

与碱性玄武岩有关刚玉巨晶的多阶段成因^{*} ——包裹体的证据

丘志力¹, 陈敬德¹, 陈炳辉¹, 朱 敏²

(1. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275; 2. 广东有色地质勘察院, 广东 广州 510008)

摘 要: 分析山东昌乐与碱性玄武岩有关的刚玉巨晶不同部位的常量元素、稀土元素及包裹体组成。刚玉巨晶的主体以大量流体—熔体包裹体、锆石、铌(钽)铁矿包裹体为主, 而巨晶中的“晶核”部位则以大量的熔体包裹体为主, 反映研究区的刚玉巨晶是在不同的阶段形成的。刚玉“晶核”以及“铜皮刚玉”形成于熔体相为主的体系中, 而主体刚玉则形成于熔体—流体过渡的急剧变化的不均一的地球化学环境中。

关键词: 刚玉巨晶; 包裹体; 形成; 山东昌乐

中图分类号: P619.24⁺2 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2001) 02-0107-05

刚玉巨晶是一种与碱性玄武岩有密切关系的深源巨晶。近年来, 在世界各地的第三纪或第四纪碱性玄武岩带的坡积物或冲积物几乎都发现了刚玉巨晶的存在, 部分地区刚玉巨晶富集成有较大经济价值的蓝宝石矿床^[1~3]。刚玉作为一种强铝过饱和和地质作用产物, 它和碱性玄武岩的成生联系已使它的研究超出了宝石矿物学的范围。

本文所研究的刚玉巨晶来自我国重要的蓝宝石产地——山东昌乐。该矿是目前我国已发现的规模最大、种类最齐全的蓝宝石矿。更为重要的是该地次生蓝宝石矿和原生蓝宝石矿同时存在, 因此对研究刚玉巨晶的成因有重要的意义。

1 地质概况及刚玉巨晶矿物学特征

1.1 地质概况

研究区位于中国东南沿海新生代玄武岩带的东北段, 区内碱性玄武岩的喷发主要受郯庐断裂带山东段的沂沭断裂及其次一级上五井断裂控制。根据岩石同位素年龄数据, 区内岩浆喷溢活动发生在早中新世至上新世以钠质超基性熔岩裂隙式喷溢为主。区内零星出露寒武奥陶系含泥质或砂屑的灰岩、白云岩。与刚玉巨晶形成密切相关的火山活动主要有2个期次: 牛山组玄武岩(14.48±0.79 Ma), 主要分布在山坳及下部层位, 以含大量气孔及地幔岩包体的碱性橄榄玄武岩和碧玄武岩为主, 夹棕色泥岩; 尧山组玄武岩

(4.34±0.19 Ma), 主要分布在方山、北岩等地的山顶, 以水平厚层状玄武岩及橄榄辉石粗玄武岩为主, 可见少量辉绿岩发育^[4]。

1.2 巨晶赋存状态及其矿物学特征

山东昌乐地区与碱性玄武岩有关的刚玉巨晶有2种赋存状态: ①直接赋存在牛山组碱性玄武岩和碧玄武岩等火山熔岩中^[5], 刚玉巨晶往往和地幔岩包体——二辉橄榄岩关系密切。方山主要的刚玉含矿层就分布在富含绿色二辉橄榄岩包体(地幔岩包体体积含量最高可达30%以上)的层位中。刚玉晶体可达2 cm长, 1.5 cm宽, 呈六方柱状或桶状, 表面具有明显的熔蚀现象, 部分刚玉外表附有一层灰黑色的氧化膜, 透光下其颜色多为深蓝—灰蓝色, 透明—半透明, 其内可见明显的裂理及色带。②赋存在残坡积砂矿和冲积砂矿中, 这种刚玉砂矿距碱性玄武岩出露区有数十米至数百米不等, 部分可分布在远达数千米的第四纪河流冲积物中。刚玉巨晶往往和锆石、铁尖晶石、歪长石、玻辉石巨晶等伴生, 呈六方桶状、腰鼓状、碎裂块状、双锥状等各种形态, 部分颗粒有磨圆; 巨晶颗粒大小变化非常大, 大的可达3 cm×8 cm, 而小的仅为1 mm×2 mm; 其内可见非常发育的{000 $\bar{1}$ }和{10 $\bar{1}$ 1}裂理, 完整的巨晶晶体表面多可见熔蚀结构。

根据刚玉巨晶的颜色和透明度可将之粗分成2大类, 其一是以蓝黑色—浅蓝色为主色调的

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49602025); 南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室开放基金资助项目

收稿日期: 2000-11-21; 作者简介: 丘志力(1963—), 男, 副教授。

刚玉巨晶, 这种刚玉巨晶以透明一半透明为主. 在许多裂理发育的半透明颗粒中往往可发现有一褐色半透明六方环状核. 核的大小 $0.1 \sim 1 \text{ mm}$, 棕褐色, 半透明, 没有环带. 围绕“核”, 刚玉巨晶则往往具有明显的六方生长环带, 环带的宽度为 $0.1 \sim 3 \text{ mm}$ 不等. 这类含有核的刚玉巨晶中往往可见 $\{10\bar{1}1\}$ 的裂理发育, 并形成六条以

“核”为中心交汇的裂理带 (“死星光”), 裂理带一般不穿过其中的“核” (图 1a). 另一类刚玉呈褐色—铜褐色, 半透明—不透明, 当地称之为“铜皮”刚玉, 这种刚玉虽然也有大量裂理分布, 但大多是 $\{0001\}$ 方向的板面裂理, 其内含大量褐黑色矿物包裹体.

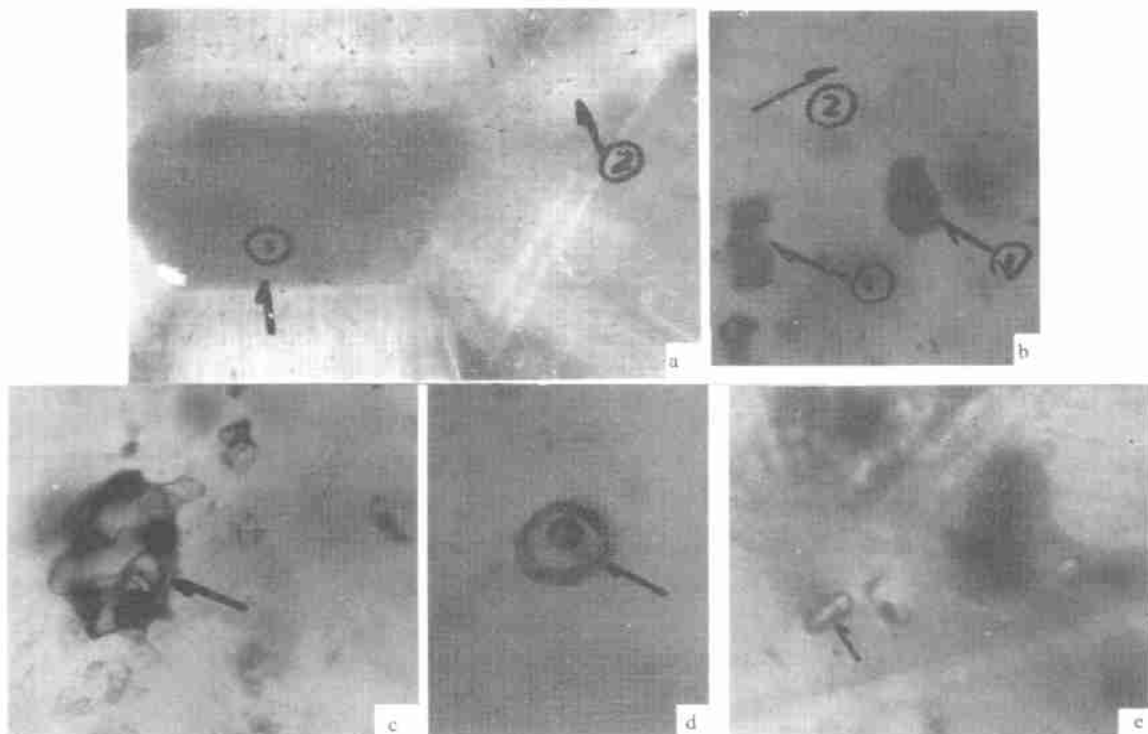


图 1 刚玉巨晶的各类包裹体

Fig. 1 Inclusions in corundum megacrysts

a 有核的刚玉巨晶, 放大 23×10 倍, 箭头①所指为晶核, ②为裂理, 裂理只发育在外层; b 晶核中的熔体包裹体, ① 后期出熔的针状包裹体; ② 放大倍数 16×10 ; c 外层刚玉中的多相熔体包裹体, 放大倍数 16×10 ; d 主体刚玉中的同生流体包裹体, 放大倍数 16×25 ; e 主体刚玉中的锆石结晶质包裹体, 放大倍数 16×25 (正交偏光)

1.3 巨晶常量元素及稀土元素的特征

不同类型刚玉巨晶常量元素分析 (电子探针分析) 表明山东昌乐不同颜色刚玉巨晶的常量元素并没有显著的差别, 其 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化为 $97.60\% \sim 99.17\%$, $w(\text{TiO}_2)$ 变化为 $0.005\% \sim 0.104\%$, $w(\text{FeO})$ 变化为 $1.104\% \sim 1.762\%$, $N(\text{Fe})/N(\text{Ti})$ 比值变化为 $12 \sim 294$, 其 $N(\text{Fe})/N(\text{Ti})$ 比值并不随刚玉的颜色变化而呈现规律性变化, 这一点与其它研究者的认识不同^[6].

不同类型刚玉的稀土元素含量见表 1. 结果表明刚玉巨晶所含的稀土元素总量很低, 部分稀土元素低于分析检测限. 从不同样品的分析结果看, “铜皮”刚玉及宝石级刚玉巨晶均含有明显

的 Eu 正异常, 其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值大于 10, 表明稀土元素在刚玉巨晶中强烈富集轻稀土, 稀土元素分馏特征明显.

对地幔岩矿物及其包裹体稀土元素的研究表明, 地幔岩包体矿物稀土含量和它所含流体—熔体包裹体的数量有一定的关系, 含包裹体较高的其稀土含量往往高, 尤其是 LREE^[8], 本次分析的刚玉巨晶半透明的样品比宝石级样品明显富含各种包裹体, 但其稀土总量却是后者明显高于前者, 这说明宝石级刚玉形成时环境更富含稀土元素, 也说明刚玉巨晶形成晚期可能是更富含流体相和富稀土元素.

表 1 昌乐刚玉巨晶稀土元素质量分数¹⁾

Tah 1 REE composition of corundum megacryst $w_B/10^{-6}$

元素	SDR-04	SDR-02	SD2010	SDR-07
La	0.47	0.79	0.44	0.18
Ce	3.29	1.73	1.46	1.01
Pr	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Nd	0.33	0.28	0.21	0.048
Sm	0.098	0.12	<0.05	<0.05
Eu	0.043	0.036	0.012	0.015
Gd	0.073	<0.05	<0.05	<0.05
Tb	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Dy	0.043	0.047	0.036	0.011
Ho	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Er	0.046	0.054	0.029	0.017
Tm	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Yb	0.012	0.025	0.017	<0.01
Lu	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Y	0.61	0.47	0.24	0.13
总和	<5.105	<3.692	<2.634	<1.611
$\delta Eu^{2)}$	1.63	1.30	>0.8	>1.0
$(La/Yb)_N$	22.07	17.91	14.67	10.17

1) 由地质矿产部宜昌地质矿产研究所用 ICP 分析, 02 号样 δEu 计算时, Gd 取检测限 0.05 作近似;

2) $\delta Eu = \frac{EuN}{(SmN + GdN)} / 2$

2 刚玉巨晶中的包裹体特征

2.1 作为晶核的棕色刚玉的包裹体特征

刚玉巨晶中心的晶核内发育大量褐黑色的熔体包裹体 (A) (图 1b) 或不混熔相包裹体, 包裹体的大小可从 $0. n \sim n \times 100 \mu m$, 其形态一般呈片状, 尘状或粒状, 成群不规则分布, 包裹体无确定的晶形, 不透明, 褐黑色, 强光下则呈浅棕褐色, 外观上与铌 (钽) 铁矿相似, 但元素面扫描分析并没有显示出 Nb 或 Ta 的富集. 拉曼光谱探针确定其中粒状者为磁铁矿, 而褐黑色熔体则未能确定其种类 (另文). 刚玉的棕褐色实际上是这种密集分布的固体和不混熔相 (A_1 和 A_2) 包裹体引起的 (包裹体数量每 mm^2 可达数百个). 和褐黑色熔体相不混熔的是无色透明熔体 (A_2), 其折光率与刚玉巨晶近似. 除了单相熔体包裹体外, 部分包裹体中可见形态不规则或圆形的气泡 (G), 其相态体积比例一般为 $V(A_1) : V(A_2) : V(G) = 90 \sim 45 : 10 \sim 45 : 0 \sim 10$ (图 1c). 包裹体的形态特征及其与刚玉的关系可确定这种包裹体属共生包裹体.

流体—熔融包裹体 (图 1d): 这种包裹体主要呈假次生状态存在, 分布在一些微裂纹或小的面形缺陷内, 成群分布, 大小 $0. n \sim n \times 10 \mu m$

不等, 相态多种多样, 在极小的范围内形成明显的相态变化. 其中的熔体相一般无色或褐色—棕黑色, 流体相为浅灰褐色—近无色, 结晶相多为针、柱状, 无色透明或浅棕褐色, 气相可呈近于圆形或不规则的形态, 既可分布在包裹体的边部亦可分布在中间. 各相的比例变化很大.

针柱状的晶体包裹体: 这种包裹体在垂直 c 轴平面内可断续呈 3 个方向分布, 颜色一般是棕褐色—浅褐色. 属后期出溶的包裹体 (图 1e), 但其成分未能确定.

2.2 主体刚玉巨晶中的包裹体

主体刚玉是除了“棕色核”以外的部分, 部分没有核的刚玉巨晶也属于这一范畴, 他们是宝石级蓝宝石的主要来源. 和“棕色核”部分相比, 主体刚玉一般为蓝—浅蓝色, 具明显的颜色生长环带. 在有核发育刚玉中一般有非常发育的裂理带, 裂理带中可发育有大量的假次生或次生熔体或流体熔融包裹体, 亦见结晶质包裹体.

不混熔相包裹体. 这类包裹体和“棕色核”的不混熔包裹体有些相似, 在部分巨晶中甚至可见逐渐过渡的现象, 但其相态组成及比例发生明显的变化, 无色透明熔体及气相所占的体积比增大. 其中棕褐色熔体占 10%~40%, 无色熔体相为 20%~35%, 气相为 5%~25%, 而其数量远较“核晶”中的包裹体数量少 (图 1c, d).

共生结晶质包裹体主要有锆石 (图 1e) 和铌 (钽) 铁矿两种. 其中锆石呈柱状、粒状, 单颗或成群分布, 无色, 具有极高的正突起和明显的双折射, 最大的颗粒达 $1 mm \times 0.2 mm$; 而铌 (钽) 铁矿呈长柱状或不规则形态, 褐黑色, 不透明, 反光具金属光泽. 电子探针成分分析见表 2, 3.

表 2 刚玉巨晶中锆石包裹体成分

样品号	wt %						$w(ZrO_2)$
	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	ZrO_2	HfO_2	Σ	$w(HfO_2)$
SD97041 *	0.30	32.62	0.02	65.49	0.53	99.41	123.5
SD97042 *	0.33	32.28	0.00	65.53	0.48	99.21	136.5
SD97043 *	0.31	32.35	0.04	65.13	0.43	99.19	151.5
SD97044	0.02	30.87	—	66.18	1.199	98.38	55.2
SD97045	—	31.01	—	65.73	1.507	98.32	43.6
SD1901 *	—	32.45	—	65.24	2.235	99.98	29.2
SD1902 *	—	31.64	—	65.61	2.503	99.79	26.2
SD1903	—	31.59	—	65.88	2.384	99.93	27.6

* 由中国科学院南海海洋所分析, 其余由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点开放实验室分析

表 3 昌乐刚玉巨晶中铌钽铁矿矿物包裹体电子探针成分分析¹⁾

Tab 3 EMPA compositions of columbite inclusions in corundum megacryst in Changle

wB/ %

样品号	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	Ta ₂ O ₅	ZrO ₂	FeO	MnO	Σ
SD2003—1	0.091	0.015	—	72.443	2.645	4.655	0.635	12.395	6.827	99.706
SD2003—2	0.107	0.016	0.008	71.674	3.170	4.635	0.705	12.600	7.221	100.136
SD2003—3	0.078	—	0.020	69.497	4.069	4.018	1.310	14.851	5.169	99.012
SD2004—4	0.158	0.007	0.013	68.640	5.419	4.471	2.406	13.696	3.350	98.160
SD2003—5	0.096	—	0.044	69.419	5.180	4.930	1.514	14.245	3.225	98.653
SD2003—6	0.074	0.351	0.013	67.198	6.123	4.936	2.259	17.523	2.003	100.480
SD2003—7	0.121	0.005	—	72.519	4.424	4.625	1.290	14.642	3.300	100.926
平均	0.104	0.056	0.014	70.199	4.433	4.610	1.446	14.279	4.442	99.582

1) 在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点开放实验室分析

3 讨 论

与碱性玄武岩有关的刚玉巨晶是来自地壳深度或地幔的产物, 由于其化学成分较为单纯, 且经过碱性玄武岩等岩浆的长距离搬运, 缺失共生矿物, 因而巨晶所保存的包裹体便成为研究其成因的关键地质依据^[9, 10]。

关于山东蓝刚玉巨晶中的包裹体, 不同的学者曾有过不同的发现. 王萍等^[11]发现了镁铁尖晶石、普通辉石、钾长石、霞石和橄榄石等共生包裹体和火山玻璃及磁铁矿、针状金红石等后生包裹体; 丁振华^[12, 13]则报道了更长石包裹体及氯化物包裹体的存在. Guo 等^[14]发现巨晶中含有富铀钼钨石、富钽铌铁矿、钠长石、磷灰石、钛铁矿和镁铁尖晶石. 文献^[15]则发现斜长石、石英、锆石、磷灰石、铁铝尖晶石、镁铝尖晶石、铬镍尖晶石、铬铁矿、铬镍磁铁矿、磁铁矿、钛铁矿、石榴石、假板钛矿和钙钛矿等包裹体。

国内外研究存在明显的差异, 造成这样差异的原因, 笔者认为主要有 3 个, 一是样品数量及代表性不同; 二是分析手段的差异, 不同的分析手段可产生精度不同的结果; 其三是研究者所研究的样品实际上是不同生长过程中形成的. 本文发现的呈晶核存在的刚玉巨晶(“铜皮刚玉”实际和此类刚玉相似) 其内主要以单一熔体共生包裹体为主, 包裹体的数量巨大, 而且内部不发育颜色条带及{10 $\bar{1}1$ }裂理等, 反映刚玉形成于快速生长的条件之下, 是从熔体中结晶的, 其近于平直的边界反映出它与后来形成的刚玉巨晶形成于近似的地球化学环境. 而主体刚玉中主要发育不混熔相的包裹体、流体熔融包裹体以及其它的晶体矿物包裹体, 如铌铁矿和锆石等, 还可见围绕着早期晶核刚玉形成的{10 $\bar{1}1$ }裂理, 反映出主体刚玉形成时流

体的作用已经明显加强, 形成时环境富含挥发分, 刚玉巨晶中大量交替出现的六方颜色条带反映出刚玉的形成过程并不是均匀的, 主体刚玉的形成明显晚于成“晶核”刚玉。

不混熔包裹体是矿物在不均匀的体系中捕获的, 而流体—熔体包裹体的存在, 说明矿物形成于一种物理化学条件急剧变化的地球化学环境中^[16]. 流体—熔体包裹体反映出成矿环境是一种岩浆—流体的过渡体系^[17]。

张明^[18]在研究与刚玉巨晶密切有关的福建明溪新生代火山岩的同位素及微量元素时发现, 该区的橄榄霞石岩系列与碱性玄武岩系列具有非常一致的锶同位素组成, 但 $N(\text{Rb})/N(\text{Sr})$ 差别很大, 火山岩中的 $N(\text{K})/N(\text{Ba})$, $N(\text{K})/N(\text{La})$, $N(\text{Zr}(\text{Hf}))/N(\text{Nb})$ 比值远低于亏损的洋中脊玄武岩源区和球粒陨石, 因此认为明溪上地幔源区至少经历 2 次交代事件, 即富 Ba, LILE 和 Nb 的流体相或熔体相的交代富集和 Rb 的不均一交代作用. 丁振华^[12]认为山东与刚玉巨晶有关的碱性玄武岩形成过程中地幔流体交代作用不容忽视。

事实上, 近年来在金伯利岩金刚石及榴辉岩中不断发现有刚玉的存在, 以及这些刚玉包体成分的差别已经使我们不得不注意到实际上刚玉可能形成的深度远较目前所认知的 30~80 km 为深, 而且其形成亦不局限于某一具体层面^[19, 20]. 而对金刚石中包裹体的研究表明, 同一金刚石中不同部位矿物包裹体成分可产生变化, 金刚石中心部位最早期包裹体富含镁, 而边部的包裹体富含钛、铝、硅、钙和钾, 表明金刚石在流体熔融体萌芽后主要是在强烈液化的不平衡介质中继续形成的. 山东昌乐刚玉巨晶不同部分包裹体组成的差异反映出它与金刚石形成过程具相似性, 刚玉巨晶可能是不平衡的地球化学系统中不同阶段

的产物。而锆(钼)铁矿独立矿物和流体—熔体包体的大量出现,反映出刚玉巨晶形成时流体及挥发分的作用不容低估。

4 结 论

(1) 作为“晶核”存在的刚玉与外层生长刚玉巨晶包裹体组成的差异,反映出两者并不是同一阶段形成的,大量流体熔融包裹体的存在反映出主体刚玉巨晶形成于一种急剧变化的不平衡的流体—熔体地球化学系统中。

(2) 刚玉巨晶的形成过程和金刚石的形成过程具有某种相似性,也就是说,目前所发现的刚玉巨晶可能并不是同一种地质作用的产物。

参考文献:

- [1] GUO J F, WANG F Q, YAKOWMELOS G. Sapphires from Changle in Shandong Province, China[J]. *Gem & Gemology*, 1992(4): 255—260.
- [2] COENRAADS R R. 与东澳火山岩区有关的蓝宝石冲积矿的成因[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1997, 12(2): 119—125.
- [3] KELLER A S, KELLER P C. The sapphires of Mingxi, Fujian province, China[J]. *Gem & Gemology*, 1986, 22(1): 41—45.
- [4] 山东地质矿产局. 山东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991. 210—223.
- [5] 董振信, 杨良锋, 王日文. 山东蓝宝石原生矿床成因探讨[J]. 地质学报, 1999, 20(2): 177—183.
- [6] 余晓燕. 山东蓝宝石的宝石矿物学特征[J]. 岩矿测试, 1999, 18(1): 41—45.
- [7] 周德进, 鄂莫岚, 徐平, 等. 雷琼新生代玄武岩中地幔岩包体矿物中的流体—熔体包裹体的 REE 组成特征[J]. 岩石学报, 1995, 11(4): 434—440.
- [8] 樊祺诚, 刘若新, 杨瑞英. 地幔橄榄岩矿物中富稀土元素的 CO₂ 流体包裹体及其地球化学意义[J]. 岩石

学报, 1993(4): 411—415.

- [9] COENRAADS R R. Sapphires and rubies associated with volcanic provinces; inclusions and surface features shed light on their origin[J]. *Austral J. Mineralogy*, 1992, 18: 70—78.
- [10] GUO J F, O'REILLY S Y, GRIFFIN W L. Corundum from basaltic terrains: A mineral inclusion approach to the magma[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 122: 368—386.
- [11] 王萍, 李国昌. 山东蓝宝石中包裹体的研究[J]. 矿产与地质, 20(4): 252—255.
- [12] 丁振华. 山东昌乐刚玉巨晶中包裹体的研究 II. 氯化物包体与地幔液相的物质组成[J]. 矿物岩石, 1999(3): 15—18.
- [13] 丁振华. 玄武岩刚玉巨晶中包裹体的研究 I. 更长石包体的发现及其意义[J]. 矿物学报, 1998(1): 23—26.
- [14] GUO J F, O'REILLY S Y, GRIFFIN W L. Zircon inclusions in corundum megacrysts I. Trace element geochemistry and clues to the origin of corundum megacrysts in alkali basalts[J]. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1996, 60(13): 2347—2363.
- [15] 谢先德. 中国宝玉石矿物物理学[M]. 广州: 广东科技出版社, 1999. 66.
- [16] 卢焕章. 流体熔融包裹体[J]. 地球化学, 1990(3): 225—229.
- [17] BURNHAM C W, OHMOTO H. Late-stage process of felsic magmatism[J]. *Mining Geology Special Issue*, 1980(8): 1—11.
- [18] 张明. 明溪新生代火山岩地幔源区的交代作用和不均一性[J]. 中国科学院地球化学研究所年报[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1986. 230—231.
- [19] McCONVILLE, BOYCE A J, FALICK A E. A high-chromium corundum (ruby) inclusion in diamond from the Sao Luiz alluvial mine[J]. *Brazil Mineral Mag*, 1994, 58(9): 490—493.
- [20] ROSSMAN G R, SMYTH H T. Hydroxyl contents of accessory minerals in mantle eclogite and related rocks[J]. *Amer Miner*, 1990, 25: 775—780.

The Forming of Corundum Megacrysts Related to Alkali Basalt in Changle, Shandong

QIU Zhi-li¹, CHEN Jing-de¹, CHEN Bing-hui¹, ZHU Min²

(1. Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

2. Institute of Nonferrous Metal Geology, Guangzhou 510008, China)

Abstract: The compositions of usual elements and rare earth elements and inclusions of corundum megacrysts related to alkali basalt in Changle, Shandong Province, are analyzed. In the main parts of corundum megacrysts are a large number of fluid-melting inclusions, zircon, Ta-columbite inclusions, and in the central crystal core are a large number of melting inclusions. The corundum megacrysts were formed in different periods and different physical chemistry conditions. The crystal core was formed in magma system, and the main parts were formed in inhomogeneously geochemical conditions in which magma and fluid phases coexisted.

Keywords: corundum megacryst; inclusion; forming process; Changle, Shandong