

基础力学实验 竞赛教程

■ 杨绪普 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

基础力学实验竞赛教程

主 编 杨绪普

副主编 韦忠瑄 陈 平 蔡传国 陈国良

编 者 蔡传国 陈国良 陈 平 顾 娟

韦忠瑄 闫凤国 杨绪普

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

基础力学实验教学在学生创新能力和综合素质提高方面得到各校的一致认可,由江苏省发起,得到教育部课指委支持的首届全国大学生基础力学实验竞赛吸引了 106 所高校的 4 000 多人参加。

本书内容分三个部分。第一部分为基本理论与方法,涵盖了基础力学实验竞赛的考核范围,即机测和电测的理论知识;第二部分为竞赛常见题型分类详解,对典型题分门别类进行汇编讲解;第三部分为模拟试题汇编及解答,包括 20 套不同阶段的模拟试题,并给出了参考答案。

本书所编基本理论内容紧扣比赛出题范围,翔实全面;模拟试题经作者学校精心提炼、优化创新,参照历年比赛真题编写,适合参赛者备战使用。同时,也对基础力学实验教学具有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

基础力学实验竞赛教程 / 杨绪普主编. —北京 :
中国铁道出版社, 2012. 11
ISBN 978-7-113-14764-8

I. ①基… II. ①杨… III. ①力学 - 实验 - 高等学校
- 教学参考资料 IV. ①O3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 144279 号

书 名: 基础力学实验竞赛教程

作 者: 杨绪普 主编

策 划: 邓 静

读者热线: 400-668-0820

责任编辑: 李小军 徐盼欣

封面设计: 刘 颖

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.51eds.com>

印 刷: 三河市华业印装厂

版 次: 2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16 印张: 18 字数: 463 千

书 号: ISBN 978-7-113-14764-8

定 价: 38.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010) 63550836

打击盗版举报电话:(010) 63549504

前 言

大学生基础力学实验竞赛最早于2005年由江苏省力学学会教育科普委员会发起举办,25所高校组队参加,一举成功,也得到省外众多高校的认可及主动加盟。2008年遂发展为全国邀请赛,包括清华大学、浙江大学、山东大学等在内的36所高校代表队同台竞技,邀请赛的成功更进一步扩大了该项赛事的影响力。经中国力学学会同意后,2010年由中国力学学会教育科普委员会、教育部高等学校力学指导委员会力学基础课程教学分委员会、教育部国家级实验教学示范中心联席工作委员会力学学科组共同举办了首届正式比赛,全国106所高校约4000名学生参加了初赛,96所高校代表队的近300名学生进入决赛阶段。

比赛从各个方面采取严密措施保证公平性。首先,精心安排竞赛全过程的每个细节,从程序上保证公正、公平。其次,严格实行出题学校回避制与阅卷评分盲评制,并根据答卷情况集体讨论评分标准,做到一把尺子量高低。竞赛还创造性地成立了由资深专家组成的监督仲裁委员会,审核了阅卷评分的有关规定,制订了监督仲裁工作制度,对竞赛全过程进行了抽查和巡视,及时了解并处理了发生的个别违规情况,保证了竞赛规则、制度的执行。可以说,比赛过程是背靠背的,竞争环节是硬碰硬的,成绩奖项是实打实的。

基础力学实验教学在学生创新能力和综合素质提高方面得到各校的一致认可,中国力学学会常务理事会讨论后,将实验力学竞赛纳入周培源大学生力学竞赛中,成为一个组成部分,每两年举行一次,下届比赛将于2013年在西南交通大学举行。

该赛事很好地实现了理论与实践相结合,动手与动脑相结合,个人能力与团队合作相结合,为大学生提供了一个充分展示才华的平台,也为全国从事实验力学教学的同行提供了一个交流学习的平台,得到了各高校领导和广大师生的一致认可和支持。一些高等级奖项的获奖学生获得了免试进入清华、北大、同济等名校攻读研究生的资格,这从另一个侧面反映了该项赛事的含金量。

解放军理工大学作为该赛事的首批倡议和积极参与单位,在组织和辅导方面做了一些工作,参与了2005年比赛的命题工作,获得了2008年比赛的全国二等奖和2010年比赛的全国一等奖的佳绩。在此过程中,积累了一些经验和想法,我们

把这些材料记录并加以整理成讲义,在训练阶段起到了很好的作用,比赛成绩的取得也证明了这点。

感谢中国铁道出版社编辑的热情鼓励和社领导的倾力支持,使得这本教程能够快速地与读者见面。本书作为国内第一部实验力学竞赛教程,填补了该方面教材的空白,但愿能让更多的师生受益,这对于编者、读者和出版者来说都是一件很值得高兴的事。

本书的内容分三个部分。第一部分为基本理论与方法,涵盖了基础力学实验竞赛的考核范围,即机测和电测的理论知识;第二部分为竞赛常见题型分类详解,对典型题分门别类进行汇编讲解;第三部分为模拟试题汇编及解答,包括 20 套不同阶段的模拟试题,并给出了参考答案。

本书具有针对性强,条理性好,难易程度适度,适宜自学等特点,基本理论内容紧扣比赛出题范围,翔实全面;典型题解经精心提炼,优化创新,避免重复,评点精辟;模拟试题的编写紧贴真题,考察全面,重点、难点突出,是参加实验力学竞赛辅导强化训练的师生专用教材,也可作为实验力学、材料力学、工程力学教学的辅导参考书。

全书由杨绪普担任主编,韦忠瑄、陈平、蔡传国、陈国良担任副主编,闫凤国和顾娟承担了部分章节的编写工作,一些参赛学员,尤其是决赛阶段的杨明梦、张鹏、邵筱、赵旭东、童振湄、周健龙同学,协助整理并试做了所有试题,高世豪、邵筱同学在文字录入和校对过程中付出了辛勤劳动,在此一并致谢。

由于编者的水平有限及条件的限制,以及赛事赛制的发展变化,本书肯定存在一些不适当的地方,请读者不吝指正。

杨绪普

2012 年 5 月于解放军理工大学

目 录

第一部分 基本理论与方法	1
第1章 金属材料力学性质	1
1.1 概述	1
1.2 金属材料拉伸时的力学性能	3
1.3 金属压缩时的力学性能	11
1.4 金属扭转时的力学性能	14
第2章 力学性能试验	16
2.1 拉伸试验	16
2.2 压缩试验	25
2.3 扭转试验	29
第3章 应变电测技术基础	34
3.1 概述	34
3.2 电阻应变片的工作原理、构造和分类	35
3.3 电阻应变片的工作特性及标定	40
3.4 测量电路原理与设备	46
3.5 应变片粘贴方位误差的分析	54
3.6 测量结果的修正	56
3.7 电阻应变片的粘贴技术及相关问题	60
第4章 测量电桥的应用	63
4.1 应变-应力换算关系	63
4.2 拉伸应变的测定	67
4.3 扭转切应力的测定	69
4.4 弯曲应变的测定	70
4.5 弯曲切应力的测定	71
4.6 内力分量的测定	72
4.7 常见变形的电桥接法	75
第5章 误差分析和数据处理	81
5.1 概述	81
5.2 误差的基本概念	81
5.3 最佳值 标准误差 误差的分布规律	84
5.4 间接测量中误差的传递	86
5.5 实验数据处理	88

5.6 实验数据的线性拟合方法	91
第二部分 竞赛常见题型分类详解	95
一、是非判断题	95
二、单项选择题	97
三、多项选择题	101
四、填空题	104
五、图解分析题	105
六、简答题	113
七、电测实验设计计算题	121
八、电测实验分析设计操作综合题	183
第三部分 模拟试题汇编及解答	189
模拟试题一	189
模拟试题二	191
模拟试题三	193
模拟试题四	195
模拟试题五	197
模拟试题六	200
模拟试题七	202
模拟试题八	204
模拟试题九	206
模拟试题十	208
模拟试题十一	211
模拟试题十二	212
模拟试题十三	214
模拟试题十四	217
模拟试题十五	219
模拟试题十六	222
模拟试题十七	226
模拟试题十八	228
模拟试题十九	230
模拟试题二十	233
模拟试题解答	237
参考文献	280

第一部分 基本理论与方法

第1章 金属材料力学性质

1.1 概 述

材料的使用性能包括物理、化学、力学等性能。对于用于工程中作为构件和零件的结构材料,人们最关心的是它的力学性能。力学性能又称机械性能。任何材料受力后都要产生变形,变形到一定程度即发生断裂。这种在外载荷作用下材料所表现出来的变形与断裂的行为称为力学行为,它是由材料内部的物质结构决定的,是材料本身固有的属性。

材料的力学性能指标测试是材料力学实验的主要内容之一。金属材料的力学性能指标除了取决于材料的化学成分、金相结构、表面和内部缺陷外,还与测试方法、试样形状、尺寸、加工精度、环境温度等有关。因此,为了使测试的力学性能在国际、国内都能通用(即能互相对照、引用),对试样、实验设备和实验方法建立了相应的国家标准,对各力学性能指标的定义、测试方法等做出了统一规定。随着测试技术的发展及实验要求的变化,使国家标准逐渐与国际标准接轨,近年来,国家标准作了比较大的修订。本书的实验方法主要依据国家标准 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》、GB/T 7314—2005《金属材料 室温压缩试验方法》,考虑到大学生使用的材料力学教材,部分符号及名称仍与材料力学教材中规定一致,与国家标准的不同之处,在相关处会列出或在叙述中特别指出。

1.1.1 工程应变和工程应力

1. 工程应变和真实应变

当对试样施加一个载荷 F 后,试样长度由 l_0 伸长到 l ,它的伸长是 $\Delta l = l - l_0$,这时的轴向线应变即是试样试验段长度的相对变化量,即

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (1.1)$$

ε 又称工程应变,因为在计算 ε 时使用了原长 l_0 。

事实上,由于在拉伸过程中试样不断伸长, ε 不能代表试样每一瞬间的相对伸长,真实线应变应该是瞬时伸长 dl 与瞬时长度 l 之比的积分值,即

$$\varepsilon_T = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1.2)$$

将式(1.1)代入式(1.2)可得

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1.3)$$

式中, ε_T 为材料拉伸均匀变形时的真实应变。仅当试样沿轴向均匀变形时式(1.3)才成立。在拉伸试样出现颈缩或压缩试样出现鼓胀现象时, 试样的变形沿轴向不再均匀, 式(1.3)则不成立。

如果材料本身的力学性质不均匀, 或横截面积是变化的, 则应变往往不均匀, 这时应变测量必须在小范围内进行。

从式(1.1)可知: 应变是一个无量纲量, 正应变表示伸长, 负应变表示缩短。

2. 工程应力和真实应力

拉伸试样横截面上的正应力可以通过作用于试样的载荷 F 除以原始横截面积 A_0 来得到, 其表达式为

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.4)$$

由于在加载过程中试样的横截面积是在不断改变的, 而工程上为了计算方便, 以试样的原始横截面积 A_0 来计算应力, 因此 σ 又称工程应力。如果考虑横截面积的改变, 则真实应力为

$$\sigma_T = \frac{F}{A} = \frac{\sigma}{(1 - \mu\varepsilon)^2} \quad (1.5)$$

式中, A 为加载过程中的横截面积。应力的单位为帕斯卡, 记为 Pa, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。由于 Pa 太小, 常使用 MPa, $1 \text{ MPa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$ 。与线应变相对应, 拉伸时应力取正, 压缩时取负。

以上是指在试样整个横截面范围内的应力均匀分布的情况, 在均匀应力作用下应变也是均匀的, 在非均匀应变下, 材料内各点的应力也必定是变化的。例如, 横截面上有孔、槽或尺寸变化时, 横截面上的应力是非均匀的。

1.1.2 材料的弹性常数

材料的弹性常数, 顾名思义是指材料在弹性范围内的常数, 是材料本身所固有的常数。

1. 弹性模量

图 1-1-1(a) 为低碳钢拉伸图。如果把载荷除以试样原始横截面积 A_0 , 把伸长 Δl 除以原始标距 l_0 , 则载荷、变形分别转换为应力、应变, 拉伸图即转换为应力-应变图, 如图 1-1-1(b) 所示。

绝大多数金属材料单向拉伸(或单向压缩)时的应力-应变图中, 在加载的起始阶段都有一段弹性阶段。在这个阶段中任一点卸载载荷时, 变形将会完全恢复, 这种变形称为弹性变形。在弹性阶段, 应力-应变曲线上某点切线的斜率称为弹性模量, 用符号 E 表示, 即

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (1.6)$$

实验表明, 绝大多数金属材料在拉伸过程的起始阶段, 应力-应变曲线是一段直线。通常所说的材料的弹性模量指该直线段的斜率, 仍用 E 表示, 即

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

弹性模量的单位与应力的单位相同, 经常使用 GPa, $1 \text{ GPa} = 1 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。国家标准中也使用 N/mm^2 , 有 $1 \text{ GPa} = 1000 \text{ N/mm}^2$ 。

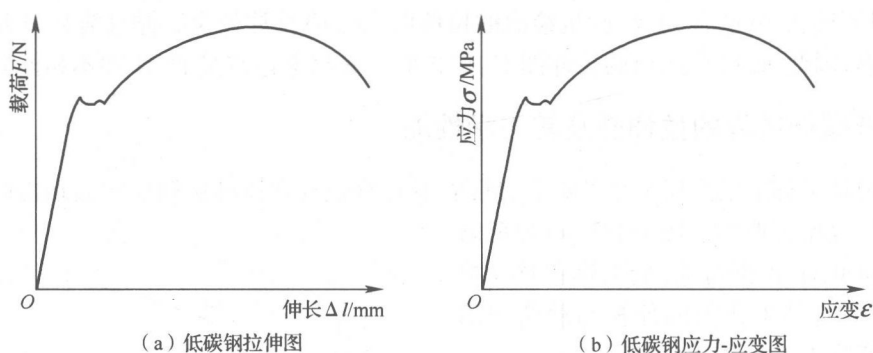


图 1-1-1 低碳钢的拉伸图和应力-应变图

2. 切变模量

扭转实验时,横截面上的最大扭转切应力 τ 与最大切应变 γ 之间也存在类似于图 1-1-1(b) 之间的关系,区别只是纵坐标为切应力 τ ,横坐标为切应变 γ 。将线弹性阶段切应力与切应变的比值称为切变模量,用 G 表示,即

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.8)$$

切变模量 G 的单位与弹性模量 E 的单位相同,常使用 GPa。

3. 泊松比

试样在拉伸(或压缩)时,横截面积会减小(或增大),即存在横向应变 ε' 。在材料变形范围内,将横向应变 ε' 与纵向应变 ε 之比的绝对值定义为材料的泊松比,用 μ 表示,即

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| \quad (1.9)$$

泊松比是无量纲量。在材料的弹性阶段,泊松比 μ 是常数。

根据材料力学理论,三个弹性常数之间有如下关系,即

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1.10)$$

式(1.9)的定义似乎表明,泊松比只能为正值,其实,科学家已发现负泊松比的天然材料,也发明制作了具有负泊松比的人工合成材料,所以,将泊松比定义为下式更为合适。

$$\mu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (1.11)$$

1.2 金属材料拉伸时的力学性能

1.2.1 拉伸图与应力-应变图

拉伸试验及压缩试验是材料力学性能测试的主要途径。将实验时作用于试样的载荷 F 和试样原始标距部分的伸长 Δl 逐点测出后画在记录纸上,连接这些点,得到的曲线称为拉伸曲线(或压缩曲线,有时也称拉伸图与压缩图)。拉伸曲线一般可由自动绘图仪绘制。带计算机辅助测试功能的试验机,能够直接绘制应力-应变图。应力-应变图是计算力学性能指标的

重要依据。如图 1-1-1 所示, (a) (b) 分别为低碳钢拉伸图和应力-应变图, 由于 A_0 、 l_0 均为常量, 故两图形形状相同 (注意: 试验机绘出的拉伸图上的伸长常包含试样过渡部分和试样夹持部分的变形, 因此, 试验机绘出的拉伸图上, 伸长的定义与上述定义的 Δl 并不相同)。

1.2.2 低碳钢试样的拉伸图及其力学性能

低碳钢是工程上最广泛使用的材料, 同时, 低碳钢试样在拉伸试验中所表现出的变形与抗力间的关系也比较典型。图 1-1-2 (a) 为低碳钢试样的拉伸图, 由图可见, 低碳钢在整个拉伸试验过程中, 其工作段的伸长与载荷间的关系大致可分为以下四个阶段。

阶段 I 试样的变形完全是弹性的, 全部卸除载荷后, 试样将恢复到原长, 这一阶段称为**弹性阶段**。低碳钢试样在此阶段内, 其伸长与载荷之间成正比关系, 即

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA}$$

虽精确的测量指出伸长与载荷间的关系和正比关系略有偏离, 但从工程实用的精确度要求来看, 此种微小的偏离是可以忽略不计的。

阶段 II 试样的伸长急剧增加, 而试验机上的载荷读数却在很小范围内波动。如果略去这种载荷读数的微小波动不计, 则这一阶段在拉伸图上可用一水平线段来表示, 即试样的载荷基本不变而试样却不断伸长。这一现象称为**屈服**, 这一阶段则称为**屈服阶段**。屈服阶段出现的变形, 含有不可恢复的塑性变形。若试样经过抛光, 则在试样表面可看到方向约与轴线成 45° 的条纹 (见图 1-1-2 (b)), 这是由材料沿试样的最大切应力面滑移而出现的, 称为**滑移线**。

阶段 III 试样经过屈服阶段后, 使其继续伸长, 由于材料在塑性变形中不断发生强化, 因而试样中的抗力不断增长。这一阶段称为**强化阶段**, 在强化阶段中试样的变形主要是塑性变形, 所以要比在弹性阶段内试样的变形大得多。在此阶段中可以较明显地看到整个试样的横向尺寸在缩小。

阶段 IV 试样伸长到一定程度后, 载荷读数反而逐渐降低。此时可以看到试样某一段内的横截面积显著地收缩, 出现如图 1-1-2 (c) 所示的**颈缩**现象。在试样继续伸长 (主要是颈缩部分的伸长) 的过程中, 由于缩颈部分的横截面积急剧缩小, 因此载荷读数 (即试样的抗力) 反而降低, 一直到试样被拉断。这一阶段称为**局部变形阶段**。

若在强化阶段中停止加载, 并逐渐卸除载荷, 如图 1-1-3 所示, 则可看到, 在这一过程中载荷与试样的伸长之间遵循直线关系, 该直线 bc 与弹性阶段内的直线 Oa 近乎平行。卸载时载荷与伸长之间遵循直线关系的规律称为**材料的卸载规律**。由此可见, 试样的变形包括弹性变形 Δl_e 和塑性变形 Δl_p 两部分, 在卸载过程中, 弹性变形会逐渐消失, 只留下塑性变形。

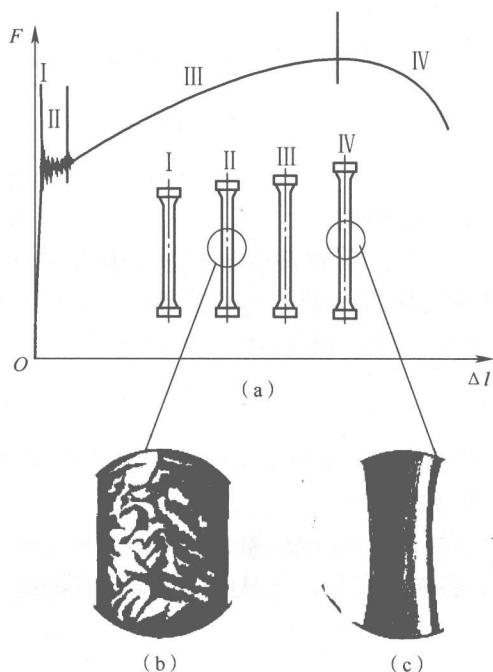


图 1-1-2 低碳钢的拉伸试验各阶段示意图

如果卸载后立即再加载荷,则载荷与伸长间基本上仍遵循着卸载时的同一直线关系,一直到开始卸载时的载荷为止。再往后则大体上遵循着原来拉伸图的曲线关系。

常温下,若对试样预先施加轴向拉力,使之达到强化阶段,然后卸载(例如在图 1-1-3 中的 b 点处卸载),则当再加载荷时,试样在弹性阶段范围内所能承受的最大载荷将增大,而试样所能经受的塑性变形降低。这一现象称为材料的冷作硬化。在工程上常利用冷作硬化来提高钢筋和钢缆绳等构件在弹性阶段范围内所能承受的最大载荷。经过一段时间后再受拉,则其弹性阶段范围的最大载荷还有所提高,如图 1-1-3 中虚线 cb' 所示。这种现象称为冷作时效。冷作时效不仅与卸载后至加载的时间间隔有关,而且与试样所处的温度有关。

低碳钢试样的拉伸图只能代表试样的力学性能,因为该图的横坐标和纵坐标均与试样的几何尺寸有关。若将拉伸图的纵坐标即载荷 F 除以试样横截面的原面积 A ,将其横坐标即伸长 Δl 除以试样工作段的原长 l ,所得曲线即与试样的尺寸无关,则可以得到代表低碳钢材料的力学性能的应力-应变曲线或 σ - ε 曲线。

1.2.3 其他金属在拉伸时的力学性能

图 1-1-4 中给出了另外几种典型的金属材料在拉伸时的 σ - ε 曲线。将这些曲线与图 1-1-2 相比较,可以看出:有些材料例如强铝和退火球墨铸铁没有屈服阶段,而其他三个阶段却很明显;另外一些材料例如锰钢则仅有弹性阶段和强化阶段,而没有屈服阶段和局部变形阶段。

这些材料的共同特点是伸长率 δ 均较大,它们和低碳钢一样都属于塑性材料。对于没有屈服阶段的塑性材料,通常将对应于塑性应变 $\varepsilon_p = 0.2\%$ 时的应力定义为规定非比例伸长应力或屈服强度,并以 $\sigma_{p0.2}$ 表示。这是一个人为规定的极限应力,作为衡量材料强度的指标。确定 $\sigma_{p0.2}$ 数值的方法如图 1-1-5 所示。图中的直线 CD 与弹性阶段内的直线部分相平行。

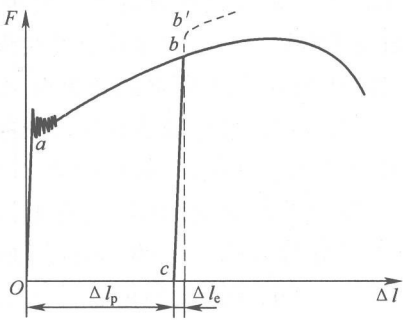


图 1-1-3 低碳钢的拉伸加载卸载曲线

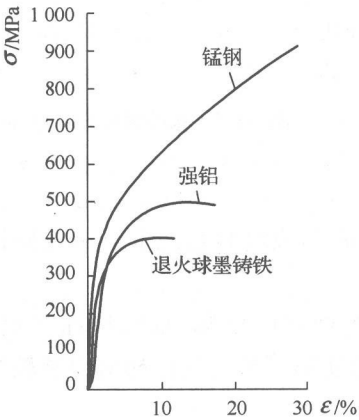


图 1-1-4 锰钢、强铝、退火球墨铸铁的拉伸曲线

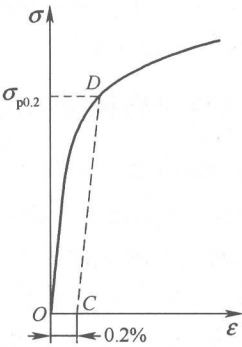


图 1-1-5 无明显屈服点的材料的屈服强度

图 1-1-6(a) 为最常见的金属材料拉伸 σ - ϵ 曲线, 并没有明显的屈服点, 工程上很多金属材料, 如调质钢和一些轻合金都有此类现象。

图 1-1-6(b) 具有明显的屈服点, 有时呈平台状, 有时呈齿状, 相应应变变量 1% ~ 3%。低碳钢为代表, 某些有色金属也有此类现象。

图 1-1-6(c) 所示为拉伸时不出现颈缩的 σ - ϵ 曲线, 只有弹性变形和均匀塑性变形阶段。某些塑性较低的金属 (铝青铜) 就在未出现颈缩前的均匀变形过程中断裂, 还有些形变强化能力特别强的金属, 如高锰钢也有此类现象。它们塑性大, 而且形变强化潜力大。

图 1-1-6(d) 在形变强化过程中出现多次局部失稳。曲线相应出现齿形特征, 原因是孪生应变速率超过试验机夹头运动速度, 导致局部应变松弛。某些低溶质因溶体铝合金及铁合金会得到此类曲线。

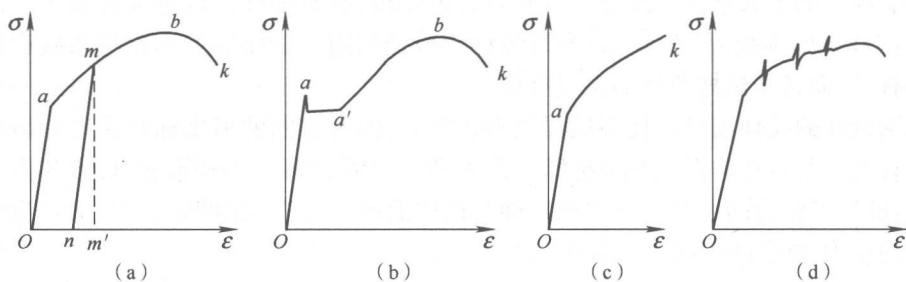


图 1-1-6 其他塑性材料的典型应力-应变曲线

另外一类典型材料的共同特点是伸长率 δ 均很小, 这类材料称为脆性材料。通常以伸长率 $\delta < 5\%$ 作为定义脆性材料的界限。图 1-1-7 所示的就是脆性材料灰口铸铁在拉伸时的 σ - ϵ 曲线。灰口铸铁的 σ - ϵ 曲线从很低的应力开始就不是直线, 但由于直到拉断时试样的变形都非常小, 且没有屈服阶段、强化阶段和局部变形阶段, 因此, 在工程计算中, 通常取总应变为 0.1% 时 σ - ϵ 曲线的割线斜率来确定其弹性模量, 称为割线弹性模量。

衡量脆性材料拉伸强度的唯一指标是材料的拉伸强度极限 σ_b 。这个应力可看成是试样被拉断时的真实应力, 因为脆性材料的试样被拉断时, 其横截面积的缩减极其微小。

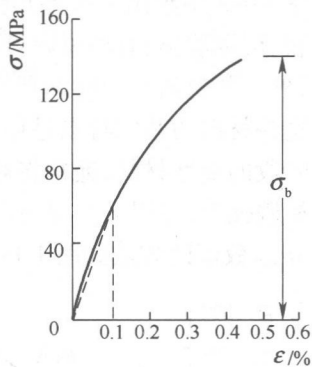


图 1-1-7 脆性材料的应力-应变曲线

1.2.4 力学性能指标及新国标定义

国家标准 GB/T 228—2002 为了与国际标准接轨, 全面系统地对名词术语进行修订完善, GB/T 228.1—2010 则进行了细节的修订。

表 1-1-1 列出了国家标准 GB/T 288—2002 定义的各种强度指标、塑性指标和相应的符号。作为比较, 也列出了旧国家标准中对应的性能指标及使用符号。现行材料力学教材中, 大多还沿用旧国家标准中的名称和符号。

不同性能的金属材料拉伸时, 有各种不同的试验结果。尽管国家标准定义了一系列测试指标, 但这些测试指标并不是什么材料都有的。除低碳钢以外的大多数金属材料没有屈服性

能指标;脆性材料大多没有塑性指标;规定强度指标通常仅须测试一两个即可。

表 1-1-1 新旧国家标准对比表

指标分类	新 国 标		旧 国 标	
	符 号	名 称	符 号	名 称
屈服强度指标	—	屈服强度	σ_s	屈服极限
	R_{eH}	上屈服强度	σ_{sU}	上屈服极限
	R_{eL}	下屈服强度	σ_{sL}	下屈服极限
规定强度指标	R_p	规定非比例延伸强度	σ_b	规定非比例伸长应力
	R_t	规定总延伸强度	σ_t	规定总伸长应力
	R_r	规定残余延伸强度	σ_r	规定残余伸长应力
抗拉强度指标	R_m	抗拉强度	σ_b	抗拉强度 (或强度极限)
塑性 指标	Z	断面收缩率	ψ	断面收缩率
	A	断后伸长率	δ_5	延伸率(伸长率)
	$A_{11.3}$	断后伸长率	δ, δ_{10}	延伸率(伸长率)
	A_t	断裂总伸长率	—	
	A_{gt}	最大总伸长率	δ_{gt}	
	A_g	最大非比例伸长率	δ_g	
	A_e	屈服点延伸率	δ_s	

1. 塑性指标

力学性能测试的目的是为结构强度、刚度和稳定性设计提供计算依据。国家标准 GB/T 228—2002 对力学性能测试提出了一些新的概念和术语,为了能够让试验结果更好地为工程服务,必须首先了解相应的概念、术语、试验方法和数据处理方法。

(1) 伸长及伸长率。试验期间任一时刻原始标距(l_0)的增量称为**伸长**。原始标距的伸长与原始标距之比的百分率称为**伸长率**。如果不考虑百分率,伸长率即是原始标距内的平均应变。

试样拉断后,其标距的残余伸长($l_u - l_0$)与原始标距之比的百分率称为**断后伸长率**(注意:断后伸长率在旧国家标准中称**延伸率**,用 δ 表示。但在新国家标准中,延伸率另有定义)。

断裂时刻原始标距的总伸长(弹性伸长加塑性伸长)与原始标距之比的百分率称为**断裂总伸长率**。最大力时原始标距的伸长与原始标距之比的百分率称为**最大伸长率**。应区分最大总伸长率(A_{gt})和最大非比例伸长率(A_g),如图 1-1-8 所示。

(2) 延伸及延伸率。用引伸计测量试样延伸时,引伸计刀口部分的距离称为**引伸计标距**(l_e)。测定屈服强度和规定强度性能时推荐 $l_e \geq l_0$ 。测定屈服点延伸率和最大力之后的性能时,推荐 l_e 等于 l_0 或近似等于 l_0 。

试验期间任一给定时刻引伸计标距的增量称为**延伸**。延伸与延伸计标距之比的百分率称为**延伸率**。试样施加并卸除应力后引伸计标距的延伸与引伸计标距之比的百分率叫**残余延伸率**。实验中任一给定时刻引伸计标距的非比例延伸与引伸计标距的百分率称为**非比例延伸率**。实验中任一时刻引伸计标距的总延伸(弹性延伸加塑性延伸)与引伸计标距之比的百分率称为**总延伸率**。呈现明显屈服(不连续屈服)现象的金属材料,屈服开始至均匀加工硬化开始之间引伸计标距的延伸与引伸计标距之比的百分率称为**屈服点延伸率**。

2. 屈服强度指标

在试验期间试样发生了塑性变形,但力不增加的现象称为屈服现象。衡量金属材料强度的指标称为屈服强度指标。屈服强度指标有屈服强度、上屈服强度和下屈服强度。

试验发生屈服而力首次下降前的最高应力称为上屈服强度(R_{eH})；在屈服期间,不计初始瞬时效应时的最低应力称为下屈服强度(R_{eL})。初始瞬时效应是指力具有多个下降谷点时的第一个下降谷点,如图 1-1-9 所示。材料力学中,常以下屈服强度(R_{eL})作为屈服极限(σ_s)的值。

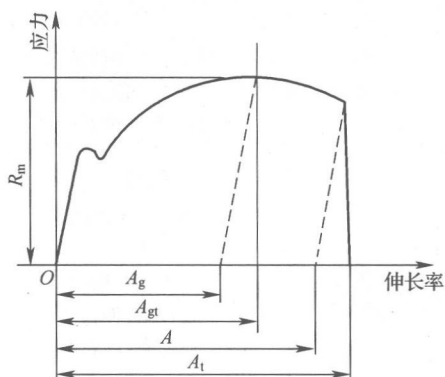


图 1-1-8 伸长率的定义

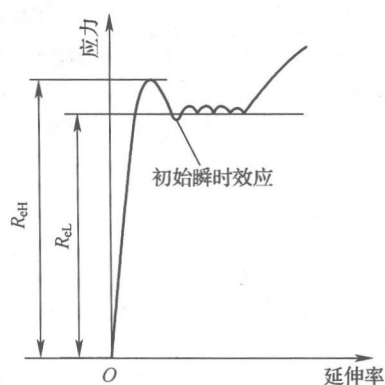


图 1-1-9 屈服强度定义

3. 规定强度指标

有三种不同类型的规定强度指标:规定非比例延伸强度、规定总延伸强度和规定残余延伸强度。

当非比例延伸率等于规定的引伸计标距百分率时的应力称为规定非比例延伸强度(R_p)，如图 1-1-10(a)所示。使用的符号应附以下脚注说明所规定的百分率,例如 $R_{p0.2}$ ，表示规定非比例延伸率为 0.2% 时的应力。

当总延伸率等于规定的引伸计标距百分率时的应力称为规定总延伸强度(R_t)，如图 1-1-10(b)所示。使用的符号应附以下脚注说明所规定的百分率,例如, $R_{t0.5}$ 表示规定非比例延伸率为 0.5% 时的应力。

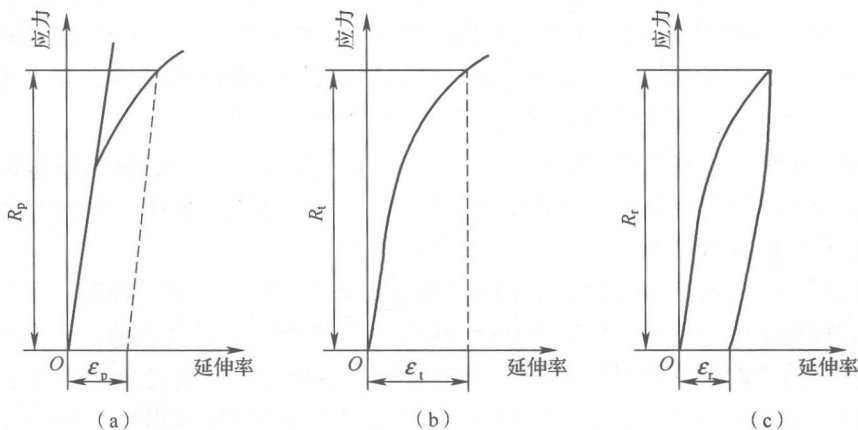


图 1-1-10 规定强度指标的定义

当卸除应力后残余延伸率等于规定的引伸计标距百分率时对应的应力称为规定残余延伸强度(R_r),如图 1-1-10(c)所示。使用的符号应附以下脚注说明所规定的百分率。例如, $R_{r0.2}$ 表示规定残余延伸率为 0.2% 时的应力。

在材料力学中,比例极限 σ_p 大致与 $R_{p0.01}$ 相当,弹性极限 σ_e 大致与 $R_{e0.01}$ 相当,但并无严格规定,不可等同。对于无屈服现象的材料, $\sigma_{0.2}$ 则与 $R_{0.2}$ 相当,常替代材料的屈服极限用于强度设计或强度校核。对于大多数金属材料, $R_{0.2}$ 与 $R_{p0.2}$ 非常接近,因而可以用 $R_{p0.2}$ 代替 $R_{0.2}$ 。在 GB/T 7314—2005《金属材料 室温压缩试验方法》中,没有设置规定残余压缩强度指标。

4. 抗拉强度指标

试样拉伸过程中的最大力原始横截面积 A_0 之比称为抗拉强度(R_m),在材料力学中称强度极限,用 σ_b 表示。

5. 弹性指标

弹性指标有弹性模量、切变模量、材料泊松比等。对这些指标,新国标中未给出新定义及测试方法,通常沿用以前的定义及测试方法。

1.2.5 拉伸现象的细微观解释

1. 金属材料的屈服

位错是引起晶格畸变的特殊缺陷,位错可简单地认为在外力作用下发生的定向移动(称为滑移),滑移的结果将使靠近晶粒表面的位错移动到晶粒间的晶界处或者试样的外表面而形成滑移线或者滑移带。如果用光纤照射,能看出明暗相间的条纹。由于拉伸试样的最大剪应力在与轴成 45° 的截面上,因而条纹首先发生在这一方向。

低碳钢在屈服过程中,其应力应变曲线上产生锯齿形的应力值。这一现象主要是因为低碳钢材料是多晶体材料。由许多晶粒组成的多晶体,各晶粒的晶面方向是随机分布的,由于滑移首先沿 45° 的截面发生(最大剪应力作用面),滑移发生后,对应新的晶格,金属原子间的伸长将消失,原子间的引力也随之消失,从而导致该晶粒内材料的卸载,也使整个试样发生微小的卸载。随着位移控制加载继续进行,试样载荷又呈上升,直至晶面上剪应力较大的下一个晶粒发生滑移,试样载荷又下降。各晶粒逐次轮回经历加载、滑移、卸载、再加载的过程。在屈服阶段,滑移累积引起的试样变形要远远大于在弹性阶段所发生的弹性变形。该阶段试样所受的载荷,只是在晶格发生初始滑移所需要的应力的附近作微小波动,形成了一段“屈服平台”。

2. 金属材料的应变强化

金属材料的塑性变形是因为晶体内部位错的定向移动造成的,但必须有一定大小的剪应力作用于晶面上,这种移动才能发生。使晶面方向产生滑移时的剪应力,这时刚好能克服晶体的滑移阻力,使滑移能够进行。随着晶格滑移的数量的积累,在各晶粒的内部,将出现多个位错连续分布或堆积于晶界处的现象。这种连续分布的位错群称为位错的塞积。根据对原子间库仑力的作用分析,可以得出位错的塞积将增大对进一步滑移的阻力,这一结果也适于晶界面。因而,当晶粒内的位错塞积群达到一定密度时,必须加大作用于各晶面上的外力,即加大试样表面的外力,才能克服由位错带来的滑移阻力,进而继续驱使位错群的移动,使晶体进一步累积滑移或塑性变形。可见,金属材料发生塑性变形的物理本质,就是晶格位错在外力作用

下,不断产生、塞积和运动的宏观表现。

如果在强化阶段卸载,显然由晶格滑移产生的塑性变形不会消失,可以恢复的只能是对应当前晶格的原子间的位移及弹性变形。既然都是弹性变形的卸载,这时材料的受力和变形的变化量之间当然应该服从线性关系。重复加载时,晶体内的位错群已经积累到一定程度,如果要使试样继续发生塑性变形,显然施加的外力必须能克服卸载前的滑移阻力,即达到或超过卸载前的外力值。这时对应的应力值为材料的后继屈服极限。在强化阶段卸载,显然材料的后继屈服极限高于初始的屈服极限,这种现象称为材料的冷作硬化。经过冷作硬化处理的材料或者构件,能使其承受更大的外力作用而不发生塑性变形,即扩展了材料弹性阶段的范围。这种处理方法在工程中得到了广泛的应用。

3. 金属材料的颈缩和断裂

材料滑移能产生很大的塑性变形,塑性变形使试样变长、变细。发生滑移的晶粒处,总能引起试样横截面积的减少,从而引起横截面上的平均应力变大。滑移累积程度不明显时,应力的增大可以由晶格滑移后产生的材料强化来弥补,达到稳定的平衡。因而,可以形成前面所述的各个晶粒轮换滑移的机制。当加载载荷变大时,横截面越来越小,材料应变强化所增加的滑移阻力,将不足以抵消横截面变细的影响来维持平衡。滑移将在截面上继续发生,应力越来越大。显然,这时材料的塑性变形平衡将丧失稳定性。由于试样失稳现象的出现,试样的薄弱部位急剧变细,形成颈缩区。该部位的滑移和位错塞积将大大高于此前发生的累积程度。由于试样在该部位横截面骤减、应力集中影响及内部损伤的积累,细颈部的真实最大应力也将高出很多。对于颈缩区以外的材料,其作用在横截面上的轴力低于前面已经达到的最大值,所以不会产生进一步的塑性变形。由于局部变形阶段各部分材料的应力应变有极大的差异,这时的工程应力应变曲线已经不能具体统一说明各处的实际应力、应变关系,而只有名义的意义或者统计平均的意义。

随着局部变形继续增加,金属颈缩区域内的材料滑移将累积到很高的程度,这时位错塞积会很严重,位错群密度增大。由位错理论和断裂力学知,在颈缩区内部三向拉力的作用下,密集有位错群前缘会产生很大的拉应力并且集中在局部区域,从而在汇集的位错群萌生微小裂纹(见图 1-1-11(a)),然后逐渐形成扩展性宏观裂纹(见图 1-1-11(b))。如果从试样的断口看去,试样断口形成锯齿状的纤维圆盘状断口(见图 1-1-11(c))。由断裂力学知识可知,裂纹扩展方向是与三向拉应力作用力下的圆盘裂纹面方向扩展规律相一致的。当圆盘裂纹的前缘接近颈缩处试样的外表面时,由于自由表面的影响,表面附近处于二向应力状态,根据塑性屈服

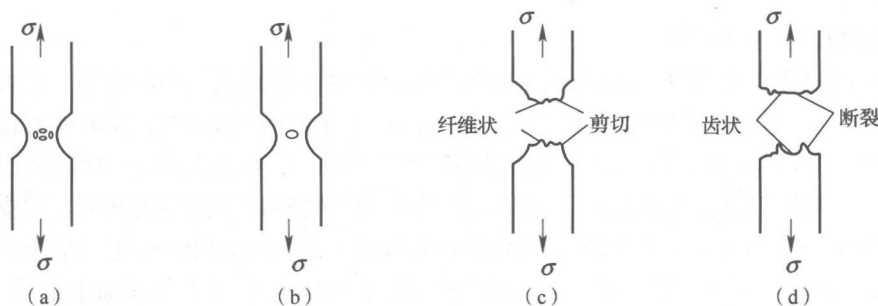


图 1-1-11 韧性材料的拉伸破坏机理