

材料科学与工程专业本科系列教材

GONGCHENG JIEGOU CAILIAO

工程结构材料

杨瑞成 伍玉娇 张粉芹 丁旭 编 著
季根顺 陈奎 吴庆记



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

工程结构材料

杨瑞成 伍玉娇 张粉芹 丁 旭 编著
季根顺 陈 奎 吴庆记

重庆大学出版社

内 容 提 要

按使用性能、用途或所起的作用,可将工程材料分成结构材料和功能材料两大类。

结构材料是以其力学性能为基础,用来制造受力为主(承受力、能量或传递运动等)的零构件。结构材料数量异常巨大,应用无处不在。本书按工程要求—材料特征—提高材料强韧性途径—基础材料、先进材料—典型工程领域要求与选材用材及分析—工程应用的主线索,贯穿全书及相关章节。全书分为基础部分(工程结构材料的负荷与性能要求、工程常用的基础结构材料共两章)、提高部分(提高工程结构材料性能的途径、先进结构材料共两章)和应用部分(机械制造、工程机械、车辆运输机械、石油化工、航天航空和土木建筑用材,共6章)。内容上基础材料、先进材料和行业(工程领域)惯用材料相结合,特别着眼于实用结构材料,大力强调工程性,充分体现其工程背景与应用实例。有助于材料科学与工程学科的学生强化其工程意识,将材料与各工程应用领域紧密接轨,使所学材料知识的科学化、具体化、实用化与工程化。

本书适用于二级材料专业或材料科学与工程一级专业的专业课或选修课,也可供研究生教学参考。鉴于本书的性质与特色,也很适合相关工程技术人员参考与使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构材料/杨瑞成等编著. —重庆:重庆大学出版社,2007.3

(材料科学与工程专业本科系列教材)

ISBN 978-7-5624-3907-3

I. 工… II. 杨… III. 工程结构—结构材料—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 016320 号

工程结构材料

杨瑞成 伍玉娇 张粉芹 丁 旭 编著
季根顺 陈 奎 吴庆记

责任编辑:周 立 张学琴 版式设计:周 立
责任校对:李定群 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆华林天美印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:21 字数:524千

2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-3907-3 定价:29.50元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

材料是人类赖以生存的物质基础,是人类历史发展阶段的标志;材料是人类文明的里程碑,又是社会现代化的物质基础与先导。

材料分类方法可有多种多样,尚无统一的标准。从其组成和物理化学属性,可分为金属材料、无机非金属材料(陶瓷)、高分子材料(高聚物)和复合材料4大类。金属材料从古至今已使用了数千年,由于其综合性能优越,还将继续使用下去;陶瓷材料古老而又年轻,陶器、瓷器以及后来的玻璃、水泥、耐火材料等,都属于传统陶瓷范畴, Al_2O_3 、 SiC 乃至人造金刚石刀具、薄膜以及碳材料则是近几十年才发展起来的,称为现代陶瓷(或先进陶瓷);高分子材料是20世纪30年代后才逐渐开发的;人工复合材料是集不同种类材料之长,近年及将来所要大力研究、发展的材料。从开发、应用时间的长短,材料又可分成传统材料和新型材料(或先进材料);又可以从使用领域出发,分为机械工程材料、建筑工程材料、电子材料、核材料等。

按使用性能(用途),将材料划分成结构材料 and 功能材料两大类,是更常见的分类方式。而且,这样的分类,材料的功能明确、界限清楚。结构材料是以力学性能为基础,用来制造承受力、能量或传递运动等的结构件;而功能材料则主要是利用物质独特的物理性质、化学性质或生物功能而形成的一类材料。从房屋、桌椅、路面等使用的建筑材料,家用压面机、厨具、火车、汽车等使用的机械工程材料及飞机、航天事业用的航空航天材料到石油、化工领域的储罐、反应塔、钻机等使用的金属材料,结构材料数量巨大、应用无处不在,人类的衣食住行,时时、处处离不了;功能材料虽数量有限,然而品种繁多、功能奇特,已在日常生活以及高科技领域发挥着不可估量的作用,如计算机磁盘、助听器、住宅走廊的光/声控电灯、录音机磁头、光导纤维等。

当然,结构材料和功能材料并不能截然分开,如最普通的窗玻璃,既有结构性作用(做成门窗构件),又有透光等功能性作用;机床床身既要起支撑作用(结构性),又要具有减振能力

(功能性);临床用心血管支架,既有一定强度要求,又要有扩张血管、保持血液畅通以及与人体相容性的功能。

值得注意的是,传统的材料学科的相关教材,惯以金属材料学、陶瓷材料学、高分子材料学和复合材料学来分别冠名。这样,4 大类材料虽然界限分明,每一类材料介绍细致、系统、全面。然而,鉴于学时所限,这四门课中大部分为选修课,大多数学生并不能全部选修,这样难以对各类材料全面、整体的了解,甚至对一些类型材料的知识缺失(未选)。事实上,4 大类材料常常是共同运用在一些场合,如汽车、飞机,乃至现代机床,各类材料分别应用了不同比例。从学科发展来看,相关的一级学科之间现在都在提倡相互交叉,更何况材料范畴的二级学科乎?

重庆大学出版社多年来通过对多所院校的广泛调研、听取意见,确定了“工程结构材料”和“现代功能材料”这两门材料课程的构思、选题,其立意、视角是很好的,颇具新意。本书作者欣然承担了“工程结构材料”的编写任务。

本书定位为二级材料学科专业的专业课或选修课,以及大材料专业(或一级材料学科)的专业课,也可供相关的研究生教学选用以及工程技术人员使用和参考。内容上基础材料、先进材料和行业(或工程领域)惯用材料相结合,特别着眼于实用结构材料,大力强调工程性,充分体现其工程应用背景,加强工程实例与分析。本书创作思路,按工程要求—材料特征与提高材料性能途径—基础材料、先进材料—典型工程领域要求与选材、用材及分析—工程应用的主线索,贯穿全书及相关大部分章节。其框架可分为基础部分(第1章、第2章),提高部分(第3章、第4章)和应用部分(第5~10章)。前两部分大多为必讲内容,第3部分可为选讲内容,各校可根据各专业面向以及学时等情况酌定。因此,本书具有足够的可选择空间,各种性质的院校可根据其具体情况进行内容上的选择。此外,在具体内容选择和撰写方式上,着力强化工程意识,将材料与各工程领域紧密结合,有助于材料科学与工程学科的学生所学材料知识的科学化、具体化、实用化、工程化。

本书是多校教学、科研第一线人员通力合作的成果。编著者如下:杨瑞成(第1章、第3章及第7章)、季根顺(第2章)、陈奎(第4章)、伍玉娇(第5章、第6章)、吴庆记(第7章)、丁旭(第8章、第9章)和张粉芹(第10章);由杨瑞成任主编(著)并负责统稿、定稿,其他相关工作均由陈奎完成。非常感谢吴庆记教授的友情加盟,对本书的完成有所贡献的还有李进

娟、赵丽美、成生伟、余世杰、马建忠、杨海歌、杨钊、杨新星。感谢“兰州理工大学规划教材建设基金”的资助。

国内有关功能材料的教材、著作已有多本,而专门着眼于结构材料或工程结构材料的书籍难寻。本书兼具教材与工程技术书籍为一体,力图有所特色,也融入了作者们多年科研、教学的成果和体会,因此也是一次尝试。总之,工程结构材料,顾名思义,针对、着眼于结构材料,充分体现科学性、工程性、实用性、新颖性以及一定程度的广泛性。当然,鉴于作者们的学识,真切希望同行和广大读者对本书的不妥之处予以批评指正。

作者(杨瑞成执笔)

2006年10月

目 录

第 1 章 工程结构材料的负荷和性能要求	1
1.1 结构材料性能的基本特征	1
1.2 工程构件力学负荷与力学性能	5
1.3 工程结构材料的力学状态	15
1.4 工程结构件的热负荷作用	18
1.5 环境介质作用及其他表面作用	22
1.6 现代工程对结构材料的其他特殊要求	24
1.7 工程结构材料的选择	28
本章小结	34
习题与思考题	35
第 2 章 工程中常用的基础结构材料	36
2.1 金属材料	36
2.2 高分子材料	52
2.3 陶瓷材料	57
2.4 复合材料	61
本章小结	63
习题与思考题	64
第 3 章 提高工程结构材料性能的途径	65
3.1 强韧结构材料需求和提高性能途径	65
3.2 金属材料的强化与韧化	80
3.3 陶瓷材料的增韧增强	90
3.4 高分子材料的强化与增韧	94
3.5 改善结构材料性能的其他工程措施	98
本章小结	101
习题与思考题	102
第 4 章 先进工程结构材料	103
4.1 超级钢	103
4.2 高性能轻合金	107
4.3 高强材料	112
4.4 超硬材料	115

4.5 高温结构材料	119
4.6 低温结构材料	123
4.7 非晶态合金	124
4.8 先进复合材料	127
本章小结	130
习题与思考题	131
第5章 机器制造用结构材料	132
5.1 机器制造用材要求	132
5.2 机器制造用钢及其热处理特点	133
5.3 机器制造用结构零部件用材及实例	141
5.4 机器制造中非金属材料的应用	154
本章小结	157
习题与思考题	157
第6章 工程机械用结构材料	159
6.1 工程机械用材特点	159
6.2 工程机械用耐磨材料与耐磨表面处理	162
6.3 工程机械结构件用材	170
6.4 工程实例	171
本章小结	177
习题与思考题	178
第7章 车辆运输机械用结构材料	179
7.1 车辆运输机械用结构材料的特点	179
7.2 运输机械用低合金高强度钢	185
7.3 汽车用材及其发展	190
7.4 铁道车辆、船舶结构用材料及发展	198
本章小结	207
习题与思考题	207
第8章 石油化工机械设备用结构材料	208
8.1 石油化工用结构材料的特点	208
8.2 耐蚀材料及耐蚀表面处理	210
8.3 石油机械用材	217
8.4 化工机械设备用材	230
本章小结	242
习题与思考题	243
第9章 航空航天用结构材料	244
9.1 航空航天用材特点	244
9.2 航空航天用高比强(刚)度材料	249
9.3 航空航天用高温合金	271

9.4 航空航天用特殊(功能)结构材料	275
本章小结	280
习题与思考题	281
第 10 章 土木工程材料	282
10.1 土木工程材料与土木工程结构概况	282
10.2 土木工程用混凝土材料	287
10.3 土木工程用钢材	294
10.4 土木工程用砌体材料	301
10.5 土木工程用功能材料	304
本章小结	316
习题与思考题	316
参考文献	318

第 1 章

工程结构材料的负荷和性能要求

1.1 结构材料性能的基本特征

1.1.1 工程材料的核心就是性能

所有的人,尤其工程技术人员,在日常工作中都要与材料打交道:使用由各种材料做成的物件;选择材料、制造和加工材料;利用材料进行设计和制造元器件或结构件;分析材料(零部件、机器等)的失效原因等。

从工程角度来讲,产品生产的工程技术人员责任是改善他所设计或制造的产品性能,以及研制具有更好性能的产品。电气工程师要使集成电路正确地运行使用,计算机中的开关应能瞬时作出反应,即使在最恶劣的条件下,绝缘材料也能承受高的电压;建筑工程师希望建造高强、可靠、耐腐蚀,而同时又有美感的建筑物;石油和化学工程师要求钻头和输送管道能在磨损或腐蚀条件下长时间工作;汽车工程师除了希望采用轻质材料之外,还希望材料具有高强度并能经久耐用;宇航工程师则要求得到在高温和外层空间的冷真空情况下能顺利完成任务的轻质材料;冶金、陶瓷和高分子材料的工程技术人员希望生产和加工更便宜、同时又具有优良性能的材料等。

工程材料之所以能够在机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等众多工程领域中得到广泛应用,就是因为其具有良好的工艺性能和优良的使用性能以及可接受的价格。材料是通过他所具备的各种性能服务于人类的,因此,从工程意义上说,材料和材料工程的核心就是材料的性能,以及如何去达到所希望的这些性能。

1.1.2 材料的性能与使用性能

(1) 材料的性质(性能)

性质也称为材料的固有性能,它赋予了材料的价值和可应用性,包括材料本身具有的力学性能(如强度、塑性、韧性等)、物理性能(电、磁、光、热等性能)和化学性能(如抗氧化和抗腐蚀性、高聚物的降解等)。

性质是材料功能特性和效用(即电、磁、光、热、力学等性质)的定量度量 and 描述。任何一种材料都有其特征的性能和应用。例如,金属材料具有刚性和硬度,可以用做各种结构件;金属还具有延性,可以加工成导电或受力用的线材(如导线或钢丝);一些特种合金,如不锈钢、形状记忆合金、超导合金等,分别可以用做耐腐蚀材料、智能材料和超导材料等。陶瓷有很高的熔点、高的硬度和化学惰性,可用于高温发动机和金属切削工具等;而具有压电、介电、电导、半导体、磁学等特征的特种陶瓷,可在相应的领域发挥作用。利用金刚石的耀度和透明性可制成光灿夺目的宝石和高性能光学涂层;而利用其硬度和导热性可用作切削工具和传导材料。高分子材料以其独特的性能(易加工、便宜、一定的强度以及绝缘性能等),使其在各种不同的产品上发挥作用,如汽车等各类交通工具的内饰件、外装件、功能件等,还有建筑材料、电器材料、航天航空材料等。

材料的性质也表示了材料对外界作用或刺激(如电场、磁场、温度场、应力场等)的反应或整体响应,并按其响应的类型和大小而表达出的一种品质或特性。相应地便有了材料的导电性、导热性、光学性能、磁化率、超导转变温度、力学性能等。对于结构材料,最重要的是力学性能。一般,材料的性质(能)是与其形状和尺寸无关的,任何状态(固态、液态)、任何尺度(宏观或微观)的材料,其性能都是经过合成或加工后材料内部成分和结构所产生的结果。

(2) 使用性能

使用性能又称为效能或服役性能。使用性能通常指材料做成零件或产品后在最终使用状态时的行为,是把材料固有性质与产品设计、工程应用能力和人类需要这几者相联系相融合在一起的一个要素,必须以使用性能为基础进行零件或产品设计才能得到最佳的方案。度量使用性能的指标相对来讲比较综合和复杂一些,也很实际、很工程化,如承载能力、有效寿命、速度(器件或车辆的)、能量利用率(机器或常用运载工具的)、安全可靠程度和成本以及寿命费用等,其他尚有能量转换效率(如太阳能电池)、灵敏度(如传感元件)等。

应该指出地是,使用性能与材料的性能既紧密联系又相互区别。材料的性能(质)是在材料做成元器件或零件组装的设备后,实现预期的使用性能后而得到利用的,材料性能是其使用性能的基础。显然,若无一定的强度水平,就无法保证所做成的构件(如吊车钢丝绳、飞机起落架等)具有所需的如承载能力这样的使用性能;同样,没有热绝缘性能,就无法保证泡沫塑料等材料所制成的(如冰箱)保温层的性能,即使用性能取决于材料的基本性能。

但元器件、零件或设备的使用性能又不简单地等同于材料的性能。

一方面,材料的性能多系实验室条件下的简单性能(如单向拉伸、压缩等),带有很大的人为规定性(如拉伸速度、试样尺寸及标距规定等),且一般是统一按国家标准进行测试并取得结果的。而使用性能多系在实际使用环境或工况下元器件、零件或设备考核出的复杂性能,如上述的使用寿命、可靠性等,带有很强的客观性和针对性(对应一定使用条件的)。

另一方面,应注意和重视材料在使用过程中内部组织结构和性能的变化情况,这最终会对其使用性能产生重要影响。产品供货状态的材料具有一整套满足实际设计要求的性能——强度、硬度、导电性、密度、色彩等。倘若在使用过程中,材料的内部结构没有变化,那么它将永远保持这些性能。但是,如果产品遇到使材料内部结构发生变化的使用情况,那么,可以肯定地说材料的性能与行为也会发生相应的变化。这就解释了为什么当橡胶暴露在阳光和空气中时会逐渐地硬化;为什么铝不能用在超音速飞机中;为什么金属在周期性的载荷作用下会产生疲劳;为什么普通钢的钻头不能像高速钢钻头那样飞快地切削;为什么磁体在射频场中会失去它

的磁性;为什么半导体在核辐射下会损坏等,这类例子是数不清的。因此,不仅要考虑初始条件(具有一定材料性能的初始状态),而且还要考虑那些将使材料内部结构发生变化,因而也导致材料性能发生变化的使用条件(即还要考虑材料的使用特性)。

(3) 整机性能、零部件性能与材料性能

机器(或装备)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。

比如金属切削机床(车床、铣床、磨床等)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,从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。柴油机是以柴油作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、活塞及汽缸的性能所决定。比如,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。结构因素是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中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。可以认为:在结构因素和加工工艺因素正确合理的条件下,大多数结构零件的体积、重量、性能和寿命主要由材料因素,即主要由材料的强度及其他力学性能所决定。

在设计机械产品或其他类型产品时,主要是根据零件失效的方式,正确选择材料强度等力学性能判据指标来进行定量计算,以确定产品的结构和零件的尺寸。

1.1.3 非结构敏感性能与结构敏感性能

从与内部组织结构的联系上,材料的性能可分成两类:一类是非结构敏感性能;另一类是结构敏感性能。

(1) 非结构敏感性能

长期以来,人们早就发现:对于一些物理参量是可以相当准确地计算出来的,比如材料的热容,就可以根据固体晶格振动的量子统计理论(如爱因斯坦理论、德拜理论)计算出来;杨氏模量可以在金属电子理论的基础上根据金属的晶体结构计算出来,等等,而且计算结果与实验值相当吻合。但是对于另外一些量,尤其是力学参量则不然。尽管19世纪以来,X-射线的发现为研究金属结构提供了新的手段,但在相当长的一段时间内,人们对于金属力学参量的计算,无论屈服强度还是断裂强度,仍然无能为力。例如,实际材料的屈服强度只有其理论值的

千分之一左右。这种情况说明了材料的力学参量有别于其他物理量,此问题直到查明了前者是结构敏感量,而后者是非结构敏感量,问题才得以澄清。

材料的非结构敏感性能有弹性模量、密度、热容量等。其特征之一是:对于同一种材料的不同试样(甚至通过不同的处理而获得不同的状态,如钢材淬火得到马氏体,退火得到珠光体等),进行测量的结果差别不大;特征之二是:和将材料视为理想的完整晶体的理论计算结果基本符合,绝大部分纯物理参量均属于这一类。

(2) 结构敏感性能

材料结构敏感性能,除上述屈服强度、断裂强度外,还有疲劳强度、蠕变强度、抗弯强度以及材料的塑性和韧性等。这些力学量对于同一种材料的不同试样测得的结果,往往差异很大,而且和将材料视为理想完整晶体的理论计算值存在着十分显著的差异。

工程结构材料所依据的力学性能,正是结构敏感性能,而且还是高度结构敏感性,目前工程上所得到的力学性能实验值,和其理论值之间往往有1~3个数量级的巨大差别。这不仅对于结构材料的工程应用(包括加工处理)带来深刻的影响,而且更给材料工作者如何按照人们的意愿改善材料的力学性能,提供了很大的空间、机会,也提出了巨大的挑战。事实上,多年来材料工作者正是运用材料科学与工程的原则、知识,通过各种途径和手段,不断提高已有材料的性能,并不断研制出高性能的新材料来的。

力学性能的结构敏感性印证了材料科学的一条基本原则:材料的结构决定着材料的性能。下面进一步地,从材料科学与工程的四要素(材料的合成制备与加工处理、材料的成分与结构、材料的性能和使用性能),用工程实例说明材料的成分(通过合成、制备而得)、工艺处理和外界条件等,是如何改变材料的结构而最终改变材料性能(以及使用性能)的。

例1:化学组成即成分的影响。含碳量 $w_c < 0.2\%$ 的钢称为低碳钢,如一般的钢板、钢筋。低碳钢的塑性很好,可以冲压成形或其他加工方法成形,所以可以方便地通过钢板冲压制成从日用的洗脸盆到汽车覆盖件等各种类型的成形件。低碳钢高塑性的来源就是其显微组织是由很软的铁素体所构成的。而高碳钢(含碳量 w_c 达 $0.6\% \sim 1.2\%$) 由于含有较多珠光体(甚至马氏体)组织,能达到高强度、高硬度,所以可用于制造弹簧和加工工具(如锉刀、锯条等)。

例2:工艺的影响。同样材料的高碳钢但不同的状态,其性能会截然不同:退火状态(为一般供货时的状态)时比较软,其布氏硬度约为187HB(约折合15HRC);而淬火状态(800℃左右加热后水冷)却变得非常硬,洛氏硬度可达62HRC以上。前者很容易被加工,而后者则可以作为切削工具使用。原因就在于他们的组织结构明显不同,前者为较软的球粒状珠光体,而后者为很硬的马氏体。

例3:外界(使用)环境的影响。钢材高温下强度明显下降,而低温下会变脆、韧性下降。这是由于材料在高温下原子活动性大大加强并且会发生蠕变等现象,导致材料软化;而在低温下原子活动性大大削弱,对材料塑性变形起作用的结构即位错变得难以运动的缘故。

本书将在第3章,结合金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料,进一步阐述提高工程结构材料力学性能的原理和途径。

1.1.4 材料性能的几点属性

(1) 材料性能是各种负荷作用的响应

材料的性能是在一定过程中材料行为集中、具体的体现,也就是说,材料的性能是材料对

于各种负荷作用的响应。这里的负荷是广义负荷,包括力学负荷,即各种外力、能量的作用;热负荷,即温度、热量的作用,有时还有温度梯度、加热与冷却速度的影响;电负荷,即电场与磁场的作用;其他理化负荷,即化学介质作用、各种物理作用,如辐射等。这些广义负荷有个作用类型、作用时间与作用范围的问题,因此对应着各种各样的过程,如拉伸过程、蠕变过程、疲劳过程、磁化过程、导电过程、腐蚀过程、应力腐蚀断裂过程等。在这些过程中材料表现出力学性能、物理性能、化学性能等。

(2) 材料性能的条件性

材料的性能是一种参量,用于表征材料在给定外界条件下的行为。在不同的外界条件下,相同的材料也会有不同的性能,即材料的性能具有相对意义,具有条件性。例如,合金的断裂强度这个力学性能,若不注明外界条件,其含义是含混的。含锌量 w_{Zn} 30% 的黄铜其室温抗拉强度是 320 MPa,从工程观点来看,可以理解这个性能的外部条件:室温、(周围)空气介质、拉伸负荷以及工业标准规定的拉伸速度和计算方法。再如某材料高温力学性能 $\sigma_{\frac{500}{10^5}} = 100$ MPa,则表示此材料在 500 °C 温度下,10 万小时后伸长为 1% 的蠕变极限为 100 MPa。

(3) 材料性能的多样性及评价

任何一种材料都具有一定数值的各种性能指标,如强度、塑性、导电性、耐蚀性等。在工程上,甚至日常生活中,经常听到议论:什么材料最好,什么材料不好。其实,在进行材料的具体评价时,是有一定背景或针对性。事实上,一方面我们不能希冀某一种材料的各种性能均最佳,这是不可能的;另一方面,“好”与“不好”是相对的,看其用在什么场合,用它的什么性能。

比如材料的力学性能,当要对材料进行加工成形时,希望它软一些好(即强度要低、塑性要好),如软钢、有色金属及高分子材料的加工性能很好;当用某种材料做加工工具时,希望它尽可能硬一些,由之发展了高速工具钢、硬质合金及超硬陶瓷等工具材料;而当要对它进行破碎时(如通过机械粉碎法制备粉末即粉体材料),希望它脆一些好。所以不能简单地认为某类结构材料的强度越高越好,或塑性越高越好。再比如,用作电子、电器元件或器件的材料,需考虑其电学性能:当其用作输电线等导电用途时,材料的电阻越小越好,铜、铝、银已得到广泛应用,而且开发无电阻的超导材料展现了美好的应用前景;当用作电绝缘材料时,便不允许电流通过,要求材料的电阻率特别大,故陶瓷材料和塑料最为适合;如果用作电热体,如各种工业炉以及家用电器内的电加热元件,则希望材料既要能导电又要具有较高电阻率(能使传导电子在材料内部传播过程的散射中,损耗更多的能量转变为热能),此外,还要具有高熔点、耐高温氧化等特性和良好工艺性(如做成螺旋状电阻丝),所以多采用合金材料,例如镍-铬合金、铁-铬-铝合金。

1.2 工程构件力学负荷与力学性能

结构材料制成的工程构件(或零件)都要在一定的负荷(力学负荷、热负荷及其他各种表面作用等)下工作,会产生机械损伤、热损伤和各种表面损伤。其中,机械损伤是由于施加外力引起的材料变形,超过了材料弹性变形或塑性变形限度而发生的;热损伤是由于温度变化而引起的材料的损坏;而表面损伤是构件在周围介质作用下逐渐发生的物理、化学损坏。

1.2.1 工程构件的受力情况

工程构件在实际工作条件下可能受到各种力学负荷(载荷),受力情况包括受力类型(或变形方式)、载荷(受力)性质、受力状态和受力大小四种。

(1) 受力类型

受力类型是指外力的方向、形式等与工程构件的相互关系,由此就决定了材料的变形方式。常见的受力类型如下:绳索、拉杆等所受的拉伸力;垫片、密封圈等所受的压缩力;汽车保险杠、锻锤锤杆等所受的冲击力;体育器材的单、双杠等所受的弯曲力;传动轴等构件所受的扭曲力;铆钉等所受的剪切力;轴承、导轨、活塞等受的摩擦力;饮料瓶、煤气管道等所受的内压力,等等。

(2) 负荷性质

负荷性质是指构件所受力的可变化性。如果所受的作用力不变化则称为恒定负荷,所受的作用力变化则称为非恒定负荷。非恒定负荷又可分为逐渐变化的渐增(减)负荷和周期性变化的间歇负荷两种。此外,从负荷的作用时间,又可分为静载(如静拉伸)和动载(如冲击)。

(3) 受力状态

受力状态是指构件受力作用时与施予力物体之间的接触状况。接触状况可分为两种:一为静止接触,如螺母与螺栓;一为摩擦接触,如轴承、齿轮等。对于摩擦接触的受力构件,要求所选材料不仅力学性能要好,还要有高耐磨损性、低摩擦系数及自润滑性。

(4) 受力大小

受力大小是指构件所受负荷的高低。一般而言,钢铁材料能承受很大的负荷,而塑料只能承受较小的负荷。那么,对于受力较大的塑料构件,为了提高其强度,一般都需要对其所用的材料进行纤维增强改性等处理。

根据不同情况,力学负荷还有其他不同的分法。例如:根据构件受力复杂与否可分为简单负荷与复合负荷;按加载速度可分为静负荷与动负荷;按分布形式可分为集中负荷与分布负荷。本节针对几种常见力学负荷做简单的介绍。

1.2.2 简单负荷与复合负荷

(1) 简单负荷

简单负荷就是构件只受到一种类型的力。对于各向同性材料有三种基本类型,即简单拉伸、简单剪切和均匀压缩。这类变形方式是由大小相等、方向相反、作用线与杆体轴线重合(或垂直)的一对力引起的(图 1.1)。前二者表现为杆件的长度发生伸长或缩短。起吊重物的钢索(承受拉应力)或液压油缸的活塞杆(承受压应力)属于拉伸或压缩变形。

拉应力或压应力统称为正应力,若正应力以 σ (MPa) 表示,则有

$$\sigma = F/A \quad (1.1)$$

式中 F ——拉伸或压缩负荷, (N); A ——棒的截面积, (m^2)。

单位长度的伸长量或缩短量称为拉应变或压应变。如果取棒的总长为 l , 伸长或缩短的长度为 Δl , 则应变 ε 为

$$\varepsilon = \Delta l/l \quad (1.2)$$

单向(简单)拉伸的主要力学性能指标有:弹性极限 σ_e 、屈服极限 σ_s 、强度极限(抗拉强

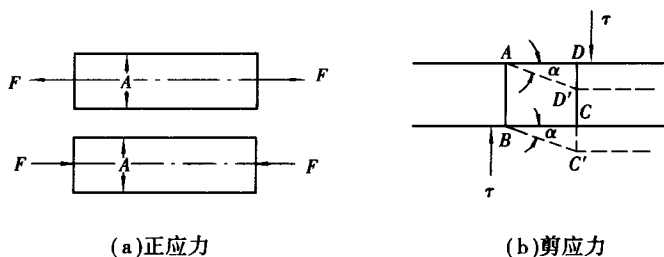


图 1.1 拉伸(或压缩)负荷与剪切负荷作用

度) σ_b 、延伸率 δ 和断面收缩率 Ψ 。单向(简单)压缩的主要力学性能指标有:压缩屈服极限 σ_{sc} 、压缩强度极限(抗拉强度) σ_{bc} 和压缩变形程度 ε_c 。

$$\varepsilon_c = \Delta H / H_0 \times 100\% \quad (1.3)$$

式中 ΔH ——圆柱试样压缩前、后的高度差;

H_0 ——圆柱试样压缩前高度。

剪切负荷作用时的应力称为剪应力,如图 1.1(b)所示。这类变形方式是由大小相等、方向相反、作用线垂直于杆轴且距离很近的一对力引起的,表现为受剪杆件的两部分沿外力作用方向发生相对的错动。铆结构中的铆钉、机械中常用的连接件(如键、销钉等)都受到剪切变形。

剪应力若以 τ (MPa) 表示,则

$$\tau = F / A \quad (1.4)$$

式中 F ——剪切负荷, (N);

A ——作用面积, (m^2), 即图 1.1(b) 中 AB 或 CD 的截面面积。

剪应力产生的应变称为剪应变。在 F 作用下,图 1.1(b) 中的 $ABCD$ 若变为 $ABC'D'$, 剪应变以 γ 表示, 则

$$\gamma = \tan \alpha = \frac{DD'}{AD} \approx \alpha \quad (1.5)$$

剪切时的主要力学性能指标为材料的抗剪强度,即剪切面上的最大切应力 $\tau_{\max}$ ($\tau_{\max} = F_b / A_0$, F_b 是试样被剪断时的最大负荷, A_0 是试样的原始截面积)。应当指出,剪切试验不能测定材料的剪切屈服极限,需扭转试验才能测出。

在任何情况下,材料截面上的应力均可按拉应力、压应力和剪切应力这三种方式来表现。

(2) 复合负荷

实际工作中,零件或构件承受的载荷通常比较复杂。工程构件受到两种或两种以上类型的负荷作用称为复合负荷,例如车床主轴工作时承受弯曲、扭转与压缩三种载荷作用;钻床主柱同时承受拉伸与弯曲两种载荷;电机转子轴工作时同时承受弯曲与扭转两种载荷作用;船舶推进器同时承受压缩、弯曲和扭转三种负荷作用。复杂负荷下,构件将产生组合变形。

通过力学计算、实验应力分析或有限元等方法可以获得构件的应力、应变分布以及应力集中和危险截面情况,从而为科学选材用料奠定基础。

1.2.3 静负荷与动负荷

按负荷随时间变化的情况(即加载速度),可把负荷分成静负荷与动负荷两类。

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,否则为动负荷。加载速度可按应变速率($1/s$)给出。通常可考虑以 $10^{-1}s^{-1}$ 作为区分静负荷和动负荷的大致分界,应变速率在 $10^{-1}s^{-1}$ 以下为静载,以上为动载。

(1) 静负荷

作用在工程构件上的静负荷可分为四种形式,即拉伸或压缩、剪切、扭转和弯曲。拉伸、压缩和剪切前面已经介绍过,这里介绍扭转和弯曲。

1) 扭转

如图 1.2 所示,汽车转向轴在工作时发生的变形方式叫扭转。这类变形是由大小相等、方向相反、作用面垂直于杆轴的一对力偶引起的,表现为杆件的任意两个横截面将发生绕轴线的相对转动。

扭转的应力分布如图 1.3 所示,其特点如下(以圆柱体为例):①轴向和与其垂直的横向上有数值相等的最大切应力 $\tau_{\max}$;②与轴向成 $\pm 45^\circ$ 角的两组平面上分别有数值相等的最大拉应力和最大压应力,其值等于最大切应力;③圆柱表面上任何一点的最大切应力或拉应力在数值上相等;④圆柱表面上应力最大,中心轴上应力为零;⑤最大切应力平面上没有拉应力存在,同样,最大拉应力平面上也没有切应力存在。

汽车的传动轴、电机和水轮机的主轴等都是受扭杆件。

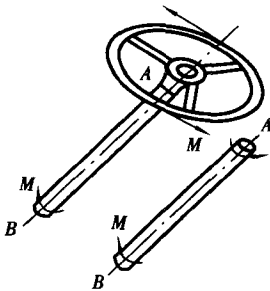


图 1.2 方向盘

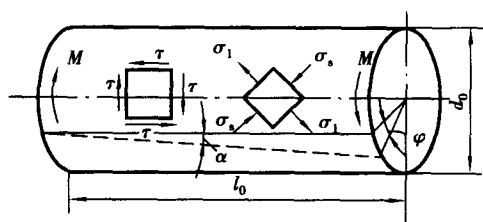


图 1.3 扭转应力分布示意图

扭转时的正应变(与轴向成 45° 方向):

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_y = \frac{1}{E}(1+\nu)\sigma_x = \frac{1}{E}(1+\nu)\tau_{\max} \quad (1.6)$$

式中 E ——弹性模量;

ν ——泊松常数。

其最大切应变:

$$\gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{\max} = 2\varepsilon_x = 2|\varepsilon_y| \quad (1.7)$$

扭转时的切应力 $\tau = M/W$, 其中 W 为截面系数。切应变 γ 为

$$\gamma = \tan \alpha = \varphi d_0 / (2l_0) \times 100\% \quad (1.8)$$

对于直径为 d_0 的圆柱试样, $W = \pi d_0^3 / 16$ 。若已知 τ 和 γ , 就可求出切变模量

$$G = \tau / \gamma = 32 M l_0 / (\pi \varphi d_0^4) \quad (1.9)$$

式中 α ——圆杆表面任一条等于轴线的直线因切应力的作用而转动的角度(图 1.3 所示);

φ ——扭转角;