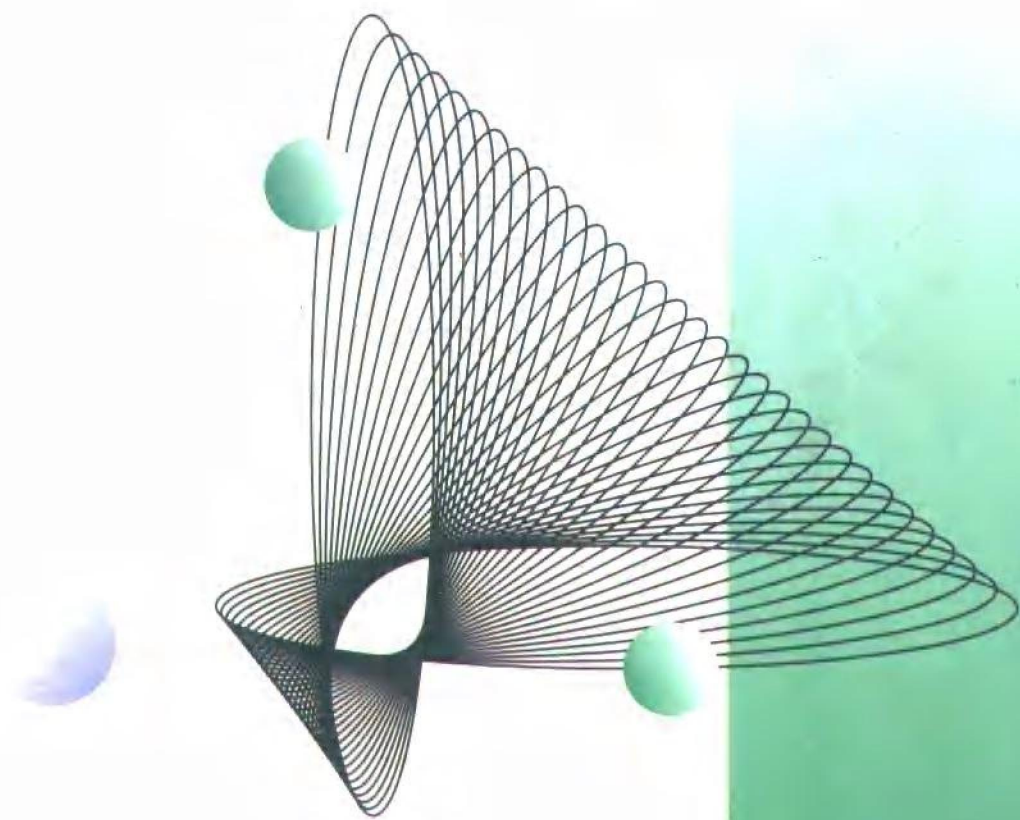


B

普通高等教育机电类规划教材

工程材料学

哈尔滨工业大学 王晓敏 主编



机械工业出版社

ND27/19

普通高等教育机电类规划教材

工 程 材 料 学

主 编 王晓敏

副主编 罗学心

协 编 王成国 王 来 陈贻瑞

主 审 康沫狂



机 械 工 业 出 版 社

全书共十二章。主要内容有：钢的合金化基础，工程构件用钢，机器零件用钢，工具钢，不锈钢，耐热钢及耐热合金，铸铁，有色金属及其合金，高聚物材料，复合材料，陶瓷材料等。

本书取材新颖，内容丰富。可作为材料类、机械类、冶金类等有关专业本科生和研究生的教材，也可供工程技术人员应用和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料学/王晓敏主编. —北京：机械工业出版社，
1999. 10

普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-07089-5

I. 工… II. 王… III. 工程材料-材料科学-高等学校-教材
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 14792 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑：常燕宾 版式设计：张世琴 责任校对：程俊巧
封面设计：姚学峰 责任印制：何全君

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 10 月第 1 版第 1 次印刷
787mm × 1092mm¹/₁₆ · 20.75 印张 · 505 千字
0 001 - 5000 册
定价：26.50 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677 - 2527

前 言

本书是1997年在大连全国教材会议上确定的，是根据全国高等工业学校“材料工程教学指导委员会”所确定的教学计划和课程教学大纲的要求编写的，是专业主干课教材。

为了适应跨世纪教学改革的需要，拓宽学生专业知识面，以适应科学技术为生产服务的宗旨。此书在内容上作了必要的充实和更新，在加强基本概念和基础理论知识的前提下，注意反映比较成熟的最新科学技术成就，同时注意引导学生将所学的理论知识用于解决生产实际问题，达到能力培养的目的。

本书具有鲜明的特点：

1. 系统性强 首先从金属材料的“合金化基础”讲起，为以后各类材料的组织和性能的论证奠定了理论基础，并为开发新材料提供了必备知识；然后论述各类材料的基本特征及选择材料与使用材料的原则和方法；最后对国内外各类材料最新发展动向及存在的问题进行了探索性介绍，对启发读者思索和解决新问题起到有益的作用。

2. 主线明确 本教材紧紧抓住材料的成分—组织—性能这一主线，阐明它们之间的内在联系及其衍变过程，并进一步揭示发挥材料性能潜力的途径，以达到提高产品质量的目的。

3. 内容丰富新颖 书中既以各类材料基础知识为主，又反映了国内外比较成熟的新的研究成果，体现了知识性、实用性和时代性相结合的特点。除传统的结构材料外，又增加了新结构材料（如高分子材料、陶瓷材料和复合材料）的介绍，使读者对新材料领域的主要内容有所了解（如陶瓷材料的韧化机制，复合材料的界面工程等）。

4. 理论联系实际 本书注意以典型零件失效分析为范例，论述材料的成分、加工工艺与组织、性能的关系，以及造成失效的原因和解决问题的方法措施，以达到培养学生学会分析问题和解决问题的能力。

全书共十二章，其中第一、二、三、十一、十二章由哈尔滨工业大学王晓敏编写。第四、五章由华中理工大学罗学心编写。第六、七章由大连理工大学王来编写。第八、九章由山东工业大学王成国编写。第十章由天津大学陈贻瑞编写。全书由王晓敏教授主编，西北工业大学康沫狂教授（博导）主审。

本书可作为材料类、机械类、冶金类等有关专业本科生和研究生的教材，也可供工程技术人员应用和参考。

在编写本书过程中，主编、主审及参编者进行了充分酝酿讨论，发挥各自特长承担任务。在讨论编写大纲中，康沫狂教授提出许多建设性建议，在此表示深深的谢意。由于编者水平所限，书中难免存在不妥和错误，恳请读者批评指正。

编 者

1998.12 于哈尔滨工业大学

目 录

前言		第四节 塑料模具用钢	132
第一章 绪论	1	第五节 量具用钢	135
第一节 概述	1	第六章 不锈钢	137
第二节 工程材料的失效分析	3	第一节 金属的腐蚀与防护	137
第三节 工程材料的选用原则	8	第二节 对不锈钢的性能要求及影响其耐 蚀性因素	140
第四节 材料化学成分、组织结构与性能的 关系	13	第三节 不锈钢的分类	143
第二章 钢的合金化基础	15	第四节 铁素体、马氏体不锈钢	144
第一节 钢中的合金元素及其与铁和碳的相 互作用	15	第五节 奥氏体不锈钢	150
第二节 钢的强化机制	24	第六节 铁素体-奥氏体双相不锈钢	157
第三节 改善钢塑性和韧性的基本 途径	29	第七节 沉淀硬化不锈钢(超高强 度钢)	158
第四节 合金元素对钢相变的影响	35	第八节 不锈钢的新发展	160
第五节 合金元素对钢热处理工艺性能的 影响	41	第七章 耐热钢和耐热合金	162
第六节 钢的冶金质量	42	第一节 耐热金属材料的工作条件及性能 特点	162
第三章 工程构件用钢	45	第二节 抗氧化钢	165
第一节 工程构件用钢的力学性能特点	45	第三节 珠光体及马氏体耐热钢	167
第二节 工程构件用钢的耐大气 腐蚀性	49	第四节 奥氏体耐热钢及合金	172
第三节 工程构件用钢的加工工艺 性能	51	第五节 镍基耐热合金(高温合金)	174
第四节 碳素构件用钢	53	第六节 高温合金的新发展	176
第五节 低合金构件用钢	56	第八章 铸铁	179
第六节 进一步提高普低钢性能的 途径	61	第一节 概述	179
第四章 机器零件用钢	71	第二节 铸铁的结晶	179
第一节 机器零件用钢的强韧化	71	第三节 灰铸铁	184
第二节 渗碳钢	75	第四节 球墨铸铁	187
第三节 调质钢	79	第五节 蠕墨铸铁	190
第四节 弹簧钢	87	第六节 可锻铸铁	191
第五节 滚动轴承钢	90	第七节 合金铸铁	193
第五章 工具钢	98	第九章 有色金属及其合金	196
第一节 刃具用钢	98	第一节 铝及其合金	196
第二节 冷作模具用钢	117	第二节 钛及其合金	212
第三节 热作模具用钢	124	第三节 铜及其合金	220
		第四节 镁及其合金	228
		第十章 高聚物材料	230
		第一节 概述	230
		第二节 高聚物结构	233

第三节	温度对高聚物结构性能的影响	238	第五节	金属基复合材料	273
第四节	高聚物的基本性能	239	第六节	其它类型的复合材料	278
第五节	高聚物材料的加工成型	244	第十二章 陶瓷材料	284	
第六节	常用塑料简介	245	第一节	概述	284
第七节	合成纤维	249	第二节	陶瓷材料制备工艺	287
第八节	橡胶	250	第三节	陶瓷的显微组织	291
第九节	胶粘剂	254	第四节	陶瓷的力学性能	295
第十一章 复合材料	259		第五节	陶瓷的塑性变形及蠕变	303
第一节	概述	259	第六节	陶瓷的热学性能和抗热震性	305
第二节	复合理论简介	263	第七节	陶瓷的韧化	311
第三节	复合材料的界面	266	第八节	结构(工程)陶瓷简介	320
第四节	树脂基复合材料	269	主要参考文献	323	

第一章 绪 论

第一节 概 述

材料在人类历史进程中的地位人所共知，材料发展与社会进步有着密切关系，它是衡量人类社会文明程度的标志之一。因此，历史学家根据人类使用的材料，将历史划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。我国是最早发现和使用金属材料的国家之一。周朝是青铜器的极盛时期，到春秋战国时代，已普遍应用铁器。但是相当长历史时期内，受到采矿和冶炼技术的限制，直到 19 世纪中叶，大规模炼钢工业才兴起，钢铁才成为最主要的工程材料。

凡与工程有关的材料均谓之工程材料。工程材料按其性能特点分为结构材料和功能材料两大类。结构材料以力学性能为主，兼有一定的物理、化学性能。功能材料以特殊的物理、化学性能为主，如那些要求有电、光、声、磁、热等功能和效应的材料。

同人类历史发展一样，工程材料也有一个发展过程。在本世纪 40~50 年代，材料的发展主要围绕着机械制造业，因此，主要发展了以一般力学性能为主的金属材料。90 年代以后，随着科学技术的发展，新材料的品种不仅越来越多，而且质量越来越高。近十年来，随着高压聚合工艺的进步，高分子材料（又称高聚物材料）的合成，高性能的合成纤维和工程塑料已进入实用阶段。由于开发了沥青热解法生产碳纤维的新技术，使碳纤维的生产达到了数万吨的规模，因此，碳纤维增强的复合材料逐渐扩大并应用于机械制造业，其中 60% 用于汽车工业。陶瓷本是古老的传统材料，由于制备技术的进步，开发出一批特种陶瓷材料，包括 SiN、SiC、AlN、赛隆（Sialon）、增韧氧化锆、莫莱石等新材料，其强度和断裂韧性大大优于普通的硅酸盐陶瓷材料，因此，特种陶瓷材料在未来工程材料中将占有重要地位。进入 80 年代，材料超纯提炼和微细加工技术的突破，促进了各种功能材料的迅速发展，各种小型化功能元器件也逐步产业化。

材料工艺的进步不仅推动了新材料的开发和应用，而且极大地提高了材料的性能和质量。如轴承钢的精炼工艺使非金属夹杂物含量明显降低，且呈细小、均匀分布，可提高轴承寿命 30%~50%。又如用计算机控制的自动缠绕工艺技术的使用，使设计人员可以按照工件的应力分布，合理配置增强纤维并呈最佳取向，可自动成型，使复合材料的可靠性大大提高，应用范围不断扩大。

工程材料种类繁多，用途广泛，有许多不同的分类方法，工程上通常按化学分类法对工程材料进行分类，如图 1-1 所示。工程材料主要应用于机械制造、航空、航天、化工、建筑、能源、矿山和交通运输等部门。

随着时代的进步，材料科学也在快速发展，面向 21 世纪，世界各国都在发展新材料。新材料对高科技和新技术的发展具有非常关键的作用，没有新材料就没有发展高科技的物质基础。掌握新材料是一个国家在科技领域处于领先地位的标志之一。因此，世界各国都把新材料的研究和开发列为发展国民经济的重要组成部分。面向 21 世纪，新材料的发展趋势如下：

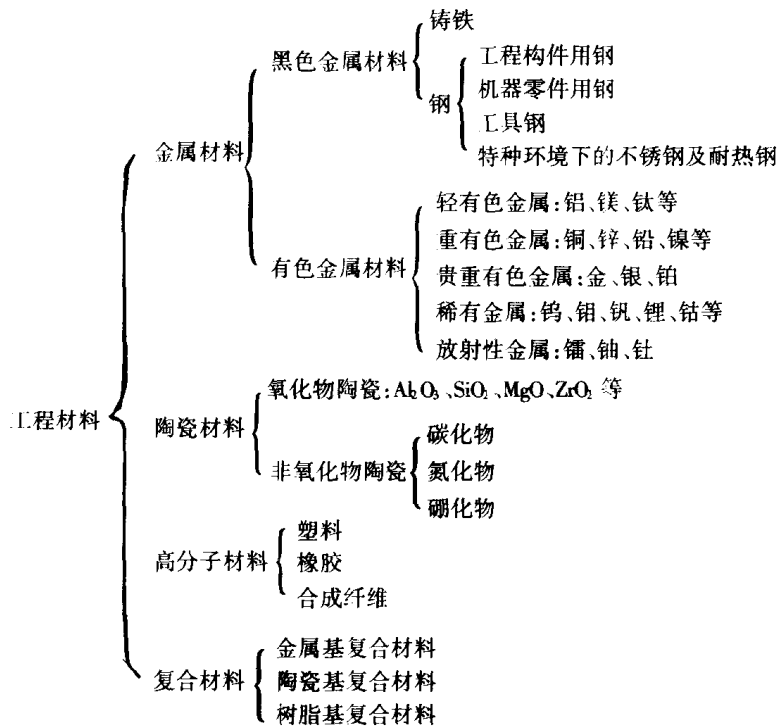


图 1-1 工程材料的分类

1. 继续重视高性能的新型金属材料

所谓高性能材料就是指具有高强度、高韧性、耐高温、耐低温、抗腐蚀、抗辐射等性能的材料。这种材料对发展空间技术、核能、海洋开发等工业有着极其密切的关系。新材料是采用新技术和新工艺发展的。例如，合金成分的物理冶金设计，微量元素的加入与控制，特殊组织结构的控制等，从而大幅度提高材料的性能。面向 21 世纪，金属材料仍占主导地位。

2. 结构材料趋向于复合化

尽管金属材料采用了一系列强韧化措施及发展了非金属材料，如高分子材料和陶瓷材料，但由于单一材料存在难以克服的某些缺点，如脆性、弹性模量低、比强度不足等。所以把不同的材料进行复合以得到优于原组分性能的新材料，就成为结构材料发展的一个重要趋势。如玻璃树脂基的第一代复合材料，碳纤维增强树脂基的第二代复合材料，第三代复合材料则是正在发展的金属基、陶瓷基及碳基复合材料。复合材料在航空、航天工业和汽车工业中获得了广泛的应用，在化工设备和其它方面也有较多的应用。

3. 低维材料正在扩大应用

低维材料包括零维（超微粒）、一维（纤维）和二维薄膜材料，这些材料也是近年来发展最快的一类新材料，可用于作结构材料 and 功能材料。

通过化学反应、气相沉积等方法，可制出亚微米级和纳米级（1~100nm）的金属或陶瓷粉末，这类超微颗粒有很大的比表面积和比表面能，熔点低，扩散速度快，烧结温度下降，强度高而塑性下降缓慢，具有良好的综合性能。超微粒的某些功能材料，可成为高效吸波材料。

一维材料应用广泛，其中最突出的是光导纤维，可用于作通信工程材料。纤维结构材料是复合材料中的主要增强组分，它决定了复合材料的关键性能；纤维中的晶须，其强度和刚

度可接近理论强度值；碳纤维、有机高分子纤维和陶瓷纤维均有广阔的应用前景。

二维的薄膜材料发展迅速，金刚石薄膜和有机高分子薄膜十分诱人，高温超导薄膜尤为突出。金刚石薄膜可用于高速电子计算机的微芯片；高分子分离膜已在水处理、化工生产、高纯物质制备等方面获得了应用；高温超导薄膜将开辟超导技术的新领域。

4. 非晶（亚稳态）材料日益受到重视

70年代通过快冷技术（ 10^6°C/s ）而获得非晶态或亚稳态合金材料。由于骤冷，金属中的合金元素偏析程度降低，没有晶界，从而可提高合金化程度，而不致产生脆性相。非晶态合金具有高强度、耐腐蚀等特点，某些非晶态铁基合金具有很好的磁学性能，用作变压器比硅钢片的铁损少2/3。

在工程应用中，通光激光束表面处理可在工件表面获得非晶态，具有高耐磨性和耐蚀性。另外，非晶态的硅太阳能电池，光电转换率可达15%，有待进一步实用化。

5. 功能材料迅速发展

功能材料是当代新技术中能源技术、空间技术、信息技术和计算机技术的物质基础。功能材料是90年代材料研究与生产中最活跃的领域。例如，由于超大容量信息通信网络和超高计算机的发展，对集成电路的要求越来越高，促进集成度逐年增加。从材料看，除了硅半导体外，化合物半导体受到越来越多的重视。又如有关磁记录和磁光记录材料、高温超导材料、光电转换材料等都将有进一步的发展。近年来功能梯度材料发展很快，其性能是原来的均质材料和一般复合材料所不具备的，梯度功能材料将有广泛的应用潜力。

6. 特殊条件下应用的材料

在低温、高压、高真空、高温以及辐照条件下，材料的结构和组织将会转变，并由此引起性能变化。研究这些变化规律，将有利于创制和改善材料。例如，在高压下的结构材料，由于原子间距离缩短，材料将由绝缘体转变为导体， Nb_3Sn 、 Nb_3Ge 和 Nb_3Si 等超导体均在高压下合成。现正在开展高压及冲击波对材料性能影响的试验研究，理论上预测氢在几千万大气压下将转变为金属态，它在室温时就具有超导性，它的实现还有待于高压条件的创建。另外，太空、深海洋等工程技术所用的材料将继续深入研讨。

7. 材料的设计及选用计算机化

由于电子计算机及应用技术的高度发展，使得人们可以按照指定的性能进行材料设计正逐步成为现实。通过电子计算机的应用以及量子力学、系统工程和统计学的运用，可以在微观与宏观相结合的基础上进行材料设计和选用，使之最佳化。目前已建立起计算机化的各种材料性能数据库和计算机辅助选材系统，并进一步向智能化方向发展，从而提高了工程技术的用材水平。

第二节 工程材料的失效分析

各种工件丧失规定的功能称为失效（Failure）。分析失效原因，提出预防措施，使工件正常安全运行的科学，称为失效分析学，它是一门新兴的边缘科学。

随着航空、宇航、原子能等工业的飞速发展，要求工件在各种恶劣而复杂的环境中服役，因此发生失效的几率也日益增加。当今世界上每年都要发生多起重大失效事故，不仅危及人身安全，环境污染，而且造成巨大的经济损失。例如1986年1月28日美国航天飞机挑

战者号发射升空后 75s 即发生爆炸，造成宇航史上震惊世界的悲剧。又如 1986 年 4 月 25 日前苏联切尔诺贝利核电站发生失效，反应堆被毁，导致人员伤亡，千百万人健康受到损害，事故造成的直接经济损失约 20 亿卢布。根据文献报道，美国每年在工程上因疲劳失效或应力腐蚀断裂失效造成的经济损失达 3000 万美元。我国矿山机械由于失效造成的损失每年达 10 亿元。由此可知，失效分析是提高产品质量与可靠性的重要手段，是经济建设的必要环节。

一、失效原因

工件失效分析的基础原因可概括为设计、选材、加工和安装使用等四个方面，如图 1-2 所示。

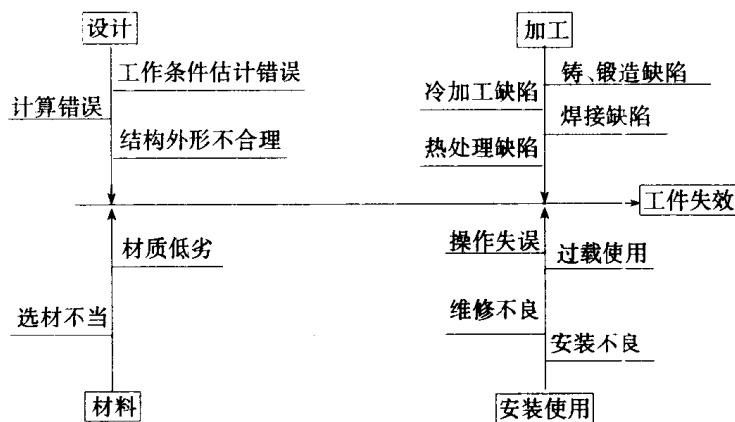


图 1-2 工件失效原因示意图

（一）合理设计与不合理设计

设计时应从强度计算、结构形式、选材、使用条件和环境的影响等方面周密考虑安全使用寿命问题。

设计中的错误主要表现为：设计中的过载荷、外形上的应力集中、焊接或装配不当，没有考虑使用条件和环境的影响等。

工件外形设计不合理或结构上存在问题，将引起应力集中。例如尖角、过渡角太小、凹槽和缺口布置或设计不当等，容易造成应力集中，导致失效。

由于未经周密的计算，或构件形状复杂，很难进行应力计算时就从事设计，也将引起工件早期失效。例如汽轮机叶片，由于设计不当，经常发生共振损坏。

德国阿连兹技术中心（AZT）曾对 1200 次蒸汽轮电站失效原因进行统计分析，其中设计及结构事故占 17.5%，这说明了设计与失效之间的密切关系。

（二）材料与失效

机器设备工作时，材料往往作为过载信息的传递者，而每一工件的失效，多是由于材料所受的载荷超过了材料的承载能力。在许多失效案例中，有可能仅仅对材料分析研究，就能找出失效原因。因此，失效分析总是从材料开始，从材料及工艺上找问题。由于材料导致失效的原因，主要有以下两方面。

1. 选材不当导致失效

选材不当是引起失效的主要原因，例如 1980 年 12 月 1 日在加拿大某地发生储油罐炸

裂，引起大火，损失 850 万美元。失效分析表明，这是由于选用锰碳比很低的 ASTM283 钢，在低温使用，导致储油罐壳发生脆性断裂。

2. 材质低劣导致失效

材料的生产一般要经过冶炼、铸造、锻造、轧制等几个阶段，在这些工艺过程中所造成的缺陷往往会导致早期失效。

(1) 冶炼中的缺陷 冶炼工艺的好坏将直接影响产品的使用寿命。冶炼工艺较差，会使钢中有较多的氧、氢、氮，并形成非金属夹杂物，这不仅使材料变脆，甚至还会成为疲劳源，导致产品的早期失效。

(2) 铸造中的缺陷 由于铸造工艺不当，均可产生一些铸造缺陷。这些缺陷有：疏松、裂纹、夹杂等；铸件中疏松破坏了材料的连续性，使材料强度大大下降；铸件在冷却过程中产生的裂纹，可导致铸件早期失效；铸件中由于碳化物、氮化物和硫化物等沿晶界的析出，会引起铸件产生沿晶断裂。

(3) 锻造或轧制中的缺陷 锻造可明显改善材料的力学性能。但如果锻造工艺不当，会在锻造过程中产生各种缺陷，如过热、过烧、锻造或轧制裂纹、流线分布不良及折叠等。它们会引起工件早期失效。例如，某厂用 T8A 钢生产卡尺，由于锻造工艺不当造成微小表面裂纹，经淬火处理时，使裂纹扩展，致使整批卡尺报废，造成巨大经济损失。

(三) 制造过程中产生缺陷引起的失效

产品在加工制造过程中，若不注意加工质量，会产生加工缺陷而导致产品早期失效。其缺陷包括如下几方面：

1. 冷加工缺陷

许多机械产品，往往要经过车、铣、刨、磨等加工工序。由于加工工艺不当，给工件带来各种缺陷；磨削时磨削深度过大或冷却不充分，将使表面出现回火组织而使表面硬度降低，有时甚至会形成磨削裂纹；零件表面加工粗糙，会造成应力集中而引起疲劳断裂。以上各种情况均有可能导致零件的早期失效。例如某厂进一批 DAL 载重汽车，使用两年后，约有 4% 的发动机曲轴发生断裂，经分析，认为是由于加工质量不符合规定而造成的早期失效。

2. 热处理中的缺陷

热处理的不当是导致工件失效的重要原因，常见的缺陷有氧化与脱碳、变形与开裂、过热与过烧、回火不足以及组织缺陷等，均能导致工件失效。据文献报告，对工模具的失效调查表明，大部分失效是热处理不当造成的。例如，天津机车车辆厂用 60Si2Mn 钢生产的热成型弹簧，装车使用后不久就产生了断裂。分析后认为，是由于在热处理时加热温度过高引起淬火裂纹所致。

3. 焊接缺陷

焊接缺陷引起失效的例子很多。如焊接时产生气孔、未焊透、焊接裂纹等均会造成工件在使用过程中早期失效。另外，焊接所引起的残余应力也会引起零件的早期失效。

(四) 安装使用不当

工件安装不良，操作失误、过载使用、维修保养不当等，均可导致工件在使用中失效。据文献统计，在 260 起压力容器失效中，属于操作不当而造成的失效竟占 74.6%。又如前苏联切尔诺贝利核电站事故是由于电站工作人员粗暴违反反应堆装置的操作规程，导致了这场

大灾难。

总之，工件失效的原因是复杂的，它是各种因素共同作用的结果。但每一失效事故，都有一个导致失效的主要原因。因此对各种服役条件下的工件失效，应作具体分析，找出失效方式和失效抗力指标。失效分析时应做到设计、材料、工艺相结合；结构强度与材料强度相结合；宏观规律与微观机理相结合；规律性试验与生产实际相结合。

工件失效类型和相应的失效抗力指标归纳于表 1-1。

表 1-1 工件失效类型和相应的抗力指标

失效类型	相应的主要抗力指标
变形失效	$E, G, \sigma_e, \sigma_s, \sigma_{0.2}$ 、松弛稳定性等
一次断裂失效	$\sigma_b, a_k, CVN, K_{Ic}, \psi, \delta$ 、脆性转变温度等
疲劳失效	$\sigma_{-1}, da/dN$ 等
应力腐蚀失效	K_{Isc} 等
磨损失效	耐磨性，接触疲劳抗力等

二、失效类型

工程上产品种类繁多，同类产品或零件可能以不同方式失效，而不同产品又会有相同或相似的失效特征。根据工件损坏的特点，所承受载荷的形式及外界条件，可将失效分为下列几种类型：

(一) 变形失效

变形失效包括弹性变形失效、塑性变形失效、蠕变变形失效。其特点是非突发性失效，一般不会造成灾难性事故。但塑性变形失效和蠕变变形失效有时也可造成灾难性事故，应引起充分重视。

(二) 断裂失效

断裂失效包括以下几类：

(1) 塑性断裂失效 其特点是断裂前有一定程度的塑料变形，一般是非灾难性的，用电镜观察断口时，到处可见韧窝断裂形貌，观察断口附近金相组织，可见到有明显塑性变形层组织。

(2) 脆性断裂失效 断裂前无明显的塑性变形，它是突发性的断裂。电镜下它的特征为河流花样或冰糖状形貌，如解理断裂和沿晶界断裂。

(3) 疲劳断裂 疲劳的最终断裂是瞬时的，因此它的危害性较大，甚至会造成机毁人亡的重大损失。电镜观察断口时，在疲劳扩展区可看到疲劳特征的辉纹。工程上疲劳断裂占大多数，约占失效总数的 80% 以上。

(4) 蠕变断裂失效 在高温缓慢变形过程中发生的断裂属于蠕变断裂失效。最终的断裂也是瞬时的。在工程中常见的多属于高温低应力的沿晶蠕变断裂。

(三) 腐蚀失效

金属与周围介质之间发生化学或电化学反应而造成的破坏，属于腐蚀失效。其中应力腐蚀、氢脆和腐蚀疲劳等是突发性失效，而点腐蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀和大部分均匀腐蚀失效不是突发性的，而是逐渐进展的。腐蚀失效的特点是失效形式众多，机理复杂，占金属材

料失效事故中的比比较大。

(四) 磨损失效

凡相互接触并作相对运动的物体，由于机械作用所造成的材料位移及分离的破坏形式，称为磨损。磨损失效所造成的后果一般不像断裂失效和腐蚀失效那么严重，然而近年来却发现一些灾难性的事故来自磨损。磨损失效主要有：粘着磨损、磨粒磨损、接触疲劳磨损、微动磨损、气蚀等几种失效形式。

三、提高失效抗力的方法

(一) 冶金质量问题

图 1-3 是材料失效抗力指标与成分、组织状态的关系。沿着这条思路可寻求选材用材的强韧化最佳方案，从材料角度探索出提高工件使用寿命的途径。

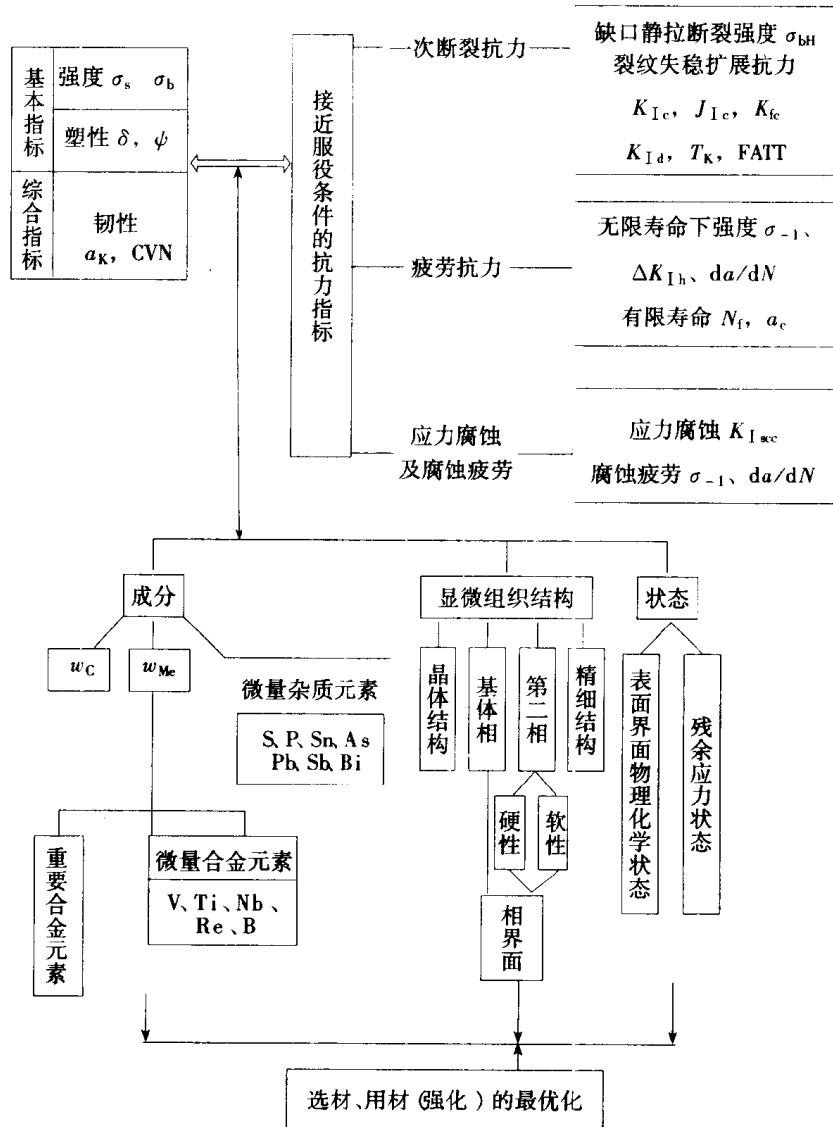


图 1-3 材料失效抗力指标与成分、组织、状态的关系

微量杂质元素对钢的性能危害极大，因此必须采用精炼，提高钢的纯净度，可显著改善钢的失效抗力。

(二) 微合金化

钢中加入合金元素如铝、钒、钛、锆、铌、硼、稀土等，可提高强韧性，降低裂纹扩展速率，延长工件使用寿命。

（三）控制轧制

控制轧制可获细晶组织，提高钢的失效抗力。

（四）强韧化工艺

大力开展强韧化工艺是提高材料的失效抗力指标的有效途径，如板条状位错型马氏体的应用、亚温淬火、超细晶粒处理、形变热处理和复合热处理、超高温淬火、碳化物的微细化处理、高碳钢和渗碳钢的短时加热淬火等，均可在保证高强度的条件下提高塑性、韧性，改善材料失效抗力。

（五）采用局部复合强化

采用局部复合强化，克服薄弱环节，具有重要意义。例如中碳合金结构钢淬火、低温回火后滚压；合金渗碳钢经 C-N 共渗淬火、低温回火后滚压，都可提高其疲劳极限。因此热处理后再施以冷变形强化，是大幅度提高工件疲劳失效抗力的有效措施。

总之，材料存在的宏观、微观缺陷以及选材和加工工艺不恰当，是导致工件失效的重要原因。运用材料科学的基本原理，能确定各种失效抗力指标随材料成分、组织结构和状态的变化规律，从而探索增强失效抗力的主要措施，以提高产品使用寿命和可靠性。

第三节 工程材料的选用原则

材料的选用是机械设计中的重要环节之一，这会影响到整个设计过程。材料选择的核心是在技术和经济合理前提下，使材料的使用性能与产品的设计功能相适应。一方面使材料服役于接近失效极限的范围内，安全系数趋于低值，并尽量使用高性能的材料和强化技术；另一方面，在产业化工艺技术不够成熟和完善的情况下，避免盲目使用性能尚未稳定的新材料。选用材料的主要依据是其使用性能、工艺性能和经济性，其中使用性能需要首先满足。

一、使用性能选材原则

在人类生活中，使用最多的是金属材料，故以金属材料为例说明。

使用性能是指材料在使用过程中，能够安全可靠地工作所必须具备的性能。它包含材料的力学性能、物理性能和化学性能。对于一般工件，使用性能中最主要的是材料的强度，因为只有在满足特定的材料力学性能之后才有可能保证工件运转正常，不致早期失效。工程上经常采用的热处理和冷变形强化工艺，就是以获得较高的力学性能为依据的。

（一）金属的力学性能

金属力学性能是研究金属在外力作用下所表现的行为。其力学行为包括弹性变形、塑性变形和断裂。金属受外力作用后，随着外力的增加，首先发生形状和尺寸的变化，而后当外力增大到一定数值时，金属便断裂成几部分。金属基本力学行为的研究具有重要的工程实际意义：首先与基本力学行为有关的问题是金属零件在运行中所发生的失效。任何一种失效过程均伴随着上述基本力学行为的发生，因为研究基本力学行为对防止工件失效及发挥材料性能潜力将是十分重要的。其次，金属加工工艺过程也与其力学性能密切相关，例如，金属压力加工的基础是塑性变形，切削加工的基本过程是塑性变形和断裂。第三，评定金属材料力学性能指标的测试，就是测量金属的弹性变形、塑性变形和断裂抗力，以及弹性变形和塑性

变形的能力。这些基本力学性能指标就是金属各种基本力学行为发生转变时临界状态的度量。

1. 影响金属力学性能的因素

(1) 内因 影响力学性能的内因包括组成金属材料的全部内容，其中包括：

金属的原子结构：不同的金属元素有不同的原子结构，因而表现出不同的性能。如铁的原子间结合力比铝大，就是由于它们的原子结构不同，从而铁基合金比铝合金有较高的强度和较大的弹性模量。

晶体结构：常见的金属晶体结构有面心立方、密排立方和体心立方。面心立方的奥氏体钢一般比体心立方的铁素体钢具有较高的塑性，并且没有冷脆倾向性。

化学成分：这是影响力学行为最活跃的因素之一。改变成分并配合以适当的热处理可以有效地改变其力学行为。如低碳钢的塑性较好，但强度较低；而高碳钢具有很高的硬度和耐磨性，但较脆。加入合金元素后形成的固溶体比纯金属具有较高的强度。

显微组织状态：这是指构成金属材料中各种相的种类、状态、数量、大小和分布的总和。所有这些内容又可以用基体、第二相（基体以外的所有相）和界面状态三个基本方面来描述。同一种成分的合金可以通过不同的热处理工艺在很大的范围内改变它的组织状态，从而改变力学性能。如中碳钢退火后的组织为铁素体和珠光体，其强度较低而塑性较高，但淬火后为马氏体，则硬而脆。

精细结构（或晶体缺陷）：在实际晶体中，或多或少地存在偏离理想结构的区域，称为晶体缺陷。晶体缺陷对金属的许多性能有着极重要的影响，与晶体的凝固、固态相变、扩散等过程都有重大关系，特别是对塑性变形、强度和断裂等方面起决定性作用。

在晶体中，缺陷并不是静止地、稳定不变地存在着，而是随着各种条件的改变而不断地变动，它们可以产生、发展、运动和交互作用，有时则会合并或消失。

晶体缺陷按几何形状可分为点缺陷、线缺陷（位错）和面缺陷（如堆垛层错、晶界）等三类。

晶体缺陷：往往包括在组织状态之中，如位错密度及其组态。例如铁素体经冷塑性变形后，物理化学性质并没有改变，但位错密度增加，使其强度增高。

冶金缺陷：如夹渣、缩孔、发纹、偏析和非金属夹杂物等，它们都是难以避免的，但对材料性能的影响往往十分严重。因此，有些重要零件所用的金属材料，常采用各种精炼方法提高其冶金质量。

内应力：在金属材料中，内应力往往是难以避免的。它们对力学性能的影响可能有利也可能有害。如淬火热应力可能导致工件开裂；而渗氮层表面压应力则可能提高工件的疲劳强度，因此应合理地控制和利用内应力。

所有这些内部因素都是在材料的生产和工件的加工处理过程中形成的，是工件制造历史的记录。因此，为了控制最终的组织状态，必须控制工件的整个加工制造过程。

(2) 外因 外因是指工件的工作条件，其中包括：承受载荷的性质（静载荷、冲击载荷、变载荷）和幅度、加载次序（载荷谱）、应力状态（拉、压、扭、剪、接触及它们的复合）、温度、环境介质（常规大气、海洋大气、湿度、化学与电化学腐蚀、冲刷、磨损、微动磨损）等。

表 1-2 失效方式和材料性能之间的关系

失效方式 \ 材料性能	抗拉强度	屈服强度	压缩屈服强度	剪切屈服强度	疲劳性能	延展性	冲击吸收功	转折温度	弹性模量	蠕变速率	K_{Ic}	K_{Isc}	电化学位	硬度	膨胀系数
明显屈服		○		○											
皱折			○						○						
蠕变										○					
脆断							○	○			○				
低周循环疲劳					○	○									
高周循环疲劳	○				○										
接触疲劳			○												
磨蚀			○											○	
腐蚀													○		
应力腐蚀开裂	○											○	○		
电化学腐蚀													○		
氢脆	○														
磨损														○	
热疲劳										○					○
腐蚀疲劳					○								○		

总之，不同材料在不同的条件下表现出不同的力学性能；相应地，不同的工件在不同工作状态下可能以不同的形式失效；表 1-2 列出了与各种失效方式密切相关的力学性能指标。不同的工作条件和失效方式对材料力学性能的要求不同。表中的圆圈表示该种性能对特定的失效方式有决定性的影响。

2. 金属及合金的力学性能

所有机械产品工作时分别承受着不同形式和不同程度外力作用，并在温度和环境介质作用下工作。这种承受外力作用所反映出的各种力学性能，它代表着材料抵抗变形和断裂的能力，这些性能指标都是通过实验测定的，其主要力学性能指标如下：

(1) 金属材料的强度指标 从拉伸曲线可以确定金属材料的强度，其中包括金属对微量塑性变形的抗力，对大量塑性变形的抗力以及断裂抗力

比例极限 σ_p ：比例极限 σ_p 是材料所受应力 P_p 与应变成正比关系的最大应力，即拉伸曲线上将开始偏离直线时的应力：

$$\sigma_p = P_p / S_0$$

式中 P_p ——应力与应变呈直线关系的最大载荷；

S_0 ——试样原始截面积。

弹性极限 σ_e ：弹性极限 σ_e 是材料由弹性变形过渡到弹-塑性变形时的应力，应力超过此限度后便开始产生塑性变形，其应力

$$\sigma_e = P_e / S_0$$

式中 P_e 表示材料开始产生塑性变形的载荷，对于零件在工件条件下不允许产生微量塑

性变形时，设计中应根据此数据来选材。

屈服点（屈服强度） σ_s ：屈服点 σ_s 表示在拉伸过程中载荷不增加或增加很小的情况下，试样发生明显变形的最小应力：

$$\sigma_s = P_s / S_0$$

式中 P_s 即在屈服阶段的载荷，对大多数金属来讲没有明显的屈服现象，因此规定产生 0.2% 永久变形时的应力作为屈服极限，称条件屈服极限，以 $\sigma_{0.2}$ 表示之，称为屈服强度。屈服强度的大小规定了微量塑性变形的界限，它是评定金属对微量塑性变形抗力的重要指标，某些零件常因过量的塑性变形而失效，因而它是设计和选材的主要依据。

抗拉强度 σ_b ：抗拉强度 σ_b 是材料断裂前所能承受最大载荷 P_B 时的应力，即

$$\sigma_b = P_B / S_0$$

抗拉强度的物理意义是表征材料承受最大均匀塑性变形的抗力，也表征材料在拉伸条件下抵抗破坏所能承担的最大应力值，它是设计和选材的主要依据之一。

σ_s 和 σ_b 是两个主要的强度指标。 σ_s / σ_b 的比值称屈强比，若此比值愈大，则材料强度的有效利用率愈高；比值愈小，则材料强度的有效利用率愈低，但可靠性却增加了。

断裂强度 σ_K ：断裂强度 σ_K 等于拉断试样时的载荷 P_K 除以断裂后缩颈处截面积 S_K ，即

$$\sigma_K = P_K / S_K$$

它是拉断试样时的真实应力，表征材料对断裂的抗力，对塑性材料来说，它在工程上意义不大，因为产生缩颈后，试样所承受的外力不但不增加，反而减小。脆性材料一般不产生缩颈，即 $S_K = S_0$ ，因此抗拉强度 σ_b 就是断裂强度 σ_K 。

(2) 金属材料的塑性指标 反映金属材料在外力作用下发生塑性变形的能力称为塑性。塑性以其受外力破断后的塑性变形大小来表示。工程中以材料拉伸时的伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 两个指标来表示：

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\psi = \frac{S_0 - S_K}{S_0} \times 100\%$$

式中 L_1 ——试样破断后的标距长度；

L_0 ——试样的原始标距长度；

S_0 ——试样的原始截面积；

S_K ——试样断裂后的最小截面积。

上述两塑性指标在测定金属材料抗拉强度的同时即可测得之。

(3) 硬度 硬度是衡量金属材料软硬程度的一个指标，硬度值表征材料抵抗弹性变形、塑性变形和破坏的能力，是一系列不同物理量的一个综合性能指标。

最常用的硬度试验法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等方法。

(4) 金属的疲劳 某些零件在交变应力作用下，经过长时间的工作而发生破断的现象称为金属的疲劳。

实验表明，对于钢铁材料，若在某一应力下经受 10^7 次交变循环而不发生破坏时，则它可在该应力下承受无限次循环而不破坏，因此将 10^7 次循环所对应的最大应力称为疲劳极