

高等学校试用教材

# 机械工程材料

西安交通大学 沈 莲 编

GAODENG XUE  
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

## 前 言

本书是根据原机械工业部1986年11月在威海市召开的机械工程材料及物理化学教材编审会议审定的编写大纲编写的。

本教材主要供机械制造和机械设计类专业大学本科学生使用。参考学时数为60学时。

机械制造和设计专业现有的“金属材料及热处理”教材由于内容偏多，教材篇幅与学时数之间的矛盾比较突出，且对于非金属材料未作介绍，不能适应当前材料科学发展的形势。另外，编者认为，对于机械制造与设计专业来说，本课程应该着重向学生介绍正确选择材料的思想方法及材料加工过程中各个环节对性能的影响。应使学生懂得，要正确合理地选择材料，首先必须了解零件的工作条件及其失效方式，进而能较准确地提出对零件材料的主要性能要求，并就材料的成分、组织、热处理和其它冷、热加工方法提出设想，以满足对零件的性能要求。因此，本课程最后要达到的目标，是使学生在设计时初步具有合理选材和正确制订零件的冷、热加工工艺路线的能力。

基于上述想法，本教材新增加了第一章机械零件的失效和第十章典型零件的选材；在热处理工艺分析一节中，也加强了根据零件性能要求进行选材的内容。本教材对金属和合金的晶体结构与结晶、相图、塑性变形与再结晶等内容作了较大的删减，把必要的基本理论放在第二章碳钢中，结合有关内容加以阐述。在第四章合金钢中，针对动力机械和化工机械有关专业，加强了不锈钢与耐热钢的内容。在钢的热处理这一章中，对热处理基本原理仅作初步介绍，而侧重于各热处理方法的应用，使学生懂得热处理工艺在机械零件加工工艺流程中的位置和作用。对于铸铁、有色金属、高分子材料、陶瓷材料、复合材料各章，则着重于这些材料的性能特点和应用。总之，本教材力求作到加强基础，突出重点，注重应用和适用范围广。

为帮助学生思考、复习、巩固和引伸所学知识，各章后均附有习题，供教学时参考。

本书由西安交通大学沈莲编写，由陕西机械学院沈福三教授主审。在编写过程中作者参阅了国内外出版的有关教材和资料，并得到西安交通大学材料系有关同志的支持和帮助。本书所采用的金相图片由西安交通大学强度研究所杨桂应工程师提供。在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编 者

1989.12

# 目 录

绪论	1	六、合金性能和相图关系小结	49
第一章 机械零件的失效分析	3	§ 2-4 钢中常存杂质元素对钢性能的影响	50
§ 1-1 零件在常温静载下的过量变形	3	一、硅和锰的影响	50
一、过量弹性变形	3	二、硫的影响	51
二、过量塑性变形	5	三、磷的影响	51
§ 1-2 零件在静载和冲击载荷下的断裂	5	四、钢中气体的影响	51
一、韧断和脆断的基本概念	5	§ 2-5 钢锭的组织 and 缺陷	52
二、影响脆断的因素	6	一、镇静钢钢锭的组织 and 缺陷	52
三、断裂韧性的概念	8	二、沸腾钢钢锭的组织 and 缺陷	54
§ 1-3 零件在交变载荷下的疲劳断裂	10	三、沸腾钢和镇静钢的比较与应用	55
一、疲劳的基本概念	10	§ 2-6 压力加工对钢组织和性能的影响	55
二、疲劳断口的特征	11	一、冷压力加工对钢组织和性能的影响	55
三、疲劳抗力指标及其影响因素	11	二、冷变形钢在加热过程中组织和性能的变化	59
§ 1-4 零件的磨损失效	15	三、热压力加工对钢组织和性能的影响	61
一、磨损的基本类型	16	§ 2-7 碳钢的分类、编号及用途	62
二、接触疲劳	18	一、碳钢的分类	62
§ 1-5 高温下工作零件的失效	19	二、碳钢的牌号和用途	63
一、高温对金属机械性能的影响	19	习题与思考题	66
二、蠕变极限和持久强度	19	第三章 钢的热处理	68
三、高温下零件的失效	21	§ 3-1 概述	68
习题与思考题	22	§ 3-2 热处理过程中钢的组织转变	68
第二章 碳钢	23	一、钢在加热时的转变	68
§ 2-1 纯铁的组织 and 性能	23	二、钢在冷却时的转变	72
一、纯铁的结晶	23	§ 3-3 钢的普通热处理	82
二、纯铁的同素异构转变	24	一、钢的退火与正火	82
三、工业纯铁的组织 and 性能	27	二、钢的淬火	85
§ 2-2 铁和碳的相互作用	30	三、钢的回火	90
一、铁和碳形成固溶体——铁素体和奥氏体	30	§ 3-4 钢的表面热处理	92
二、铁和碳形成化合物——渗碳体	31	一、表面淬火	93
三、铁碳合金中的组织组成物	32	二、钢的化学热处理	95
§ 2-3 Fe-Fe <sub>3</sub> C相图	33	§ 3-5 热处理缺陷及防止方法	102
一、相图的基本概念	33	一、变形与开裂	102
二、Fe-Fe <sub>3</sub> C相图分析	35	二、淬火硬度不足	102
三、典型铁碳合金结晶过程分析	40	习题与思考题	102
四、碳对铁碳合金平衡组织和性能的影响	46	第四章 合金钢	104
五、Fe-Fe <sub>3</sub> C相图的实际应用	48	§ 4-1 概述	104

一、合金元素在钢中的作用 .....	104	第六章 有色金属及其合金 .....	170
二、合金钢的分类及牌号 .....	109	§ 6-1 铝及铝合金 .....	170
§ 4-2 合金结构钢 .....	110	一、铝及铝合金的性能特点 .....	170
一、普通热处理用结构钢 .....	110	二、提高铝及铝合金强度的主要途径 .....	170
二、表面热处理用结构钢 .....	119	三、铝及铝合金的分类和用途 .....	174
§ 4-3 合金工具钢 .....	123	§ 6-2 铜及铜合金 .....	180
一、工具钢的特点及合金元素在工具		一、铜及铜合金的性能特点 .....	180
钢中的作用 .....	123	二、铜及铜合金的分类及用途 .....	180
二、碳素工具钢与低合金工具钢		§ 6-3 轴承合金 .....	190
的比较 .....	124	一、轴承合金的性能要求 .....	190
三、高速钢的性能及热处理特点 .....	126	二、轴承合金的分类及用途 .....	191
四、量具用钢的性能及热处理特点 .....	131	§ 6-4 钛及钛合金 .....	194
五、模具钢的特点及热处理 .....	131	一、钛及钛合金的性能特点 .....	194
§ 4-4 特殊性能钢 .....	135	二、常用钛合金及其热处理 .....	195
一、不锈钢 .....	135	习题与思考题 .....	197
二、耐热钢 .....	141	第七章 高分子材料 .....	198
三、低温钢 .....	146	§ 7-1 概述 .....	198
四、耐磨钢 .....	147	一、高分子链的结构和形态 .....	198
习题与思考题 .....	152	二、高聚物的聚集态 .....	203
第五章 铸铁 .....	153	三、高分子材料的组成 .....	205
§ 5-1 概述 .....	153	§ 7-2 高分子材料的性能 .....	206
一、石墨化过程 .....	153	一、机械性能 .....	206
二、影响石墨化的因素 .....	154	二、物理性能和化学性能 .....	209
§ 5-2 灰口铸铁的组织 and 性能 .....	156	三、高分子材料的老化 .....	211
一、灰口铸铁的组织 .....	156	§ 7-3 常用高分子材料 .....	211
二、灰口铸铁的性能特点 .....	158	一、工程塑料的种类、性能及应用 .....	211
§ 5-3 灰口铸铁的分类、性能及用途 .....	159	二、合成橡胶的种类、性能和应用 .....	214
一、灰铸铁 .....	159	习题与思考题 .....	217
二、球墨铸铁 .....	159	第八章 陶瓷材料 .....	218
三、蠕墨铸铁 .....	161	§ 8-1 陶瓷材料的结构、性能与分类 .....	218
四、可锻铸铁 .....	163	一、陶瓷材料的结构 .....	218
§ 5-4 灰口铸铁的热处理 .....	165	二、陶瓷材料的性能 .....	222
一、退火 .....	165	三、陶瓷材料的分类 .....	225
二、正火 .....	165	§ 8-2 工程结构陶瓷材料 .....	226
三、淬火及回火 .....	165	一、普通陶瓷 .....	226
四、等温淬火 .....	166	二、特种陶瓷 .....	226
五、表面淬火 .....	166	§ 8-3 金属陶瓷材料 .....	228
六、表面化学热处理 .....	166	一、粉末冶金简介 .....	228
§ 5-5 合金铸铁 .....	166	二、金属陶瓷硬质合金 .....	228
一、高强度合金铸铁 .....	167	习题与思考题 .....	229
二、耐热合金铸铁 .....	167	第九章 复合材料 .....	230
三、耐蚀合金铸铁 .....	167	§ 9-1 复合机理简介 .....	230
四、耐磨合金铸铁 .....	168	一、粒子增强复合 .....	230
习题与思考题 .....	169	二、纤维增强复合 .....	231

三、连续纤维单向增强复合材料的强化原理 .....	232	§ 10-3 零件实物性能试验的重要性 .....	245
四、复合材料的性能特点 .....	235	一、结构设计对性能的影响 .....	245
§ 9-2 非金属基复合材料 .....	236	二、加工工艺对性能的影响 .....	245
一、纤维-树脂复合材料 .....	236	§ 10-4 材料强度、塑性与韧性的合理配合 .....	245
二、塑料-金属多层复合材料 .....	239	§ 10-5 选材方法 .....	246
§ 9-3 金属基复合材料 .....	240	一、根据材料的使用性能选材 .....	247
一、纤维-铝(或合金)基复合材料 .....	240	二、根据材料的工艺性能选材 .....	248
二、纤维-钛合金基复合材料 .....	240	三、根据材料的经济性选材 .....	250
三、纤维-铜(或合金)基复合材料 .....	241	§ 10-6 典型零件选材及热处理工艺分析 .....	250
习题与思考题 .....	241	一、齿轮 .....	250
第十章 典型零件的选材及热处理工艺分析 .....	242	二、轴 .....	251
§ 10-1 常用机械性能指标在选材中的意义 .....	242	三、汽轮机叶片 .....	253
§ 10-2 断裂韧性在选材中的意义 .....	244	习题与思考题 .....	254
		主要参考文献 .....	254

## 绪 论

材料是我们社会中的工作物质，它是人类发展和进步的标志。历史学家根据制造生产工具的材料将人类生活的时代划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。现代工业技术的发展，同样与材料紧密相连。能源、信息和材料已成为现代技术的三大支柱，而能源、信息的发展又离不开材料。材料的品种、数量和质量已是衡量一个国家科学技术和国民经济水平以及国防力量的重要标志之一。

人类在地球上出现之后，最早使用的工具是石头，到了原始社会的末期，开始用火烧制陶器，由此发展为以后的瓷器。我国汉代瓷器对世界文化产生了巨大的影响，已成为中国古文化的象征。

制陶技术的发展为炼铜准备了必要条件，奴隶社会青铜冶炼技术已得到很大发展。我国青铜冶炼技术的发明虽然晚于古埃及和西亚，始于夏代以前，但发展较快，到了商、周时代青铜冶炼和铸造技术已发展到较高水平，普遍用于制造各种工具、食物器皿和兵器。春秋战国时期，我国劳动人民通过实践，认识了青铜成分、性能和用途之间的关系。在《周礼·考工记》中总结出“六齐”规律：“六分其金而锡居一，谓之钟鼎之齐；五分其金而锡居一，谓之斧斤之齐；四分其金而锡居一，谓之戈戟之齐；三分其金而锡居一，谓之大刃之齐；五分其金而锡居二，谓之削杀矢之齐；金、锡半，谓之鉴燧之齐”。这是世界上最早的合金化工艺的总结。此外，铅、锡、锌、金、银、汞等有色金属的冶炼及使用不断得到发展。

由青铜器过渡到铁器是生产工具的重大发展，对社会进步起着巨大的推动作用。我国从春秋战国时期开始大量使用铁器，推动了奴隶社会向封建社会的过渡。到了汉代，“先炼铁后炼钢”的技术已居世界领先地位。从西汉到明朝，我国钢铁生产的技术远远超过世界各国，而且钢铁热处理技术也得到很大发展，达到相当高的技术水平。西汉《史记·天官书》中有“水与火合为淬”。《汉书·王褒传》中有“巧冶铸干将之朴，清水淬其锋”等的记载。明代科学家宋应星在《天工开物》一书中对钢铁材料的退火、淬火、渗碳工艺作了详细论述。

历史充分证明我国劳动人民在材料的制造和使用上有着辉煌的成就，为人类文明作出了巨大贡献。

18世纪世界工业迅速发展，对材料在品种、数量和质量上都提出了越来越高的要求，推动了材料工艺的进一步发展。光学显微镜于1863年开始应用于金属研究，从此金属材料的生产 and 研究不再是凭经验（如听声音、看颜色、靠祖传秘方或经验），而是深入到材料内部的微观领域。在化学、物理、材料力学等学科的基础上产生了一门新学科“金属学”，它是研究金属材料的成分、组织和性能之间关系的一门科学。随着1912年X射线衍射技术和1932年电子显微镜等新仪器和新技术的相继出现和应用，“金属学”日趋完善，大大推动了金属材料的发展。

20世纪以来，现代科学技术和生产的突飞猛进，能源、信息、空间技术的发展，不但要求生产更多具有高强度和特殊性能的金属材料，而且要求迅速发展更多更好的非金属材料。今天，在发展高性能（如高温、高强度及高比强度等）金属材料的同时，正迅速发展和应用

高性能(如高比强度、高比模量、耐高温等)非金属材料,并且正在进入人工合成材料(高分子材料、陶瓷材料、复合材料)的时代。“金属学”已不能全面反映现今使用的各类材料的研究、生产和应用中的理论和实际问题,因此在金属学、高分子科学、陶瓷学的基础上形成了“材料科学”,它是研究所有固体材料的成分、组织和性能之间关系的一门科学。而“工程材料学”则是材料科学的一部分,它以用于工程结构和机器零件的材料即工程材料为研究对象,阐述工程材料的成分、组织和性能之间的关系。

《机械工程材料》是机械制造和机械设计类专业的技术基础课,其目的是使学生获得有关工程结构和机器零件常用的金属材料和非金属材料的基本理论知识和性能特点,并使其初步具备根据零件工作条件和失效方式合理选择与使用材料、正确制订零件的冷、热加工工艺路线的能力。

《机械工程材料》的内容包括:(1)机械零件的失效方式(第一章);(2)金属材料的基本知识、热处理基本原理和常用金属材料的性能特点及应用(第二、三、四、五、六章);(3)常用非金属材料(高分子材料、陶瓷材料)和复合材料的基本知识和性能特点及应用(第七、八、九章);(4)机械零件设计选材的基本方法(第十章)。

《机械工程材料》是以化学、物理、材料力学及金属工艺学和金工教学实习为基础的课程,在学习时应该联系上述基础课程的有关内容,以加深对本课程内容的理解。同时本课程又是设计选材的基础,在今后学习有关专业课程时,还应经常联系本书的有关内容,以便进一步掌握所学知识。此外,《机械工程材料》是一门从生产实践中发展起来,而又直接为生产服务的科学,所以学习时不但要注意学习基本理论,而且要注意联系生产实际及实验室试验。

# 第一章 机械零件的失效分析

任何机器零件(即结构件)都应有一定功能,如在载荷、温度、介质等作用下保持一定几何形状和尺寸,实现规定的机械运动,传递力和能等。零件若失去设计要求的效能即为失效。

造成零件失效的原因是多方面的,它涉及到结构设计、材料选择、加工制造、装配调整及使用与保养等因素,但从本质看,零件失效都是由于外界载荷、温度、介质等的损害作用超过了材料抵抗损害的能力。对于机械设计者来说,为了预防零件失效,必须做到设计正确、选材恰当、工艺合理。为此,要求设计者在设计时,不仅要熟悉零件的工作条件,掌握零件的受力和运动规律,还要把它们和材料的性能结合起来,即从零件的工作条件中找出其对材料的性能要求,然后才能做到正确选择材料和合理制订冷、热加工的技术条件和工艺路线。而研究零件的失效是深刻了解零件工作条件的基础,通过观察零件的失效特征,找出造成失效的原因,从而确定相应的失效抗力指标,为制订技术条件、正确选材和制订合理工艺提供依据。因此,研究机械零件的失效具有重要意义。本章将分别讨论机械零件常见的失效方式:过量变形、断裂、应力腐蚀和磨损等。

## § 1-1 零件在常温静载下的过量变形

材料在外力作用下产生的形状或尺寸的变化叫变形。根据外力去除后变形能否恢复,将变形分为弹性变形和塑性变形。能够恢复的变形叫做弹性变形;不能够恢复的变形叫做塑性变形。从图 1-1 低碳钢拉伸时的应力-应变曲线可以看出,钢在低于弹性极限 $\sigma_e$ 的应力作用下发生弹性变形,在此阶段内,当应力低于比例极限 $\sigma_p$ 时,应力和应变成正比。当应力继续增加超过弹性极限 $\sigma_e$ 后在继续发生弹性变形的同时开始发生塑性变形并出现屈服现象,即外力不增加,但变形继续进行。当应力超过屈服极限 $\sigma_s$ 后,随着应力增加,塑性变形逐渐增大,并伴随加工硬化,产生均匀塑性变形,直至应力达到强度极限 $\sigma_b$ 之后,试样开始发生不均匀的塑性变形,产生缩颈。变形量迅速增大至 $k$ 点而发生断裂。因此,钢和其它金属一样是具有弹性变形、塑性变形和加工硬化能力的弹塑性材料。而零件在外力作用下所发生的弹性变形和塑性变形对零件的使用寿命有着重要的影响,有些零件常常由于变形超过了允许量而导致失效,例如镗床的镗杆、弹簧等。

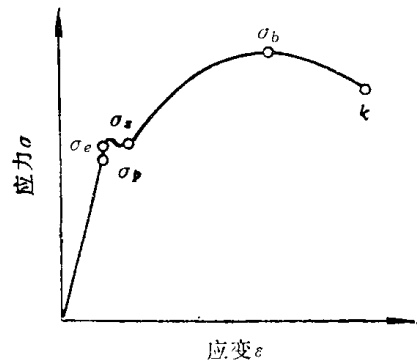


图 1-1 低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

大,并伴随加工硬化,产生均匀塑性变形,直至应力达到强度极限 $\sigma_b$ 之后,试样开始发生不均匀的塑性变形,产生缩颈。变形量迅速增大至 $k$ 点而发生断裂。因此,钢和其它金属一样是具有弹性变形、塑性变形和加工硬化能力的弹塑性材料。而零件在外力作用下所发生的弹性变形和塑性变形对零件的使用寿命有着重要的影响,有些零件常常由于变形超过了允许量而导致失效,例如镗床的镗杆、弹簧等。

### 一、过量弹性变形

任何机器在工作时都处于弹性变形状态。有些零件在一定载荷下只允许一定的弹性变形,若发生过量弹性变形就会造成失效,如镗床镗杆,机床主轴、刀架等。为了保证被加工



零件的精度，要求镗杆在工作过程中具有较小的弹性变形，若镗杆本身由于刚度不足，产生过量弹性变形，镗出的内孔直径会偏小或有锥度，影响加工精度，甚至出现废品。弹簧是典型的弹性零件，起减震和储能驱动作用，应具有较高的弹性，工作过程中产生较大的弹性变形，但是弹簧有时也会因过量弹性变形而失效。例如汽车钢板弹簧，要求汽车满载时弹簧产生最大弹性变形，但有时由于弹簧刚度不够，当汽车没有满载时其弹性变形已达最大值，此弹簧不能承受设计时汽车所要达到的装载能力。由此可见，刚度不够是零件产生过量弹性变形的根本原因。

所谓刚度是指零件在受力时抵抗弹性变形的能力。由虎克定律可知，

$$\text{单向拉伸（或压缩）时： } E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P/A}{\varepsilon}, \text{ 即 } EA = \frac{P}{\varepsilon}$$

$$\text{纯剪切时： } G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{P_r/A}{\gamma}, \text{ 即 } GA = \frac{P_r}{\gamma}$$

式中， $P$ 和 $P_r$ 为拉伸力和剪切力； $A$ 为零件截面积； $E$ 为正弹性模量； $G$ 为剪切弹性模量； $EA$ （或 $GA$ ）为零件的刚度，代表零件产生单位弹性变形所需载荷大小。载荷一定时， $EA$ （或 $GA$ ）愈大， $\varepsilon$ （或 $\gamma$ ）愈小，即零件愈不易产生弹性变形。因此，增加零件的截面积 $A$ 或选用弹性模量 $E$ （或 $G$ ）高的材料，都可以增加零件刚度，防止过量弹性变形。当零件的截面 $A$ 一定时，弹性模量 $E$ （或 $G$ ）就代表零件的刚度。上述镗杆和钢板弹簧都选用弹性模量高的合金钢制造，其原因就在于此。各类材料的室温弹性模量 $E$ 如表1-1所示。由表可见，高分子材料（聚氯乙烯）的弹性模量最低，因此在要求零件有较大刚度时，不能选用高分子材料。

表1-1 各类材料的室温弹性模量E

材 料	$E/(10^4\text{MPa})$	材 料	$E/(10^4\text{MPa})$
金刚石	102	铜(Cu)	12.6
WC	46~67	铜合金	12.2~15.3
硬质合金	41~55	钛合金	8.1~13.3
Ti,Zr,Hf的硼化物	51	黄铜及青铜	10.5~12.6
SiC	46	石英玻璃	9.5
钨(W)	41	铝(Al)	7.0
$Al_2O_3$	40	铝合金	7.0~8.1
TiC	39	钠玻璃	7.0
钼及其合金	32.5~37	混凝土	4.6~5.1
$Si_3N_4$	30	玻璃纤维复合材料	0.7~4.6
MgO	25.5	木材(纵向)	0.9~1.7
镍合金	13~24	聚酯塑料	0.1~0.5
碳纤维复合材料	7~20	尼龙	0.2~0.4
铁及低碳钢	20	有机玻璃	0.34
铸铁	17.3~19.4	聚乙烯	0.02~0.07
低合金钢	20.4~21	橡胶	0.001~0.01
奥氏体不锈钢	19.4~20.4	聚氯乙烯	0.0003~0.001

弹性模量 $E$ （或 $G$ ）主要取决于材料中原子本性和原子间结合力，对材料的成分、显微组织是不敏感的，不能通过合金化、热处理、冷变形等方法使之改变，例如钢，不管其成

分和显微组织如何变化，其室温下的弹性模量 $E$ 都在204000~214200MPa范围之内。但是弹性模量对温度很敏感，随温度升高而降低。因为温度升高，原子间距离加大，原子间结合力减弱，导致 $E$ （或 $G$ ）值降低。

## 二、过量塑性变形

绝大多数机器零件在使用过程中都处于弹性变形状态，不允许产生塑性变形。但是，由于偶然的过载或材料本身抵抗塑性变形的能力不够，零件也会产生塑性变形。当塑性变形量超过允许量时，零件就失去其应有的效能。例如炮筒，为了保证每发炮弹弹道的准确性，要求炮弹通过时，只能引起炮筒内壁产生弹性变形，而且其变形与应力之间须严格保持正比关系。若炮筒材料的比例极限偏低，使用一段时间后产生微量塑性变形，就会使炮弹偏离射击目标。又如汽车钢板弹簧，只允许在弹性范围内工作，若其材料的弹性极限过低，使用一段时间后，弹簧弓形就会变小，即产生了塑性变形，导致弹力不够，此时必须更换。再如精密机床丝杠，为了保持其精度，不允许产生塑性变形，若丝杠材料的屈服强度低，使用一段时间后丝杠会产生明显塑性变形而使机床精度下降。由此可见，比例极限 $\sigma_p$ 、弹性极限 $\sigma_e$ 、屈服极限 $\sigma_s$ 都是材料抵抗微量塑性变形的抗力指标。为了便于比较，国家标准中把产生一定残余变形的应力作为“规定屈服极限”、“规定弹性极限”、“规定比例极限”（图1-2）。它们之间并无本质区别，只是规定允许的塑性变形大小不同而已。比例极限 $\sigma_p$ 规定的残留变形量最小（0.001~0.01%）；弹性极限 $\sigma_e$ 规定的残留变形次之（0.005~0.05%）；屈服极限 $\sigma_s$ 规定的残留变形最大（0.01~0.5%）。

零件与结构件经常因过量塑性变形而失效，所以一般不允许发生塑性变形，但是要求的严格程度是不一样的。设计时应根据零件与结构工作条件所允许的残留变形量加以选择。例如炮筒和弹簧等采用比例极限或弹性极限 $\sigma_{0.001} \sim \sigma_{0.01}$ ；精密机床丝杠采用弹性极限或屈服极限 $\sigma_{0.01} \sim \sigma_{0.05}$ ；一般机器结构如机座、机架、普通车轴等可采用屈服极限 $\sigma_{0.2}$ ；桥梁、容器等建筑物构件可允许的残余变形量较大，则可采用屈服极限 $\sigma_{0.5}$ 甚至 $\sigma_{1.0}$ 。

应该指出，比例极限、弹性极限、屈服极限是对材料成分、组织敏感的机械性能指标，可以通过合金化、热处理、冷变形等方法使之改变。这将在后面详细介绍。

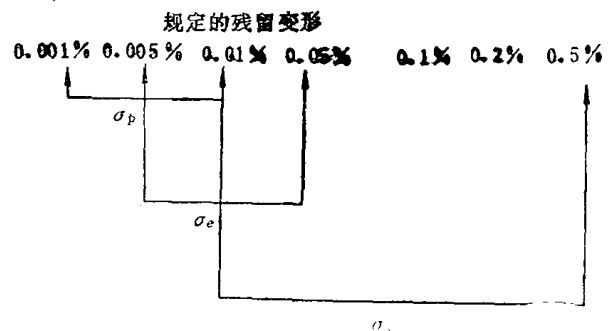


图 1-2 规定残留变形量的 $\sigma_p$ 、 $\sigma_e$ 、 $\sigma_s$ 之间的关系

## § 1-2 零件在静载和冲击载荷下的断裂

### 一、韧断和脆断的基本概念

所谓断裂是材料在应力作用下分为两个或两个以上部分的现象。根据材料断裂前所产生的宏观变形量大小，将断裂分为韧性断裂和脆性断裂。韧性断裂是断裂前发生明显宏观塑性变形。例如低碳钢在室温拉伸时，有足够大的伸长量后才断裂，其断口为杯形，呈暗灰色纤维状。而脆性断裂是断裂前不发生塑性变形。例如灰铸铁在室温拉伸时，几乎不发生塑性变形，断裂后其断口齐平，由无数发亮的小平面组成。零件在静载和冲击载荷下通常具有这两

种断裂形式。图 1-3 是拉伸时的断裂示意图。

由于韧性断裂前发生明显塑性变形，这就可预先警告人们注意，因此一般不会造成严重事故。而脆性断裂没有明显征兆，因而危害性极大，历史上曾发生过许多脆断事故。如汽轮机叶轮和主轴飞裂；发电机转子断裂；美国油船脆断沉没；联邦德国核电站压力容器和英国核电站大型锅炉爆炸；澳大利亚大铁桥断毁等。

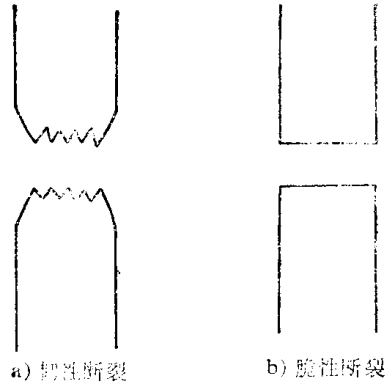


图 1-3 拉伸时的断裂示意图

为了防止脆性断裂，人们对材料的断裂过程进行了深入研究。研究表明，无论是韧性断裂还是脆性断裂，其断裂过程均包含裂纹形成和扩展两个阶段。材料在外力作用下首先形成微裂纹或者以原有的内部缺陷(如微裂纹、空孔、杂质等)作为裂纹源，当这些微裂纹或裂纹源逐渐扩展到一个临界裂纹长度时，立刻发生断裂。通常把裂纹自形成到扩展至临界长度的过程称为裂纹亚稳扩展阶段。在这一阶段裂纹扩展阻力大，扩展速度较慢；而把裂纹达到临界长度后的扩展阶段称为失稳快速扩展阶段，在这一阶段裂纹扩展阻力小，扩展速度很快，最大可达声音在该材料中的传播速度。对于韧性断裂，裂纹形成后经历很长的裂纹亚稳扩展阶段，裂纹扩展与塑性变形同时进行，变形一旦停止，裂纹也停止扩展，只有再增加外力使变形继续进行，裂纹才相应地继续扩展。外力不断增加，塑性变形不断进行，裂纹不断扩展，直至达到临界裂纹长度，最后经历快速失稳扩展阶段而瞬时断裂，因此韧性断裂前有明显的塑性变形。对于脆性断裂，裂纹形成后很快达到临界长度，几乎不经历裂纹亚稳扩展阶段就进入裂纹失稳扩展阶段，裂纹扩展速度极快，故脆性断裂前无明显塑性变形。

二、影响脆断的因素

如前所述，脆断有极大危害，但是材料的“脆断”和“韧断”在一定条件下是可以相互转化的。在某些条件下，韧性材料可以发生脆性断裂，例如低碳钢在低温下拉伸时表现为脆性断裂。而脆性材料也可发生韧性断裂，例如灰铸铁在压缩条件下则表现为韧性断裂。为了防止脆性断裂，实现脆断向韧断方面转化，必须了解影响脆断的因素。研究表明，决定材料断裂类型的主要因素有：加载方式、材料本质、温度、加载速度、应力集中及零件尺寸。

## 二、影响脆断的因素

1. 加载方式和材料本质的影响 根据点的应力状态分析，在外力作用下，零件上每点所受应力都有一个最大切应力 $t_{max}$ 和最大正应力 $s_{max}$ 。任何应力状态都可用 $t_{max}$ 和 $s_{max}$ 来表示，而比值 $\alpha = \frac{t_{max}}{s_{max}}$ 称为应力状态软性系数。加载方式不同，材料的应力状态不同，则 $\alpha$ 值不同。这样，以 $t_{max}$ 为纵坐标， $s_{max}$ 为横坐标，可以画出材料的力学状态图(图 1-4)。图中 $t_s$ 线为材料的剪切屈服强度线； $t_b$ 线为材料的剪切断裂强度线； $s_b$ 线为材料的正断强度线。它们分别表示要使材料产生屈服、切断和正断所需的极限应力。而由原点 $o$ 所作的不同斜率即不同 $\alpha$ 的射线(虚线)则表示不同加载方式下的应力状态，如代表单向拉伸的射线 $\alpha = 0.5$ ；代表扭转的射线 $\alpha = 0.8$ ；代表单向压缩的射线 $\alpha = 2$ 等。由于在力学状态图上同时标出了材料的变形抗力和断裂抗力指标以及相应于不同加载方式下的各种应力状态，因此就可以根据它来判断某种材料制成的零件在一定工作条件下的断裂类型。

当材料一定时，加载方式不同，断裂类型不同。例如图 1-4 中所示材料在三向不等拉伸(即缺口试样拉伸)情况下，由于代表该应力状态的射线( $\alpha < 0.5$ )直接与 $s_b$ 线相交，故知其在断裂前只发生弹性变形，表现为宏观正断式的脆性断裂。当此材料在单向拉伸( $\alpha$

当材料一定时，加载方式不同，断裂类型不同。例如图 1-4 中所示材料在三向不等拉伸(即缺口试样拉伸)情况下，由于代表该应力状态的射线( $\alpha < 0.5$ )直接与 $s_b$ 线相交，故知其在断裂前只发生弹性变形，表现为宏观正断式的脆性断裂。当此材料在单向拉伸( $\alpha$

$\alpha=0.5$ ) 情况下, 代表此应力状态的射线在碰到 $s_k$ 线以前, 先与 $t_s$ 线相交, 故知其在断裂前发生塑性变形, 其断裂为宏观正断式的韧性断裂。若此材料受到扭转载荷时, 则代表该应力状态的射线 ( $\alpha=0.8$ ) 先与 $t_s$ 相交, 然后与 $t_k$ 相交, 故知其表现为切断式的韧性断裂。由此可见, 在零件上各点处能否发生塑性变形主要取决于该处的切应力成分, 也就是要看应力状态软性系数 $\alpha$ 的大小。 $\alpha$ 值愈大, 应力状态愈软, 脆性倾向愈小。反之,  $\alpha$ 值愈小, 应力状态愈硬, 脆断倾向愈大。因此,  $\alpha$ 值大小可以表征材料的韧断或脆断倾向。这表明, 就材料而言, 并不存在本质上是绝对脆性或绝对塑性的, 任何材料都既有可能发生脆性断裂, 也有可能发生韧性断裂。例如灰铸铁在单向拉伸 ( $\alpha=0.5$ ) 时表现为典型的正断式的脆性断裂, 而在作布氏硬度试验 (相当于侧压应力状态 $\alpha>2$ ) 时可以压出一个很大的压痕窝, 表现出很好的塑性。

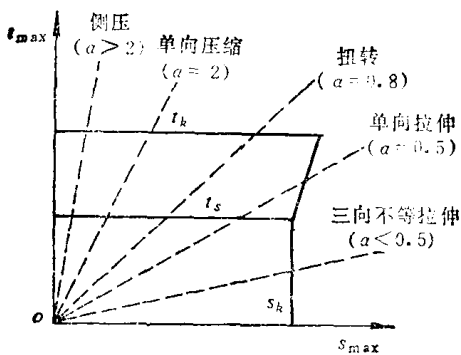


图 1-4 某一材料的力学状态图

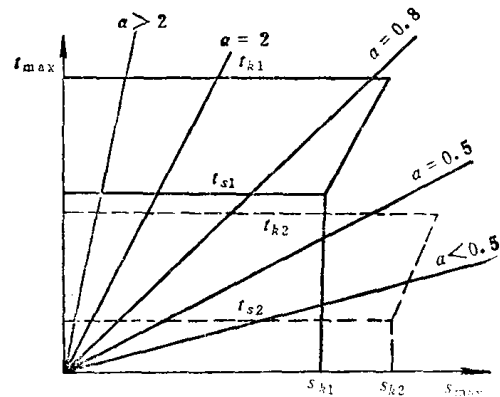


图 1-5 两种不同材料（以虚线、实线区分）的力学状态图

当加载方式一定时, 材料不同, 其  $t_s$ 、 $t_k$ 、 $s_k$  值不同 (图 1-5), 断裂方式也不同。若材料  $t_s$  很高, 而  $s_k$  很低, 则易发生脆断 (图中实线); 反之, 若材料  $t_s$  很低, 而  $s_k$  很高, 则易发生韧断 (图中虚线)。例如在单向拉伸 ( $\alpha=0.5$ ) 时, 材料 1 (图中实线) 表现为正断式脆性断裂; 而材料 2 (图中虚线) 则表现为切断式韧性断裂。即使在有应力集中的情况下 ( $\alpha<0.5$ ), 材料 2 也由于塑性变形松弛应力集中, 使应力均匀分布而发生正断式韧性断裂。

2. 温度和加载速度的影响 实验结果表明, 随着温度  $T$  降低, 材料的冲击韧性  $a_k$  不断降低 (图 1-6a), 屈服强度  $\sigma_s$  不断升高, 而正断强度  $s_k$  基本不变 (图 1-6b)。图中  $T_k$  称为韧脆转化温度。温度低于  $T_k$  发生脆性断裂; 高于  $T_k$  则发生韧性断裂。

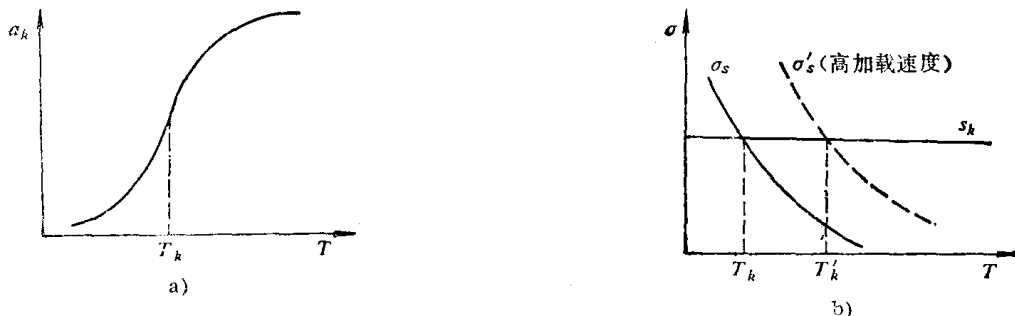


图 1-6 冲击韧性和屈服强度随温度变化示意图

加载速度增加时,  $\sigma_s$  升高, 则  $T_k$  也随之升高, 如图 1-6b 中虚线所示。因此, 降低温度和增加加载速度都会引起材料脆化。

3. 应力集中的影响 当材料有缺口时, 缺口根部有应力集中, 改变了该处三向应力分布, 使缺口前沿最大切应力减小, 导致应力状态变硬, 相当于图 1-4 中  $\alpha < 0.5$  的三向不等拉伸的情况, 表现为脆断, 而该材料在无缺口拉伸时 ( $\alpha = 0.5$ ) 则表现为韧断。因此, 应力集中引起材料脆化。

上述温度、加载速度、应力集中对断裂类型的影响, 可以通过图 1-7 的应力状态图反映出来。由图可见, 某材料在室温下进行单向拉伸时, 表现为正断式韧性断裂; 而在有缺口的三向不等拉伸时则表现为正断式脆断。若温度降低或加载速度增加, 由于屈服强度  $t_s$  急剧升高, 而  $s_k$  基本不变, 则此材料在单向拉伸时表现为正断式脆性断裂。若温度升高或加载速度减低时, 由于屈服强度  $t_s$  明显降低, 该材料即使在有缺口的三向不等拉伸时也表现为正断式韧性断裂。

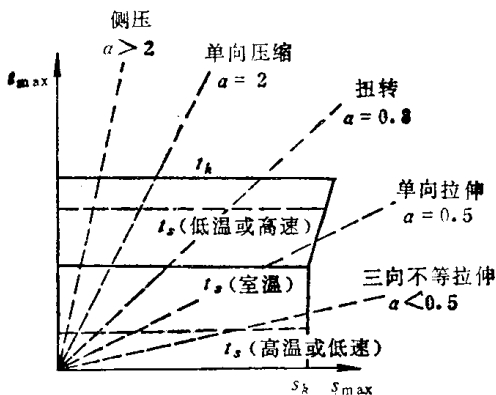


图 1-7 某一材料在不同温度和不同加载速度下的力学状态图

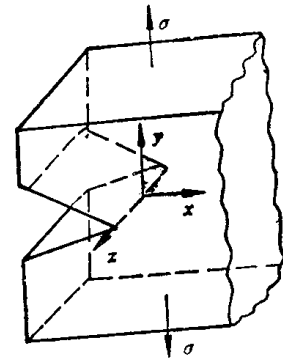


图 1-8 张开型的裂纹扩展示意图

综上所述, 低温、高加载速度、高应力集中都促使材料发生脆性断裂。因此, 生产上常用低温、缺口试样冲击试验 (或称系列冲击试验) 来评定材料的脆断倾向, 因为缺口可以造成三向不等拉伸硬性的应力状态; 而低温可使材料屈服强度 ( $t_s$  或  $\sigma_s$ ) 提高; 冲击加载又使  $t_s$  或  $\sigma_s$  进一步提高, 这样便可全面地反映材料的脆断倾向。

4. 零件尺寸的影响 零件截面尺寸愈大, 愈易发生脆断。因为薄件处于平面应力状态, 而厚件中心受三向拉应力作用, 处于平面应变状态而造成脆断。这可以用图 1-8 张开型裂纹扩展示意图加以说明。设板状零件表面有一裂纹, 它在拉应力  $\sigma$  作用下发生扩展。当板很薄时, 裂纹尖端只有  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ , 而  $\sigma_z = 0$ 。虽然  $z$  方向上的应力为零, 但该方向上的应变不为零,  $\epsilon_z = -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)$ , 式中  $\nu$  为泊松比;  $E$  为正弹性模量。因此, 零件处于平面应力状态, 即只有  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 、 $\epsilon_z$ , 而  $\sigma_z = 0$ 。当裂纹沿  $x$  方向扩展时,  $z$  方向可以自由变形, 不受约束, 表现为韧性断裂。当板很厚时, 裂纹尖端, 特别是其中心部分处于三向拉应力状态,  $\sigma_z$  在  $z$  方向的弹性约束阻止了该方向上的变形, 使零件处于平面应变状态, 即只有  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 、 $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ , 而  $\epsilon_z = 0$ , 因而造成脆性断裂。可见, 零件尺寸愈大, 脆断倾向愈大。

### 三、断裂韧性的概念

断裂是零件最危险的一种失效方式, 在机械零件和工程设计时必须考虑如何防止断裂事故发生。为了防止零件断裂, 在设计时要使零件工作过程中所承受的最大应力小于材料的许

用应力, 即 $\sigma \leq [\sigma]$ , 通常 $[\sigma] = \sigma_s / k$ ,  $k$ 为安全系数。一般认为, 零件在许用应力以下工作时, 不会发生塑性变形或断裂。但是对于用高强度材料制造的零件, 或用中低强度材料制造的大型、重型零件, 即使按上述强度判据进行设计, 也经常会在应力远低于材料屈服强度的状态下发生脆性断裂。为了防止这种低应力脆断, 过去传统的设计办法是除了要求材料有足够的强度之外, 还对材料的塑性指标 $\delta$ 、 $\psi$ 和韧性指标 $a_k$ 提出一定的要求。但是这些塑性、韧性指标究竟要多大, 只能凭经验选定。而设计人员为了避免脆断事故发生, 往往过分地要求高的塑性和韧性, 而牺牲强度, 这就导致选定偏低的许用应力, 但又为了满足服役条件对强度的要求, 不得不使零件的尺寸和重量增加, 造成零件笨重和材料浪费。而且, 即使采用了凭经验确定的高塑性、韧性值, 也不能可靠地保证零件不发生脆断。例如50年代美国北极星式导弹固体燃料发动机壳体采用了屈服强度为1400MPa的高强度钢, 并且经过了一系列传统的韧性指标的检验, 但却在点火后就发生脆性断裂。因此, 许用应力、安全系数再辅之以 $\delta$ 、 $\psi$ 、 $a_k$ 的设计选材办法, 在许多情况下并不能可靠地防止脆断。因为传统的设计思想只考虑到应力、材料强度和零件在圆角过渡、键槽、油孔附近的应力集中系数, 规定了强度储备的安全系数, 但没有考虑到一般材料中都存在着微小的宏观裂纹。这些宏观裂纹可能是原材料中的冶金缺陷, 也可能是在加工过程中(如热处理裂纹、焊缝区裂纹、锻造裂纹等)或使用过程中(疲劳、应力腐蚀等)产生的。正是这种宏观裂纹的存在, 引起材料的低应力脆性断裂。随着断裂力学的发展, 提出了评定材料抵抗脆性断裂的力学性能指标——断裂韧性 $K_{Ic}$ , 它是材料抵抗裂纹突然扩展的能力。断裂力学分析证明, 裂纹尖端应力场强度因子 $K_I$ 、零件裂纹半长度 $a$ 和零件工作应力 $\sigma$ 之间存在如下关系:

$$K_I = Y\sigma a^{1/2}$$

式中,  $Y$ 为零件裂纹的几何形状因子。当 $K_I \geq K_{Ic}$ 时, 零件发生低应力脆性断裂; 当 $K_I < K_{Ic}$ 时, 零件安全可靠。因此 $K_I = K_{Ic}$ 是零件发生低应力脆断的临界条件, 即

$$K_I = Y\sigma a^{1/2} = K_{Ic}$$

由此式可知, 为了使零件不发生脆性断裂, 设计者可以控制三个参数: 即材料的断裂韧性 $K_{Ic}$ 、工作应力 $\sigma$ 和零件中裂纹的半长度 $a$ 。其中任一参数发生变化均可能导致零件发生脆性断裂。例如, 若已知材料的工作应力 $\sigma$ 和零件中的最大裂纹长度 $2a$ ; 可以根据上式来选择合适的材料, 即选择合适的 $K_{Ic}$ 值, 使 $\sigma Y a^{1/2} < K_{Ic}$ , 则即使零件中含有长度为 $2a$ 的裂纹, 此裂纹在外应力 $\sigma$ 作用下也不会发生突然扩展, 零件在这样的条件下工作, 将是安全的。但是, 如果所选择的材料不合适, 其断裂韧性 $K_{Ic}$ 值较低, 使 $\sigma Y a^{1/2} > K_{Ic}$ , 则裂纹将会快速扩展, 导致零件脆性断裂; 若材料一定, 通过实验测得其断裂韧性 $K_{Ic}$ 和零件中存在的最大裂纹尺寸 $2a$ , 可根据上式确定零件的最大承载能力 $\sigma_c$ , 即:

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{Y a^{1/2}}$$

如果零件的工作应力 $\sigma < \sigma_c$ , 则零件安全可靠。反之, 如果零件的工作应力 $\sigma > \sigma_c$ , 则将会发生脆性断裂。若已知 $K_{Ic}$ 和零件的工作应力 $\sigma$ , 则根据上式可确定零件中允许存在的裂纹最大尺寸 $2a_c$ , 即:

$$a_c = (K_{Ic} / Y\sigma)^2$$

如果零件中实际裂纹半长度 $a < a_c$ , 则零件安全可靠。反之, 如果 $a > a_c$ , 则用此材料制成的零件在应力 $\sigma$ 作用下将会发生脆性断裂。

综上所述, 在裂纹尺寸一定的条件下, 材料的断裂韧性 $K_{Ic}$ 愈高, 零件的承载能力愈

大。在外加应力一定的条件下， $K_{Ic}$ 愈高，零件中允许裂纹尺寸愈大。在材料的断裂韧性一定的条件下，零件的工作应力 $\sigma < \sigma_c$ 或零件中裂纹半长度 $a < a_c$ ，均不会发生脆性断裂。因此，断裂韧性已成为设计用高强度材料制造的飞机、火箭、导弹等重要零件和用中低强度材料制造的大型发电机转子、汽轮机转子等大型零件的重要性能指标。这样既可以充分发挥材料强度潜力，又可以有效地防止零件发生脆性断裂。

应当指出，断裂韧性是对材料成分、组织敏感的机械性能指标，可以通过合金化、热处理等方法改变。例如低碳合金钢与中碳合金结构钢处理成相同强度水平时，前者的 $K_{Ic}$ 值明显高于后者，如表 1-2 所示。

表 1-2 20SiMn2MoV (低碳) 与 40CrNiMo (中碳) 钢性能比较

材 料	热处理工艺	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_b$	$\psi$	$\delta$	$K_{Ic}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
		MPa	MPa			
20SiMn2MoV (低碳)	900℃ 淬火 250℃ 回火	1215	1480	59%	13.4%	113
40CrNiMo (中碳)	850℃ 淬火 430℃ 回火	1333	1392	52%	12.3%	~78

### § 1-3 零件在交变载荷下的疲劳断裂

#### 一、疲劳的基本概念

许多零件如轴、齿轮、弹簧等都是在交变载荷下工作的，它们工作时所承受的应力通常都低于材料的屈服强度。零件在这种交变载荷下经过较长时间的工作而发生断裂的现象叫做疲劳或疲劳断裂。据统计，在机械零件断裂失效中有 80% 以上属于疲劳断裂。

零件的工作条件不同，其所受的交变载荷类型也不同，如图 1-9 所示。所谓交变载荷是指载荷的大小、方向随时间发生周期性变化的一类载荷。其特征可用应力半幅 $\sigma_a$ 、平均应力幅 $\sigma_m$ 和应力循环对称系数 $\gamma$ 等几个参数表示。它们的定义为：

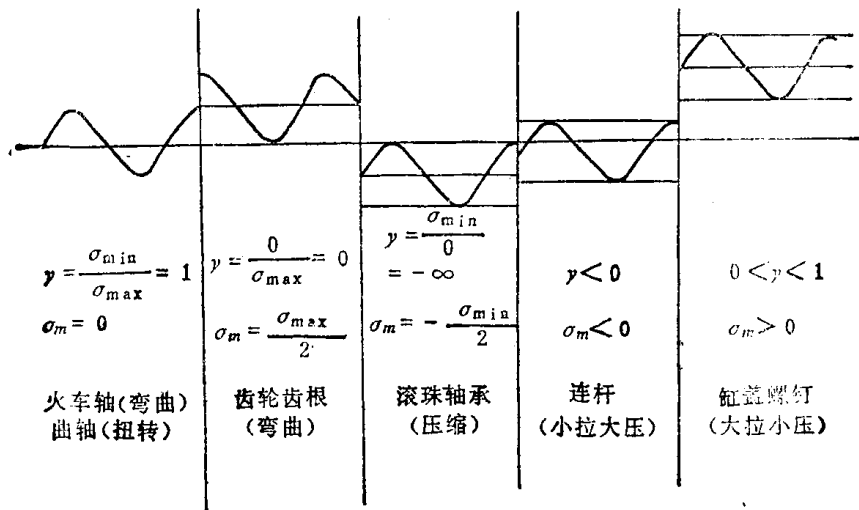


图 1-9 几种常见的交变应力

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2},$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2},$$

$$\gamma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

式中， $\sigma_{\max}$ 为交变应力中的最大应力； $\sigma_{\min}$ 为交变应力中的最小应力。

零件所受的交变载荷的类型不同，但疲劳断裂的特点大致相同。与静载和冲击载荷下的断裂相比，疲劳断裂有如下特点：①断裂时无明显的塑性变形，断裂突然发生。即使在静载或冲击载荷下有大量塑性变形的塑性材料，在交变载荷下发生疲劳断裂时也显示出脆断的宏观特征，因而具有很大的危险性；②引起疲劳断裂的应力很低，常常低于静载下的屈服强度；③疲劳断口能清楚地显示出裂纹的形成、扩展和最后断裂三个阶段。

## 二、疲劳断口的特征

疲劳断裂过程经历裂纹形成、扩展和最后断裂三个阶段。因此，典型的疲劳断口形貌由疲劳源、疲劳裂纹扩展区和最后断裂区三部分组成，如图 1-10 所示。

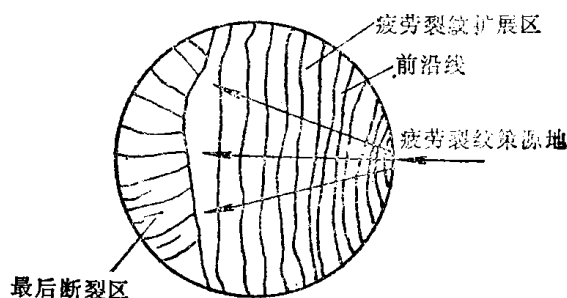


图 1-10 疲劳断口示意图

1. 疲劳源 由于材料的内部缺陷（如夹杂物、孔洞等）、加工缺陷（如刀痕、锻造裂纹、焊接裂纹、热处理裂纹、磨削裂纹等）或结构设计不合理（如键槽、轴肩处圆角）等原因，使零件的局部区域造成应力集中，这些区域便是疲劳裂纹产生地，称为疲劳源。

2. 疲劳裂纹扩展区 疲劳裂纹形成后，在交变应力作用下继续扩展长大，由于载荷的间断或载荷大小的改变，裂纹经多次张开、闭合以及裂纹表面的相互摩擦，疲劳裂纹扩展区留下一条条光亮的弧线，叫做疲劳裂纹前沿线（或疲劳线）。这些弧线开始时比较密集，以后间距逐渐增加，形成了“贝壳状”或“海滩状”的花样。

3. 最后断裂区 由于疲劳裂纹不断扩展，使零件的有效截面逐渐减小，因而应力增加。当应力超过材料的断裂强度时，发生断裂，形成最后放射状的断裂区。

实际零件的疲劳断口有各种形态，它取决于载荷类型、应力大小和应力集中程度，如图 1-11 所示。比较各种类型断口，可以得到如下结论：①高应力与低应力相比（其他情况相同），高应力的疲劳裂纹扩展区相对面积小，最后断裂区相对面积大，出现许多疲劳源，疲劳源区有台阶和线痕（或表面比较粗糙，缺乏光泽），疲劳线的密度大；②单向弯曲和双向弯曲相比，单向弯曲疲劳源只有一个，而双向弯曲的疲劳源有两个；③单向弯曲和旋转弯曲相比，旋转弯曲的最后断裂区不处在疲劳源的正对面，而是与逆旋转方向偏离一定角度；④高应力集中与低应力集中相比，高应力集中的裂纹源多，而且最终断裂区逐渐移向断口中心。综上所述，当载荷类型一定时，可以根据疲劳断口上最终断裂区相对面积的大小和位置来判断零件所受应力高低及应力集中程度的大小。如果最终断裂区的面积较大，而且在断口的中心，说明该零件是在高的名义应力和大的应力集中条件下断裂的，其疲劳寿命较短；如果最终断裂区的面积较小，而且接近表面，说明该零件是在低名义应力和小的应力集中条件下断裂的，零件寿命较长。

## 三、疲劳抗力指标及其影响因素



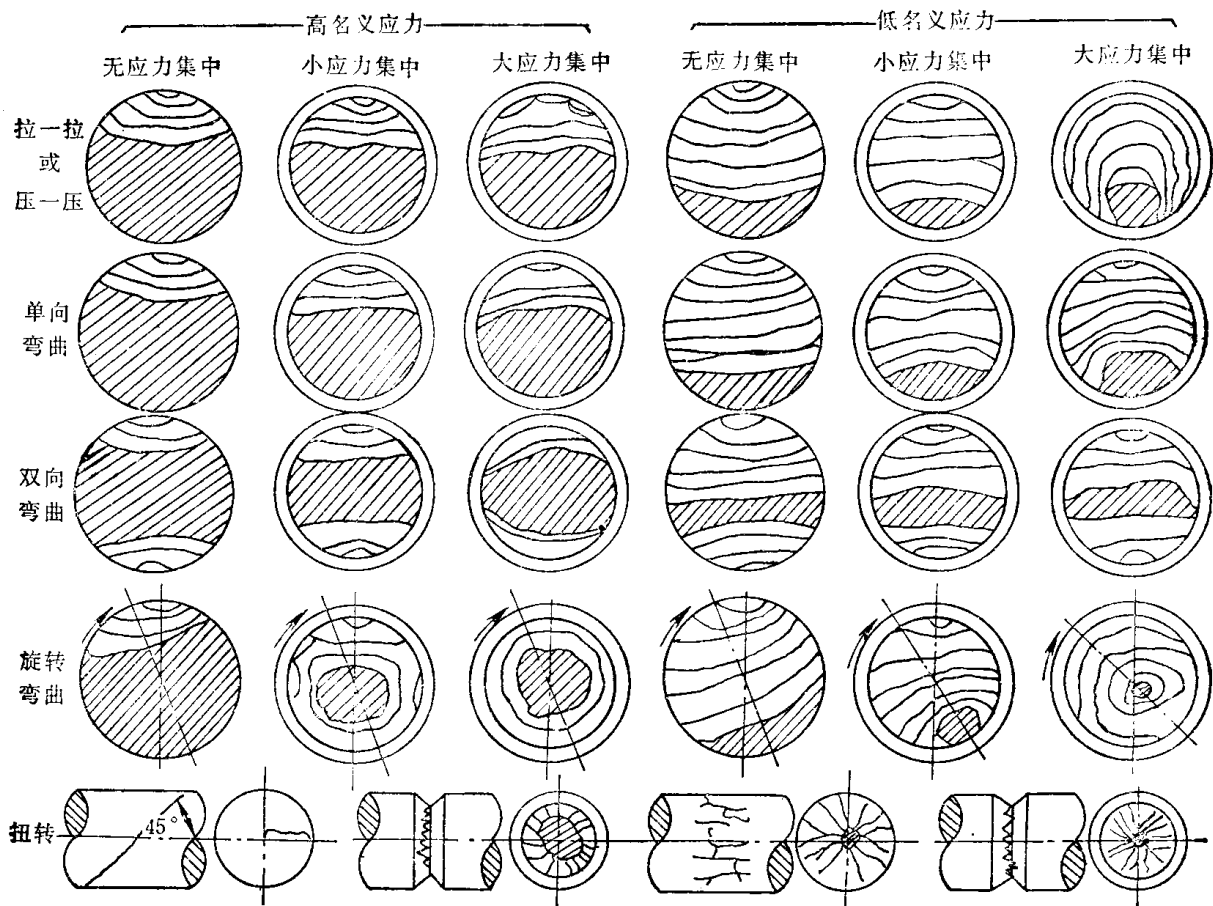


图 1-11 各种类型的疲劳断口形态示意图

1. 疲劳抗力指标 如前所述, 疲劳断裂前无明显征兆, 断裂突然发生, 因此疲劳断裂具有很大的危险性。为了防止零件的疲劳断裂, 设计时必须正确确定疲劳抗力指标。目前机械设计中最常用的疲劳抗力指标有疲劳极限、过负荷持久值、疲劳缺口敏感度。

(1) 疲劳极限和过负荷持久值 图 1-12 是疲劳曲线, 它是材料所承受的交变应力 $\sigma$ 和相应的断裂循环周次 $N$ 之间的关系曲线。由图可见, 应力 $\sigma$ 愈大, 断裂的循环周次愈小; 反之,  $\sigma$ 愈小, 断裂的循环周次愈大。当应力低于 $\sigma_r$ 时, 应力即使循环无限多次也不会发生疲劳断裂。因此曲线水平部分所对应的应力 $\sigma_r$ 就是疲劳极限, 它表示材料经受无限多次应力循环而不断裂的最大应力,  $r$ 为应力循环对称系数。通常材料的疲劳曲线用旋转对称弯曲疲劳试验方法测定, 故 $r = -1$ , 其疲劳极限用 $\sigma_{-1}$ 表示。由于疲劳断裂时循环周次 $N$ 很大, 所以疲劳曲线的横坐标一般取对数坐标。

不同材料的疲劳曲线形状不同, 大致分为两种类型, 如图 1-13 所示。一种类型是疲劳曲线上有明显的水平部分 (图 1-13a), 如钢铁材料的疲劳曲线; 另一类是疲劳曲线上没有水平部分 (图 1-13b), 如铝合金及高温下或在腐蚀介质中的钢的某些疲劳曲线, 这时就规定某一 $N_0$ 值所对应的应力作为“条件疲劳极限”或“有限疲劳极限”,  $N_0$ 称为循环基数。对于实际零件来说,  $N_0$ 是根据零件工作条件和使用的寿命来确定的。如火车轴取 $N_0 = 5 \times 10^7$ 次, 汽车发动机的曲轴取 $N_0 = 12 \times 10^7$ 次, 汽轮机叶片取 $N_0 = 25 \times 10^{10}$ 次等。实验表明, 疲劳极限和材料的抗拉强度有一定的经验关系: 中、低强度钢为 $\sigma_{-1} = 0.5\sigma_b$ , 灰铸铁