

815

T/H14-43
H32

高等学校教材

机械工程材料及选用

主 编 何庆复
副主编 杨 萍 王德志
主 审 王金华

中 国 铁 道 出 版 社

2001年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书为高等工科院校机械类各专业的技术基础课教材。与传统的相关教材相比,本书对材料基础理论内容进行了较大幅度调整和补充。全书注重对必要的工程材料基本知识和基本原理的阐述,做到由浅入深,兼顾原理与应用,重点突出了材料工程应用方面的知识,加强了对工艺方法的分析比较,扩增了工程材料的失效、选用与设计方面的内容。

本书除可作为高校机械专业的教材外,也可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料及选用/何庆复主编. —北京:中国铁道出版社,2001.7
高等学校教材

ISBN 7-113-04245-7

I. 机… II. 何… III. 机械制造材料-高等学校-教材 IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 043504 号

书 名:机械工程材料及选用

作 者:何庆复 杨 萍 王德志

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:赵 静

封面设计:陈东山

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787×960 1/16 印张:17 字数:338 千

版 本:2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 7-113-04245-7/TH·93

定 价:24.00 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

“机械工程材料及选用”作为高等工科院校机械类各专业的技术基础课,为机械类专业学生毕业后从事机械产品设计、制造和维修工作奠定基础。传统的相关教材涉及材料学科基础理论的内容比重偏大,而材料应用方面的内容比重较小,尤其是有关新材料及其应用方面的知识更欠缺,已不能适应科技与教育事业发展的要求。鉴于这种情况,我们在编写过程中,坚持以转变教育思想为先导,立足于培养机械类专业本科学生机械创新设计的综合能力,做到教材在体系上符合机械类人才培养方案整体优化的原则,以满足 21 世纪初科技发展对系列技术基础课的要求。

本书对材料基础理论内容进行了较大幅度调整,注重对必要的工程材料基本知识和基本原理的阐述,力求由浅入深,兼顾原理与应用,循序渐进,内容精练,体系完整。重点突出了材料工程应用方面的知识,加强了对工艺方法的分析比较,扩增了工程材料的失效、选用与设计方面的内容。在内容上力求有一定深度和广度,反映近年来国内外材料学科较成熟的最新科技成就,并力图建立理论联系实际,适应科技与现代化发展的需要。本课程新体系,使学生能对工程材料领域的现代发展全貌有基本了解。着重解决材料选用与设计思想方法,培养初步具有合理选材,制定工艺路线,综合运用知识,分析和解决一般工程实际问题的能力,并为后续课程的学习及毕业以后从事生产和科研工作打下必要的坚实的基础。

本书的完成是面向 21 世纪机械基础系列课程教改项目成果的重要体现之一。为确保教材质量,编写过程中,在发挥各自优势的基础上,注重协同作战,发扬团队精神。本书包括课堂教学和一定量的课外自学两部分内容。

本书由何庆复主编,杨萍和王德志副主编,王金华主审。参加本书编写工作的有:丁志敏(第一章),章为夷(第二章),王顺花(第三章),何庆复(第四章),刘伟(第五章),付华(第六章),王德志(第七章),杨萍(第八章),朱旻昊(第九章)。

在本书编审出版过程中,很多同志为此付出辛勤劳动,并提出宝贵意见,在此一并表示感谢。

本书如有错误之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

2001 年 1 月

目 录

绪 论	1
第一章 金属材料力学性能	3
第一节 拉伸曲线和应力应变曲线	3
第二节 金属的弹性与塑性	4
一、金属的弹性	4
二、金属的塑性	7
第三节 金属的强韧性	8
一、金属的强度	8
二、金属的韧性	13
三、金属的硬度	16
练习题	19
第二章 金属晶体结构与塑性变形	21
第一节 金属晶体结构	21
一、晶体学基础知识	21
二、金属典型晶体结构	25
三、晶体不完整性	26
第二节 金属塑性变形基本方式	29
一、滑移	29
二、孪生	31
第三节 多晶体塑性变形	32
一、多晶体塑变特点	32
二、双相合金塑变	33
第四节 冷塑性变形组织与性能	34
一、冷塑性变形金属组织变化	35
二、冷塑性变形金属性能变化	36
三、残余应力	36
第五节 回复与再结晶	37
一、回复	37
二、再结晶	37
三、晶粒长大	37
第六节 热加工及动态回复和动态再结晶	38
一、动态回复	38

二、动态再结晶·····	38
练习题·····	39
第三章 金属结晶及合金相图 ·····	40
第一节 纯金属的结晶·····	40
一、结晶曲线·····	40
二、结晶过程·····	41
三、结晶晶粒细化·····	43
第二节 合金的相结构·····	44
一、固溶体·····	44
二、金属化合物·····	46
三、非晶相·····	48
第三节 二元合金相图及结晶·····	49
一、相图及其测定·····	49
二、匀晶相图·····	50
三、共晶相图·····	53
四、包晶相图·····	56
五、合金铸锭组织·····	57
六、合金使用性能与相图间的关系·····	58
第四节 铁碳合金相图·····	59
一、铁碳合金的基本相与相图·····	59
二、典型铁碳合金的平衡结晶·····	64
三、铁碳合金的成分、组织、性能间的关系·····	71
练习题·····	73
第四章 钢的热处理 ·····	75
第一节 钢加热时奥氏体转变·····	75
一、金属固态相变热力学条件·····	75
二、加热保温时钢的奥氏体形成过程·····	75
三、连续加热时钢的奥氏体形成过程·····	78
四、奥氏体晶粒度·····	79
第二节 钢的过冷奥氏体转变图·····	80
一、钢的过冷奥氏体等温转变图·····	80
二、钢的过冷奥氏体连续转变图·····	81
第三节 钢的过冷奥氏体转变组织·····	82
一、过冷奥氏体高温转变·····	82
二、过冷奥氏体中温转变·····	84

三、过冷奥氏体低温转变·····	85
第四节 钢的常规热处理工艺·····	87
一、钢加热与冷却临界温度·····	88
二、钢的常规热处理工艺·····	88
第五节 钢的表面处理工艺·····	96
一、表面淬火·····	96
二、表面化学热处理·····	98
第六节 形变热处理·····	102
一、低温形变淬火·····	102
二、高温形变淬火·····	103
三、高温形变正火·····	103
四、等温形变热处理·····	103
第七节 常见热处理缺陷·····	104
一、氧化与脱碳·····	104
二、过热与过烧·····	104
三、变形与开裂·····	105
四、硬度不足·····	105
练习题·····	105
第五章 钢铁材料及其应用·····	107
第一节 钢的分类与编号·····	107
一、钢的分类·····	107
二、钢的编号·····	108
第二节 钢的合金化·····	109
一、碳钢合金化的必要性·····	109
二、合金元素在钢中的存在形式·····	109
三、钢中合金元素的作用·····	110
四、钢中常存杂质及其影响·····	113
第三节 工程结构用钢·····	114
一、碳素结构钢·····	114
二、低合金高强度钢·····	114
第四节 机械制造用钢·····	116
一、优质碳素结构钢·····	116
二、渗碳钢·····	116
三、调质钢·····	117
四、弹簧钢·····	121

五、滚动轴承钢	121
六、马氏体时效钢	124
七、双相钢	125
八、贝氏体钢	126
第五节 工具钢	127
一、碳素工具钢	127
二、合金工具钢	128
第六节 特殊性能钢	134
一、耐蚀钢	134
二、耐热钢	138
第七节 铸 钢	139
一、铸钢的分类与编号	141
二、结构铸钢	141
三、耐磨铸钢	141
四、铸钢件的热处理	144
第八节 铸 铁	144
一、铁碳双重相图与碳的石墨化	144
二、铸铁的分类和编号	146
三、铸铁的基本组织及性能特征	148
四、常用铸铁	148
练习题	154
第六章 有色金属及应用	155
第一节 铝及铝合金	155
一、纯铝	155
二、铝的合金化及其强化	156
三、形变铝合金	158
四、铸造铝合金	160
第二节 铜及铜合金	162
一、纯铜	162
二、铜合金	162
第三节 钛及钛合金	167
一、纯钛	167
二、钛合金化	168
三、钛合金组织、性能及应用	168
四、钛合金热处理	170

第四节 滑动轴承合金	170
一、锡基轴承合金	170
二、铅基轴承合金	171
三、铜基轴承合金	172
四、铝基轴承合金	172
第五节 特殊性能合金	173
一、高温合金	173
二、形状记忆合金	174
练习题	176
第七章 非金属材料	178
第一节 高分子材料	178
一、概述	178
二、工程塑料	183
三、合成橡胶	185
四、合成纤维	186
五、胶粘剂	187
第二节 工程陶瓷	188
一、概述	188
二、陶瓷的组织与性能	191
三、常用工程陶瓷	193
第三节 复合材料	195
一、概述	195
二、复合理论简介	196
三、复合材料的种类	198
四、常用复合材料	199
练习题	200
第八章 材料选择基础	202
第一节 零件失效	202
一、零件失效的基本形式	202
二、失效分析的主要方法	204
三、零件失效分析实例	208
第二节 材料选择概述	211
一、材料选用在机械工程中的地位	212
二、材料选用原则	213
三、材料选用方法	225

练习题·····	231
第九章 机械零件设计中的材料选择·····	233
第一节 考虑刚度的材料选择·····	233
一、梁的选材准则·····	233
二、梁的选材分析·····	234
第二节 强韧化材料选择·····	235
一、材料静强度选材准则·····	235
二、轴类零件的选材分析·····	237
三、齿轮类零件的选材分析·····	241
第三节 抗断裂材料选择·····	243
一、抗断裂材料设计准则·····	243
二、压力容器选材分析·····	244
第四节 抗疲劳材料选择·····	245
一、影响材料疲劳性能的因素·····	245
二、疲劳裂纹扩展速率与寿命估算·····	246
三、实例分析——连杆安全寿命估算·····	248
第五节 耐磨损材料选择·····	249
一、材料的磨损·····	249
二、抗磨损材料的选材原则·····	250
三、滑动轴承的选材分析·····	256
练习题·····	257
参考文献·····	259

绪 论

材料、能源和信息并列被称为现代技术的三大支柱,而材料又是能源和信息的基础。人类文化是一个极复杂的结构,材料进步对决定人类文化总体面貌具有头等意义。人类与材料一起走过各个历史阶段,人类的文明史就是按当时制作工具或武器所用材料而定名。19 世纪初,丹麦考古学家提出人类文化经过石器时代、铜器时代和铁器时代三阶段理论,并很快被社会所承认,当今人们所说的由钢铁时代进入信息时代的概念也与时代的材料发展相关。

材料的应用与研制构成了人类历史进程中辉煌的里程碑。我国对材料发展做出过重要贡献。人类冶金史有 6000 多年,经历了三次大发展,其中两次大发展发生在中国。冶金史第一次大发展是中国商周时期青铜冶铸技术大发展。在战国时期,已对青铜成分与性能的规律有所认识,根据器物使用性能提出 Cu-Zn 的 6 种不同配方,是世界上最早的合金化技术。冶金史第二次大发展是战国秦汉冶铁与生铁炼钢技术的大发展。春秋战国时期,中国出现了生铁铸造技术的大发展。通过生铁退火得到铸铁脱碳钢的这一技术已属于生铁炼钢工艺的范畴。西汉时期又发明了用生铁炼钢的新技术。生铁炼钢、生铁柔化两大成就构成世界古代冶铁技术发展的重要内容。当时我国钢铁生产技术已达到相当高的水平,处于世界领先地位。冶金史第三次大发展是欧洲近代冶金技术大发展。18 世纪欧洲工业革命后,冶炼技术才在欧洲发展起来,直到 20 世纪电炉炼钢法诞生,进一步提高了钢的质量,使合金钢生产成为可能,近代炼钢技术发展才突飞猛进。1886 年美国在有色金属冶炼方面最重大发明是将氧化铝加入熔融冰晶石,电解得到铝。

材料是社会进步的标志。材料科学受到重视的原因之一,就是社会的发展对材料的需要。材料的发展又促进社会的进程,二者相辅相成。科学技术在经济增长中所起作用的比重逐年增加,而在科技所占比例中材料发展的贡献很大。随着我国现代化生产发展,零件的服役条件日趋苛刻,因而对其质量和材料性能的要求也越来越高。这一趋势要求工程技术人员对工程材料的物理本质以及成分、组织和力学性能有一基本了解。新材料、新工艺的应用推动着现代化工业发展和科技进步。目前,材料研究已成为一门尖端技术。划时代新材料的出现,必然萌生技术革新。技术革新又对新材料有强烈的需求,促进新材料的研制与发展,使新材料品种增多,质量提高,以满足需要。如航空航天技术的发展,促进了具有抗高温性能的新材料的飞速发展;石油化学工业的兴起,促进了高分子化学的发展;材料的研究与应用给现代技术的发展带来了新的生机。

材料科学是一门研究材料成分、结构、加工工艺、性能与应用之间内在相互关系及其变化规律的学科。材料科学理论与实验是材料发展与创新的基础与前提。19世纪冶金、材料技术有了新的发展。人们用显微镜对钢组织进行观察,揭示了组织、成分和性能之间的关系,建立了金相学,提出了 Fe-C 相图,这时对于钢件在加热和冷却过程中其内部组织变化规律以及对由此引起钢的性能变化的物理本质才有所认识。X 射线衍射技术与电子显微镜的应用使金属电子理论与位错理论大发展,化学、物理、力学与材料、冶金之间建立了密不可分的关系,形成了化学冶金学、物理冶金学和力学冶金学等一系列新的材料学科的分支,成为指导材料及材料制造业的理论基础。

材料按用途可分为工程材料和功能材料;按结构可分为金属、非金属和复合材料。在近十几年甚至几十年内,钢铁材料所处的主导地位是不容忽视的,但从未来的发展看,钢铁材料有可能逐渐被其他材料所替代。具有各种性能的陶瓷作为一种新型材料相继研制成功,复合材料应用取代了某些金属材料,作为未来最有希望的材料已日益受到人们的重视。在当前材料科学迅速发展的情况下,仅有金属材料知识还不够,必须对其他材料有所了解。

本课程在先行基础课与后续技术基础课或专业课之间起着承前启后的作用。本课程对机械产品设计、生产、检测起着重要指导作用。本书主要包括三大方面内容,即材料基础理论部分、工程材料及应用部分和工程材料的失效、设计与选用部分。加强基础理论部分学习是认识材料与合理使用材料的先导。学习这门课程首先了解材料成分、组织与性能之间相互关系,知道具有什么成分的材料,通过哪一种工艺可以获得适当的组织,才能达到所要求的性能,为提高机械零件质量,充分发挥现有材料潜力及发展新材料打下基础。学会如何运用材料学科理论与研究方法分析与解决机械产品设计与生产中所遇到的问题,具有能根据机件服役条件和对材料性能要求正确选材与制订合理的热处理工艺,妥善安排工艺路线的初步能力。

第一章 金属材料力学性能

金属材料的使用性能包括物理性能、化学性能、工艺性能和力学性能,对于工程材料来说,其中最重要的是力学性能。

金属材料的力学性能是指金属在外加载荷(外力或能量)作用下或载荷与环境因素(温度、介质和加载速率)联合作用下所表现的行为。由于载荷施加的方式多种多样,而环境、介质的变化又十分复杂,所以金属在这些条件下所表现的行为就会大不相同,致使金属材料力学性能所研究的内容非常广泛,它已发展成为介于金属学和材料力学之间的一门边缘学科。

金属材料的力学性能包括强度、硬度、塑性和韧性等性能。因为金属构件的承载条件一般用各种力学参量(如应力、应变和冲击能量等)来表示,因此,人们便将表征金属材料力学行为的力学参量的临界值或规定值称为金属材料力学性能指标,如强度指标、塑性指标、韧性指标等等。本章将在介绍金属材料力学性能基本知识的基础上着重介绍这些性能指标的物理概念及实用意义。

第一节 拉伸曲线和应力应变曲线

拉伸试验是工业上最广泛使用的力学性能试验方法之一。试验时在拉伸机上对圆柱试样或板状试样两端缓慢地施加载荷,使试样受轴向拉力沿轴向伸长,一般进行到拉断为止。

一般试验机都带有自动记录装置,可把作用在试样上的力和所引起的试样伸长自动记录下来,绘出载荷-伸长曲线,称拉伸曲线或拉伸图。

图 1-1 为退火低碳钢拉伸曲线示意图。曲线的纵坐标为载荷(P),横坐标是绝对伸长(ΔL),由图可见,载荷比较小时,试样伸长随载荷增加成正比例增加,保持直线关系。载荷超过 P_p 后,拉伸曲线开始偏离直线。载荷在 P_e 以下阶段,试样在加载时发生变形,卸载后变形能完全恢复,该阶段为弹性变形阶段。当载荷超过 P_e 后,试样在继续产生弹性变形的同时,将产生塑性变形,进入弹塑性变形阶段。此时,若在载荷 P

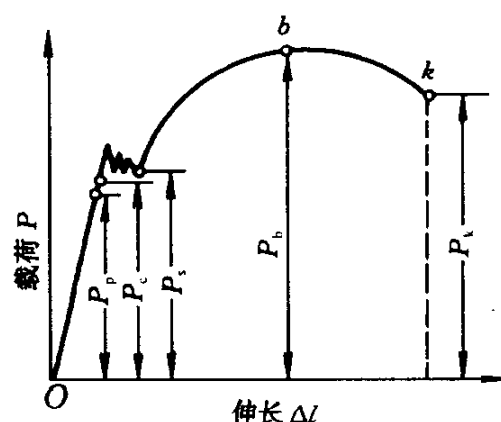


图 1-1 低碳钢的拉伸曲线示意图

作用下试样的变形为 ac , 则弹性变形和塑性变形分别为 ab 和 bc (如图 1-2 所示)。若卸载, 弹性变形 ab 将恢复, 塑性变形 bc 被保留, 使试样的伸长只能部分地恢复, 而保留一部分残余变形 OD 。当载荷达到 P_s 时, 在拉伸曲线上出现锯齿或平台。即载荷虽然保持不变或发生波动, 而试样继续伸长 (变形量继续增加), 这种现象称为屈服。由于在弹塑性变形阶段有塑性变形的产生, 因此试样要继续变形, 就必须不断增加载荷。随着塑性变形增大, 载荷升高。当到最大载荷 P_b 时, 试样的某部位横截面开始缩小, 出现了颈缩。随着伸长量的增加, 试样的变形主要集中在颈缩处而使试样的颈缩越来越明显。由于颈缩处试样截面急剧缩小, 继续变形所需的载荷下降。载荷达 P_k 时, 试样产生断裂。

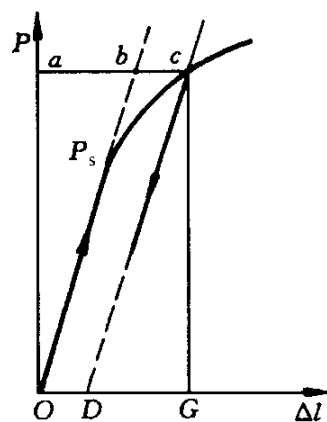


图 1-2 弹塑性变形阶段
各类变形的示意图

由此可知, 金属材料在外加载荷作用下的变形过程一般可分为三个阶段, 即弹性变形、弹塑性变形和断裂。

用试样原始横截面积 (F_0) 去除载荷得到应力 (σ), 即 $\sigma = P/F_0$ 。以试样的原始标距长度 (L_0) 去除绝对伸长, 得到相对伸长 (应变 ϵ), 即 $\epsilon = \Delta L/L_0$, 单位为百分数 (%)。故可由金属材料的拉伸曲线得到材料的应力应变曲线, 并且由于原始横截面积和原始标距长度均系常数, 因而两曲线形状相同。

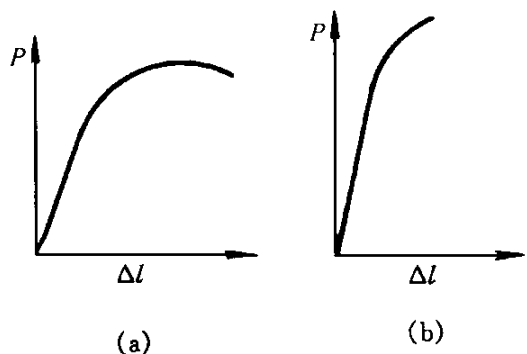


图 1-3 其他类型的拉伸曲线
(a) 塑性材料; (b) 脆性材料。

金属材料的拉伸曲线除了低碳钢这种类型以外, 还有其他不同类型的拉伸曲线 (图 1-3)。图 1-3(a) 为塑性材料的拉伸曲线, 它由弹性变形过渡到弹塑性变形是逐渐发生的, 没有屈服现象, 而存在有颈缩现象。

图 1-3(b) 为脆性材料的拉伸曲线, 它不仅没有屈服现象, 而且也没有颈缩现象, 最大载荷就是断裂载荷。

第二节 金属的弹性与塑性

一、金属的弹性

前面已经提到, 金属材料在外加载荷作用下最先产生弹性变形。弹性变形的特点是: 变形是可逆的; 不论是加载或卸载期内, 应力与应变之间都保持单值线性关系; 变形量比较小, 一般不超过 $0.5\% \sim 1\%$ 。

(一) 弹性模量

在弹性变形阶段, 金属材料的应力与应变成正比关系, 如拉伸时 $\sigma = E\epsilon$, E 表示应

力应变曲线的斜率,称为正弹性模量。弹性模量表征金属材料对弹性变形的抗力,其值的大小反映了金属材料弹性变形的难易程度。 E 值越大,则产生一定弹性变形的应力也越大。

在工程上一般机器零件大都在弹性状态下工作,在设计、选材时除了设计足够的截面外,还应考虑弹性模量问题。故弹性模量是金属材料重要的力学性能指标之一。它的大小主要由材料本身的种类和晶体结构所决定,通常的合金化、热处理、冷加工等均不能明显改变金属材料的弹性模量,它是一个对材料的成分和显微组织不敏感的力学性能指标。

(二)比例极限和弹性极限

比例极限(σ_p)是应力与应变成正比关系的最大应力,即在拉伸应力应变曲线上开始偏离直线时的应力。

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \quad (1-1)$$

式中 P_p ——比例极限对应的载荷;

F_0 ——试样的原始截面积。

弹性极限(σ_e)是材料弹性变形阶段弹性变形量达到最大值时的应力。应力超过弹性极限以后,材料便开始发生塑性变形。

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad (1-2)$$

式中 P_e ——弹性极限对应的载荷;

F_0 ——试样的原始截面积。

σ_p 和 σ_e 的实际意义是:对于要求在服役时其应力应变关系严格维持直线关系的构件,如测力计弹簧,是依靠变形的应力正比于应变的关系显示载荷大小的,则选择这类构件的材料应以比例极限为依据;若服役条件要求构件不允许产生微量塑性变形,则设计时应按弹性极限来选材。

(三)弹性比功

弹性比功又称弹性比能、应变比能,表示金属材料吸收弹性变形功的能力。一般可用金属开始塑性变形前单位体积吸收的最大弹性变形功表示。金属拉伸时的弹性比功可用图1-4应力应变曲线下影线面积表示,且

$$a_e = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad (1-3)$$

式中 a_e ——弹性比功;

σ_e ——弹性极限;

ϵ_e ——最大弹性应变。

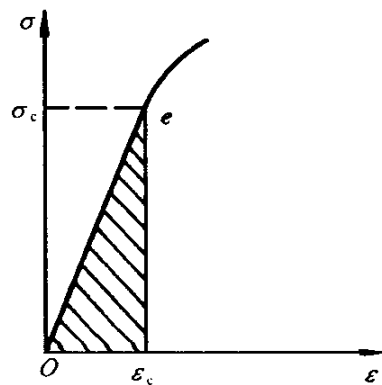


图 1-4 金属拉伸时应力应变曲线(弹性阶段)

由式(1-3)可见,金属材料的弹性比功决定于其弹性模量和弹性极限。由于弹性模量是组织不敏感性能指标,因此,对于一般金属材料,只有用提高弹性极限的方法才能提高其弹性比功。

弹簧是典型的弹性零件,其重要作用是减震和储能驱动,要求 σ_e 较高,使弹性比功增加。

(四)弹性不完整性

理想的弹性变形应该是单值性的可逆变形,加载时立即变形,卸载时又立即恢复原状,变形与加载方向、时间无关,加载线和卸载线重合一致。但是由于实际金属是多晶体并有各种缺陷存在,弹性变形时,并不是完整弹性的,还将出现弹性不完整性。弹性不完整性包括包申格效应、弹性后效和弹性滞后等现象。

1. 包申格效应

图 1-5 为退火轧制黄铜在不同载荷条件下弹性极限的变化情况。曲线 1 为初次拉伸曲线,测得的弹性极限为 σ_{e1} ;曲线 2 为初次压缩曲线,弹性极限为 σ_{e2} 。若将经初次压缩后的试样卸载,再进行第二次压缩加载,弹性极限将由 σ_{e2} 增加到 σ_{e3} (曲线 3);若用初次压缩过的试样进行第二次拉伸加载,则弹性极限明显下降,由 σ_{e2} 下降到 σ_{e4} (曲线 4)。

金属经过这种预先加载产生微量塑性变形,然后再同向加载,使弹性极限升高;反向加载弹性极限降低的现象叫包申格效应。

包申格效应在很多金属中都有发现。显然,包申格效应对于预先经过轻度塑性变形而后再反向加载的构件十分有害。在交变过载作用下,因包申格效应会使材料逐步弱化。

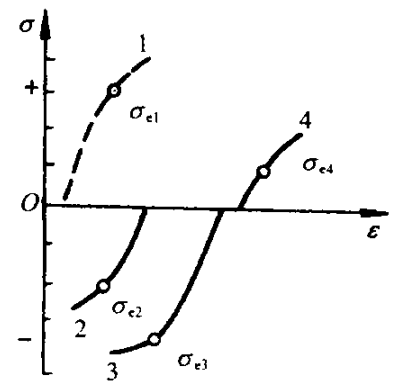


图 1-5 包申格效应

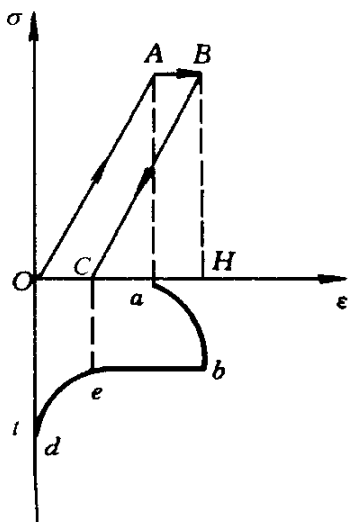


图 1-6 弹性后效

预先进行较大的塑性变形是消除包申格效应的方法之一。

2. 弹性后效

试验发现,在加载速率比较快时,金属的拉伸应力应变曲线上的直线段实际上是由两部分组成的,如图 1-6 所示。

试样在应力作用下产生的弹性变形开始时,沿 OA 变化,产生瞬时弹性应变 Oa 之后,在应力不变的条件下,随时间延长变形慢慢增加,产生附加的弹性应变 aH。这种加载时应变落后于应力而和时间有关的现象,称为正弹性后效。卸载时,立即沿 BC 变化,部分弹性应变 HC 消失,之后随时间延长应变才缓慢消失至零。卸载时应变落后于应力的现

象,称为反弹性后效。弹性后效又称滞弹性,随时间延长而产生的附加弹性应变叫做滞弹性应变。滞弹性应变随时间的变化情况如图 1-6 下半部分所示。正弹性后效 ab 段和反弹性后效 ed 段都是时间的函数,而瞬时弹性应变 Oa 和 be 则和时间无关。

评定仪表和精密机械中一些重要的传感元件如长期承受载荷的测力弹簧、薄膜传感元件所用材料,需要考虑弹性后效问题,如弹性后效较明显,会使仪表精度不足。

3. 弹性滞后

金属在弹性区内加载后,又卸载时,由于应变落后于应力,使加载线和卸载线不重合而形成封闭回线的现象,称为弹性滞后。封闭回线称为弹性滞后环。单向加载卸载形成的滞后环如图 1-7(a)所示。如果所加的是交变载荷,且最大应力低于材料的弹性极限,则得到交变载荷下的弹性滞后环[图 1-7(b)]。若交变载荷中的最大应力超过材料的弹性极限,则得到塑性滞后环[图 1-7(c)]。

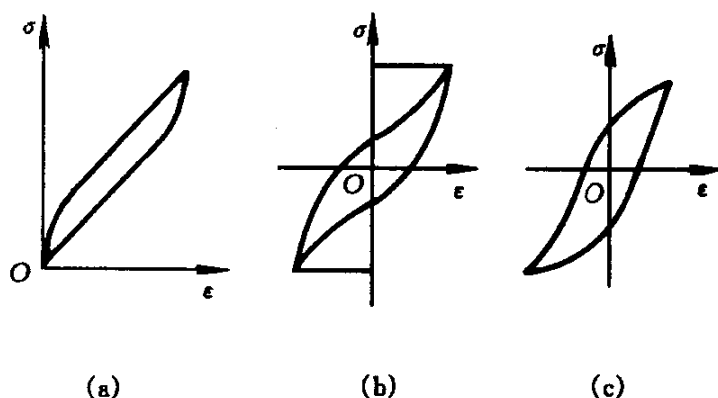


图 1-7 滞后环的类型

- (a) 单向加载弹性滞后环;
(b) 交变加载弹性滞后环;
(c) 交变加载塑性滞后环。

存在滞后环现象说明加载时消耗于金属的变形功大于卸载时金属释放出的变形功,因而有一部分变形功为金属所吸收。金属这种吸收不可逆变形功的能力,称为金属的循环韧性,也叫金属的内耗或消震性。循环韧性也是金属材料的重要力学性能。

循环韧性大的材料其消震能力强。对于承受交变应力而易振动的构件,常希望材料有良好的消震性,如汽轮叶片。但是另一方面,对有些零件又希望材料的循环韧性越小越好。如仪表上的传感元件,材料的循环韧性越小,传感灵敏度越高;乐器所用金属材料的循环韧性越小,声音越好听。

二、金属的塑性

金属在外力作用下,当超过弹性极限后开始塑性变形。和弹性变形相比,塑性变形是一种不可逆变形。随着外力增加其塑性变形量也增加。当达到断裂时,塑性变形量也达到最大值。通常用断裂时塑性变形极限值的相对量,即最大相对塑性变形量来表示材料的塑性变形能力,即塑性。拉伸试样的塑性指标有延伸率或断面收缩率。

(一) 延伸率

延伸率(δ)又叫伸长率,是试样拉断后标距长度的相对伸长值,等于标距的绝对伸长($\Delta L_k = L_k - L_0$)除以试样原始标距长度(L_0),用百分数表示:

$$\delta = \frac{L_k - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 L_0 ——试样原始标距长度；

L_k ——试样断裂后的标距长度。

实验证明：试样的原始截面积和原始标距长度的大小会对延伸率有一定的影响，因此为了得到统一的可以相互比较的数据，通常对试样的尺寸有一定的要求。对于圆柱试样而言，试样的尺寸有两种： $L_0 = 5d_0$ 或 $10d_0$ (d_0 为试样的原始直径)。相应的试样分别称为 5 倍或 10 倍比例试样，得到的延伸率分别以 δ_5 或 δ_{10} 表示，且 $\delta_5 > \delta_{10}$ 。通常的 δ 即代表用 10 倍比例试样得到的延伸率。

(二) 断面收缩率

断面收缩率 (Ψ) 是拉伸断裂后试样断裂处截面的相对收缩值，等于断裂处截面绝对收缩值 ($\Delta F_k = F_0 - F_k$) 除以试样原始截面积 (F_0)，也用百分数表示：

$$\Psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 F_0 ——试样原始截面积；

F_k ——试样断裂后断裂处的最小截面积。

第三节 金属的强韧性

一、金属的强度

金属的强度是表征金属材料抵抗变形和断裂的能力。材料内部的化学成分和组织结构将影响金属的强度，因而可以通过合金化、热处理、冷变形等方法使之改变。这将在第二章中详细介绍。

(一) 屈服极限

在介绍退火低碳钢的拉伸曲线时曾经指出，在弹性变形后载荷达到 P_s 时将产生屈服现象。表现在试验过程中，载荷不增加试样仍能继续伸长而在拉伸曲线上出现平台〔图 1-8 (a)〕，称为平台状屈服；或在载荷上下波动情况下，试样继续伸长变形而在拉伸曲线上出现锯齿〔图 1-8(b)〕，称为锯齿状屈服。在平台状屈服时与平台对应的载荷记为 P_s ，相应的应力称为屈服点，以 σ_s 表示。仍以 F_0 表示试样原始截面积，则

$$\sigma_s = P_s / F_0 \quad (1-6)$$

在锯齿状屈服时，最大载荷或不计初始瞬时效应（指载荷第一次发生下降）时的最小载荷分别记为 P_{su} 和 P_{sl} ，相对应的应力 σ_{su} 和 σ_{sl} 分别称为材料的上屈服点和下屈服

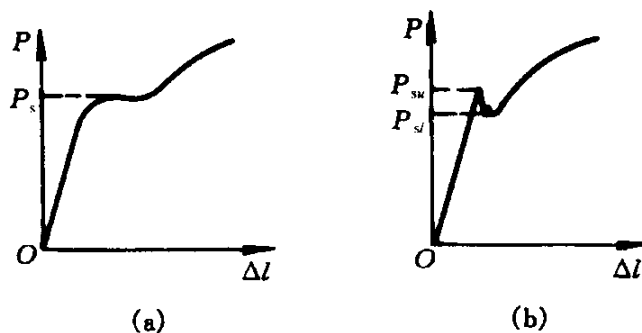


图 1-8 屈服点的确定
(a) 平台状屈服；(b) 锯齿状屈服。