

# 工程材料 及成形技术基础

第4版

选题编辑 黄成群  
责任编辑 黄成群  
封面设计 刘俊霞

定价: 49.80 元



工程材料及成形技术基础

第4版

主编 亓四华

中国科学技术大学出版社



# 工程材料 及成形技术基础

第4版

主编 亓四华

中国科学技术大学出版社



“十四五”职业教育国家规划教材

# 工程材料 及成形技术基础

## 第4版

主 编 亓四华

副主编 王小平 安 荣

编写人员（以姓氏笔画为序）

王小平 王立跃 王菊线

亓四华 安 荣 张 炳

张新建 顾 伟

中国科学技术大学出版社

## 内 容 简 介

本书基于应用型教育的要求,强调对学生应用能力和实践能力的培养,在对传统的“工程材料及成形技术基础”课程体系进行改造、重组、充实的过程中,根据工程材料成形技术与现代机械制造技术的发展实际,建立现代应用型教育大材料课程体系的全新概念。

全书共 11 章,其中第一、二章讲述工程材料的性能、材料的组成和内部结构特征;第三、四章讲述金属材料相图的建立和热处理技术;第五至第七章讲述黑色金属和有色金属材料、非金属材料及新型材料;第八章讲述材料的选择及质量控制;第九至第十一章讲述铸造、锻压、焊接成形技术。

本书可作为高职高专院校机械类、数控类、模具类、机电类及近机类各专业的通用教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程材料及成形技术基础 / 亓四华主编. -- 4 版. -- 合肥 : 中国科学技术大学出版社, 2025. 5. -- ISBN 978-7-312-06349-7

I . TB3

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20259VK337 号

### 工程材料及成形技术基础

GONGCHENG CAILIAO JI CHENGXING JISHU JICHIU

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号

<http://press.ustc.edu.cn>

<https://zgkxjsdxcbs.tmall.com>

印刷 安徽省瑞隆印务有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 17.25

字数 441 千

版次 2008 年 9 月第 1 版 2026 年 1 月第 4 版

印次 2026 年 1 月第 13 次印刷

定价 49.80 元

# 前　　言

本书为“十四五”职业教育国家规划教材。“工程材料及成形技术基础”是高等工科职业技术院校机械类专业必修的一门重要的技术基础课程。该课程主要介绍工程材料及成形技术的基础理论和相关工艺知识,是学生了解和认知机械制造的基础平台。

本书在编写过程中,力求体现职业技术教育特色,注重职业岗位的需求,贯彻“必需、够用”的原则,内容上力求少而精,突出“课程思政、案例应用”,注重理论与实际的结合。以突出机械产品制造对工程材料选择和材料成形技术的特殊需求为特色,以材料的成分—工艺—组织—性能—应用为主线,聚焦典型产品的材料选择和成形工艺。

本书通过“课程思政、案例应用”融入党的二十大精神,以我国在材料领域取得的突出成果为切入点,激发学生的爱国热情,增强其民族自豪感,激励其为国家振兴、民族强盛而努力学习,让学生真正具有共产主义远大理想和中国特色社会主义共同理想,能够坚定不移听党话、跟党走,成为有理想、敢担当、能吃苦、肯奋斗的时代青年。

本书系统地阐述了工程材料及成形技术的基本原理、基本知识和工程应用的内容。主要内容包括:工程材料及成形技术在制造业中的地位与作用,工程材料及成形技术的发展,工程材料的力学性能,材料科学的基础知识,热处理原理及各种热处理工艺方法,热处理在机械零件生产过程中的作用,工程材料的分类及编号,各种工程材料成分、组织、性能特点及用途,工程材料的成形方法(包括铸造成形、压力加工成形和焊接成形)等。

为了保持教材的先进性,书中引入了较多的新材料与新技术等知识,并采用最新国家标准。为便于学生复习,提高学习成效,全书每章均附有习题。

本书依托“学银在线”,目前已搭建了课程教学平台,可扫码登录及获取相关教学资源:



本书共分 11 章,由安徽绿海商务职业学院亓四华担任主编,参加本书编写的有:亓四华(前言、绪论、第八章)、安徽职业技术学院安荣(第一章、第五章)、安徽职业技术学院



王菊线(第二章)、安徽机电职业技术学院王立跃(第三章、第九章)安徽机电职业技术学院顾伟(第四章)、安徽职业技术学院张焱(第六章、第七章)、安徽机电职业技术学院张新建(第十章)、安徽机电职业技术学院王小平(第十一章),全书由亓四华统稿。

本书在编写过程中参考并引用了国内有关图书及其他相关文献,在此谨向原作者表示诚挚的感谢!

本书涉及的专业面较广,由于编者水平有限,编写时间仓促,书中的疏漏和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正(联系邮箱:[ustcp@163.com](mailto:ustcp@163.com))。

#### 编 者

# 目 录

前 言 .....	( 1 )
绪 论 .....	( 1 )
一、工程材料及成形技术在制造业中的地位与作用 .....	( 1 )
二、工程材料及成形技术的发展 .....	( 3 )
三、本课程的特点、主要内容及教学要求 .....	( 6 )
<b>第一章 工程材料的主要性能 .....</b>	<b>( 7 )</b>
第一节 强度 .....	( 7 )
一、屈服强度 .....	( 9 )
二、抗拉强度 .....	( 10 )
第二节 塑性 .....	( 10 )
一、断后伸长率 .....	( 10 )
二、断面收缩率 .....	( 11 )
第三节 硬度 .....	( 11 )
一、布氏硬度(HB) .....	( 11 )
二、洛氏硬度(HR) .....	( 12 )
三、维氏硬度(HV) .....	( 13 )
第四节 冲击韧性 .....	( 14 )
第五节 疲劳强度 .....	( 16 )
第六节 金属材料的物理、化学和工艺性能 .....	( 17 )
一、物理性能 .....	( 17 )
二、化学性能 .....	( 18 )
三、工艺性能 .....	( 18 )
习题 .....	( 19 )
思政案例 .....	( 19 )
<b>第二章 金属的晶体结构与结晶 .....</b>	<b>( 21 )</b>
第一节 金属的晶体结构 .....	( 21 )
一、理想晶体结构 .....	( 21 )
二、金属的实际晶体结构 .....	( 23 )
第二节 金属的结晶过程和同素异晶转变 .....	( 25 )
一、金属的结晶过程 .....	( 25 )



二、金属的同素异晶转变 .....	( 27 )
第三节 合金的晶体结构 .....	( 28 )
一、基本概念 .....	( 28 )
二、固态合金的相结构 .....	( 29 )
习题 .....	( 31 )
思政案例 .....	( 31 )
<b>第三章 二元合金相图及应用 .....</b>	<b>( 34 )</b>
第一节 相图的建立 .....	( 34 )
第二节 匀晶相图 .....	( 35 )
一、相图分析 .....	( 35 )
二、合金的结晶过程 .....	( 35 )
三、枝晶偏析 .....	( 36 )
第三节 共晶相图 .....	( 36 )
一、相图分析 .....	( 36 )
二、典型合金的结晶过程 .....	( 37 )
第四节 其他相图 .....	( 38 )
一、二元共析相图 .....	( 38 )
二、形成稳定化合物的相图 .....	( 39 )
第五节 相图与性能的关系 .....	( 39 )
一、合金的使用性能与相图的关系 .....	( 40 )
二、合金的工艺性能与相图的关系 .....	( 40 )
第六节 铁碳合金相图 .....	( 41 )
一、铁碳合金的基本组织 .....	( 41 )
二、铁碳合金相图分析 .....	( 42 )
三、铁碳合金的成分、组织和性能的变化规律 .....	( 48 )
四、铁碳合金相图的应用 .....	( 49 )
习题 .....	( 50 )
思政案例 .....	( 50 )
<b>第四章 钢的热处理 .....</b>	<b>( 52 )</b>
第一节 钢的热处理原理 .....	( 52 )
一、基本概念 .....	( 52 )
二、钢在加热时的组织转变 .....	( 53 )
三、钢在冷却时的组织转变 .....	( 54 )
第二节 钢的普通热处理 .....	( 62 )
一、退火 .....	( 62 )
二、正火 .....	( 64 )
三、淬火 .....	( 65 )
四、回火 .....	( 67 )



第三节 钢的表面热处理与化学热处理 .....	( 68 )
一、表面淬火 .....	( 68 )
二、化学热处理 .....	( 70 )
第四节 钢的热处理新技术 .....	( 71 )
一、可控气氛热处理 .....	( 71 )
二、真空热处理 .....	( 72 )
三、离子渗扩热处理 .....	( 72 )
四、形变热处理 .....	( 72 )
习题 .....	( 73 )
思政案例 .....	( 73 )
 第五章 钢铁材料 .....	( 75 )
第一节 杂质元素对钢材性能的影响 .....	( 75 )
一、硅、锰的影响 .....	( 75 )
二、硫的影响 .....	( 75 )
三、磷的影响 .....	( 76 )
四、氧、氢、氮的影响 .....	( 76 )
第二节 非合金钢 .....	( 77 )
一、非合金钢的分类 .....	( 77 )
二、非合金钢 .....	( 77 )
第三节 合金钢 .....	( 83 )
一、合金元素在钢中的存在形式及主要作用 .....	( 83 )
二、合金钢的分类和牌号 .....	( 85 )
三、合金结构钢 .....	( 86 )
四、合金工具钢 .....	( 94 )
五、特殊性能钢 .....	( 102 )
第四节 铸铁 .....	( 106 )
一、铸铁的成分和特点 .....	( 106 )
二、铸铁的石墨化 .....	( 107 )
三、常用铸铁 .....	( 108 )
习题 .....	( 115 )
 第六章 有色金属及其合金 .....	( 117 )
第一节 铝及铝合金 .....	( 117 )
一、纯铝 .....	( 118 )
二、铝合金的分类及强化方法 .....	( 118 )
三、常用铝合金 .....	( 120 )
第二节 铜及铜合金 .....	( 123 )
一、纯铜 .....	( 124 )
二、黄铜 .....	( 124 )



三、白铜 .....	(127)
四、青铜 .....	(128)
第三节 钛及钛合金 .....	(130)
一、纯钛 .....	(130)
二、钛合金 .....	(130)
第四节 滑动轴承合金 .....	(131)
一、滑动轴承的工作条件及对滑动轴承合金的性能要求 .....	(131)
二、滑动轴承合金的理想组织 .....	(131)
三、常用的滑动轴承合金 .....	(132)
第五节 粉末冶金材料 .....	(133)
一、粉末冶金工艺简介 .....	(133)
二、粉末冶金的应用 .....	(133)
三、硬质合金 .....	(133)
四、含油轴承材料 .....	(134)
习题 .....	(134)
 第七章 非金属材料与新型材料 .....	(136)
第一节 高分子材料 .....	(136)
一、高分子材料基本概念 .....	(136)
二、高聚物的人工合成 .....	(136)
三、高聚物分子的形态 .....	(137)
四、有机高分子材料的组成及性能特点 .....	(137)
第二节 工程塑料 .....	(138)
一、塑料的基本组成 .....	(139)
二、塑料的分类 .....	(139)
三、塑料的性能 .....	(140)
四、常用工程塑料 .....	(140)
五、塑料制品的成形方法 .....	(143)
第三节 合成橡胶 .....	(144)
一、橡胶的特性与应用 .....	(144)
二、橡胶的组成 .....	(145)
三、橡胶的分类 .....	(145)
四、常用橡胶 .....	(145)
第四节 胶黏剂与胶接技术 .....	(146)
一、胶黏剂的组成 .....	(146)
二、胶黏剂的分类 .....	(147)
三、常用胶黏剂 .....	(147)
四、胶接技术 .....	(149)
五、胶接的特点与应用 .....	(150)
第五节 合成纤维 .....	(151)



一、纤维的分类 .....	(151)
二、纤维的特点和用途 .....	(152)
三、合成纤维的生产工艺 .....	(152)
四、常用合成纤维 .....	(152)
第六节 陶瓷材料 .....	(153)
一、陶瓷的分类 .....	(153)
二、陶瓷材料制作工艺 .....	(153)
三、陶瓷材料的组织结构 .....	(154)
四、陶瓷材料的性能特点 .....	(155)
五、常用工程结构陶瓷的种类、性能和用途 .....	(155)
第七节 复合材料 .....	(156)
一、复合材料的种类 .....	(156)
二、复合材料的性能特点 .....	(157)
三、复合材料简介 .....	(158)
第八节 其他新型材料 .....	(160)
一、高温材料 .....	(160)
二、形状记忆材料 .....	(161)
三、非晶态材料 .....	(161)
四、超导材料 .....	(161)
五、纳米材料 .....	(162)
习题 .....	(163)
 第八章 工程材料的选择 .....	(164)
第一节 机械零件的失效分析 .....	(164)
一、基本概念 .....	(164)
二、零件的失效形式 .....	(164)
三、失效的基本因素 .....	(166)
四、失效分析的步骤及方法 .....	(167)
第二节 工程材料的选材原则 .....	(167)
一、保证使用性能足够的原则 .....	(168)
二、工艺性能良好的原则 .....	(169)
三、经济性合理的原则 .....	(171)
第三节 典型零件材料的选材举例 .....	(171)
一、轴类零件 .....	(171)
二、齿轮类零件的选材 .....	(173)
三、刀具的选材 .....	(174)
习题 .....	(175)
 第九章 铸造 .....	(177)
第一节 合金的铸造性能 .....	(177)



一、合金的流动性及充型能力 .....	(178)
二、铸件的凝固方式 .....	(180)
三、铸造合金的收缩 .....	(180)
四、铸造应力、变形与裂纹 .....	(183)
第二节 砂型铸造 .....	(184)
一、砂型铸造的工艺过程 .....	(184)
二、砂型铸造造型方法 .....	(184)
三、浇注系统的确定 .....	(187)
四、铸造工艺设计 .....	(188)
第三节 特种铸造 .....	(194)
一、熔模铸造 .....	(194)
二、金属型铸造 .....	(195)
三、压力铸造 .....	(196)
四、低压铸造 .....	(197)
五、离心铸造 .....	(198)
六、铸造方法的选择 .....	(199)
第四节 铸件结构工艺性 .....	(200)
一、合金铸造性能对铸件结构设计的要求 .....	(200)
二、铸造工艺对铸件结构设计的要求 .....	(201)
第五节 铸造新技术与发展趋势 .....	(204)
一、造型技术的发展 .....	(204)
二、快速原型制造技术 .....	(205)
三、计算机在铸造中的应用 .....	(205)
习题 .....	(206)
 第十章 锻压 .....	(207)
第一节 锻压加工工艺基础 .....	(208)
一、金属的锻造性能 .....	(208)
二、锻造比及流线组织 .....	(208)
三、金属的塑性变形规律 .....	(209)
第二节 常用锻造方法 .....	(210)
一、自由锻 .....	(211)
二、模锻 .....	(216)
第三节 板料冲压 .....	(218)
一、板料冲压特点及应用 .....	(218)
二、冲裁 .....	(219)
三、拉深 .....	(219)
四、弯曲 .....	(220)
五、成形 .....	(221)
六、板料冲压件的结构工艺性 .....	(222)



第四节 现代塑性加工与发展趋势 .....	(224)
一、精密模锻 .....	(224)
二、挤压 .....	(225)
三、轧制成形 .....	(227)
习题 .....	(228)
<b>第十一章 焊接 .....</b>	<b>(230)</b>
第一节 焊接概述 .....	(230)
一、焊接的分类 .....	(230)
二、焊接的特点 .....	(230)
第二节 焊接基础知识 .....	(231)
一、熔焊冶金过程 .....	(231)
二、焊接接头组织和性能 .....	(232)
三、焊接应力与变形 .....	(234)
第三节 常用焊接方法 .....	(239)
一、手工电弧焊 .....	(240)
二、埋弧自动焊 .....	(243)
三、气体保护焊 .....	(245)
四、压焊与钎焊 .....	(247)
第四节 常用金属材料的焊接 .....	(252)
一、金属材料的焊接性 .....	(252)
二、碳钢及低合金结构钢的焊接 .....	(253)
三、不锈钢的焊接 .....	(254)
四、铸铁的焊补 .....	(255)
五、非铁金属的焊接 .....	(256)
第五节 焊接结构工艺性 .....	(257)
一、焊接结构的材料选择 .....	(257)
二、焊接方法的选择 .....	(258)
三、焊接接头的工艺设计 .....	(258)
第六节 现代焊接技术与发展趋势 .....	(261)
一、离子弧焊接与切割 .....	(261)
二、激光焊接 .....	(261)
三、电子束焊接 .....	(262)
四、焊接技术的发展趋势 .....	(262)
习题 .....	(263)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(264)</b>



# 绪 论

## 一、工程材料及成形技术在制造业中的地位与作用

制造业是工业时代国民经济增长的源泉,综观发达国家经济高速发展的进程,制造业均起着关键的作用。目前制造业在各国民经济中仍然占有十分重要的地位,特别是制造技术的高低已成为衡量一个国家核心竞争力的标准之一,而制造技术的提高离不开工程材料的发展和材料成形技术的进步。

众所周知,材料是人们生活和生产赖以进行的物质基础,而任何材料在被人们制造成有用物品(无论是生活用品还是生产工具)的过程中,都要经过成形加工处理。任何设备或机器,无论是飞机、船舶、火车、大型发电机组、各种流水生产线等大型工具和装备,还是微电子产品、仪器、仪表等细微的零件产品;无论是工业、农业、能源、化工、建筑、军工等领域的工艺装备,还是各种民用、家用电器,都是由许多零件组装而成的。这些零件无一例外的都是由具备一定使用性能和工艺性能的工程材料经过若干工序加工成形的。

机械制造过程一般是先根据零件的服役条件,选择满足使用性能和工艺性能要求的工程材料,然后经过铸造、锻压或焊接等成形工艺方法将材料制作成零件的毛坯(或半成品),再经切削加工制成形状、尺寸和表面粗糙度符合设计要求的零件,在此过程中根据需要还要适时地进行热处理,以改进毛坯或零件的工艺性能和使用性能,最后把质量合格的各种零件装配成机器,其过程如图 0-1 所示。

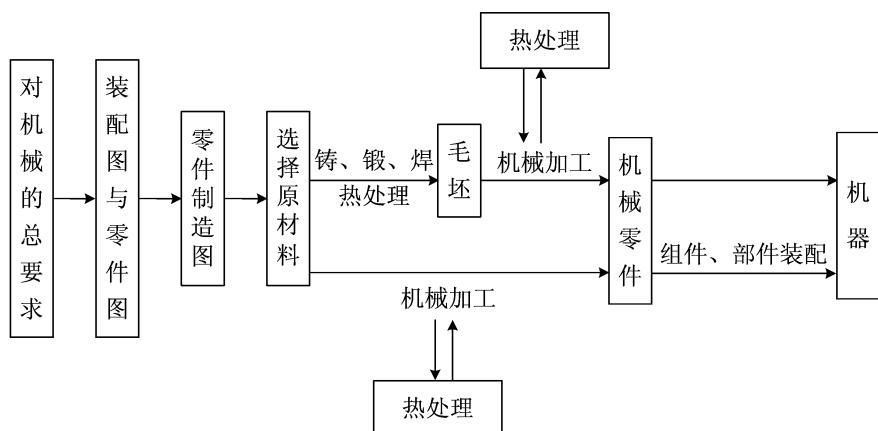


图 0-1 机械制造的一般过程

由上可知,机械零件的生产制造过程是把设计者的思想转变为实际产品的过程,因此必须着重考虑以下两方面的问题:首先必须考虑选择何种工程材料来制造,通常由设计者根据零件的工作条件、工作环境、价格等因素作出选择;其次考虑选择何种方法来加工成形,目的



是以较高的效率、较低的成本获得符合设计要求的毛坯或零件。工程材料的选择是进行毛坯或零件生产的前提,而合理的加工成形工艺是获得最终的毛坯或零件产品的必经阶段,两者是相互联系、密不可分的。而且材料的选择是否得当、成形方法是否合理直接决定了技术上是否可行、质量上是否可靠、成本是否低廉、用户是否满意。

如今,由各种工程材料制造的大量机械零件和工程结构件被用于机械、能源、化工、建筑、船舶、车辆、仪器仪表、航空航天等工程领域,这些工程材料是制造业发展的重要物质基础。因为在各种装备研制过程中,材料本身的性质是装备中各种机械零件和工程结构件使用性能达到其设计要求的基本保证,而且越是先进的装备对材料的性能要求越高。据估算,燃气涡轮发动机效率与性能的提高大约有 50% 来自材料的改进;飞机性能的提高,材料的贡献所占比例达 70% 左右;汽车每减重 100kg,每升油就多行驶 0.5km。也正是由于材料在各种装备研究制造过程中的基础和支撑作用,各国在制定国家与产业发展计划时,都将新材料开发与技术应用作为优先发展的关键技术。

材料成形技术是一门研究将材料如何加工成毛坯或零件,并研究如何保证和提高零件的安全可靠度和寿命的技术科学。传统的材料成形技术有液态成形(铸造)、塑性成形(锻造)、连接成形(焊接)等方法,随着非金属材料和复合材料的广泛应用,非金属材料的成形等工艺技术也获得了快速发展。在大部分的材料成形过程中,材料除了发生几何尺寸的变化外,还会发生成分、组织结构及性能的变化。因此,材料成形技术的任务不仅要研究如何使机器零件获得必要的几何尺寸,更重要的是通过一定的技术措施使加工的零件获得需要的成分、组织结构及性能,从而保证机器零件的安全可靠度和寿命。因此,材料成形技术既包括获得零件形状和尺寸的工艺过程,如铸、锻、焊等,也包括保证成分、组织结构及性能的热处理工艺。

材料科学及材料成形技术在国民经济各个部门和行业都有着广泛的应用,尤其对于制造业来说更是具有举足轻重的作用。制造业是对所有生产和装配制成品的企业群体的总称,包括机械制造、运输工具制造、电气设备、仪器仪表、食品工业、服装、家具、化工、建材、冶金等,它在整个国民经济中占有很大的比重。统计资料显示,近年来我国制造业占国民生产总值(GDP)的比例已达 24.9%,因此,制造技术的高低是一个国家综合经济实力的象征。在高科技时代,国民经济的发展越来越依靠先进的制造技术,材料科学及材料成形技术是制造技术的重要组成部分,在国民经济中占有十分重要的地位,并且在一定程度上代表着一个国家的工业和科技发展水平。

据统计,占全世界总产量将近一半的钢材是通过焊接制成立构件或产品后投入使用的;在机床和通用机械中铸件质量占 70%~80%;农业机械中铸件质量占 40%~70%;汽车中铸件质量约占 20%,锻件质量约占 70%;飞机上的锻件质量约占 85%;发电设备中主要零件如主轴、叶轮、转子等均为锻件制成;家用电器和通信产品中 60%~80% 的零部件是冲压件和塑料成形件。再从我们熟悉的交通工具——轿车的构成来看,发动机中的缸体、缸盖、活塞等一般都是铸造而成;连杆、传动轴、车轮轴等是锻造而成;车身、车门、车架、油箱等是经冲压和焊接制成的;车内装饰件、仪表盘、车灯罩、保险杠等是塑料成形制品;轮胎等是橡胶成形制品。因此,可以毫不夸张地说,没有先进的工程材料及材料成形技术,就没有现代制造业。



## 二、工程材料及成形技术的发展

### (一) 工程材料的发展及应用

工程材料就是人类用来制作各种产品的物质,先于人类而产生,是人类生产和生活的物质基础。人类社会的发展史表明,生产中使用的材料的性质直接反映了人类社会的文明水平,材料的更新与发展促进了人类社会的进步,其中先进材料是工业革命的先导,是一个国家综合国力的重要标志。一种新材料的出现和应用,孕育着一项或多项技术,甚至导致若干领域的技术革命,从而大大加速了社会的发展进程,并给社会生产和人们的生活带来巨大的变化。所以,历史学家根据制造生产工具的材料,将人类生活时代划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代。当今,人类正跨进人工合成材料的新时代。

大约二三百万年前人类最先使用的工具是石头,在从古猿到原始人的漫长进化过程中,石器一直是人类使用的主要工具之一。当时,制造石器的原料大都为燧石和石英石,因为这些石头坚硬,能纵裂成薄片,崩解为锋刃,容易加工,而且资源丰富。约 50 万年前人类学会了用火,在六七千年以前的原始社会末期,我们的祖先开始用火烧制陶器。新石器时代的仰韶文化和龙山文化时期,制陶技术已经发展到能在氧化性窑中 950℃下烧制红陶;在还原性炉气中 1050℃下烧制薄胎黑陶与白陶。3000 多年前的殷、周时期发明了釉陶,炉窑温度提高到 1200℃。到东汉出现了瓷器,并于 9 世纪传至非洲东部和阿拉伯世界,13 世纪传到日本,15 世纪传至欧洲。瓷器成为中国文化的象征,对世界文明产生了很大的影响。

而制陶技术的发展又为炼铜准备了必要的条件。我国青铜的冶炼在夏(公元前 2140—前 1711 年)以前就开始了,虽然晚于古埃及和西亚,但发展较快,到殷、西周时期已发展到较高的水平,普遍用于制造各种工具、食器、兵器。河南安阳晚商遗址出土的后母戊鼎重达 875kg,是迄今为止世界上最古老的大型青铜器。从湖北江陵楚墓中发掘出的两把越王勾践的宝剑,长 55.6cm,至今仍锋利异常,是我国古青铜器的杰作。湖北隋县出土的战国青铜编钟是我国古代文化艺术高度发达的见证。春秋战国时期,《周礼·考工记》中关于青铜“六齐”的科学论述,反映了我们的祖先已经认识了青铜的性能与成分之间的关系,他们在青铜材料的冶炼和应用方面达到了当时世界的高峰,创造了灿烂的青铜文化。

由青铜器过渡到铁器是生产工具的重大发展。我国从春秋战国时期(公元前 770—前 221 年)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砂造型水平进入铁模铸造的高级阶段。到了西汉时期,炼铁技术又有了很大的提高,采用煤作炼铁的燃料,要比欧洲早 1700 多年。在河南巩县汉代冶铁遗址中,发掘出 20 多座冶铁炉和锻炉,炉型庞大,结构复杂,并有鼓风装置和铸造坑,可见当年生产规模之壮观。我国古代创造了三种炼钢方法:第一种是从矿石中直接炼出自然钢,用这种钢做的剑在东方各国享有盛誉,东汉时传入了欧洲;第二种是西汉时期的经过“百次”冶炼锻打的百炼钢;第三种是南北朝时期生产的灌钢。我国先炼铁后炼钢的两步炼钢技术,要比其他国家早 1600 多年。从西汉到明朝的 1000 多年间,我国钢铁生产技术远远超过了世界各国。相应的,其他金属材料的工艺技术也都有高度的发展,留下了大量的珍贵文物和历史文献。

在材料领域中还应该提到的是丝绸。丝绸是一种天然高分子材料,它在我国有着悠久的历史,于 11 世纪传到波斯、阿拉伯、埃及,并于 1470 年传到意大利的威尼斯,进入欧洲。

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过辉煌的成就,为人类



文明作出了巨大的贡献。

铁器在公元前 1000 多年以前的亚洲大地上出现以后,逐渐在文明古国的巴比伦、埃及和希腊也得到了广泛的应用。经过许多世纪的发展,西欧和俄国后来居上,创造了不少冶炼技艺,使以钢铁为代表的材料生产和应用跨进一个新的阶段。但是,由于材料的问题太复杂,直到 17 世纪的科学革命和 18、19 世纪的工业革命时期,人们对材料的认识仍是非理性的,还主要停留在工匠、艺人的经验技术水平上。

18 世纪以后,由于工业迅速发展,对材料特别是钢铁的需求急剧增长。因此,为适应这一需求,在化学、物理、材料力学等学科的基础上,产生了一门新的科学——金属学。它明确地提出了金属的外在性能决定于内部结构的概念,并以研究它们之间的关系为自己的主要任务。100 多年来,由于显微镜、X 射线技术、电子显微镜等新仪器和新技术的相继涌现和发展,金属学得到了长足的进步。

进入 20 世纪以来,随着现代科学技术和生产的飞跃发展,材料、能源与信息作为现代技术的三大支柱发展格外迅猛。在材料领域中非金属的发展尤其神速,而以人工合成高分子材料的发展最快。从 20 世纪 60 年代到 70 年代,有机合成材料的产量以每年 14% 的速度增长,而金属材料产量的年增长率仅 4%。到 70 年代中期,全世界的有机合成材料和钢的产量的体积已经相等,可作为结构材料代替钢铁。目前,正在研究和发展具有良好导电性能和耐高温的有机合成材料。另外,陶瓷材料除了具有一些特殊的性能(如可作光导纤维、激光晶体等)外,它的脆性和抗热震性能正在逐步获得改善,可望作为高温结构材料使用,所以工程结构已不再只使用金属材料了。近 20 多年来,金属与非金属相互渗透,并且相互结合,组成了一个完整的材料体系,材料科学也就在金属学、高分子科学和陶瓷学等的基础上很快地发展起来了,其任务也是揭示材料的成分、结构和性能之间的关系,但研究对象却是一切固体材料。

18、19 世纪钢铁材料的大规模使用,促进了机械制造业的飞速发展。进入 20 世纪以后,半导体材料的工业化生产及光纤技术的进步,使人类进入了信息时代。

## (二) 材料成形技术的发展及作用

材料成形工艺是伴随着人类使用材料的历史而发展起来的。在人类使用材料之初,通过将天然材料石头打制成石器和将陶土烧制成陶器,就诞生了最原始的材料成形工艺。随着人们对金属材料(青铜、钢铁等)的使用,相应地产生了铸造、锻造、焊接等金属成形加工技术。

铸造技术在我国源远流长,并有很高的水平,形成了闻名于世的以泥范(砂型)、铁范(金属型)和石蜡铸造为代表的中国古代三大铸造技术。据考证,早在 3000 年前的商周,我国已发明了古代石蜡铸造法;战国中期,出现了金属型铸造;隋唐以后,我国已掌握了大型铸件的生产技术。我国河北沧州的五代铁狮、湖北当阳的北宋铁塔等,都是世界著名的巨型铸件;北京故宫、颐和园内精美的铜狮、铜鹤、铜龟和铜亭构件等,则是我国明清时期石蜡铸造的代表作。

我国的锻造技术和焊接技术也有着悠久的历史。在河北藁城出土的商朝铁刃铜钺是目前我国发现的最早的锻件,它表明我国在 3000 年前就有了锻造和锻焊技术。到了战国时期,锻造工艺已普遍应用于刀剑和一些日常用具的制作中。

在河南辉县战国墓中发掘出的殉葬铜器,其耳和足是用钎焊方法与本体连接的。我国还是最早使用黏结技术的国家,在陕西临潼秦始皇陪葬坑发现的铜车马中,金银饰件的固定



用的是一种无机黏结剂。

我国明朝科学家宋应星所著《天工开物》一书中,记载了冶铁、炼铜、铸钟、锻铁、焊接、淬火等多种金属成形和改性方法及生产经验,是世界上有关金属加工工艺最早的科学著作之一。

我国古代在材料加工工艺方面的科技水平曾在世界上长期居于领先地位,但在封建社会的后期,社会和技术发展出现了停滞。

18世纪和19世纪,以蒸汽机的发明和电气技术的应用为代表的第一次和第二次工业革命,极大地改进了材料成形生产的能源结构,有力地推动了材料成形技术的发展。蒸汽空气锤、水压机、模锻压力机、高速冲床等工艺装备的问世,使金属锻压工艺彻底改变了传统的“手工打铁”的落后方式,进入到机械化现代化生产的行列。1885年发现了气体放电电弧可作为电弧焊接的热源,1886年发明了电阻焊,从此电焊便成为现代焊接技术的主流。

20世纪中期以后,随着计算机、微电子、信息和自动化技术的迅速融入,在涌现出一大批新型的成形技术的同时,材料成形加工生产已开始向着优质化、精密化、绿色化和柔性化的方向发展。另外,随着塑料和先进陶瓷材料的出现,非金属材料的成形工艺得到了迅速发展。今天我们已进入了各种人工设计、人工合成的新型材料层出不穷的新时代,各种与之相适应的先进的成形工艺也在不断涌现并大显身手。

自新中国成立后,我国的材料成形技术重新走上了振兴之路,特别是改革开放以来,更是取得了巨大的成就,为促进国民经济的发展和人民物质文化生活的改善发挥了积极的作用,一大批以材料成形技术为重要支撑的行业和企业已经成长壮大。

自从20世纪50年代中期第一辆自行生产的解放牌汽车诞生以来,我国逐步建成了较完备的汽车工业生产体系,并已成为世界第四大汽车生产国;我国自力更生发展起来的航空制造业已初具规模,可以生产较先进的各种用途的军用飞机和中型民用飞机,大型飞机也已开始制造;我国的船舶制造业跻身于世界前列,已能够建造40万吨级的超大型船只。我国是世界上少数的几个拥有运载火箭、人造卫星和载人飞船发射实力的国家。这些航天飞行器的建造都离不开先进的成形工艺,其中,火箭和飞船的壳体都是采用了高强轻质的材料,通过先进的特种焊接和黏结技术制造的。

重型机械的制造能力是反映一个国家的成形技术水平的重要标志,我国已成功地生产出了世界上最大的轧钢机机架铸钢件(质量为410t)和长江三峡电站巨型水轮机的特大型铸件,锻造了质量达196t的汽轮机转子,采用铸焊组合方法制造了12000t水压机的立柱(高18m)、底座和横梁等大型零部件。

坐落在香港大屿山和无锡太湖边的天坛大佛和灵山大佛塑像,分别高26.4m和88m,均是采用青铜分块铸造后拼焊装配而成的。这两座巨型佛像一坐一立,体态雄健庄重,充分体现了成形工艺与人文艺术的完美结合,对于弘扬我国的传统文化和促进当地的旅游业起到了很大的作用。

进入21世纪以后,随着我国改革开放步伐和世界经济一体化进程的加快,我国已越来越成为全球制造业的中心之一。通过技术引进和技术创新,我国材料成形的技术水平达到了新的高度。我国制造业生产的产品在质量、品种和产量上都比过去有了大幅度的提高,其中一些重要的产品如彩电、手机、洗衣机等产量已居世界第一,不仅极大地丰富和满足了国内市场的需求,而且以强大的竞争力不断扩展其在国际市场上的占有率,成为中国经济充满活力、蒸蒸日上的具体体现。

当然,也要清醒地看到我国与发达国家相比在材料成形技术水平上还存在差距,尤其是



在技术创新能力和企业核心竞争力方面的差距还很大,要赶超世界先进水平还需要继续做出不懈的努力。

### 三、本课程的特点、主要内容及教学要求

作为高等职业院校机械类和近机类专业学生的一门重要的技术基础课,本课程从工程材料的应用角度出发,阐明工程材料的基本理论及其成分、组织结构、性能与加工工艺之间的关系,介绍常用工程材料与成形工艺及应用等基本知识。本课程的一个特点是涵盖的知识面广,融入了材料科学、机械、电子、信息、管理学等多学科的最新知识,体现了多学科的交叉与渗透;另一个特点是有着丰富的工程应用背景。因此,在学习中要十分重视对工程素质的培养,要了解工艺问题的综合性和灵活性,学会全面、辩证地看问题的方法。

本课程的主要内容包括以下几个方面:工程材料的主要性能,金属材料的成分、工艺、组织结构、性能、应用及它们之间的关系,金属材料的热处理,常用金属材料及应用,非金属材料及复合材料的组成特点及应用,液态成形、塑性成形、焊接成形工艺的基本理论、基本方法、工艺设计和结构设计,工程材料及成形方法的选择及典型零件加工工艺路线的制定等。

通过本课程的学习,应达到以下基本要求:

- (1) 掌握常用金属材料的成分、工艺、组织、性能、应用及它们之间的关系。
- (2) 初步具有选用常用金属材料和常规热处理工艺的能力,并初步具备合理安排工艺路线的能力。
- (3) 掌握各种成形方法的基本原理、工艺特点和应用场合,具有选择毛坯(或零件)成形方法的初步能力。
- (4) 了解与材料成形技术有关的新材料、新技术、新工艺及其发展趋势。

本课程是一门体系较为庞杂、知识点多而分散的课程,因此在学习中要注意抓好课程的两条主线。对于工程材料要抓住成分、工艺、组织、性能、使用场合五个因素之间的关系主线。一定成分的工程材料其成形工艺(含热处理工艺)决定了该种材料的组织结构,不同的组织结构决定了该种材料的性能,材料的性能包括使用性能和工艺性能两方面。使用性能是材料在使用条件下表现出的性能,具体如力学(或机械)性能、物理性能和化学性能等;工艺性能则是材料在加工过程中表现出的性能,如切削加工性能、铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能等。材料具有什么样的使用性能和工艺性能决定了其使用场合。因此,抓住了这条学习主线,就抓住了工程材料的核心和本质。对于材料成形技术(热加工)要围绕着“成形原理—成形方法及应用—成形工艺设计—成形件的结构工艺性”这样一条主线而展开,这也是学习材料成形技术(热加工)的主要内容和要求。按照主线对知识点进行归纳整理,有利于在学习中保持清晰的思路,有利于对本课程内容的总体把握。在抓好主线的同时,还要注意比较不同工程材料的特点和不同成形工艺的特点,建立相关知识点之间的联系,这将有利于在学习中保持开阔的思路,有利于将所学的知识融会贯通,在分析和解决问题的时候,就能够做到触类旁通,举一反三。

# 第一章 工程材料的主要性能

工程材料中金属材料是制造机器零件最主要的材料。这是因为它既具有满足机器零件使用要求的机械、物理和化学性能，又具有制造时所需的工艺性能。

工程材料的性能包括使用性能和工艺性能两方面。使用性能是保证工件的正常工作应具备的性能，即在使用条件下所表现出来的性能，它包括力学性能、物理性能（如密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性、磁性等）、化学性能（如耐腐蚀性、抗氧化性等）等。工艺性能是材料在被加工过程中适应各种冷热加工的性能，主要包括热处理性能、铸造性能、锻压性能、焊接性能、切削加工性能等。

机械制造工业中所用的金属材料以合金为主，很少使用纯金属。

设计机器零件时，要根据零件的使用要求，考虑材料的主要性能和经济性，合理地选用材料。本章重点介绍金属材料的力学性能，其他性能将在后续相关章节中作详细介绍。

金属材料的力学性能是指在外力的作用下，材料所显示的抵抗能力。力学性能不仅是产品设计、选材、验收、鉴定的依据，还是对产品加工过程实行质量控制的重要参数。材料的用处不同，对力学性能的要求也不同。金属的力学性能包括强度、塑性、硬度、冲击韧性及疲劳强度等。

## 第一节 强 度

材料在力的作用下抵抗永久变形和断裂的能力称为强度。载荷是指金属材料在加工及使用过程中所受的外力，也称为负荷。根据载荷作用性质的不同，对金属材料的力学性能要求也不同。载荷按其作用性质不同可分为以下三种：

- (1) 静载荷：是指大小不变或变化过程缓慢的载荷。
- (2) 冲击载荷：是指在短时间内以较高速度作用于零件上的载荷。
- (3) 交变载荷：是指大小、方向或大小和方向随时间作周期性变化的载荷。

根据载荷作用方式不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度五种。一般情况下多以抗拉强度作为判别金属强度高低的指标。

抗拉强度是通过拉伸试验测定的，通常在拉伸试验机上进行。本书按《金属材料拉伸试验》(GB/T 228.1—2010)测定材料在拉力作用下的强度。拉伸试验的方法是采用标准拉伸试样，在拉伸试验机上缓慢施加静拉力，同时连续测量力和相应的试样伸长量，直至试样断裂，根据测得的数据，即可得出有关的力学性能。

拉伸试样的形状一般有圆形和矩形两类。常用的圆形拉伸试样如图 1-1 所示。

试样的原始直径  $d_0$  与原始标距长度  $l_0$  之间满足一定的关系（长试样  $l_0 = 10d_0$  和短试样  $l_0 = 5d_0$  两种）。在拉伸实验中，随着拉伸力  $F$  的增加，试样不断伸长，截面缩小，拉断后



试样标距长度为  $l_1$ , 断口直径为  $d_1$ 。

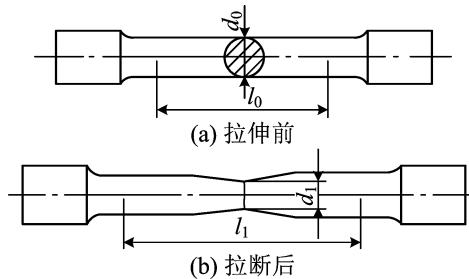


图 1-1 圆形拉伸试样

拉伸试验机可自动将拉伸力  $F$  与试样伸长量  $\Delta l$  的对应关系绘制成  $F - \Delta l$  曲线, 即拉伸力-伸长量曲线。图 1-2 所示为低碳钢的拉伸力-伸长量曲线图, 图中纵坐标表示拉伸力  $F$ , 单位为 N; 横坐标表示伸长量  $\Delta l$ , 单位为 mm。当拉力逐渐增加时, 试样经历了弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

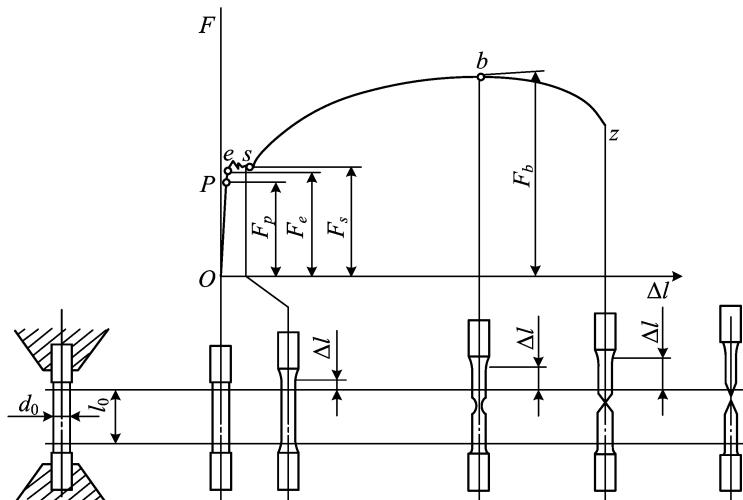


图 1-2 低碳钢的拉伸力-伸长量曲线

图中明显地表现出下面几个变形阶段:

(1)  $Oe$ ——弹性变形阶段。当给材料施加载荷后, 试样产生伸长变形。此阶段试样的伸长量与拉伸力呈正比, 如果此时卸去载荷, 试样可恢复原状。材料受外力作用时产生变形, 外力去除后能恢复到原来形状的性能叫弹性。这种随外力的消失而消失的变形叫弹性变形。在  $P$  点以下, 载荷和变形量呈线性关系。当施加力超过比例伸长力  $F_p$  后, 力和变形不呈线性关系, 直至最大弹性伸长力  $F_e$ 。 $F_e$  为试样能恢复到原始形状和尺寸的最大拉伸力, 一般来说  $F_p$  与  $F_e$  非常接近。

(2)  $es$ ——屈服阶段。当载荷超过  $F_e$  后再卸载时, 试样的伸长只能部分地恢复, 而保留了一部分残余变形。外力消失后留下来的不能恢复的变形叫塑性变形。材料在外力作用下产生塑性变形而不致引起破坏的性能叫塑性。载荷增加到  $F_s$  时, 拉伸力-伸长量曲线上出现平台或锯齿状, 这种在载荷不增加的情况下, 试样还继续伸长的现象叫作材料的屈服。 $F_s$  称为屈服载荷。屈服后, 材料开始出现明显的塑性变形, 材料完全丧失了抵抗变形的能力。在试样表面开始出现与轴线成约  $45^\circ$  的滑移线。



(3)  $sb$ ——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,试样变形抗力也在不呈比例地逐渐增加,这种现象称为形变强化(或称加工硬化),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)  $bz$ ——缩颈阶段(局部塑性变形阶段)。当载荷达到最大值 $F_b$ 后,试样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,试样变形所需的外力也随之降低,而变形继续增加,这时伸长量主要集中于缩颈部位,由于颈部附近试样面积急剧减小,致使载荷下降,当到达 $z$ 点时试样发生断裂。

工程上使用的金属材料种类繁多,力学性能不同,拉伸曲线各异。塑性材料(如低碳钢等)在断裂前有明显塑性变形,这种断裂称为韧性断裂;而脆性材料(如铸铁等)在断裂前无明显塑性变形,拉伸曲线上无屈服现象,而且也不产生“缩颈”,这种断裂称脆性断裂。图1-3为铸铁的拉伸力-伸长量曲线。

金属材料的强度大小通常用应力来表示。材料受外力作用时,为保持自身形状尺寸不变,在材料内部作用着与外力相对抗的力,称为内力。内力的大小与外力相等,方向则与外力相反,和外力保持平衡。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。 $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。当面积用 $\text{mm}^2$ 时,则应力可用MPa为单位, $1\text{MPa}=1\text{N}/\text{mm}^2=10^6\text{Pa}$ 。

$F$ ——外力,N。

$S$ ——横截面积, $\text{m}^2$ 。

拉伸图与试样的尺寸有关。为了进行比较,通常用试样的原始截面积 $S_0$ 去除拉力 $F$ 得到的应力 $\sigma$  $(\sigma=\frac{F}{S_0})$ 和用试样的长度 $l_0$ 除其相应的变形量 $\Delta l$ 得到的应变 $\epsilon$  $(\epsilon=\frac{\Delta l}{l_0})$ 来代替 $F$ 和 $\Delta l$ ,由此绘成的曲线叫应力-应变曲线,它和拉伸曲线具有相同的形式,只是坐标不同。它不受试样尺寸的影响,可以直接看出材料的一些力学性能。

通过拉伸试验测得的主要强度指标有屈服强度(屈服点)和抗拉强度。

## 一、屈服强度( $\sigma_s$ )

屈服强度指试样在试验过程中拉伸力不增加(保持恒定)仍能继续伸长时的拉应力,表示材料开始产生明显塑性变形时的最低应力值。屈服点按如下公式计算:

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

式中, $\sigma_s$ ——屈服点,MPa;

$F_s$ ——试样屈服时的载荷,N。

工业上使用的多数金属材料,在拉伸试验过程中没有明显的屈服现象。对于无明显屈服现象的金属材料,按国标GB/T 10623—2008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,也称为条件屈服强度。

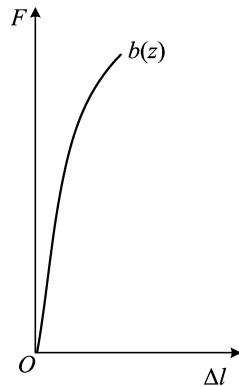


图1-3 铸铁的拉伸力-伸长量曲线



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。

屈服强度  $\sigma_s$  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减小。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。

## 二、抗拉强度( $\sigma_b$ )

抗拉强度指材料拉断前所能承受的最大拉应力。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。

对塑性材料来说, 在  $F_b$  以前试样均匀变形, 而在  $F_b$  以后变形将集中在颈部。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。

强度是材料的重要性能指标。一般零件使用时不允许发生塑性变形, 即要求零件所受的应力小于屈服点, 所以选材与设计的主要依据是屈服点  $\sigma_s$  或  $\sigma_{0.2}$ 。而抗拉强度  $\sigma_b$  代表材料抵抗大量均匀塑性变形的能力, 也是材料抵抗拉断的能力, 是评定材料性能的重要参考指标。

# 第二节 塑 性

塑性是材料断裂前发生不可逆永久变形的能力。塑性指标也是由拉伸试验测得的, 常用断后伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  来评定材料塑性好坏。

## 一、断后伸长率

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,  $\delta$ ——断后伸长率, %;

$l_1$ ——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, 测得的断后伸长率是不同的。长、短试样的断后伸长率分别用符号  $\delta_{10}$  和  $\delta_5$  表示, 习惯上  $\delta_{10}$  也常写成  $\delta$ 。一般短试样的断后伸长率比长试样的断后伸长率大 20% 左右, 对于拉伸试验局部变形特别明显的材料, 甚至可以大到 50%。

## 二、断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后, 缩颈处横截面积的缩减量与原始横截面积的百分比, 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最小横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

金属材料的断后伸长率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$  数值越大, 表示材料的塑性越好。材料的塑性是决定其能否进行塑性加工的必要条件, 塑性好的金属可以发生大幅度塑性变形而不被破坏, 易于通过塑性变形加工成复杂形状的零件。例如, 工业纯铁的  $\delta$  可达 50%,  $\psi$  可达 80%, 可以拉制细丝、轧制薄板等。铸铁的  $\delta$  几乎为零, 所以不能进行塑性变形加工。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, 大大增加了安全可靠性。

## 第三节 硬 度

材料的软硬是一个相对概念。金属材料抵抗局部变形, 特别是塑性变形、压痕或划痕的能力叫硬度。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。

生产中常用压入法测硬度, 即将一定几何形状的压头, 在一定的压力作用下压入材料的表面, 根据压入的程度来测量材料的硬度。压入法测量的硬度常用的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

### 一、布氏硬度(HB)

布氏硬度测量原理如图 1-4 所示: 使用直径为  $D$  的球体(淬火钢球或硬质合金球), 以规定的试验力  $F$  压入试样表面, 经规定保持时间后卸除试验力, 然后测量表面压痕直径  $d$ 。

布氏硬度值用球面压痕单位表面积上所承受的平均压力来计算, 并以符号 HBS(HBW) 来表示。布氏硬度值按下式计算:

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



式中, HBS——用淬火钢球压头测量的布氏硬度值, 用于测量硬度值小于 450 的材料;

HBW——用硬质合金压头测量的布氏硬度值, 用于测量硬度值为 450~650 的材料;

F——试验力, N;

S——球面压痕表面积,  $\text{mm}^2$ ;

D——压头直径, mm;

d——压痕直径, 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。

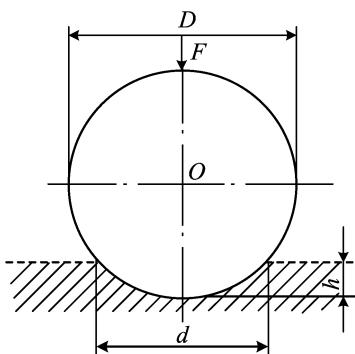


图 1-4 布氏硬度测量原理

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。

测量时应根据材料的种类和硬度范围选定合适的压头材料、压头直径、压力大小和压力保持时间。测得的硬度值应按标准书写, 在符号 HBS 或 HBW 之前的数字为硬度值, 符号后面按以下顺序用数值表示试验条件:

- (1) 压头直径;
- (2) 压力大小;
- (3) 试验力保持的时间(10~15s 不标注)。

例如, 270 HBS10/1000/30 表示用直径 10mm 的淬火钢球, 在 9.8kN (1000kgf) 的试验力作用下, 保持 30s 时测得的布氏硬度值为 270。490HBW5/750 表示用直径 5mm 的硬质合金球, 在 7.35kN (750kgf) 的试验力作用下, 保持 10~15s 时测得的布氏硬度值为 490。

一般在零件图或工艺文件上可只标出硬度值的大小和符号, 而不必规定实验条件, 如 200~230HBS。

布氏硬度实验测量的比较准确, 但不能测太薄的试样, 试样的厚度至少为压痕深度 h (图 1-4) 的 10 倍。由于压痕较大, 布氏硬度不宜测量成品件的硬度, 而主要用于原材料或半成品的硬度测量。布氏硬度可用于测量退火、正火、调质处理的钢、铸铁、铝合金等金属材料。

## 二、洛氏硬度(HR)

洛氏硬度是用顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥或直径为  $1.588\text{mm}$  ( $1/16''$ ) 的淬火钢球作压头, 在试验压力  $F$  (由初始试验力  $F_0$  和主试验力  $F_1$  合成) 的作用下, 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硬度。

洛氏硬度测量的示意图如图 1-5 所示。测量时, 先加初试验力  $F_0$ , 压入深度为  $h_1$ , 目的是为消除因被测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。洛氏硬度没有单位, 试验时硬度值直接从硬度计的表盘上读出。为了符合



数值越大、硬度越高的思维习惯,将一个常数  $K$  减去  $e$  来表示硬度的大小,并用 0.002mm 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:

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

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 0.2mm;用钢球压头进行试验时, $K$  为 0.26mm;

$e$ ——压痕深度,mm。

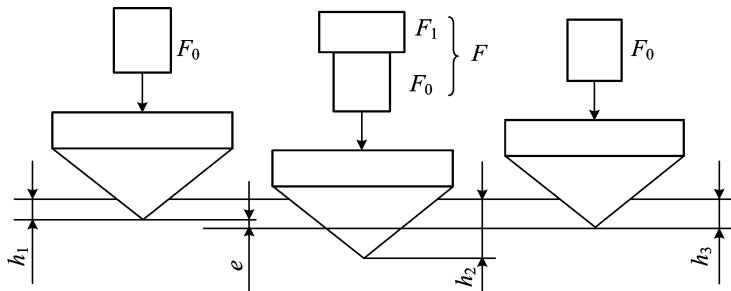


图 1-5 洛氏硬度测量原理

洛氏硬度可以测量从软到硬较大范围的硬度值。根据被测对象不同,洛氏硬度实验可用不同的压头和试验力,有 HRA、HRB、HRC 等多种测量标尺。表 1-1 为常用三种测量标尺的实验条件、测量范围及应用,其中 HRC 是最为常用的方法。

表 1-1 常用洛氏硬度标尺的试验条件和适用范围

硬度符号	压头类型	总试验力 $F/N(\text{kgf})$	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥体	588.4(60)	60~85HRA	硬质合金、表面淬火钢等
HRB	Φ1.5875mm 钢球	980.7(100)	25~100HRB	软钢、退火钢、铜合金等
HRC	120°金刚石圆锥体	1471.0(150)	20~67HRC	一般淬火钢、调质钢等

洛氏硬度表示方法如下:符号 HR 前面的数字表示硬度值,HR 后面的字母表示不同洛氏硬度的标尺。例如,45HRC 表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 45。

洛氏硬度测量迅速、简便、压痕小、硬度测量范围大,可用于成品或较薄工件的测量,但数据准确性不如布氏硬度,一般不宜测量组织不均匀的材料。

### 三、维氏硬度(HV)

维氏硬度是用相对面夹角为 136° 金刚石正四棱锥压头,以规定的试验力  $F$  压入材料的表面,经保持规定时间后卸除试验力,然后根据压痕两对角线长度的算术平均值来计算硬度,其测量原理与布氏硬度相似。

如图 1-6 所示,维氏硬度用符号 HV 表示。其计算公式如下:

$$HV = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$



式中, HV——维氏硬度值;

F——试验力,N;

d——压痕两对角线长度算术平均值,mm。

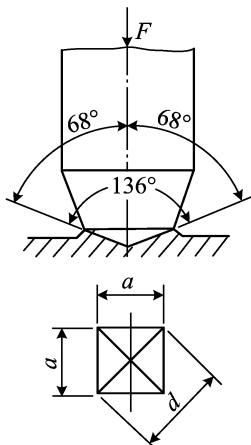


图 1-6 维氏硬度测量原理

维氏硬度试验所用的试验力可根据试样的大小、厚薄、硬度高等条件进行选择,试验力F的取值范围为49.03~980.7N,试验力选用原则是根据材料硬度及硬化层或试样厚度来定。维氏硬度可以测量从软到硬的各种金属材料,而且测量的硬度值具有连续性(10~1000HV)。维氏硬度测量压痕小,可测量较薄的材料和材料表面渗碳、渗氮层的硬度,且准确性高。

维氏硬度值表示方法与布氏硬度相同,例如,400HV30表示用294.2N(30kgf)试验力,保持10~15s(可省略不标),测定的维氏硬度值为400。

由于各种硬度测量法试验条件不同,相互间没有理论换算关系,故试验结果不能直接进行比较,可查阅硬度换算表进行比较,也可粗略地根据以下经验公式来换算:

硬度在200~600HB时,1HRC相当于10HBS;

硬度小于450HB时,1HB相当于1HV。

表 1-2 为几种常用材料的硬度值。

表 1-2 几种常用材料的硬度值

材料	中碳结构钢	碳素工具钢	灰铸铁	硬铝合金	黄铜
状态	热轧	淬火	铸态	硬化	硬化态
硬度	170~255HBS	>62HRC	100~250HBS	70~100HBS	140~160HBS

## 第四节 冲击韧性

冲击韧性是指金属在断裂前吸收变形能量的能力。金属材料抵抗冲击载荷的能力叫冲击韧性。许多机械零件和工具如连杆、曲轴、活塞销、冲模和锻模等,在工作时要受到冲击载荷的作用,瞬时外力冲击作用所引起的应力和应变要比静载荷引起的大得多。对这些零件,如仍用静载荷作用下的强度指标作为设计和选材的依据,就不能保证零件工作时安全可靠,对此,必须考虑冲击韧性。

冲击韧性通常用摆锤冲击弯曲试验来测定。它是以材料受一次冲击破坏时单位面积上所吸收的冲击功表示的,试验原理如图1-7所示。按《金属夏比缺口冲击试验》(GB/T 229—2020)规定,冲击试样的横截面尺寸为10mm×10mm、长度为55mm,试样的中部开有V形或U形缺口。

试验时,冲击试样的缺口背向摆锤的冲击方向置于试验机的支架上,将质量为m的摆锤举至规定的高度H<sub>1</sub>,然后让摆锤绕其固定轴自由落下冲断试样,试样被冲断时所吸收的能量即是摆锤冲击试样所做的功,称为冲击吸收功,用符号A<sub>K</sub>表示。其计算公式如下:



$$A_K = mgH_1 - mgH_2 = mg(H_1 - H_2)$$

式中, $A_K$ ——冲击吸收功,J;

$m$ ——摆锤的质量,kg;

$H_1$ ——摆锤初始的高度,m;

$H_2$ ——冲断试样后,摆锤回升的高度,m。

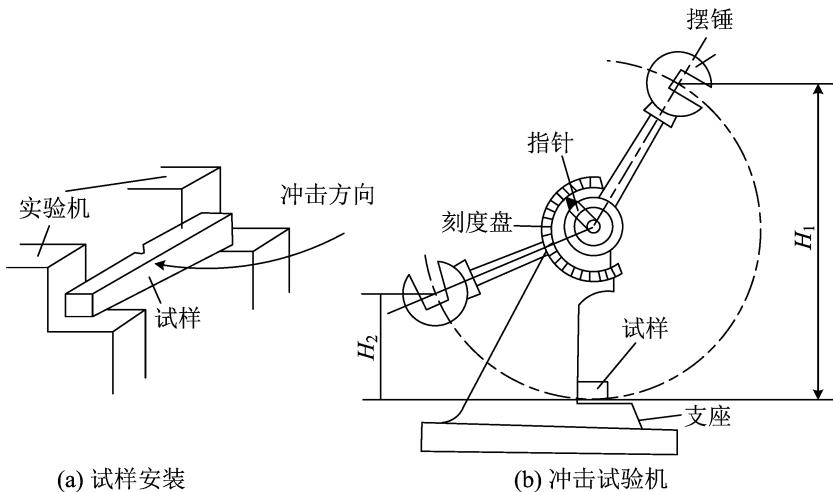


图 1-7 摆锤冲击试验示意图

冲击吸收功( $A_K$ )除以试样缺口处截面积( $S_0$ ),即可得到材料的冲击韧性,用符号 $\alpha_K$ 表示。其计算公式如下:

$$\alpha_K = \frac{A_K}{S_0}$$

式中, $\alpha_K$ ——冲击韧性,J/cm<sup>2</sup>;

$A_K$ ——冲击吸收功,J;

$S_0$ ——试样缺口处截面积,cm<sup>2</sup>。

冲击韧性是冲击试样缺口处单位横截面积上的冲击吸收功。

必须说明的是,使用不同类型的试样(V形缺口或U形缺口)进行试验时,其冲击吸收功应分别标为 $A_{KV}$ 或 $A_{KU}$ ,冲击韧性则标为 $\alpha_{KV}$ 或 $\alpha_{KU}$ 。

实际工作的零件,绝大多数情况是受小能量多次冲击。因此较正确地衡量材料受冲击载荷的抗力指标应该采用小能量多次冲击的抗力,不该是受一次冲击破坏时得出的冲击韧性值。

冲击韧性值的大小与很多因素有关,不仅受化学成分、试样形状、材料内部组织缺陷情况的影响,还受环境温度的较大影响。因此冲击韧性值的影响因素较多,工程上仍以 $\alpha_K$ 值作为选材的参考。



## 第五节 疲劳强度

许多机械零件,如齿轮、轴、轴承、弹簧等,在工作过程中各点的应力随时间作周期性的变化,这种随时间作周期性变化的应力称为交变应力(也称循环应力)。在交变应力作用下,虽然零件所承受的应力大大低于材料的屈服点,但经一定循环次数后,材料在一处或几处产生局部永久性积累损伤,产生裂纹或突然发生完全断裂,这种现象称为金属的疲劳现象。

疲劳断裂是机械零件失效的主要原因之一。据统计,在机械零件失效中大约有 80% 以上属于疲劳断裂,而且疲劳断裂前没有明显的塑性变形,所以疲劳断裂往往是突然的,具有很大的危险性。

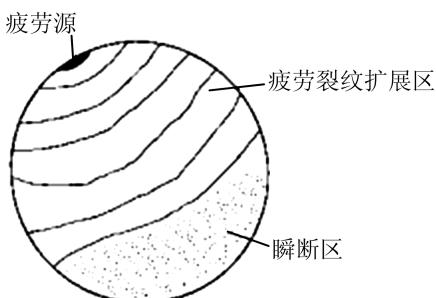


图 1-8 疲劳断裂口示意图

疲劳断裂的“策源地”往往是零件应力集中的部位,如尖角、孔、槽、刀痕等,在循环应力作用下,疲劳源处产生疲劳裂纹。这种疲劳裂纹不断扩展和相连,减小了零件的有效承载面积,最后当截面小至不能承受外力时,零件即发生突然断裂。图 1-8 所示为疲劳断裂口示意图。

为避免疲劳断裂,零件必须保证经过无限次或相当多次应力的循环作用而不断裂。实践证明,金属材料所受的循环应力值  $\sigma$  愈大,断裂前承受的循环次数  $N$  愈小。

图 1-9 所示为钢铁材料的疲劳曲线示意图。由图可见,当循环应力小于某一值后,试样可以经受无数次循环而不断裂,此应力值称为疲劳极限,用  $\sigma_{-1}$  表示。实际试验时不可能做无数次循环试验,一般黑色金属应力循环次数达  $10^7$  次时、有色金属达  $10^8$  次时试样仍不断裂的最大循环应力值表示为疲劳极限。

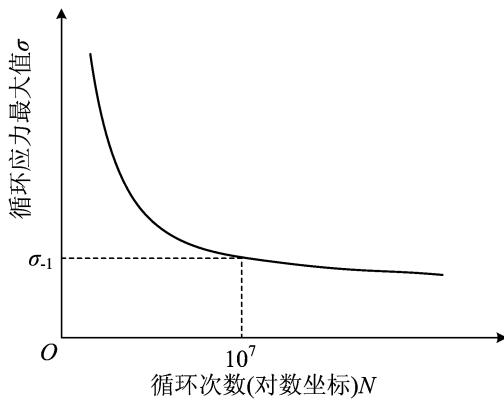


图 1-9 疲劳曲线示意图

一般认为,产生疲劳破坏的原因是材料的某些缺陷,如夹杂物、气孔等所致。交变应力下,缺陷处首先形成微小裂纹,然后裂纹逐步扩展,最后导致零件的受力截面积减少,以致突



然产生破坏。零件表面的机械加工刀痕和构件截面突然变化部位,均会产生应力集中。交变应力下,应力集中处易产生显微裂纹,这也是产生疲劳破坏的主要原因。

为了防止或减少零件的疲劳破坏,除应合理设计结构防止应力集中外,还要尽量降低零件表面粗糙度,采取表面处理等措施来提高材料的抗疲劳能力。

## 第六节 金属材料的物理、化学和工艺性能

### 一、物理性能

金属材料的物理性能主要有密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性和磁性等。

#### (一) 密度

密度是指在一定温度下单位体积物质的质量,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$  或  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。材料的密度大小很大程度上决定了工件的自重,有些零件,如航空器上的零件,为了减轻自重,需要采用密度小的材料,这时强度和密度的比值(称为比强度)就具有特别重要的意义。常用材料的密度如表 1-3 所示。

表 1-3 常用材料的密度

材料	铁	铜	铝	铅	锡	钨	钛	塑料	玻璃钢
密度/ $\text{g}/\text{cm}^3$	7.8	8.9	2.7	11.3	7.28	19.3	4.5	0.9~2.2	2.0

#### (二) 熔点

熔点是材料从固态转变成液态的温度。金属等晶体材料一般具有固定的熔点,而高分子等非晶体材料没有固定的熔点。某些非金属材料的熔点比普通金属材料的熔点还要高,如陶瓷的熔点可超过  $2000^\circ\text{C}$ ;塑料和橡胶一般都不耐热,正常使用的温度都不超过  $100^\circ\text{C}$ ,只有极少数可在  $250^\circ\text{C}$  长期使用。常用材料的熔点如表 1-4 所示。

表 1-4 常用材料的熔点

材料	铁	铜	铝	锡	钨	钛	碳钢	铝合金
熔点/ $^\circ\text{C}$	1538	1083	660.1	231.9	3380	1677	1450~1500	447~575

#### (三) 热膨胀性

热膨胀性是指材料在温度升高时体积涨大的现象,用热膨胀系数衡量,单位是  $^\circ\text{C}^{-1}$  或  $\text{K}^{-1}$ (表示当温度每升高  $1^\circ\text{C}$  或  $1\text{K}$  时其单位长度的膨胀量),系数越大,金属的尺寸或体积随温度变化的程度就越大。热膨胀性不仅影响了零件在工作时的尺寸精度,而且也影响其成形过程。



#### (四) 导热性

材料传导热的性能称为导热性,一般用导热系数来衡量材料导热性的好坏,单位是  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,其值越大导热性越好。在热成形加工时若对导热性很小的金属以较快的速度加热或冷却,金属中就会产生较大的温度差,从而引起足以导致工件变形甚至产生裂纹的热应力,因此对于这种材料应注意减缓其加热或冷却速度。

#### (五) 导电性

材料传导电的性能称为导电性,一般描述材料导电性的物理量有电阻率  $\rho$  和电导率  $\sigma$ 。电阻率  $\rho$  表示单位长度、单位截面积材料的电阻值,其单位为  $\Omega \cdot \text{m}$ ;电导率  $\sigma$  为电阻率的倒数,单位为  $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。导电器材常选用导电性良好的材料,以减少损耗;加热元件、电阻丝则选用导电性差的材料制作,以提高功率。金属中银的导电性最好,铜与铝次之。通常金属的纯度越高,其导电性越好;合金的导电性比纯金属差;高分子材料和陶瓷一般都是绝缘体。

#### (六) 磁性

自然界中的物体磁性相差很大,如铝、铜等物质的磁性很弱,这些物质称为非铁磁性物质。另一些物质如铁、镍、钴等,它们可以被磁铁吸引,在外磁场作用下能产生很大的磁化强度,这种物质被称为铁磁性物质。铁磁材料的磁性一般用磁导率  $\mu (\mu = B/H)$  表示,是物质中磁感应强度  $B$  与外磁场强度  $H$  的比值。

### 二、化学性能

材料的化学性能主要指材料在室温或高温时抵抗各种化学介质作用的能力,如耐酸性、耐碱性和抗氧化性等。

金属材料在常温下抵抗氧、水及其他化学物质腐蚀破坏的能力称为耐腐蚀性。金属的腐蚀既易造成一些隐蔽性和突发性的事故,也易造成金属材料的损失,因此应采取适当的防腐蚀措施。对一些特殊用途的工件,应选择耐腐蚀材料制作,如贮存及运输酸类的容器、管道等,应选择耐酸的材料;海洋设备及船用钢,则要求耐海水的腐蚀。金属材料中铬镍不锈钢可以耐含氧酸的腐蚀;而铜及铜合金、铝及铝合金能耐大气的腐蚀;合成高分子材料和陶瓷材料一般都具有良好的耐腐蚀性。

在高温下金属材料易与氧结合形成氧化皮,造成金属的损耗和浪费,因此高温下使用的工件,要求材料具有高温抗氧化的能力。材料中的耐热钢、高温合金、钛合金、陶瓷等材料都具有好的高温抗氧化性,可用于加热炉、航空发动机零件等。

### 三、工艺性能

工艺性能是指金属材料在加工过程中是否易于加工成形的能力,它是对材料的物理、化学和机械性能的综合反映。按工艺方法的不同分为铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。工艺性能直接影响到零件制造工艺和质量,是选材和制定零件工艺路线时必须考虑的因素之一。



## 习 题

1. 名词解释:① 屈服强度;② 抗拉强度;③ 塑性;④ 断后伸长率;⑤ 断面收缩率;⑥ 硬度;⑦ 冲击韧性;⑧ 疲劳;⑨ 疲劳极限;⑩ 物理性能;⑪ 化学性能。
2. 什么是金属材料的力学性能? 力学性能主要包括哪些指标?
3. 简述各力学性能指标是在什么载荷作用下测试的。
4. 用标准试样测得的材料的力学性能能否直接代表材料制成零件的力学性能,为什么?
5. 为什么疲劳断裂对机器零件危害最大? 如何提高零件的疲劳强度?

## 思 政 案 例

### 千锤百炼最“薄”钢的青年团队

新华社太原 2022 年 10 月 7 日电(记者申峰、王学涛) 国庆节假期,中国宝武山西太钢不锈钢精密带钢有限公司(以下简称“太钢精密带钢公司”)正满负荷生产。车间内,一卷卷薄如蝉翼、光滑如镜的钢材(图 1-10)经过压延、清洗、光亮、拉矫、纵切、包装等步骤自动化制成。



图 1-10 不锈钢精密箔材

这种特殊的不锈钢精密箔材可以轻易用手撕开,俗称“手撕钢”,广泛应用于航空航天、精密仪器、新能源电池等高端设备制造行业。

这项技术因生产工艺难度大,曾长期被外国垄断。2016 年,太钢精密带钢公司专门成



立“手撕钢”研发团队，15名团队成员的平均年龄只有30岁。“85后”青年段浩杰是研发团队的核心成员之一，负责轧机生产。他告诉记者，轧钢最核心的设备是轧机，轧机最重要的部分是轧辊，类似于“擀面杖”。擀面只需要一根擀面杖，而轧制“手撕钢”却有20根轧辊，每轧薄一次，轧辊就要重新配比一次，其中的排列组合有上万种。工艺需要改进，设备同样需要不断改造进步。在39岁的团队成员胡尚举的创新工作室里，多个获奖证书、发明专利证书见证着他们的努力。胡尚举指着一本名叫“多点转矩平衡补偿提高手撕钢控制稳定性”的获奖证书介绍来历，“手撕钢”在光亮退火去应力环节，要经过260m长的带钢通道，最初常在一个地方扯断，“我们通过大数据分析，找到问题根源，再结合现场试验，历时3个月，终于研发出这套技术并解决了问题。”

图1-11所示为工作人员在生产车间监控轧机生产。“手撕钢”研发团队带头人王天翔介绍，积累经验的笔记本摞在一起有一米高，它们是“手撕钢”研发的见证者。



图1-11 监控轧机生产

历经700多次试验，攻克452个工艺难题、175个设备难题，这支团队终于在2018年底成功研发出厚度0.02mm、宽度600mm的宽幅“手撕钢”；2020年，团队又成功研发出厚度0.015mm、宽度600mm的“手撕钢”，刷新了“手撕钢”最薄最宽的世界纪录。

为使“手撕钢”适应市场，充分发挥自身价值，研发团队始终对客户多样化需求高度重视。36岁的团队成员廖席说，曾有一款特殊性能的“手撕钢”需要在夏日生产，因为在低温下可以更好地控制产品精度，团队成员选择在晚上回到厂里加班，从凌晨3点工作到早上6点，只为轧制出能满足客户需求的产品。

随着“手撕钢”研发逐步深入，太钢精密带钢公司改变以往客户下订单、公司生产的模式，主动参与到客户设计、共同研发中去。“近年来，新的应用场景不断涌现，促使我们继续开发新材料。钢材研发始终在路上！”段浩杰说。

### 课程思政知识点

在探索试验中的艰苦卓绝、严谨务实，“手撕钢”见证了中国制造实力，使学生们在潜移默化中提升职业道德，形成严谨治学的态度，保持爱国热情，树立为中华民族伟大复兴而奋斗的理想信念。