

高等学校教学用书

泥浆胶体化学

北京石油学院化学原理教研室编

中国工业出版社

前 言

本書原是北京石油學院鑽井專業膠體化學課程的講義，這次付印曾略加整理和修改。

鑽井專業所需要的膠體化學基礎，範圍比較廣泛，除氣溶膠外，幾乎每類膠態體系都已涉及。同時，對各類膠態體系的側重又有其特點。由於一時缺乏這方面的適當教本，因此幾年來都用單獨編寫的講義。

本書試圖從適當結合專業需要出發，以闡明膠體化學一般原理為主，敘述力求簡明扼要，為了在講清膠體化學基本知識之後隨時結合專業上的應用，本書在緒論之後先適當介紹常用泥漿的基本材料——粘土礦——的化學組成和晶體結構。在本書最后一章，則對於泥漿性能參數和化學處理的原理，試圖作較詳細的分析。這種安排章節的次序只經過初步嘗試，不一定最合宜，採用本書的教師可以斟酌更改。例如將第二章放在第七章之前講。

本書內容共分七章：緒論，粘土礦的化學組成和晶體結構，表面現象，電動性質，穩定性和聚結，流變性和泥漿化學處理的原理。全書內容安排是這樣考慮的：每個膠態體系可以分成互相關聯的三個部分，分散相顆粒，分散介質和界面層。分散介質實際是溶液，這在先修的普通化學，有機化學和分析化學中已有適當的介紹。作為常用泥漿分散相的粘土礦，在先修課程中未曾學過，因此配合結合專業需要，當作固體分散相顆粒的代表，專列一小章加以簡單介紹。表面現象，電動性質，穩定性和聚結，以及流變性等四章，是膠體化學的基本內容，其中穩定性和聚結一章，一方面簡單結合膠態體系製備原理和光學性質，另一方面綜合溶膠，懸浮體，乳狀液和泡沫等具體體系來講穩定性和聚結，最後泥漿化學處理的原理一章，則綜合前面各章來分析泥漿性能參數和化學處理劑的作用。

值得注意的是，按照本書的写法，稳定性原理实际是分別在第五章和第七章介紹的。流变性也是分別在第六章和第七章介紹的，因此在学完第七章中有关問題后，應該作一适当的总结。

本書是按講課32—42学时的教学計劃时数編写的，需要更多的胶体化学內容时可参考書末所列参考書。

本書原講義稿系在平时备課过程中写成，这次虽略經整理和修改，但限于編写人的水平，書中仍难免有不少缺点和錯誤，希望采用本書的教师和同學們，多多提出批評和建議，以便进行改正。

本書由陈廷蕤同志主編，朱亞傑同志主审，参加审查的尚有梁文傑，于品洁，武革非，张蔭惠，王君钰，陈鴻賢，尹宏錦等同志。賴愈滔同志在这次付印时参加了整理和修改工作。

目 录

前 言	3
第一章 緒論	1
第 1 节 胶体化学发展簡史	1
第 2 节 胶体化学的研究对象	2
第 3 节 胶体化学的实际意义	5
第二章 粘土矿的組成和結構	7
第 1 节 粘土矿的化学組成	7
第 2 节 粘土矿的晶体結構	8
第 3 节 粘土顆粒的几种性質	15
第三章 表面現象	18
第 1 节 表面能及其作用原理	18
第 2 节 表面收縮压和鑽井中遇到的一些問題	22
第 3 节 表面张力的測定	27
第 4 节 吸附現象	30
第 5 节 吸附的測定	36
第 6 节 吸附的經驗公式	37
第 7 节 吸附的理論	39
第 8 节 朗格茂的吸附理論	39
第 9 节 液面吸附	42
第 10 节 表面活性剂的分子結構	45
第 11 节 离子交換吸附	47
第 12 节 岩石減硬作用的原理	51
第四章 电动性質	54
第 1 节 电动現象及其应用	54
第 2 节 双电层理論	57
第 3 节 电动电势方程式	60
第 4 节 电解質过电动电势的影响	63
第 5 节 胶体粒子的結構	65

第五章 稳定性和聚結	68
第1节 溶胶和悬浮体	68
第2节 溶胶和悬浮体的稳定性	70
第3节 聚結作用	76
第4节 胶凝和脫水收縮	81
第5节 研究悬浮体的二种方法	82
第6节 乳状液及其类型和鑑別	88
第7节 乳状液的稳定因素	89
第8节 乳状液的反相和破坏	91
第9节 乳状液在混油泥浆中的作用	95
第10节 泡沫	97
第六章 流变性	99
第1节 分散体系的流变性	99
第2节 流型	101
第3节 流型理論	104
第七章 泥浆化学处理的原理	107
第1节 泥浆的功用及其主要性能参数	107
第2节 泥浆化学处理概說	109
第3节 泥浆处理剂及其作用原理	110
第4节 泥浆化学处理举例	120

参考書

第一章 緒 論

第1节 胶体化学发展簡史

胶体化学虽到本世紀初才成为一門独立的物理化学科学，但是和任何一門科学的发展过程一样，它的起源历史却要早得多。这种发展历史无疑是和社会生产力的发展息息相关的，因为“人的認識，主要地依赖于物質的生产活动”。

人們零星应用胶态体系是很早的事。例如在我国，上古时代已能制造陶器，左传上已有油漆的紀事，汉代已会制造豆腐。就胶体化学技术来说，这些創造都已經有相当高的水平。

在近代生产实践发展的基础上，才兴起了近代的自然科学，胶态体系的系統研究，也到工业生产已經相当发达的十九世紀中才开始。

从上世紀中到上世紀末，胶体化学的发展，还处在生产实践和科学实验資料的积累和尝试着从已有資料提高到理論的阶段。这个时期基本上以定性的研究为主，任务在于制备組成不确定而复杂的胶态体系。因此在胶体的制备和提純方法（如透析）上有所发展。至于胶体性質的研究，在这个时期还是研究个别的性質。

到本世紀初，定量的分子运动論在胶体化学中的引用創立了布朗运动的統計理論。由于超显微鏡的創制（1903年），随后又有超过滤和超离心分析等技术的发展，使得布朗运动的理論得到的証实。这些发展不但促进了分子統計理論的发展，而且証实了原子和分子的现实性，在当时反对唯心的唯能論和巩固辯証唯物論的宇宙觀上也起过一定作用。至于胶体化学本身，则从此有了定量研究的基础。也在这个时候，胶体化学开始形成为現代物理化学科学的一个独立部門。並且从1907年起，第一个專門的胶体化学杂志也創刊了。

从二十世紀初年，胶体化学另一个重要发展方向也开始了，即分散体系中分子相互作用的研究。这些相互作用是分散体系稳定性和聚結現象的基础。

这里不可能詳細敘述胶体化学在本世紀初以来的所有各种发展。只能提一提其中一些重大的发展。例如表面层的物理化学，現在几乎要发展为一門独立的科学。引用电化学方法于胶体化学使胶体电化学得到很大的发展，由于建筑材料及其他胶态体系的力学性質在生产上的利用，胶体化学中的流变学得到很大的发展。至于近二十年来的最大发展，是高分子化合物的物理化学。这和合成纖維，合成橡胶，合成膜質物，塑料等工业的发展密切相关。这个发展是这么巨大，以致近些年来，胶体化学的許多原理和基本概念都在发生改变，甚至胶体化学的研究范围也需要重新审查了。

第2节 胶体化学的研究对象

每門科学的区分在于它所研究的对象的特殊性，因此我們接着就来介紹胶体化学的研究对象。

胶体化学原是物理化学的一个部分。到本世紀初才成为一門独立的物理化学科学。胶体化学研究多相的分散体系，即由一相或二相以上构成的分散体系。其中一相处于細碎的分散状态，叫做分散相，它的顆粒匀称地分布在另一相之中，这另一相叫做分散介質。

这种多相分散体系和在无机化学中学过的真溶液或分子溶液不同。在真溶液中，溶質分散成个别的分子或离子。例如在蔗糖水溶液中，蔗糖分散成个别的分子；在盐的水溶液中，氯化鈉分散成个别的氯离子和鈉离子。在多相分散体系中，分散相顆粒不是个别的分子或离子，而是几百、几千或几万个原子或离子的聚結体，因此分散相和分散介質之間存在着物理分界面。这种多相分散体系的主要特征，是分散度高，单位体积中露在表面上的原子或分子比例高。单位体积或重量的物体所具有的表面积叫做比面，

胶态体系是比面特别大的体系。

具体說来，胶体化学研究的多相分散体系，有以液体为分散介質的溶胶（或液溶胶）、悬浮体、乳状液和泡沫等实际体系。其中溶胶和悬浮体是固体在液体中的多相分散体系，乳状液是一种液体在另一种液体中的多相分散体系，泡沫是气体在液体中的多相分散体系。溶胶和悬浮体之間最容易辨别的差别在于分散相顆粒的大小，像氢氧化铁溶胶和泥浆的細分散部分中的分散相顆粒，在最高倍的光学显微镜中观察不到，能透过一般的滤紙，但不能透过动植物的薄膜，所以溶胶又叫做超微多相分散体系。像印刷油墨和泥浆中粗分散部分的固体顆粒，不能透过滤紙，在高倍的光学显微镜中可以观察到，因此悬浮体又叫做微多相分散体系。乳状液和泡沫也属于微多相分散体系，因为它们中間液滴和气泡的大小和悬浮体的顆粒大致落在同一范围。

胶体化学研究的多相分散体系，还有以气体为分散介質的气溶胶，这里包括自然界和工厂中以液滴为分散相的云霧和以固体微粒为分散相的煙。此外，还有以固体为分散介質的固溶胶。常見的例子有以气体为分散相的多孔性干凝胶，以液体为分散相的珍珠，包藏液体的矿石和毛細体系，以及以固体为分散相的蓝色岩盐，有色玻璃，宝石和合金。

以上这些多相分散体系之中，以用液体为分散介質的溶胶，悬浮体，乳状液和泡沫在实际应用上最重要，研究得也最多。这些体系就是通常胶体化学課程中所講的胶态体系。

約在十年以前，高分子化合物的溶液（像蛋白質和淀粉的水溶液）一直被叫做亲液溶胶（同时上述溶胶被称为憎液溶胶），也就是說被看成多相分散体系的一种，只是分散相和分散介質的相互作用比較大，即分散相容易溶剂化。这是因为高分子化合物的分子量特別大（几千到几十万，甚至有达百余万的），和溶胶顆粒具有某些相似的性質，例如高分子化合物的分子也不能透过动植物薄膜，扩散也很慢等等。但是由于近二十年来高分子化学的迅速发展，經過許多研究証明，原来所謂亲液溶胶，其实是高

分子化合物的真溶液，即高分子化合物在溶剂中成为分子分散的单相体系，而不是像溶胶那样的多相分散体系。

在这个原则性的区别被揭露之后，就引起高分子化合物溶液还属不属于胶体化学研究对象的讨论。这个讨论至今还未结束，从实际应用看，发展趋势是高分子化合物溶液划到高分子物理化学的领域中去。不过在目前，一般胶体化学课程仍把它列为研究对象之一，这里除了历史上原已包括在胶体化学之内外，还有二方面的原因：第一，高分子化合物的溶液和溶胶的性质在形式上是相似的，因而在研究方法上也有共同性；第二，高分子化合物在胶态体系的稳定性上能起重要的保护作用，往往作为浓的胶态体系的稳定剂，因此和胶态体系是很密切的。

还应该提到，在现代胶体化学中，除了多相分散的胶态体系和单相的高分子化合物溶液，还包括一种在实际应用上很重要的所谓「半胶态体系」。这类分散体系指肥皂，洗涤剂，染料和鞣料等的溶液。它们的特点是随着浓度和温度的改变，有时形成分子分散的溶液，有时部分分子互相缔合成溶胶大小的颗粒，而这些颗粒与个别分子之间又存在着聚结动平衡。

从以上所述来看，胶体化学作为一门物理化学科学是化学和物理学相联系的环节之一，事实上在今天的胶体化学领域中，研究胶态体系所特有的物理结构，物理性质（甚至力学性质）和物理化学过程的篇幅，比研究这些体系的化学组成和其中的化学反应的篇幅多得多。因此有人建议胶体化学应该改为胶体物理化学或分散体系的物理化学。

其次，像蛋白质，核酸，淀粉，肝糖，纤维素等长链高分子组成的物质是一切有生命过程的活的有机体，组织和细胞的结构基础，这样胶体化学又是联系化学和生物化学与生物学的重要环节。

此外，许多岩矿是胶态体系，许多岩矿（如沉积岩）的形成过程是胶体化学过程，因此胶体化学又是联系化学和地质科学之间的环节之一。

第3节 胶体化学的实际意义

胶体化学的应用是非常广泛的。在现代的工农业上几乎找不到不利用胶体化学原理和方法的部门。就农业来说，土壤结构和吸收性能的改进，农田水利建设上土坝渗漏的防止，农肥农药的使用方法，胶体化学过程和胶态体系都有重要的意义。

就工业来说，像食品，纺织，皮革，合成橡胶，合成纤维，塑料，肥皂，造纸，制药，浮选富集贵重矿物，陶瓷，建筑材料等等工业的生产过程，无不应用胶体化学过程，甚至像机器制造这样似乎与胶体化学相隔很远的工业，在高速切削，减低金属硬度和润滑材料上都逐渐和胶体化学方法发生了关系。

石油工业和胶体化学的关系也很密切。

在石油及天然气的地质勘探方面，为了掌握石油资源的规律就得了解含油可能性较大的岩层——沉积岩的形成规律，而沉积岩的整个形成过程中胶体化学过程佔有重要地位。其次，石油及天然气在地层中运移的规律也和胶体化学有关，此外地球物理测井工作也和井壁上的胶体化学现象有关。

就石油炼制和人造石油来说，石油和煤焦油等化学加工中所需的催化剂和担体的制备，石油炼制过程中的破乳化问题，石油产品的吸附精制，吸附色层分离和分析，润滑油的流度性和稳定性，煤的结构和利用的研究，都包含着胶体化学过程。

油气田开采方面，油在地层中的流动，提高原油采收率的油田注水和压裂等措施（如表面活性剂的选择和压裂液的配制），都需要运用胶体化学的规律。采得的原油的脱盐脱水（破乳）几乎就是胶体化学过程。

即使像储运过程中，原油降凝，储运设备的防油渗漏，以及原油流动性的研究，也都得用胶体化学的方法。

说到钻井方面，和胶体化学的关系就更密切了。钻井过程中钻头钻碎的岩屑，必须及时从井底用洗井液冲洗出来。除了清水钻井的特殊情况，一般洗井液都是胶态体系，用得最多的是粘土水

基(即以水为分散介质)泥浆,这种泥浆是溶胶和悬浮体的混合体。近年来随着鑽井生产技术的发展,洗井液的种类也在不断增加,如油基泥浆,乳状液泥浆,表面活性剂泥浆和泡沫泥浆等等。几乎包括所有各种胶态体系,以及吸附,潤湿,稳定性和聚結,流变性等許多胶体化学規律。

泥浆性能的化学处理剂中,大多数有机处理剂,如丹宁碱剂,煤碱剂,木質素磺酸盐,都屬半胶态体系或高分子化合物溶液。

固井用的水泥的硬化过程和固井質量有密切关系,而硬化过程本身(中間經過可控制的聚結胶凝阶段)以及加添加剂調节硬化的过程,都运用胶体化学的吸附,聚結和稳定性等原理。

如何降低岩石硬度也是加速鑽井的一个方向,而加減硬剂減低岩石硬度是胶体化学中潤湿和吸附过程的一种应用。

因此学好胶体化学課程,对于鑽井工作人員也是一个重要的任务。

第二章 粘土矿的組成和結構

粘土矿是泥浆的主要成分之一，为了了解泥浆的全面胶体化学結構和性質，需要先講一下粘土矿的化学組成和晶体結構。

第1节 粘土矿的化学組成

粘土是岩石經過水、空气、阳光和冷热变化的风化作用形成的，成分相当复杂。但化学分析的结果表明，各种粘土矿的主要成分元素是氧、硅和铝，主要粘土矿的定量分析结果如表2—1。

表2—1

晶格类型	粘 土 矿	化 学 組 成 (經 驗 式)
高嶺土	高嶺石	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_2$ 或 $2Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O$
	珍珠陶土	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_2$ 或 $2Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O$
	地凱土	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_2$ 或 $2Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O$
	偏多水高嶺土	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_2$ 或 $2Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O$
	多水高嶺土	$Al_4(Si_4O_8)(OH)_{10}$ 或 $2Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 8H_2O$
微晶高嶺土	叶蜡石	$Al_4(Si_5O_{20})(OH)_4$ 或 $2Al_2O_3 \cdot 8SiO_2 \cdot 2H_2O$
	微晶高嶺石	$Al_4[Mg](Si_5O_{20})(OH)_4 \cdot XH_2O$
	拜得石	$Al_4[Mg](Si_5[Al]O_{20})(OH)_4 \cdot XH_2O$
	綠脫石	$Fl_4[Mg](Si_5O_{20})(OH)_4 \cdot XH_2O$
	皂石	$Mg_5(Si_5[Mg]O_{20})(OH)_4 \cdot XH_2O$
	滑石	$Mg_5(Si_5O_{20})(OH)_4$
	凹凸棒石	$Mg_5[Al](Si_5O_{20})(OH)_2(OH_2)_4 \cdot 4H_2O$
伊利石	水云母	$K_yAl_4(Fe_4Mg_4Mg_6)Si_{10-y}Al_yO_{20}$

表中〔 〕內的离子可以在晶格中取代左边的离子($y=1-1.5$)。

除了上面所列的粘土矿之外，粘土中还常常含有石灰石、石膏以及使粘土帶棕褐色的氧化鉄和其他的盐类。

高岭石和微晶高岭石两种矿是最常见的下列两类粘土的主要成分，以高岭石为主的粘土叫做高岭土（其中往往混有水云母），到处可以遇见，制备泥浆时广泛地采用，以微晶高岭石为主的粘土叫做微晶高岭土或膨润土（蒙脱土），比高岭土少见，但我国产地不少，在产地可用它制备泥浆，在不产膨润土的地方，由于成本较高，一般只作泥浆的添加剂。

从上述分析结果可以看出，高岭石和微晶高岭石在化学组成上各有一个主要的特点：

高岭石： $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=2:1$

微晶高岭石： $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=4:1$

这个比值可利用来鉴定粘土的类型。

鉴别这二类粘土矿还有另一种方法，即将土酸化后进行pH滴定，在滴定曲线上，高岭土像一元酸，微晶高岭土像二元酸。关于pH滴定的这种特点，待讲过二类土的晶体结构即可清楚。

关于粘土矿的化学分析，下列三点值得注意：

1) 由于晶格中的离子有被别的离子取代的情况，以及由于粘土矿往往不纯，故只能确定大致的组成。

2) 由于晶体结构上的差别，某些化学组成相同的粘土矿可以具有不同的性质。

3) 另一方面同样由于晶体结构的相似，某些化学组成不同的粘土，却可以有相似的性质。

第2节 粘土矿的晶体结构

一直到30多年以前，人们曾长期地从外表出发把粘土看成无定形物，X射线分析的应用才揭露了它们内部的晶体结构。

将一些粘土矿的X射线衍射，化学分析和热差分析（根据加热时失重情况）的结果仔细比较后发现下列情况。

1. 化学分析结果不相同的粘土矿，X射线衍射图有可能相同。

2. 有些粘土矿的X射线衍射结果互不相同，化学分析却一致。

根据粘土是晶体的现代概念，这种情况可以说明如下：

1) 第一种情况是由于晶格中发生元素或离子取代之后，晶体结构並未改变。因此化学分析上有差别，X射线衍射图則未变。

2) 第二种情况由于組成的元素虽相同，但晶格结构有差别，即原子排列上有所不同。

現在介绍X射线衍射得出的粘土矿晶体构造。

各种粘土矿由即使不完全相同也是类似的小结构单位构成，正如相同的砖、瓦、灰泥可以造成不同式样的建筑物一样，用相同或类似的小结构单位也可以构成不同的晶体。

1. 粘土矿的二种基本结构单位。

1) $\text{Si}-\text{O}_4$ 四面体——如图2-1，四个氧在四面体的顶点，Si在四面体的中心，由于Si离子比四个氧离子密接所能留出的空间还要大，故四个氧实际並不互相接触。（四价硅离子的半径为 $0.41\text{\AA}$ ，二价氧离子的半径为 $1.40\text{\AA}$ ）。

2) $\text{Al}-\text{O}_6$ 八面体——见图2-2，其中三价Al离子的半径为 $0.50\text{\AA}$ 。

显然上面二种单位都是不饱和的，例如 SiO_4 四面体是不饱和的，每个氧上再连一个H即达饱和，如此所得就是正硅酸 H_4SiO_4 。

几个 H_4SiO_4 失水缩合生成链状结构（图中每个三角形代表 $\text{Si}-\text{O}_4$ 四面体）。

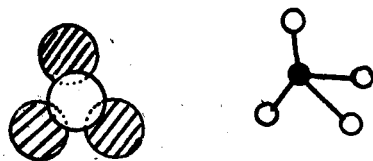


图 2-1 硅氧四面体

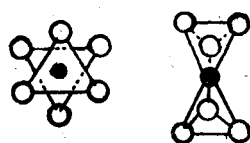


图 2-2 铝氧八面体

倘若上面的H为Na取代，这种链分子分散在水中即是水玻璃（ Na_2SiO_3 ），这是由于 Na^+ 的水化强，引起大的溶解度。链状结构说明为什么水玻璃的粘度比较大。

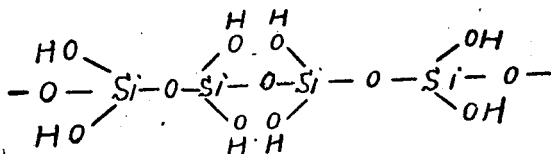
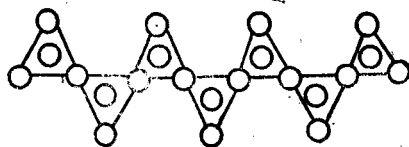


图 2-3 硅氧四面体结合成链

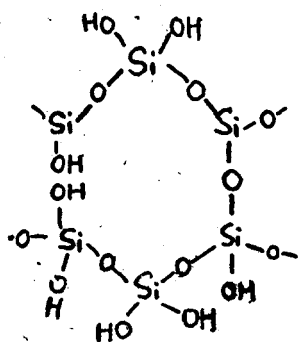


图 2-4 偏硅酸凝胶

如果四面体链上H未全被 Na^+ 取代，在水蒸发掉或其他原因失水时，就可以进一步缩合成网状结构——即凝胶（图2-4）。

2. 粘土矿的二种二级结构单位从粘土矿的晶体结构还可以划分出二种比基本结构单位复杂的二级结构单位，即水合硅土结构和水矾土结构。

1) 水合硅土的结构

水合硅土是由硅氧四面体互连成多六角环状的层状结构（如图2-5），其中原子排列可分三层。

第一层：氧原子（在边缘上为OH原子团）成正三角形排列（注意：图中氧之间的连线只代表几何关系，不代表价键）每个氧在价键上部与第二层的硅相连，各正三角形又排成空心六角环。

第二层：硅原子形成空心的六角环。

第三层：在第二层的每个硅之上有一个氢氧基它们也构成空心的六角环。

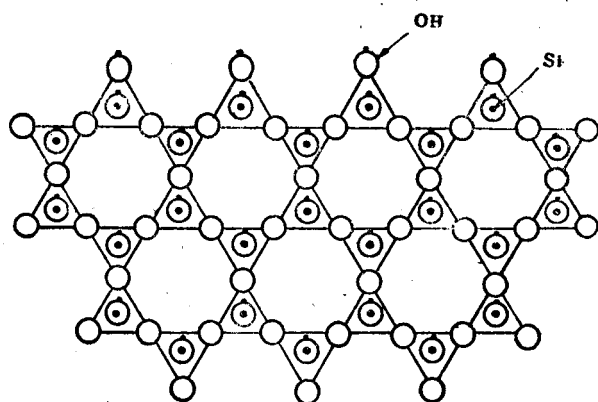


图 2—5 水合硅土

在这些结构中，我們只看見每二个硅共連一个氧，沒有共連二个氧，这是因为硅离子有正四价，每二个硅共連二个氧时二个硅之間距离太近，斥力太大。

2) 水矾土 $[\text{Al}(\text{OH})_3]$

水矾土並非单个的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 分子，实际是由許多鋁氧八面体連成的层状晶体，其中离子排列也可分三层如图 2—6。

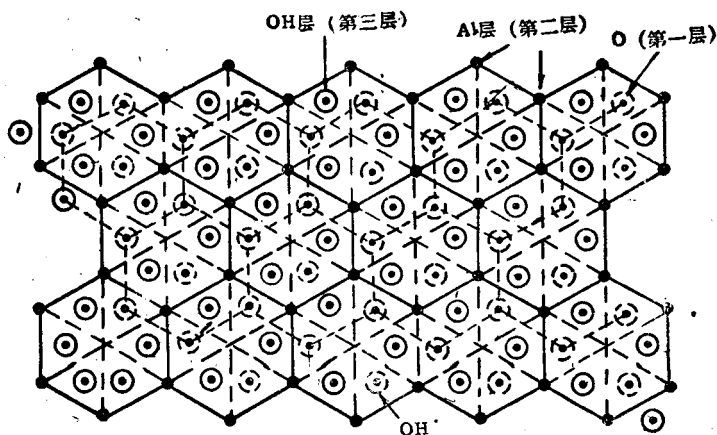


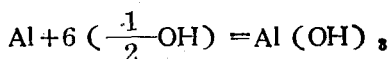
图 2—6 水矾土

1) 夹在中間第二层的全是Al，它們在几何上排成空心的正

六角环。

2) 每二个铝共有二个 OH, 一个在第一层(虚线图)另一个在第三层(实线图)第一层和第三层的 OH 都形成实心的六角环。

3) 三层的六角环都不互相重叠, 而是这样地错开, 使每个 Al 离子周围有六个 OH, 三个在第一层, 三个在第三层, 即然每个 OH 是二个 Al 共有的, 可见每个 OH 只有 $1/2$ 属于每个 Al 离子, 因此 Al 和 OH 的关系是:



有了以上二种二级结构单位, 再来看高岭土和微晶高岭土的晶体结构就比较容易了。

3. 二种主要粘土矿的结构

1) 高岭土

一个水合硅土层的 OH 空心六角环和水矾土层的任何一个 OH 实心, 六角环相对应起来, 在每二个相近的 OH 之间脱水缩合的结果, 每个六角环顶上只剩下一个氧连结水矾土的 Al 和水合硅土的硅这样二层 OH 六角环缩合的结果形成一层氧的六角环, 由于水合硅土的 OH 六角环是空心的, 故水矾土 OH 六角环中心的 OH 不能缩合而仍保留在氧六角环的中心, 这样由二个三层结构缩合而成的五层结构就是高岭土的晶体结构故高岭土也是片状结构的晶体, 其中五个层中的原子排列如下:

(1) O 层(边上为 OH)——即水合硅土的第一层如图 2—7。

(2) Si 层——即水合硅土的第二层, Si 成空心六角环的排列。

(3) 以 OH 为中心的氧六角环层——这是相应于水合硅土第三层和水矾土第一层缩合而得的层如图 2—8。

(4) Al 层——即水矾土中的空心六角环层, 但与 Si 的空心六角环不是正对重叠, 而是如图 2—9 有规则地互相错开。

(5) OH 层——成实心六角环排列如图 2—10。