

* 系列文章 *

自然界碱性长石调制结构及复结构的研究

前言

1982—1985年, 笔者在彭志忠教授指导下, 开展了碱性长石调制结构及复结构的研究, 对我国河北张家口汉诺坝地区及江西东北地区的碱性长石等开展了大量的野外及室内研究工作。室内研究工作主要用 X—光单晶分析方法, 辅之以透射电镜方法来研究碱性长石的复结构等, 个别样品进行了晶体结构测定。为了继承彭志忠教授未竟的事业, 笔者整理出了有关四篇系列文章, 以悼念著名矿物结晶学家彭志忠教授的不幸逝世并寄托我们深切的哀思。

自然界碱性长石调制结构及复结构的研究分为下述四篇系列文章:

- 一、调制结构及复结构的概念及实验方法简介
- 二、河北省汉诺坝玄武岩斜长石巨晶体的发现及晶体结构的测定
- 三、河北省汉诺坝玄武岩歪长石结构的研究
- 四、江西东北部火山碎屑岩碱性长石结构的研究

一、调制结构及复结构的概念及实验方法简介

彭志忠 西门露露* 王鲜华

(武汉地质学院北京研究生部)

引言

长石是地壳上分布最广泛的造岩矿物之一, 占地壳重量的50%, 地壳体积的60%^[1], 分布在各种成因类型的岩石中。其化学成份及结晶构造的变化都比较复杂。在不同的地质条件下生成的长石有不同的成分及结构状态, 反映了不同的热力学环境。所以, 深入研究长石的化学成分、光学性质、晶体结构及其复结构正确鉴定长石的种类将有助于了解地质体形成的条件, 从而为寻找有用的矿产资源提供有价值的信息。长期以来, 国外进行了大量的人工合成试验, 模拟地质环境, 采用不同的成分、温度、压力, 不同的淬火、退火时间及速度来观

* 有*号者为执笔者。

察长石的结构状态及复结构变化的细节。研究的方法除用经典的光学方法及X-光衍射方法(也是极重要的方法)外,还用电子显微镜来研究长石的微细结构。此外,还用红外光谱、核磁共振、电子自旋、穆斯堡尔谱等方法去研究长石内部原子所处的环境、原子的替代及结构的有序-无序问题。近年还用中子衍射方法进行结构分析,以便较精确地确定Al-Si的占位度,以更好地确定长石的结构状态。上述新的进展对我国国内长石的研究工作也是一个推动,国内近来也做了一些这方面的工作。虽然手段不齐全,但在光性、多晶X-光衍射及单晶照相等方面仍作了不少工作。本文主要用X-光单晶分析方法及少量透射电镜方法对河北汉诺坝长石巨晶及江西东北等地区的碱性长石的复结构包括调制结构、出溶、双晶等特征进行了研究,从而为形成它们的地质环境提供了某些信息。

一、调制结构的一般概念

众所周知,晶体是原子在三维空间周期地排列,三个方向的重复周期一般可以从几个Å到几十个Å。晶体作为一个三维的光栅,利用X-光通过它可以产生各种衍射花样,测定衍射点的强度就可以精确定出晶体内部原子的排列方式。但这样测出的是晶体内部原子理想的排布,即晶体的平均结构。实际上,在自然界形成的矿物晶体,由于生成时温度、压力及成分等的变化,常导致晶体内部结构的局部紊乱,近十几年来,借助高分辨电子显微镜已能在晶胞尺度范围内去研究晶体理想的基本结构的微细变化的细节,即涉及晶体的复结构及调制结构等。

1979年国际调制结构学术会议上,对调制结构作了如下的概括^[1]:调制结构是用来描述晶体基本结构的周期整体或局部被扰乱,往往在基本周期上叠加了一个明显增大的周期,这个周期与基本周期可以是有公度的(commensurate),也可以是无公度的(in-commensurate)。且这个周期常常随着系统的温度、压力或成分的变化而连续变化,若是有公度的则常形成超结构。广义的调制结构概念涉及范围比较广,它包括超结构、短程有序、长程有序、周期双晶、拐点分解(spinodal decomposition)引起的密度调制、出溶引起的两相晶格的共格、半共格等各种结构上的紊乱现象。而狭义的调制结构现象通常指在基本周期上叠加了一个无公度较大周期的调制波,其波长不固定,可以在较大范围内变动。本文提及的调制结构即指此,而复结构则涉及广义的调制结构范畴。

二、密度调制结构、共格出溶交生、横波调制结构的 概念及X-光单晶衍射效应

1. 密度调制(density modulation structure)^[3]

以碱性长石为例,钠长石和钾长石的完全固溶体在出溶(exsolution)沉淀之前常发生不均一化现象,表现为K、Na离子在具堕性的T(Al, Si)-O四面体格架中扩散,并形成K离子富集区及贫乏区(相应为Na离子贫乏区和富集区),但这种变化程度很微小,变化区域却很大,并保持晶体结构为完全连续单一对称的晶格。K、Na离子常沿碱性长石近(100)面网方向偏聚成层状区域。在每个K离子富集区两侧为K离子贫乏区。犹如一种调制波叠加在基本点阵上,这种固溶体的不均一现象称为密度调制,它实质上是晶体结构中原子散射因子在某方向上周期性的变化,因此也可称为散射因子的调制结构。

图1是密度调制结构示意图,其中(a)图中,用圆圈大小表示原子散射因子的大小,格子为厩格子,由于散射因子的变化,在厩格子上叠加了一个周期为 T 的调制波;(b)图示散射因子沿 a^* 方向的变化曲线, Δf_n 是各处散射因子与其平均散射因子之差,它呈正弦波沿 a^* 方向传播,其波长称为调制波波长,调制周期以 T (或 λ)表示。图(c)是相应的倒易格子模式,

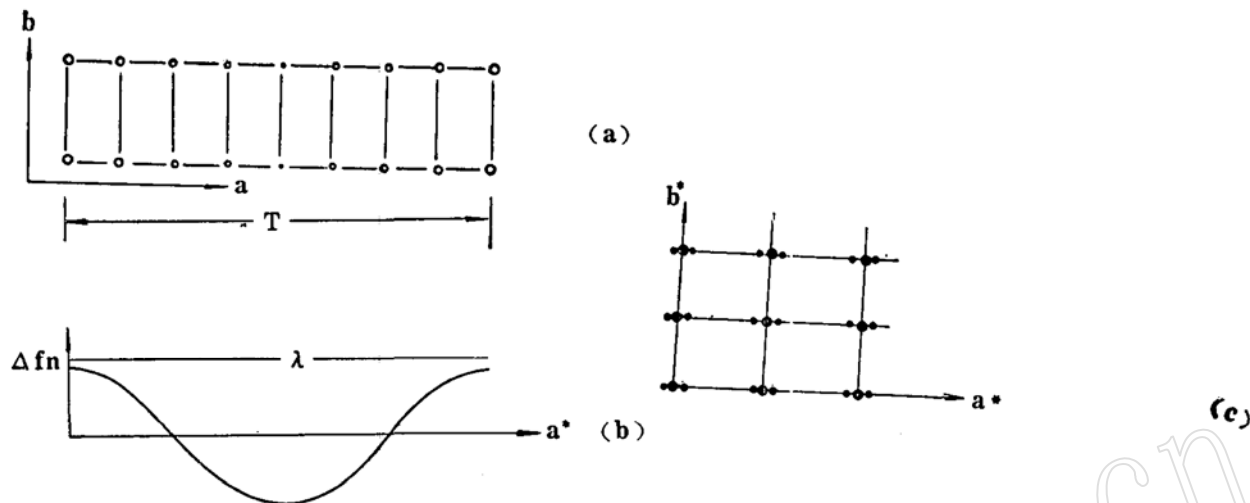


图1 固溶体密度调制结构示意图

Fig. 1 Model of solid solution with density modulation

是理想的密度调制衍射效应。其特点是在每一个主反射两侧出现弱的卫星反射。该卫星点距主反射点的距离与调制波波长呈倒易关系,而卫星反射与主反射连线方向及调制波传播方向一致,即碱性长石K、Na阳离子偏聚面(100)的法线方向。

2. 共格出溶^{[4][5]} (coherent exsolution)

固溶体中出溶的两相晶体结构相似或相同,但化学成分相异的交生,在一定条件下,出溶片晶(lamella)的界面如果维持两相结构的连续则称为共格出溶。对于碱性长石而言,共格意味着碱金属离子的重新分布,而不破坏Al-Si四面体格架在其界面处的连续性,但与密度调制所不同的是有新相的生成。

现以单斜碱性长石为例,并假设出溶片晶平行(100)面网,见图2。由于K、Na离子半径不同而形成的两相,改变了原来格子的均一性,面网间距有错动。如图2(a),虽富Na相与富K相二者的晶格互相平行,但其衍射图为独立的两套衍射点。相反,若为完全共格出溶(图2b),垂直于纸面和二相界的面的竖直面网必需连续通过界面,因此,共格时要求界面两侧的面网调整其面网间距,故竖直面网在界面上部必需弹性地伸长些,下部分则缩小些,同样,垂直于纸面和平行于界面的水平面网也与非共格情况不同,因二者力求b轴长度相同。应力的作用将使水平面网的面网间距在二相界面附近连续变化,而竖直面网则近于等间距,由此可见,共格出溶的钾、钠两相的晶胞大小及形态歪曲了原来成分均一、单一独立相的晶胞,如图2(b)所示的 $hk0$ 衍射图。凡是平行于 a^* 的面网,由于其面网间距在K、Na两相中无变化,故衍射时形成敏锐的点,如 $0k0$ 点子,而平行于(100)的面网,由于K、Na两相的间距不同,其他不垂直界面的面网不仅面网间距不同且方向也不同,因此($h00$)和($hk0$)点子分离成两个点子,两点间以细的条纹(streak)相连。以($h00$)点为例,最大倒易单位的衍射点相应于最小正格子($h00$)的面网间距,即相应于Na相的衍射点。反之,K相的衍

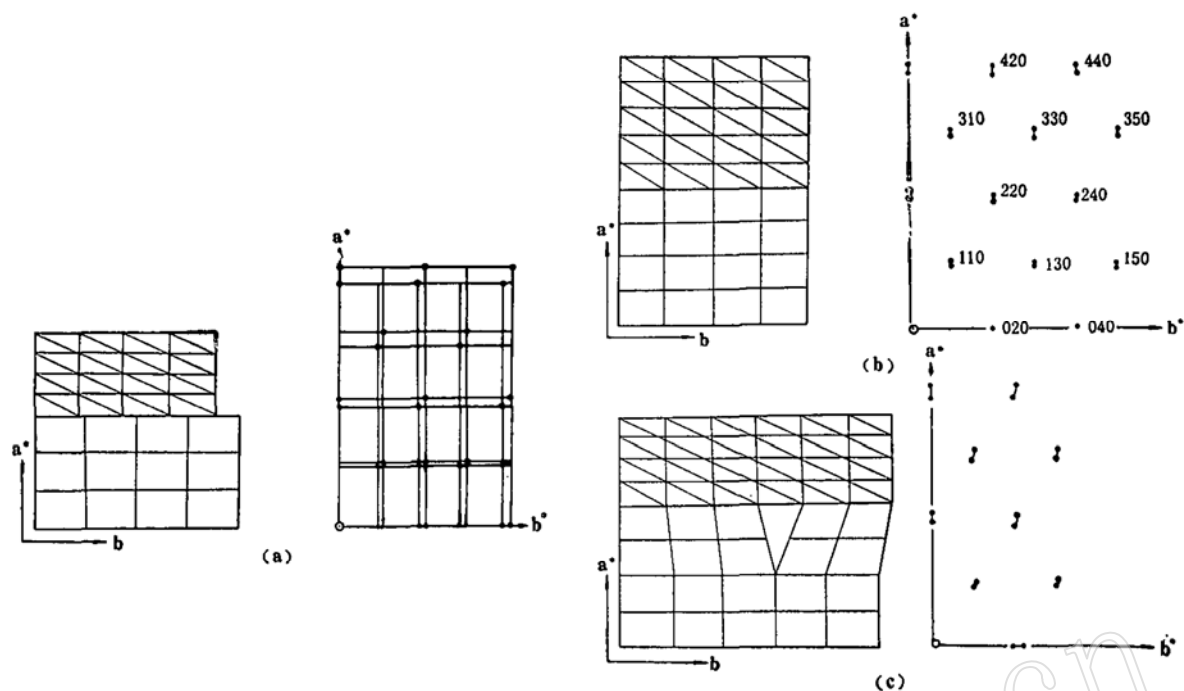


图2 碱性长石固溶体出溶格子示意图

出溶片晶平行(100)面网。(a)非共格, (b)共格, (c)半共格。左为正格子, 右为倒易格子, 斜线示Na相, 其余为K相

(据J.V.Smith, 1974, P. H. Ribbe 1975)

Fig. 2 Schematic illustration of non-coherent(a) coherent (b) and semi-coherent exsolution (c) in solid solution of alkali feldspar

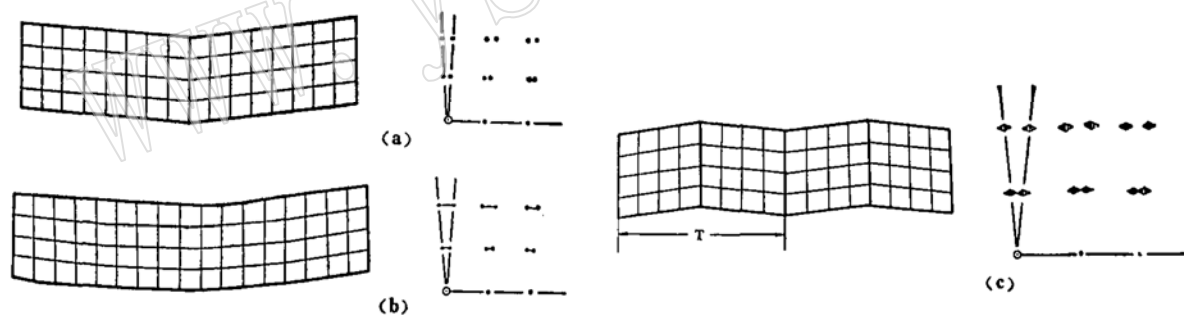


图3 双晶格子示意图

(a)简单双晶 (b)共格双晶 (c)周期双晶
(左为正格子、右为倒易格子)

Fig. 3 Twinning lattice pattern

(a) simple twinning, (b) coherent twinning, (c) regular periodic twinning

射点具最小的倒易间距。二者间以细条纹相连平行界面, 这是面网间距介于K、Na两相最大和最小间距之间的那些面网衍射的结果。细条纹相连表征共格出溶的机制。

随着出溶的不断进行, 两相之间的共格程度发生变化, 形成半共格。在界面处, 两相面网不连续而构成错位现象(图2(c)), 在衍射图上, K、Na两相衍射点由弯曲的衍射纹相连。

3. 双晶化与横波调制 (twining and transverse modulation)

化学成分均匀, 晶体结构双晶化, 产生周期性规则或不规则双晶的交生称横相调制, 与出溶片晶相似, 双晶之间也有共格和非共格之分, (见图3)。若系共格, 双晶单体的格子有连续渐变的关系。图3(a)示非共格双晶, (b)示共格双晶。共格双晶的两个双晶点间有一弱的衍射条纹。如果双晶晶片宽度很有规律, 晶体格子方位有周期性的重复, 此称为周期双晶或双晶超结构。X-光衍射图上可见每一衍射位由一串衍射点组成, 如图3(c)所示。

三、实验方法简介

由于长石的成分、结构的复杂性, 研究它需多种方法配合。本文着重介绍 X-光单晶照相并配合单晶结构分析及透射电镜来研究。

1. X-光单晶分析方法

传统的研究长石除光学方法(偏光镜)及X-光多晶衍射之外, 最常用的是X-光单晶分析方法。单晶照相方法主要包括三种: 旋进照相法、标准定向迴摆照相法、华森堡照相法。三者互相配合使用, 可以揭示长石内部复杂的复结构等现象。单晶结构分析则只能对单一相的长石进行结构测定, 由测出的键长、键角以确定Al在四面体T位置中的占位情况, 从而确定其结构状态。各种方法分述于后:

(1) 旋进照相方法^[6]:

沿晶体某一晶带轴, 绕X-光作旋进运动, 摄取不歪曲的倒易格子面网的投影照片。通常根据长石的外形及解理或在偏光镜下挑选晶粒, 先用单晶迴摆法, 使b轴或b*轴与测角晶架的转轴吻合, 然后分别摄取绕a轴或c轴的零层旋进照片。由此可直接测出b*、c*、 α^* 及a*、 β^* 、 γ^* 。 β 角可以粗略地从摄a轴及c轴时两次大转盘(D)上读数之差得出, 其精度轴长为0.25%, 轴角为0.05°。利用以上测出的数据, 可大致确定长石的结构状态及Na/K之比, 但很不精确。

在摄a、c轴零层倒易格子面网之前, 尚可用锥轴照相法粗略测定a、c轴的轴长及观察劳埃对称。从a轴大小也大致可测定Or含量。

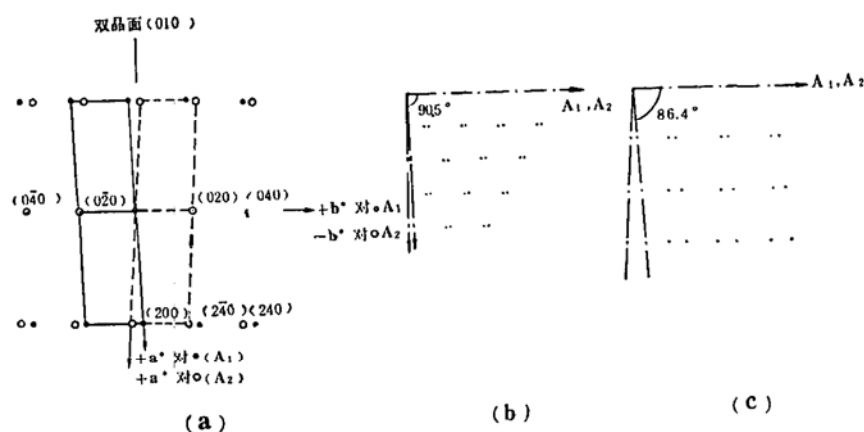


图4 钠长石双晶倒易格子衍射图

(a) 单体A₁、A₂二个倒易格子结合情况。A₁、A₂的b*、-b*吻合。•代表A₁衍射点, ○代表A₂衍射点。图中为简化起见, 未表示c心格子(据F. Laves, 1950)。(b)理想的c轴0层倒易格子旋进图(据J. V. Smith, 1974)。(c)理想的a轴0层倒易格子旋进图(据J. V. Smith, 1974)

Fig. 4 Diffraction pattern of albite twins

由于旋进照片可以摄取不歪曲的倒易格子面网, 可以用它来观察长石的各种双晶、调制波方向及波长、隐纹长石中几个相的共格程度及交生关系十分便利。

今介绍几种常见的双晶在旋进照片中的衍射花样于后。

碱性长石由高温单斜相转成三斜相时, 常常生成钠长石双晶或肖钠长石双晶或M双晶等。图4、图5分别表示两种典型理想的双晶倒易格子图^[7]。

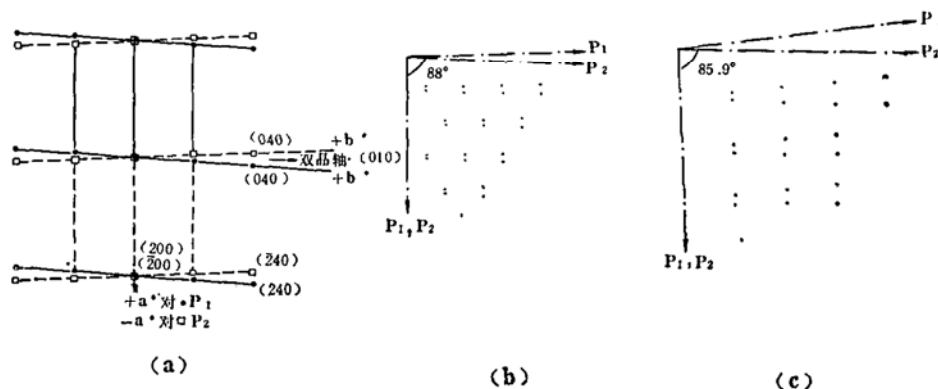


图5 肖钠长石双晶倒易格子衍射图

(a) 单体 P_1 、 P_2 二个倒易格子结合情况。 P_1 、 P_2 的 a^* 、 $-a^*$ 吻合。 $\bullet$ 代表 P_1 衍射点, $\square$ 代表 P_2 衍射点。为了简化图中未表示 c 心格子(据F. Laves 1950)。(b) 理想的 c 轴旋进零层倒易格子衍射图(据J. V. Smith, 1974)。(c) 理想的 a 轴旋进零层倒易格子衍射图(据J. V. Smith, 1974)

Fig. 5 Diffraction pattern of pericline twins

图4在钠长石双晶中, A_1 、 A_2 有共同的 b^* , 故 b^* 方向二个点子重合, 双晶的一对点子对称分布于双晶面(010)两侧, 如图4(a)所示。 a^* 、 c^* 方向出现双晶的二个点子如图4(b)、(c)所示。图5中可见在肖钠长石中, 双晶 P_1 、 P_2 单体有共同的 b 轴, 而 b^* 轴对称分布于双晶轴 b 轴两侧。 b^* 方向出现二个双晶点子, 如图5(a)所示。在 a^* 、 c^* 方向双晶点重合为一点, 如图5(b)(c)所示。

此外, 许多研究长石的学者认为当单斜晶系转为三斜晶系时易于形成M双晶, 常见于微斜长石或歪长石中。1950年F. Laves摄取了 $[104]$ 轴M双晶照片, 可见在 $hk0$ 位置上, 一个点分裂成4个点子, 并遵循钠长石双晶与肖钠长石双晶律二者的叠加。此种现象有人用选区电子衍射摄取了 $[102]$ 轴方向的衍射图, 点子分布类似X-光旋进照片^[8]。图6表示M双晶的理想模式。

此外, 用旋进照相机可以不歪曲地摄取几个相共格或不共格交生、各种调制结构, 例如密度调制或横波调制等的倒易格子图象, 其衍射花样与前节所述图1、2、3的理想衍射模式完全可以对比, 在此不赘述。由于旋进照相能摄取不歪曲的倒易格子, 故有利于研究长石各种调制结构及复结构。但此方法受仪器性能所限, 其收集到的衍射点少, 高角度的点子常收不到。故宜用波长短的X-光光源为好。

(2) 迴摆照相机法:

安置 b 轴或 b^* 轴与测角晶架的转轴吻合, 并以(001)解理面平行X-光作为迴摆中心, 迴摆角取 $\pm 7.5^\circ$, 摄取定向迴摆照片。若照片上在零层线上可见对称于中心的一对(001)与(00 $\bar{1}$)衍射点, 则可确认定向无误。此种照片易于指标化, 是研究长石的常规方法。在6层以内(k 指标到6, 从 $h0l$ 到 $h6l$)的衍射点均可收到。高角度点子收集范围广, 是研究长

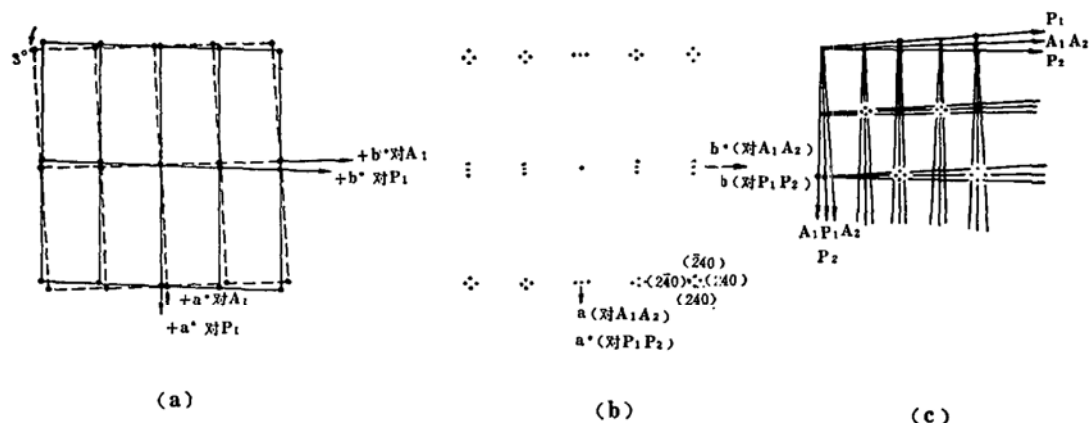


图 6 M双晶倒易格子衍射图

(a) M双晶中钠长石双晶A₁单体与肖钠长石双晶P₁单体的组合关系 (为了简化双晶单体A₂、P₂未表示)。二个格子夹角3° (据F. Laves 1950) (b) 理想的[104]轴零层旋进照相衍射模式 (据F. Laves, 1950) (c) 理想的c轴零层旋进照相模式 (据J. V. Smith, 1974)

Fig. 6 Diffraction pattern of M-twin

石复结构等极有效的手段。

在迴摆照片中常见的钠长石双晶及肖钠长石双晶的衍射模式见图7。钠长石双晶点在各层上, 每个点分裂成二个点并处于等 ϵ 曲线上, 如图7(b)所示。而肖钠长石双晶的二个点则分布在非零层上的等 ϵ 线上, 如图7(a)所示。而零层上的两点则合成一点。

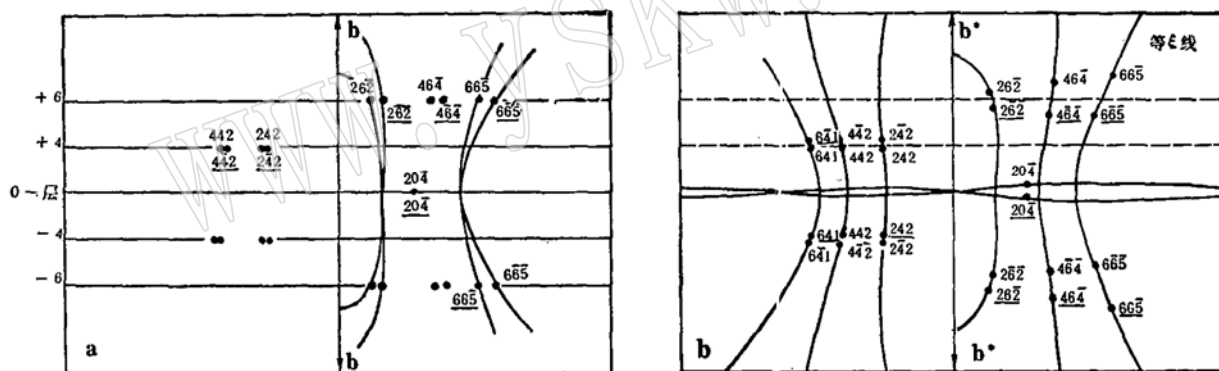


图 7 迴摆图上双晶的衍射花样 (据J. V. Smith, 1974)

(a) 肖钠长石双晶 (b) 钠长石双晶

Fig. 7 Diffraction pattern of X-ray oscillation of pericline and albite-twinned feldspars

根据两种双晶点分离成两个点, 由分离距离的大小, 经计算可以求出 α^* 、 γ^* 。从而可以大致估算出在隐纹长石中, 某一相的Or和Ab的含量⁽¹⁾。

各种典型的调制结构、复结构的衍射花样用迴摆法均能得到极好的反映, 详见本系列文章第二、三、四篇, 结合样品逐个描述, 此略。

(3) 华森堡照相法:

常用的华森堡照相方法可以分层摄取倒易格子面网照片, 可测定晶胞参数及对称, 但对研究长石用常规的透射华森堡照相法测出的晶胞参数的精度是不够的, 且由于倒易格子歪曲, 对研究长石的复杂结构现象带来一定困难。但由于它摄取的衍射点范围广, 所以仍不失为一种有效的方法, 若能用背射华森堡方法, 则测出的轴长精度达0.01%, 轴角达0.01°, 故可

以较精确地测定Or成份。有关典型的衍射花样见后续的几篇文章,此略。

(4) 单晶结构测定方法及长石结构状态的确定:

选择大小合适的单晶,用四园衍射仪收集强度数据,然后用SHLEX-76结构分析程序修正结构,用精确算出的键长、键角来确定长石的结构状态。这是研究均一相长石的重要手段。个别虽具两相的长石,或具调制结构的长石,由于副相或卫星衍射点的强度很弱,不影响主相强度数据的采集,故仍可用单晶结构分析方法研究主相的结构状态。本次工作对几个样品进行了结构分析。详见后续的文章。

2. 透射电镜方法

经典的X-光方法研究矿物是假定所有晶胞相同,即只能测出数千个单位晶胞平均结构,对X-光衍射出的卫星点、边带衍射、星芒等这些反映结构内部局部微小变化的细节是无法用X-光方法深入研究的。近年来电子显微术的重大进展例如超高压电镜的问世以及离子减薄技术的应用,使电镜在研究矿物,特别是对矿物的微结构(fine-scale texture or microstructure)及复结构等方面开辟了新的前景。国外在研究长石的超显微双晶(sub X-ray perthite)、出溶片晶、相变、反相畴、晶体形变等做了大量的工作^[10]。本次工作因条件所限,仅对个别样品做过电镜工作。

(1) 实验方法:

制样:由于长石有完全的(001)、(010)解理,制样可以用解理法。若有巨粒晶体样品也可先磨制成定向薄片(0.03mm),然后移到离子减薄器上减薄至数十至数百Å的薄膜,以备在电镜下观察。

上镜操作步骤:本次工作使用JEM-200cx透射电镜,用液氮冷却以防样品污染并减少辐射损伤,镜体真空度至 10^{-5} mm/Hg之后,可以开始工作。电压用200kv,束流95—115 μ A,开始对镜子照明系统及呈象系统的对中及合轴调整,然后调节物镜象散,使镜子处于最佳工作状态,若需摄高分辨象,选择好颗粒方位之后,应再次调节象散,一经调好,迅速照相,以减少样品的辐射损伤。

晶粒方位的选取是借助于观察选区电子衍射图来确定。选区衍射在0.5~2 μ 的微区内进行。取向的调节用双倾台。JEM-200cx电镜具顶插式双倾台,可绕两个正交的轴倾斜 $\pm 10^\circ$ 。样品取向调节好之后,先摄取电子衍射图,然后在一定放大倍数下摄显微象(明场象或暗场象)。然后增大放大倍数,仔细调节象散,摄高分辨晶格象等。

(2) 电镜显微照片分析举例:

1984年Brown及Parsons用电镜系统观察了Klokken地区正长岩中长石发育生成微纹长石的各个阶段^[11],并列出了电镜显微照片的标准模式,这使人们用电镜研究长石时可与之对比,从而获得某些生成的成因信息,见图8,并加以说明。

通常火山喷发时,喷出物骤冷,此时碱性长石常保持均一状态;一般为透长石相,见图8中1,2。火山流出的熔岩及小型侵入体,其冷却速度由快逐渐变慢,此时出现细的隐纹长石,或有拐点分解的未粗化的产物,即密度调制结构现象。继续冷却后有出溶现象,且出溶片晶开始粗化,逐步有复杂的出溶片晶的界面,有波状的及(661)方向的界面等,如图8中8、9。此外,周期双晶常常出现在富钠的三斜出溶片晶之中,并遵循钠长石双晶律,少数形成肖钠长石双晶,有时二种双晶均有出现,如图8中的6所示。

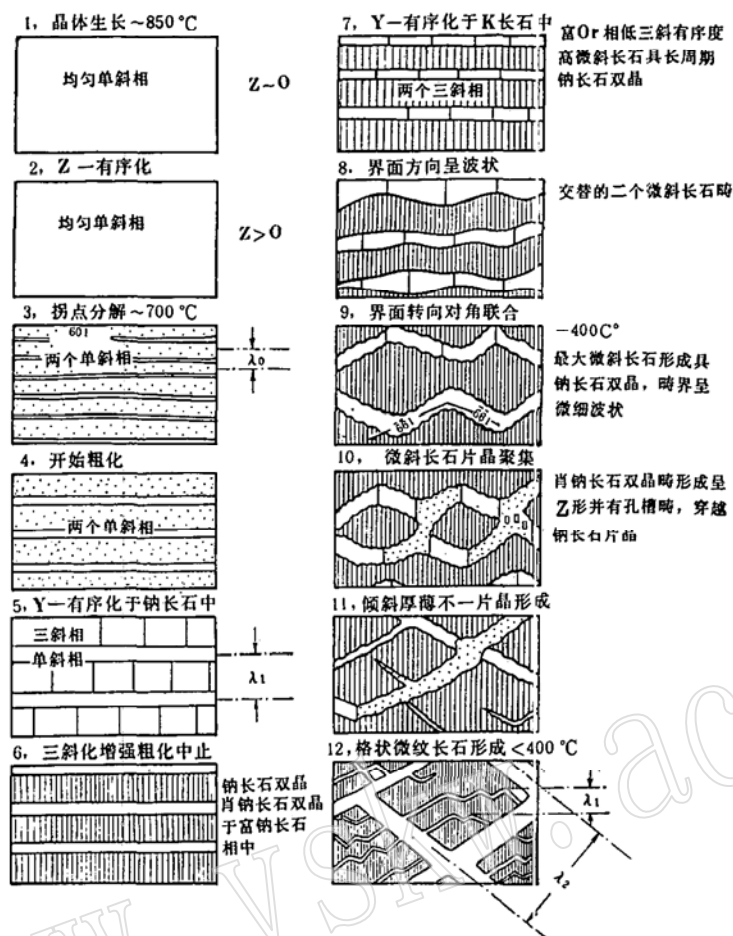


图8 格状微纹长石生成过程中不同阶段

(据Brown and Parsons, 1984)

 λ_0 、 λ_1 调制波波长, λ_2 次级调制波波长

Fig. 8 Stage in the development of braid microperthites in Klokken layered syenite

总之, 由于不同的温度条件, 特别是冷却速度及退火时间不同, 在碱性长石中可产生不同的微结构现象^[12]。传统的X-光方法对于复杂的微细结构变化, 可以观察衍射点的边带衍射、卫星衍射等现象, 配合实验矿物学的研究, 从而间接推断长石生成时的温度、压力、冷却速度等成因信息。而透射电镜方法却进了一步, 不仅能看到选区电子衍射花样, 还可以对样品直接观察显微象、晶格象、结构象等, 从而成为研究长石微细结构、探讨成因信息极有效而直观的手段。

电镜工作得到中国科学院物理所樊汉节、李方华及中国科学院金属所郭可信、邹本三、叶恒强等同志指导。周珣若副教授审阅了初稿。在此一并致谢。

参 考 文 献

- 【1】 王灏等, 1984. 系统矿物学 (中册), p. 26. 地质出版社。
- 【2】 A. P. I. 1979. Modulation Structure, p. 3—4.
- 【3】 郭可信等, 1965. X-射线学及电子显微术的进展, p. 26—34. 上海科学技术出版社。
- 【4】 Ribbe, P. H. 1975. Feldspar Mineralogy, Y9—Y15.
- 【5】 Smith, J. V. 1974. Feldspar Minerals, vol. 1. p. 127—131.

- (6) 同(5), p. 179—191.
- (7) Laves, F. 1950. The Lattice and Twinning of Microcline and other Potash Feldspars. J. Geology. Vol. 58, p. 548—571.
- (8) William L. Brown, 1984. Feldspar and Feldspathoids. p. 373—381.
- (9) Smith J. V. et al. 1955. The Alkali Feldspars, II A Simple X-ray Technique for the Study of Alkali Feldspars. Amer. Min., Vol. 40, p. 733—747.
- (10) 同(8), p. 21—29.
- (11) 同(8), p. 338—343.
- (12) 同(4), Y35—Y57.

A Study of Modulated Structures and Complex Structures in Natural Alkali Feldspars;

I. A Brief Introduction to the Concepts of Modulated Structures and Complex Structures and Their Experimental Methods

Peng Zhizhong, Ximen Lulu, Wang Xianhua

Abstract

This paper involves some of the concepts of modulated structures and complex structures of alkali feldspars and their experimental methods.

Complex structures such as density modulation, periodic twinning and coherent exsolution etc. were found in alkali feldspars of Hanmuoba basalt, Zhangjiakou, Hebei Province, and in the volcanic clastic rocks of northeastern Jiangxi Province.

X-ray single crystal analysis methods such as precession method, standard orientation oscillation, Weissenberg method and transmission electron microscopy (TEM) were employed to reveal these complex structures of alkali feldspars, and the techniques are outlined in this paper.

二、河北省汉诺坝玄武岩斜长石巨晶体的发现及晶体结构测定

彭志忠 王鲜华* 西门露露

(武汉地质学院北京研究生部)

汉诺坝玄武岩位于河北省张北县、尚义县东部,崇礼县西缘及万全县北缘。构造位置上

* 有*号者为执笔者,现在河北地质学院工作。

表 1 斜长石化学成分

Table 1 Chemical composition of plagioclase

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	H ₂ O ⁺	TiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	H ₂ O ⁻	BaO	SrO	P ₂ O ₅	总计
Xh-3*	62.66	23.11	7.51	1.16	4.35	0.27		0.00	0.24	0.03	0.00		105°C 烘干样	0.061	0.36	0.02	99.77
Xh-53**	60.75	24.06	7.20	0.79	6.35		0.24	0.006		0.075	0.00	0.018		0.00	0.12		99.61
Xh-2	60.36	24.11	6.75	0.56	7.38		0.24	0.057		0.019	0.013	0.061		0.49	0.16		100.20
Xh-18	62.05	22.57	7.45	1.18	6.10		0.29	0.066		0.042	0.013	0.007		0.10	0.32		100.19

* 为化学分析结果，由研究生部黄仕永完成，其余为电子探针样，由研究生部邵道乾完成。

** 测定晶体结构样。

表 2 斜长晶体化学式及其端员组份比 (Mol.%)

Table 2 Crystal-chemical formula and end-member compositions (Mol. %) of plagioclase

样号	晶 体 化 学 式												Or	Ab	An
Xh-3*	(Na 0.651	Ca 0.206	K 0.000	Sr 0.011	Ba 0.001	0.929	Al 1.213	Si 2.798	O 8				7.16	70.51	22.33
Xh-2	(Na 0.587	Ca 0.555	K 0.032	Ba 0.009	Sr 0.004	0.987	Al 1.274	Si 2.706	O 8				3.26	60.31	36.43
Xh-53**	(Na 0.626	Ca 0.305	K 0.045	Sr 0.003	Ba 0.000	0.979	Al 1.271	Si 2.724	O 8				4.63	64.14	31.23
Xh-18	(Na 0.645	Ca 0.293	K 0.067	Sr 0.008	Ba 0.002	0.015	Al 1.191	Si 2.777	O 8				6.71	64.18	29.11

*, ** 说明同表1。

处于燕山断隆的南缘、张家口—平泉—北票深断裂与张家口—天津隐伏断裂的交汇部位。汉诺坝玄武岩以裂隙式溢流性的熔岩相为主,亦有火山喷发型的火山锥、火山口等岩相。岩性属碱性玄武岩和拉斑玄武岩,时代为第三纪^[1]。

一、斜长石巨晶体的发现

众所周知,深源玄武岩常富含各种幔源铁镁质包体及深部晶出的巨晶体。汉诺坝玄武岩正是这种岩体的典型代表。从1921年英国学者把本区玄武岩称为汉诺坝玄武岩至今已有60多年的历史。由于汉诺坝玄武岩分布广,深源包体及巨晶体种类极为丰富,故长期以来吸引着众多岩石学家对其进行了广泛深入的研究,从而积累了丰富的岩石学资料,并初步建立了岩浆演化模式。随着研究的深入,发现的巨晶体矿物种类也越来越多。然而,半个多世纪以来,一直把本区分布较广的长石巨晶体笼统称为歪长石。笔者1983年以研究玄武岩中歪长石复结构为课题,对汉诺坝玄武岩进行了野外地质工作,对四个工作点的长石巨晶体经化学分析和电子探针分析发现,本区发育最完整的新世^[1]张北县十字街火山口中的长石巨晶体属斜长石而不是歪长石。表1、2分别是其四个样品的成分、晶体化学式和三端元(钾长石Or、钠长石Ab、钙长石An)组分的摩尔百分含量。将其投于J.V.Smith (1974)^[8]长石高温系列分类图中(图1),它恰好位于奥中斜长石区,An在30%左右变化。

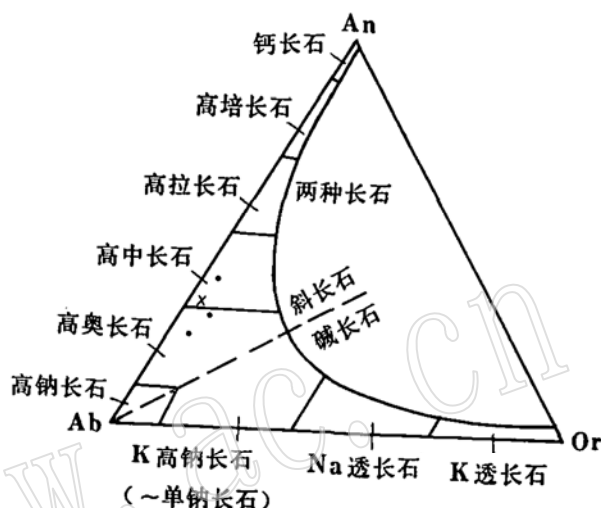


图1 高温三元系长石分类

(据Smith, 1974)

Fig. 1 Schematic diagram illustrating the composition and nomenclature of feldspars quenched at high temperature in the Or-Ab-An system.

二、长石巨晶体与寄主玄武岩岩性的关系

汉诺坝玄武岩岩性分碱性和拉斑玄武岩两类。笔者工作结果表明,歪长石巨晶体的寄主玄武岩为碱性玄武岩,而奥一中斜长石的寄主岩为拉斑玄武岩。因此,长石巨晶体出现的种类与其寄主岩的成分有关。

玄武岩中巨晶体是其寄主玄武岩浆在高温高压下晶出的矿物,这一成因观点已被众多的研究者所接受和证实。因此,巨晶体成分与寄主岩成分的相关性是不容置疑的。汉诺坝碱性玄武岩中出现歪长石巨晶体,而拉斑玄武岩中出现奥一中斜长石巨晶体,其原因在于二者寄主岩的成分不同。表3、4是汉诺坝区三个岩体的岩石化学成分及CIPW计算结果。从CIPW计算出的or、ab和an标准矿物分子含量可见,大麻平火山锥和掏药湾岩筒相对富钾长石分子,而贫钙长石分子;相反,十字街火山口贫钾长石分子而富钙长石分子,而且,它们在长石三元组份图上靠近Ab端。因此,大麻平和掏药湾中的长石巨晶体为近Ab端富钾贫钙的长石,即歪长石,十字街火山口则为富钙贫钾的奥一中斜长石。

表3 汉诺坝玄武岩化学成分*

Table 3. Chemical composition of basalts from Hannuoba(W. %)

产地及产状	时代	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总合
大麻坪火山锥	中新世	硷性玄武岩	43.07	2.38	12.42	5.05	8.65	0.15	9.48	8.84	2.83	1.80	1.00	4.93	100.60
掏药湾岩筒	中新世	硷性玄武岩	43.84	2.72	18.86	5.19	7.45	0.10	5.67	9.64	2.71	1.78	0.92	5.81	99.67
十字街火山口	上新世	拉斑玄武岩	53.04	1.27	15.60	3.07	6.93	0.17	6.42	8.82	3.54	0.83	0.24	1.36	100.75

* 据河北地质学院冯家麟

表4 汉诺坝玄武岩CIPW标准矿物(W_B%)Table 4 C. I. P. W. normative minerals of basalts from Hannuoba (W_B%)

产地及产状	岩石名称	标准矿物														Q
		ap	il	mt	or	ab	an	ne	di			ol		hy		
									wo	en	fs	fa	fo	en'	fs'	
大麻坪火山锥	碧玄岩	2.35	4.52	7.29	10.57	27.16	16.02	3.68	9.20	6.33	2.13	4.46	12.14			
掏药湾岩筒	碧玄岩	2.09	5.19	7.62	10.64	22.76	20.28	0.20	9.33	6.36	2.23	2.09	5.42			
十字街火山口	石英拉斑玄武岩	0.47	2.38	4.40	5.16	29.78	24.17		7.7	4.6	2.7			11.40	6.69	0.97

三、十字街中长石晶体结构测定

用来进行晶体结构测定的汉诺坝十字街火山口中斜长石晶体X光单晶照相表明,它为单晶,无与出溶有关的各种复结构。关于奥一中斜长石的晶体结构前人也有所研究⁽²⁾⁽³⁾,但对幔源玄武岩中高温斜长石巨晶体的结构解析却未见报导。

1. 基本矿物学特征

进行晶体结构测定的晶体样品无色透明,(001)、(010)解理发育,其化学成分、晶体化学式见表1、2Xh-53样品。因它介于奥长石、中长石之间,钙分子含量略高于奥长石而进入中长石的成分范围(图1中的×点),又因是玄武岩中的巨晶体,故称其为高温偏酸性中长石。二轴晶负光性,(-2V)=82°,Ng=1.551, Nm=1.547, Np=1.542,实测比重为2.66g/cm³(JN-A-25型扭力天平,介质为CCl₄)。空间群C₂v。对用于结构测定的晶体分别拍摄了a轴、b轴X光迴摆衍射图及相应的华森堡零层衍射图。由这些衍射图求得其粗略晶胞参数为:a=8.16 Å, b=12.95 Å, c=7.09 Å, α=92.08°, β=116.19°, γ=91.78°。

2. 晶体结构测定

(1) 实验方法及数据处理

所测晶体为大小约0.1×0.1×0.05mm³的单晶体。在FASA-II S四圆衍射仪上对其进行了强度数据的收集。采用MoKα射线、石墨单色器。采用2θ-ω联合扫描方式,扫描常数由公式Δω=0.9759+0.5tgθ确定,扫描速度为4°/分,背景扫描时间为5秒,并且每收集100个衍射点便收集3个参考点作为标准,以检验数据收集的可靠性。这样共收集了3°<2θ<65°的衍射点2675个。将|F₀|<3δ|F₀|的点视为不可观察点,这样用于计算的独立点为1256

个。对衍射强度作了LP因子修正, 未做吸收校正。LP因子计算公式为:

$$[LP]^{-1} = \frac{\sin 2\theta (1 + \cos^2 2\theta M)}{1 + \cos^2 2\theta \cos^2 2\theta M}$$

($2\theta M$: 单色器的 2θ 衍射角)

取14个 $2\theta > 29^\circ$ 、强度较大的点, 对其定位参数进行最小二乘法修正, 求得其精确的晶胞参数为: $a = 8.155(2) \text{ \AA}$, $b = 12.851(3) \text{ \AA}$, $c = 7.094(1) \text{ \AA}$, $\alpha = 93.32(2)^\circ$, $\beta = 116.29(1)^\circ$, $\gamma = 90.17(2)^\circ$, $V = 665.1(3) \text{ \AA}^3$ 。

表5 原子坐标、占有率和热振动参数

Table 5 Coordinations, occupancies and thermal vibration parameters of atoms

原子	原子坐标			占有率		
	X	Y	Z	K		
T ₁ O	0.0085(5)	0.1648(3)	0.2159(6)	0.929(19)		
T _{1m}	0.0041(5)	0.8157(3)	0.2298(6)	0.899(18)		
T ₂ O	0.6889(5)	0.1088(3)	0.3207(6)	0.8851(189)		
T _{2m}	0.6840(5)	0.8786(3)	0.3551(6)	0.9071(186)		
O _A (1)	0.0026(14)	0.8647(9)	0.0199(17)	1.0000		
O _A (2)	0.5883(12)	0.9912(7)	0.2803(16)	1.0000		
O _B (O)	0.8171(14)	0.1093(8)	0.1947(17)	1.0000		
O _B (m)	0.8192(13)	0.8501(8)	0.2484(18)	1.0000		
O _C (O)	0.0167(13)	0.2913(8)	0.2783(17)	1.0000		
O _C (m)	0.0176(13)	0.6872(7)	0.2190(17)	1.0000		
O _D (O)	0.1983(13)	0.1111(7)	0.3882(15)	1.0000		
O _D (m)	0.1894(13)	0.8694(8)	0.4249(16)	1.0000		
M	0.2703(7)	0.0098(8)	0.1278(13)	0.9521(223)		

原子	热振动参数*					
	U ₁₁	U ₂₂	U ₃₃	U ₂₃	U ₁₃	U ₁₂
T ₁ O	0.0101(17)	0.0153(18)	0.0071(16)	-0.0022(13)	0.0053(13)	-0.0039(12)
T _{1m}	0.0082(17)	0.0141(18)	0.0063(17)	-0.0026(13)	0.0043(13)	0.0017(12)
T ₂ O	0.0071(17)	0.0074(17)	0.0068(17)	-0.0016(12)	0.0029(13)	-0.0009(11)
T _{2m}	0.0082(17)	0.0088(16)	0.0077(16)	-0.0008(12)	0.0040(13)	-0.0013(12)
O _A (1)	0.0226(50)	0.0449(67)	0.0185(50)	-0.0043(49)	0.0125(42)	-0.0031(46)
O _A (2)	0.0167(43)	0.0177(43)	0.0233(49)	-0.0023(39)	0.0085(39)	-0.0046(33)
O _B (O)	0.0274(52)	0.0243(50)	0.0284(56)	-0.0052(45)	0.0193(46)	-0.0070(41)
O _B (m)	0.0192(50)	0.0311(55)	0.0331(61)	-0.0061(50)	0.0136(48)	0.0061(40)
O _C (O)	0.0227(51)	0.0252(51)	0.0285(57)	-0.0086(46)	0.0138(45)	-0.0052(40)
O _C (m)	0.0214(46)	0.0171(44)	0.0241(51)	-0.0015(41)	0.0072(41)	0.0017(36)
O _D (O)	0.0266(48)	0.0111(41)	0.0174(45)	0.0080(36)	0.0070(39)	0.0032(34)
O _D (m)	0.0235(50)	0.0232(49)	0.0194(50)	-0.0046(41)	0.0062(41)	-0.0041(39)
M	0.0174(25)	0.1561(89)	0.0843(59)	-0.0923(63)	0.0030(27)	0.0038(33)

* 热振动参数计算公式: $\exp[-(U_{11}h^2a^{*2} + U_{22}k^2b^{*2} + U_{33}l^2c^{*2} + 2U_{12}hka^{*}b^{*} + 2U_{13}hla^{*}c^{*} + 2U_{23}klb^{*}c^{*})]$

(2) 结构解析

结构解析是用SHELX-76程序在U-1500计算机上进行的。结构解析首先引用前人的长石原子坐标⁽⁴⁾进行Fc计算,用全矩阵最小二乘法对晶胞中所有原子坐标及各向同性温度因子进行修正,从而得到的偏离因子R为0.015。而后,用全矩阵最小二乘法对原子坐标参数、各向异性温度因子及M阳离子和四面体T位阳离子占有率加权修正了三轮,最后由公式 $R = \sum ||F_o| - |F_c|| / \sum F_o$ 计算,R因子降到0.096,参加计算的共1256个独立衍射点。其原子坐标、热振动参数及部分键长、键角分别见表5、6、7、8、9。表中括号内的数字代表标准偏差值。

表 6 T—O键长(Å)

Table 6 T—O bond distances (Å)

T ₁ O—O _A (1)	1.673(10)	T _{1m} —O _A (1)	1.629(12)	T ₂ O—O _A (2)	1.665(9)	T _{2m} —O _A (2)	1.647(10)
T ₁ O—O _B (O)	1.655(10)	T _{1m} —O _B (m)	1.630(10)	T ₂ O—O _B (C)	1.649(10)	T _{2m} —O _B (m)	1.623(10)
T ₁ O—O _C (O)	1.653(10)	T _{1m} —O _C (m)	1.655(10)	T ₂ O—O _C (m)	1.639(10)	T _{2m} —O _C (O)	1.637(9)
T ₁ O—O _D (O)	1.671(10)	T _{1m} —O _D (m)	1.645(10)	T ₂ O—O _D (m)	1.635(10)	T _{2m} —O _D (O)	1.636(10)
平 均	1.663	平 均	1.640	平 均	1.647	平 均	1.636

表 7 O—O键长(Å)

Table 7 O—O bond distances (Å)

四面体	O _A —O _B	O _A —O _C	O _A —O _D	O _B —O _C	O _B —O _D	O _C —O _D	平 均
T ₁ O	2.610	2.792	2.653	2.725	2.787	2.714	2.714
T _{1m}	2.626	2.720	2.589	2.704	2.712	2.712	2.677
T ₂ O	2.692	2.603	2.659	2.714	2.720	2.738	2.688
T _{2m}	2.691	2.632	2.652	2.679	2.664	2.709	2.671
平均	2.655	2.687	2.638	2.706	2.721	2.718	2.688

表 8 M—O键长(Å)

Table 8. M—O bond distances (Å)

M—O _A (1)	M—O _A (1)	M—O _A (2)	M—O _A (2)	M—O _B (O)
2.704	2.580	2.346	3.558	2.495
M—O _B (m)	M—O _C (O)	M—O _C (m)	M—O _D (O)	M—O _D (m)
3.120	3.398	2.886	2.478	3.130

四、讨 论

将所测结构的晶体与成分相近的奥长石从成分、晶胞参数、键长和四面体Al含量上进行对比(表10)表明:(1)十字街火山口偏酸性中长石的晶胞参数与成分均一化的奥长石相近,而和伟晶岩的低温奥长石不同,主要表现在高温者 γ 为钝角,而低温者 γ 为锐角。同样,

表 9 O—T—O和T—O—T键角(°)
Table 9 O—T—O and T—O—T bond angles(°)

O—T—O (°)			
T ₁ O 四面体		T ₂ O 四面体	
O _A (1)—T ₁ O—O _B (O)	103.3(5)	O _A (2)—T ₂ O—O _B (O)	108.6(5)
O _A (1)—T ₁ O—O _C (O)	114.2(6)	O _A (2)—T ₂ O—O _C (m)	104.0(5)
O _A (1)—T ₁ O—O _D (O)	105.0(5)	O _A (2)—T ₂ O—O _D (m)	107.2(6)
O _B (O)—T ₁ O—O _C (O)	110.9(5)	O _B (O)—T ₂ O—O _C (m)	111.2(6)
O _B (O)—T ₁ O—O _D (O)	113.8(6)	O _B (O)—T ₂ O—O _D (m)	111.8(5)
O _C (O)—T ₁ O—O _D (O)	109.5(5)	O _C (O)—T ₂ O—O _D (m)	135.5(5)
平 均	109.5	平 均	109.4
T _{1m} 四面体		T _{2m} 四面体	
O _A (1)—T _{1m} —O _B (m)	107.3(6)	O _A (2)—T _{2m} —O _B (m)	110.7(6)
O _A (1)—T _{1m} —O _C (m)	111.8(6)	O _A (2)—T _{2m} —O _C (O)	106.4(5)
O _A (1)—T _{1m} —O _D (m)	104.5(5)	O _A (2)—T _{2m} —O _D (O)	107.8(5)
O _B (m)—T _{1m} —O _C (m)	110.7(6)	O _B (m)—T _{2m} —O _C (O)	110.5(5)
O _B (m)—T _{1m} —O _D (m)	111.8(5)	O _B (m)—T _{2m} —O _D (O)	109.6(5)
O _C (m)—T _{1m} —O _D (m)	110.5(5)	O _C (O)—T _{2m} —O _D (O)	111.7(6)
平 均	109.4	平 均	109.5
T—O—T (°)			
T ₁ O—O _A (1)—T _{1m}	144.2(8)	T ₁ O—O _C (O)—T _{2m}	131.3(6)
T ₂ O—O _A (2)—T _{2m}	128.6(6)	T _{1m} —O _C (m)—T ₂ O	130.9(6)
T ₁ O—O _B (O)—T ₂ O	139.8(6)	T ₁ O—O _C (O)—T _{2m}	134.5(6)
T _{1m} —O _B (m)—T _{2m}	159.3(8)	T _{1m} —O _D (m)—T ₂ O	147.8(7)
平均: 139.8			

表 10 成分相近的斜长石对比

Table 10 Comparison of some plagioclases with similar compositions

产 状	伟晶岩 透镜体 ⁽³⁾	低温加热 均一化 ⁽²⁾	拉斑玄武 岩火山口	产 状	伟晶岩 透 镜 体	低 温 加 热均一化	拉斑玄武 岩火山口
成 份	An28	An27.8 Ab69.9 Or2.3	An31.23 Ab64.14 Or4.03	T ₁ O—O	1.700	1.662	1.663
a(Å)	8.169(3)	8.1733(6)	8.155	T _{1m} —O	1.637	1.649	1.639
b(Å)	12.851(4)	12.8818(5)	12.851(3)	T ₂ O—O	1.683	1.649	1.647
c(Å)	7.124(2)	7.1103(6)	7.094(1)	T _{2m} —O	1.639	1.649	1.636
α(°)	93.631(3)	93.314(6)	93.32(2)	t ₁ O	0.678	0.314	0.382
β(°)	116.40(2)	116.282(4)	116.29(1)	t _{1m}	0.193	0.31	0.229
γ(°)	89.46(2)	90.275(4)	90.17(2)	t ₂ O	0.201	0.31	0.276
空间群	C ₁	C ₁	C ₁	t _{2m}	0.208	0.31	0.202

钠长石的高结构态和低结构态也有类似情况^{[5],[6]}。由此可见,结构态的不同影响着富钠斜长石的晶胞参数,尤其表现在γ角的变化上;(2)已知长石各四面体Al的含量(ti)与T—O键长和成分有关。根据下列公式:

$$ti = 0.25 (1 + An) + (\langle Ti-O \rangle - \langle T-O \rangle) / 0.13^{(7)}$$

(其中: An 为钙分子的摩尔百分数; $\langle Ti-O \rangle$ 为各四面体的平均键长; $\langle T-O \rangle$ 为所有 $Ti-O$ 的平均键长)

将所计算得到的相应键长代入上式求出了各四面体的 Al 含量 (见表10)。所测晶体四面体 $T-O$ 键长和经高温处理的高奥长石相近, 二者四面体 Al 含量也比较接近, 因而, 二者的结构态相似, 均属高结构态。但 Al 占位还表明, 二者均在一定程度上偏离了完全无序的 Al/Si 分布, 而十字街火山口的中长石似乎有序度略偏高。

实验工作中得到了研究生部X光实验室施倪承、马喆生、张建洪、韩绍绪等同志的指导和帮助。野外工作得到了河北地质学院冯家麟、谢嫚泽等同志的热情指导和帮助。化学分析和电子探针分析得到了研究生部化学分析室杨风华、黄仕永、电子探针室邵道乾和陈代璋等老师的热情帮助。研究生部实验及工艺岩石研究室周珣若副教授在百忙中审阅了初稿。在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 冯家麟等, 1982. 汉诺坝玄武岩及其深源包体. 河北地质学院院报, 第1—2期, p. 43—65页。
- [2] Kroll, H., 1978. *Pgys. Chem. Minerals*, v. 3.
- [3] Phillips, N. W., 1971. The Crystal Structures of Two Oligoclases: A Composition with Low and high Albite. *Z. Kristallogr. Bd.* 133, S43—65
- [4] George, E. H., Gorden, E. B., 1982. Low Albite: an X-ray and Neutron Diffraction Study. *Am. Mineral.*, v. 65, p. 986—995.
- [5] Prewitt, C. T., Suend, S., 1976. The Crystal Structures of High Albite and Monalkite at High temperatures. *Am. Mineral.*, v. 61, p. 1213—1225.
- [6] Ferguson, R. B., 1958. The crystal Structure of Low-Temperature and High-Temperature Albites. *Acta Crystal.*, v. 11, p. 331—345.
- [7] Ribbe, P. H., 1974. *Feldspar Mineralogy*.
- [8] Smith, J. V., 1974. *Feldspar Mineralogy*, v. 1.

A Study of Modulated Structures and Complex Structures in Natural Alkali Feldspars: II. Discovery and Structure Determination of Plagioclase Megacrysts in Hannuoba Basalt, Hebei

Peng Zhizhong Wang Xianhua, Ximen Lulu

Abstract

The Hannuoba Basalt is located in the northwestern part of Zhangjiakou, Hebei province. The distribution of the basalt is controlled mainly by the two

fractures in the area. Several kinds of deep-source inclusions and megacrysts such as feldspars and pyroxenes were found in the basalt.

For about sixty years, all the feldspar megacrysts found in this area had been regarded as anorthoclases. On the basis of analysis of compositions, optical properties and X-ray diffraction patterns, oligoclase-andesine megacrysts were first discovered by the author in Zhangjiawan Tholeiite Crater in the area. The structure of an andesine megacryst in it has been determined. The least-squares refinement led to a final discrepancy index $R=0.096$. The bond lengths of T-O tetrahedrons and Al occupancy indicate that Al/Si distribution is disordered

三 河北省汉诺坝玄武岩歪长石 结构研究

彭志忠

王鲜华* 西门露露

(武汉地质学院北京研究生部)

汉诺坝碱性玄武岩富含歪长石巨晶体。迄今为止,尚未有关于该类歪长石结构研究方面的报导。本文以汉诺坝三个工作区不同产状碱性玄武岩中歪长石巨晶体为研究对象,以X光单晶照相为主,辅以X光粉末法、光学显微镜、透射电镜等方法,着重研究它们的结构特征,尤其是复结构现象。这三个工作区分别是:(1)万全县大麻平火山锥;(2)崇礼县掏药湾岩筒;(3)万全县张家湾熔岩被。有关地质背景可参见有关文献所述⁽¹⁾;有关复结构、调幅结构的概念以及研究方法和X光衍射效应可参见本系列文章之二⁽²⁾。

一、基本特征

三个产状歪长石巨晶体的化学成分和它们的钾长石(Or_1)、钠长石(Ab)和钙长石(An)的摩尔百分含量见表1,并投点于图1中,为钾高钠长石系列,亦即位于Kroll (1981)⁽⁴⁾分类图中的歪长石区。光学显微镜下,除见到格子双晶外,无固溶体分溶所引起的消光不均一性。大麻平和掏药湾17个样品X光粉末衍射图表现为歪长石衍射峰敏锐,且各衍射峰之间分辨良好,所有指标的衍峰射均为单值峰。可见,这两个区的歪长石不具粉末法可以分辨的出溶结构或结构的其它不均一性。相反,张家湾样品的衍射图谱最显著的特点是衍射峰敏锐性很差,各衍射峰之间的分辨程度明显不如前者。 (201) 衍射峰已非单一峰,而是具分离或宽化现象。可见,张家湾歪长石巨晶体具出溶结构,而在其余两个区的歪长石粉末图上未发现固溶体分溶现象。但这一点不足以推断这两个区歪长石为完全均一的晶体,

* 有*号者为执笔者,现在河北地质学院工作。

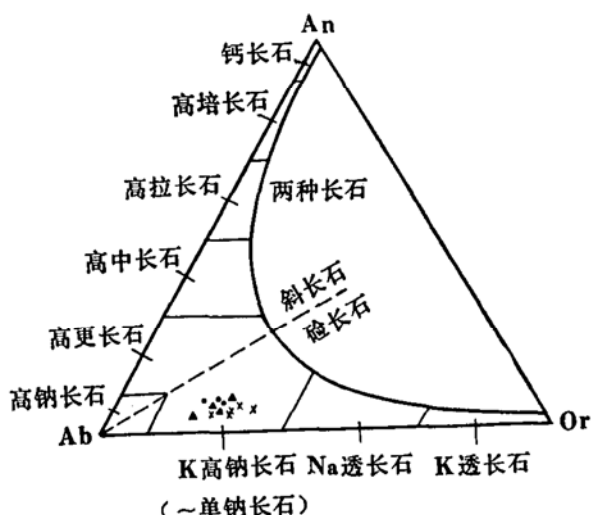
表 1 歪长石化学成分**

Table 1 Chemical composition of anorthoclase

产 地	样 号	成 分															三端元(Mol. %)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	BaO	SrO	FeO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	H ₂ *O	H ₂ O ⁻	P ₂ O ₅	总计	Ab	Or	An
大 麻 平	Dh ₂ -17	69.68	19.37	6.76	3.14	0.87	0.03	0.05	0.02	0.39	0.11	0.13		0.00				100.55	72.65	22.19	5.16
	Dh ₂ -5	70.09	19.24	6.73	3.09	0.82	0.00	0.00	0.02	0.00	0.73	0.17		0.00				100.89	73.02	22.09	4.89
	Dh ₇ -10*	65.99	20.63	8.22	3.21	1.00	0.10	0.02	0.00	0.13	0.33	—	0.28		0.32		0.11	100.30	75.58	19.39	5.03
掏 药 湾	TAf-95	69.33	19.82	7.08	3.56	0.65	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.11		0.00				100.60	73.70	24.19	2.10
	TAf-27	69.61	19.18	7.21	3.36	0.71	0.00	0.00	0.02	0.00	0.21	0.18		0.00				100.48	73.43	22.52	4.05
	TAf-50	68.00	19.66	8.77	3.15	0.65	0.00	0.00	0.00	0.12	0.05	0.17		0.04				100.61	78.23	18.55	3.22
	TAf-74	67.88	19.96	7.85	3.36	0.85	0.00	0.04	0.00	0.56	0.09	0.09		0.02				101.02	73.06	22.54	4.39
	TAf-95*	65.45	20.41	7.95	3.69	1.16	0.11	0.02	0.00	0.08	0.36	—	0.23		0.32		0.07	100.08	71.29	22.92	5.79
张 家 湾	xq-j-38	69.00	18.67	6.70	3.55	0.64	0.00	0.03	0.01	0.00	0.15	0.10		0.00				98.85	71.35	24.86	3.77
	xq-j-24	68.41	19.43	7.24	3.81	0.73	0.00	0.03	0.00	0.29	0.54	0.19		0.03				100.70	70.41	26.64	3.96
	xq-j-40	66.12	19.14	6.63	4.74	0.88	0.00	0.05	0.03	0.78	0.52	0.18		0.00				99.07	64.77	30.48	4.75
	xq-j-45	67.28	19.75	6.98	4.06	0.88	0.01	0.06	0.07	0.09	0.49	0.13		0.00				99.80	68.99	26.36	4.64
	xq-25*	66.55	20.32	8.06	3.66	0.80	0.05	0.01	0.00	0.74	0.30	—	0.21		0.44		0.06	99.53	74.07	21.94	3.99

* 者为化学分析结果，其余为电子探针结果。

** 化学分析由我部黄仕永完成，电子探针由我部邱道乾完成。

图 1 高温三元系长石分类^[3]

● 大麻平火山锥样品 ▲ 掬药湾岩筒样品
× 张家湾熔岩样品

Fig.1 Schematic diagram illustrating the composition and nomenclature of feldspars quenched at high temperature in the Or-Ab-An system.

因粉末法不能探测到弱边带^[3] (如密度调制结构)。单晶照相表明掬药湾部分晶体确具密度调制结构的边带卫星衍射。

将粉末法求得的晶胞参数代入有关公式^[5]得出四面体Ti的Al含量 t_i , 并且将计算的 a_0 与 $b-c$ 图^[5]上的 a_c 值相减得 Δa ($\Delta a = a_0 - a_c$)。这些数据表明, 张家湾歪长石Al/Si分布的有序化程度要高于其它两个区的歪长石。因为 $|\Delta a| = 0.05$ 为临界值, 高于比值说明晶体内部应力作用明显, 而张家湾样品的 $|\Delta a|$ 普遍大于0.05, 其余二区的样品小于0.02, 所以, 张家湾歪长石巨晶体的内应力作用是不可忽视的。共格出溶是一个可靠的推测方向, 因晶体结构共格会使晶体内部产生应力作用。

二、歪长石单晶X光衍射及其复结构研究

歪长石单晶X光研究所用的主要方法是标准迴摆照相法。歪长石晶体标准迴摆衍射图主要衍射位指标见图2。如果具钠长石律或肖钠长石律双晶, 其各衍射位的指标可参见参考文献[3]中的图6—8。

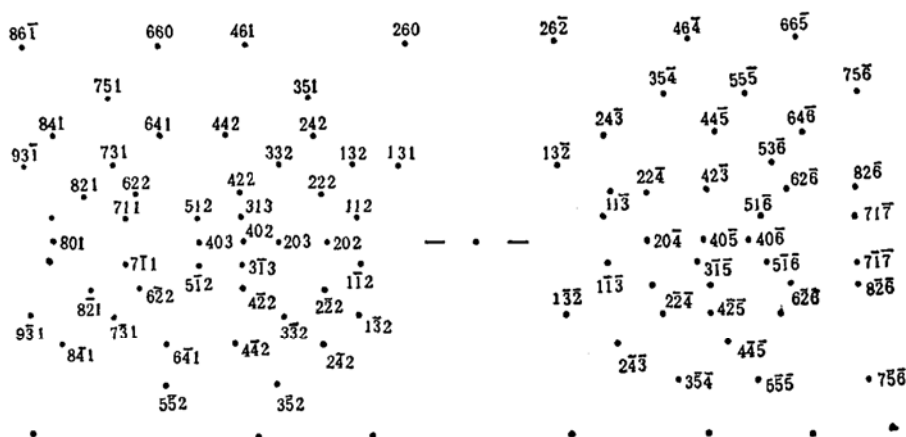


图 2 歪长石标准迴摆图及主要衍射位指标

Fig.2 Single crystal X-ray standard oscillation schematic diffraction pattern. Some diffractions are indexed.

(一) 大麻平火山锥歪长石巨晶体

标准迴摆照相表明该区歪长石晶体为无出溶的均一相歪长石, 衍射图上只看到单一相, 可见到钠长石律双晶或肖钠长石律双晶。

(二) 掏药湾岩筒歪长石巨晶体

X光单晶研究发现掏药湾区歪长石普遍具有密度调制结构的特殊衍射, 即所谓的卫星边带衍射。照片1是该区一晶体的(h0l)旋进衍射图, 在 a^* 附近的(201)等衍射点具有弱弥散强度, 这便是所谓的非布拉格卫星衍射。与理想的密度调制结构模式的卫星衍射所不同的是其卫星衍射与主点之间具弱衍射条纹, 二者之间无明显分界, 形如小喇叭, 其开口略大于 10° 。由于这些卫星衍射具弥散拉长特点, 故称为边带衍射。经测量, 边带的拉长方向近于平行 $(\bar{1}001)$ 的法线方向; 在(h0l)华森堡衍射图上测得其调制波的周期为 $95 \text{ \AA}$ 。业已知道, X光衍射图上边带的方向代表了调制波的方向, 距主衍射点的距离随调制波波长的增大而减小。而掏药湾歪长石晶体的卫星衍射为弥散拉长的喇叭状边带, 强度却有一个集中部位; 从而可推论, 该区歪长石晶体调制波周期是非恒定的, 所测量计算的周期只代表了调制波的主要波长, 而且方向在 $(\bar{1}001)$ 法线的附近略有变化, 这一点基本代表了自然界碱性长石密度调制结构的调制波特点。晶体的透射电镜研究进一步证实了其密度调制结构的存在。照片2为歪长石明场显微象, 在下角衍射图上衍射点的拉长方向和(h00)平行, 并和显微象明暗条纹方向垂直, 这些条纹即为密度调制结构在显微象上的反映, 这和本系列文章之一中图8第三种拐点分解的情况对应^[2]。明暗相间条纹的宽窄并非一致, 延伸也非笔直, 但总的方向是一致的。在该显微象上测得其调制波周期约为 $107 \text{ \AA}$, 考虑到其周期的非恒定性和X光衍射图上的测量情况, 密度调制结构的调制波平均波长约为 $100 \text{ \AA}$ 。

对本区6个巨晶体的11颗晶体的研究发现, 其中四个巨晶体样具有类似的边带衍射, 但其粉末X光衍射峰却无宽化现象, 故用粉末法来判断边带衍射是不够的。对一些弱边带, 粉末图不是都能分辨的。因此, 只根据粉末图来判定边带的存在与否是不可靠的, 这 and 前人研究的情况略有不同。

(三) 张家湾熔岩被歪长石巨晶体

该区歪长石显微镜下消光均一, 粉末图上具固溶体分溶衍射, 故称其为歪长石隐纹长石(Cryptoperthite)。单晶X光衍射图上, 所有晶体均具不同程度的共格出溶衍射, 且无论是富Or相还是富Ab相, 均具钠长石律双晶或肖钠长石律双晶, 亦有这两种双晶的复合衍射。长周期双晶(Long Period Twinning)的出现是本区歪长石又一典型特征。考虑到晶体内共格连生所产生的应力作用, 作者应用了J.V.Smith (1955)^[6]双晶的 α^* 、 γ^* 及相应各相Or重量百分比的测量计算方法。

本区晶体主要拍摄的是标准迴摆图, 根据其衍射特点可大致把它们划分为如下六种复合结构衍射类型:

I、出溶两相均为钠长石律双晶的梯形衍射

照片3属该类衍射。衍射图左侧每一衍射位由四个衍射点组成, 高角度富Ab相和低角度富Or相均具钠长石律双晶衍射, 而且, 无论双晶衍射点还是出溶的富Or、Ab相衍射点之间均具衍射条纹, 如(2k2)等衍射位。四个衍射点及其间的衍射条纹构成了一个梯形, 故称之为梯形衍射。衍射条纹的存在说明歪长石的整个硅酸盐格架是共格连生在一起的。此

外,可见到富Ab相衍射点强度远大于富Or相衍射,故主相是Ab相,客体是Or相,属反条纹隐纹长石。另外,照片左侧(hkl)衍射位两相分离明显而构成梯形,而右侧(hkl)两相衍射点常重合在一起,其成因有关文献^[7]已有详述,这里不再赘述。经测量计算,富Or、Ab两相的Or重量百分比分别为27和16。

II、三相均为钠长石律双晶的共格衍射

照片4属该类衍射,与梯形衍射不同的是在类似于梯形衍射的中间,还有一相钠长石律双晶衍射。出溶三相之间以及各相双晶之间均由共格衍射条纹相联结着,从而构成了似阶梯形图案,这从(402)、(242)衍射位的放大相上可一目了然,其中最低角度富Or相衍射强度最小,和其它两相的衍射角度相差较大,而且富Ab相和中间相之间的共格条纹要比富Or相和中间相之间的共格条纹强度大,三者的Or重量百分比分别约为29、18和15。

III、梯形衍射与肖钠长石律双晶衍射的复合

照片5属该类衍射。该类衍射与梯形衍射的不同之处在于,在富Ab相双晶共格条纹两侧具一对平行层线的肖钠长石律双晶衍射点,如图中(2k2)衍射位。照片6是其(0kl)旋进衍射图,在图上可见到强度较大的钠长石律双晶〔如(00l)位〕和强度较小的肖钠长石律双晶〔如(0k0)位〕衍射。

在迴摆图上,该晶体的肖钠长石律衍射和钠长石律双晶的富Ab相构成了形如·|·的衍射花样,二者的b轴和b*轴平行,但与J.V. Smith^[3]所讲的M双晶衍射不同。首先,所讨论衍射图的钠长石律双晶衍射强度明显大于肖钠长石律双晶的衍射,而且二者衍射点形状全然不同,前者大而弥散,后者小而敏锐,两个肖钠长石律双晶衍射点之间是非共格的,与其它衍射点之间无衍射条纹,显示其具独立性。此外, α^* 、 ν^* 测值也不等。因此,具钠长石律双晶部分和具肖钠长石律双晶部分在所讨论的衍射图上,它们的衍射为非双晶关系。

IV、梯形衍射和长周期双晶衍射的复合

照片7除具梯形衍射外,具有钠长石律周期双晶衍射。在(204)衍射位可清楚地见到8个等 ν 成串的卫星衍射点,各衍射点之间 ϵ 基本相等,这便是碱性长石横波调制结构(Transverse Modulation Structure)的特征衍射,调制波周期

$$\bar{\omega} = \frac{b^*}{\Delta\epsilon} = 17b(219.4 \text{ \AA})^{[7]}$$

据前人研究,电镜和X光衍射所发现的钠长石律周期双晶的周期一般在6—9b,而所研究的歪长石周期居然达17b,实为少见,故称之为长周期双晶衍射。

V、三个相的钠长石律双晶、钠长石律周期双晶及肖钠长石律双晶的复合衍射

该衍射比较有趣(照片8),现对其逐步进行分析:(1)(242)、(222)衍射位上可以看到类似于第II类的衍射(照片8,b),即三相均为钠长石律双晶的共格衍射;(2)(204)衍射位类似于第IV横波调制结构的卫星衍射(照片8,c),且各相均具周期双晶,从而显示出梳状衍射的特点,经测量周期为18b。所不同于第IV类的是,在中间相靠钠相一边,具一小而敏锐的衍射点;(3)在(204)衍射位中间有一单个衍射点,而在(132)衍射位(照片8,d)分为平行层线的两点,故它们应为肖钠长石律双晶衍射,且该衍射强度小、衍射点小而敏锐,其解释应同于第III类的相应情况。由上述可见,该类复合结构的衍射构成应为前述II、III和IV类的综合表现。

VI、富Ab相、富Or相均为肖钠长石律双晶共格衍射

该类衍射和梯形衍射本质相同。照片9为一歪长石的标准迴摆图,它表明该晶体具肖钠长石律双晶衍射。图左侧(h0l)衍射位亦为两个点,其低角度侧强度小,为富Or相点,这在高层位线上也能看到,只是因Or、Ab两相点有重合而显示模糊而已。(h0l)华森堡衍射图(照片10)上无双晶衍射,但a*轴附近各衍射位富Or、Ab两相的共格出溶结构却表现得十分清楚,与密度调制结构类似,其出溶面近于平行(1001)。由此可见,该衍射图形式上与梯形衍射不同,但实质相同,只是双晶律不同。

由以上六类衍射可以知道,本区歪长石巨晶体衍射花样十分丰富多样,而且同一巨晶体不同晶体颗粒的衍射类型也不同。这充分反映了巨晶体内部成分、结构的不均一性。这里除第一类外,其余五类的具体衍射类型尚未见有报导。

三、讨 论

关于一些结构的成因可归纳为:(1)歪长石各种双晶,尤其是长周期双晶,是由于晶体在由单斜向三斜转换过程中,为减少内应力而形成的。密度调制结构和出溶相共格结构分别是拐点分解和共格分解的结果。实验表明,二者都是均一相的矿物在高温淬火条件下形成的。详细研究晶体结构的细节可以为其形成的地质环境的推断提供有用的信息。下面先谈拐点分解和共格分解。

(一) 拐点分解与共格分解

对任何体系,其状态总是向着自由能降低的方向变化。在一定温压下,二元固溶体系随成分的调整变化而变化(见图3中的上部曲线),图3中, S_1 、 S_2 是 $\frac{\partial^2 G}{\partial C^2} = 0$ 的两点,

称其为拐点。体系自由能的变化可由公式 $\Delta G_{(T, P, 0)} = (\delta c)^2 F \left(\frac{\partial^2 G}{\partial C^2} \right)$ 来表示(其中, F 为函数符号, ΔG 和 $\frac{\partial^2 G}{\partial C^2}$ 的正负号一致; δc 为组份浓度的微小变化)。如果均一固溶体系的总成分

位于两个拐点之间,如 C_0 处,因 $\frac{\partial^2 G}{\partial C^2} < 0$,所以体系组份的任何微小变化,总能使其自由能

减小,如 C_1 、 C_2 ,从而使均一相固溶体出现成分的波动。相反,如果总成分在两个拐点之外,就不可能发生类似的变化。可见,总成分位于拐点之内时,整个体系成分可以在大范围内进行连续微小的偏移,然而这种变化的条件是,两个端员的基本结构必须相同,并且以小幅度离子扩散的方式来实现。密度调制结构便是这一作用的结果。对于钠长石和钾长石固溶体,由于一般情况下,Al、Si-O格架是惰性的,所以不可能扩散迁移以致成核离溶。因此,

碱性长石离溶只是碱金属离子在相对稳定的硅酸盐格架中扩散,从而具备了拐点分解的内在条件。可以预知,由于拐点分解只限于M阳离子的微小幅度扩散,故其速度是相当快的,以致“瞬间”即可实现。实际情况正是如此,地质上具密度调制结构的矿物均出现在类似于淬火条件的火山岩中。Owen^[8]等学者曾对均一碱长石进行过淬火实验,并用X光衍射和透射电镜研究了相应的结构特征,他们发现,成分一定时,密度调制结构的波长与淬火时间、温度成正相关关系。淬火时间太短,拐点分解不会发生,固溶体仍为完全均一相。如Or重量百

分比为37的碱性长石,在750℃下均一化后,再在15分钟内冷却至室温,未发现产生拐点分解。但是,如果在同样条件下,使其在2小时内冷却至室温,X光研究就见到了边带卫星衍射,也就是说拐点分解已经发生,从而产生了密度调制结构。

然而,由于拐点分解可以在大范围内连续进行,所以,拐点分解的重要物理意义是其形成的结构是不稳定的。如果在一个温度下,淬火时间足够长,分解将会进行到共格分解阶段。密度调制结构和共格出溶结构从某种意义上可以认为是晶体冷却速度的变化而导致离溶程度由量变到质变的结果。然而,无论那种结构,它们都相应于地质上浅成岩或火山岩的冷却条件^[5]。

(二) 大麻平火山锥、掏药湾岩筒以及张家湾熔岩冷凝环境对比

大麻平火山锥、掏药湾岩筒和张家湾熔岩的岩性均为碱性玄武岩,且其歪长石巨晶体的成分也相近。众所周知,地幔碱性玄武岩中歪长石巨晶体是在深部寄主岩浆中晶出的,那么其内部结构(出溶)主要可能受两个因素的影响,一为寄主岩浆上升到地表时的冷却环境,二为寄主岩受后期缓慢变质作用的影响(退火作用)。

后者与拐点分解和共格分解的淬火条件不符,故可否定。因此,三个区歪长石固溶体分溶条件主要是由寄主岩浆冷凝条件所决定的。研究表明,大麻平歪长石为均一相;掏药湾歪长石以拐点分解形成的密度调制结构为其特征;而张家湾歪长石共格出溶结构普遍。可见,岩性相同,产状不同的岩体其冷凝环境是不同的。碱性玄武岩中歪长石巨晶体固溶体分溶情况说明,从大麻平火山锥、掏药湾岩筒到张家湾熔岩,歪长石所产部位其寄主碱性玄武岩浆的冷凝速度依次变慢;掏药湾歪长石巨晶体的边带衍射反映了其密度调制波波长是有变化的,这正好与寄主岩浆在冷凝过程中温度是在变化的这一条件相符。

四、掏药湾歪长石的晶体结构

晶体结构的测定是用掏药湾区具密度调制结构的晶体进行的,该晶体的成分见表1 TAf-95号样品,比重为2.61g/cm³,(-2V)=49°,Ng=1.533,Nm=1.531,Np=1.525,空间群C $\bar{1}$ 。在旋进衍射图上测得的粗略晶胞参数为:a=8.15Å,b=12.82Å,c=7.04Å,α=92.23°,β=116.28°,γ=90.02°。在四圆衍射仪上精测的晶胞参数为:a=8.231(1)Å,b=12.907(2)Å,c=7.125(1)Å,α=92.17(1)°,β=116.33(1)°,γ=90.18(1)°,V=677.7(2)Å³。

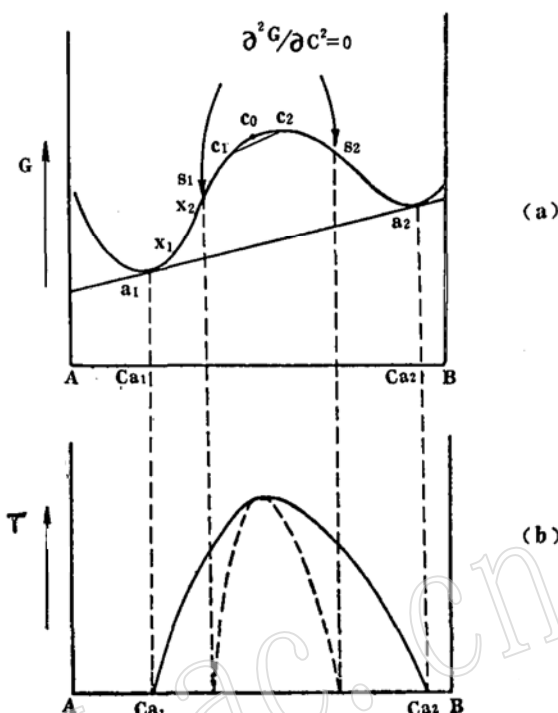


图3 二元(A、B)固溶体拐点分解示意图

(a) 自由能(G)与组分(C)关系图,温度为T。

(b) 温度(T)与组分(C)关系图。

Fig.3 Schematic spinodal decomposition diagram of binary (A-B) solid solution.

表 2 原子坐标、占有率和热振动参数

Table 2 Coordinations, occupancies and thermal vibration parameters of atoms

原子	原子坐标			占有率
	X	Y	Z	
T ₁ O	0.0087(2)	0.1710(1)	0.2185(2)	0.9363(93)
T _{1m}	0.0058(2)	0.8162(1)	0.2269(2)	0.9369(93)
T ₂ O	0.6935(2)	0.1115(1)	0.3289(2)	0.9474(94)
T _{2m}	0.6908(2)	0.8797(1)	0.3495(2)	0.9418(93)
O _A (1)	-0.0045(7)	0.8628(3)	0.0082(7)	1.0000
O _A (2)	0.5998(6)	0.9942(3)	0.2817(7)	1.0000
O _B (O)	0.8222(7)	0.1195(4)	0.2092(8)	1.0000
O _B (m)	0.8207(6)	0.8534(4)	0.2378(8)	1.0000
O _C (O)	0.0207(6)	0.2964(3)	0.2691(7)	1.0000
O _C (m)	0.0234(6)	0.6898(3)	0.2303(7)	1.0000
O _D (O)	0.1913(6)	0.1163(3)	0.3949(7)	1.0000
O _D (m)	0.1886(6)	0.8696(3)	0.4198(7)	1.0000
M	0.2739(3)	0.0040(3)	0.1344(5)	1.1312(149)

原子	热振动参数					
	U ₁₁	U ₂₂	U ₃₃	U ₁₂	U ₁₃	U ₂₃
T ₁ O	0.0211(9)	0.0116(8)	0.0077(7)	0.0020(5)	0.0059(6)	0.0010(5)
T _{1m}	0.0198(9)	0.0103(7)	0.0073(7)	0.0027(5)	0.0044(6)	0.0057(5)
T ₂ O	0.0199(9)	0.0077(7)	0.0110(8)	0.0023(5)	0.0049(6)	0.0028(5)
T _{2m}	0.0217(9)	0.0072(7)	0.0101(8)	0.0028(5)	0.0055(6)	0.0042(5)
O _A (1)	0.0386(26)	0.0221(21)	0.0162(20)	0.0047(16)	0.0105(19)	0.0053(18)
O _A (2)	0.0297(23)	0.0148(19)	0.0201(21)	0.0030(15)	0.0058(18)	0.0039(16)
O _B (O)	0.0318(25)	0.0296(24)	0.0290(24)	0.0051(19)	0.0147(21)	0.0002(19)
O _B (m)	0.0300(24)	0.0307(24)	0.0273(24)	0.0078(19)	0.0141(20)	0.0069(19)
O _C (O)	0.0303(23)	0.0183(20)	0.0238(22)	0.0002(16)	0.0119(19)	0.0023(16)
O _C (m)	0.0331(24)	0.0169(19)	0.0192(21)	0.0012(16)	0.0057(19)	0.0052(17)
O _D (O)	0.0327(24)	0.0208(20)	0.0153(20)	0.0046(16)	0.0055(18)	0.0052(17)
O _D (m)	0.0315(24)	0.0214(21)	0.0197(21)	-0.0013(16)	0.0035(18)	0.0032(17)
M	0.0177(14)	0.0797(26)	0.0507(21)	0.0401(17)	0.0012(12)	0.0056(13)

热振动参数计算公式: $\exp[-(U_{11}h^2a^* + U_{22}k^2b^{*2} + U_{33}l^2c^{*2} + 2U_{12}hka^*b^* + 2U_{13}hla^*c^* + 2U_{23}klb^*c^*)]$

表 3 T—O键长 (Å)

Table 3. T—O bond distances (Å)

T ₁ O—O _A (1)	1.643(5)	T _{1m} —O _A (1)	1.659(4)	T ₂ O—O _A (2)	1.651(4)	T _{2m} —O _A (2)	1.648(4)
T ₁ O—O _B (O)	1.644(5)	T _{1m} —O _B (m)	1.631(5)	T ₂ O—O _B (O)	1.634(5)	T _{2m} —O _B (m)	1.625(5)
T ₁ O—O _C (O)	1.638(4)	T _{1m} —O _C (m)	1.638(4)	T ₂ O—O _C (m)	1.632(4)	T _{2m} —O _C (O)	1.636(5)
T ₁ O—O _D (O)	1.654(5)	T _{1m} —O _D (m)	1.647(5)	T ₂ O—O _D (m)	1.621(5)	T _{2m} —O _D (O)	1.638(4)
平均T ₁ O—O	1.645	平均T _{1m} —O	1.644	平均T ₂ O—O	1.635	平均T _{2m}	1.637
t _{1o}	0.301	t _{1m}	0.293	t _{2o}	0.224	t _{2m}	0.240

表 4 O—O键长 (Å)
Table 4. O—O bond distances (Å)

四面体	O _A —O _B	O _A —O _C	O _A —O _D	O _B —O _C	O _B —O _D	O _C —O _D	四面体 平均键长
T ₁ O	2.606	2.757	2.613	2.711	2.724	2.691	2.684
T _{1m}	2.617	2.737	2.641	2.708	2.717	2.677	2.683
T ₂ O	2.688	2.604	2.657	2.689	2.682	2.708	2.671
T _{2m}	2.682	2.621	2.654	2.682	2.681	2.713	2.672
平均	2.648	2.679	2.641	2.698	2.701	2.697	

表 5 M—O键长(Å)
Table 5 M—O bond distances (Å)

M—O _A (1)	M—O _A (1)	M—O _A (2)	M—O _A (2)	M—O _B (0)
2.720	2.658	3.551	2.414	3.671
M—O _A (1)	M—O _C (O)	M—O _C (m)	M—O _D (O)	M—O _D (m)
3.091	3.274	3.006	2.633	3.028

表 6 O—T—O键长 (°)
Table 6 O—T—O bond angles (°)

T ₁ O 四面体		T ₂ O 四面体	
O _A (1)—T ₁ O—O _B (O)	104.9(3)	O _A (2)—T ₂ O—O _B (O)	108.6(2)
O _A (1)—T ₁ O—O _C (O)	114.4(2)	O _A (2)—T ₂ O—O _C (m)	104.9(2)
O _A (1)—T ₁ O—O _D (O)	104.9(2)	O _A (2)—T ₂ O—O _D (m)	108.5(2)
O _B (O)—T ₁ O—O _C (O)	111.4(2)	O _B (O)—T ₂ O—O _C (m)	110.8(2)
O _B (O)—T ₁ O—O _D (O)	111.4(2)	O _B (O)—T ₂ O—O _D (m)	111.0(3)
O _C (O)—T ₁ O—O _D (O)	109.7(2)	O _C (m)—T ₂ O—O _D (m)	112.7(2)
平 均	110.5	平 均	109.4
T _{1m} 四面体		T _{2m} 四面体	
O _A (1)—T _{1m} —O _B (m)	105.4(3)	O _A (2)—T _{2m} —O _B (m)	110.1(2)
O _A (1)—T _{1m} —O _C (m)	112.2(2)	O _A (2)—T _{2m} —O _C (O)	105.9(2)
O _A (1)—T _{1m} —O _D (m)	106.1(2)	O _A (2)—T _{2m} —O _D (O)	107.7(2)
O _B (m)—T _{1m} —O _C (m)	111.9(3)	O _B (m)—T _{2m} —O _C (O)	110.7(2)
O _B (m)—T _{1m} —O _D (m)	112.0(3)	O _B (m)—T _{2m} —O _D (O)	110.5(3)
O _C (m)—T _{1m} —O _D (m)	109.1(2)	O _C (O)—T _{2m} —O _D (O)	111.9(2)
平 均	109.5	平 均	109.5

数据收集实验条件和数据处理与结构解析过程同本系列文章之二^[9]。最后得到的R偏离因子为0.079, 其原子坐标、热振动参数、部分键长、键角分别见表2、3、4、5、6和7。表中括号内的数字为标准偏差。

将该歪长石的相应键长代入公式:

表 7 T—O—T键角 (°)
Table 7. T—O—T bond angles (°)

T ₁ O—O _A (1)—T _{1m}	143.3(3)	T ₁ O—O _C (O)—T _{2m}	131.6(3)
T ₂ O—O _A (2)—T _{2m}	130.9(3)	T _{1m} —O _C (m)—T ₂ O	134.1(3)
T ₁ O—O _B (O)—T ₂ O	145.2(3)	T ₁ O—O _D (O)—T _{2m}	137.6(3)
T _{1m} —O _B (m)—T _{2m}	155.7(3)	T _{1m} —O _D (m)—T ₂ O	147.0(3)
平均T—O—T键角: 140.7			

$$t_i = 0.25(1 + A_n) + (\langle \text{Ti}-\text{O} \rangle - \langle \text{T}-\text{O} \rangle) / 0.13^{[10]}$$

求得的各四面体的Al含量见表3。由表可知, Al/Si分布基本属于无序态, 而且 $t_i\text{O}$ 和 t_{im} 近于相等, 故晶体结构接近于拓扑单斜对称。

五、结 语

通过对汉诺坝三个碱性玄武岩区歪长石巨晶体的研究, 得出如下几点认识和结论:

1. 本区内歪长石巨晶体内部结构复杂多样, X光研究表明, 巨晶体内部结构的不均一性具普遍性。在掏药湾区发现了地幔玄武岩中歪长石巨晶体的密度调制结构, 晶体结构测定结果为近似于拓扑单斜对称的歪长石。在张家湾的歪长石中找到了五种新的复结构衍射类型, 同时发现了同期达17—18b的钠长石律长周期双晶。

2. 根据大麻平火山锥、掏药湾岩筒和张家湾熔岩中歪长石复结构特征, 初步可推断三个区(歪长石产出部位)玄武岩岩浆的冷凝环境不同, 冷凝速度依次减慢。

3. 实验工作主要采用了标准迴摆照相方法, 标准迴摆图可以较全面地揭示碱长石的复结构信息, 如配合华森堡和旋进法研究, 可以起到相互补充验证的作用。

4. 研究密度调制结构时, 用X光粉末法来检验一个样品边带的存在与否是不可靠的。

实验工作中得到本部X光室马喆生等全体同志的帮助, 样品的采集得到了河北地质学院冯家麟、谢嫚泽等同志的大力支持和帮助。工作还得到本部化学分析室杨风华、黄仕永、探针室邵道乾以及孙以谏、束今赋、彭长琪等同志的帮助和指导。周珣若副教授在百忙中审阅了初稿, 在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 冯家麟等, 1982, 汉诺坝玄武岩及其深源包体。河北地质学院院报。第1—2期, P45—63页。
- [2] 彭志忠等, 1986, 调制结构及复结构的概念及实验方法。岩石矿物学杂志, 第3期。
- [3] Smith, J. V., 1974. Feldspar minerals, vol. 1.
- [4] Kroll, H., 1981. Am. Mineral., vol. 66.
- [5] Ribbe, P. H., 1975. Feldspar mineralogy.
- [6] Smith, J. V., 1955. The Albite Feldspar: 2. A Simple X-ray Technique for the Study of Alkali Feldspars.
- [7] 彭志忠、孙以谏, 1983, 火山岩中某些碱性长石的复结构。中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 第四卷, p.49—60页。
- [8] Owen, D. C., 1974. The feldspar.

- [9] 彭志忠等, 1986. 河北省汉诺坝玄武岩斜长石巨晶体的发现及晶体结构测定. 岩石矿物学杂志, 第3期.
[10] Ribbe, P. H., 1983. Feldspar Mineralogy.
[11] Hillard, J. E., 1974. Phase Transformation.

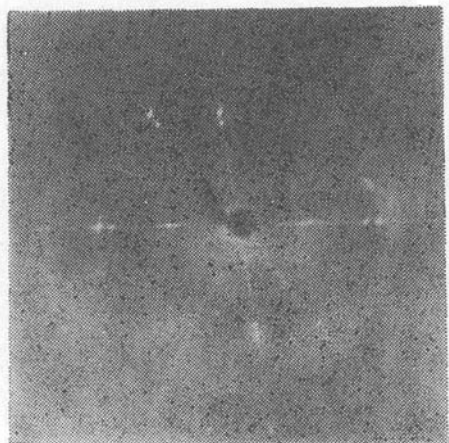
A Study of Modulated Structures and Complex Structures in Natural Alkali Feldspars; III Study on the Structures of the Anorthoclase Megacrysts in Hannuoba Basalt, Hebei

[Peng Zhizhong], Wang Xianhua, Ximen Lulu

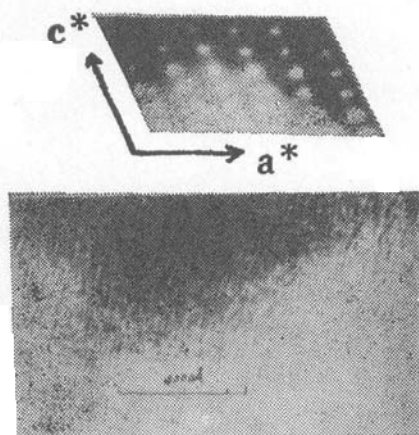
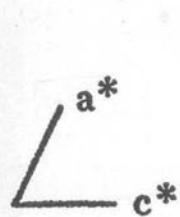
Abstract

The paper is concerned with the anorthoclase megacrysts collected from Damaping Volcanic Cone, Zhangjiawan Lava Sheet and Taoyaowan Pipe in Hannuoba Basalt, which are all alkali basalt. The study is focused on the complex structures of the anorthoclase megacrysts and was carried out mainly by means of single-crystal diffraction in addition to the powder X-ray diffraction, chemical analysis and optical study. The anorthoclase megacrysts from Damaping are characterized by their simpler structures. Only albite law or pericline law twinning can be found on the single diffraction patterns. The same patterns of anorthoclase megacrysts from Taoyaowan Pipe are characterized by bond satellite diffractions, which are caused by density modulation structures. The direction of its wave transmission is nearly parallel to the normal of $(\bar{1}0\ 0\ 1)$ and the length is about $100\text{ \AA}$. Several kinds of complex structure diffractions including coherent decomposition (cryptoperthite) and long-period albite twinning (transverse modulation structure) were found on the patterns of the anorthoclase megacrysts from Zhangjiawan Lava Sheet. The period of the transverse modulation is 17 to 18b.

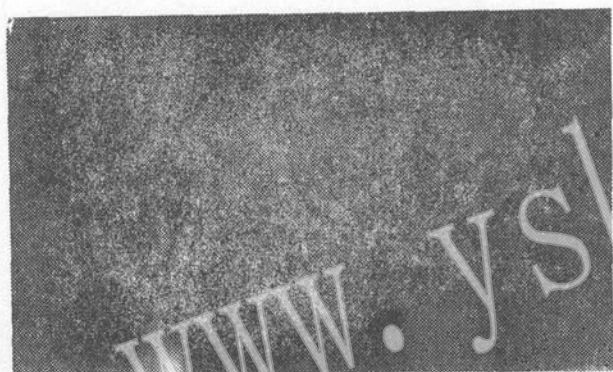
An anorthoclase crystal structure has been determined. The least-squares refinement led to a final discrepancy index $R=0.072$. The bond lengths of T-O tetrahedron indicate that the structure is almost topochemically monoclinic symmetry.



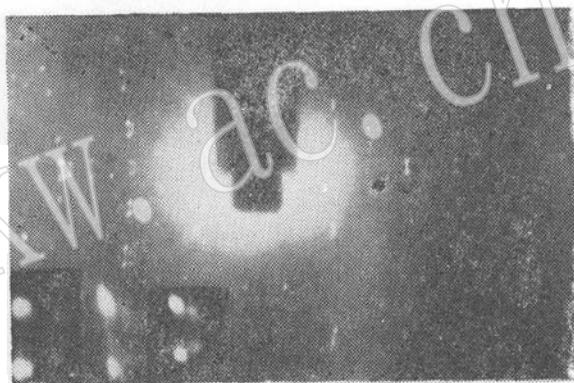
照片1 歪长石 (h01) 旋进衍射图



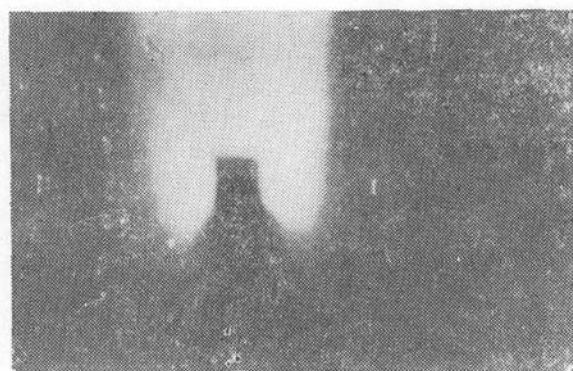
照片2 a.歪长石电子衍射图 b.歪长石明场电子显微象



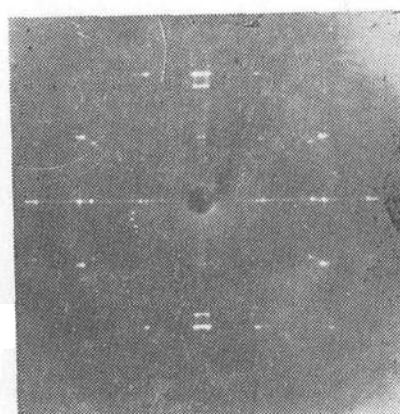
照片3 第 I 类衍射



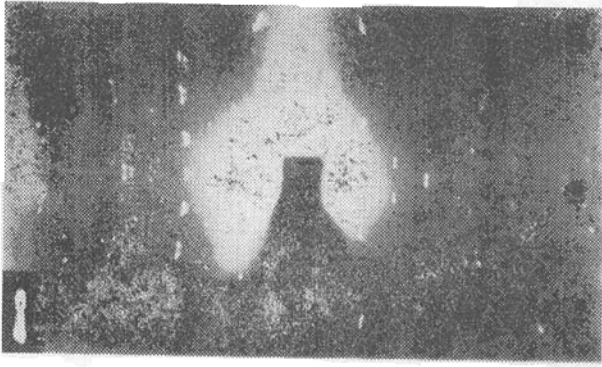
照片4 第 II 类衍射 (左下角由左到右依次为405, 242, 222衍射位)



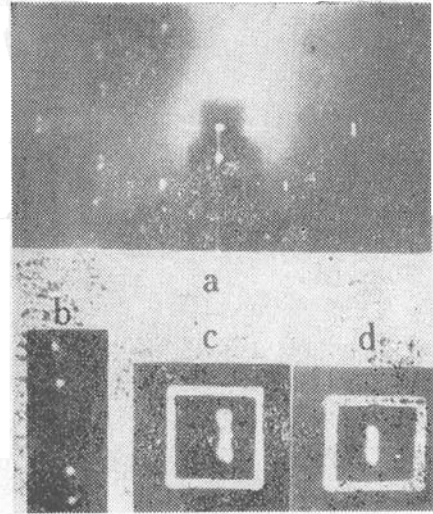
照片5 第 III 类衍射



照片6 第 III 类衍射的 (0kl) 旋进衍射图



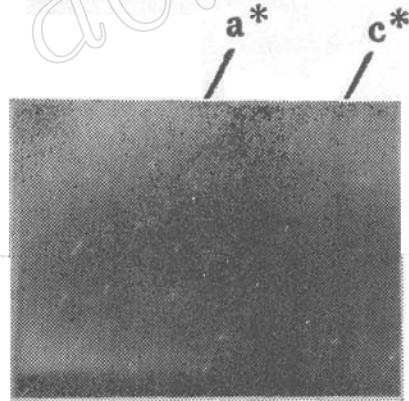
照片7 第IV类衍射 (左下角为 204 衍射位)



照片8 第V类衍射 (b、c、d分别为a中 $222, 242, 204, 132$ 衍射图)



照片9 第VI类衍射



照片10 第IV类衍射的 $(h01)$ 华森堡图

(注: 除注明者外, 其它均为标准迴摆衍射图。)