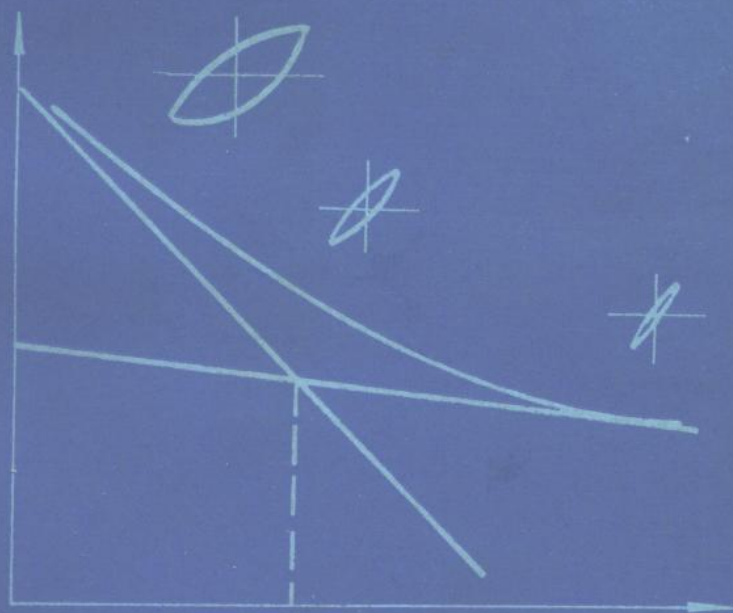


高等学校教材

结构疲劳强度设计与 失效分析

王学颜 宋广惠 编著



兵器工业出版社

(京)新登字049号

内 容 简 介

本书从机械工程实用角度系统地介绍了机械结构疲劳失效的基本特征、影响因素与分析方法；结构疲劳强度设计的基本原理与参数确定；结构疲劳寿命的预测方法、实验技术及在自动武器中的应用实例。从结构疲劳强度设计角度介绍了无限寿命设计与有限寿命设计。所涉及的疲劳理论主要有：常规疲劳、高周疲劳、低周疲劳、接触疲劳、摩擦磨损疲劳、冲击疲劳、腐蚀疲劳、高温疲劳与热疲劳等。为方便使用，书中还介绍了循环弹塑性应力、冲击应力、接触应力及热应力的计算方法。

本书可作为高等院校兵工机械类专业或一般机械专业本科生教材和研究生教学用书；亦可作为从事机械产品研制、生产与教学的科技人员的参考书。

结构疲劳强度设计与失效分析

王学颜 宋广惠 编著

*

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号 邮政编码100081)

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

华东工学院印刷厂印装

*

开本：787×1092 1/16 印张 14.5 字数：336千字

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数：0 001~1 000册 定价：3.78元

ISBN 7-80038-457-8/TB·22(课)

出版说明

遵照国务院国发〔1978〕23号文件精神，兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵工教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下；在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材 211 种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任，建立了由主审审查、责任编委复审和教编室审定等五个文件。并根据兵工类专业的特点，成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组，以加强对兵工类专业教材建设的规划、评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系统配套，完善管理制度，加强组织领导”的“八五”教材建设方针。兵工教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材 220 种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套，为教学质量的提高、培养国防现代化人才，为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由沈达钧教授主审，经兵器工业总公司兵工教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

兵器工业总公司兵工教材编审室

1991年8月

前 言

结构疲劳强度设计与失效分析是一门应用固体力学的疲劳强度理论解决机械结构强度设计与失效原因分析的新兴学科。

自动武器是一种利用火药燃气能量发射弹头的特种热力自动机械。在连续射击过程中,各承载构件受到多种交变载荷作用,并且有高温、交变温度和腐蚀介质的影响。因此自动武器构件的失效原因主要为疲劳,其构件强度设计几乎涉及到现有的各种疲劳强度理论。以自动武器作为典型机械讨论结构疲劳强度设计与失效分析的基本原理与方法具有代表性。另外,从自动武器产品研制、生产和教学的实际需要出发也急需编写这样一本教材。因为现行的静强度设计已不能确切反映自动武器构件在交变载荷作用下的疲劳累积损伤过程,也没有充分考虑影响结构疲劳的主要因素。

作者编写本书的指导思想主要着眼于工程应用,对疲劳失效机理方面的内容一般不予涉及。在内容编排上基本按认识事物的一般规律,即由浅入深、由易到难的顺序进行编写。

本书内容共分八章。第一章为疲劳强度基础,主要介绍疲劳强度的基本概念、参数确定及主要影响因素;第二章介绍无限寿命设计的基本方法;第三章为有限寿命设计,主要指应力高于疲劳极限的过负荷疲劳区,其中包括高周疲劳、低周疲劳、裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命等内容。重点讨论低周疲劳的应力-应变确定与寿命估算方法;第四章为特种载荷下的疲劳强度,其中主要介绍接触疲劳、摩擦磨损疲劳与冲击疲劳。主要对冲击载荷特性与冲击疲劳特点作重点分析。关于冲击疲劳试验、微机数据采集与处理程序和冲击疲劳寿命估算则分别放在第六章、附录与第七章中;第五章为特种环境下的疲劳强度,主要介绍应力腐蚀与腐蚀疲劳、高温疲劳与蠕变、热应力与热疲劳;第六章介绍结构疲劳试验的基本原理、结构冲击疲劳试验方法及试验结果的统计处理;第七章是结构疲劳设计与失效分析原理在自动武器中的应用。着重介绍回转式闭锁支撑凸笋的冲击疲劳强度设计与寿命估算方法;滚柱式闭锁加速机构的接触疲劳强度设计与寿命估算示例及身管失效原因的疲劳分析等;第八章介绍结构疲劳失效分析的一般内容与提高结构疲劳强度的措施。

本书按自动武器结构强度设计与失效原因分析的需要选取素材,编写成供本科生或本科高年级选修课和研究生必修课使用的教材。第一至第六章及第八章为结构疲劳强度理论与实验的一般原理与方法,可作为一般机械类专业本科生与研究生教材。本书集中了机械工程中常见的疲劳强度理论,尽量从使用方便角度给出结构疲劳失效分析的基本思路、结构疲劳强度设计的基本理论与参数确定方法,因而也可供从事机械产品研制、生产的科技人员参考。本教材对兵工机械类专业的教学时数为45学时;一般机械类专业可不讲第七章,教学时数为36学时。

由于教材涉及的知识面较广,一般机械专业学生应在学完金属工艺学、金属材料与热处理、材料力学、机械零件、金属机械性能及实验测试技术课之后再开设本课程。对兵工机械专业学生,除应学完上述课程外,还应当具有武器概论等方面的专业知识。

本书由华东工学院机械工程系王学颜、宋广惠编著，王学颜任主编。北京理工大学机械工程系沈达钧教授任主审。兵工教材编审室杨实诚高工对全书进行审定和编辑加工。本书编写过程中，华东工学院于道文教授、查子初教授曾对初稿提出许多宝贵意见。书中参考了中外作者的有关文献，在此对给予我们帮助的同志与先生们一并表示衷心感谢。

作者

1990年10月

目 录

第一章 疲劳强度基础	1
第一节 概述.....	1
一 疲劳强度的基本概念.....	1
二 结构疲劳失效的特征.....	1
三 结构疲劳的类型及疲劳设计程序.....	2
第二节 交变应力与疲劳极限.....	2
一 交变应力的类型.....	2
二 材料的疲劳极限.....	4
三 疲劳图.....	7
第三节 影响结构疲劳强度的因素.....	10
一 尺寸与截面形状修正系数 e	11
二 表面加工质量系数 β	11
三 有效应力集中系数 K	12
四 其它影响因素.....	21
第一章主要符号.....	22
第二章 无限寿命设计	24
第一节 常规疲劳强度计算法.....	24
一 材料极限应力的确定.....	24
二 单向应力作用下的疲劳强度计算.....	24
三 平面应力状态下的疲劳强度计算.....	25
四 强度判据与许用安全系数.....	26
第二节 应力梯度法.....	27
一 应力梯度 G 与相对应力梯度 \bar{G}	27
二 应力梯度法.....	29
第三节 当量应力法.....	30
一 单向应力状态的疲劳强度计算.....	30
二 复合应力状态的疲劳强度计算.....	31
第二章主要符号.....	32
第三章 有限寿命设计	34
第一节 高周疲劳.....	34

一	影响结构疲劳强度因素的修正	34
二	利用 $S-N$ 曲线和古德曼图解高周疲劳问题	36
第二节	低周疲劳	38
一	循环加载时材料的应力-应变关系	38
二	缺口部位的弹塑性应力-应变	40
三	低周疲劳寿命估算	47
第三节	裂纹形成寿命与扩展寿命	50
一	疲劳裂纹的萌生	51
二	疲劳裂纹的形成寿命	52
三	疲劳裂纹的扩展	53
四	疲劳裂纹扩展寿命	58
第三章	主要符号	61
第四章	特种载荷作用下的结构疲劳强度	65
第一节	接触疲劳	65
一	接触处的应力分析	65
二	接触疲劳强度设计	68
第二节	摩擦疲劳与疲劳磨损	70
一	摩擦与摩擦疲劳	70
二	疲劳磨损的理论计算	75
第三节	冲击疲劳	84
一	冲击载荷与重复冲击载荷的特性	85
二	冲击疲劳与一般疲劳的关系	87
三	$A-N$ 曲线与 $\sigma-N$ 曲线之间的关系	89
四	冲击疲劳寿命计算	97
第四章	主要符号	97
第五章	特种环境下的疲劳强度	100
第一节	腐蚀疲劳	100
一	应力腐蚀与腐蚀疲劳的概念	100
二	影响腐蚀疲劳强度的因素	101
三	腐蚀应力强度因子与裂纹扩展速率	102
四	腐蚀疲劳裂纹扩展寿命计算	107
五	提高腐蚀疲劳强度的措施	109
第二节	高温疲劳	111
一	蠕变的基本知识	111
二	变动应力、变动温度下的蠕变	114
三	高温疲劳	118

第三节 热疲劳	124
一 热应力与热疲劳的概念	124
二 影响热疲劳强度的因素	124
三 热疲劳寿命的估算	126
四 提高热疲劳强度的措施	133
第五章主要符号	133
第六章 结构疲劳试验	137
第一节 结构疲劳试验原理	137
一 结构疲劳试验的基本类型与特点	137
二 结构冲击疲劳试验	139
第二节 试验结果的统计处理	142
一 数理统计的基本知识	142
二 疲劳安全使用寿命的确定	146
三 $S-N$ 曲线与 $P-S-N$ 曲线的测定	154
第六章主要符号	163
第七章 自动武器结构疲劳强度的分析与设计	164
第一节 枪机循环载荷的确定	164
一 壳机力 F 的实验测定	164
二 壳机力 F 的理论计算	165
第二节 闭锁凸笋的冲击疲劳强度设计与寿命估算	174
一 枪机闭锁凸笋的载荷性质与失效类型	175
二 闭锁凸笋的冲击疲劳强度设计	175
三 修正的兰根方程及应用示例	176
第三节 滚柱式闭锁与加速机构的接触疲劳强度分析与设计	182
一 载荷类型、破损性质与强度设计准则	182
二 接触疲劳寿命估算原理	183
三 典型滚柱式闭锁机构的接触疲劳寿命计算(示例)	183
四 提高接触疲劳强度的途径	185
第四节 枪管内膛的疲劳强度分析	185
一 枪管内膛的受力分析	185
二 枪管内膛破损的疲劳分析	188
三 提高枪管使用寿命的途径	193
第七章主要符号	194
第八章 疲劳失效分析与提高结构疲劳强度的措施	197
第一节 疲劳失效分析	197

一	失效分析概述	197
二	疲劳断口的类型及形貌特征	198
三	零件疲劳失效分析的一般内容	200
第二节	提高结构疲劳强度的措施	201
一	合理的机械结构设计	202
二	合理的选择材料	202
三	合理的热处理工艺	203
四	喷丸强化工艺	205
附录	微机数据采集处理程序	208
一	程序功能简介	208
二	菜单与变量说明	209
三	源程序清单	210
四	应用实例	217
五	其他说明	220
参考文献		221

第一章 疲劳强度基础

本章主要介绍机械结构疲劳强度分析与设计所需要的基本概念、数据和影响因素。

第一节 概 述

生产力的发展需要性能优良的机械。评价现代机械好坏的标准很多，对不同用途的机械有不同的标准。但是，不论什么样的机械，至少有三个要素：工作性能、使用寿命和成本是必须考虑的。

传统的静强度设计方法是用构件名义应力与材料静强度数据，再根据经验给出一定强度储备的情况下确定构件的承载能力，这种设计方法不能给出具体的使用期限，属无限寿命设计范畴。

随着科学技术的发展，材料科学和结构强度设计理论也得到了发展。在发展过程中经历了由静态强度设计向动态强度设计的过渡，从无限寿命设计向有限寿命设计的转变。断裂力学的出现加快了疲劳强度理论的发展，正是结构疲劳强度设计理论和断裂力学理论的逐步完善，才促成了由无限寿命设计向有限寿命设计的转变。

一、疲劳强度的基本概念

载荷值随时间作周期性或非周期性变化的称为交变载荷。大多数承载的机械构件都在这种交变载荷作用下工作。由于载荷的变化，使试件或构件的材料内产生随时间变化的交变应力与交变应变。试件或构件材料在交变应力与交变应变作用下，裂纹萌生、扩展、直至小片脱落或断裂的过程称之为疲劳。构件因发生疲劳破损而使其丧失正常工作性能的现象称之为疲劳失效。试件抵抗疲劳失效的能力称之为材料疲劳强度；构件抵抗疲劳失效的能力称为结构疲劳强度。这里“结构”是机械零件、部件、直至整机的统称。

二、结构疲劳失效的特征

为正确分析机械构件的失效原因，必须了解区分疲劳失效与静强度失效的特征：

- (1) 载荷的交变性：疲劳失效的构件，在其材料内部必定作用着交变应力与应变。
- (2) 失效过程的渐变性：疲劳破坏是一个累积损伤的过程，从加载至失效需要经历一定的时间历程及应力与应变的循环过程。实践证明，不论何种疲劳，其失效过程都经历裂纹萌生、扩展和瞬断三个阶段。
- (3) 断口的脆性和断裂的突然性：不论构件使用脆性材料还是塑性材料，其疲劳破损在宏观上常表现为无明显塑性变形的突然断裂，断口为脆性。因此疲劳失效具有很大的危险性。
- (4) 应力与应变的缺口敏感性：构件在交变载荷作用下，材料内产生的应力或应变峰值

会受材料缺陷或几何形状突变的影响产生局部增大，这种现象称为缺口敏感性，也叫应力集中或应变集中。结构疲劳失效多发生在局部高应力区域。在设计或加工中应采取相应措施来减小局部高应力的产生。

(5) 疲劳断口的独特性：疲劳断口可以看到明显的裂纹源、裂纹扩展区（光滑断面）和瞬时断裂区（粗糙断面）。而其它断口无这种明显特征。

三、结构疲劳的类型及疲劳设计程序

1. 结构疲劳的类型

(1) 按设计寿命长短分为无限寿命设计和有限寿命设计。有限寿命设计中，寿命数大于 10^5 周的称为高周疲劳，小于 10^5 周的称为低周疲劳。

(2) 按引起疲劳的载荷特性分为冲击疲劳、接触疲劳、摩擦疲劳与磨损疲劳。

(3) 按受力方式分为拉压疲劳、弯曲疲劳、扭转疲劳和复合疲劳。

(4) 按应力与时间是否有确定的函数关系分为定常疲劳（ $S-t$ 关系确定）和随机疲劳（ S 与 t 无确定函数关系）。

(5) 按环境温度分为常温疲劳、高温疲劳和热疲劳。

(6) 按有无腐蚀性介质作用分为一般疲劳和腐蚀疲劳。

2. 结构疲劳强度设计的一般程序

结构疲劳强度设计程序一般分以下两步：

(1) 疲劳计算

机械构件的结构设计包括几何形状设计和结构强度设计。根据规定的运动规律完成几何设计之后，再按照整机的规定寿命、构件工作载荷、工作环境等情况选择适当的疲劳理论、材料和必要参数，对构件特征尺寸进行计算；或者先根据静强度理论确定出特征尺寸，而后再作寿命估算，并将计算结果与规定寿命相比较，通过对特征尺寸、材质、加工工艺等的调整直至最后使计算寿命满足规定寿命为止。

(2) 结构疲劳试验

对无限寿命设计类型中的一般机械，由于尺寸较大，便于在运行中检测疲劳裂纹的萌生与扩展情况，并且单件失效不会造成重大事故时，可只做疲劳计算而不做疲劳试验。

对重要机械，从确保安全可靠出发，考虑到疲劳数据的分散性和疲劳理论与构件实际使用情况之间的种种差异，还必须在疲劳计算之后再对构件做模拟疲劳试验。特别重要的机械，还应对构件直至整机做实物疲劳试验。

第二节 交变应力与疲劳极限

一、交变应力的类型

随着载荷的交变，构件内承载部分的应力和应变亦相应地发生交变。实际引起构件产生疲劳断裂的是构件承受最大应力处的交变应力或交变应变。应力随时间变化的图形称为应力谱。交变载荷引起的应力谱大致有如下三类：

1. 常幅及常平均应力的交变应力

常幅及常平均应力的交变应力图形，即应力谱如图 1-1 所示。应力谱中各符号的意义为：

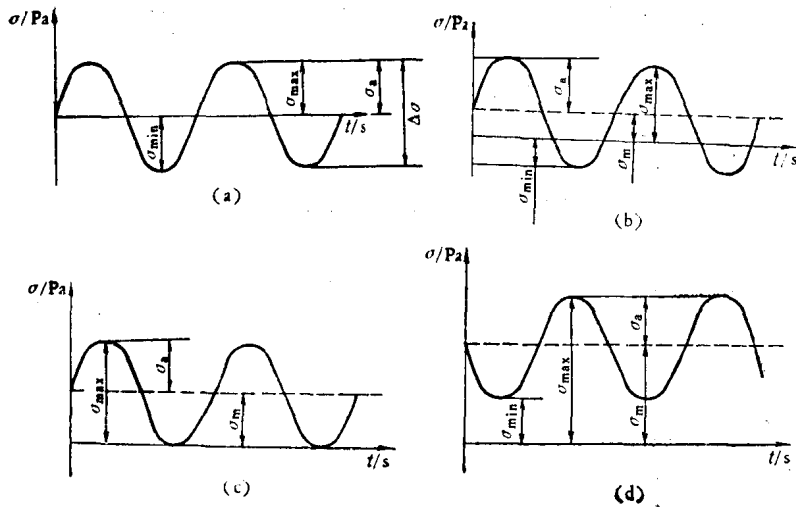


图 1-1 常幅及常平均应力的交变应力

σ_{max} ——单循环中的最大应力，代数值最大应力， $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$ ；

σ_{min} ——单循环中最小应力，代数值最小应力， $\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$ ；

σ_m ——单循环中的平均应力，是最大应力与最小应力的代数平均值， $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2$ ；

σ_a ——应力幅，是最大应力与最小应力差的一半， $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2$ ；

$\Delta\sigma$ ——应力变程， $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ ；

R ——应力比，也叫循环特性， $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ ；

A ——应力幅比， $A = \sigma_a / \sigma_m = (1 - R) / (1 + R)$ 。

应力的每一周期性变化称为一个应力循环。取拉伸应力为正应力，压缩应力为负应力。从图 1-1 中可看出： σ_{max} 与 σ_{min} 可以是异号，如图(a)、(b)；也可以是同号，如图(c)、(d)。

图(a)表示对称循环，其特征是： $|\sigma_{max}| = |\sigma_{min}|$ ， $\sigma_m = 0$ ， $\sigma_a = |\sigma_{max}| = |\sigma_{min}|$ ， $R = -1$ 。

图(c)表示脉动循环，其特征是： $R = 0$ ，对脉动拉伸 $\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{max} / 2$ ，对脉动压缩 $\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{min} / 2$ 。

静应力可以看成是 $\sigma_{max} = \sigma_{min}$ 的应力，其特征是 $\sigma_m = \sigma_{max}$ ， $\sigma_a = 0$ ， $R = +1$ 。

除 $R = -1$ ， 0 与 $+1$ 外，在 $-1 < R < +1$ 范围内的应力循环称为不对称循环。 $R < 0$ 称为变号不对称循环，如图(b)； $R > 0$ 称为不变号不对称循环，如图(d)。

一般可以用 σ_{max} ， σ_{min} ， σ_m ， σ_a 和 R 五个参数中的任意两个来确定一种交变应力的状况。交变应力的参数不随时间而改变时称为常幅交变应力，又叫稳定交变应力；参数随时间而改变时叫变幅交变应力，又叫不稳定交变应力。

2. 规则变幅变平均应力的交变应力

图 1-2 所示为经过正规化处理，较常幅交变应力更接近实际的交变应力。一些大批量生

产使用的自动机械上的构件，所受的应力谱可近似地属于这种情况。自动武器构件多数属于单向加载，若考虑系统振动，其应力谱可归为此类。

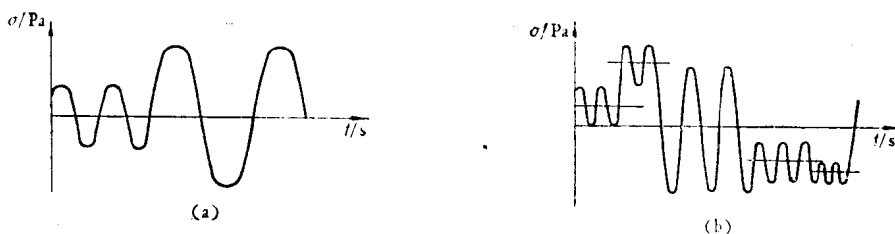


图 1-2 规则变幅变平均应力的交变应力

3. 随机交变应力

自行机械和自行火炮在行驶中承载部件所受的应力谱为随机交变应力，如图 1-3 所示。

二、材料的疲劳极限

1. 材料的 $S-N$ 曲线

将试验材料制成直径为 6~10mm 的标准试件，按规定分别在旋转变曲、拉压、扭转材料疲劳试验机上进行试验。若按不同应力水平加载，每组按同一标准（如断裂或出现同尺寸裂纹）记录循环次数，将试验结果画在应力 S 为纵坐标，循环次数 N 为横坐标的图上，所得出的曲线称为 $S-N$ 曲线。以正应力为纵坐标的叫 $\sigma-N$ 曲线，如图 1-4 所示；以剪应力 τ 为纵坐标的叫 $\tau-N$ 曲线，统称 $S-N$ 曲线。



图 1-3 随机交变应力

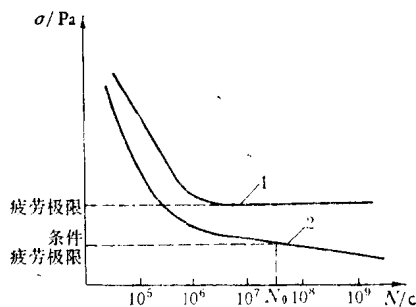


图 1-4 两种 $\sigma-N$ 曲线

1—铁合金及钛合金； 2—非铁合金。

若把试验结果按不同的存活率 p 整理在 σ 为纵坐标， N 为横坐标的图上，即得出 $p-\sigma-N$ 曲线，如图 1-5 所示。该图表示 45 号钢制成直径为 25mm 试件承受平面弯曲时的 $p-\sigma-N$ 曲线。存活率（也叫可靠度） p 与破坏概率（也叫风险） α 的关系为 $p=1-\alpha$ 。若图中不加特别说明，则这种 $S-N$ （或 $\sigma-N$ 、或 $\tau-N$ ）曲线的存活率一般为 50%。

经大量试验，人们对材料的疲劳现象，通过对 $S-N$ 曲线的分析总结出如下基本规律：

(1) 应力愈高，循环次数愈少；应力愈低，循环次数

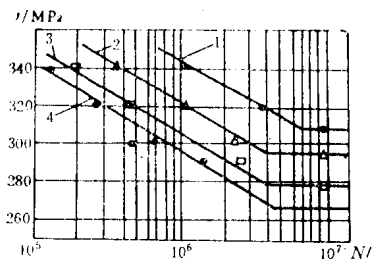


图 1-5 45 号钢的 $p-\sigma-N$ 曲线

1— $p=10\%$ ； 2— $p=50\%$ ；
3— $p=90\%$ ； 4— $p=98\%$ 。

N 愈高,如图 1-4 所示。

(2) 铁合金和钛合金材料,当应力低于某一数值时,曲线与横轴平行,如图 1-4 中曲线 1。

(3) 非铁合金,如铜、铝、镁等合金的 $\sigma-N$ 曲线,图 1-4 中曲线 2,无水平线部分。

(4) 当最高应力一定时,在循环次数相同情况下,不对称循环较对称循环对材料造成的损伤要少些。换句话说,不对称循环较对称循环抵抗疲劳破坏的强度高。不同应力比 R 对 $S-N$ 曲线的影响如图 1-6 所示。

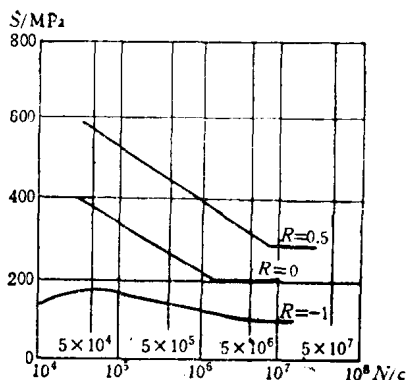


图 1-6 不同应力比 R 的 $S-N$ 曲线

2. 材料的疲劳极限

前已述及,材料或构件在交变应力(或交变应变)作用下抵抗疲劳破坏的能力称为疲劳强度。衡量材料或构件疲劳强度大小的指标之一是“疲劳强度极限”,简称“疲劳极限”。

疲劳极限指的是:在一定循环特性下,材料或构件承受无限次应力(或应变)循环而不产生疲劳破坏时的最大应力(或应变)。在 $S-N$ 曲线上与横轴平行的水平线对应的应力就是该材料或构件的疲劳极限,也叫持久疲劳极限。水平段开始时对应的应力循环次数叫做持久循环基数。一般规定钢材经 10^7 次循环仍不破坏时,就认为它可承受无限次循环。

非铁合金是没有明显水平线的材料。为了对所有材料的抗疲劳能力进行比较,人为规定一个循环基数 N_0 (此值为 2×10^7 或 10^8)。把 N_0 对应的应力称之为该材料或构件的“条件疲劳极限”。

$S-N$ 疲劳曲线的倾斜部分各点的应力水平称为“过负荷持久极限”,也称为有限寿命的疲劳极限。它表示材料在过负荷(应力超过疲劳极限)情况下抵抗疲劳破坏的能力。

在进行结构疲劳强度设计时所用的疲劳极限,一般应在与实际构件的载荷类型和应力比一致的条件下进行实验测得。无这种条件时,可用下面经验公式估算。式中 σ_s 与 σ_b 分别为材料屈服极限和强度极限。

(1) 材料疲劳极限的估算

① 结构钢对称循环的疲劳极限

拉压 $\sigma_{-1} = 0.23(\sigma_s + \sigma_b)$

弯曲 $\sigma_{-1} = 0.27(\sigma_s + \sigma_b)$

② 结构钢脉动循环的疲劳极限

拉压 $\sigma_{01} = 1.42\sigma_{-1}$

弯曲 $\sigma_0 = 1.33\sigma_{-1}$

扭转 $\tau_0 = 1.50\tau_{-1}$

③ 铸铁的疲劳极限

拉压 $\sigma_{-1} = 0.4\sigma_b$; $\sigma_{01} = 1.42\sigma_{-1}$

弯曲 $\sigma_{-1} = 0.45\sigma_b$; $\sigma_0 = 1.33\sigma_{-1}$

扭转 $\tau_0 = 1.35\tau_{-1}$

④ 铝合金的疲劳极限

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_b}{6} + 73.5 \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_b}{6} + 73.5 \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_{0.1} = 1.5\sigma_{-1}$$

⑤青铜的弯曲疲劳极限

$$\sigma_{-1} = 0.21\sigma_b$$

⑥材料扭转疲劳极限的换算

金属材料的扭转疲劳极限与弯曲疲劳极限的比值 Q , 如表 1-1 所示。当没有实验数据时, 可通过表列关系换算。

表 1-1 扭转疲劳极限与弯曲疲劳极限的比值 Q

材 料	比值 Q	试 验 数 目	比值 Q 的均值
锻 钢	0.52~0.69	31	0.60
锻造铝合金	0.43~0.74	13	0.55
锻造钢及其合金	0.41~0.67	7	0.56
锻造镁合金	0.49~0.60	2	0.54
钛	0.37~0.57	3	0.48
铸 铁	0.79~1.01	9	0.90
铸铝及镁合金	0.71~0.91	5	0.85

为了与经验公式的估算值比较, 下面再给出两种图形估算法。图 1-7 与图 1-8 都是根据材料的强度极限 σ_b 来估算对称循环弯曲疲劳极限的。

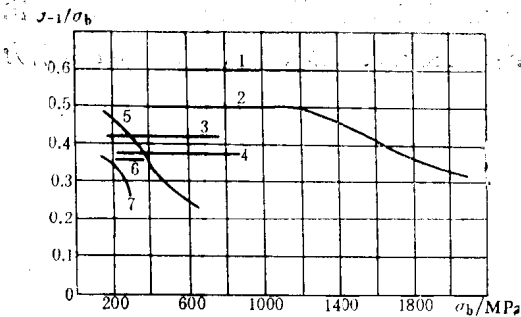


图 1-7 材料比值 $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}$ 与 σ_b 的关系

- 1—钛合金; 2—结构钢; 3—铸铁;
4—铜合金; 5—铝合金; 6—挤压及锻造镁合金;
7—铸镁合金。

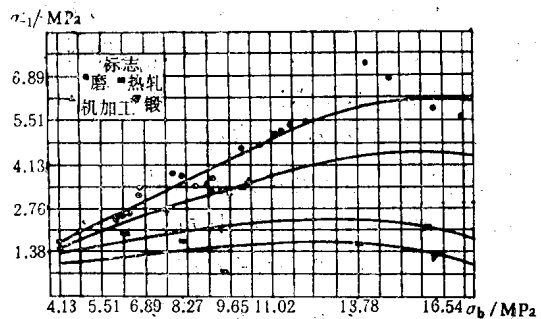


图 1-8 无缺口试件对称循环疲劳极限与强度极限 σ_b 的关系

(2) 材料疲劳极限的实验值

因为用经验公式或图表估算都有误差, 为了提高计算精确度, 最好使用实测疲劳极限值。表 1-2~ 表 1-4 列出的几种材料的疲劳极限实测值可供设计使用。

表 1-2 球墨铸铁弯曲疲劳极限^[2]
(稀土球墨铸铁)

热 处 理 状 态	疲 劳 极 限 σ_{-1} /MPa	强 度 极 限 σ_b /MPa	试 样 直 径 d/mm
正火85%珠光体	240.1	793.8	6
正火95%珠光体	249.9	803.6	6
正火100%珠光体	269.5	862.4	6
正火95%珠光体石墨球一类	269.5	862.4	6
正火95%珠光体石墨球二类	249.9	730.1	6
正火95%珠光体石墨球三类	230.3	764.4	6
正火95%珠光体石墨球四类	220.5	627.2	6

表 1-3 碳钢弯曲疲劳极限

材料牌号	热 处 理 状 态	疲 劳 极 限 σ_{-1} /MPa	强 度 极 限 σ_b /MPa	试 样 直 径 d/mm
20	正 火	176.4	411.6	
35	正 火	230.3	529.2	
45	正 火	245.0	627.2	
45	840℃淬火 580℃回火	426.3	833.0	6
45	840℃淬火 420℃回火	529.2	1215.2	6
45	840℃淬火 360℃回火	617.4	1411.2	6
45	840℃淬火 200℃回火	578.2	1960.0	6

表 1-4 合金钢弯曲疲劳极限

材料牌号	热 处 理 状 态	疲 劳 极 限 σ_{-1} /MPa	强 度 极 限 σ_b /MPa	试 样 直 径 d/mm
16 Mn	轧制态	230.3	573.3	6 × 34
15 MnVB	调质	411.6	882	
18 CrNiWA	900℃空冷 220℃回火	509.6	1215.2	6
20 Cr	调质	411.6	931	
20 SiMnMo VA	900℃淬火 250℃回火	529.2	1479.8	6
30 CrMnSiA	880~900℃淬油 610℃回火	421.4	980	6
30 CrMnSiA	880~900℃淬油 550℃回火	490	1048.6	6
30 CrMnSiA	880~900℃淬油 490℃回火	539	1342.6	6
30 CrMnSiA	880~900℃淬油 420℃回火	568.4	1568	6
30 CrMnSiA	880~900℃淬油 200℃回火	661.5	1871.8	6
40 Cr	840~860℃淬油 500℃回火	524.3	1107.4	6
40 Cr	840~860℃淬油 390℃回火	612.5	1470	6
40 Cr	840~860℃淬油 200℃回火	632.1	1911	6
40 MnB	840℃淬油 480℃回火	509.6	1068.2	6
40 MnB	840℃淬油 360℃回火	676.2	1460.2	6
40 MnB	840℃淬油 200℃回火	617.4	1940.4	6

三、疲劳图

S-N 曲线可以通过对称循环和不对称循环得到, 并且不同应力比 R 所得到的 S-N 曲

线不同。为了使用方便,最好能有一种应力比满足 $-1 \leq R \leq +1$ 的各种 $S-N$ 曲线的线图,这种线图称之为疲劳极限图,简称疲劳图。常用的疲劳图有两种:一是史密斯(Smith)疲劳图;二是黑格(Haigh)疲劳图。

1. 史密斯疲劳图

在史密斯疲劳图(图1-9)中,曲线 $C'AC$ 表示最大应力极限,即材料疲劳极限;曲线 $C'A'C$ 表示最小应力值。在曲线 $C'AC$ 与 $C'A'C$ 所围面积内的任一点,表示不产生疲劳破坏的应力水平和其循环特性。两曲线所围面积以外的任一点,表示其所代表的应力水平和循环特性的交变应力,使材料或构件经有限次应力循环即会产生疲劳破坏。

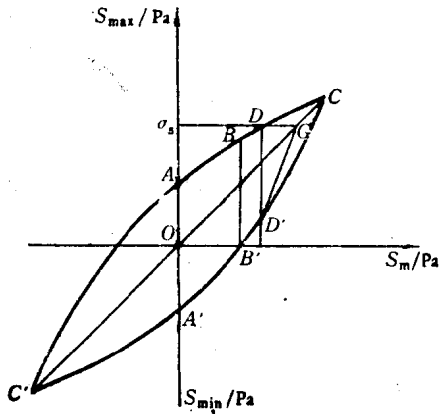


图 1-9 史密斯疲劳图

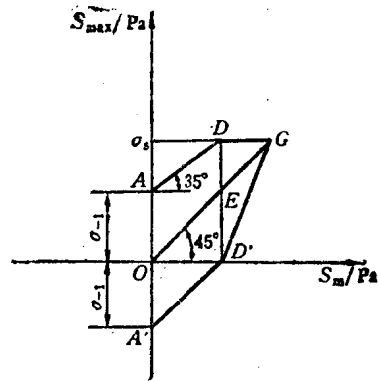


图 1-10 史密斯疲劳简图

最大应力线 $C'AC$ 与最小应力线 $C'A'C$ 的交点 C' 和 C , 因最大应力等于最小应力(即 $|\sigma_{max}| = |\sigma_{min}|$), 所以这两点表示的应力状态为静破坏, 其纵坐标与横坐标均为材料强度极限 σ_s (因 CC' 直线过坐标原点, 并与横轴成 45° 夹角)。

最小应力线 $C'A'C$ 与横轴交点为 B' , 这点最小应力 $\sigma_{min} = 0$ 。过 B' 作纵轴平行线交最大应力线于 B 点。 B 点的纵坐标值代表脉动循环的疲劳极限 σ_0 , 因 $\overline{BB'}$ 线段表示 $\sigma_{min} = 0$ 、 $R = 0$ 的变应力。

最大应力线与最小应力线分别交纵轴于 A 、 A' 两点, 这两点分居横轴上下, 且对称于原点 O 。平均应力 $\sigma_m = 0$, $R = -1$, 所以 A 、 A' 点的纵坐标表示对称循环的疲劳极限 σ_{-1} 。

在 C' 、 C 对应的横坐标范围内, 除特殊点 A 与 A' 、 B 与 B' 及 C' 与 C 之外, 平行于纵轴的任意直线与最大应力线和最小应力线相交的两点, 表示任意的应力比 R 的疲劳极限。

史密斯疲劳图在实际应用中作如下简化:

(1) 塑性材料不允许出现永久变形, 即 σ_{max} 不能大于材料屈服极限 σ_s 。在图 1-9 中, 从纵坐标 $\sigma = \sigma_s$ 处作一平行横轴直线交最大应力线和 C' 与 C 的连线于 D 、 G 。从 D 作横轴垂线交最小应力线于 D' , 用 $\triangle DGD'$ 面积代替曲面 DCD' 的面积。

(2) 很多材料的拉伸疲劳极限与压缩疲劳极限不一定相等, 故史密斯疲劳图不呈对称状态。钢材的拉压疲劳极限值近似相等, 实用中按相等处理, 即史密斯疲劳图呈对称状态。为简化起见, 钢的史密斯疲劳图只画右边一半, 如图 1-10 所示。