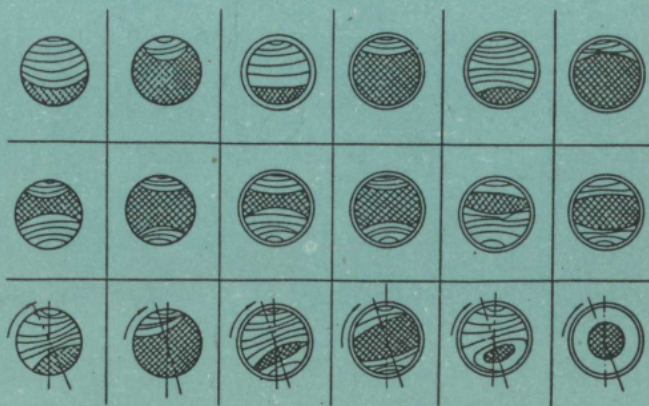


高等学校教材

疲劳强度设计 理论与方法

王德俊 编著



东北工学院出版社

TH12

507

ISBN 7-81006-316-2/TH • 30

定价：2.72 元

号 8 策字登商(31)

代高客内

高等学校教材

疲劳强度设计理论与方法

王德俊 编著

东北工学院出版社

1991 · 沈阳

(辽)新登字第 8 号

内容简介

本书是为高等学校机械设计专业本科生和工程师继续教育教学编写的教材,是在本科生教学讲义和鞍钢、宝钢疲劳强度设计培训班讲义基础上编写而成的,故理论结合实际,且针对性和实用性。内容包括疲劳破坏的识别及分析,疲劳载荷的性质及确定方法,金属材料的疲劳特性及影响因素,常规疲劳设计,裂纹形成和扩展寿命的估算,损伤容限设计,提高疲劳强度方法。为了便于学习和掌握,每章后面附有例题,不仅利于学用结合,而且能很快在生产中发挥作用。

本书可作高等学校机械设计专业本科生及工程师继续教育教学的教材,也可作为有关专业师生及工程技术人员参考。

高等学校教材

疲劳强度设计理论与方法

王德俊 编著

东北工学院出版社出版 辽宁省新华书店发行
(沈阳·南湖) 大连海运学院印刷厂印刷

开本:789×1092 1/32 印张:9.75 字数:219千字
1992年1月第1版 1992年1月第1次印刷
印数:1~1500册

责任编辑:涂宜军 战志民 责任校对:张德喜
封面设计:唐敏智 版式设计:杨华宁

ISBN 7-81006-316-2/TH·30 定价:2.72元

前 言

在机械零件和工程构件的三种主要失效形式（磨损、腐蚀、断裂）中，疲劳断裂约占机械破坏事故中的 50%~90%，由于疲劳断裂多是突然发生的，常常导致灾难性的设备和人身事故，给社会和生产带来巨大的损失。

例如，美国国家标准局研究报告指出，美国每年因断裂及防止断裂在经济上要付出 1190 亿美元的代价，相当于其国民经济总产值的 4%。如果能充分依靠科学技术的力量，有一半的经济损失是可以避免的。

飞机、汽车、轮船、冶金机械、矿山机械、工程机械、石油、化工机械及铁路桥梁等，这些主要承受循环载荷或随机载荷的零构件，其主要失效形式是疲劳破坏。

随着我国建设和生产的迅速发展，对上述机械设备的需求量将逐年增加。所以，疲劳失效的问题也会越来越突出、越严重。我们的工程技术人员，如能尽早地掌握疲劳强度设计的基本理论和方法，并在机械的设计、制造、材料、工艺、运行和维修等各个环节中予以运用，就会防止或大大减少设备疲劳断裂事故的发生，收到巨大的经济效益和社会效益。

作者基于上述认识，考虑到我国机械工程设计和使用人员的现状及工作特点，把经过实践检验而行之有效的疲劳断裂基本理论与方法通过本书介绍给广大读者。由于工作在设计和生产第一线的工程技术人员时间紧，工作繁忙，难以抽出较长时间对这一理论进行系统学习，故本书在内容上力求简明扼要，通俗易懂，理论联系实际，着重于应用。为便于

自学，每章后面都有例题。这样不仅把学和用结合起来，而且能很快在生产中发挥作用。这是本书第一个特点。

其次，本书根据设计和生产的认识规律和工作程序安排章节内容。在了解机件疲劳破坏的特点及识别方法之后，依次为：确定疲劳载荷；掌握金属材料在循环载荷下的疲劳特性和影响材料疲劳强度的因素；给出机械零构件疲劳强度设计和疲劳寿命估算的公式和方法；最后指出了提高零构件疲劳强度的措施。经过作者在上海宝钢和鞍钢等地教学实践证明，这样安排读者易于接受，效果很好。

第三，本书不仅吸收了国内外疲劳强度设计的主要内容和方法，而且包括了近年来我国自己研究得到的国产材料的性能数据、曲线、疲劳设计参数及计算公式等成果。这也是本书有别于以往著作的主要之点。这些试验数据及曲线有一部分是在国内首次正式发表。这对于我国开展机械疲劳强度设计是极为有用的资料。对实现机械设备国产化、提高设计水平有着重要意义。

本书的主要对象是机械设计、使用和维修方面的工程技术人员，对于从事与这一领域有关的科研、教学人员以及大学生们也有着重要的参考价值。

这本书能与广大读者见面，首先感谢我的导师徐灏教授的支持与指导，还要感谢上海宝钢总厂和鞍钢的“疲劳设计理论在冶金厂中应用”学习班学员，他们对本书提出了宝贵的建议，使本书更能适合工程技术人员需要。书中引用了国内外许多专家和学者的资料和数据，在此表示衷心的感谢。由于作者水平所限，书中不足及错误之处，诚望指正。

作者 1990·10

主要符号表

- A 截面面积
 a 裂纹尺寸
 a_0 初始裂纹尺寸
 a_c 临界裂纹尺寸。
 B 厚度
 b 疲劳强度指数、形状参数
 c 疲劳塑性指数
 D 疲劳损伤、直径
 d 直径
 E 弹性模量
 e 名义应变
 F 力
 $f(x)$ 概率密度函数
 K 应力强度因子
 K_I 张开型裂纹应力强度因子
 K_C 断裂韧性
 K_{IC} 平面应变断裂韧性
 ΔK 应力强度因子幅度
 K_6 弯曲有效应力集中系数
 K_t 扭转有效应力集中系数
 K'_6 (真实) 应力集中系数
 K'_t (真实) 应变集中系数。
 M 弯矩
 N 循环次数、寿命

- N_a 特征寿命参数
- N_0 循环基数、裂纹形成寿命, 最小寿命参数
- N_C 裂纹扩展寿命
- n 工作安全系数
- $[n]$ 许用安全系数
- P 概率、功率
- Q 相对应力梯度
- q 敏性系数
- R 半径
- r 半径、应力比
- S 名义应力
- ΔS 名义应力幅度
- t 时间
- W 宽度
- Y 应力强度因子形状系数
- $\alpha_0 \cdot \alpha_r$ 理论应力集中系数
- β 表面系数
- ϵ 应变、真应变、总应变、尺寸系数
- $\Delta \epsilon$ 应变幅度
- ϵ_e 弹性应变、弹性应变幅
- ϵ_p 塑性应变、塑性应变幅
- ϵ_r 单调拉伸断裂时的真实应变
- ϵ_r' 循环拉伸应变断裂时的真实应变, 疲劳塑性系数
- μ 泊松比, 母体均值
- ν 频率
- σ 应力、真实应力、母体标准离差
- $[\sigma]$ 许用应力

$\Delta\sigma$ 应力幅度

σ_{-1} 对称循环下弯曲疲劳极限

σ_0 脉动循环下弯曲疲劳极限

σ_a 应力幅

σ_b 强度极限

σ_f 单调拉伸断裂时的真实应力

σ'_f 循环应力断裂时的真实应力、疲劳强度系数

σ_m 平均应力

$\sigma_{\max}$ 最大应力

$\sigma_{\min}$ 最小应力

σ_r 应力比为“ r ”时的疲劳极限

σ_s 屈服极限

τ 切应力

τ_{-1} 对称循环下的扭转疲劳极限

τ_0 脉动循环下的扭转疲劳极限

ψ 截面收缩率

ψ_σ 弯曲循环应力下的平均应力影响系数

ψ_τ 扭转循环应力下的平均应力影响系数

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 疲劳破坏的识别及分析

- 1.1 疲劳破坏的特点 (1)
- 1.2 疲劳断口的形貌特征 (3)
- 1.3 分析疲劳断口的一般方法 (15)
- 1.4 破断分析实例 (20)

第 2 章 疲劳载荷的性质及确定方法

- 2.1 疲劳载荷及其分类 (27)
- 2.2 循环应力和循环应变 (29)
- 2.3 随机疲劳载荷的处理 (32)
- 2.4 累积频数曲线 (43)
- 2.5 疲劳载荷谱的编制 (47)

第 3 章 金属材料的疲劳特性

- 3.1 金属材料的拉伸特性 (52)
- 3.2 材料的 $S-N$ 曲线 (54)
- 3.3 疲劳极限线图 (56)
- 3.4 循环应力—应变下的材料特性 (61)
- 3.5 材料的 $\varepsilon-N$ 曲线 (69)

第4章 影响材料疲劳强度的因素

4.1 尺寸影响	(73)
4.2 表面加工状况影响	(76)
4.3 应力集中影响	(78)
4.4 载荷影响	(88)
4.5 温度影响	(91)

第5章 常规疲劳强度设计

5.1 疲劳损伤累积理论	(94)
5.2 单向应力时的安全系数计算	(97)
5.3 平面应力时的安全系数计算	(103)
5.4 常规疲劳设计中的寿命估算	(107)
5.5 随机载荷下的疲劳寿命估算	(111)
5.6 计算实例	(112)

第6章 裂纹形成寿命的估算

6.1 疲劳寿命估算方法概述	(129)
6.2 缺口处局部应力—应变的确定	(132)
6.3 裂纹形成寿命的估算	(140)
6.4 计算实例	(147)

第7章 裂纹扩展寿命的估算

7.1 概 述	(154)
---------------	-------

7.2	应力强度因子 K	(156)
7.3	断裂韧性与断裂判据	(159)
7.4	裂纹顶端塑性区尺寸及 K_I 的塑性修正 ...	(161)
7.5	疲劳裂纹扩展速率	(165)
7.6	影响疲劳裂纹扩展速率的因素	(167)
7.7	裂纹扩展寿命的估算	(173)
7.8	计算实例	(177)

第8章 损伤容限设计

8.1	材料选择	(181)
8.2	结构设计	(186)
8.3	检验程序	(188)
8.4	安全工作应力	(189)

第9章 提高零件疲劳强度途径

9.1	合理选材	(194)
9.2	改进结构	(196)
9.3	采用强化工艺	(197)

附录 1	安全系数	(209)
附录 2	材料疲劳性能	(221)
附录 3	国产材料的 $P-S-N$ 曲线	(225)
附录 4	应力集中系数	(239)
附录 5	常用的应力强度因子	(284)
参考文献		(293)

第1章 疲劳破坏的识别及分析

1.1 疲劳破坏的特点

机械是现代社会进行生产和服务的五大要素（即人、资金、能源、材料和机械）之一，任何现代产业和工程领域都需要应用机械。所以，保证机械安全、可靠地运行就有着十分重要的意义。

据国外统计表明，机械零件的破断事故中，疲劳破坏约占50%~90%。因此，世界一些工业发达的国家，对重要的机械产品都要进行疲劳强度设计，把产品的疲劳性能做为一项重要的技术指标。

目前使用中的多数机械零件承受的应力都是随时间而变化的，这种随时间改变其大小和方向的应力，称为循环应力。材料或零件在循环应力作用下，经过一段时间之后，突然发生脆性断裂的现象，称为疲劳断裂。在循环应力多次重复作用下，零构件发生的破坏称疲劳破坏。

疲劳破坏与静强度破坏有着本质的区别，静强度破坏是由于零件的危险截面中产生过大的残余变形或最终断裂。疲劳破坏是由于零件局部应力最大处，在循环应力作用下形成微裂纹，然后逐渐扩大成宏观裂纹，裂纹再继续扩展而最终导致断裂。因此疲劳破坏有着如下的特点：

1. 疲劳断裂应力（即循环应力中的最大应力）远比静应力下材料的抗拉极限 σ_b 低，甚至比材料的屈服极限 σ_s 低得多的情况下，疲劳破坏就可能发生。

2. 不论是脆性材料或延性材料，其疲劳断裂在宏观上均表现为无明显塑性变形的脆性突然断裂，故疲劳断裂一般表现为低应力脆断。

3. 疲劳破坏是在循环应力多次反复作用下产生的，因而它不是在短时间内发生的，而要经历一定的时间，甚至很长的时间。

4. 材料或零件对疲劳载荷远比静载荷敏感得多，疲劳抗力不仅决定于材料本身，而且敏感地决定于零件形状、尺寸、表面状态、服役条件和所处环境等。

5. 在疲劳破坏的宏观断口上，有着不同于其它破坏断口的显著特点，即有疲劳源（或称疲劳核心）、疲劳裂纹扩展区和瞬断区。

图 1-1 是一个典型的疲劳破坏断口图，图中 A 点为疲劳源或称疲劳核心，是疲劳破坏的起点，在一般情况下，发生在零构件的表面。但是，如果零构件内部存在缺陷，例如脆性夹杂物空洞、化学偏析等，也可能在零件次表层或内部发生。疲劳核心的数目也不都是一个，有时可能是两个甚至更多。尤其在低周疲劳时，其应变幅值较大，断口上常有几个位于不同位置的疲劳核心。

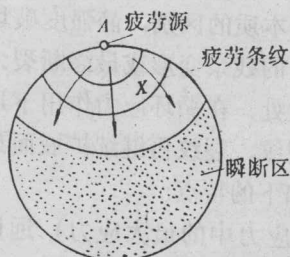


图 1-1 疲劳断口图

疲劳裂纹扩展是疲劳断口上最重要的特征区域。在该区域中，常见到明显的相互平行的弧形线，或叫贝纹线、海滩波纹线。这种贝纹状弧线标志着机器开动或停止时，疲劳裂纹扩展过程中留下的痕迹。这种特征，在低应力高循环次数

下的疲劳断口尤为明显。

瞬断区，也称最终破断区。这是静力破断部分。当零构件上的裂纹扩大到一定程度后，零件的有效截面大为减小，当小到无法继续承受最大应力的作用时，即迅速断裂。这个区域的特点，对塑性材料来说呈纤维状，对脆性材料来说呈粗结晶状。且往往具有尖锐的唇边、刃口等。

1.2 疲劳断口的形貌特征

疲劳断口是指金属材料或零构件在疲劳断裂过程中形成的一种匹配的表面，称断裂面或断口。分析它的目的在于确定零构件是否属于疲劳破坏？其破坏的原因是什么？从而提出防止事故的措施和方法，为今后的设计、选材以及加工等问题提出改进意见。

对断口的形貌进行分析包括两个方面，即宏观断口分析和微观断口分析。所谓宏观分析是指用肉眼或 20~30 倍以下放大镜观察断口的形貌特征。微观分析是指用光学显微镜或电子显微镜对断口进行分析。宏观分析不要求专用设备，被观察断口尺寸不受限制，可以观察断件和断口全貌，了解各个方面变化情况，所以说宏观分析是断口分析的基础。微观分析是用高倍的光学显微镜、透射电镜、扫描电镜对断口进行分析，能观察断口的精细结构及裂纹形态。

1.2.1 疲劳断口宏观特征

由于零构件经常承受拉、压、弯、扭或复合应力的作用，因载荷类型不同，在宏观断口上表现出的形貌特征也不

相同。

(1) 弯曲应力作用下的疲劳断口

图 1-2 是在弯曲疲劳载荷作用下的断口示意图。零件在弯曲疲劳载荷作用下，其表面应力最大，中心应力最小，

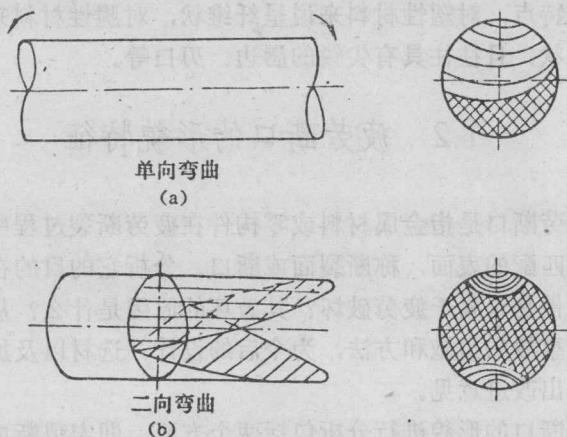


图 1-2 弯曲应力下的疲劳断口特征

疲劳源首先在表面形成，然后沿着与最大正应力相垂直方向扩展，到最后瞬断。图中 (a) 是单向弯曲疲劳断口，它的疲劳源首先在受拉应力一侧表面形成，瞬断区在疲劳源相对侧，其面积大小由材料抗拉强度和外加载荷的大小来决定。图中 (b) 是双向弯曲疲劳断口，由于双向弯曲，试件上下两侧交替承受拉应力作用，故疲劳源在相对两侧面形成，瞬断区在中间。

图 1-3 是轴在旋转弯曲应力作用下的疲劳断口示意图，由于旋转弯曲应力也是表面最大，中心最小，疲劳源也开始于表面，且疲劳源两侧裂纹发展速度较中心快，故贝纹线比较扁平。最终瞬断区虽然也在疲劳源对面，但总是相对

于轴的旋转方向逆偏转一个角度，此种现象称为偏转现象。因此，从疲劳源与瞬断区的相对位置便能推知轴的旋转方向。

轴上有无应力集中及应力集中大小，其最终瞬断区的位置是不同的。若应力集中较小时，疲劳源只在一处发生，最终瞬断区在疲劳源相对应的一侧。若应力集中较大时，则沿周向缺口将同时有几个疲劳源产生，瞬断区的位置则在轴的内部。另外，最终瞬断区的位置还受轴上名义应力大小的影响。名义应力越大，瞬断区越移向轴的中央，如图

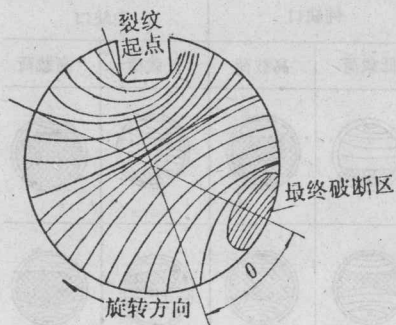


图 1-3 旋转弯曲应力下疲劳断口特征

最终瞬断区在疲劳源相对应的一侧。若应力集中较大时，则沿周向缺口将同时有几个疲劳源产生，瞬断区的位置则在轴的内部。另外，最终瞬断区的位置还受轴上名义应力大小的影响。名义应力越大，瞬断区越移向轴的中央，如图

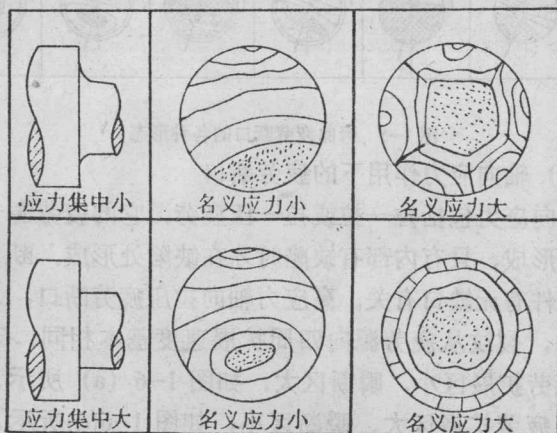


图 1-4 旋转弯曲时应力集中对断口形态影响