

PUTONG GAODENG YUANXIAO
JIXIELEI SHIERWU GUIHUA XILIE JIAOCAI

普通高等院校机械类“十二五”规划系列教材

工程材料及其应用

GONGCHENG CAILIAO JIQI YINGYONG

主 编 王彦平 强小虎 冯利邦
主 审 王顺花

GONGCHENG CAILIAO JIQI YINGYONG



西南交通大学出版社
<http://press.swjtu.edu.cn>



PUTONG GAODENG YUANXIAO
JIXIELEI SHIERWU GUIHUA XILIE JIAOCAI
普通高等院校机械类“十二五”规划系列教材

工程材料及其应用

GONGCHENG CAILIAO JIQI YINGYONG

主 编 王彦平 强小虎 冯利邦
主 审 王顺花



西南交通大学出版社
<http://press.swjtu.edu.cn>

图书在版编目 (C I P) 数据

工程材料及其应用 / 王彦平, 强小虎, 冯利邦主编.
—成都: 西南交通大学出版社, 2011.7
普通高等院校机械类“十二五”规划系列教材
ISBN 978-7-5643-1180-3

I. ①工… II. ①王… ②强… ③冯… 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 081409 号

普通高等院校机械类“十二五”规划系列教材
工程材料及其应用

主编 王彦平 强小虎 冯利邦

责任编辑	牛 君
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	17
字 数	418 千字
版 次	2011 年 7 月第 1 版
印 次	2011 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1180-3
定 价	29.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

普通高等院校机械类“十二五”规划系列教材
编审委员会名单

(按姓氏音序排列)

主任	吴鹿鸣				
副主任	蔡勇	蔡长韬	蔡慧林	董万福	冯鉴
	侯勇俊	黄文权	李军	李泽蓉	孙未
	吴斌	周光万	朱建公		
委员	陈永强	党玉春	邓茂云	董仲良	范志勇
	龚迪琛	何俊	蒋刚	李宏穆	李玉萍
	廖映华	刘念聪	刘转华	陆兆峰	罗红
	乔水明	秦小屿	邱亚玲	宋琳	孙付春
	汪勇	王海军	王顺花	王彦平	王忠
	谢敏	徐立新	应琴	喻洪平	张静
	张良栋	张玲玲	赵登峰	郑悦明	钟良
	朱江				

总 序

装备制造业是国民经济重要的支柱产业，随着国民经济的迅速发展，我国正由制造大国向制造强国转变。为了适应现代先进制造技术和现代设计理论和方法的发展，需要培养高素质复合型人才。近年来，各高校对机械类专业进行了卓有成效的教育教学改革，和过去相比，在教学理念、专业建设、课程设置、教学内容、教学手段和教学方法上，都发生了重大变化。

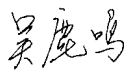
为了反映目前的教育教学改革成果，切实为高校的教育教学服务，西南交通大学出版社联合众多西部高校，共同编写系列适用教材，推出了这套“普通高等院校机械类‘十二五’规划系列教材”。

本系列教材体现“夯实基础，拓宽前沿”的主导思想。要求重视基础知识，保持知识体系的必要完整性，同时，适度拓宽前沿，将反映行业进步的新理论、新技术融入其中。在编写上，体现三个鲜明特色：首先，要回归工程，从工程实际出发，培养学生的工程能力和创新能力；其次，具有实用性，所选取的内容在实际工作中学有所用；再次，教材要贴近学生，面向学生，在形式上有利于进行自主探究式学习。本系列教材，重视实践和实验在教学中的积极作用。

本系列教材特色鲜明，主要针对应用型本科教学编写，同时也适用于其他类型的高校选用。希望本套教材所体现的思想和具有的特色能够得到广大教师和学生的认同。同时，也希望广大读者在使用中提出宝贵意见，对不足之处，不吝赐教，以便让本套教材不断完善。

最后，衷心感谢西南地区机械设计教学研究会、四川省机械工程学会机械设计（传动）分会对本套教材编写提供的大力支持与帮助！感谢本套教材所有的编写者、主编、主审所付出的辛勤劳动！

首届国家级教学名师
西南交通大学教授



2010年5月

前 言

“工程材料及其应用”是高等工科院校机械类各专业的技术基础课。本课程的任务是从机械工程应用的角度出发，以材料的性能—结构—组织—应用为主线，阐述机械工程材料的基本理论、基本知识和工程应用。为机械类专业学生毕业后从事机械产品设计、制造和维修工作奠定基础。

在本书编写过程中，精简理论知识的叙述，强化实际应用的介绍，力求内容简明扼要。以金属材料为重点，着重介绍了金属材料及热处理的基础知识，同时介绍了一些常用的非金属材料。内容包括：绪论、材料的性能、材料的结构、材料的凝固与结晶、金属的塑性变形及再结晶、钢的热处理、钢铁材料、有色金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料、机械零件的失效分析与选材和工程材料的应用。在材料选用方面，突出机床用材、汽车用材和铁路用材的举例。

本书可作为高等工科院校机械类各专业的技术基础课教材，也可供有关工程技术人员学习参考。

本书共分 13 部分。其中 0~5 章由王彦平编写；第 6、7、12 章由强小虎编写；8~11 章由冯利邦编写。全书由王彦平统稿。本书由兰州交通大学王顺花教授担任主审，她在审稿过程中提出了一些宝贵的修改意见并修正了个别错误。本书出版得到了西南交通大学出版社出版基金的资助，兰州交通大学教务处对本书的编写、出版给予了热情支持，在此表示衷心感谢。

由于编者能力有限，难免有错漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 2 月

目 录

0 绪 论	1
0.1 材料的地位与作用	1
0.2 材料科学	2
0.3 工程材料的分类	2
0.4 工程材料及其应用课程的目的和基本要求	5
1 材料的性能	6
1.1 强度、刚度、弹性和塑性	6
1.2 硬 度	10
1.3 疲 劳	13
1.4 冲击韧性	14
1.5 断裂韧性	16
1.6 材料的理化性能	17
1.7 材料的工艺性能	19
思考题与习题	20
2 材料的结构	21
2.1 晶体学基础	21
2.2 金属的晶体结构	23
2.3 实际金属的晶体结构	25
2.4 合金的晶体结构	27
2.5 高分子材料的结构	31
2.6 陶瓷材料的结构	38
思考题与习题	41
3 材料的凝固与结晶	42
3.1 纯金属的结晶	42
3.2 合金的结晶	44
3.3 铁碳合金相图	53
3.4 凝固组织及其控制	66
思考题与习题	68
4 金属的塑性变形及再结晶	70
4.1 金属的塑性变形	70

4.2	塑性变形对金属组织和性能的影响	75
4.3	回复和再结晶	77
4.4	金属材料的热加工与冷加工	80
	思考题与习题	82
5	钢的热处理	83
5.1	概 述	83
5.2	钢在加热时的转变	84
5.3	钢在冷却时的转变	86
5.4	钢的普通热处理	93
5.5	钢的表面热处理	100
5.6	常见热处理缺陷及预防	105
	思考题与习题	107
6	钢铁材料	109
6.1	钢的分类	109
6.2	常存元素和杂质对钢性能的影响	110
6.3	合金元素在钢中的作用	111
6.4	我国的钢材编号	116
6.5	工程结构用钢	117
6.6	机器零件用钢	120
6.7	工具钢	129
6.8	特殊性能钢	139
6.9	铸 铁	146
	思考题与习题	158
7	有色金属材料	161
7.1	铝及铝合金	161
7.2	铜及铜合金	168
7.3	滑动轴承合金	175
	思考题与习题	180
8	高分子材料	181
8.1	高分子材料概述	181
8.2	塑 料	185
8.3	橡 胶	191
8.4	合成纤维	195
8.5	胶黏剂	198
8.6	涂 料	202
	思考题与习题	205

9 陶瓷材料	206
9.1 陶瓷材料概述	206
9.2 普通陶瓷	207
9.3 特种陶瓷	208
9.4 玻 璃	210
思考题与习题	213
10 复合材料	214
10.1 复合材料概述	214
10.2 复合材料的性能和复合增强原理	218
10.3 常用复合材料	220
思考题与习题	227
11 机械零件的失效分析与选材	228
11.1 机械零件的失效分析	228
11.2 机械零件的选材原则	234
11.3 常用机械零件的选材及加工路线	236
思考题与习题	241
12 工程材料的应用	242
12.1 机床用材	242
12.2 汽车用材	246
12.3 热能设备用材	252
12.4 铁路用材	253
思考题与习题	257
参考文献	258

0 绪论

0.1 材料的地位与作用

材料一般是指人们用于制造有特定功能的装置、仪器、仪表、器件、构件、组件以及机械或其他产品所需要的那些物质。

材料是人类社会进步的里程碑。纵观人类利用材料的历史，可以清楚地看到，人类利用材料的历史，就是一部人类进化和进步的历史。每一种重要新材料的发现和应用，都把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平。材料科学技术的每一次重大突破都会引起生产技术的重大变革，甚至引起一次世界性的技术革命，大大地加速社会发展的进程，给社会生产力和人类生活带来巨大变革，推动人类物质文明和精神文明进步。因此历史学家常根据材料的使用，将人类生活的时代划分为石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代等。

在人类历史的发展过程中，中华民族对材料发展做出了重大贡献。早在新石器时代（公元前 6000 年—公元前 5000 年），中华民族的先人们用黏土（主要成分为 $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）烧制成陶器；到东汉时期又出现了瓷器，我国成为最早生产瓷器的国家。中国的瓷器流传到世界的各个角落，瓷器成为中国文化的象征，对世界文明产生了极大的影响。直到今天，中国瓷器仍畅销全球，享誉四海。我国青铜的冶炼在夏朝（公元前 2140 年始）以前就开始了，到殷、西周时期已发展到很高的水平。青铜主要用于制造各种工具、食器、兵器。从河南安阳晚商遗址出土的司母戊鼎重达 8 750 N，外形尺寸为 1.33 m×0.78 m×1.10 m，是迄今世界上最古老的大型青铜器。我国从春秋战国时期（公元前 770 年—公元前 221 年）已开始大量使用铁器。从兴隆战国铁器遗址中发掘出了浇铸农具用的铁模，说明冶铸技术已由泥沙造型水平进入铁模铸造的高级阶段。到了西汉时期，我国炼铁技术又有了很大的提高，采用煤作为炼铁的燃料，这比欧洲早 1 700 多年。历史充分说明，我们勤劳智慧的祖先，在材料的创造和使用上有着辉煌的成就，为人类文明、世界进步做出了巨大贡献。中华人民共和国成立以后，特别是改革开放 30 多年来，我国在材料方面的研究有了突破性进展，这为我国稳步推进社会主义现代化建设奠定了坚实的基础。

材料不仅是人类社会进步的标志，而且是社会现代化的物质基础与先导。近代两次工业革命都是以新材料的发明和广泛应用为先导。制钢工业的发展为蒸汽机的发明和应用奠定了物质基础。钢铁材料的广泛应用，导致了大规模的机械化生产，极大地丰富了人类社会的物质文明，引起了第一次工业革命。第二次工业革命，就是起源于 19 世纪 70 年代的工业技术革命，其主要标志是：内燃机、电动机代替蒸汽机，新炼钢方法的迅速推广，电力的广泛应用和化学方法的采用。在新技术的带动下，电力工业、石油工业、化学工业等新兴的工业部

门迅速建立。产业结构也随之发生变化，以钢铁材料的生产及应用为代表的冶金、机械制造等重工业部门，逐渐在工业生产中占据优势。

进入 20 世纪 90 年代，人类不断发展和研制新材料，这些新材料具有一般传统材料不可比拟的优异性能或特定性能，是发展信息、航天、能源、生物、海洋开发等高新技术的重要基础，也是整个科学技术进步的突破口。如砷化镓等新的化合物半导体材料、用于信息探测传感器的硫化铅等敏感类材料、石英型光导纤维材料、铬钴合金光存储记录材料、非晶体太阳能电池材料、超导材料、高温陶瓷材料、高性能复合结构材料、高分子功能材料，特别是纳米材料等。新材料的广泛使用给社会带来了有目共睹的进步。

进入 21 世纪，随着科学技术的进步、人类生活水平的提高，对材料科学技术提出了更高的要求，特别是由于世界人口迅速增加，资源迅速枯竭，生态环境不断恶化，对材料的生产技术与有效利用提出了许多新要求。在这种背景下，知识经济的蓬勃发展与信息的网络化正促进材料科学技术突飞猛进。总之，新材料技术是社会现代化的先导，是一切工业发展的关键共性基础。材料的研究和应用促进了人类社会的进步，而人类社会的不断发展刺激了材料的不断创新。

0.2 材料科学

材料科学是一门研究材料成分、微观组织与结构、加工工艺、性能与应用之间内在相互关系及其变化规律的学科。它以化学、固体物理学、力学等为基础，是一门多学科交叉的边缘学科。材料科学理论与实验是材料发展与创新的基础与前提。

工程材料主要指应用于工程构件、机械零件、工具等领域的结构材料，包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料。其中最基本的是金属材料。工程材料学作为一门材料学科，主要研究的是材料学科的实用部分，重点阐述上述结构材料的性能、结构、工艺、应用之间的关系。

0.3 工程材料的分类

0.3.1 材料的结合键

工程材料可以有不同的分类方法。比较科学的方法是根据材料的结合键进行分类。工程材料通常是固态物质，是由各种元素通过原子、离子或分子结合而成的。原子、离子或分子之间的结合力称为结合键。一般可把结合键分为离子键、共价键、金属键和分子键四种。

1. 离子键

当元素周期表中相隔较远的正电性元素原子和负电性元素原子接触时，前者失去最外层价电子变成带正电荷的正离子，后者获得电子变成带负电荷的满壳层负离子。正离子和负离子由于静电引力相互吸引；同时当它们十分接近时发生排斥，引力和斥力相等即形成稳定的

离子键，如图 0.1 所示。最具有代表性的离子晶体为 NaCl 、 Al_2O_3 等。离子键的结合力很大，因此离子晶体的硬度高、强度大、热膨胀系数小，但脆性大。离子键中很难产生可以自由运动的电子，所以离子晶体都是良好的绝缘体。在离子键结合中，由于离子的外层电子被比较牢固地束缚，可见光的能量一般不足以使其受激发，因而不吸收可见光，所以典型的离子晶体是无色透明的。

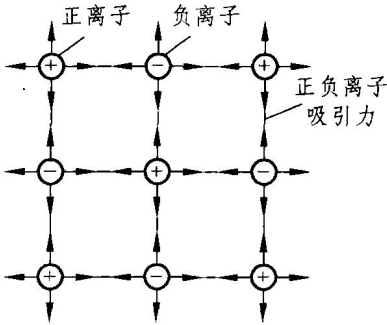


图 0.1 离子键示意图

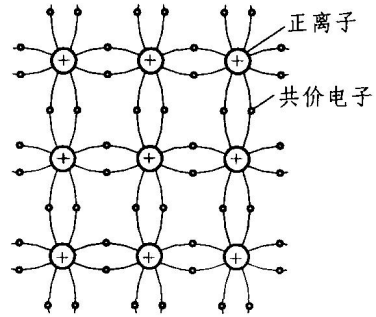


图 0.2 共价键示意图

2. 共价键

处于元素周期表中间位置的三、四、五价元素原子既可能获得电子变为负离子，也可能丢失电子变为正离子。当这些元素原子之间或与邻近元素原子形成分子或晶体时，以共用价电子形成稳定的电子满壳层的方式实现结合。这种由共用价电子对产生的结合键叫共价键，如图 0.2 所示。最具有代表性的共价晶体为金刚石。共价键的结合力很大，所以共价晶体强度高、硬度高、脆性大、熔点高、沸点高和挥发性低。

3. 金属键

金属原子的外层电子少，很容易失去。因此金属原子之间不可能通过电子转移或共用来获得稳定的外层电子结构。当金属原子相互靠近时，其外层电子脱离原子成为自由电子，而金属原子则成为正离子，自由电子在正离子之间自由运动，为各原子所共有，形成电子云或电子气。金属离子通过正离子和自由电子之间的引力而相互结合，这种结合键称为金属键，如图 0.3 所示。自由电子的存在使金属具有良好的导电性和导热性，并使金属不透明并呈特有的金属光泽。金属键无方向性，当金属原子间发生相对位移时，金属键不受破坏，因而金属塑性好。

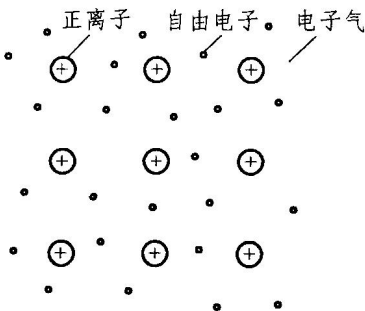


图 0.3 金属键示意图

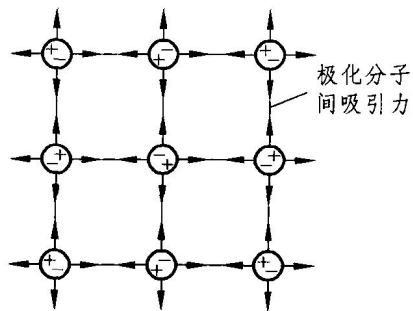


图 0.4 分子键示意图

4. 分子键

在某些分子中可能存在偶极矩，这是由于分子中共价电子的非对称分布，使分子的某一部分比其他部分更偏于带正电或带负电（称为极化）。一个分子的带正电部分会吸引另一个分子的带负电部分，这种结合力称为范德瓦尔斯力或分子键，如图 0.4 所示。分子键也可以产生于电子随机运动引起的瞬间极化。

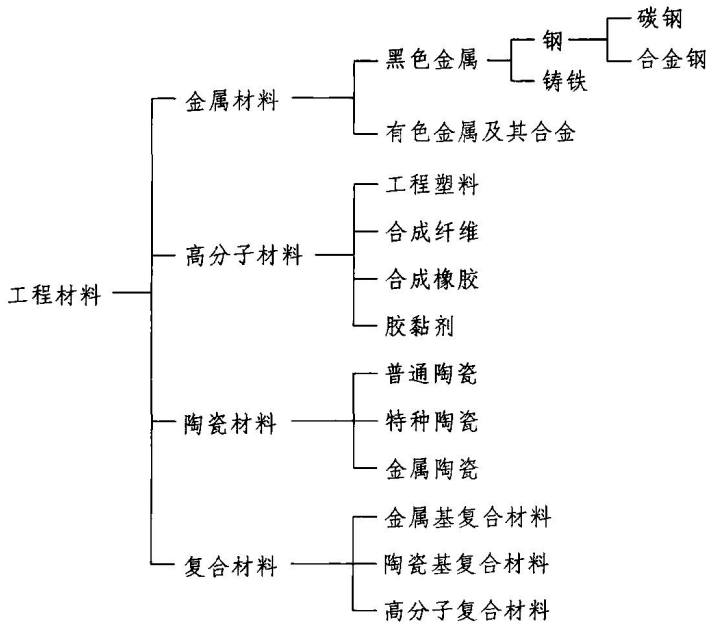
当氢原子与一个电负性很强的原子结合成分子时，氢原子的唯一一个电子会向另一个原子强烈偏移，氢原子几乎成为一个带正电的核，可以对第三个电负性较大的原子产生较强的吸引力，使氢原子在两个电负性很强的原子之间形成一个桥梁，这种结合力称为氢键或氢桥。氢键在生物系统中起着重要作用，但和所有的弱键一样，在工程上的重要性并不显著。

0.3.2 工程材料的分类

工程材料主要是指用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域中的材料，用来制造工程构件和机械零件，也包括一些用于制造工具的材料和具有特殊性能（如耐蚀、耐高温等）的材料。

按结合键的性质，一般将工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料等四大类，如表 0.1 所示。

表 0.1 工程材料的分类



金属材料是以金属键结合为主的材料，具有良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽，是目前用量最大、应用最广泛的工程材料。金属材料分为黑色金属和有色金属两类，铁及铁合金称为黑色金属，即钢铁材料，其世界年产量已超过 10 亿吨，在机械产品中的用量占整个用材的 60% 以上。黑色金属之外的所有金属及其合金称为有色金属。有色金属的种类很多，根据其特性的不同又可分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属等。

高分子材料是以分子键和共价键为主的材料。高分子材料作为结构材料具有塑性、耐腐蚀性、电绝缘性、减震性好及密度小等特点。工程上使用的高分子材料主要包括塑料、橡胶及合成纤维等。在机械、电气、纺织、汽车、飞机、轮船等制造工业和化学、交通运输、航空航天等工业中被广泛应用。

陶瓷材料是以共价键和离子键结合为主的材料，其性能特点是熔点高、硬度高、耐腐蚀、脆性大。陶瓷材料分为传统陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷三类。传统陶瓷又称普通陶瓷，是以天然材料（如黏土、石英、长石等）为原料的陶瓷，主要用作建筑材料。特种陶瓷又称精细陶瓷，是以人工合成材料为原料的陶瓷，常用作工程上的耐热、耐蚀、耐磨零件。金属陶瓷是金属与各种化合物粉末的烧结体，主要用作工、模具。

复合材料是把两种或两种以上不同性质或不同结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而形成的材料，通过这种组合来达到进一步提高材料性能的目的。包括金属基复合材料、陶瓷基复合材料和高分子基复合材料。如现代航空发动机燃烧室中耐热最高的材料就是通过粉末冶金法制备的氧化物粒子弥散强化的镍基合金复合材料。很多高级游艇、赛艇及体育器械等是由碳纤维复合材料制成的，它们具有重量轻、弹性好、强度高等优点。

0.4 工程材料及其应用课程的目的和基本要求

从材料学的角度看，材料的性能取决于内部结构，而材料的内部结构又取决于成分和加工工艺。所以，正确地选择材料，确定合理的加工工艺，得到理想的组织，获得优良的使用性能，是决定机械制造中产品性能的重要环节。因此，本书是以材料的成分、加工工艺、组织结构与性能之间的关系为主线而编写的。

工程材料及其应用是机械类和近机类各专业的重要技术基础课，课程的目的是使学生获得工程材料的基本理论及其性能特点方面的知识，建立起材料的化学成分、组织结构、加工工艺与性能之间的关系，了解常用材料的应用范围和加工工艺，初步具备合理选用材料、正确确定加工方法、妥善安排加工工艺路线的能力。

工程材料及其应用课程是一门理论性和实践性都很强的课程，特点是基本概念多，与实际联系密切。因此要求在学习时注意联系物理、化学、工程力学及金属工艺学等课程的相关内容，并结合生产实际，注重分析、理解前后知识的整体联系和综合应用。

1 材料的性能

在机械设计时，满足使用性能是选材的首要依据。例如，汽车半轴在工作时主要承受扭转力矩和反复弯曲以及一定的冲击载荷。因此，要求半轴材料具有高的抗弯强度、疲劳强度和较好的韧性；起重机钢丝绳及吊钩承受拉伸应力，选材时应考虑拉伸强度；齿轮心部及齿根部承受剪切应力，而齿轮表面承受磨损，这就要求齿轮内韧外硬；等等。所有这些选材时考虑的因素都涉及材料的使用性能。使用性能是指为保证零件能正常工作和有一定工作寿命，材料应具备的性能，包括力学性能、物理性能和化学性能。其中结构材料的使用性能主要由它们的力学性能指标衡量；功能材料的使用性能主要由相关的物理学参量衡量。所谓力学性能，是指材料抵抗外力作用所显示的性能，包括强度、刚度、硬度、塑性、韧性和疲劳强度等，它们可通过标准试验测定。

其次，如果选材时满足了使用性能，那么还要考虑材料是否容易加工。如果制造困难或制造成本太高，则这种选材方案未必可行。因此选材时还应考虑材料的工艺性能。所谓工艺性能，是指为保证材料加工顺利进行，材料应具备的性能，包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等。

本章主要介绍材料的力学性能，对材料的物理和化学性能及工艺性能做简单介绍。

1.1 强度、刚度、弹性和塑性

金属的强度、刚度、弹性和塑性一般可以通过室温拉伸试验来测定。它是按国标 GB6397—1986 规定，把一定尺寸和形状的金属试件（见图 1.1）装夹在试验机上，然后对试样逐渐施加拉伸力，直至试样拉断为止。根据试样在拉伸过程中承受的载荷和产生的变形量大小，可以测定金属的拉伸曲线，并由此测定金属的强度、刚度、弹性及塑性。

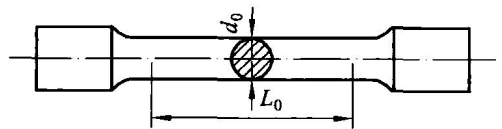


图 1.1 圆形标准拉伸试样

1.1.1 拉伸图与应力-应变曲线

1. 拉伸图

拉力试样进行拉伸试验时，随着载荷的逐渐增加，试样的伸长量也逐渐增加，通过自动记录仪随时记录载荷（ P ）与伸长量（ ΔL ）的数值，直至试样被拉断为止，然后将记录的数

值绘在载荷为纵坐标、伸长量为横坐标的图上。连接各点所得的曲线即为拉伸曲线，该图称为拉伸图。

图 1.2 为低碳钢的拉伸图。由图可见，低碳钢试样在拉伸过程中，其载荷与变形关系有以下几个阶段。

(1) 当载荷不超过 P_p 时，拉伸曲线 Oa 为一直线，即试样的伸长量与载荷成正比地增加，如果卸除载荷，试样立即恢复到原来的尺寸，试样属于弹性变形阶段，完全符合胡克定律。 P_p 是能符合胡克定律的最大载荷。

(2) 当载荷超过 P_p 后，拉伸曲线开始偏离直线，即试样的伸长量与载荷已不再成正比关系，但若卸除载荷，试样仍能恢复到原来的尺寸，故仍属于弹性变形阶段。 P_e 是试样发生完全弹性变形的最大载荷。

(3) 当载荷超过 P_e 后，试样将进一步伸长，但此时若卸除载荷，弹性变形消失，而另一部分变形被保留，即试样不能恢复到原来的尺寸，这种不能恢复的变形称为塑性变形或永久变形。

由图可见，当载荷达到 P_s 时，拉伸曲线出现了水平的或锯齿形的线段，这表明在载荷基本不变的情况下，试样却继续变形，这种现象称为“屈服”。引起试样屈服的载荷称为屈服载荷。

(4) 当载荷超过 P_s 后，试样的伸长量与载荷又将呈曲线关系上升，但曲线的斜率比 Oa 段的斜率小，即载荷的增加量不大，而试样的伸长量却很大。这表明在载荷超过 P_s 后，试样已开始产生大量的塑性变形。当载荷继续增加到某一最大值 P_b 时，试样的局部截面缩小，产生所谓“颈缩”现象。由于试样局部截面的逐渐减小，承载能力也逐渐降低，当达到拉伸曲线上 k 点时，试样断裂。 P_k 为试样断裂时的载荷。

应该指出，工业上使用的许多材料在进行静拉伸试验时，其承受的载荷与变形量之间的关系，并非都与上述低碳钢相同。某些脆性金属（如铸铁等）在尚未产生明显塑性变形时已经断裂，故不仅没有屈服现象，而且也不产生颈缩现象。

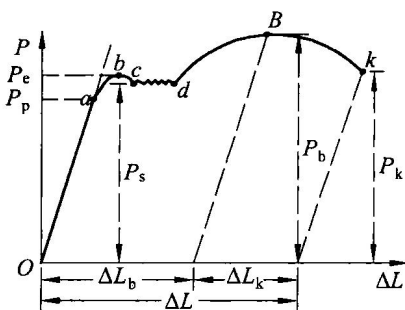


图 1.2 低碳钢的拉伸图

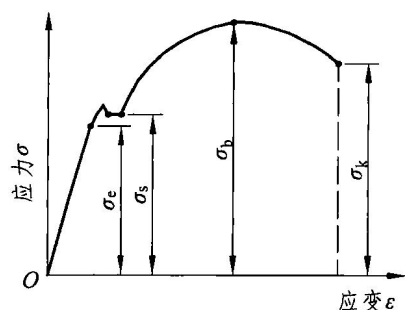


图 1.3 低碳钢的应力-应变曲线

2. 应力-应变曲线

由于拉伸图上的载荷 P 与伸长量 ΔL 不仅与试验的材料性能有关，而且还与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸因素的影响，将载荷 P 除以试样的原始截面积 A_0 ，即得到试样所受的拉应力 σ ，其单位为 MPa；将试样的伸长量 ΔL 除以试样的原始标距长度 L_0 ，得到试样的相对伸长，即应变 ε 。以 σ 为纵坐标， ε 为横坐标，则绘出 σ - ε 关系曲线，如图 1.3 所示。

1.1.2 刚度和弹性

由图 1.3 所示的 σ - ε 曲线中的弹性变形阶段可以测出材料的弹性模量和弹性极限。

1. 弹性模量

弹性模量 E 是指材料在弹性状态下的应力与应变的比值，即

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

在应力-应变曲线上，弹性模量就是试样在弹性变形阶段线段的斜率，即引起单位弹性变形时所需的应力。因此，它表示材料抵抗弹性变形的能力。弹性模量 E 值越大，则材料的刚度越大，材料抵抗弹性变形的能力就越强。

绝大多数的机械零件都是在弹性状态下进行工作的，在工作过程中一般不允许有过多的弹性变形，更不允许有明显的塑性变形。因此，对其刚度都有一定的要求。提高零件刚度的办法，除了增加零件横截面或改变横截面形状外，从材料性能上来考虑，就必须增加其弹性模量 E 。弹性模量 E 值主要取决于各种材料本身的性质，热处理、微合金化及塑性变形等对它的影响很小。一般钢在室温下的 E 值在 190~220 GPa 范围内，而铸铁的 E 值较低，一般为 75~145 GPa。

2. 比例极限与弹性极限

比例极限 σ_p 是应力与应变之间能保持正比例关系的最大应力值，即

$$\sigma_p = \frac{P_p}{A_0} \quad (1.2)$$

式中： P_p —— 载荷与变形能保持正比例关系的最大载荷；

A_0 —— 试样的原始横截面积。

弹性极限 σ_e 是材料产生完全弹性变形时所能承受的最大应力值，即

$$\sigma_e = \frac{P_e}{A_0} \quad (1.3)$$

式中： P_e —— 试样发生完全弹性变形的最大载荷；

A_0 —— 试样的原始横截面积。

由于弹性极限与比例极限在数值上非常接近，故一般不必严格区分。它们表示材料在不产生塑性变形时所能承受的最大应力值。有些零件如枪管、炮筒及精密弹性件等在工作时不允许产生微量塑性变形，设计时应根据比例极限和弹性极限来选用材料。

1.1.3 强度

强度是指材料在外力作用下，抵抗变形或断裂的能力。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等方式，所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等，各