

火山岩实验矿物的结晶形态 及其生长动力学机制*

白志民 周王旬若

(中国地质大学, 北京 100083)

主题词 实验矿物 结晶形态 生长动力学 火山岩

提 要 本文对我国福建、江西、河南等地某些典型玄武岩和部分安山岩以及意大利维苏威火山的白榴响岩质碱玄岩进行了熔融、结晶、淬火实验研究。总结了斜长石、白榴石、橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和磁铁矿等实验矿物的形态特征, 探讨了微晶矿物、骸晶矿物和雏晶矿物的生长动力学机制。阐述了矿物晶体形态与结晶温度、生长速度及熔浆 SiO₂ 含量的关系。

笔者对我国福建、江西、河南等地某些典型玄武岩和部分安山岩以及意大利维苏威火山的白榴响岩质碱玄岩进行了实验研究, 其中包括熔融、结晶、淬火实验。根据实验结果, 分析了熔浆成分对首晶矿物的影响, 阐明了矿物晶体形态与结晶温度、生长速度及成核密度的关系, 研究了斜长石、白榴石的晶出及其矿物学、岩石学意义, 论述了橄榄石、辉石的成分特征及其晶出后熔浆成分的演化趋势, 讨论了单斜辉石的淬火效应与压力效应。以上内容, 已经在本刊 1996 年第 2 期发表^[1], 本文仅对实验矿物的结晶形态及其生长动力学机制进行研究和探讨。

文中的研究对象为中基性火山岩, 实验样品的产地、时代、岩石名称和系列见表 1。

表 1 实验岩石的产地、时代、名称和系列

Table 1 Localities, ages, names and sequences of experimental rocks

岩石样品编号	I	II	III	IV	V
产地	江西广丰	河南二郎坪	福建明溪	福建牛头山	意大利维苏威
时代	早白垩世	寒武纪	新第三纪—第四纪	新第三纪	现代
岩石名称	安山岩	高铝玄武岩	碱性苦橄玄武岩	橄榄拉斑玄武岩	白榴响岩质碱玄岩
岩石系列	钙碱性系列	钙碱性系列	碱性玄武岩系列	拉斑玄武岩系列	副长石岩系列

本次熔融、结晶、淬火实验是在自动控温的 Si—Mo 棒箱式高温炉中进行的。将粉碎至-200 目的样品装在刚玉坩埚中, 在 1400—1300 °C 下熔成玻璃, 然后在 1350—950 °C 区间内以 50 °C 间隔恒温结晶。其中, 1300 °C 及更高温度的实验, 在炉内恒温 3 小时; 1250 °C 及更低温度的实验, 在炉内恒温 16 小时。样品高温熔融、恒温结晶后, 在空气中快速淬火。总体来看, 由于每次实验的样品在电炉中放置的位置较固定, 恒温结晶时间较长, 且淬火速度很快, 因此实验过程对矿物

* 本文由高等学校博士学科点专项科研基金 (9249114) 资助。
本文于 1996 年 11 月 20 日收到, 12 月 1 日改回。

晶体形态的影响可以忽略不计。本文对淬火后的实验样品进行了显微照相(见照片)和岩相学研究;对熔融玻璃及晶出矿物进行了电子探针分析(结果见“火山岩熔融、结晶、淬火实验及岩石学意义”一文^[1]);对典型组构作了扫描电子显微镜分析和照相(见照片)。

1 实验矿物的结晶形态

该项实验晶出的暗色矿物有橄榄石、单斜辉石和斜方辉石,浅色矿物有斜长石和白榴石,不透明矿物为磁铁矿。这些矿物的结晶形态有微晶、骸晶和雏晶三种,它们分别在不同结晶温度的实验样品中出现。总体看,同一实验样品中同种结晶矿物的大小基本均匀,形态相似。

1.1 微晶

本文所称微晶是指熔融、结晶实验中形成的具有较完整形态、有光性的微小晶体。

本次实验晶出的微晶矿物有斜长石、单斜辉石、白榴石和磁铁矿。它们的大小、形态及成分见表2及照片1至照片6。

表2 微晶矿物的成分及结晶特征

Table 2 Compositional and crystallization characteristics of microcrystal minerals

矿物名称	斜长石		单斜辉石		白榴石	磁铁矿	
实验样品	I	II	III		IV	V	
实验温度(°C)	1200	1250	1200	1150	1150	1200	
结晶特征	板柱状, 近平行排列	板柱状—针柱状, 杂乱排布, 或呈放射状集合体	宽板状, 稀疏分布, 砂钟构造发育, “砂部”顶角 86°—90°, 偶见简单双晶		板柱状, 不规则排布, 砂钟构造, “砂部”顶角 28°—38°	粒—柱状, 集合体呈放射束状	粒—柱状有些呈三连晶(夹角 120°左右)或四连晶(夹角 90°)
晶体大小 (mm)	长	0.2—0.25	0.25		0.23—0.25 0.05—0.08	0.1 0.03	0.04 0.02
	宽	0.025	0.2				
	厚	0.01	0.009				
成分 (%)	An 62.31 Ab 34.72 Or 2.97		砂钟构造		SiO ₂ : 58.14—58.25 Al ₂ O ₃ : 22.65—22.78 K ₂ O: 16.67—17.45		
			“钟部”	“砂部”			
			Wo 46.76 En 37.49 Fs 15.75	43.89 46.58 9.53			44.10 33.70 18.20
照片号	1	2	3	4	5	6	

实验样品编号与表1岩石样品编号相同。

照片3中的砂钟状单斜辉石,其“钟部”的TiO₂及Al₂O₃含量较高,干涉色较高(二级蓝绿);而“砂部”的TiO₂和Al₂O₃含量较低,干涉色较低(一级黄白)。

1.2 骸晶

本文所称骸晶,是指那些具有特殊形态、有光性,但发育不完善的晶体骨架。

本次实验晶出的骸晶矿物有斜长石、橄榄石、斜方辉石和磁铁矿。现分述其特征如下:

斜长石:主要出现在安山岩(I)和高铝玄武岩(II)的实验样品中,结晶温度分别为1150°C和1200°C。晶体呈板柱状,长轴方向晶棱和晶面平直,晶体中空部分由熔浆玻璃充填。骸晶之间

常组合成“雁列状”、“T 字形”(照片 7), 或呈“一字形”排列(照片 8)。呈雁列状排列的各骸晶, 随物台转动依次消光, 但呈“一字形”排列的骸晶消光位一致。

安山岩实验样品中, 骸晶大小为: 长 0.06mm 土, 宽 0.01—0.02mm。高铝玄武岩实验样品中的骸晶大小为: 长 0.37—0.5mm, 宽 0.075mm 土。其成分为: $An_{68.08-70.05} Ab_{29.95-30.75} Or_{0-0.57}$ 。

橄榄石: 仅在碱性苦橄玄武岩(III)和橄榄拉斑玄武岩(IV)实验样品中出现, 结晶温度分别为 1200℃和 1100—1400℃。骸晶单体形态多种多样(照片 9、10), 有“工字形”、“乌龟形”等, 大小一般为 0.02—0.025mm。“工字形”者常联合为“铁轨状”集合体, 并具有一致的消光位, 长度一般在 1mm 左右, 最长达 2.5mm。集合体之间常呈平行排列。碱性苦橄玄武岩实验样品晶出的橄榄石骸晶为镁橄榄石, 其成分为: $Fa_{1.57} Fo_{98.43}$ 。

本次实验晶出的橄榄石骸晶, 其形态特征及组合特点与铸石和高炉渣中的橄榄石相似^[2]。

斜方辉石: 仅在橄榄拉斑玄武岩(IV)实验样品(1350℃)中晶出。晶体呈“鲱骨状”(照片 11), 由“脊骨”及其两侧对称生长的“肋骨”组成。“脊骨”长 0.2mm 土, “肋骨”长 0.07—0.08mm。“脊骨”与“肋骨”基本呈垂直, 只在其接合部两者呈 70°左右的夹角。该辉石为顽火辉石, 成分为: $Wo_{5.10-7.90} En_{84.80-89.00} Fs_{5.90-7.30}$ 。

磁铁矿: 磁铁矿骸晶大多呈规则的等边三角形, 边长为 0.025mm 土; 有的晶体呈不等边六边形(照片 12—14)。在照片 13 中, 磁铁矿骸晶的晶棱有明显生长间断, 并包裹有更小的六边形骸晶。在照片 14 中, 六边形晶面上呈现出明显的条带, 其内包含有更小的三角形骸晶。

1.3 雏晶

本实验中, 雏晶为众多结晶程度较低的毛发状“晶须”组成的集合体, 形态呈放射状、球粒状、花瓣状、雪花状、羽毛状、禾束状、枝条状。“晶须”为无光性—微弱光性。

本次实验晶出的雏晶矿物有单斜辉石、斜长石和磁铁矿, 其特征见表 3 及照片 15—20。实验结果表明, 雏晶形态与矿物种类有关: 单斜辉石雏晶往往呈球粒状或花瓣状; 斜长石雏晶多呈禾束状, 偶见球粒状; 磁铁矿雏晶以雪花状最常见, 有时呈禾束状或枝条状。

表 3 雏晶矿物结晶特征
Table 3 Crystallization characteristics of embryonic crystal minerals

矿物名称	单斜辉石		斜长石		磁铁矿
	碱性苦橄玄武岩		安山岩		
实验样品					
实验温度(℃)	1250	1300	1100		
结晶特征	单斜辉石雏晶以自形粒状磁铁矿为核心, 呈花瓣状生长, 波状消光	单斜辉石呈球粒状, 无结晶核心, 车轮状消光	斜长石雏晶呈放射束状, 垂直坍塌壁生长; 晶须之间为富含铁质的玻璃	斜长石雏晶呈球粒状, 球体边缘晶须与周围玻璃犬牙交错, 十字消光	雏晶呈枝条状、雪花状、羽毛状。枝条状雏晶的晶须有时与斜长石雏晶相间分布
晶体大小(mm)	直径 0.04 土	球粒直径 0.2 土	晶须长 0.7 土	球粒直径 3.50	晶须长 0.1 土
照片号	15	16	17	18	19 和 20

2 实验矿物的生长动力学机制

矿物从熔体中晶出, 大都经历了晶核形成和晶体生长两个过程, 前者主要受体系自由能变化的影响, 是热力学过程; 后者则主要取决于晶体结构(内因)及生长环境(外因), 是动力学过

程。也就是说, 矿物能否晶出, 以及晶出数量的多少, 主要与体系的热力学状态有关; 而晶体的生长及其形貌, 则主要受控于动力学条件。本文着重讨论实验过程中骸晶、雏晶和微晶矿物晶出的动力学机制。

2. 1 骸晶矿物

2. 1. 1 骸晶的形成

晶核形成后, 矿物晶体将按照自己的结构及结晶习性生长, 如斜长石呈板柱状, 橄榄石呈厚板状或粒状, 磁铁矿呈八面体或菱形十二面体等。但是, 由于熔浆粘度较大以及物质扩散迁移速率较慢的影响, 晶体生长所需的物质得不到充分供应, 因而快速生长的晶体最先发育的是晶棱或与生长方向平行的晶面, 因而形成中空的骸晶(照片7—8)或边棱凸出的骸晶(照片9)以及环带状骸晶(照片12—14)。

2. 1. 2 骸晶的定向排列

呈定向排列的骸晶矿物有斜长石(照片7—8)和橄榄石(照片9—10)。

骸晶在晶核基础上逐渐长大时, 矿物晶体与熔体的密度差将迫使矿物下沉或上浮, 从而引起熔体扰动, 进而导致温度的起伏变化。反过来, 熔体扰动和温度变化又加剧了熔体的流动。熔体流动所产生的扭力将驱使正在生长着的骸晶作定向排列。并且, 其排列形式依骸晶长宽比及分布密度不同而变化: 当骸晶分布较稀疏、且骸晶单体的长宽比不大($< 2:1$)时, 多个骸晶将排列成不连续的“铁轨状”集合体(照片8—10), 并在一定范围内出现集合体平行排列的现象; 单个骸晶的长宽比较大($> 4:1$)、且密集分布时, 骸晶集合体呈雁列式平行排列(照片7)。

2. 1. 3 斜方辉石骸晶的枝蔓生长

枝蔓生长的概念最初由切尔诺夫(Tchernoff, 1879)^[4]用来描述金属铸锭中呈现的分支结构。本次实验晶出的鲕骨状斜方辉石骸晶(照片11)呈现出枝蔓生长的特征, 其生长过程可作如下分析: 首先, 晶体沿a轴方向^[2]一维生长, 形成骸晶的“脊骨”部分; 当“脊骨”附近的熔浆中结晶物质的饱和度高于其一维生长所需时, 则受结晶对称性的制约, 沿垂直或近于垂直“脊骨”的方向开始二维生长; 在二维生长阶段, 晶体-熔体界面(以下简称界面)附近将出现结晶潜热扩散慢、结晶物质补充也慢的更加不平衡的状态, 因此, 在“脊骨”两侧枝蔓生长出对称分布的“肋骨”(晶须)。

2. 2 雏晶矿物

由众多晶须组成的雏晶, 与一般正常的晶体相比, 具有较大的表面积和表面自由能, 在热力学上属于不稳定的非平衡态。

2. 2. 1 晶须的形成

晶核一旦形成, 矿物晶体的进一步长大不仅需要结晶潜热由“界面”向熔体方向稳定扩散, 而且需要结晶物质由熔体向“界面”不断地供应。根据多尔蒂的研究^[4]: 在熔浆中, 矿物晶体沿一维方向快速生长形成的“锐利先导”, 有利于结晶潜热的迅速扩散, 并易于从熔体中获得结晶物质。同时, 晶核的一维快速生长, 不仅引起了晶体周围的结晶物质浓度的降低, 而且使不参加结晶相的组份在“界面”附近聚集, 形成“边界层”, 进而限制了矿物晶体的二维或三维生长, 形成了一维延长的纤维状晶须。

2. 2. 2 雏晶形态与结晶中心的关系

雏晶形态往往与结晶中心有关。

花瓣状雏晶: 晶须以早晶出的矿物(如磁铁矿等)为结晶中心生长时, 由于沿核心矿物面、棱、角各部位的生长能力(主要是生长速度)不同(按结晶学的几何淘汰律, 垂直结晶面的晶须

生长最快,其次为晶棱和晶角),因而形成具花瓣状晶须的雏晶,如照片15中的单斜辉石。

球粒状雏晶:当结晶中心很小或形态不规则时,晶须生长在各个方向上具有较均等的几率和速率,可形成球粒状(放射状)雏晶,如照片16的单斜辉石,照片18的斜长石。

此外,在坩埚壁附近生长的晶须,大多近于垂直坩埚壁生成束状雏晶,如照片17的斜长石和照片19的磁铁矿。

本次实验晶出的花瓣状和球粒状雏晶,在铸石中也有出现^[5]。

2.3 微晶矿物

本次实验晶出的板柱状斜长石、板柱状单斜辉石、粒状石榴石和磁铁矿等微晶,大多具有较完整的形态及发育相对好的晶棱和晶面,说明它们是在较为有利的环境中生长发育的。其生长动力学机制主要是:

(1) 生长速度较慢(与骸晶和雏晶相比):斜长石在1200—1250℃时的生长速度为 $(39-48) \times 10^{-7}$ mm/秒;单斜辉石在1150—1200℃时为 $(42-43) \times 10^{-7}$ mm/秒;石榴石在1150℃时为 17×10^{-7} mm/秒;而磁铁矿在1200℃时仅为 7×10^{-7} mm/秒。

本文的“矿物晶体生长速度”,是指矿物晶体的平均大小与结晶时间之比,单位为mm/秒。

(2) 熔体粘度较低:以晶出斜长石微晶、骸晶和雏晶的安山岩(I)实验样品为例:晶出斜长石微晶时,熔体粘度为1553 Pa·S;晶出骸晶时为2114 Pa·S;晶出雏晶时,粘度高达4595 Pa·S。熔体粘度是按Shaw (1972)^[9]提出的公式计算的。

2.4 矿物晶体形态、结晶温度及生长速度之间的关系

实验结果表明,矿物晶体的形态与晶体生长速度、结晶温度关系密切(表4)。

(1) 矿物晶体形态与结晶温度的关系:温度从高(1200—1250℃)到低(1100℃),安山岩中斜长石的结晶形态呈微晶→骸晶→雏晶的变化趋势;与之相反,碱性苦橄玄武岩中单斜辉石则由雏晶变化为微晶。

(2) 矿物晶体生长速度与温度的关系:对同种矿物而言,在其结晶温度范围内,温度愈高,晶体生长速度愈快。但对不同结晶形态的矿物晶体而言,雏晶的生长速度往往比同种矿物的微晶和骸晶要快。

(3) 矿物晶体形态与生长速度的关系:同一实验、同一结晶温度下形成的同种矿物晶体(以表4中序号11、12斜长石雏晶为例),球粒状雏晶比束状雏晶生长速度快,这与球粒状雏晶晶须比束状雏晶晶须更容易从熔体中获得结晶物质有关。

表4 矿物晶体形态、结晶温度与生长速度

Table 4 Morphology, crystallization temperatures and growth rates of minerals

序号	结晶形态	结晶矿物	结晶温度 ($^{\circ}\text{C}$)	晶体生长速度 ($\times 10^{-7}\text{mm/秒}$)	实验样品及编号
1	板柱状	斜长石	1200	39	安山岩 (I)
2	板柱状		1250	48	高铝玄武岩 (II)
3	板柱状	单斜辉石	1150	42	碱性苦橄玄武岩 (III)
4	宽板状		1200	43	
5	粒—柱状	白榴石	1150	17	白榴响岩质碱玄武岩 (V)
6	粒—柱状	磁铁矿	1200	7	橄欖拉斑玄武岩 (IV)
7	中空板	斜长石	1150	10	安山岩 (I)
8	柱状		1200	76	高铝玄武岩 (II)
9	“工字形”	橄欖石	1200	4	碱性苦橄玄武岩 (III)
10	“鲕骨状”	斜方辉石	1350	69	橄欖拉斑玄武岩 (IV)
11	禾束状	斜长石	1100	121	安山岩 (I)
12	球粒状		1100	303	
13	花瓣状	单斜辉石	1250	2	碱性苦橄玄武岩 (III)
14	球粒状		1300	93	
15	雪花状	磁铁矿	1100	17	安山岩 (I)

此外, 矿物晶体生长速度还与熔体的酸度有关: 同一实验温度下, 矿物晶体生长速度与实验样品所熔成的熔体的酸度成反相关。由表4可见, 序号1和8同为1200 $^{\circ}\text{C}$ 时晶出的斜长石, 但由于安山岩(序号1)的酸度(SiO_2 为57.27%)明显高于高铝玄武岩(序号8, SiO_2 为52.76%), 因而后者的生长速度几乎是前者的一倍, 并且前者呈微晶出现, 后者以骸晶存在。这是因为酸度高的熔体, 其成网阳离子含量高、变网阳离子含量低, 熔体粘度大, 故矿物晶体生长速度慢⁶⁻⁸⁾。

参 考 文 献

- 1 周 若, 白志民. 火山岩熔融、结晶、淬火实验及其岩石学意义. 岩石矿物学杂志, 1996, 15 (2): 97—109.
- 2 叶大年等. 硅酸盐熔体中橄欖石晶体的发育过程. 地质科学, 1974, 9 (2): 349—355.
- 3 张克从, 张乐穗主编. 晶体生长. 科学出版社. 1981, 112—114.
- 4 刘如水等译. 晶体生长. 中国建筑工业出版社. 1981, 436—453.
- 5 金成伟, 叶大年. 铸石结晶过程中球体的发育特征. 地质科学, 1974, 9 (3), 337—233.
- 6 周 若, 王方正. 岩石物理化学. 河南科学技术出版社, 1987, 270—279.
- 7 马鸿文. 结晶岩热力学概论. 地质出版社. 1993, 77—82.
- 8 周亚栋. 无机材料物理化学. 武汉工业大学出版社. 1994, 219—222.
- 9 Shaw H R. Viscosities of magmatic silicate liquids: an empirical method of predictio. Am. J. Sci., 1972, (272), 870—893.

Crystal Forms of Experimental Minerals from Volcanic Rocks and Dynamic Mechanism for Their Growth

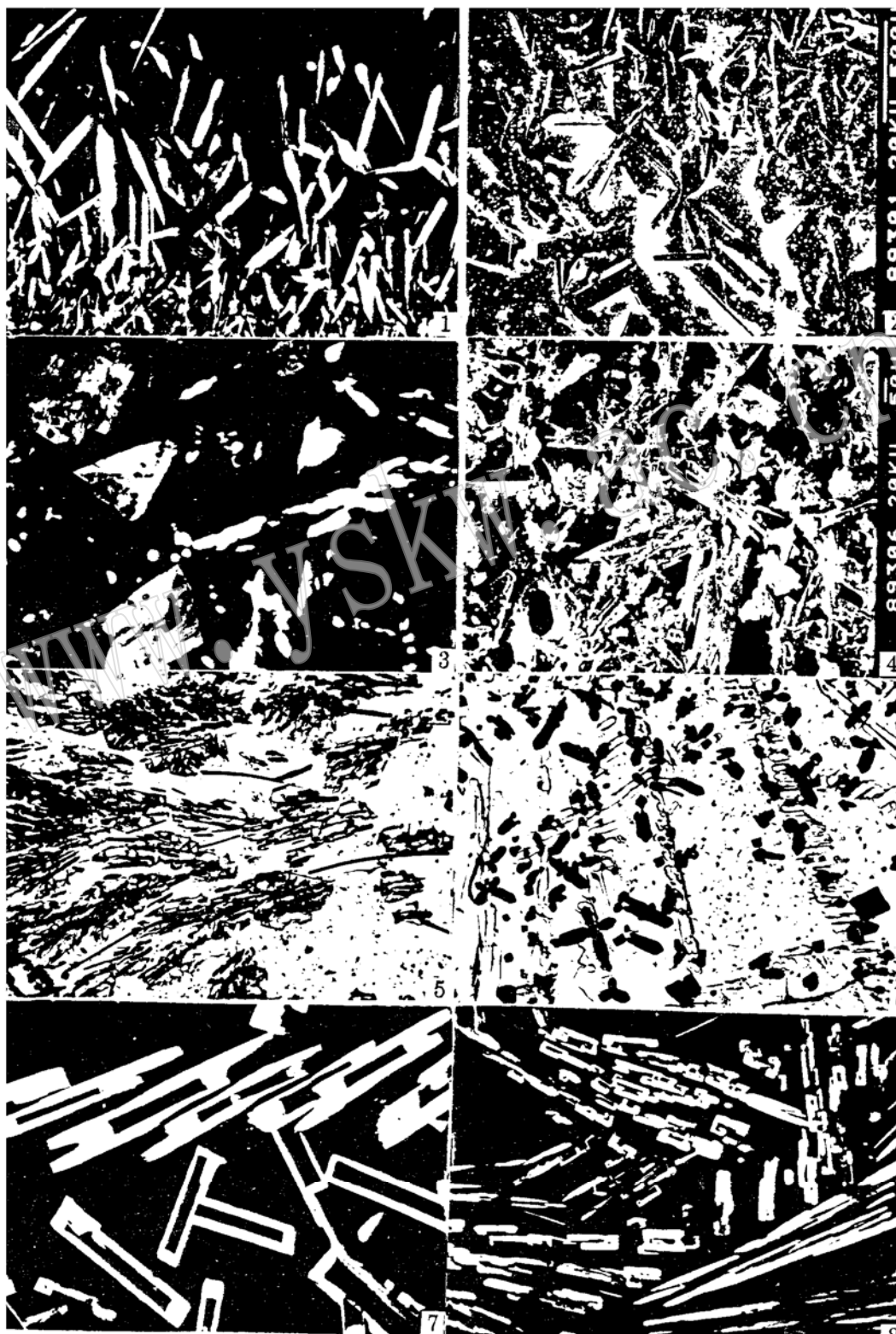
Bai Zhimin , Zhou Xunruo

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

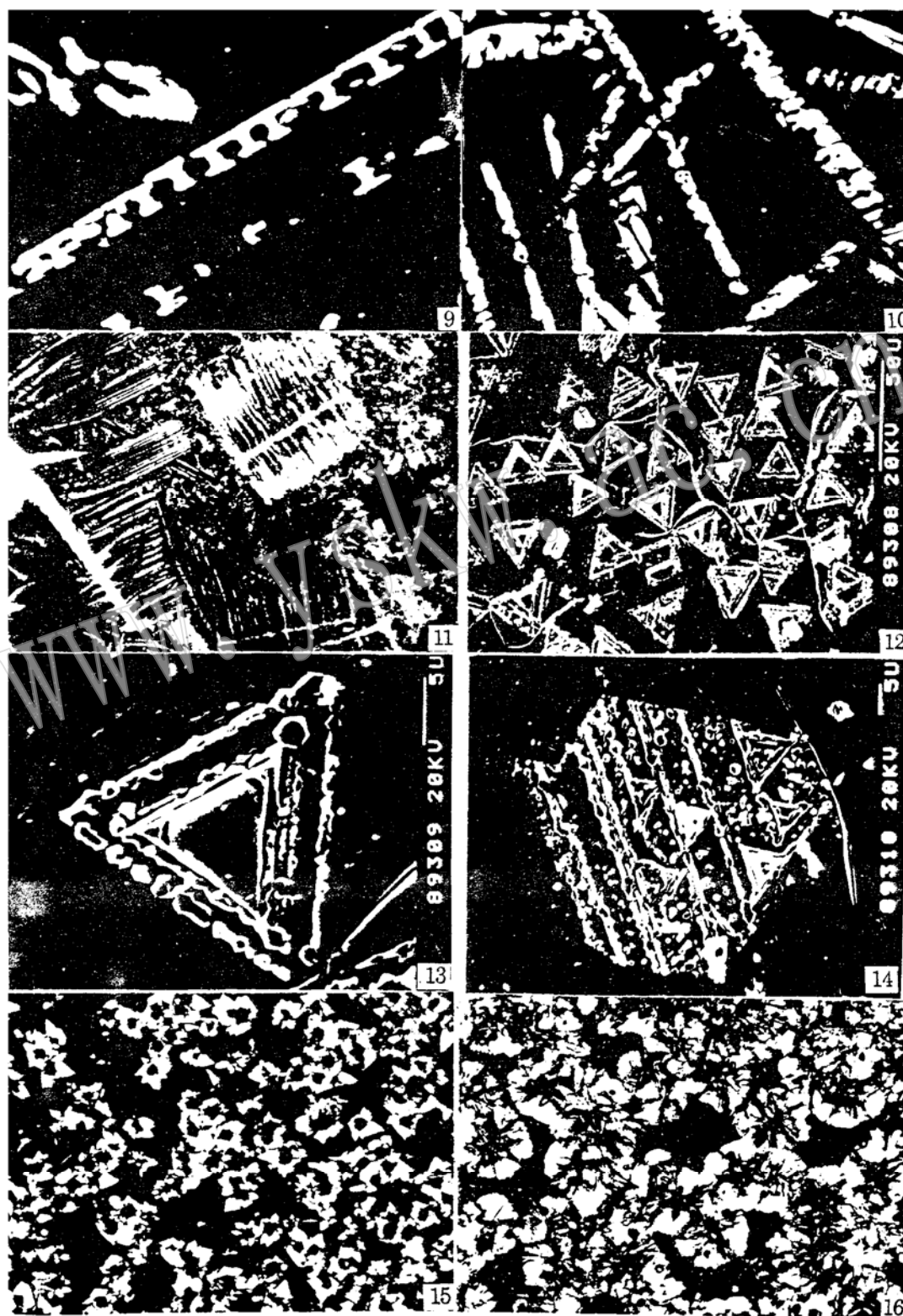
Key words: experimental mineral; crystal form; growth dynamics

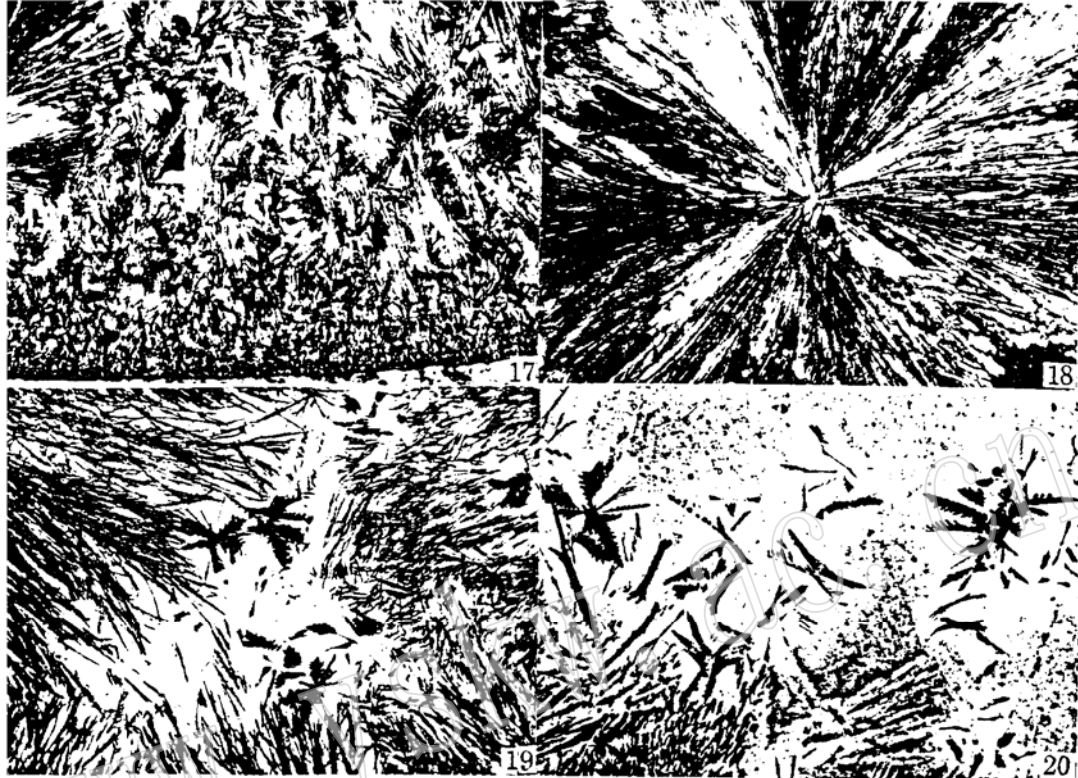
Abstract

Melting, crystallization and quenching experiments were made on certain typical basalts (including alkaline picritic basalt, olivine tholeiite and high alumina basalt) as well as some andesites from Fujian, Jiangxi and Henan of China and columbretitic tephrite from Vesuvian volcano of Italy. Three forms of minerals, namely microcrystals, skeletal crystals and embryonic crystals were formed. The microcrystal minerals included tabular-prismatic plagioclase, hourglass clinopyroxene, granular-prismatic leucite and magnetite; the skeletal crystals included hollow tabular-prismatic plagioclase, "I-shaped" olivine, herringbone enstatite and zonal magnetite; the microcrystals included spherulitic plagioclase, petal-like spherulitic clinopyroxene, snowflake-branched magnetite. This paper has summarized morphological characteristics and compositional features of experimental crystallized minerals, calculated growth rates of minerals, analysed formation mechanism of skeletal crystal and embryonic crystal minerals, probed into mechanisms for orientated arrangement of skeletal crystal minerals plagioclase and olivine as well as growth of skeletal crystal dendrite of enstatite, dealt with the growing process of crystal whisker, described the relationship of the embryonic crystal form to grain of crystallization as well as that of the crystal form to crystallization temperature, growth rate, and viscosity and acidity of magmatic melt.



白志民等: 火山岩实验矿物的结晶形态及其生长动力学机制





图版说明

- 照片 1 板柱状斜长石微晶 I- 1200 正交偏光 4×10
照片 2 板柱状、车轮状斜长石微晶 II- 1250 线长= $500\mu\text{m}$
照片 3 燕尾状(砂钟状)单斜辉石微晶 III- 1200 正交偏光, 4×10
照片 4 燕尾状(砂钟状)单斜辉石微晶 III- 1150 线长= $50\mu\text{m}$
照片 5 石榴石微晶 V- 1150 单偏光 4×20
照片 6 磁铁矿微晶 IV- 1200 单偏光 4×20
照片 7 中空斜长石骸晶 II- 1200 正交偏光 4×10
照片 8 中空斜长石骸晶 I- 1150 正交偏光 4×20
照片 9 杆状橄榄石骸晶 III- 1200 正交偏光 4×20
照片 10 杆状橄榄石骸晶 IV- 1200 正交偏光 4×20
照片 11 鲑骨状斜方辉石骸晶 IV- 1350 单偏光 4×20
照片 12 磁铁矿骸晶 III- 1200 线长= $50\mu\text{m}$
照片 13 磁铁矿骸晶 III- 1200 线长= $50\mu\text{m}$
照片 14 磁铁矿骸晶 III- 1200 线长= $50\mu\text{m}$
照片 15 以磁铁矿为结晶中心的单斜辉石雏晶 III- 1250 正交偏光 4×20
照片 16 球粒状单斜辉石雏晶 III- 1300 正交偏光 4×10
照片 17 禾束状斜长石雏晶 I- 1100 正交偏光 4×4
照片 18 球粒状斜长石雏晶 I- 1100 正交偏光 4×4
照片 19 禾束状及雪花状磁铁矿雏晶 I- 1100 单偏光 4×10
照片 20 雪花状磁铁矿雏晶 I- 1100 单偏光 4×10