

高等学校教材

郑修麟 主编

材料 的 力学性能

第2版

西北工业大学出版社

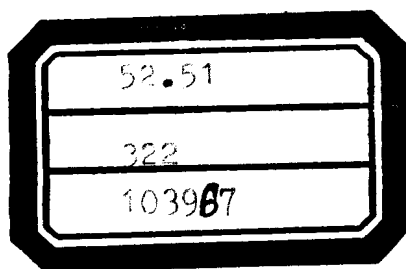
材料力学性能
(第2版)

郑修麟 主编

1

67

西北工业大学出版社

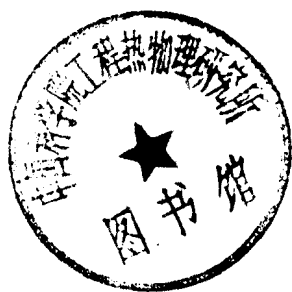


高等学校教材

材料的力学性能

(第2版)

郑修麟 主编



西北工业大学出版社

2000年4月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】本书从工程应用的角度,介绍材料力学性能的基本理论,评价材料的各种力学性能指标、测定原理与方法、失效机理与失效准则及其工程实用意义。书中尽可能反映国内,尤其是西北工业大学在这一领域内的科研成果。全书共十四章,可分为三大部分。第一部分包括第一章至第七章,主要介绍与评价金属结构件安全性相关的力学性能。第二部分包括第八章至第十一章,介绍与评价金属结构件使用寿命相关的力学性能。考虑到复合材料、高分子材料与陶瓷材料将作为结构材料在工程中应用,故第三部分介绍这些材料的力学性能。本书可作为高等院校材料科学与工程各专业的教材,也可作为从事金属与非金属制作加工、机械与结构设计等领域内工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料的力学性能/郑修麟主编;乔生儒,秦熊浦编. 2版. —西安:西北工业大学出版社, 2000. 2

ISBN 7-5612-1205-4

I. 材... II. ①郑... ②乔... ③秦... III. 工程材料-力学性能 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 57505 号

© 2000 西北工业大学出版社出版发行
(邮编: 710072 西安市友谊西路 127 号 电话: 8493844)

全国各地新华书店经销

西北工业大学印刷厂印装

*

开本: 787 毫米×1 092 毫米 1/16
1999 年 4 月第 1 版
印数: 4 900~6 900 册

印张: 13.625 字数: 323 千字
2000 年 4 月第 2 版第 4 次印刷
定价: 19.00 元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

第 2 版前言

《材料的力学性能》一书,1990 年 4 月由西北工业大学出版社第一次出版发行。此后,又在 1994 年和 1996 年两次重印。

在本书出版发行后的近 10 年时间内,我国的教育体制改革深入开展。其中重要的一环,是拓宽专业面向,提高自身获取知识的能力,使学生获得更广阔丰富的知识。因此,本书在内容选取、章节安排以至具体的文字表述等方面,力图能满足上述要求,适应教育改革发展的新形势。

材料力学性能的基本知识,不仅是研究新材料必需的,而且也是合理、有效利用现有材料所必须具备的。更为重要的是,材料力学性能研究的新进展,会对材料的研究发生重大的影响,导正材料研究的方向。例如,20 世纪 50 年代,断裂力学的发展和断裂韧性这一新的材料力学性能的出现,导正了新型结构材料研制中单纯追求高的强度指标的倾向,提出了“强韧化”的研究新思路。与此同时,在结构设计中提出了“损伤容限设计”的新思想。研究结构材料,而不深入研究其力学性能、失效机理与失效准则,无异于“缘木求鱼,望梅止渴”。现有材料使用效益不高,新材料难以很快在工程中应用,其中一个主要的原因是对材料的力学性能认识不全面,对其失效机理与失效准则的研究不深入。这种状况应尽快改变。

因此,在材料学和材料工程专业学习的大学生,以及在机械和结构与制造专业学习的大学生,应当具有较全面的材料力学性能的知识。现有的结构材料主要还是金属材料。所以,本书第一章至第十一章,论述金属的力学性能。这不仅是因为金属力学性能的研究历史悠久,形成了较完整的理论、实验技术与方法,并制订了相应的标准,而且还移植到新型结构材料的力学性能研究中。在高科技领域,新型结构材料包括复合材料、高分子材料、陶瓷材料和金属化合物材料等。本书第十二章至第十四章,介绍复合材料、高分子材料和陶瓷材料的力学性能。

本书第 1 版的第一章至第七章,主要是论述用于评价机件安全、有效服役所需的力学性能指标和相关的理论知识。考虑到用于测定力学性能的试件具有三类不同的几何特征:即光滑试件、切口试件和含裂纹试件。所以,本书第 2 版时,对这部分章节作了如下的调整:第一至第五章主要论述用光滑试件在单向加载,包括拉伸、扭转、弯曲、压缩、剪切和侧压(硬度)下的力学性能指标、失效过程和机理。这些试验是测定材料的基本力学性能。第六章考虑应力集中对强度的影响,即用切口试件测定材料的切口强度,进而评估材料对切口的敏感性。第七章是讨论材料中出现裂纹后,如何评价材料的力学性能,用含裂纹试件测定材料断裂韧性 K_{IC} 的方法,以及 K_{IC} 在评估含裂纹构件的剩余强度和选用材料时的应用。第七章以后,在章节安排上未作变动。全书所有章节均在内容上作了精简,文字上作了修改;同时,也根据研究工作的新进展,增补了部分内容。另一方面,可考虑将带 * 的部分作为自学内容。

本书初版时,第二章由王介淦编写,第三章和第五章(现为第五章和第七章)由周建初编写,第六章和第七章(现为第三章和第四章)由陈赛克编写,第十一章由杨思品编写,第九、十二章和十三章由乔生儒编写,第十四章由路民旭编写,其余章节由郑修麟编写。这次修订时,本书的第九、十二章和十三章由乔生儒改编,第十章由秦熊浦改编,其余各章由郑修麟改编。修订

稿由西安交通大学宋余九教授进行了细致的审阅,在此表示衷心的感谢!

作为一本教材,很难满足诸多方面的要求,而且限于编者的学识水平,因而本书难免存在缺点和不足,敬希使用本书的教师和学生,不吝金玉,加以指正。

编 者

1999 年 6 月于西安

第 1 版前言

在金属材料及热处理专业的教学计划中,材料的力学性能是一门必修课。在材料科学与工程系其他专业学习的大学生,以及在机械和结构设计与制造专业学习的大学生,也应具有较全面的材料力学性能知识。《材料的力学性能》一书是为适应金属材料及热处理专业的教学需要撰写的,也是为适应上述其他各专业的教学需要撰写的。本书的编写大纲初稿由郑修麟、乔生儒两同志撰写,在 1987 年 11 月于西安召开的原航空工业部教材编委会上作了讨论和修订。

根据 30 多年从事教学和科研工作的经验,我们认识到,在我国航空航天高等院校,材料的力学性能课程应当从工程应用的观点和要求组织教学,这与材料物理以及从事新材料研制的专业,对本课程的教学要求和侧重点是有所不同的。因此,我们重新编排和划分了全书的章节,确定了各章节的内容和重点,全书共有十四章,可以粗略地分为三大部分:第一部分包括第一章到第七章,主要是论述用于评价机件安全、有效地服役所需要的力学性能指标和相关的理论知识,以及测定原理和方法;第二部分包括第八章到第十一章,主要是论述用于评估机件寿命所需要的力学性能指标,包括疲劳、蠕变、环境效应与磨损,这是机件常见的四种失效形式,材料对这四种形式失效的抗力将决定机件的寿命;第三部分包括第十二章至第十四章,主要论述非金属材料的力学性能。在编写本书时,尽可能介绍本学科的研究新成果,尤其是国内的研究成果。这也有利于对学生进行爱国主义教育。力学性能的测定方法参照相应的国家标准来叙述。此外,每章附有主要参考文献,便于读者查阅,以加深对所有内容的理解,也有助于拓宽知识面。各章的思考题与习题附在书后,供读者课后思考与练习。

本书由西北工业大学郑修麟主编。编写分工情况如下:绪论、第一章、第四章和第八章由郑修麟编写;第二章由南京航空学院王介淦编写;第三章和第五章由周建初编写;第六章和第七章由南昌航空工业学院陈赛克编写;第九章、第十二章和第十三章由西北工业大学乔生儒编写;第十章由秦熊浦编写;第十一章由杨思品编写;第十四章由路民旭编写;各章的思考题与习题由席守谋编写,并负责与出版有关的工作。

在编写过程中,周希真、蓝立文和矫桂琼诸位先生,从不同的角度细致地审阅了第十二章和第十三章手稿,提出了不少修改意见和建议,对于保证这两章的质量起了重要的作用,清华大学顾家琳先生对全部书稿进行审阅,并提出修改建议,在此一并表示衷心感谢。

最后,我们诚挚地希望并感谢使用本书的教师和读者能将教学时遇到的问题、困难以及对本书的修改建议函告我们,以便本书再版时得以改进,臻于完善。

编 者

1990 年 4 月于西安

目 录

绪论	1
第一章 材料的拉伸性能	3
1.1 引言	3
1.2 拉伸试验	3
1.3 脆性材料的拉伸性能	5
1.4 高塑性材料的拉伸性能 (Ⅰ)——连续塑性变形强化	6
1.5 高塑性材料的拉伸性能 (Ⅱ)——不连续塑性变形强化	11
第二章 弹性变形与塑性变形	12
2.1 引言	12
2.2 弹性变形	12
2.3 弹性极限与弹性比功	16
2.4 弹性不完善性	18
2.5 塑性变形	21
2.6 屈服强度	23
2.7 形变强化	27
第三章 其它静加载下的力学性能	30
3.1 引言	30
3.2 扭转试验	30
3.3 弯曲试验	33
3.4 压缩试验	35
3.5 剪切试验	36
第四章 材料的硬度	38
4.1 引言	38
4.2 布氏硬度	38
4.3 洛氏硬度	41
4.4 维氏硬度	42
4.5 显微硬度	44
4.6 肖氏硬度	45

第五章 断裂	46
5.1 引言	46
5.2 脆性断裂	46
5.3 理论断裂强度和脆断强度理论	50
5.4 延性断裂	53
5.5 脆性-韧性转变	56
第六章 切口强度与切口冲击韧性	60
6.1 引言	60
6.2 局部应力与局部应变	60
6.3 切口强度的实验测定	63
6.4 切口强度的估算	65
6.5 切口敏感度评估	66
6.6 切口冲击韧性	67
6.7 低温脆性	69
第七章 断裂韧性	72
7.1 引言	72
7.2 裂纹的应力分析	72
7.3 裂纹扩展力或裂纹扩展的能量释放率	76
7.4 平面应变断裂韧性	78
7.5 裂纹尖端塑性区	80
7.6 平面应变断裂韧性 K_{IC} 的测定	82
7.7 金属的韧化	83
7.8 估算 K_{IC} 的模型和经验关系式	85
7.9 裂纹尖端张开位移	87
7.10 J 积分	88
第八章 金属的疲劳	91
8.1 引言	91
8.2 金属在对称循环应力下的疲劳	91
8.3 非对称循环应力下的疲劳	94
8.4 疲劳切口敏感度	95
8.5 累积疲劳损伤	96
8.6 疲劳失效过程和机制	97
8.7 应变疲劳	100
8.8 疲劳裂纹形成寿命的估算	104
8.9 疲劳裂纹扩展速率及门槛值	105

8.10	延寿技术·····	108
8.11	冲击疲劳·····	111
8.12	疲劳短裂纹简介·····	112
第九章	材料在高温下的力学性能·····	114
9.1	引言·····	114
9.2	蠕变、蠕变极限及持久强度·····	114
9.3	蠕变过程中合金组织的变化、变形和断裂机制·····	118
9.4	应力松弛·····	123
9.5	高温疲劳及疲劳与蠕变的交互作用·····	124
第十章	环境介质作用下金属的力学性能·····	128
10.1	引言·····	128
10.2	应力腐蚀断裂·····	128
10.3	氢脆·····	134
10.4	腐蚀疲劳·····	138
第十一章	金属的磨损与接触疲劳·····	143
11.1	引言·····	143
11.2	摩擦与磨损的概念·····	143
11.3	磨损试验方法·····	145
11.4	磨损机制及影响因素·····	146
11.5	接触疲劳·····	152
第十二章	复合材料的力学性能·····	159
12.1	引言·····	159
12.2	研究单向连续纤维增强复合材料力学性能的基本假设·····	159
12.3	代表性体元·····	159
12.4	复合材料的纵向力学性能·····	160
12.5	复合材料的横向力学性能·····	164
12.6	复合材料的面内剪切弹性模量·····	165
12.7	短纤维复合材料的力学性能·····	166
12.8	复合材料的断裂、冲击与疲劳性能特点·····	171
第十三章	高分子材料的力学性能·····	177
13.1	引言·····	177
13.2	线性非晶态高分子材料的力学性能·····	177
13.3	结晶高聚物的变形特点·····	181
13.4	高聚物的粘弹性·····	183

第十四章 陶瓷材料的力学性能	186
14.1 引言.....	186
14.2 陶瓷材料的弹性模量.....	186
14.3 陶瓷材料的强度.....	187
14.4 陶瓷材料的疲劳.....	189
14.5 陶瓷材料的韧性.....	192
14.6 陶瓷材料的抗热震性.....	194
思考题与习题	195
参考文献	202

绪 论

飞机和发动机的零件和部件,以及其它机械和工程结构的零件和构件,都是由材料制成的。在零件的生产过程中,要求材料具有优良的加工性能;例如,当金属塑性成型时,要求材料具有优良的塑性和低的塑性变形抗力。而在零件的服役过程中,则要求材料具有高的变形和断裂抗力,使零件在受外力作用时能保持设计所要求的外形和尺寸,保证在服役期内安全地运行。因此,不仅是学习材料科学和工程类有关专业的大学生,必须具备材料力学性能的知识;而且学习机械和结构设计与制造专业的大学生以及工程技术人员,也应具有材料力学性能的基本知识。

材料的力学性能通常是指材料的弹性、塑性和强度。弹性是指材料在外力作用下保持固有形状和尺寸的能力,在外力除去后恢复固有形状和尺寸的能力。塑性是材料在外力作用下发生不可逆的永久变形的能力。而强度则是材料对塑性变形和断裂的抗力。或许,材料的力学性能还应当包括“寿命”。所谓寿命,是指材料在外力的长期或重复作用下,或在外力和环境因素的复合作用下,抵抗损伤和失效的能力,使零件在服役期限内安全、有效地运行。

《材料的力学性能》一书是按工程应用的观点和要求编写的,它主要论述材料,包括金属材料和非金属材料,在不同形式的外力作用下,或者在外力、温度、环境等因素的共同作用下,发生损伤、变形和断裂的过程、机制和力学模型,评定材料力学性能的各项指标、其物理意义和工程实用意义、实验测定的原理和方法,改善力学性能的途径等。此外,还介绍一些根据拉伸性能预测其它一些力学性能指标的理论或经验关系式。因为拉伸性能是材料的基本力学性能,也易于实验测定;而其它一些力学性能指标,如断裂韧性、疲劳极限和疲劳寿命等的实验测定,技术上比较复杂或者要耗费大量人力和物力,因而在研究拉伸性能与其它力学性能指标的定量关系方面做了很多的工作,取得了相当的成功。这样,在零部件的初步设计阶段,可以根据材料的拉伸性能较全面地评价材料,考虑是否选用或进行进一步的必要的实验研究,以加速设计进程并节约设计费用。

我们希望通过《材料的力学性能》的学习,读者应能理解在外力作用下材料失效的过程、机制和力学模型;应能理解如何评价材料以及用什么样的力学性能指标评价材料;在零件设计中如何优选材料,尤其是在生产过程中如何优化工艺以改善材料在服役条件下的力学性能;掌握材料基本力学性能的测试原理和方法,以及了解新材料和新技术的发展对材料力学性能提出的新要求。

为达到上述教学要求,本书共编写了十四章,可以粗略地分为三大部分:第一部分包括第一至第七章;第二部分包括第八至第十一章,最后三章为第三部分。第一部分主要是阐述金属的形变和断裂过程、机制和基本理论,材料在一次静加载条件下的力学性能。加载方式包括拉伸、扭转、弯曲、压缩和剪切等等,试件包括光滑试件、切口试件和含裂纹的试件等。所测定的力学性能指标用于评价零件在服役过程中的抗过载失效能力或安全性。第二部分论述疲劳、蠕变、环境效应和磨损。这是机件常见的四种失效形式。材料对这四种形式失效的抗力将决定零

件的寿命。最后三章分别介绍复合材料、高分子材料和陶瓷材料的力学性能。这些材料正在或即将作为新型结构材料、制造结构的构件或部件,因而有必要掌握这些材料的力学性能特点。这是从工程应用的观点,来看待本书的章节安排和划分的。然而,从学科内容上,各章节又是有着紧密联系的。

学习《材料的力学性能》需要有材料力学和金属学方面的基本理论知识。因为在编写本书时,凡是已在材料力学和金属学中讲授过的内容,即不再简单地重复。学习就是用已知求未知。若读者已淡忘了某些“已知”,则在学习本课程时,应当复习,“温故而知新”。这是学习本课程中应当注意的第一点。《材料的力学性能》又是实用性很强的一门课程。例如,某些力学性能指标是根据原理定义的,而相当多的力学性能指标是按工程实用要求定义的。因此,学习本课程时既要掌握所学的理论知识,又要注意联系实际。这就要求读者理解一些重要的力学模型赖以建立的依据、基本思想,以及由此而导出的定理和公式,也要理解这些定理和公式在工程中的适用范围和限制;同时,还要应用诸如机械设计、金属工艺学和金属热处理等课程中所学的知识,以加深理解本课程的某些内容。另一方面,还要重视实验,通过实验既可掌握力学性能的测试原理,又可掌握测试技术,了解测试设备,进一步理解所测的力学性能指标的物理意义与实用意义。在每章学完之后,做一些练习也是重要的,可加深对所学知识的理解,巩固所学的知识。故本书后附有习题与思考题,读者可选做其中一部分,全做更好。我们希望读者通过课堂教学、复习、阅读参考文献、答疑、实验和做练习 6 个教学环节,将本课程学得更好。

第一章 材料的拉伸性能

1.1 引言

拉伸试验虽是简单的、但却是最重要的应用最广泛的力学性能试验方法。拉伸试验可以测定材料的弹性、强度、塑性、应变硬化和韧性等许多重要的力学性能指标。这些性能指标统称为拉伸性能。它是材料的基本力学性能。根据拉伸性能可预测材料的其它力学性能,如抗疲劳、断裂性能等^{[1]~[4]}。在工程应用中,拉伸性能是结构静强度设计的主要依据。因此,在研究新材料、或合理使用现有材料和改善其力学性能时,都要测定材料的拉伸性能。本章主要介绍在室温大气中,在单向拉伸载荷作用下,用光滑试件测定的具有不同变形和硬化特性的材料的应力-应变曲线和拉伸性能参数,使读者对不同材料的性质有概略的、而不是较全面的认识。

1.2 拉伸试验

如不特别说明,拉伸试验是指在室温大气中,在缓慢施加的单向拉伸载荷作用下,用光滑试件测定材料力学性能的方法。常用拉伸试件的形状和尺寸示于图 1-1^[5]。若采用光滑圆柱试件,试件的标距长度 l_0 比直径 d_0 要大得多;通常, $l_0 > 5d_0$,以使试件横截面上的应力均匀地分布,以实现轴向均匀加载。试件做成圆柱形是便于测量径向应变,试件的加工也比较简便。当测定板材和带材的拉伸性能时,也可采用板状试件,见图 1-1 (b),但试件的标距长度 l_0 应满足下列关系式^[6]: $l_0 = 5.65A_0$ 或 $11.3A_0$;其中 A_0 为试件的初始横截面积。上式中的规定对应于圆柱试件中的 $l_0 = 5d_0$, $l_0 = 10d_0$ 。拉伸试件的几何形状,尺寸及允许的加工误差,在国家标准(以后简称国标) GB6397--86 中作了规定^[5]。

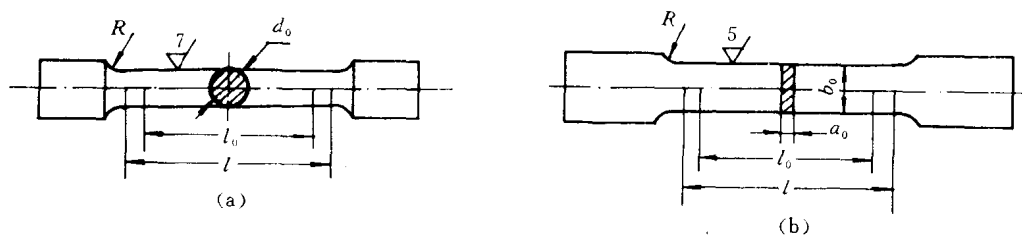


图 1-1 常用的拉伸试件

(a) 标准圆柱形拉伸试件; (b) 板状拉伸试件^[5]

拉伸加载速率,在屈服前,规定为 $d\sigma/dt = 1 \sim 10 \text{ MPa/s}$ ^{[6],[7]}。由于拉伸时加载速率较低,所以俗称静拉伸试验。关于试件制备、对试验仪器的要求、试验操作细节和结果处理等,应按国

标的规定进行。只有严格按照国标的规定进行拉伸试验,试验结果方为有效,由不同的实验室和工作人员测定的拉伸性能数据才可以互相比较。

拉伸试验机通常带有自动记录或绘图装置,以记录或绘制试件所受的载荷 P 和伸长量 Δl 之间的关系曲线; $\Delta l = l - l_0$,其中 l 为加载后标距间的长度。这种曲线通常称为拉伸图。退火低碳钢的拉伸图示于图 1-2 (a)。载荷除以试件的原始截面积即得工程应力 σ , $\sigma = P/A_0$,伸长量除以原始标距长度即得工程应变 e , $e = \Delta l/l_0$ 。图 1-2 (b) 表示工程应力-工程应变曲线,简称应力-应变曲线或拉伸曲线。比较图 1-2 (a) 和图 1-2 (b),可以看出,两者具有相同或相似的形状,但坐标刻度不同,意义不同。

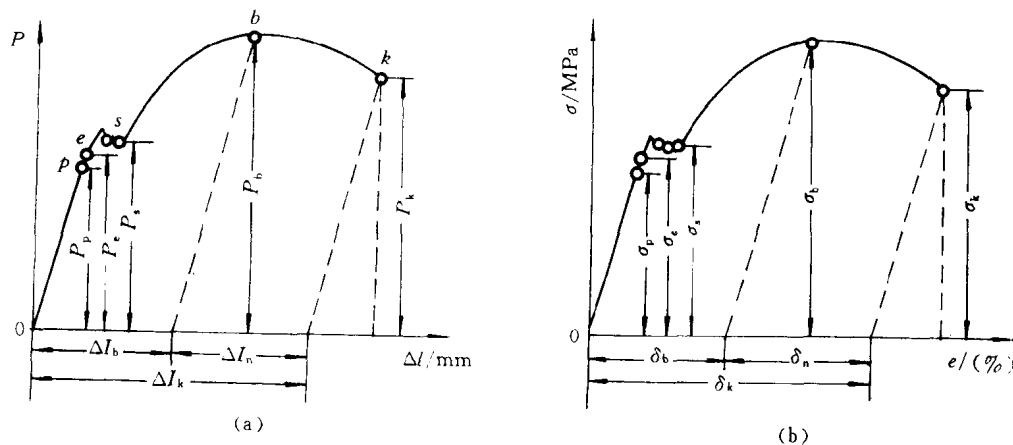


图 1-2

(a) 低碳钢的拉伸图; (b) 工程应力-工程应变曲线

由于材料具有不同的化学成分和微观组织,在相同的试验条件下,也会显示出不同的应力-应变响应。图 1-3 列举了几种典型的应力-应变曲线。每种曲线的变形特征和阶段以及哪些材料具有相应的应力-应变曲线,在表 1-1 中作了说明。

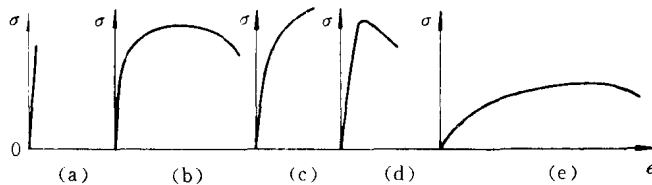


图 1-3 几种典型的应力-应变曲线

工程实践中,常按材料在拉伸断裂前是否发生塑性变形、将材料分为脆性材料和塑性材料两大类。脆性材料在拉伸断裂前不产生塑性变形。塑性材料在拉伸断裂前不仅产生均匀的伸长,而且发生颈缩现象,且塑性变形量大,见图 1-2 和图 1-3 (b),这种材料可认为是高塑性材料。若在拉伸断裂前只发生均匀伸长,且塑性变形量较小,见图 1-3 (c)。这种材料可认为是低塑性材料。

表 1-1 几种典型的应力-应变曲线及材料举例

图 号	变 形 与 断 裂 特 性	典 型 材 料 举 例
图 1-2	弹性变形、塑性屈服、均匀塑性变形、出现颈缩后的局集塑性变形。	正火、调质、退火的碳素结构钢,低合金结构钢。
图 1-3 (a)	只有弹性变形、脆断。	淬火高碳钢、玻璃、陶瓷等。
图 1-3 (b)	弹性变形、均匀塑性变形和出现颈缩后局集的塑性变形、断裂。	有色金属、经冷变形的钢、经低、中温回火的结构钢等。
图 1-3 (c)	弹性变形、均匀塑性变形和断裂。	高锰钢、铝青铜、锰青铜等。
图 1-3 (d)	弹性变形、颈缩后局集的塑性变形、断裂。	冷拔钢丝、受过强烈硬化的材料。
图 1-3 (e)	非线性弹性变形、均匀塑性变形、颈缩后局集的塑性变形、断裂。	纯铜、纯铝等。

1.3 脆性材料的拉伸性能

脆性材料,如玻璃、岩石、很多种陶瓷以及一些处于低温下的金属材料,在拉伸断裂前只发生弹性变形,而不发生塑性变形,其拉伸曲线如图 1-3 (a) 所示。在弹性变形阶段,应力与应变成正比,即

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-1)$$

式(1-1)中比例常数 E ,也就是图 1-3 (a) 中直线的斜率,通常称为弹性模量或杨氏模量 (Young's modulus)。公式(1-1)称为虎克定律 (Hook's Law)。若干工程材料的弹性模量列入表 1-2。

表 1-2 工程材料的弹性性能^[8]

材 料	E/GPa	ν	G/GPa	材 料	E/GPa	ν	G/GPa
铝 (Al)	70.3	0.345	26.1	氧化铝 (致密)	~ 415	—	—
镉 (Cd)	49.9	0.300	19.2	金钢石	~ 965	—	—
铬 (Cr)	279.1	0.210	115.4	铅玻璃	80.1	0.27	31.5
铜 (Cu)	129.8	0.343	48.3	尼龙 66	1.2 ~ 2.9	—	—
金 (Au)	78.0	0.44	27.0	聚碳酸酯	2.4	—	—
铁 (Fe)	211.4	0.293	81.6	聚乙烯 (高密度)	0.4 ~ 1.3	—	—
镁 (Mg)	44.7	0.291	17.3	有机玻璃 (聚甲基丙烯酸甲酯)	2.4 ~ 3.4	—	—
镍 (Ni)	199.5	0.312	76.0				
铌 (Nb)	104.9	0.397	37.5	聚丙烯	1.1 ~ 1.6	—	—
银 (Ag)	82.7	0.367	30.3	聚苯乙烯	2.7 ~ 4.2	—	—
钽 (Ta)	185.7	0.342	69.2	水晶 (熔凝石英)	73.1	0.170	31.2
钛 (Ti)	115.7	0.321	43.8	碳化硅	~ 470	—	—
钨 (W)	411.0	0.280	160.6	碳化钨	534.4	0.22	219.0
钒 (V)	127.6	0.365	46.7				

当拉伸时,试件发生轴向伸长,也同时发生横向收缩。将纵向应变 e_l 与横(径)向应变 e_t 之负比值表示为 ν ,即 $\nu = -e_t/e_l$, ν 称为泊松比(Poisson's ratio),它也是材料的弹性常数。若干材料的泊松比之值也列入表1-2。

表征脆性材料的力学性能参数有二:即弹性模量和脆性断裂强度。脆性材料的拉伸曲线可用公式(1-1)来描述,其适用范围的上限即断裂强度。可以设想,脆性材料的断裂强度等于、甚至低于弹性极限,因而断裂前不发生塑性变形。脆性材料的抗拉断裂强度低,但抗压断裂强度高,理论上抗压强度可达抗拉强度的8倍^[9]。因此,脆性材料在工程结构中成功地应用于承受压缩载荷的构件。

1.4 高塑性材料的拉伸性能(I)——连续塑性变形强化

本节介绍拉伸试验所能测定的力学性能指标;但在一般情况下,拉伸试验主要测定屈服强度、抗拉强度、延伸率和断面收缩率等四个指标。

1.4.1 工程应力-工程应变曲线

如果材料具有塑性变形(不可逆流动)的能力,且断裂前塑性变形较大,其工程应力-工程应变曲线如图1-4所示。可以看出,当应力很小时,是弹性变形阶段,此时应力与应变成正比。此后是一段光滑的曲线,对应于材料的均匀塑性变形过程。曲线继续上升直到最大的工程应力,然后下降,直到试件发生断裂。

工程应力-应变曲线之所以呈现先升后降的变化趋势,与工程应力的定义有关,并不代表材料的本性。为了理解这一点,需要联系试件在拉伸时的变形过程加以说明。当拉伸应力超过弹性极限时,便在试件的标距内的最弱部位产生塑性变形,并使该部位的材料发生形变强化,从而增大材料进一步塑性变形的抗力。这时,只有提高应力,才能在次弱的部位产生塑性变形,材料随即又在该处强化。因此,在应力-应变曲线上表现为随着应变的增大,

应力也在连续地升高,一直到b点,见图1-4。应当注意的是,拉伸时试件发生轴向伸长的同时,也发生横向收缩,引起试件横截面积的减小。因此,试件所受的真实应力较工程应力为大,见图1-4。随着载荷的增大,最后达到某一点,即b点,材料的变形强化已不能补偿由于横截面积的减小而引起的承载能力的降低,因而在工程应力-应变曲线上出现应力随应变增大而降低的现象。b点对应于局部塑性流动的 begin,进一步的塑性变形集中于试件上很小一段的局部区域,宏观上出现颈缩现象,见图1-5,最后在颈缩区断裂。因此,在b点以后,随颈缩区局部变形量的增大,载荷和工程应力下降,如图1-2和图1-4所示。

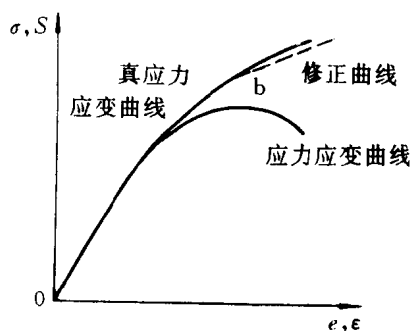


图1-4 连续硬化的高塑性材料的应力-应变曲线

1.4.2 拉伸性能

根据工程应力-应变曲线可以确定材料的拉伸性能,包括材料的强度、塑性和韧性。所谓强度是材料对塑性变形和断裂的抗力。塑性表示材料在断裂前发生的不可逆的变形量的多少。而

韧性则表示断裂前单位体积材料所吸收的变形和断裂能,即外力所作的功。

比例极限:它是应力和应变成严格的正比关系的上限应力值。

弹性极限:它是材料发生可逆的弹性变形的上限应力值;换言之,当应力低于弹性极限时,材料的变形是完全可逆的。对于大多数工程材料,比例极限接近或稍低于弹性极限;若材料显示非线性的弹性特性,见图1-3(e),则比例极限要比弹性极限低得多,以至于不存在比例极限。

屈服强度:当应力高于屈服强度时,材料发生较明显的塑性变形。对于连续塑性变形硬化的材料,工程中将屈服强度定义为产生0.2%残余伸长率时的应力,记为 $\sigma_{0.2}$ 。显然,屈服强度高于弹性极限。

比例极限和弹性极限可以认为是材料对非线性变形或极微量塑性变形的抗力。这些量在实验中很难测定。因此,在工程实践中要对上述两个性能指标重新进行定义,以便于实验测定,而又适合于工程应用。实验测定的细节将在2.4中介绍。

抗拉强度:定义为试件断裂前所能承受的最大工程应力,以前称为强度极限。取拉伸图上的最大载荷,即对应于b点的载荷,见图1-2,除以试件的原始截面积 A_0 ,即得抗拉强度,记为 $\sigma_b, \sigma_b = P_{\max}/A_0$ 。

延伸率:材料的塑性用延伸率(δ_k)和断面收缩率(Ψ_k)表示。延伸率按下述方法测定:拉伸试验前测定试件的标距 l_0 ,拉伸断裂后测得标距为 l_k ,然后按下式算出延伸率

$$\delta_k = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{\Delta l_k}{l_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

由图1-5可见,在颈缩开始前,试件发生均匀伸长,伸长量为 Δl_b ;颈缩开始后,塑性变形集中在颈缩区,由颈缩区集中的塑性变形而引起的伸长量为 Δl_n 。显然, $\Delta l_k = \Delta l_b + \Delta l_n$;相应地,延伸率也是均匀伸长率 δ_b 和局集伸长率 δ_n 之和,即

$$\delta_k = \frac{\Delta l_b + \Delta l_n}{l_0} = \delta_b + \delta_n \quad (1-3)$$

实验研究表明,均匀伸长率是取决于合金基体相状态的常数^[10],而局集伸长率 δ_n 则与试件的几何有关^[11]。

$$\delta_n = \gamma \sqrt{A_0}/l_0 \quad (1-4)$$

因此,材料的延伸率与试件几何有关,见图1-6。由式(1-4)和图1-6,可以看出,随着 l_0 的增大,局集伸长率对延伸率的贡献愈小,延伸率 δ_k 也愈小。当 l_0 很大时, $\delta_n \rightarrow 0$

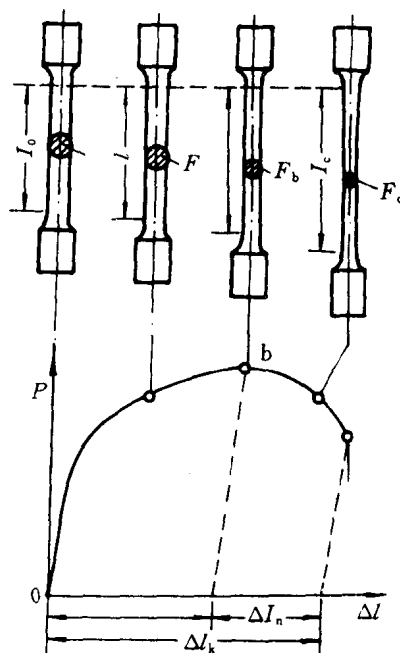


图1-5 拉伸过程中试件截面变化情况示意图

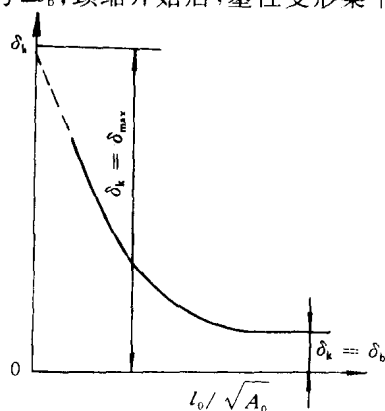


图1-6 试件几何尺寸(l_0/A_0)对延伸率 δ_k 的影响