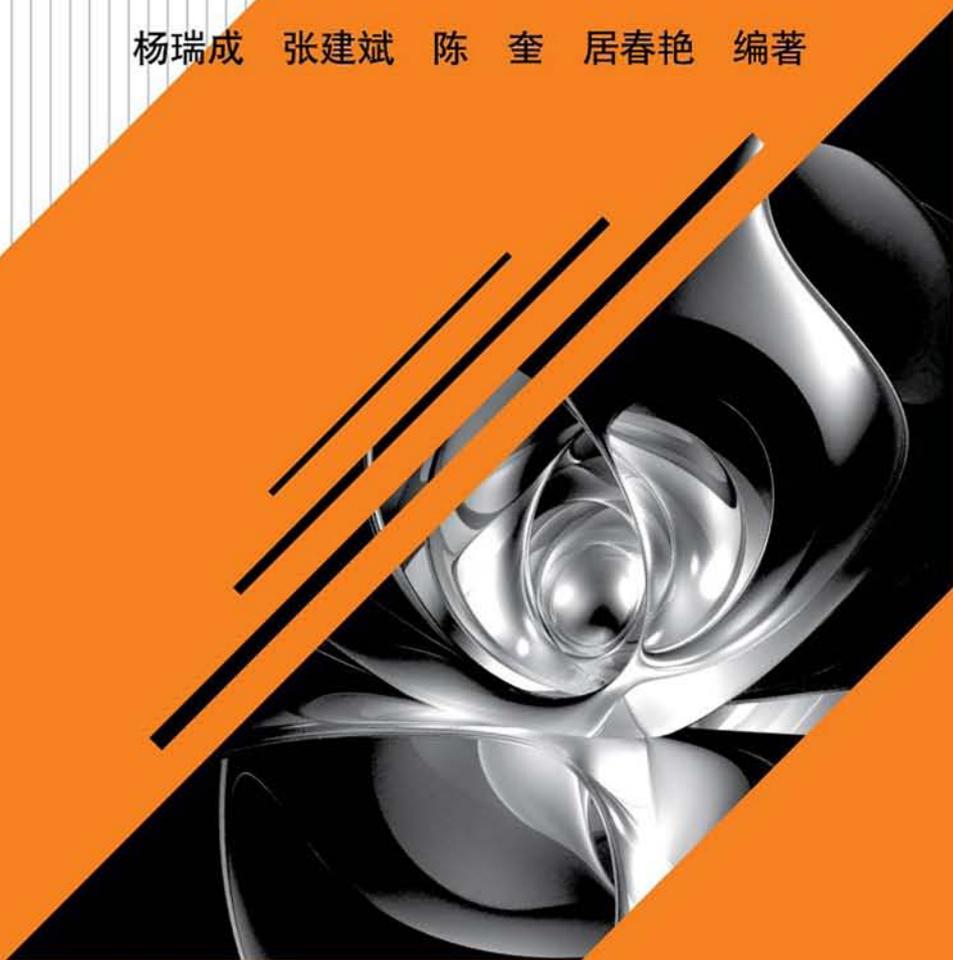




普通高等教育“十二五”规划教材

材料科学与工程导论

杨瑞成 张建斌 陈奎 居春艳 编著



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

材料科学与工程导论

杨瑞成 张建斌 陈奎 居春艳 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书试图从 21 世纪发展的角度看待材料问题(材料与人类文明、材料的可持续发展等)。在体现材料科学与工程领域大背景(第 1 章)及概述主要类型材料(第 2 章)的基础上,从材料的性能要求出发(第 3 章),按材料结构层次来设章展开,从材料的原子结构与结合键、材料的原子排列结构与缺陷、材料的热力学状态与动力学过程,以及如何改善、提高材料性能等方面(第 4~8 章),讲述了材料科学与工程的基本原理。第 9 章介绍各类材料和现代特殊材料的制备方法。各章有小结、思考题与习题,章末还特别设置了扩展阅读材料共 18 篇,以体现新颖性、时代性和趣味性,可供教师讲课时穿插选用和学生课后阅读。

本书可作为材料科学与工程、冶金工程、应用物理等相关专业本科生的教材,多数章节可供跨学科或公共选修课程选用,也可供相关专业研究生、教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料科学与工程导论/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 978-7-03-034996-5

I. ①材… II. ①杨… III. ①材料科学—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 135055 号

责任编辑:毛 莹 / 责任校对:钟 洋
责任印制:闫 磊 / 封面设计:迷底书装

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2012 年 8 月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:404 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是编者多年来从事材料科学与工程的教学、教改和精品课程建设以及相关科研工作的积累和总结。其前身为哈尔滨工业大学出版社出版的同名教材《材料科学与工程导论》(2002,多次重印),曾被国内多所院校使用,包括工科院校的材料类专业、理科院校的应用物理专业等。鉴于此书的适应性和广泛性,既可以作为材料科学与工程(MSE)专业的学科基础课教材,也可以用于材料成型、冶金工程等专业的导论性课程,还可以作为相关专业的跨专业选修课和全校性各专业的公共选修课的参考书等。长期以来,此书已成为多所院校考研(硕、博)的主要参考书之一。

本书在保持原版教材特色和普适性的基础上,作了较大幅度的修改。数章(第1、2、3、8、9章)重新编写,其他章全面修订,并更新、添加了一些内容。在各章末还特别增设了与相应章节内容密切相关的具有拓展、提高性质的扩展阅读材料共18篇(超级钢、生态环境材料、耗散结构、软物质材料、相变效应与“锡疫”、钨合金和穿甲弹、石墨烯、芳纶纤维等),以体现新颖性、时代性和趣味性,可供教师讲课时穿插选用和学生课后阅读。这些扩展阅读材料也在一定程度上体现了近年来多学科的交叉和材料科学与工程的发展,以及如何不断地从基础学科和相关学科汲取营养、拓展创新,如同几十年前MSE本身的创立一样。

类似名称的教材国外已有多册,其体系、内容、深度等均存在很大差异。国内自20世纪90年代以来,相继出版的几本相关教材基本按几大类材料(金属、陶瓷、高分子等)分成几大块,分别予以论述,并多以金属材料为主体。本书的思路与体系则有所不同,其指导思想是试图从21世纪发展的角度看待材料问题,体现材料与社会、人及自然相合一的思想,把材料与人类文明及生存,材料、能源、环境及材料的可持续发展等结合起来。在体现材料科学与工程领域大背景(第1章)及概述主要类型工程材料及其应用(第2章)的基础上,从材料的工程性能要求出发(第3章),按照材料结构层次的较新观点设置章节并展开,用5章的篇幅(第4~8章),从材料的原子结构与结合键、材料的原子排列结构与缺陷、材料的热力学状态(相和组织等)和动力学过程(原子激活、扩散运动及相关材料行为),以及如何改善、提高结构材料的性能等方面,讲述了材料科学与工程的主要原理。试图将大类材料的共性与个性有机地结合起来,注重材料科学与材料工程的交叉联系,并注意将学生学过的力学、物理、化学,尤其是物理化学的知识运用到材料系统中来,强调材料科学原理的应用,并与材料性质、行为相联系(如第4~7章每章的后二、三节)。第9章介绍了各类工程材料的主要制备方法与原理,以及现代一些特殊材料(单晶、非晶合金和纳米材料)的制备。每章有小结和思考题与习题。本书适用学时为24~48学时,教师使用本书时,可按各校的专业面向、课程性质及大纲要求选取相应的内容。

本书以材料科学与工程的基本概念、原理为基础,注重整体内容的系统性和工程实用性,并对新材料、新技术及材料新领域进行了适当介绍。使学生初步建立以材料的构成—原子结合(键)—组织结构—工艺—性能与行为的主线去学习和处理材料问题的思路,对工程材料的总貌与特性及制取加工等有一定程度的掌握与了解,并为后续课程的学习奠定基础 and 提供导引。希望本书有助于我国材料类、材料加工类专业和其他相关专业高级应用型人才的培养和卓越工程师计划的实施。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4~7章和10篇扩展阅读材料,其他编者为张建斌(第1、2章和3篇扩展阅读材料)、陈奎(第8、9章和5篇扩展阅读材料)、居春艳(第3章)。对本书的完成作出贡献的还有郭铁明、南雪丽、刘芬霞、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。

本书得到兰州理工大学规划教材建设基金的资助,特此致谢。

杨瑞成
2012年5月

目 录

前言

第 1 章 材料与人类	1
1.1 材料与人类文明.....	1
1.2 材料科学与工程兴起.....	5
1.3 材料科学与工程内涵.....	6
1.4 材料设计与材料选择.....	9
1.5 材料循环	11
本章小结.....	13
思考题与习题.....	13
扩展阅读材料 1:超级钢	14
扩展阅读材料 2:生态环境材料	15
第 2 章 工程材料概述	18
2.1 金属材料	18
2.2 陶瓷材料	27
2.3 高分子材料	32
2.4 复合材料	35
2.5 功能材料	38
本章小结.....	40
思考题与习题.....	41
扩展阅读材料 3:高性能轻合金	41
扩展阅读材料 4:高温结构材料	44
第 3 章 工程材料的基本性能	47
3.1 概述——材料性能的基本特征	47
3.2 工程材料的力学性能	50
3.3 工程材料的物理性能	67
3.4 工程材料的化学性能	74
3.5 不同类型材料的主要性能比较	77
本章小结.....	84
思考题与习题.....	84
扩展阅读材料 5:超硬材料	84
扩展阅读材料 6:钨合金和穿甲弹	86

第 4 章 材料的原子结构和原子间结合键	89
4.1 材料的结构与结构层次	89
4.2 孤立原子的特性	92
4.3 原子间作用力和结合能	96
4.4 原子间的结合键——一次键	99
4.5 原子间的结合键——二次键	103
4.6 原子间结合键与材料性质 I ——材料类型及一些原子参数	106
4.7 原子间结合键与材料性质 II ——弹性模量及其他相关性质	112
本章小结	115
思考题与习题	116
扩展阅读材料 7: 高分子材料的结构层次	116
扩展阅读材料 8: 材料结构层次的耦合和脱耦	118
第 5 章 固体材料中原子的排列与缺陷	121
5.1 聚集态与原子排列	121
5.2 固体材料中原子的周期排列结构	124
5.3 无机非金属材料(陶瓷)的结构	130
5.4 有机聚合物的原子排列	136
5.5 晶体材料的结构不完整性	139
5.6 原子排列与材料行为及性能 I : 材料密度、各类材料的性能	145
5.7 原子排列与材料行为及性能 II : 晶体滑移、各向异性和同素异构	147
本章小结	150
思考题与习题	151
扩展阅读材料 9: 准晶体	151
扩展阅读材料 10: 石墨烯、富勒烯和纳米碳管	153
第 6 章 固体材料热力学状态: 自由能、相图、相与组织	156
6.1 材料系统的熵、自由能与相平衡	156
6.2 材料系统影响自由能的因素	162
6.3 材料中的相组成	167
6.4 材料中的热力学 I : 自由能曲线与材料相图	173
6.5 材料中的热力学 II : 金属和陶瓷的一元相图与二元相图	176
6.6 材料中的热力学 III : 显微组织形貌及其对材料性能的影响	181
本章小结	188
思考题与习题	188
扩展阅读材料 11: 橡胶的熵致弹性	189
扩展阅读材料 12: 相变效应与“锡疫”	191

第 7 章 固体材料动力学过程:激活与扩散及相关材料行为	193
7.1 材料状态的改变、过程与激活能	193
7.2 玻尔兹曼分布与阿伦尼乌斯定律及其应用	196
7.3 金属材料中的原子扩散过程	199
7.4 离子晶体、共价晶体和聚合物中的扩散	204
7.5 材料中的动力学 I :扩散有关的几个材料行为	206
7.6 材料中的动力学 II :材料的相变与相变动力学特征	210
7.7 材料中的动力学 III :高聚物的结晶	219
本章小结	222
思考题与习题	222
扩展阅读材料 13:软物质材料	222
扩展阅读材料 14:材料中的耗散结构	225
第 8 章 工程材料强化与韧化的主要途径	229
8.1 晶体中的位错与材料强度	229
8.2 金属材料强化的基本途径	234
8.3 金属材料的断裂与韧化途径	242
8.4 陶瓷材料的强韧化	251
8.5 高分子材料的强韧化	254
8.6 材料表面强化及表面改性处理技术	258
本章小结	263
思考题与习题	263
扩展阅读材料 15:芳纶纤维	264
扩展阅读材料 16: ZrO_2 陶瓷的相变增韧	266
第 9 章 工程材料的制备	268
9.1 金属冶炼概述	268
9.2 钢铁的冶炼	270
9.3 有色金属冶炼和粉末冶金介绍	278
9.4 高聚物材料的制备	280
9.5 陶瓷材料的制备	283
9.6 复合材料的制备	287
9.7 现代特殊材料的制备简介	291
本章小结	296
思考题与习题	297
扩展阅读材料 17:碳纤维及其制备	297
扩展阅读材料 18:极端条件下的材料制备	299
主要参考文献	302

第 1 章 材料与人类

材料是人类文明、社会进步和科学技术发展的物质基础和技术先导。材料,尤其是新材料的研究、开发与应用反映出一个国家的科学技术和工业的总体水平。

本章阐述材料与人类文明的关系、材料科学与工程的内涵、材料循环以及材料设计与材料选择等方面的总体思路与战略考虑。

1.1 材料与人类文明

1.1.1 人类发展史上最伟大的材料事件

2006年9月,美国《金属杂志》(Journal of Metals, JOM)发起了旨在弘扬材料科学在人类历史发展进程中的影响力的“最伟大的材料事件”(the Greatest Materials Moments)活动,表 1-1 为按其重要性大小顺序排列的部分“最伟大材料事件”及其意义。“最伟大的材料事件”被定义为:一项人类的观测或者介入,导致人类对材料行为的理解产生标志性进展的关键或决定性事件,它开辟了材料利用的新纪元,或者产生了由材料引发的社会经济重大变化。可以据此来描述材料及其相关科学与技术的发展对人类文明、社会进步和科学技术发展所作出的巨大贡献。

在“最伟大的材料事件”中,有新材料、新器件和先进仪器的发明,有材料的新原理、新规律与揭示新结构的提出,有材料制备技术及工艺的发展,等等。中国古代开发的铁铸造工艺和使用高岭土制备首批精细陶瓷,榜上有名。

表 1-1 最伟大的材料事件

排序	年代	材料事件	意义、贡献
1	1864 年	门捷列夫(D Mendeleev)设计出元素周期表	成为材料科学家和工程师普遍使用的参考工具
2	公元前 3500 年(推测)	埃及人首次冶炼铁(或许是铜精炼的副产品),微量的铁主要用于装饰或礼仪	揭开了钢铁成为世界主导冶金材料的第一个制备秘密
3	1948 年	巴丁(J Bardeen)、布拉顿(W Brattain)和肖克利(W Shockley)发明晶体管	成为所有现代电子学的基石和微芯片与计算机技术的基础
4	公元前 2200 年(推测)	伊朗西北部人发明了玻璃	成为第二种伟大的非金属工程材料(继陶瓷之后)
5	1668 年(推测)	列文虎克(A Leeuwenhoek)制出超过 200 倍的光学显微镜	能够研究肉眼无法看到的自然世界及其结构
6	1755 年	斯米顿(J Smeaton)发明了现代混凝土(水凝水泥)	成为当代的主导建筑材料

续表

排序	年代	材料事件	意义、贡献
7	公元前 300年(推测)	南印度的金属业劳动者发展了坩埚炼钢	生产出几百年后成为著名的“大马士革”刀的“乌兹钢”(wootz),激发了数代工匠和冶金学家
8	公元前 5000年(推测)	在土耳其周边发现可以从孔雀石和蓝铜矿中萃取液体铜以及熔融的金属,可铸成不同的形状	成为冶金提取术——开发地球矿物宝藏的手段
9	1912年	劳厄(M Laue)发现晶体的X射线衍射	创建表征晶体结构方法,启发布拉格父子发展晶体衍射理论,深化对晶体结构与材料性能关系的理解
10	1856年	贝西默(H Bessemer)申请了底吹酸性炉炼钢过程专利	引领出廉价、大吨位炼钢时代,为运输业、建筑物和通用工业带来巨大进步
11	1876年	吉布斯(J W Gibbs)发表《论非均相物质之平衡》著名论文	成为现代热力学和物理化学的基础
20	1913年	玻尔(N Bohr)发表了原子结构模型的理论	提出电子环绕原子核做轨道运动,较外层电子数决定了元素的化学性质

1864年门捷列夫所设计的元素周期表,在表 1-1 的“最伟大的材料事件”中排名第一。此后,元素周期表成为材料科学家和材料工程师普遍使用的参考工具。

元素的物理性质、化学性质随原子序数逐渐变化的规律称为元素周期律。即随着原子序数的增加,元素的许多性质呈周期性的递变规律,如图 1-1 所示。最初,门捷列夫周期表中仅有 66 种元素,截至 2012 年,共包含 118 个确认的化学元素。

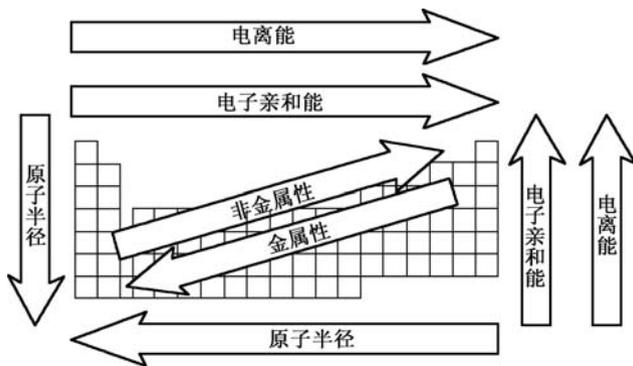


图 1-1 元素周期表的规律性(箭头表示增大的方向)

材料是由元素之间相互作用构成的。可以认为,元素周期表及其基本规律是材料科学的主要基础之一。以上主要由周期表所得的启示,无论是对材料构成的本质和材料行为与特征的认识,还是研制和开发新材料,都具有不可估量的价值(参见 4.2 节)。

1.1.2 材料与物质

我们周围到处都是材料,那么,究竟什么是材料呢?美国材料科学与工程调查委员会将材料定义为:在机器、结构件、器件和产品中因其性能而成为有用的物质。

可见,材料(materials)和物质(substance)是既紧密联系又含义不同的两个概念。材料是物质,但不是所有物质都可以成为材料,材料总是和一定的应用场合相联系的。材料可由一种物质或若干种物质构成;同一种物质由于制备方法或加工方法的不同,可成为用途迥异的不同类型材料,如单晶体 Al_2O_3 成为宝石或激光材料,而多晶体 Al_2O_3 可制作集成电路的放热基板或高速切削工具。

国内普遍认同的材料定义为:材料是人类社会所能接受的、可经济地用于制造有用器件的物质,是人类赖以生存和发展的物质基础。

上一定义内含肖纪美院士论述的判断物质是否为材料的5条判据:资源、能源、环保、经济性及性能。即:

①“人类社会所能接受的”,反映资源、能源、环保的考虑与要求,为战略性判据;

②“可经济地”,反映了经济性指标,经济效益与社会效益,为经济性判据;

③“有用器件”,反映了各种性能要求,如力学性能、物理性能、化学性能等,为质量性判据。

因此,材料与物质间的关系可归纳为以下三方面内容,即材料是有用的并能用来制造物品(件)的物质;材料一般指固态的、可用于工程上的物质;作为材料科学的研究对象,主要是那些制造器件或物品的人造物质。

1.1.3 材料是人类文明的里程碑和社会发展的基础

历史上,人们将石器、铜器、铁器等材料的发展水平作为时代的标志(断代),称为石器时代(史前~公元前10000)、青铜器时代(公元前4000~公元前1000)、铁器时代(公元前1000~公元前1620)。在近代,材料的种类繁多,各种新材料不断涌现,很难用一种材料来代表当今时代的特征,因此一般认为是铁器时代的延续。

100万年以前,人类获得的材料数量非常有限,通常使用的是天然材料,主要以石头为工具,还用木材、动物皮毛、黏土等,称为旧石器时代。在新石器时代,人类已经知道使用天然的金和铜,但因其尺寸较小、数量也少,不能成为大量使用的材料。后来,人类在找寻石料的过程中认识了矿石,在烧制陶器过程中又还原出金属铜,创造了炼铜技术,生产出各种青铜器物,从而进入青铜器时代。中国在商周(公元前17世纪初~公元前256)进入了青铜器的鼎盛时期,在技术上达到了当时世界顶峰。

公元前3500年,埃及人首次熔炼铁(或许是作为铜精炼的一种副产品),揭开了钢铁成为世界主导冶金材料的第一个制备秘密。由于铁比铜更易得到、更好利用,人类从此由青铜器时代进入铁器时代,一直延续到现在。由于铁便宜,大量开采和冶炼,铁成为“平民材料”,从而被普遍使用。公元前8世纪已出现用铁制造的犁、锄等农具,使生产力提高到一个新的水平。中国在春秋(公元前770~公元前476)末期,冶铁技术有很

大的突破,遥遥领先于世界其他地区,如利用生铁经过退火制造韧性铸铁以及生铁制钢技术的发明,标志着中国生产力的重大进步,这成为促进中华民族统一和发展的重要因素之一。这些技术从战国至汉代相继传到朝鲜、日本、西亚和欧洲地区,推动了整个世界文明的发展。

公元前 300 年,南印度的金属业劳动者发展了坩埚炼钢,生产出几百年后成为著名的“大马士革”刀的“乌兹钢”,激发了数代工匠、铁匠和冶金学家。1856 年贝西默(H Bessemer)申请了底吹酸性炉衬炼钢过程的专利,引领出廉价、大吨位炼钢时代,为运输业、建筑物和通用工业带来巨大进步。

第一次产业革命的突破口是推广应用蒸汽机,但只有在开发了铁和铜等材料之后,蒸汽机才得以使用并逐步推广;第二次产业革命以石油开发和新能源广泛使用为突破口,大力发展飞机、汽车和其他工业,支持这个时期产业革命的是当时合金钢、铝合金以及各种非金属材料的相继开发。从而金属材料在 20 世纪中占据了材料的主导地位。20 世纪 30 年代,人工合成高分子材料问世,并发展迅速,如今其世界年产量在 1 亿吨以上。应该指出,有些应归于非金属材料范畴的传统材料如木材、砖瓦、石料、水泥及玻璃等一直占有十分重要的位置。这些材料资源丰富,性能价格比在所有材料中最有竞争力。20 世纪 50 年代,通过合成化工原料或特殊制备方法,制造出一系列的先进陶瓷。由于其资源丰富、比重小、耐高温,很有发展前途,成为近三四十年来研究工作的重点之一。

随着科学技术的发展,与以上结构材料相对应,功能材料越来越重要,特别是半导体材料单晶硅的出现和对其属性的认识,促进了现代文明的加速发展,开启了信息时代。1948 年巴丁(J Bardeen)、布拉顿(W Brattain)和肖克利(W Shockley)发明了晶体管,成为所有现代电子学的基石和微芯片与计算机技术的基础。10 年后又研制成功集成电路,使计算机的功能不断提高、体积不断缩小、价格不断下降,加之高性能的磁性材料不断涌现、激光材料与光导纤维的问世,使人类社会真正进入了“信息时代”。

近、现代历史表明,材料与社会经济发展、地区开发乃至国家振兴是休戚相关的。英国和美国早在 1830 年就尝试以蒸气为动力并用于铁路运输,然而当时的铁轨仅仅是软钢带钉在厚木板上,故急需一种便宜、具有所需性能的金属。倘若没有 KELLEY(美国)和 BESSEMER(英国)制钢技术的发展,铁路事业不可能发展,那么美国就不可能开发西部,英国也不可能工业化。反过来,若无工业、农业对交通运输的需求,那么就缺乏对钢铁工业发展的刺激以及资本投入,当然钢铁制造技术进步的机会也就失去。

材料与经济之间密切关联的另一个例子涉及硅材料。经济上,它触发了一个数百亿美元的工业。从助听器到全球性的遥测技术,通信已十分便利,并且通过文化娱乐、各种私人计算机的出现与使用,人们的日常生活发生了巨大变化。

人类进入 21 世纪后,世界各发达国家都把材料科学和工程作为重大科学研究领域之一,并且根据材料及其在各领域的应用划分为以下几大部分:

——与信息的获取、传输、存储、显示及处理有关的材料即信息功能材料;

——与宇航事业的发展、地面运输工具的要求相适应的高温、高比刚度和高比强度的高性能工程结构材料及先进的陶瓷材料；

——与能源领域有关的能源结构材料、功能材料与含能材料；

——以纳米材料为代表的作为当前材料科学技术前沿的低维材料；

——与医学、仿生学以及生物工程相关的生物材料；

——与信息产业相关的智能化材料；

——与环境工程相关的环境材料,也称绿色材料。

纵观人类利用材料的历史,可以清楚地看到,每一种重要材料的发现和利用,都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平。给社会生产力和人类生活带来巨大的变化,把人类物质文明和精神文明向前推进一步。因此,材料是人类赖以生存的基础,材料的发展和进步伴随着人类文明发展和进步的全过程。

1.2 材料科学与工程兴起

1.2.1 材料学科形成的科学基础

材料科学是一门科学,它致力于材料本质的发现、解析,其目的在于提供材料结构的统一描绘或给出其模型,并解释这种结构与材料的性能之间的关系。

“材料科学”的形成是1960年代初及之后相关科学技术发展的结果。

第一,固体物理、无机化学、有机化学、物理学等相关基础学科对物质结构和物性的深入研究,促进了人们对材料本质的了解;同时,冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等相关应用学科的发展也大大加强了对材料本身的研究,从而对材料制备、结构与性能以及它们之间的相互关系的研究也越来越深入,为材料科学的形成打下了比较坚实的基础。

第二,在材料科学这个名词出现以前,金属材料、高分子材料与陶瓷材料都已自成体系,目前复合材料也正在形成学科体系。它们之间存在着颇为相似之处,不同类型的材料可以相互借鉴,从而促进本学科的发展。如马氏体相变本来是金属学家提出来的,作为钢材热处理的理论基础,后来在氧化锆陶瓷中也发现了马氏体相变现象,并用来作为陶瓷增加韧性的一种有效手段。又如材料制备方法中的溶胶—凝胶法,是利用金属有机化合物的分解得到纳米级高纯氧化物粒子,现在成为改进陶瓷性能的有效途径。复合材料更需要借鉴其他材料的基础知识和制备方法。

第三,各类材料的研究设备与生产手段有颇多共同之处,如光学显微镜、电子显微镜、表面测试及物理性能与力学性能测试设备等。材料生产的许多加工装置也是通用的,如挤压机,既可以用于金属材料成形及冷加工以提高强度,也能用于某些高分子材料的挤压成丝,可使有机纤维的比强度、比刚度大幅度提高。研究与生产装备的通用不但可以节约资金,而且可以相互启发和借鉴,加速材料的发展。

第四,许多不同类型的材料可以相互代替和补充,能更充分发挥各种材料的长处,

达到物尽其用的目的。长期以来,金属、高分子及无机非金属材料相互分割,自成体系。由于互不了解,各分支的人员习惯只在本身的“小领域”内考虑问题,思路难以开阔。设计人员“因循守旧”,对采用异种类型材料持怀疑态度,这既不利于新材料的推广,又有碍于使用材料的行业的发展。显然,材料使用的综合而互补式思路是有益的。

第五,复合材料大多是不同类型材料的组合,如果不同类型材料没有一个全面的了解,作为新材料发展之一的复合材料的研究开发必然受到影响。

可见,材料科学是研究材料共性的一门科学。它是以固体物理、固体力学、热力学、动力学、量子力学、晶体学等为其理论基础的交叉应用学科,运用光学显微镜、电子显微镜、X-射线衍射、电子探针、离子探针以及热分析等各种精密仪器和技术手段,探讨材料的组成、结构、制备工艺和加工使用过程以及与其力学、物理、化学性能之间的规律。

1.2.2 材料科学与材料工程

材料工程是工程的一个领域,它的目的在于采用经济的而又能为社会所接受的生产工艺、加工工艺,控制材料的结构、性能和形状以达到使用要求。

材料科学和材料工程之间的区别主要在于着眼点的不同,它们当中并没有一条明确的分界线。材料科学着重于发现材料的本质,并由此对其结构与组成、性质、使用性能之间的关系作出描述与解释;而材料工程则是应用材料科学的理论和知识,对材料进行控制并实现其具体应用。材料科学或材料工程是一个多学科领域,涉及物质的性质及其在各个科学和工程领域的应用。

1.3 材料科学与工程的内涵

材料科学与工程(materials science and engineering, MSE)就是研究各种材料的成分/结构、制备/加工、性能以及使用性能之间关系的科学。近年来国内外材料界都把材料的成分/结构(composition/structure)、制备/加工(synthesis/processing)、性质(或性能, properties)以及使用性能(或使用效能, performance)称为材料科学与工程的四个基本要素,将它们连接在一起,便形成一个四面体,如图 1-2 所示。

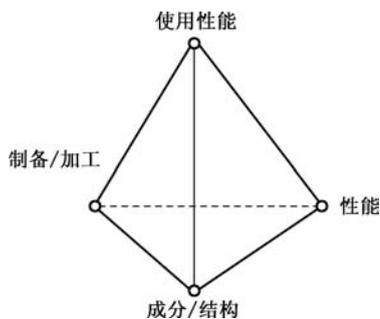


图 1-2 材料科学与工程的四要素与四面体

能, properties) 以及使用性能(或使用效能, performance)称为材料科学与工程的四个基本要素,将它们连接在一起,便形成一个四面体,如图 1-2 所示。

1.3.1 成分与结构

成分与结构包括了决定材料性质和使用性能的原子类型和排列方式。

成分是指材料的化学组成及其所占比例。结构指组成材料的原子或离子在不同尺度上的排列,如宏观、微观的组织结构。

每种特定的材料都含有一个从原子、电子尺度到宏观尺度的结构体系。对于大多

数材料,所有这些结构尺度上的组成和分布是三维变化的,这是制造该种特定材料所采用的具体合成和加工方法的结果。而材料内部结构上多层次的丰富内容和复杂变化(参见4.1节)同样会引起与此相应的一系列复杂的材料性质。因此,在各种尺度上对材料的组成与结构的深入了解是材料科学与工程的主要方面。

1.3.2 制备与加工

本质上制备与加工是获得原子特定排列的方法和过程。具体来讲,就是指通过一定手段构建原子、分子及其聚集体的新排列,是在从原子尺度直到宏观尺度的所有尺度上对结构进行控制以及高效而有竞争力地制造材料和零件的演变过程。

制备的作用包括合成新材料、用新技术合成已知的材料或将已知的材料合成为新的形式以及将已知材料按特殊用途的要求来合成这样三个方面。

加工指将材料成形为有用产品或改变其性能。除了上述为生产出有用材料对其原子和分子的构成与状态进行控制外,加工还包括材料在较大尺度上的改变,有时也包括材料制造等工程方面的问题。材料加工涉及许多学科,是科学、工程以及经验的综合,是制造技术的一部分,也是整个技术发展的关键一步。一个国家保持先进的、强有力的材料加工技术,对各个工业部门实现高质量、高效率至关重要。

对于金属材料,一般而言是先合成制备(冶炼,如炼钢)再后续加工(如轧制、机械加工等)。但对一些材料,合成和加工之间的区别已变得越来越模糊了。高分子材料制造中的反应注射成形就是典型的一例,它是将单体快速混合、充模、聚合反应和最终成形融于一体,在瞬间完成。

合成和加工包括一系列各不相同的技术和工艺,如钢板的轧制、锻造、挤压、冲压成形,机械加工或切削成形,材料的热处理或表面改性(涂层等)处理,陶瓷粉末的压制和烧结成形,精细陶瓷粉末的溶胶-凝胶生产,半导体材料砷化镓晶体的生长,聚合物改性,混凝土的浇注,聚合物的化学反应制备以及层叠式复合材料的铺层,等等。

1.3.3 性质(性能)

性质也称为材料的固有性能,材料的性能是由组成原子及其排列(结构)决定的,它赋予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(如电、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(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由之而来的应用。例如,金属材料具有刚性、强度和硬度,可以用作各种结构件;金属还具有延性,可以加工成导电或受力用的线材(如导线和钢丝);一些特种合金,如不锈钢、形状记忆合金、超导合金等,分别可以用作耐蚀材料、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,可用作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、一定强度以及绝缘性能等)可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、电子电器材料等。

1.3.4 使用性能

使用性能又称效能或服役性能。使用性能是在考虑经济、社会成本和收益的基础上,材料在实际使用中有用性的度量。使用性能通常指材料做成零件或产品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三方面相联系、相融合在一起的一个要素。度量使用性能的指标包括有效寿命、速度(器件或车辆的)、能量利用率(机器或运载工具的)、安全可靠程度和成本及寿命费用等,其他还有能量转换效率(如太阳能电池)、灵敏度(如传感元件),等等。

应指出的是,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)是在元器件或零件组装的设备实现预期的使用性能后而得到利用的。材料的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等这样的使用性能;同样,没有绝缘性能,就无法保证泡沫塑料等所制成的保温层性能。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,一般而言,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,应注意和重视元器件、零件或设备在使用过程中其所用材料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。通常,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指标——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指标。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;等等。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,并导致材料性能发生变化的使用条件(还要考虑材料的使用特性)。

总之,材料科学与工程包含四个要素——成分与结构、制备与加工、性能以及使用性能,它们是材料科学与工程的核心所在。四要素之间密切关联、相互作用形成了一个整体(MSE),构筑成了一个系统(材料系统),形成了一个领域(材料学科与材料世界)。因此,材料工作者的任务就是研究这四个要素以及它们之间的相互关系(这正是本书后

续各章的主线索),并在此基础上创造新材料和挖掘现有材料的潜力,满足各工程领域的要求,推动社会发展。

1.4 材料设计与材料选择

在材料科学与工程四要素的基础上,我国的材料工作者认为成分和结构是不同的两个参量,提出了五要素的六面体模型,如图 1-3 所示。在六面体的中心位置加入理论、材料设计与工艺设计;在性能和使用性能的基础上,分别衍生出材料选择和材料优化。这些发展无疑赋予材料科学与工程更为全面而丰富的内涵。

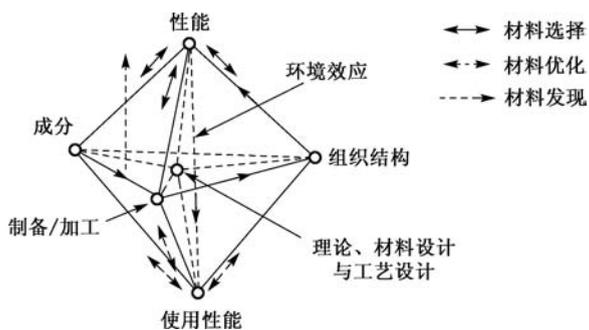


图 1-3 MSE 五要素、六面体以及材料设计与选择示意图

1.4.1 材料设计

材料设计是应用已知的材料信息、科学知识和实践经验,通过控制成分并提出其制备合成方案,预报和开发满足特殊要求的新材料的一种活动过程,其目的是改进已有的材料和开发新材料。

目前,材料设计可根据设计对象所涉及的空间尺度划分为材料性能层次、微观结构层次、原子分子层次和电子层次的设计,以及综合考虑各个层次的多尺度材料设计。所对应的相关学科如图 1-4 所示。分子动力学法与蒙特卡罗法、有限元等方法以及工程模拟等方法和技术是相应的研究工具。

材料设计的最关键步骤是建立物理模型与数学模型。依据材料科学基本原理和相关学科知识,考虑所设计的材料系统各组分的基本特征以及各主要成分的合金化特性等建立相应物理模型,通过有限个小型试样的试验、分析,建立各性能指标与成分之间的数学回归方程,并建立起相应的数学模型。在此基础上进行优化设计,经过计算,建立起可以预见的合金成分,再经过有限个实验确定出其成分—结构—合成与加工—性能—使用效能关系的最佳材料成分,然后经过扩大的实验室试验—半工业化生产阶段—工业化生产阶段,而每个阶段都必须进行工况条件下的应用研究、性能实验,最终达到工程上所需要的材料设计。

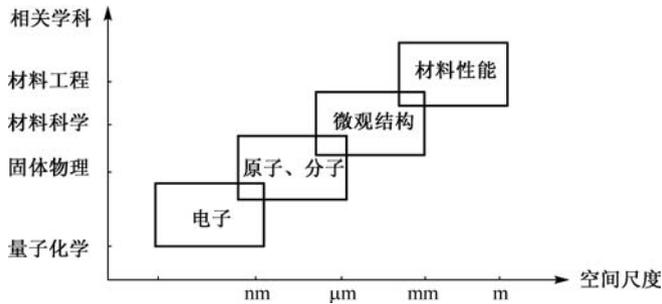


图 1-4 材料设计的层次(尺度)和相关学科

1.4.2 材料选择

近年来,材料界已达共识:材料选择是材料科学与材料工程的重要使命之一,是材料器件化、产品化的必经之路,也是材料工作者的职责所在。

材料的选择具有相当的复杂性和非唯一性。所幸的是大多数情况下,所设计的产品有先例可以借鉴,采用相似的材料和工艺生产相似的产品或零部件,即使材料选择不完全得当,一般也不会出现太大的差错。但是,要科学而合理的选材,不仅是不容易的,而且是意义重大的。如果产品是没有先例的,材料选择就更显得特别重要了。

选材中的理想结果是只有一种材料满足设计要求,但工程实际中往往有许多候选材料,而每种材料都可能只是在不同程度上满足其要求。

尽管产品设计选材时往往面临着多种可能的选择,但选材有其基本原则:

- ① 胜任某一特定功能;
- ② 综合性能比较好;
- ③ 材料性能差异的量化,主要指性能指标波动的程度;
- ④ 成本,经济效益与社会效益;
- ⑤ 与资源、能源及环境尽可能地协调,即对环境尽可能友好。

要实施这些基本原则,重要的问题是材料参数的量化。对于十分重要的数个参数,必须按重要性的先后次序排列,进行选材评判,或者考虑其相对权重进行定量分析。此时选材问题实际上变为在几种候选材料中选优。一个好的材料选用,应是设计—选材—工艺—用户(效果)最佳组合的结果。

此外,选材中也可能出现现有材料都不能满足规定的性能要求,或者由于价格高、不易购得、环境关系等原因,无法合理选材。在这种情形下,可以通过重新设计、降低要求或者研制新材料来解决。

在近年兴起和提倡的绿色设计中,要求设计人员选材时不仅要考虑产品的使用条件和性能要求,还要考虑环境约束准则、材料对环境的影响以及环境友好性原则。绿色设计对材料的要求是:

- ① 选用的材料应是资源丰富的、市场可得的材料;

- ② 应是(材料制备中)能耗少、成本低、少污染或无污染的材料;
- ③ 材料容易被加工并在加工中无污染或少污染;
- ④ 应是易回收、易处理、可重用、可降解的材料。

根据绿色设计选材的要求,理想的材料称为绿色材料(或环境协调材料、生态材料)应具有如下三个显著特征:良好的使用性能;较高的资源利用率;对生态环境无副作用(环境负荷值最小)。

1.5 材料循环

1.5.1 材料的循环过程

人类从地球上通过采矿、钻探、挖掘、采集等得到矿石、矿物、煤、原油、天然气、石头、沙子、木头、生橡胶等原材料,这些原材料通过冶炼或其他初加工被制成工业用原料(金属坯料、化学产品、纤维、橡胶、电子晶体等),然后进一步加工成工程材料(合金或型材、玻璃或陶瓷、半导体、塑料、合成橡胶、混凝土、建筑材料、纸、复合材料,等等)。这些工程材料通过完成相应设计要求的加工制造,组成结构构件、机器、装置和其他社会需要的产品,为人类所使用(军用、民用)。当这些由工程材料制成的产品被人类使用一定期限后,或因服役后失效,或到了工程要求的服役(或寿命)期,或完成了某一规定使用周期,人们通常把它废弃,这些废弃物又回到大地中去,如图 1-5 所示材料循环模式中的外环。

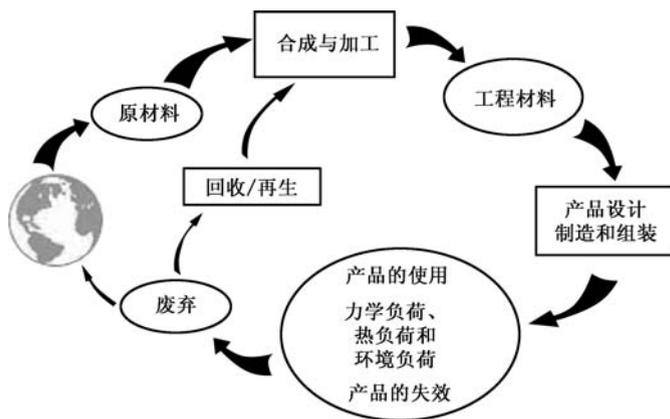


图 1-5 材料循环示意图

以上即是人们长期以来所形成的传统思维或传统产业的“资源开采—生产加工—消费使用—废物丢弃”的物质单向运动模式,这必然会带来地球有限资源的紧缺和破坏,同时带来能源浪费,并且造成人类生存环境的污染。

审视 20 世纪过程工业的发展历程,人们开始认识到现有的“消耗资源能源—制造产品—排放废物”这一单向生产模式已无法持续下去,而应当代之以仿效自然生态过程

物质循环的模式,建立起废物能在不同生产过程中多次循环、多产品共生的工业模式,即所谓的双向循环模式(或理论意义上的闭合循环模式)。即废弃物通过回收利用,经过某种再生、加工过程,又回到工程材料的状态,重新进行材料的循环过程(如图 1-5 的内环),如此不断进行下去。最易于回收利用的是金属材料,迄今钢铁构件和铝制品等的回炉非常成功,纸张的回收造纸也是人们的传统作法。废旧塑料的回收利用是最不成功的。一是由于不同塑料混杂后无法区分,而混杂塑料的性能是十分低劣的;二是由于某些塑料是不可再加工的,如聚苯乙烯泡沫包装材料。橡胶轮胎也属于不可再加工的物品,至今只能以高成本进行低温粉碎或焚烧发电。聚合物的回收利用问题在全世界已显得日益紧迫。所幸的是人们已发明出利用超临界状态使聚酯(饮料瓶所用材料)回到聚合前的对苯二甲酸和乙二醇酯单体的技术,这是一个可喜的信号。如果塑料都能回到聚合前的状态,白色污染的问题今后将不再困扰负担过重的自然界。

1.5.2 材料的可持续发展战略

国际材料界在审视材料发展与资源和环境关系时发现,过去的材料科学与工程是以追求最大限度发挥材料的性能和功能为出发点的,而对资源、环境问题没有足够重视,没有充分考虑材料的环境协调性问题。在全球经济必须可持续发展的今天,人们在理解和认识材料科学与工程的内涵时应予以拓宽,这主要是:

①在尽可能满足用户对材料性能要求的同时,必须考虑尽可能地节约资源与能源,尽可能地减少对环境的污染,要改变片面追求性能的观点。

②在研究、设计、制备和加工材料以及使用、废弃材料产品时,一定要把材料及其产品整个寿命周期内对环境的协调性作为重要评价指标,改变过去那种只管生产、不顾使用和废弃后资源再利用及环境污染的观点。

③这个定义的拓宽将涉及多学科的交叉,且具有更宽的知识基础和更强的实践性,不但要追求科学技术效益、经济效益,还要追求社会效益,最终把材料科技与产业的具体发展目标和各国、各地区可持续发展的大目标结合起来。

材料的可持续发展战略是一个需要多学科、多部门联合作战的复杂系统工程,最重要的思想就是建立“生态工业园区”。所谓“生态工业园区”就是实施生态工业的系统工程基础,其目标是通过多种产业的综合协调发展,使某一个产业的副产物或废料成为另一个企业的原料并加以利用,进而形成物流的“生态产业链”或“生态产业网”,形成能流的多次梯级利用,使在一定界区内的多行业、多产品联合发展,由此不仅可使物质资源在产业链中得到充分利用或循环利用,而且可使能量资源和信息资源同时得到充分利用。

生态环境材料是人类从环境保护的角度出发,重新认识和评价过去人类研究材料、开发材料和使用材料的活动后提出来的。

生态环境材料(又称环境友好型材料、绿色材料)是指同时具有优良的使用性能和最佳环境协调性的一大类材料。这类材料对资源和能源的消耗少、对生态和环境的污染小,再生利用率高或可降解化和可循环利用,而且要求从材料制造、使用、废弃直到再生利用的整个寿命周期中,都必须具有与环境的协调共存性。

近年来,围绕生态环境材料这一主题,国际上开展的广泛研究,可以划分为材料的环境协调性评价和具体的生态环境材料设计、研究与开发两大主题。

生态环境材料的评价必须以材料的完整寿命周期为研究范围。全寿命周期评价 LCA(life cycle assessment)是 20 世纪 70 年代初至 90 年代发展起来的理论,即对产品从最初的原材料采掘到原材料生产、产品制造、产品使用以及产品用后处理的全过程进行跟踪和定量分析与定性评价。自 1998 年起,国家 863 计划支持了首项“材料的环境协调性评价研究”,开始对钢铁、铝、水泥、塑料、陶瓷、建筑涂料等量大面广的几大类主要基础材料进行初步的评价、分析。到目前为止,已经完成了各类材料基本数据的调研和初步分析,初步建立了相应的 LCA 数据库和评估软件。

发展生态环境材料也包括材料性能或使用寿命的明显提高,从而大幅度减少原材料及能源等的消耗。如世纪之交世界上兴起和发展的超级钢计划,目标是主要钢铁材料品种的实际使用强度、使用寿命提高一倍,并降低总成本,降低对环境的污染度。详见本章扩展阅读材料 1。关于生态环境材料的细节内容及其进展,参阅扩展阅读材料 2。

本章小结

材料、信息、能源是现代文明的三大支柱,而材料又是人类文明、社会进步和科学技术发展的物质基础和技术先导。人类进入 21 世纪后开始认真思考材料、能源和环境的密切关系,越来越重视材料的可持续发展。

材料科学着重于发现材料的本质,并由此对其结构与组成、性质、使用性能之间的关系作出描述与解释;而材料工程则是应用材料科学的知识,对材料进行控制并实现其具体应用。材料科学与工程是一个整体,是一个多学科领域,涉及材料的性质及其在各个科学和工程领域的应用。

材料科学与工程包括四个要素——成分与结构、制备与加工、性能以及使用性能,四者之间密切关联,它们是材料科学与工程的核心所在,它们相互作用形成了一个四面体整体(MSE)。在此基础上,将成分和结构分开,提出了六面体模型,衍生出材料选择和材料优化,这些发展无疑赋予材料科学与工程更为全面而丰富的内涵。

在材料的“资源开采—生产加工—消费使用—废物丢弃”传统单向循环过程中加入多次“回收利用”即形成材料充分利用的闭环循环。生态环境材料是可持续发展的,应贯穿于人类开发、制造和使用材料的整个过程。

思考题与习题

1. 试选“最伟大的材料事件”中的某一项阐述材料与人类的关系。
2. 试阐述材料科学兴起的科学基础。何为材料科学与工程?
3. 说明材料科学与工程四个要素与四面体的概念。
4. 材料设计的目的是什么?

5. 以杯子、窗框用材为例,说明材料选择的原则和绿色选材。
6. 举例说明什么是材料循环。
7. 说明可持续发展、生态环境材料和全寿命周期评价的概念。

扩展阅读材料 1: 超级钢

超级钢(super steel)是指具有组成单元(晶粒)超细化、化学成分(杂质)超洁净、显微组织超均质的结构特征,以及高强度、高韧性的力学特征的新一代钢铁材料,也称超细晶粒钢。

1. 超级钢的研究开发背景

自工业革命以来,钢铁一直是人类使用的主要结构材料,人类社会的每一点进步都与钢铁工业的发展紧密相连。虽然 1960 年代后不断涌现的高技术先进结构材料使钢铁在材料中的地位受到了严重的挑战,但钢铁在资源、能耗、成本、环保和性能诸方面,仍具有明显的综合优势。与此同时,钢铁材料本身又如何在性能、寿命、技术经济指标和节能、环保等方面获得跨越式的提升,甚至成倍的提高? 所以,以质补量,研究开发性能更好的新一代钢铁材料,成为 20 世纪 90 年代国际材料界、钢铁行业反复思考、研究和大力开发的热点。

研究表明:在超细晶粒范围内铁基材料屈服强度(α)与晶粒尺寸(d)的关系仍符合 $\alpha \propto d^{-1/2}$ 的 Hall-petch 关系(参见 8.2 节)。当晶粒从 $20\mu\text{m}$ (当前工业细晶粒尺寸)细化到亚微米($0.26\mu\text{m}$ 左右)后,屈服强度 α 可从 200MPa 升达 1.4GPa。

2. 国内外超级钢计划、目标

日本钢铁界 1997 年出台了超级钢研究工程项目,10 年期限的目标(表 1)是主要钢铁材料品种的“实际使用强度提高 1 倍,结构的寿命提高 1 倍,降低总成本,降低对环境的污染度”。此举措被认为是对世界上最重要的工程结构材料——钢铁的再认识,是“第二次铁器时代”来临的前期征兆,吹响了“向钢铁进军”的新号角。韩国 1997 年也启动“21 世纪高性能结构钢发展”的 10 年项目。相应地,在国际钢铁协会主持下,1998 年由欧洲和北美 35 家钢厂和汽车厂联合发起的“超轻钢车身”项目启动,其目标是车身强度提高 80%,车重减轻 25%。

在日、韩、欧美对超级钢(以达到 $1\mu\text{m}$ 的铁素体晶粒尺寸为目的)研究的热潮中,我国 1998 年末在国家重大发展规划中,启动了由翁宇庆教授主持的 973 项目“新一代钢铁材料重大基础研究”,并将超级钢思路发展成“超细晶粒钢”。到 2001 年后,全球范围的先进钢铁结构材料研发工作已蓬勃展开,陆续取得了阶段性成果与成效(开发出原型钢、进行中试等)。

表 1 日本新世纪结构材料(超级钢铁材料)研究课题与目标

两大研究主题	四项研究课题	研究目标
结构材料高强度化的研究	以铁素体为基体的一般焊接结构用钢的高强度化研究	开发 800MPa 级(用于土木、造船等)的一般焊接结构用钢及其焊接工艺
	1500MPa 级超级高强度钢的高性能化研究	开发 1500MPa 级(超长大桥、轻型化汽车、新建筑用)不易疲劳破坏与延迟破坏的超强钢;同时开发新的高刚性化技术
结构材料长寿命化的研究	利用长时间组织稳定化实现铁素体系耐热钢的高性能化研究	开发可长时间使用的高 Cr 铁素体系耐热火力发电所用的大直径厚壁主蒸汽管
	提高结构用钢在海洋环境下的耐久性的研究	开发海滨用免防腐层(裸使用)低合金耐蚀钢与耐海水腐蚀不锈钢及耐腐蚀涂层

近几年,国内外的超级钢项目主要以高强度化与长寿命化为研究主题,以 800MPa 高强度钢、1500MPa 级超高强度钢、耐热钢和耐蚀钢为研究对象。

3. 超细晶粒化方法

1) 加工热处理

利用塑性加工+相变来细化组织的原理,归纳为三方面。

①通过增大相变时形核位置的密度来细化晶粒。这需要依靠母相奥氏体的晶粒细化,以及用塑性加工向奥氏体晶粒内导入位错结构(促进形核)来实现。

②通过相变驱动力的增大,使临界晶核尺寸减小和形核速度增大。这主要靠奥氏体快速冷却,导致很大的过冷度来实现。

③通过抑制所生成的细晶组织的长大与粗化。最有效的方法是使细小第二相弥散析出,发挥其对晶界的钉扎效果。

各种奥氏体晶粒超细化的特殊加工热处理方法研究表明:通过在 A_3 点稍上的温度和室温之间快速加热、冷却,反复进行铁素体(或马氏体)/奥氏体相变,可得到 $2\sim 3\mu\text{m}$ 的超细奥氏体晶粒。将低、中碳钢的回火马氏体进行 80% 的冷轧后,再奥氏体化,可将奥氏体晶粒细化到 $0.9\mu\text{m}$ 。另外,将奥氏体不锈钢在室温加工,得到近 100% 的加工诱导马氏体组织后再进行逆相变,可得到 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ 的超细晶粒奥氏体。

2) 强应变加工

普通塑性加工无法给予特大应变,难以使金属材料的晶粒超细化到 $1\mu\text{m}$ 。高压扭转法、等通道角挤压或通道角压制法等虽是实验室条件下进行强应变加工、实现晶粒超细化的好方法,但不适合用于大型材料的连续生产。

目前,主要采用累积叠轧合法进行大型材料轧制的强应变加工。即将承受 50% 轧制后的材料按纵向一分为二,叠合后返回到原来尺寸(厚度),再轧制等变形加工,如此反复。为轧制时使两片材料相互结合良好,在叠前对钢板表面进行脱脂、刷洗等表面处理。此外,为了减小轧制载荷,常加热到再结晶温度以下的中温区域进行轧合加工。

用强应变加工使晶粒超细化的机理与通常成核、长大型的再结晶不同。随着应变增大,塑性变形诱导大角晶界的密度上升,晶粒被分割为亚微米尺寸。应变诱导晶界具有很大的位向差,通过回复转化为具有较平衡结构的晶界,形成清晰的晶粒超细组织。由于这一过程并没有伴随着大角度晶界的长距离移动(新晶粒的生长),因而使得它与由形核长大产生的不连续再结晶有区别,被称为“原位再结晶”或者“连续再结晶”。

(杨瑞成、陈奎撰写)

扩展阅读材料 2: 生态环境材料

1. 生态环境材料的提出

1992 年,日本东京大学山本良一教授提出一个全新的研究领域“环境材料”(environmental conscious materials 或 ecological materials)。生态环境材料是充分考虑材料与人类、社会、自然三者相互关系的前提下提出的新概念,它代表了 21 世纪材料科学的一个新的发展方向。

生态环境材料是指那些具有良好的使用性能和优良的环境协调性的材料(图 1)。

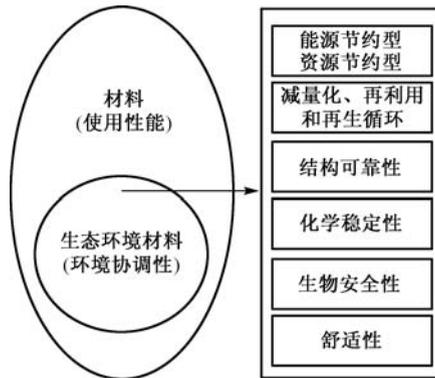


图 1 生态环境材料的概念图

材料的循环可借鉴解决环境问题的三个原则,即 3R: 一是减量(reduce),其特点就是尽可能减少材料生命周期各阶段排放的废弃物;二是再利用(reuse),其特点就是废弃物中材料或零件不进行再加工和分离,直接作为产品使用;三是再生循环(recycle),其特点就是废弃物进行加工处理,作为原料来使用(再资源化)。

生态环境材料主要包括:环境相容材料(如纯天然材料的木材、石材等)、仿生物材料(如人工骨、人工器脏等)、绿色包装材料(如绿色包装袋、包装容器等)、生态建材(如无毒装饰材料等)、环境降解材料(如生物降解塑料等)、环境工程材料(如环境修复材料等)、环境净化材料(如分子筛、离子筛材料)、环境替代材料(如无磷洗衣粉助剂)等。

本篇仅以与生态环境材料相关的合金成分设计的环境协调性、通用合金和简单合金、可降解塑料的开发应用为例做一简单介绍。

2. 合金成分设计的环境协调性考虑

材料的环境协调性评价(materials environmental life cycle assessment, MLCA),是评价材料的环境表现和环境性能,即将 LCA 的原则和方法应用到对材料全寿命周期的评价中去。

环境协调性合金的成分设计原则之一是尽量不使用环境协调性不好的合金元素。包括地球中即将枯竭性元素以及对生态环境特别是对人体有较大毒害作用的元素,对人体有较大毒害作用的元素有 Cr、As、Pb、Ni、Hg 等。表 1 列出了欧盟制定的环境保护限制措施中与材料相关的条例(RoHS、PPW 和 ELV),可见 Pb、Cd、Hg、Cr(6 价)和 Br 的元素含量是需要严格控制的。

铅表面在空气、土壤及水中容易起反应,形成一层保护性的不溶无机铅化物,这些全被归为危险毒性物质。铅用于橡胶、染料、印刷、陶瓷、铅玻璃、焊锡、电缆及铅管等的生产,会产生含铅废水和废弃物。另外,汽车排气中的四乙基铅是剧毒物质。在人体中铅会影响中枢神经系统及肾脏。若长期曝露使血液铅浓度超过 60 $\mu\text{g}/\text{dl}$,就会造成临床铅中毒。无铅钎焊合金就是成功研制的环境协调性合金的典型例子。

铬用于不锈钢、电镀(如汽车零件、手用工具等)、制革、油漆颜料、染料、防锈处理、合金化等。六价铬为吞入性毒物/吸入性极毒物,皮肤接触可能导致过敏,更可能造成遗传性基因缺陷,吸入可能致癌,对环境有持久危险性。金属铬、三价或四价铬并不具有这些毒性,目前国内外汽车业电镀推行三价铬替代六价铬,未来发展应是完全不含铬的方式,如合金或复合电镀。

表1 欧盟制定的环境保护限制措施

名称	限制内容
RoHS (The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment) 电气电子设备中限制使用某些有害物质指令	2006年7月1日起电器产品零组件禁用铅、汞、镉、六价铬及特定的溴系难燃剂(多溴联苯 PBB、多溴二苯醚 PBDE 等)
PPW(Packaging and Packaging Waste) 包装和包装废弃物指令	包装材料使用铅、汞、镉、六价铬的含量限制在0.01%以下, 2008年12月31日起,包装废弃物总重55%~80%应能再利用、60%应可回收或能源回收
ELV(End of Life Vehicle) 汽车回收指令	2003年7月1日起汽车零、组件禁用铅、汞、镉、六价铬; 添加前述物质时镉限制在0.01%以下,其他为0.1%以下

3. 通用合金和简单合金

以往总是针对不同用途开发不同的材料,使材料种类一直在增加(达数十万种)。种类繁多的材料混杂在一起,使废料的再生循环利用变得非常困难。因此,从提高金属材料的再生循环性能出发,出现了通用合金和简单合金的概念。

通用合金,又称泛用型合金,就是使用合金元素种类最少且能满足对材料要求的通用性能(如较高强度、耐腐蚀性和耐热性等)的标准合金系。具体应用中的性能要求主要是通过不同的热处理来控制显微组织以及调整成分比来实现的,现在已发展了 Fe-Cr-Ni 钢、Fe-Cr-Mn 钢、Fe-Cr-Mo 钢、Ti-Al-V 系等几种通用合金。

简单合金就是其组元组成简单的合金系。其合金设计的思路是省合金化或最小合金化。即合金组元简单,再生循环过程中易于分选;原则上不加入目前尚不能用精炼方法去除的元素;尽量不使用环境协调性不好的合金元素。因此,在设计、开发此类合金时,一方面在维持合金较好性能的前提下,尽量减少合金的组元数;另一方面在获得合金性能时,以控制显微组织作为加入合金元素的替代方法。与通用合金的用途不同,简单合金主要是替代大量消费的金属结构材料。简单合金的代表是 Fe-C-Si-Mn 系低碳合金钢,通过适当的组分配比和热加工工艺,可以获得大范围变化的显微组织和力学性能,而且简单的组元和类似的化学成分能保证再生循环过程中回收的废钢具有大致相同的成分,易于再生循环。这一合金系成功范例是日本开发的 SCIFER 钢 (Fe-0.15C-0.8Si-1.5Mn, Fe-0.10C-1.0Si-1.2Mn),其合金元素总量低于 2.5%,通过形变强化可使这种钢的强度达 500MPa 以上,同时还保持较高的塑性。

4. 可降解塑料

塑料可以用化石原料或可再生原料进行生产。可再生原料主要是利用植物类或动物类天然高分子,其中植物类有纤维素和木质素、淀粉、植物蛋白质、天然橡胶等。可降解塑料是指使用后能在自然界微生物或光的作用下最后完全分解成二氧化碳、水及其他低分子化合物,使之成为自然界中碳循环的一个组成部分的一类高分子材料。如生物降解性塑脂 Ecovio 的成分是 Ecoflex 和 PLA(聚乳酸),前者是基于石油化工产品生产的生物降解性塑脂,后者则由可再生原材料——玉米制成。

可生物降解塑料具有广阔的应用市场,如医疗领域的手术缝合线、手术衣以及药物缓释的载体;农业材料中的地膜、花盆和控释化肥封装;包装材料中的手提袋、垃圾袋、食品包装和容器等。

(张建斌撰写)

第 2 章 工程材料概述

解决不同工程用途所需要的材料称为工程材料。按物理化学属性将其分为四大类:金属材料、陶瓷材料、高分子(聚合物)材料和复合材料。

工程材料按其工作时的主要性能指标可分为结构材料和功能材料。结构材料是以力学性能(强度、塑性等)和化学性能(腐蚀、磨蚀等)为主要指标,用于承力、腐蚀或磨蚀等环境的构件;功能材料是以物理性能(电学、磁学、热学、光学、声学等)及生物功能为主要指标,用于制造各种功能元器件。

本章分 4 节介绍金属材料、陶瓷材料、高分子(聚合物)材料、复合材料 4 种工程结构材料;第 5 节介绍功能材料。

2.1 金属材料

金属材料包括黑色金属和有色金属两大类。黑色金属主要是指钢铁和其他以铁为基的合金,以及铬、锰及其合金;以其他金属为基的合金,则称为有色金属或称为非铁合金。

2.1.1 钢铁

1. 钢铁及其牌号表示

钢铁是钢和铸铁的统称。钢是以铁为主要元素、含碳质量分数小于 2.11%(一般在 1.3%以下),并含有其他元素的合金;铸铁是指含碳质量分数大于 2.11%(一般为 2.5%~4%),并含有较多 Si、Mn 及杂质元素 S、P(与钢相比)的多元铁碳合金。

按化学组成钢可分为碳钢和合金钢。合金钢是在碳钢基础上,特意添加某些合金元素,用以保证较高的性能与组织要求以及相应的生产和加工技术的钢材。

按用途钢可分为结构钢、工具钢和特殊性能钢三类。结构钢又分为工程结构用钢和机械制造用钢,结构钢强调强度和塑性、韧性的合理配合。工具钢又分为刃具钢、量具钢和模具钢,工具钢强调高硬度、耐磨性以及热(红)硬性、尺寸稳定性和热疲劳性等。特殊性能钢包括耐蚀钢、耐磨钢、耐热钢和某些特殊物理性能钢等。

钢铁产品牌号通常采用汉语拼音字母、化学元素符号和阿拉伯数字相结合的方法表示。为了便于国际交流和贸易的需要,也可采用大写英文字母或国际惯例的表示符号。表 2-1 列出了常用钢铁产品牌号表示方法。

表 2-1 钢铁产品牌号表示方法(GB 221—2008)

钢类	钢号举例	表示方法说明
结构钢	碳素结构钢和低合金结构钢	Q235AF 代表屈服强度的拼音字母“Q”+强度值(以 N/mm ² 或 MPa 为单位); 必要时标出钢的质量等级(A、B、C、D、E 等); 必要时标出脱氧方式,即沸腾钢、半镇静钢、镇静钢、特殊镇静钢分别以“F”、“b”、“Z”、“TZ”表示; 必要时标出产品用途、特性和工艺方法的标识符号
	低合金高强度结构钢	Q345D 16MnR 20MnK 低合金高强度结构钢的牌号表示方法同碳素结构钢; 也可用二位阿拉伯数字(表示平均含碳量,以万分之几计)加元素符号; 必要时顺次加代表产品用途、特性和工艺方法的表示符号
	优质碳素结构钢	08F 50A 50MnE 45AH 65Mn 以二位阿拉伯数字表示平均碳含量(以万分之几计); 较高含锰量碳素工具钢必要时标出“Mn”; 高级优质钢、特级优质钢也可分别以 A、E 表示,优质钢不标(下同); 必要时标出脱氧方式表示符号,即沸腾钢、半镇静钢、镇静钢分别以“F”、“b”、“Z”表示,但镇静钢表示符号通常可以省略; 必要时标出产品用途、特性或工艺方法的标识符号,如保证淬透性钢表示符号“H”
	合金结构钢	20Cr 40CrNiMoA 60Si2Mn 18MnMoNbER 以二位阿拉伯数字表示平均碳含量(以万分之几计)。合金元素含量,以化学元素符号及阿拉伯数字表示。平均含量小于 1.50%,一般不标明含量;平均含量为 1.50%~2.49%、2.50%~3.49%...则相应数字为 2、3...(下同)。必要时加产品用途、特性或工艺方法的表示符号,如“R”代表锅炉和压力容器用钢
工具钢	碳素工具钢	T8 T8Mn T8A T 代表碳素工具钢; 阿拉伯数字表示平均碳含量(以千分之几计); 较高含锰量的碳素工具钢标出“Mn”
	合金工具钢	9SiCr CrWMn 平均碳含量小于 1.0% 时,采用一位数字表示碳含量(以千分之几计); 平均碳含量不小于 1.0% 时,不标明含碳量数字
	高速工具钢	W18Cr4V CW6Mo5Cr4V2 表示方法与合金结构钢相同,但在牌号头部一般不标明表示碳含量的阿拉伯数字。在牌号头部加“C”表示高碳高速工具钢
不锈钢和耐热钢	06Cr19Ni10 022Cr18Ti 20Cr15Mn15Ni2N 20Cr25Ni20 用两位或三位阿拉伯数字表示碳含量最佳控制值(以万分之几或十万分之几计)。合金元素表示方法同合金结构钢。钢中有意加入的铌、钛、锆、氮等合金元素,虽然含量很低,也应在牌号中标出	

2. 碳钢

碳钢又称碳素钢。一般认为,除了铁和碳以外,还含有少量脱氧元素 Mn、Si、Al, 杂质 P、S 及气体 N、H、O 等元素的钢统称为碳钢。其组织和性能主要受碳元素的质量分数和硫、磷等杂质元素的质量分数的影响。

碳钢具有较好的力学性能和工艺性能,且产量大、价格较低,因此它是机械工程上应用十分广泛的金属材料。碳钢的用途与碳含量密切相关(图 2-1),据此碳钢可分为

低碳钢($w_c < 0.25\%$)、中碳钢($0.25\% \leq w_c \leq 0.60\%$)、高碳钢($w_c > 0.6\%$)和超高碳钢($w_c > 1.2\%$)。

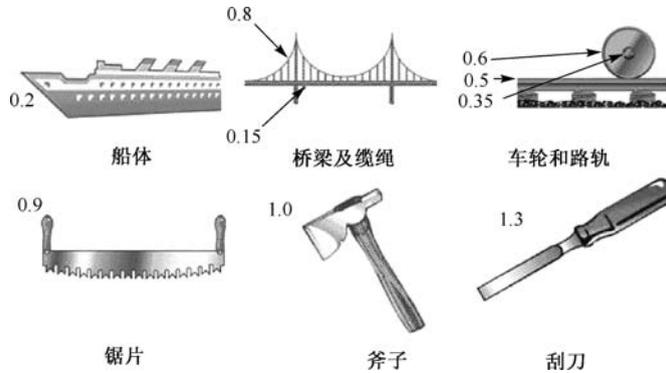


图 2-1 常用金属零构件及其碳含量(图中数字为质量百分数)

1) 低碳钢

低碳钢因其强度、硬度低而柔软,故又称软钢。它包括大部分普通碳素结构钢和一部分优质碳素结构钢。

低碳钢一般通过轧制加工,制成角钢、槽钢、工字钢、钢管、钢带、钢板等型材,具有良好的焊接性,用于制作各种建筑构件、容器、箱体、炉体和农机用具等。优质低碳钢轧成薄板用于制作汽车驾驶室等深冲制品;轧成棒材用于制作强度要求不高的机械零件。

低碳钢在使用前一般不经热处理,有的经渗碳或碳氮共渗处理,用于要求表层硬度高、耐磨性好的轴、轴套、链轮等零件。

2) 中碳钢

中碳钢可不经热处理,直接使用热轧或冷拉材,亦可经热处理后使用。中碳钢经淬火、回火后具有良好的综合力学性能。中碳钢的热加工性能及切削性能良好,强度、硬度比低碳钢高,而塑性和韧性低于低碳钢。同时因含碳量比低碳钢高,焊接性能变差。在中等强度水平的各种用途中,中碳钢得到最广泛的应用,除作为建筑材料外,还大量用于制造各种机械零部件。

3) 高碳钢

高碳钢通过淬火硬化和低温回火,主要用于制造工模具。随碳含量的升高,高碳钢在硬度升高的同时变脆,焊接性能很差。锤、撬棍等由含碳量 0.75% 的钢(如 T8A)制造;切削工具如钻头、丝攻、铰刀等由含碳量 0.90%~1.00% 的钢(如 T10A)制造。

4) 超高碳钢

超高碳钢通过热机械处理(也称为形变热处理)以获得超细、近球形的等轴晶粒以及非连续碳化物颗粒的显微组织,可具有高的超塑性能和良好的综合力学性能。超高碳钢可被加工成锭、薄板和棒,并代替部分高碳钢应用于耐磨件、工模具、汽车和铁轨等领域。

3. 合金钢

合金钢按合金元素含量可分为低合金钢(合金元素总量 $\leq 5\%$)、中合金钢($5\% <$ 合金元素总量 $\leq 10\%$)和高合金钢(合金元素总量 $> 10\%$)。

合金钢中加入的主要合金元素有锰、镍、铬、钼、钒、钛、铌、铝、硼等,合金元素的加入,克服了碳钢淬透性低、回火稳定性差、不能满足特殊性能要求等缺点。因此,制造高强度、大尺寸的重要零件时离不开合金钢。

合金钢的品种多,下面主要介绍低合金高强度钢、工具钢和不锈钢。

1) 低合金高强度钢

低合金钢是指在低碳钢中加入少量(一般不大于 5%)合金元素,由于合金元素的强化作用,低合金钢具有较高强度和韧性,且耐腐蚀、耐低温,其焊接性、成形性等工艺性能较好,生产成本较低。

低合金高强度钢的供货状态通常为热轧或控制轧制状态,用户在使用时通常均不进行热处理。低合金高强度钢的显微组织通常为铁素体+珠光体(F-P),其屈服强度约为 460MPa 。若要求更高强度和韧性的配合,就需要考虑选择其他类型组织的低合金钢,因而发展了F-M双相钢(在软相铁素体基体上分布着一定量的硬质相马氏体)、针状铁素体、低碳贝氏体和低碳马氏体钢。

加入强碳氮化物形成元素V、Ti、Nb,以及少量Al(形成AlN)主要起细晶强化和析出强化作用,得到微合金化钢,如 15MnVN 等。

添加少量Cu、P、Cr和Ni等,使其在金属表面上形成保护层,以改善钢材耐大气腐蚀性能,得到在大气和海洋气氛中锈蚀缓慢的耐候钢,如 09CuPTi 、 12MnPRE 等。

低合金高强度钢常用于铁路、桥梁、船舶、汽车、压力容器、焊接结构件和机械构件等,图2-2所示为低合金高强度钢在南京长江大桥和国家体育场“鸟巢”建筑中的典型应用。

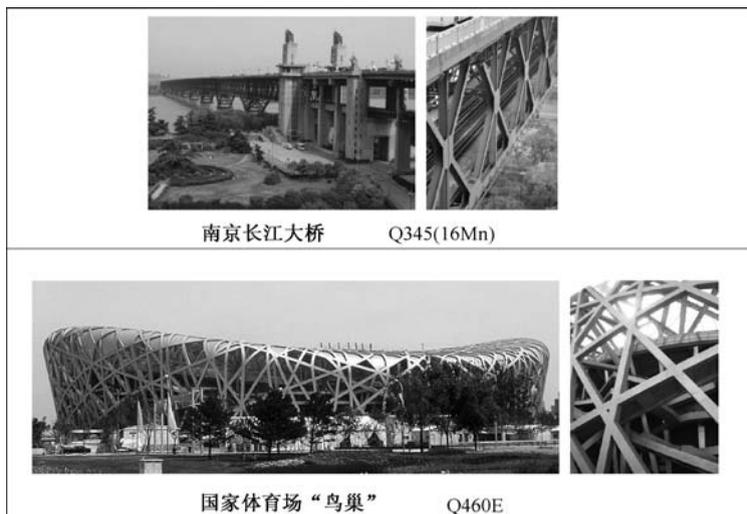


图2-2 低合金高强度钢的典型应用

2)合金工具钢

合金工具钢是指用于制造切削工具、量具、模具及抗高温软化弹簧、各类轴承和一些耐磨零件等的高碳合金钢。工具钢的分类较多,如按用途分为刃具钢、模具钢和量具钢(但在实际使用中并无严格界限)。常用如 9Mn2V、9SiCr、CrWMn、Cr12MoV 以及高速工具钢 W6Mo5Cr4V2 等。

合金工具钢具备以下基本性能:高硬度(必须超过被切削或被成形材料的硬度)、高红硬性(高温长时间下仍能保持高硬度的能力,它需要高的抗回火性)、耐磨性(在承受高应力和高摩擦工况下能有最低的磨损)、足够的塑性和韧性(在受冲击或震动时防止刀具断裂)。

3)不锈钢

不锈钢是以不锈、耐蚀性为主要特性,且铬含量至少为 10.5%、碳含量(通常 < 0.1%)最大不超过 1.2%的钢。近 10 年来随不锈钢的进步,其应用越来越广泛。

不锈钢种多、性能差异大。按国际通用方法可将不锈钢分成五类:奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢、奥氏体-铁素体双相不锈钢和沉淀硬化不锈钢。这五类不锈钢的牌号、主要成分和性能的简单比较如表 2-2 所示。

表 2-2 常用不锈钢的主要成分与性能(GB/T 20878—2007,GB/T 1220—2007)

不锈钢	C/%	Cr/%	Ni/%	其他元素	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率/%	状态
奥氏体不锈钢(2××系列:铁-铬-低镍-锰;3××系列:铁-铬-镍)								
201 (12Cr17Mn6Ni5N)	0.15	17	5	6.5% Mn	520	275	40	固溶处理
304 (06Cr19Ni10)	0.08	19	10		520	205	40	固溶处理
316 (06Cr17Ni12Mo2)	0.08	17	12	2.5% Mo	520	205	40	固溶处理
铁素体不锈钢(4××系列:铁-铬-低碳)								
430 (10Cr17)	0.12	17			450	205	22	退火
409 (06Cr11Ti)	0.08	11		(6×C) % Ti				
马氏体不锈钢(4××系列:铁-铬-高碳)								
410 (12Cr13)	0.15	13		0.6% Mo	540	345	22	淬火+回火
440A (68Cr17)	0.68	17						
奥氏体-铁素体双相不锈钢								
2205(022Cr23Ni5Mo3N)	0.03	23	5	3.0% Mo	655	450	25	固溶处理
沉淀硬化不锈钢(6××系列或×××-PH:铁-铬-低碳-沉淀元素)								
630 (17-4PH) (05Cr17Ni4Cu4Nb)	0.07	17	4	0.4% Nb	1310	1180	10	固溶+ 480℃时效