

前 言

《金属机械性能》是金属材料及热处理专业的一门必修专业课，主要研究金属变形和断裂的规律，以及机械性能指标的本质、意义及受内外因素影响时的变化规律，为学生能正确选用材料和制订热处理工艺指明方向，为合理设计、提高产品质量等提供有关材料性能方面的基本知识。

本书第一版于1976年由18所院校联合编写。参加编写的同志有孙希太、刘大燊、杨永弟、王文田、刘会亭、杨铮、束德林、周天健、杨道明、陈友萱、蒋伯诚、孙尧卿、郑炀曾、戴雅康、曾振朋、邵尔玉、陈菁、张学仁等。

1978年6月在西安召开的高等学校一机部对口的金属材料及热处理专业教材会议上确定本书（第一版）为该专业教材，但由于某些原因原书已无法重印。因此，于1981年4月由机械工业出版社组织有关同志进行了讨论，与会同志一致认为：鉴于目前教学发展情况，原书在基础理论方面显得薄弱，不能适应当前提高教学质量的要求，有必要进行充实和更新，并决定由参加会议的同志承担修订任务。

根据几年教学实践，在本次修订中较系统地阐明本学科的基本理论，加强宏观规律和微观机理的结合并反映国内外新成就。同时在层次安排上也作了必要的调整，以求满足当前教学的需要。修订后全书共分十一章，将原书第一章、第三章合并为第一章金属静载机械性能，介绍各种常用静载机械性能的意义和原理。充实了原书第二章前两节的内容列为第二章金属的变形，讨论了弹性变形与塑性变形的宏观及微观规律，并从位错理论观点阐述了强化金属的途径和本质。在原书第二章及第九章某些内容的基础上新写了第三章金属断裂，讨论静载下的断裂类型、断裂过程及断口形貌。第四章金属的断裂韧性，增加了屈服区修正，影响断裂韧性因素等内容。第五章疲劳较原书在疲劳裂纹扩展机理的论述上有所深化，并增加了应力场强度因子阈值的内容。由于应力腐蚀与氢脆已成为机件主要失效类型之一，所以新增加了第六章静载延滞断裂。第七章金属冲击韧性和钢的冷脆性、第八章金属磨损与接触疲劳、第九章金属高温机械性能，第十一章机件失效分析，不论是内容还是层次安排均有不同程度的修改。为了使学生学完本课程后对机械性能指标有一个全面而辩证的认识，增写第十章按机械性能评定金属，主要介绍如何用各种不同机械性能指标去评定金属和选用金属。

参加修订的同志有：山东工学院孙希太（第一章）、刘大燊（第三章）、太原工学院刘会亭（第二章）、北京工业学院杨道明（第三、四、七章）、西北工业大学杨铮（第五章）、上海交通大学曾振朋（第六章）、安徽工学院束德林（第八、十、十一章）、大连铁道学院戴雅康（第九章、附录）、洛阳农机学院邵尔玉（第十一章）。全书由刘会亭、杨道明、束德林整理完稿。第一机械工业部教材编辑室丁孝模担任本书责任编辑。

本书在修订过程中除了原书的有关编写同志提出了很多宝贵意见外，还得到机械工业

IV

出版社丁文华、张绪江等同志的大力支持和热忱帮助，北京工业学院的院系领导及金相教研室石霖教授对本书的修订工作给予了很大的支持，在此深表感谢。本书在修订和编写时，曾参考、引用了一些单位的部分资料和图片，在此谨向有关同志致以谢意。

由于我们水平有限，加之时间又非常仓促，缺点和错误一定不少，恳切希望读者批评指正。

目 录

第一章 金属静载机械性能	1
第一节 静拉伸机械性能	1
一 拉伸试样	1
二 拉伸图及应力-应变图	1
三 强度指标及其测定	3
四 塑性指标及其测定	6
第二节 真实应力-应变曲线	8
一 条件应力与真实应力	8
二 条件应变与真实应变	8
三 形变强化容量 ψ_0	10
四 真实应力-应变曲线、形变强化模数和形变强化指数	10
五 强度与塑性、韧性之间的关系	11
第三节 其它静载机械性能	11
一 扭转机械性能	12
二 弯曲机械性能	15
三 压缩机械性能	16
第四节 金属的缺口效应	18
一 缺口效应试验的意义	18
二 缺口处应力分布的特点	18
三 缺口试样的拉伸和偏斜拉伸试验	21
第五节 硬度	23
一 布氏硬度	24
二 洛氏硬度	26
三 维氏硬度及显微硬度	28
四 肖氏硬度	29
五 硬度和抗拉强度的换算	30
第二章 金属的变形	31
第一节 金属弹性变形	31
一 弹性变形的特点	31
二 弹性变形的物理过程	31
三 虎克定律	32
四 几种常见的应力状态	35
第二节 金属弹性模数	35
一 弹性模数的意义	35
二 影响弹性模数的因素	36
三 金属的弹性及弹性比功(弹性比能)	37
第三节 金属弹性不完整性	38
一 包申格效应	38

二 弹性后效	38
三 弹性滞后环及循环韧性	39
第四节 金属塑性变形	40
一 塑性变形的一般特点	40
二 塑性变形的物理过程	41
三 多晶体金属的塑性变形	43
四 屈服条件	45
第五节 金属屈服强度	45
一 屈服强度理论	46
二 影响屈服强度的因素	47
三 金属物理屈服现象	53
第六节 金属形变强化	54
一 形变强化的意义	54
二 单晶体金属的形变强化	55
三 多晶体金属的形变强化	56
四 影响形变强化的因素	57
五 金属颈缩现象	59
第三章 金属的断裂	61
第一节 断裂分类与断口宏观特征	61
一 断裂分类	61
二 断口的宏观特征	64
第二节 断裂强度与断裂过程	67
一 断裂强度	67
二 裂纹形成的位错理论	70
三 裂纹的扩展	73
第三节 韧性断裂的微观机制	74
一 断口的微观形貌	74
二 韧窝形成过程	75
三 影响韧窝形貌的因素	77
第四节 脆性解理断裂的微观机制	78
一 断口的微观形貌	79
二 解理台阶及河流形成原因	80
三 影响河流花样形貌的因素	81
四 准解理断口	83
第四章 金属的断裂韧性	84
第一节 裂纹尖端应力场强度因子 K_I 及断裂韧性 K_{Ic}	84
一 裂纹尖端的应力场强度因子	85
二 平面应力与平面应变	87
三 断裂韧性和脆断判据	88
四 裂纹尖端塑性区及其修正	89
第二节 裂纹扩展的能量率 G_I	92
一 G_I 的物理意义	93
二 应力场强度因子 K_I 与裂纹扩展力的关系	93

第三节 弹塑性状态的断裂韧性	94
一 裂纹顶端张开位移 COD	95
二 J 积分	96
第四节 断裂韧性的测定	97
一 试样制备	97
二 测试方法	98
三 δ_c 和 J_{Ic} 的测试原理简介	100
第五节 影响断裂韧性的因素	101
一 断裂韧性与常规机械性能指标之间的关系	101
二 断裂韧性与材料内部组织的关系	102
三 温度、加载速度及零件厚度对断裂韧性的影响	104
第五章 金属的疲劳	106
第一节 金属疲劳现象	106
一 变动载荷	106
二 疲劳曲线	107
三 疲劳宏观断口	108
第二节 疲劳抗力指标	111
一 疲劳极限	111
二 过负荷持久值和过负荷损害界	113
三 疲劳缺口敏感度	115
四 不同应力状态下的疲劳极限	117
五 疲劳极限和静强度之间的关系	118
第三节 金属疲劳破坏机理及疲劳裂纹扩展规律	118
一 疲劳裂纹的产生	118
二 疲劳裂纹的扩展	123
三 疲劳裂纹扩展速率	126
第四节 影响疲劳抗力的因素	130
一 工作条件	130
二 表面因素及尺寸因素	132
三 表面强化处理的效应	132
四 合金的成分及组织	134
第五节 金属低周疲劳	136
一 低周疲劳现象和特点	136
二 金属循环硬化与循环软化	138
三 $\Delta\epsilon_p-N$ 曲线	139
第六章 金属静载延滞断裂	140
第一节 应力腐蚀断裂	140
一 应力腐蚀现象及其特征	140
二 应力腐蚀断裂机理	141
三 断裂力学在应力腐蚀中的应用	142
四 预防机件应力腐蚀断裂的措施	144
第二节 氢脆	145
一 氢脆的类型及特征	145

二 氢脆机理	150
三 影响材料氢脆的外部因素	150
四 应力腐蚀开裂和氢脆的关系	151
第三节 其它类型的延滞断裂	152
一 液体金属引起的延滞断裂	152
二 中子辐照引起的延滞断裂	153
第七章 金属的冲击性能和钢的冷脆性	154
第一节 冲击载荷下金属的变形及断裂	154
一 加载速度及变形速度的概念	154
二 冲击载荷下金属变形及断裂的特点	154
第二节 冲击韧性试验	156
一 冲击试验方法及原理	156
二 冲击试验用的试样	157
三 冲击值的意义及讨论	157
四 冲击试验的应用	158
第三节 钢的冷脆断裂	160
一 冷脆转变的物理本质	160
二 冷脆温度的评定方法	162
第四节 影响冷脆转变的因素	164
一 材料方面的因素	165
二 影响冷脆转变的外部因素	166
第五节 多次冲击试验	169
一 多次冲击试验的原理及方法	169
二 多次冲击抗力的变化规律	170
第八章 金属磨损与接触疲劳	173
第一节 摩擦及磨损的概念	173
一 摩擦及磨损	173
二 磨损类型及耐磨性	174
第二节 磨损机理及影响因素	175
一 粘着磨损	175
二 磨粒磨损	177
三 腐蚀磨损	179
第三节 提高耐磨性的途径	181
第四节 磨损试验方法	182
第五节 接触疲劳	184
一 接触应力的概念	184
二 接触疲劳的类型和损伤过程	186
三 影响接触疲劳抗力的因素	189
四 接触疲劳试验方法	192
第九章 金属高温机械性能	194
第一节 金属的蠕变与蠕变断裂	195
一 蠕变现象	195
二 蠕变过程中变形与断裂机理	196

第二节 蠕变极限与持久强度	198
一 蠕变极限及其测定方法	198
二 持久强度及其测定方法	199
三 影响蠕变极限及持久强度的主要因素	201
第三节 松弛稳定性	202
一 金属中的应力松弛现象	202
二 松弛稳定性指标及其测定方法	203
第四节 其它高温机械性能	204
一 高温短时拉伸性能	204
二 高温硬度	204
第十章 按机械性能评定金属	206
第一节 按机械性能评定金属的内容	206
第二节 对机械性能指标的认识	207
一 明确机械性能指标的意义和适用范围	207
二 使用机械性能数据的注意事项	209
第三节 按机械性能评定金属的结构强度	210
一 常温静载下的机械性能指标	210
二 高温长时静载下的机械性能指标	212
三 常温重复及交变载荷下的机械性能指标	213
第十一章 机件失效分析	215
第一节 失效分析的意义	215
一 失效分析的目的	215
二 失效分析的基本环节和一般方法	215
第二节 失效类型和抗力指标	220
一 机件的失效类型和相应的抗力指标	220
二 影响失效抗力的冶金因素	221
第三节 失效分析实例	223
一 拖拉机前轮主销疲劳断裂	223
二 提高凿岩机活塞使用寿命	224
三 铣床球墨铸铁主轴断裂	227
附录	230
附录一 钢铁硬度与强度对照	230
附录二 常用单位换算表	235
附录三 本书常用符号表	235
附录四 金属机械性能试验有关标准	237

第一章 金属静载机械性能

机械性能指标是设计计算、材料选择、工艺评定以及材料检验的主要依据。在工业生产中，测量材料机械性能最常用的是静载荷方法。本章将讨论静载荷下机械性能指标的意义及其测定方法。

第一节 静拉伸机械性能

静拉伸试验是工业上最广泛使用的机械性能试验方法之一。试验时在试样两端缓慢地施加载荷，使试样在工作部分受轴向拉力沿轴向伸长，一般进行到拉断为止。测定试样对外加载荷的抗力，可以求出材料的强度指标；测定试样在破断后塑性变形的大小，可以求出材料的塑性指标。

一 拉伸试样

静力拉伸试验是用圆柱试样或板状试样在拉伸机上测定各种强度和塑性指标。为了确保金属确实处于单向拉伸状态，以衡量它的各种性能，对试样形状、尺寸和加工，均有一定要求。一般拉伸试样共分三个部分，即工作部分、过渡部分和夹持部分（图 1-1）。其中工作部分必须表面光滑，以保证材料表面也是单向拉伸；过渡部分必须有适当的台肩和圆角，以降低应力集中，保证该处不会变形和断裂；夹持部分是和试验机夹头连接的部分，其直径和长度应适当。根据

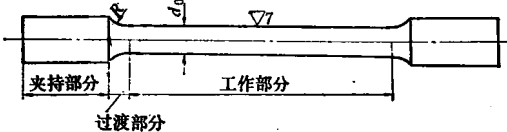


图1-1 拉伸试样

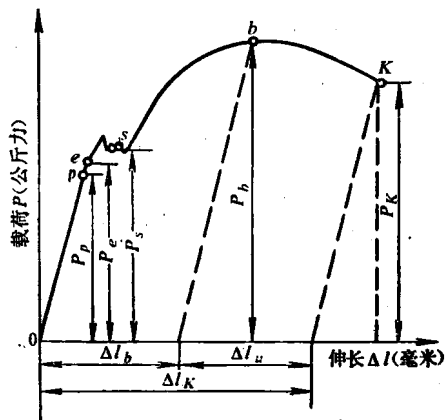


图1-2 低碳钢的拉伸图

不同的材料和要求，对试样的形状、尺寸和加工，在国家标准GB228-76中均有明确规定，应遵照执行。

二 拉伸图及应力-应变图

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伸长自动记录下来，绘出载荷-伸长曲线，这种曲线叫做拉伸图或拉伸曲线。

图 1-2 是退火低碳钢的拉伸图，图的纵坐标表示载荷 P ，单位是公斤力，横坐标表示绝对伸长 Δl ，单位是毫米。

载荷比较小时，试样伸长随载荷成正比地增加，保持直线关系。载荷超过 P_s 后，拉伸

曲线开始偏离直线。保持直线关系的最大载荷，是比例极限的载荷 P_p 。

变形开始阶段，卸荷后试样立刻恢复原状，这种变形是弹性变形。当载荷大于 P_p 再卸荷时，试样的伸长只能部分地恢复，而保留一部分残余变形。卸荷后的残余变形叫做塑性变形。开始产生微量塑性变形的载荷是弹性极限的载荷 P_e 。一般说来， P_p 与 P_e 是很接近的。

载荷增加到一定值时，载荷指示器（测力计刻度盘）的指针停止转动或开始往回转，拉伸图上出现了平台或锯齿，这种在载荷不增加或减小的情况下，试样还继续伸长的现象叫做屈服。屈服阶段的最小载荷是屈服点的载荷 P_s 。屈服后，金属开始明显塑性变形，试样表面出现滑移带。

在屈服阶段以后，欲继续变形，必须不断增加载荷。随着塑性变形增大，变形抗力不断增加的现象叫做形变强化或加工硬化。当载荷达到最大值 P_b 后，试样的某一部位截面开始急剧缩小，出现了“缩颈”，以后的变形主要集中在缩颈附近。

由于缩颈处试样截面急剧缩小，致使载荷下降。拉伸图上的最大载荷，是强度极限的载荷 P_b 。

载荷达 P_K 时，试样断裂，这个载荷称为断裂载荷。

工业上使用的金属材料，多数是没有屈服现象的，其拉伸图如图1-3所示。

图1-3 a是塑性材料的拉伸图，如退火铝合金、调质处理的合金钢等。图1-3 b是低塑性材料的拉伸图，它不仅没有屈服现象，而且也不产生缩颈，最大载荷就是断裂载荷，如球墨铸铁等。

综上所述，金属在外力作用下，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。

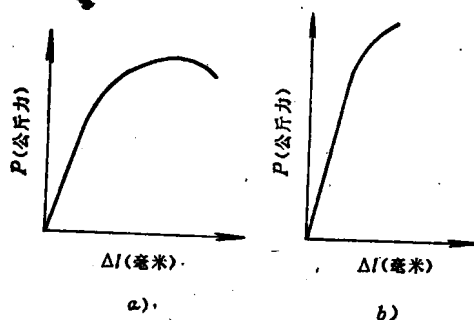


图1-3 塑性材料及低塑性材料的拉伸图
a) 塑性材料 b) 低塑性材料

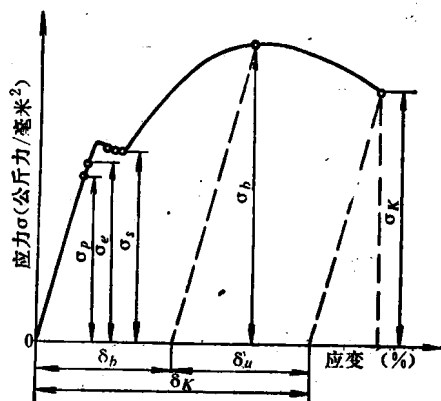


图1-4 低碳钢的应力-应变曲线

用试样原始截面积 F_0 去除拉力得到应力 σ ，即 $\sigma = \frac{P}{F_0}$ 公斤力/毫米²。以试样的计算长度 l_0 去除绝对伸长 Δl ，得到相对伸长（应变） ϵ ，即 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ 。应力与应变的关系曲线叫做应力-应变曲线（图1-4）。应力-应变曲线的形状与拉伸图（载荷-伸长曲线）相似，只

坐标不同。应力-应变曲线的纵坐标表示应力，单位是公斤力/毫米²，横坐标表示相对伸长，单位是百分数(%)。在应力-应变曲线上，可以直接读出材料的机械性能指标，如屈服强度 σ_s ，强度极限(抗拉强度) σ_b ，伸长率(延伸率) δ_k 等。

三 强度指标及其测定

(一) 比例极限 σ_p

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

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)} \quad (1-1)$$

式中 P_p ——比例极限的载荷，公斤力；

F_0 ——试样的原截面积，毫米²。

实际在拉伸曲线上，不是测定开始偏离直线那一点的应力，而是测定偏离一定值的应力。一般规定曲线上某点切线和纵坐标夹角的正切值 $\tan \theta'$ 比直线部分和纵坐标夹角的正切值 $\tan \theta$ 增加50%时，则该点对应的应力即为规定比例极限 σ_{p50} (简称为 σ_p)，见图1-5。如果要求高时，也可规定偏离值为25%或10%，此时所对应的应力为 σ_{p25} 或 σ_{p10} ，显然， $\sigma_p > \sigma_{p25} > \sigma_{p10}$ 。

关于比例极限的具体测定方法可参考标准 GB 228-76。

(二) 弹性极限 σ_e

弹性极限 σ_e 是材料由弹性变形过渡到弹-塑性变形的应力。应力超过弹性极限以后，便开始发生塑性变形。

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)} \quad (1-2)$$

式中 P_e 为弹性极限的载荷(公斤力)。和比例极限一样，测出的弹性极限也受测量精度的影响。为了便于比较，根据零件的工作条件要求，规定产生一定残余变形的应力，作为“规定弹性极限”，因此，国家标准中把弹性极限称为“规定残余伸长应力”。规定以残余伸长为0.01%的应力作为规定残余伸长应力，并以 $\sigma_{0.01}$ 表示。可见，弹性极限并不是金属对最大弹性变形的抗力，因为应力超过弹性极限之后，材料在发生塑性变形的同时还要继续产生弹性变形。所以，弹性极限是表征开始塑性变形的抗力，严格说来，是表征微量塑性变形的抗力。

工作条件不允许产生微量塑性变形的零件，设计时应该根据规定弹性极限数据来选材。例如，如果选用的弹簧材料，其规定弹性极限低，弹簧工作时就可能产生塑性变形，尽管每次变形可能很小，但时间长了，弹簧的尺寸将发生明显的变化，导致弹簧失效。

理论上，材料的弹性极限 σ_e 较比例极限 σ_p 稍大一点，但规定弹性极限和规定比例极限有时颇为接近。例如，炮钢的 $\sigma_{0.01}$ 与 σ_p 值是等同的。所以国家标准把规定残余伸长应力 $\sigma_{0.01}$ 并列于规定比例极限之后。为的是在材料强度指标中逐步取消规定比例极限 σ_p 。

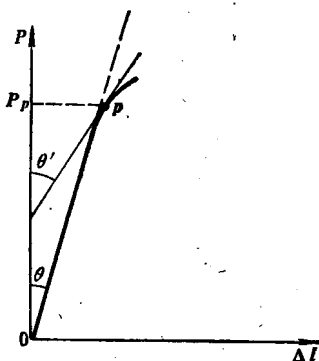


图1-5 规定比例极限

因为在机件设计、制造与运转过程中，在最大许用应力条件下是否会产生或产生多少微量残余变形是有实际意义的。可见，规定残余伸长应力比较切合实际。因此，许多国家已取消了规定比例极限。

规定残余伸长应力 $\sigma_{0.01}$ 的测量方法与测定屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 相似，均可采用图解法。在自动记录装置绘出的载荷-伸长（夹头位移）曲线（图 1-6）上，自弹性直线段与横坐标轴的交点 O 起，截取 $0.01\%l_0$ 一段残余伸长的距离 OC 再从 C 点作平行于弹性直线段的 Ce 线，交拉伸曲线于 e 点。对应于 e 点的载荷，便是规定残余伸长应力的载荷 $P_{0.01}$ ，即可算出 $\sigma_{0.01}$ 值。确定 $\sigma_{0.01}$ 的拉伸图，伸长坐标比例应不低于 1000 倍。

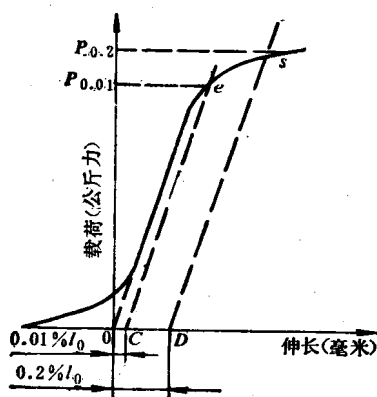


图 1-6 图解法确定 $\sigma_{0.01}$ 及 $\sigma_{0.2}$

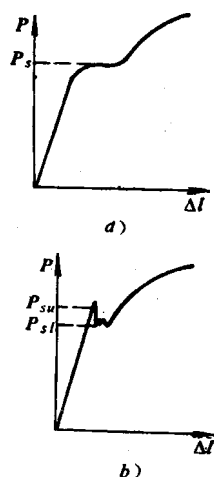


图 1-7 屈服点的确定
a) 平台状屈服 b) 锯齿状屈服

(三) 屈服极限

1. 屈服点 σ_s 在拉伸过程中，载荷不增加或开始下降，试样还继续伸长时的恒定载荷（如图 1-7 a 的 P_s ）、最大或首次下降的最小载荷（如图 1-7 b 的 P_{su} 、 P_{sl} ）所对应的应力，分别为材料的屈服点、上屈服点 σ_{su} 和下屈服点 σ_{sl} 。具有上、下屈服点的材料规定以下屈服点作为材料的屈服点，并以 σ_s 表示。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)} \quad (1-3)$$

式中 P_s 是载荷不增加或开始下降，试样还继续伸长的恒定载荷或首次下降的最小载荷，单位为公斤力。

屈服点是具有屈服现象的材料特有的强度指标。屈服点 σ_s 的载荷可借助于试验机的测力计刻度盘的指针或拉伸曲线上的纵坐标来确定。

(1) 指针法：测力计刻度盘的指针停止转动或第一次往回转的最小载荷，就是 P_s 。

(2) 图示法：在拉伸图上找出屈服平台的恒定载荷或第一次下降的最小载荷。

2. 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有屈服现象外，大多数金属合金都没有屈服点。因此，规定产生 0.2% 残余伸长的应力，作为屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 表示。

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)} \quad (1-4)$$

式中 $P_{0.2}$ 为产生 0.2% 残余伸长的载荷, 公斤力。

屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和屈服点一样, 表征金属发生明显塑性变形的抗力, 可用图解法或引伸计法测定。

(1) 图解法: 与测定残余伸长应力 $\sigma_{0.01}$ 方法相同, 只是拉伸曲线的伸长坐标与试样实际伸长量的比例要小一些, 但不应低于 50 倍。这种方法是一次加荷, 不用多次加荷, 能避免加工硬化的影响, 具有简便、效率高, 能保证测量精度的优点。

(2) 引伸计法: 可参考标准 GB228-76。

弹性极限和屈服强度 (屈服点) 都可以表征金属开始塑性变形的抗力。但是从变形程度来看, 弹性极限 σ_e 规定的残余变形小 (0.005~0.05%), 表示开始产生塑性变形的抗力, 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 规定的残余变形大一点, 表征开始产生明显塑性变形的抗力; 比例极限 σ_p 规定的残余伸长更小, 在 0.001~0.01% 之间。它们之间的关系由图 1-8 所示。

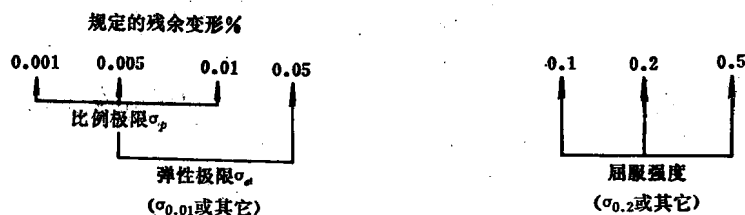


图1-8 σ_p 、 σ_e 及屈服强度之间的关系

由此可知, 这三个强度指标都是金属的微量塑性变形抗力指标, 从工程技术上和标准中的定义来看, 它们之间并无原则差别, 只是规定的塑性变形大小不同而已。因而, 各国有用规定残余伸长应力把比例极限、弹性极限及屈服强度的定义统一起来的趋势。我国也打算向这一方向过渡。

零件与结构件, 经常因过量的塑性变形而失效, 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, 要求特别严的零件, 应该根据材料的弹性极限或比例极限设计, 要求不十分严格的零件与结构件, 则要以材料的屈服强度作为设计和选材的主要依据。正因为这样, 屈服强度被公认为是评定金属材料的重要机械性能指标, 资料中大多数金属材料都有屈服强度的数据。

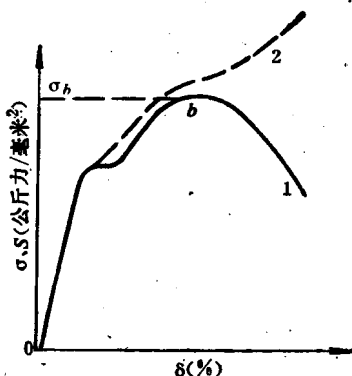
(四) 抗拉强度 (强度极限)

抗拉强度 (强度极限) σ_b 是由试样拉断前最大载荷所决定的条件临界应力, 即试样所能承受的最大载荷除以原始截面积, 以 σ_b 表示。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)} \quad (1-5)$$

式中 P_b 为拉断前试样所能承受的最大载荷, 公斤力。

对塑性材料来说, 在 P_b 以前试样为均匀变形, 试样各部分的伸长基本上是一样的, 在 P_b 以后, 变形将集中于试样的某一部分, 发生集中变形, 试样上出现缩颈, 由于缩颈处截面积急剧减小, 试样能担负的载荷减少, 所以按试样原始截面积 F_0 计算出来的条件应力, 也随之减少, 如图 1-9 中曲线 1 所示。在 P_b 以后, 如果改用缩颈处的瞬时截面积 F ,

图1-9 σ (或 S)- ε 曲线

1—条件应力 2—真实应力

去除当时的载荷,得到的真实应力 S ($S = \frac{P}{F_s}$ 公斤力/毫米²)也是随变形度增加而增大的,如图1-9中曲线2所示。这说明产生缩颈以后,变形抗力将继续增加,进一步产生加工硬化。

尽管如此,强度极限 σ_b 在技术上还是很重要的。它的物理意义是表征材料对最大均匀变形的抗力,表征材料在拉伸条件下所能承受的最大载荷的应力值,工程上通常称为抗拉强度,它是设计和选材的主要依据之一,也是材料的重要机械性能指标。

测定抗拉强度比较容易。拉伸试验时由测力计刻度盘的指针停留位置,直接读出最大载荷 P_b ,代入式(1-5)即得 σ_b 。

(五) 断裂强度 S_K

断裂强度 S_K 是拉断试样时的真实应力,它等于拉断时的载荷 P_K 除以断裂后缩颈处截面积 F_K 。

$$S_K = \frac{P_K}{F_K} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)} \quad (1-6)$$

断裂强度表征材料对断裂的抗力。但是,对塑性材料来说,它在工程上意义不大,因为产生缩颈后,试样所负担的外力不但不增加,反而减少,故国家标准中没有规定断裂强度。

塑性差的材料(脆性材料)一般不产生缩颈,拉断前的最大载荷 P_b 就是断裂时的载荷 P_K ,并且由于塑性变形小,试样截面积变化不大, $F_K \approx F_0$,因此抗拉强度 σ_b 就是断裂强度 S_K 。在这种情况下,抗拉强度 σ_b 表征材料的断裂抗力。

四 塑性指标及其测定

断裂前金属发生塑性变形的能力叫做塑性。塑性指标常用金属断裂时的最大相对塑性变形来表示。如拉伸时的伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。

(一) 伸长率 δ_K (或 δ)

伸长率 δ_K 是断裂后试样标距长度的相对伸长值,它等于标距的绝对伸长 $\Delta l_K = l_K - l_0$ 除以试样的原标距长度 l_0 ,用百分数(%)表示。

$$\delta_K = \frac{l_K - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 l_0 ——试样的原标距长度, 毫米;

l_k ——试样断裂后的标距长度, 毫米;

Δl_k ——断裂后试样的绝对伸长, 毫米。

通常, δ_k 即以 δ 表示之, 但此时 必须注意, 伸长率 δ 与相对伸长有不同含义。

图1-10上方的影线表示试样上塑性变形的分布情况。可以看出, 缩颈处(断裂位置)变形最大; 距离断裂位置愈远, 变形愈小。断裂位置是对 δ 有影响的, 其中以断在正中的试样所得的伸长率最大。为了便于比较, 规定以断在标距的中央 1/3 段试样的伸长率为测量标准; 如断在标距的两端的 1/3 段时, 则要求用位移法换算成相当于断在正中时的伸长率。

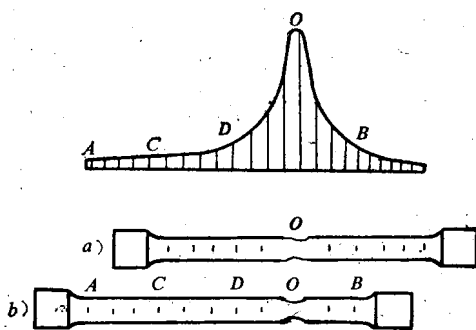


图1-10 用位移法确定 δ
a) 断口在正中 b) 断口在标距一端

根据测定伸长率的需要, 在试样上先画出标距, 并分为10个格。a) 如断口到邻近标距端点大于 $\frac{1}{3}l_0$ 时, 直接测量的两端点间距离就是 l_k ; b) 如断口到邻近标距端点小于或等于 $\frac{1}{3}l_0$ 时, 要用位移法换算, 如图 1-10 所示。先在长段上从断口处 O 截取一段 OC, 其长度等于 $\frac{1}{2}$ 或稍大于 (不大于 1 个格) $\frac{1}{2}$ 标距的总格数; 再由 C 向断口方向截取一段 CD, 令 CD 的格数等于 C 到邻近标距端点 A 的格数 CA; 断裂后 BC + CD 的长度便是 l_k 。这样处理就相当于把 CD 移到试样标距的另一端, 接到 B 处, 变为断口在正中。

试样的长度和截面尺寸对 δ 是有影响的, 可分析如下:

拉断后, 试样的伸长 Δl_k 由均匀伸长 Δl_b 和缩颈处的集中伸长 Δl_u (参见图1-2) 两部分组成, 即:

$$\Delta l_k = \Delta l_b + \Delta l_u$$

根据实验结果:

$$\Delta l_b = \beta l_0, \quad \Delta l_u = \gamma \sqrt{F_0}$$

式中 β 和 γ 是常数, 对同一金属制成的几何形状相似的试样恒为定值, 所以:

$$\Delta l_k = \Delta l_b + \Delta l_u = \beta l_0 + \gamma \sqrt{F_0}$$

$$\delta = \frac{\Delta l_k}{l_0} = \frac{\beta l_0 + \gamma \sqrt{F_0}}{l_0} = \beta + \gamma \frac{\sqrt{F_0}}{l_0}$$

由此可见, 伸长率 δ 除决定于 β 和 γ 外, 尚受试样尺寸的影响, 随着 $\frac{\sqrt{F_0}}{l_0}$ 的减小而减小。为了使同一种材料不同尺寸的试样得到一样的伸长率, 必须取 $\frac{\sqrt{F_0}}{l_0} = \text{常数}$, 即试样必须按比例地增大或减小其长度和截面积。为此, 我国和世界大多数国家一样, 选定 $\frac{l_0}{\sqrt{F_0}} = 5.65$ 或 11.3, 对圆形试样来说即相当于 $\frac{l_0}{d_0} = 5$ 或 10, 前者称为短试样, 后者为长试样。用 $l_0 = 5d_0$ 试样测出的伸长率, 以 δ_5 表示。用 $l_0 = 10d_0$ 试样测定的伸长率, 以 δ_{10} 或 δ 表

示。按上述两种比例关系制作的拉伸试样，称为比例试样。标距长度与原截面积间不是上述两种关系者，称为非比例试样。非比例试样是根据制品的尺寸和材质决定的所得结果不能和 δ_5 或 δ 相互比较。应该指出，同一材料的 δ_5 和 δ_{10} 数值是不相等的，因而不能直接用 δ_5 和 δ_{10} 进行比较。从公式 $\delta = \beta + \gamma \frac{\sqrt{F_0}}{l_0}$ 可以看出：因 β 、 γ 为常数， δ 值则取决于

$\frac{\sqrt{F_0}}{l_0}$ 之大小，由于短试样的 $\frac{\sqrt{F_0}}{l_0} = \frac{1}{5.65}$ ，长试样的 $\frac{\sqrt{F_0}}{l_0} = \frac{1}{11.3}$ ，短试样的 $\frac{\sqrt{F_0}}{l_0}$

数值比长试样的大一倍，故 δ_5 大于 δ_{10} ，一般， $\delta_5 = 1.2 \sim 1.5 \delta_{10}$ 。由于短试样可以节约原材料且加工较方便，故目前各国标准中有优先选取短试样的趋势，我国也逐步向这方面统一。

(二) 断面收缩率 ψ

断面收缩率 ψ 是断裂后试样截面的相对收缩值，它等于截面的绝对收缩 $\Delta F_K = F_0 - F_K$ 除以试样的原始截面积 F_0 ，也是用百分数(%)表示的。

$$\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 F_K ——试样断裂后的最小截面积。

ψ 的测定，对于圆试样比较简单，将断的试样对接起来，测出它的最小直径 d_K （从相互垂直方向测两次，再取平均值）后，即可求出 ψ 值。由式(1-8)可见， ψ 和试样尺寸无关。

第二节 真实应力-应变曲线

一 条件应力与真实应力

应力 σ 是试样单位截面上的内力，用试样的原始截面积 F_0 除载荷求得，叫做条件应力。实际上，在拉伸过程中，试样的截面积 F 是逐渐变小的，实际的应力应该是试样的瞬时截面积 F 除载荷 P ，即 $S = \frac{P}{F}$ ， S 叫做真实应力。在拉伸过程中 $F < F_0$ ，所以 $S > \sigma$ 。

$$\text{由于} \quad F = F_0 - \Delta F = F_0 \left(1 - \frac{\Delta F}{F_0} \right) = F_0 (1 - \psi)$$

$$\text{所以} \quad S = \frac{P}{F} = \frac{P}{F_0 (1 - \psi)} = \frac{\sigma}{1 - \psi} \quad (1-9)$$

可见，拉伸时随着 ψ 值增加， S 与 σ 的差值逐渐增大。

二 条件应变与真实应变

(一) 条件相对伸长、条件相对断面收缩

根据均匀塑性变形前后金属体积不变的近似假定，可以推导出在均匀变形阶段时的相对伸长与相对断面收缩间的关系。由于

$$F_0 l_0 = Fl$$

式中 $F_0 l_0$ ——试样工作部分的原始体积；

Fl ——均匀伸长时试样工作部分体积。

$$\text{由于:} \quad F = F_0 (1 - \psi)$$

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

式中 $\lambda = \frac{\Delta l}{l_0}$ 为均匀变形时的相对伸长。

代入后

$$F_0 \times l_0 = F_0 (1 - \psi) l_0 (1 + \lambda)$$

则

$$(1 - \psi)(1 + \lambda) = 1$$

故

$$\lambda = \frac{\psi}{1 - \psi} \quad (1-10)$$

或

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

因此, 在均匀变形时, ψ 的数值总是小于 λ 值, 如图1-11所示。

产生缩颈后: $\lambda = \frac{\Delta l}{l_0}$ 只能代表试样全长的平均条件相对伸长, 而不能代表缩颈处实际的

条件相对伸长, 后者要比前者大得多。可以根据式(1-10)用 ψ 值计算出缩颈处实际的条件相对伸长, 这个条件相对伸长叫做全伸长, 相当于把整个试样都拉伸到缩颈处那样细时的条件相对伸长。

(二) 真实相对伸长、真实相对断面收缩

条件相对伸长 λ 为试样原长 l_0 除以绝对伸长 Δl 的百分数。实际上, 在拉伸过程中试样长度是逐渐增加的, λ 不能代表真实的相对伸长。

例如, 将原长为 100 毫米的试样先拉长到 120 毫

米, 此时的条件相对伸长 $\lambda_1 = \frac{120-100}{100} = 20\%$; 再将试样进一步拉长到 144 毫米, 第二次的条件相对伸长为 $\lambda_2 = \frac{144-120}{120} = 20\%$, 两次伸长叠加起来 $\lambda_1 + \lambda_2 = 40\%$ 。但是如果

将原长为 100 毫米的试样, 一次拉长到 144 毫米, 其条件相对伸长 $\lambda = \frac{144-100}{100} = 44\%$, 两者并不相等, 后者大于前者。由此可见, 条件相对伸长不能代表实际的相对伸长。实际的相对伸长, 应该是瞬时伸长 dl 与瞬时长度 l 之比的积分值。即:

$$e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

e 叫做真实相对伸长。断裂时的真实相对伸长 e_k 叫做真实伸长率。

真实相对伸长 e 与条件相对伸长 λ 之间的关系为:

$$e = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right) = \ln (1 + \lambda) \quad (1-12)$$

同理, 真实的相对断面收缩 ψ_0 为:

$$\psi_0 = \int_{F_0}^F \frac{dF}{F} = \ln \frac{F}{F_0}$$

在均匀塑性变形阶段, e 与 ψ_0 之间的关系, 可用体积不变的假定求出:

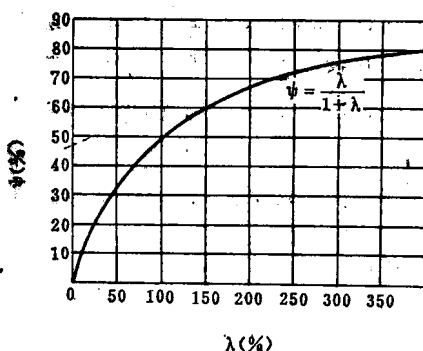


图1-11 均匀变形时 λ 与 ψ 的关系

$$\psi_s = \ln \frac{F}{F_0} = -\ln \frac{l}{l_0} = -e \quad (1-13)$$

即真实应变 e 和 ψ_s 在绝对值上是相等的。如果和条件应变相比,则只有在极小量变形的情况下, e (ψ_s), λ 和 ψ 的数值才比较接近。在其它情况下, λ 值最大, ψ 值最小。 ψ 与 e 之差要比 λ 与 e 之差小。可见,条件应变中的 ψ 要比 λ 更接近于真实应变 e (ψ_s)。

三 形变强化容量 ψ_s

在出现缩颈的情况下,塑性指标 $\psi(\delta)$ 都可分为两部分:即均匀变形部分 $\psi_s(\delta_s)$ 和集中变形部分 $\psi_u(\delta_u)$ 。

$\psi_s(\delta_s)$ 代表金属产生最大均匀塑性变形的能力。金属的塑性变形和形变强化是产生均匀变形的先决条件,即哪里发生塑性变形,哪里就发生形变强化,使该处再继续变形困难,变形便转移到别的地方去。变形与强化这样交替进行的结果,在试样上就构成了均匀的塑性变形。金属变形到 ψ_s 以后,由于形变强化跟不上变形的发展,形变强化作用不能再将变形转移到别的地方去,致使该处试样截面减小,应力增加,变形发展加剧,而导致缩颈形成。从这个意义上讲, $\psi_s(\delta_s)$ 除代表材料的均匀变形能力外,还包含着金属利用形变强化的可能性大小,因而叫做形变强化容量。 ψ_s 值大,意味着这种金属利用形变来强化金属的可能性大;反之, ψ_s 值小,意味着这种金属利用形变强化来强化金属的可能性小。

$\psi_u(\delta_u)$ 代表金属集中塑性变形的大小。

有的实验证明, $\psi_s(\delta_s)$ 主要取决于金属中基体相的状态,反映基体相的强化程度,对第二相是不敏感的。例如,钢淬火回火后的 ψ_s 值随回火温度提高而增大,而钢中的含碳量对它影响不大。 $\psi_u(\delta_u)$ 主要取决于基体相的极限塑性大小,并受第二相影响。例如钢淬火600°C回火后, ψ_u 值是随着含碳量增加而降低的。

ψ_s 还可衡量材料承受冷冲压的能力。有的实验还证明, ψ_s 值与疲劳试验时的缺口敏感性有一定联系。

四 真实应力-应变曲线、形变强化模数和形变强化指数

图1-12为 $S-e$ 真实应力-应变曲线。曲线 OA 段是弹性变形部分。曲线的 AB 段是产生缩颈前的均匀变形部分,它的斜率 $D = \frac{dS}{de}$ 为材料的形变强化模数。 D 随变形增大而减小。实验证明,均匀变形阶段,在双对数坐标下真实应力-应变曲线是一条直线。因此,在直角坐标中可用 $S = Ke^n$ 表示之,式中 n 称为形变强化指数,可以表征在均匀变形阶段金属的形变强化的能力。 B 点以后开始产生缩颈, BC 线段是集中变形部分,它的斜率 D 为一常数,表示形变强化趋于稳定。曲线最后一段上翘现象,是属于缩颈发展到一定程度后,因三向应力不利于变形所造成的。

如何衡量整个塑性变形过程金属的形变强化能力,还存在不同的意见,有人将 ABC 曲线的直线部分向两端延长,简化为虚线所示的直线,就可以用 $D = \tan \alpha$ 表示材料的形变强化能力。

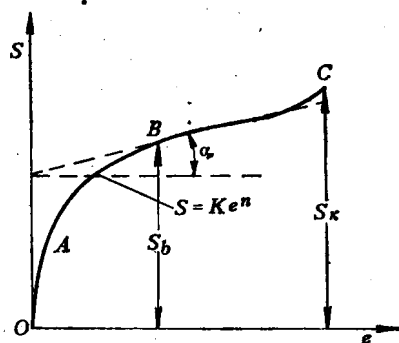


图1-12 $S-e$ 曲线(*)

(*) 缩颈以后,即 BC 段,按 $e = \ln \frac{l}{l_0}$

计算真实相对伸长,严格说来是不正确的。