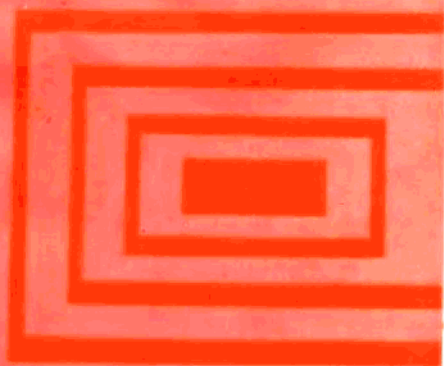


谢 济 洲 编著

低 循 环 疲 劳



能 源 出 版 社

低 循 环 疲 劳

谢济洲 编著

能源出版社出版 新华书店 发行

北京北七家 印刷厂印制

787×1092 1/32开本 13.125印张274.4字

1990年2月第一版 1990年2月第一次印刷

印数 1—1.000 册

定价 5.20元

ISBN 7-80018-239-8/TG·1

目 录

绪论

第一章 低循环疲劳基础理论 (10)

§1 循环受载下应力集中区材料的应力-应变 行为 (10)

§2 真实应力与真实应变 (14)

§3 材料在循环加载下的行为 (20)

3.1 循环加载条件和循环滞后环 (20)

3.2 循环应变硬化和软化 (24)

3.3 循环应力-应变曲线 (28)

3.4 与循环有关的力学性能的变化 (34)

§4 低循环疲劳寿命 (34)

4.1 $\Delta\epsilon-N_f$ 曲线分析 (36)

4.2 过渡疲劳寿命 N_T (39)

§5 低循环疲劳的能量分析 (42)

5.1 准静态下的断裂准则 (43)

5.2 循环加载条件下的断裂能量准则 (44)

§6 累积损伤 (50)

6.1 寿命的消耗 (51)

6.2 塑性和累积损伤 (55)

§7 平均应力和平均应变 (57)

7.1 带平均应变的疲劳寿命 (59)

7.2 带平均应力的疲劳寿命 (60)

7.3 带平均应力和平均应变的疲劳 (64)

§8 反映金属疲劳抗力的唯象参量分析 (66)

8.1	应力疲劳	(67)
8.2	塑性应变疲劳	(67)
8.3	零件中理想的强度和延性的分配	(69)
第二章	低循环疲劳测试技术	(73)
§1	试样	(73)
1.1	试样的设计	(73)
1.2	试样的制备	(75)
1.3	试样的类型	(77)
1.4	带过渡圆弧的轴向应变控制试样总应 变量的修正	(82)
§2	试验装置	(88)
2.1	低循环疲劳试验机	(89)
2.2	应变引伸计	(99)
2.3	夹具	(108)
2.4	高温装置	(113)
§3	试验程序	(116)
3.1	程序的选择	(117)
3.2	试验的开始和控制	(119)
3.3	数据的测量和记录	(119)
3.4	失效的确定	(121)
3.5	数据的处理和表达	(121)
第三章	低循环疲劳寿命预测	(128)
§1	材料低循环疲劳寿命预测	(129)
1.1	Manson-Coffin定律	(129)
1.2	Manson 四点法	(131)
1.3	通用斜率法	(133)
1.4	10%规律法	(135)

1.5	频率修正法	(138)
1.6	应变范围划分法	(143)
1.7	频率分离法	(147)
1.8	滞后能损伤函数法	(148)
1.9	损伤速率法	(149)
§2	缺口试样或零件的低循环疲劳寿命估算	(153)
2.1	局部应力-应变分析	(155)
2.2	线性累积损伤理论和循环计数法	(160)
2.3	构件裂纹形成寿命的估算	(164)
§3	损伤力学在高温疲劳寿命预测中的应用	(165)
3.1	背景	(166)
3.2	损伤的定义和量度	(168)
3.3	损伤的本构方程	(173)
第四章	断裂力学在高温低循环疲劳裂纹扩展中的应用	(186)
§1	线弹性断裂力学在高温下的应用	(189)
§2	一种高、低周疲劳裂纹扩展率公式及其应用	(198)
2.1	公式推导	(200)
2.2	实验验证	(208)
§3	弹塑性断裂力学参量J积分在高温疲劳裂纹扩展中的应用	(217)
3.1	K5合金低周疲劳裂纹扩展率的循环J积分实验验证	(218)
3.2	修正的紧凑拉伸试样循环J积分表达式	

.....	(222)
§4 McGowan和Liu模型的应用及修正.....	(238)
§5 其它断裂力学参量在高温低循环疲劳裂纹 扩展中的应用	(245)
5.1 塑性应变范围 $\Delta\epsilon_p$	(245)
5.2 应变强度因子范围 $\Delta K\epsilon$	(247)
5.3 净截面应力 σ_{net}	(248)
§6 影响高温疲劳裂纹扩展率的因素	(249)
6.1 温度和预率的影响.....	(249)
6.2 保持时间和应力比的影响.....	(253)
§7 高温低循环疲劳裂纹扩展速率实验数据处 理及计算机程序	(255)
7.1 数学准备.....	(253)
7.2 计算步骤.....	(264)
7.3 框图及程序说明.....	(266)
第五章 材料的低循环疲劳性能	(275)
§1 两种铁基高温合金GH36、GH132的低循 环疲劳性能	(278)
§2 电渣熔铸涡轮盘 GH136 合金的高温低循 环疲劳性能	(285)
§3 几种镍基高温合金的低循环疲劳性能	(295)
3.1 GH33、GH33A合金.....	(295)
3.2 GH901合金.....	(303)
3.3 GH169合金.....	(307)
§4 定向凝固铸造合金的低循环疲劳性能	(316)
4.1 DK3、K3合金	(317)
4.2 DZ4合金.....	(327)

§5 高强度结构钢的低循环疲劳性能	(335)
5.1 30CrMnSiA钢	(335)
5.2 30CrMnSiNi2A钢	(337)
5.3 40CrMnSiMoVA (GC-4) 钢	(340)
5.4 300M钢	(343)
§6 铝合金的低循环疲劳性能	(349)
6.1 LY12CZ铝合金	(349)
6.2 LC4CS铝合金	(350)
§7 不锈钢的低循环疲劳性能	(354)
7.1 Cr-Mn-N无镍不锈钢	(354)
7.2 1Cr18Ni9Ti不锈钢	(356)
§8 TC4钛合金的低循环疲劳性能	(358)
§9 普通钢的低循环疲劳性能	(363)
9.1 45号钢	(363)
9.2 40Cr钢	(368)
§10 国外几种航空金属材料的低循环疲劳数 据	(372)
10.1 材料	(372)
10.2 低循环疲劳性能	(373)
10.3 应变寿命曲线和应力-应变曲线	(376)
10.4 低循环疲劳参数	(381)
附录 轴向等幅低循环疲劳试验方法, 中华人 民共和国国家标准	(384)

绪 论

疲劳断裂是工程结构和零件普遍而严重的断裂故障。它遍及着每一个运动着的物体，甚至看上去似乎是静止的，只要它承受力和变形的反复作用，就会导致疲劳破坏。行驶在崎岖道路上的汽车；反复起飞、着陆并在飞行过程中遭受阵风袭击和各种机动特技飞行时引起载荷变化的飞机；每当车辆通过时使之产生挠曲的桥梁；遭受波浪袭击的各种船舶以及温度循环变化的核反应堆，都承受着各种循环载荷或变形，最终将发生疲劳断裂。更通俗地说，要使一件东西反复使用多次，即要求它具有一定的使用寿命，就会出现疲劳问题^[1]。

回顾疲劳的历史，自19世纪40年代，由反复应力引起的破坏首先在铁路工业上出现^[2]。人们发现机车轮轴总是在轴肩处破坏，经过分析材质本身是符合要求的，于是提出了消除锐角的建议。在德国，Wöhler于19世纪50年代到60年代，模拟车轴工况，在试验室条件下作了许多疲劳试验，重现了实际情况，并于1967年在一次巴黎博览会上展出了他所作的疲劳断口。由于当时金相显微镜尚未问世，Wöhler的疲劳断口是用铅笔素描的。即使如此，也引起有关人员的重视和注意。当时有一名英国学者在留言簿上写道：“看来Wöhler朴素的展品今天没有引起人们充份的注意，但可以预计不久的将来，它会吸引更多的人去进行深入的研究。”由于Wöhler对疲劳首次进行系统性地研究，因此曾被人们

称为疲劳之“父”。他的功绩在于：

- 1.建立了循环应力和疲劳寿命之间的关系，即至今仍然使用的S-N曲线。

- 2.提出了疲劳极限的概念。

- 3.他指出，对疲劳来说，应力范围， ΔS ，比最大应力， S_{max} ，更为重要。

19世纪70至90年代，其他一些人继续论证并发展了Wöhler的经典工作。Gerber等研究了平均应力的影响，Goodman提出了平均应力、应力幅值和疲劳寿命的关系，即著名的Goodman图，或至今仍在普遍应用的等寿命图。

20世纪初期，光学显微镜的出现促进了人们对疲劳破坏的机理进行研究，发现在局部应力集中处导致微裂纹形成的滑移线和滑移带。20世纪20年代，英国人Gough等对疲劳断裂机理进行了大量的研究，并研究了弯曲和扭转复合作用的疲劳，于1924年发表了一部金属疲劳的综合性著作。1927年美国人Moore和Kommers也发表了第一部关于金属疲劳的美国综合性著作。

与此同时，Griffith于1920年对玻璃的脆性断裂作了理论强度计算和试验研究之后，他发现玻璃的强度取决于微观裂纹的尺寸，得出了 $S\sqrt{a} = \text{常数}$ 的著名关系，式中 S 是断裂时的名义应力， a 是断裂时的裂纹尺寸。由于就裂纹的重要性作了这项经典性的开创性研究，Griffith曾被人们称为断裂力学之“父”。

1929到1930年间，Haigh就缺口对高强度钢和低碳钢疲劳行为影响作了研究，并应用了缺口应变分析和自应力概念。其后他人应用和发展了这一概念，在汽车工业中采用了喷丸强化处理，取得了重大的进展。在弹簧和轮轴经常发生疲

劳破坏的地方，经喷丸处理后就很少发生这种破坏。Almen正确地解释了经过喷丸处理后零件疲劳强度提高的原因是由于残余压缩应力的作用，从而促进了喷丸处理和其它方法来产生有利的自应力，如表面滚压强化等。1937年，Neuber引用了缺口处应力梯度效应和单元体概念，认为缺口根部微小体积内的平均应力要比缺口处的峰值应力更为重要的观点。

第二次世界大战期间，在设计航空发动机和装甲车辆时常有意地利用压缩自应力。在焊接的油轮和自由轮中多次出现脆性断裂，促使人们作出更大的努力，并联想到预存缺陷和应力集中的影响。这种脆性断裂大多起始于方形切口及焊缝处，解决办法是将方角例圆和加强、加铆接的止裂板以及重视材料的性能。1945年Miner用公式表示了Palmgren于1924年提出的线性累积损伤定律，即 $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ ，式中 n_i 为经受的疲劳循环数， N_i 为总的疲劳循环次数。Palmgren-Miner线性累积损伤定律，尽管它有许多不足之处，如没有考虑载荷的序到效应，过载效应等，但由于它的简单实用，已广泛地用于疲劳设计，至今仍是预测疲劳寿命的一个重要工具。

20世纪50年代促进人们对疲劳问题作更深一步认识的事件要算是英国的两架喷气式客机“慧星”号失事。第一架在试飞300多小时之后于1952年5月投入使用，1954年1月的一次检查后四天，坠入地中海。对飞机残骸进行彻底的检查和试验之后得出的结论是，由于增压舱的疲劳破坏引起的。在地一空一地循环压差作用下，驾驶舱天花板上装无线电定向器天线之切口角处的蒙皮首先发生破裂。原定该机的寿命为

1 万 小时，而实际上其中一架为3681小时，另一架为2704小时^{〔1〕}。这件事给人们的启示是即使看上去似乎是静止的飞机结构，只要它承受反复载荷的作用，不管它的战率多低，也会发生疲劳问题。

与此同时，电液伺服试验系统的出现，可以更好地、方便地实现按实际载荷谱进行加载的试件、部件及整个机械系统的模拟试验。同时电子显微技术的发展，为更深入地了解疲劳机理开辟了前景。

至60年代初期，低循环疲劳特性就已同塑性应变幅与疲劳寿命之间的Manson-Coffin关系一起，在疲劳研究中占有重要地位。这些概念是现行的缺口应变疲劳分析的基础。

从以上对疲劳发展历史的简单回顾，我们可以看出疲劳是一种复杂的断裂现象。疲劳断裂取决于很多因素，所用材料的质量，是高强度还是低强度，是延性的还是脆性的，所制成的零件几何形状和表面状态，是简单的还是复杂的型面，截面是连续的还是不连续的，表面是粗糙的还是光滑的，表层的质量与内部是一致的还是不一致的；所受载荷的频率是高的、中等的还是低的，受载的方式是弯曲、拉压、扭转、剪切还是两种或几种方式的复合，载荷的波形是正弦波、三角波还是梯形波，在整个循环过程中载荷是等幅的还是变幅的，所使用的环境是空气、真空还是腐蚀介质，是室温、低温还是高温，所受的载荷是高的还是较低的等等因素，都会影响一个零件的疲劳寿命。有时一个或两个因素对其疲劳断裂起主导作用，有时几个因素交织在一起产生复合效应。它涉及到力学、物理学、冶金学甚至化学等许多方面的问题。因此，长期以来人们觉得疲劳是一个很难对付的复杂问题。

疲劳断裂的本质，亦即产生疲劳的机理是什么？人们在

对疲劳不断进行斗争的过程中，通过实践—认识—再实践，积一百多年对疲劳断裂的分析和研究经验表明，任何疲劳断裂总是起因于零件关键部位应力或应变集中区材料的循环塑性应变，它是所有材料，任何环境和循环加载条件下造成疲劳损伤的原因⁽⁴⁾。

物体在循环受载过程中，局部应力或应变集中区的材料就会产生循环塑性应变。随着循环加载的继续，裂纹在这些关键区域的薄弱点上成核，开始出现微裂纹。尔后裂纹在塑性区中扩展，并逐步增长形成可检的宏观或工程裂纹，最后裂纹穿过塑性区继续扩展，直至断裂，如图1所示⁽⁵⁾。

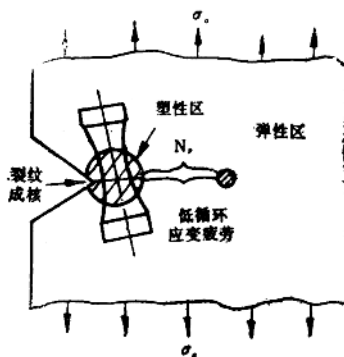


图 1 疲劳断裂过程示意图

根据这一过程，按照工程方法，构件的疲劳寿命可以表达为

$$N_t = N_1 + N_p \quad (1)$$

式中 N_1 为宏观或工程裂纹形成寿命

N_p 为裂纹穿过塑性区后扩展至临界状态，直至最后

断裂的寿命

即其总寿命为裂纹形成寿命和扩展寿命之和。

低循环应变疲劳就是研究这类应力或应变集中区，诸如拐角、孔边、沟槽以及各种过渡截面处材料在循环载荷作用下的应力-应变行为，并估算其宏观裂纹形成寿命的一种方法或手段。

低循环疲劳主要是研究循环塑性应变，试验时主要控制参量是应变而不是应力，所以有人也称之为应变疲劳。这个问题的研究开始于50年代^{〔6〕}，兴起于60年代^{〔7〕}。它与工程上的其它问题一样，始于实践，尔后逐渐被人们所认识，可以说它是疲劳研究的进一步深入和发展。产生这个问题的主要原因是：

1. 现代科学技术的发展趋向于愈来愈高的温度，从而带来了工作过程中瞬态受热的严重性，尤其是在起动—停车或加感速过程中，快速加热或冷却引起的各种瞬变机械应力叠加在一起，构成了严重的复合应力循环，致使零件关键部位进入塑性应变范围内工作。例如，航空发动机中的涡轮盘，它是涡轮转子中的重要受力件之一。其重量大，在使用过程中由于高速旋转产生很大的离心应力；另外，其形状复杂，截面变化大，尤其在起动—停车时各部位受热不均，产生很大的热应力。每起动停车一次，盘子就要经受一次由离心应力和热应力叠加而成的应力-应变循环。这种叠加应力相当大，在其关键部位，如涡轮盘的榫槽槽底可能超过材料的屈服极限强度，达 60kg/mm^2 以上，进入塑性受力状态下工作，从而构成了以大应力或高应变为特点的低循环疲劳。沿盘子径向应力分布及其槽底的应力-应变循环如图2所示^{〔8〕}。

2. 随着先进的电子计算机技术的使用和断裂力学的发展

展，为了充分发挥现有材料的强度，减轻重量和提高产品的性能，其中最典型的是航空零件。设计者采用了弹塑性设计，即零件的总体其材料在弹性范围内工作，而某些应力集中区材料则允许进入塑性状态下工作⁽⁹⁾。

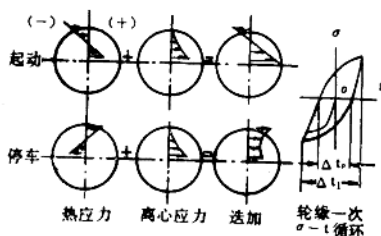


图 2 沿盘子径向应力分布示意图

近二十年来，由于上述原因，低循环应变疲劳问题已逐步深入到功率发生器、核反应堆部件，超高速飞机结构、飞机燃气涡轮发动机、舰艇、运输机械等现代科学技术的各个领域，引起了冶金学、应用数学、力学和有关学科的重视和注意。与此同时，对控制应变循环而不是应力循环的金属疲劳试验产生了极大的兴趣。1971年北大西洋公约组织航空空间研究发展顾问组的结构和材料小组，专门成立了高温低循环疲劳组⁽¹⁰⁾，汇集了美、英、法、西德等九国57个研究单位的情况，统一规划，定期交流，一般每两年召开一次专业会议。工作分基础理论和应用研究两个方面，前者研究如何解释引起明显塑性应变和断裂特征的微观机制，后者从寻求定量的实验数据入手，预测实际工程零件的低循环疲劳寿命，而后一项已成为发展低循环应变疲劳的主要推动力。1973年由美国国防部批准，在新制订的“涡轮喷气和涡轮风扇发动机

强度规范“MIL-E-5007D中^[11]，对发动机各种冷、热端部件，除原规定的飞行小时数外，都追加了低循环疲劳循环寿命数。波音公司的发动机转子，其使用寿命要经政府批准^[12]，理由是控制盘子寿命的六个因素中低循环疲劳是左右其寿命的重要因素。

低循环疲劳包括的范围很广^[13]，仅受力方式来说就有轴向拉压的、弯曲的、扭转的，还有单轴的、双轴的和多轴的低循环疲劳。从力的来源又可分为低循环机械疲劳和低循环热疲劳等等。但目前应用最广泛的，基本的是单轴拉压机械应变低循环疲劳。本方针对这种疲劳，从分析循环受载下应力集中区材料的应力-应变行为出发，论述了低循环疲劳性能测试中所必须具备的基本理论，介绍了低循环疲劳的测试技术，列举了各种材料的低循环疲劳性能，综合了目前常用的预测材料低循环疲劳寿命的方法及断裂力学在低循环疲劳领域中的应用，最后，根据对应力疲劳和应变疲劳的有关参数分析，提出提高零件疲劳强度的途径。

参 考 文 献

- [1] Sandor, B. I., Fundamental of Cyclic Stress and Strain, Wisconsin University, U. S., 1972.
- [2] Fuchs, H. O., Stephens, R. I., Metal Fatigue in Engineering, 1980.
- [3] C. N. 兰德涅尔, 谢济洲译, 高强度钢和高强度铝合金的重复静载荷强度与应力分布、表面状态及残余应力之关系的研究, 第六研究所, 1960.
- [4] 谢济洲, 机械强度, NO. 11, 疲劳专辑(下), 1980, PP. 75-80.

- [5] Coffin, L. F., *Fatigue at High Temperature*, ASTM STP 520, 1973, PP. 5-34.
- [6] Coffin, L. F., *Transaction, ASME*, Vol. 76, 1954, P. 931.
- [7] 刘湘生主编, 航空发动机强度设计、试验手册, 第二篇第三章, 第三机械工业部第六研究院, 1980.
- [8] 谢济洲、周瑞发, 航空材料, No. 5, 1978, PP 44-53.
- [9] *Manual on Low-Cycle Fatigue Testing*, ASTM STP 465, 1969.
- [10] AGARD Report No. 604, AD HOC Group on Low Cycle High Temperature Fatigue, Published Dec. 1972.
- [11] MIL-E-5007D 涡轮风扇和涡轮喷气采用发动机强度规范, 航空标准化专刊2, 1976, 12.
- [12] McRae, G. M., *Turbine Jet Engine Disc Life Limits*, P & W. Aircraft T.R. 1973.
- [13] 陈石卿译, 谢济洲校, 低周高温疲劳试验技术, 国外航空技术, 材料热加工类, 3, 1975. 3.

第一章 低循环疲劳基础理论

§1 循环加载下应力集中区材料的应力-应变行为

假定有一块带中心孔宽板模拟件，在外加轴向拉力作用下，其危险截面的应力分布可能会出现以下三种情况⁽¹⁾：

1. 其名义应力 $\sigma_0 \leq \sigma_y / K_\sigma$ ，这里 σ_y 为材料的屈服强度， K_σ 为应力集中系数。这时其应力场完全是弹性的，如图1-1a所示。

2. 外载使 $\sigma_y / K_\sigma < \sigma_0 < \sigma_y$ ，即名义应力使局部产生屈服，出现塑性变形，但不大到完全屈服的程度，如图1-1b所示。

3. 完全屈服，即整个截面上都出现塑性变形，此时 $\sigma_0 = \sigma_y$ ，其应力分布如图1.1c所示。

很明显，若按图1-1(a)进行设计则偏于保守，因为各个部位的受力均为弹性，除某些地面普通机械外，在现代技术工程中很少遇到，纯属弹性设计。若按图1-1(c)设计，则零件不可能工作，因为一旦施加载荷，零件就大面积屈服，即刻发生断裂。值得注意的是，也是实际工程中普遍遇到的是图1-1(b)这种情况。对整块板来说受力时处于弹性范围内工作，但局部应力集中区往往进入塑性状态。其工作截面的应力分布大体由三部分组成：

- (1) 塑性变形区；
- (2) 有应力梯度的弹性变形区；
- (3) 应力梯度接近于零的弹性变形区。