

超晶格正长石的高分辨透射 电子显微镜研究*

徐 惠 芳

罗 谷 凤

南京大学地球科学系; 固体微结构物理实验室 南京大学地球科学系

胡 梅 生

陈 峻

南京大学现代分析中心 南京大学固体微结构物理实验室

1988 年 11 月 25 日收到

对产自山东五莲辉石二长岩中的正长石进行了高分辨透射电子显微镜 (HRTEM) 研究, 确定这一正长石属大周期超晶格正长石. 其扩展晶胞参数与三斜亚晶胞参数间的关系为 $a = a_{tc}$, $b \approx 8b_{tc}$, $c = c_{tc}$, $\beta = \beta_{tc}$ (下标 tc 表示三斜亚晶胞).

这一超晶格正长石是由一系列的三斜晶畴组成. 它是钾长石从 $C2/m$ 对称向 $C1$ 对称的相变过程中, 通过四面体中 Si-Al 间的有序化而形成的一种中间态调制结构.

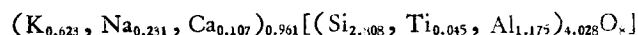
一、引 言

正长石是一种具有三斜对称的晶畴组成的超显微或超 X 射线的双晶. 由 X 射线给出的平均结构为 $C2/m$ 对称, 但晶畴本身的实际对称则具有 $C1$ 空间群. 就 Si-O 四面体中 Si-Al 间的有序化而言, 正长石是介于透长石与微斜长石之间的中间态准稳定变体^[1,2].

作者在对山东五莲辉石二长岩次火山岩体中的正长石进行透射电子显微镜研究时, 发现其 $0kl$ 衍射均具有多级沿 b^* 方向分布的明锐卫星点; 对应的明场象、暗场象和高分辨结构象都表明, 它系由完全有序的钠长石律周期结构双晶所构成. 有关在钾长石晶体中存在着各种晶畴问题, 虽然早有报道且已从理论上作了解释^[3], 但作为完全有序的周期结构双晶所构成的超晶格正长石, 还未见文献报道.

二、样品和实验

五莲辉石二长岩中的正长石呈半自形粒状产出, 平均粒径为 5 mm. 在光学性质上表现为单斜对称. 光轴角为 $(-)\ 2\nu = 54-66^\circ$. 由电子探针测得其平均成分为



换算成 $K[(Si_3Al)_4O_8](Or)-Na[(Si_3Al)_4O_8](Ab)-Ca[(Si_2Al_2)_4O_8](An)$ 三端员组分

* 国家自然科学基金资助和南京大学固体微结构物理实验室基金资助的课题.

的含量: $\text{Or}_{65}\text{Ab}_{24}\text{An}_{11}$.

由X射线粉晶衍射测得其三斜度 $\Delta_{131} = 0.04$. 按 Wright 和 Stewart^[4] 以及苏树春^[5]对碱性长石的分类,五莲正长石基本上属于中正长石.

对粉晶衍射数据进行指标化,并用最小二乘法进行修正,求得五莲正长石平均结构的单斜晶胞参数为 $a_0 = 8.56(8)$, $b_0 = 12.98(0)$, $c_0 = 7.19(1)\text{\AA}$, $\beta = 116.0(1)^\circ$.

从辉石二长岩的岩石学薄片取下垂直 a 轴切面的正长石晶体,制成透射电子显微镜样品,用侧插双倾台在 JEM-200CX 分析电子显微镜上进行观察,加速电压为 200 kV. 正长石的高分辨结构象是在 JEM-4000EX 高分辨电子显微镜上获得的,加速电压为 400 kV.

图 1(a) (见图版 I) 是五莲正长石 b^*-c^* 平面的选区电子衍射图,图 1(b), 图 1(c) (见图版 I) 分别是与图 1(a) 对应平面的明场象和暗场象. 由图 1(a) 可见, $\alpha = 90^\circ$; 所有 okl 衍射点都至少可见四级明锐的卫星点,它们均平行于 b^* 方向分布,卫星点的周期为 $16d_{020} = 8b_0$; 强度则随着级次的增高而急剧衰减. 绕 b 轴倾转样品,在其它方向的电子衍射图中也见有同样的现象. 这表明在此正长石结构上叠加了一个调制周期为 $8b_0$ 的有公度大周期. 图 1(b), 图 1(c) 中平行条纹的重复周期约为 104\AA , 正好相当于 $8d_{010}$. 从高分辨结构象[图 1(d) (见图版 II)] 中更可以清楚地看出,沿 b 轴方向每隔四个基本晶胞,晶格的倾斜取向便发生一次反转,相应的重复周期为 $8d_{010}$. 由于样品受到超高压电子的辐照,样品的辐照损伤相当严重. 图 1(d) 的右上角区域可以清楚地看出,正长石受到电子辐照,晶格发生变形和破坏,以致失去晶格的周期性.

三、讨 论

五莲正长石的电子衍射图中,所有的衍射斑点和卫星点都十分明锐,彼此间既无弥散相连,本身亦无变形. 按 Buseck 和 Cowley^[6] 对复结构的分类,它属于完全有序的超结构. 这一点从高分辨结构象中也完全得到证实: 五莲正长石晶体实际上系由一系列具有三斜对称的晶畴所组成,晶畴间的界面平行 (010), 各晶畴沿 b 方向的宽度均为 $4d_{010}$, 相邻三斜畴之间的取向构成钠长石律双晶关系. 所以它是一种由晶胞级的钠长石律周期结构双晶所构成的完全有序结构. 这一超晶格的结构模型可以表示成图 2 所示的结构. 它具有单斜对称,其扩展晶胞参数与三斜亚晶胞参数间的关系为 $a = a_{ic}$, $b = 8d_{010} \approx 8b_{ic}$, $c = c_{ic}$, $\beta = \beta_{ic}$; 其可能的空间群为 Pm .

五莲正长石中由一系列三斜畴组成的钠长石律周期结构双晶,是在 Si-Al 有序化过程中形成的. 因为当有较多的 Al 原子从 T_2 晶位转移到四种等价的 T_1 晶位中的某一晶位时,与自由能相应减小的同时,原来的单斜结构将转化为三斜结构,并因而产生局部应力^[3]. 周期结构双晶的出现有利于应力的释放. 在五莲正长石中表现为钠长石律双晶. 所以,五莲正长石的超晶格结构是因有序度的增大而导致的自由能减小与由于结构变形而产生的局部应变能之间达到准平衡的产物;其调制周期的大小则与结构中 Al 的占位率有关.

显然,五莲正长石的超晶格结构是介于 Si-Al 完全无序的高透长石与 Al 完全进入

T_{10} 晶位的最大微斜长石之间的一种中间态结构; 是钾长石从 $C2/m$ 对称向 $C\bar{1}$ 对称的相转变过程中形成的一种中间态调制结构。随着所处地质环境的不同, 此类超晶格正长石的调制周期和调制方向都可能发生一定的变化。类似的现象在 NaNO_2 , β -锂霞石, β -石英以及 Pbca 斜方辉石的相转变过程中出现^[7,8]。

- [1] J. V. Smith, *Feldspar Minerals*, Vol. 1, Crystal Structure and Physical Properties, Springer-Verlag, Heidelberg, (1974), p. 416—436.
- [2] W. L. Brown, *Feldspars and Feldspathoids*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, (1984), p. 317.
- [3] P. H. Ribbe, *Reviews in Mineralogy*, Vol. 2, *Feldspar Mineralogy*, 2nd ed., MSA, Washington, (1983), p. 24.
- [4] T. L. Wright and D. S. Stewart, X-Ray and Optical Study of Alkali Feldspar, *Amer. Mineral.*, 53(1968), 38.
- [5] 苏树春, 碱性长石的光学鉴定, 地质出版社, 北京, (1982).
- [6] P. R. Buseck and J. W. Cowley, *Modulated and Intergrowth Structures in Minerals and Electron Microscopy for Their Study*, *Amer. Mineral.*, 68(1983), 18.
- [7] H. Böhn, *Modulated Structures at Phase Transitions*, *Amer. Mineral.*, 68(1983), 11.
- [8] 罗谷风、徐惠芳、胡梅生, “全国第三届矿物岩石地球化学学术交流会论文摘要汇编”, 中国科学技术出版社重庆分社, (1988), 28—29页。

HRTEM STUDY OF THE SUPERLATTICE ORTHOCLASE

XU HUI-FANG

*Department of Earth Sciences and the Laboratory of Solid State
Microstructures, Nanjing University*

LUO GU-FENG

Department of Earth Sciences, Nanjing University

HU MEI-SHENG

Centre of Material Analyses, Nanjing University

CHEN JUN

Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University

(Received 25 November 1988)

ABSTRACT

An HRTEM study was carried out for the orthoclase ($\text{Or}_{65}\text{Ab}_{21}\text{An}_{14}$) taken from the augite-mozonite deposit in Wuliang, Shandong Province. The results showed that this material consists of superlattice with long period. The relationship between extended cell parameter and triclinic subcell parameter is as follows: $a = a_{ic}$, $b = 8d_{010} \approx 8b_{ic}$, $c = c_{ic}$, $\beta = \beta_{ic}$ (tc represents the triclinic subcell).

The orthoclase consists of a series of triclinic domains. It is the intermediate modulated structure formed in the process of phase transformation of potassic feldspar from $C2/m$ symmetry to $C\bar{1}$ Symmetry through the ordering of Si and Al in the tetrahedra.