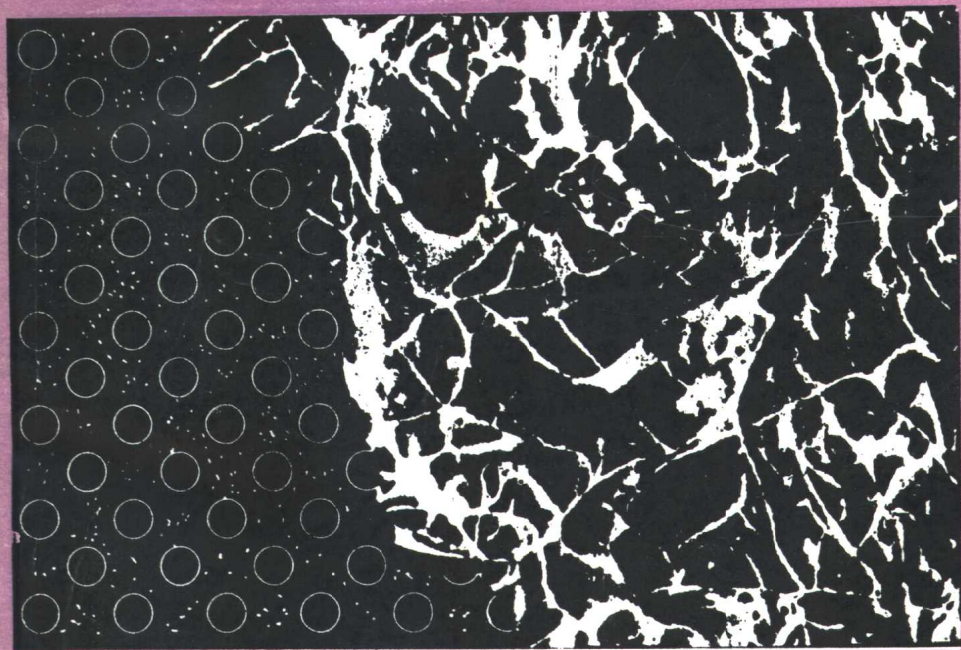


姜伟之 赵时熙 编著

工程材料的力学性能



北京航空航天大学出版社

工程材料的力学性能

姜伟之 赵时熙 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书分两篇阐述了各向同性材料（以金属材料为主）和各向异性材料（以树脂基复合材料为主）在各种加载条件下的力学行为。第一篇以静拉伸、断裂韧性和疲劳等力学行为为重点，第二篇则着重介绍了组分性能与复合材料性能的关系及复合材料的结构特性。全书在适当阐述变形及断裂理论的基础上，力图使各种力学性能指标的物理意义明确，并使其测试原理易于理解。

本书为航空航天部教材编审室审定的材料科学与工程类各专业的大学教材，也可供有关专业学生及从事工程材料的研究、加工，结构失效分析等专业技术人员使用和参考。

工程材料的力学性能

GONGCHENG CAILAO DE LIXUE XINGNENG

编 著 姜伟之 赵时熙

责任编辑 肖之中

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

建华印刷厂排版 觅子店印刷厂印装

850×1168 1/32 印张，14.25 字数，383千字

1991年6月第一版 1991年6月第一次印刷 印数，3500册

ISBN 7-81012-229-0/TB·038 定价，4.40元

前 言

《工程材料的力学性能》是在教学改革中为适应“材料科学与工程”类各专业（金属材料、高分子材料、复合材料和材料防护等）学生要求适当拓宽力学性能方面的知识结构而设置的课程。实际上，它还是新设置的大专业系列技术基础课之一。这个系列包括：《材料科学与工程导论》、《工程材料的力学性能》和《材料科学中的现代研究方法》，它们共同组成“材料科学与工程”大专业的主干课程。

《工程材料的力学性能》课的教学目的是使学生掌握工程材料力学性能的基本理论和评价工程材料的力学性能指标，在构件设计中正确选材，在生产过程中优化工艺并改善材料性能，掌握材料性能测试原理和方法等。

本书就是为满足上述要求而编写的，它由两篇组成，分别以金属材料和树脂基复合材料为主，相应讨论了均质各向同性（如金属、陶瓷和高分子材料）和非均质各向异性两类工程结构材料的基本力学行为。为使在应用本教材时可以按需要有所取舍，以及对力学性能中的新近发展有所了解，书中还少量选编了一些相关的内容，并在目录中以“•”号标出。它们一般不直接纳入课程的教学内容，但可作为在某一方面深入学习的入门，可望在学生进行“毕业论文”等教学环节的科研活动中发挥作用。

本书第一篇由姜伟之编写，第二篇由赵时熙编写。由于编者水平所限，加上时间仓促，错误之处在所难免，敬希读者批评指正。

编 者

1990.4

目 录

绪 论

第一篇 金属的力学性能

第一章 静拉伸下的力学性能

§1.1 载荷-伸长和 应力-应变曲线	(8)
§1.2 弹性变形、Hooke定律 和弹性模量	(10)
§1.2.1 弹性变形的Hooke定律 和双原子模型	(10)
§1.2.2 广义Hooke定律	(13)
§1.2.3 常用弹性常数及弹性模量	(16)
§1.3 滞弹性变形	(19)
§1.4 连续屈服材料的变形和抗力	(21)
§1.4.1 非比例变形	(22)
§1.4.2 规定非比例伸长应力	(23)
§1.4.3 规定总伸长应力	(25)
§1.4.4 规定残余伸长应力	(25)
§1.5 不连续(物理的、明显)屈服材料的变形和抗力	(26)
§1.5.1 不连续屈服变形	(26)
§1.5.2 屈服点和屈服点伸长率	(28)
§1.5.3 影响屈服应力的因素	(31)
§1.6 形变硬化	(34)
§1.6.1 流变曲线和硬化指数	(34)
§1.6.2 形变硬化的工程意义	(39)
§1.7 最大均匀塑性变形及断后变形和抗力	(39)
§1.7.1 最大力下的总伸长率和非比例伸长率	(39)
§1.7.2 抗拉强度	(42)
§1.7.3 断后伸长率和断面收缩率	(42)
§1.8 颈缩处的应力分布	(44)

§1.9	实际断裂强度	(46)
§1.10	宏观断裂类型和力学状态图	(48)
§1.11	断裂的微观形貌特征	(51)
§1.11.1	晶间断裂与穿晶断裂	(52)
§1.11.2	解理断裂和微孔聚合剪切断裂	(52)
§1.12	断裂的力学理论导论	(59)
§1.12.1	理论断裂强度	(60)
§1.12.2	缺口体的断裂强度	(61)
§1.12.3	裂纹体的断裂强度	(63)
§1.12.4	裂纹形核理论的综述	(66)
§1.13	高聚物的变形和断裂行为	(69)
	习题	(72)

第二章 其他静载下的力学性能

§2.1	扭转	(75)
§2.1.1	静扭转试验的特点	(75)
§2.1.2	扭转试验测定的力学性能指标	(76)
§2.2	弯曲	(80)
§2.2.1	静弯曲试验的特点	(80)
§2.2.2	弯曲试验测定的力学性能指标	(81)
§2.3	压缩	(82)
§2.4	硬度	(84)
§2.4.1	布氏硬度	(85)
§2.4.2	洛氏硬度	(89)
§2.4.3	维氏硬度	(92)
§2.5	缺口对静加载下力学性能的影响	(94)
§2.5.1	缺口效应	(94)
§2.5.2	缺口静拉伸及斜拉伸试验	(97)
§2.5.3	缺口静弯曲试验	(100)
	习题	(102)

第三章 冲击韧性和冷脆转变

§3.1	冲击试验和冲击吸收功	(103)
§3.1.1	缺口试样的冲击试验	(103)
§3.1.2	冲击吸收功的意义	(106)

§3.1.3 冲击试验的应用	(107)
§3.2 低温脆性和冷脆转变温度	(109)
§3.2.1 低温脆性现象	(109)
§3.2.2 冷脆现象的断口观察	(110)
§3.2.3 冷脆转变温度的评定和内在影响因素	(111)
§3.2.4* 落锤试验与断裂分析图	(113)
习题	(116)

第四章 断裂韧性

§4.1 线弹性条件下的断裂韧性	(118)
§4.1.1 三种断裂的类型	(118)
§4.1.2 应力强度因子 K_{Ic} 和断裂韧性 K_{Ic}	(119)
§4.1.3 线弹性断裂力学在理想弹塑性材料中的应用	(123)
§4.1.4 小范围屈服对塑性区尺寸的限制	(131)
§4.1.5 裂纹扩展能量释放率 G_I 和断裂韧性 G_{Ic}	(133)
§4.1.6 裂纹扩展阻力 R 曲线的概念	(138)
§4.2* 弹塑性条件下的断裂韧性	(141)
§4.2.1 裂纹张开位移 COD 和断裂韧性 δ_c	(142)
§4.2.2 J 积分和断裂韧性 J_{Ic}	(145)
§4.3 断裂韧性指标的测试	(149)
§4.3.1 K_{Ic} 的测试	(150)
§4.3.2* δ_c 的测试	(158)
§4.3.3* J_{Ic} 的测试	(161)
§4.4 影响断裂韧性的因素	(165)
§4.4.1 材料的组织和结构	(165)
§4.4.2 温度和加载速度	(167)
习题	(168)

第五章 疲 劳

§5.1 变动载荷和疲劳破坏的特征	(170)
§5.1.1 变动载荷(应力)及其描述参量	(170)
§5.1.2 疲劳破坏特征和断口分析	(171)
§5.2 高周疲劳	(173)
§5.2.1 $S-N$ 曲线和疲劳极限	(174)
§5.2.2 循环应力特性对疲劳强度的影响	(180)

§5.2.3	表面几何因素对高周疲劳特性的影响	(182)
§5.2.4	应力变动和累积损伤	(183)
§5.3	低周疲劳	(184)
§5.3.1	滞后回线	(186)
§5.3.2	循环硬化和循环软化	(187)
§5.3.3	循环应力-应变曲线	(188)
§5.3.4	应变-寿命曲线	(190)
§5.3.5	缺口零件的疲劳寿命预测	(193)
§5.3.6	热疲劳	(195)
§5.4	疲劳裂纹扩展	(196)
§5.4.1	应力、裂纹长度与疲劳裂纹扩展的关系	(197)
§5.4.2	平均应力的影响	(200)
§5.4.3*	裂纹尖端塑性区尺寸和裂纹闭合效应	(203)
§5.4.4	组织对疲劳裂纹扩展速率的影响	(208)
§5.4.5	疲劳裂纹扩展寿命的估算	(208)
§5.5	疲劳裂纹的萌生、扩展机理和短裂纹扩展	(212)
§5.5.1	疲劳裂纹的萌生	(213)
§5.5.2	疲劳裂纹扩展的方式和机理	(214)
§5.5.3*	疲劳短裂纹扩展的特性	(219)
§5.6	改善疲劳强度的方法	(223)
§5.7	工程塑性的疲劳	(224)
§5.7.1	疲劳热破坏	(225)
§5.7.2	疲劳裂纹扩展	(229)
习题	(233)

第六章 蠕变

§6.1	蠕变和持久强度	(235)
§6.1.1	蠕变现象和蠕变曲线	(235)
§6.1.2	蠕变极限与持久强度	(237)
§6.1.3	蠕变变形和断裂机理	(241)
§6.1.4	影响蠕变极限和持久强度的主要因素	(245)
§6.2	松弛稳定性	(246)
§6.2.1	应力松弛现象和应力松弛曲线	(246)
§6.2.2	松弛稳定性及其测定	(247)
§6.3*	蠕变-疲劳交互作用	(248)

习题	(252)
----------	-------

第七章 应力腐蚀与腐蚀疲劳

§7.1 应力腐蚀	(254)
§7.1.1 应力腐蚀裂纹扩展的特征	(254)
§7.1.2 应力腐蚀抗力指标及测试方法	(255)
§7.1.3 应力腐蚀的机理	(258)
§7.1.4 防止应力腐蚀的措施和安全设计	(259)
§7.2 氢脆	(262)
§7.2.1 氢脆现象和分类	(262)
§7.2.2 内部氢脆	(263)
§7.2.3 环境氢脆	(264)
§7.3 腐蚀疲劳	(267)
§7.3.1 腐蚀疲劳中的S-N曲线	(267)
§7.3.2 腐蚀疲劳裂纹扩展	(269)
§7.3.3 防止腐蚀疲劳的措施	(271)
习题	(273)

第八章 磨损、接触疲劳和微动损伤

§8.1 磨损	(274)
§8.1.1 氧化磨损	(276)
§8.1.2 咬合磨损	(276)
§8.1.3 热磨损	(277)
§8.1.4 磨粒磨损	(277)
§8.2 接触疲劳	(277)
§8.2.1 接触应力	(278)
§8.2.2 接触疲劳的类型	(281)
§8.2.3 影响接触疲劳抗力的因素	(283)
§8.3 微动损伤	(285)
习题	(291)

第二篇 复合材料的力学性能

第九章 复合材料的一般特性、增强机理和分类

§9.1 研究对象	(293)
-----------------	-------

§9.2 复合材料的一般特性	(293)
§9.3 增强机理及分类	(294)
习题	(298)

第十章 单向复合材料的静态力学性能

§10.1 单向复合材料的对称性和基本性能指标	(299)
§10.2 组分对单向复合材料刚度的贡献	(308)
§10.2.1 纵向刚度	(310)
§10.2.2 横向刚度	(314)
§10.2.3 面内剪切模量和主泊松比	(317)
§10.3 失效模式和强度	(320)
§10.3.1 在纵向拉伸载荷下的失效	(320)
§10.3.2 在横向拉伸载荷下的失效	(326)
§10.3.3 在纵向压缩载荷下的失效	(329)
§10.3.4 在横向压缩载荷下的失效	(333)
§10.3.5 在面内剪切载荷下的失效	(334)
§10.4* 环境条件对复合材料性能的影响	(334)
§10.4.1 环境因素对纤维强度的影响	(335)
§10.4.2 环境因素对基体和界面的影响	(337)
习题	(344)

第十一章 复合材料层合板的静态力学性能

§11.1 单层板的正轴应力-应变关系	(346)
§11.2 单层板的偏轴应力-应变关系	(353)
§11.2.1 应力和应变的转换	(353)
§11.2.2 单层板的偏轴应力-应变特性	(357)
§11.3* 偏轴工程常数	(365)
§11.4* 层合板变形的基本特征	(373)
§11.4.1 对称层合板的面内应力-应变关系	(373)
§11.4.2 对称层合板的弯曲行为	(375)
§11.4.3 一般层合板的应力-应变关系	(378)
§11.5 层合板强度的基本概念	(381)
§11.6* 层间应力和自由边效应	(383)
习题	(388)

第十二章 复合材料的断裂、疲劳和冲击

§12.1 复合材料的断裂.....	(389)
§12.2 复合材料的疲劳.....	(392)
§12.2.1 疲劳损伤及其对复合材料性能的影响.....	(394)
§12.2.2 影响复合材料疲劳特性的因素.....	(399)
§12.3 复合材料的冲击.....	(408)
§12.3.1 冲击试验的方法.....	(408)
§12.3.2 材料和试验参数对复合材料冲击性能的影响.....	(412)
§12.3.3 能量吸收机理.....	(416)
习题	(420)

第十三章 短纤维复合材料的力学性能

§13.1 应力传递理论	(422)
§13.2 短纤维复合材料的模量和强度	(425)
§13.3 短纤维复合材料的疲劳	(431)
习题	(433)

附 录

§A1 常用单位的换算	(434)
§A2 常用应力强度因子	(435)
§A3 常用力学性能试验标准编号及名称	(442)
参考资料	(444)

*. 选修内容.

绪 论

一、工程材料的力学性能在材料科学与工程中的地位

一般说来，力学性能是工程结构材料研究和应用中最关键性的问题。这是因为

1. 力学性能通常是工程结构或部件设计中最重要数据和依据。

2. 力学性能通常是新材料能否由研制状态进入工程应用的基本考核指标，尤其是其综合性能（包括强度和塑性）的优劣常常是决定性因素。

3. 任何机器结构的失效（包括不能满足设计的工作能力或未达到预期的工作寿命而损坏）尽管形式多种多样，究其原因除设计不当外，一般都归因于，在服役中的载荷形式和环境条件下未能达到要求的力学性能。所以，通常的失效分析在很大程度上也是围绕载荷和环境以及相关力学性能分析而展开的。

由此可见，在材料科学与工程，材料的力学性能显然占有很重要的地位。

二、工程材料力学性能研究的对象

一般说来，力学性能研究主要包括两个方面：一是建立适当的模型和给出定量的处理方法；二是借助微观分析，探讨材料力学性能的实质，以便能动地改造和提高材料的力学性能。所以，工程材料的力学性能应涉及的内容有：

1. 工程材料在各种服役条件下的失效现象及微观机理。

2. 各种力学性能指标的物理概念、实用意义以及它们之间可能的相互联系。

3. 影响工程材料力学性能的因素以及提高力学性能的方向和

途径。

4. 各种力学性能测试方法。

不过，应当指出，作为材料科学与工程类各专业的一门公共技术基础课程，它不可能在微观机理方面作深入的讨论，有关内容将留给相应专业课程去解决。

三、工程材料力学性能的分类

工程材料力学性能首先当然和材料的本质有关，但在服役条件下，自然还和它所处的工作条件有很密切的联系。所以，其基本分类是由其主要服役条件所确定的。

1. 按服役的温度分为低温、常温和高温力学性能，其中在概念上更宜以所处温度与材料的熔点（或其类似特征温度）的相对值为高、低温的分界，这样对其机理分析更方便、更确切。

2. 按加载速度分为静载和动载力学性能，加载速度既可按应力速率（ $\text{N}/\text{mm}^2/\text{s}$ ），也可按应变速率（ $1/\text{s}$ ）给出。以应变速率为例，通常可考虑以 10^{-1}s^{-1} 作为大致的分界，以下为静载，以上为动载。在动载力学性能中还包括单次加载（如冲击）和循环加载（如疲劳）两大类。

3. 按非腐蚀和腐蚀环境分为普通和环境介质作用下的力学性能。前者通常指干燥空气介质下的力学性能，而在其他更有腐蚀性的介质下则均被视为后者（如应力腐蚀、腐蚀疲劳等）。由此可见，两者本质上只是腐蚀作用轻重不同而已。不过，从实际应用的意义上说，考虑环境介质作用下的力学行为显然更接近于真实的服役状态，而且在许多情况下，介质的作用已构成材料力学性能的控制性因素。

4. 材料在不同应力状态（或加载方式）下常常有不同的力学性能响应，这是因为，在不同加载方式中，受载物体的任何一点处的应力总可以分解为切应力 τ 和正应力 σ 两部分。一般切应力引起塑性变形，使材料发生韧性断裂，而正应力通常引起弹性变形，最终容易导致脆性断裂。所以，从宏观上说，至少可以利用不同应力状态中的最大切应力 τ_{max} 与最大正应力 σ_{max} 的比值来

判断材料在所受加载方式下更趋向于那种变形和断裂。按材料力学所给出的第二强度理论, $\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)$; 按第三强度理论, $\sigma_{\max} = \sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3)$, 式中 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 是按大小顺序排列的三个主应力。 ν 是泊桑系数。令 $\alpha = \tau_{\max} / \sigma_{\max}$ 为应力状态的软性系数, 当 $\nu = 0.25$ 时, 有 $\alpha = (\sigma_1 - \sigma_3) / [2\sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3)]$ 。举例来说, 单向拉伸加载时, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 则 $\sigma_{\max} = \sigma_1$, $\tau_{\max} = \sigma_1$, 所以 $\alpha = 0.5$ 。显然, α 越大, τ_{\max} 越大, 表示应力状态越“软”, 越容易产生塑性变形和韧性断裂。反之, α 值越小, 表示应力状态越“硬”, 越容易产生脆性断裂。下表给出了常见的几种典型加载方式(应力状态)的软性系数值, 可见三向不等拉伸和三向不等压缩是两种很极端的状态, 而单向拉伸比较适中, 这正是它在工程材料的力学试验研究中应用最广的原因。

表 1.1

不同加载方式的应力状态软性系数

加载方式	主 应 力			软性系数 α
	σ_1	σ_2	σ_3	
三向不等拉伸	σ	$(8/9)\sigma$	$(8/9)\sigma$	0.1
单向拉伸	σ	0	0	0.5
扭转	σ	0	$-\sigma$	0.8
二向等压缩	0	$-\sigma$	$-\sigma$	1
单向压缩	0	0	$-\sigma$	2
三向不等压缩	$-\sigma$	$(-1/3)\sigma$	$(-1/3)\sigma$	4

由上述分析可见, 的确有必要给出材料在相应应力状态下的力学性能, 以满足各种实际受力状态的需要。在这方面不仅包括通常所指的拉伸、压缩、弯曲及扭转等加载方式的变化, 而且还包括零件上存在缺口或裂纹所引起的应力状态的急剧改变, 从而有必要去研究这些相关条件下的力学性能。譬如五十年代以来, 对受载裂纹体的研究推出了断裂力学以及随之发展的材料抗裂的断裂韧性, 以及这类分析在材料疲劳裂纹扩展特性中的应用等, 这些都是工程材料力学性能中最重要的进展。

四、力学性能与材料科学的发展

以工程结构材料为例，早期是以低碳钢为代表的，由于其塑性良好，强度低，在断裂前通常有明显变形，容易确保结构的安全。所以，在一般机械工业中得到了广泛的应用，在力学性能的研究上，也只限于常温下的几种常规静载和动载性能。但是，随着工程结构设计上要求高效、紧凑，特别是象航空航天等高技术的发展，使高强度材料和高耐热材料得到迅速发展和应用。前者的有限塑性而引入的脆断失效，促使前述的断裂力学以及材料断裂韧性和裂纹扩展特性的研究，这种力学性能的研究又反过来推动了人们对高强材料的认识，并指出了它应有的发展方向；后者则推动了高温力学性能，诸如蠕变和持久强度的研究，其中特别是与高温部件服役条件更接近的力学性能—蠕变-疲劳的交互作用愈来愈受到人们更大的关注。当然，在所有这些观察与研究中，大量的实验经验表明，环境介质在多数情况下都是一个影响材料力学性能的重要因素。所以，抗蚀力学性能和抗蚀材料在这一斗争中，同时也得到了长足的发展。

长期以来，由于工程材料特别是金属结构用材料在多数情况下均为多晶体，在宏观上可视为均质的各向同性体。所以，有关力学性能的研究也主要限于这种类型，它以金属为主，包括陶瓷以及少数用于结构的高分子材料。随着现代技术，特别是航空航天和海洋工程技术的发展，要求材料兼具高强度、高刚度、高韧度和低密度等更好的综合性能，而且还要求能经受住各种极端环境的考验。显然，不论是金属、陶瓷或高聚物等单一材料都是无法达到的，人们寄希望于两种或两种以上材料的复合。目前，作为结构用复合材料中最典型的有聚脂或环氧树脂基体的玻璃纤维增强材料和环氧树脂的碳纤维增强材料两大类。它们的问世，使力学性能也进入了一个新的领域，即由均匀各向同性向各向异性过渡。基于这方面的原因，本书对这两类材料的力学行为是分别加以阐述的。

第一篇

金属的力学性能

金属作为宏观上均匀、各向同性的结构材料，其应用历史最悠久，因而其力学行为和试验方法的研究也较深入和完善，并成为其他工程材料同类研究的主要借鉴。所以，本编以结构用金属材料为主，兼顾陶瓷和高分子材料，讨论它们在各种加载方式和环境（即服役条件）作用下变形和断裂的物理实质、失效方式、抗力指标及主要影响因素。

第一章 静拉伸下的力学性能

正如绪言中指出，由于单轴拉伸应力状态的软性系数 ($\alpha=0.5$) 适中，所以只要材料固有的塑性较好，强度不是太高，利用这种试验方法就能够较全面地显示材料的力学响应，即既能显示弹性变形，又能充分显示塑性和最后断裂，因而相应可标定出一系列对应的基本力学性能（强度和塑性）指标，为结构部件的设计、选材以及制定材料的合理加工工艺提供必要的性能数据。因此，单轴拉伸是工程材料力学性能中最基本的试验方法。正因为它能全面地显示材料的力学响应，所以在这一章中将就材料的弹性变形、塑性变形和断裂进行较多的阐述和分析，作为材料在其他载荷和环境条件下的力学响应分析的一个初步基础。

应当指出，在不特别指明的情况下，静拉伸力学性能通常是指在室温、应变速率 $\leq 10^{-1}$ /秒和非腐蚀（一般指干燥空气）环境中试验得到的力学性能。

§ 1.1 载荷-伸长和应力-应变曲线

用光滑圆柱试样，在静拉伸试验中，通常可直接得到载荷-伸长曲线 ($F-\Delta l$)。为了建立静拉伸的失效指标，一般以试样的初始截面积 S_0 和初始标距长度 l_0 分别除载荷 F 和伸长 Δl ，得到以标称（条件）应力 $\sigma = F/S_0$ 和标称（条件）应变 $\delta = \Delta l/l_0$ （在标准试验方法中 δ 叫做伸长率）为坐标的标称（条件）应力-标称（条件）应变 ($\sigma-\delta$) 曲线。由于 S_0 和 l_0 都是常数，所以， $F-\Delta l$

* 试样标距是拉伸试验过程中用以测量试样均匀段长度及其变化的两标记间的长度， l_0 为试验前的原始标距。如果在试验中，标距长度的变化用引伸计测量，则引伸计标距的初始长度 l_0 一般与 l_0 相等。不过，也可以不等。