

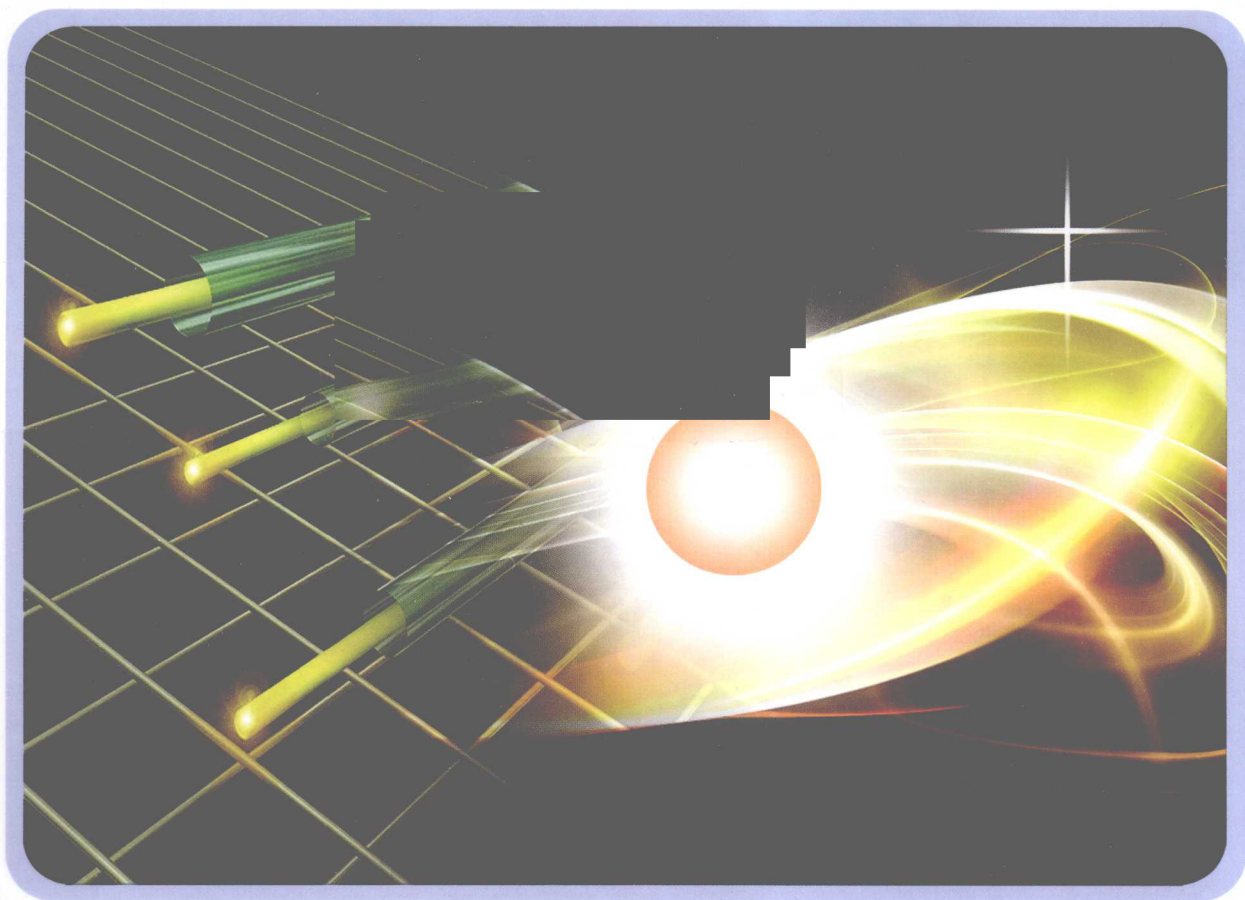


职业教育特色精品课程规划教材  
职业教育课程改革项目研究成果

# 金属学与热处理

jinshuxue yu rechuli

◆ 主编 李新领



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

21世纪职业教育特色精品课程规划教材  
 职业教育课程改革项目研究成果

# 金属学与热处理

主编 张新 副主编 张新

第一版 2010年1月

(张新)

查并图

学属金

2010

① 1

1111

列国中

\ 谷武志

\ 11

\ 金

\ 11

\ 11

设计 张新 张新 张新

北京理工大学出版社

2010年1月 2010年1月 2010年1月

1111

1111

张新 张新 张新

张新 张新 张新

张新 张新 张新

张新 张新 张新

张新 张新 张新

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 提 要

本书根据劳动和社会保障部培训就业司颁发的《金属学与热处理教学大纲》，并结合教学实践、职业技能鉴定的需求和相关技术的发展状况编写而成，主要包括：金属的性能、金属的晶体结构与结晶、金属的塑性变形、铁碳合金、钢的热处理、碳素钢、合金钢、铸铁、有色金属及硬质合金、其他常用工程材料等。每章进行了知识点划分，并配有习题。

本书供职业技术学校机械类焊接专业、热加工工种的师生使用，也可作为中级技能人才培养和工人自学用书。

版权专用 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

金属学与热处理 / 李新领主编. — 北京 : 北京理工大学出版社, 2010. 7  
ISBN 978 - 7 - 5640 - 3396 - 5

I. ①金… II. ①李… III. ①金属学 - 专业学校 - 教材②热处理 - 专业学校 - 教材 IV. ①TG1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 138882 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京通县华龙印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 10

字 数 / 256 千字

版 次 / 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 18.00 元

责任校对 / 张沁萍

责任印制 / 母长新

---

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

## 出版说明



本书是根据劳动和社会保障部培训就业司于2000年8月颁发的《金属材料与热处理教学大纲》和当前形势的需要编写的。本书主要介绍了金属的性能、金属学的基础知识、钢的热处理、机械工程材料等共十章有关金属材料与热处理方面的基础知识。

在教材的编写过程中，我们始终坚持了以下几个原则。

1. 坚持技能人才的培养方向，从职业（岗位）分析入手，强调实用性；
2. 紧密结合职业培训学校的教学实际情况，同时，坚持以国家职业资格标准为依据，力求使教材内容覆盖职业技能鉴定的各项要求；
3. 突出教材的时代感，力求较多地引进新知识、新技术、新工艺、新方法等方面的内容，较全面地反映行业的技术发展趋势；
4. 打破传统的教材编写模式，树立以学生为主体的教学理念，在每章前面都给出了“教学要求”和“教学目标”，在章后还配有相应的习题，便于学生自学与思考。

本书在编写过程中，参考了一些教材和资料，在此一并表示感谢。本教材的编写虽经过各位编者的不懈努力，但限于编者水平与能力，书中难免有错误与不足之处，恳请广大读者和使用本书的各位教师、同仁提出批评和宝贵的意见，以使本书得到不断完善。

编者

(1)	绪 论 .....	(1)
(2)	<b>第一章 金属的性能</b> .....	(3)
(3)	第一节 金属的物理性能和化学性能 .....	(3)
(6)	第二节 金属的力学性能 .....	(6)
(15)	第三节 金属的工艺性能 .....	(15)
(18)	<b>第二章 金属的晶体结构与结晶</b> .....	(18)
(18)	第一节 金属的晶体结构 .....	(18)
(21)	第二节 金属的结晶 .....	(21)
(26)	第三节 金属的同素异构转变 .....	(26)
(28)	<b>第三章 金属的塑性变形</b> .....	(28)
(29)	第一节 金属的塑性变形 .....	(29)
(30)	第二节 冷塑性变形对金属的影响 .....	(30)
(32)	第三节 回复与再结晶 .....	(32)
(34)	第四节 金属的热加工 .....	(34)
(37)	<b>第四章 铁碳合金</b> .....	(37)
(37)	第一节 铁碳合金的基本组织 .....	(37)
(39)	第二节 铁碳合金相图 .....	(39)
(49)	第三节 铁碳合金相图的应用 .....	(49)
(51)	<b>第五章 钢的热处理</b> .....	(51)
(52)	第一节 钢在加热时的组织转变 .....	(52)
(55)	第二节 钢在冷却时的组织转变 .....	(55)
(60)	第三节 钢的退火与正火 .....	(60)
(62)	第四节 钢的淬火 .....	(62)

第五节	钢的回火	(66)
第六节	钢的表面热处理与化学热处理	(68)
第七节	典型零件的热处理分析	(73)
<b>第六章</b>	<b>碳素钢</b>	<b>(76)</b>
第一节	杂质元素对钢性能的影响	(76)
第二节	碳素钢的分类	(78)
第三节	碳素钢的牌号及用途	(78)
<b>第七章</b>	<b>合金钢</b>	<b>(84)</b>
第一节	合金元素对钢的影响	(84)
第二节	合金钢的分类和牌号	(86)
第三节	合金结构钢	(87)
第四节	合金工具钢	(91)
第五节	特殊性能钢	(94)
<b>第八章</b>	<b>铸 铁</b>	<b>(98)</b>
第一节	铸铁分类	(98)
第二节	灰铸铁	(100)
第三节	可锻铸铁	(102)
第四节	球墨铸铁	(104)
第五节	蠕墨铸铁	(105)
第六节	合金铸铁	(106)
<b>第九章</b>	<b>有色金属及硬质合金</b>	<b>(108)</b>
第一节	铝及铝合金	(108)
第二节	铜及铜合金	(112)
第三节	钛及钛合金	(115)
第四节	滑动轴承合金	(117)
第五节	硬质合金	(119)
<b>第十章</b>	<b>其他常用工程材料</b>	<b>(122)</b>
第一节	高分子材料	(122)
第二节	陶瓷材料	(127)
第三节	复合材料	(129)
第四节	新材料简介	(130)
<b>实 验</b>		<b>(135)</b>
<b>附 录</b>		<b>(147)</b>

金属是指具有特殊光泽、良好导电性、导热性、一定强度和塑性的物质,如铁、铜、铝等。具有金属特性的元素称为金属元素。凡是由金属元素或以金属元素为主而形成的,并具有一般金属特性的材料统称为金属材料。通常把金属材料分为黑色金属材料 and 有色金属材料两类。以铁、锰、铬或以它们为主而形成的具有金属特性的物质,称为黑色金属材料。如碳素钢、合金钢、铸铁等。除黑色金属材料以外的其他金属材料,称为有色金属材料。如铜、铝、轴承合金等。

金属材料,不论是黑色金属材料或是有色金属材料,通常都是由矿石经冶炼而得到的。

我国是世界上最早使用金属材料及热处理技术的国家之一。根据大量出土文物考证,我们的祖先早在公元前 16 世纪就开始使用金属材料。殷商时代,在生产工具、武器、生活用具等方面已大量使用青铜。如重达 875 kg 的司母戊大方鼎,不仅体积庞大,而且花纹精巧,造型美观,说明当时人们已具有很高的铸造技术。

在热处理技术方面,远在西汉时期就有“水与火合为粹(同淬)”之说,东汉时期则有“清水淬其锋”等有关热处理技术的记载。1965 年在湖北省出土的越王勾践青铜剑,虽然在地下深埋了 2 400 多年,但是这把剑在出土时却没有一点锈斑,完好如初,说明当时不仅已掌握了金属冶炼、锻造、热处理技术,而且还掌握了金属材料的防腐技术。

明朝宋应星所著《天工开物》一书中详细记载了古代冶炼、炼钢、铸造、锻造、淬火等多种金属的加工方法,可以说《天工开物》一书是世界上有关金属加工工艺最早的科学著作之一。

总之,在金属材料与热处理学的发展过程中,我国古代劳动人民表现出极大的创造力,他们用自己的智慧为这门学科的发展和应用作出了巨大的贡献。

金属材料不仅具有优良的物理、化学和力学性能,能满足各种零件的使用要求,而且具有良好的加工工艺性能,适合制造各种产品,尤其是热处理工艺能改变金属材料表面及内部的组织结构与性能,可满足不同的使用要求。因此,金属材料在生产中得到了广泛的应用。据统计,目前的机械工业部门所用的材料中有 90% 以上是金属材料。金属材料已成为我国现代农业、工业、国防及科学技术的重要物质基础,成为我国国民经济发展的支柱产业之一。近年来,我国在材料工业领域取得了巨大成就:我国的钢产量已跃居世界的前列;在金属材料生产方面已建立了符合我国特点的合金钢系列,且应用范围日益扩大;广泛采用稀土元素材料,并研制出具有世界先进水平的稀土镁球墨铸铁;许多热处理新工艺、新技术得到应用和推广;高分子材料、陶瓷材料、复合材料等非金属材料在生产中也逐步得到了应用。

随着科学技术的不断发展,新产品、新工艺、新材料也在不断出现,但与发达国家相比,我

国在材料开发方面仍有一定差距,这在一定程度上制约了国民经济的发展。因此,我们应刻苦学习,不断探索,努力赶超世界先进水平,为我国材料工业的腾飞贡献自己的力量。

本课程是一门研究金属材料的成分、组织、热处理与金属材料性能间关系和变化规律的学科。通过本课程的学习,学生应掌握有关金属材料与热处理的基本理论和基本知识,初步了解金属材料的应用及零件设计时的合理选材,初步掌握正确运用热处理工艺、合理安排零件工艺路线的方法。

金属材料是指金属元素或以金属元素为主构成的具有金属特性的材料的统称。包括纯金属、合金、金属材料等。金属材料是国民经济中应用最广泛、用量最大的材料。金属材料在国民经济中占有极其重要的地位。金属材料的发展水平是衡量一个国家工业水平的重要标志。

金属材料的发展历史源远流长。早在原始社会,人们就使用天然金属材料。随着生产力的发展,人们开始对金属材料进行加工和热处理,以提高其性能。金属材料的发展经历了漫长的历史过程,从古代的青铜、铁器,到近代的钢铁、有色金属,再到现代的合金、复合材料等。

金属材料的发展与人类文明的进步密切相关。金属材料的发展推动了人类社会的发展,为人类的生产和生活提供了便利。金属材料的发展也促进了科学技术的进步,为人类探索自然奥秘提供了有力的工具。

金属材料的发展也面临着许多挑战。随着科学技术的不断进步,人们对金属材料的要求越来越高。金属材料的发展需要克服许多困难,如资源短缺、环境污染、能源消耗等。金属材料的发展需要全社会的共同努力,才能实现可持续发展。

金属材料的发展需要加强基础研究和应用研究。基础研究是材料发展的源泉,应用研究是材料发展的动力。金属材料的发展需要加强产学研合作,促进科技成果转化,提高材料工业的自主创新能力。

金属材料的发展需要提高材料的质量和性能。材料的质量和性能是材料工业的生命线。金属材料的发展需要提高材料的生产工艺水平,加强材料的质量控制,提高材料的可靠性和使用寿命。

金属材料的发展需要加强国际合作。金属材料的发展是一个全球性的课题,需要各国之间的合作与交流。金属材料的发展需要加强国际间的科技合作,共同推动金属材料工业的繁荣和发展。



## 金属的性能



## 教学要求

金属材料由于具有许多良好的性能,在机械制造业中,广泛地用于制造生产和生活用品。为了能够合理地选用金属材料,也为了设计、制造出具有竞争力的产品,必须了解和掌握金属材料的性能。

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料为保证机械零件或工具正常工作应具备的性能,即在使用过程中所表现出的特性,主要包括物理性能、化学性能、力学性能等。工艺性能是指材料在被加工过程中,适应各种冷热加工的性能,如热处理性能、铸造性能、锻压性能、焊接性能、切削加工性能等。



## 教学目标

1. 准确理解有关名词的定义和范围;
2. 学会利用掌握的知识对日常生活中的现象进行分析和思考,试一试能否用学到的理论知识对遇到的实际问题或现象进行科学的解释。例如,零件的疲劳断裂,在日常生活和工作中将会经常遇到;
3. 金属材料课程内容杂,涉及知识面广,因此,为了巩固所学知识,要学会对所学知识进行分类、归纳和整理,提高学习效率。整理的方法很多,如列表法、层次罗列法等;
4. 牢固掌握重点内容,本章的重点是金属材料的力学性能部分;
5. 金属工艺学课程的许多理论知识,带有很强的实践性,在学习时要尽量将自己的感性认识与教学内容相联系,帮助理解和认识。

\* \* \* \* \*

## 第一节 金属的物理性能和化学性能

金属的物理性能是指金属在重力、电磁场、热力(温度)等物理因素作用下,所表现出的性能或固有的属性。它包括密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等。金属的化学性能是指金属在室温或高温时,抵抗各种化学介质作用所表现出来的性能,它包括耐腐蚀性、抗氧化性和化学稳定性等。

## 一、金属的物理性能

### 1. 密度

密度是指单位体积的质量。密度是金属材料的特性之一。不同金属材料的密度是不同的。在体积相同的情况下,金属材料的密度越大,其质量(重量)也就越大。金属材料的密度,直接关系到由它所制造设备的自重和效能,如发动机要求质轻和惯性小的活塞,常采用密度小的铝合金制造。在航空工业领域中,密度更是选材的关键性能指标之一。

常用金属材料的密度见表 1-1。一般将密度小于  $4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  的金属称为轻金属,密度大于  $4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  的金属称为重金属。

### 2. 熔点

金属和合金从固态向液态转变时的温度称为熔点。纯金属都有固定的熔点。常用金属的熔点见表 1-1。

合金的熔点决定于它的化学成分,如钢和生铁虽然都是铁和碳的合金,但由于其碳的含量不同,其熔点也不同。熔点是金属和合金在冶炼、铸造、焊接时重要的工艺参数。熔点高的金属称为难熔金属(如钨、钼、钒等),可以用来制造耐高温零件,它们在火箭、导弹、燃气轮机和喷气飞机等方面得到广泛应用。熔点低的金属称为易熔金属(如锡、铅等),可以用来制造印刷铅字(铅与锡的合金)、熔丝(铅、锡、铋、镉的合金)和防火安全阀等零件。

### 3. 导热性

金属传导热量的能力称为导热性。金属导热能力的大小常用热导率(亦称导热系数) $\lambda$ 表示。金属材料的热导率越大,说明其导热性越好。一般说来,金属越纯,其导热能力越强。合金的导热能力比纯金属差。金属的导热能力以银为最好,铜、铝次之。常用金属的热导率见表 1-1。

表 1-1 常用金属的物理性能

金属名称	元素符号	密度(20℃) $\rho$ /[ $(\text{kg} \cdot \text{m}^3) \times 10^{-3}$ ]	熔点/℃	热导率 $\lambda$ /[ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$ ]	线胀系数(0~100℃) $\alpha_t / (10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	电阻率 $\rho$ /[ $(\Omega \cdot \text{m}) \times 10^{-8}$ ]
银	Ag	10.49	960.8	418.6	19.7	1.5
铝	Al	2.698	660.1	221.9	23.6	2.655
铜	Cu	8.96	1 083	393.5	17.0	1.67~1.68(20℃)
铬	Cr	7.19	1 903	67	6.2	12.9
铁	Fe	7.84	1 538	75.4	11.76	9.7
镁	Mg	1.74	650	153.7	24.3	4.47
锰	Mn	7.43	1 244	4.98(-192℃)	37	185(20℃)
镍	Ni	8.90	1 453	92.1	13.4	6.84
钛	Ti	4.508	1 677	15.1	8.2	42.1~47.8
锡	Sn	7.298	231.91	62.8	2.3	11.5
钨	W	19.3	3 380	166.2	4.6(20℃)	5.1

导热性好的金属其散热性也好,如在制造散热器、热交换器与活塞等零件时,就要注意选用导热性好的金属。在制定焊接、铸造、锻造和热处理工艺时,也必须考虑材料的导热性,防止金属材料在加热或冷却过程中形成较大的内应力,以免金属材料发生变形或开裂。

#### 4. 导电性

金属能够传导电流的能力,称为导电性。金属导电性的好坏,常用电阻率 $\rho$ 表示。取长1m、截面积为 $1\text{mm}^2$ 的物体,在一定温度下所具有的电阻数,叫做电阻率,单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率越小,导电性就越好。

导电性和导热性一样,是随合金化学成分的复杂化而减弱的,因而纯金属的导电性总比合金好。因此,工业上常用纯铜、纯铝做导电材料,而用导电性差的铜合金(康铜)和铁铬铝合金做电热元件。常用金属的电阻率见表1-1。

#### 5. 热膨胀性

金属材料随着温度变化而膨胀、收缩的特性称为热膨胀性。一般来说,金属受热时膨胀而体积增大,冷却时收缩而体积缩小。热膨胀性的大小用线胀系数 $\alpha_l$ 和体胀系数 $\alpha_v$ 来表示。体胀系数近似为线胀系数的3倍。常用金属的线胀系数见表1-1。

在实际工作中考虑热膨胀性的地方颇多,如铺设钢轨时,在两根钢轨衔接处应留有一定的空隙,以便留给钢轨在长度方向有膨胀的余地;轴与轴瓦之间要根据膨胀系数来控制间隙尺寸;在制定焊接、热处理、铸造等工艺时也必须考虑材料的热膨胀影响,做到减少工件的变形与开裂;测量工件的尺寸时也要注意热膨胀因素,做到减少测量误差。

#### 6. 磁性

金属材料在磁场中被磁化而呈现磁性强弱的能力称为磁性,通常用磁导率 $\mu(\text{H/m})$ 表示。根据金属材料在磁场中受到磁化程度的不同,金属材料可分为如下几种。

- 铁磁性材料——在外加磁场中,能强烈地被磁化到很大程度,如铁、镍、钴等。
- 顺磁性材料——在外加磁场中,呈现十分微弱的磁性,如锰、铬、钼等。
- 抗磁性材料——能够抗拒或减弱外加磁场磁化作用的金属,如铜、金、银、铅、锌等。

在铁磁性材料中,铁及其合金(包括钢与铸铁)具有明显磁性。镍和钴也具有磁性,但不如铁。铁磁性材料可用于制造变压器、电动机、测量仪表等;抗磁性材料则可用作要求避免电磁场干扰的零件和结构材料。

## 二、金属的化学性能

金属材料在机械制造中,不但要满足力学性能、物理性能的要求,同时也要求具有一定的化学性能,尤其是要求性能具有耐腐蚀、耐高温的机械零件,更应重视金属材料的化学性能。

### 1. 耐腐蚀性

金属材料在常温下抵抗氧、水及其他化学介质腐蚀破坏作用的能力,称为耐腐蚀性。金属材料的耐腐蚀性是一个重要的性能指标,尤其对在腐蚀介质(如酸、碱、盐、有毒气体等)中工作的零件,其腐蚀现象比在空气中更为严重。因此,在选择材料制造这些零件时,应特别注意金属材料的耐腐蚀性,并合理使用耐腐蚀性能良好的金属材料进行制造。

### 2. 抗氧化性

金属材料在加热时抵抗氧化作用的能力,称为抗氧化性。金属材料的氧化程度随温度升高而加速,例如,钢材在铸造、锻造、热处理、焊接等热加工作业时,氧化比较严重。氧化不仅造成材料过量的损耗,也会形成各种缺陷,为此常采取措施,避免金属材料发生氧化。

### 3. 化学稳定性

化学稳定性是金属材料的耐腐蚀性与抗氧化性的总称。金属材料在高温下的化学稳定性称为热稳定性。在高温条件下工作的设备(如锅炉、加热设备、汽轮机、喷气发动机等)上的部

件需要选择热稳定性好的材料来制造。

## 第二节 金属的力学性能

所谓力学性能是指金属在外力作用下所表现出来的性能。金属的力学性能是设计和制造机械零件或工具的主要依据,也是评定金属材料质量的重要判据。各种金属材料除对其成分作规定外,还要对其力学性能作必要的规定。制造各类构件的金属材料都必须满足规定的性能指标。因此熟悉和掌握金属的力学性能是非常重要的。

金属受力的性质不同,将表现出各种不同的行为,显示出各种不同的力学性能。金属的力学性能主要有强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

### 一、强度

金属材料在加工及使用过程中所受的外力称为载荷。根据载荷作用性质的不同,它可以分为静载荷、冲击载荷及循环载荷3种。静载荷是指大小不变或变化过程缓慢的载荷。

金属材料受到载荷作用而产生的几何形状和尺寸的变化称为变形。变形一般分为弹性变形和塑性变形两种。

金属受外力作用时,为保持其不变形,在材料内部产生与外力相对抗的力,称为内力。单位面积上的内力称为应力。金属受拉伸载荷或压缩载荷作用时,其横截面积上的应力按下式计算:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

式中  $\sigma$ ——应力, Pa。1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>。当面积用 mm<sup>2</sup> 时,则应力可用 MPa 为单位。1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup> = 10<sup>6</sup> Pa;

$F$ ——外力, N;

$S$ ——横截面积, m<sup>2</sup>。

金属在静载荷作用下,抵抗塑性变形或断裂的能力称为强度。强度的大小通常用应力来表示。

由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切、扭转等,所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度5种。一般情况下多以抗拉强度作为判别金属强度高低的依据。

金属的抗拉强度和塑性是通过拉伸试验测定的。拉伸试验的方法是将一定形状和尺寸的被测金属试样装夹在拉伸试验机上,缓慢施加轴向拉伸载荷,同时连续测量力和相应的伸长量,直至试样断裂,根据测得的数据,即可计算出有关的力学性能。

#### 1. 拉伸试样

在国家标准中,对试样的形状、尺寸及加工要求均有明确的规定,通常采用圆形拉伸试样,如图 1-1 所示。

图中  $d_0$  是试样的直径,  $l_0$  为标距长度。根据标距长度与直径之间的关系,试样可分为长试样 ( $l_0 = 10d_0$ ) 和短试样 ( $l_0 = 5d_0$ ) 两种。

#### 2. 力—伸长曲线

拉伸试验中得出的拉伸力与伸长量的关系曲线叫做力—伸长曲线,也称为拉伸曲线图。图 1-2 是低碳钢的力—伸长曲线,图中纵坐标表示力  $F$ , 单位为 N; 横坐标表示伸长量  $\Delta l$ , 单位

为 mm。图中明显地表现出下面几个变形阶段：

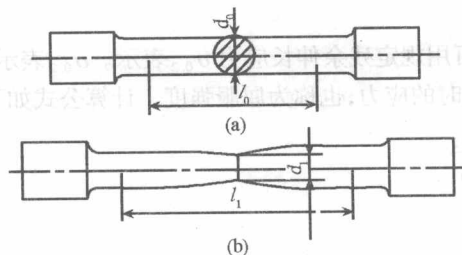


图 1-1 圆形拉伸试样  
(a) 拉伸前；(b) 拉伸后

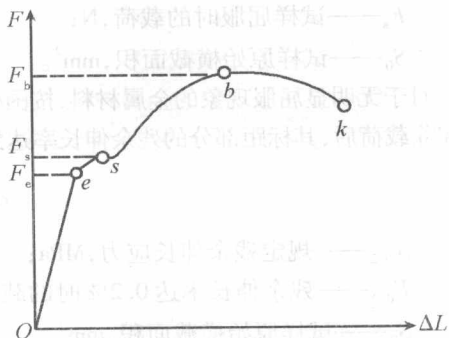


图 1-2 低碳钢的力—伸长曲线

(1)  $Oe$ ——弹性变形阶段 在力—伸长曲线图中,  $Oe$  段为一斜直线, 说明在该阶段试样的伸长量  $\Delta l$  与拉伸力  $F$  之间成正比例关系, 当拉伸力  $F$  增加时, 试样的伸长量  $\Delta l$  随之增加, 去除拉伸力后试样完全恢复到原始的形状及尺寸, 这种随载荷的存在而产生、随载荷的去除而消失的变形称为弹性变形。  $F_e$  为试样保持完全弹性变形的最大拉伸力。

(2)  $es$ ——屈服阶段 当拉伸力不断增加, 超过  $F_e$  再卸载时, 弹性变形消失, 一部分变形被保留下来, 即试样不能恢复原来的形状及尺寸, 这种不能随拉伸力的去除而消失的变形称为塑性变形。当拉伸力继续增加到  $F_s$  时, 力—伸长曲线出现平台或锯齿状, 说明在拉伸力基本不变的情况下, 试样的伸长量继续增加, 这种现象称为屈服。  $F_s$  称为屈服载荷。屈服后, 材料开始出现明显的塑性变形。

(3)  $sb$ ——冷变形强化阶段 在屈服阶段以后, 欲使试样继续伸长, 必须不断加载。随着塑性变形增大, 试样变形抗力也逐渐增加, 这种现象称为冷变形强化。在力—伸长曲线上表现为一段上升曲线, 此阶段试样的变形是均匀发生的。  $F_b$  为试样拉伸试验时的最大载荷。

(4)  $bk$ ——缩颈与断裂阶段(局部塑性变形阶段) 当载荷达到最大值  $F_b$  后, 试样上某个部位的直径发生局部收缩, 称为“缩颈”。由于试样缩颈处横截面积的减小, 试样变形所需的载荷也随之降低, 这时伸长主要集中于缩颈部位, 直至断裂。缩颈现象在力—伸长曲线上表现为一段下降的曲线。

工程上使用的金属材料, 多数没有明显的屈服现象。有些脆性材料, 不仅没有屈服现象, 而且也不产生“缩颈”, 如铸铁等。图 1-3 为铸铁的力—伸长曲线。

### 3. 强度指标

(1) 屈服点 在拉伸试验过程中, 载荷不增加(保持恒定), 试样仍能继续伸长时的应力称为屈服点, 用符号  $\sigma_s$  表示, 计算公式如下:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

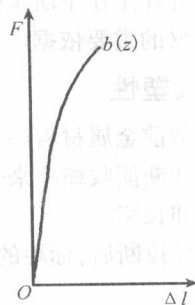


图 1-3 铸铁的力—伸长曲线

式中  $\sigma_s$ ——屈服点,MPa;

$F_s$ ——试样屈服时的载荷,N;

$S_0$ ——试样原始横截面积, $\text{mm}^2$ 。

对于无明显屈服现象的金属材料,按国标规定可用规定残余伸长应力  $\sigma_{0.2}$  表示。 $\sigma_{0.2}$  表示试样卸除载荷后,其标距部分的残余伸长率达到 0.2% 时的应力,也称为屈服强度。计算公式如下:

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0}$$

式中  $\sigma_{0.2}$ ——规定残余伸长应力,MPa;

$F_{0.2}$ ——残余伸长率达 0.2% 时的载荷,N;

$S_0$ ——试样原始横截面积, $\text{mm}^2$ 。

屈服点  $\sigma_s$  和规定残余伸长应力  $\sigma_{0.2}$  都是衡量金属材料塑性变形抗力的指标。机械零件在工作时如受力过大,则因过量的塑性变形而失效。当零件工作时所受的应力低于材料的屈服点或规定残余伸长应力,则不会产生过量的塑性变形。材料的屈服点或规定残余伸长应力越高,允许的工作应力也越高,则零件的截面尺寸及自身质量就可以越小。因此,材料的屈服点或规定残余伸长应力是机械零件设计的主要依据,也是评定金属材料性能的重要指标。

(2) 抗拉强度 材料在拉断前所能承受的最大应力称为抗拉强度,用符号  $\sigma_b$  表示。计算公式如下:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

式中  $\sigma_b$ ——抗拉强度,MPa;

$f_b$ ——试样拉断前承受的最大载荷,N;

$S_0$ ——试样原始横截面积, $\text{mm}^2$ 。

零件在工作中所承受的应力不允许超过抗拉强度,否则会产生断裂。 $\sigma_b$  也是机械零件设计和选材的重要依据。

## 二、塑性

断裂前金属材料产生永久变形的能力称为塑性。塑性指标也是由拉伸试验测得的,常用伸长率和断面收缩率来表示。

### 1. 伸长率

试样拉断后,标距的伸长与原始标距的百分比称为伸长率,用符号  $\delta$  表示。其计算公式如下:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中  $\delta$ ——伸长率,%;

$l_1$ ——试样拉断后的标距,mm;

$l_0$ ——试样的原始标距,mm。

必须说明,同一材料的试样长短不同,测得的伸长率是不同的。长、短试样的伸长率分别用符号  $\delta_{10}$  和  $\delta_5$  表示,习惯上  $\delta_{10}$  也常写成  $\delta$ 。

### 2. 断面收缩率

试样拉断后,缩颈处横截面积的缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率,用符号

$\psi$  表示。其计算公式如下:

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中  $\psi$ ——断面收缩率, %;

$S_0$ ——试样原始横截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$S_1$ ——试样拉断后缩颈处的横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

金属材料的伸长率和断面收缩率数值越大, 说明其塑性越好。塑性直接影响到零件的成型加工及使用。例如, 低碳钢的塑性好, 能通过锻压加工成型, 而灰铸铁塑性差, 不能进行压力加工。塑性好的材料, 在受力过大时, 首先产生塑性变形而不致发生突然断裂, 因此比较安全。所以大多数机械零件除要求具有较高的强度外, 还必须具有一定的塑性。

下面举例说明强度、塑性的计算方法。

例 有一个直径  $d_0 = 10 \text{ mm}$ ,  $l_0 = 100 \text{ mm}$  的低碳钢试样, 拉伸试验时测得  $F_s = 21 \text{ kN}$ ,  $\sigma_b = 29 \text{ kN}$ ,  $d_1 = 5.65 \text{ mm}$ ,  $l_1 = 138 \text{ mm}$ 。求此试样的  $\sigma_s$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ 。

解:

(1) 计算  $S_0$ ,  $S_1$

$$S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{3.14 \times 10^2}{4} = 78.5 \text{ mm}^2$$

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3.14 \times 5.65^2}{4} = 25.1 \text{ mm}^2$$

(2) 计算  $\sigma_s$ ,  $\sigma_b$

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} = \frac{21\ 000}{78.5} = 267.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} = \frac{29\ 000}{78.5} = 369.4 \text{ MPa}$$

(3) 计算  $\delta$ ,  $\psi$

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{138 - 100}{100} \times 100\% = 38\%$$

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% = \frac{78.5 - 25.1}{78.5} \times 100\% = 68\%$$

### 三、硬度

硬度是衡量金属软硬程度的一种性能指标, 是指金属抵抗局部变形, 特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。

硬度是各种零件和工具必须具备的性能指标。机械制造业所用的刀具、量具、模具等, 都应具备足够的硬度, 才能保证使用性能和寿命。有些机械零件如齿轮等, 也要求有一定的硬度, 以保证足够的耐磨性和使用寿命。因此硬度是金属材料重要的力学性能之一。

硬度值又可以间接地反映金属的强度及金属在化学成分、金相组织和热处理工艺上的差异, 而与拉伸试验相比, 硬度测试试验简便易行, 不破坏工件。因而硬度测试试验应用十分广泛。

硬度测试的方法很多, 最常用的有布氏硬度试验法、洛氏硬度试验法和维氏硬度试验法 3 种。

#### 1. 布氏硬度

(1) 布氏硬度的测试原理 使用一定直径的球体(钢球或硬质合金球),以规定的试验力压入试样表面,经规定保持时间后卸除试验力,然后用测量的表面压痕直径来计算硬度,如图 1-4 所示。

布氏硬度值是用球面压痕单位面积上所承受的平均压力来表示的。选择淬火钢球压头时,用符号 HBS 表示;选择硬质合金球压头时,用符号 HBW 表示。布氏硬度值按下式计算:

$$HBS(HBW) = \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

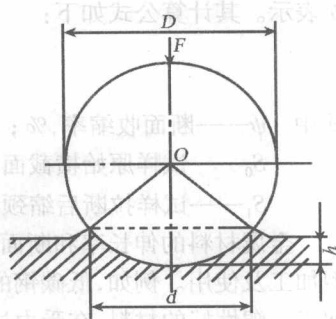


图 1-4 布氏硬度试验原理图

式中  $HBS(HBW)$ ——用钢球(或硬质合金球)试验时的布氏硬度值;

$F$ ——试验力, N;

$S$ ——球面压痕表面积,  $\text{mm}^2$ ;

$D$ ——球体直径, mm;

$d$ ——压痕平均直径, mm。

从上式中可以看出,当试验力  $F$ 、压头球体直径  $D$  一定时,布氏硬度值仅与压痕直径  $d$  的大小有关。 $d$  越小,布氏硬度值越大,也就是硬度越高。相反, $d$  越大,布氏硬度值越小,硬度也越低。

通常布氏硬度值不标出单位。在实际应用中,布氏硬度一般不用计算,而是用专用的刻度放大镜量出压痕直径  $d$ ,根据压痕直径的大小,再从专门的硬度表中查出相应的布氏硬度值,详见附录 1。

(2) 布氏硬度的表示方法 布氏硬度的表示方法:符号 HBS 或 HBW 之前的数字为硬度值,符号后面按以下顺序用数字表示试验条件:

- 球体直径;
- 试验力;
- 试验力保持的时间(10 ~ 15 s 不标注)。

例如 170HBS10/1000/30 表示用直径 10 mm 的钢球,在 9 807 N 的试验力作用下,保持 30 s 时测得的布氏硬度值为 170。530HBW5/750 表示用直径 5 mm 的硬质合金球,在 7 355 N 的试验力作用下,保持 10 ~ 15 s 时测得的布氏硬度值为 530。

做布氏硬度试验时,压头球体的直径( $D$ )、试验力( $F$ )及试验力保持的时间( $t$ ),应根据被测金属材料的种类、硬度值的范围及金属的厚度进行选择,见表 1-2。

(3) 适用范围 布氏硬度主要适用于测定灰铸铁、有色金属、各种软钢等硬度不是很高的材料。



### 测量布氏硬度的优缺点

测量布氏硬度采用的试验力大,球体直径也大,因而压痕直径也大,因此能较准确地反映出金属材料的平均性能。另外,由于布氏硬度与其他力学性能(如抗拉强度)之间存在着一定的近似关系,因而在工程上得到广泛应用。



测量布氏硬度的缺点是操作时间较长,对不同材料需要不同压头和试验力,压痕测量较费时;在进行高硬度材料试验时,由于球体本身的变形会使测量结果不准确。因此,用钢球压头测量时,材料硬度值必须小于450;用硬质合金球压头时,材料硬度值必须小于650。又因其压痕较大,不宜于测量成品及薄件。

表 1-2 布氏硬度试验的技术条件

材料	布氏硬度	球直径/mm	$0.12F/D^2$	试验力/N	试验力保持时间/s	注意事项
铁金属	$\geq 140$	10		29 420	10	试样厚度应不小于压痕深度的 10 倍。试验后,试样边缘及背面应无可见变形痕迹; 压痕中心距试样边缘距离应不小于压痕直径的 2.5 倍; 相邻两压痕中心距离不应小于压痕直径的 4 倍
		5	30	7 355		
		2.5		1 839		
	< 140	10		9 807	10 ~ 15	
		5	10	2 452		
		2.5		613		
非铁金属	$\geq 130$	10		29 420	30	
		5	30	7 355		
		2.5		1 839		
	36 ~ 130	10		9 807	30	
		5	10	2 452		
		2.5		613		
	8 ~ 35	10		2 452	60	
		5	2.5	613		
		2.5		153		

2. 洛氏硬度

(1) 洛氏硬度测试原理 洛氏硬度试验采用顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或直径为 1.588 mm 的淬火钢球压头,在初试验力和主试验力的先后作用下,压入金属表面后,经规定保持时间后卸除主试验力,以测量的压痕深度来计算洛氏硬度值。

图 1-5 是用金刚石压头进行洛氏硬度试验的示意图。测量时,先加初试验力  $F_0$ ,压入深度为  $h_1$ ,目的是为消除因零件表面不光滑而造成的误差。然后再加主试验力  $F_1$ ,在总试验力  $(F_0 + F_1)$  的作用下,压头压入深度为  $h_2$ 。卸除主试验力,由于金属弹性变形的恢复,使压头回升到  $h_3$  的位置,则由主试验力所引起的塑性变形的压痕深度  $e = h_3 - h_1$ 。显然,  $e$  值越大,被测金属的硬度越低,为了符合硬度测试结果数值越大,硬度越高的习惯,将一个常数  $K$  减去  $e$  来表示硬度的大小,并用 0.002 mm 压痕深度作为一个硬度单位,由此获得洛氏硬度值,用符号 HR 表示。即洛氏硬度值按下列公式计算:

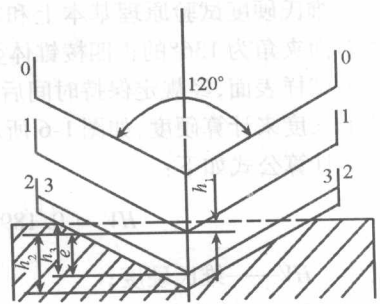


图 1-5 洛氏硬底试验原理图

$$HR = \frac{K - e}{0.002}$$

式中 HR——洛氏硬度值;

K——常数。用金刚石圆锥体压头进行试验时,  $K$  为 0.2 mm; 用钢球压头进行试验时,  $K$  为 0.26 mm;

$e$ ——压痕深度, mm。