

高等学校教材

土工原理与计算

第二版

河海大学·钱家欢 殷宗泽 合编

水利电力出版社

前 言

《土工原理与计算》(第一版)上、下两册先后于1980年和1981年由水利电力出版社出版。它受到广大读者,特别是土建、水利、交通等部门的工程技术人员及高等学校有关专业师生的欢迎,不少院校将其用作研究生教材。1987年该书获得了水电部优秀教材一等奖,这给全体编写人员以很大鼓舞。

现在,十多年过去了,土力学的理论和实践都有了很大发展,第一版已经不能适应新的形势,迫切需要修订、更新。为此,我们决定编写第二版。编写的目的正如第一版序言中所说:“希望力所能及地将土力学中某些重要领域的近代理论与新的计算方法,紧密结合起来,加以总结和介绍。”考虑到目前尚无正式的土力学研究生教材,《土工原理与计算》(第二版)将作为研究生教材出版。当然,它仍是工程技术人员和研究人员的参考书。

20名专家学者参加了本书的编写。第一章由河海大学方开泽和南京大学李生林两位教授编写;第二章由河海大学殷宗泽教授执笔,其中河海大学向大润教授编写了部分内容;第三章由南京水利科学研究院毛昶熙和周保中两位高工编写;第四章由河海大学钱家欢教授编写;第五章由河海大学钱家欢、殷宗泽、方开泽和赵维炳四位教授编写;第六章、第七章、第八章分别由河海大学方涤华、郭志平、周萍三位副教授编写;第九章由河海大学俞仲泉教授编写;第十章由江苏省水利勘测设计院谢良诚高工编写;第十一章、第十二章分别由河海大学姜朴、徐志英教授编写;第十三章由东南大学唐念慈教授编写;第十四章由河海大学卢盛松教授编写;第十五章由同济大学胡中雄、魏道焱和高大钊三位教授编写。钱家欢和殷宗泽教授负责第二版的组织编写和定稿工作。

本书由天津大学陈环教授担任主审,也承清华大学周景星教授审阅了第十一章、第十二章。他们提出了宝贵的改进意见,至为铭感。

编 者

1993年6月

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书是土力学专著,系统地总结和介绍了国内外在土力学重要领域内的理论和计算方法。

本书共分15章,内容包括:土的物质构成及分类,土的本构关系及土工有限元分析,土的渗透性与渗流计算,地基应力与建筑物沉降,固结与流变理论,土的抗剪强度,土坡稳定计算,地基承载力,地基与基础计算中的若干问题,水工建筑物地基处理,土的动力性质,土体动力分析,桩的动力测试方法及应用,边界单元法在土力学中的应用,概率论与统计学在土工问题中的应用。

本书除可作有关院校土工专业研究生教材外,还可供建筑、水利、铁道、交通等部门的工程技术人员使用。

高等学校教材

土工原理与计算

第二版

河海大学 钱家欢 殷宗泽 合编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京·中南海边)

各地新华书店经售

北京市朝阳区小红门印刷厂

*

787×1092毫米 16开本

1980年

1994年6月第二版 第一次印刷

印数0—

ISBN 7-114-0005-4 V·713

定价 20.70元

目 录

前言

第一章 土的物质构成及分类	1
第一节 土的矿物成分	1
第二节 粘土颗粒的带电性	9
第三节 土中水和气	17
第四节 土的物理化学性质	24
第五节 土质分类	29
第二章 土的本构关系及土工有限元分析	44
第一节 土体的变形特性	44
第二节 弹性非线性模型	54
第三节 弹塑性模型	60
第四节 非线性有限元分析	82
第五节 土体非线性分析中的几个问题	90
第三章 土的渗透性与渗流计算	107
第一节 土的渗透性与达西定律	107
第二节 流网及其应用	111
第三节 水在土中渗流的作用力	119
第四节 渗流出口的临界坡降及其防护	122
第五节 闸坝基底浮托力和出口坡降的近似计算	125
第六节 渗流对堤坝稳定的影响及渗流控制	135
第七节 堤坝的渗流计算	140
第八节 基坑排水的渗流计算	148
第九节 有限单元法的渗流计算	155
第四章 地基应力与建筑物沉降	169
第一节 概述	169
第二节 地基自重应力	169
第三节 附加应力	174
第四节 实用沉降计算方法	178
第五节 应力路径法计算沉降	193
第五章 固结与流变理论	199
第一节 概述	199
第二节 太沙基固结理论	199
第三节 比奥固结理论	213
第四节 有限单元法解比奥固结方程	221
第五节 大变形固结理论	229

第六节 土的流变	237
第七节 动力固结	250
第六章 土的抗剪强度	259
第一节 概述	259
第二节 莫尔—库伦强度理论	260
第三节 三轴试验中的应力路径和破坏取值标准	263
第四节 孔隙压力系数	267
第五节 粘性土的强度特性	269
第六节 砂土的强度特性	290
第七章 土坡稳定计算	302
第一节 条分法的基本概念	302
第二节 最简单的条分法——瑞典圆弧滑动法	304
第三节 毕肖普法	308
第四节 简布的普遍条分法	312
第五节 极限平衡的其他计算方法	318
第六节 塑性极限分析和模糊极值理论	327
第七节 各种方法的比较与讨论	339
第八章 地基承载力	345
第一节 概述	345
第二节 极限承载力的基本公式	347
第三节 极限承载力的修正和推广	361
第四节 层状地基的极限承载力	371
第五节 深基础地基的承载力	387
第六节 浅基础地基承载力的讨论	395
第九章 地基与基础计算中的若干问题	401
第一节 基底摩擦系数及其确定	401
第二节 弹性地基参数及其确定	414
第三节 水闸反拱底板及构筑物壳体基础的计算	430
第十章 水工建筑物地基处理	452
第一节 换土垫层法	452
第二节 反压法	457
第三节 砂井预压法	464
第四节 振动水冲法	483
第十一章 土的动力性质	491
第一节 概述	491
第二节 室内动力测试	491
第三节 原位动力测试	503
第四节 土的动力变形特性	510
第五节 土的动强度与液化	523
第六节 振动作用下的孔隙水压力	532
第十二章 土体动力分析	537
第一节 地震	537

第二节	结构动力学基础	548
第三节	地基的地震反应分析	558
第四节	土坝的地震反应分析	583
第十三章	桩的动力测试方法及应用	611
第一节	概述	611
第二节	波动方程的基本原理	613
第三节	波动方程的推导	615
第四节	波动方程的史密斯解答	616
第五节	土阻力的计算模型	617
第六节	垫层材料的特性	619
第七节	桩身的计算图式	620
第八节	桩的性状分析步骤	621
第九节	波动方程的生产应用问题	621
第十节	波动方程分析的发展近况	628
第十一节	桩的其他几种常用动力测试方法简介	631
第十二节	介绍一项国外新的试桩技术	641
第十三节	关于桩的动力测试规范	643
第十四章	边界单元法在土力学中的应用	648
第一节	边界元的基本原理与积分方程	648
第二节	建筑物与地基相互作用的边界元分析	653
第三节	边界元在渗流分析中的应用	656
第四节	三维动力基础的边界元分析	661
第五节	边界元在强夯中的应用	673
第十五章	概率论与统计学在土工问题中的应用	680
第一节	关于安全度和优化设计的讨论	680
第二节	随机事件及其概率	683
第三节	随机变量的概率分布与数学特征	687
第四节	抽样估计	693
第五节	地基的推断设计	705
第六节	边坡安全度分析	709

第一章 土的物质构成及分类

土是由固相、液相、气相组成的三相分散系。固相物质包括多种矿物成分组成土的骨架，骨架间的空隙为液相和气相填满，这些空隙是相互连通的，形成多孔介质。液相主要是水（溶解有少量的可溶盐类）。气相主要是空气、水蒸气，有时还有沼气等。土中三相物质的含量比例不同，其形态和性状也就不同，自然界的土的固相物质约占土体积的一半以上。不同成因类型的土，即使达到相同的三相比例关系，但由于其颗粒大小、形状、矿物成分类型及结构构造上的不同，其性质也会相去甚远。土与岩石的主要区别在于固体颗粒间的连结很弱，因此，其强度较其他固体材料要低得多，且极易受外界环境（湿度、温度）的影响。由于土的成因类型、形成历史不同，其性质及性状极其复杂多变。为了对土的复杂多变特性的形成原因和作用机理有一基本了解，本章拟从土的矿物成分、土颗粒的带电性、土中水和气、土的物理化学性质以及土的分类诸方面作一简单介绍。

第一节 土的矿物成分

一、土的矿物成分类型

土是岩石风化后的产物，由于母岩成分及风化程度的不同，就形成不同的矿物类型，按其不同成因和性质可分为以下四大类。

（一）原生矿物

原生矿物是母岩物理风化的产物，仅形状大小发生变化，化学成分并未改变。主要有石英、长石、云母类矿物，其次为角闪石、磁铁矿等。这类矿物的化学性质稳定或较稳定，具有强或较强的抗水性和抗风化能力，亲水性弱或较弱，是组成粗粒土的主要矿物成分，其对土的性质的影响主要由这些矿物本身的性质反映出来的。如颗粒大小组成、矿物类型、颗粒形状、表面特征、硬度等。

（二）次生矿物

次生矿物是原生矿物进一步因氧化、水化、水解及溶解等化学风化作用而形成的新的矿物成分。在自然界，最常见的有粘土矿物、含水倍半氧化物及次生二氧化硅。

粘土矿物是次生矿物中数量最多的矿物，主要是由各种硅酸盐类矿物分解形成的含水铝硅酸盐，其颗粒极细，一般粒径小于 $5\mu\text{m}$ ，是构成土中粘粒的主要矿物成分。它在土中的相对含量即使不大，也对土的工程性质有极大的影响，表现出明显的控制作用，故下面将单独讨论。

含水倍半氧化物，常以 $\text{R}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 表示，R可以是铝，也可以是铁，如铝矾土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）、褐铁矿（ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ），它是各种硅酸盐矿物分解后残留的非溶性次生矿物。大多呈凝胶状，部分呈显微结晶，颗粒极细，粒径一般小于 $0.1\mu\text{m}$ ，亲水性强。

次生二氧化硅，一般都含结晶水，分子式为 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，是由硅酸盐矿物解析出的次生矿物，也呈凝胶状。它的颗粒细小，形成土中的粘粒，亲水性较弱，性质稳定。

（三）水溶盐

水溶盐实际是可溶性次生矿物，根据其在水中溶解度的大小，可分为易溶盐、中溶盐及难溶盐三类。易溶盐包括全部氯盐及钾、钠的硫酸盐、碳酸盐，溶解度为每升几十至几百克，最常见的有岩盐(NaCl)、钾盐(KCl)、芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)和苏打($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)等。中溶盐主要有石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)，溶解度为 2g/L 。难溶盐主要是方解石(CaCO_3)和白云石(MgCO_3)，溶解度极小，每升仅几十毫克。土中盐类的溶解和结晶会影响到土的工程性质，硫酸盐类还对金属和混凝土有一定的腐蚀作用。故工程中对易溶盐和中溶盐的含量有一定限制，对土坝，要求总量不超过 8% ，铁路路堤不超过 5% 。其中硫酸盐应不超过 2% 。

由于土中盐类的存在，对孔隙水中离子的浓度和类型会产生影响，这又是影响土的物理力学性质的重要因素。

（四）有机质

土中的有机质主要是动植物分解后的残骸，分解彻底的称为腐殖质。有机质的化学成分有碳水化合物、蛋白质、脂肪、碳氢化合物及碳等五类，其中，碳水化合物的纤维素($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)为主要成分。腐殖质的颗粒极细，粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ ，呈凝胶状，带有电荷，具有极强的吸附性。有机质含量对土的性质的影响要比蒙脱石更大，如土中含有 $1\% \sim 2\%$ 有机质时，其对液限和塑限的影响相当于 $10\% \sim 20\%$ 蒙脱石。有机质在高含水量时随含水量的变化具有可逆转的膨胀收缩性质，但干缩到某一含水量后这种逆转性就消失。故含有机质的土，用烘干土做液塑限试验，较用天然含水量的土做液塑限试验，数值要低很多。

有机质的存在对土的工程性质的影响甚大，可惜对它的认识还远不及对粘土矿物清楚。但总的概念是，随着有机质含量的增加，土的分散性加大，含水量增高（可达 $50\% \sim 200\%$ ），干密度减小（ $< 1\text{g/cm}^3$ ），胀缩性增加（ $> 50\%$ ），压缩性增大，强度减小，承载力降低。故对工程极为不利。通常地层表面范围土的有机质含量较为丰富，修筑建筑物时要清基，填筑用土的有机质含量也应有所限制。如我国，要求筑坝土料有机质含量不超过 5% ，防渗结构土料有机质不超过 2% 。

二、土的矿物成分与颗粒大小关系

随着岩石风化过程的加深，以及风化产物搬运距离的增大，土颗粒逐渐变细，矿物成分也会发生变化。土的矿物成分与颗粒的大小之间存在明显的内在联系。较粗大的颗粒都由原生矿物构成，而细小颗粒绝大多数为次生矿物。

土的矿物成分与粒组之间的对应关系大致如图1-1所示。

由原生矿物集合体构成的母岩碎屑，主要形成粗大漂石、卵石及砾石。部分隐晶、细晶岩及沉积岩的碎屑可形成粗中砂粒，并保持母岩的多矿物结构。

大多数组成岩石的矿物成分，晶粒的大小相当于砂粒、粉粒的粒径，故母岩物理风化后常形成砂粒及粉粒。自然界各种土的砂粒，除少数母岩碎屑和极少数难溶盐外，绝大多

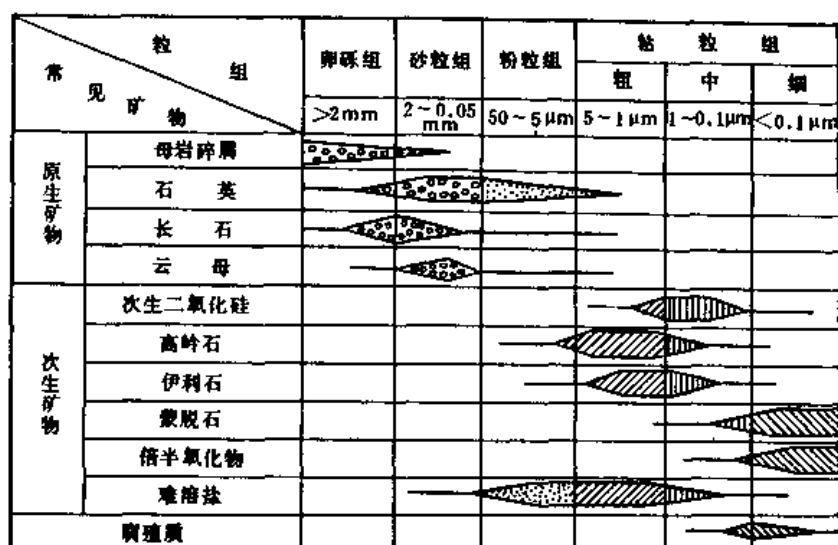


图 1-1 颗粒大小与矿物成分间的关系

数都是单个原生矿物。特别是石英，由于抗风化力和抗水性强，硬度又大，故成为砂粒和粉粒组的主要成分。而长石、云母类矿物在粉粒组中含量显著减少，原因是它们容易风化次生矿物。

三、粘土矿物

粘土矿物是次生矿物中数量最多的一种，是由各种硅酸盐矿物分解形成的含水铝硅酸盐矿物，颗粒都极细小，是粘粒组中的主要矿物成分。粘土矿物种类繁多，可分为晶体和非晶体两大类，以晶体矿物为主，非晶体矿物很少。所谓晶体是指原子、离子在空间有规律的排列，不同的几何排列形式称为晶体结构，组成晶体结构的最小单元称为晶胞。粘土矿物晶胞是由硅氧四面体和氢氧化铝八面体两种基本结构单元组成的。硅氧四面体由 4 个氧原子中间包 1 个硅原子构成一等边四边形，如图 1-2 所示，(a) 为透视图，(b) 为侧视图，并标出原子符号及价数。氢氧化铝八面体如图 1-3 所示，它的顶端是 6 个氢氧根，上下各 3 个，构成 1 个八面体，中心为铝原子或镁原子。

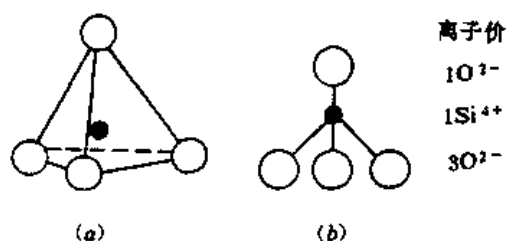


图 1-2 硅氧四面体
(a) 透视图；(b) 侧视图

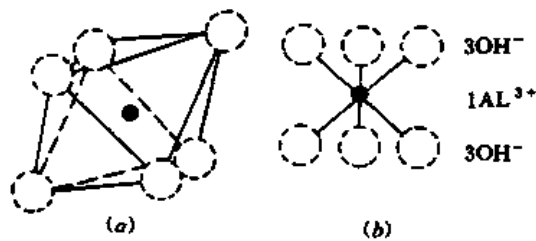


图 1-3 铝氢氧八面体
(a) 透视图；(b) 侧视图

不同的粘土矿物都是由以上两种基本结构单元组成的，只是具有不同的组成形式而已。有时中心原子 Si、Al 会被其他原子如 Fe、Mg 等置换，其结构形式不变，但其物理化学性质将发生变化，形成不同的矿物，这种现象叫同像置换或同形代替。

四面体、八面体不是单个存在而是成层状排列的。四面体在平面上构成六边形网络，八面体也是连成一片的，交接处的原子为相邻单元公用，成为四面体层及八面体层。当四

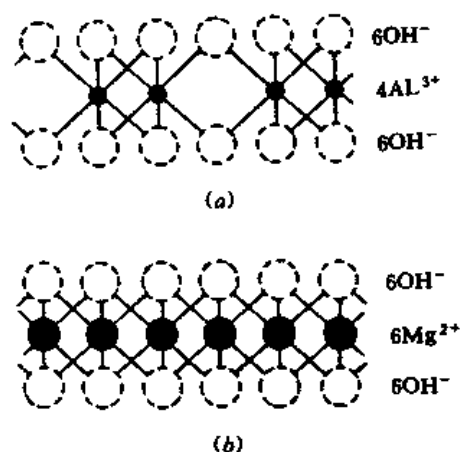


图 1-4 八面体示意图

(a) 水铝矿 (二八面体);

(b) 水镁矿 (三八面体)

面体层与八面体结合时, 顶部的O或OH有一部分也是公用的。

由八面体层构成的矿物有水铝矿, 分子式为 $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, 结构形式如图1-4 (a) 所示, 铝处在八面体中心位置, 只有2/3被占满, 故称为二八面体。当中心的铝被镁所置换时, 将全部占满中心位置, 称为三八面体, 成为水镁石, 分子式为 $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ 。由四面体层和八面体层相互叠接而成的矿物称为层状结构矿物, 主要类型有高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石等。

(一) 高岭石组

高岭石组以高岭石为代表, 因最早发现于我国江西浮梁高岭山 (景德镇附近) 而得名。它是

两层结构, 由一层硅氧四面体层和一层铝氧八面体层通过公共的氧原子连接成1个晶胞, 晶胞厚为 $7.2\text{\AA}$, 每个晶胞的原子排列和电荷分配如图1-5, 作为简图, 八面体层可以用1个矩形来表示, 四面体层可以用1个等腰梯形表示。晶胞内的电荷是平衡的, 晶胞之间是氧原子和氢氧根连接, 氢氧根中的氢与相邻晶胞中的氧形成氢键, 起着连接作用, 故性质是较稳定的, 水分子不易进入晶胞间面发生膨胀。典型的高岭石有70~100层, 属三斜及单斜晶体, 密度为 $2.58\sim 2.61\text{g/cm}^3$, 它的水稳性好, 可塑性低, 压缩性低, 亲水性差。

高岭石产于酸性环境中, 是花岗岩风化后的产物, 通常来源于长石的水解, 分子式为 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ 。

属于两层结构的还有埃洛石, 晶胞间有水分子进入, 呈结晶水, 故亦称多水高岭石, 分子式为 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。由于晶胞间存在结晶水, 埃洛石常呈卷曲状或管状, 含有此类矿物的土, 其密度都较低。

(二) 蒙脱石组

蒙脱石组属三层结构。它由两层硅氧四面体层夹一层氢氧化铝八面体层构成, 每个晶胞的厚度为 $14\text{\AA}$, 晶胞中原子的排列与电荷分配如图1-6所示。

作为单个粘土片的蒙脱石只有几层, 其特点是两层之间是以氧原子与氧原子相联, 靠分子间的相互作用力 (范得华力) 相互连接, 连结力很弱, 水分子容易进入晶胞之间, 使晶胞距离增大。因之, 蒙脱石的晶格是活动的, 吸水后体积会发生膨胀, 体积可增大数倍, 脱水后则可收缩。膨胀土就是由于粘粒中含有一定数量这类矿物的缘故。一般含量在5%以上, 就会有明显的膨胀性。

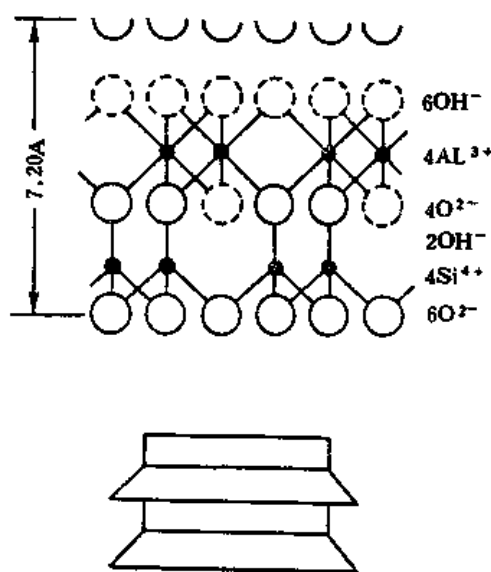


图 1-5 高岭石结晶格架示意图

蒙脱石的分子式为 $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$,以氧化物表示为 $4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$,相应的含量分别为66.9%、28.3%、5.0%。它属斜方晶体,呈灰白色、青色、桃红色,密度一般为2.2~2.7,具有高塑性,高压缩性,低强度,低渗透性,液限可达150%~700%,塑性指数可达100~650。

蒙脱石常由火山灰、玄武岩等转变而来,一般在碱性、排水不良的环境里风化形成。蒙脱石的同像置换非常发育,而形成一系列类质同像矿物,如拜来石、囊脱石、皂石等。在湿润温暖的气候条件下,蒙脱石中的一部分 SiO_2 可能被溶滤析出而转变为伊里石、高岭石或其他粘土矿物。

(三) 伊利石组

伊利石是云母类粘土矿物的统称,亦为三层结构,晶胞厚为 $10\text{ \AA}$ 。与蒙脱石的不同之处是类质同像置换主要发生在硅四面体中,约有20%的硅被铝、铁置换,由此而产生的不平衡电荷由进入晶胞之间的钾、钠离子(主要是 K^+)来平衡,钾键起到晶胞与晶胞之间的连结作用,连结力较强。因此,水分子就不易进入,遇水膨胀,脱水收缩的能力低于蒙脱石,单片厚为十几层,其力学性质介于高岭石与蒙脱石之间。

伊利石的分子式为 $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$,典型的伊利石含 K_2O 6.3%,属斜方晶体,密度为2.6~3.0。伊利石是较不稳定的中间产物,形成条件是要有一定的钾离子,我国黄河、长江流域的沉积土以及沿海软粘土中,其粘土矿物大部分以伊利石主,故塑性指数较低。

上述高岭石、蒙脱石、伊利石是最常见、最重要的粘土矿物,由于其晶格结构的差异,反映出的力学性质也有很大差别,如不同粘土矿物的液限和塑限及塑性指数就不同。图1-7为塑性指数与粘粒($<2\text{ }\mu\text{m}$)含量百分率的关系图,同样的粘粒含量,塑性指数以蒙脱石最高,伊利石次之,高岭石最低,这些线的斜率也就是活动性指标。指标越大,表面力与水分子力之间的相互作用愈强烈,亲水性越强。

不同矿物成分的力学强度有很大差别,如以残余强度 ϕ_r 来表示,石英砂的 ϕ_r 达 35° ,高岭石的为 12° ,伊利石的为 10.2° ,蒙脱石的为 $4^\circ\sim 10^\circ$ 。它反映粘土层状结构对抗剪强度的影响。

不同粘土矿物的孔隙比与渗透系数的关系见图1-8。从图中可以看出,蒙脱石的孔隙比变化范围最大,渗透系数则最小,高岭石的孔隙比变化范围最小,而渗透系数最大。从图中还可以看出交换阳离子类型对渗透性也有很大的影响,孔隙比为7时,钠蒙脱石的渗透

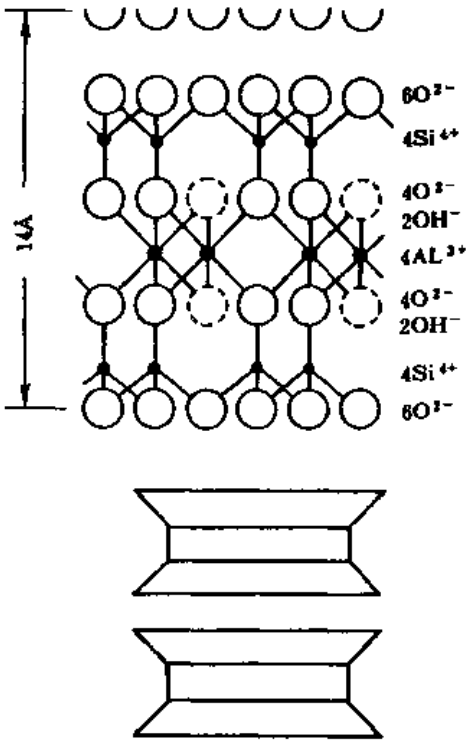


图 1-6 蒙脱石结晶格架示意图

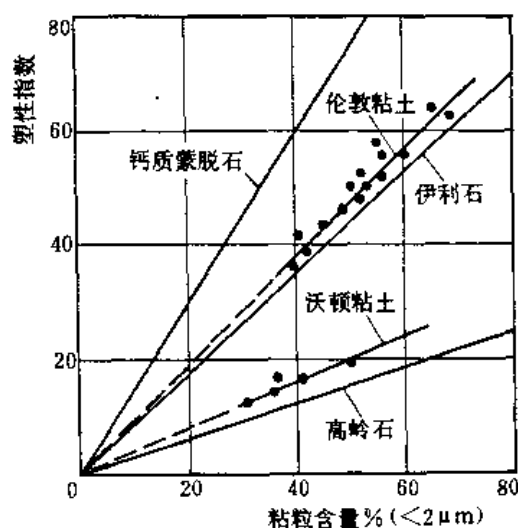


图 1-7 塑性指数与粘粒含量的关系

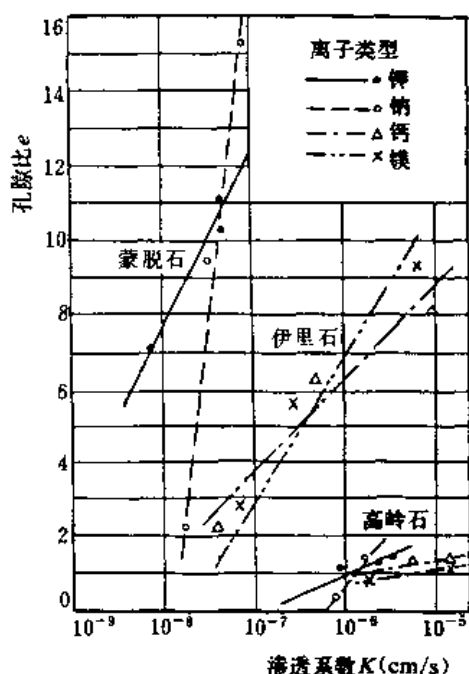


图 1-8 孔隙比与渗透性关系

系数要比钾蒙脱石约大300倍。

(四) 绿泥石

绿泥石由三层结构中间再夹一层二八面体或三八面体连接起来，属 2:1:1 型的层状结构，晶胞间距为 $14\text{\AA}$ ，分子式为 $\text{Mg}_6[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。它一般由变质岩风化而来，性质类似伊利石。

除上述层状结构外，还有链状结构的粘土矿物，如坡缕缟石和海泡石。它们是碱性环境中的风化产物，但不多见。

(五) 水铝英石

水铝英石属非晶质矿物，X衍射分析效果不佳，可用远红外光谱分析法鉴定，可以认为是四面体和八面体无规律组成的矿物。它通常同多水高岭石伴生，在良好的排水条件下，由火山灰风化而成。它在工程性质上的特点是，凡含有水铝英石的粘土，都具有很高的灵敏性和活动性。用静水沉降法进行颗粒分析时，一般分散剂往往不起作用，反而产生絮凝，含有水铝英石的粘性土进行液限塑限试验时，和有机质土有类似特性，即用自然含水量的土做出的结果要比风干土的高得多，反映出含水量的变化对土的性质有不可逆的影响。

四、粘土矿物的鉴定

鉴定粘土矿物成分的方法很多，由于天然土往往存在几种不同的粘土矿物，因之常需用几种方法进行综合分析，方能准确地鉴定土中存在的不同矿物成分。以下介绍一些常用的方法。

(一) 差热分析法

差热分析法是鉴定粘土矿物的常用方法，它的原理是不同矿物在加热过程中会产生不同的热反应。粘土矿物在加热 ($100\sim 1200^\circ\text{C}$) 过程中将发生一系列的物理、化学变化，如矿物化学结合水的脱出、晶格构造的破坏，将产生吸热反应，而新的矿物晶相的形成则引起放热反应。不同的粘土矿物，由于成分、晶格构造及物理化学性质不同，加热过程所发

生的变化及其伴生的热反应特征也是不一样的。应用差热分析仪可以测出矿物在升温过程中吸热时的温度（吸热谷）和放热时的温度（放热峰），即差热曲线。图1 9为某些常见粘土矿物的差热曲线。

高岭石在550~600℃之间时，由于结构水的脱出和晶格结构的破坏，有一个较强的吸热反应，加热至接近1000℃时，被破坏的高岭石重新结晶出现1个放热峰。

蒙脱石的差热曲线有3个吸热谷和1个放热峰，3个吸热谷分别在150~200℃、700℃附近及850~900℃，在1000℃附近形成放热峰。

伊利石的特征是差热曲线有3个不大的吸热谷，即150℃、550℃附近及800~900℃。

各种粘土矿物的差热曲线有专门的参考图谱可查。由于自然界的土往往由多种矿物组成，热反应的温度、峰谷的形状大小等，均会因相互干扰而发生变异，故此时的鉴别能力就较低。

(二) X 射线分析法

X射线分析法是研究结晶构造、鉴定粘土矿物最重要的一种方法。所用的仪器为X射线衍射仪，由X射线发生器、测角仪、计数器及自动记录装置组成。X射线是一种波长很短的光波，穿透力很强，X射线射入粘土矿物晶格中时将产生衍射现象，不同的粘土矿物、晶格构造各异，会产生不同的衍射图谱。

任何一种晶体，都是由原子(离子或分子)在三度空间呈周期性排列而成。对层状结构的粘土矿物，晶胞间距是X射线分析的主要参数。所采用的X射线的波长应同原子的间距在同一数量级，如同铜靶的X射线管，其波长 λ 为1.5418 Å，晶体中的原子由于X射线的射入，周围的电子引起振动，并将X射线散射出来，散射出来的射线能产生干涉现象。干涉的结果可使X射线相互迭加而增强或相互抵消而减弱。最大程度的增强叫做衍射。根据光学原理，干涉现象是由于不同光源射出的光线之间存在行程差而引起的，只有当行程差等于波长的整数倍时，光波才能相互迭加而增强，否则就相互抵消而削弱。在层状构造的晶体矿物中，只有在相邻晶面射出的次生X射线的行程差等于波长的整数倍时，才能迭加成为衍射线。

如图1-10所示， P_1 、 P_2 、 P_3 ...为原子晶面， d 为晶面间距，波长为 λ 的X射线束与晶面成 θ 角射入。当 P_2 面的反射波与 P_1 面的反射波的行程差为波长的整数倍时，相邻层面的反射波就有相同的相位，衍射射线就加强。

由图1 10可知经 P_2 、 P_1 晶面的射线，行程差为 $BC + CD$ ，由对称性， $BC = CD$ ，且 $CD = d \sin \theta$ ，故衍射线加强的必要条件为

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

式中， n 为正整数，即 $n = 1, 2, 3 \dots$ 。

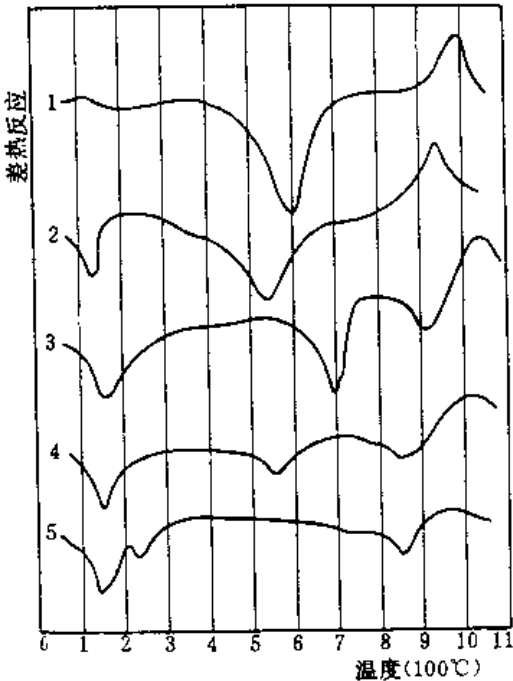


图 1 9 土中某些常见粘土矿物的差热曲线
1 -高岭石； 2 -水化埃洛石； 3 -蒙脱石； 4 -伊利石； 5 -蛭石

上式亦可表达为

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (1-1)$$

此即布拉格定律 (Bragg's law)，它是 X 射线鉴定晶体的理论根据。

试验用的样品一般是小于 $2\mu\text{m}$ 的土粒，用粉末法或集合体法制样。常见粘土矿物的 X 射线衍射图见图 1-11。水平坐标为入射角，垂直坐标为衍射峰。根据衍射峰值可判断出矿

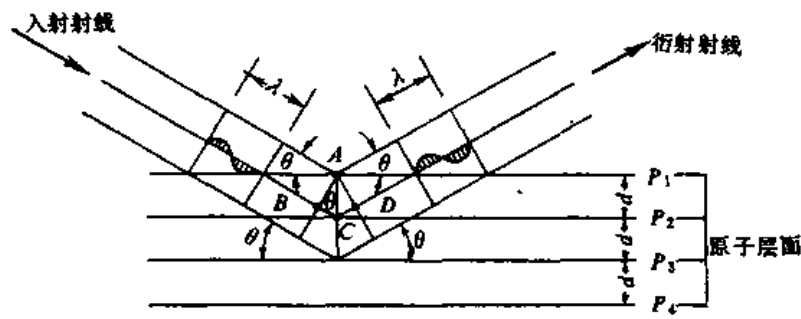


图 1-10 X 射线衍射的几何条件

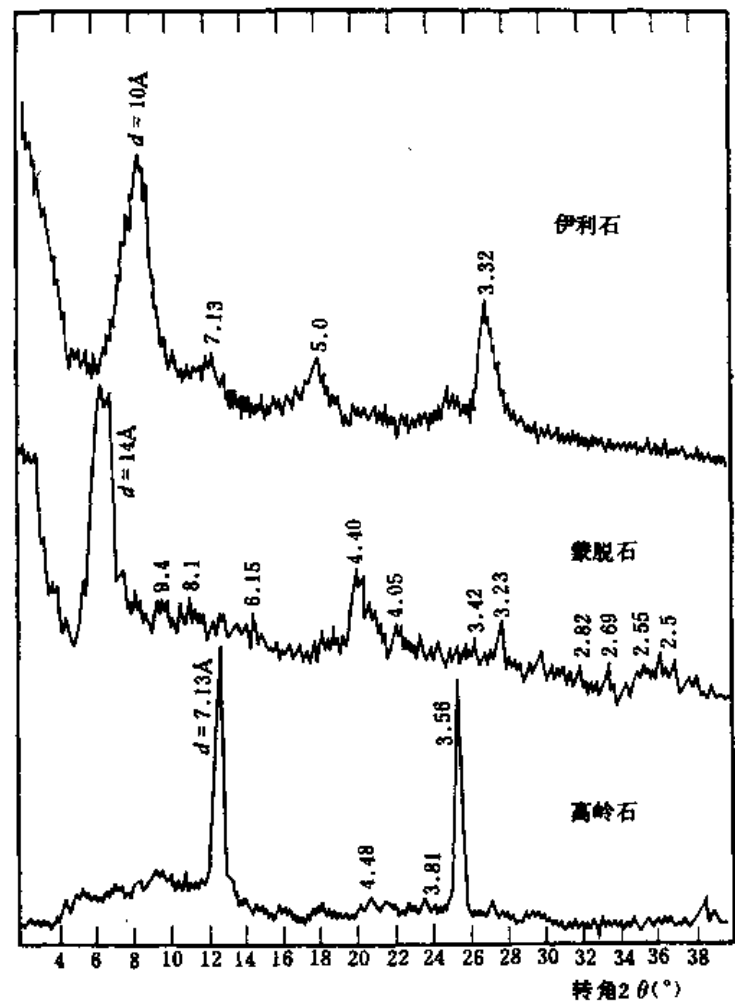


图 1-11 不同矿物的衍射图

物类型。

（三）化学分析法

化学分析法是通过粘土矿物的全量化学分析,测得各主要元素的相对含量,如 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、 SO_3 、 H_2O 等,由此推算出其分子式,从而鉴别其矿物类型。 K_2O 含量高为伊利石的特征,正常的伊利石 K_2O 含量达6%以上,高岭石的 Al_2O_3 含量可达40%左右,蛭石、皂石的 MgO 含量可达20%~30%。

二氧化硅与倍半氧化物的分子数比称为硅铝率,即硅铝率 $k = \text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 。不同矿物的硅铝率是不同的,一般高岭石 $k = 2$,伊利石 $k = 2 \sim 3$,蒙脱石 $k > 4$ 。故根据硅铝率可粗略地判别粘土矿物的类型。

（四）其他方法

染色法是最简单的鉴定粘土矿物的方法,但可靠性较差。其原理是用孔雀石绿、二氨基联苯等有机染色剂对粘土进行染色,不同的粘土矿物对各种染色剂的反应是不同的,有的被染色,有的不能染色,染上颜色的深浅也不同。根据不同的反应来鉴别不同的粘土矿物。

红外光谱分析是利用不同矿物所吸收的红外光的频率范围的不同来鉴别矿物的。可用于晶体及非晶体矿物,如水铝英石所吸收的频率为 $3400 \sim 3500 \text{ 1/cm}$ 及 $1000 \sim 1100 \text{ 1/cm}$ 。

电子显微镜法是研究粘土结构的有效方法。通过它也可直接观察粘土颗粒的大小、形状、厚薄等外部特征,以此来鉴别粘土矿物。

由于天然土中往往同时存在数种粘土矿物,常需用上述几种方法进行综合分析,才能定性的确定土中的矿物成分类型。至于定量分析,目前还只能粗略地作出估计。

第二节 粘土颗粒的带电性

自然界的土是由各种大小不同的颗粒组成的。对粘性土来讲,其中粘粒的含量和类型对土的性质起着决定性的影响。这是因为粘土颗粒极细,具有巨大的表面积和带电性,当其与水相遇时,将产生复杂的物理化学变化,具有胶体分散系的一些特征。本节先就粘土颗粒的表面特性、双电层理论、离子交换现象等作一介绍。

一、粘粒的表面特性

我国土工规程将粘粒定义为小于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒,国外也有用 $2 \mu\text{m}$ 的。在进行粘土矿物鉴定时则提取小于 $2 \mu\text{m}$ 的颗粒作为样品。胶体化学中称小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒为胶体颗粒。实际上粒径为 $5 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒已具有胶体性质,可称为准胶体颗粒。

（一）比表面积

作为准胶体颗粒和胶体颗粒的粘粒来讲,首先是具有巨大的表面积。粘粒的表面往往带有一定的电荷,这些电荷具有吸引外界极性分子或离子的能力,称为表面能。同样质量或同样体积的土,表面积越大表面能就越大,重力作用相对就减小。

衡量土的表面积大小的指标叫比表面积。可以用单位体积土的颗粒所具有的表面积来表示,以 1 cm^3 土颗粒所具有总表面积(cm^2)来计量,单位是 cm^2/cm^3 或 $1/\text{cm}$ 。也可

以用单位质量土所具有的总表面积来表示，单位是 m^2/g 。各种粘土矿物由于分散度及晶格构造特征不同，表面积有明显的差别。象蒙脱石这类矿物的晶胞间连接力很弱，不仅具有外表面，同时还有巨大的内表面。土中常见粘土矿物的比表面积见表1-1。

土的比表面积可以用实验方法测定，通常也是提取小于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒作为样品，根据测得的比表面积来判别粘土矿物的类型，了解其物理化学性质。测定土的比表面积的方法很多，应用较普遍的是有机极性分子吸附法，我国土工规程推荐的是乙二醇吸附法及甘油吸附法。其原理是使试样颗粒表面形成单个分子的吸附层，测出吸附量的多少，再换算成表面积。如以乙二醇为吸附剂时，换算系数为 $0.00031\text{g}/\text{m}^2$ ，即形成 1m^2 单分子层所需乙二醇的质量。以甘油作为吸附剂时，每克甘油吸附的面积为 17.65m^2 。

(二) 电动现象

粘土颗粒的带电现象早在1809年就为俄国学者列依斯所发现，他在潮湿的粘土块中，插入两根玻璃管，管内撒上一层净砂，注入清水至同样高度，再放入电极通以直流电，经过一段时间后出现了如图1-12所示的现象：

表 1-1 常见粘土矿物的比表面积	
矿物名称	比表面积 (m^2/g)
蒙脱石	810 (其中内表面700~760)
伊利石	67~100
高岭石	7~30
埃洛石	45
水铝英石	260~300

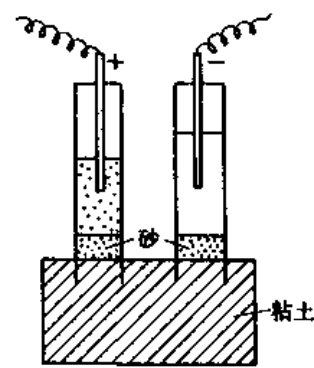


图 1-12 电动现象

正极玻璃管内的水慢慢混浊起来，同时水位逐渐下降，这说明极细小的粘粒本身带有一定的负电荷，在电场作用下向正极移动，这种现象称为电泳。负极的玻璃管内，水仍然是清澈透明的，但水位逐渐升高，这说明水分子在电场作用下向负极移动，由于水中含有一定的阳离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)，故水的移动实际是水分子随这些水化了的阳离子一起移动，这种现象称为电渗。

电泳、电渗是同时发生的，统称为电动现象。

电动现象可以用来加固软粘土地基，使软土的含水量降低，强度提高，在国内已有实际应用的例子。但因耗电量很大，费用较高，一般只用于已成建筑物的加固。

(三) 粘粒表面电荷的来源

前述实验说明粘土表面带有一定的负电荷，这些电荷大致有以下几个来源。

(1) 同象置换。矿物晶格中高价离子被低价离子置换时，将产生过剩的未饱和负电荷，因而使土粒表面带负电。如硅四面体中的硅被三价铝所置换，铝八面体中的铝被二价镁或铁所置换。这种现象在蒙脱石中尤为显著，故其表面负电性最强。伊利石的同象置换也较强，但有一部分负电荷被晶胞间的 K^+ (有时是 Na^+) 离子所平衡，故负电性较弱些。高岭石的同象置换最弱，故负电荷更少。

(2) 晶格缺陷及破键。实际粘土矿物的晶格结构并不像理论上所说的那样排列整齐,而是往往存在一些缺陷。如某一位置缺少一个硅或铝离子,这就引起不平衡电荷,使表面带负电,此外在粘土片的边缘处总有断开的地方,这就是所谓破键。它使电荷不平衡,破键处既可以是负电荷,也可以是正电荷。

(3) 选择性吸附。粘土颗粒具有吸引外界极性分子或离子的能力,这种吸附有一定的选择性,只吸附与其本身晶格中成分相同或相近的离子。以 CaCO_3 成分的方解石为例,如置于 Na_2CO_3 水溶盐中,颗粒表面将吸附与其相同的 CO_3^{2-} 离子,颗粒表面带负电荷;如置于 CaCl_2 溶液中,则将吸附 Ca^{2+} 离子,表面带正电荷。

(4) 离解吸附。上述吸附作用是颗粒从水溶液中吸附离子而带电。此外,矿物颗粒还可以通过自身的离解作用,再吸附与其相同或相似的离子。

以 SiO_2 粘粒为例,它的表面与水相互作用形成偏硅酸(H_2SiO_3),再离解为 SiO_3^{2-} 和 H^+ 离子:



SiO_2 颗粒吸附 SiO_3^{2-} ,使表面带负电荷。

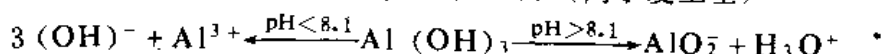
粘土颗粒与水作用所生成的可离解的化合物 H_2SiO_3 称为离子发生基。 H_2SiO_3 在水中离解为 SiO_3^{2-} 及 H^+ ,从而使溶液的酸度增加,称为酸式离解,能产生酸式离解的晶体称为酸性体。

如果矿物颗粒与水作用生成的离子发生基能离解成阳离子及 OH^- ,矿物颗粒吸附阳离子使表面带正电,水溶液中的碱性增加,则这种矿物称为碱性体。土中的碱性体很少。

还有一些矿物,随着水溶液的pH值的不同,既可以发生酸式离解也可以发生碱式离解,颗粒表面既可能带负电荷也可能带正电荷,这类矿物称为两性体。倍半氧化物就是两性体。

以 Al_2O_3 为例,当介质水溶液的 $\text{pH} < 8.1$ 时,粘粒矿物离解成碱性体,颗粒表面带正电,氢氧根浓度增加;当介质的 $\text{pH} > 8.1$ 时,粘粒矿物离解成酸性体,颗粒表面带负电,溶液的 H^+ 浓度增加。当介质溶液 $\text{pH} = 8.1$ 时, Al_2O_3 不发生离解作用,呈中性,此时介质的pH值称为该矿物的等电pH值,以 pH_e 表示。

Al_2O_3 在pH值不同的水中所发生的不同离解作用,可用以下反应式表示:



这种现象可以用化学平衡原理来解释,即平衡是向减弱这种改变的方向移动的。溶液中的pH值增大,意味着酸性减弱,故两性体呈酸性体形式出现,以保持平衡。反之,溶液的pH减小时,则酸性增强,碱性削弱,两性体呈碱性形式出现。

Fe_2O_3 的等电pH值为7.1。天然水的pH值一般在7左右,故 Fe_2O_3 的电性极弱,或正或负,有时甚至呈中性。 Al_2O_3 在一般情况下颗粒表面是带正电荷的。

各种粘土矿物的成分较复杂,但都是由四面体和八面体组成的。四面体具有 SiO_2 的性质,八面体具有 Al_2O_3 的性质。 SiO_2 作为酸性体,也可以理解为 pH_e 极小的两性体。因之粘土矿物在水中的离解作用,要看其综合效果,可以用粘土矿物中的硅铝率来反映。硅铝