

材料科学与工程著作系列
HEP Series in Materials Science and Engineering

HEP
MSE

工程材料学

Engineering Materials

堵永国 编著

高等教育出版社

工程材料学

Engineering Materials

堵永国 编著

GONGCHENG CAILIAOXUE

高等教育出版社·北京

内容简介

本书首先介绍工程零构件的使用效能特点及工程材料的主要失效形式；然后分析工程材料在力学负荷、热负荷、环境（腐蚀介质）负荷及复合负荷作用下的行为，亦即工程材料的力学性能、热性能及耐环境腐蚀性，建立工程零构件使用效能与工程材料性能之间的关系；进而系统地阐明金属材料、陶瓷材料、高分子材料及复合材料等各种工程材料的成分、组织及其演变与性能之间关系的基本理论及基本原理，以提高工程材料的强韧性、耐热性、耐环境腐蚀性等性能的科学原理及技术途径为重点。在相关章节中分别介绍了常用工程结构零件的使用条件和性能要求，以及满足相应性能要求的典型结构零件用材料的成分、组织及相应的热处理和成形工艺。

本书的读者对象为高等院校材料学科的本科生、研究生以及相关专业的工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料学 / 堵永国编著. — 北京：高等教育出版社，2015.12

(材料科学与工程著作系列)

ISBN 978-7-04-043938-0

I. ①工… II. ①堵… 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(2015)第 223959 号

策划编辑 刘剑波
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 卢艳茹
责任校对 刘丽娟

封面设计 姜磊
责任印制 韩刚

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 涿州市星河印刷有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 42
字 数 780 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版 次 2015 年 12 月第 1 版
印 次 2015 年 12 月第 1 次印刷
定 价 79.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 43938-00

前 言

“工程材料学”课程是高等院校材料科学与工程一级学科及其二级学科各专业的骨干课。

从字面上看，“工程材料学”可分解为工程、材料、学。这里的“工程”是定语，强调的是用途，故工程材料学是指关于制造工程装备(机器或仪器)构件(零件或元器件)的材料的科学。

工程材料按使用性能分类可分为结构材料和功能材料。所谓结构材料主要是指满足刚度、强度、硬度、塑性、韧性等力学性能，用来制造工程构件和机械零件的材料，也包括一些用于制造工具的材料和具有特殊性能(如耐高温、耐环境介质腐蚀等)的材料；而功能材料则是指主要利用其电、光、声、磁、热等效应和功能的材料。本书所指工程材料主要是以力学性能为主的结构材料。

材料科学是研究各种固体材料的成分、组织、性能和使用效能之间的关系及其变化规律的一门科学，它包含四个基本要素：材料的合成与制备，成分与组织结构，材料特性以及使用性能。材料的合成与制备着重研究获取材料的手段，以工艺技术的进步为标志；成分与组织结构反映材料的本质，是认识材料的理论基础；材料的特性表征了材料固有的力学等性能，是选用材料的重要依据；使用性能可以将材料的加工性能和服役条件相结合来考虑，往往是材料科学与工程最终目标。

因此，“工程材料学”课程的任务是从工程应用的角度出发，阐明各类工程材料的成分、组织、性能和使用效能之间的关系及其变化规律的基本理论、基本原理，介绍各类常用工程材料及其应用等基本知识。本课程的目的是使学生通过学习，在掌握工程材料的基本理论、基本原理的基础上，初步具备研究开发高性能工程材料的能力，能根据工程构件(零件)使用条件分析材料的性能要求，进而对工程构件(零件)进行合理选材及制定加工工艺路线。

本书的编写特点是采用逆向工程方法，即首先介绍工程零构件的使用效能特点及工程材料的主要失效形式；然后分析工程材料在力学负荷、热负荷、环境(腐蚀介质)负荷及复合负荷作用下的行为，亦即工程材料的力学性能、热性能及耐环境腐蚀性，使读者建立工程零构件使用效能与工程材料性能之间的关系；进而系统地阐明金属材料、陶瓷材料、高分子材料及复合材料等各种工

前言

程材料的成分、组织及其演变与性能之间关系的基本理论及基本原理，以提高工程材料的强韧性、耐热性、耐环境腐蚀性等性能的科学原理及技术途径为重点。在相关章节中分别介绍了常用工程结构零件的使用条件和性能要求，以及满足相应性能要求的典型结构零件用材料的成分、组织及相应的热处理和成形工艺。

本书力求遵循科学性、逻辑性、系统性及实用性的原则，以工程材料相对成熟的理论、方法和数据为主，也参考了国内外工程材料研究的新进展。由于“工程材料学”是大材料专业骨干课程，编写时特别注意金属材料、陶瓷材料、高分子材料及复合材料等各种材料的科学及技术相关知识的涵盖及其体量的均衡，凝练共性化教学内容，着力于分析问题的科学思想及解决问题的技术原理，以提高学生解决工程材料实际问题的能力。

本书的编写参考了部分国内外相关教材、科技著作及论文，在此向有关作者致以深切的谢意。

由于本书内容广泛，编著者水平有限，尽管加倍努力，但不足之处在所难免，敬请同行和读者批评指正。

堵永国
2015年11月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 历史沿革	1
1.2 材料科学与工程	2
1.3 工程材料的分类	4
1.4 现代社会对材料的需求	9
1.5 工程材料及其知识架构	10
第二章 工程材料的使用效能	13
2.1 工程零构件所受负荷	14
2.2 工程零构件在各种负荷作用下的失效模式	20
2.3 零构件对材料的其他特殊要求	37
本章小结	40
第三章 工程材料的性能	41
3.1 工程材料在力学负荷作用下的性能	42
3.2 工程材料在热负荷作用下的性能(热稳定性)	76
3.3 工程材料在环境负荷作用下的性能	79
本章小结	82
第四章 金属材料的微观结构	85
4.1 固体原子间的相互作用	86
4.2 固体中原子的排列	98
4.3 晶体缺陷	105
4.4 相与组织	115
本章小结	124
第五章 合金相图及固态相变基础	127
5.1 相图基础	128
5.2 Fe-C 合金系	150
5.3 固态相变基础	160
本章小结	176
第六章 金属材料组织与力学性能控制	179
6.1 位错和金属的塑性变形	179

6.2	金属材料强化机理	191
6.3	塑性变形对材料组织与性能的影响	198
6.4	回复、再结晶和晶粒长大	201
6.5	金属热处理原理与工艺	208
	本章小结	269
第七章	金属材料	271
7.1	金属材料加工及工艺性能	272
7.2	金属材料的性能特点	276
7.3	碳钢	279
7.4	合金化原理	285
7.5	工程结构合金钢	300
7.6	机械零件合金钢	304
7.7	合金工模具钢	323
7.8	耐磨钢	335
7.9	不锈钢	337
7.10	铸铁	343
7.11	有色金属及其合金	352
7.12	耐热合金	387
	本章小结	404
第八章	陶瓷材料的相结构与性能及制备工艺	407
8.1	陶瓷材料中的相组成	408
8.2	工程陶瓷中的晶体结构	409
8.3	陶瓷晶体中的缺陷	414
8.4	陶瓷晶体的晶型转变	416
8.5	陶瓷相图	418
8.6	玻璃相	420
8.7	陶瓷材料的力学性能	424
8.8	陶瓷材料的热学性能	430
8.9	陶瓷材料的抗高温氧化及耐蚀性	435
8.10	陶瓷材料的其他特性	436
8.11	结构陶瓷的制备	437
	本章小结	448
第九章	结构陶瓷材料	451
9.1	自增强增韧	452
9.2	复合增强增韧	455

9.3	氧化物结构陶瓷材料	463
9.4	氮化物陶瓷	480
9.5	碳化物陶瓷	489
9.6	超高温陶瓷	495
9.7	晶须补强增韧多相复合陶瓷	499
9.8	连续纤维增强增韧陶瓷基复合材料	503
	本章小结	510
第十章	高分子材料的结构与性能基础	511
10.1	高分子材料的基本概念	512
10.2	高分子化合物的合成反应及命名	513
10.3	高分子的链结构	516
10.4	高分子材料的聚集态结构	534
10.5	高分子运动	546
10.6	聚合物的力学和流变性能	553
	本章小结	562
第十一章	高分子材料	565
11.1	高分子材料的性能特点	566
11.2	高分子材料的成型性能及成型工艺	568
11.3	塑料	572
11.4	橡胶	594
	本章小结	603
第十二章	复合材料	605
12.1	复合材料概述	606
12.2	复合材料的复合原理	609
12.3	复合材料的性能特点	620
12.4	聚合物基复合材料用纤维增强材料	621
12.5	聚合物基复合材料用树脂基体材料	631
12.6	树脂基复合材料的界面	641
12.7	纤维增强热固性树脂基复合材料的成型工艺	648
12.8	常用复合材料的性能特点及其应用	653
	本章小结	656
	参考文献	659

第一章

绪论

20 世纪 70 年代，人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。80 年代以高技术群为代表的新技术革命，又将新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这些都突显了材料是社会进步的物质基础，是人类进步程度的主要标志。近百年来材料的发展远超过以前数千年，这源于工业革命以来科学技术发展所形成的“材料科学与工程”学科。首先，固体物理、无机化学、有机化学、物理化学等学科的发展，对物质结构及物性的深入研究，推动对材料本质的了解；同时冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等的发展也使对材料本身的研究大大加强，从而对材料的制备、结构与性能，以及它们之间相互关系的研究也越来越深入，为“材料科学与工程”学科的形成奠定了坚实基础。

1.1 历史沿革

何谓材料？材料是指具有特定性质，能用于制造结构和构件、机器、仪器和器件以及各种产品的物质。如金属、陶瓷、半导体、超导体、塑料、玻璃、介电体、纤维、木头、砂子、石头及各种复合材料等都是常见的材料。

材料是人类生存和发展的物质基础。衣、食、住、行、娱乐、

通信等人们生活的方方面面均在不同程度上伴随着材料的发展和进步。从历史的角度出发,社会的发展和进步依赖于人类生产出满足各种需要的材料的能力和水平。1836年,丹麦学者汤姆森提出了石器时代、青铜时代和铁器时代的历史分期方法,更表明材料在人类文明史上占有重要地位。

早期人类只能被动地利用天然材料,如石头、木头、黏土及动物骨骼皮毛等。火的应用使人类发现了比天然材料性能更好的材料制备方法,制造出陶器和一些金属器物如青铜器和铁器。又进一步发现通过热处理和添加其他物质可提高材料的性能。这段时期材料的选用仅限于对少数材料基本性能有限的认知程度。近百年来,材料科学家对材料成分、结构及性能之间的关系有了更深入的理解,材料性质的本质越来越多地被揭示,已能提供数万种满足各种要求的材料,如各种金属、陶瓷、高分子及复合材料等。

现代科技的发展与材料的进步紧密关联,材料研究的突破往往带来许多科学技术的快速发展。例如,有了低成本钢铁及相关材料,汽车工业就得到了迅猛发展;同样,有了由半导体等材料制成的各类电子元器件,各类电子电器消费品才会不断出新,满足人们更多的需求。新材料的研究与开发对国防工业、航空、航天与武器装备的发展更是起着决定性作用。

1.2 材料科学与工程

可以将材料科学与工程细分为材料科学和材料工程。严格地讲,材料科学在于揭示材料结构与性能之间关系的本质,材料工程则是基于材料科学的理论,设计和制备可预见性能的材料微观结构。按职能划分,材料科学家主要研究或合成新材料,材料工程师或选用现有材料及工艺,或研究材料加工工艺制造产品。

材料科学与工程是研究材料的结构、性质、加工和使用效能四者关系的一门学科。这里的材料包括金属与合金、陶瓷、高分子材料、复合材料等各类材料。

结构是广义概念。材料的结构通常指材料内部组元元素原子的排列。可分为不同层次,亚原子结构是指原子内部电子分布、状态及与原子核间的相互作用。原子尺度的结构则专指原子或分子间的结合方式。含有数量众多原子的更大尺度的结构则称为显微结构,意指借助于显微镜能够观察到的结构。而用肉眼观察分辨的则为宏观结构。材料结构由其成分及加工工艺所控制。

性质是指材料在给定外界条件作用下表现出的行为。它赋予了材料的价值和可应用性。包括力学性能(特别是强度和塑性)、物理性质(热学、电学、磁学、光学等各种性质)、化学性质(特别是和材料的氧化和腐蚀行为有关的性

质)和冶金性质(如合金化和相变行为)。如金属材料受力时易产生塑性变形、抛光表面反射光。材料性质是指对特定外界条件作用的响应,一般情况下,材料的性质与材料的形状及尺寸无关。材料的性质表征了材料固有的力学等性能,是选用材料的重要依据。

固体材料的性质可分为六大类:力学、电学、热学、磁学、光学和变质。每种性质均对应特定的外界条件。力学性能是指材料在各种负荷作用下的行为,如弹性模量(刚度)、强度及韧性。电学性质是指在电场作用下的行为,如电导率和介电常数。固体的热学性质有热容和热导率等。磁学性质是材料在磁场作用时的行为。光学性质指在电磁波或光的作用下材料的响应,如折射和反射。材料的变质则主要与材料的化学反应相关。

材料科学与工程中,除了结构和性质,还有两个重要概念,即加工和使用效能。材料的加工是指材料的制备、合成、压力加工、机械加工,乃至废料的再生处理等,以工艺技术的进步为标志。材料的结构取决于它们的加工工艺。材料的使用效能则是指材料在各种使用条件(包括高温或低温、各种应力状态、冲击和疲劳加载、腐蚀和辐照环境)下的性能或行为(它未必和该材料在使用前的性能相同)。可以用材料的加工性能和服役条件相结合来考察,往往是材料科学与工程的最终目标。材料的使用效能是材料性质的函数。加工、结构、性质与使用行为之间的关系如图 1.1 所示。本书以材料的设计、生产、应用中涉及的上述四要素及其之间的关系为主线。



图 1.1 材料科学与工程四要素之间的关系

也有科学家提出材料科学与工程的四要素为:成分与组织、制备与加工、性能和服役行为。其概念与内涵与前述四要素没有本质区别。

以图 1.2 所示样品讨论加工—结构—性质—使用效能关系。图示样品具有不同的透光性能,左侧完全透明,右侧不透明,中间样品为部分透明。三个样品的材料均为氧化铝,左侧为单晶,完美无缺的单晶结构使得该材料完全透明。中间样品由数量众多的细小粒状晶体组成,晶体间界面(晶界)将散射部分可见光,使得该材料部分透光。右侧样品也由数量众多的细小粒状晶体组成,但材料内部同时还存在大量细小的孔隙,这些孔隙完全散射可见光,故材料失透。

由于制备工艺不同,导致三个样品有着不同的晶界及孔隙等结构特性,这些特性影响其透光性能。显见,当透光性能是选材重要参量时,这三种材料的使用效能差异巨大。

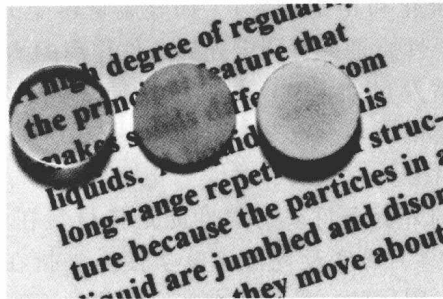


图 1.2 三种透光性能不同的氧化铝陶瓷样品 (Callister et al., 2011)

1.3 工程材料的分类

工程材料通常分成三类：金属、陶瓷和高分子材料。这种分类法主要依据化学组成及原子键的不同。除此之外，还有一类为复合材料，它是由两种或两种以上不同的材料复合而成。另一类为用于高科技领域的先进材料，如半导体、生物材料、智能材料以及纳米材料等。

1.3.1 金属材料

该类材料由一种或多种金属元素(如铁、铝、铜、钛、金及镍等)组成，通常含有少量非金属元素(如碳、氮和氧等)。一般来讲，金属的密度比陶瓷及高分子材料的大(图 1.3)，有更高的力学性能，强韧性好(图 1.4、图 1.5)，

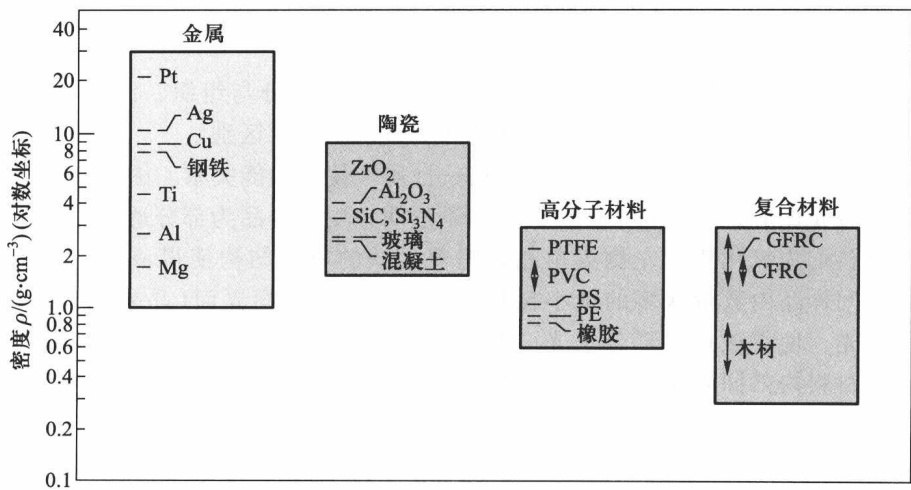


图 1.3 常用金属、陶瓷、高分子材料及复合材料的室温密度

有更好的塑性(能承受大变形而不断裂)及抗断裂性能(图 1.6), 应用范围非常广泛。由于金属材料内部有大量自由电子, 不受特定原子的束缚, 该特性赋予金属材料良好的导电、导热性, 不透可见光; 抛光的金属表面有金属光泽, 另外, 某些金属还有磁性, 如铁、钴、镍等。

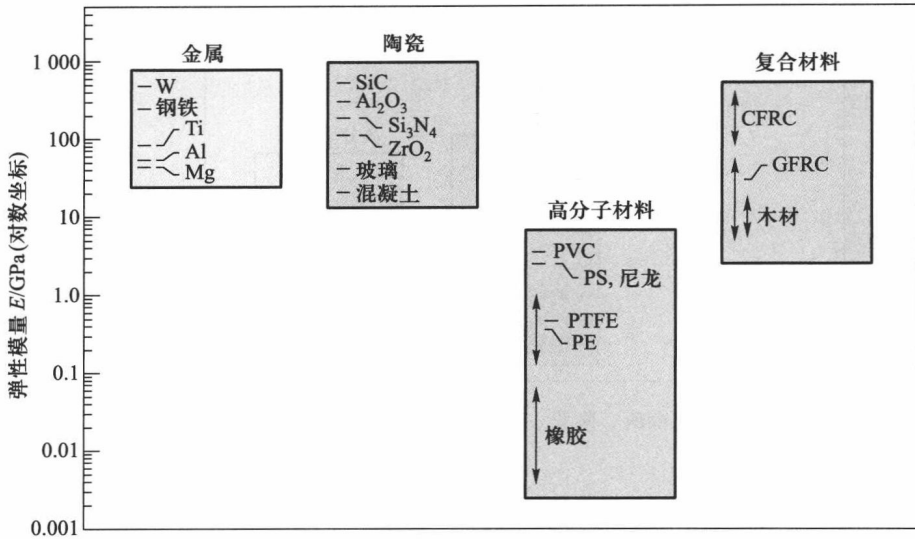


图 1.4 常用金属、陶瓷、高分子材料及复合材料的室温弹性模量

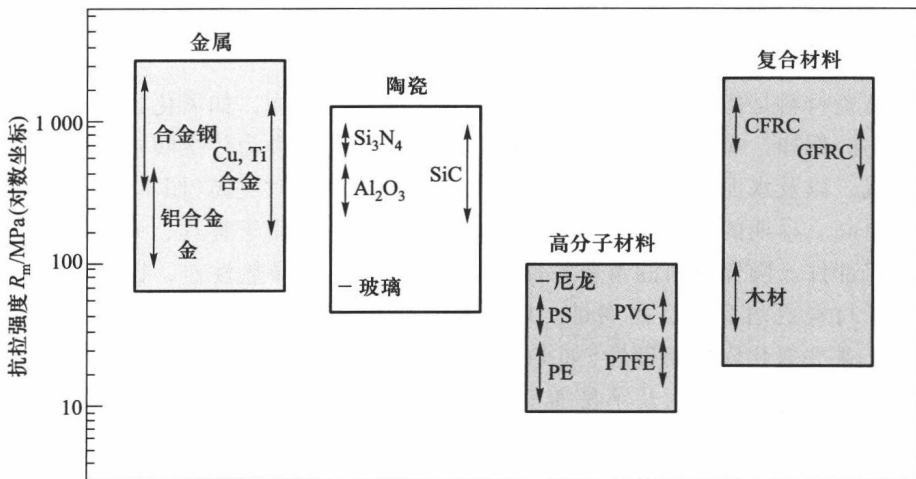


图 1.5 常用金属、陶瓷、高分子材料及复合材料的室温抗拉强度

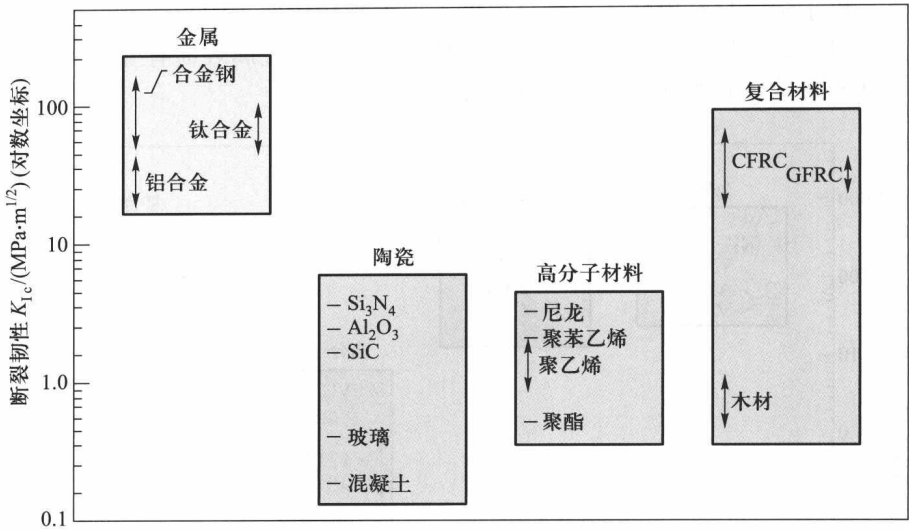


图 1.6 常用金属、陶瓷、高分子材料及复合材料的室温断裂韧性

金属材料兼有优良的力学性能、理化性能和工艺性能，是结构材料中应用最为广泛的一类，部分金属材料也可用作功能材料。但是应该指出，在特别高的温度以及特殊环境介质中，由于化学稳定性问题，一般金属材料难以胜任。此外，地球上金属材料的资源有限。

1.3.2 陶瓷材料

陶瓷材料是指金属和准金属或非金属之间的化合物，如氧化物、氮化物及碳化物。例如，氧化铝、氧化硅、碳化硅等。还有一类为传统陶瓷，由黏土矿物组成，以及水泥和玻璃。陶瓷材料的刚度及强度相对更高(图 1.4、图 1.5)，硬度更高。早期的陶瓷材料脆性很大，易断裂，主要用于餐具、刃具以及汽车发动机部件。陶瓷材料的重要特性是绝缘(图 1.7)，导热性差，比金属材料和高分子材料更耐高温、耐腐蚀。陶瓷材料可以透明、半透明及不透明(见图 1.2)，某些氧化陶瓷有磁性(如 Fe₃O₄)。

陶瓷材料的脆性大及不易加工成形等性质，使其应用受到较大的限制。

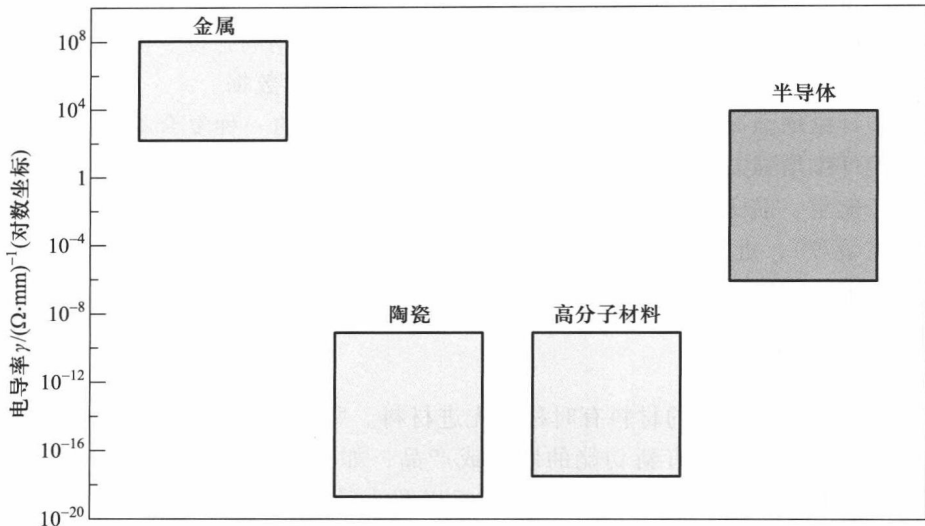


图 1.7 常用金属、陶瓷、高分子材料及半导体材料的电导率

1.3.3 高分子材料

高分子材料又称为聚合物，是指由一种或几种低分子单元(单体)经聚合、共聚、缩聚反应，形成由许多单体重复连接的高分子化合物。包括大家熟悉的塑料和橡胶，大多为由碳、氮及其他非金属元素(C、N及Si等)组成的化合物，分子量大，主链大多为碳链，呈链状结构。常见的如聚乙烯(PE)、尼龙、聚氯乙烯(PVC)、聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)及硅橡胶等。与金属及陶瓷材料相比，该类材料密度小，强度、刚度低，但比强度、比刚度大。高分子材料易变形，塑性好，故易制成复杂形状。一般情况下呈化学惰性，耐候性好。主要缺点是软化温度低，在较高温度下易分解，限制了其应用范围。另外，大多数高分子材料电导率低，无磁性。

1.3.4 复合材料

复合材料是由两种或多种具有不同化学组成和性质的材料(金属、陶瓷、高分子材料)复合而成的一体化材料。复合材料的设计目的是获得任一单组分材料所不具备的综合性能，将每种材料的性能优势充分发挥。由各种不同种类的材料(金属、陶瓷、高分子材料)可以复合成数量众多的复合材料。事实上，很多天然材料如木头、骨骼等均为复合材料，本书所讨论的是合成(或人造)的复合材料。

最常见的复合材料是玻璃钢，它由玻璃纤维和环氧树脂复合而成。玻璃纤维的强度、刚度大，高分子材料的韧性好。因此玻璃钢的强度、刚度大，且韧性好，同时密度低。见图 1.3~图 1.7 示出的相关性能数据。

碳纤维增强高分子复合材料(CFRP)是非常重要的—种复合材料。该材料比玻璃纤维增强复合材料有更高的强度和刚度，但价格更贵。CFRP 复合材料常用于航空、航天领域以及高科技运动装备(如自行车、高尔夫球棒、网球拍、雪橇等)，近年开始用于汽车车身，波音 787 机身亦由该材料制备。

目前，性能高的复合材料昂贵的价格是制约其应用的主要因素。

1.3.5 先进材料

用于高科技领域的材料有时称为先进材料。所谓高科技是指应用相对新的理论及工艺制备的具有新功能的装置或产品，如数码产品(摄像机、CD/DVD 等)、计算机、光纤系统、航天器、飞机以及火箭等。先进材料通常指新研制的、比传统材料性能更优越的材料。先进材料涵盖所有材料类型(包括金属、陶瓷、高分子材料等)。先进材料包括半导体材料、生物材料以及所谓的“未来材料”(如智能材料、纳米材料等)。—般情况下，先进材料价格更高。

半导体的电学性能介于导体(如金属及合金)和绝缘体(陶瓷和高分子材料)之间。该类材料的电学性能对微量掺杂元素浓度的变化非常敏感。由半导体技术制备的集成电路使得电子及计算机产业在过去的 30 年中有了革命性的飞跃。

生物材料可用于制备人体植入器官。这些材料不产生有毒物质，与人体组织相容(即不发生有害生物反应)。所有类别的材料——金属、陶瓷、高分子材料、复合材料及半导体均可用作生物材料，如人工关节的制作等。

智能材料是一类对许多技术有深刻影响的最新材料。所谓“智能”是指如同人的感官那样对环境敏感并按预先确定的方式做出响应。智能的概念还拓展至由智能材料和传统材料构成的相对复杂的系统。智能元件(或系统)包括各种类型的传感器(探测输入的信号)、执行器(完成响应和调整功能)。当温度、电场或磁场变化时，执行机构具有改变形状、位置、频率、力学特性等功能。

目前用于执行器的材料主要有四类，分别是形状记忆合金、压电陶瓷、磁致伸缩材料以及电流变体/磁流变体。形状记忆合金是指预先变形的材料在温度变化时能恢复原来形状的一类合金。压电陶瓷则指那些在电场作用时产生膨胀或收缩，或当其尺寸变化时产生电场的一类陶瓷。磁致伸缩材料的特性与压电陶瓷类似，区别是在磁场中响应。电流变体和磁流变体是指分别在电场和磁场作用时黏度(刚度)发生突变的液体。

传感材料(或器件)主要有光纤、压电材料以及微机电系统(MEMS)。

例如一种用于降低直升机螺旋桨产生的座舱噪声的智能系统,通过将压电陶瓷置入螺旋叶片来控制叶片应力和变形,反馈信号输入计算机控制的调节器以产生消除噪声的反噪声。

纳米材料是一类具有奇特性质、应用前景非常广泛的新材料,涵盖了金属、陶瓷、高分子及复合材料等所有种类。与传统材料不同的是,其特性主要由尺寸效应而不是化学组成所控制。纳米是长度单位,为 10^{-9} m,纳米材料的尺寸通常小于100 nm,大约为500个原子直径的长度。

在纳米材料发明之前,科学家认识材料化学和物理特性的过程通常是从大且复杂的宏观结构开始,然后再深入研究并认识小且简单的基本微观架构,称为“由上而下”的科学。伴随着扫描探针显微技术的发展,人们已经能够观察到单个原子及分子,可以从原子尺度设计和组装新微观结构(设计材料),人们有可能通过原子组装制备出具有特殊力学、电学、磁学及其他性质的新材料。此为“由下而上”的过程,对这些材料的性能研究称为纳米技术。

接近原子尺度的纳米颗粒其化学和物理性质会发生奇特的变化,如当颗粒由宏观尺度变为纳米尺度时,原来失透的材料变为透明的,固体变为液体,化学稳定的变为可燃的,绝缘体变为导体等。这些现象有的源于量子效应,也有一些与颗粒表面原子的数量急剧减少而导致的表面现象有关。

正是因为具有独特的性质,纳米材料已被广泛应用于电子、生物医药、体育、能源及其他工业领域。

需要指出的是,新材料对于人类及动植物具有的潜在的、未知的危害应引起重视。超细的纳米颗粒具有极大的比表面积,将导致高的化学活性。目前对纳米材料安全性的认识还相对肤浅,通过皮肤、肺及消化吸收到体内的纳米颗粒含量达到一定浓度时,有可能产生健康风险,如导致DNA变异或肺癌。

1.4 现代社会对材料的需求

尽管在过去的几十年材料科学与工程领域有了巨大的发展,但挑战依然存在,一方面有各种性能要求更高、更特殊的材料需求,另一方面是材料制备过程中的环保考量。

核能展示了很好的发展前景,但需要解决的问题不少,如核燃料、反应堆结构、放射性废料处理等。

交通运输有巨大的能源消耗,减轻运载工具(汽车、飞机、火车等)自重以及提高发动机工作温度均可提高燃料效率。故需要发展高强度、低密度结构材料,以及用于发动机部件的耐高温材料。

更进一步地讲,既要发展新能源,也要设法提高现有能源的效率。无疑在