

金属机械性能

JINSHU JIXIE XINGNENG

机械工业出版社

金属机械性能

《金属机械性能》编写组 编

本书阐述金属机械性能指标的物理意义、技术意义、测试方法原理及其在外界条件下的变化规律,并扼要地讨论机械性能与金属内部组织结构的一般关系。

全书共分十章。第一至第三章是金属变形和断裂的一般规律及静强度;第四至第九章是对机件常见的失效型式,如疲劳、磨损、断裂、蠕变等分章作了讨论。对近年来发展较快的断裂力学和断口分析也作了简要介绍。第十章是介绍机件失效分析方法及实例。

本书可供工科院校有关专业师生和从事机械设计及制造的工人、技术人员参考。

金 属 机 械 性 能

《金属机械性能》编写组 编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

江 苏 徐 州 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 13 $\frac{1}{2}$ ·字数326千字
1978年9月南京第一版·1978年9月南京第一次印刷
印数00,001—60,000 定价:1.10元

*

统一书号:15033·4458

前 言

本书是根据教学、生产、科研的需要编写的。在编写过程中,我们力求用辩证唯物主义的观点来指导工作,注意基本理论的阐述,努力使理论联系实际,尽量反映国内的新成就与新技术;对国外先进的技术,本着“洋为中用”的原则,也适当地作了介绍和引用。

本书是由山东工学院、广东工学院、大连铁道学院、上海交通大学、太原工学院、东北重型机械学院、北京工业大学、北京工业学院、甘肃工业大学、华中工学院、西北工业大学、合肥工业大学、河北工学院、洛阳农业机械学院、陕西机械学院、武汉钢铁学院、湖北农业机械学院、黑龙江工学院等 18 所院校共同编写而成。各校在具体编写过程中,曾先后到有关工厂、科研单位调查研究征求意见,并邀请工厂、研究单位有经验的工人和技术人员参加大纲讨论和审编工作。由于我们思想和业务水平有限,加之时间又较仓促,书中难免有缺点和错误,望读者批评指正。

本书在编写过程中曾得到许多工厂、科研单位、院校的大力帮助与支持,谨此致谢。

《金属机械性能》编写组

1976 年 12 月

目 录

前 言

绪论1

第一章 金属常用机械性能2

第一节 静拉伸试验—强度和塑性2

一、拉伸试样2

二、拉伸图及应力—应变图3

三、强度指标及其测定4

四、塑性指标及其测定11

第二节 硬度12

一、布氏硬度13

二、洛氏硬度15

三、维氏硬度及显微硬度17

四、其它硬度18

五、硬度和抗拉强度的换算19

第三节 冲击值(冲击韧性)20

一、冲击试验方法及原理20

二、冲击试验用的试样21

三、冲击值 a_K 的意义22

第二章 金属变形与断裂23

第一节 弹性变形23

一、金属的弹性变形23

二、弹性模数23

三、影响弹性模数的因素24

四、金属的弹性与弹性比功24

第二节 塑性变形25

一、金属的塑性变形25

二、屈服强度26

三、影响屈服强度的因素29

第三节 断裂33

一、断裂类型及断裂方式33

二、断裂抗力35

三、影响断裂抗力的因素38

第四节 影响断裂类型的因素39

一、温度39

二、加荷速度40

三、应力状态和力学状态图40

第五节 真实应力应变曲线43

一、条件应力与真实应力43

二、条件应变与真实应变43

三、形变强化容量 ψ_045

四、真实应力应变曲线、形变强化模数和形变强化指数45

五、强度与塑性、韧性之间的关系46

第三章 扭转、弯曲、压缩及缺口效应试验47

第一节 扭转试验47

一、扭转试验的特点和应用47

二、扭转机械性能48

第二节 弯曲试验50

一、弯曲试验的特点和应用50

二、脆性材料的弯曲试验50

第三节 压缩试验51

一、单向压缩试验51

二、多向不等压缩试验53

第四节 金属的缺口效应54

一、缺口效应试验的意义54

二、缺口处应力分布的特点54

三、缺口试样的拉伸和偏斜拉伸试验57

四、缺口试样弯曲试验59

第四章 金属的疲劳61

第一节 金属疲劳现象61

一、变动负荷61

二、疲劳曲线62

三、疲劳断裂的宏观断口63

四、疲劳裂纹的产生64

五、疲劳裂纹的扩展68

第二节 疲劳抗力指标70

一、疲劳极限70

二、疲劳缺口敏感度72

第三节 金属循环韧性75

一、循环韧性的概念75

二、循环韧性的评定指标75

三、循环韧性的实用意义76

第四节 影响疲劳抗力的因素77

一、工作条件	77
二、表面因素及尺寸因素	80
三、表面强化处理的效应	81
四、合金组织	83
第五节 低周疲劳	85
一、周期应力及应变	86
二、 ϵ_p - N 曲线	87
第五章 金属冲击	89
第一节 冲击负荷下金属的变形和断裂	89
一、加荷速度和变形速度的概念	89
二、冲击负荷下金属变形与断裂的特点	89
第二节 一次冲击弯曲试验	90
一、一次冲击弯曲试验的应用	91
二、冲击值 a_K 的讨论	93
三、一次冲击弯曲试验的改进	94
第三节 冲击拉伸和冲击扭转试验	96
第四节 影响冲击值的因素及防止机件脆性断裂的措施	97
一、影响冲击值和冷脆转化温度的因素	97
二、防止机件发生脆性断裂的主要措施	101
第五节 多次冲击试验	102
一、多次冲击试验的原理和方法	102
二、多次冲击抗力的变化规律	103
第六章 金属磨损与接触疲劳	107
第一节 摩擦和磨损的概念	107
一、摩擦的概念	107
二、磨损的概念	108
第二节 磨损	108
一、磨损的基本规律及提高零件耐磨性的途径	108
二、磨损随外界条件变化的规律	114
三、磨损试验方法	116
第三节 接触疲劳	119
一、接触应力的概念	120
二、接触疲劳损坏过程及其试验规律	121
三、影响接触疲劳抗力的因素	124
四、接触疲劳试验	128
第七章 金属断裂韧性	132
第一节 裂纹扩展时的能量转化	132
第二节 裂纹尖端的应力强度因子及金属断裂韧性	134
一、裂纹尖端的应力强度因子	134
二、平面应力及平面应变	135

三、应力强度因子和裂纹扩展力的关系	137
四、金属断裂韧性和脆性断裂的判据	137
第三节 弹塑性状态的断裂韧性	138
一、裂纹张开位移	138
二、形变功差率	139
第四节 断裂韧性的测定	140
一、试样制备	140
二、测试方法	141
三、 δ_0 和 J_{IC} 的测试原理简介	143
第五节 影响断裂韧性的因素	144
一、温度和加荷速度的影响	144
二、断裂韧性和常用机械性能的关系	144
三、断裂韧性和材料内部组织的关系	145
第六节 断裂韧性原理的应用	146
一、机件实际断裂强度的计算	146
二、机件裂纹临界尺寸的估算	147
三、在疲劳方面的应用	149
第八章 金属高温机械性能	152
第一节 蠕变极限及其测定	152
一、蠕变现象及蠕变过程	152
二、蠕变极限及测定方法	154
第二节 持久强度及其测定	156
一、持久强度的意义	156
二、持久强度的测定	156
第三节 松弛稳定性及其测定	158
一、金属中的应力松弛现象	158
二、松弛稳定性指标及测定方法	159
第四节 其它高温机械性能	160
一、高温短时拉伸性能	160
二、高温硬度	160
第九章 金属断口分析	162
第一节 概述	162
一、断口的分类	162
二、断口分析的方法	162
三、断口的保护及处理	163
第二节 断口的宏观分析	163
一、静负荷的断口形态	163
二、影响断口形态的因素	165
三、晶界断口与解理断口的宏观特征	170
第三节 断口的微观分析	170
一、韧性断口	171
二、解理断口	173
三、准解理断口	177

第四节 疲劳断口分析	177	第二节 机件失效分析方法	187
一、疲劳断口的宏观分析	177	一、外部观察	187
二、疲劳断口的微观形态	180	二、内部检查	187
第五节 断口分析举例	181	三、失效原因分析	188
一、韧性断裂实例	181	第三节 综合分析实例——提高凿岩机活塞	
二、脆性断裂实例	181	使用寿命的研究	194
三、疲劳断裂实例	182	一、活塞的工作条件	196
四、二十吨吊勾的断裂分析	182	二、活塞材料和加工工艺过程	196
第十章 机件失效分析	184	三、活塞的失效类型	196
第一节 机件的工作条件、失效类型和抗力		四、机械性能试验方法的选择	197
指标	184	五、活塞材料选择和热处理工艺的讨论	198
一、机件的工作条件	184	六、其它因素对活塞使用寿命的影响	202
二、失效类型	184	录附	205
三、抗力指标	185	附录一 硬度与强度换算表	205
四、典型机件的工作条件、失效类型及抗		附录二 常用性能的单位换算	206
力指标	185	附录三 常用符号名称对照表	208

绪 论

在伟大领袖和导师毛主席的无产阶级革命路线指引下,机械工业和其他行业一样,蓬勃地向前发展,产品的品种、数量和质量都有很大提高。目前,机械产品正朝着容量大、效能高、重量轻、成本低、寿命长的方向发展。为了使机械产品达到上述要求,必须从结构设计,材料选用,制造工艺以及使用和维护等多方面采取措施。就金属材料而言,应该从使用性能,特别是机械性能方面进行考虑。

机件(机器零件、构件、机具等)在使用时通常要传递力或能,在拉、压、弯、扭、摩擦、冲击等各种负荷作用下,常常会由于发生过量变形,表面损伤,尺寸改变或断裂而失效(失去原来设计的效能)。为了防止上述失效现象发生,需要从机件的工作条件和失效现象出发,研究金属在各种负荷下变形及破坏的规律,提出合理的机械性能指标,为机件的设计提供依据,并为合理选用材料和正确制定工艺指明方向。

主要的机械性能指标有:屈服强度,抗拉强度,伸长率,断面收缩率,冲击值,硬度,疲劳强度,缺口敏感性,冷脆转化温度,耐磨性及断裂韧性等。本书的主要内容在于阐明这些机械性能指标的物理意义、技术意义、测试原理以及这些指标之间的相互关系;分析内在因素(化学成分,组织状态,冶金质量,残余应力等)和外在此条件(负荷类型,加荷速度,温度,环境介质,表面状态等)对机械性能的影响规律;指出进一步提高金属材料机械性能的途径;并介绍机件失效分析方法等。

本书从介绍常用的机械性能指标入手,进而分析静荷下金属变形及破坏规律。由于生产中疲劳、磨损、断裂等是经常碰到的失效问题,因此本书对于冲击,疲劳,磨损,断裂韧性,高温机械性能,断口分析,机件失效分析等分章进行讨论。

金属机械性能不是一门孤立的知識,它和力学、制造工艺、金属材料及热处理等知识都有着密切的联系。

解放后廿多年来,广大工人和技术人员在毛主席关于“独立自主,自力更生”指示的精神鼓舞下,结合生产实际开展了对金属机械性能的试验和研究工作,成绩十分显著。在多次冲击试验及应用方面;在表面强化提高疲劳抗力方面;在断裂韧性的测试技术和应用方面等都取得了可喜的成果。

在国内外一派大好形势的鼓舞下,我们必须遵照伟大领袖和导师毛主席关于“中国人民有志气,有能力,一定要在不远的将来赶上和超过世界先进水平”的教导,继续深入开展对金属机械性能的研究工作,提高机械工业产品质量,为在本世纪内全面实现农业、工业、国防和科学技术的现代化,把我国建设成为强大的社会主义国家而努力奋斗。

第一章 金属常用机械性能

在工业生产中,衡量金属材料机械性能的指标,最常用的有:抗拉强度、屈服强度、硬度、塑性和冲击值(冲击韧性)。本章重点在于讨论这些机械性能指标的意义及其测定方法。

第一节 静拉伸试验—强度和塑性

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。是缓慢地在试样两端施加负荷,使试样在工作部分受轴向拉力,引起试样沿轴向伸长,试验一般进行到拉断为止。测定试样对外加负荷的抗力,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

为了使金属材料的机械性能指标在测试时能排除因试样形状及尺寸不同所造成的影响,并便于分析比较,试样应按 GB228-63 规定制作。试样工作部分应具有严格的截面尺寸和合理的过渡部分,务使该部分处于均匀分布的轴向拉伸应力作用下,以获得较准确的机械性能指标。

拉力试验的试样截面有圆形、矩形及管形等,在国家标准中均有规定,这里不再赘述。仅就标准及比例的圆形试样做以简述,见图 1-1 所示。

图 1-1 的试样尺寸应符合表 1-1~2 的规定。

表 1-1

单位: 毫米

一 般 尺 寸					短 试 样 $l_0=5d_0$				长 试 样 $l_0=10d_0$					
d_0	D	h	h_1	R 最小	试号	样数	l_0	l	L	试号	样数	l_0	l	L
25	45	30	5	5	9		125	150	$L=l+2h+2h_1$	09		250	275	$L=l+2h+2h_1$
20	34	25	5	5	10		100	120		010		200	220	
15	28	20	3	3	11		75	90		011		150	165	
10	16	10	3	3	12		50	60		012		100	110	
8	13	10	3	2	13		40	48		013		80	88	
6	12	10	2.5	1.5	14		30	36		014		60	66	
5	11	10	2.5	1.5	15		25	30		015		50	55	
3	7	7	2.0	1.5	16		15	20		016		30	35	

圆形试样的直径通常为 3~25 毫米,对钢、铜材一般采用直径 d_0 为 10 毫米的短、长试样。

表 1-2

单位: 毫米

试 样 直 径 d_0	试样标距部分直径 d_0 的允许偏差	试样标距长度内最大与 最小直径的允许差值
<5	± 0.05	0.01
$5\sim 10$	± 0.1	0.02
≥ 10	± 0.2	0.05

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,绘出负荷—伸长曲线,这种曲线叫做拉伸图(拉伸曲线)。

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

负荷比较小时,试验时伸长跟负荷成正比地增加,保持直线关系。负荷超过 P_p 后,拉伸曲线开始偏离直线,保持直线关系的最大负荷,是比例极限的负荷 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。当负荷大于 P_e 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。卸荷后的残余变形是塑性变形。开始产生微量塑性变形的负荷,是弹性极限的负荷 P_e 。一般说来, P_p 与 P_e 是很接近的。

负荷增加到一定值时,负荷指示器(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,在此负荷不增加或减小的情况下,试样还继续伸长,这种现象叫做屈服。屈服阶段的最小负荷,是屈服点的负荷 P_s 。屈服后,金属开始产生明显的塑性变形,试样表面出现滑移带。

在屈服阶段以后,再继续变形,负荷重新增加。随着塑性变形的增大,变形抗力不断增加的现象,叫做加工硬化。负荷达到一个最大值 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的急剧缩小,致使负荷下降。拉伸图上的最大负荷,是强度极限的负荷 P_b 。

负荷达 P_K 时,试样断裂。这个负荷称为断裂负荷。

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 1-3a 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 1-3b 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,最大负荷就是断裂负荷,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。

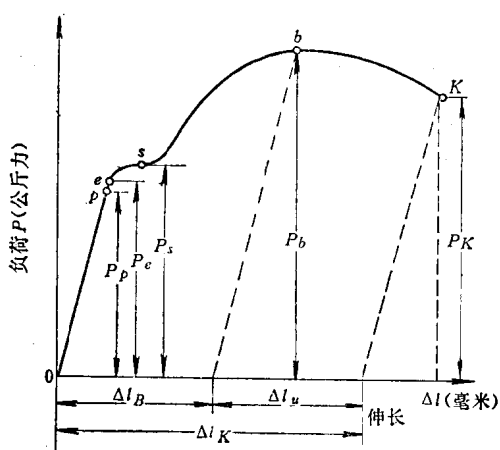


图 1-2 低碳钢的拉伸图

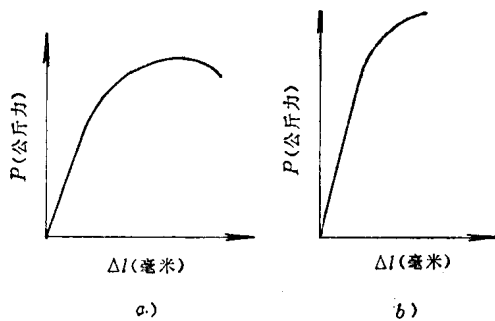


图 1-3 塑性材料及低塑性材料的拉伸图

a) 塑性材料 b) 低塑性材料

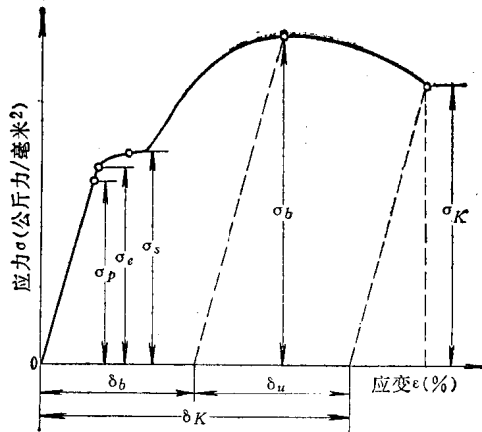


图 1-4 低碳钢的应力—应变曲线图

用试样原始截面积 F_0 来除拉力得到应力 σ , 即 $\sigma = \frac{P}{F_0}$ 公斤力/毫米²。以试样的计算长度 l_0 除绝对伸长 Δl , 得到相对伸长(应变) ε , 即 $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ 。应力与应变的关系曲线, 叫应力—应变图(图 1-4)。应力—应变图的形状, 与拉伸图(负荷—伸长图)相似, 只是坐标不同。应力—应变图的纵坐标表示应力, 单位是公斤力/毫米², 横坐标表示相对伸长, 单位是百分数(%)。应力—应变图不受试样尺寸的影响, 可以直接读出材料的一些机械性能指标, 如材料发生屈服时的最小应力—屈服点 σ_s ; 相当于最大负荷时的应力—强度极限(抗拉强度) σ_b ; 以及断裂后的相对伸长—伸长率(延伸率) δ 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, 即在拉伸图上开始偏离直线时的应力。

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

式中 P_p ——比例极限的负荷, 公斤力;

F_0 ——试样的原始截面积, 毫米²。

实践证明: 测出的比例极限值, 受测量精度的影响甚大, 精度愈高, 测量值愈小。为了便于比较, 根据有关零件的工作条件需要, 规定负荷与伸长已不成直线关系, 产生一定偏离值的应力作为“规定比例极限”, 我国新标准中规定以拉伸曲线的切线与负荷轴间夹角的正切值较弹性直线部分之值增加 50% 作为偏离值, 其应力以 σ_p 表示。有时也允许采用偏离值为 25% 或 10%, 分别以 σ_{p25} 或 σ_{p10} 表示。同一材料的 σ_p 要比 σ_{p25} 和 σ_{p10} 大一点, 即规定的偏离值愈大, 材料的规定比例极限愈大。

规定比例极限的测定方法:

测量伸长值一般是用精度较高的引伸计来进行的。从有关资料中查出试验材料的 σ_p 值作为估计值, 先加约等于 10% 估计值所算得的初负荷 P_0 , 再装上引伸计(加初荷的目的在于消除试件夹头在夹紧前松动造成的误差)。然后分级加荷。各级负荷确定的办法是: 取

70~80% 估计值计算所得的负荷作为末级负荷 P_4 , 再把 $P_4 \sim P_0$ 分为四等分 (或多于四等分), 每一等分 $\Delta P = \frac{P_4 - P_0}{4}$ 作为一级负荷。每加一级负荷, 测一次伸长。根据从初负荷到末级负荷的总伸长, 计算出一小级负荷的平均伸长, 直到后加的某一级小负荷 (每一小级按 2 公斤力/毫米² 左右计算) 后, 引起的伸长增量等于上述计算出一小级负荷平均伸长的 1.5 倍时, 这时的总负荷, 就是比例极限的负荷 P_p 。若 1.5 倍平均伸长增量在两级小负荷之间, 可用内插法求之。

举例: 测定 65 号碳钢 (820°C 油淬, 经 600°C 回火) 的 σ_p (图 1-5)。

试样工作部分直径 $d_0 = 10$ 毫米, 试样工作部分截面积 $F_0 = 78.5$ 毫米²; 引伸计的每分格为 0.002 毫米, 查手册知道: 这种钢 σ_p 约为 60 公斤力/毫米², 以此作为估计值。初负荷 $P_0 = \sigma_p \times 10\% \times F_0 = 60$ 公斤力/毫米² $\times 10\% \times 78.5$ 毫米² = 471 公斤力, 取整数为 500 公斤力。加初负荷后, 引伸计指示在 10 分格上。

末级负荷 $P_4 = \sigma_p \times 80\% \times F_0 = 60$ 公斤力/毫米² $\times 80\% \times 78.5$ 毫米² = 3768 公斤力,

取整数为 3700 公斤力。分为四等分, 每级为 $\Delta P = \frac{3700 \text{ 公斤力} - 500 \text{ 公斤力}}{4} = 800$ 公斤力。

以后的小级负荷以 2.5 公斤力/毫米² 计算, 应为 $\Delta P = 2.5 \text{ 公斤力/毫米}^2 \times 78.5 \text{ 毫米}^2 = 196$ 公斤力, 取整数为 200 公斤力。

加每级负荷后测量伸长, 记入记录表 1-3 内。

表 1-3

负 荷 (每级加 800 公斤力)		引伸计读数 (分格)	读 数 增 量 (分格)	负 荷 (每小级加 200 公斤力)		引伸计读数 (分格)	读 数 增 量 (分格)
P_0	500	10.0	—	3900		61.0	3.0
P_1	1300	22.5	12.5	4100		64.0	3.0
P_2	2100	34.5	12.0	4300		67.5	3.5
P_3	2900	46.0	11.5	4500		71.5	4.0
P_4	3700	58.0	12.0	4700		77.5	6.0
				4900		86.0	8.5

加上末级负荷后, 根据总伸长, 求出每一小级负荷的平均伸长:

$$\Delta l_{200} = \frac{58 \text{ 分格} - 10 \text{ 分格}}{3700 \text{ 公斤力} - 500 \text{ 公斤力}} \times 200 \text{ 公斤力} = 3.0 \text{ 分格},$$

其 1.5 倍为 4.5 分格。

再增加小级负荷, 每级 200 公斤力, 测其伸长, 同样记在表 1-3 内, 分析记录表可知, 读数增量 4.5 分格是在 4500~4700 公斤力两级负荷之间, 要用内插法求出: 负荷增加 200 公斤力, 读数增量由 4.0 分格变为 6.0 分格, 增加了 2.0 分格, 相当于 P_p 时, 读数增量应为 4.5 分格,

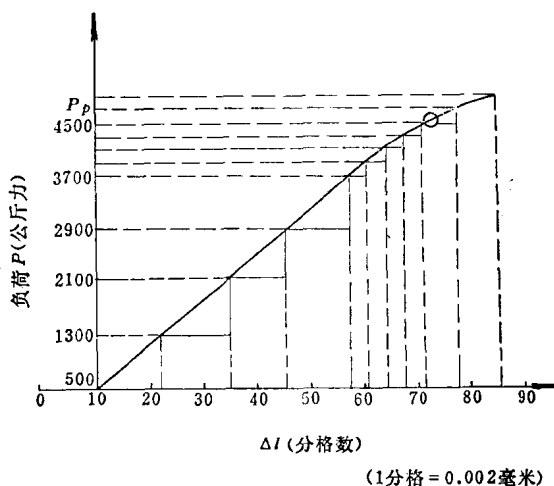


图 1-5 比例极限 σ_p 的测定

比 4500 公斤力时应多 0.5 分格。

用比例法求出它的负荷增量 x :

200 公斤力: 2.0 分格

x 公斤力: 0.5 分格

$$x = \frac{0.5}{2.0} \times 200 = 50 (\text{公斤力})$$

$$\therefore P_p = 4500 + 50 = 4550 (\text{公斤力})$$

规定比例极限 σ_p 则为:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} = \frac{4550}{78.5} = 58 (\text{公斤力/毫米}^2)$$

(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。

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \text{ 公斤力/毫米}^2$$

式中 P_e 为弹性极限的负荷(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”。一般说来, 是以产生 0.005~0.05% 的残余伸长的应力作为规定弹性极限。在新国标中规定以残余伸长为 0.01% 的应力作为“规定弹性极限”, 并以 $\sigma_{0.01}$ 表示。弹性极限并不代表金属对最大弹性变形的抗力, 而是代表开始塑性变形的抗力, 严格说来, 是代表微量塑性变形的抗力。

工作条件下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, 如果选用弹簧材料的规定弹性极限低, 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。所以在新国标中, 把规定残余伸长应力 $\sigma_{0.01}$, 并列于规定比例极限 σ_p 之后。这为在材料强度指标中逐步取消规定比例极限 σ_p 创造条件。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。

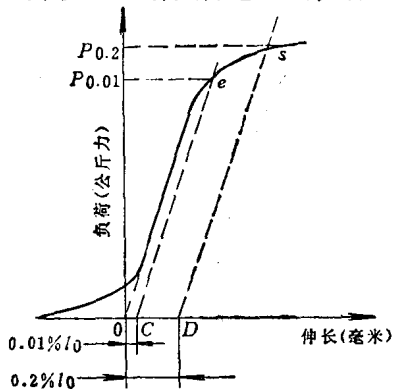


图 1-6 图解法确定 $\sigma_{0.01}$ 及 $\sigma_{0.2}$

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负荷—伸长(夹头位移)曲线或根据测力计刻度盘与引伸计读得的负荷—伸长曲线(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 点的负荷, 便是规定残余伸长应力的负荷 $P_{0.01}$, 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。

(三) 屈服极限

1. 屈服点 σ_s 在拉伸过程中, 负荷不增加, 甚至有所降低, 试样还继续发生明显变形的最小应力, 叫做屈服点(物理屈服极限), 以 σ_s 表示, 即:

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ 公斤力/毫米}^2$$

式中 P_s 是负荷不增加, 甚至有所降低, 试样还继续伸长的最小负荷(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 的负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负荷, 就是 P_s 。

(2) 图示法: 在拉伸图上找出屈服平台的恒定负荷(图 1-7a) 或第一次下降的最小负荷(图 1-7b) 就是 P_s 。

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

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

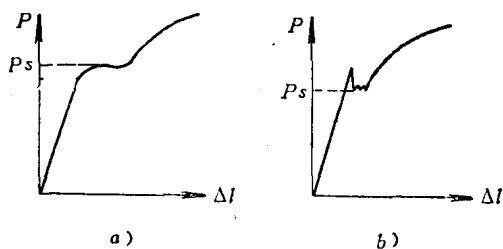


图 1-7 屈服点的确定

式中 $P_{0.2}$ 为产生 0.2% 残余伸长的负荷(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, 并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, 见图 1-6。只是要求的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: 将试样固定在夹头内, 先加 10% 屈服强度估计值的初负荷 P_0 后, 安装引伸计, 再将负荷增加到 $2P_0$, 保持 5~10 秒后卸荷到 P_0 , 此时引伸计读数可调到零点, 或取某一分格读数作为条件零点。下面介绍两种测定法:

a. 卸荷法: 此法也可称为逐步增大变形法。加上初负荷后, 反复加荷、卸荷, 逐步增大变形量, 每次卸荷后测其残余伸长, 直到残余伸长达到规定值 0.2% l_0 为止, 这时的负荷就是 $P_{0.2}$ 。

举例: 测定 40MnB 钢调质后的 $\sigma_{0.2}$ (图 1-8)。

试样 $d_0=10$ 毫米, $F_0=78.5$ 毫米²; 试样标距 l_0 及引伸计基础长度均为 50 毫米, 引伸计每一分格为 0.01 毫米。与规定残余伸长相当的分格数为

$$\frac{0.2\% l_0}{0.01} = \frac{0.002 \times 50}{0.01} = 10 \text{ (分格)}$$

这种钢的屈服强度估计值为 80 公斤力/毫米²。

初负荷应为 $P_0 = 10\% \times \sigma_{0.2} \times F_0 = 0.1 \times 80 \times 78.5 = 628$ (公斤力), 取整数为 600 公斤力。加初负荷后引伸计读数设为 1 分格, 即以 1 分格作为条件零点。

第一次使试样拉长到比规定残余伸长还多 1~2 分格的长度(此处按 2 分格计算), 即 $10+1+2=13$ 分格(式中第一项为残余伸长分格数, 第二项为条件零点, 第三项为估计的弹性

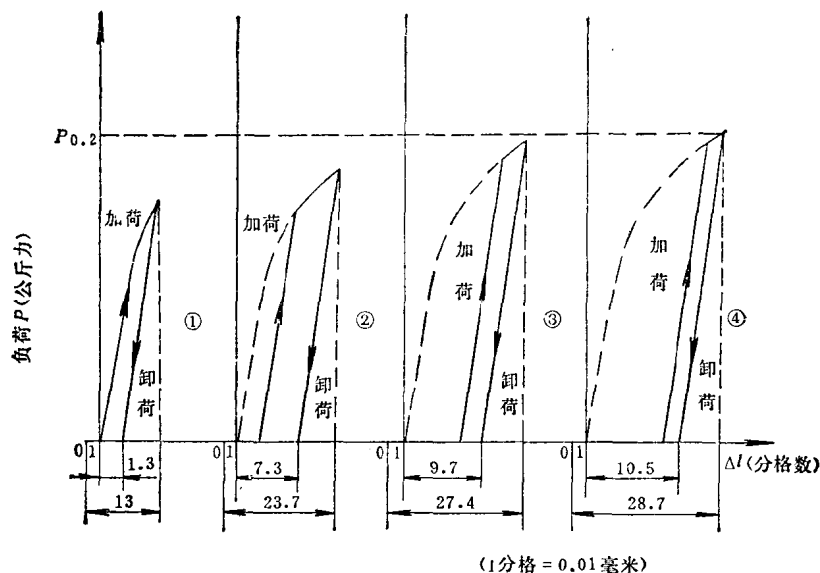


图 1-8 用卸荷法测定屈服强度负荷 $P_{0.2}$

伸长分格数)。此时负荷读数为 4100 公斤力；卸荷后测残余伸长为 1.3 分格。说明这一次加荷太小，残余伸长值远较 10 分格为低。

第二次使试样拉长到引伸计分格数为 $(10 - 1.3) + 13 + 2 = 23.7$ 分格的长度（式中 13 分格为上次加荷的总伸长，条件零点 1 分格包括在内；这个负荷只引起 1.3 分格的残余伸长，故第二次加荷就希望有 $10 - 1.3 = 8.7$ 分格的残余伸长而使总残余伸长达 10 分格；由于负荷增大使残余伸长增加的同时还增大弹性伸长，故还应多加 2 分格），此时的负荷读数为 5700 公斤力，卸荷后残余伸长为 7.3 分格。

第三次使试样拉长到 $10 - 7.3 + 23.7 + 1 = 27.4$ 分格（理由同上，只是因需要增加的残余伸长仅 2.7 分格，故弹性伸长只多加 1 分格）。

如此加荷、卸荷，直到试样的残余伸长达或稍超过 10 分格为止，将数值记入表 1-4 内。

表 1-4

负荷读数(公斤力)	加 荷 读 数(分格)	卸 荷 读 数(分格)	残余伸长(分格)
600	—	1.0	—
4100	13.0	2.3	1.3
4700	23.7	8.3	7.3
6100	27.4	10.7	9.7
6200	28.7	11.5	10.5

由表 1-4 中可见残余伸长 10 分格的负荷在 6100 到 6200 公斤力负荷之间，用内插法求之。

增加 $6200 - 6100 = 100$ (公斤力) 的负荷，残余伸长增加 $10.5 - 9.7 = 0.8$ (分格)。那么 $10 - 9.7 = 0.3$ 分格负荷应增加 ΔP ， $\Delta P = \frac{100 \times 0.3}{0.8} = 37.5$ (公斤力)。

$$\therefore P_{0.2} = 6100 + 37.5 = 6137.5 \text{ (公斤力)}$$

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0} = \frac{6137.5}{78.5} = 78 \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)}$$

b. 逐级增加负荷法: 与测定 σ_p 相似, 逐级加荷, 先求出弹性直线段时相应于一小等级负荷的平均伸长增量, 由此计算出偏离直线后的各小级负荷的弹性伸长值, 从总伸长中减去弹性伸长就是残余伸长, 残余伸长为 $0.2\% l_0$ 时的应力即为 $\sigma_{0.2}$ 。

举例: 测定铝合金的 $\sigma_{0.2}$ 。(图 1-9)。

试样厚 $a_0=2.9$ 毫米, 宽 $b_0=15$ 毫米, $F_0=43.5$ 毫米²。引伸计基础长度为 50 毫米, 每一分格为 0.01 毫米, 规定残余伸长为 $\frac{0.2\% \times 50}{0.01}=10$ (分格)。

屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的估计值为 30 公斤力/毫米²。

初负荷 $P_0=10\% \times \sigma_{0.2} \times F_0=0.1 \times 30 \times 43.5=130.5$ (公斤力), 现取整数 200 公斤力。加初负荷后, 设引伸计的条件零点为 1 分格。

相应于 $\sigma_{0.2}$ 估计值 80% 的负荷 $P_n=80\% \times \sigma_{0.2} \times F_0=80\% \times 30 \times 43.5=1044$ (公斤力), 取整数 1000 公斤力。从 P_0 到 P_n 分四级, 每一级负荷增值

$$\Delta P = \frac{P_n - P_0}{4} = \frac{1000 - 200}{4} = 200 \text{ (公斤力)}$$

加 P_n (1000 公斤力) 之后的每一小级负荷增值, 按 2 公斤力/毫米² 计算: $\Delta P_k = 2 \times 43.5 = 87$ (公斤力), 取整数为 100 公斤力。

每次加荷后读出引伸计上的伸长读数, 记入表 1-5。

表 1-5

负 荷 (公斤力)	引 伸 计 读 数 (分格)	伸长读数增值 (分格)	计算弹性伸长 (分格)	计算残余伸长 (分格)
200	1.0	—	$\Delta l_{200}=3.2$ 或 $\Delta l_{100}=1.6$	
400	4.1	3.1		
600	7.2	3.1		
800	10.5	3.3		
1000	13.8	3.3		
1100	15.7	1.9	15.4	0.3
1200	18.0	2.3	17.0	1.0
1300	22.1	4.1	18.6	3.5
1400	30.3	8.2	20.2	10.1

由表可知: 负荷在 1000 公斤力以下为纯弹性伸长, 求出弹性直线段中每 200 公斤力负荷增值引起的平均伸长增量 $\Delta l_{200} = \frac{13.8 - 1.0}{1000 - 200} \times 200 = 3.2$ (分格) 或 $\Delta l_{100} = 3.2/2 = 1.6$ (分格)。

由于弹性伸长量始终与负荷量成正比, 故在任何负荷的弹性变形增量 Δl_{100} 均为 1.6 分格。故可将 1100 公斤力级负荷的弹性伸长量计算出: $13.8 + 1.6 = 15.4$ (分格); 1200 公斤力级为 $13.8 + 2 \times 1.6 = 17.0$ (分格) 等, 也记入表内。加负荷后总的伸长减去弹性伸长, 为残余伸长(严格讲应叫非比例伸长), 加荷直到残余伸长等于或稍超过 10 分格为止。

由表 1-5 中查出 $P_{0.2}$ 为 1400 公斤力, 故:

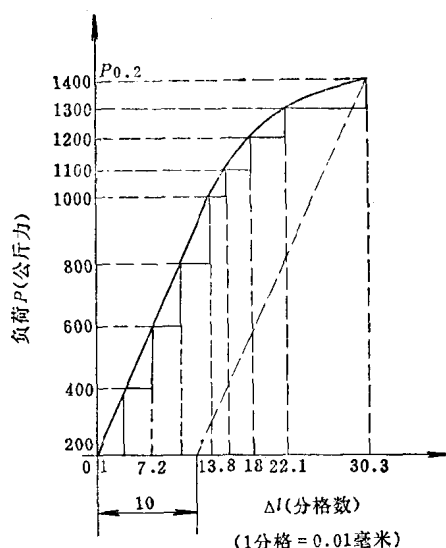


图 1-9 逐级加荷法测定屈服强度负荷 $P_{0.2}$

$$\sigma_{0.2} = \frac{1400 \text{ 公斤力}}{43.5 \text{ 毫米}^2} = 32 \text{ 公斤力/毫米}^2$$

卸荷法测量的是残余伸长应力,逐级加荷法实际上是测量非比例伸长应力,两种方法所得结果可能相近,也可能有差异,如几种铝合金的 $\sigma_{0.2}$,两种方法测量结果差异不大。

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1-10所示。

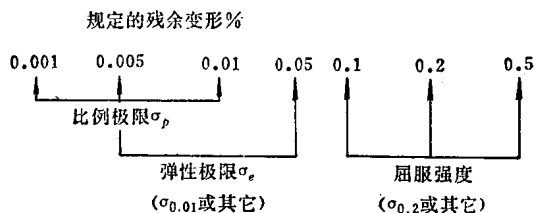


图 1-10 σ_p 、 σ_e 及屈服强度之间的关系

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,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,则要以材料的屈服强度为设计和选材的主要依据。正因为这样,屈服强度(屈服点)是评定金属质量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) σ_b

抗拉强度(强度极限) σ_b 是相当于拉断前最大负荷的应力,即试样所能承受的最大负荷除以原始截面积,以 σ_b 表示。

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

式中 P_b 为拉断前试样所能承受的最大负荷(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,由于缩颈处截面积的急剧减小,试样能担负的负荷减少,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1-11中曲线1所示。在 P_b 以后,如果改成缩颈处的瞬时截面积 F_x 去除当时的负荷,得到真实应力 S ($S = \frac{P}{F_x}$ 公斤力/毫米²)也随着变形度的增加而增大,如图1-11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最大均匀变形的抗力,表征材料在拉伸条件下所能担负的最大负荷的应力值,工程上常称为抗拉强度,它是设计和选材的主要依据之一,也是材料主要机械性能指标之一。

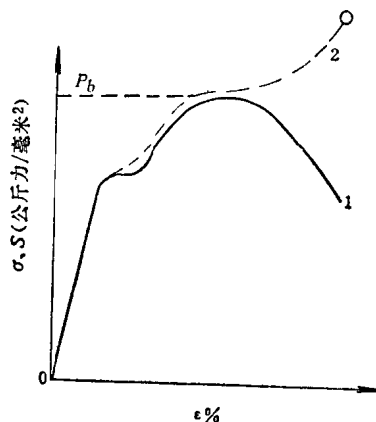


图 1-11 σ (或 S)- ϵ 曲线