

长石矿物学

P. H. Ribbe 主编

地质出版社

美国矿物学会《矿物学评论》丛书 第2卷

长石矿物学

P. H. Ribbe 主编

曾荣树 应育浦

杨华蕊 李天顺

译

地质出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了最主要造岩矿物长石的晶体结构, 晶胞参数, 在铝氧硅氧四面体格架中铝, 硅的有序—无序排列及有序化过程的特征, 详细地讨论了利用电子显微镜研究长石微细结构(出溶, 共格条纹, 位错, 机械双晶等)的成果, 对于长石的光学性质, 亦有充分的论述, 同时阐明了各种斜长石组分的相平衡作用及元素在长石中的扩散。本书反映了八十年代初期世界各国关于长石矿物研究的最新进展, 对于从事研究矿物岩石的科研人员、地质院校师生、研究生及在地质战线工作的同志们均有一定的参考价值。

Reviews in Mineralogy Vol. 2 2nd Edition

Paul H. Ribbe, Editor

Feldspar Mineralogy

Mineralogical Society of America

1983

美国矿物学会《矿物学评论》丛书 第2卷

长 石 矿 物 学

P. H. Ribbe 主编

曾荣树 应育浦 译

杨华蕊 李天顺

*
责任编辑: 王 曙

地质出版社出版发行

(北京和平里)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

*

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 14.625 铜版插页: 9页 字数: 335000

1989年9月北京第一版·1989年9月北京第一次印刷

印数: 1—980册 国内定价: 7.15元

ISBN 7-116-00443-2/P·369

译 者 的 话

矿物学在地球科学发展的漫长历程中有了长足的进步，这不仅仅表现在很多新的科学理论和新的实验技术应用到矿物学的研究中，而且表现在一系列内容新颖、水平高超的矿物学论著陆续问世。这里特别应该提到的是由美国矿物学会组织出版的《矿物学评论》丛书，该系列丛书的第一卷《硫化物矿物学》于1974年发行以来，至今已经出版了十四卷之多。这些专著集世界造岩矿物研究之大成，代表了当代矿物学研究的水平，已成为地质工作者必读的参考书之一。

我们有机会较早地阅读了由 P. H. Ribbe 教授主编的《长石矿物学》一书，这是以上所说的十四卷专著中的第二卷（1975年第一版，1983年经较大修改后出了第二版），并将它译成中文介绍给我国广大读者，该书的内容涉及到长石矿物的各个方面，反映了当今长石矿物研究的最新成果。在本书翻译的过程中，P. H. Ribbe 教授曾访问过我国，他对我们的翻译工作给予了热情的关注，为我们提供了许多精彩的原始图件和照片，经常来信询问工作的进展情况及指出原文编排中的一些错处，在此我们向 Ribbe 教授表示衷心的感谢。

本书由曾荣树、应育浦、杨华蕊、李天顺翻译，周景良、曾荣树、苏树春校对，全文最后由曾荣树复校，顾芷娟同志也协助做了不少工作。在翻译过程中，作了少量的删节。

译者

1988年1月于北京

目 录

第一章 长石的化学、结构与命名	1
引言	1
长石四面体格架的结构形态	2
沿 a 轴的投影	4
沿 c^* 轴的投影	4
沿 b 轴的投影	7
理想晶胞参数	8
铝、硅有序—无序的类型：以结构和化学成分为基础的命名法则	8
碱性 (Na, K) 长石：Al:Si = 1:3, $C \sim 0.7\text{nm}$	8
钙长石与钡长石：Al:Si = 2:2, $C \sim 1.4\text{nm}$	10
$I2/c$ 钡长石	12
PI 钙长石	12
PI 钙长石	14
长石四面体位置命名法概述	14
反相晶畴与Ti平均结构	15
第二章 长石的铝—硅有序及晶畴结构与衍射类型	18
引言	18
碱性长石铝硅有序化的顺序	18
包含从单斜对称转化到三斜对称的钾长石有序过程	18
微斜长石多种双晶的发育	20
无双晶的或简单双晶的微斜长石	24
一步有序还是两步有序?	24
透长石转化为微斜长石的温度范围	24
三斜碱性长石的有序化	24
钾长石	24
钠长石	24
斜长石的单晶衍射类型	26
X射线照相技术	26
旋进法	26
迴摆法	27
斜长石衍射图概述	27
斜长石铝硅有序化顺序	33
钠质斜长石的有序化	33
钠长石	33
晕长石	33
斜长石平均结构模式	34

钙质斜长石的有序化	36
钙长石	36
倍长石	38
高斜长石	39
休顿洛契连生	39
中间组分斜长石的有序化	39
奥长石	39
‘e’斜长石	40
博吉尔德连生	43
本章概要	43
第三章 碱性长石的晶格参数、成分及其Si、Al有序	44
引言	44
四面体位置和Al、Si分布	45
线性模式	45
一个新的模式	50
键合效应的修正	53
碱性长石的晶格参数	53
碱的交换系列	53
晶胞体积和 a 值	55
单位晶胞角度	58
晶胞的 b 、 c 值	58
用来推导 $(t_{10}+t_{1m})$ 的 $b-c$ 图解	59
用来推导 $(t_{10}-t_{1m})$ 的 $\alpha^*-\gamma^*$ 图解	61
从 $b-c$ 和 $\alpha^*-\gamma^*$ 计算Al、Si分布	62
受应变的长石	63
测定Al、Si分布的 $[110]$ 法	65
$[110]$ 法的依据	66
碱性长石的 $[110]$ 法	67
估算 t_{10} 和 $(t_{10}-t_{1m})$ 的图	69
误差的估计	72
其它的测定方法	73
岩石学应用	73
有序路径	74
关于Al、Si分布投影方法的建议	77
第四章 斜长石和三元系长石的晶格参数及测定方法	78
引言	78
晶格参数的变化	78
高斜长石	78
低斜长石	81
钾交换的斜长石	82
热膨胀	82

用于斜长石的[110]法	84
估算 t_{10} 和 $t_{10} - \langle t_{1m} \rangle$ 的图解	84
误差的估算	86
应用于三元系长石的[110]法	86
$\Delta 131$ 法和 γ 法	89
第五章 长石的光学性质	92
引言	92
碱性长石：光轴角	92
光轴角 $2V_x$ ($t_{10} + t_{1m}$)的标记	93
低微斜长石→高透长石系列的 $2V_x$	95
低钠长石→钠歪长石系列的 $2V_x$	95
低钠长石→低微斜长石系列的 $2V_x$	96
高钠长石→高透长石系列的 $2V_x$	96
b—c图中的 $2V_x$ 等值线	97
出溶作用和应变组分对 $2V_x$ 的影响	98
$2V_x$ 作为最高结构状态的证据	99
碱性长石：消光角	99
(001)面中的消光角	99
(010)面中的消光角	100
结论	101
斜长石	102
折射率	102
光轴角, $2V_x$	103
光性方位和消光角	103
第六章 碱性长石固相线下物相的关系 (着重于共格的物相)	108
引言	108
置换的和有序—无序的关系	108
蒙钠长石—钠歪长石	109
有序相的稳定性	110
无应变的离溶线	110
透长石—高钠长石	111
低或最大微斜长石—低钠长石	113
共格的出溶	114
引言	114
共格的出溶条纹	115
共格条纹的鉴定	116
条纹的取向	116
共格条纹的成分	118
共格离溶线	120
一般的关系	120
对碱性长石的应用	122

最大微斜长石—低钠长石的共格离溶线	123
透长石—高钠长石的共格离溶线	123
附录：长石类的晶体弹性和弹性常数	127
晶体的弹性	128
长石类的弹性常数	130
第七章 碱性长石出溶的显微结构、动力学和形成机理	133
引言	133
出溶机理	133
成核作用	133
拐点分解作用	134
出溶显微结构	136
碱性长石出溶的实验研究	137
初期显微结构的发展	137
条纹显微结构的粗化	141
在矿物学中的应用	142
隐条纹长石	143
具有条纹的隐条纹长石	143
无条纹的隐条纹长石	144
粗条纹长石	145
第八章 元素在长石中的扩散作用	151
引言	151
扩散系数	151
扩散系数的测定	152
实验结果	154
长石中的各向异性扩散	154
静水压力和水对碱扩散作用的影响	155
碱金属扩散作用的系数	155
铷、锶和钙的扩散作用	157
氫的扩散作用	158
硅和铝的扩散作用	159
氧的扩散作用	159
长石中离子扩散作用的机制	162
长石高扩散性的途径	162
扩散资料的应用	163
第九章 长石的相平衡	166
引言	166
熔融体的关系	167
钙长石	168
钠长石	168
均匀斜长石区	170
‘e’斜长石	171

晕长石	175
休顿洛契连生	177
博吉尔德连生	178
变质岩中其它的组合	178
固相线下物相平衡的实验资料	179
第十章 三元系长石与斜长石的出溶结构和干涉色	180
引言	180
三元系长石的出溶作用	181
中条纹长石	181
反条纹长石	184
变质斜长岩的中长—反条纹长石	186
拉布拉多的月长石	186
斜长石的出溶作用	188
晕长石	189
物相关系	189
结构	189
共生物相的比较	192
休顿洛契连生	193
博吉尔德连生	194
干涉色	200
提要	204
第十一章 长石的形变	205
引言	205
晶体间的滑移	205
位错滑移和攀移	205
滑移体系的检测	208
钾长石中的滑移体系	209
晶体结构的考虑	209
实验证据	209
自然形变样品的证据	209
钾长石的复元和再结晶作用	210
斜长石的滑移系统	212
晶体结构的考虑	212
实验证据	212
自然形变样品的证据	213
斜长石的复元和再结晶作用	213
长石结构滑移作用概述	215
机械双晶	215
一般概念	216
斜长石中的机械双晶	217
晶体结构的考虑	217

实验研究	218
来自自然界样品的证据	219
钾长石的机械双晶	220
长石自然形变的概述	220
显微裂隙	220
机械双晶	221
位错蠕变	221
扩散蠕变	222
晶界滑移	223
概要	223

第一章 长石的化学、结构与命名

P. H. Ribbe

引言

长石矿物是铝硅酸盐，它的结构是由共角顶的铝氧 (AlO_4) 与硅氧 (SiO_4) 四面体向三度空间无限延伸而成；在四面体格架中，半径大于 0.1nm ^① 的阳离子 A 其电荷是平衡的，它们占据着那些大的不规则的空穴。长石的化学式一般写为 AT_4O_8 ，其中 T 代表 Al, Si；对于碱土长石 $\text{AAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 来说，A 代表二价的 Ca 或 Ba，而对于碱性长石 AAlSi_3O_8 ，A 则为一价的 Na 或 K。斜长石系列的组分范围是连续的，以 $\text{Na}_y\text{Ca}_{1-y}\text{Al}_{2-y}\text{Si}_{2+y}\text{O}_8$ ($0 \leq y \leq 1$) 表示，此外还有一个类似的钡冰长石系列 ($\text{K}_x\text{Ba}_{1-x}$)。

在不规则的 A 多面体位置，Sr, Ba, Cs, Pb, Eu 及其它的稀土元素， Fe^{2+} ，可能还有 Mg，可以产生微量的置换。在自然界还有一种与长石类似的硼化合物（钠硼长石，reedmergnerite, NaBSi_3O_8 ）与铵长石（buddingtonite, $\text{NH}_4\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ）一样，可能含有某些替代了 NH_4^+ 的水合氢离子。除了硼以外，在四面体位置还有 Fe^{3+} , Fe^{2+} , P 和 Ti 的置换。

表 1 Pentinghaus 等人工合成的由各种不同大阳离子 A 和四面体位置上阳离子 T 组成的化合物

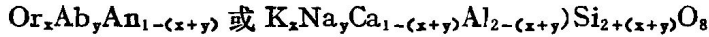
T^{3+}					T_2^{3+}				
A^{1+}	B	Al	Ca	Fe	T^{4+}	A^{2+}	Al_2	Ga_2	T_3^{4+}
Na	x	x	x		Si_3	Ca	x	x	Si_2
		x	x		Ge_3		x	x	Ge_2
			x		Al Si P	Sr	x	x	Si_2
K	x	x	x	x	Si_3		x	x	Ge_2
	x	x	x	x	Ge_3	Ba	x	x	Si_2
			x		Al Si P		x	x	Ge_2
Rb		x	x	x	Si_3	Pb	x		Si_2
		x	x	x	Ge_3				
NH_4		x			Si_3				

另外的化合物组分见有关长石的化学性质章节的论述

① 即为 1\AA ——译者。

表1列出了各种各样的A—T组合,具有长石化学式的人工合成的化合物。Smith报导了地球上存在的一些含有百分之几剩余量的 Al_2O_3 或 SiO_2 的长石(Smith, 1974b, p. 17—18),同时具有缺陷构造的长石也已被合成出来: $A_{1-x}□_xAl_{2-2x}Si_{2+2x}O_8$, 其中A=Sr(Grundy与Ito, 1974); A=Ca(Bruno与Fachinelli, 1974; Longhi与Hays, 1979)。这样,柯石英, $□Si_4O_8$ (一种 SiO_2 的高压变体) 具有与长石相似的结构, 就并不奇怪了(Megaw, 1970)。月球玄武岩的钙长石也含有高达7%摩尔的 $□Si_4O_8$ (Beaty与Albee, 1980)。

本书主要研究常见天然产出的长石, 它的通式为:



其中 $0 \leq (x+y) \leq 1$; x为钾长石(Or)的摩尔分数, y为钠长石(Ab)的摩尔分数, $1-(x+y)$ 为钙长石(An)的摩尔分数。图1表示在 10^8 帕(即1000巴)水压和某些温度下, 用实验测定的长石固溶体区域。

长石的命名是很复杂的。Smith(1974a, 第九章)用了足足45页的篇幅来阐述它! 如果不具备关于长石的结构和物相之间关系的知识, 包括在T位置的Al, Si有序—无序, 扩散与位移式同质多象转变, 反相晶畴以及令人感到晕眩的各种各样的出溶结构等方面的知识, 就很难正确地理解它。下面我们开始讨论长石的结构形态。

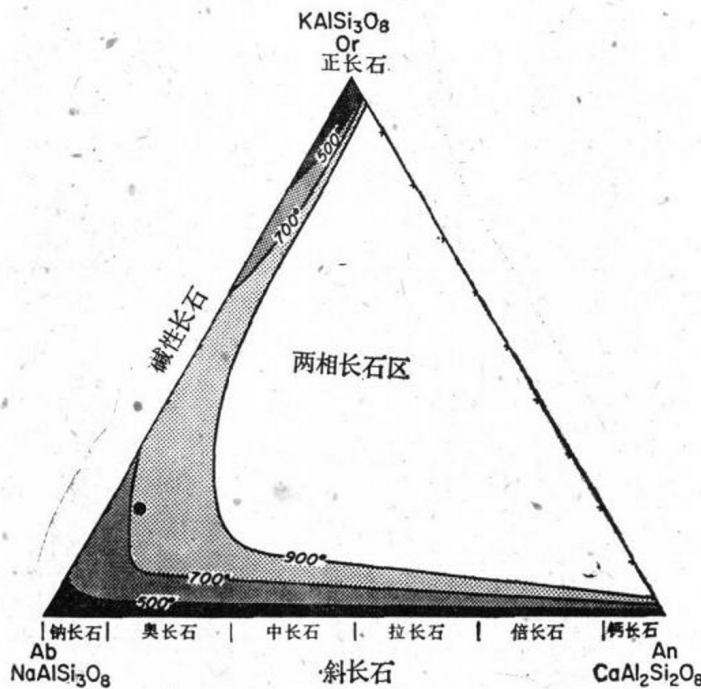


图1 Seck(1971)用实验测定的An—Ab—Or三元系较高的压力 $P(H_2O)$ 使固溶体区的界线更加靠近于二元系, 图中列出根据成分的变化而定名的各种长石矿物名称

长石四面体格架的结构形态

1928年, Machatschki 首先认识到长石是铝硅酸盐类, 其通式为 AT_4O_8 , 它是由共角

顶的 AlO_4 与 SiO_4 四面体组成的三维格架 (Machatschki, 1928)。但是, 有一些矿物和合成的铝硅酸盐虽然与Machatschki的描述相同, 它们却不属于长石。这些矿物与铝硅酸盐列举如下:

单斜晶系 $P2_1/a$	假六方晶系	斜方晶系 $Immm$
副钡长石, $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (Craig等, 1973)	“六方钡长石”, $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ —不是矿物 (Müller, 1976)	亚稳定 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (Takeuchi等, 1973)
锶长石, $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (Griffen等, 1977)	Sr—及Ca— $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{RbAlSi}_3\text{O}_8$ (Pentlinghaus, 1975)	

实际上, 这就是唯一定义长石的四面体格架的“结构形态学”^②。在下面的论述中, 我们将着重采用Helen D. Megaw博士的资料 (Megaw, 1973, 1974a)。

最简单的长石结构—透长石 (KAlSi_3O_8) 的结构是 $C2/m$, 它是Taylor测定的 (Taylor, 1933)。他发现透长石的关键结构单元是由 TO_4 四面体组成的四元环, 当它与类似的四元环成共角顶时, 形成了平行于 x 轴或 a 轴的曲柄转轴式的双链。图2明显地反映出呈链状的两四元环类型, 一种是与 y 轴 (b 轴) 垂直, 另一种与 x 轴近于垂直。为进一步理解长石的结构形态, 首先沿着三个相互垂直的结晶轴来观察结构的投影将是很有意义的。即沿

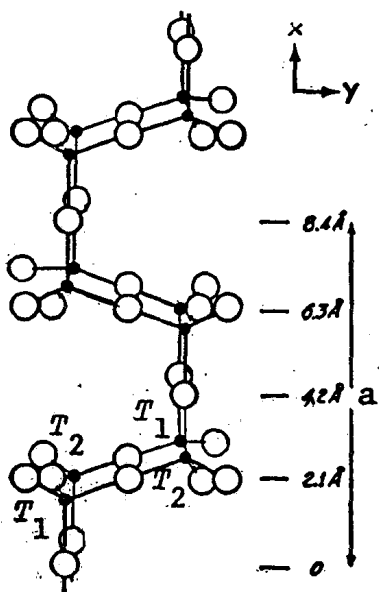


图2 长石中与 a 轴平行的四元四面体所组成的曲柄转轴式的双链

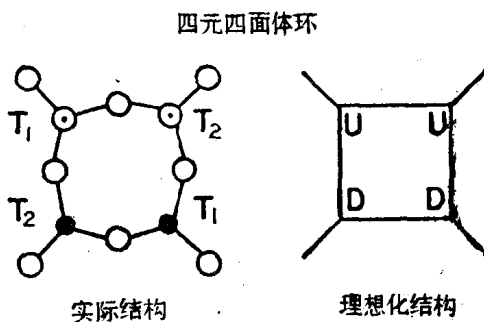


图3 四元四面体环在 $(20\bar{1})$ 的投影 (左图) 以及理想化的结构 (右图); U = 顶点向上的四面体, D = 顶点向下的四面体。与图2、5相比较

a 轴观察在 $(20\bar{1})$ 面的投影, 沿 c^* 观察 (001) 面上的投影以及沿 b 轴在 (010) 的投影。当然如果要更全面地认识长石结构, 最好是把这些投影图与由圆球和连杆组成的长石三维结构模型结合起来, 同时参阅图4的立体结构图 (需用立体镜进行观察—译注)。

topology 在很多文献中往往译为拓扑学, 我们认为译成“结构形态学”更易于理解——译者。

沿 a 轴的投影

沿 a 轴向下看(图3),一个四元环由两对不等效的 T_1 和 T_2 四面体组成,其中一对 T_1-T_2 的角顶向上(U),另一对角顶朝下(D)。沿 a 轴方向,U四面体与D四面体总是共角顶的。图4a是长石结构的立体图与结构的简化图,在简图中只标出T原子的位置。图5a的 $(20\bar{1})$ 面上的部分投影表示每个四元环在 (010) 对称面上是怎样通过共用的氧原子(以 O_{A2} 或简写成A2表示)相互连结的,在与 b 轴平行的二次轴方向上,又是如何通过 O_{A1} 氧原子连结的。Smith与Rinaldi(1962)从与其它架状硅酸盐的关系的角度讨论了这种独特的结构形态(参阅Phillips等,1974),图5b,c把这些结构进行了比较。从某种意义上说,长石的结构就是由这些 $(20\bar{1})$ 的单位层以 O_B 原子为共角顶,沿 a 轴方向互相连结而成的,当然从其它的角度来观察长石结构也是很有益处的。

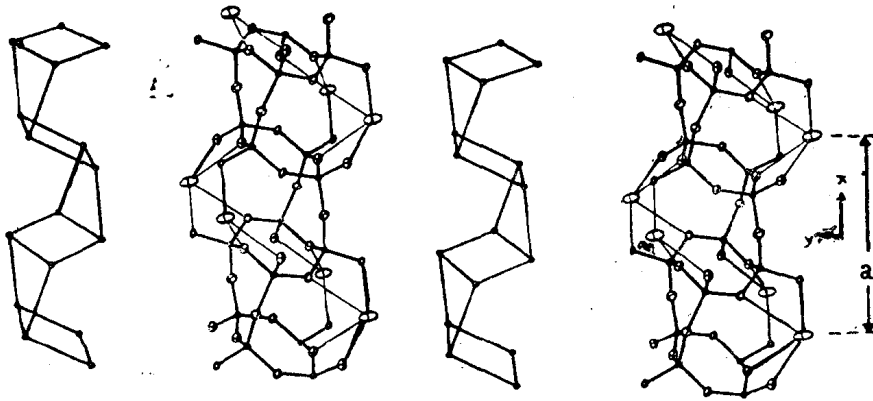


图 4a 在每对立体图中,右图是呈双曲柄链状的四元四面体环,左图是只包括四面体(T)结点的理想化结构, x 轴呈直立方向; y 轴与 x 轴垂直,且向上倾斜与图平面成 15° 夹角

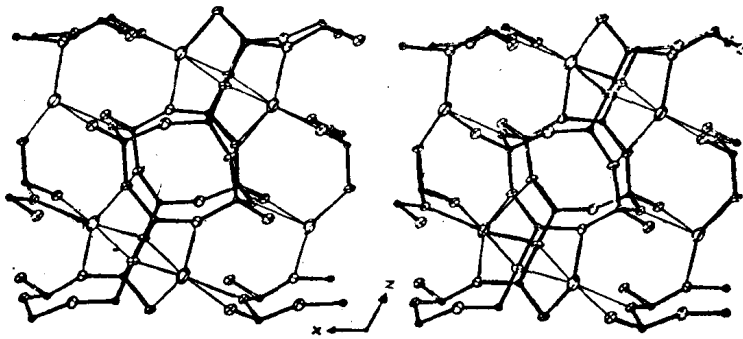


图 4b 原子的分数坐标 $y = \pm 0.3$ 的部分长石结构立体图

a, b图中最大的椭圆是Na原子,它与七个氧原子(较小的椭圆)配位,最小的椭圆是T原子,图4a, b承蒙J. Starkey与J. E. Wainwright提供

沿 c^* 轴的投影

图6表示长石格架在 (001) 的理想投影—“狗面状”投影,只画出四面体的结点,T—O—T之间的连线用直线表示。在 $C_{2/m}$ 对称型中,那些由于与 (010) 平行对称面的作用

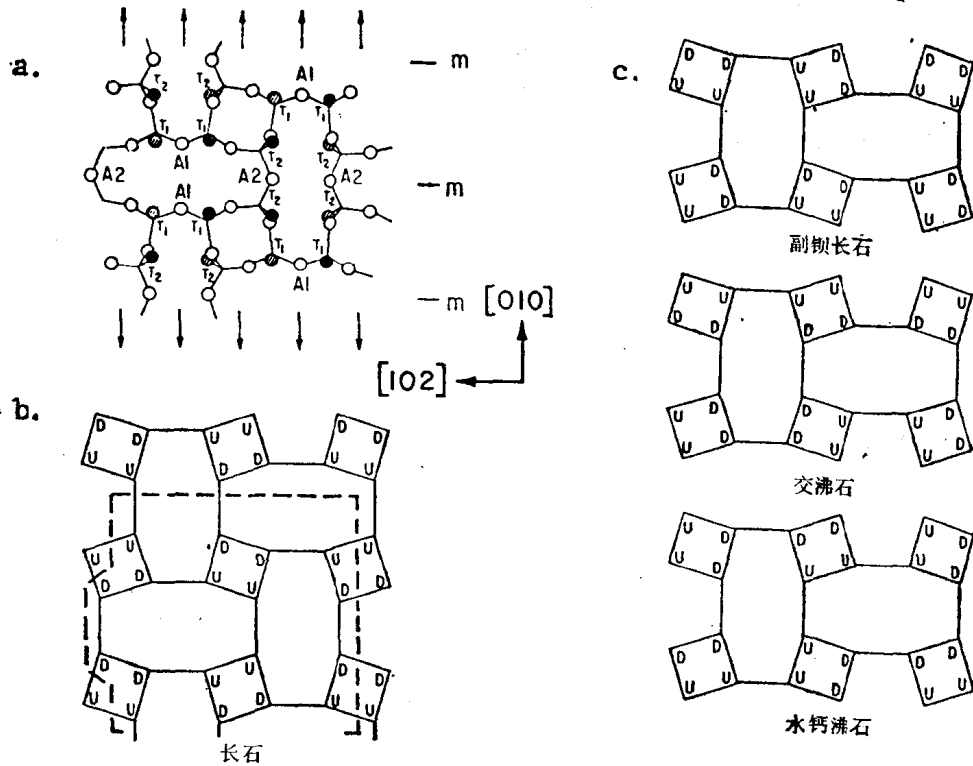


图 5 (a)透长石结构沿a轴向下在(201)面上的部分投影图
组成双曲柄链(图2)的四元四面体环(图3)通过氧原子 O_{A1} (位于二次轴 \uparrow)和 O_{A2} (位于对称面 m)形成共角顶的四面体层,据Taylor(1933). (b)相同投影的理想化结构,图中U(向上)与D(向下)表明共角顶四面体顶点的指向,虚线部分表示a图的结构, (c)副钠长石,交沸石与水钙沸石铝硅酸盐格架中的四面体层. 图5b, 5c取自Smith与Rinaldi(1962)

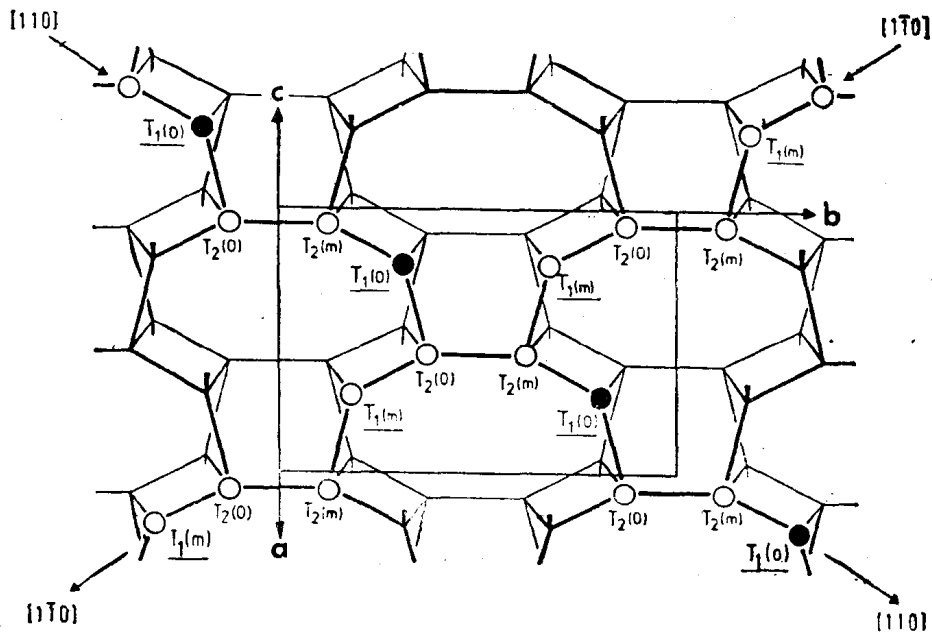


图 6 长石结构沿 c^* 方向在(001)面的理想化投影
该图表示沿 $[110]$ 与 $[1\bar{1}0]$ 方向四面体链的特征。完全有序化的碱性长石结构中 T^{3+} 仅仅出现在 $[110]$ 链(黑色的圆圈),而在 $[1\bar{1}0]$ 链中不存在 T^{3+} ,据Laves(1960)的资料进行了修改,进一步的解释详见正文, c 轴与 ab 平面成近于 64° 的交角

(在 $C\bar{1}$ 对称则为假对称面)，而联系起来的四面体T，被任意称为 T_1O 、 T_{1m} 与 T_2O 、 T_{2m} 。在 $C2/m$ 对称的与 b 轴垂直的四元环中， T_1O 、 T_{1m} 与 T_2O 、 T_{2m} 是借助于2次轴相互联系的， $C\bar{1}$ 对称则是假2次轴。单斜和三斜长石中每个由四个四面体组成的环的中间都有对称中心($\bar{1}$)，这些环在图中看起来犹如矩形。

c^* 轴投影说明在 b 方向双曲柄轴的链(图2)是怎样通过相邻 T_2 角顶— O_{A2} 氧原子—互相连结的，因而产生了曲柄轴链层。 c 轴方向上每重复一个单位长度就有一层这样的结构。 O_{A2} 原子位于(010)对称面(或假对称面)中，朝上和朝下的 T_1 位置用粗的或细的短线连接。它表示在 c 方向连续的双曲柄轴链层就是靠这些 T_1 的角顶联系的。 O_{A1} 氧原子位于2次轴或假2次轴。简而言之， T_2 四面体仅仅在层内起连结曲柄的作用，而 T_1 四面体则是连结层与层之间。每个 T_2 四面体与一个 T_2 及三个 T_1 四面体相连，每个 T_1 四面体则与一个 T_1 及三个 T_2 四面体相连。

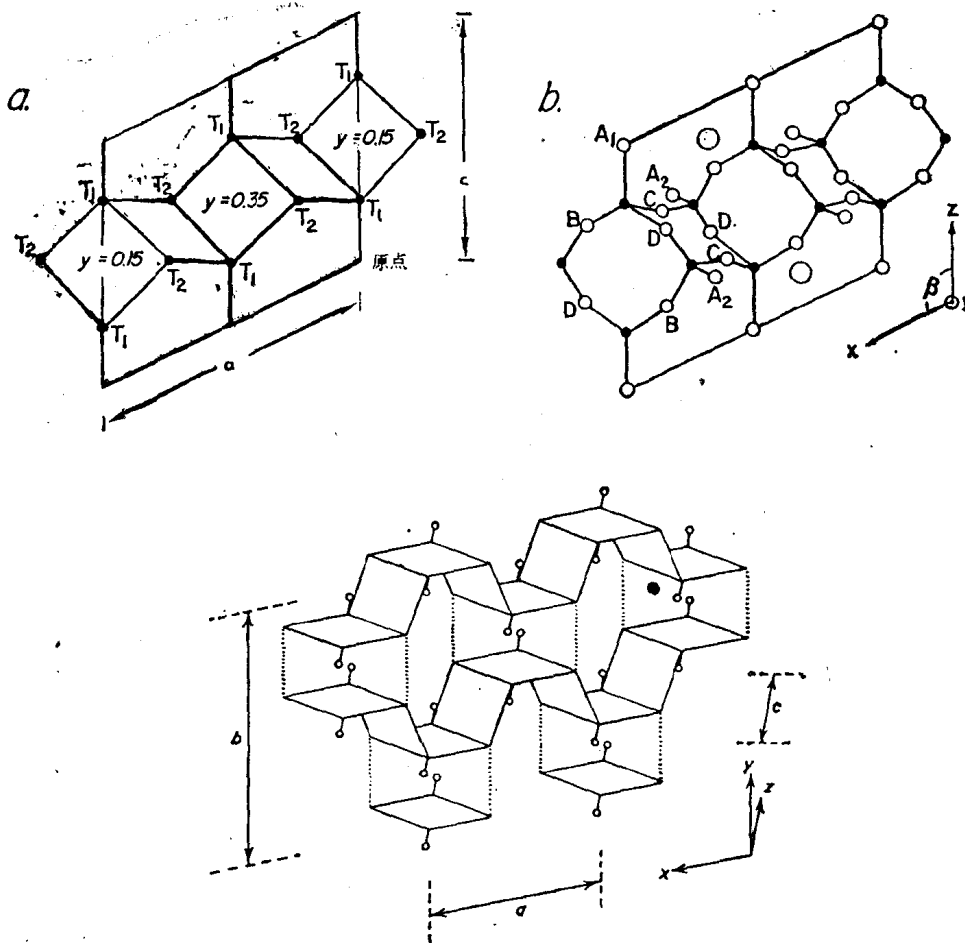


图7 长石结构在(010)面的投影

(a) 结点表示四面体的原子，(b) 把氧原子(用小圆表示)加到(a)中，原子A的高度 $y = 0.0, 0.5$ 。用带阴影的大圆表示，它们在 ac 平面的位置为连结这两个氧原子的水平线上 A_1 与 A_2 之间距离的一半，据 Megaw (1974a) 资料修改而成，(c) 在 $y = 0.25, 0.75$ 的(010)对称面所反射的“曲柄轴”透视图，实线连接图(a)的 T 原子， O_{A2} 原子位于连接曲轴与它的对称面之间的虚线上， O_{A1} 氧原子用小圆表示，据 Megaw 的资料(1973, 图11—25)

沿**b**轴的投影

图4b表示沿 b 轴投影的部分钠质长石结构的立体图，由该图特别容易看出 Na 与七个氧原子的配位关系。Megaw(1974a) 作出了这个方位的简单结构模式图 (图7)，它实质上是在 $y=0$ 与 $y=0.5$ 之间一个曲柄轴链的简化投影 (参照图4a立体图的简化表示法)。图7a是单位晶胞 ($a \sim 0.8\text{nm}$, $b \sim 1.3\text{nm}$, $c \sim 0.7\text{nm}$, $\alpha \sim \gamma \sim 90^\circ$, $\beta \sim 116^\circ$) 在 (010) 面的投影。我们选择晶胞的右下角作为座标的原点，原子的分数座标为 $x \sim 0.00$, $y \sim 0.15$, $z \sim 0.25, 0.75$ 的 T_1 就沿 z 轴分布在 $0.25c$ 及 $0.75c$ 位置。把 z 作为它的对角线画出一个正方形，则另外相对的两个角顶为 T_2 。这个近于共面的 $T_1-T_2-T_1-T_2$ 四元环就处在与纸面垂直的 y 轴上，其高度为 0.15 。(注意：这是在图2中与 a 轴平行的环，它与图3所表示的环不同)。在晶胞相对的另一条棱上，四元环重复出现，它们之间相差一个 a 平移向量。第一个四元环所有原子的 x 座标都加上 0.5 ，又可产生一个完全相同的环来；它借助于在 $y=0.25$ 处的 a -滑移面与其它环联系。因此，该环所有 T 原子的 y 座标为 $0.5-0.15=0.35$ ，添入氧原子后 (如图7b)，局部的投影图表明氧原子 O_B, O_D (简写为 B, D) 位于与 b 轴垂直的环内，这些环通过氧原子 c 相互连接，在 c 方向双曲柄轴链则通过氧原子 A_1 相连。所有的原子通过在 $y=0.5$ 的对称面作用又重复出现。在 $x, y, z = \frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{2}$ 处有一个对称中心，它以对角线的形式把 (20 $\bar{1}$) 投影面上的环中相对的 T 位置联系起来 (图3)，还有一根二次旋转轴，它把与 (010) 近于平行的环中 T 的位置联系起来。在图10a 中画出 $C2/m$

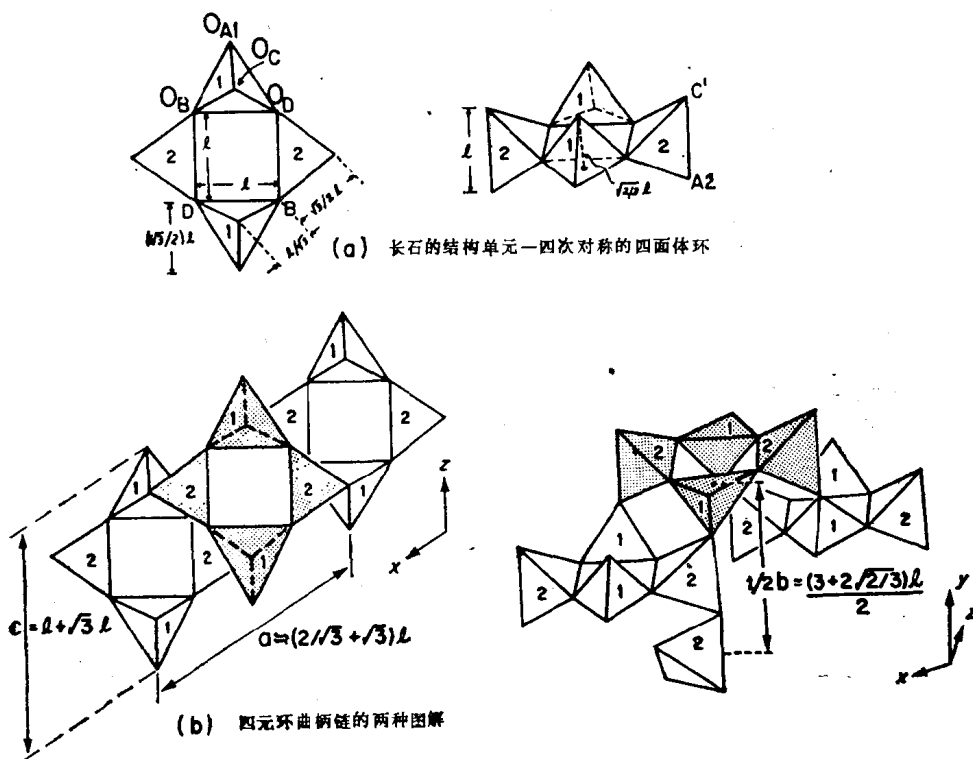


图 8 长石四面体格架透视图

该图应用棱长为 l 的规则四面体来描述理想晶胞，据 Megaw (1974a) 的图修改而成