

材料科学与工程学科
研究生教学用书

工程材料学原理

Fundamentals of Engineering Materials

毛卫民

高等教育出版社

材料科学与工程学科
研究生教学用书

工程材料学原理

Fundamentals of Engineering
Materials

高等教育出版社

内容简介

工程材料学原理是了解、生产、使用和改进工程材料非常重要的基础知识。本书从突破传统材料学科的局限和拓宽专业面的角度出发,全面介绍了材料的晶体结构、钢铁材料、有色金属材料、无机非金属材料、高分子材料以及复合材料的相关材料学原理,并简述了微电子材料和光学材料。本书以大学本科毕业生的专业知识为基础,重点阐述无机结构材料的相关材料学原理,也对近年来传统材料高技术化发展的成果作了一定的介绍。

本书可作为材料专业本科生或从事冶金、铸造、加工、机械、化工等专业研究生的教学用书,也可作为相关技术人员从事技术改造或技术更新的参考,还可作为相近专业科研工作者、高等学校教师或在校大学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料学原理/毛卫民. —北京:高等教育出版社,2009.10

ISBN 978-7-04-028069-2

I. 工… II. 毛… III. 工程材料-研究生-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 158728 号

策划编辑 宋晓 责任编辑 薛立华 封面设计 李卫青 责任绘图 尹莉
版式设计 余杨 责任校对 金辉 责任印制 韩刚

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
总 机 010-58581000

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>

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16
印 张 26.25
字 数 500 000

版 次 2009 年 10 月第 1 版
印 次 2009 年 10 月第 1 次印刷
定 价 41.30 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 28069-00

前 言

用以制造有用物件的物质称为材料。“有用”一词决定了材料在现代社会中的工程化特性,也决定了材料学科以工科为主的学科性质。然而,随着现代科技的进步,材料学科工程性质所涉及的范围越来越广泛,尤其是对材料力学性质以外的光学、声学、电学、磁学、化学、热学、微电子学、生物学等多方面性质的认识、开发和利用。材料的非力学性质往往会涉及许多物理和化学方面的本性及其产生的根源,因此材料的物理学与化学等多方面的研究以及相关成果的应用也得到了高速发展。

根据材料的化学组成,可以把材料划分成金属材料、无机非金属材料、高分子材料以及这三者之间互相混合而成的复合材料;根据材料的来源,又可以把材料划分成人工材料和天然材料两大类。从材料的概念和分类的原则出发,观察我们所生活的城镇、街道、馆所、村庄、房屋,所工作的企业、办公室、学校、机关,所使用的各种用具、工具、机械、车辆、设备等物质环境,就不难发现我们完全被材料所包围。即使是现代信息社会所赖以生存的计算机技术、通信技术、网络技术、生物技术等也都是在材料技术取得突破之后才得以迅速发展,而且其不同的发展阶段始终不能脱离材料技术的不断进步。从工程角度出发可以认为,全面地掌握材料知识就能够了解人类通过几十、上百个世纪持续劳动的积累而建立并赖以生存的现代物质世界。

人们对以各种材料所构成的物质世界的认识是一个由浅入深、由表及里、由局部向全面的渐进过程。当人们囿于社会发展水平的限制而比较孤立地关注于现实生活中的每一类可以用材料技术解决的具体问题时,往往会着重汇集与该类问题直接相关的专业知识,以此来划分材料学科,并开展研究探索和培养人才。例如传统的“耐火材料”、“半导体材料”、“化学纤维”、“塑料”、“水泥工艺”、“有色金属压力加工”、“炼铁”等高等学校学科或专业名称就是典型的与当时社会发展水平相适应的学科划分模式的实例。可以看出,材料学科以往的划分方式往往与相关材料的使用企业或生产企业的分工有密切的联系。在经济发达水平较低的情况下,这种学科划分方式对企业生产和经济发展产生了快速、直接的推动作用。

20世纪60年代以来,随着工业生产和科学技术的迅猛发展,材料科学与工程学科面临着巨大的挑战。社会经济建设的发展对金属材料、无机非金属材料、高分子材料等各种类型材料的要求越来越苛刻。这种要求不仅反映在性能指标

的不断提高,而且也反映在对材料由单一的性能要求不断向多方面的性能要求转化,如既要求其高的力学性能又要求其高的物理性能。现代信息技术和生物技术的进步极大地促进和强化了同一工程材料具备多方面高性能的趋势。在这种发展压力下,单纯地在金属材料、无机非金属材料或高分子材料范围内开发新的材料品种已经远不能满足上述发展需求。从材料科学与工程的整体角度出发,人们发现基本化学组成不同的材料类型之间,其基本性能有很强的互补性。在单一材料类型不能全面满足服役要求的情况下,复合材料以及不同类型材料组合成的新构件层出不穷。另外,人们也注意到各种材料类型学术思想之间的交叉与借鉴可以极大地推动高技术、新材料的发展,并可以借此在很大程度上迎接和满足现代社会发展所提出的挑战和要求。因此,为满足社会发展在人才培养和科学研究方面的需求以突破传统专业划分的局限,材料学科的拓宽就成为不可阻挡的趋势。材料学科的拓宽不仅反映在专业内容包含不同类型的材料,而且也需要涉及材料的制备与加工、组成与结构、性能与应用等材料科学与工程的全面知识。也就是说,为迎接所面临的挑战,在继续发展材料学科时不能完全割裂材料的基本构成和性能、基本的材料学原理、材料的生产加工过程以及材料的服役和使用等多方面的系统知识。大批高等学校以“材料科学与工程”一级学科的模式设立本科专业就是在人才培养方面拓宽材料学科的具体体现,以期材料专业本科大学生能够在“材料科学与工程”一级学科的范围内获得宽广的基本知识,并奠定良好的后续发展基础。

然而,应该清醒地看到,当前材料学科面临着无数的难题,需要人们不断地、甚至是一代人接一代人持续地探索和克服。解决这些难题不仅需要宽广的材料科学与工程的基本知识,而且更重要的往往是要在材料学科范围很有限领域或方向内掌握和熟悉非常深入而尖端的材料科学知识。人类社会是一个分工与协作的社会,任何个体都不可能包揽一切,这一点在现代社会尤为突出。材料科学与工程学科所涉及的知识范畴极为广泛,任何一个人都不可能整体而深入地完全掌握。由此可见,在材料科学与工程领域内学习与工作,还必须在拓宽的领域内掌握相关知识的同时有所取舍;进而真正能满足社会的不同需求,并以自身独特的角色投身于分工协作的社会之中。高等学校所设本科专业使大学生在“材料科学与工程”一级学科范围内获得宽广基本知识之后,在后续的硕士、博士学习和研究过程中除一定程度地继续学习宽面的材料科学与工程知识外,更要注重选择一定的专业方向进行窄学科面且有明显特色地深入学习与探索,以应对或解决所面对的难题。

材料科学与工程学科所培养人才将面对的工作领域可能涉及材料的生产和技术改进、材料的选择和使用、材料的研究与开发、材料学科人才的教育和培养、材料的贸易或管理等,如冶金企业、机电类企业、科研机构、高等学校、贸易公司

或政府部门等。不同的工作领域对材料专业人才会有非常不同的要求,因此所有的高等学校不可能按照统一的模式培养材料学科人才。尤其是一些地域性比较强的高等学校,还需要根据地方经济特色来制订具有自己特色的材料学科人才培养方案。

自从冷战结束以后,世界经济格局发生了巨大的变化,传统材料工业生产和消费的重心已经转移到东亚地区。以钢铁材料为例,第二次世界大战之前钢铁的生产和消费中心在欧洲,第二次世界大战结束后因欧洲钢铁工业遭受严重破坏而使生产和消费中心转移到美洲。在冷战后期,钢铁生产中心转向日本,随后扩展到韩国;目前中国已成为世界钢铁生产和消费的第一大国。许多主要的传统有色金属材料、无机非金属材料、高分子材料的生产和消费均呈现了类似的趋势。随着欧美地区传统材料生产的衰落,该地区高等学校材料学科也因工业格局的变化相应调整其人才培养的模式。显而易见,欧美地区高等学校材料学科的调整模式不是亚洲地区可以照搬的样本。目前亚洲地区在高技术、新材料发展整体水平方面与欧美差距逐渐缩小,在信息材料、生物医用材料等方面的研究水平也不亚于欧美。因此,亚洲及中国材料学科的调整和发展更应注意地区经济特点和需求,以及多元化的材料科研与工业生产现状。在保证拓宽基础知识和特定学科方向特色发展的前提下,应鼓励多种材料学科发展的模式,以满足现代社会对材料学科多层次、多方位的发展需求。

鉴于上述种种考虑,作者结合近十几年来在工程材料方面教学、科研的经验和体会,参考了一些书刊资料,草拟本书以奉献给广大专业读者。作为材料专业本科生或非材料专业研究生教材,本书在编写时假定读者已经具备高等学校材料学科或相近学科的大学本科专业基础知识。从突破传统材料学科的局限和拓宽专业面的角度出发,本书全面地介绍了钢铁材料、有色金属材料、无机非金属材料、高分子材料以及它们之间组合而成的复合材料的相关材料学原理,同时对微电子材料和光学材料也作了简单的描述。一本容量有限的书不可能真正全面而系统地阐述所有的工程材料,本书的偏重点在无机多晶材料,其中更侧重于金属材料的基本材料学原理。在编写内容的选择上注重于基础性传统材料体系基本原理的阐述和介绍;而且特别注重介绍近些年来传统材料高技术化发展的一些成果,以及因适应社会生产需求而出现的许多新的材料品种。希望本书能对我国材料专业或相关专业教学和科研的发展有一定的推动作用。本书从各种文献中所引用的大量图、表、技术数据等不一定有权威性,仅供说明相应的观念时参考。

在本书的编写过程中邀请了北京科技大学杨平教授起草李生诱发塑性钢、变形诱导相变与超细晶粒钢、镁合金等部分;邀请了安徽工业大学朱国辉教授起草双相钢、相变诱发塑性钢、管线钢等部分;北京科技大学林均品教授为 TiAl 等

金属间化合物材料部分提供了资料和素材;美国应用材料公司张弘博士提供了大规模集成电路结构照片;北京科技大学吕反修教授和唐荻教授提供了金刚石和相变诱发塑性钢的照片;北京科技大学实验中心为本书提供了部分金属微观组织照片。浙江大学赵新兵教授认真审阅了本书。在此对上述各位一并表示衷心的感谢。作者也感谢国家自然科学基金委员会、教育部、科学技术部、北京市科学技术委员会等对本书形成所给予的支持。

由于作者的认识水平有限,书中谬误在所难免,恳请读者给予指正。

毛卫民

2008年11月

目 录

绪论	1
一、材料的概念	1
二、地球的资源	1
三、材料与环境	7
四、可持续发展	7
参考文献	10
第 1 章 材料的晶体结构概要	11
§ 1-1 晶体的形态与结构	11
一、晶体的概念	11
二、晶体的基本特征	12
三、非晶体	13
四、液晶	13
五、准晶	14
§ 1-2 晶体的基本对称性	16
一、对称操作	16
二、七种晶系	16
三、十四种布拉菲点阵	17
§ 1-3 常见的无机晶体结构	18
一、单质晶体结构	18
二、AX 型化合物	20
三、AX ₂ 型化合物	22
四、AX ₃ 型化合物	22
五、结构转变及概率占位	23
六、拓扑密堆型化合物	24
§ 1-4 晶体的取向与织构	25
一、晶体取向	25
二、取向的表达方法	26
三、晶体学织构	29
§ 1-5 金属晶体的塑性变形	30
一、金属塑性变形晶体学	30

二、塑性变形时的取向变化	32
三、多晶体变形及变形织构的生成	33
§ 1-6 金属晶体的再结晶与晶粒长大	34
一、冷变形金属的回复	34
二、再结晶形核	37
三、初次再结晶	37
四、晶粒长大	40
五、动态再结晶	41
参考文献	42
第 2 章 钢铁材料	43
§ 2-1 钢的合金化及热处理原理	43
一、纯铁及钢中的合金元素	43
二、铁基固溶体	44
三、钢中的化合物	46
四、金属热处理的基本概念	48
五、合金元素对钢热处理行为的影响	50
§ 2-2 普通结构用钢	57
一、结构钢的力学性能	57
二、碳结构钢	61
三、低合金高强度钢	63
四、调质钢及非调质钢	66
五、低温回火状态使用的结构钢	67
六、渗碳及渗氮钢	68
七、弹簧钢	69
八、易切削钢	69
§ 2-3 特种合金钢	70
一、滚动轴承钢	70
二、工具钢	72
三、不锈钢	76
四、耐热钢	79
五、超高强度钢	80
§ 2-4 铸造钢铁材料	81
一、铸钢的基本特性	81
二、高锰钢	81
三、铸铁的基本特性	82
四、铸铁材料	82
§ 2-5 高纯净高强度结构钢	86

一、超深冲无间隙原子 (IF) 钢	87
二、高强度无间隙原子 (IF) 钢	91
三、车辆用钢与汽车的安全性	95
四、双相 (DP) 钢	96
五、相变诱发塑性 (TRIP) 钢	100
六、孪生诱发塑性 (TWIP) 钢	104
七、应变诱导相变与超细晶粒钢	109
八、管线钢	114
§ 2-6 软磁电工硅钢	120
一、电工钢的基本分类及其磁性能	120
二、晶体取向对电工钢性能的影响	125
三、电工钢的生产技术	127
四、电工钢取向控制技术的发展	130
五、电工钢的磁时效行为	131
参考文献	134
第 3 章 有色金属材料	144
§ 3-1 铝合金	144
一、铝的基本特性	144
二、Al-Cu、Al-Mg、Al-Mn 合金系	146
三、Al-Si 和 Al-Zn 合金系	150
四、其他铝合金系	152
五、工业纯铝	154
六、铸造铝合金	155
七、变形铝合金	156
八、铝合金的广泛应用	160
§ 3-2 铜合金	162
一、铜的基本特性	162
二、纯铜中的杂质与合金元素	163
三、Cu-Zn、Cu-Sn、Cu-Al 合金系	166
四、Cu-Ni 合金系	170
五、Cu-Be 及其他铜合金系	171
六、工业纯铜	172
七、黄铜	173
八、青铜	176
九、白铜	179
§ 3-3 钛合金	180
一、钛的基本特性	180

二、纯钛的相转变及钛基固溶体	181
三、不扩大 β 相区的代位元素	184
四、 β 同晶型和 β 共析型元素	186
五、工业纯钛	190
六、其他 α 钛合金	190
七、 $\alpha+\beta$ 钛合金	192
八、 β 钛合金	194
§ 3-4 镁合金	195
一、镁的基本特性	195
二、Mg-Al 和 Mg-Zn 合金系	197
三、Mg-RE 和 Mg-Mn 合金系	197
四、Mg-Li 合金系	198
五、镁合金的热处理特点	199
六、工业纯镁和常用工业镁合金	200
七、新型工业镁合金	206
八、镁合金的应用	207
§ 3-5 金属间化合物基合金	208
一、有序金属结构的塑性变形特点	209
二、冷变形有序金属结构的再结晶行为	212
三、Fe ₃ Al 基金属间化合物	214
四、Fe ₃ Si 基金属间化合物	215
五、TiAl 基金属间化合物	217
参考文献	221
第 4 章 无机非金属材料基础	225
§ 4-1 无机非金属材料组织与结构	226
一、无机非金属材料的基本相组织	226
二、晶体相的结构	227
三、晶体相的缺陷	231
四、非晶相	232
§ 4-2 无机非材料的性能	234
一、基本力学性能	234
二、高温与热学性能	237
三、其他性能	243
§ 4-3 水泥	244
一、水泥的成分	244
二、水泥的煅烧	246
三、水泥的水化	248

四、水泥的强度	249
§ 4-4 普通陶瓷	250
一、普通陶瓷的基本特征	250
二、瓷器材料	251
三、炻瓷器材料	252
四、陶器材料	253
§ 4-5 耐火材料	254
一、耐火材料的基本特征	254
二、耐火材料的制作	256
三、耐火材料的应用	257
§ 4-6 玻璃	261
一、玻璃的概念	261
二、玻璃的生成	262
三、玻璃的光学特性	264
四、玻璃的制造	266
§ 4-7 特种陶瓷	268
一、特种陶瓷的特征	268
二、特种陶瓷的制备	269
三、特种结构陶瓷	270
四、特种功能陶瓷	273
参考文献	274
第 5 章 高分子材料的结构与性能	276
§ 5-1 高分子材料概述	276
一、基本概念	276
二、高分子材料的分类	278
三、高分子材料的基本特征	279
§ 5-2 高分子材料的结构与组织	280
一、大分子链的近程结构	280
二、大分子链的远程结构	282
三、大分子的聚集态组织结构	285
§ 5-3 高分子材料的基本性能	292
一、聚合物的力学性能	292
二、聚合物的物理性能	296
三、聚合物的化学性能	299
四、聚合物的自降解特性	301
§ 5-4 木材的结构与性能	302

一、木材的基本结构	302
二、木材的物理性能	304
三、木材的力学性能	308
参考文献	312
第6章 复合材料简介	313
§6-1 复合材料的发展	313
一、复合材料概述	313
二、复合材料的分类方法	314
三、复合材料性能特点	314
§6-2 先进复合材料	316
一、复合材料新发展	316
二、新型增强材料及其使用	317
三、复合材料的应用与开发	321
§6-3 金属与陶瓷基复合材料的制作	322
一、液态金属浸铸法	323
二、粉末冶金法	234
三、沉积法	324
四、扩散结合法	326
五、原位复合法	326
六、其他复合法	328
参考文献	329
第7章 微电子材料与光学材料简述	330
§7-1 超大规模集成电路材料	330
一、半导体材料学原理	330
二、集成电路技术及其合成制备原理	334
三、超大规模集成电路的材料连接结构	338
§7-2 超导材料	340
一、物质的超导现象	340
二、超导原理浅析	342
三、工程用超导材料	347
§7-3 现代光学工程材料举例	354
一、物体的基本光学行为	355
二、光纤材料	359
三、电磁波吸收材料	362
四、电磁波屏蔽及屏蔽涂料	368
五、光学金刚石	375

参考文献	379
索引	384

绪 论

一、材料的概念

学习工程材料学基本原理的知识首先要了解材料的概念。人们熟知,自然界是由物质构成的。材料虽然应归属于自然界中的物质,但材料不能与物质等同,人类所接触到的物质并不都能成为材料。显然,物质的概念要远大于材料的概念。

一千万年前,古猿用天然石头作工具敲碎动物的骨头,由此人类的始祖因不断形成并提高劳动能力而逐步转变成人。三百万年前,人类已经可以用天然石料初步加工制成工具,并因使用石料劳动而进入人类最早期的旧石器时代和原始社会。一万年前,人类可以制成精细的石料工具,包括用火制出土器、陶器、瓷器、玻璃制品等,因而进入新石器时代。

公元前 8000—9000 年西亚地区的早期人类开始使用天然铜,并于公元前 3800 年左右发明了炼铜技术,公元前 3000 年左右西亚和中国等地均发展了青铜冶炼与制作技术,人类因此进入了铜器时代和奴隶社会。公元前 1300 年在西亚地区出现了炼铁技术,公元前 600 年中国也产生了炼铁技术,人类因此进入了铁器时代和封建社会。20 世纪以来钢铁产业迅速发展,人类进入了现代工业资本主义社会,称为后铁器时代或钢铁时代。

追踪人类社会出现以来的历史可以发现,人与猿的一个根本区别在于人具有劳动能力,或者说劳动创造了人。劳动本身包含了工具的使用及各种制作物质产品的过程。随着社会的发展和知识的积累,人类不断地以越来越高级的技术手段来制作工具及各种产品。但不论怎样高级的制作过程,其中总是包含了把相对不能直接使用的物质转变成相对可以直接使用的物质。因此,用以制造有用物件的物质都可以称为材料。从这个概括性的描述可以看出,材料的概念是一个以人为本的概念。没有人及与之相伴的劳动也就没有材料。反过来看,材料也是与人类发展始终相伴的特殊物质。

二、地球的资源

自然资源是一切材料的原始来源。目前人类所能获得的自然资源主要来自地球。当材料及其制品被废弃后其大多数也会最终返回地球。图 0-1 示意性地给出了材料的循环途径。应当指出,材料失效被废弃后并不能在短期内转

变成可利用的自然资源。面对现代人类社会对自然资源开发利用的速度,整体自然资源再生的速度基本可以忽略,因此地壳中可直接利用的自然资源将会越来越有限。

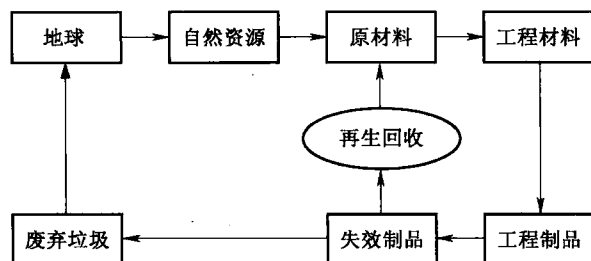


图 0-1 材料的循环途径

全世界可供开采的金属与非金属矿产资源约有 400 余种,储量为 1 450 万吨,每年开采矿产品约 180 亿吨,其中 85% 是能源资源。据统计,由于大量开采,许多重要的传统自然资源的可利用时间已经缩短到以数十年或百年计算。表 0-1 给出了 21 世纪初世界典型金属资源可开采年限的估计。虽然这种估计不一定十分准确,但从整个人类历史来看,许多已知自然资源的利用期限已经屈指可数。据估计,目前只有煤的储量比较充足,硬煤还可开采 140 ~ 180 年,褐煤可开采 180 ~ 220 年。德国鲁尔天然气公司估计,全世界天然气储量为 135.5 万亿立方米,按 1999 年 22 000 亿立方米的年生产水平计,还可开采 60 ~ 70 年。按美国埃索石油公司的估计,目前世界已探明石油储量约为 1 380 亿吨,全世界目前年采石油约 35 亿吨;据此计算石油能源还可维持约 40 年。因此,可预计 21 世纪人类将面临自然资源短缺,尤其是矿产资源短缺的难题。预计到 2020 年将有 20 余种矿产保有储量严重不足。到 2004 年底,中国已查明各类矿产 168 种,探明储量的矿产资源达 158 种。矿产资源提供了中国 90% 以上的能源和 80% 左右的工业原料。矿业和矿产品加工业是中国国民经济的重要支柱产业,但矿业资源的大量开采对生态和环境也将会带来严峻考验和挑战。

表 0-1 21 世纪初世界典型金属资源可开采年限的估计

资 源	可开采年限	资 源	可开采年限	资 源	可开采年限
铁 (Fe)	161 ~ 173	钒 (V)	~ 110	锡 (Sn)	~ 40
锰 (Mn)	~ 30	铜 (Cu)	33 ~ 48	金 (Au)	~ 15
铬 (Cr)	~ 120	铅 (Pb)	18 ~ 64	银 (Ag)	~ 10

续表

资源	可开采年限	资源	可开采年限	资源	可开采年限
镍(Ni)	~45	锌(Zn)	20~50	铂(Pt)	~180
钨(W)	~60	铝(Al)	<222	铌(Nb)	~290
钼(Mo)	~50	钛(Ti)	~40	锑(Sb)	~80
钴(Co)	~170	锂(Li)	~460	稀土金属	~1 500

表 0-2 给出了未来若干年我国主要矿产品国内供应能力与需求预测。可以看出,到 2010 年我国只有煤、天然气、铅、磷基本满足;到 2020 年只有铅和磷基本满足,急缺的金属则有铁、锰、钾、铅、铜、铬等。国内矿物和原料的短缺造成进口的增加。以 2003 年为例,矿产品进口中原油 9 112 万吨,铁矿石 14 813 万吨,锰矿石 286 万吨,铬铁矿 178 万吨,铜矿石 267 万吨,钾肥 657 万吨。进口增长幅度最大的主要是高性能钢铁和有色金属材料、矿砂和矿物燃料等。

地球已经有几十亿年的历史,她为人类所提供的自然环境里包括土地、水、矿物、空气、森林和草地等。在人类出现之后,被人类利用并给人类带来效益的自然物称为自然资源。地球是一个巨大而不规则的实心椭圆形球体,其平均半径约为 6 370 千米,赤道半径较长(6 378 千米),而极半径较短(6 357 千米)。地球表面总面积为 5.1×10^8 千米²,体积为 $1 083.32 \times 10^9$ 千米³,平均密度为 5.52 克/厘米³。

表 0-2 未来若干年我国主要矿产品国内供应能力与需求预测

矿产品名称	供应能力		需求量	
	2010 年	2020 年	2010 年	2020 年
煤(亿吨)	16.00	18.00	18.25	21.05
石油(亿吨)	1.75	1.71	3.00	4.25
天然气(亿立方米)	1 349	1 650	1 100	1 800
铁(矿石亿吨)	2.20	2.40	5.29	5.34
锰(矿石万吨)	350	350	925	935
铬(矿石万吨)	20	10	290	440
铜(金属万吨)	112	137	337	445
铅(金属万吨)	107	112	85	110
锌(金属万吨)	179	202	190	245
铝(金属万吨)	354	405	800	1 200