

JINSHU CAILIAO JIANCE



职业教育金属材料检测类规划教材

金属力学性能

王学武 主编



赠电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

职业教育金属材料检测类规划教材

金属力学性能

主 编 王学武
副主编 李红莉
参 编 姚永红 马春来 王贵斗
主 审 严范梅



机械工业出版社

本书主要介绍金属力学性能有关的基础知识,以“现象—机理—指标—测试—影响因素—工程应用”为主线、以“理论够用,突出工程实践”为原则,适当关注金属力学性能的测试手段,内容的组织富有知识性、趣味性和可操作性。

全书共分九个单元,主要介绍金属在静载荷、冲击载荷及兼有环境介质作用下的力学性能,金属的断裂与断裂韧度,金属的疲劳、磨损,高温性能,工艺性能与弯曲试验等。在每个单元后面都附有可供选做的综合训练,以利于读者掌握、理解知识,提高解决实际问题的能力。为便于教学,本书配备了内容丰富的电子课件和部分综合训练答案,选择本书作为教材的教师可来电索取(010-88379201),或登录 www.cmpedu.com 网站注册、免费下载。

本书适合作为职业院校金属材料检测类专业的教材,也可供从事金属热处理、力学性能检测、金属材料热加工及机械设计等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属力学性能/王学武主编. —北京:机械工业出版社,2010.1

职业教育金属材料检测类规划教材

ISBN 978-7-111-29478-8

I. 金… II. 王… III. 金属—力学性质—职业教育—教材 IV. TG113.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第002235号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:齐志刚 责任编辑:齐志刚 版式设计:张世琴

封面设计:王伟光 责任校对:张媛 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷

2010年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.5印张·281千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-29478-8

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

为了进一步贯彻“国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定”的文件精神，加强职业教育教材建设，满足职业院校深化教学改革对教材建设的要求，机械工业出版社于2008年7月在北京召开了“职业教育金属材料检测类专业教材建设研讨会”。在会上，来自全国多所院校的骨干教师、企业代表、专家研讨了新的职业教育形势下材料类专业的课程体系和教材编写计划，本书是根据会议所确定的教学大纲要求和高职教育培养目标组织编写的。

金属材料力学性能是零件或构件设计的依据，也是选择、评价材料和制订工艺规程的重要参量。在金属研究领域，它们是合金成分设计、显微组织结构控制所要达到的目标之一，也是反映金属内部组织结构变化的重要表征参量。因此，金属材料力学性能测试是材料理化检测的重要组成部分，是金属材料检测类专业的重要课程。

本书在内容安排上分两大部分：一部分是基本力学行为，即弹性变形、塑性变形和断裂，包括第一~四单元，这是本课程的基础。另一部分是与零件或构件工作条件相关的力学行为，即疲劳、蠕变、磨损和接触疲劳、氢脆和应力腐蚀等，包括第五~八单元。此外，对金属材料的工艺性能也作了简要的介绍。考虑到高职学生的培养目标和岗位能力需求，本书对金属力学性能测试方法进行了适当的介绍。

本书采用单元、模块化设计，紧密结合职业教育的办学特点和教学目标，强调实践性、应用性和创新性。努力降低理论深度，理论知识坚持以应用为目的，以必需、够用为度。注意内容的精选和创新，既考虑了知识结构的合理性、系统性，又兼顾了职业技术培训的要求。内容力求突出实践应用，重在能力的培养。书中所涉及的标准大多采用国家最新标准，考虑到有的产品标准更新与国家标准更新不同步，产品标准落后于国家标准的实际情况，有个别部分采用工程习惯叫法。

本书由王学武（绪论、第三、五、六单元、附录）、马春来（第二单元）、王贵斗（第八单元）、李红莉（第一、九单元）、姚永红（第四、七单元）共同编写，由王学武任主编并统稿，李红莉任副主编，由北京普汇恒达材料测试有限公司严范梅高级工程师任主审。

本书在编写过程中，引用或参考了大量已出版的文献和资料，书后难以一一列举，在此向原作者致谢。

由于编者学识水平和收集资料来源有限，加之时间仓促，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者不吝赐教，共同商榷。（主编电子邮箱：wangxuewu-2009@163.com）

编 者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一单元 金属在单向静拉伸载

荷作用下的力学性能	4
-----------------	---

模块一 金属室温静拉伸试验	4
---------------------	---

一、拉伸试样	4
--------------	---

二、拉伸试验前的准备	7
------------------	---

三、拉伸曲线	8
--------------	---

模块二 金属的弹性变形	10
-------------------	----

一、弹性模量	10
--------------	----

二、弹性极限与弹性比功	12
-------------------	----

模块三 强度指标及其测定	14
--------------------	----

一、强度及其意义	14
----------------	----

二、屈服现象和屈服强度	14
-------------------	----

三、形变强化	17
--------------	----

四、缩颈现象和抗拉强度	18
-------------------	----

五、金属的强化手段	20
-----------------	----

模块四 塑性指标及其测试	21
--------------------	----

一、塑性	21
------------	----

二、塑性指标	22
--------------	----

三、塑性的工程意义	23
-----------------	----

模块五 特殊试样的拉伸试验	24
---------------------	----

一、金属线材拉伸试验	24
------------------	----

二、金属管材拉伸试验	24
------------------	----

三、钢丝绳和钢绞线拉伸试验	25
---------------------	----

模块六 拉伸试样断口的评价和	
----------------	--

拉伸试验结果的处理	25
-----------------	----

一、拉伸试样断口评定	25
------------------	----

二、影响拉伸试验结果的因素	26
---------------------	----

三、拉伸试验结果的修约与处理	27
----------------------	----

四、不同国家金属拉伸试验标准的	
比较	28

单元小结	28
------------	----

综合训练	30
------------	----

第二单元 金属在其他静载荷下的

力学性能	31
------------	----

模块一 压缩试验	31
----------------	----

一、压缩试验的特点	31
-----------------	----

二、金属室温单向压缩试验主要力学	
性能指标	31

三、金属室温单向压缩试验	33
--------------------	----

模块二 金属弯曲力学性能试验	34
----------------------	----

一、金属弯曲力学性能试验的特点	34
-----------------------	----

二、金属弯曲力学性能试验的原理及	
过程	35

三、金属弯曲力学性能的确定	37
---------------------	----

模块三 金属扭转试验	38
------------------	----

一、金属扭转试验的特点	38
-------------------	----

二、金属扭转试验的原理及过程	39
----------------------	----

三、金属扭转力学性能指标	41
--------------------	----

模块四 金属缺口试样静载荷试验	41
-----------------------	----

一、缺口效应	41
--------------	----

二、缺口试样静拉伸试验	43
-------------------	----

三、缺口试样静弯试验	44
------------------	----

模块五 金属硬度试验	45
------------------	----

一、硬度及硬度试验特点	45
-------------------	----

二、布氏硬度试验	45
----------------	----

三、洛氏硬度试验	47
----------------	----

四、维氏硬度试验	49
----------------	----

五、显微硬度试验	51
----------------	----

六、其他硬度试验	52
----------------	----

单元小结	54
------------	----

综合训练	55
------------	----

第三单元 金属在冲击载荷下的

力学性能	56
------------	----

模块一 冲击载荷和冲击韧性	56
---------------------	----

一、冲击载荷	56
--------------	----

二、冲击韧性	57
--------------	----

模块二 冲击试验	57
----------------	----

一、冲击试样	58
--------------	----

二、一次摆锤冲击试验原理	58
--------------------	----

三、一次摆锤冲击试验	60
------------------	----

四、小能量多次冲击试验	62
-------------------	----

模块三 低温脆性	63
----------------	----

一、金属的冷脆现象	63	三、应力腐蚀抗力指标及测试方法	110
二、金属韧脆转变温度的测定	64	四、提高应力腐蚀抗力的措施	111
三、影响金属韧脆转变温度的因素	66	模块二 氢脆	112
单元小结	67	一、氢的来源和氢脆的特点	112
综合训练	67	二、氢脆断裂机理及防止措施	115
第四单元 金属的断裂与断裂韧性	68	模块三 腐蚀疲劳	116
模块一 金属的断裂	68	一、腐蚀疲劳及其基本规律	116
一、金属断裂的类型	68	二、腐蚀疲劳机理及断口特征	117
二、金属的断裂机制	71	三、防止腐蚀疲劳的措施	118
模块二 金属的断裂韧性	75	单元小结	119
一、裂纹尖端的应力场	76	综合训练	119
二、断裂韧性 K_{IC} 和断裂 K 判据	78	第七单元 金属的磨损	120
三、影响断裂韧性 K_{IC} 的因素	79	模块一 金属磨损的概念	120
四、断裂韧性 K_{IC} 的测试	80	模块二 金属的磨损类型	122
五、断裂韧性 K_{IC} 的应用	84	一、粘着磨损	122
单元小结	86	二、磨料磨损	123
综合训练	87	三、腐蚀磨损	125
第五单元 金属的疲劳	88	四、微动磨损	126
模块一 金属疲劳现象	88	模块三 金属的磨损试验	127
一、变动载荷和循环应力	88	一、磨损试验种类	127
二、金属疲劳概念与分类	90	二、常用的磨损试验	128
三、金属疲劳断口	91	三、磨损量测量	129
模块二 S-N 曲线和疲劳极限	93	模块四 金属的接触疲劳	130
一、S-N 曲线	93	一、接触疲劳现象	130
二、疲劳极限	93	二、接触疲劳试验	131
三、疲劳极限与抗拉强度的关系	94	三、影响接触疲劳寿命的若干因素	131
四、金属疲劳试验	94	单元小结	133
模块三 其他类型的疲劳	99	综合训练	134
一、低周疲劳	99	第八单元 金属高温力学性能	135
二、热疲劳	100	模块一 金属的蠕变	135
模块四 提高疲劳极限的途径	101	一、金属材料在高温下力学性能的特点	135
一、合理进行结构设计	101	二、金属蠕变现象	136
二、改善工件表面状态	102	三、蠕变变形机制	137
三、表面强化	102	模块二 金属高温力学性能指标	138
四、改善材料材质	103	一、蠕变极限	138
单元小结	104	二、持久强度极限	141
综合训练	105	三、松弛稳定性及其指标	143
第六单元 金属在环境介质作用下的力学性能	107	模块三 其他高温力学性能	144
模块一 应力腐蚀	107	一、高温短时拉伸性能	144
一、应力腐蚀现象	107	二、高温硬度	145
二、应力腐蚀的断裂特征	108	模块四 影响金属高温力学性能的因素	145
		一、合金化学成分的影响	145

二、金属冶炼工艺	146	三、试验方法	156
三、热处理工艺	146	模块五 金属反复弯曲试验	157
四、晶粒度	146	一、金属反复弯曲试验及其工程意义	157
单元小结	147	二、试样	157
综合训练	147	三、试验方法	157
第九单元 金属工艺性能试验	149	四、试验结果评定	158
模块一 金属弯曲试验	149	模块六 金属管工艺试验	158
一、金属弯曲试验及其工程意义	149	一、金属管扩口试验	158
二、试样	150	二、金属管弯曲试验	160
三、试验方法	151	三、金属管压扁试验	160
模块二 金属杯突试验	152	单元小结	162
一、金属杯突试验及其工程意义	152	综合训练	162
二、试样	153	附录	164
三、试验方法	153	附录 A 平面布氏硬度值计算表	164
四、试验结果评定	154	附录 B 金属力学及工艺性能试验	
模块三 金属顶锻试验	154	国家标准(部分)	170
一、金属顶锻试验及其工程意义	154	附录 C 金属常温单向拉伸试验结果	
二、试样	154	记录单	172
三、试验方法	154	附录 D 金属力学性能检测报告(示例)	173
模块四 金属线材扭转试验	155	附录 E 本书主要力学性能表征指标	
一、金属线材扭转试验及其工程意义	155	一览表	174
二、试样	155	参考文献	175

绪 论

一、课程的性质和任务

金属力学性能主要研究金属在力或力和其他外界因素共同作用下所表现出的行为，诸如在不同载荷作用下所造成的弹性变形、塑性变形、断裂（脆性断裂、韧性断裂、疲劳断裂等）以及金属抵抗变形和断裂能力的衡量指标，如强度、硬度、塑性、韧性、断裂韧性等。

金属力学性能测试，对研制和发展新型金属材料，改进材料质量，最大限度发挥材料性能潜力，进行金属失效分析，确保金属零件或构件设计合理以及使用维护的安全可靠，都是必不可少的手段。

在有关正确选择和合理使用金属材料的一系列工程实际问题中，习惯采用的思想方法是，根据零件或构件的服役条件，提出对制造材料的性能要求，根据成分和组织结构与力学性能的关系提出对材料的成分和组织状态的要求；根据成分和加工工艺与组织结构的关系制订出冷热加工工艺，于是就形成了一个常用的思考链条，如图 0-1 所示。反过来就形成了获得一个合格零件的工程路线。在这个链条中力学性能及其与成分和组织的关系占据了重要的核心位置，是解决一系列问题的出发点。由此确定了“金属力学性能”课程在材料类专业培养计划中的重要地位，与它密切相关的前导课是“金属材料与热处理”或“机械工程材料”、“工程力学”等。

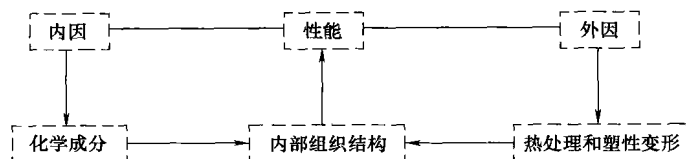


图 0-1 金属材料的性能与成分、组织结构、加工工艺之间的关系

本课程的基本任务是向学生讲授金属材料力学行为的基本规律、物理本质、力学性能指标的评定与测量以及力学性能与组织结构之间的关系。本课程既不同于单纯的力学性能试验方法，更不同于单纯的微观理论，按照“理论够用，重工程应用实践”的原则，本课程注重清晰阐明三个方面的问题：力学性能指标的物理概念或工程技术涵义、测试方法和实际应用。在内容的取舍上力图做到既讲述当代的新成就，又介绍对学科发展起过里程碑作用的经典理论的诞生过程，以阐明学科发展的来龙去脉，启发学生创造性的思维。

二、金属的力学行为

金属力学性能随受力方式、应力状态、温度及接触介质的不同而异。受力方式可以是静载荷、冲击载荷、循环载荷等，应力状态可以是拉、压、剪、弯、扭及它们的复合，以及集中应力和多轴应力等，如图 0-2 所示。温度可以是室温、低温与高温。接触介质可以是空气、其他气体、水、盐水或腐蚀介质。在不同使用条件下，材料具有不同的力学行为和失效现象，因而必须有相应的力学性能指标表征。与此相对应，金属材料的基本力学行为有在不同载荷作用下的弹性变形、塑性变形和断裂；以及与相关环境介质参与下的疲劳、蠕变、磨

损、接触疲劳等。

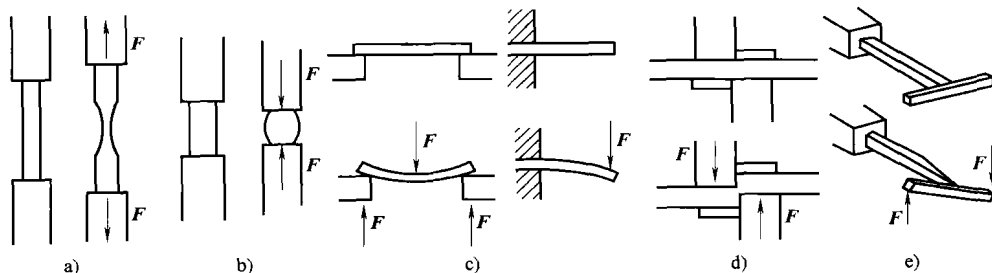


图 0-2 金属材料常见的应力状态

a) 拉伸 b) 压缩 c) 弯曲 d) 剪切 e) 扭转

力是金属力学行为中最基本和最重要的外部条件，需要对金属受力后的应力和应变特征进行分析。同时，组织结构也是决定力学行为的内部因素，因此，必须将宏观和微观两方面结合起来分析金属的力学行为。此外，金属的加工成形和力学性能测试也都以认识金属的力学行为为基础。

三、金属力学性能的测试

金属力学性能测试的基本任务是正确地选用检测仪器、装备和试样，确定合理的金属力学性能判据，依据相应标准，准确而尽可能快速地测出这种判据。

为了确切表征金属材料在服役条件下所表现的力学行为，力学性能测试条件应尽量接近实际工作条件。除普通金属力学性能测试（利用试样进行力学性能测试）外，近年来又发展了模拟试验，即应用零件或构件模型，或甚至使用真实工件，在模拟工件真实工作条件下进行力学试验。通过这种试验所得到的力学性能判据，能更真实反映工作条件下金属的性能，具有重大的工程实际意义。但是，模拟试验一般缺乏普遍性，应用受到限制。然而根据具体情况，进行部分模拟服役条件的力学性能测试还是十分必要的。

操作者水平、试验设备、试样形状、尺寸和加工方法、加载速率、测试方法、温度、介质等，均影响金属力学性能测试结果，也就是“人、机、料、法、环、测”等几个方面。只有采用相同的试验方法标准和测试规程，才能保证金属力学性能测试结果的可靠性和可比性。正确选择和执行标准，是确保金属力学性能测试质量的首要条件，同时也是本课程教学所要达到的目标之一。

四、《金属力学性能》课程的发展概述

早在 20 世纪 50 年代，本课程以金属力学性能测试方法为主要内容，基本属于一门试验方法课。这是因为当时对金属力学行为的认识只限于一般性规律和性能测试的水平。后来，随着金属材料领域研究的发展，在一系列的领域内出现了突破性的进展，如位错理论解释实际金属的强度及由此而发展起来的合金强化理论，并且在理论指导下发展了一系列高强度材料。工程中高强度材料的低应力脆性断裂事故的发生又促使人们去深入研究金属的断裂过程，结合断裂力学的成果形成了金属断裂理论。于是，对金属力学行为的认识向着更深入、更本质的方面产生了质的飞跃。

测试技术的进步也是《金属力学性能》发展历程中的重要动力。测试技术或实验手段的每一次突破，都给学科带来新的进展。如扫描电镜（SEM）和透射电镜（TEM）在材料

科学发展中的贡献是很大的，它们的出现为金属断裂研究和位错理论的确立做出重大贡献。近年来，机电一体化技术和数字技术在材料试验机上的应用，极大地提升了材料测试的技术水平。如微机控制电子万能试验机的应用，极大地提高了金属力学性能测试的精度，并使金属力学性能测试由传统模式向数字化、信息化方向转变。

金属力学性能研究的新进展，又会对材料的研究发生重大的影响。例如，20 世纪 50 年代，断裂力学的发展和断裂韧性这一新的材料力学性能的出现，纠正了新型结构材料研制中单纯追求高强度指标的倾向，提出了“强韧化”的研究新思路，许多新材料就是以此为理论基础研制出来的。

五、课程的特点和研究方法

通过本课程的学习，学生应了解工程材料在静载荷、冲击载荷、交变载荷、环境介质作用下的力学性能以及材料的断裂韧度与耐磨性能等的表征方法，理解材料力学性能的基本参数的物理意义及其本质，掌握常规金属力学性能的测试方法，加强学生对力学性能指标物理意义与工程应用的了解，为材料设计与选择打下良好的基础。

本课程既有一定的理论性，又有较强的实践性和应用性，各种力学性能指标、名词术语、符号众多。因此，在学习时，应认真听讲，在记忆的基础上，注重理解、分析和应用，并注意前后内容的衔接与综合应用。在理论学习外，要注意密切联系生产和生活实际，运用如杂志、互联网等各种学习方式，广泛涉猎，勤动手，认真做好各项实验，认真完成各项作业。

金属力学性能指标的名称、符号、测试方法等都应按相应标准命名或进行，所以，在本课程的学习中，对国家标准的学习、宣传和贯彻也是一项重要任务。

在教学中应多采用直观教学、现场教学、多媒体教学、启发教学等，增加课堂教学的信息量和利用效率，培养学生的自学能力和思维能力。

第一单元 金属在单向静拉伸载荷作用下的力学性能



单元导读：金属拉伸试验是力学性能中最基本的试验，也是检验金属材料、表征其内在质量的最重要的试验项目之一。金属的拉伸性能既是评定金属材料的重要指标，又是机械制造和工程设计、选材的主要依据。

本单元将主要介绍金属拉伸试验过程以及金属在静拉伸条件下力学性能指标的物理概念与实用意义，并在此基础上探讨提高上述性能指标的途径和方向。

模块一 金属室温静拉伸试验

单向静拉伸试验是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，引起试样沿轴向伸长，直至拉断为止，是应用最广泛的金属力学性能试验方法之一。试验是在应力状态为单向，温度恒定，应变速率为 $0.0001 \sim 0.01/s$ 的条件下进行，常用标准试样进行，它简单、可靠，测量数据精确，能清楚地反映出材料受外力时表现出的弹性、弹塑性、断裂三个过程，对金属材料尤为明显。

通过拉伸试验可以测定金属材料在单向静拉伸条件下的基本力学性能指标，如弹性模量、泊松比、屈服强度、规定非比例延伸强度、抗拉强度、断后伸长率、断面收缩率、应变硬化指数和塑性应变比等。因此，拉伸试验在机械设计、新材料的研制、材料的采购和验收、产品的质量控制、设备的安全评估等领域应用广泛，试验结果具有重要的应用价值和参考价值。

国际标准化组织（ISO）和世界各国都制定了完善的拉伸试验标准，将拉伸试验列为力学性能试验中最基本、最重要的试验项目。我国于2002年颁布了GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》。按照金属力学性能试验方法标准体系逐步与国际接轨的方针，该标准等效采用了ISO 6892:1998《金属材料室温拉伸试验》。将原GB/T 228—1987《金属拉伸试验方法》、GB/T 6397—1986《金属拉伸试验试样》和GB/T 3076—1962《金属薄板（带）拉伸试验方法》合并，不但技术内容、要求和规定采用国际标准，而且相关术语、性能名称、符号也采用国际标准。

一、拉伸试样

试验表明，所用试样的形状和尺寸及加工质量对其性能测试结果有一定影响。为了测定金属材料或零部件的拉伸性能，并使金属材料拉伸试验的结果具有可比性与符合性，拉伸试样的取样和制作应遵照金属材料力学及工艺性能取样规定，如产品标准或供需双方协议另有规定，应按其规定执行。

1. 试样的形状和尺寸

拉伸试样的形状与尺寸取决于被试验的金属产品的形状与尺寸，可以分为板材（薄带）试样、棒材试样、管材试样、线材试样、型材试样以及铸件试样等种类。根据其形状及试验目的不同，试样可以进行机加工，也可以采用不经加工的原始截面试样。标准中规定的试样主要类型见表 1-1。

表 1-1 试样的主要类型

产品类型				试样类型
薄板、板材 	线材 	棒材 	型材 	
0.1mm ≤ 厚度 < 3mm				矩形横截面比例试样或非比例试样
厚度 ≥ 3mm	直径或边长 ≥ 4mm			圆形横截面比例试样，矩形横截面比例试样或非比例试样
	直径或边长 < 4mm			通常产品的一部分，一般不经机加工
管材				纵向弧形试样，管材试样或横向试样

一般拉伸试样由夹持段、过渡段和平行段构成，如图 1-1 所示。试样两端较粗部分为夹持段，其形状和尺寸必须与试验机夹头的钳口相匹配，最常用的是圆形单肩式和矩形夹头。过渡段常采用圆弧形状，使夹持段与平行段光滑连接，以消除应力集中。平行部分必须保持光滑均匀以确保材料表面的单向应力状态，其有效工作部分 L_0 称作原始标距， d 表示圆形截面试样平行段的直径或圆丝直径， S_0 代表试样的原始横截面积； L_c 为平行段长度。

根据原始标距（ L_0 ）与原始横截面积（ S_0 ）之间的关系，拉伸试样可分为比例试样和非比例试样两种。比例试样的标距是按公式 $K = L_0 / \sqrt{S_0}$ 计算而得，系数 K 通常取 5.65 或 11.3。通常把 $K = 5.65$ 称为短比例试样； $K = 11.3$ 称为长比例试样。根据 $K = L_0 / \sqrt{S_0}$ 可知，圆截面短（长）比例试样的标距为 $5d$ （ $10d$ ）；矩形截面短（长）比例试样的标距为 $5.65 \sqrt{S_0}$ （ $11.3 \sqrt{S_0}$ ）。

圆形试样和矩形试样的形状如图 1-2 所示。两种试样的主要尺寸和允许偏差见表 1-2 和表 1-3。拉伸试验时，一般优先选用短比例试样，但要保证原始标距不小于 15mm，

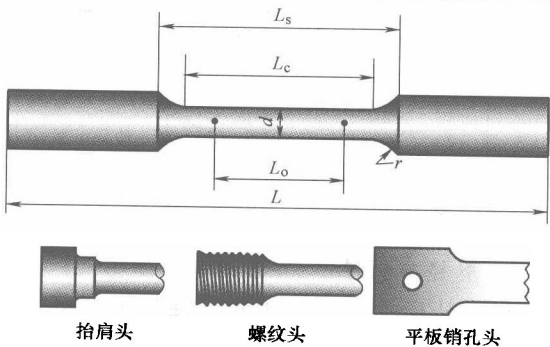


图 1-1 拉伸试样及夹持部分的各种形式

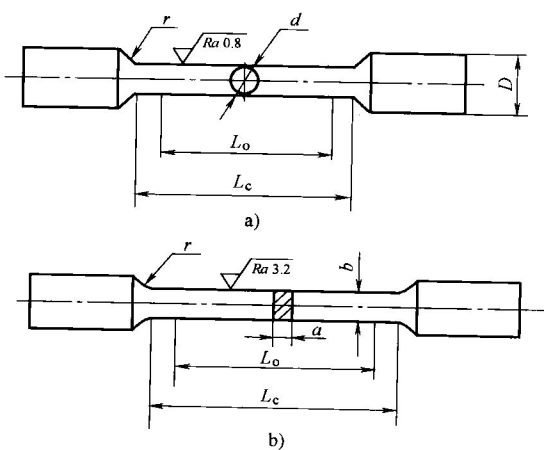


图 1-2 标准比例拉伸试样
a) 圆截面 b) 矩形截面

否则, 建议采用长比例试样或采用非比例试样。非比例试样也称定标距试样, 其原始标距 (L_0) 与其原始横截面积 (S_0) 无关。

表 1-2 圆截面比例试样

d/mm	r/mm	$K = 5.65$			$K = 11.3$		
		L_0/mm	L_c/mm	试样编号	L_0/mm	L_c/mm	试样编号
25	$\geq 0.75d$	$5d$	$\geq L_0 + d/2$ 仲裁试样: $L_0 + 2d$	R1	$10d$	$\geq L_0 + d/2$ 仲裁试样: $L_0 + 2d$	R01
20				R2			R02
15				R3			R03
10				R4			R04
8				R5			R05
6				R6			R06
5				R7			R07
3				R8			R08

表 1-3 板材矩形横截面比例试样

a/mm	b/mm	r/mm	$K = 5.65$			$K = 11.3$		
			L_0/mm	L_c/mm	试样编号	L_0/mm	L_c/mm	试样编号
> 3	12.5	≥ 12	$5.65 \sqrt{S_0}$	$\geq L_0 + 1.5 \sqrt{S_0}$ 仲裁试验 $L_0 + 2.0 \sqrt{S_0}$	P7	$11.3 \sqrt{S_0}$	$\geq L_0 + 1.5 \sqrt{S_0}$ 仲裁试验 $L_0 + 2.0 \sqrt{S_0}$	P07
	15				P8			P08
	20				P9			P09
	25				P10			P010
	30				P11			P011

2. 取样与制样

通常从产品、压制坯或铸锭切取样坯经机加工制成试样。但具有恒定横截面的产品 (型材、棒材、线材等) 和铸造试样 (铸铁和铸造非铁合金) 可以不经机加工而进行试验。

(1) 取样原则 取样部位、取样方向和取样数量是对材料性能试验结果影响较大的三个因素, 被称为取样三要素。应在外观及尺寸合格的材料或产品上切取样坯, 取样三要素应符合相关产品标准、供需双方协议或 GB/T 2975—1998 的规定。取样时, 应对抽样产品、材料、样坯及试样作出标记, 以保证始终能识别取样的位置和方向。

取样有以下几种情况:

- 1) 从原材料 (型材、棒材、板材、管材、丝材、带材等) 上直接取样试验。
- 2) 从产品上的重要部位 (最薄弱、最危险的部位) 取样试验, 以校核设计计算的准确性, 也可检验产品加工及热处理的质量。
- 3) 以实物零件直接试验, 如螺栓、螺钉或链条等。
- 4) 以浇注的铸件试样直接试验或经加工成试样进行试验。

取样要考虑代表性, 如大截面材料其表层组织均匀致密、心部组织较疏松, 因此所取试样应在能代表材料综合性能的部位。切取样坯时应防止过热、形变强化而影响拉伸力学性能, 应留有足够的机加工余量。同时, 应防止对截取的样坯锤击、敲打, 以免影响测试数据的准确性。

(2) 加工要求 应按照相关产品的标准或协议, 采用机加工试样或采用不经机加工的试样。如果未作具体规定, 一般在材料尺寸足够时机加工成带头试样。

试样在机加工过程中要防止冷变形或受热而影响其力学性能,通常以切削加工为宜,进刀深度要适当,并充分冷却,特别是最后一道切削或磨削的深度不宜过大,以免影响性能。

对于矩形横截面试样,一般要保留原表面层并防止损伤。试样上的毛刺要清除,尖锐棱边应倒圆,但半径不宜过大。试样允许矫直,但应防止校正对力学性能产生显著影响。对于不测定断后伸长率的试样可不经矫正直接试验。

不经机加工的铸件试样,其表面上的夹砂、夹渣、毛刺、飞边等必须加以清除。

加工以后,试样的尺寸和表面粗糙度应符合规定的要求,表面不应有显著的横向刀痕、磨痕或机械损伤、明显的淬火变形或裂纹以及其他可见的冶金缺陷。

二、拉伸试验前的准备

1. 试样的检查与标距的刻划

试验前应先检查试样外观是否符合要求。对经过加工的试样,如发现表面有明显的横向刀痕,或有扭曲变形或淬火裂纹,应重新取样加工成合格试样。

试样原始标距一般采用细划线或细墨线进行标定,所采用的方法不能影响试样过早断裂。当试样工作段远长于标距时,可标记相互重叠的几组标距。对于特薄或脆性材料的试样,通常可在试样平行段内涂上快干着色涂料,再轻轻划上标线,这样可避免试样断裂在刻线上而影响试验结果。

对于比例试样,应将原始标距的计算结果修约至最接近 5mm 的倍数,中间值向大的一方修约,标距的长度应精确到取值数据的 $\pm 1\%$ 。

测量试样原始横截面尺寸时,应按照表 1-4 选量具。根据所测得的试样原始尺寸,计算原始横截面积 S_0 ,并至少保留 4 位有效数字。

表 1-4 量具或测量装置的分辨力

试样截面尺寸/mm	分辨力 (不大于)
0.1 ~ 0.5	0.001
> 0.5 ~ 2.0	0.005
> 2.0 ~ 10.0	0.01
> 10.0	0.05

圆形横截面试样直径应在试样平行段的两端及中间处两个互相垂直的方向上各测一次,取算术平均值后选取其中最小值计算横截面积。横截面积 S_0 按下式计算:

$$S_0 = \frac{1}{4} \pi d^2$$

矩形横截面试样横截面尺寸(宽度 b 、厚度 a)也应在标距两端和中间处测量,选取三处测得横截面积中的最小值。横截面积 S_0 按下式计算:

$$S_0 = ab$$

2. 拉伸试验机

拉伸试验一般在液压万能试验机或电子万能试验机上进行。WE 系列液压万能试验机是一种适用性强、用途广的试验机,系列规格有 100kN、300kN、600kN、1000kN,当然也有特殊规格,目前为一般力学实验室普遍配套使用,如图 1-3a 所示。

微机控制的电子万能试验机采用伺服电动机、伺服调速系统及载荷传感器,性能优良、操作简便,能实现高精度、宽范围的测量,但电子万能试验机能提供的试验力一般较小。图

1-3b 为 WDW 系列电子万能试验机。

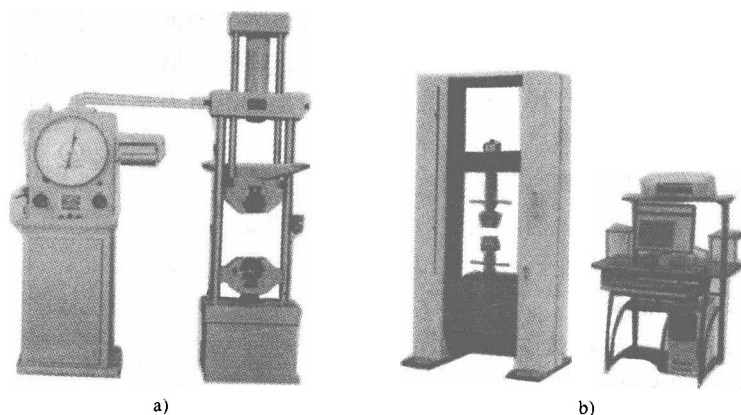


图 1-3 万能试验机

a) WE 系列液压式 b) WDW 系列电子式

根据试样的材质及试样尺寸估算出试样破断所能承受的最大负荷值, 作为选择试验机夹持装置以及合适量程的依据。在每批试验时, 应在空载时调整试验机指示的零点。

试验机应按照 GB/T 16825.1—2008 进行检定, 并应满足 1 级或优于 1 级的准确度。

3. 试验速率

试验速率的控制应根据材质和试验项目来确定。除有关标准和协议特别规定外, 拉伸速率应符合下列要求:

1) 在弹性范围和直至上屈服强度, 试验机夹头的分离速度应尽可能保持恒定, 并在表 1-5 规定的应力速率范围内。

表 1-5 试验规定的应力速率

材料弹性模量 E/MPa	应力速率/ $\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$	
	最小	最大
<150000	2	20
≥ 150000	6	60

2) 若仅测定下屈服强度, 试样平行段屈服期间的应变速率应在 $0.00025 \sim 0.0025/\text{s}$ 之间。平行长度内的应变速率尽可能保持恒定。如试验机无能力测量或控制应变速率, 应通过调节屈服即将开始前的应力速率来控制, 在屈服完成之前不再调节试验机的控制。

在任何情况下, 弹性范围内的应力速率不得超过表 1-5 规定的最大速率。

三、拉伸曲线

1. 力-伸长曲线

将拉伸试样安装在材料试验机上, 缓慢且均匀施加轴向力 F , 观察并测定试样在外力作用下的变形过程, 直至试样断裂为止, 如图 1-4 所示。外力 F 与试样的绝对伸长量之间的关系曲线称为力-伸长曲线。拉伸曲线形象地描绘出材料的变形特征及各阶段受力与变形间的关系, 可由该图形的状态来判断材料弹性与塑性好坏, 断裂时的韧性与脆性程度以及不同变形下的承载能力。在拉伸试验时, 利用试验机的自动绘图器可绘出力-伸长曲线。图 1-5 所示为低碳钢力-伸长曲线, 图中纵坐标为拉伸力 F , 横坐标是绝对伸长量 ΔL 。

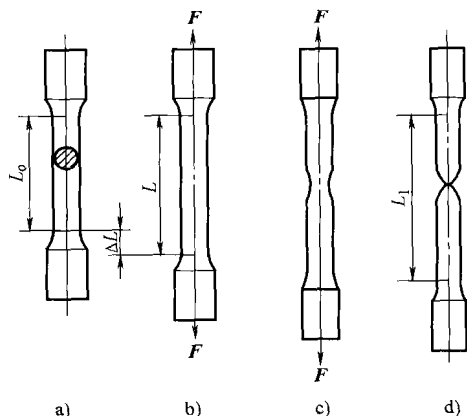


图 1-4 试样在拉伸时的伸长和断裂过程

a) 试样 b) 伸长 c) 产生缩颈 d) 断裂

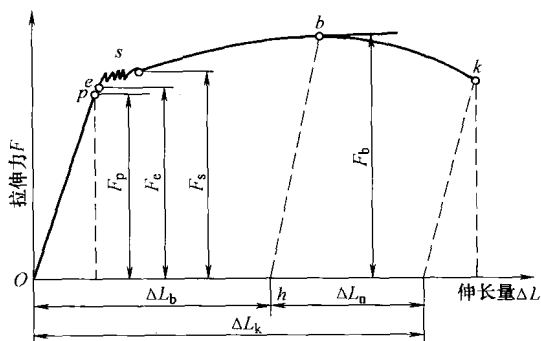


图 1-5 低碳钢力-伸长曲线

由图 1-5 可见, 试样伸长随拉伸力增大而增大。拉伸力在 F_p 以下阶段 (Op 段), 试样在受力时发生变形, 在此阶段中拉力和伸长成正比关系, 卸除拉伸力后变形能完全恢复, 该区段为完全弹性变形阶段。在曲线的 pe 段^①, 伸长量与载荷不再成正比关系, 拉伸曲线不成直线, 但试样仍处于弹性变形阶段。

所加的拉伸力达到 F_e 后, 外力不增大或变化不大, 试样仍继续伸长, 开始出现明显的塑性变形。曲线上出现平台或锯齿 (曲线 es 段), 试验机示力盘上的主指针暂停转动或开始回转并往复运动。这种现象表明试样在承受的拉力不继续增大或稍微减小的情况下变形却继续伸长, 这种现象称为材料的屈服, 直至 s 点结束。

在曲线的 sb 段, 载荷增大, 伸长沿整个试样长度均匀进行, 继而进入均匀塑性变形阶段。同时, 随着塑性变形不断增加, 试样的变形抗力也逐渐增加, 产生形变强化, 这个阶段是材料的强化阶段, 在这一阶段试样的塑性伸长量为 ΔL_b 。

在曲线的最高点 (b 点), 达到最大拉伸力 F_b 时, 试样再次产生不均匀塑性变形, 变形主要集中于试样的某一局部区域, 该处横截面积急剧减小, 试样的塑性伸长量为 ΔL_u , 这种现象即是“缩颈”。随着缩颈处截面不断减小, 承载能力不断下降, 到 k 点时, 试样发生断裂, 试样的总塑性伸长量为 ΔL_k 。

由此可知, 低碳钢在拉伸力作用下的变形过程可分为弹性变形阶段、屈服阶段、均匀塑性变形阶段、缩颈 (集中塑性变形阶段) 和断裂阶段。正火、退火碳素结构钢和一般低合金结构钢, 也都具有类似的力-伸长曲线, 只是力的大小和伸长量变化不同而已。

并非所有金属材料或同一材料在不同条件下都具有相同类型的力-伸长曲线, 下面列举几种常见材料的力-伸长曲线, 如图 1-6 所示。

图 1-6a 是低碳钢、低合金结构钢的力-伸长曲线。它有锯齿状的屈服阶段, 分上、下屈服, 均匀塑性变形后产生缩颈, 然后试样断裂。

图 1-6b 是中碳钢的力-伸长曲线。它有屈服阶段, 但波动微小, 几乎成一直线, 均匀塑性变形后产生缩颈, 然后试样断裂。

① 在实际工程中, p 点和 e 点一般分辨不出, 国际上趋向于点 e 。——编者注

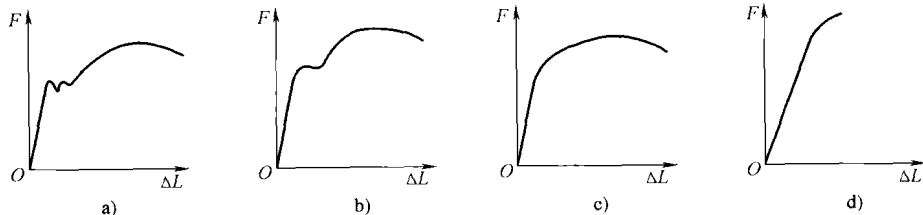


图 1-6 不同金属材料的力-伸长曲线

图 1-6c 是淬火后低、中温回火钢的力-伸长曲线。它无明显可见的屈服阶段，试样产生均匀塑性变形并缩颈后断裂。

图 1-6d 是铸铁、淬火钢等较脆材料的力-伸长曲线。它不仅无屈服阶段，而且在产生少量均匀塑性变形后就突然断裂。

2. 应力-应变曲线

力-伸长曲线只代表试样的力学性质，同一种材料的力-伸长曲线中，横、纵坐标会因试样尺寸不同而各异。为了使同一种材料不同尺寸试样的拉伸过程及其特性点便于比较，以消除试样几何尺寸的影响，将图 1-5 力-伸长曲线的纵、横坐标分别用拉伸试样的原始横截面积 S_0 和原始标距长度 L_0 去除，则得到应力-应变曲线，如图 1-7 所示。因均系以相应常数相除，故应力-应变曲线与力-伸长曲线形状相似，但消除了几何尺寸的影响。单向拉伸条件下的金属材料的力学性能指标就是在应力-应变曲线上定义的。如果试验能提供一条精确的应力-应变曲线，那么单向拉伸条件下的主要力学性能指标就可精确地测定。

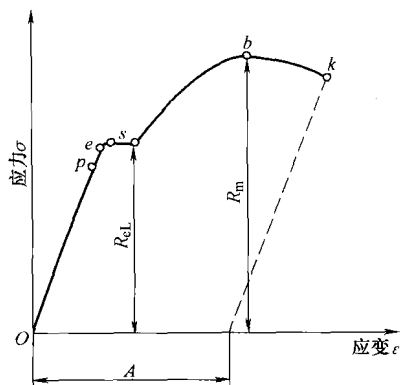


图 1-7 低碳钢应力-应变曲线

模块二 金属的弹性变形

金属弹性变形是一种可逆变形，它是金属晶格中原子自平衡位置产生可逆位移的反映。金属弹性变形量比较小，一般不超过 0.5% ~ 1%，这是因为原子弹性位移量只有原子间距的几分之一，所以弹性变形量总是小于 1%。

在弹性变形过程中，不论是在加载期还是卸载期内，应力与应变之间都保持单值线性关系，即服从胡克定律。

一、弹性模量

1. 弹性模量的概念

金属材料在弹性变形阶段，其应力和应变成正比例关系，符合胡克（Hooke）定律，即 $\sigma = E\varepsilon$ ，其比例系数 E 称为弹性模量。在应力-应变曲线上，弹性模量就是直线 (Op) 段的斜率。

弹性模量的物理意义可阐述为：表征金属材料对弹性变形的抗力，即金属发生弹性变形的难易程度。 E 值越大，则产生相同的弹性变形量需要的外力越大，弹性变形越困难，如图 1-8 所示。

弹性模量 E 主要取决于材料的结合键和原子间的结合力，是一个对组织不敏感的力学