

内容简介

本书主要介绍工程材料在各种载荷与环境条件下的力学性能。重点阐述工程材料力学性能的宏观规律及其微观本质,测试与评定方法及其在工程实际中的应用。

本书为材料科学与工程类各专业大学本科生教材,也可供有关专业的学生以及从事工程材料研究和加工、机械零件与结构设计、机械装备失效分析等专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料力学性能/刘瑞堂主编.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.8

材料科学与工程系列教材(二)

ISBN 7-5603-1651-4

I.材... II.刘... III.工程材料-力学性能-高等学校-教材 IV.TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 048650 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真 0451—6414749
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 17.625 字数 405 千字
版 次 2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-1651-4/TB·21
印 数 1~3 000
定 价 20.00 元

序 言

材料科学与工程系列教材是由哈尔滨工业大学出版社组织国内部分高校专家学者共同编写的大型系列教学丛书,其中第一系列、第二系列教材已分别被列为国家新闻出版总署“九五”、“十五”重点图书出版计划。第一系列教材9种已于1999年陆续出版。编写本系列教材丛书的基本指导思想是:总结已有、通向未来、面向21世纪,以优化教材链为宗旨,依照为培养材料科学人才提供一个较为广泛的知识平台的原则,并根据培养目标,确定书目、编写大纲及主干内容。为确保图书品位,体现较高水平,编审委员会全体成员对国内外同类教材进行了细致的调查研究,广泛征求各参编院校第一线任课教师的意见,认真分析国家教育部新的学科专业目录和全国材料工程类专业教学指导委员会第一届全体会议的基本精神,进而制定了具体的编写大纲。在此基础上,聘请了国内一批知名的专家,对本系列教材书目和编写大纲审查认定,最后确定各册的体系结构。经过全体编审人员的共同努力,第二系列教材即将出版发行,我们热切期望这套大型系列教学丛书能够满足国内高等学校材料工程类专业教育改革发展的需要,并且在教学实践中得以不断充实、完善和发展。

在本书的编写过程中,注意突出了以下几方面特色:

1. 根据科学技术发展的最新动态和我国高等学校专业学科归并的现实需求,坚持面向一级学科、加强基础、拓宽专业面、更新教材内容的基本原则。
2. 注重优化课程体系,探索教材新结构,即兼顾材料工程类学科中金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料共性与个性的结合,实现多学科知识的交叉与渗透。
3. 反映当代科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术、新工艺,突出反映教材内容的现代化。
4. 注重协调材料科学与材料工程的关系,既加强材料科学基础的内容,又强调材料工程基础,以满足培养宽口径材料学人才的需要。
5. 坚持体现教材内容深广度适中、够用的原则,增强教材的适用性和针对性。
6. 在系列教材编写过程中,进行了国内外同类教材对比研究,吸取了国内外同类教材的精华,重点反映新教材体系结构特色,把握教材的科学性、系统性和适用性。

此外,本系列教材还兼顾了内容丰富、叙述深入浅出、简明扼要、重点突出等特色,能充分满足少学时教学的要求。

参加本系列教材编审工作的单位有:清华大学、哈尔滨工业大学、北京科技大学、北京航空航天大学、北京理工大学、哈尔滨工程大学、北京化工大学、燕山大学、哈尔滨理工大

学、华东船舶工业学院、北京钢铁研究总院等 22 所院校 100 余名专家学者,他们为本系列教材的编审付出了大量心血。在此,编审委员会对这些同志无私的奉献致以崇高的敬意。此外,编审委员会特别鸣谢中国科学院院士肖纪美教授、中国工程院院士徐滨士少将、中国工程院院士杜善义教授,感谢他们对本系列教材编审工作的指导与大力支持。

限于编审者的水平,疏漏和错误之处在所难免,欢迎同行和读者批评指正。

材料科学与工程系列教材编审委员会

2001 年 7 月

前 言

工程材料力学性能是关于材料强度的一门科学,其研究对象主要是材料受外力作用后的力学行为规律及其物理本质和评定方法。《工程材料力学性能》是材料科学与工程类专业的主干课程之一,其内容包括工程材料的基本力学性能;弹性变形、塑性变形、断裂和断裂韧性原理;与零件工作条件相关的力学性能:低温脆性、疲劳、蠕变和环境介质作用下的力学性能,以及工程非金属材料,如复合材料、高分子材料和无机非金属材料的力学性能。本课程的教学目的在于使学生掌握工程材料力学性能的基本理论和评价材料的力学性能指标及其测试方法,为正确选择和合理使用材料,优化和改进加工工艺以充分发挥材料的性能潜力,创制新材料、新工艺以及开展零构件失效分析等奠定必要的基础。本书就是为达到上述目的而编写的,其内容以金属材料力学性能为主,对几种主要的工程非金属材料分章单独介绍。因此,本书仍保留了金属力学性能教材的传统体系。在内容的组织上,努力做到既体现当代材料强度领域的新成就,如位错理论对材料力学性能规律的理解,断裂韧性原理及应用等,又适当介绍对学科发展曾起到重要作用的经典理论,以体现学科发展历程,启迪学生的创造性思维,并力图将基本理论与工程实际相结合,以培养学生理论联系实际和灵活运用知识的能力。

考虑到本书不仅可作为本科生教材,还可以作为研究生学位论文期间以及正在从事科研与生产实践的工程技术人员的参考书,因此,尽管近年来课程的学时安排趋于压缩,也只对其局部内容进行了删节和调整,所以篇幅显得稍长。应用本教材时,可根据实际需要和学时情况,适当删节。

由于时间紧迫,为应急于今年秋季教学使用,书中部分内容取材于国内外曾经和正在使用的有关教材(见书末参考书目),并且移植了其中的部分段落。书中还吸收了近期材料力学性能研究的部分新成果,也是由于时间关系,未能将这些文献一一列出。在这里谨向这些参考书和文献的作者表示衷心的感谢。

参加本书编写的有刘瑞堂(第一至九章),刘锦云(第十章),刘文博(第十一至十四章)。全书由刘瑞堂统稿定稿。由于作者学术水平所限,书中谬误在所难免,恳请采用本书的老师和读者不吝赐教。

作 者

2001年7月

来信请寄:哈尔滨工业大学出版社 张秀华(收)

地 址:哈尔滨市南岗区教化街21号

邮 编:150006

目 录

第一章 静载拉伸试验	(1)
1.1 应力-应变曲线	(1)
1.2 拉伸性能指标	(3)
1.3 塑性指标及其意义	(5)
习 题	(7)
第二章 弹性变形	(8)
2.1 弹性变形及其物理本质	(8)
2.2 弹性性能的工程意义	(12)
2.3 弹性不完整性	(14)
习 题	(18)
第三章 塑性变形	(19)
3.1 金属材料塑性变形机制与特点	(19)
3.2 屈服现象及其本质	(20)
3.3 真实应力-应变曲线及形变强化规律	(22)
3.4 应力状态对塑性变形的影响	(27)
习 题	(42)
第四章 断裂	(43)
4.1 延性断裂	(43)
4.2 解理断裂	(48)
4.3 沿晶断裂	(52)
4.4 应力状态对断裂的影响	(53)
习 题	(54)
第五章 缺口试样的力学性能	(55)
5.1 缺口顶端应力、应变分析	(55)
5.2 缺口试样静载力学性能	(57)
5.3 缺口试样在冲击载荷下的力学性能	(60)
5.4 低温脆性及其评定	(64)
5.5 抗脆断设计及其试验	(68)
习 题	(70)
第六章 断裂韧性基础	(71)
6.1 Griffith 断裂理论	(71)

6.2	裂纹扩展的能量判据	(73)
6.3	裂纹顶端的应力场	(75)
6.4	裂纹顶端的塑性区	(78)
6.5	应力强度因子的塑性区修正	(81)
6.6	断裂韧度 K_{IC} 的测试	(82)
6.7	影响断裂韧性的因素	(86)
6.8	弹塑性条件下的断裂韧性概述	(93)
习 题		(93)
第七章 疲劳		(95)
7.1	变动载荷(应力)和疲劳破坏的特征	(95)
7.2	高周疲劳	(97)
7.3	低周疲劳	(106)
7.4	疲劳裂纹扩展	(116)
7.5	疲劳裂纹萌生和扩展机理	(123)
7.6	改善疲劳强度的方法	(126)
习 题		(128)
第八章 材料在环境介质作用下的断裂		(129)
8.1	应力腐蚀开裂	(129)
8.2	氢脆	(135)
8.3	腐蚀疲劳	(140)
8.4	其他环境脆化问题	(144)
习 题		(148)
第九章 金属高温力学性能		(149)
9.1	金属的蠕变	(150)
9.2	金属高温力学性能指标	(152)
9.3	其他高温力学性能	(158)
习 题		(159)
第十章 磨损		(160)
10.1	磨损类型	(160)
10.2	磨损试验方法	(162)
10.3	磨损机理	(165)
习 题		(177)
第十一章 复合材料的力学性能		(178)
11.1	单向复合材料的力学性能	(178)
11.2	复合材料层合板的力学性能	(187)
11.3	复合材料的断裂、疲劳和冲击性能	(196)
11.4	短纤维复合材料(SFC)的力学性能	(206)
习 题		(218)

第十二章	聚合物的力学性能	.....	(219)
12.1	聚合物的结构特点与力学状态	.....	(219)
12.2	聚合物的时间效应和时-温等效原理	.....	(224)
12.3	聚合物的力学性能	.....	(225)
习 题	.....		(230)
第十三章	陶瓷材料的力学性能	.....	(231)
13.1	陶瓷材料的弹性性能	.....	(231)
13.2	陶瓷材料的强度及其影响因素	.....	(235)
13.3	陶瓷材料的断裂韧性与热抗震性	.....	(238)
习 题	.....		(240)
第十四章	混凝土的力学性能	.....	(241)
14.1	一般受力破坏机理	.....	(241)
14.2	基本力学性能	.....	(242)
习 题	.....		(261)
附 录			
附录 1	常用计量单位的换算	.....	(262)
附录 2	常用应力强度因子 K_I	.....	(262)
附录 3	常用金属力学性能试验方法国家标准及其适用范围	.....	(268)
参考文献	.....		(271)

第一章 静载拉伸试验

静载拉伸试验是最基本的、应用最广的材料力学性能试验方法。一方面,由静载拉伸试验测定的力学性能指标,可以作为工程设计、评定材料和优选工艺的依据,具有重要的工程实际意义,另一方面,静载拉伸试验可以揭示材料的基本力学行为规律,也是研究材料力学性能的基本试验方法。本章主要介绍由静载拉伸试验得到的应力-应变曲线和材料的基本力学性能指标。

1.1 应力-应变曲线

静载拉伸试验所用试样一般为光滑圆试样^①,试样工作长度(标长) $l_0 = 10d_0$, d_0 为原始直径。静拉伸试验,通常是在室温和轴向加载条件下进行的,其特点是试验机加载轴线与试样轴线重合,载荷缓慢施加,应变与应力同步,试样应变速率 $\leq 10^{-1}/s$ 。在静拉伸试验得到的应力-应变曲线上,记载着材料力学行为的基本特征,因此,应力-应变曲线成为理解材料基本力学行为的基础和信息源。材料应力-应变曲线的应力和应变,一般用条件应力 σ 和条件应变 δ 表示

$$\sigma = P/A_0 \quad (1-1)$$

$$\delta = \Delta l/l_0 \quad (1-2)$$

式中, P 为载荷, Δl 为试样伸长量, $\Delta l = l - l_0$, l_0 为试样原始标长, l 为与 P 相对应的标长部分的长度, A_0 为原始截面积。在拉伸过程中,试样长度增加,截面积减小,但在上述计算中,假设试样截面积和长度保持不变,因此称 σ 为条件应力或工程应力, δ 为条件应变或工程应变。下面介绍工程材料常见的几种应力-应变曲线。

1.1.1 拉伸脆性材料应力-应变曲线

图 1-1 为工程脆性材料的应力-应变曲线,其行为特点是应变与应力单值对应,成直线比例关系,只发生弹性变形,不发生塑性变形,在最高载荷点处断裂,形成平断口,断口平面与拉力轴线垂直。应力-应变曲线与横轴夹角的大小表示材料对弹性变形的抗力,用弹性模量 E 表示

$$E = \operatorname{tg} \alpha \quad (1-3)$$

工程上大多数玻璃、陶瓷、岩石,横向交联很好的聚合物、淬火状态的高碳钢和普通灰铸铁等均具有此类应力-应变曲线。

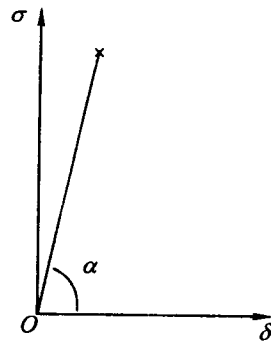


图 1-1 脆性材料的应力-应变曲线

^① 其他试样形式及详细规定可参见本书附录 3 中所列出的相应试验标准。

1.1.2 塑性材料应力-应变曲线

图 1-2 为工程塑性材料应力-应变曲线的几种形式。图 1-2(a) 为最常见的金属材料应力-应变曲线, Oa 为弹性变形阶段, 其行为特点与图 1-1 相同。在 a 点偏离直线关系, 进入弹-塑性阶段, 开始发生塑性变形, 过程沿 abk 进行。开始发生塑性变形的应力称为屈服点。屈服以后的变形包括弹性变形和塑性变形, 如在 m 点卸载, 应力沿 mn 降至零, m 点所对应的应变 Om' 为总应变变量, 在卸载后恢复的部分 $m'n$ 为弹性应变变量, 残留

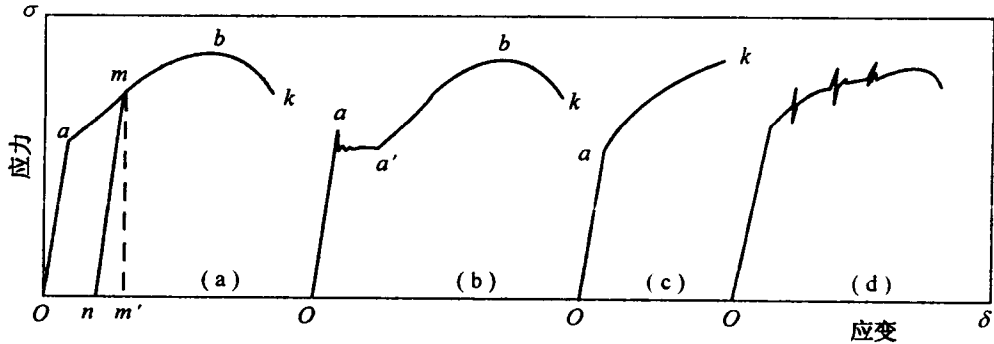


图 1-2 塑性材料应力-应变曲线

部分 nO 为塑性应变变量。如果重新加载, 继续拉伸试验, 应力-应变曲线沿 nm 上升, 至 m 点后沿 mbk 进行, nm 与 Oa 平行, 属于弹性变形阶段, 塑性变形在 m 点开始, 其相应的应力值高于首次加载时塑性变形开始的应力值, 这表明材料经历一定的塑性变形后, 其屈服应力升高了, 这种现象称为应变强化或加工硬化。 b 点为应力-应变曲线的最高点, b 点之前, 曲线是上升的, 与 ab 段曲线相对应的试样变形是整个工作长度内的均匀变形, 即在试样各处截面均匀缩小。从 b 点开始, 试样的变形便集中于某局部地方, 即试样开始集中变形, 出现“缩颈”。材料经均匀变形后出现集中变形的现象称为颈缩。试样的颈缩在 b 点开始, 颈缩开始后, 试样的变形只发生在颈部的有限长度上, 试样的承载能力迅速降低, 按式(1-1)计算的工程应力值也降低, 应力-应变曲线沿 bk 下降。最后在 k 点断裂, 形成杯状断口。工程上很多金属材料, 如调质钢和一些轻合金都具有此类应力-应变行为。

图 1-2(b) 为具有明显屈服点材料的应力-应变曲线, 与图 1-2(a) 相比, 不同之处在于出现了明显屈服点 aa' , 这种屈服点在应力-应变曲线上有时呈屈服平台, 有时呈齿状, 相应的应变变量在 1% ~ 3% 范围。退火低碳钢和某些有色金属具有此类应力-应变行为。

图 1-2(c) 为拉伸时不出现颈缩的应力-应变曲线, 只有弹性变形的 oa 和均匀塑性变形的 ak 阶段。某些塑性较低的金属如铝青铜就是在未出现颈缩前的均匀变形过程中断裂的, 具有此类应力-应变曲线。还有些形变强化能力特别强的金属, 如 ZGMn13 等奥氏高锰钢也具有此类应力-应变行为, 不但塑性大, 而且形变强化潜力大。

图 1-2(d) 为拉伸不稳定型材料的应力-应变曲线, 其变形特点是在形变强化过程中

出现多次局部失稳,原因乃是孪生变形机制的参与,当孪生应变速率超过试验机夹头运动速度时,导致局部应力松弛,相应地,在应力-应变曲线上出现齿形特征。某些低溶质固溶体铝合金及含杂质的铁合金具有此类应力-应变行为。

由上述可见,根据拉伸试验可以判断材料呈宏观脆性还是塑性,塑性的大小,对弹性变形和塑性变形的抗力以及形变强化能力的大小等。此外,还可以反映断裂过程的某些特点。但在工程上,拉伸试验被广泛用来测定材料的常规力学性能指标,为合理评定、鉴别和选用材料提供依据。

1.2 拉伸性能指标

材料拉伸性能指标,又称力学性能指标,用应力-应变曲线上反映变形过程性质发生变化的临界值表示。力学性能指标可分为二类:反映材料对塑性变形和断裂的抗力的指标,称为材料的强度;反映材料塑性变形能力的指标,称为材料的塑性。

1.2.1 屈服强度

原则上,材料的屈服强度应理解为开始塑性变形时的应力值。但实际上,对于连续屈服的材料,这很难作为判定材料屈服的准则,因为工程中的多晶体材料,其各晶粒的位向不同,不可能同时开始塑性变形,当只有少数晶粒发生塑性变形时,应力-应变曲线上难以“觉察”出来。只有当较多晶粒发生塑性变形时,才能造成宏观塑性变形的效果。因此,显示开始塑性变形时应力水平的高低,与测试仪器的灵敏度有关。因此,工程上采用规定一定的残留变形量的方法,确定屈服强度。

工程上常用的屈服标准有三种:

(1)比例极限 应力-应变曲线上符合线性关系的最高应力值,用 σ_p 表示,超过 σ_p 时,即认为材料开始屈服。

(2)弹性极限 试样加载后再卸载,以不出现残留的永久变形为标准,材料能够完全弹性恢复的最高应力值,用 σ_e 表示,超过 σ_e 时,即认为材料开始屈服。

上述二定义并非完全等同,有的材料,如高强度晶须,可以超出应力-应变的线性范围,发生较大的弹性变形。一般材料中弹性极限稍高于比例极限。工程上之所以要区分它们,是因为有些设计,如火炮筒材料,要求有高的比例极限,而另一些情况,如弹簧材料,要求有高的弹性极限。

(3)屈服强度 以规定发生一定的残留变形为标准,如通常以0.2%残留变形的应力作为屈服强度,用 $\sigma_{0.2}$ 或 σ_{ys} 表示。

上述定义都是以残留变形为依据的,彼此区别在于规定的残留变形量不同。现行国家标准将屈服强度规范为三种情况。

1. 规定非比例伸长应力(σ_p) 试样在加载过程中,标距长度内的非比例伸长量达到规定值(以%表示)的应力,如 $\sigma_{p0.01}$, $\sigma_{p0.05}$ 等。

σ_p 通常用图解法测定,对有明显弹性直线段的材料,可利用自动记录的载荷-伸长($P-\Delta l$)曲线,如图1-3,自弹性直线段与伸长轴的交点O起,截取一相应于规定非比例

伸长的线段 OC ($\overline{OC} = n \cdot L_e \cdot \epsilon_p$, 其中 n 为拉伸图放大倍数, L_e 为引伸计标距, ϵ_p 为规定的非比例伸长率), 过 C 点作弹性直线段的平行线 CA , 交曲线于 A 点, A 点对应的载荷 P_p 即为所测定的非比例伸长载荷, 规定非比例伸长应力由下式计算

$$\sigma_p = P_p / A_0 \quad (1-4)$$

2. 规定残余伸长应力 (σ_r) 试样卸载后, 其标距部分的残余伸长达到规定比例时的应力, 常用的为 $\sigma_{0.2}$, 即规定残余伸长率为 0.2% 时的应力值。

测定 σ_r 通常用卸载法 (如图 1-4), 即当卸载后所得残余伸长为规定残余伸长载荷 P_r , 规定残余伸长应力由下式计算

$$\sigma_r = P_r / A_0 \quad (1-5)$$

3. 规定总伸长应力 (σ_t) 试样标距部分的总伸长 (弹性伸长与塑性伸长之和) 达到规定比例时的应力。应用较多的规定总伸长率为 0.5%、0.6% 和 0.7%, 相应地, 规定总伸长应力分别记为 $\sigma_{0.5}$ 、 $\sigma_{0.6}$ 和 $\sigma_{0.7}$ 。

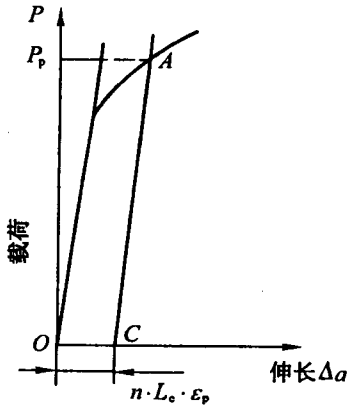


图 1-3 图解法测 σ_p

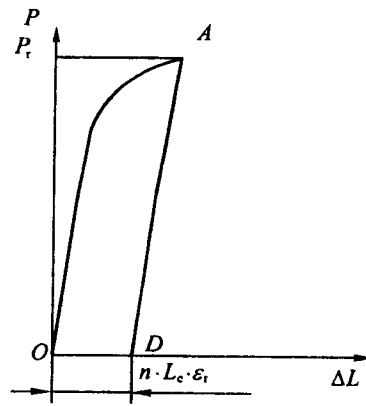


图 1-4 卸载法测 σ_r

测定 σ_t 也用图解法, 操作与测定 σ_p 相同, 拉伸图横轴放大倍数不小于 50 倍。如图 1-5 所示, 在 $P-\Delta l$ 曲线上, 自曲线原点 O 起, 截取相应于规定总伸长的线段 OE ($\overline{OE} = n \cdot L_e \cdot \epsilon_t$, 式中 ϵ_t 为规定总伸长率), 过 E 点作纵轴平行线 EA 交曲线于 A 点, A 点对应的载荷即为规定总伸长的载荷, 规定总伸长应力由下式计算

$$\sigma_t = P_t / A_0 \quad (1-6)$$

在上述屈服强度的测定中, σ_p 和 σ_t 是在试样加载时直接从应力-应变 (载荷-位移) 曲线上测量的, 而 σ_r 则要求卸载测量。由于卸载法测定规定残余伸长应力 σ_r 比较困难, 而且效率低, 所以, 在材料屈服抗力评定中, 更趋于采用 σ_p 和 σ_t 。

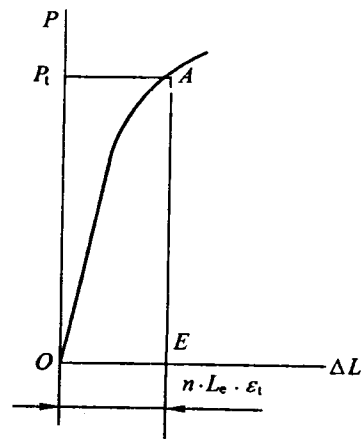


图 1-5 图解法测 σ_t

σ_t 在测试上又比 σ_p 方便, 而且

不失 σ_p 表征材料屈服特征的能力,所以,可以用 σ_s 代替 σ_p ,尤其在大规模工业生产中,采用 σ_s 的测定方法,可以提高效率。

对于不连续屈服即具有明显屈服点的材料,其应力-应变曲线上的屈服平台就是材料屈服变形的标志,因此,屈服平台对应的应力值就是这类材料的屈服强度,记作 σ_{ys} ,按下式计算

$$\sigma_{ys} = P_y / A_0$$

式中, P_y 为物理屈服时的载荷或下屈服点对应的载荷。

屈服强度是应用最广的一个性能指标。因为任何机械零件在工作过程中,都不允许发生过量的塑性变形,所以,机械设计中,把屈服强度作为强度设计和选材的依据。

1.2.2 抗拉强度

材料的极限承载能力用抗拉强度表示。拉伸试验时,与最高载荷 P_b 对应的应力值 σ_b 即为抗拉强度

$$\sigma_b = P_b / A_0 \quad (1-7)$$

对于脆性材料和不形成颈缩的塑性材料,其拉伸最高载荷就是断裂载荷,因此,其抗拉强度也代表断裂抗力。对于形成颈缩的塑性材料,其抗拉强度代表产生最大均匀变形的抗力,也表示材料在静拉伸条件下的极限承载能力。对于钢丝绳等零件来说,抗拉强度是一个比较有意义的性能指标。抗拉强度很容易测定,而且重现性好,与其他力学性能指标如疲劳极限和硬度等存在一定关系,因此,也作为材料的常规力学性能指标之一用于评价产品质量和工艺规范等。

1.2.3 实际断裂强度

拉伸断裂时的载荷 P_K 除以断口处的真实截面积 A_K 所得的应力值称为实际断裂强度 S_K

$$S_K = P_K / A_K \quad (1-8)$$

注意,在这里采用的是试样断裂时的真实截面积, S_K 是真实应力,其意义是表征材料对断裂的抗力,因此,有时也称为断裂真应力。

1.3 塑性指标及其意义

材料的塑性变形能力,即塑性用延伸率和断面收缩率表示。

1. 延伸率 试样断裂后的总延伸率称为极限延伸率,用 δ_k 表示,其条件应变值用下式计算

$$\delta_k = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中, l_k 为断裂后的标长。

对于形成颈缩的材料,其伸长量 $\Delta l_k = l_k - l_0$ 包括颈缩前的均匀伸长 Δl_0 和颈缩后

的集中伸长 Δl_c , 即 $\Delta l_k = \Delta l_b + \Delta l_c$ 。因此, 延伸率也相应地由均匀延伸率 δ_b 和集中延伸率组成 δ_c , 即

$$\delta_k = \delta_b + \delta_c$$

研究表明, 均匀延伸率取决于材料的冶金因素, 而集中延伸率与试样几何尺寸有关, 即

$$\delta_c = \beta \sqrt{A_0} / l_0$$

可以看出试样 l_0 越大, 集中变形对总延伸率的贡献越小。由此产生了一个问题, 即为了使同一材料的试验结果具有可比性, 如何排除试样几何尺寸的影响? 为此必须对试样尺寸进行规范化, 这只要使 $\sqrt{A_0} / l_0$ 为一常数即可。工程上规定了两种标准拉伸试样, $l_0 / \sqrt{A_0} = 11.3$ 和 5.65 。对于圆形截面拉伸试样, 相应于 $l_0 = 10d_0$ 和 $l_0 = 5d_0$, 分别称为 10 倍和 5 倍试样。相应地, 延伸率分别用 δ_{10} 和 δ_5 表示。由上述可见, $\delta_5 > \delta_{10}$ 。

2. 断面收缩率 试样断裂后所得总断面收缩率称为材料的极限断面收缩率, 用 ψ 表示, 其条件应变值由下式计算

$$\psi_k = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中, A_k 为试样断口处的最小截面积。与延伸率一样, 断面收缩率 ψ_k 也由两部分组成, 均匀变形阶段的断面收缩率和集中变形阶段的断面收缩率, 但与延伸率不同的是, 断面收缩率与试样尺寸无关, 只决定于材料性质。

3. 塑性指标间的关系 这要对颈缩前后分别讨论。对于颈缩前, 根据体积不变条件

$$l_0 A_0 = l A$$

$$l = l_0 + \Delta l = l_0 \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right) = l_0 (1 + \delta)$$

$$A = A_0 - \Delta A = A_0 \left(1 - \frac{\Delta A}{A_0}\right) = A_0 (1 - \psi)$$

于是得条件塑性指标间的关系

$$1 + \delta = \frac{1}{1 - \psi}$$

或

$$\delta = \frac{\psi}{1 - \psi} \quad (1-11)$$

上式表明, 在均匀变形阶段 δ 恒大于 ψ 。

上面的讨论, 塑性指标都采用条件应变。在拉伸过程中每一时刻的真应变 $d\epsilon$ 为

$$d\epsilon = dl/l$$

试样从 l_0 拉伸至 l 时, 完成的真应变为

$$\epsilon = \int d\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1-12)$$

于是真应变与条件应变的关系为

$$\epsilon = \ln(1 + \delta) = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi}\right) \quad (1-13)$$

在颈缩开始以后, 颈部的变形是非常复杂的, 此时, 条件塑性指标之间已不存在上式

关系,但真实塑性应变与条件断面收缩率之间尚有如下关系

$$\epsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_1} = 2 \ln \frac{d_0}{d} = \ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \quad (1-14)$$

因此,试样断裂后,可通过测量断面收缩率 ψ_k ,求得真实极限塑性 ϵ_f

$$\epsilon_f = \ln \left(\frac{1}{1-\psi_k} \right) \quad (1-15)$$

4. 塑性指标的意义 延伸率和断面收缩率是工程材料的重要性能指标。设计零件时,不但要选择材料,提出强度要求,以进行强度计算,同时还要提出对材料塑性的要求。如汽车齿轮箱的传动轴,选用中碳钢调质处理,要求 $\sigma_{0.2}$ 为 400~500MPa,同时还要求 δ 不小于 6%~7%。这里对塑性的要求是出于安全考虑。零件工作过程中,难免偶然过载,或者应力集中部位的应力水平超过材料屈服强度,这时,材料如果具有一定的塑性,则可用局部塑性变形松弛或缓冲集中应力,避免断裂,保证安全。

另外,金属塑性变形能力是压力加工和冷成形工艺的基础。冷成形过程中,如冷弯、冲压等,为保证金属的流动性,必须具有足够的塑性,尤其材料均匀塑性变形能力的大小十分重要。

习 题

1. 工程金属材料的应力-应变曲线有几种典型形式? 其主要特征如何? 各为什么材料所特有?
2. 何谓材料的强度? 塑性?
3. 比较比例极限,弹性极限和屈服强度之异同。说明这几个强度指标的实际意义。
4. 常用的标准拉伸试样有 5 倍试样和 10 倍试样,其延伸率分别用 δ_5 和 δ_{10} 表示,说明为什么 $\delta_5 > \delta_{10}$ 。
5. 说明强度指标和塑性指标在机械设计中的作用。
6. 说明均匀塑性应变 ϵ_b 的实际意义。

第二章 弹性变形

材料受外力作用发生尺寸和形状的变化,称为变形。外力去除后,随之消失的变形为弹性变形,剩余的(即永久性的)变形为塑性变形。本章讨论弹性变形及其本质。

弹性变形的重要特征是其可逆性,即受力作用后产生变形,卸除载荷后,变形消失。这反映了弹性变形决定于原子间结合力这一本质属性。

2.1 弹性变形及其物理本质

弹性变形是原子系统在外力作用下离开其平衡位置达到新的平衡状态的过程,因此,对弹性变形的讨论,必须从原子结合力模型开始。

2.1.1 弹性变形过程

在平衡状态下,晶体中的原子处于其平衡位置,在平衡位置上的原子之间的作用力——吸引力和排斥力是平衡的。各原子之间保持着一定的距离。对于以金属键结合为主的晶体而言,可以认为吸引力是金属正离子与公有电子间库仑引力的作用结果,显然这是一个长程力,其作用范围比原子尺寸大得多。而排斥力来源于金属离子之间以及同性电子之间的排斥作用,属于短程力,在原子间距离扩大时,其作用很小,但当原子彼此靠近时,即显示出其主导作用。说明原子间结合力的双原子模型如图 2-1 所示。当吸引力与排斥力相平衡时,原子即处于平衡位置。受外力作用,原子间距拉大时,原子间作用力的合力表现为吸引力,而当原子间距减小时,表现为排斥力。作为原子间作用力的吸引力或排斥力的作用是恢复原子的平衡位置。外力引起的原子间距的变化,即位移,在宏观上就是所谓弹性变形。外力去除后,原子复位,位移消失,弹性变形消失,从而表现了弹性变形的可逆性。

原子间作用力 P 随原子间距 r 的变化而变化,其关系为

$$P = \frac{A}{r^2} - \frac{B}{r^4} \quad (2-1)$$

式中, A 和 B 分别为与原子本性和晶格类型有关的常数。式中第一项为引力,第二项为斥力。该式表明原子间作用力与原子间距并不成线性关系,而是抛物线。这在本质上反映了 Hooke 定律的近似性。在外力不很大时,原子偏离平衡位置不远,原子间作用力曲线的起始段,可近似视为直线,因此, Hooke 定律表达的外力与位移的关系近似为直线关系。

弹性模量 E 本质上是原子间结合力曲线的斜率,因此,弹性模量随变形量的变化也

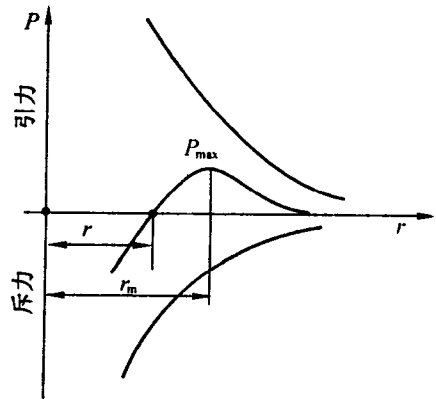


图 2-1 原子间作用力双原子模型

不是一个常数。但通常金属晶体弹性变形量很小,弹性模量只是原子间作用力在平衡位置处的斜率,可以认为是一个常数。

由上述可见,弹性性能与特征是原子间结合力的宏观体现,本质上决定于晶体的电子结构,而不依赖于显微组织,因此,弹性模量是对组织不敏感的性能指标。

由图 2-1,当 $r = r_m$ 时,原子间作用力合力表现引力,而且出现极大值 P_{max} ,如果外力达到 P_{max} ,就可以克服原子间的引力而将它们拉开。这就是晶体在弹性状态下的断裂强度,即理论正断强度,相应的弹性变形量也是理论值。实际中由于晶体中含有缺陷如位错,在弹性变形量尚小时的应力足以激活位错运动,而代之以塑性变形,所以实际上可实现的弹性变形量不会很大。对于脆性材料,由于对应力集中敏感,应力稍大时,缺陷处的集中应力即可导致裂纹的产生与扩展,使晶体在弹性状态下断裂。

2.1.2 Hooke 定律

物体在弹性状态下应力与应变之间的关系用 Hooke 定律描述,其常见形式为

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2-2)$$

所表达的是各向同性体在单轴加载方向上的应力 σ 与弹性应变 ϵ 间的关系。须知,在加载方向上的变形例如伸长,必然导致与加载方向垂直的方向上的收缩。对于复杂应力状态以及各向异性体上的弹性变形,情况更要复杂,这需要用广义 Hooke 定律描述。

受力体中任一点的应力状态可用其单元体上的 9 个应力分量表示,如图 2-2 所示。切应力角标第一个字母表示应力所在平面的法线方向,第二个字母表示应力的方向,并且规定正面的正方向为正,负面的负方向也为正。其中 6 个切应力分量 $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ 中,根据切应力互等原理,有 $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$,故 9 个应力分量中,只有 6 个独立应力分量。相应的正应变和切应变也只有 6 个独立应变分量: $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}$ 和 γ_{zx} 。应变分量角标含义与应力分量相同。每一应力分量都可表示成 6 个应变分量的线性函数,即

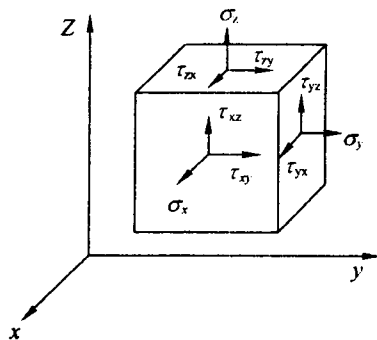


图 2-2 受力体中一点的应力表示法

其中 6 个切应力分量 $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ 中,根据切应力互等原理,有 $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$,故 9 个应力分量中,只有 6 个独立应力分量。相应的正应变和切应变也只有 6 个独立应变分量: $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}$ 和 γ_{zx} 。应变分量角标含义与应力分量相同。每一应力分量都可表示成 6 个应变分量的线性函数,即

$$\begin{aligned} \sigma_x &= C_{11} \epsilon_x + C_{12} \epsilon_y + C_{13} \epsilon_z + C_{14} \gamma_{xy} + C_{15} \gamma_{yz} + C_{16} \gamma_{zx} \\ \sigma_y &= C_{21} \epsilon_x + C_{22} \epsilon_y + C_{23} \epsilon_z + C_{24} \gamma_{xy} + C_{25} \gamma_{yz} + C_{26} \gamma_{zx} \\ \sigma_z &= C_{31} \epsilon_x + C_{32} \epsilon_y + C_{33} \epsilon_z + C_{34} \gamma_{xy} + C_{35} \gamma_{yz} + C_{36} \gamma_{zx} \\ \tau_{xy} &= C_{41} \epsilon_x + C_{42} \epsilon_y + C_{43} \epsilon_z + C_{44} \gamma_{xy} + C_{45} \gamma_{yz} + C_{46} \gamma_{zx} \\ \tau_{yz} &= C_{51} \epsilon_x + C_{52} \epsilon_y + C_{53} \epsilon_z + C_{54} \gamma_{xy} + C_{55} \gamma_{yz} + C_{56} \gamma_{zx} \\ \tau_{zx} &= C_{61} \epsilon_x + C_{62} \epsilon_y + C_{63} \epsilon_z + C_{64} \gamma_{xy} + C_{65} \gamma_{yz} + C_{66} \gamma_{zx} \end{aligned} \quad (2-3)$$

此即广义虎克定律,式中 $C_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, 6)$, 是应力分量与应变分量间的比例系数,称为刚度常数。也可将任一应变分量写成应力分量的关系式,比例系数用 S_{ij} 表示, S_{ij} 称为

柔度常数。由此可见,广义虎克定律中刚度常数和柔度常数各为 36 个。可以证明,即使各向异性程度最大的晶体如三斜晶系,也存在 $C_{ij} = C_{ji}$ 的对称关系,所以, 36 个弹性常数中只有 21 个是独立的。随着晶体对称性的提高, 21 个常数中有些彼此相等或为零,独立的弹性常数更少,直至在对称性最高的各向同性体中,就只有 2 个独立的弹性常数了,即

$$\begin{array}{ccccccc}
 S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 & \\
 & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 & \\
 & & S_{11} & 0 & 0 & 0 & \\
 & & & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 & 0 & (2-4) \\
 & & & & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 & \\
 & & & & & 2(S_{11} - S_{12}) &
 \end{array}$$

各晶系的独立弹性常数个数如表 2.1 所列。

表 2.1 晶体结构与独立弹性常数个数

晶体结构	独立弹性常数个数
三斜晶系	21
单斜晶系	13
斜方晶系	9
四方晶系	6
六方晶系	5
立方晶系	3
各向同性体	2

工程中应用的材料,金属材料或非金属材料(陶瓷、高聚物等),在很多情况下都可看成是各向同性体,因此,只有 2 个独立的弹性常数。其定义如下

$$\left. \begin{array}{l}
 E = \frac{1}{S_{11}} \\
 \nu = \frac{S_{12}}{S_{11}} \\
 G = \frac{1}{2(S_{11} - S_{12})}
 \end{array} \right\} \quad (2-5)$$

由式(2-4)和(2-5)可导出各向同性体广义 Hooke 定律形式

$$\left. \begin{array}{l}
 \epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\
 \epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\
 \epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\
 \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}
 \end{array} \right\} \quad (2-6)$$