极限, 周期的极限数值  $N_L$  是疲劳试验的基础, 对于结构钢和其他铁合金来说为  $10 \times 10^6$  次循环; 而对于非铁合金来说则为  $100 \times 10^6$  次循环; 对各种结构元件,  $N_L$  采取  $2 \times 10^6$  次循环。确定  $S_D$  失效的准则是试样的断裂或者出现可检测的裂纹, 即这些裂纹可以采用探伤 (如磁力或超声) 或者光学的方法加以探测。

疲劳极限可用不同类型的加载来测定, 最常用的是全反复循环, 很少采用零到拉伸循环, 加载类型在疲劳极限符号上加上适当的角注。在全反复弯曲下的疲劳极限以  $S_{br}$  表示; 在单向零到拉伸弯曲下为  $S_{bs}$ ; 对于任何单独测定循环的弯曲疲劳极限以  $S_b$  表示; 以其他类型加载的疲劳极限则用类似方式表示 (表 1.1)。

## 1.2 Wöhler 疲劳图

疲劳强度 (疲劳极限或耐久极限) 是通过试验确定的, 即采用一组标准试样, 在不同的  $\sigma_a$  和  $\sigma_m$  下, 试验所达到的断裂循环数为  $N_a$  或超过  $N_L$ 。在  $\sigma-N$  坐标图上绘出测量点, 把它们连接起来, 就得到了疲劳曲线或 Wöhler 疲劳图。

该曲线通常是以  $\sigma-\log N$  坐标绘制的, 有时也采用  $\sigma-N$  或  $\log \sigma-\log N$  坐标。以  $\sigma-\log N$  为坐标的疲劳曲线是一条折线 (图 1.2), 不过在转折点处出现很小的圆弧段。曲线中两根直线段的交点就决定了理论极限循环数  $N_0$ 。

绘制 Wöhler 曲线的坐标点主要是在一定的  $\sigma_m$  和变化的  $\sigma_a$  下, 试样出现破坏 (斜线) 或在一些  $\sigma_a$  值等于或低于疲劳极限 (曲线右方——与  $N$  轴平行的直线) 不产生破坏时测出的, Wöhler 曲线也可设  $R = \text{常数}$  或  $\sigma_{\min} = \text{常数}$  来得到。

在基础教课书和有关标准中给出了绘制 Wöhler 曲线和其他疲劳曲线以及疲劳试验的一些有关细节。

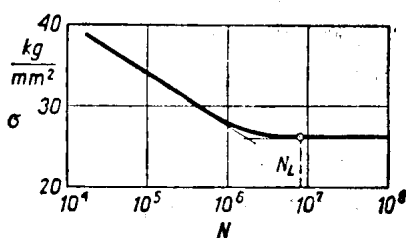


图 1.2  $\sigma-\log N$  坐标的 Wöhler 疲劳曲线

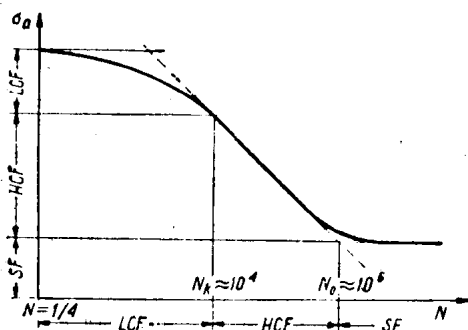


图 1.3 标识有下列区域的完整 Wöhler log-log 坐标曲线示意图: 低循环疲劳强度  $LCF$ 、有限 (或高循环) 疲劳强度  $HCF$ 、亚疲劳极限  $SF$ 、 $HCF$  区假定沿着  $N$  轴并由原点开始

完整的 Wöhler 曲线通常由  $1/4$  周期载荷开始, 在  $1/4$  周期处的破坏应力相当于静态或单调加载时的极限强度。在图 1.3 中示意的标出了低循环疲劳强度区  $LCF$ 、有限 (或高循环) 疲劳强度区  $HCF$  和亚疲劳强度区  $SF$ 。 $LCF$  强度在法国称为 *fatigue oligocyclique* 或 *fatigue*

plastique oligocyclique, 在德国称为 *Kurzzeitfestigkeit* 和 *Ermüdung im Kleinwechselzahlbereich*。一个系统或元件的低疲劳寿命并非经常与这一项相联系, 问题在于这里的循环数不多(但使用载荷高); 两次循环之间的时间间隔也许值得考虑, 以多少循环作为 *LCF* 区域的界限迄今尚未确定, 但通常达到  $10^4$ 。在 *LCF* 与 *HCF* 之间的过渡区中, Wöhler 曲线呈现一个在裂纹扩展特征和塑性应变大小上发生变化的转折点。

该转折点很久以前就已经知道, 并曾在一些文献(如 [1.76~1.79])中作过讨论。曲线在转折点以上部分  $\sigma_a = f(N)$ , 随着材料不同可能向上或向下移动; Wöhler 曲线在形状上的变化可能还未被认识清楚。

有限疲劳强度 *HCF* 区包括在下列方程的左方:

$$S^m = S_D^m \frac{N_0}{N} \quad (1.8)$$

式中:  $S$  为该区的疲劳极限,  $N$  为相应的循环次数,  $m$  为该直线(对数坐标)斜率的倒数, 该  $m$  值主要取决于材料的种类、元件的形状和表面层的性能。对不同等级的抛光钢元件,  $m = 9 \sim 12$ ; 对带有一般类型缺口的元件,  $m = 18 \sim 20$ 。

方程(1.8)也可用稍有不同的方式表示,

$$S = S_D \left( \frac{N_0}{N} \right)^\xi$$

式中:  $\xi$  是 Wöhler 曲线中直线的斜率,  $\xi = 1/m$ 。

### 1.3 低循环范围

#### 1.3.1 一般试验方法; 基本公式

在低循环范围内范性应变是主要的, 它是产生滞后回线的主要原因, 在回线内所包含的面积与该材料在一个加载循环中消耗的不可逆的能量成正比。在恒幅应变或应力下, 一个滞后回线的改变及其特征量的变化为循环次数的函数, 并可通过该材料宏观组织的变化来描述。试验是在恒定塑性应变幅  $\varepsilon_{apl}$ (图 1.4)、恒定应力幅  $\sigma_a$ (图 1.5)、或恒总应变幅  $\varepsilon_t$  下进行的。虽然这种试验是不简单的, 但曾有人建议试验在  $\varepsilon_{apl} = \text{常数}$  下进行, 如在参考文献 [1.82] 中所强调的那样[特别是在高的  $\sigma_a$  值下不产生循环蠕变, 在第一循环中采用全部  $\varepsilon_{apl}$  则可避免预硬化阶段, 这就可以直接采用 Manson-Coffin 公式(1.10), 并可测定流变应力与累积塑性应变的关系]。在绘制这些曲线和应用不同公式时, 一般将应力或应变范围以  $\Delta\sigma$  和  $\Delta\varepsilon$  表示, 因此, 可以用下列公式互换:  $2\varepsilon_t = \Delta\varepsilon_t$ ;  $2\varepsilon_{apl} = \Delta\varepsilon_{apl}$ ;  $2\sigma_a = \Delta\sigma_a$ 。

在由  $\varepsilon_{apl} = \text{常数}$  得到的图 1.4 中研究了一些滞后回线的实例。对于退火铜,  $\sigma_a$  随着循环次数而增加(图 1.4(a)); 这也在 Cu-Al 合金中观察到, 当铜与 Cu-Al 合金在应变硬化后进行试验时,  $\sigma_a$  逐渐减少。在第一种情况下, 我们称为材料的循环硬化, 而在第二种情况下, 则称为材料的软化。在  $\sigma_a = \text{常数}$  的试验条件下, 当应变幅减小(该滞后回线变窄)时, 材料受到循环硬化; 而当应变幅增加时, 则材料经受循环软化(图 1.5)。因此, 绘制循环硬化或循环软化曲线, 以说明相当于滞后回线顶端的应力峰值与循环数  $N$  或范性应变之和  $\sum \Delta\varepsilon_{apl}$ (很少用  $\sum \varepsilon_{apl}$ ) 的关系。将每一循环为常数的应变幅乘以循环次数(不管应变的方向), 即得到迭加的或累积的塑性应变。图 1.6(a) 示出这种示意曲线, 铜的试验曲线则示于图 1.6(b) 与 (c)。由这些图中可以看出: 在某些循环次数或一定大小的  $\sum \Delta\varepsilon_{apl}$  之后,  $\sigma_a$  趋于稳定,  $\varepsilon_{apl}$  愈大, 这种现象发生愈快, 当达到所谓饱和状态时, 该相应的应力称为饱和应力  $\sigma_{as}$ , 这表明滞后回线的形状

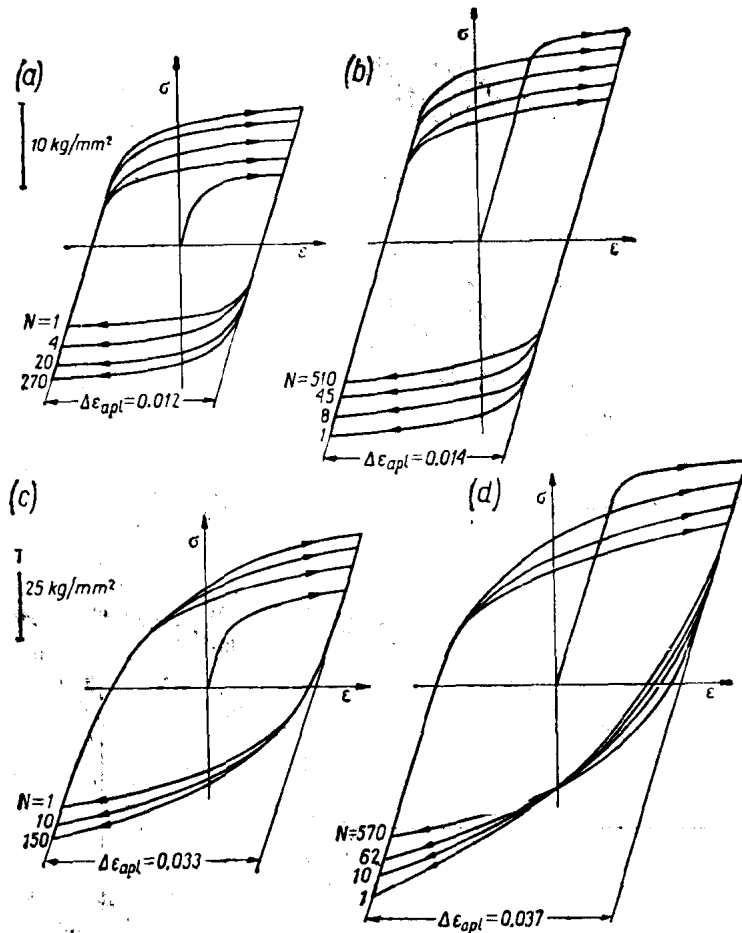


图 1.4 不同循环  $N$  以后滞后回线变化的示意图: (a) 退火的铜; (b) 冷加工的铜, 在  $27^{\circ}\text{C}$  下进行试验; (c) 退火的铜合金; (d) 冷加工的铜合金 (7.5% Al), 在  $-195^{\circ}\text{C}$  下进行试验 (C. E. Feltner 和 C. Laird<sup>[1.80]</sup>)

不再进一步改变, 它可能在几十个循环后趋于稳定, 一般不迟于达到破坏的循环次数的  $1/3$  到  $1/2$  之间。开始硬化或软化阶段有时称为快速硬化(软化)阶段, 它和饱和区之间被一个过渡区隔开, 曲线上某一点的循环硬化(软化)系数则定义为  $d\sigma/d(\sum\Delta\varepsilon_{ap})$ 。

在  $LCF$  区的材料行为的变化可能取决于它们的状态和试验条件(第 1.3.2 节), 图 1.7 为在恒定  $\varepsilon_{ap}$  或恒定  $\sigma_a$  下试验的示意图, 传统的饱和数值以  $\sigma_{as}$  和  $\varepsilon_{apls}$  表示。因此, 一些材料可能首先硬化而后软化或者相反变化, 另一方面, 有些材料在循环性能方面经历着微小的变化, 因而被称为循环稳定材料。极限拉伸强度  $\sigma_u$  与明显的常规的屈服强度  $\sigma_y$  或  $\sigma_{0.2}$  之比, 可以看作是一些材料的循环硬化或软化的十分粗略的表征: 当  $\sigma_u/\sigma_{0.2} > 1.4$  时可能出现硬化, 当  $\sigma_u/\sigma_{0.2} < 1.2$  时则出现软化。附带指出, 应当注意在低合金钢中根据热处理的不同, 可能表现为硬化或软化。

通过改变  $\varepsilon_{ap}$  的数值, 我们会得到不同的与选定的  $\varepsilon_{ap}$  数值有关的饱和应力  $\sigma_{as}$ 。其次,  $\sigma_{as} = f(\varepsilon_{ap})$  曲线的绘制, 使我们得到一个循环应力-应变曲线, 简称为循环应变曲线(图 1.8, 参考文献 [1.84])。因此, 该曲线把这些稳定的滞后回线的顶端连结起来了。单向  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线也描绘在图 1.8 中, 并标出平均应变  $\varepsilon_m$  和弹性应变  $\varepsilon_{el}$ 。如图 1.8 所示, 曲线的位置(循环应变

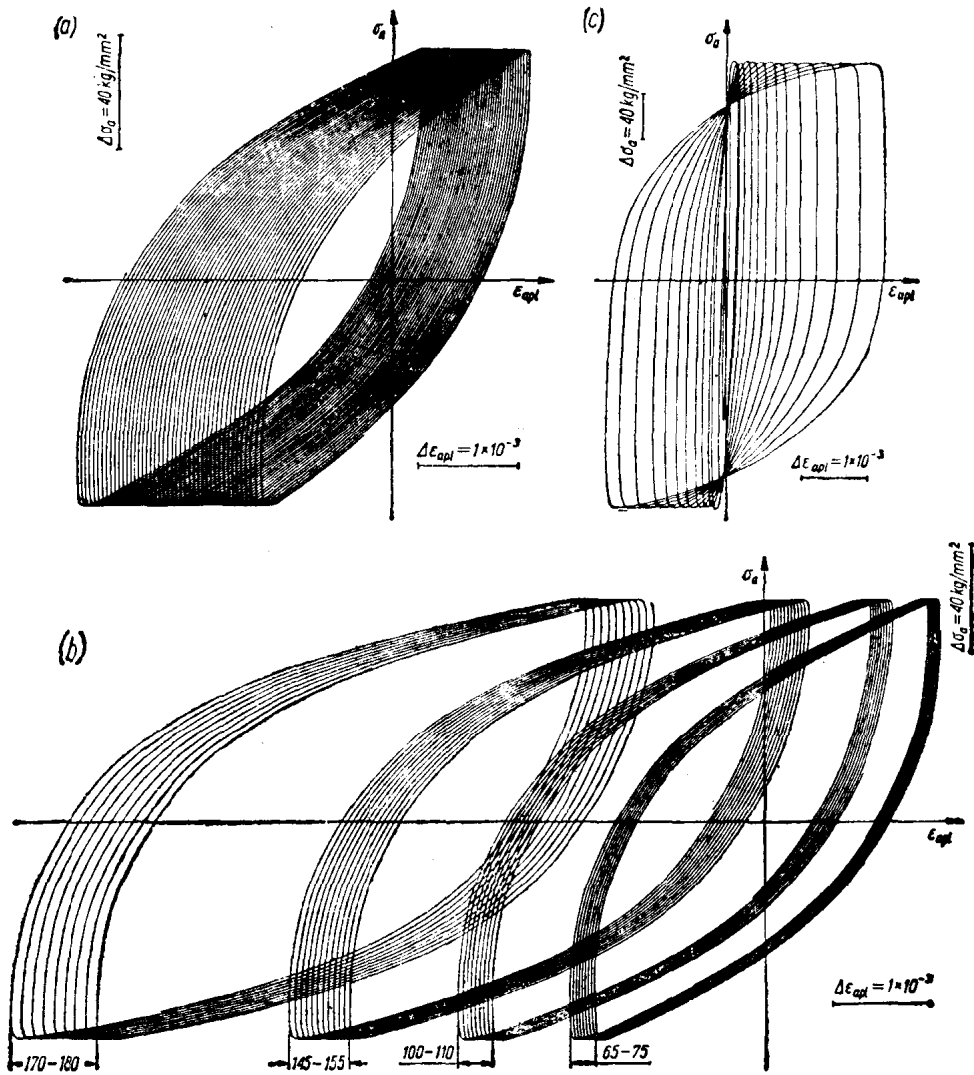


图 1.5 Ti-6Al-4V 合金的滞后回线的变化表明: 在  $\sigma_a = \text{常数}$  时出现循环软化 [(a) 与 (b) 为滞后回线特有的“徘徊”], 同一回线经循环预应变 (c), 在图 1.5(b) 标识出的循环数 (为清楚起见, 未示出所有的单个循环) 是图 1.5(a) 曲线的延伸 (J. Burbach<sup>[1.81]</sup>)

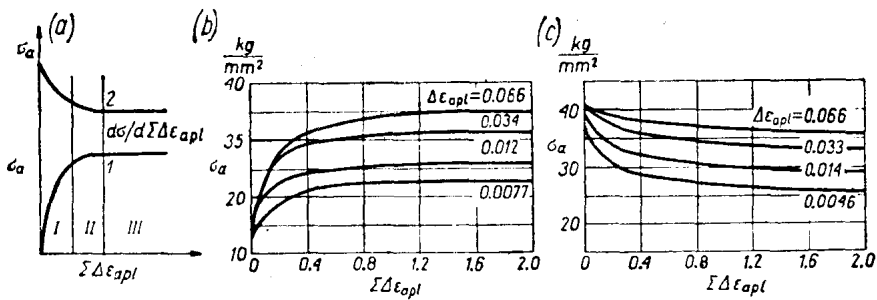


图 1.6 (a) 循环硬化 1 与循环软化 2 曲线示意图; (b) 退火的铜; (c) 冷加工的铜<sup>[1.80]</sup>。(a) 中标出的区域: I—快速硬化(软化)区, II—过渡区, III—饱和区

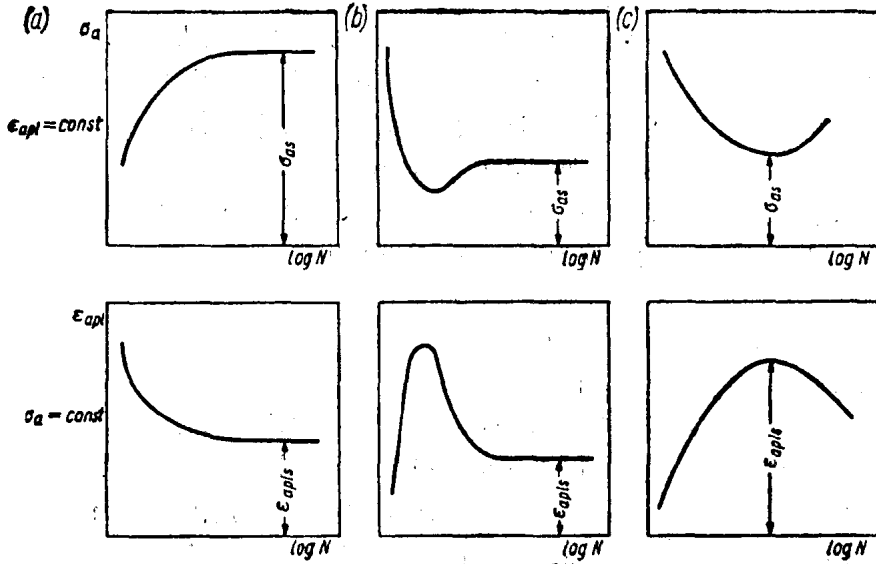


图 1.7 在两种不同类型的循环载荷下( $\epsilon_{aplt}$ =常数和 $\sigma_a$ =常数),不同材料的表现行为示意图: (a) 铜、黄铜; (b) 碳钢; (c) 奥氏体钢 (J. Polák, M. Klesnil 和 P. Lukás<sup>[1.88]</sup>)

曲线位于单向曲线之下)表明该材料是循环软化, 否则材料发生硬化。对于大多数金属来说, 循环应变曲线与加载过程及热处理无关, 特别是对一些具有高层位错(SFE)的、容易产生交滑移并具有波纹状滑移特征的纯金属(Al、Cu、Ni、Fe)更是如此, 对这些金属只能得到单一的循环应变曲线, 这意味着硬化与软化曲线(如图 1.6a 所示)在同一 $\sigma_{as}$ 的水平上相遇。循环应变曲线并不总是位于单向应变曲线的上方或下方; 它们可能与后者相交, 在同样应变条件下与相应的单向应力相比, 开始表现较高(如某些牌号的钛合金)或较低的(如某些牌号的钢) $\sigma$ 值。

关于这类课题曾经提出过某些不同的术语和概念, 在许多书刊中(例如参考文献[1.85]、[1.86]), 于某一恒定的 $\epsilon_{aplt}$ 下应力随着循环数增加时, 就使用疲劳硬化这一名词, 另一方面, 倘若 $\sigma_a$ =常数时,  $\epsilon_{aplt}$ 随着循环数而降低, 就出现循环硬化, 这是与通常的术语相吻合的(无论是在 $\epsilon_{aplt}$ =常数或 $\sigma_a$ =常数时进行试验)。

一些金属的循环应变过程也可用 $\log \sigma_a - \log \epsilon_{aplt}$ 坐标描绘, 并用方程表示:

$$\sigma_a = K \epsilon_{aplt}^n \tag{1.9}$$

式中:  $n$ 为循环硬化指数, 其范围约由 0.025(奥氏体钢)到 0.25(铝)。

应当记住, 在方程(1.9)中 $n$ 的变化与描述单向应变常用的类似方程中指数的变化具有不

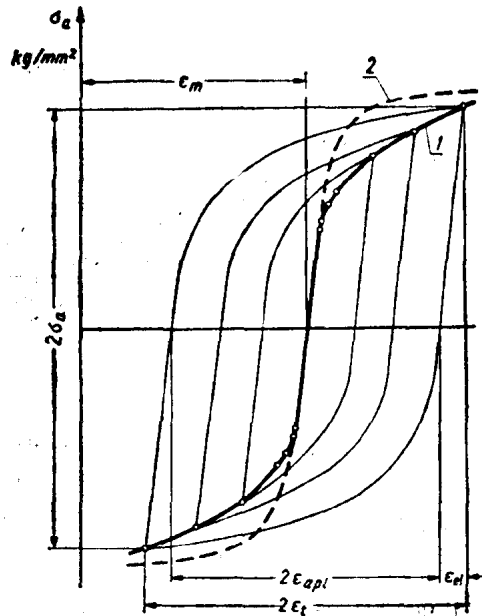


图 1.8 Cr-Ni-Mo 钢应力与循环应变的关系 1, 在背景上示出了该钢在单向加载下的曲线 2, 并示意地描绘了滞后回线。ε 的说明见正文 (R. W. Smith 等, 1963<sup>[1.84]</sup>)



同的特征。例如，对于钢，在一定的硬度下后者为最低值。另一方面， $n$  随着硬度的增加而降低<sup>[1.87]</sup>。某些文献，特别是[1.88]与[1.89]，已证明方程(1.9)也适用于高循环范围 ( $10^5 \sim 10^7$  次循环)。这些文献给出很有趣的研究结果，并对方程(1.9)进行了评述；指数  $n$  在  $\epsilon_{opt} = \text{常数}$  或  $\sigma_a = \text{常数}$  时，对于多数循环来说似与试验条件无关。对于许多材料，具有与方程(1.9)相似形式的公式的较全面评述见参考文献[1.90]和[1.91]。

在低循环范围内 ( $\epsilon_{opt}$  为恒定值)，材料的行为一般采用 S. S. Manson<sup>[1.92]</sup> 和 L. F. Coffin<sup>[1.93]</sup> 的一个经验关系来描述，通常称为 Manson-Coffin 定理。

$$N^K \Delta \epsilon_{opt} = C \quad (1.10)$$

式中： $N$  为达到破坏时的循环数； $K$  与  $C$  为材料常数。

S. S. Manson 采用了 Sachs 等的试验结果，曾在以前 (1948) 建立了一种类似的关系式 ( $\Delta \epsilon_{opt} = MN^Z$  式中： $M$  与  $Z$  为常数)。E. Orowan<sup>[1.94]</sup> 根据他自己的疲劳假说(1939)，推导出  $N \epsilon_{opt} = C$  的关系式，才使方程(1.10)的正确性很快得到证实，见参考文献[1.95]。实际上也曾采用方程(1.10)的修正式  $N \Delta \epsilon_{opt}^n = C$ ，这将有利于描述累积损伤。在循环扭转条件下，也可采用方程(1.10)，并将  $\Delta \epsilon_{opt}$  代以  $1/2 \Delta \gamma_{opt}$ ，在此  $\Delta \gamma_{opt}$  为塑性剪切范围。

方程(1.10)绘在对数坐标上的是一条斜率为  $K$  的直线，其位置由常数  $C$  确定，这说明许多具有范性形变的材料， $K = \frac{1}{2}$ ，常数  $C$  是由单向拉伸试验中试样的开始和终了(破断后)的截面积  $F_0$  与  $F_u$  来决定的<sup>[1.93][1.97]</sup>。

$$N^{\frac{1}{2}} \Delta \epsilon_{opt} = \frac{1}{2} \ln \frac{F_0}{F_u} \quad (1.11)$$

图 1.9 示出绘制在  $\Delta \epsilon_{opt}$ ,  $N$  坐标系的实例，也出现过一些负的  $C$  值，并且这可能是正确的。这

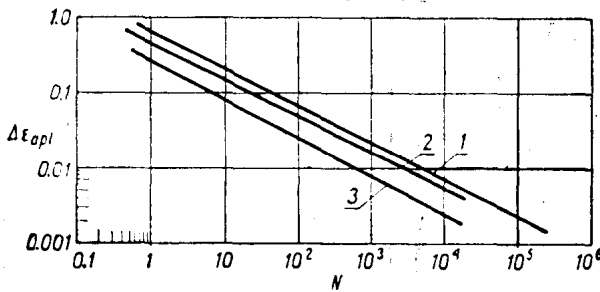


图 1.9  $\log \Delta \epsilon_{opt} - \log N$  疲劳曲线：1—奥氏体钢与 Al，2—2024-T3 铝合金，3—7075-T6 铝合金；Cu, Ti, Ni 和碳钢的直线位于 1 与 2 之间(参考文献[1.102]和 L. F. Coffin 的其他文献)

取决于  $C$  的定义。假使真实断面收缩率以  $e = \ln 1/(1-RA)$  表示，式中  $RA$  为在单向拉伸试验中得到的断面收缩率 ( $RA = 1 - \frac{F_u}{F_0}$ )，这样符号  $e = -\ln(1-RA)$  是相当的。在此情况下，方程(1.11)中的常数  $C$  就等于  $e = \ln 1/(1-RA) = -\ln(1-RA) = -\ln F_u/F_0$  和  $C = -0.5e$ 。要注意假使我们在方程(1.11)中设  $N = 1/4$ ，就得出  $\Delta \epsilon_{opt} = \ln F_0/F_u$  的结果。

方程(1.11)的正确性在参考文献[1.96]与[1.97]中曾进行过评述，并指出该方程与试验方法和温度关系不大，但是，这个证明不是十分准确的(如参考文献[1.98])。另一方面，根据能量考虑，D. E. Martin<sup>[1.99]</sup> 认为  $C = e/\sqrt{2}$ 。

V. T. Troshchenko<sup>[1.95]</sup> 报导： $C$  的试验数值较理论计算值  $e/2$  高 5~30%，较  $e/\sqrt{2}$  小一个大致相同的数量，而  $K$  值则在 0.25~1.0 范围。Manson-Coffin 定理的偏差，特别是在较低的  $\epsilon_{opt}$  范围内，曾经多次报导过<sup>[1.100]</sup>。在高强度钢的研究中曾得出与该定理显著不同的结果(这种差异随着钢的强度而增加)<sup>[1.91]</sup>；对奥氏体钢，在低应变过程中发生马氏体转变的钢和镁及其合金<sup>[1.90]</sup>也是一样。另一方面，P. Lukáš 等<sup>[1.88, 1.89]</sup>指出：方程(1.10)也适用于低循