

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.150>



岩石中斜长石双晶的背散射电子衍射测试与分析

赵珊茸, 刘宇坤, 徐 畅

中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘 要: 斜长石双晶很常见, 双晶律达 10 多种, 但斜长石的各种双晶律在光学显微镜下不容易鉴别. 基于背散射电子衍射 (EBSD) 技术, 对产于大别山地区的 3 种岩石 (花岗岩、闪长岩、变粒岩) 中斜长石双晶进行了精确测定. 3 种岩石中均以卡—钠复合双晶 (包括钠长石律、卡斯巴律、卡—钠复合律) 为主, 这种卡—钠复合双晶在光学显微镜下只表现为两个聚片单体的聚片双晶, 还有 1 个或 2 个单体以晶畴形式分散在聚片单体中, 在光学显微镜下不可辨别. 除了卡—钠复合双晶外, 偶见肖钠长石律、柱面 $\{130\}$ 、 $\{\bar{1}30\}$ 和 $\{110\}$ 律. 并发现了新的斜长石双晶律的复合关系和规则连生关系: (1) 卡斯巴律—柱面 $\{130\}$ 律—柱面 $\{110\}$ 律可以形成复合双晶; (2) 卡—钠复合律—柱面 $\{130\}$ 律—柱面 $\{\bar{1}30\}$ 律可以形成具三一六方对称的规则连生体, 但不能形成复合双晶. 基于本文有限的斜长石双晶统计数量, 3 种岩石中斜长石各双晶律出现的概率差异不大, 可能斜长石双晶律出现概率与成岩条件关系不大. 精确测定斜长石双晶律的方法, 为今后大规模测量统计岩石中斜长石双晶律、发现新的斜长石双晶律及其复合关系等, 提供一种方便有效的方法与手段.

关键词: 斜长石; 双晶律; 电子背散射衍射 (EBSD); 极图; 矿物学.

中图分类号: P572; P583

文章编号: 1000-2383(2022)04-1399-16

收稿日期: 2020-08-11

Electron Back-Scatter Diffraction Analysis for Twins of Plagioclase in Some Rocks

Zhao Shanrong, Liu Yukun, Xu Chang

School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Twins in plagioclase are very common, and the twin laws are of more than 10 types. However, these twin laws are difficultly distinguished under optic microscope. In this paper, it provides a method based on electron back-scatter diffraction (EBSD) technique to determine accurately twin laws of plagioclase in three kinds of rocks (granite, diorite and leptite), occurring in Dabie Mountain, China. It is found that albite-carlsbad compound twin (including Albite law, Carlsbad law and Albite-Carlsbad law) is the most common twin type in the plagioclase in these three rocks. However, this Albite-Carlsbad compound twin (including 3-4 individuals) under EBSD test is just a polysynthetic twin (only 2 individuals) under optic microscope, because there are 1-2 individuals appearing as small domains inside other individuals, which cannot be resolved under optic microscope. A small amount of Pericline law, Prism $\{110\}$, $\{130\}$ and $\{\bar{1}30\}$ laws are also found. A new compound twin among Carlsbad law, Prism $\{110\}$ law and Prism $\{\bar{1}30\}$ law is found. The Albite-Carlsbad law, Prism $\{130\}$ law and Prism $\{\bar{1}30\}$ law can co-exist together to form an intergrowth with three-six fold symmetry, but they cannot form a compound twin. Based on the limited amount of statistics in this

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41872037).

作者简介: 赵珊茸 (1962—), 女, 教授, 博士生导师, 从事晶体对称、晶体形貌、矿物晶体化学的研究. ORCID: 0000-0001-8847-6991.
E-mail: shanrongzhao@126.com

引用格式: 赵珊茸, 刘宇坤, 徐畅, 2022. 岩石中斜长石双晶的背散射电子衍射测试与分析. 地球科学, 47(4): 1399—1414.

Citation: Zhao Shanrong, Liu Yukun, Xu Chang, 2022. Electron Back-Scatter Diffraction Analysis for Twins of Plagioclase in Some Rocks. *Earth Science*, 47(04): 1399—1414.

paper, the probability of twin laws of plagioclase is unvaried among these three kinds of rocks, possibly reflecting that the twin laws of plagioclase are not related closely to the formation condition of rocks. The method provided in this paper to analyze twin laws of plagioclase based on EBSD is effective and convenient, which will be helpful to statistic twin laws of plagioclase in rocks on a large scale, and find some new twin laws as well as new compound twins.

Key words: plagioclase; twin law; electron back-scatter diffraction; pole figure; mineralogy.

0 引言

长石族是最重要的造岩矿物,在地壳各类岩石中广泛分布.长石的双晶现象普遍存在,没有双晶的长石是很少的.长石双晶律的种类很多,可达 10 多种.最常见的双晶律是钠长石律、肖钠长石律、卡斯巴律和卡—钠复合律;其他长石双晶律则较为少见,如巴温诺律、曼尼巴律、阿拉律、柱面 $\{110\}$ 、 $\{1\bar{1}0\}$ 、 $\{130\}$ 、 $\{1\bar{3}0\}$ 律,以及这几种双晶律的复合律(沈上越, 1990; Deer *et al.*, 2001).

由于斜长石是中心对称的,有一个双晶面(或双晶轴)时,必产生一个垂直它的双晶轴(或双晶面).因此,斜长石每种双晶律同时有一对互相垂直的双晶面和双晶轴,这一对双晶面和双晶轴中,如果双晶面(轴)是简单指数面(轴),那么垂直它的双晶轴(面)就是高指数轴(面).一般把双晶面是简单指数面的双晶律称为面律(如钠长石律),双晶轴是简单指数轴的双晶律称为轴律(如卡斯巴律).

需要特别指出的是,钠长石律与肖钠长石律在双晶要素的结晶学取向是很相似的,钠长石律的双晶面是 $\{010\}$,双晶轴为 b^* (即 $\{010\}$ 面的法线,高指数轴),而肖钠长石律的双晶轴是 b 轴,双晶面是垂直 b 轴的面(高指数面).在斜长石中 b 轴和 b^* 轴之间只有 $0\sim 4^\circ$ 之差,所以,钠长石律与肖钠长石律在双晶要素上很难区别,但它们的双晶接合面是不同的,通过双晶接合面可以区分它们:钠长石律的双晶接合面为 $\{010\}$,肖钠长石律的双晶接合面为菱形截面 $\{h0l\}$.

此外,斜长石双晶还普遍存在复合律.所谓复合律,是指通过两个双晶律复合产生的双晶律,这个“复合”相当于对称要素“组合”的关系.在斜长石中,复合律涉及晶胞的 3 个棱 a 、 b 、 c 和 3 个主平面 $\{100\}$ 、 $\{010\}$ 和 $\{001\}$,以及垂直主平面的 a^* 、 b^* 、 c^* .复合律的双晶轴就是两个相互垂直的简单双晶轴组合(即相当于两个相互垂直的二次轴组合)产生的第 3 个双晶轴(第 3 个二次轴),这 3 个双晶轴一定是相互垂直的.由于这 6 个方向 a 、 b 、 c 和 a^* 、 b^* 、 c^* 在

组合中刚好是垂直的(如: a 垂直于 b^* 和 c^* , a^* 垂直于 b 和 c 等),因此其中两个方向的双晶轴会产生第 3 个方向的双晶轴,这样导致有 6 种可能性,即 6 种复合律.在单斜晶系的长石中是不存在复合律的,因为形成复合律的双晶轴,要么恰好是单斜晶系长石的对称轴,要么恰好是对应于单斜晶系长石的某个简单双晶律的双晶轴,例如:钠长—阿拉律等价于曼尼巴律等(Smith and Brown, 1988).

复合律一般都在复合双晶中存在,例如,如果单体 1 和 2 为钠长石律,而单体 2 和 3 为卡斯巴律,那么单体 1 和 3 就自动形成(或称被动形成)卡—钠复合律,即使单体 1 和 3 可能并不接触.这样,3 个或 4 个单体共同组成一个复合双晶.复合律本身是否可以孤立存在还没有定论(Smith and Brown, 1988).

早期对于长石双晶律的鉴定主要通过光学方法,利用偏光显微镜或者旋转台(也叫费氏台)来鉴定长石双晶律,并且形成了一整套的鉴定方法(池际尚和吴国忠, 1982; 江鑫培, 1985; 沈上越, 1990; 胡承绮, 1991).但是,这些光学方法对精确鉴定长石各种双晶律是有困难的.随着 X 射线衍射和透射电子衍射等技术发展成熟,长石双晶的研究可以深入到微观纳米级别,对长石各种显微双晶及其相关的复杂结构可进行更直观深入的研究(Brown and Maccaudière, 1986; Lee, 2010; 王晨波等, 2011; Noguchi, 2013).但是, X-射线衍射和透射电子衍射测试虽然很深入细致却不能实现大规模测试与统计.现如今,先进的电子背散射衍射(Electron Back-scatter Diffraction, 简称 EBSD)技术日趋成熟,这一手段在鉴定双晶律时不仅制样与测试方便而且高效精确.目前该技术已经被应用到长石和其他矿物晶体的双晶测试等方面的研究中. Balić-Žunić *et al.* (2013) 利用电子探针、X 射线粉晶衍射、X 射线单晶衍射、EBSD 这一系列的方法对两种伟晶岩中条纹长石的显微结构进行了研究,测定了条纹结构的结晶学方向及鉴定聚片双晶的双晶律,并指出各种方

法相互验证以得到可靠数据. Arzilli *et al.* (2015) 利用EBSD研究了粗面岩熔体中钾长石球粒的生长机制,发现相邻钾长石晶体间多以卡斯巴双晶律结合,以降低界面能而更加稳定. Brugger and Hammer (2015) 利用EBSD对不同物理化学条件下人工合成的斜长石聚集形态进行了研究,发现在远离平衡条件下结晶的他形斜长石颗粒比接近平衡条件下结晶的自形斜长石颗粒更易形成双晶. Xu *et al.* (2016) 根据长石双晶理论,建立了12种斜长石双晶律的标准极图,介绍了利用EBSD技术鉴定长石双晶律的具体方法.

本文用EBSD技术测试和鉴定了3种岩石(花岗岩、闪长岩、变粒岩)中斜长石的双晶律,发现了一些与在光学显微镜下所观察到的斜长石双晶不同的现象,并发现了一些新的斜长石双晶律复合和规则连生的规律.统计了3种岩石中各双晶律出现概率.这为快速方便且精确测定岩石中斜长石双晶律、深入细致研究斜长石双晶律及其复合规律提供一种有效便捷的方法与手段.

1 岩石样品的地质背景与岩性描述

本文研究的岩石样品采集于大别山地区,具体位置为湖北省黄冈市境内.其中花岗岩(DT-37)采集于黄冈市英山县吴家山林场北出露的吴家山中粒含斑二长花岗岩单元内($31^{\circ}5'38''\text{N}$, $115^{\circ}47'22''\text{E}$, $H=910\text{ m}$),闪长岩(DT-24)采集于黄冈市武穴市梅川镇西部出露的陶斯垸中细粒石英二长闪长岩单元内($30^{\circ}7'58''\text{N}$, $115^{\circ}38'35''\text{E}$, $H=120\text{ m}$),变粒岩(HA-17)采集于黄冈市红安县七里坪镇东北部出露的桐柏山岩群内($31^{\circ}28'49''\text{N}$, $114^{\circ}43'53''\text{E}$, $H=92\text{ m}$).这3种岩石中,有岩浆岩和变质岩,有酸性岩浆岩和中性岩浆岩,斜长石含量较多且很新鲜,期望能精确测定斜长石双晶律、对比不同岩性中斜长石双晶律概率的变化规律.各岩石的岩相学观察描述如下.

DT-37: 花岗结构,块状构造.斜长石自形程度较好,聚片双晶密集(图1a),偶见格子双晶;钾长石自形程度次之;石英多呈他形填充于颗粒之间,有波状消光现象,并发育蠕虫结构.矿物组成为:钾长

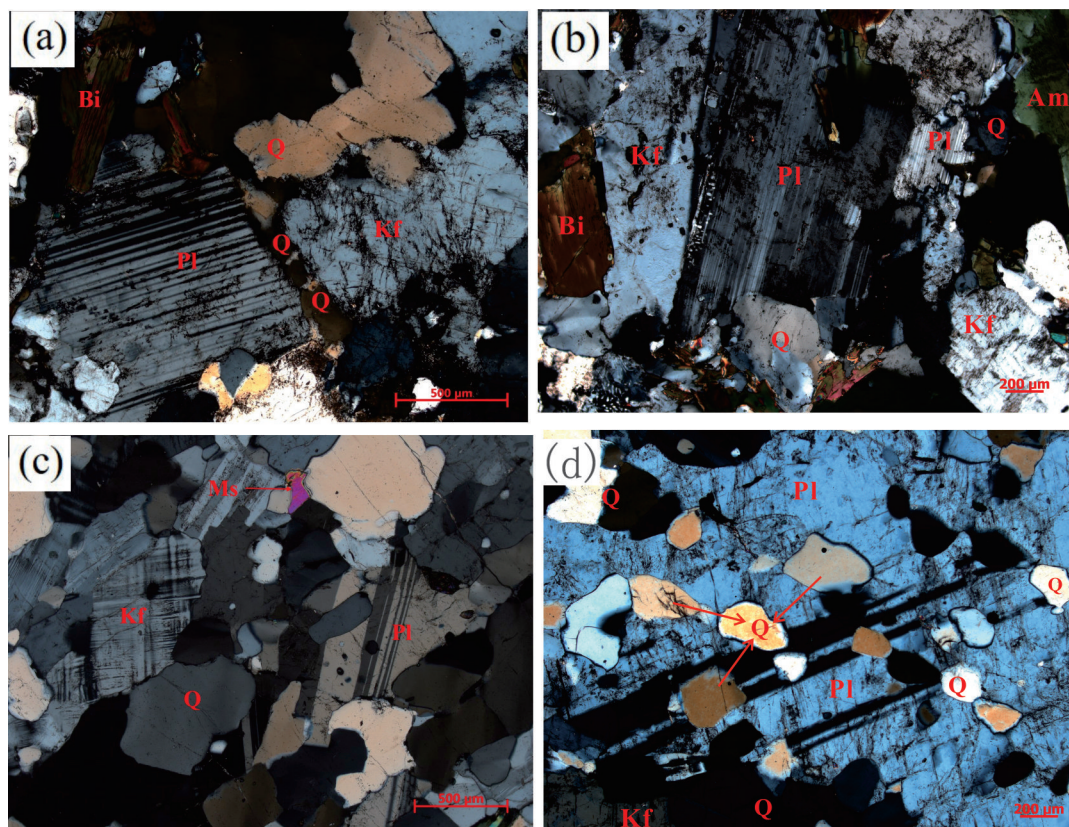


图1 3种岩石镜下照片(正交镜, 5×10)

Fig.1 The optical microscopic photos of the three rocks

a. DT-37的花岗结构及矿物组成;b. DT-24的半自形粒状结构及矿物组成;c,d. HA-17的变晶结构及矿物组成

石 32%(1~3 mm),斜长石 20%(0.5~2.0 mm),石英 40%(0.5~1.5 mm),黑云母 8%(0.2~1.0 mm).定名为中细粒黑云母二长花岗岩.

DT-24:半自形粒状结构,块状构造.斜长石自形程度良好,聚片双晶密集(图 1b),可见完整晶形的斜长石嵌于钾长石大晶体中;钾长石半自形—他形;石英多呈他形填充于颗粒之间,有波状消光现象,并发育蠕虫结构.矿物组成为:斜长石 47%(0.5~2.5 mm),钾长石 25%(1~3 mm),石英 13%(0.2~1.0 mm),角闪石 12%(0.2~1.0 mm),黑云母 3%(0.2~1.0 mm).定名为中细粒石英二长闪长岩.

HA-17:中粗粒粒状变晶结构,块状构造.斜长石呈半自形—他形,常见钾长石和石英等包含在斜长石中,聚片双晶不太密集,有些聚片可见尖灭现象,可能是变质成因双晶(图 1c, 1d);钾长石和石英也多为半自形—他形.矿物组成为:斜长石 35%(1~3 mm),钾长石 29%(0.2~1.0 mm),石英 32%(0.1~1.5 mm),白云母 4%(0.2~0.5 mm),绿帘石 <1%(0.1~0.2 mm).定名为中粗粒含绿帘白云母二长变粒岩.

2 斜长石成分与结构测试

2.1 斜长石电子探针成分分析

电子探针成分分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的配备有 4 道波谱仪的 JEOL JXA-8100 电子探针完成.样品在上机测试之前按照 Zhang and Yang(2016)提供的办法进行了镀碳,将样品镀上尽量均匀的厚度约为 20 nm 的碳膜以增强导电性.测试工作条件为:加速电压 15 kV,加速电流 20 nA,束斑直径 10 μm .所有测试数据均进行了 ZAF 校正处理.

对 3 块岩石样品中的斜长石颗粒各打两个点进行成分测试,取两个点测试结果的平均值.各样品中斜长石晶体化学式计算结果列于表 1 中.

2.2 斜长石 X 射线粉晶衍射测试

X 射线粉晶衍射测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的型号为荷兰 X' Pert MPD Pro 的粉晶衍射仪完成.岩石碎样并过筛后,在双目镜下挑出其中的长石碎粒(是否具有解理面区分出长石和石英,但斜长石与钾长石在双目镜下不易区分,所以是斜长石和钾长石混合样),使用玛瑙研钵对挑好的长石碎粒研磨成粉直至达到测试要求.

表 1 斜长石晶体化学式		
Table 1 The chemical formula of plagioclase		
样品编号	晶体化学式(O=8.000)	长石端元组分
DT-37	$(\text{Na}_{0.757}\text{Ca}_{0.212}\text{K}_{0.035}\text{Mg}_{0.001}\text{Mn}_{0.001}\text{Fe}_{0.007})_{1.013}$ $[(\text{Al}_{1.130}\text{Si}_{2.845})_{3.975}\text{O}_{8.000}]$	$\text{Ab}_{75.4}\text{An}_{21.1}\text{Or}_{3.5}$ 更长石
DT-24	$(\text{Na}_{0.838}\text{Ca}_{0.155}\text{K}_{0.018}\text{Mn}_{0.001}\text{Fe}_{0.003})_{1.015}$ $[(\text{Al}_{1.145}\text{Si}_{2.847})_{3.992}\text{O}_{8.000}]$	$\text{Ab}_{82.9}\text{An}_{15.3}\text{Or}_{1.8}$ 更长石
HA-17	$(\text{Na}_{1.003}\text{Ca}_{0.013}\text{K}_{0.005}\text{Fe}_{0.001})_{1.022}$ $[(\text{Al}_{0.950}\text{Si}_{3.028})_{3.978}\text{O}_{8.000}]$	$\text{Ab}_{98.2}\text{An}_{1.3}\text{Or}_{0.5}$ 钠长石

表 2 斜长石与钾长石的晶胞参数测试结果							
Table 2 The cell parameters of plagioclase and K-feldspar							
样品编号	晶胞参数						
		$a(\text{\AA})$	$b(\text{\AA})$	$c(\text{\AA})$	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$
DT-37	Pl	8.111	12.734	7.123	94.292	116.665	87.527
	Kf	8.511	12.912	7.171	90.306	116.015	88.977
DT-24	Pl	8.150	12.838	7.160	94.570	116.675	87.774
	Kf	8.580	12.923	7.196	89.922	116.250	89.240
HA-17	Pl	8.139	12.771	7.156	94.094	116.681	87.689
	Kf	8.600	12.962	7.224	90.739	115.952	87.744

注:Pl. 斜长石;Kf. 钾长石.

测试环境为室温 20 $^{\circ}\text{C}$,湿度 65%.因为是斜长石与钾长石的混合样,需要在衍射图谱中首先区分出斜长石与钾长石的特征峰谱,然后测出的样品晶胞参数,列于表 2 中.

3 斜长石双晶 EBSD 测试与分析

3.1 EBSD 制样

由于电子背散射衍射(EBSD)是一种对样品表面测量的技术,其在样品表面的作用深度为 5~20 nm(徐海军等, 2007),所以样品表面的平整光洁程度将对测试效果有着最直接的影响,需要对样品表面进行高度的机械抛光.

抛光过程在钢化玻璃板和 UNIPOL-830 精密研磨抛光机上进行,抛光剂使用粒径为 5 μm 、2.5 μm 、1 μm 和 0.3 μm 的刚玉(Al_2O_3)粉并以水作为分散剂的悬浊液,以及 0.03 μm 的二氧化硅悬浮液;抛光布为吸震功能优良、损伤较小的金丝绒.具体制备过程如下:

(1)使用粒径为 5 μm 、2.5 μm 的刚玉粉,在钢化玻璃板上对探针片进行粗抛,每种粒度各抛光 10 min,此过程为除去样品表面大的坑凹和裂纹,消除矿物颗粒之间自身的高度差距.抛光过程中需要

表 3 斜长石双晶律的极图特征
Table 3 The pole figure characteristics of twin laws of plagioclase

双晶律种类	极图特征
钠长石律	{010}面,<100>、<001>轴两单体极点重合;{100}、{001}面,<010>轴两单体极点近于重合.特征概括为:3个主面和主轴都重合或近于重合
卡斯巴律	{100}、{010}、{110}、{130}面,<001>轴两单体极点重合;<010>轴两单体极点近于重合.特征概括为:主轴<100>不重合,主面{001}不重合,但{hk0}面重合
卡-钠复合律	{010}面,<001>轴两单体极点重合;{100}面,<010>轴两单体极点近于重合.特征概括为:主轴<100>不重合,主面{001}不重合,且{hk0}面也不重合
肖钠长石律	{100}、{001}面,<010>轴两单体极点重合;{010}面,<100>、<001>轴两单体极点近于重合;简单概括为:3个主面和主轴都重合或近于重合.这与钠长石是相似的,与钠长石律区别是:<001>轴两单体之间夹角为 6.98°,这个角度在极图上也很难看出来.肖钠长石律与钠长石律只能通过双晶接合面的方向区别:钠长石律接合面为{010},肖钠长石律接合面为{h0l}
巴温诺律	{021}、{0 $\bar{2}$ 1}面,<100>轴两单体极点重合,其他方向晶面或晶轴的极点关于{021}面对称
曼尼巴律	{001}面,<010>、<100>轴两单体极点重合,{010}面两单体极点近于重合,其他方向晶面或晶轴的极点关于{001}面对称
柱面{110}律	{110}、{1 $\bar{3}$ 0}面,<001>轴两单体极点重合,其他方向晶面或晶轴的极点关于{110}面对称
柱面{1 $\bar{1}$ 0}律	{1 $\bar{1}$ 0}、{130}面,<001>轴两单体极点重合,其他方向晶面或晶轴的极点关于{1 $\bar{1}$ 0}面对称
柱面{130}律	{130}、{1 $\bar{1}$ 0}面,<001>轴两单体极点重合,其他方向晶面或晶轴的极点关于{130}面对称
柱面{1 $\bar{3}$ 0}律	{1 $\bar{3}$ 0}、{110}面,<001>轴两单体极点重合,其他方向晶面或晶轴的极点关于{1 $\bar{3}$ 0}面对称
阿拉律	<100>轴,{010}、{001}面两单体极点重合;<010>轴两单体极点近于重合,其他方向晶面或晶轴的极点关于垂直<100>的面对称
X 律	{100}面,<010>、<001>轴两单体极点重合;{010}面两单体极点近于重合,其他方向晶面或晶轴的极点关于{100}面对称

注:表格据 Xu *et al.*, 2016,本文作者重新整理.

注意不能用力过猛且时间不能过长,否则会对样品产生新的损伤.

(2)使用粒径为 2.5 μm 、1 μm 、0.3 μm 的刚玉粉,在抛光机上辅以抛光布进行细抛,每种粒度各抛光 30 min,此过程为除去样品表面大的噪点和细小坑凹,使样品表面清洁光滑.

(3)使用粒径为 0.03 μm 的二氧化硅悬浮液,在抛光机上辅以抛光布进行精抛,抛光时间为 30 min,此过程为除去更加细小的噪点,以及除去前两步抛光过程中给样品带来的二次破坏和损伤.

3.2 EBSD 测试过程与标定

EBSD 测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,使用仪器为牛津仪器公司的 NordlysNano 型的电子背散射衍射仪,安装在型号为 FEI Quanta FEG 450 的场发射环境扫描电子显微镜上.测试条件为:样品倾斜角度 70°,低真空 20 Pa,加速电压 20 kV,束斑大小为 6,工作距离 25 mm.测试前在偏光显微镜下选择双晶发育良好的且尽量表面洁净、风化蚀变程度低的颗粒圈定待测.使用手动打点标定和自动面扫两种方式共同完成测试.根据前述斜长石电子探针成分分析结果及 XRD 粉晶衍射测出的晶胞参数,选择 EBSD 数据库中与斜长石成分和结构最接近的数据来解析得到的菊池衍射花样,且

只保留 MAD(Mean Angle Deviation,即平均角度偏差)值小于 1°的数据以便保证测试质量.

3.3 EBSD 测试结果与双晶分析

每个斜长石颗粒 EBSD 面扫之后,利用 EBSD 配套软件 Channel 5.0 对数据进行处理.首先降噪除去单个孤点,合并属于同一个颗粒的散点,便可以得到斜长石颗粒中各单体的取向信息图(Orientation Map).做 {100}、{010}、{001}、{110}、{1 $\bar{1}$ 0}、{130}、{1 $\bar{3}$ 0} 面,以及 <100>、<010>、<001> 轴的极图,分析每两个单体之间的关系,对照各双晶律的极图特点(表 3),就可鉴定斜长石双晶律.在表 3 中,极点的重合与近于重合是基于双晶理论推导出来的,在实际的 EBSD 测试结果中,这种重合与近于重合在极图上都表现为重合的特点,很难区别,所以我们暂且不区分重合与近于重合.例如,在表 3 中我们将钠长石律简单概括为:3 个主面和主轴都重合或近于重合.卡斯巴律、卡-钠复合律也有很多极点是重合的或近于重合的,为了突出它们与钠长石律的区别,在表 3 中我们也给出了特征概括的描述;此外,肖钠长石律与钠长石律在极图特点上是很难区别的,在表 3 中我们也做了说明.柱面 {110}、{1 $\bar{1}$ 0}、{130}、{1 $\bar{3}$ 0} 律之间也是很难区分

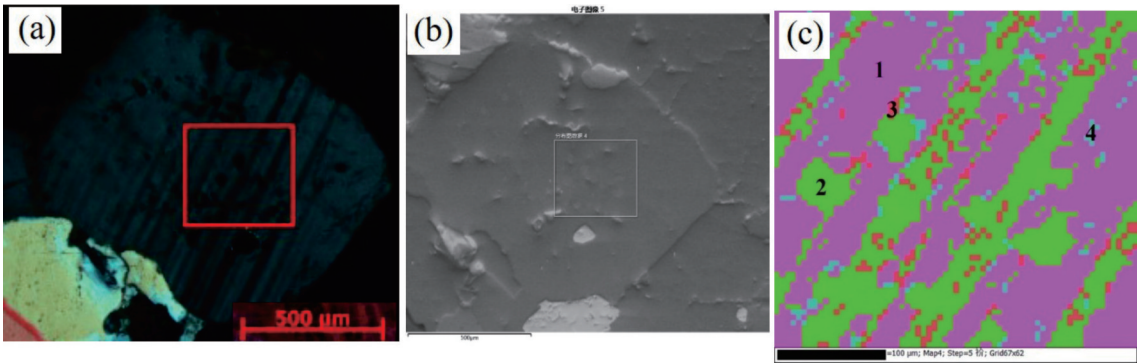


图2 二长花岗岩(DT-37)中斜长石颗粒9 EBSD测试信息

Fig.2 EBSD test for Grain 9 of plagioclase in monzonitic granite (DT-37)

a. EBSD测试扫描区域正交镜下照片;b. EBSD测试扫描区域SEM图;c. 扫描区域取向信息图

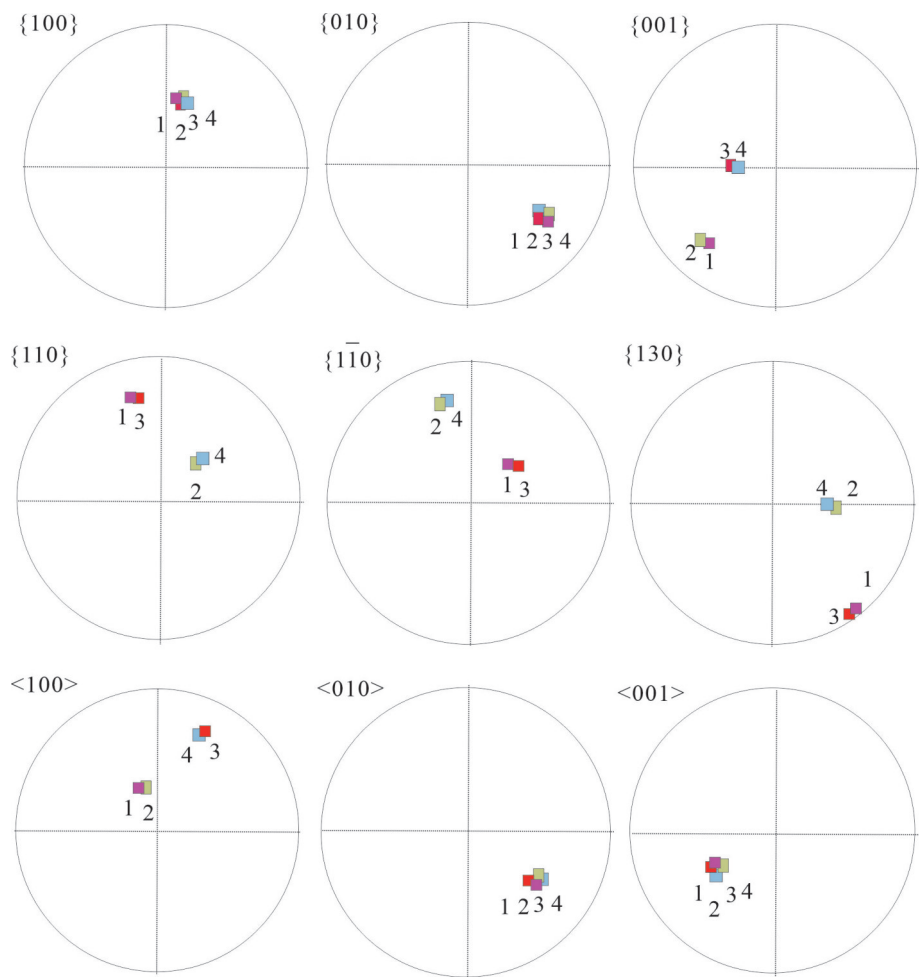


图3 二长花岗岩(DT-37)中斜长石颗粒9的极图

Fig. 3 Pole figures of Grain 9 of plagioclase in monzonitic granite (DT-37)

的,除了考虑不同的极点重合外,还要考虑其他方向晶面或晶轴的极点关于双晶面的对称分布特点才能准确鉴定.

下面我们从每种岩石中选择1~2个具有代表性的颗粒进行举例,说明EBSD测试与分析斜长石

双晶的方法与过程.

3.3.1 二长花岗岩(DT-37)颗粒9 图2a~2c分别为二长花岗岩(DT-37)中斜长石颗粒9的EBSD扫描区域在正交镜下照片、SEM图和取向信息图.该颗粒内部共包含了4个单体,根据极图(图3)两两分

析单体之间的关系得到:

(1)单体1和单体2在 $\{100\}$ 、 $\{010\}$ 、 $\{001\}$ 面和 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ 轴的极点都是重合或近于重合的,两单体之间的对称关系符合钠长石律的极图特征,故单体1和单体2构成钠长石双晶.同理,单体3和单体4也是钠长石律.

(2)单体1和单体3在 $\{100\}$ 、 $\{010\}$ 、 $\{110\}$ 面和 $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 轴的极点是重合或近于重合的,但 $\{001\}$ 面不重合、 $\langle 100 \rangle$ 轴也不重合,两单体之间的对称关系符合卡斯巴律的极图特征,故单体1和单体3构成卡斯巴双晶.同理,单体2和单体4也为卡斯巴律.

(3)单体2和单体3在 $\{100\}$ 、 $\{010\}$ 面和 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ 轴的极点是重合或近于重合的,但 $\{001\}$ 面不重合、 $\langle 100 \rangle$ 轴也不重合、 $\{110\}$ 面也不重合,两单体之间的对称关系符合卡-钠复合律的极图特征,故单体2和单体3构成卡-钠复合双晶.同理,单体1和单体4也为卡-钠复合律.

理论上,如果单体1和单体2之间为钠长石律,单体1和单体3之间为卡斯巴律,那么单体2和单体3必定为卡-钠复合律.按照这种规律,上述4个单体的复合关系可以用图4表示.在这个图中,两单体之间用横线连接代表这两个单体构成钠长石律,用点线连接代表这两个单体构成卡斯巴律,用横一点线连接代表这两个单体构成卡-钠复合律.任意3个单体之间构成一个三角形,表达了这3个单体之间3种双晶律的复合关系.

下面我们分析一下双晶接合面.在光学显微镜下该颗粒只是两个单体组成的简单的聚片双晶(图2a),但在EBSD测试得到的取向信息图(图2c)中却

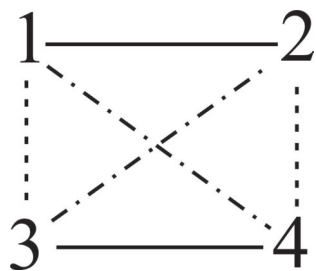


图4 组成卡-钠复合双晶的4个单体之间构成的双晶复合关系

Fig. 4 Twin compound relationships among the four individuals with Albite-Carlsbad compound twin
实线表示钠长石律(Ab);虚线表示卡斯巴律(Cd);点划线表示卡-钠复合律(Ab-Cd)

显示有4个单体,其中以单体1(紫红)和单体2(绿)为主,即:单体1和单体2对应光学显微镜下的两个聚片单体,而单体3(大红)以小晶畴的形式主要镶嵌在单体2中,单体4(灰蓝)以小晶畴的形式主要镶嵌在单体1中,单体3和单体4在光学显微镜下并没有显示出来.我们将聚片双晶的接合面迹线(即聚片双晶接合面与薄片的交线)平移到 $\{010\}$ 极图上,发现该迹线是近于垂直 $\{010\}$ 极点的,即双晶接合面应该是 $\{010\}$,这就证实了单体1-2之间是钠长石律而不是肖钠长石律(我们在前面叙及,钠长石律与肖钠长石律在极图特征上是很相似的,只能用双晶接合面区别).而单体2-3之间、单体1-4之间是卡-钠复合律的关系,说明一个斜长石晶体内部还可以形成小晶畴以卡-钠复合律与主晶相连.单体1-3之间、单体2-4之间基本不接触,而1-3之间、2-4之间是卡斯巴律,可以推测卡斯巴律是被动产生的双晶律.

这种现象与我们以前对卡-钠复合双晶的认识不同,一般认为,当单体1-2、单体3-4是钠长石律,如果再将单体2-4以卡斯巴律接合,自动就产生了:1-3也是卡斯巴律,1-4、2-3是卡-钠复合律.见图5a.也就是说,一般认为卡-钠复合律是被动产生的,是由钠长石律与卡斯巴律共存时复合产生的.在前面引言中我们也叙及,卡-钠复合律能否单独出现还没有定论.但是在DT-37样品颗粒9的EBSD取向扫描图中,卡-钠复合双晶在接合面形式上是主晶-晶畴的关系,这样的接触关系就有可

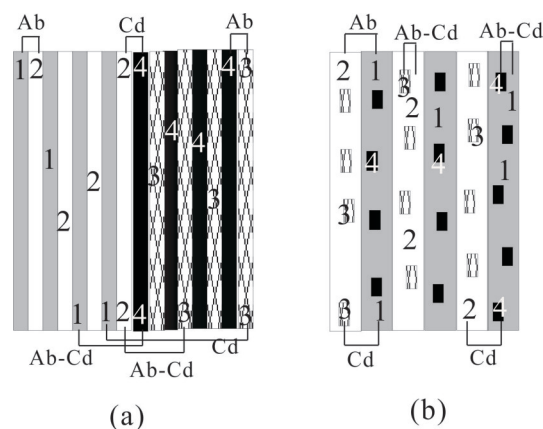


图5 卡-钠复合双晶的两种形式

Fig. 5 Two kinds of Albite-Carlsbad compound twin forms

a. 通常认为的卡-钠复合双晶形式; b. 本文EBSD测试所得到的卡-钠复合双晶形式. Ab. 钠长石律; Cd. 卡斯巴律; Ab-Cd. 卡-钠复合律

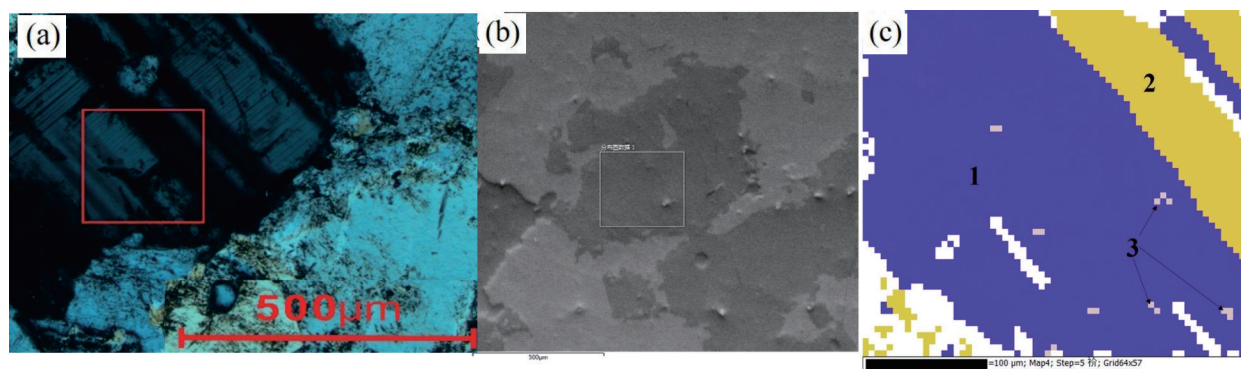


图 6 二长花岗岩(DT-37)中斜长石颗粒6 EBSD测试信息

Fig. 6 EBSD test for Grain 6 of plagioclase in monzonitic granite (DT-37)

a. EBSD测试扫描区域正交镜下照片;b. EBSD测试扫描区域SEM图;c. 扫描区域取向信息图

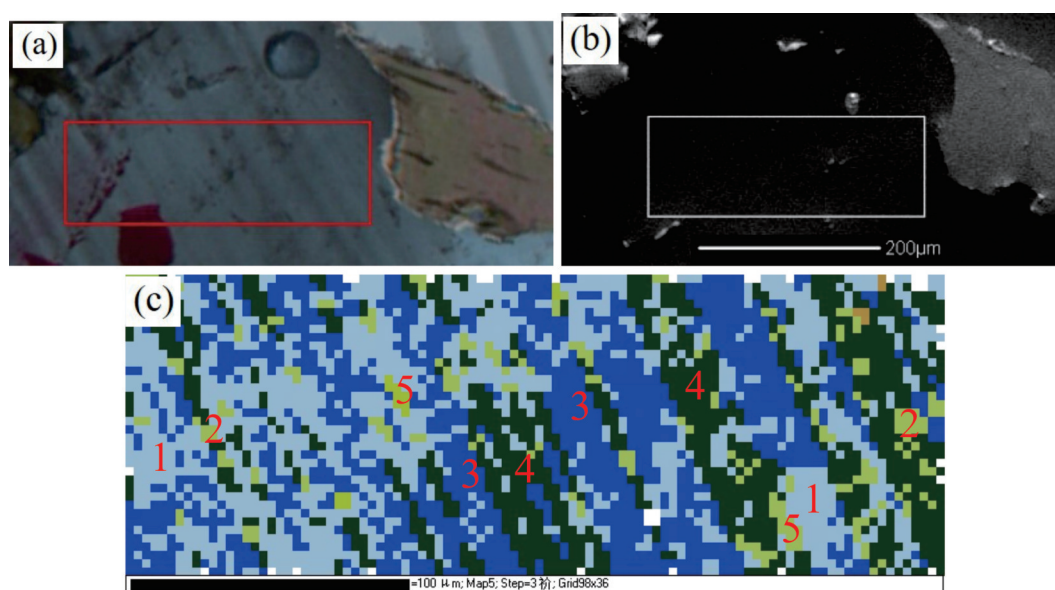


图 7 二长闪长岩(DT-24)中斜长石颗粒2 EBSD测试信息

Fig. 7 EBSD test for Grain 2 of plagioclase in monzonitic diorite (DT-24)

a. EBSD测试扫描区域正交镜下照片;b. EBSD测试扫描区域SEM图;c. 扫描区域取向信息图

能是主动产生的双晶关系,是可以单独出现的;而卡斯巴律双晶的两个单体是不接触的,应该是被动产生的.我们将EBSD取向扫描图中的卡-钠复合双晶的形式用示意图表示于图5b中.

3.3.2 二长花岗岩(DT-37)颗粒6 图6a~6c分别为二长花岗岩(DT-37)中斜长石颗粒6扫描区域正交镜下照片、SEM图和取向信息图.该颗粒内部共包含了3个单体,根据极图分析单体之间的关系得到(极图与DT-37颗粒9的极图类似,省略):单体1-2为钠长石律,单体2-3为卡斯巴律,单体1-3为卡-钠复合律.

但是当我们分析双晶接合面时,发现聚片双晶的接合面迹线是包含 $\{010\}$ 极点的,即双晶接合面应该是 $\{h0l\}$,这就说明单体1(蓝)与2(黄)之间不

是钠长石律而是肖钠长石律.从光学显微镜下(图6a)可见,该斜长石颗粒发育的是格子双晶(在EBSD扫描区左上角可见另一组聚片双晶),格子双晶的一组聚片为钠长石律,另一组聚片就是肖钠长石律,所以该颗粒中EBSD扫描区的聚片是肖钠长石律,EBSD扫描区左上角的另一组聚片双晶就一定是钠长石律.从镜下观察来看,斜长石发育格子双晶很少,即斜长石发育肖钠长石律很少.而除了单体1与单体2外,还有很小的晶畴(单体3,灰粉)分布在单体1中,单体1-3为卡-钠复合律,这个结果与颗粒9中的情况一样,即当某个单体以小晶畴的形式镶嵌在主晶中,晶畴与主晶的关系为卡-钠复合律.

3.3.3 二长闪长岩(DT-24)颗粒2 图7a~7c分别

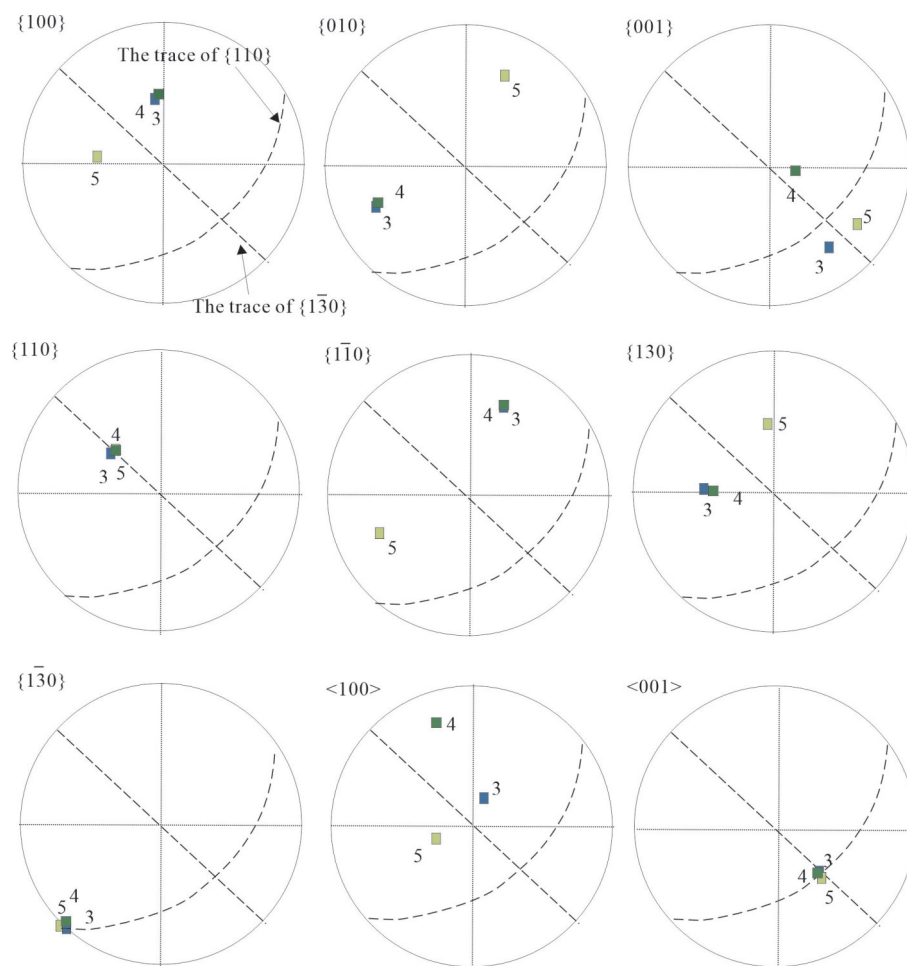


图8 二长闪长岩(DT-24)中斜长石颗粒2中单体3-4-5之间极图

Fig. 8 Pole figures of individuals 3-4-5 in Grain 2 of plagioclase in monzonitic diorite (DT-24)

图中虚线为 $\{110\}$ 、 $\{1\bar{1}0\}$ 的迹线

为二长闪长岩(DT-24)中斜长石颗粒2扫描区域正交镜下照片、SEM图和取向信息图。该颗粒内部共包含了5个单体(单体2和单体5的色差十分小,需要通过Channel 5.0作图软件区分,肉眼难以辨别)。根据极图分析单体之间的关系得到(极图与DT-37颗粒9的极图类似,省略):单体1-4为钠长石律,单体2-3为钠长石律,单体1-2为卡斯巴律,单体3-4为卡斯巴律,单体1-3为卡-钠复合律,单体2-4为卡-钠复合律。即:单体1-2-3-4也构成一个卡-钠复合双晶。

同样,我们分析该颗粒的双晶接合面。在光学显微镜下该颗粒也是两个单体组成的简单的聚片双晶(图7a),但在EBSD测试得到的取向信息图(图7c)中却显示有5个单体,其中以单体3(蓝)和单体4(墨绿)为主,即:单体3和单体4对应光学显微镜下的两个聚片单体。单体1(浅灰蓝)分布杂乱,但以晶畴形式主要镶嵌在单体3中,单体2(灰黄)以小晶畴的形

式主要镶嵌在单体4中,单体5(也是灰黄)以小晶畴的形式主要镶嵌在单体1中,单体1,2和5在光学显微镜下不可辨别。单体3-4之间的聚片双晶的接合面迹线是近于垂直 $\{010\}$ 极点的,即双晶接合面是 $\{010\}$,但单体3-4之间是卡斯巴律,说明卡斯巴律也可以形成聚片双晶。单体2-4之间、单体1-3之间是卡-钠复合律的关系,这一点与DT-37颗粒9中的情况相似,即当某个单体内部有另一个单体以小晶畴的形式存在,晶畴与主晶的关系是卡-钠复合律。该颗粒(DT-24颗粒2)中单体3-4之间形成聚片双晶的卡斯巴律是主动的,单体1-3,单体2-4之间主晶-晶畴关系的卡-钠复合律也是主动的,那接触关系不明确的单体1-4,单体2-3之间的钠长石律就是被动的了。

在DT-24颗粒2中,还有一个单体5与其他单体的关系需要分析。单体5与单体1-2-3-4的 $\langle 001 \rangle$ 是重合的。如图8,进一步分析发现单体3-4-5的

$\{1\bar{3}0\}$ 、 $\{110\}$ 是重合的,那么它们之间就有可能是柱面 $\{110\}$ 律和(或)柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律.为了进一步确定,我们将 $\{110\}$ 和 $\{1\bar{3}0\}$ 面的迹线(即面的极射赤平投影线)画在极图上,考察所有极点的分布是关于哪个面呈对称关系.在这个图中许多极点既关于 $\{110\}$ 呈对称关系又关于 $\{1\bar{3}0\}$ 呈对称关系,很难判断.但是仔细考察后发现,单体3和单体5的 $\{001\}$ 极点和 $\langle 100 \rangle$ 极点只关于 $\{1\bar{3}0\}$ 对称,不关于 $\{110\}$ 对称,所以单体3-5构成柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律;单体4和单体5的 $\{001\}$ 极点和 $\langle 100 \rangle$ 极点只关于 $\{110\}$ 对称(要将 $\{110\}$ 迹线通过吴氏网的小圆弧旋转变为直径,同时单体4和单体5的 $\langle 100 \rangle$ 极点也随之旋转后,才能看出这种对称),不关于 $\{1\bar{3}0\}$ 对称,所以单体4-5构成柱面 $\{110\}$ 律.

由于单体3-5,单体4-5,单体3-4之间都有双晶关系,我们就需要分析单体3-4-5之间是否存在双晶的复合规律.单体3-4之间为卡斯巴律,其双晶轴为 $\langle 001 \rangle$,单体3-5之间为柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律,其双晶轴为 $\{1\bar{3}0\}$ 面的法线,单体4-5之间为柱面 $\{110\}$ 律,其双晶轴为 $\{110\}$ 面的法线.由几何结晶学可以计算出来, $\{1\bar{3}0\}$ 面与 $\{110\}$ 面是近于互相垂直的(85.3°),因此它们的法线也是近于互相垂直的;并且它们的法线也垂直 $\langle 001 \rangle$.因此单体3-4、单体3-5、单体4-5这3对单体构成的双晶律对应的双晶轴之间是近于两两垂直的,可以认为这3种双晶律(卡斯巴律—柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律—柱面 $\{110\}$ 律)大致可以相互复合,形成一个复合双晶(图9).这种复合双晶以前没有报道.

3.3.4 二长变粒岩(HA-17)中颗粒6 图10a~10c分别为二长变粒岩(HA-17)中斜长石颗粒6扫描区

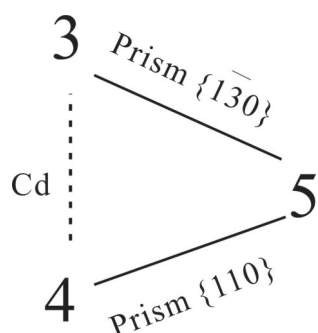


图9 二长闪长岩(DT-24)斜长石颗粒2中单体3-4-5构成的双晶律复合关系

Fig.9 Twin compound relationship among individuals 3-4-5 in Grain 2 of plagioclase in monzonitic diorite (DT-24)
Cd. 卡斯巴律; Prism $\{1\bar{3}0\}$. 柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律; Prism $\{110\}$. 柱面 $\{110\}$ 律

域正交镜下照片、SEM图和取向信息图.颗粒6内部共包含了6个单体,其中单体5-6为钠长石律(极图省略).但是,单体1-2-3-4之间存在一个复杂的双晶律共存关系,其极图见图11.首先,单体1-2-3-4的 $\langle 001 \rangle$ 是重合的;其次,单体1-2之间为卡—钠复合律,单体3-4之间也为卡—钠复合律;此外,单体1和单体3的 $\{1\bar{3}0\}$ 、 $\{110\}$ 面及 $\langle 001 \rangle$ 轴的极点是重合的,我们将单体1-3的 $\{1\bar{3}0\}$ 和 $\{110\}$ 的迹线画在极图上,发现单体1和单体3的 $\{001\}$ 极点和 $\langle 100 \rangle$ 极点只关于 $\{1\bar{3}0\}$ 对称,不关于 $\{110\}$ 对称,所以单体1-3之间为柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律;类似地,单体2和4的 $\{1\bar{3}0\}$ 、 $\{110\}$ 面及 $\langle 001 \rangle$ 轴的极点是重合的,我们也将单体2-4的 $\{1\bar{3}0\}$ 和 $\{110\}$ 的迹线画在极图上,发现单体2和单体4的 $\{001\}$ 极点和 $\langle 100 \rangle$ 极点只关于 $\{1\bar{3}0\}$ 对称,不关于 $\{110\}$ 对称,所以单体2-4之间为柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律.并且发现,单体1-3的双晶面 $\{1\bar{3}0\}$ 与单体2-4的双晶面 $\{1\bar{3}0\}$ 是重合的,单体1-3的 $\{110\}$ 与单体2-4的 $\{110\}$ 也是重合的(图11).

既然单体1-2、单体3-4为卡—钠复合律,单体1-3为柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律,单体2-4为柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律,那1-2-3-4之间会不会存在双晶律的复合关系呢?因为这3个双晶律的双晶轴都在垂直 $\langle 001 \rangle$ 的平面内,不可能互相垂直,所以它们不能形成双晶律的复合关系,即:卡—钠复合律与柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律或柱面

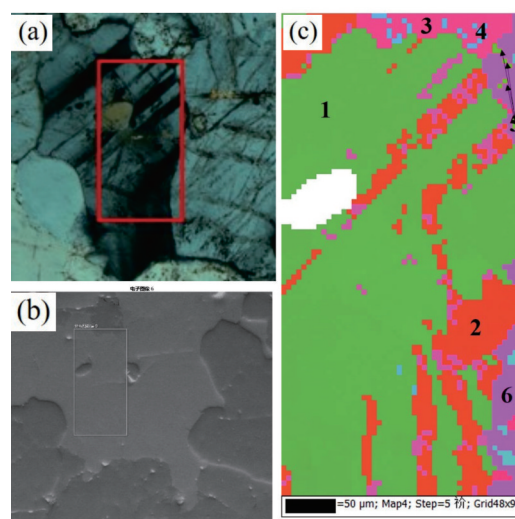


图10 二长变粒岩(HA-17)中斜长石颗粒6 EBSD测试信息

Fig.10 EBSD test for Grain 6 of plagioclase in monzonitic leptyte (HA-17)

a. EBSD测试扫描区域正交镜下照片; b. EBSD测试扫描区域SEM图; c. 扫描区域取向信息图

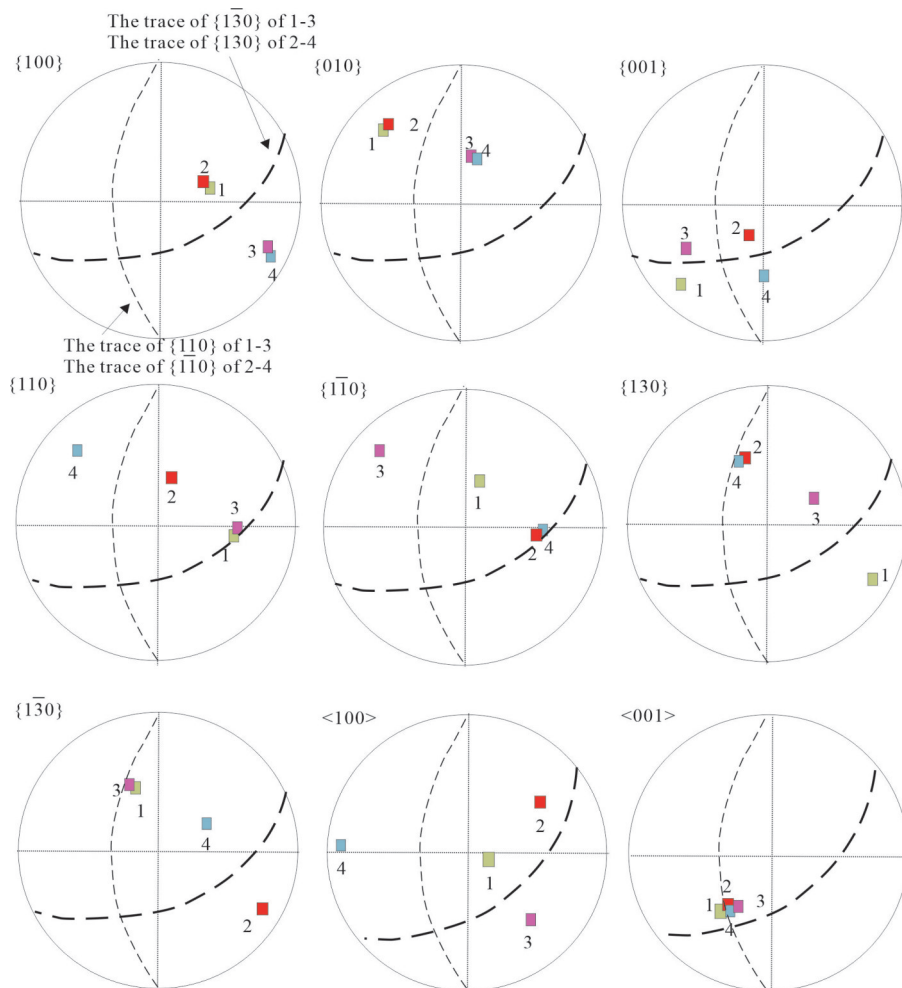


图 11 二长变粒岩(HA-17)中斜长石颗粒 6 单体 1-2-3-4 之间极图

Fig.11 Pole figures of individuals 1-2-3-4 in Grain 6 of plagioclase in monzonitic leptyte (HA-17)

粗虚线为单体 1-3 之间的双晶面 $\{1\bar{3}0\}$ 和单体 2-4 之间的双晶面 $\{130\}$ 的迹线,这两个双晶面是重合的;细虚线为单体 1-3 的 $\{110\}$ 和单体 2-4 的 $\{1\bar{1}0\}$ 的迹线,这两个面也是重合的

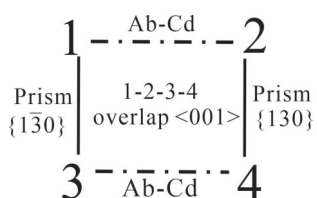


图 12 二长变粒岩(HA-17)中斜长石颗粒 6 单体 1-2-3-4 之间双晶关系

Fig.12 The twin relationship among individuals 1-2-3-4 in Grain 6 of plagioclase in monzonitic leptyte (HA-17)

$\{130\}$ 律不能复合产生另一复合双晶律,也就是说,单体 1-4,单体 2-3 之间没有双晶关系.单体 1-2-3-4 之间的双晶关系见图 12.

仔细考察后发现,在单体 1-2-3-4 之间存在许多重合关系,除了上述的单体 1-3 的 $\{1\bar{3}0\}$ 与单体 2-

4 的 $\{130\}$ 重合、单体 1-3 的 $\{110\}$ 与单体 2-4 的 $\{1\bar{1}0\}$ 重合外,还有单体 1-2 的 $\{010\}$ 与单体 3 的 $\{1\bar{1}0\}$ 、单体 4 的 $\{110\}$ 是重合的;单体 3-4 的 $\{010\}$ 与单体 1 的 $\{1\bar{1}0\}$ 、单体 2 的 $\{110\}$ 是重合的;单体 1-2 的 $\{100\}$ 与单体 4 的 $\{1\bar{3}0\}$ 、单体 3 的 $\{130\}$ 是重合的;单体 3-4 的 $\{100\}$ 与单体 1 的 $\{130\}$ 、单体 2 的 $\{1\bar{3}0\}$ 是重合的.我们将所有极点合并到一个极图,发现这些重合的极点都位于同一条大圆弧上(图 13).在这个合并的极图上测量各极点之间的角度,基本上都是 30° 的角度关系,其中双晶轴(卡—钠复合律的双晶轴近似为 $\{100\}$ 的极点、柱面 $\{130\}$ 和 $\{1\bar{3}0\}$ 律的双晶轴为 $\{130\}$ 和 $\{1\bar{3}0\}$ 的极点)所在的位置基本上是 60° (理论计算为 $60^\circ \pm 4.5^\circ$) 的关系,说明单体 1-2-3-4 之间的卡—钠复合律—柱面

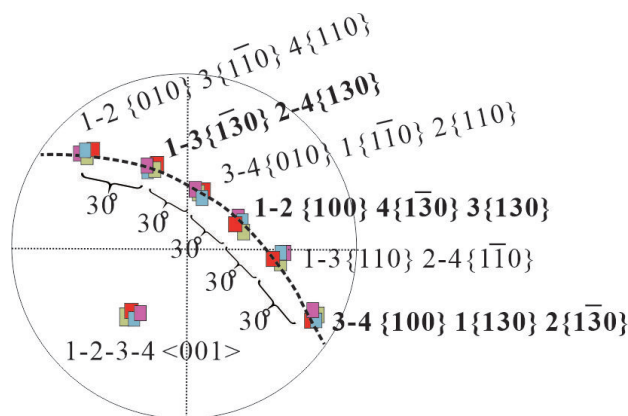


图 13 二长变粒岩(HA-17)中斜长石颗粒6单体1-2-3-4相互重合的极点的规律分布

Fig.13 The regular distribution of the overlapping poles among individuals 1-2-3-4 in Grain 6 of plagioclase in monzonitic leptyte (HA-17)

黑色数字表达的是双晶轴所在的位置

{130}律一柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律组成一个具有三一六方对称的规则连生体。

按照上述方法分析了二长花岗岩(DT-37)中11个斜长石颗粒、二长闪长岩(DT-24)中9个斜长石颗粒、二长变粒岩(HA-17)的9个斜长石颗粒的双晶律情况,列于表4~6中。

4 讨论

在偏光显微镜下观察鉴定斜长石的双晶律,是以双晶的形式来鉴定的:聚片双晶通常被认为是钠长石律;简单接触双晶被认为是卡斯巴律;如果聚片与简单接触同时存在,就被认为是卡一钠复合双晶;如果出现格子双晶,其中一个方向的聚片为钠长石律,另一个方向的聚片为肖钠长石律。

然而,本文用EBSD测试斜长石的双晶律,发现与偏光显微镜下所观察到的斜长石双晶现象有所不同。在偏光显微镜下只看到两个单体组成的聚片双晶,在EBSD扫描的取向图中却出现了3~4个单体,其中两个单体对应于偏光显微镜下组成聚片的两个单体,而另外1~2个单体则以晶畴的形式镶嵌在形成聚片的那两个单体内,这3~4个单体一般都组成了一个卡一钠复合双晶,其中钠长石律、卡斯巴律、卡一钠复合律同时存在。这种现象在所研究的3种岩石中普遍存在,这为我们重新认识斜长石双晶提供了新的信息。

在这种同时有聚片和晶畴关系的双晶中,大多数是聚片接触的为钠长石律,主晶一晶畴接触的为

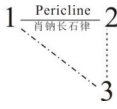
卡一钠复合律,这样就导致了卡斯巴律的单体基本不接触,即卡斯巴律为被动双晶关系。这种形式的双晶如图5b所示。具有这种双晶形式的有:二长花岗岩的第2、5、9、11颗粒,二长闪长岩的第1、3颗粒,二长变粒岩的第1、3、5、8颗粒。但也有少数是聚片接触的为卡斯巴律,主晶一晶畴接触的为卡一钠复合律,这样就导致了钠长石律的单体基本不接触,即钠长石律为被动双晶关系,这种形式的双晶相当于将图5b中的钠长石律(Ab)与卡斯巴律(Cd)交换位置。具有这种双晶形式的有:二长闪长岩的第2颗粒,二长变粒岩的第2、4颗粒。当然,还有少数双晶形式是:主晶一晶畴接触的是钠长石律、卡一钠复合律和卡斯巴律,这时不好判断哪个双晶律是被动的,具有这种双晶形式的有:二长花岗岩的第1、3、10颗粒,二长闪长岩的第4、5、7、8、9颗粒。

从表4~6可以看出,主晶一晶畴形式的大多是卡一钠复合律,这种形式的卡一钠复合律是以前没有认识到的。我们原来认为卡一钠复合律是由钠长石律和卡斯巴律同时存在时发生双晶律复合被动产生出来的,这时形成卡一钠复合律关系的两个单体不直接接触,如图5a所示。但如果是形成主晶一晶畴的关系,则说明卡一钠复合律不是被动产生出来的双晶关系,而是主动生成的。

此外,还发现了两种新的双晶律复合和规则连生关系:卡斯巴律一柱面 $\{130\}$ 律一柱面 $\{110\}$ 律这3种双晶律可以形成复合关系,即:其中任意两种双晶律的复合可以形成第3种双晶律;卡一钠复合律一柱面 $\{130\}$ 律一柱面 $\{1\bar{3}0\}$ 律这3种双晶律共

表 4 二长花岗岩(DT-37)中斜长石双晶测试分析统计

Table 4 Twin analysis and statistics for plagioclase in monzonitic granite (DT-37)

颗粒(单体)	双晶律及其复合关系	双晶中单体接触情况	双晶形式描述
1(1,2,3)		颗粒中以单体 1 为主,单体 2 和 3 以晶畴形式零散分布在单体 1 内部	无聚片,主晶—晶畴为卡斯巴律和卡—钠复合律
2(1,2,3,4)		颗粒中以单体 2 和 3 为主,单体 1 以晶畴形式零散分布在单体 2 内部,单体 4 以晶畴形式零散分布在单体 3 内部.单体 2-3 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶—晶畴为卡—钠复合律,卡斯巴律基本不接触
3(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 3、4 以晶畴形式零散分布在单体 2 的内部.单体 1-2 的接合面是(010)	聚片为卡斯巴律,主晶—晶畴为钠长石律和卡—钠复合律
4(1,2)		颗粒中以单体 1 为主,单体 2 以晶畴形式零散分布在单体 1 内部	无聚片,主晶—晶畴为卡—钠复合律
5(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 4 以晶畴形式零散分布在单体 1 内部,单体 3 以晶畴形式零散分布在单体 2 内部.单体 1-2 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶—晶畴为卡—钠复合律,卡斯巴律基本不接触
6(1,2,3)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 3 以晶畴形式零散分布在单体 1 的内部.但单体 1-2 的接合面不是(010)而是(h0l),所以单体 1 和 2 是肖钠长石律	聚片为肖钠长石律,主晶—晶畴为卡—钠复合律,卡斯巴律基本不接触
7(1,2)		颗粒中以单体 1 和 2 为主.单体 1 和 2 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,无晶畴
8(1,2)		颗粒中以单体 1 和 2 为主.单体 1-2 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,无晶畴
9(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 4 以晶畴形式零散分布在单体 1 内部,单体 3 以晶畴形式零散分布在单体 2 内部.单体 1-2 接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶—晶畴为卡—钠复合律,卡斯巴律基本不接触
10(1,2,3,4)		颗粒中以单体 2 为主,单体 1、3、4 以晶畴形式零散分布在单体 2 内部.单体 2-4 的接合面大致为(010)	聚片为钠长石律,主晶—晶畴为卡斯巴律和卡—钠复合律
11(1,2,3)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 3 以晶畴的形式分布在单体 2 中.单体 1-2 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶—晶畴为卡—钠复合律,卡斯巴律基本不接触

注:实线表示钠长石律(Ab);虚线表示卡斯巴律(Cd);点划线表示卡—钠复合律(Ab-Cd).

存可以形成一个具三一六方对称的规则连生体,但这 3 种双晶律没有形成复合关系。

通过统计表 4~6 中 3 种岩石中斜长石的双晶律,发现这 3 种岩石中大部分斜长石都发育卡—钠复合双晶,即同时存在钠长石律、卡斯巴律和卡—钠复合律.少量是只发育钠长石律的聚片双晶.同时也存在少量肖钠长石律和柱面{130}、{ $\bar{1}30$ }、{110}律.基于本文有限的斜长石双晶统计数量,3

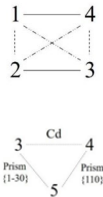
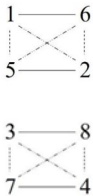
种岩石中斜长石双晶律出现的概率基本相同,可能斜长石双晶律概率与成岩条件的关系不大。

5 结论

(1) EBSD 测试的斜长石双晶现象,与偏光显微镜下所观察到的完全不同.大多数在偏光显微镜下观察到的简单聚片双晶,在 EBSD 测试下都是

表 5 二长闪长岩 (DT-24) 样品中斜长石双晶测试分析统计

Table 5 Twin analysis and statistics for plagioclase in monzonitic diorite (DT-24)

颗粒(单体)	双晶律及其复合关系	双晶中单体接触情况	双晶形式描述
1(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 为主,单体 2-3 交织形成另一个聚片,单体 4 以晶畴形式零散分布在单体 1 的内部.单体 1 与单体 2-3 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶—晶畴为卡—钠复合律,卡斯巴律基本不接触
2(1,2,3,4,5)		颗粒中以单体 3 和 4 为主,单体 1 以晶畴形式零散分布在单体 3 的内部,单体 2 以晶畴形式零散分布在单体 4 的内部.单体 3-4 的接合面是(010).单体 5 很少量,主要以晶畴形式分布在单体 1 中 1-2-3-4-5 共<001>,且 3-4-5 之间形成另一种复合双晶	聚片为卡斯巴律,主晶—晶畴为卡—钠复合律,钠长石律基本不接触
3(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 4 以晶畴形式零散分布在单体 1 的内部,单体 3 以晶畴形式零散分布在单体 2 的内部.单体 1-2 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶—晶畴为卡—钠复合律,卡斯巴律基本不接触
4(1,2,3)		颗粒中以单体 1 为主,单体 2、3 以晶畴形式零散分布在单体 1 的内部	无聚片,主晶—晶畴为卡斯巴律和卡—钠复合律
5(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 为主,单体 2、3、4 交叉在一起(类似于主晶—晶畴的关系)	无聚片.主晶—晶畴为钠长石律、卡斯巴律和卡—钠复合律
6(1,2)		颗粒中以单体 1 为主,单体 2 以晶畴形式零散分布在单体 1 的内部	无聚片,主晶—晶畴为卡斯巴律
7(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 3、4、1 以晶畴形式零散分布在单体 2 的内部.单体 1-2 的接合面是(010)	无聚片,主晶—晶畴为卡斯巴律、卡—钠复合律和钠长石律
8(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 2 和 3 交织形成一个聚片,单体 4 很少,以晶畴分布在 1 和 2 中.单体 1-2 的接合面是(010)	聚片为卡斯巴律,主晶—晶畴为卡—钠复合律和钠长石律
9(1,2,3,4,5,6,7,8)		颗粒中以单体 6 为主,单体 1、2 以晶畴形式零散分布于单体 6 中.单体 5 很少 另一个区域单体 3、4 和 7 交织在一起,单体 8 在 3 和 4 中两个区界面方向性不好.两个区内部各单体界面也不清楚,无方向性	无聚片,主晶—晶畴为卡斯巴律和钠长石律

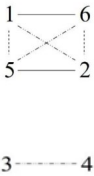
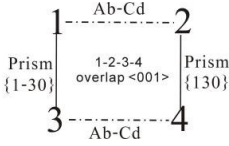
注:实线表示钠长石律(Ab);虚线表示卡斯巴律(Cd);点划线表示卡—钠复合律(Ab-Cd).

卡—钠复合双晶.在这个卡—钠复合双晶中,有 1~2 个单体以晶畴的形式镶嵌在呈聚片的那两个单体中,这 1~2 个单体在偏光显微镜下不可鉴别.在这种卡—钠复合双晶中,呈聚片关系的大多是钠长石律,也有少数是卡斯巴律,呈晶畴—主晶关系的大多是卡—钠复合律.

(2)本文所研究的 3 种岩石(花岗岩、闪长岩、变粒岩)中斜长石双晶律均以卡—钠复合双晶为主,偶见肖钠长石律、柱面 {130}、{ $\bar{1}30$ } 和 {110} 律.基于本文有限的斜长石双晶统计数量,3 种岩石中斜长石双晶律概率基本相同,可能斜长石双晶律概率与成岩条件关系不大.

表 6 二长变粒岩(HA-17)样品中斜长石双晶测试分析统计

Table 6 Twin analysis and statistics for plagioclase in monzonitic leptite (HA-17)

颗粒(单体)	双晶律及其复合关系	双晶中单体接触情况	双晶形式描述
1(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 和 4 为主,单体 2 以晶畴形式零散分布在单体 1 的内部,单体 3 以晶畴形式零散分布在单体 4 的内部.单体 1-4 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶一品畴为卡-钠复合律,卡斯巴律基本不接触
2(1,2,3,4,5,6)		颗粒中以单体 1 和 5 为主,单体 2、3、4 以晶畴形式零散分布在单体 1 的内部,单体 6 以晶畴形式零散分布在单体 5 的内部.单体 1-5 的接合面是(010)	聚片为卡斯巴律,主晶一品畴为卡-钠复合律,钠长石律基本不接触
3(1,2,3,4)		颗粒中以单体 1 和 3 为主,单体 2 以晶畴形式零散分布在单体 1 的内部,单体 4 以晶畴形式零散分布在单体 3 的内部.单体 1-3 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶一品畴为卡-钠复合律,卡斯巴律基本不接触
4(1,2,3)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 3 以晶畴形式零散分布在单体 1 的内部.单体 1-2 的接合面是(010),单体 2-3 基本不接触	聚片为卡斯巴律,主晶一品畴为卡-钠复合律,钠长石律基本不接触
5(1,2,3,4)		颗粒中以单体 2 和 3 为主,单体 1 以晶畴形式零散分布在单体 2 的内部,单体 4 以晶畴形式零散分布在单体 3 的内部.单体 2-3 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶一品畴为卡-钠复合律,卡斯巴律基本不接触
6(1,2,3,4,5,6)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 4 以晶畴形式零散分布在单体 3 的内部,单体 1-2 局部沿(010)方向规则接触 单体 1-2-3-4 中存在三种双晶律,组成一个具三一六方对称的规则连生体	聚片为卡-钠复合律,主晶一品畴也为卡-钠复合律
	5——6	5-6 为钠长石律,单体 5 很少,接触关系不明确	
7(1,2)	1——2	颗粒中以单体 1 和 2 为主.单体 1-2 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,无晶畴
8(1,2,3)		颗粒中以单体 1 和 2 为主,单体 3 以晶畴形式零散分布在单体 2 的内部.单体 1-2 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,主晶一品畴为卡-钠复合律,卡斯巴律基本不接触
9(1,2)	1——2	颗粒中以单体 1 和 2 为主.单体 1-2 的接合面是(010)	聚片为钠长石律,无晶畴

注:实线表示钠长石律(Ab);虚线表示卡斯巴律(Cd);点划线表示卡-钠复合律(Ab-Cd).

(3)发现两种新的斜长石双晶律复合和规则连生关系:①卡斯巴律—柱面{110}律—柱面{130}律可以形成双晶复合关系;②卡-钠复合律—柱面{130}律—柱面{130}律可以形成一个具三一六方

对称的规则连生体.

(4)本文提供了一个用EBSD测试并结合极图来分析鉴定斜长石双晶律、发现一些新的斜长石双晶律复合和连生关系的有效便捷的方法与手段.

References

- Arzilli, F., Mancini, L., Voltolini, M., et al., 2015. Near-Liquidus Growth of Feldspar Spherulites in Trachytic Melts: 3D Morphologies and Implications in Crystallization Mechanisms. *Lithos*, 216/217: 93—105. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.12.003>
- Balić-Žunić, T., Piazzolo, S., Katerinopoulou, A., et al., 2013. Full Analysis of Feldspar Texture and Crystal Structure by Combining X-Ray and Electron Techniques. *American Mineralogist*, 98: 41—52.
- Brown, W.L., Macaudière, J., 1986. Mechanical Twinning of Plagioclase in a Deformed Meta-Anorthosite—The Production of M-Twinning. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(1): 44—56. <https://doi.org/10.1007/BF00373962>
- Brugger, C.R., Hammer, J.E., 2015. Prevalence of Growth Twins among Anhedra Plagioclase Microlites. *American Mineralogist*, 100(2/3): 385—395. <https://doi.org/10.2138/am-2015-4809>
- Chi, J.S., Wu, G.Z., 1982. Federov Law. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 2001. Rock-Forming Minerals (Volume 4A)—Framework Silicates: Feldspar. 2nd ed. Geological Society Publishing House, London.
- Hu, C.Q., 1991. Measurement of Plagioclase Composition and Structural State by Using an Improved Twin Operation Method. *Journal of Guilin College of Geology*, 11(3): 315—319(in Chinese with English abstract).
- Jiang, X.P., 1985. Using a Triaxial Spindle Stage to Determine the Chemical Composition Structure Op and Twinning Type of Plagioclase. *Yunnan Geology*, 4(3): 281—290(in Chinese with English abstract).
- Lee, M.R., 2010. Transmission Electron Microscopy (TEM) of Earth and Planetary Materials: A Review. *Mineralogical Magazine*, 74(1): 1—27. <https://doi.org/10.1180/minmag.2010.074.1.1>
- Noguchi, T., 2013. Importance of Transmission Electron Microscopy (TEM) on the Studies of Planetary Materials and the Progress of TEM and Peripheral Technology. Abstracts of Meeting of the Geochemical Society of Japan, 60: 252—253.
- Shen, S.Y., 1990. The Recognition of Plagioclase Twins with Universal Stage Method. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 10(3): 33—40(in Chinese with English abstract).
- Smith, J.V., Brown, W.L., 1988. Feldspar Minerals, Volume 1: Crystal Structures, Physical, Chemical and Microtextural Properties. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Wang, C.B., Chen, T.L., Chen, N., 2011. The Origin of Iridescent Plagioclase from Finland: A Perspective from the Relationship between the Inclusions and the Iridescence. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(1): 150—160(in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Zhao, S.R., Li, C., et al., 2016. Plagioclase Twins in a Basalt: An Electron Backscatter Diffraction Study. *Journal of Applied Crystallography*, 49(6): 2145—2154. <https://doi.org/10.1107/s1600576716015739>
- Xu, H.J., Jin, S.Y., Zheng, B.R., 2007. New Technique of Petrofabric: Electron Backscatter Diffraction(EBSD). *Geoscience*, 21(2): 213—225(in Chinese with English abstract).
- Zhang, R.X., Yang, S.Y., 2016. A Mathematical Model for Determining Carbon Coating Thickness and Its Application in Electron Probe Microanalysis. *Microscopy and Microanalysis*, 22(6): 1374—1380. <https://doi.org/10.1017/s143192761601182x>

附中文参考文献

- 池际尚, 吴国忠, 1982. 弗德罗夫法. 北京: 地质出版社.
- 胡承绮, 1991. 一种测定斜长石成分和结构态的改进双晶法. 桂林冶金地质学院学报, 11(3): 315—319.
- 江鑫培, 1985. 三轴旋转针台测定斜长石成分结构状态和双晶类型. 云南地质, 4(3): 281—290.
- 沈上越, 1990. 旋转台法鉴别斜长石双晶律. 矿物岩石, 10(3): 33—40.
- 王晨波, 陈廷礼, 陈南, 2011. 芬兰晕彩斜长石晕彩成因探讨: 包裹体及其与晕彩的关系. 岩石矿物学杂志, 30(1): 150—160.
- 徐海军, 金淑燕, 郑伯让, 2007. 岩石组构学研究的最新技术——电子背散射衍射(EBSD). 现代地质, 21(2): 213—225.