

ONGCHENG DIZHI GAILUN



# 工程地质概论

李忠 曲力群 于箫 主编

中国铁道出版社

P642  
17

---

---

# 工程地质概论

---

---

李忠 曲力群 于 箫 主编

中国铁道出版社

2006年·北京

## 内 容 简 介

本书内容包括岩石和造岩矿物、岩石圈的变形与变位、土的工程地质性质、水的地质作用、岩石的工程地质性质、常见地质灾害、工程地质勘察。书末附有岩土工程地质室内实验指导书。

本书可以作为相关专业的参考书,也可作为土木类本科生教材,还可作为土木工程专业专科函授生和工程地质培训班的教材,此外,可供从事工程地质勘察的科技人员和其他有关专业院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程地质概论/李忠,曲力群,于箫主编.—北京:中国铁道出版社,2005.1(2006.1重印)

ISBN 7-113-06281-4

I.工… II.①李…②曲…③于… III.工程地质 IV.P642

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第127227号

书 名: 工程地质概论

作 者: 李忠 曲力群 于 箫 主编

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑: 程东海

印 刷: 北京市兴顺印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.25 字数: 378千

版 本: 2005年1月第1版 2006年1月第2次印刷

印 数: 3001~6000册

书 号: ISBN 7-113-06281-4/TU·796

定 价: 25.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话(010)51873135

发行部电话(010)51873171

# 前 言

近年来,各高等院校特别是理工科院校为了适应社会对大学毕业生的需要,拓宽大土木专业本科生毕业后的就业范围,各大学水文地质与工程地质专业及其相关专业(包括地下工程、桥梁、物探等专业)都相继开设了“工程地质学”课程,但尚无一本比较适合铁道交通院校使用的参考书。为此,石家庄铁道学院工程地质教研室决定编写《工程地质概论》,以作为铁道高等院校土木类专业学生学习工程地质的参考书。

在传统的大学教育中,工程地质科学本已占有一定的位置,有关的书数不胜数。但长期以来工程地质科学本身也是专业林立,各守疆界,工程地质科学是被分解成许多局部来研究的。虽然在人类认识的历史过程中,由于当时认识能力的限制,形成许多研究的分支学科是必然的,今天也仍有必要继续从各个局部深入下去。但如总是停留在对工程地质科学上某些局部进行研究,而对作为一个完整系统存在的整体缺乏认识,则会给人类生存环境造成重大危害,这方面我们是有深刻教训的。对于土木专业毕业生来说,在走向工作岗位前,很需要对工程地质科学进行总体的认识。

为此,本书力求把工程地质科学当作一个系统来介绍,同时把地球当作宇宙中的一员来认识,重点探究地球各圈层的相互作用与演化,结合人类对地球的认识过程,概略地介绍关于地球科学的理论和知识,从而探讨人类怎样才能做到与地球和谐协调的发展。我们理解的工程地质科学,应该是系统研究地球物质的组成、运动、时空演化及其形成机制的学问。懂得工程地质科学最基本的研究方法是野外观测。获取野外第一手的资料是所有地球科学包括工程地质科学研究的重点,也是基础。其目的是保护和改善自然环境,预报和减轻自然灾害。

本书由李忠、曲力群、于箫主编,具体分工如下:绪论由李忠、陈伟编写,第一章由李忠、杨杰、温进芳编写,第二章由李忠、于箫、杨杰编写,第三章由李忠、曲力群、于箫编写,第四章由李忠、杨杰、温进芳、于箫编写,第五章由李忠、曲力群、温进芳编写,第六章由李忠、温进芳编写,第七章由曲力群、王景春、陈伟编写。在编写过程中,编者在总结教研室的教学经验和中国地质大学、西南交通大学教材的基础上,参阅了各种版本的工程地质学教材和这一学科领域的最新研究成果,并搜集了最近颁布的有关规范和规程,力图做到体系结构严谨、合理,基本概念清楚、明确,且能深入浅出,易于本科生接受,使土木类专业学生能在有限的学时内掌握工程地质学最基本的原理和方法,学以致用。

编者谨向参加审稿的各位教授致以谢意,他们为提高本教材质量付出了辛勤劳动。

本书除作为土木类本科生参考书外,还可作为土木工程专业专科函授生和工程地质培训班的教材。此外,可供从事工程地质勘察的科技人员和其他有关专业院校师生参考,也是一本为文、理、政、法、工、农、医、商各科大学生进行素质教育而编写的参考书,供非工程地质学类专业大学生入门之用。

由于编者水平所限,书中会有缺点甚至错误,恳请读者批评指正。

编 者

2005年1月

## 目 录

绪 论 .....	1
<b>第一章 岩石和造岩矿物</b> .....	7
第一节 地球的物质组成 .....	7
第二节 岩 浆 岩 .....	14
第三节 沉 积 岩 .....	22
第四节 变 质 岩 .....	32
思考题 .....	38
<b>第二章 岩石圈的变形与变位</b> .....	40
第一节 岩石圈的变形与变位综述 .....	40
第二节 褶 皱 .....	45
第三节 断 裂 .....	48
第四节 节 理 .....	54
第五节 岩层产状与土木工程的关系 .....	60
第六节 地 质 图 .....	64
第七节 地 史 .....	66
思考题 .....	75
<b>第三章 土的工程地质性质</b> .....	76
第一节 土的形成及其结构构造 .....	76
第二节 几种特殊土的工程地质特征 .....	81
第三节 地貌学基础知识 .....	91
思考题 .....	96
<b>第四章 水的地质作用</b> .....	97
第一节 地表流水的地质作用 .....	99
第二节 地 下 水 .....	113
思考题 .....	131
<b>第五章 岩石的工程地质性质</b> .....	132
第一节 岩石与土工程地质性质的差别 .....	132
第二节 岩石的物理性质和水理性质 .....	133
第三节 岩石力学性质 .....	135
第四节 岩石的工程地质性质概述 .....	136
第五节 岩体的结构特征 .....	146
思考题 .....	158
<b>第六章 常见地质灾害</b> .....	160
第一节 地质灾害评述 .....	160

第二节 内生地质灾害特征 .....	164
第三节 外生地质灾害特征 .....	173
第四节 主要的地质灾害评价理论 .....	209
思考题 .....	211
<b>第七章 工程地质勘察 .....</b>	<b>212</b>
第一节 工程地质勘察的方法 .....	212
第二节 工程建筑地区工程地质勘察 .....	215
思考题 .....	226
附录一 测定岩石的静力变形参数(电阻应变仪法)实验 .....	227
附录二 测定岩石的单轴抗压强度实验 .....	230
附录三 测定岩石的抗拉强度(劈裂法)实验 .....	231
附录四 测定岩石的剪切强度指标(变角板法)实验 .....	232
附录五 一般性地质符号 .....	234
参考文献 .....	236

## 绪 论

### 一、工程地质学的研究对象和任务

工程地质学是地质学的分支学科,又是工程与技术科学、基础学科的分支学科。它是工程科学与地质科学相互渗透、交叉而形成的一门边缘科学,从事人类工程活动与地质环境相互关系的研究,是服务于工程建设的应用科学。它利用基础学科中地学的基本理论,解决各种建筑物,如桥梁、隧道、车站等建筑场地的地质条件对建筑物的影响。研究如何控制和改善建筑场地的不良工程地质条件,以保持各种建筑物的稳定和正常使用。

人类工程活动与地质环境间的相互关系,首先表现为地质环境对工程活动的制约作用。地球上现有的工程建筑物,都建造于地壳表层一定的地质环境中。地质环境包括地壳表层以及深部的地质条件,它们以一定的作用方式影响工程建筑物。例如,地球内部构造活动导致的强烈地震,顷刻间可使较大地域内的各种建筑物和人类生命财产遭受毁灭性的损失;地壳表面的软弱土体不适应于某些工业与民用建筑物荷载的要求,需进行专门的地基处理;地质时期内形成的岩溶洞穴因严重渗漏,造成水库和水电站不能正常发挥效益,甚至完全丧失功能;大规模的崩塌、滑坡,因难于治理而使铁路改线等等。各种制约作用,归结起来是从安全、经济和正常使用三个方面影响工程建筑物的。因此,工程地质工程师必须要很好地研究建筑场址的地质环境,尤其是对工程建筑物有严重制约作用的地质作用和现象一定要进行详细、深入地研究。

人类的各種工程活动又会反馈作用于地质环境,使自然地质条件发生变化,影响建筑物的稳定和正常使用,甚至威胁到人类的生活和生存环境。例如,滨海城市大量抽汲地下水所引起的地面沉降,造成海水入侵、市政交通设施破坏和丧失效用、地下水水质恶化等;大型水库的兴建,是河流上下游大范围内水文和水文地质条件发生变化,引起库岸再造、库周浸没、库区淤积、诱发地震等问题,甚至使生态环境恶化。工程地质工程师应充分预计到一项工程的兴建,尤其是重大工程兴建对地质环境的影响,以便采取相应的对策。

铁路、公路运输线是国民经济的大动脉,它在国家的建设中占有重要地位。修建一条能满足国防及国民经济发展所要求的高质量的铁路,取决于多方面的因素。但是当一条铁路的方向和施工技术条件确定之后,地质条件就成为设计线路位置和线路上各种建筑物如车站、桥梁、隧道、路基等的决定性因素。对工程地质条件的认识程度和掌握水平,在很大程度上决定着铁路设计的质量和施工方案的合理性。多年来的大量铁路建设实践表明,如果铁路工程地质工作做得深入细致,工程地质条件掌握得透彻,即使工程地质条件较复杂,也能建成高质量的铁路,反之,如果忽视了工程地质工作的重要性,工程地质工作做得不够,没有如实地掌握客观的工程地质资料,即使在工程地质条件比较简单的地段,往往也会发生问题。

由此可见,人类的工程活动与地质环境之间,处于相互联系、又相互制约的矛盾之中。研究地质环境与人类工程活动之间的关系,促使两者之间的矛盾转化和解决,就成了工程地质学的基本任务。

工程地质学为工程建设服务,是通过工程地质勘察来实现的,勘察所取得的各项地质资料和数据,提供给规划、设计、施工和使用部门使用。具体地说,工程地质勘察的主要任务是:

- (1) 阐明建筑地区的工程地质条件,并指出对建筑物有利的和不利的因素;
- (2) 论证建筑物所存在的工程地质问题,进行定性和定量的评价,作出确切结论;
- (3) 选择地质条件优良的建筑场地,并根据场地工程地质条件对建筑物配置提出建议;
- (4) 研究工程建筑物兴建后对地质环境的影响,预测其发展演化趋势,提出利用和保护地质环境的对策和措施;
- (5) 根据所选定地点的工程地质条件和存在的工程地质问题,提出有关建筑物类型、规模、结构和施工方法的合理建议,以及保证建筑物正常施工和使用所应注意的地质要求;
- (6) 为拟定改善和防治不良地质作用的措施方案提供地质依据。

工程地质工程师只有与工程规划、设计和施工工程师密切配合、协同工作,才能圆满地完成上述各项任务。

由上述任务可见,明确工程地质条件和工程地质问题的含义以及它们之间的关系是很有必要的。

工程地质条件指的是与工程建设有关的地质因素的综合,或是工程建筑物所在地质环境的各项因素,是在自然地质历史发展演化过程中形成的,因此必须采用自然历史分析方法去研究它。这些因素包括岩土类型及其工程性质、地质构造、地貌、水文地质、工程动力地质作用和天然建筑材料等方面。它是一个综合概念,其中的某一项因素不能概括为工程地质条件,而只是工程地质条件的某一因素。工程地质条件直接影响到工程建筑物的安全、经济和正常使用。所以兴建任何类型的建筑物,首先就要查明建筑场地的工程地质情况,它是工程地质勘察的基本条件。由于不同地区的地质环境不尽相同,因此,对工程建筑物有影响的地质因素主次也不同,工程地质工程师应对当地的工程地质条件进行具体分析,明确主次,并进一步指出对工程建筑物有利的和不利的方面。

工程地质问题指的是工程地质条件与工程建筑物之间所存在的矛盾或问题。工程地质条件是自然界客观存在的,它能否适应工程建设的需要,则一定要联系到工程建筑物的类型、结构和规模,优良的工程地质条件能适应建筑物的要求,对它的安全、经济和正常使用方面不会造成影响或损害。但是,工程地质条件往往有一定的缺陷,对建筑物产生某种影响,甚至造成灾难性的后果。因此,一定要将工程地质条件和建筑物两个方面联系起来进行分析。

不同类型、结构和规模的工程建筑物,由于工作方式和对地质体的负荷不同,对地质环境的要求是不同的。所以,工程地质问题是复杂多样的。例如,工业与民用建筑的主要工程地质问题是地基承载力和变形问题;地下洞室的主要工程地质问题是围岩稳定性问题;露天采矿场的主要工程地质问题是采坑边坡的稳定性问题。而水利水电建设中的工程地质问题更为复杂多样。例如,坝基渗漏和渗透稳定性是土石坝主要的工程地质问题。地质问题的坝基抗滑稳定和坝座抗滑稳定则分别是重力坝和拱坝的主要工程地质问题;还有水库渗漏、库周浸没、库岸再造以及船闸边坡稳定和渠系工程的渗漏和稳定问题等等。工程地质问题的分析、评价,是工程地质勘察工作的核心任务,对每一项工程的主要工程地质问题必须作出定性的或定量的确切结论。

近数十年来,国内外一些工程建设项目由于未查清建筑场区的工程地质条件,对工程地质问题分析、评价不够确切或结论有误,以致造成不良影响或严重后果的事例较多,应引起初学者们的注意。

## 二、工程地质学的研究内容、分科及其与其他学科的关系

工程地质学研究内容是多方面的,完整的工程地质学科体系应从如下几方面进行研究,由



此也就形成了它的分支学科。

(1)岩土工程地质性质的研究。建造与地壳表层的任何类型的建筑物,总是离不开岩土体的,作为建筑物地基或环境的岩土体,其成因类型和性质对建筑物的意义重大,是人类工程活动与地质环境相互联系和制约的基本要素。无论是分析工程地质条件,或是评价工程地质问题,首先要对岩土的工程性质进行研究,研究岩土的分布规律和成因类型,它的工程性质和形成、变化规律,各项参数的测试技术和方法以及对其不良性质进行改善、补强等方面的内容,是由“工程岩土学”这一分支学科来进行的。

(2)工程动力地质作用的研究。作为工程地质条件要素之一的工程动力地质作用,包括地球的内力和外力成因的,还有人类工程、经济活动所产生的各种作用,往往制约着建筑物的稳定性、造价和正常使用。研究工程动力地质作用(现象)的分布、规模、形成机制、发展演化规律,所产生的不良地质问题,对之进行分析、评价以及提出有效的防治对策和措施等,是由“工程动力地质学”这一分支学科来进行的。

(3)工程地质勘察理论和技术方法的研究。工程地质学服务于工程建设的具体工作就是要进行工程地质勘察。正如前面所提及的,工程地质勘察的主要目的,就是为工程建筑物的规划、设计施工和使用,提供所需的地质资料 and 各项数据。由于不同类型、结构和规模的建筑物,对工程地质条件的要求以及所产生的工程地质问题不同,因而勘察方法的选择、勘察方案的布置以及工作量使用等也都不尽相同。为了做好勘察工作,就要在查明建筑场区的地质条件的基础上,对可能产生的主要工程地质问题进行确切的分析、评价。为了保证工程地质勘察的质量和精度,应该制定适用于不同类型工程建筑的勘察规范或手册,作为工程勘察的指导性文件。当前我国有关部已经编制出或正在编制国家标准的各类建筑工程的勘察规范或规程,并注意和推广新颖的勘察理论和技术方法。有关这方面的研究,是由“专门工程地质学”这一分支学科进行的。

(4)区域工程地质的研究。不同地域的自然地质条件不同,因而工程地质条件和工程地质问题也有明显的区域性分布规律和特点。为了国土资源开发利用和工程建设布局的优化,就必须研究不同地域工程地质条件的形成和分布规律,进行区划。我国国土面积广大,自然地质条件复杂,因此开展这方面的研究更显重要。“区域工程地质学”即为这方面研究的分支学科。

(5)环境工程地质的研究。这是近代工程地质学研究的热点。由于人类工程经济活动对地质、环境的反馈作用日趋广泛和深刻,使地质环境恶化,甚至地质灾害频发,严重威胁着人类的生存和生活。为了合理开发利用和保护地质环境,要建立起地质环境与人类活动之间的理论模式关系,科学地预测由于人类活动对地质环境的负影响以及它的区域性变化。尤其在大型水利、水电工程、城市建设和矿产开发等方面要大力开展环境工程地质研究。所以,“环境工程地质学”已成为工程地质学的新兴分支学科。

工程地质学所涉及的知识范围是很广泛的,它必须要以许多学科的知识作为自己的理论基础和方法、手段。它与地质学的各分支学科以及其他多种学科相联系。

地质学的分支学科有:动力地质学、矿物学、岩石学、构造地质学、地层学、第四纪地质学、地貌学和水文地质学等,都是工程地质学的地质基础学科。没有上述各地质学科的知识,是不可能进行工程地质研究的。例如,研究岩土工程地质性质时,就必须有矿物学和岩石学的知识。研究各种工程动力地质作用和现象,更需要多种地质分支学科的理论和方法作为其基础。

为了确切地研究一些不良地质现象的形成机制和定量评价工程地质问题,工程地质学要以数学、物理学、化学、力学等学科知识作为它的基础。尤其是属于物理学的力学学科的工程

力学、弹塑性力学、结构力学、土力学和岩体力学等,与工程地质学的关系十分密切。工程地质学中的大量计算问题,实际上也就是土力学和岩体力学的课题;土力学和岩体力学是进行工程地质问题定量评价的左右手。因此,在广义的工程地质学概念中,甚至将土力学和岩体力学也包含在内。

此外,工程地质学还与工程应用技术科学、环境科学、工程科学等有关。如水利水电建筑工程、工业与民用建筑学、气象学、水文及水测验学、电子计算机技术、地球物理勘探学、钻探学等与之联系均较密切。

### 三、工程地质学的发展历史

人类在远古时代,就懂得利用优良的地质条件兴建各类建筑工程。但是,工程地质学在国际上成为地质学的一门独立分支学科,仅有 60 多年的历史。

20 世纪 30 年代初,原苏联开展大规模的国民经济建设,促使了工程地质学的萌生。1932 年在莫斯科地质勘查学院领导下成立了工程地质教研室,培养工程地质专业人才,并奠定了工程地质学的理论基础,与此同时,欧美和日本等国家,在举行水利工程和水利工程建筑中,也都开展了工程地质工作,但它附属于建筑工程中,主要从事一般地质构造和地质作用与工程建筑有关岩土工程地质性质和力学问题的研究。

工程地质学经过数十年的发展,学科体系逐渐完善,已形成为有多个分支学科的综合性学科。为了促进工程地质科学的发展和便于各国学者的学术交流,1968 年在第 23 届国际地质大会,成立了国际地质学会工程地质分会,后改名为国际工程地质协会,该协会下设了多个专业委员会,并定期进行学术交流,亦有会刊。至今已召开了多届国际工程地质大会,每届大会所交流的学术论文内容非常广泛,有各类岩土工程地质性质勘察研究、边坡和地下工程岩土体稳定有关的工程地质问题研究、环境规划和城市区的工程地质勘查研究,以及各类重大工程兴建时环境地质问题研究等等。

我国的工程地质学是在新中国成立后才发展起来的,20 世纪 50 年代初期,原地质部成立了水文地质工程地质局和相应的研究机构,设置水文地质工程地质专业,培养专门人才,当时一些重大工程项目如新安江水电站、三门峡水电站等,都进行了较详细的工程地质勘察。随后国防、交通、城建等单位相继成立了勘察和研究机构,在高等院校中设立有关专业,其中包括水利水电、铁路桥梁、城市规划、工业与民用建筑、矿山工程、大型地下开拓工程等方面进行了大量工程地质工作,为工程的规划、设计、施工和正常运行提供地质依据,这不但保证了工程建设的顺利进行,而且丰富了工程地质学。

为了更好地促进我国工程地质学科,1979 年 11 月成立了中国地质学会工程地质专业委员会,并召开了我国首届工程地质大会,至今已召开了多届大会和多次专题性学术讨论会。

工程地质学作为一门独立的科学体系还在不断充实、完善,当前又开辟平矿山工程、地震工程地质和海洋工程地质、地质灾害防治专业等新的研究领域,耗散结构理论、灰色理论等理论和方法也逐渐引入到其中。

### 四、本书内容与学习方法

本书是为地质类非水文地质与工程地质专业学生开设的综合性工程地质课而编写的参考书。本书内容包括岩土工程地质性质研究、工程动力地质作用研究,另有一室内工程地质试验指导的附录。

岩土工程地质性质研究。讨论岩石的成因类型、岩石矿物学特征、组成成分、结构和构造,它们的物理性质和力学性质,岩土工程分类,以及不良性质的改善与处理等。

工程动力地质作用研究。讨论与工程建设关系较密切的工程动力地质作用,它们的形成机制、发展演化规律、时空分布特点,可能产生的工程地质问题以及防治措施等。

附录室内工程地质试验、指导,为土和岩石室内主要的物理性质和力学性质试验的原理、仪器设备操作步骤和成果要求。

根据本书工程地质学的研究重点内容,可以大致归纳为以下线索:

### (一)重点内容

#### 1. 研究土及岩石的分类及其工程地质性质

不同的土、岩石,其成因及组成物质各不相同,所以工程地质性质差异也就很大。我们在不同的土、岩石中开挖路堑边坡、隧道,在不同的土、岩石上修筑桥涵、路基、房屋,使用各种砂及石作为建筑材料,必须对这些土、岩石的工程地质性质有清楚地了解,确保工程建筑物的稳定和正常使用。

#### 2. 研究地质构造地质作用

由于地壳运动使岩层产生各种不同的构造形态。这些构造形态的性质、分布及其特征是控制岩体稳定的重要因素。所以在设计和施工时要考虑地质构造的影响。

#### 3. 研究地下水地质作用

在土和岩石孔隙和裂隙中储存和运动着的地下水,常改变土和岩石的工程地质性质,削弱其力学强度,是使岩体失稳的重要因素之一。

#### 4. 研究不良地质作用

不良地质作用如崩塌、滑坡、泥石流及地震等能直接严重地损害各种建筑物。研究不良地质作用的发生、发展规律,可以提出控制它们危害线路和建筑物的措施,以保证建筑物的正常使用,或选择工程地质条件良好的线路方案。

### (二)研究方法

影响建筑物稳定性的各种地质条件,都是自然历史演化的产物。各种地质现象既有其本身的特殊运动规律,各种地质现象间又有普遍地相互联系,所以是非常复杂的。为了分析研究影响建筑物稳定的各种地质条件和地质现象,就要用地质学的研究方法,即首先要直接或间接地取得大量的客观实际资料,然后通过资料的整理、分析和归纳,找出其规律性和处理措施。

地质学研究方法得出的结论是原则性的基本情况,往往不能全部满足工程设计和施工的具体要求,所以还必须采用试验和计算手段,求得具体的数字指标和参数,供设计和施工使用还很不完备,很多理论问题,如工程地震,坑道围岩稳定性和岩质边坡稳定性,各种特殊地层的工程地质性质,以及在高原冰冻地层地区修建铁路出现的一系列工程地质问题等,都有待进一步的研究。最近十几年来,现代科学技术突飞猛进,宏观的和微观的测试手段以及计算技术的发展,将会推进工程地质的理论研究大踏步地向前迈进。

### (三)学习本课程的要求

本课程为土木工程专业技术基础课。通过本门课程的学习,使学员获得工程地质方面的基本理论知识,初步了解作为建筑物地基、边坡、围岩的岩体稳定分析的基本知识和方法,为学生应用工程地质方法分析解决工程专业问题打下基础。为此,对学生提出以下要求:

1. 能阅读一般的地质资料,根据地质资料在野外辨认常见的岩石;了解其主要的工程地质性质,辨认基本的地质构造及较明显、简单的不良地质现象,了解其对线路及建筑物的影响,并

在专业设计和施工中能应用这些工程地质知识。

2.一般地了解取得工程地质资料的工作方法、工作内容以及勘测、试验手段。应用这两种方法,必须有机的配合,才能取得正确而具体的答案。如果抛开地质条件的分析,单纯地追求计算数字指标和参数往往会得出片面的结论。

# 第一章

# 岩石和造岩矿物

## 第一节 地球的物质组成

### 一、地球中的元素

我们的地球是一个物质的世界。根据万有引力定律计算的结果,地球的质量近 60 万亿亿吨,几乎都集中在平均半径为 6 371 km 的固体地面以下,以岩石和金属的形态出现,其平均密度为  $5.517 \text{ g/cm}^3$ (表 1—1)。大气、水和生物体的总质量不足 0.1%,但占领的空间广大。密度分布愈向外愈小,特别是大气圈向上可以稀薄到使人误认为“真空”的程度。

今天地球上的物质存在形式可谓千姿百态,特别是出现生命以后,更是变得复杂多样,但它们都是由最简单的基本粒子所组成。首先是一个质子和一个电子组成结构最简单、也最轻的元素——氢。质子居于中心成为原子核,电子围绕原子核运动,犹如行星绕太阳;而质量分配也和太阳系相像,几乎全部质量都集中在原子核里,但这微不足道的电子却为这氢原子占据了比原子核大上亿倍的空间。当原子核中多了一个中子时,这个氢原子的质量加一倍;多两个,加两倍,但仍处于元素周期表上原来的位置,这样氢就有了相对原子质量为 1、2、3 的三种同位素。地球上的氢,99.985% 是相对原子质量为 1 的氢。

按照宇宙始于大爆炸的设想,地球上多种多样的物质,都是从基本粒子聚变成氢开始的,然后是四个氢合成一个氦,氦再进一步合成其他元素。这样从轻元素到重元素,约在 150 亿年前的大爆炸后 50 万~100 万年时,现今所有的元素就已通过核聚变而逐渐形成。

元素的形成时期远比太阳系的起源早。根据现代物理、化学的理论与实验和观察的结果,太阳上目前仍在进行着氢合成氦的热核聚变,及其他天体化学现象。已经可以肯定,宇宙中的元素通过热核聚变反应,经历了从简单到复杂的形成演化过程。

物质世界的一切,不论是何种形态,归根到底,都可以说是从“一”开始,难怪不少当代科学家对两千多年前中国李耳“道生一,一生二,二生三,三生万物”的哲学思想,大为叹服。

人类社会的发展,工业兴起,加剧了对资源的需要,驱使人们去分析、研究矿物岩石的化学成分。19 世纪末期,美国化学家克拉克(F. W. Clarke, 1847—1931 年)等人根据大陆地壳中的 5 159 个岩石、矿物、土壤和天然水的样品分析数据,于 1889 年第一次算出元素在地壳中的平均含量数值(平均质量百分数),即元素的丰度,后人为了纪念这个创举,将它命名为克拉克值。地壳中各元素的丰度,依次为:氧(45.2%),硅(27.2%),铝(8%),铁(5.8%),钙(5.06%),镁(2.77%),钠(2.32%),钾(1.68%),钛(0.68%),氢(0.14%),锰(0.10%),磷(0.10%),其他所

表 1—1 地球质量与密度的分配

名称	质量( $10^{24} \text{ g}$ )	密度( $\text{g/cm}^3$ )
大气	0.005	
海洋	1.41	1.03
冰川	0.023	0.9
大陆地壳	17.93	2.7
大洋地壳	7.71	2.9
地幔	4 068	4.53
地核	1 881	10.72
总计或平均	5 976	5.517

(据 A. Holmes,《Principles of Physical Geology》,1978 年)

有元素(0.77%)。克拉克等采用的样品来自地面下 16 km 以内大陆地壳,后来被分析的样品则不仅有采自地壳的岩石,还有来自天外的陨石。加上采用其他方法,整个地球,乃至宇宙的元素丰度都有可能推知。1956 年第一次算出了以硅原子数量为基数的元素的相对宇宙丰度,后来又按质量估算出 92 种元素在地球中含量的百分数(见图 1—1)。

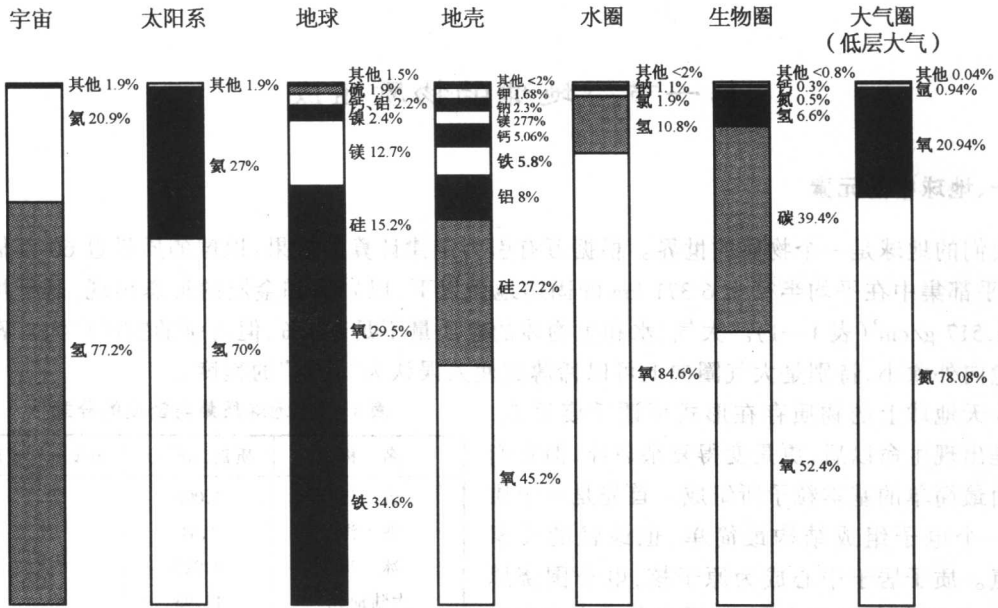


图 1—1 元素在地球中的分布

据近年来的研究,组成整个地球的物质,按质量计算,各元素的丰度为:接近 34.6% 是铁, 29.5% 是氧, 15.2% 为硅, 12.7% 为镁, 2.4% 为镍, 1.9% 硫, 2.2% 为钙和铝,其他所有元素共占 1.5%。地球中的铁和镍大部分以金属状态存在于地核中。组成地壳和地幔的物质,大部分是氧和硅,还有铝、铁、镁也较多。在地球的水圈中,以氧和氢为主。生物圈则主要为碳、氢、氧和氮。大气圈、水圈和生物体中的所有元素的质量和地球的总质量相比,不及千分之一,但它们的影响,特别是对人类的影响,快速而强烈,因为水和大气都极易流动,而生物圈更是地球上物质转换最为活跃的部分。

地球中的元素,大部分组成化合物或以单质的形式——矿物,聚集在岩石中。初看起来,它们似乎被固定在那里了,实际上随着岩石、矿物的破坏和重新形成而在无休止地迁移、变化着。从化学的角度来看,则元素在不断地改变着它们的存在场所或组合形式。在这迁移的过程中,可以使某些元素或化合物相对集中,也会使某些元素相对分散开来。当元素或化合物相对集中到能够具有经济价值并可被人所利用时,这些物质就称为矿产。可以说整个地球的历史,也就是元素在地球的各圈层间不断转移的历史。

## 二、自然界中的矿物

在地球科学中,把天然产出的、具有一定化学成分和物理特征的元素或化合物称为矿物,而把矿物的集合体称为岩石。但在实际生活中,两者不是一眼就能区别的,特别是有些岩石中的矿物颗粒极其细微,肉眼难以辨认,所以古人常分不清岩石和矿物,这并不奇怪。

矿物与岩石的根本区别不在它们的外表,而在于矿物有确定的化学成分和一定形态的内

部结构,无论是在什么地方产出,矿物的化学成分都是一致的。但岩石中各种矿物成分和化学成分含量的多少,只有大致的范围,可以说岩石是各种矿物的混合物。

中国古代很重视玉,但并不知道它是什么成分,经过现代技术手段测定,才知道玉不是矿物,而是矿物的集合体,即岩石一类。这些矿物大多为透闪石( $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$ )或阳起石一类,成纤维状,非常细微,肉眼是分辨不出来的。它们紧密交织,牢牢地结合在一起,不仅坚硬而且韧性极强,所以帝王用它做传国玉玺。难以识别的细微矿物很多,像黏土中的许多矿物也是如此,看起来是一把泥土,其实里面含有多种矿物,用电子显微镜才能认出。

矿物也有较大的形体,可以用肉眼及简单的试验方法辨认。矿物一般都有自己固有的形态,但在自然界产出时常不完整,只有部分矿物如水晶、金刚石、黄铁矿、方解石、黑云母、石棉等少数矿物易形成其固有的形态特征。除少数矿物是无色透明外,一般都有自己的颜色。不过含有杂质时本来的颜色会被改变。少数矿物的颜色鲜明,如辰砂(朱红色)、磁铁矿(铁黑色)、孔雀石(孔雀绿色)等也颇能引人注目。矿物粉末的颜色——条痕色常具有鉴定意义。矿物的透明度、硬度、密度、磁性;表面的光泽,以及受到打击碎裂后的形态——解理等等,都是识别它们的标志(表 1—2)。少数矿物具有某些显著特征,像磁铁矿具磁性,能吸铁;金刚石坚硬无比(在所有矿物中硬度最大),而且光泽极强;方解石被击碎时,总是具有菱面体的解理面;有“愚人金”之称,表面呈现黄色的黄铁矿,在无釉的白色瓷板上能擦出黑绿色的条痕。上述矿物特征就成为它们的主要鉴别标志。需要注意的是,在自然界中,矿物常常不是作为单个矿物产出,而是聚集在一起成为集合体,或是分散在岩石中,因而鉴别起来难度很大。但矿物的各种常见特征,仍是鉴别的基础(见表 1—2)。

表 1—2 常见矿物的鉴别特征

矿物名称	化学成分	晶形	颜色	条痕	光泽	硬度	解理或断口	其他
石墨	C	片状	黑色	黑色	半金属光泽	1~2	一组解理	有滑感,易污手
金刚石	C	八面体 四面体	无色	无	金刚光泽	10	无解理	
萤石	$\text{CaF}_2$	八面体	无色,或带色彩	无色	玻璃光泽	4	四组解理	具荧光
黄铁矿	$\text{FeS}_2$	立方体	浅黄色	绿黑色	金属光泽	6~6.5	无	晶面有生长纹
黄铜矿	$\text{CuFeS}_2$	少见	黄铜色	绿黑色	金属光泽	3~4	无	
方铅矿	$\text{PbS}$	立方体	铅灰色	灰黑色	金属光泽	2~3	三组解理	
闪锌矿	$\text{ZnS}$	四面体	浅黄至棕色	白色至褐色	玻璃光泽	3.5~4	六组解理	
石英	$\text{SiO}_2$	六棱柱 菱面体	无色或乳白色	无	玻璃光泽	7	无	断口油脂光泽
磁铁矿	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	八面体	铁黑色	黑色	半金属光泽	5.5~6	无	磁性
方解石	$\text{CaCO}_3$	菱面体	白色	无色	玻璃光泽	3	三组解理	
钾长石	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	板状	肉红色	无色	玻璃光泽	6	两组解理	卡氏双晶

续上表

矿物名称	化学成分	晶形	颜色	条痕	光泽	硬度	解理或断口	其他
斜长石	$(\text{Na}, \text{Ca})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	板状、板条状	白色	无色	玻璃光泽	6	两组解理	聚片双晶
普通辉石	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_2[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$	短柱状	绿黑色或黑色	灰绿色	玻璃光泽	5.5~6	两组解理	
普通角闪石	$(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{11}]_2[\text{OH}]_2$	长柱状	绿黑色或黑色	灰绿色	玻璃光泽	5.5~6	两组解理	
橄榄石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$	不规则粒状	橄榄绿色	无色	玻璃光泽	6~7		
黑云母	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}][\text{OH}, \text{F}]_2$	片状或板状	棕褐色或黑色	灰色	玻璃光泽或珍珠光泽	2~3	一组解理	
白云母	$\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}][\text{OH}]_2$	片状或板状	无色	无色	玻璃光泽或珍珠光泽	2~3	一组解理	
石榴子石	$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ca})_3(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr})_2[\text{SiO}_4]_3$	十二面体八面体	黄褐色	无	玻璃光泽或油脂光泽	6~7.5	无	

### 三、矿物晶体结构——矿物的 DNA

前面多次提到矿物的形态和大小,准确地说,应该是矿物晶体的形状和大小。绝大部分矿物都经过结晶,只是有的晶体太小了,肉眼看不见。常见的花岗岩中的石英、长石和云母都可以看出是晶体,但也并不是都能看清它们完整的晶体形态。

1912年,德国物理学家冯·劳埃(M. von Laue, 1879—1960年)用X射线观测晶体,发现不管晶体的外形如何,内部的原子、离子、分子都是有秩序地排列。这种质点的有序排列,就好像生物的基因物质——脱氧核糖核酸(DNA)一样,可以说就是矿物的“DNA”。以后科学家进一步认识到,矿物的各种特征,与它的化学成分相关,金刚石的硬度排名第一,而石墨极软,用手摩擦就能使它掉下粉末、将手染黑。金刚石有棱有角,表面光洁耀眼成为珍贵的宝石,而石墨则不过是一堆片状物的集合,毫无观赏的价值。这些差异,都是它们内部碳原子的空间排列形态不同所造成的(图1—2)。

所有的矿物晶体内的原子或离子都是在空间中、有规律地排列组合起来的,其空间格架的形态多种多样。同一矿物的晶体结构总是一样的。抓住晶体内部结构的特点,面对五光十色形态繁多

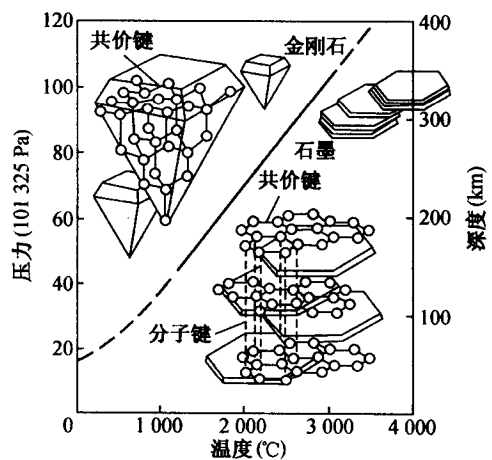


图1—2 金刚石和石墨的晶体结构  
(引自 J. P. Davidson 等, 1997 年)



的矿物,认识它们就有了头绪。如果化学成分相同,而其晶体结构不同,那么就形成了不同的矿物,金刚石和石墨就是这种情况,成分相同而晶体结构不同。但是同一种矿物、同一种晶体结构可由一种或多种晶体外部形态,如像黄铁矿常以立方体形态产出,但还有五角十二面体、八面体等几种晶体形态。这也就是说,如果具有同一种晶体结构,即使晶体形态不同,也应该是同一种矿物。

将矿物化学成分分析与晶体结构结合起来观测,才能可靠地鉴定矿物,仅靠肉眼是做不到的。20世纪以来,随着观测技术手段的进步,矿物学家认出了愈来愈多的矿物,人类已知的矿物种数,从20世纪初的两千多种,增加到20世纪90年代的五千多种。

按其化学成分及晶体结构,矿物通常分为以下五大类:

自然元素矿物:如金、金刚石、石墨、硫磺,还有铜、银、汞等。

卤化物矿物:如石盐、钾盐、萤石等。

硫化物矿物:如黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿、雄黄等。

氧化物和氢氧化物矿物:如赤铁矿、磁铁矿、铬铁矿、锡石、铝土矿、软锰矿、硬锰矿等。

含氧酸盐矿物:还可再分为若干类,最重要的是下面三类:①硫酸盐矿物,有石膏、芒硝、重晶石等;②碳酸盐矿物,如方解石、白云石、孔雀石等;③硅酸盐矿物,在氧离子和硅离子结合的基础上,再与金属离子结合而成硅酸盐矿物,种类繁多,约占已知矿物种数的1/4,占地壳总质量的85%,其中最常见的就是各类长石、云母、辉石、角闪石、橄榄石等几种,它们广泛分布在地壳与地幔内。

硅和氧结合的时候,硅离子居中,周围是四个氧离子与它等距离地连接起来,形成一个硅氧四面体,这种四面体结构非常稳定(图1—3)。位于四面体四个顶端上的氧离子需要与四个阳离子结合,其他金属的离子正好可与之结合。硅氧四面体也可互相连接,形成多种晶体结构的硅酸盐矿物。如果没有外来的阳离子与它结合,这些硅氧四面体就自行结合起来成为石英( $\text{SiO}_2$ )。

矿物中也存在没有经过结晶的非晶质体,火山喷出的熔岩快速凝结而成的黑曜岩、珍珠岩,还有新近从温泉中沉淀出来的蛋白石,就是非晶质体。它们在电子显微镜与X射线衍射仪上,仍看不出质点的有序排列。随着仪器观测精度的提高,过去许多以为是非晶质的矿物,其实是晶体微小的“隐晶质”。原来被列为非晶质的矿物越来越少了。

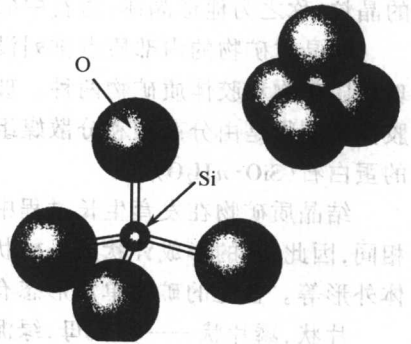


图1—3 一个硅离子和四个氧离子结合构成的硅氧四面体

#### 四、矿物的形态及主要物理性质

自然界中已被发现的矿物达3000种左右,其中大部分矿物数量很少,分布也极分散,一般来说这些矿物对岩石性质影响不大,对岩石定名也没有普遍意义。在岩石中经常见到、明显影响岩石性质、对鉴定和区别岩石种类起重要作用的矿物,约有20多种,称之为主要造岩矿物。

对于肉眼鉴别矿物来说,矿物的下述几方面特性有重要意义:

##### (一) 矿物的形态

在通常情况下,绝大多数造岩矿物呈固态,只有极个别矿物呈液态,如自然汞(Hg)等。固