



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

金属材料力学性能

Metal Material Mechanics Performance

● 刘瑞堂 刘锦云 编

哈尔滨工业大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

金属材料力学性能

刘瑞堂 刘锦云 编

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

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

本书是高等学校材料科学与工程类专业本科生教材,也可供相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技术人员参考。

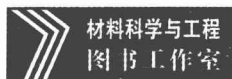
图书在版编目(CIP)数据

金属材料力学性能/刘瑞堂,刘锦云编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014. 12

ISBN 978 - 7 - 5603 - 4985 - 5

I. ①金… II. ①刘…②刘… III. ①金属材料-材料力学性质-高等学校-教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 311710 号



材料科学与工程
图书工作室

责任编辑 张秀华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 13.25 字数 316 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 4985 - 5

版 次 2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元



(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

金属材料力学性能是关于金属材料强度的一门科学,其研究对象主要是金属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。《金属材料力学性能》是高等学校材料科学与工程类专业的主干课程之一。教学大纲要求通过本门课程的学习使学生掌握金属材料力学性能的基本理论,掌握评价金属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金属材料,优化和改进加工工艺以充分发挥金属材料的性能潜力,为创制新材料、新工艺以及开展零构件失效分析等奠定必要的基础。

本书主要内容由两部分组成,一是金属材料的基本力学性能,包括弹性变形、塑性变形、断裂和断裂韧性原理;二是与零件工作条件相关的力学性能,包括低温脆性、疲劳、蠕变和环境介质作用下的力学性能。本书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。本书不仅可以作为本科生教材,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。

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),书中还吸收了部分材料力学性能研究方面的成果,在此谨向以上作者表示衷心的感谢。参加本书编写的有刘瑞堂(第1至第9章),刘锦云(第10章)。全书由刘瑞堂统稿定稿。

由于作者学术水平所限,书中疏漏之处在所难免,恳请提出宝贵意见。

作 者

2014年7月

目 录

第 1 章 静载拉伸试验	1
1.1 应力-应变曲线	1
1.1.1 拉伸脆性材料应力-应变曲线	1
1.1.2 塑性材料应力-应变曲线	2
1.2 拉伸性能指标	3
1.2.1 屈服强度	3
1.2.2 抗拉强度	5
1.2.3 实际断裂强度	6
1.3 塑性指标及其意义	6
习题	8
第 2 章 弹性变形	9
2.1 弹性变形及其物理本质	9
2.1.1 弹性变形过程	9
2.1.2 Hooke 定律	10
2.1.3 常用弹性常数及其意义	12
2.2 弹性性能的工程意义	13
2.2.1 刚度	13
2.2.2 弹性比功	15
2.3 弹性不完整性	16
2.3.1 弹性后效	16
2.3.2 弹性滞后环	17
2.3.3 包辛格 (Bauschinger) 效应	18
习题	20
第 3 章 塑性变形	21
3.1 金属材料塑性变形机制与特点	21
3.1.1 晶体塑性变形的机制	21
3.1.2 多晶体材料塑性变形特点	21
3.2 屈服现象及其本质	22
3.2.1 物理屈服现象	22
3.2.2 屈服现象的本质	23

3.2.3	应变时效	24
3.3	真实应力-应变曲线及形变强化规律	25
3.3.1	冷变形金属的真实应力-应变关系	25
3.3.2	颈缩条件分析	26
3.3.3	形变强化的实际意义	27
3.3.4	韧性的概念及静力韧性分析	28
3.3.5	形变强化过程中的损伤	29
3.4	应力状态对塑性变形的影响	30
3.4.1	应力状态柔度系数	30
3.4.2	金属在扭转加载条件下的力学性能	31
3.4.3	弯曲试验	35
3.4.4	压缩试验	36
3.4.5	硬度	38
	习题	47
第4章	断裂	48
4.1	延性断裂	48
4.1.1	光滑试样延性断裂的宏观断口特征	48
4.1.2	微孔的形成	50
4.1.3	微孔长大与连结	50
4.1.4	断口微观特征	51
4.1.5	裂纹试样微孔型断裂过程	51
4.1.6	韧窝形态与材料韧性	52
4.2	解理断裂	53
4.2.1	解理断裂的基本特征	53
4.2.2	解理断裂过程	54
4.2.3	多晶体材料解理断裂过程分析	56
4.2.4	碳化物对解理断裂的影响	57
4.3	沿晶断裂	57
4.4	应力状态对断裂的影响	59
	习题	60
第5章	缺口试样的力学性能	61
5.1	缺口顶端应力应变分析	61
5.2	缺口试样静载力学性能	63
5.2.1	缺口试样静拉伸和偏斜拉伸	64
5.2.2	缺口试样静弯曲	65
5.3	缺口试样在冲击载荷下的力学性能	66
5.3.1	缺口试样冲击试验	67
5.3.2	冲击试样断裂过程	68
5.3.3	冲击试验的意义及应用	69

5.4	低温脆性及其评定	70
5.4.1	系列温度冲击试验	70
5.4.2	低温脆性评定	71
5.4.3	冶金因素对低温脆性的影响	72
5.5	抗脆断设计及其试验	74
5.5.1	落锤试验	74
5.5.2	NDT 判据及断裂分析图	75
	习题	76
第6章	断裂韧性基础	77
6.1	Griffith 断裂理论	77
6.1.1	完整晶体的理论断裂强度	77
6.1.2	Griffith 断裂理论	78
6.1.3	奥罗万 (Orowan) 的修正	79
6.2	裂纹扩展的能量判据	80
6.3	裂纹顶端的应力场	81
6.3.1	三种断裂类型	81
6.3.2	I 型裂纹顶端的应力场	82
6.3.3	应力强度因子 K_I	83
6.3.4	断裂判据	84
6.3.5	几种常见裂纹的应力强度因子	85
6.4	裂纹顶端的塑性区	85
6.5	应力强度因子的塑性区修正	87
6.6	断裂韧性 K_{IC} 的测试	89
6.6.1	试样及其制备	89
6.6.2	测试方法	91
6.6.3	试验结果的处理	92
6.7	影响断裂韧性的因素	93
6.7.1	外因 (板厚和试验条件)	93
6.7.2	内因 (材料因素)	95
6.7.3	高强度金属材料的裂纹敏感性	96
6.7.4	K_{IC} 与静载力学性能指标间的关系	97
6.7.5	K_{IC} 与 Charpy 冲击功 CVN 之间的关系	99
6.8	弹塑性条件下的断裂韧性概述	99
	习题	100
第7章	疲劳	101
7.1	变动载荷 (应力) 和疲劳破坏的特征	101
7.1.1	变动载荷 (应力) 及其描述参量	101
7.1.2	疲劳破坏特征和断口	102
7.2	高周疲劳	103

7.2.1	S-N 曲线和疲劳极限	103
7.2.2	循环应力特性对 S-N 曲线的影响	108
7.2.3	表面几何因素对高周疲劳特性的影响	110
7.2.4	应力变动和累积损伤	111
7.3	低周疲劳	112
7.3.1	滞后回线	113
7.3.2	循环硬化和循环软化	113
7.3.3	循环应力-应变曲线	114
7.3.4	应变-寿命曲线	116
7.3.5	缺口零件疲劳寿命预测	118
7.3.6	热疲劳	121
7.4	疲劳裂纹扩展	123
7.4.1	应力裂纹长度与疲劳裂纹扩展的关系	123
7.4.2	平均应力的影响	126
7.4.3	组织对疲劳裂纹扩展速率的影响	128
7.4.4	疲劳裂纹扩展寿命的估算	128
7.5	疲劳裂纹萌生和扩展机理	131
7.5.1	疲劳裂纹的萌生	132
7.5.2	疲劳裂纹扩展的方式和机理	133
7.6	改善疲劳强度的方法	135
	习题	137
第 8 章	金属在环境介质作用下的断裂	138
8.1	应力腐蚀开裂	138
8.1.1	应力腐蚀开裂的特征	138
8.1.2	应力腐蚀抗力指标及测试方法	139
8.1.3	应力腐蚀的机理	142
8.1.4	防止应力腐蚀的措施和安全设计	143
8.2	氢脆	144
8.2.1	氢的来源及其在金属中存在的形式	144
8.2.2	氢致脆化类型	145
8.2.3	位错理论对氢脆的理解	146
8.2.4	氢脆与应力腐蚀的关系	147
8.2.5	氢脆评定	148
8.2.6	防止氢脆的措施	149
8.3	腐蚀疲劳	150
8.3.1	腐蚀疲劳的特点和机理	150
8.3.2	腐蚀疲劳裂纹扩展	151
8.3.3	影响腐蚀疲劳裂纹扩展的因素	153
8.3.4	防止腐蚀疲劳的措施	154

8.4	其他环境脆化问题	155
8.4.1	辐射脆化	155
8.4.2	低熔点金属接触脆断	156
习题	.....	158
第9章	金属高温力学性能	159
9.1	金属的蠕变	160
9.1.1	蠕变曲线	160
9.1.2	蠕变过程的形变和断裂	161
9.2	金属高温力学性能指标	163
9.2.1	蠕变极限	163
9.2.2	持久强度	165
9.2.3	松弛稳定性	166
9.2.4	影响蠕变极限和持久强度的主要因素	167
9.3	其他高温力学性能	168
9.3.1	高温短时拉伸性能	168
9.3.2	高温硬度	169
习题	.....	169
第10章	磨损	171
10.1	磨损类型	171
10.1.1	磨损过程的三个阶段	171
10.1.2	磨损类型	172
10.2	磨损试验方法	173
10.2.1	磨损试验的类型	173
10.2.2	常用的磨损试验机	173
10.2.3	金属材料耐磨性能的评定方法	175
10.3	磨损机理	176
10.3.1	磨料磨损	176
10.3.2	粘着磨损	179
10.3.3	表面疲劳磨损	182
10.3.4	腐蚀磨损	187
10.3.5	微动磨损	188
习题	.....	189
附 录	.....	190
附录1	常用计量单位的换算	190
附录2	常用应力强度因子 K_I	190
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	196
参考文献	.....	199

第 1 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。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-应变曲线和金属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柱试样^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 ——载荷;

Δl ——试样伸长量, $\Delta l = l - l_0$;

l_0 ——试样原始标长;

l ——与 P 相对应的标长部分的长度;

A_0 ——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。下面介绍金属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

^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。

模量 E 表示

$$E = \tan\alpha \quad (1.3)$$

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。

1.1.2 塑性材料应力-应变曲线

图 1.2 为塑性材料应力-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

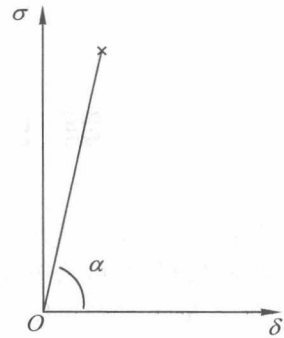


图 1.1 脆性材料的应力-应变曲线

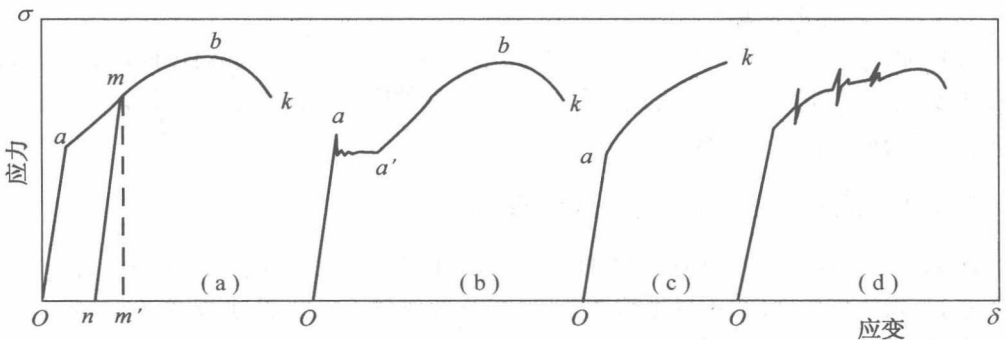


图 1.2 塑性材料应力-应变曲线

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金属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金属材料的常规力学性能指标, 为合理评定、鉴别和选用金属材料提供依据。

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, 称为材料的强度指标; 反映材料塑性变形能力的指标, 称为材料的塑性指标。

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。工程上采用规定一定的残留变形量的方法, 确定屈服强度。

1. 工程上常用的屈服标准

(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。

上述两定义并非完全等同, 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。

2. 规范的屈服强度标准

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 所示。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 ,其计算公式为

$$\overline{OC} = n \cdot L_e \cdot \varepsilon_p$$

式中 n ——拉伸图放大倍数;

L_e ——引伸计标距;

ε_p ——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的计算如下

$$\sigma_p = P_p / A_0 \quad (1.4)$$

(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 $\sigma_{r0.2}$ 表示,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 所示,即当卸载后所得残余伸长为规定残余伸长载荷 P_r ,规定残余伸长应力的计算公式如下

$$\sigma_r = P_r / A_0 \quad (1.5)$$

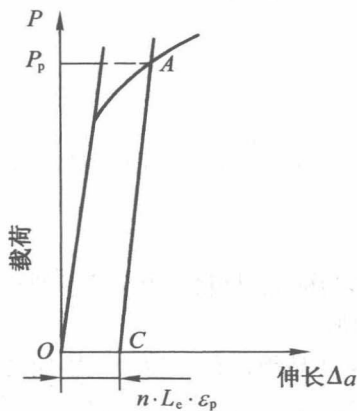


图 1.3 图解法测 σ_p

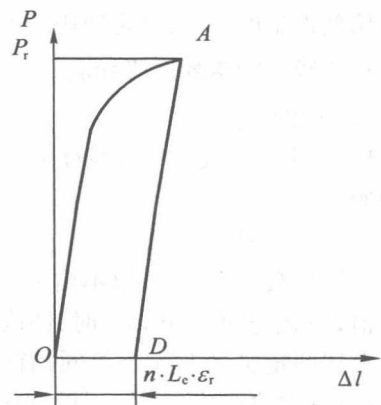


图 1.4 卸载法测 σ_r

(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 $\sigma_{t0.5}$, $\sigma_{t0.6}$ 和 $\sigma_{t0.7}$ 。

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 ,其计算公式为

$$\overline{OE} = n \cdot L_e \cdot \varepsilon_t$$

式中 ε_t ——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,规定总伸长应力的计算公式如下

$$\sigma_t = P_t / A_0 \quad (1.6)$$

在上述三种屈服强度测定中, 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 。 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_t 代替 σ_p ,尤其在大规模工业生产中,采用 σ_t 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 ——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

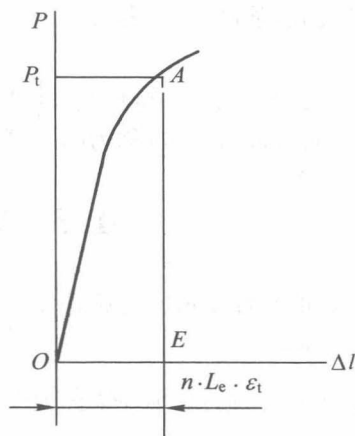


图 1.5 图解法测 σ_t

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,实际断裂强度用 S_k 表示

$$S_k = P_k / A_k \quad (1.8)$$

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 ——断裂后的标长。

对于形成颈缩的材料,其伸长量 $\Delta l_k = l_k - l_0$, Δl_k 包括颈缩前的均匀伸长 Δl_b 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 ——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 $d\varepsilon$ 为

$$d\varepsilon = dl/l$$

试样从 l_0 拉伸至 l 时,完成的真应变为

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1.12)$$

于是真应变与条件应变的关系为

$$\varepsilon = \ln(1 + \delta) = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi}\right) \quad (1.13)$$

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

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A} = 2 \ln \frac{d_0}{d} = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi_k}\right) \quad (1.14)$$

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 ,即

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi_k}\right) \quad (1.15)$$

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 ~ 500 MPa,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. 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。