



普通高等教育“十二五”规划教材

工程材料

杨瑞成 郭铁明 陈 奎 编著
南雪丽 刘芬霞 张建斌



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

工 程 材 料

杨瑞成 郭铁明 陈 奎 编著
南雪丽 刘芬霞 张建斌

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

机类、近机类以及其他工程领域专业的学生需要与工程设计制造紧密相关的材料知识,以及如何在具体零件的材料选择和加工工艺中应用这些知识。与从材料学出发的传统体系不同,本书将重点放在材料的性能与特征、材料选择以及应用上。因此,本书的体系、框架与编写方式均与以往同类教材有很大的不同,即注重工程背景、工程应用以及与机械等工程设计制造的有机联系,既新颖又实用。

全书分四篇 10 章,内容包括:(机械等)工程领域对材料性能的要求、材料组成与结构、材料成形行为与性能、材料热处理与表面改性、金属材料、非金属材料、工程设计制造与材料选择、常用机器零件选材、机械工程用材情况及节材、工程领域选材用材专题。

本书特别设置了“走进工程材料”(共 14 篇),兼顾传统性、时代性、新颖性。除了小结和例题、习题外,章末增设实用而有趣的课堂讨论题(书末列出简要提示),可拓展学生的知识面。

本书可作为普通高等院校机械设计制造及其自动化等工科类专业本科生的教材,也可供大专生或有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料/杨瑞成等编著. —北京:科学出版社,2012
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-03-032770-3

I. ①工… II. ①杨… III. ①工程材料-高等学校-教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 231671 号

责任编辑:毛 莹 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:张克忠 / 封面设计:速底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中新伟业印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2012 年 1 月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:400 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是为各工程领域，尤其是机械设计制造及其自动化专业学生编写的一部主干技术基础课教材。本书也是编者多年来从事本课程教学、教改以及精品课程建设的积累和成果。其前身是《机械工程材料》（重庆大学出版社，2000、2004、2009年，共三版），此次作了较大幅度的修改，数章是重新编写，并更新、添加了一些内容，如走进工程材料、课堂讨论题等。

与传统体系（单纯从材料出发，立足材料学本身，遵循的主线为：成分→热处理工艺→组织结构性能的关系）不同，本书的思路是立足工程需求，以及如何从材料角度予以保证。主线为：（机械等）工程要求→力学及其他负荷特征→对应的材料性能→材料制备加工特征与提高材料性能的热处理与表面处理→常见的工程材料→材料选择及典型应用。全书分四篇共10章，各篇相互联系，循序渐进，又有一定独立性。

第一篇为工程材料的性能和基本特征。包括工程领域对材料性能的要求（第1章）和各种类型材料的组成和内部结构特征（第2章）。

第二篇为工程材料的加工特性及改性。包括工程材料成形过程中的行为与性能变化（第3章）以及改善材料性能的热处理、合金化及改性（第4章）。

第三篇为常用工程材料。包括金属材料（第5章）与非金属材料（第6章），内容简洁概括，依据最新国家标准和国际标准，强调各类材料特点与共性以及主要应用场合。

第四篇为工程材料的选择与应用。一般教材无此部分或仅书末一章。本书基于主思路则大为扩充，视为重点之一。首先是内容丰富的第7章，旨在介绍工程设计制造中材料选择和材料成形与热处理工艺选择原则的同时，将它们纳入到工程设计制造的流程中去，使材料与材料成形加工（包括热处理等）更好地为机械等工程服务。接着就是应用部分：常用机器零件选材（第8章）以及工程领域选材用材专题与应用实例（第10章，6个专题），体现了工程性、实用性，拓展了学生的知识面，也可供不同性质院校和专业选用。第9章介绍了机械工业用材情况与比较，以及体现经济性与产业政策的节材问题。

各章包含数个例题、思考题与习题，以及“本章小结”，而且本书在前7章的正文后设置了“走进工程材料”，共14篇（每章2篇），成为课程内容的补充和拓展，充分体现可读性、趣味性、新颖性，兼顾传统性、时代性，旨在让学生真正走进工程材料。此外，章末还增设实用而有趣的课堂讨论题（书末以附录形式给出简要提示），可活跃、激发课堂气氛，这也是编者多年教学实践的部分体现。

总之，本书从机类、近机类等工程专业教材的性质与实际需求出发，加强工程

背景，强调材料的特征和选材用材，注重材料知识的工程应用。其效果如何，敬请广大读者不吝指教。

本书是多校合作的结果，由杨瑞成担任主编（确定大纲、统稿定稿）并编写第9、10章和8篇走进工程材料以及课堂讨论题，其他编者为郭铁明（第1、2章）、南雪丽（第3、4章和2篇走进工程材料）、张建斌（第5、7章和3篇走进工程材料）、陈奎（第6章和1篇走进工程材料）、刘芬霞（第8章）。对本书完成有贡献的还有舒俊、孟威、杨娟、王彬、成佳辉、靳塞特、牛绍蕊、胡天雷、李杰、毕海娟、陈华、申鹏、吴量、张安明、夏渊、杨海歌、杨钊、杨新星等。兰州理工大学教务处的马骏同志在本书的组织和协调等方面作出很大的贡献，本书得到“兰州理工大学规划教材建设基金”的资助，特此感谢。

编 者

2011年8月

目 录

前言

第一篇 工程材料的性能和基本特征	1
第 1 章 工程领域对材料性能的要求	1
1.1 工程零构件所受各种负荷概述	1
1.2 工程设计制造所需要的材料力学性能	5
1.3 工程设计制造所需要的材料理化性能	14
1.4 工程材料的加工工艺性能	16
1.5 工程材料的类型及基本特征	17
本章小结	19
思考题与习题	20
走进工程材料 1: 纽约世贸大厦坍塌的材料学追思	21
走进工程材料 2: 鸟巢、国家大剧院、水立方和大峡谷“玻璃桥”用材	24
第 2 章 材料的组成和内部结构特征	28
2.1 金属材料的结构特点	28
2.2 晶体材料的相图与相变	34
2.3 铁碳合金相图与铁碳合金	45
2.4 陶瓷与高分子材料的结构特点	53
2.5 材料的组织与性能	56
本章小结	60
思考题与习题	60
走进工程材料 3: “锡疫”探源	61
走进工程材料 4: 相变趣闻	63
第二篇 工程材料的加工特性及改性	65
第 3 章 工程材料成形过程中的行为及性能变化	65
3.1 金属的凝固(结晶)	65
3.2 铸造、焊接过程中的材料行为及性能变化	70
3.3 冷塑性变形过程中的材料行为及性能变化	76
3.4 热塑性变形过程中的材料行为及性能变化	81
3.5 高分子材料的物理状态	83
本章小结	86

思考题与习题	86
走进工程材料 5: 冰海沉船 (泰坦尼克号悲剧) 原因探讨与材料韧性	87
走进工程材料 6: 琴钢丝的特性和制造	88
第 4 章 改善材料性能的热处理、合金化及改性	91
4.1 提高工程材料性能的主要途径	91
4.2 金属材料的热处理原理	92
4.3 金属材料的热处理工艺 (一)——预先热处理	104
4.4 金属材料的热处理工艺 (二)——最终热处理	109
4.5 工程材料的表面改性	116
4.6 钢的合金化	124
本章小结	127
思考题与习题	128
走进工程材料 7: 热处理的“四把火”	130
走进工程材料 8: 大马士革刀和中国古代铸剑	132
第三篇 常用工程材料	135
第 5 章 金属材料	135
5.1 工业用钢分类与牌号	135
5.2 结构钢	138
5.3 滚动轴承钢和耐磨钢	148
5.4 工具钢	151
5.5 不锈钢和耐热钢	157
5.6 铸铁	159
5.7 有色金属及其合金	164
5.8 粉末冶金材料	170
本章小结	173
思考题与习题	174
走进工程材料 9: 硬币用金属及合金	175
走进工程材料 10: 窗框用材及其变迁	178
第 6 章 非金属材料	181
6.1 高分子材料	181
6.2 无机非金属材料	193
6.3 复合材料	200
本章小结	203
思考题与习题	204
走进工程材料 11: 钢化玻璃的奥妙	204
走进工程材料 12: 海水淡化用的反渗透膜材料	206

第四篇 工程材料的选择与应用	208
第 7 章 工程设计、制造与材料选择	208
7.1 零件失效与失效模式	208
7.2 零件设计中的材料选择	213
7.3 热处理在工艺路线中的位置及热处理方案的选择	217
7.4 零件选材、加工及热处理工艺性	223
本章小结	227
思考题与习题	228
走进工程材料 13: 目标函数法选材介绍	229
走进工程材料 14: 价值工程法选材介绍	230
第 8 章 常用机器零件选材	233
8.1 轴类零件选材	233
8.2 齿轮类零件选材	238
8.3 弹簧类零件选材	243
8.4 箱体支承类零件选材	247
本章小结	249
思考题与习题	249
第 9 章 常用机械用材情况与机械工业节材	251
9.1 常用机械用材情况与趋向	251
9.2 机械工程中的节材	255
本章小结	257
思考题与习题	258
第 10 章 工程领域选材用材专题与应用实例	259
专题 1 刀具的选材用材	259
专题 2 塑料模具的选材用材	263
专题 3 磨损工况选材用材及防护	267
专题 4 高温工况选材用材及防护	273
专题 5 腐蚀工况选材用材及防护	279
专题 6 压力容器的选材用材	285
参考文献	292
附录	295
附录 1 课堂讨论题提示	295
附录 2 若干实用数据	297

第一篇 工程材料的性能和基本特征

第 1 章 工程领域对材料性能的要求

1.1 工程零构件所受各种负荷概述

工程构件与机械零件（以下简称零件或构件）在工作条件下可能受到力学负荷、热负荷或环境介质的作用，有时只受到一种负荷作用，更多的时候将受到两种或两种以上负荷的同时作用。在力学负荷作用条件下，零件将产生变形，甚至出现断裂等；在热负荷作用下，将产生热胀冷缩，导致尺寸和体积的改变，并产生热应力，同时随温度的升高零件的承载能力下降，随温度降低零件脆化等；环境介质的作用主要表现为环境对零件表面造成的化学腐蚀、电化学腐蚀及摩擦磨损等。

1.1.1 力学负荷

按负荷（载荷）随时间变化的情况，可把负荷分成静负荷和动负荷。若负荷缓慢地由零增加到某一定值以后保持不变或变动很不显著，即为静负荷，如机器的重量对基础的作用。若负荷随时间而显著变化，则为动负荷，如钢材锻造时锤头对毛坯的作用。

1. 静负荷

作用在机械零件上的静负荷分为 4 种基本形式，即拉伸或压缩、剪切、扭转和弯曲。

1) 拉伸或压缩负荷

图 1-1 (a) 表示一简易吊车，在负荷 P 作用下，AC 杆受到拉伸负荷作用（图 1-1 (b)），而 BC 杆受到压缩负荷作用（图 1-1 (c)）。拉伸负荷或压缩负荷是由大小相等、方向相反、作用线与杆件轴线重合的一对力引起的。这类负荷使杆件的长度发生伸长或缩短。起吊重物的钢索、桁架的杆件、液压油缸的活塞杆等，在工作时都受到拉伸负荷或压缩负荷的作用，产生拉伸或压缩变形。

2) 剪切负荷

图 1-2 (a) 表示一铆钉连接组件，在 P 力

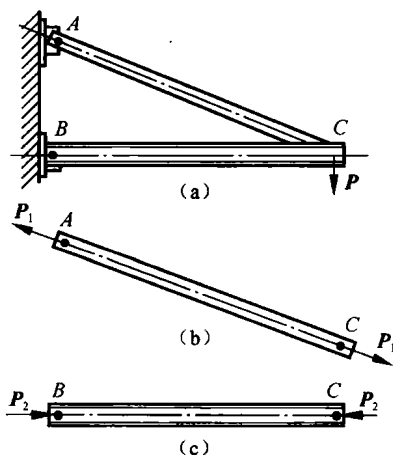


图 1-1 受力杆件

作用下，铆钉受到剪切负荷作用。剪切负荷是由大小相等、方向相反、作用线垂直于杆轴且距离很近的一对力引起的。剪切负荷使受剪杆件的两部分沿外力作用方向发生相对的错动（图 1-2 (b)），产生剪切变形，甚至受力过大时发生切断。机械中常用的连接件（如键、销钉、螺栓等）都受剪切负荷作用。

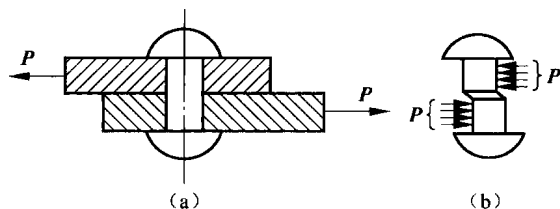


图 1-2 铆钉连接

3) 扭转负荷

图 1-3 (a) 所示汽车转向轴在工作时承受扭转负荷作用。扭转负荷是由大小相等、方向相反、作用面垂直于杆轴的一对力偶引起的（图 1-3 (b)）。扭转负荷使杆件的任意两个横截面发生绕轴线的相对转动，产生扭转变形。汽车的传动轴、电动机和水轮机的主轴等都受扭转负荷作用。

4) 弯曲负荷

图 1-4 (a) 所示为火车轮轴发生弯曲变形。弯曲负荷是由垂直于杆件轴线的横向力，或由作用于包含杆轴的纵向平面内的一对大小相等、方向相反的力偶引起的（图 1-4 (b)）。弯曲负荷使杆件轴线由直线变为曲线，产生弯曲变形。在工程中，杆件受弯曲负荷作用是最常遇到的情况之一，桥式吊车的大梁、各种心轴以及车刀等都受弯曲负荷作用。

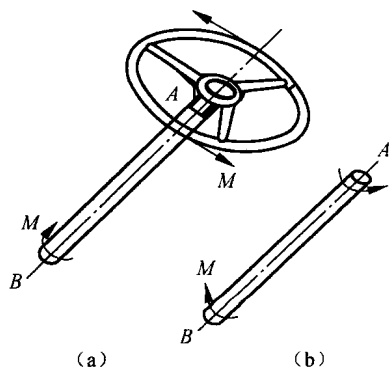


图 1-3 方向盘图

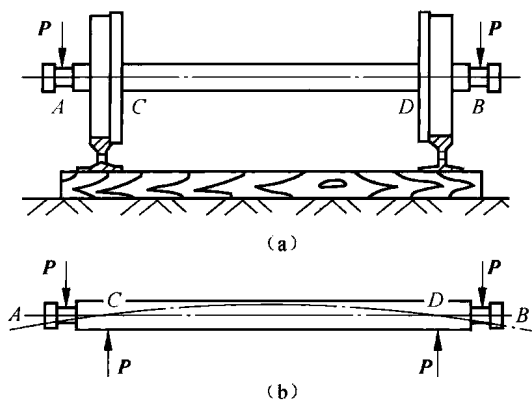


图 1-4 火车轮轴

很多零件同时承受几种负荷作用，例如，车床主轴工作时承受弯曲、扭转与压缩三种负荷作用，钻床工作时其立柱同时承受拉伸与弯曲两种负荷作用，在这些情况下，产生组合变形。

2. 动负荷

按负荷随时间变化的方式，动负荷可分为变动负荷与冲击负荷。

1) 变动负荷

变动负荷是大小或大小和方向随时间按一定的规律作周期性变化的负荷，或呈无规则随机变化的负荷，前者称为周期变动负荷（又称循环负荷），后者称为随机变动负荷。周期变动负荷又分交变负荷和重复负荷。交变负荷是指负荷大小和方向均随时间作周期性变化的负荷（图 1-5 (a)，应力作正、负向循环变化），火车的车轴和曲轴轴颈上的一点在运转过程中所受的负荷就是交变负荷。重复负荷是指负荷大小作周期性变化，但方向不变的变动负荷（图 1-5 (b)），齿轮转动时作用于每一个齿根受拉侧的负荷就是重复负荷。汽车、拖拉机等在不平坦的路面上行驶，它的许多机件常受偶然冲击，所承受的负荷就是随机变动负荷（图 1-5 (c)）。零件在变动负荷作用时的主要破坏形式是疲劳断裂（详见 1.2 节），据统计资料表明，在各类机件的断裂失效中疲劳断裂占 80% 以上。

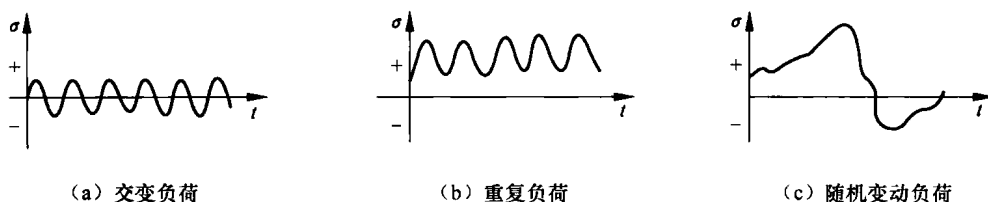


图 1-5 变动负荷示意图

2) 冲击负荷

冲击负荷则是物体的运动在瞬时内发生突然变化所引起的负荷，如急刹车时飞轮的轮轴、锻造时汽锤的锤杆等都受到冲击负荷的作用。零件在冲击负荷作用下的失效形式通常为过量弹性变形、过量塑性变形，严重时会产生断裂。

1.1.2 热负荷

有些零件是在高温或低温条件下服役的。高温使工程材料的力学性能下降，并可能发生氧化。另外温度反复变化还会引起热疲劳，温度急剧变化时会产生热冲击。低温下材料会变脆。

首先，高温下材料的强度随温度升高而降低，如常温下拉伸强度为 420MPa 的 20 钢，在 450℃ 时拉伸强度降为 330MPa。

其次，高温下材料强度随加载时间的延长而降低（在低温下，材料的强度基本不受加载时间的影响）。例如，20 钢在 450℃ 的短时抗拉强度为 330MPa，若试样仅承受 230MPa 的应力，在该温度下持续工作 300h 就会发生断裂；如果将应力降至 120MPa，持续 10000h 才会发生断裂。在给定温度和规定的时间内，使试样发生断裂的应力称为持久强度。同时，材料在长时间的高温作用下，即使应力小于其屈服强度，也会慢慢地产生塑性变形，这种现象称为高温蠕变。一般来说，只有当

温度超过 $0.3T_m$ (T_m 为材料的熔点, 以 K 为单位) 时, 才出现较明显的蠕变。

在高温下服役的零构件, 如蒸汽锅炉、蒸汽轮机、燃气涡轮、喷气发动机以及火箭、原子能装置等, 要求用高温强度好、热稳定性高的材料来制造。

第三, 许多零件在不断变化的温度下工作, 零件各部分受热 (或冷却) 存在着先后顺序与不均匀性, 引起膨胀 (或收缩) 的非同时与不一致, 从而在零件内部产生的应力叫做热应力。热应力的存在降低了零件的实际承载能力, 会使零件产生热变形, 严重时会产生开裂。

第四, 急剧加热或冷却会使零件产生剧烈的温度变化, 该零件会产生冲击热应力, 这种现象叫做热振或热冲击。热冲击对脆性材料 (比如陶瓷) 尤其有害, 通常会导致零件的突然破坏, 如将 Al_2O_3 陶瓷管直接放入 $1200^\circ C$ 的盐浴中会立即发生爆裂。材料抗热冲击破坏的能力对于承受温度急剧变化的零件非常重要, 如火箭喷嘴瞬时要承受高达 $3000\sim 4000K$ 的高温, 除了要求材料熔点高以外, 对其抗热冲击破坏性能的要求也非常高。

第五, 温度交替变化会引起热应力的交替变化, 当交变热应力循环次数较多时, 会在零件的表面产生龟裂而导致破坏, 这种现象称为热疲劳。热疲劳裂纹一般发生在金属零件的表面。锅炉的过热器、汽包, 汽轮机的汽缸、隔板, 都有出现热疲劳的可能性。

最后, 低温下材料的性能也会发生变化。多数工程材料在室温或室温以上表现为韧性状态, 但在低温下会由韧性状态转变为脆性状态, 这种现象称为低温脆性 (详见 1.2 节中冲击韧性)。压力容器、桥梁和船舶结构以及在低温下服役的机件, 就需考虑材料的低温脆化问题。

1.1.3 环境介质的作用

环境介质对零件的作用主要有腐蚀 (金属材料最典型)、摩擦磨损以及老化作用 (塑料等最显著)。

1. 腐蚀作用

根据腐蚀的过程和腐蚀机理, 可将腐蚀分为化学腐蚀、电化学腐蚀和物理腐蚀三大类。由于金属材料的化学性质相对活泼, 最容易受到环境介质的腐蚀作用。

化学腐蚀是指材料与周围介质直接发生化学反应, 但反应过程中不产生电流的腐蚀过程, 如零件在高温气体中或在不导电的液体 (如汽油、苯类等) 中的腐蚀。

电化学腐蚀最常见, 是指金属与电解质溶液接触时发生电化学反应, 反应过程中有电流产生的腐蚀过程, 如钢铁在大气中生锈、地下输油管道在土壤里的腐蚀穿孔等。

物理腐蚀是指单纯的物理溶解而产生的腐蚀, 如零件在熔盐中、液态金属中的腐蚀。

2. 摩擦磨损作用

任何在接触状态下发生相对运动的零件之间 (如轴与轴承、活塞环与汽缸套、

齿轮与齿轮等)都会发生摩擦。零件在摩擦过程中其表面发生尺寸变化和物质耗损的现象叫做磨损。最常见磨损类型的有黏着磨损、磨粒磨损、表面疲劳磨损和腐蚀磨损四种。

黏着磨损为摩擦副接触面局部发生材料的黏着、扩散而引起的磨损,如铝活塞和汽缸体之间的磨损。磨粒磨损是指硬凸物在接触表面的微切削引起的磨损,如滑动轴承的磨损。表面疲劳磨损是指表层或亚表层在接触应力反复作用下产生的麻点剥落,如滚动轴承、车轮和铁轨的磨损。腐蚀磨损是指零件在摩擦过程中同时受周围介质腐蚀作用造成的表面材料损失和迁移现象,比如,由于润滑油中含有腐蚀性化学成分和灰尘等磨料时,对机床导轨、滑动轴承的磨损。

3. 老化作用

塑料等高分子材料在加工、储存和使用过程中,由于受各种环境因素的作用导致性能逐渐变坏,以致丧失使用价值的现象叫做老化。例如,农用薄膜经日晒雨淋,发生变色、变脆和透明度下降;玻璃钢制品长期暴露在大气中,其表面逐渐露出玻璃纤维(起毛)、变色、失去光泽,并且强度下降;汽车轮胎和自行车轮胎储存或使用中发生龟裂等。

1.2 工程设计制造所需要的材料力学性能

1.2.1 整机性能、零部件性能与材料性能

机器是零件(或部件)间有确定的相对运动、用来转换或利用机械能的机械。机器一般由零件、部件(若干零件的组合,具备一定功能)组成一个整体。因此,一部机器的整机性能除与机器构造、加工与制造等因素有关外,主要取决于零部件的结构与性能,尤其是关键件的性能,如机床的主轴、导轨、传动齿轮及柴油机的曲轴、连杆、精密偶件等。

金属切削机床(车床、铣床等)要能对金属坯料或工件进行有效而高质量的加工,其主轴组件、支承件(床身等)、导轨及传动装置等必须处于良好的工作状态。主轴的刚度、强度或韧性不足,导轨的磨损,传动齿轮因种种原因造成破损或失效而影响功率与扭矩的传递以及传动精度的下降等,都会严重地妨碍机床的正常工作,以至无法进行切削加工。

柴油机是以柴油为燃料的往复式活塞式内燃机,靠燃油在汽缸内的高温高压空气中雾化、压缩、自动燃烧所释放的能量推动活塞做往复运动,并通过连杆和曲轴转换为旋转的机械功。柴油机的性能主要由喷油系统(喷油泵)、连杆、曲轴以及活塞与汽缸的性能所决定。例如,喷油泵的喷油状况(即雾化程度,由三副精密偶件控制)决定了柴油机的燃烧质量与燃油消耗,汽缸缸套的磨损又决定了柴油机的大修期,而连杆与曲轴的力学性能则是柴油机安全可靠工作的基本保证。

因此,可以认为:在合理而优质的设计与制造的基础上,机器的性能主要由其

重要零部件的强度及其他相关性能来决定。

机械零件的强度一般表现为短时承载能力和长期使用寿命。它是由许多因素确定的,其中结构因素、加工工艺因素和材料因素起主要作用。此外,使用因素对寿命也起很大作用。结构因素指零件在整机中的作用、零件的形状和尺寸,以及与其他连接件的配合关系等。加工工艺因素指全部加工工艺过程对零件强度所产生的影响。材料因素指材料的成分、组织与性能,这三个因素各自有独立的作用,又相互影响,在解决与零件强度有关的问题时必须综合加以考虑。在结构因素和加工工艺因素正确合理的条件下,大多数零件的体积、重量、性能和寿命主要由材料因素(即材料的强度及其他力学性能)所决定。

在设计机械产品时,主要是根据零件所承受的负荷和失效的方式正确选择材料的性能指标(主要是强度等力学性能)来进行定量计算,以确定产品的结构和零件的尺寸。

材料性能可分为使用性能和工艺性能两大类。材料的使用性能包括力学性能、物理性能和化学性能等。

1.2.2 工程材料的基本力学性能

材料的力学性能(也称机械性能)是指材料在不同环境因素(温度、介质)下,承受外加负荷作用时所表现的行为。这种行为通常表现为材料的变形和断裂。因此,材料的力学性能可以理解为材料抵抗外加负荷所引起的变形和断裂的能力。当外加负荷的性质、环境温度与介质等外在因素不同时,对材料要求的力学性能指标也不相同。室温下常用的力学性能有强度、塑性、刚度、弹性、硬度、冲击韧性、断裂韧性和疲劳极限等。

1. 拉伸试验和应力-应变曲线

图 1-6 为低碳钢的拉伸应力-应变(σ - ϵ)图(GB/T 228—2002)。

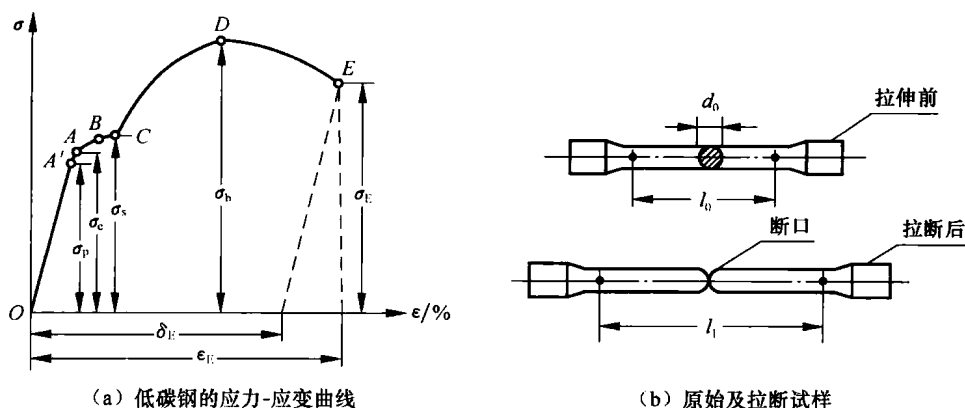


图 1-6 低碳钢的应力-应变图

应力 $\sigma = P/F_0$; 应变 $\epsilon = \Delta l/l_0$; P -外力; F_0 -试样原始横截面积; l_0 -试样标距长; Δl -试件的总伸长 ($l_1 - l_0$); l_1 -断裂后标距长; δ_L -延伸率 (总塑性应变); ϵ_E -E 点时的总应变 (含弹性应变及塑性应变)

在图 1-6 (a) 所示的 σ - ϵ 曲线上, OA 段为弹性阶段。在此阶段随负荷增加试样的变形增大, 若去除外力, 变形完全恢复, 这种变形称为弹性变形, 其应变值很小 (金属材料多 $\leq 0.1\%$)。A 点的应力 σ_e 称为弹性极限, 为材料不产生永久变形可承受的最大应力值, 是弹性零件的设计依据。OA 线中 OA' 段为一斜直线, 在 OA' 段应变与应力始终成比例, 所以 A' 点的应力 σ_p 称为比例极限, 即应变与应力成比例所对应的最大应力值。由于 A 点和 A' 点很接近, 工程上一般不作区分。

2. 弹性和刚度

材料在弹性范围内, 应力与应变的比值 (σ/ϵ) 称为弹性模量 E , 即

$$E = \sigma/\epsilon \quad (1-1)$$

E 反映了材料抵抗弹性变形的能力, 即材料刚度大小的度量指标。金属材料的 E 值主要取决于材料的本性, 一些处理方法 (如热处理、冷热加工、合金化等) 对它的影响很小。提高零件刚度的主要办法是增加横截面积或改变截面形状。金属的 E 值随温度升高逐渐降低。

材料的弹性模量 E 与其密度 ρ 的比值 (E/ρ) 叫做比刚度。比刚度大的材料 (如铝合金、钛合金、碳纤维增强复合材料) 在航空航天工业上得到了广泛应用。

3. 强度、塑性和黏弹性

强度是材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力。塑性是材料在外力作用下产生塑性变形 (外力去除后不能恢复的变形) 而不断裂的能力。

1) 强度

根据外力的作用方式, 有多种强度指标, 如抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度等, 其中以拉伸试验所得强度指标的应用最为广泛。

在图 1-6 (a) 中, 当试验应力 σ 超过 A 点时, 试件除产生弹性变形外还产生塑性变形; 在 BC 段, 应力几乎不增加, 但应变大量增加, 称为屈服。B 点的应力 σ_s 称为屈服强度*, 即

$$\sigma_s = P_s/F_0 \quad (1-2)$$

式中: P_s 为试棒产生屈服时所承受的最大外力; F_0 为试棒原始横截面积。

有些塑性材料没有明显的屈服现象发生, 对这种情况用试件标距范围内产生 0.2% 塑性变形时的应力值作为该材料的屈服强度, 以 $\sigma_{0.2}$ 表示 ($\sigma_{0.2}$ 也叫条件屈服强度)。屈服强度表示了材料由弹性变形阶段过渡到弹-塑性变形阶段的临界应力, 也是材料抵抗微量塑性变形的抗力。一般而言, 零件在工作时不允许产生塑性变形, 因此, 屈服强度是零件设计的主要依据, 也是材料最重要的强度指标。

材料发生屈服后, 试样应变的增加有赖于应力的增加, 材料进入强化阶段 (称为应变强化或加工硬化), 如图 1-6 (a) 的 CD 段所示, 在此阶段, 试样的变形为均匀变形。到 D 点应力达最大值 σ_b 。D 点以后, 试件在某个局部的横截面发生明显收缩, 出现“颈缩”现象, 此时试样产生不均匀变形, 由于试样横截面积的锐

* GB/T 228—2002 和 GB/T 228.1—2010 中已将拉伸性能指标的符号作了变动, 如屈服强度改为“Re”, 伸长率改为“A”等, 但国内工程界大多依旧。书末附录 2-4 列出金属拉伸性能名称、单位与符号的新旧对照。

减, 维持变形所需要的应力明显下降, 并在 E 点处发生断裂。 D 点对应的最大应力值 σ_b 称为抗拉强度, 它是材料抵抗均匀变形和断裂所能承受的最大应力值, 即

$$\sigma_b = P_b / F_0 \quad (1-3)$$

式中: P_b 为试棒拉断前承受的最大外力。

σ_b 也是零件设计和评定材料时的重要强度指标。 σ_b 测量方便、数据易得, 如果单从保证零件不产生断裂的安全角度考虑, 或者用低塑性材料或脆性材料制造零件时, 都可以 σ_b 作为设计依据, 但所取安全系数要大些。如绳类产品可选 σ_b 作为设计依据。

在航空航天及汽车工业中, 为了减轻零件的重量, 在产品和零件设计时经常采用比强度的概念。材料的强度指标与其密度的比值称为比强度 (σ_b / ρ)。强度相等时, 材料的密度越小 (即重量越轻), 比强度越大。另外, 屈服比 (σ_s / σ_b) 表征了材料强度潜力的发挥、利用程度和该种材料所制零件工作时的安全程度。

2) 塑性

材料的常用塑性指标有延伸率和断面收缩率。

延伸率即断后总伸长率, 以 δ 表示, 即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中: l_0 为标距原长; l_1 为断裂后标距长度。

断面收缩率以 ψ 表示, 即

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中: F_0 为试件原始横截面积; F_1 为断口处的横截面积。

同一材料的试样长短不同, 测得的 δ 略有不同。如 l_0 为试样原始直径 d_0 的 10 倍, 则延伸率常记为 δ_{10} (常简写成 δ); 如 l_0 为试样原始直径 d_0 的 5 倍, 则延伸率记为 δ_5 。同一种材料, $\delta_5 > \delta_{10}$, 所以对不同材料, δ_5 与 δ_{10} 不能直接比较。考虑到材料塑性变形时可能有颈缩行为, 故 ψ 能更真实地反映材料的塑性好坏 (但 ψ 、 δ 均不能直接用于工程计算)。

材料具有良好的塑性能降低应力集中, 使应力松弛、吸收冲击能, 产生形变强化、提高零件的可靠性, 同时有利于压力加工, 这对工程应用和材料的加工都具有重大意义。

材料的应力-应变图中亦能反映其韧性 (静力韧性)。拉伸曲线与横坐标所包围的面积愈大, 则材料从变形到断裂过程中所吸收的能量愈多, 即所谓材料的韧性愈好。

3) 黏弹性

理想的弹性材料在加载时 (应力不超过材料的弹性极限) 立即产生弹性变形, 卸载时变形立即消失, 应变和应力是同步发生的。但实际工程材料尤其是高分子材料, 加载时应变不是立即达到平衡值, 卸载时变形也不立即消失, 应变总是落后于应力。这种应变滞后于应力的现象称为黏弹性。具有黏弹性的物质, 其应变不仅与

应力大小有关，而且与加载速度和保持负荷的时间有关。

4. 硬度

硬度是反映材料软硬程度的一种性能指标，它表示材料表面局部区域内抵抗变形或破裂的能力。测定硬度的试验方法有十多种，但基本上均可分为压入法和刻划法两大类（此外，还有回弹类），其中压入法最为常用。

1) 布氏硬度

布氏硬度的试验原理、方法与条件在 GB/T 231.1—2009《金属材料布氏硬度试验》中有详细说明。多用一定直径 D 的淬硬钢球或硬质合金球（即压头），以相应的试验负荷 P 压入试样表面，经规定的保持时间，卸载后测量试样表面的压痕直径 d ，计算出压痕表面积，进而得到所承受的平均应力值，即为布氏硬度值，记作 HB。

具体试验时，硬度值可根据实测的 d 按已知的 P 、 D 值查表求得。当压头为淬火钢球时用 HBS 表示，适用于布氏硬度在 450 以下的材料；当压头选为硬质合金球时用 HBW 表示，适用于布氏硬度为 450~650 的材料。布氏硬度的表示方法为：符号 HBS 或 HBW 之前为硬度值，符号后面的数值依次表示球体直径、负荷大小及负荷保持时间（保持时间 10~15s 时可不标注）。例如，钢球直径为 10mm，负荷为 9.81kN (1000kgf)，保持 30s，硬度值为 170，可记为 170HBS10/1000/30，也可简单表示为 170HBS。

布氏硬度试验的优点是：因压痕面积大，测量结果误差小，且与强度之间有良好的对应关系，故有代表性和重复性。但同时也因压痕面积大而不适宜于成品零件以及薄而小的零件。此外，还因测试过程相对较费事，故也不适合于大批量生产的零件检验。布氏硬度常用于低、中硬度的退火状态下钢材、铸铁、有色金属及调质钢的硬度测试。

2) 洛氏硬度

GBT 230.1—2009《金属材料洛氏硬度试验》详细说明了洛氏硬度的测试原理、方法与条件。洛氏硬度也是采用一定规格的压头，在一定负荷作用下压入试样表面，然后测定压痕的残余深度来计算并表示其硬度值，记为 HR。实际测量时可直接从硬度计表盘上读得硬度值（现在硬度计上多配备数字显示），十分方便。

为测定不同性质工件的硬度，采用不同材料与形状尺寸的压头和负荷的组合，可获得不同的洛氏硬度标尺。每一种标尺用一个字母写在硬度符号 HR 之后，其中 HRA、HRB、HRC 最常用，其硬度值（数字）置于 HR 之前，如 60HRC、75HRA 等。常用洛氏硬度标尺的试验条件与应用范围见表 1-1。

表 1-1 常用洛氏硬度标尺的试验条件与应用范围

洛氏硬度	压头类型	总负荷/N	测量范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥	588.4	60~85HRA	高硬度表面、硬质合金
HRB	1.588mm 淬火钢球	980.7	20~100HRB	软钢、灰铸铁、有色金属
HRC	120°金刚石圆锥	1471	20~67HRC	淬火回火钢