



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部普通高等教育精品教材



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

机械工程材料

Engineering Materials

第4版

© 西安交通大学 沈莲 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
面向 21 世纪课程教材
教育部普通高等教育精品教材

机械 工 程 材 料

第 4 版

主 编 沈 莲
副主编 范群成 孙巧艳
参 编 王红洁
主 审 金志浩



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、面向 21 世纪课程教材、教育部普通高等教育精品教材。本书重点讲授零（构）件和器件在不同服役条件下的失效方式及其对性能的要求，以及机械设计者和制造者必须具备的材料基础知识和基本理论，介绍各类工程材料的成分、组织结构与冷、热加工（或合成）工艺、性能特点和应用范围，并以实例说明如何根据零（构）件或器件的不同服役条件和性能要求进行合理选材。全书共分 12 章，包括机械零件（或器件）的失效分析、碳钢、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、高分子材料、陶瓷材料、复合材料、功能材料、零件的选材及工艺路线、工程材料在典型机械和生物学上的应用。为帮助学生思考、复习、巩固所学知识，各章后均附有习题与思考题。本书力求做到加强基础、突出重点、注重应用和适应面广。

本书主要供机械设计制造及其自动化、能源与动力工程、核工程与核技术、材料成形及控制工程、工程装备与控制工程、建筑环境与设备工程、化工机械、飞行器制造工程、高分子材料与工程、工程力学、理论与应用力学、口腔医学、管理工程等专业本科生使用，参考学时数为 50 学时。本书也可供从事机械设计与制造等的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

机械工程材料/沈莲主编. —4 版. —北京：机械工业出版社，2018.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材 教育部普通高等教育精品教材 面向 21 世纪课程教材
ISBN 978-7-111-60115-9

I. ①机… II. ①沈… III. ①机械制造材料-高等学校-教材
IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 115538 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：丁昕祯 责任编辑：丁昕祯 责任校对：郑 婕
封面设计：张 静 责任印制：李 昂
北京宝昌彩色印刷有限公司印刷
2018 年 8 月第 4 版第 1 次印刷
184mm×260mm·21 印张·513 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-60115-9
定价：49.80 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

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

第4版前言

FOREWORD

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、面向 21 世纪课程教材、教育部普通高等教育精品教材，入选西安交通大学“十三五”规划教材，也是西安交通大学国家精品课程、国家精品资源共享课“工程材料基础”的指定教材。

本书可作为机械设计制造及其自动化、能源与动力工程、核工程与核技术、材料成形与控制工程、工程装备与控制工程、工程力学、理论与应用力学、飞行器设计与制造、口腔医学等专业本科生必修的“工程材料”或者“机械工程材料”等类似课程的教材或者参考教材，参考学时 50 学时。

进入新世纪以来，随着可持续发展理念被普遍接受，材料学科发展迅猛，新工艺、新材料、新技术不断出现，以满足低碳环保、国防尖端科技的迫切需求。本书在保持上一版体系、结构和内容不变的基础上，对内容进行了适当的修订，具体如下：①第六章增加了难熔金属及其合金，主要介绍难熔金属的特点及其在国防军工、电子信息等领域的工程应用；②第八章适当补充了陶瓷材料的分类与制备方面的内容，增加了“陶瓷材料在工程应用中应注意的几个问题”的内容；③调整了部分章节内容，删除了上一版的“第十一章材料改性新技术”，在第十章增加了“第七节 纳米材料”，介绍了纳米材料的基本特性及其应用；④对上一版中的一些文字方面的错误做了修改。

本书分为 12 章，包括机械零件（或器件）的失效分析、碳钢、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、高分子材料、陶瓷材料、复合材料、功能材料、零件的选材及工艺路线、工程材料在典型机械和生物学上的应用。

本书由西安交通大学沈莲教授编写和修改绪论及第一、二、四、五、六（第一节至第五节）、七、十一章、十二章，范群成教授编写和修改第三、九、十（第一节至第六节），王红洁教授编写和修改第八章、第十章第七节，孙巧艳教授编写第六章第六节，并负责本书文字、图表等修订。全书由沈莲教授担任主编，西安交通大学金志浩教授担任主审。华中科技大学周凤云教授、西安理工大学任润刚副教授曾参加编写本书第 1 版部分内容，在此表示感谢。

在编写过程中，作者参阅了国内外出版的有关教材和资料，在此对相关作者一并致谢。由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

第1版前言

FOREWORD

本书系原机械工业部“九五”重点教材，是1996年12月在北京由“机械工程类专业教学指导委员会”委托“材料工程类专业教学指导委员会”组织编写的。

本书为机械工程、能源动力工程、化学工程、工程力学、管理工程等各类专业大学本科必修的“机械工程材料”课程的教材，参考学时为50学时。

本书从机械制造与设计类专业培养目标出发，突出培养学生从零件的工作条件和失效方式入手，确定零件抵抗失效的性能指标，进而合理选材并正确制订零件的冷、热加工工艺路线的能力。在这个思想指导下，本书在体系、结构、内容上都进行了较大的改革。本着加强基础、突出重点、注重应用、适应面宽的原则，重点讲授零件在不同服役条件下的失效方式及其对性能的要求，以及机械制造者和设计者必须具备的材料知识和有关的基本理论，介绍各类工程材料的成分、组织结构与冷、热加工工艺及性能特点和应用范围，并以实例说明如何根据零件的不同服役条件和性能要求进行合理选材。全书共分十一章，包括机械零件的失效分析、碳钢、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、高分子材料、陶瓷材料、复合材料、材料表面改性新技术、典型零件的选材及热处理工艺分析等。

本书是根据《机械工程材料》（沈莲编，1990年11月机械工业出版社出版）教材重新编写的。原书自1990年出版以来，受到全国不少院校的好评，并获1996年机械工业部优秀教材一等奖。为了集思广益，这次编写时吸收了兄弟院校有关同行参加，并于1997年3月在西安召开了编写会议，讨论和确定了编写大纲。在保持原教材体系、结构和特色的基础上重新改写，进一步精选教材内容，压缩教学学时，注重基本概念，适当增加与机械工程和能源动力工程有关的新材料、新工艺和新技术，进一步增强选材知识，力图使修编后的教材更具有较强的理论性、系统性、先进性和广泛的实用性。本书由西安交通大学沈莲编写第一、二、十一章及第四章的部分内容，范群成编写第三、九、十章，华中理工大学周风云编写第五章及第四章的部分内容，西安理工大学任润刚编写第六、七、八章。全书由沈莲主编，东南大学吴元康教授主审，本书所采用的金相图片由西安交通大学材料科学与工程学院谷秀莲高级工程师提供。

在编写过程中，作者参阅了国内外出版的有关教材和资料，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

目录

CONTENTS

第 4 版前言	
第 1 版前言	
绪论	1
第一章 机械零件 (或器件) 的失效分析	4
第一节 零件在常温静载下的过量变形	4
第二节 零件在静载和冲击载荷下的断裂	9
第三节 零件在交变载荷下的疲劳断裂	14
第四节 零件的磨损失效	21
第五节 零件的腐蚀失效	24
第六节 零件在高温下的蠕变变形和断裂失效	28
第七节 电子器件的失效	30
习题与思考题	38
第二章 碳钢	39
第一节 纯铁的组织 and 性能	39
第二节 铁碳合金中的相和组织组成物	45
第三节 Fe-Fe ₃ C 相图	47
第四节 钢中常存杂质元素对钢性能的影响	62
第五节 钢锭的组织 and 缺陷	64
第六节 压力加工对钢组织和性能的影响	65
第七节 碳钢的分类、牌号及用途	71
习题与思考题	76
第三章 钢的热处理	78
第一节 钢在加热时的转变	78
第二节 奥氏体转变图	80
第三节 钢的普通热处理	86
第四节 钢的表面热处理	93
第五节 钢的特种热处理	97
习题与思考题	102
第四章 合金钢	103
第一节 概述	103
第二节 合金结构钢	108
第三节 合金工具钢	121
第四节 特殊性能钢	130
习题与思考题	145
第五章 铸铁	146
第一节 铸铁的石墨化	146
第二节 各类铸铁的特点及应用	148
习题与思考题	155
第六章 有色金属及其合金	157
第一节 铝及铝合金	157
第二节 镁及镁合金	167
第三节 铜及铜合金	169
第四节 钛及钛合金	179
第五节 轴承合金	182
第六节 难熔金属及合金	186
习题与思考题	194
第七章 高分子材料	196
第一节 概述	196
第二节 高分子材料的性能特点	202
第三节 常用高分子材料	205
习题与思考题	221
第八章 陶瓷材料	222
第一节 概述	222
第二节 工程结构陶瓷材料	228
第三节 陶瓷材料的强度设计	230
第四节 金属陶瓷	232
习题与思考题	235
第九章 复合材料	237
第一节 概述	237
第二节 增强材料及其增强机制	239
第三节 常用复合材料	242
习题与思考题	249



第十章 功能材料	250	第五节 选材方法	279
第一节 概述	250	第六节 典型零件选材及工艺路线	287
第二节 电功能材料	251	习题与思考题	291
第三节 磁功能材料	255	第十二章 工程材料在典型机械和生物	
第四节 热功能材料	257	医学上的应用	293
第五节 光功能材料	260	第一节 工程材料在汽车上的应用	293
第六节 其他功能材料	262	第二节 工程材料在机床上的应用	297
第七节 纳米材料	265	第三节 工程材料在热能设备上的应用	301
习题与思考题	271	第四节 工程材料在仪器仪表上的应用	306
第十一章 零件的选材及工艺路线	272	第五节 工程材料在石油化工设备上的	
第一节 常用力学性能指标在选材中的		应用	308
意义	272	第六节 工程材料在航空航天器上的	
第二节 断裂韧度在选材中的意义	275	应用	311
第三节 零件实物性能试验的重要性	276	第七节 工程材料在生物医学上的应用	317
第四节 材料强度、塑性与韧性的合理		习题与思考题	325
配合	278	参考文献	326

绪论

材料是人类社会生活中广泛应用的物质，它是社会发展和进步的标志。历史学家根据制造生产工具的材料不同，将人类生活的时代划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。现代工业技术的发展，同样与材料紧密相连。能源、信息和材料已成为现代技术的三大支柱，而能源、信息的发展又离不开材料。现今人类正处于人工合成材料的新时代，材料的品种、数量和质量已是衡量一个国家科学技术和国民经济水平以及国防力量的重要标志。

人类在地球上出现之后，最早使用的工具是石器，到了原始社会的末期，开始用火烧制陶器，由此发展为以后的瓷器，这是最早使用的陶瓷材料。我国汉代瓷器对世界文化产生了巨大的影响，已成为中国古文化的象征。

制陶技术的发展为炼铜准备了必要条件，在奴隶社会，青铜冶炼技术已得到很大发展。我国青铜冶炼技术的发展始于夏代以前，虽然晚于古埃及和西亚，但发展较快。到了商、周时代，青铜冶炼和铸造技术已发展到较高水平，普遍用于制造各种工具、食物器皿和兵器。春秋战国时期，我国劳动人民通过实践，认识了青铜成分、性能和用途之间的关系。在《周礼·考工记》中总结出“六齐”规律：“六分其金而锡居一，谓之钟鼎之齐；五分其金而锡居一，谓之斧斤之齐；四分其金而锡居一，谓之戈戟之齐；三分其金而锡居一，谓之大刃之齐；五分其金而锡居二，谓之削杀矢之齐；金、锡半，谓之鉴燧之齐”。这是世界上最早的合金化工艺的总结。此外，铅、锡、锌、金、银、汞等有色金属的冶炼及使用不断得到发展。

由青铜器过渡到铁器是生产工具的重大发展，对社会进步起着巨大的推动作用。我国从春秋战国时期开始大量使用铁器，推动了奴隶社会向封建社会的过渡。到了汉代，“先炼铁后炼钢”的技术已居世界领先地位。从西汉到明朝，我国钢铁生产的技术远远超过世界各国，而且钢铁热处理技术也得到很大发展，达到相当高的技术水平。西汉《史记·天官书》中有“水与火合为淬”。《汉书·王褒传》中有“巧冶铸干将之朴，清水淬其锋”等的记载。明代科学家宋应星在《天工开物》一书中对钢铁材料的退火、淬火、渗碳等工艺作了详细论述。

与上述陶瓷材料和金属材料发展的同时，天然高分子材料棉、麻、丝绸的生产技术也不断发展，特别是丝绸处于当时世界领先地位，并于11世纪沿古丝绸之路传到波斯、阿拉伯、埃及，然后在14世纪后期进入欧洲。

另外，功能材料在我国自古就受到重视，早在战国时期已利用天然磁铁矿制造司南（指南车），到宋代用钢针磁化制出了罗盘，为航海的发展提供了关键技术。

历史充分证明我国劳动人民在材料的制造和使用上有着辉煌的成就，为人类文明作出了



巨大贡献。

18 世纪世界工业迅速发展，对材料在品种、数量和质量上都提出了越来越高的要求，推动了材料工艺的进一步发展。光学显微镜于 1863 年开始应用于金属研究，从此金属材料的生产和研究不再是凭经验（如听声音、看颜色、靠祖传秘方或经验），而是深入到材料内部的微观领域。在化学、物理、材料力学等学科的基础上产生了一门新学科“金属学”，它是研究金属材料的成分、组织和性能之间关系的一门科学。随着 1912 年 X 射线衍射技术和 1932 年电子显微镜等新技术和新仪器的相继出现及应用，“金属学”日趋完善，大大推动了金属材料的发展。

20 世纪以来，以硅为代表的半导体材料的出现，为信息技术和自动化技术奠定了基础。随着晶体管、集成电路的研制成功，使以硅材料为代表的计算机的功能不断提高，体积不断缩小，加之高性能的磁性材料不断涌现，激光材料与光导纤维的问世，使人类社会进入了信息时代，加速了现代文明的发展。21 世纪更是现代科学技术和生产突飞猛进的时代，能源、信息、空间技术的发展，不但要求生产更多具有高强度和特殊性能的金属材料，而且要求迅速发展更多、更好的非金属材料。今天，在发展高性能（如高温、高强度、高比强度等）金属材料的同时，正迅速发展和应用高性能（如高比强度、高比模量、耐高温和超高温、抗辐射、高导电性、高敏感性等）非金属材料，并且正在进入人工合成材料（高分子材料、陶瓷材料、复合材料）的时代。“金属学”已不能全面反映现今使用的各类材料的研究、生产和应用中的理论及实际问题，因此在金属学、高分子科学、陶瓷学的基础上形成了“材料科学”，它是研究所有固体材料的成分、组织和性能之间关系的一门科学。而“工程材料学”则是材料科学的一部分，它是以工程材料即用于工程结构和机器零件及元器件的材料为研究对象，阐述工程材料的成分、组织、加工工艺和性能之间的关系的学科。

工程材料按性能特点和用途分为结构材料和功能材料两类。结构材料是以力学性能为主要使用性能，用于制造工程结构和机器零件的材料；功能材料是以物理、化学性能或生物功能等为主要使用性能，用于制造具有特殊功能的元器件或生物组织的材料。工程材料包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类。金属材料是最主要的工程材料，尤其以钢铁材料使用最广，约占 80% 以上。虽然目前高分子材料、陶瓷材料和复合材料在工程结构和机器零件中应用所占比例较少，但其发展迅速，它们是 21 世纪的重要工程材料。

工程材料的性能包括使用性能和工艺性能两方面。使用性能是材料在使用条件下所具备的性能，主要指力学性能（如强度、塑性、韧性等）、物理性能（如密度、导热性、导电性、磁性等）、化学性能（如氧化性、电化学腐蚀性等）及生物功能（如相容性、自恢复性、自修复性等）；工艺性能是材料在加工过程中所具备的性能，主要指切削加工性能、铸造性能、压力加工性能、焊接性能和热处理性能等。在机械设计中首先考虑的是材料的力学性能。

工程设计人员在设计某种设备或装置时，除了精心进行结构设计和计算外，还应考虑选用何种材料最佳，使之既经久耐用又经济实惠。这就要求设计人员在选材时必须具备两方面的知识：一方面应该了解材料性能和设计的关系，如进行刚度设计、强度设计和断裂力学设计时，必须考虑哪些性能，以及结构、工艺、外界条件（如温度、环境介质）改变时对性能的影响；另一方面应该了解各种材料的基本特性和应用范围。只有把两者结合起来才能正确选用材料。“机械工程材料”课程正是为适应这一要求而设置的。



“机械工程材料”是机械制造和设计类专业的技术基础课，其目的是使学生获得有关工程结构和机器零件常用的金属材料、非金属材料的基本理论知识和性能特点，并使其初步具备根据零件工作条件和失效方式，合理选材与使用材料，正确制订零件的冷、热加工工艺路线的能力。

本书的内容包括：①机械零件（或器件）的失效分析（第一章）；②金属材料的基本知识、热处理基本原理和常用金属材料的性能特点及应用（第二、三、四、五、六章）；③常用非金属材料（高分子材料、陶瓷材料）、复合材料和功能材料的基本知识和性能特点及应用（第七、八、九、十章）；④机械零（构）件设计选材的基本方法及工程材料在典型机械和生物学上的应用（第十一、十二章）。

“机械工程材料”是以化学、物理、材料力学及金属工艺学和工程训练为基础的课程，在学习时应该联系上述基础课程的有关内容，以加深对本课程内容的理解。同时本课程又是设计选材的基础，在今后学习有关专业课程时，还应经常联系本书的有关内容，以便进一步掌握所学知识。此外，“机械工程材料”是一门从生产实践中发展起来，而又直接为生产服务的科学，所以学习时不但要注意学习基本理论，而且要注意联系实验室的实验和生产实践。

第 一 章

机械零件（或器件）的失效分析

任何机器零件或结构件都具有一定功能，如在载荷、温度、介质等作用下保持一定几何形状和尺寸，实现规定的机械运动，传递力和能等。零件若失去设计要求的效能即为失效。

造成零件失效的原因是多方面的，它涉及到结构设计、材料选择、加工制造、装配调整及使用与保养等因素，但从本质看，零件失效都是由于外界载荷、温度、介质等的损害作用超过了材料抵抗损害的能力造成的。对于机械设计者来说，为了预防零件失效，必须做到设计正确、选材恰当和工艺合理。为此，要求设计者在设计时，不仅要熟悉零件的工作条件，掌握零件的受力和运动规律，还要把它们和材料的性能结合起来，即从零件的工作条件中找出其对材料的性能要求，然后才能做到正确选择材料和合理制订冷、热加工的技术条件及工艺路线。而研究零件的失效是深刻了解零件工作条件的基础。通过观察零件的失效特征，找出造成失效的原因，从而确定相应的失效抗力指标，为制订技术条件、正确选材和制订合理工艺提供依据。因此，研究机械零件的失效具有重要意义。本章将分别讨论机械零件常见的失效方式：过量变形、断裂、磨损和腐蚀，以及半导体器件的失效方式和机理。

第一节 零件在常温静载下的过量变形

材料在外力作用下产生的形状或尺寸的变化叫变形。根据外力去除后变形能否恢复，将变形分为弹性变形和塑性变形。能够恢复的变形叫做弹性变形；不能够恢复的变形叫做塑性变形。研究材料在常温静载荷下的变形常采用静拉伸、压缩、弯曲、扭转和硬度等试验方法，其中静拉伸试验可以全面地揭示材料在静载荷作用下的变形规律。本节首先讨论工程材料在静拉伸时的应力-应变行为。

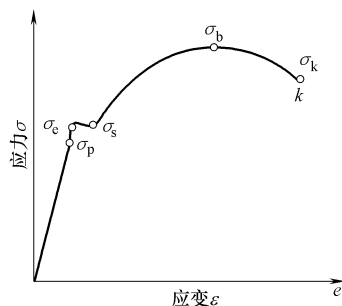


图 1-1 低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

一、工程材料在静拉伸时的应力-应变行为

1. 低碳钢的应力-应变行为

图 1-1 为低碳钢的应力-应变曲线。由图可以看出，钢在低于弹性极限 σ_e 的应力作用下发生弹性变形，在此阶段内，当应力低于比例极限 σ_p 时，应力和应变成正比，服从胡克定律，即

$$\sigma = E\varepsilon$$

称为线弹性变形，式中 E 为弹性模量。当应力超过弹性极限后，在继续发生弹性变形的同



时，开始发生塑性变形并出现屈服现象，即外力不增加，但变形继续进行。当应力超过屈服强度（屈服点）后，随着应力增加，塑性变形逐渐增加，并伴随加工硬化，即塑性变形需要不断增加外力才能继续进行，产生均匀塑性变形，直至应力达到抗拉强度后均匀塑性变形阶段结束，试样开始发生不均匀集中塑性变形，产生缩颈，应力迅速下降至 σ_k （金属断裂时对应的应力），变形量迅速增大至 k 点而发生断裂。由此可见，低碳钢在拉伸应力作用下的变形过程分为：**弹性变形**、**屈服塑性变形**、**均匀塑性变形**、**不均匀集中塑性变形**四个阶段。除低碳钢外，正火、退火、调质态的中碳钢或低、中碳合金钢和有些铝合金及某些高分子材料也具有上述类似的应力-应变行为。

2. 其他类型材料的应力-应变行为

如上所述，低碳钢在拉伸应力作用下的变形过程分为：**弹性变形**、**屈服塑性变形**、**均匀塑性变形**、**不均匀集中塑性变形**四个阶段。但并非所有材料在拉伸应力作用下都经历上述变形过程。图 1-2 给出了其他类型材料的应力-应变曲线。图中曲线 1 为大多数纯金属（如 Al、Cu、Au、Ag 等）的应力-应变曲线，其变形过程包括**弹性变形**、**均匀塑性变形**、**不均匀集中塑性变形**三个阶段，不发生屈服塑性变形；曲线 2 为脆性材料（如陶瓷、白口铸铁、淬火高碳钢或高碳合金钢等）的应力-

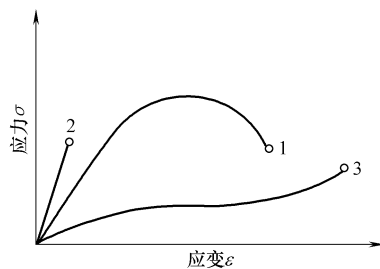


图 1-2 其他类型材料的应力-应变曲线示意图

1—纯金属 2—脆性材料 3—高弹性材料

应变曲线，这类材料断裂时的应力低于屈服强度，尚未发生塑性变形就断裂了，其变形过程只有**线弹性变形**一个阶段；曲线 3 为高弹性材料（如橡胶等）的应力-应变曲线，其弹性变形偏离线性关系，且弹性变形能力强，弹性变形率可达 100%~1000%，直至断裂前都不发生塑性变形，其变形过程只有**非线性的弹性变形**一个阶段。由此可见，材料不同，其塑性变形能力不同，即塑性不同。

二、静载性能指标

1. 刚度和强度指标

(1) 刚度 **刚度是指零（构）件在受力时抵抗弹性变形的能力，它等于材料弹性模量与零（构）件截面积的乘积。**由胡克定律可知：

$$\text{单向拉伸（或压缩）时：} E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\varepsilon}, \text{ 即 } EA = \frac{F}{\varepsilon}$$

$$\text{纯剪切时：} G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F_{\tau}/A}{\gamma}, \text{ 即 } GA = \frac{F_{\tau}}{\gamma}$$

式中， F 和 F_{τ} 为拉伸力和剪切力； A 为零（构）件截面积； E 为弹性模量； G 为切变模量； EA （或 GA ）为零（构）件的刚度，代表零（构）件产生单位弹性变形所需载荷的大小。载荷一定时， EA （或 GA ）越大，则 ε （或 γ ）越小，即零（构）件越不易产生弹性变形。当零（构）件的截面积 A 一定时，弹性模量 E （或切变模量 G ）就代表零（构）件的刚度。因此，弹性模量 E （或切变模量 G ）是表征材料刚度的性能指标。

(2) 强度 **强度是指材料抵抗变形或断裂的能力。**这里只介绍静拉伸的强度指标。由图 1-1 可以看出，低碳钢在静拉伸时的强度指标有比例极限、弹性极限、屈服强度（屈服



点)、抗拉强度和断裂强度，它们的物理意义分别是：**比例极限是材料应力和应变成正比的**最大应力，用 σ_p 表示；**弹性极限是材料不产生塑性变形的最大应力**，用 σ_e 表示；**屈服强度（屈服点）是材料开始产生塑性变形的应力**，用 R_{eL} 表示；**抗拉强度是材料产生最大均匀塑性变形的应力**，用 R_m 表示；**断裂强度是材料发生断裂的应力**，用 σ_R 表示。

2. 弹性和塑性指标

(1) 弹性 **弹性是指材料弹性变形的大小**。通常用弹性变形时吸收的弹性能（又称弹性比功） u 来表示。弹性能为应力-应变曲线下面弹性变形部分所包围的面积，即

$$u = \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e = \frac{1}{2} \frac{\sigma_e^2}{E}$$

由上式可以看出，材料的弹性极限 σ_e 越高、弹性模量 E 越低，则弹性能越大，材料的弹性越好。因此，弹性能（弹性比功） u 是表征材料弹性的性能指标。

(2) 塑性 **塑性是指材料断裂前发生塑性变形的能力**。通常用**断后伸长率 A** 和**断面收缩率 Z** 来衡量材料的塑性。 A 和 Z 的含义为

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100\%$$

式中， L_0 、 S_0 分别为拉伸试样的原始标距长度和原始截面积； L_u 、 S 分别为拉伸试样断裂后的标距长度和缩颈处最小截面积。显然， A 、 Z 越大，材料的塑性越好，所以断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 是表征材料塑性的性能指标。

3. 硬度指标

硬度是表征材料软硬程度的一种性能。其物理意义随试验方法不同而不同。划痕法硬度值（如莫氏硬度）主要表征材料对切断的抗力；弹性回跳法硬度值（如肖氏硬度）主要表征材料弹性变形功的大小；压入法硬度值（如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等）则表征材料的塑性变形抗力及应变硬化能力。工业生产上应用最广的是压入法，它是以硬质合金或金刚石锥体为压头，在一定载荷下压入材料表面的硬度试验方法。用这种方法测得的硬度分别表示为**布氏硬度 HBW（硬质合金球为压头）**、**洛氏硬度 HRC（锥角为 120° 的金刚石圆锥体为压头）**、**维氏硬度 HV（锥面角为 136° 的金刚石四棱锥体为压头）**。由于压头压入时压头周围材料发生塑性变形，所以压入法硬度是材料抵抗局部塑性变形能力的性能指标，通常用布氏硬度 HBW、洛氏硬度 HRC、维氏硬度 HV 表示。

三、过量变形失效

前面讨论了工程材料在静拉伸时的应力-应变行为。而零（构）件在外力作用下所发生的弹性变形和塑性变形对零（构）件的使用寿命有着重要的影响，有时常常由于变形超过了允许量而导致零（构）件失效。

1. 过量弹性变形及其抗力指标

任何机器零件在工作时都处于弹性变形状态。有些零件在一定载荷作用下只允许一定的弹性变形，若发生过量弹性变形就会造成失效。例如镗床镗杆，为了保证被加工零件的精度，要求其在工作过程中具有较小的弹性变形；若镗杆本身由于刚度不足，产生过量弹性变



形，镗出的孔径会偏小或有锥度，影响加工精度，甚至出现废品。又如齿轮轴，为了保证齿轮的正常啮合，要求齿轮轴在工作过程中具有较小的弹性变形；若因刚度不足，产生过量弹性变形，则会影响齿轮的正常啮合，加速齿轮磨损，增加噪声。再如弹簧，弹簧是典型的弹性零件，起减振和储能驱动作用，应具有较高的弹性，工作过程中产生较大的弹性变形。但是弹簧有时也会因过量弹性变形而失效。以汽车板簧为例，要求汽车满载时板簧产生最大弹性变形。但有时由于板簧刚度不够，当汽车尚未满载时其弹性变形已达最大值，此板簧不能承受设计时汽车所要达到的装载能力。由此可见，刚度不够是零件产生过量弹性变形的根本原因。如前所述，刚度是指零（构）件在受力时抵抗弹性变形的能力。在刚度设计时，常规定零（构）件的最大弹性变形量 Δl 或 θ （扭转角）必须小于许可的弹性变形量 $[\Delta l]$ 或 $[\theta]$ ，即

$$\Delta l \leq [\Delta l] \text{ 或 } \theta \leq [\theta]$$

若弹性变形量 Δl 或 θ 超过许可的弹性变形量 $[\Delta l]$ 或 $[\theta]$ ，就造成过量弹性变形失效。由材料力学可知：

$$\text{拉压条件下} \quad \Delta l = \frac{Fl}{EA}$$

$$\text{弯曲条件下} \quad \Delta l = \frac{4l^3 F}{Et^3}$$

$$\text{扭转条件下} \quad \theta = \frac{M_n}{GI_p}$$

由上式可以看出，当零（构）件的尺寸（长度 l 、截面尺寸 t 或截面积 A 、极惯性矩 I_p ）和外加载荷（外力 F 或扭矩 M_n ）一定时，材料的弹性模量 E （或切变模量 G ）越高，零（构）件的弹性变形量越小，则刚度越好。因此，弹性模量 E 或切变模量 G 是材料抵抗弹性变形的性能指标。各类材料的室温弹性模量 E 如表 1-1 所示。由表可见，弹性模量以陶瓷材

表 1-1 各类材料的室温弹性模量 E

材 料	$E/10^4 \text{MPa}$	材 料	$E/10^4 \text{MPa}$
金刚石	102	铜 (Cu)	12.6
WC	46~67	铜合金	12.2~15.3
硬质合金	41~55	钛合金	8.1~13.3
Ti、Zr、Hf 的硼化物	51	黄铜及青铜	10.5~12.6
SiC	46	石英玻璃	9.5
钨 (W)	41	铝 (Al)	7.0
Al_2O_3	40	铝合金	7.0~8.1
TiC	39	钠玻璃	7.0
钨及其合金	32.5~37	混凝土	4.6~5.1
Si_3N_4	30	玻璃纤维复合材料	0.7~4.6
MgO	25.5	木材 (纵向)	0.9~1.7
镍合金	13~24	聚酯塑料	0.1~0.5



(续)

材 料	$E/10^4\text{MPa}$	材 料	$E/10^4\text{MPa}$
碳纤维复合材料	7~20	尼龙	0.2~0.4
铁及低碳钢	20	有机玻璃	0.34
铸铁	17.3~19.4	聚乙烯	0.02~0.07
低合金钢	20.4~21	橡胶	0.001~0.01
奥氏体不锈钢	19.4~20.4	聚氯乙烯	0.0003~0.001

料最高，钢铁材料和复合材料次之，有色金属材料再次之，高分子材料最低。显然，在要求零（构）件有较大刚度时，不宜选用高分子材料。陶瓷材料虽然弹性模量高，但其脆性大、强度低，也不宜选用。复合材料工艺复杂、价格昂贵。因此，目前大量使用的是钢铁材料。上述镗床镗杆和汽车板簧都选用合金钢制造，其原因就在于此。

弹性模量 E （或切变模量 G ）主要取决于材料中原子本性和原子间结合力。熔点高低可以反映原子间结合力强弱，通常材料的熔点越高，其弹性模量也越高。另外，弹性模量对温度很敏感，随温度升高而降低。因为温度升高，原子间距离加大，原子间结合力减弱，导致 E （或 G ）值降低。

应该指出，一般情况下，金属材料的弹性模量主要取决于基体金属的性质，当基体金属一定时，不能通过合金化、热处理、冷变形等方法使之改变，即对成分、显微组织不敏感。例如钢是以 Fe 为基体金属，不管其成分和显微组织如何变化，其室温下的弹性模量 E 为 $20.4 \times 10^4 \sim 21.4 \times 10^4 \text{MPa}$ 。而陶瓷材料、高分子材料、复合材料的弹性模量对成分和组织是敏感的，可以通过改变成分和改变生产工艺来提高弹性模量。

2. 过量塑性变形及其抗力指标

绝大多数机器零件在使用过程中都处于弹性变形状态，不允许产生塑性变形。但是，由于偶然的过载或材料本身抵抗塑性变形的能力不够，零件也会产生塑性变形。当塑性变形超过允许量时，零件就失去其应有的效能。例如炮筒，为了保证每发炮弹弹道的准确性，要求炮弹通过时，只能引起炮筒内壁产生弹性变形，而且其变形与应力之间须严格保持正比关系。若炮筒的比例极限偏低，使用一段时间后产生微量塑性变形，就会使炮弹偏离射击目标。又如汽车板簧，只允许在弹性范围内工作，若其材料的弹性极限过低，使用一段时间后，板簧弓形就会变小，即产生了塑性变形，导致弹力不够，此时必须更换。再如精密机床丝杠，为了保持其精度，不允许产生塑性变形，若丝杠材料的屈服强度低，使用一段时间后丝杠会产生明显塑性变形而使机床精度下降。虽然如前所述比例极限、弹性极限和屈服强度都有明确的物理意义。然而实际使用的工程材料大多为弹塑性材料，弹性变形和塑性变形并无明显的分界点，很难测出它们的准确数值。因此工程上只能采取人为规定的方法，把产生规定的微量塑性伸长率的应力作为“条件比例极限”“条件弹性极限”“条件屈服强度”，它们之间并无本质区别，只是规定的微量塑性伸长率的大小不同而已。比例极限规定塑性伸长率最小（0.001%~0.01%）；弹性极限规定塑性伸长率次之（0.005%~0.05%）；屈服强度规定塑性伸长率最大（0.01%~0.5%）。从这个定义来说，比例极限、弹性极限、屈服强度都是材料抵抗微量塑性变形的抗力指标。

零（构）件经常因过量塑性变形而失效，所以一般不允许发生过量塑性变形。但是要



求的严格程度是不一样的。设计时应根据零（构）件工作条件所允许的残留变形量加以选择。例如炮筒和弹簧等采用 $R_{p0.001}^{\ominus} \sim R_{p0.01}$ ；精密机床丝杠采用 $R_{p0.01} \sim R_{p0.05}$ ；一般机器结构如机座、机架、普通车轴等可采用 $R_{p0.2}$ ；桥梁、容器等结构件可允许的残留变形量较大，则采用 $R_{p0.5}$ 甚至 $R_{p1.0}$ 。

顺便指出，比例极限、弹性极限、屈服强度是对材料成分、组织敏感的力学性能指标，可以通过合金化、热处理、冷变形等方法使之改变，这将在后面详细介绍。

第二节 零件在静载和冲击载荷下的断裂

一、韧断和脆断的基本概念

所谓断裂是材料在应力作用下分为两个或两个以上部分的现象。根据材料断裂前所产生的宏观变形量大小，将断裂分为韧性断裂和脆性断裂。韧性断裂是断裂前发生明显宏观塑性变形。例如低碳钢在室温拉伸时，有足够大的伸长量后才断裂，其断口为杯形，呈暗灰色纤维状。而脆性断裂是断裂前不发生塑性变形，断裂后其断口齐平，由无数发亮的小平面组成。零件在静载和冲击载荷下通常具有这两种断裂形式。图 1-3 是拉伸时的断裂示意图。

由于韧性断裂前发生明显塑性变形，这就可预先警告人们注意，因此一般不会造成严重事故。而脆性断裂没有明显征兆，因而危害性极大，历史上曾发生过许多断裂事故。如汽轮机叶轮和主轴飞裂；发电机转子断裂；油船脆断沉没；核电站压力容器和大型锅炉爆炸；铁桥断毁等。

为了防止脆性断裂，人们对材料的断裂过程进行了深入研究。研究结果表明，无论是韧性断裂还是脆性断裂，其断裂过程均包含裂纹形成和扩展两个阶段。材料在外力作用下形成微裂纹或者以原有的内部缺陷（如微裂纹、空孔、杂质等）作为裂纹源，当这些微裂纹或裂纹源逐渐扩展到一个临界裂纹长度时，立刻发生断裂。通常把裂纹自形成到扩展至临界长度的过程称为裂纹亚稳扩展阶段，在这一阶段裂纹扩展阻力大，扩展速度较慢；而把裂纹达到临界长度后的扩展阶段称为失稳扩展阶段，在这一阶段裂纹扩展阻力小，扩展速度很快，最大可达声音在该材料中的传播速度。对于韧性断裂，裂纹形成后经历很长的裂纹亚稳扩展阶段，裂纹扩展与塑性变形同时进行，变形一旦停止，裂纹也停止扩展，只有再增加外力使变形继续进行，裂纹才相应地继续扩展。外力不断增加，塑性变形不断进行，裂纹不断扩展，直至达到临界裂纹长度，最后经历失稳扩展阶段而瞬时断裂，因此韧性断裂前有明显的塑性变形。对于脆性断裂，裂纹形成后很快达到临界长度，几乎不经历裂纹亚稳扩展阶段就进入裂纹失稳扩展阶段，裂纹扩展速度极快，故脆性断裂前无明显塑性变形。显

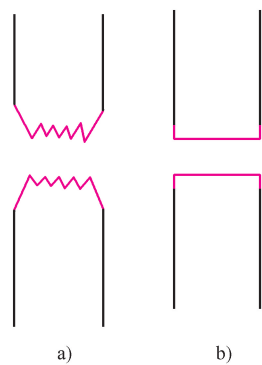


图 1-3 拉伸时的断裂示意图

a) 韧性断裂 b) 脆性断裂

⊖ GB/T 228.1—2010 中， R_p 表示规定塑性延伸强度，即引伸计发生规定塑性变形百分率对应的应力 $R_{p0.2}$ 表示规定塑性伸长率为 0.2% 时对应的应力。



然，韧性是表示材料在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力，它是材料强度和塑性的综合表现。材料韧性好，则发生脆性断裂的倾向小。评定材料韧性的力学性能是冲击韧性和断裂韧性。

二、冲击韧性及衡量指标

许多零（构）件在工作时常受冲击载荷作用，例如汽车高速行驶时紧急制动或通过道路上的凹坑、飞机起飞或降落、锻压机锻造或冲压等。因此了解材料在冲击载荷下的力学性能十分必要。冲击载荷与静载荷的主要区别是加载速率不同，前者加载速率高，后者加载速率低。由于冲击载荷加载速率提高，应变速率也随之增加，使材料变脆倾向增大，冲击韧性可以用来评定材料在冲击载荷下的脆断倾向。所谓冲击韧性，是指材料在冲击载荷作用下吸收塑性变形功和断裂功的能力，常用标准试样的冲击吸收功 A_K 表示。冲击吸收功由冲击试验测得，它是将带有 U 形或 V 形缺口的标准试样放在冲击试验机上，用摆锤将试样冲断。冲断试样所消耗的功即为冲击吸收功 A_K ，其单位为 J。若将 A_K 除以试样断口处截面积 F_K 即得材料的冲击韧度 $a_K (=A_K/F_K)$ ，其单位为 $J \cdot cm^{-2}$ 。因此 A_K 或 a_K 是衡量材料冲击韧性的力学性能指标。

工程材料的冲击吸收功通常是在室温测得，若降低试验温度，在低温下不同温度进行冲击试验（称之为低温冲击试验或系列冲击试验），可以得到冲击吸收功 A_K 随温度的变化曲线，如图 1-4 所示。由图可见，材料的冲击吸收功随试验温度降低而降低，当试验温度低于 T_K 时，冲击吸收功明显降低，材料由韧性状态变为脆性状态，这种现象称为低温脆性，将 A_K - T 曲线上冲击吸收功急剧变化的温度 T_K 称为韧脆转变温度。低温脆性是中、低强度结构钢经常遇到的现象，它对桥梁、船舶、低温压力容器以及在低温下工作的机器零件是十分有害的，容易引起低温脆性断裂。显然材料的 A_K 越高和 T_K 越低，其冲击韧性越好。冲击吸收功 A_K 是对材料成分、组织敏感的力学性能指标，可以通过合金化、热处理等方法改变。由图 1-4 可以看出奥氏体钢韧性最高，没有明显的韧脆转变温度，低温韧性好；低强度铁素体钢韧性次之，有明显的韧脆转变温度，低温韧性差；高强度马氏体钢韧性最差，即使在室温其韧性也很低。

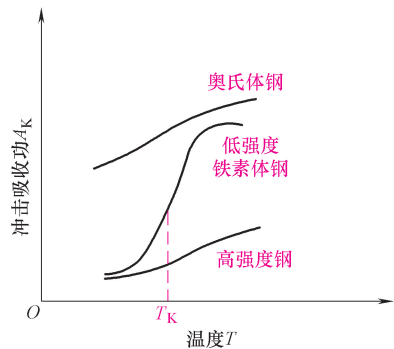


图 1-4 三种钢的冲击韧性随温度变化曲线示意图

三、断裂韧性及衡量指标

如前所述，脆性断裂是零件最危险的一种失效方式，为了防止脆性断裂，过去传统的设计方法是，一方面要求零件的工作应力 $\sigma \leq [\sigma] = R_{p0.2}/k$ ， k 为安全系数；另一方面要求材料有足够的塑性 A 、 Z 和冲击韧性 A_K 或 a_K 。即使这样，也不可能可靠地保证零件不发生低应力脆断。因为这种设计思想没有考虑到一般材料中都存在着微小的宏观裂纹，这些宏观裂纹可能是原材料中的冶金缺陷，也可能是加工过程中（如热处理裂纹、焊接裂纹、锻造裂纹等）或使用过程中（疲劳、应力腐蚀等）产生的。正是这种宏观裂纹的存在，引起材料的低应力脆性断裂，断裂力学就是在这种背景下产生的。随着断裂力学的发展，提出了评定材料抵抗脆性断裂的力学性能指标——断裂韧度 K_{IC} ，