

# 疲劳强度

中国铁道出版社

991

0346.2  
2602

1.02

5225.2  
2602

# 疲 劳 强 度

程育仁 缪龙秀 侯炳麟 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1990年·北京

## 内 容 简 介

本书主要阐述疲劳强度的经典理论和现代理论的基本观点、方法和在工程方面的应用。全书包括绪论、材料的疲劳性能、影响疲劳强度的因素、疲劳载荷谱和累积损伤、局部应力应变法、疲劳裂纹扩展、疲劳裂纹及其发展、结构的疲劳强度、可靠性设计基础和疲劳可靠性设计共10章。读者对象：土木、机械有关专业大学生、研究生及工程技术人员。

## 疲 劳 强 度

程育仁 黎龙秀 侯炳麟 编著

\*

中国铁道出版社出版

(北京市东单三条11号)

责任编辑：陈健 封面设计：翟达

中国铁道出版社发行 各地新华书店经销

中国铁道出版社印刷厂印

---

开本：850×1168mm  $\frac{1}{32}$  印张：7.5 字数：189千

1990年11月 第1版 第1次印刷

印数：1—2600册

---

ISBN7-113-00883-6/TU·200 定价：6.60元

# 前 言

本书系根据程育仁编著的“疲劳设计引论”（1983年）和“疲劳可靠性设计”（1986年）两份教材合并压缩并补充而成。上述教材曾作为无损检测专业本科生和机械、土木及力学专业研究生使用过十多次。1986年受国家教委委托，北方交通大学举办的讲师以上教师“断裂分析”研讨班亦使用了该教材。

“疲劳设计”、“可靠性设计”、“优化设计”及“计算机辅助设计”是现代设计的四大组成部分。目前航空、机械、化工、土木、交通和铁道等部门已经或正在普遍应用疲劳理论进行设计。本书主要阐述疲劳强度的经典理论和现代理论的基本观点、方法和在工程上的应用。在编写中力求重点突出、内容精炼、实用性强。书中部分实例联系了铁道实际，也反映了作者部分研究成果。

本书可作为机械和土木等有关专业大学生和研究生的教材或参考书，也可作为广大中级以上工程技术人员知识更新的参考用书。

因水平所限，书中难免有错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

1989年北京

# 目 录

<b>第一章 绪 论</b> .....	1
§ 1—1 疲劳问题的重要性.....	1
§ 1—2 疲劳问题的历史发展.....	1
§ 1—3 疲劳破坏.....	4
§ 1—4 疲劳的分类.....	5
§ 1—5 疲劳裂纹的萌生与扩展.....	7
§ 1—6 疲劳破坏的失效分析.....	12
§ 1—7 疲劳强度设计的安全准则.....	17
<b>第二章 材料的疲劳性能</b> .....	21
§ 2—1 疲劳应力和疲劳极限.....	21
§ 2—2 材料的 $S-N$ 曲线.....	24
§ 2—3 疲劳极限线图.....	28
§ 2—4 材料在复合应力状态下的疲劳强度.....	31
§ 2—5 低周疲劳.....	33
§ 2—6 材料的循环应力-应变曲线.....	34
§ 2—7 材料的 $\epsilon-N$ 曲线.....	41
<b>第三章 影响疲劳强度的因素</b> .....	46
§ 3—1 应力集中的影响.....	46
§ 3—2 尺寸影响.....	52
§ 3—3 表面加工状况的影响.....	54
§ 3—4 腐蚀与擦伤.....	59
§ 3—5 温度影响.....	63
§ 3—6 其它影响因素.....	65
<b>第四章 疲劳载荷谱与累积损伤</b> .....	68
§ 4—1 疲劳载荷谱.....	68

§ 4—2	雨流计数法	71
§ 4—3	载荷谱的统计分析	74
§ 4—4	线性累积损伤准则	78
§ 4—5	科汀-多伦 (Corten-Dolan) 累积损伤准则	81
§ 4—6	线性累积损伤准则的应用	84
<b>第五章</b>	<b>局部应力-应变法</b>	<b>88</b>
§ 5—1	缺口的应变分析	90
§ 5—2	疲劳寿命曲线	98
§ 5—3	累积损伤计算	101
§ 5—4	算例	103
<b>第六章</b>	<b>疲劳裂纹的扩展</b>	<b>107</b>
§ 6—1	疲劳裂纹扩展特性	107
§ 6—2	疲劳裂纹扩展门槛值	111
§ 6—3	裂纹的闭合效应	116
§ 6—4	环境的影响	121
§ 6—5	疲劳裂纹扩展速率的测试	122
§ 6—6	疲劳裂纹扩展寿命的估算	126
<b>第七章</b>	<b>疲劳短裂纹及其扩展</b>	<b>133</b>
§ 7—1	疲劳短裂纹问题的提出	133
§ 7—2	光滑试件疲劳极限下的短裂纹	134
§ 7—3	非扩展裂纹与光滑试件的疲劳极限	137
§ 7—4	非扩展裂纹与缺口试件的疲劳极限	138
§ 7—5	短裂纹的疲劳扩展规律	142
§ 7—6	短疲劳裂纹的测试技术	147
§ 7—7	用EPFM方法计算短裂纹的疲劳寿命	149
<b>第八章</b>	<b>焊接结构的疲劳强度</b>	<b>155</b>
§ 8—1	焊接接头的疲劳强度	155
§ 8—2	结构细节对疲劳强度的影响	167
§ 8—3	应力范围对结构疲劳强度的影响	175

§ 8—4	残余应力对疲劳强度的影响 .....	178
§ 8—5	提高结构疲劳强度的措施 .....	180
第九章	可靠性设计基础 .....	187
§ 9—1	概述 .....	187
§ 9—2	可靠性的数量特征 .....	188
§ 9—3	失效分布的三种重要分布类型 .....	193
第十章	疲劳可靠性设计 .....	206
§ 10—1	材料疲劳寿命的分布 .....	206
§ 10—2	$P-S-N$ 曲线 .....	214
§ 10—3	材料疲劳强度的分布 .....	215
§ 10—4	载荷的概率分布 .....	219
§ 10—5	应力强度模型 (S-S模型) .....	221
§ 10—6	累积失效概率和安全系数 .....	223
§ 10—7	随机载荷下累积损伤的分布 .....	224
参考文献	.....	228

# 第一章 绪 论

## § 1—1 疲劳问题的重要性

金属、塑料、木材、混凝土、玻璃、橡胶和复合材料等各种结构材料及其加工而成的结构或设备，在载荷的反复作用下，都会产生疲劳问题。在工程结构和机械设备中，疲劳破坏的现象极为广泛，它遍及每一个运动的零部件，甚至看上去是静止的，只要它承受反复作用的载荷，就会导致疲劳破坏。据统计约有50~90%的机械结构的破坏是属于疲劳破坏。疲劳破坏也是铁路上机车、车辆、桥梁和线路上某些零部件破坏的主要形式。在曲线半径大于300米的线路上，钢轨的使用寿命主要取决于疲劳寿命。疲劳是航空工业最为关注的问题，因为飞机结构的疲劳破坏常常导致机毁人亡。据美国联邦航空署最近颁布的适航条例，疲劳强度问题在民航机适航条例中占30~50%。

疲劳破坏由于没有明显的宏观塑性变形，破坏十分突然，往往造成灾难性事故，引起巨大的经济损失。因此，研究疲劳断裂的原因，寻找提高材料疲劳抗力的途径以防止疲劳断裂事故的发生，对于发展国民经济和科学技术都有重大意义。

## § 1—2 疲劳问题的历史发展

工程技术人员对疲劳问题的试验和研究已历经一个多世纪。1829年，德国采矿工程师阿尔伯特（W.A.J. Albert）做了铁链的重复载荷试验，提出了第一个疲劳问题的研究报告。19世纪30年代，铁路在欧洲迅速发展，那时疲劳破坏常常出现在铁路机车或车辆的车轴上，而且总是有规律地发生在轴肩处。随着铁制桥



梁越来越多地代替砖石桥梁，桥梁的疲劳问题也引起了人们的重视。1839年波克来特 (Poncelet) 首先使用“疲劳” (Fatigue) 一词来描述“在反复施加的载荷作用下的结构破坏现象。”但是以疲劳一词作为题目的第一篇论文是由勃累士畏特 (Braithwaite) 于1851年在伦敦土木工程师学会上发表的。

1852年到1870年之间，德国铁路工程师韦勒 (Wöhler) 在他本人发明的试验机上进行许多重复交变应力下的疲劳试验，首次对车轴的疲劳问题进行了系统的研究，提出了  $S-N$  曲线和疲劳极限的概念，并指出应力的幅值比最大应力对材料的疲劳的影响要大得多。1870年到1890年间，一些研究者发展了韦勒的经典研究工作，如盖尔倍尔 (Gerber) 等研究了平均应力的影响；古德曼 (J. Goodman) 提出了一个有关平均应力的简化理论。

整个19世纪，对疲劳问题的研究还是很有限的，总共发表约<sup>30</sup>篇论文。20世纪初，由于光学显微镜开始应用于疲劳机理的研究，使人们观察到了局部滑移线和滑移带引起的裂纹。20年代和30年代，伦敦国家物理实验室的赫尔倍特 (Herbert)、高夫 (J. Gough) 等在疲劳机理的研究上做出重大的贡献，他们根据材料的内部组织的改变来解释疲劳现象，他们还研究了弯曲和扭转载荷的复合效应。1920年格里菲思 (A. A. Griffith) 发表了关于脆性断裂的著名论文，即玻璃的强度取决于微裂纹的大小。如果断裂的名义应力为  $\sigma$ 、裂纹尺寸为  $a$ ，则断裂时  $\sigma\sqrt{a} = \text{常数}$ 。由于他的这一重要结论，在后来他被誉为断裂力学之祖。

20年代和30年代，除了常用的结构钢、铸铁、铅和其它非铁金属合金以外，对镍、镶牙用的金合金、橡胶和各种塑料也进行了疲劳试验。1929年到1930年哈埃 (Haigh) 合理解释了高强度钢和软钢的缺口试件对疲劳的不同响应。20世纪30年代，汽车工业由于采用喷丸工艺，避免了在弹簧和车轴上经常发生的疲劳破坏。美国工程师阿尔门 (O. Almen) 正确地解释了这一现象：由于喷丸工艺，在零件表面上引入了压缩残余应力，从而显著地改善了疲劳特性。1936年荷尔格 (O. L. Horger) 指出表面辊压能够

阻止裂纹的生长；1937年诺伯（H. Neuber）提出了缺口处的应力梯度效应，同时发现缺口根部附近小体积中的平均应力比缺口峰值应力更为重要。1938年，加斯奈尔（E. Gassner）首次提出程序试验方法。

在第二次世界大战年代里，疲劳研究集中在提高零件和结构的疲劳强度，探索新材料和改进材料的特性上。1945年迈纳（M. A. Miner）在瑞典工程师帕尔姆格雷（A. Palmgren）于1924年提出的球轴承疲劳准则的基础上发表了线性累积损伤假说，这个著名的假说通常称为帕尔姆格雷-迈纳准则，或迈纳准则。尽管存在一些缺陷，这个准则在疲劳寿命估算中迄今仍然是一个重要的工具。在许多情况下，实验结果和理论研究都认为这一线性累积损伤假说简单、合理和实用。

第二次世界大战后，疲劳研究提高到一个新的水平，许多研究者从事于探讨与疲劳破坏有关的影响因素和机理，对疲劳行为的研究范围，已从接近原子尺度到庞大的实际工程结构。人们从一系列的灾难性事故中，逐渐认识到疲劳研究的重要性。战后特别在航空工业中广泛开展了对材料和结构疲劳的研究。这方面课题包括飞机结构材料，燃气轮机的新材料以及其他耐高温新材料的疲劳特性，由于大型燃气轮机和火箭发动机的高频噪声引起的所谓“噪声疲劳”和由高频振动引起的导弹结构的破坏。1954年两架英国彗星式飞机（最早的喷气客机）连续失事，灾难地从高空坠毁。经调查，事故是由压力舱疲劳破坏引起的。

在航空工业中，人们把更多的注意力集中在通过实验室近似地模拟实际载荷条件来预测结构的疲劳寿命上。从60年代中期开始，电子计算机加上液压伺服系统，使我们能够更准确地模拟实际载荷谱，即随机载荷谱。许多研究工作者还致力于用概率统计方法来处理疲劳数据，并将可靠性理论运用于疲劳设计。

最近二十年来，电子显微镜和扫描电镜使我们能够观察在疲劳载荷作用下细微的组织结构的变化，从而扩展了深入了解疲劳机理的新视野。

人们越来越多地把重点放在低周疲劳和热应力疲劳问题上。60年代初期，由于描述塑性应变幅和疲劳寿命关系的曼森-柯芬 (Manson-Coffin) 公式的发表，使低周疲劳的研究取得了突破，它是目前缺口应变疲劳分析的基础。60年代末期，F-111 飞机失事，以及其它美国空军飞机的疲劳破坏使断裂力学开始应用于飞机设计。1967年美国西弗吉尼亚州普莱曾特 (Pleasant) 大桥在完全没有任何征兆的情况下断裂，事后调查表明，断裂是由一个鱼眼杆的应力腐蚀裂纹引起的。70年代中期以来，断裂力学作为研究疲劳问题的重要工具已经受到广泛的重视。

最近几年，随着核电站的发展，对液态金属在核辐射的影响下，高温疲劳的研究受到了重视。对热电站设备的燃气轮机叶片的疲劳和蠕变的复合作用问题的研究也有了新发展。

尽管对疲劳问题已经研究了半个多世纪，但对材料疲劳的物理化学本质还不十分清楚，随着高速，高温和新材料的采用，疲劳破坏仍然不断发生，这说明疲劳强度问题远远没有彻底解决，极需进行广泛、深入的研究。

### § 1—3 疲 劳 破 坏

材料在低于拉伸强度极限的交变应力（或应变）的反复作用下，发生裂纹萌生和扩展并导致突然断裂的失效方式，称为疲劳破坏。疲劳破坏和静力破坏有着本质的区别，主要有以下特征

(1) 在交变载荷作用下，构件中的交变应力在远低于材料拉伸强度极限的条件下有可能发生的破坏。

(2) 不论是脆性材料还是塑性材料，疲劳断裂在宏观上均表现为无显著塑性变形的脆性断裂。

(3) 疲劳破坏过程局限于局部区域，并不牵涉到整个结构的所有材料。这些局部区域可能因传递外载荷、几何形状突变、温度有差别、存在残余应力和材料本身有缺陷等而产生局部的高应力或高应变。因此局部改变细节设计或工艺措施，可以明显改善结构抗疲劳破坏的性能，增加结构的疲劳寿命。

(4) 疲劳破坏是一个累积损伤的过程，要经历一定的时间，有时还很长。实践表明，疲劳断裂由三个过程组成，即裂纹萌生，裂纹扩展和最终快速断裂。

(5) 疲劳破坏断口不同于其它失效类型的断口，在宏观和微观上均具有明显的特征。

### § 1—4 疲劳的分类

疲劳破坏一般分为机械疲劳、热疲劳和腐蚀疲劳等三类，见图 1—1。

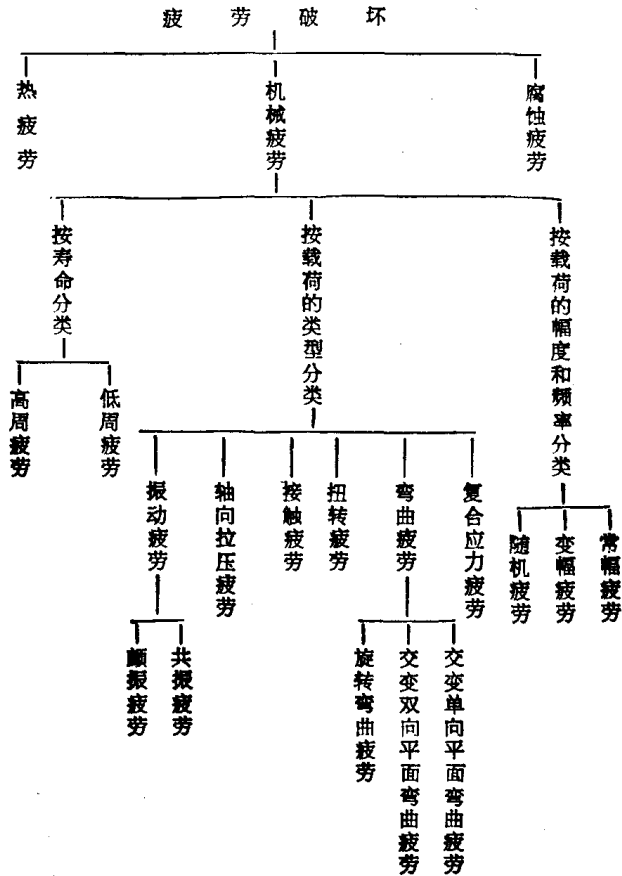


图 1—1 疲劳的分类

所谓机械疲劳是指零部件在交变机械应力（即交变应力是由机械力引起的）作用下而引起的破坏。机械疲劳根据载荷作用的幅度和频率又分为常幅、变幅和随机疲劳。常幅系指交变应力的幅度和频率都是固定不变的，如图 1—2(a)；变幅疲劳系指交变应力的幅度变化，而频率不变，如图 1—2(b)；随机疲劳则是应力幅度和频率都在变化，如图 1—2(c)。

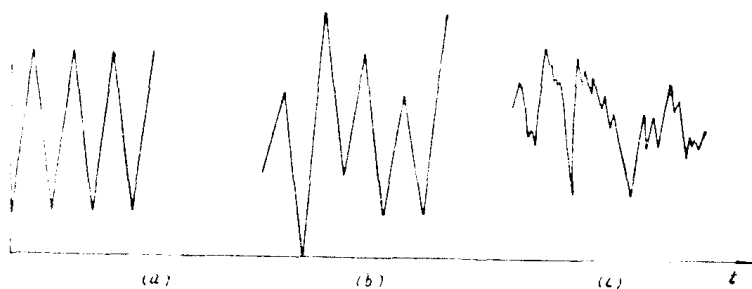


图 1—2 常幅、变幅和随机疲劳  
(a) 常幅疲劳 (b) 变幅疲劳 (c) 随机疲劳

根据材料疲劳破坏前所经历的循环次数（即寿命），又可分为高周疲劳和低周疲劳。

高周疲劳是材料所受的交变应力远低于材料的屈服极限，甚至只有屈服极限的三分之一左右，断裂前的循环次数  $N_f$  大于  $10^5 \sim 10^7$  次；通常用  $S-N$  曲线来描述该材料的疲劳特性，高周疲劳的寿命主要是由裂纹萌生寿命组成。铁路上的零部件和结构一般都属于高周疲劳。低周疲劳系指材料所受的应力较高，通常接近或超过屈服极限，断裂前的循环次数较少，一般少于  $10^4 \sim 10^5$  次，在每次循环过程中都发生了塑性变形，低周破坏就是塑性变形累积的结果，因此有时把低周疲劳称为塑性疲劳。

热疲劳系由于温度的循环变化而引起应变的循环变化，并由此产生疲劳破坏。产生热疲劳必须有两个条件，即温度循环变化和机械约束。温度变化，使材料膨胀，但由于受到约束，从而产生热应力。太阳的热梯度使大体积结构产生热应力，它将在几年

内产生好几万次循环。车轮因制动摩擦发热也能引起热疲劳。

腐蚀疲劳是在循环交变应力和腐蚀环境联合作用下而产生的开裂与破坏。如在潮湿隧道中的钢轨，位于矿区和海滨的铁路和桥梁等，都有可能发生腐蚀疲劳。

## 、 § 1—5 疲劳裂纹的萌生与扩展

疲劳破坏的过程分为三个阶段，即疲劳裂纹的萌生（亦称起始、引发、生核、孕育等）；疲劳裂纹的扩展和瞬时断裂。

疲劳断裂是由循环交变应力、拉应力和塑性应变同时作用的结果。循环交变应力使裂纹萌生，拉应力使裂纹扩展，塑性应变影响整个疲劳过程。三者缺一，则疲劳裂纹不可能萌生与扩展。

### 一、疲劳裂纹萌生的概念

疲劳裂纹萌生的概念由于观察方法和研究的层次不同，很难有一个统一的尺度标准。肉眼观察，一般能观察到的最小裂纹长度为 $0.2\sim 0.3\text{mm}$ ，而电子显微镜可小到 $3\sim 5\text{Å}$ 。对实际疲劳试样表面进行观察，可以发现在疲劳寿命的初期就已形成了滑移带，其所形成的最小裂纹长度为数微米。这一变形程度，超过了现有宏观检测手段的分辩能力。为了统一起见，有人提出了一种“工程尺寸裂纹”的概念，规定疲劳裂纹起始长度为 $0.076\text{mm}$ （ $1/32$ 英寸），这样采用一般的读数显微镜（30倍左右）即可观察。就实际的结构而言，裂纹萌生的标准因检测手段而异，例如钢轨的核伤（轨头中的埋置裂纹），因超声波探伤的灵敏度而定，一般定为 $1\sim 2\text{mm}$ 。焊接结构的缺陷也因检测手段及缺陷部位的不同，裂纹萌生的概念和标准也不尽相同。

### 二、疲劳裂纹萌生的机理

疲劳裂纹总是首先在应力最高，强度最弱的基体上形成。对

于用普通金属材料制造的零部件而言，机加工的切削纹，表面擦伤，结构上的内圆角及亚表面的夹杂物等应力集中处，易于形成很高的局部应力，这是疲劳裂纹首先发生的地区，是裂纹萌生的形式之一。纯金属及单相合金容易形成滑移带开裂；对于高温下的材料，晶界开裂则是裂纹萌生的主要形式。归纳起来疲劳裂纹的萌生有以下三种主要形式：夹杂物和基体界面开裂；滑移带开裂；晶界开裂等。

(一) 夹杂物和基体界面开裂

在金属材料中，不同程度地存在一些非金属夹杂物，例如钢轨中就存在各种氧化物，如氧化铝、氧化镁等，此外为了强化目的而常引入第二相粒子。这些夹杂物或第二相粒子，在交变应力作用下与基体沿界面分离；合金中的夹杂物和第二相粒子在交变应力作用下，本身也可能发生断裂。这两种情况，都能导致裂纹的萌生。图 1—3 为夹杂物和基体沿界面开裂过程的示意图。开始时，夹杂物与基体紧密相连（图 1—3 a）；在交变拉应力作用下，夹杂物与基体一边的界面脱开（图 1—3 b）；在一边界面脱开继续扩展的同时，另一边的界面也脱开（图 1—3 c）。此后，在基体上的表面由于界面脱开而不连续，并引起应力集

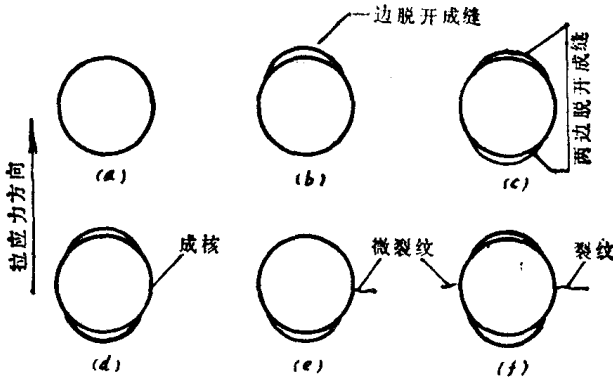


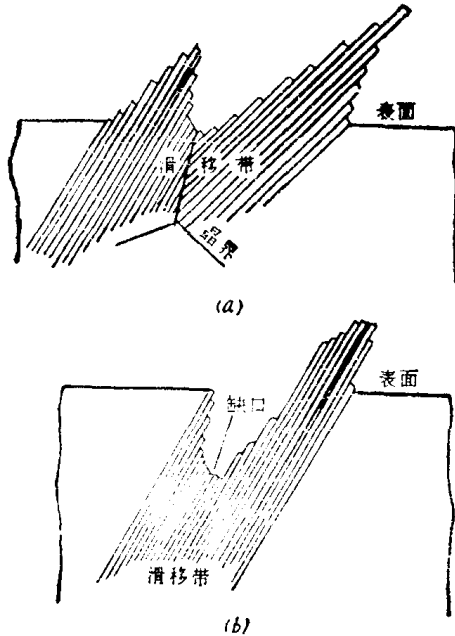
图 1—3 夹杂物与基体界面开裂过程示意图

中，萌生出疲劳微裂纹（图 1—3 e）；微裂纹扩展并在夹杂物

的两侧产生裂纹源（图 1—3 e, f）。因此，减少夹杂物或第二相的粗大粒子是延迟疲劳裂纹萌生的有效措施。钢液的真空处理以及电渣重熔等工艺措施，能有效地减少钢中的气体及夹杂物，延长金属的萌生寿命。例如轴承钢采用真空熔炼大大优于空气熔炼，原因就在于真空熔炼钢中的夹杂级别要低得多。

### （二）滑移带开裂

在软金属材料中，疲劳裂纹一般起始于晶界附近或在某些滑移带上。在单向静拉伸载荷作用下，金属试件的抛光表面可以观察到滑移带，疲劳过程的金属表面也出现滑移线或滑移带，与一般静载过程出现的塑性变形相似。但疲劳过程产生的滑移线更加不均匀。随着塑性变形程度的增加，晶体表面上的滑移带数并不增加多少，但一些带变得更加明显，从而在材料表面产生一些粗细不一的凹凸形变，见图 1—4。这是一种不可逆的塑性变形。随



(a) 在晶界附近 (b) 在滑移带的缺口处

图 1—4 在软金属材料中，疲劳裂纹起源示意图



着疲劳的继续，这种由滑移带所形成的凸起（峰）和凹进（谷）更加明显，并在凹进处形成显微裂纹，成为裂纹源。因此，对材料表面周期地进行抛光，以消除这些“凸起”和“凹进”现象，疲劳寿命可以得到提高。

高强度金属材料，疲劳裂纹源一般在应力集中处，而与滑移变形关系不大，这是因为（1）在高强度材料中，一般导致疲劳断裂的交变应力，远低于材料的屈服极限，因此在这样的交变应力作用下，发生局部滑移是有限的；（2）高强度材料中，即使发生局部滑移，一般它的滑移距离非常短，其所产生的塑性变形也很小；（3）在高强度材料中，随着强度级别的增加，对应力集中的敏感性也增加，因而不需要很大的应力，就可能在应力集中处造成裂纹，而成为疲劳裂纹源。

### （三）晶界开裂

对于高温下的材料，滑移带到达晶界时，在晶界上受阻。由于循环交变应力的继续作用，滑移带在晶界上引起的应变不断增加，在晶界前造成位错塞积（图1—5）。当位错塞积形成的应力达到理论断裂强度时，晶界开裂并形成微裂纹。材料的晶粒尺寸愈大，晶界上的应变量愈大，位错塞积群愈大，应力集中就愈高，愈易于形成裂纹。因此，采用各种工艺措施来细化晶粒，能推迟疲劳裂纹的萌生。

疲劳裂纹的形成，还必须考虑环境的影响，例如腐蚀环境能产生腐蚀坑；在有某种相对运动的联结结构中，例如车轴和车轮相联结的镶入部，其微动磨损常常形成磨损坑，以致最终形成疲劳裂纹。

## 三、疲劳裂纹的扩展

疲劳裂纹的扩展通常具有明显的两个阶段：疲劳裂纹的第Ⅰ阶段为切向扩展阶段，即滑移带裂纹在交变应力的继续作用下，裂纹尖端将沿着与应力轴成 $45^\circ$ 方向的滑移面扩展，因为零部件的表面处于平面应力状态，最大切应力与主应力方向成 $45^\circ$ 角。