



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



特殊岩土工程土质学

谭罗荣 孔令伟 著



Earth

科学出版社



国家自然科学基金研究专著

国家自然科学基金委员会 中国地质学会 中国工程地质学会 中国岩土工程学会 中国岩石力学与工程学会 中国土力学与岩土工程学会 中国环境岩土工程学会 中国工程地质学会 中国工程地质学会 中国工程地质学会

（地质工程与地质技术）

特殊岩土工程土质学

谭罗荣 孔令伟 著

科学出版社

内 容 简 介

本书以黏土矿物学和土质学为基础,从岩土的物质组成、物理化学性质、微观结构特征等出发,论述了它们和某些特殊岩土的物理性指标、工程力学特性间的关系。书中详细阐述了膨胀岩、土的物质组成、物理性质等对其胀缩性能的影响,膨胀力、胀缩变形及力学强度的变化规律以及作者提出的以渗透吸力势理论为基础的胀缩机理等;论述了以含有游离氧化铁胶结作用为特征的高含水量、高塑性、高孔隙比红黏土的似软黏土物理性质与良好的工程力学性能相矛盾的原因;胶结物质对红黏土工程力学特性的影响;红黏土结构强度起因及胶结作用的物理化学本质等;讨论了与具有水稳性较差的微结构为特征的湿陷性黄土的湿陷性与其土体中粒状颗粒间的相互排列结构及作者提出的临界孔隙半径间的关系、湿陷机理等。

本书可供关心特殊岩土研究与发展状况的科研和工程技术人员、大专院校有关专业的师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

特殊岩土工程土质学/谭罗荣,孔令伟著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-017349-X

I. 特… II. ①谭…②孔… III. 岩土力学 IV. TU44

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第055968号

责任编辑:彭胜潮 韩 鹏 汪福忻, 责任校对:曾 茹
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

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>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年9月第一次印刷 印张:20 3/4 插页:2

印数:1—1200

字数:477 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

· 地 · 球 · 科 · 学 · 系 · 列 ·

国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助

前 言

本书是作者及其同事在中国科学院武汉岩土力学研究所从事岩土体材料的物质组成、物理化学性质、微观结构特征等与其工程力学性质、指标间关系的研究成果的系统总结，由于内容主要涉及特殊岩土的工程力学特性与土质学的密切关系，故定书名为《特殊岩土工程土质学》。作者所在的物理化学组（室）是20世纪50年代末、60年代初由我国著名岩土力学专家陈宗基院士组建的，先后有裘孟辛、张坚、赵玉清、张伯楚、罗鸿禧、潘培才、邵梧敏、徐军、周芳琴、张文敏、刘金英、花莉莉、康哲良、赵宪、李江、高杨、程昌炳、陈守义、徐昌伟、张梅英、叶先贤、孔令伟、谭罗荣等同仁程度不同地参与了物化组室的研究工作。尽管有的同仁先后离开了该组（室），但研究内容却始终在持续进行。60年代是该组（室）基础训练的年代，70年代中后期开始结合葛洲坝工程等开展了大量与工程有关的基础性研究工作，特别是自80年代国家实行自然科学基金资助基础性研究项目制度以来，该课题组先后申请到近10项国家自然科学基金研究课题，并参与一些重大项目如南海Ⅱ-11、金川镍矿等大型工程中的有关课题的研究等，内容涉及膨胀岩土、红黏土、海洋土、软岩等特殊类岩土。由于前所领导袁建新、郭见扬等的热心支持，该组经过多年的潜心研究，积累了大量的研究资料，发表了许多论文，取得了一系列成果，在国内有一定影响。遗憾的是，这些研究工作没有系统整理出版一本专著。本书的目的就是将该组（室）多年的科研成果系统整理，并吸收国内外同行的部分研究成果，构成一部内容丰富、研究手段先进、站在学科前沿、有一定创新的与工程特性紧密联系的专著。它可作为从事各类岩土工程的科技人员的参考书籍，也可作为有志于特殊岩土研究的青年学生、研究生的一部重要读物及研究的参考指导书。

本书的特点是略去一些一般性的带常识性内容及其他书中常见的论述，以岩土的黏土矿物学特征、物理化学性质、微观结构特性等为基础，直接与特殊类岩土（主要指土与黏土质、泥质岩类等）典型工程特性或力学性质联系起来进行论述。因此，本书并不要求面面俱到，但要求重点突出，特别是有关最基础的机理机制研究等。故本书是以对某些特殊岩土类的与基本性质密切相关的基础性研究及其与工程特性的关系研究内容为重点，力求将有关问题阐述清楚，而对其他土类，则不予多述，但书中内容对其他土类亦有参考借鉴价值。

书中介绍的内容有些是已公开发表过的，但在收入本书时，有的作了补充和完善；有相当多的资料和内容是首次公开发表的，也有一定参考价值。

另外，出版这样一本系统研究专著的另一意愿是，为后来者少走一些弯路或避免重复前人走过的弯路或错路提供借鉴，也对有关基础研究起到一定的指导作用。

本书成书过程中，得到本所前领导白世伟及年轻学者等的大力帮助和鼓励；陈守义、罗鸿禧先生审读了部分章节，并提出了宝贵的修改意见；作者在此向他们一并表示深深的感谢。

这里要特别感谢国家自然科学基金委员会提供的出版基金(批准号：10424202)资助，使本书得以顺利出版。

谭罗荣 孔令伟

2005 年 10 月

目 录

前 言

第 1 章 岩土中的黏土矿物	1
1.1 黏土矿物的晶体学基础与理想结构	1
1.1.1 黏土矿物晶体结构的基础知识	1
1.1.2 黏土矿物的晶体结构的构型与同晶替代	4
1.2 岩土中常见的黏土矿物类型	5
1.2.1 蒙脱石类的晶体结构与化学结构	5
1.2.2 蛭石矿物的晶体构造与化学结构式	8
1.2.3 伊利石类矿物的晶体构造与化学结构式	9
1.2.4 高岭石类矿物的晶体构造与化学结构式	10
1.2.5 绿泥石类矿物的晶体构造与化学结构式	10
1.2.6 混层矿物	11
1.2.7 其他黏土矿物	11
参考文献	11
第 2 章 矿物成分鉴定与定量(半定量)分析	12
2.1 矿物鉴定分析方法及其原理	12
2.1.1 X 射线衍射法	12
2.1.2 差热分析法	13
2.1.3 电子显微镜形貌鉴定方法	14
2.1.4 其他方法	14
2.2 矿物鉴定(物相分析)	15
2.2.1 蒙脱石的鉴定	15
2.2.2 高岭石矿物的鉴定	17
2.2.3 伊利石矿物的鉴定	19
2.2.4 蛭石矿物和鉴定	21
2.2.5 绿泥石的鉴定	23
2.2.6 混层矿物的鉴定	24
2.2.7 黏土矿物鉴定的特殊方法	25
2.2.8 非黏土矿物鉴定	30
2.3 黏土矿物的定量分析	31
2.3.1 标准矿物定比定量分析法	31
2.3.2 联立方程解析法	32
2.3.3 解析法与定比法结合的定量分析方法	35
参考文献	37

第3章 岩土体的物理化学性质	38
3.1 岩土离子交换特性	38
3.1.1 交换性离子的产生原因	38
3.1.2 阳离子交换量	39
3.1.3 离子交换速度	39
3.1.4 交换性阳离子的代换性能	40
3.1.5 阴离子交换	40
3.1.6 离子交换量测定	40
3.2 岩土的比表面积	41
3.2.1 黏土矿物的表面积	41
3.2.2 表面积测定	41
3.3 岩土材料颗粒表面的带电性质	43
3.4 土壤胶体的动电性质	46
3.4.1 胶体双电层的基本概念	46
3.4.2 双电层公式及典型黏土矿物的 ζ 值	46
3.4.3 土体的动电性质与 ζ 电位的测算	50
参考文献	53
第4章 岩土体结构	54
4.1 引言	54
4.2 土体微观结构	55
4.2.1 土体的基本结构单元及结构单元间的接触与联结	55
4.2.2 微结构特征分类	57
4.3 微结构的研究方法及其量化	60
4.3.1 电子显微镜	61
4.3.2 偏光显微镜	62
4.3.3 X射线衍射仪	63
4.3.4 动态微结构特征的研究	65
4.4 土体的孔隙结构	66
参考文献	73
第5章 膨胀土	75
5.1 膨胀土的典型工程灾害	75
5.2 膨胀土的土质学特征	77
5.2.1 物理性指标与粒度组成特性	77
5.2.2 膨胀土的矿物组成及物理化学特性	80
5.3 膨胀土的微结构特征	85
5.3.1 电子显微照片反映的微结构特征	85
5.3.2 膨胀土的孔隙结构	86
5.4 膨胀土的判别与分类方法	88
5.4.1 膨胀土的初判	89
5.4.2 膨胀土的判别与分类特性指标及其选取原则	89

5.4.3 膨胀土的判别与分类—— W_{65} - W_L 图	93
5.5 膨胀土的胀缩特性及其影响因素	97
5.5.1 干密度对膨胀特性的影响	97
5.5.2 饱和度对膨胀土胀缩特性的影响	108
5.5.3 含水量对膨胀、收缩特性的影响	111
5.5.4 小结	118
5.5.5 孔隙盐溶液浓度对胀缩特性的影响	119
5.6 膨胀土的强度特性	120
5.6.1 强度与含水量及干密度、饱和度的关系	120
5.6.2 土体结构与强度	125
5.6.3 有效蒙脱石含量对强度的影响	128
5.6.4 膨胀压力与强度间的关系	129
5.6.5 膨胀土基质吸力的间接确定方法	134
5.6.6 膨胀土的 CBR 强度特征与影响因素	137
5.7 膨胀土的胀缩机理——广义渗透压-吸力势理论	143
5.7.1 蒙脱石晶体的胀缩机理	143
5.7.2 土颗粒单元间的胀缩机理	150
5.7.3 小结	152
5.8 膨胀土的改性及改性机理	152
5.8.1 膨胀土的化学改性	153
5.8.2 膨胀土的物理改性	156
5.8.3 膨胀土的综合改性及应用	159
参考文献	161
第 6 章 膨胀岩	163
6.1 膨胀岩的典型工程危害及基本特性	163
6.1.1 膨胀岩的工程危害性	163
6.1.2 膨胀岩的物理力学特性	166
6.2 膨胀岩的土质学特征	167
6.2.1 膨胀岩的物质组成	167
6.2.2 膨胀岩的物理化学特性	169
6.2.3 膨胀岩的微观结构特征	171
6.3 膨胀岩的膨胀特性与强度特性	172
6.3.1 膨胀特性及其影响因素	173
6.3.2 膨胀岩的强度	176
6.4 膨胀岩的泥化与崩解	178
6.4.1 物质组成对膨胀岩泥化特性的影响	178
6.4.2 膨胀岩的崩解现象和崩解规律	183
6.5 膨胀岩的膨胀、泥化及崩解机理	191
6.5.1 黏土岩泥化机理研究	191
6.5.2 膨胀岩的崩解机理研究	195

6.5.3 泥化、崩解的渗透压-吸力势统一理论	196
参考文献	199
第7章 红黏土	201
7.1 红黏土的基本特性	201
7.1.1 红黏土(红土)的物理力学性指标	201
7.1.2 红黏土与软土的比较	201
7.1.3 不同母岩生成的红黏土之间的比较	205
7.2 红黏土的土质学特征	206
7.2.1 红黏土的物质组成及红土化特征	206
7.2.2 红黏土的物理化学特性	211
7.2.3 红黏土的微结构特征	212
7.2.4 红黏土的孔隙结构	214
7.3 红黏土中的胶结物质及其对工程力学特性的影响	215
7.3.1 游离氧化物对红黏土物理力学特性的影响	215
7.3.2 胶结物质对红土物理力学性质的影响	219
7.4 红黏土的水理特性与不可逆特性	222
7.4.1 红土干燥脱水对其土性的影响	222
7.4.2 脱水对力学特性的影响	223
7.4.3 不同含水量红黏土的孔隙结构特征	228
7.5 红黏土中胶结物质的胶结作用	230
7.5.1 红黏土的结构强度	230
7.5.2 胶结物的赋存状态	232
7.5.3 胶结作用机制与有效胶结	233
7.5.4 红黏土的微结构胶结模型	237
7.6 红黏土与膨胀土	240
7.6.1 红黏土与膨胀土等的基本性质比较	240
7.6.2 红黏土的胀缩特性	241
7.6.3 红黏土与膨胀土在塑性图和 $\omega_{0.5}$ - ω_L 图上位置的比较	246
7.6.4 红黏土的土性分类	248
参考文献	251
第8章 中国南方某些近海沉积黏土	254
8.1 南方某些软土的基本特性	254
8.1.1 南方某些软土的物性指标与物质组成	254
8.1.2 南方某些软土的物理化学性质与胶结物质	256
8.1.3 南方软土的微结构特征	257
8.1.4 南方软土的孔隙结构特征	260
8.2 南方某些软土的工程力学特性及分类	263
8.2.1 湛江、琼海沉积黏土的结构强度及其表现形式	264
8.2.2 软土结构性的工程应用	266
8.2.3 结构性软土的分类讨论	269

8.3 南方软土的结构强度形成原因讨论	274
8.3.1 土体结构强度的形成机制	274
8.3.2 软土的结构强度起因及其环境影响因素	274
8.3.3 软黏土的胶结作用研究	277
参考文献	279
第9章 湿陷性黄土	281
9.1 湿陷性黄土的分布特征	281
9.2 湿陷性黄土的土质特征	282
9.2.1 湿陷性与颗粒粒度组成的关系	282
9.2.2 湿陷性与矿物组成的关系	285
9.2.3 黄土中的胶结作用物质	286
9.2.4 湿陷性黄土的物理化学特性	289
9.2.5 黄土的微结构特征与湿陷性	290
9.3 黄土的湿陷机理	297
9.3.1 影响黄土湿陷变形的因素	297
9.3.2 黄土的湿陷机理	299
参考文献	305
第10章 其他特殊岩土工程问题	307
10.1 尾矿沉积物的特殊工程力学性质成因研究	307
10.1.1 尾矿沉积物的基本特性	307
10.1.2 尾矿沉积物的土质学特征	308
10.1.3 尾矿泥特殊力学性质原因分析及可能存在的工程问题	309
10.2 尾矿坝土工织物滤层的淤堵与化学淤堵机制	310
10.2.1 武山铜矿土工织物层的淤堵问题	310
10.2.2 尾矿库沉积物的土质学特征	310
10.2.3 淤堵的试验研究	312
10.2.4 土工织物淤堵状况的微观测试及机理分析	314
10.3 析出物对软弱夹层长期稳定性的影响	317
10.3.1 安砂水电站有关问题的提出	317
10.3.2 坝区有关试样的土质学特征	318
10.3.3 析出物成因及其对坝区软弱夹层长期稳定性的影响	321
参考文献	322

第 1 章 岩土中的黏土矿物

岩土材料是各种建设工程中最常遇到的天然物质，其工程性能往往受其矿物组成，特别是黏土矿物的种类和含量的影响。

在 X 射线晶体分析学诞生以前，人们对土的矿物组成是不很清楚的，尽管已有学者认识到黏土物料是由种类有限的晶质矿物的极细颗粒组成^[1]。但因手段的限制，并不明确是哪些晶质矿物组成。直到 X 射线晶体分析技术发展到了相当的程度后，人们才利用 X 射线衍射技术研究土中极细颗粒的晶体学特征，并将其分别定名。

1.1 黏土矿物的晶体学基础与理想结构

黏土矿物是指那么一类矿物，它们的发现是因为在最初对土壤极细颗粒的研究中，发现它们常富集于土壤中的黏粒级的颗粒范围内，故将它们统称为黏土矿物。随着研究的深入，根据它们各自的晶体结构特征，又细分为蒙脱石、伊利石、高岭石等几大类，而后来的定名则根据 X 射线晶体结构特征，每一大类又分为许多亚类。但不管各亚类也好，各大类也好，从晶体结构的观点出发，它们都是由相同的基本单元以不同的联结堆叠而成，就像同是原子、分子，却构成各种动物、植物、有生命、无生命的大千世界一样。当然，黏土矿物的基本单元也是由分子、原子等构成。

1.1.1 黏土矿物晶体结构的基础知识

1) 硅氧四面体单元及硅氧四面体片

图 1.1.1(a) 所示为 Si—O 四面体单元。研究表明，黏土矿物晶体属离子型晶体，即构成晶体结构格子的格点是正离子或负离子，也就是说，在 Si—O 四面体中，处于中心的 Si 是正离子，围绕它的 4 个氧为负离子。单个的 Si—O 四面体的电荷结构是不平衡的，因为中心 Si 为正 4 价电荷，而周围 4 个氧离子则为负 8 价电荷。当四面体的某一底面置于同一平面，并如图 1.1.1(b) 所示顶点构成一等边六边形网的话，底面上亦由四面体底顶构成六边形图。这样排列的四面体结构称为 Si—O 四面体片。

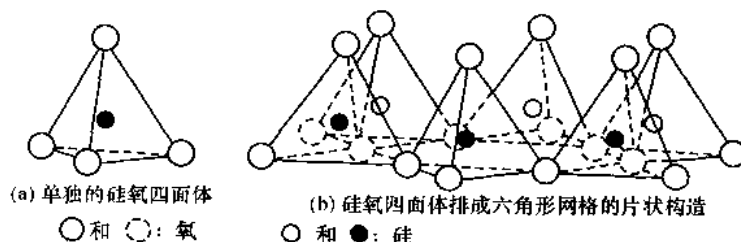


图 1.1.1 硅氧四面体示意图^[1]

Si-O四面体中, O-O(离子中心)间距为 $2.55\text{\AA}$, 离子中心组成的四面体高为 $2.08\text{\AA}$, 可供配位的阳离子半径约为 $0.29\text{\AA}$ 。

2) 铝氧八面体单元及铝氧八面体片

图 1.1.2 示出 Al-O 八面体单元和 Al-O 八面体片。

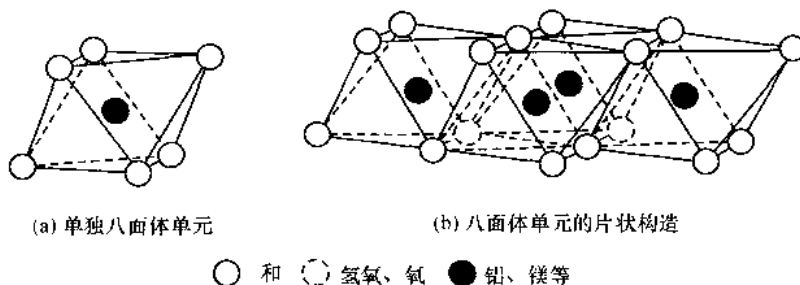


图 1.1.2 八面体构造示意图

Al-O 八面体中, Al 为阳离子。与 Si-O 四面体一样, 单个的八面体也是电荷不平衡的。当八面体的某一底面处于同一平面并相互联结成如图 1.1.2(b) 所示时, 则构成八面体片。

Al-O 八面体单元中, 正常情况下的 O-O 间距为 $2.94\text{\AA}$, 八面体上、下底面层离子中心构成的八面体厚度为 $2.40\text{\AA}$, 可容纳的配位离子半径约为 $0.61\text{\AA}$ 。

3) 云母结构

当 Si-O 四面体片和 Al-O 八面体片以两个 Si-O 片中间夹一层 Al-O 片的形式堆叠时即构成云母类矿物晶体的基本结构形态。四面体片与八面体片的堆叠不是简单的堆叠, 而是两种晶片间通过共有一面层的方式融合成一体, 如图 1.1.3 所示。八面体的上、下两侧分别与上层四面体片共同拥有朝下的四面体顶点和与下层四面体共同拥有朝

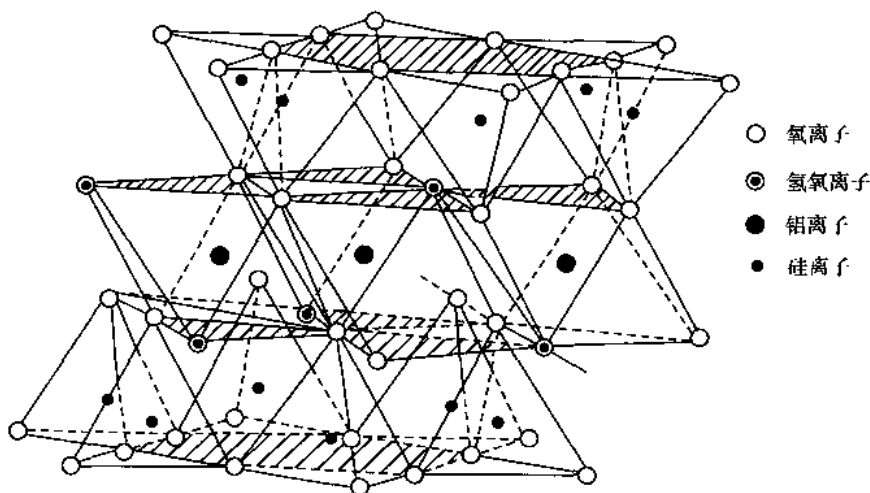


图 1.1.3 云母结构图

上的顶点,即共同拥有四面体的朝上和朝下的氧离子。而四面体顶点构成的六边形网格中央(同一层面上),则为八面体拥有独自的负离子,由于晶体结构必须满足电荷平衡原则,故该处被一价 OH 负离子占据。

在图 1.1.3 所示的结构中,由四面体和八面体的高度和厚度数据知,该结构的厚度为 $2.08+2.40+2.08=6.56\text{\AA}$ 再加上两底面上的负离子半径 $2.55\text{\AA}$ 或 $2.94\text{\AA}$,故单位晶层的厚度约为 $9.1\sim 9.5\text{\AA}$ 。

4) 单位晶胞的电荷结构与化学结构式

所有晶体都是某一基本单元向三维空间中的三个方向平行周期移动构成的,该单元就称之为晶胞,如标准的两个 Si-O 四面体层夹一个 Al-O 八面体层构成的晶体的晶胞,如图 1.1.4 虚线所围的边长分别为 a、b、c 的六面体所示。图中所示晶体属单斜晶系,即 a 轴垂直于 bc 平面, b 轴垂直于 a 轴,与 c 轴斜交。从图中晶胞的各种不同离子层面的电荷分布情况看,理想晶胞的电荷结构如图 1.1.4 右所示,结构电荷是平衡的。

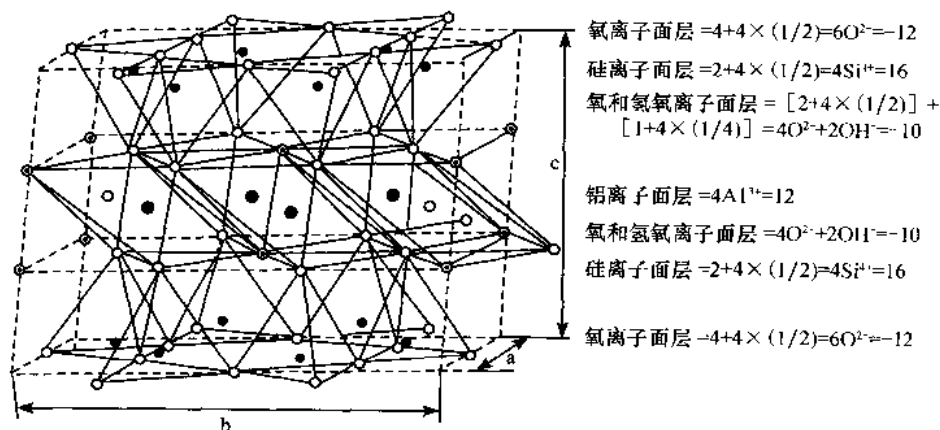


图 1.1.4 理想单位晶胞示意图

(1) 四面体的结构电荷

在图 1.1.4 所示的四面体中,处于中心的 Si 离子为 +4 价,底面上的氧离子都是由相邻的两个四面体所共有,故四面体从底面氧离子处获得 -3 价电荷。四面体的顶点与八面体共有个氧离子,虽然顶点氧离子是由四面体与八面体层中的相邻 3 个八面体所共有,但因 Si 离子电荷量大,且与氧离子距离(电荷中心间距)小,故顶点氧离子在满足四面体电荷平衡所需的一价负电荷后,余下的一个负电荷由相邻的 3 个八面体共享,因此,四面体的结构电荷是平衡的。

(2) 八面体的结构电荷

从图 1.1.4 可以看见,无论构成八面体的顶点是氧离子还是氢氧离子,它都是由相邻的三个八面体所共有。其中氢氧离子为八面体独有,氧离子是与四面体共有。由图可知,每一八面体由 4 个氧离子和两个氢氧离子和中心处的一个 Al 离子构成,其负电荷量由 $4 \times (1/3) \times (1/2) = (2/3)$ 个氧离子和 $2 \times (1/3) \times 1 = (2/3)$ 个氢氧离子提供,为

$(2/3) \times (-2) + (2/3) \times (-1) = -(6/3) = -2$ 价。其正电荷由 Al 离子提供, 共 +3 价。显然, 这样的八面体的电荷结构是不平衡的。为此, 为了使结构电荷平衡, 有两个途径: ①保持八面体中心的 3 价 Al 离子, 但八面体片中, 每三个八面体中有一个的中心为空的。这样, 虽然每一个八面体的结构电荷是不平衡的, 但整个八面体片的结构电荷是平衡的, 这样的八面体称为二八面体。②八面体中心的 3 价 Al 离子被 2 价的 Mg 或 Fe 离子等代替, 这样, 每个八面体的中心都有 2 价正电荷, 因此结构电荷是平衡的, 这样的八面体称为三八面体。

(3) 理想单位晶胞的结构电荷

由图 1.1.4 可见, 理想单位晶胞的底面 (虚线围成的矩形) 上分布有 8 个氧离子, 其中矩形内有 4 个氧离子为晶胞独有, 另外 4 个是与相邻的一个晶胞所共有, 故图中晶胞分得一半的电荷, 因此单位晶胞底面含有 $4 + 4 \times (1/2) = 6$ 个氧离子。氧离子层下为 Si 离子层, 从图上不难看出, 如果四面体顶点及其中心的 Si 离子在底面投影的话, 顶点及 Si 不仅重合, 而投影点如图中第二 (O—OH) 截面中的氧离子位置所示, 其中, 有 2 个 Si 离子在截面内, 4 个硅与相邻晶胞共有, 因此单位晶胞的上层含有 $2 + 4 \times (1/2) = 4$ 个 Si 离子。晶胞的第二截面内, 由氧离子和氢离子构成, 氧离子的分布与 Si 相同, 故该层属于晶胞的氧离子也为 4 个, 而 OH 离子如图所示, 有 1 个为晶胞独有, 矩形角点上的 4 个 OH 分别为相邻的 4 个晶胞所共有, 故晶胞实有该层的 OH 离子为 $1 + 4 \times (1/4) = 2$ 个 OH 负离子。即晶胞共拥有该截面的 4 个氧离子和 2 个氢氧离子。

Al 离子层: 图中第 2、第 3 截面之间共拥有可容纳 Al 离子的位置有 6 个, 都为单位晶胞所独有, 但根据前面对八面体电荷结构平衡的论述, 实际上只有 4 个位置才有 Al 离子, 故单位晶胞实际拥有 Al 离子为 4 个。

由于对称性、单位晶胞下半部各离子层的电荷与上半部各对应层完全相同, 不再予以论述。

由上面论述得知, 理想晶胞的电荷为 $-12 + 16 - 10 + 12 - 10 + 16 - 12 = 0$, 即理想晶胞体内电荷结构是平衡的。

5) 单位晶胞的化学结构式

前面我们已论述了晶胞的构成单元及电荷平衡关系。主要是从晶体学构成的角度来讨论的。显然, 从化学分析的角度看, 它又是一些化学元素的组合。因此, 黏土矿物的构造还可以从化学的角度来考虑。如此, 根据前面有关晶体结构单元的论述, 参照图 1.1.4 右侧所附资料, 可将其写成化学结构式



此式表明, 它由两个 Si—O 四面体片夹一 Al—O 八面体片构成, 共含 8 个 Si 离子, 4 个 Al 离子, 4 个 (OH) 离子和 20 个 O 离子。电荷结构是平衡的。

1.1.2 黏土矿物的晶体结构的构型与同晶替代

1) 黏土矿物的构型

有了前面的基础, 在后面的叙述中, 我们将黏土矿物的晶体结构构成做一些简化,

如文献 [2]、[3] 那样, 将晶体结构中的四面体简化成图 1.1.5(a) 所示, 八面体简化成图 1.1.5(b) 所示。

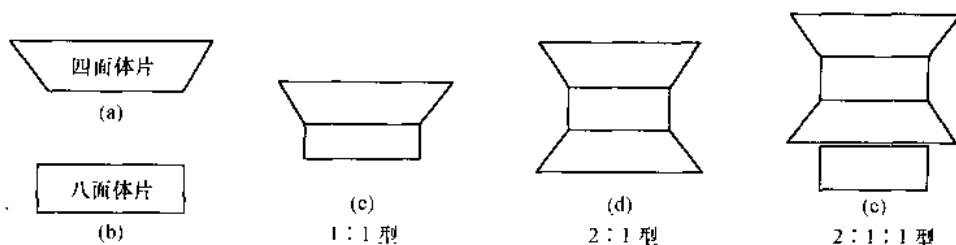


图 1.1.5 黏土矿物的不同构型

对于黏土矿物的晶体结构来说, 主要是四面体片和八面体片以不同的堆叠方式构成。如果由单位晶胞横向平移构成的晶胞层称为单位晶层, 且晶层是由一片四面体层与一片八面体层构成, 则这种矿物称为 1:1 型矿物, 如高岭石, 见图 1.1.5(c)。

如果黏土矿物晶层是由两个四面体层夹一八面体层构成, 这种矿物称为 2:1 型黏土矿物, 如伊利石等, 见图 1.1.5(d)。

如果由 2:1 型单元加上一独立的八面体片构成单位晶层, 则这样的黏土矿物称为 2:1:1 型矿物, 如绿泥石, 见图 1.1.5(e)。

2) 黏土矿物的同晶替代

实际上, 黏土矿物晶层中, 无论是四面体片层还是八面体片层, 其层中的阳离子 Si 或 Al, 都或多或少的被低价离子替代, 如 Si 被 Al 或 3 价 Fe 替代, Al 被 Mg、2 价 Fe 等替代。其结果是晶体的结构电荷失去平衡, 并呈负电性。为了结构电荷取得新的平衡, 一是部分 Si—O 四面体和 Al—O 八面体中的氧离子换成氢氧离子 OH; 二是八面体中原为 Al 离子的二八面体中的 Al, 部分由 Mg 替代成为三八面体; 三是在单位晶层间引进一些正电荷离子——可交换性离子, 这样替换的结果, 总的结构电荷仍是平衡的, 这种 Al 替代四面体中的 Si, Mg 替代八面体中的 Al 的现象, 并不改变晶体的结构特征。这种现象称之为同晶替代或同质类象。正是这种同晶替代或类质同象构成了不同性质的黏土矿物。

1.2 岩土中常见的黏土矿物类型

1.2.1 蒙脱石类的晶体结构与化学结构

蒙脱石, 有的文献中称蒙皂石、拜来石、绿脱石、班脱土、皂土、绿土等, 实际上是蒙脱石的不同变种, 即由于四面体或八面体中 Si 和 Al 被不同种类、不同数量的低价离子替代的结果, 也就是不同的同质类象产物。它们有一个共同特点, 即在单位晶层之间可以存在不同层数的水分子层, 且水分子层数在不同大气湿度条件下可变, 即蒙脱石的活动晶层现象。

1) 蒙脱石的晶体结构特征

蒙脱石是 2:1 型矿物, 由于单位晶层间可存在不同水分子层数, 故其单位晶胞的 c 轴是可变的, 如图 1.2.1 所示。一般较典型且较稳定的晶层间水分子层为一层、二层、三层。在天然饱水的土样中, 一般只有稳定的 3 个水分子层, c 轴或晶面间距 d_{001} 为 $18.5\text{\AA}$, 如图 1.2.1(d) 所示。蒙脱土样在大气中会因蒸发而失去部分水分, 在大气相对湿度大于 50% 时, 蒙脱土层间水一般稳定在 2 个水分子层上。处于地下岩层中的黏土岩, 由于成岩过程的高地压力作用, 即使岩层处于饱水状态, 蒙脱石的层间水也可能是 2 个水分子层, 如图 1.2.1(c) 所示。当大气相对湿度较低, 如低于 50% 时, 对于一般的钙质蒙脱土, 基本上仍维持 2 个水分子层, 但对钠质蒙脱土, 则可能仅维持一个水分子层, 如图 1.2.1(b) 所示。当蒙脱石在 105°C 烘烤 24h 后, 晶层间则可完全失去水分子层, 而收缩至约 $9.6\text{\AA}$, 如图 1.2.1(a) 所示。图中单位晶层间除给出示意水分子层外, 还绘有平衡晶层正电荷不足的阳离子, 故单位晶层为 $9.6\text{\AA}$ 左右。

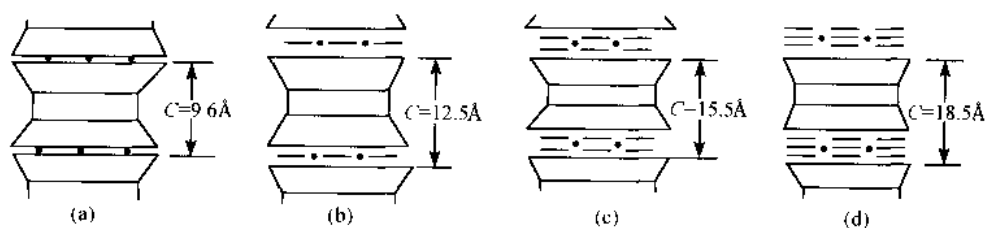


图 1.2.1 蒙脱石的晶层水分子分布示意图

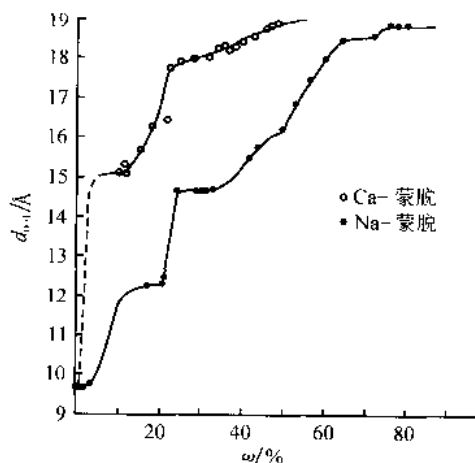
图 1.2.2 Na、Ca 蒙脱土样的 d_{001} - ω 曲线

图 1.2.2 为 Na、Ca 蒙脱土上样的 c 轴 (d_{001}) 随含水量而变化的观测结果。图中, Na 蒙脱土样中的蒙脱含量在 80% 以上, 而 Ca 蒙脱土样为典型膨胀土, 蒙脱石含量约为 55%。土样处于饱水状态时, 尽管 Na 蒙脱土样的含水量从 80% 以上由于蒸发失水降到 60%, 其 d_{001} 仍在 $18\sim 19\text{\AA}$ 以之间变化, 晶层间基本维持着 3 个水分子层厚。随着水分的进一步蒸发, 土样逐步进入非饱和状态。 c 轴即 d_{001} 随之逐渐减小, 直至含水量降到 25%~35% 左右时, d_{001} 稳定在 $15\text{\AA}$ 左右。如果此时大气相对湿度在 50% 以上, 则即使 Na 蒙脱土继续失水至 25% 左右, 其 d_{001} 也会稳定在 $15\text{\AA}$ 左右, 即维持 2 个层间水分子层。但当大气相对湿度低于 50% 并使其继续失水, 则 Na 蒙脱土样的 d_{001} 就可收缩至 $12\text{\AA}$ 左右。在天然状态下, 即使土样失水至 14% 左右, 仍可维持 1 个层间水分子层厚, 如图 1.2.2 所示。