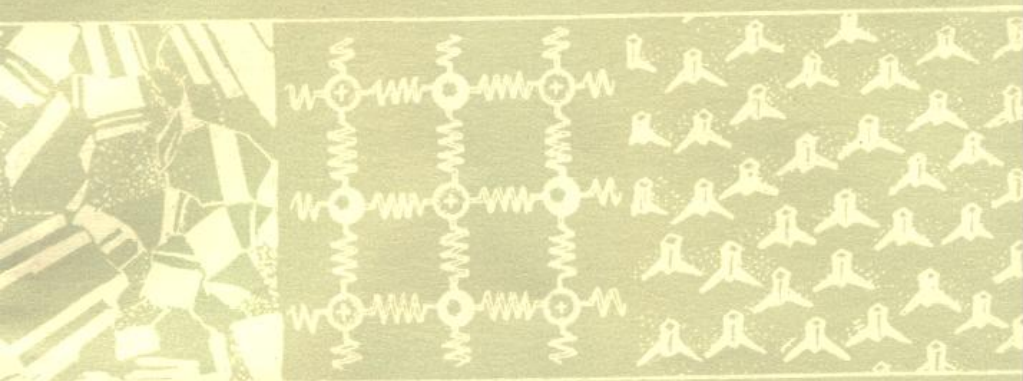
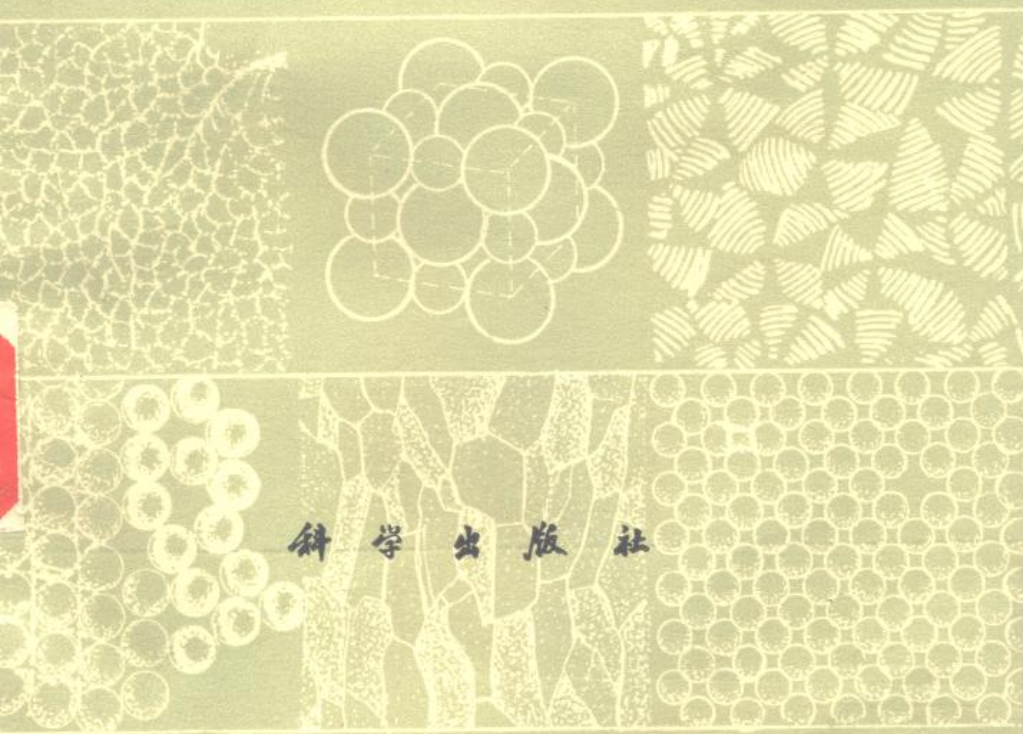


材料科学及测试技术丛书




金属高温疲劳

何晋瑞 主编



科学出版社



材料科学及测试技术丛书

金属高温疲劳

何晋瑞 主编

科学出版社



内 容 简 介

本书系统地介绍了金属在高温下的形变机理、力学性能、实验方法及其在工程实际中的应用。全书共分六章。第一章论述了时间相关疲劳，即疲劳-蠕变交互作用及环境的影响。第二章阐述了材料在单调与循环载荷下的低循环疲劳力学行为及疲劳寿命等。第三章叙述了蠕变裂纹扩展。第四章阐明了热疲劳力学模型、定性与定量测定方法。第五章介绍了高低循环复合疲劳接近服役条件的力学参量。第六章介绍了低循环疲劳微观机理及其延寿途径。

本书可供从事材料科学、冶金、机械等方面研究的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

材料科学及测试技术丛书

金 属 高 温 疲 劳

何晋瑞 主编

责任编辑 董安齐

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

*

1988年1月第一版 开本：787×1092 1/32

1988年1月第一次印刷 印张：11 7/8

印数：0001—2,700 字数：269,000

ISBN 7-03-000019-6/TG·1

定价：2.80元

序 言

金属高温疲劳的研究是随着蒸汽轮机、燃气轮机、喷气发动机和高压容器等结构的需要而发展起来的。如果说十九世纪后期金属高温力学是以高周应力疲劳、二十世纪初期是以高温蠕变为特征的话，那么二十世纪下半叶则以高温低周疲劳为特征而引起人们的普遍关注和研究。

现代金属高温疲劳的形变和断裂是建立在低周疲劳、蠕变和断裂力学基础上的。1954年美国彗星号客机在地中海的坠落引起人们对金属低周疲劳的重视，1955年提出的Coffin-Manson塑性应变范围与寿命方程使金属低周疲劳的研究发生了从定性到定量的转折。继而美国机械工程学会颁布了将金属蠕变-疲劳判据引入高温构件的设计规范，六十年代末美国空军的发动机结构完整性大纲把高温低周疲劳作为关键部件的寿命限制因素。此外，美国空军在五十年代首先把断裂力学理论用于飞机结构损伤容限设计规范中，而后又于1978年将损伤容限数据引入金属高温结构部件设计。近三十年来，金属高温疲劳经历了从高周疲劳到低周疲劳、从低周疲劳裂纹起始到裂纹扩展，然后又从长裂纹向短裂纹发展的研究过程。

我国于1957年开展高温高周疲劳和热疲劳试验研究，自七十年代后期又开展了高温低循环疲劳、时间相关疲劳、高低周复合疲劳与蠕变裂纹扩展等研究，包括测试技术、试验方法、寿命预测及影响因素等诸方面。由于注意了金属高温疲劳与工程实际应用的结合，因此我国在该领域的研究范围和

水平已日益接近国际先进水平。

金属高温疲劳的发展历史表明，注重金属低周疲劳、疲劳裂纹起始和弹塑性疲劳裂纹扩展研究，重视宏观规律与微观机理相结合，不仅符合金属高温疲劳发展规律，亦是今后重点研究的课题。

本书由该学科领域的几位学者集体编写而成，各章的作者都在各自所撰写的领域中从事过深入的研究工作。本书由冶金工业部钢铁研究总院曹用涛同志审阅，在此谨向他表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中缺点和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

何晋瑞

材料科学及测试技术丛书

出版说明

材料科学是现代科学技术的基础，是属于全局性的重要科学技术领域。由于许多材料的局限性会影响国民经济和国防现代化的进程，因此，为了提高我国材料科研工作的理论水平和材料生产的技术水平，为各个部门提供充足和优质的材料，我们出版了这套材料科学及测试技术丛书。本丛书分为材料科学与测试技术两部分。材料科学部分主要介绍金属、非金属及其他新型材料的研究成果、原理与理论；测试技术部分主要介绍上述材料的微观组织与结构及其观测技术，也介绍有关性能测试和过程机理。我们力求本丛书能反映我国材料科学研究工作者和材料工程技术人员的实践经验与成就，以及他们在发展材料科学与技术方面的见解，同时也反映国外的最新经验和成果。读者对象为从事材料科学的科研工作者和从事材料测试的工程技术人员以及高等院校的有关专业师生。

我们不仅期望本丛书能对我国的材料科学与技术的发展起到一定的推动作用，并且希望它对材料科学与技术领域内的科技工作者有所启发，从而进一步写出反映我国科学技术水平和发展方向的专著，以满足广大读者的需要。

材料科学及测试技术

丛书编辑委员会

· 山 ·

目 录

第一章 时间相关疲劳	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 时间相关疲劳裂纹起始与早期增长	(4)
1.3 时间相关疲劳裂纹起始寿命预测	(19)
1.4 时间相关疲劳裂纹扩展	(47)
1.5 环境在时间相关疲劳中的作用	(73)
1.6 非弹性应变变量的区分	(87)
参考文献	(97)
第二章 低循环应变疲劳	(102)
2.1 引言	(102)
2.2 循环受载下应力集中区材料的应力-应变行为	(106)
2.3 单调加载下材料的力学行为	(109)
2.4 循环加载下材料的力学行为	(114)
2.5 低循环应变疲劳寿命与能量因素	(123)
2.6 低循环疲劳能量寿命预测	(127)
2.7 低循环疲劳寿命预测	(130)
2.8 低循环疲劳测试技术	(137)
参考文献	(156)
第三章 蠕变裂纹扩展	(158)
3.1 引言	(158)
3.2 蠕变断裂研究的工程应用实例	(160)
3.3 裂纹扩展过程	(162)
3.4 裂纹扩展变量	(165)
3.5 裂纹扩展的断裂力学参量	(168)
3.6 裂纹扩展的时间相关性	(176)

3.7	裂纹扩展测试方法	(194)
	参考文献	(202)
第四章	金属热疲劳	(206)
4.1	引言	(206)
4.2	热疲劳模型	(210)
4.3	热疲劳试验方法	(212)
4.4	热疲劳强度及寿命预测方法	(220)
4.5	热疲劳裂纹的形成和扩展	(235)
4.6	热疲劳的影响因素	(238)
	参考文献	(243)
第五章	高低循环复合疲劳	(245)
5.1	引言	(245)
5.2	真实载荷历程的简化及复合循环参量	(245)
5.3	高低循环复合疲劳累积损伤的评定	(249)
5.4	高低循环复合疲劳寿命的评定	(256)
5.5	高低循环复合疲劳寿命预测	(273)
5.6	高低循环复合疲劳裂纹扩展	(279)
5.7	高低循环复合疲劳的主要影响因素	(288)
5.8	热循环与高循环载荷复合作用下的疲劳寿命 评定	(299)
	参考文献	(303)
第六章	低循环疲劳的微观机理及其延寿途径	(305)
6.1	引言	(305)
6.2	亚蠕变范围内的疲劳机理	(306)
6.3	蠕变范围内的疲劳机理	(330)
6.4	断裂机理鉴别	(352)
6.5	影响低循环疲劳寿命因素及其某些延寿措施	(353)
6.6	表面强化	(360)
6.7	表面防护	(361)
	参考文献	(364)

第一章 时间相关疲劳

何晋瑞 段作祥

1.1 引言

金属高温结构部件在经受各种复杂的温度循环与载荷时，常发生稳态变形（蠕变）、循环变形（疲劳）以及两种变形的组合，即蠕变-疲劳交互作用，此外，还会发生更复杂的蠕变-疲劳+环境的交互作用，这些交互作用统称为时间相关疲劳。

高温金属材料的时间相关疲劳包括裂纹起始和裂纹扩展两个过程。高温金属材料疲劳裂纹的生核与增长发生在材料表面处；蠕变发生在内部晶界开裂或形成空穴和空穴联结处；环境损伤与循环塑性变形相互作用，常发生在自由表面和裂纹顶端

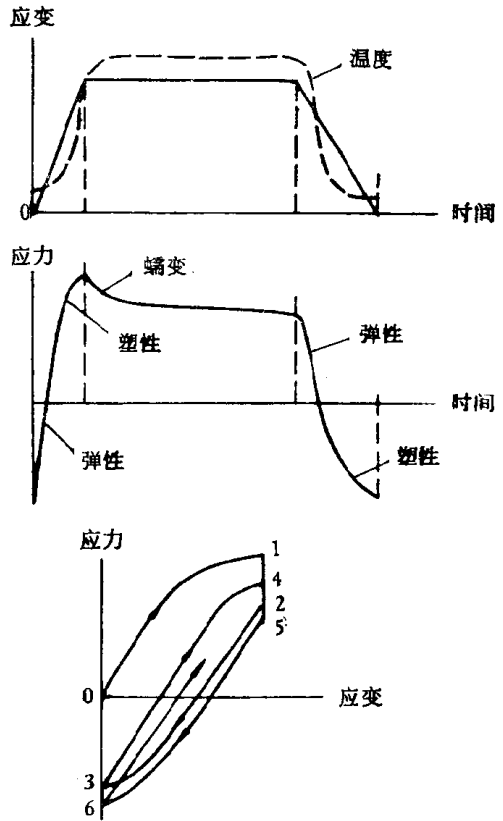


图1.1 典型应力-应变-时间循环

处。在一般情况下，蠕变-疲劳-环境交互作用可加速裂纹增长，而在某些情况下则延迟裂纹增长，其断裂类型取决于时间相关疲劳的机制。

高温机械部件应按使用中对时间相关疲劳的具体响应来合理选材。如低合金铁素体钢适用于蒸汽轮机，高合金化镍基合金用于燃汽涡轮机，奥氏体不锈钢则广泛用于核反应堆结构。为保证安全，对于抗蠕变-疲劳失效和抗氧化失效的高温部件材料选取，一般要以实验室光滑试件试验数据为基础，并在较高温度、较大应变和较短循环时间内进行试验。由于设备设计寿命（或循环）从几千小时到几十年，因此试验无法确切模拟，但可研究某些典型的服役条件，即在简单或复杂的载荷与化学介质的综合作用下，在实验室的试样尺寸与时间范围内，观察试样宏观、微观力学性能与组织变化，并以此作为寿命预测方法研究的基础。图1.1为高温部件的典型工作循环，即应力-应变-时间循环；材料受热循环与机械加载产生拉伸应变，保持一段时间至低温并回复到零，

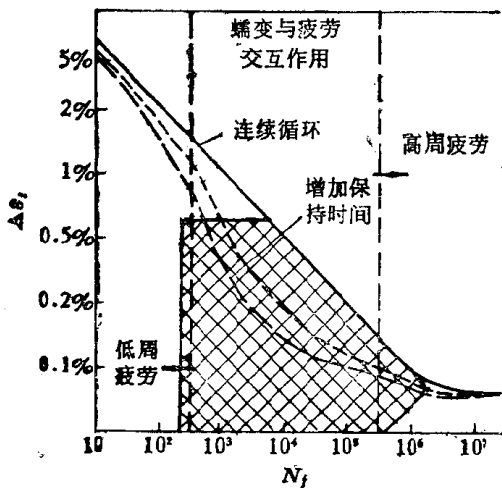


图1.2 高温疲劳研究区域示意图

高温保持时间使应力松弛，伴以晶间滑动产生蠕变-疲劳交互作用。在高温疲劳研究中，服役条件也显示出蠕变-疲劳交互作用的重要性。图1.2指出奥氏体不锈钢的使用范围⁽¹⁾。从图中可以看出，低循环疲劳破断主要发

生在高应变范围内 ($> \pm 1\%$)，该区疲劳寿命对拉伸保持时间与应变率影响不大，另一端主要为控制载荷过程的高循环疲劳区 ($N_f > 10^6$)，它与低循环疲劳相比是次要的因素，中间区域则表示蠕变-疲劳的交互作用。与图1.3比较，在应变大于图1.3中点1时，虽介入拉伸保持时间，破断类型仍为疲劳断裂，而在低于点3时，失效是由晶间蠕变损伤成核与增长所引起，其中阴影面积表示蠕

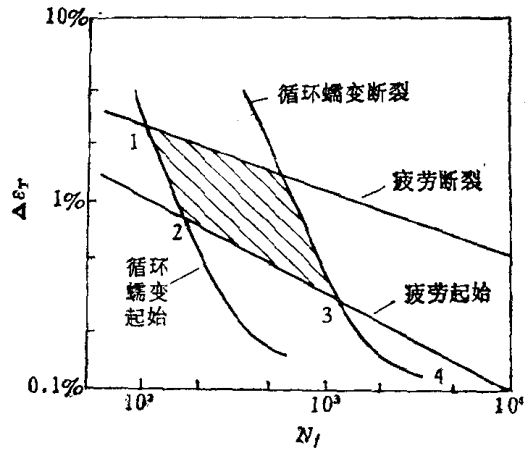


图1.3 蠕变-疲劳机制的不同类型

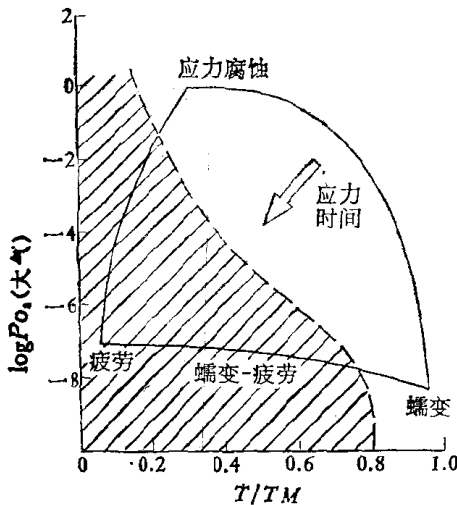


图1.4 蠕变-疲劳-腐蚀交互作用图

变-疲劳交互作用。许多工程系统最关心的寿命范围为 500 ~ 5000 循环，保持时间为 30 ~ 100 min。

时间相关疲劳是复杂的综合现象，它包括蠕变、疲劳和应力腐蚀三个要素。但从七十年代以来，断裂机制研究的进展已使疲劳、蠕变和应力腐蚀开裂的区别日趋

不明显，如在腐蚀环境中，疲劳在任一温度下都与时间相关。这些损伤模型如图1.4所示，包括腐蚀、蠕变、疲劳交互作用和环境与蠕变的交互作用。高温意味着时间相关（粘塑性）应变、扩散和可能产生的蠕变损伤，这种损伤局限于外表面或缺陷附近。此外，从图1.4中还可以看出，无论裂纹起始与裂纹扩展都受到环境的强烈影响。

1.2 时间相关疲劳裂纹起始与早期增长

疲劳是指循环载荷下裂纹起始与增长的现象或过程。疲劳开裂总是发生在循环塑性应变最严重的部位，这些位置或为缺口、表面不规则处，或为其它应力集中处，或为材料内部某些不连续处，如夹杂物、空洞或其他

微观组织不正常处。

图1.5(a)为循环加载作用下所生成的塑性区^[2]，裂纹即由此起始并增长。它首先进入由缺口生成的塑性区并在大范围塑性区中增长，如图1.5(b)所示。这种裂纹被称为短裂纹，其裂纹长度小于塑性区尺寸，最后短裂纹穿过缺口塑性区进入弹性区，

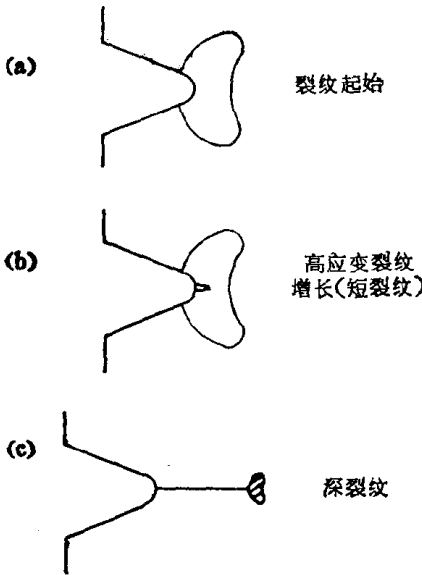


图1.5 裂纹起始与增长塑性区过程

以裂纹本身所产生的塑性区向前扩展，如图1.5(c)所示。

与缺口塑性区不同，后者是由裂纹长度与载荷大小所决定的。

何谓裂纹起始？要对裂纹起始长度下一个确切的定义是困难的。从物理学家、冶金学家、设计工程师到机械维修人员，都根据各自工作对象的大小尺度和工作目的，来规定各自认为合理的裂纹起始长度。不难想象，要求外场设备检修人员把原子、晶粒尺度规定为裂纹起始长度是没有实际意义的；同样，用工程裂纹尺寸要求物理、冶金学家也是不合理的。但是，对工程设计和材料科学研究人员来说，由于当前高温部件的抗疲劳或抗

蠕变-疲劳失效性能是以光滑试件数据为根据，因此，把 0.8 ~ 1 mm 规定为工程裂纹起始长度是合乎实际的^[3]。照这样规定，试验室试件的裂纹扩展寿命只占总寿命的一小部分。同时，这样的长度刚好能使工厂和外场设备检修人员用一般的无损检测方法就能可靠地检测出来，从而避免了对何谓疲劳裂纹起始长度的抽象争论。显然，对上述 0.8 ~ 1.0 mm 以前的裂纹起始寿命，其中某些部分可用裂纹增长规律处理，而另一部分则可用经验方法，即现象学和微观力学模型来处理，但微观力学距离实用还较远。

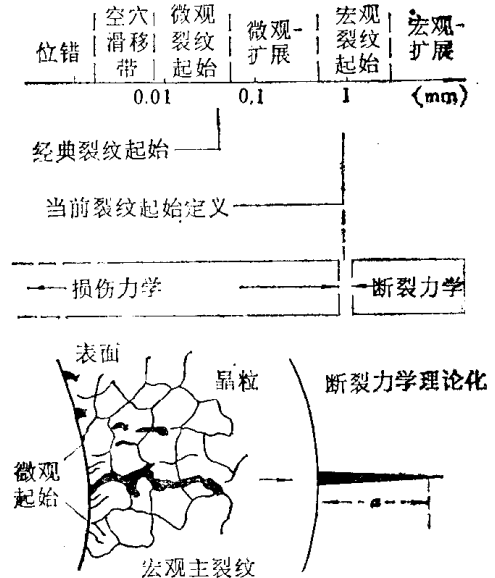


图1.6 宏观裂纹起始概念图

避免了对何谓疲劳裂纹起始长度的抽象争论。显然，对上述 0.8 ~ 1.0 mm 以前的裂纹起始寿命，其中某些部分可用裂纹增长规律处理，而另一部分则可用经验方法，即现象学和微观力学模型来处理，但微观力学距离实用还较远。

疲劳裂纹起始过程可分为三个阶段，即微裂纹形成（指最初微观可检测的裂纹，通常在微观结构尺度范围）、微裂纹联结（许多相邻的单个微裂纹联成单一的明显的裂纹）和微裂纹扩展〔明显的裂纹扩展到0.8mm（或1mm），最后阶段相当于宏观裂纹起始阶段〕，如图1.6所示。正如断裂力学主要研究宏观裂纹扩展力学性能一样，疲劳裂纹起始阶段的力学性能属微观力学和损伤力学的范畴，其中包括短裂纹在内的裂纹增长。对损伤的定义、判据和测量技术的研究和认识，也有一个发展过程。人们很早就使用了损伤这一定义，注意到所占寿命的比重，如最老的寿命分数法和Miner损伤方程，而不去考虑当时难以弄清的损伤物理过程。现在，损伤又被提出来，它不但获得进一步发展，而且作为固体力学崭新的分支，提到疲劳断裂研究的日程上来。

1.2.1 疲劳载荷类型

蠕变-疲劳寿命数据得自光滑试件的控制应变试验。图1.7(a)所示波形的拉伸应变率与压缩应变率即相平衡循环的典型应变-时间波形和滞后回线相等。图1.7(b)和1.7(c)列举的疲劳-蠕变波形与图1.7(a)的一般疲劳循环不同之处在于，对于1.7(b)的慢-快循环，拉伸进程应变率小于压缩进程应变率；而在图1.7(c)拉伸保持时间进程发生循环的应变率则远低于该循环的拉伸/压缩部分应变率。上述图1.7(b)和图1.7(c)中的两种循环都称为不平衡循环，后面将要讨论。由于疲劳-蠕变寿命来自光滑试件试验数据，因此首先讨论光滑试件的全塑性循环裂纹增长问题。

1.2.2 光滑试件的全塑性循环裂纹增长

光滑试件的疲劳寿命包括裂纹萌生到起始尺寸 a_0 所需的

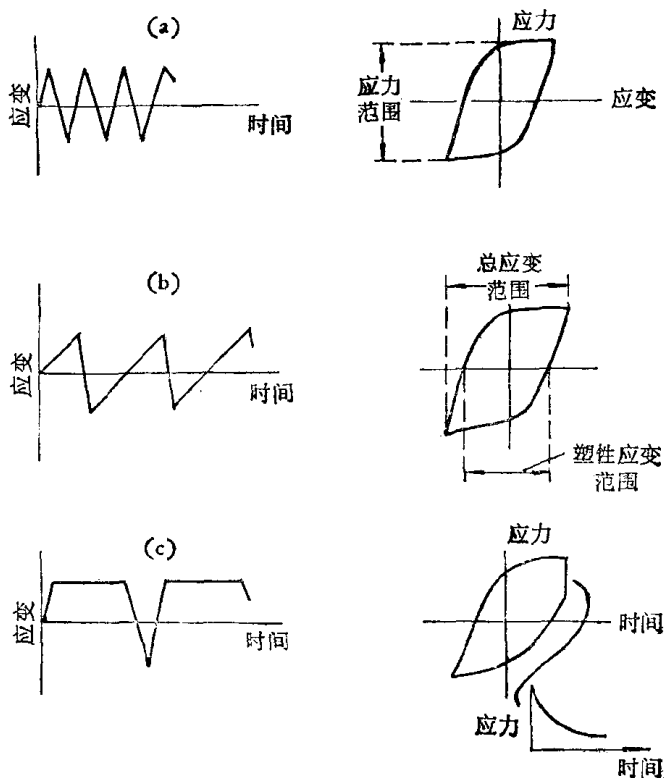


图1.7 高温试验应变-时间与应力-应变波形
 (a) 等应变速率循环, (b) 慢快循环, (c) 拉伸保持循环

循环数, 加上随后裂纹发展到破断的循环数. Wareing⁽⁴⁾用316型不锈钢的方形试件(每面宽度 W 为5.0mm)在625℃全塑性应变循环下进行微裂纹增长试验. 图1.8指出, 当微裂纹长度与试样宽度比(a/W)小时, 对数裂纹长度比与所加循环数之间存在着线性关系:

$$\frac{da}{dN} = Ba \quad (1.1)$$

式中 B 为由材料、试验温度和所加应变范围决定的常数. B

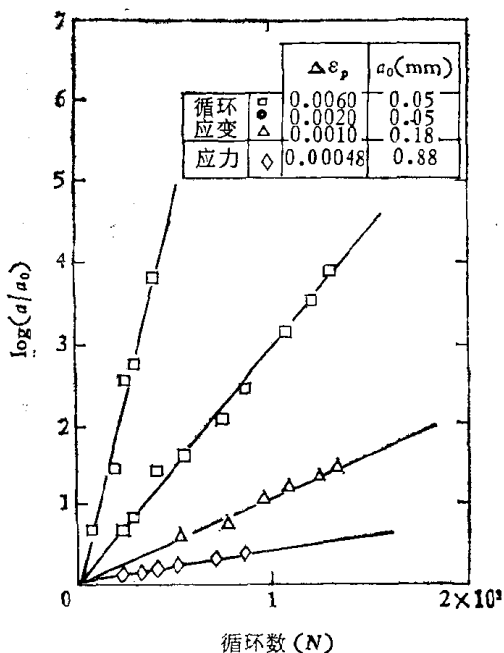


图1.8 316型不锈钢, 625℃下瞬时起始裂纹长度比与循环数对数图。

随塑性应变范围变动, 式 (1.1) 可写成:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta \varepsilon_p a \quad (1.2)$$

式中 C 为常数, $\Delta \varepsilon_p$ 为塑性应变范围。

光滑试件试验中的裂纹扩展循环数可从微分方程式 (1.2) 积分得出, 加上裂纹起始数 N_0 , 可得到疲劳寿命 N_f , 因此:

$$\ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right) = C \Delta \varepsilon_p (N_f - N_0) \quad (1.3)$$

式中 a_f 为最后裂纹尺寸, 等于延性材料试件直径的 $2/3$, 抛光后的光滑试件 a_0 经测量为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。由于裂纹形状对裂纹增长率的影响, 将方形试件转换为圆棒试件增长率测定