

玄武岩的高温高压实验研究^①

熊 大 和

(中国科学院地质研究所)

玄武岩及其高温高压相—榴辉岩的相组合, 经历了长期的地质作用, 反映出一定的时空条件。从高温高压实验矿物学、实验岩石学入手, 对于以相组合出现的某些化学体系进行平衡条件研究, 可揭示此类岩石形成的物理化学环境, 并有助于阐明地球内部的物理状态、组成成分以及活动过程。

N. L. Bowen 早在1928年曾根据高温下的实验岩石学研究成果, 提出关于火成岩演化的系统看法⁽⁷⁾。V. M. Goldschmidt⁽⁸⁾、P. Escola⁽⁹⁾等把热力学的平衡理论应用于变质矿物的共生组合, 并初步提出变质相的概念。按照P. Escola及F. J. Turner关于变质相的划分, 榴辉岩为具有与玄武岩及辉长岩相同化学组分、产生于高温高压条件下的岩石⁽²⁾。

近二十年来由于高温高压实验技术的迅速发展, 在变质岩及基性岩浆的形成等实验研究方面都取得了大量新资料, 对岩石成因及矿物共生组合得出一些新的认识。目前已经具备了模拟地幔大于100公里深度、直至千余公里进入下地幔的实验条件, 并在有关实验资料基础上, 提出了关于地幔物性、物相的若干模式。其中围绕有关莫霍界面不同成因展开的争论, 促进了玄武岩—榴辉岩相转变的实验研究。H. S. Yoder⁽¹⁰⁾、P. J. Wyllie⁽²²⁾、D. H. Green及A. E. Ringwood^{(12)~(16)}等都进行了有关的实验研究, 并总结出在10—30kb、500—1500℃的高温高压条件下, 玄武岩实验研究中斜长石、辉石、石榴石类矿物的消长规律。一般认为在压力>20kb时, 榴辉岩以辉长岩、玄武岩的稳定相存在。P. J. Wyllie则假设地幔的原始成份是辉长岩, 在100—250公里处将出现榴辉岩和液体。O. Hara认为在大于100公里深度, 当原生岩浆尚未上升以前, 分离出榴辉岩组合, 还认为榴辉岩与原生岩橄质岩岩浆有着成因上的联系。

根据铸石研究, 作者曾对玄武岩组分进行高温实验研究, 在平衡状态下形成钙契尔马克分子并出现辉石单一相, 如处于高温急剧过冷状态下, 从液相中首先析出的是橄榄石骨架状晶体^{(6)~(19)~(20)~(21)}, 此外, 作者又在高温高压下进行了玄武岩相变及析出粘流体的实验研究⁽¹⁶⁾。

本文拟在上述研究基础上, 采用不同构造部位、不同类型而时代相近的玄武岩, 进行压力为50 kb、温度近1300℃的实验, 藉以探索100—200公里深度下玄武岩组分的相变规律、榴辉岩的形成特点, 进一步查明粘流体的析出条件, 为深入研究有关问题奠定基础。

一、实验研究条件

(一) 样品的选择:

样品采用中国东部的玄武岩^{(1)~(4)~(5)}, 太平洋现代洋壳、美国夏威夷岛及加里福尼亚州玄武湖等共六个地点的晚第三纪、第四纪玄武岩的新鲜标本。岩石类型根据薄片鉴定、硅酸盐化学全分析, 配合电算程序计算, 进行综合定名, 中国东部羊房山、临朐、宽甸三地样品均为碱玄质碧玄岩, 现代洋壳

① 在此项研究中, 承张文佑教授关心支持, 由加里福尼亚大学王其允教授、哥伦比亚大学Lamont观察站等分别提供美国西部、太平洋洋壳及夏威夷标本。鄂莫岚、丛柏林、郑学正同志分别提供中国东部标本, 工作过程中, 卢照田、宋岩同志在实验方面、李兆霖同志在代为对标本进行电算程序计算命名方面, 应育浦同志在对穆斯堡尔谱测定方面、顾芷娟与张昭明同志分别在对电子探针光薄片制备及定量分析方面、张汉卿与李家驹同志分别在对X射线衍射及粉晶分析方面、边婉琳同志在对某些微量化学分析方面等, 给予支持帮助, 均此志谢。

样品为高铁拉斑玄武岩、夏威夷样品为弱碱性橄辉玄武岩，美国加州样品则为高镁质拉斑玄武岩。将上述六种玄武岩分别投影于 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 及 SiO_2 相关图解上，基本符合海恩德曼、路凤香等⁽¹⁾所划分的碱性玄武岩与拉斑玄武岩的界线（图1）。

中国东部三个地点的碱性碧玄岩矿物成份类似，橄辉石粒状晶体多为半自形、它形、少量自形，粒度平均0.1—0.3毫米左右，橄辉石微晶粒度0.05毫米。斜长石微晶粒度细小，平均约为 0.02×0.04 毫米，为中长石。金属矿物呈细粒分布，岩石为间隙—玻基斑状结构。太平洋洋壳现代玄武岩属于急剧冷却的结晶状态，除玄武玻璃外，仅有由橄辉石、斜长石微晶或锥晶集聚形成的球颗，为典型的放射状球颗结构。夏威夷玄武岩中橄辉石多碎裂呈细粒状，有的颗粒自形程度却较好。斜长石 $\text{An} > 45$ 为中长石，呈板条状出现，粒度 1×0.2 毫米，部分呈针状微晶出现。单斜辉石细粒与橄辉石微粒伴随，并含有5%的金属矿物，岩石具全晶质间粒结构，结晶粒度较粗。美国加州玄武岩，橄辉石斑晶呈自形或它形，粒度大小不等，斜长石呈细板条状出现，单斜辉石微晶与长石相间，岩石具间隙结构，结晶粒度相对较粗（图版I-1—I-6）。硅酸盐化学分析结果见表1，电算程序计算结果见表2。

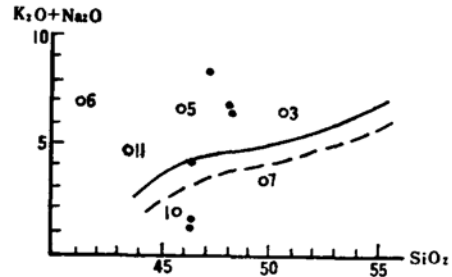


图1 玄武岩的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 及 SiO_2 相关图解
空心点为本实验所得结果：6—羊房山 11—临朐 5—宽甸 1—太平洋洋壳 3—夏威夷 7—美国加州；实心点据路凤香等所作宽甸玄武岩；曲线示碱性玄武岩与拉斑玄武岩界线（虚线据海恩德曼、实线据路凤香等）

(二) 温度、压力的确定：

实验样品经粉碎筛分制样，置高压容器内进行干系统实验。高压设备为年轮式两面顶模具，并配有专用千吨压机。样品置纯铁钨镍的安瓿中承受静水压力，并通过外加石墨管加热。高压容器压力标定为：金属钨点相变压力37kb.，压机测力计读数 35 kg/cm^2 ；金属钨点相变压力59kb.，压机测力计读数 63 kg/cm^2 。

据地球内部不同深度的温压关系推算，确定实

不同玄武岩的化学成分

表 1

岩石名称		碱玄质碧玄岩	碱玄质碧玄岩	碱玄质碧玄岩	洋壳高铁拉斑玄武岩	弱碱性橄辉玄武岩	高镁拉斑玄武岩
产 地		山东羊房子	山东临朐	辽宁宽甸	太平洋底(5KM)	夏威夷	加利福尼亚州玄武湖
化 学 成 分	SiO_2	40.36	43.06	45.90	49.74	50.45	45.53
	TiO_2	1.55	2.22	2.32	1.66	2.56	0.78
	Al_2O_3	12.62	13.48	13.60	14.32	17.57	13.38
	Fe_2O_3	10.54	3.51	3.85	1.31	3.25	6.73
	FeO	7.92	10.22	8.18	12.08	8.25	1.89
	CaO	8.76	9.29	7.58	10.87	5.99	3.97
	MgO	9.10	10.50	9.60	6.59	4.13	19.01
	MnO	0.15	0.23	0.22	0.27	0.25	0.12
	K_2O	1.04	1.80	2.80	0.20	1.90	0.20
	Na_2O	4.14	3.20	4.00	2.90	4.75	1.77
	P_2O_5	0.74	0.62	0.80	0.18	0.76	0.06
	H_2O^+	3.15	1.48	1.48	0.20	0.07	5.56
	H_2O^-	(总烧失量)	0.28	0.61	—	—	0.52
	CO_2						0.55
	Cr_2O_3						0.08
总 计		100.07	99.89	100.08	100.32	99.93	100.05

电算程序分类命名

表 2

原始号	6号 山东羊房山	11号 山东临朐	5号 辽宁宽甸	1号 太平洋洋壳	3号 夏威夷	7号 加利福尼亚州
样品可靠程度	ORD=4.64 较差	ORD=1.87 较好	ORD=1.15 较好	ORD=-0.12 很好	ORD=0.14 很好	ORD=6.56 较差
橄榄石 Ol	H 26.62 V 17.31	19.82 16.38	16.63 13.51	0.00 0.00	6.16 4.72	16.06 13.50
斜方辉石 Hy	H 0.00 V	0.00	0.00	15.50 13.98	4.95 4.31	38.93 37.17
单斜辉石 Di	H 21.39 V 20.41	20.22 18.99	17.20 15.88	22.15 19.98	3.01 2.62	0.00
钙长石 An	H 13.23 V 15.27	17.34 19.70	10.89 12.16	25.84 28.20	21.13 22.27	19.79 22.87
钠长石 Ab	H 10.79 V 12.45	11.21 12.74	17.29 19.31	26.42 28.83	42.89 45.20	16.29 18.83
钾长石 Or (斜长石号)	H 6.36 V 1.98 An=55.08	10.78 12.65 An=60.7	16.55 19.09 An=38.65	1.20 1.35 An=49.45	11.29 12.29 An=33.01	1.21 1.45 An=54.85
石英 Q	H 0.00 V	0.00	0.00	1.02 1.25	0.00	0.00
磷灰石 Ap	H 1.60 V	1.31 1.41	1.67 1.76	0.38 0.39	1.60 1.59	0.13 0.14
磁铁矿 Mt	H 7.06 V 6.13	5.25 4.49	5.19 4.36	4.93 4.05	5.18 4.10	2.81 2.45
钛铁矿 IL	H 2.23 V 1.74	3.13 2.74	3.23 2.78	2.35 1.97	3.59 2.90	1.11 0.99
霞石 NE	H 16.60 V 17.11	10.75 10.90	11.18 11.15	0.00	0.00	0.00
暗色矿物 总含量	H 47.58 V	49.74 44.00	43.92 38.28	45.30 40.36	24.49 20.25	59.05 54.24
SiO ₂	40.36	43.06 (43.88)	45.90 (46.43)	49.74 (49.68)	50.45 (50.52)	45.53 (48.73)
Al ₂ O ₃	12.62	13.48 (13.74)	13.60 (13.76)	14.32 (14.30)	17.57 (17.59)	13.38 (14.32)
Na ₂ O/K ₂ O	3.98	1.78	1.43	14.50	2.50	8.85
K ₂ O/Na ₂ O	0.25	0.56	0.41	0.07	0.40	0.11
定 名	碱玄质碧玄岩 霞石碧玄岩	碱玄质碧玄岩 霞石碧玄岩	碱玄质碧玄岩 霞石碧玄岩	高铁拉斑 玄武岩	弱碱性 橄榄玄武岩	高镁拉斑 玄武岩

验压力为 50kb ±, 温度 1200—1300℃, 相当地球内部深度约 150 公里左右。按此要求相应的压机测力计读数应为 55kg/cm²; 加热电流按功率计算令其相当于 1200—1300℃。

由于各种硅酸盐间反应进行迟缓, 因此, 采用淬火技术, 以期保持高温高压下平衡状态的结果。

因反应速率显著随温压下降而减低, 从而阻碍了再平衡的出现。

(三) 实验次数及取样鉴定:

对 6 种玄武岩总计进行 65 回次实验, 除无效样品外, 实得样品 60 个, 部份样品实验情况见表 3。所得实验样品均在双目实体镜及偏光显微镜下逐一

部份样品实验条件一览表

表 3

编 号	名 称	实 验 条 件						实 验 结 果
		P (kg/ cm ²)	T				t	
			V	A	KA	V		
6-1	山东羊房山玄武岩	65	52	75	1500	2.4	10-15'	样品结晶颗粒较细, 有少数粘流体 铁安瓶熔化样品外溢 样品结晶程度好, 较多粘流体析出 石榴子石极细圆粒, 辉石晶粒较粗 少量玻璃质, 金属矿物
6-3	山东羊房山玄武岩	70	57	87	1700	2.5	10'	
6-5	山东羊房山玄武岩	55	55	78	1562	2.6	10'	
6-6	山东羊房山玄武岩	55	55	74	1450	2.6	10'	
6-7	山东羊房山玄武岩	55	52	76	1480	2.5	10'	
11-15	山东临朐玄武岩	55	53	74	1450	2.6	6-10'	
11-16	山东临朐玄武岩	55	55	77	1520	2.6	6-10'	
11-17	山东临朐玄武岩	55	50	86	1600	2.3	10'	同上
6-1	辽宁宽甸玄武岩	55	51	81	1560	2.4	10-15'	同上
6-2	辽宁宽甸玄武岩	55	53	84	1680	2.6	10'	辉石结晶较完整, 半自形, 石榴石呈 细圆粒状, 其它同上
6-3	辽宁宽甸玄武岩	55	50	80	1500	2.3	10'	同上
1-1	太平洋洋壳玄武岩	55	52	84	1580	2.4	10-15'	结晶粒度很细, 矿物较难观察
1-2	太平洋洋壳玄武岩	55	55	85	1520	2.5	10'	石榴石成一堆一堆出现
1-3	太平洋洋壳玄武岩	67	54	74	1800	2.3	10'	未见有何变化
3-2	夏威夷玄武岩	55	52	85	1550	2.5	10-15'	结晶粒度较细
3-6	夏威夷玄武岩	55	55	93	1720	2.7	10'	石榴石结晶粒度很细, 系辉石相变成 硬玉, 成文形或半自形晶析出
3-8	夏威夷玄武岩	65	54	83	1580	2.5	10'	
7-4	美国加州玄武岩	55	52	86	1600	2.5	10-15'	
7-2	美国加州玄武岩	55	53	89	1700	2.7	10'	结晶情况基本上同结晶颗粒很细
7-3	美国加州玄武岩	60	55	87	1620	2.5	10'	

经高温高压作用后玄武岩相变成榴辉岩X射线鉴定

表 4

X射线标准数据		石 榴 石 的 X 射 线 结 果					
石 榴 石 ¹⁾		羊房山	临 朐	宽 甸	洋 壳	夏 威 夷	加 州
I	d						
8	2.886			2.882	2.88	(3)2.883	
9	2.583			(10)2.583	2.59		
6	2.462			2.46	2.46		
6	2.356			2.36	2.36		
8	2.265			2.265	2.26		
4	2.106			2.115	2.10		
2	2.033			2.025	2.05		
6	1.874			1.875	1.88		
5	1.705			1.703			
4	1.665			1.670	1.670		
10	1.542			1.545	1.549		
5	1.440			1.447	1.447		
1	1.345			1.37			
6	1.288			1.295			
7	1.258			1.265	1.265		

续表 4

X射线标准数据		石榴石、绿辉石或硬玉 X 射线结果					
石榴石 ²⁾		羊房山	临 胸	宽 甸	洋 壳	夏威夷	加 州
I	d						
2	3.32	3.36	3.36				
6	2.905	2.90	2.90				
10	2.595	(10)2.59	(10)2.59			(5)2.59	(5)2.59
5	2.367	2.36	2.36			2.36	2.36
4	2.280	2.270	2.265			2.27	2.27
4	2.119	2.115	2.115			2.115	2.115
5	1.880	1.883	1.875			1.880	1.880
2	1.769					1.785	1.785
2	1.707		1.703			1.705	1.705
4	1.674	1.675	1.670			1.675	1.675
6	1.607	1.610	1.605			1.610	1.610
8	1.549	1.550	1.545			1.550	1.550
4	1.448	1.447	1.447			1.450	1.49
1	1.395	1.390	1.390			1.385	1.385
4	1.296		1.295				
5	1.264		1.265				
						石榴石 X 射线强度减弱	
绿 辉 石 ³⁾							
10	3.33	3.36	3.36	3.34			
50	3.19	3.165	3.165	3.16	3.16		
100	2.97	(10)2.96	(10)2.96	(7)2.96	(10)2.96		
50	2.91	2.90					
50	2.88	2.86	2.88	2.88	2.88		
40	2.54	2.54	2.54	2.54			
40	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52		
50	2.48	2.47	2.46	2.46	2.46		
35	2.268	2.27	2.265	2.265	2.265		
30	2.192	2.18	2.18	2.18	2.18		
10	1.879	1.88	1.88	1.88	1.88		
30	1.660	1.67	1.67	1.67	1.67		
30	1.609	1.610	1.605	1.605	1.60		
10	1.545	1.55	1.545	1.545	1.52		
20	1.502	1.495	1.495	1.495	1.492		
80	1.402	1.40	1.40	1.40			
10	1.378	1.37	1.37	1.37			
10	1.290		1.295	1.295			
硬 玉 ⁴⁾							
7	4.30					4.30	4.30
4	3.24					3.26	3.26
4	3.12					3.12	3.12
10	2.92					(10)2.92	(10)2.92
9	2.83				(6)2.84	(8)2.84	(7)2.84
7	2.49				(6)2.505	2.49	2.49

续表 4

X射线标准数据		硬 玉 X 射 线 结 果					
硬 玉 ⁴⁾		羊房山	临 胸	宽 甸	洋 壳	夏 威 夷	加 州
I	d						
6	2.42					2.44	2.44
1	2.29					2.27	2.27
3	2.20					2.22	2.23
4	2.16					2.17	2.17
6	2.07				2.08	2.08	2.08
5	1.97				2.05	1.99	1.99
2	1.89				1.88	1.88	1.88
3	1.755				1.795	1.77	1.77
3	1.685					1.61	1.66
2	1.610						1.61
5	1.572					1.57	1.57
3	1.552				1.549	1.55	1.55

注: 1) 据B. H. Михеев⁽¹⁸⁾; 2)、4) 据《矿物X射线粉晶鉴定手册》; 3) 据ASTM。

榴辉岩中石榴石的电子探针定量分析 表 5

样 品 地 点 化 学 组 分	样 品 地 点						
	6号 羊房山	11号 临胸	5号 宽甸	1号 太平洋 洋壳	3号 夏威夷	7号 加州	
SiO ₂	46.19	37.97	44.42	45.33	45.38	42.21	
Al ₂ O ₃	16.85	16.69	25.11	20.02	21.57	23.70	
FeO	11.41	14.81	—	15.79	5.34	10.64	
CaO	—	12.67	0.09	9.24	0.92	10.36	
MgO	21.71	15.10	25.17	7.31	21.82	10.09	
Na ₂ O	—	0.46	—	0.43	—	—	
总计	96.16	96.70	94.79	98.12	95.03	97.0	

榴辉岩中辉石类的电子探针定量分析 表 6

样 品 地 点 化 学 组 分	样 品 地 点						
	6号 羊房山	11号 临胸	5号 宽甸	1号 洋壳	3号 夏威夷	7号 加州	
SiO ₂	50.09	53.63	50.03	54.08	57.90	53.32	
Al ₂ O ₃	6.13	9.69	7.04	12.77	24.04	21.37	
FeO	4.82	2.74	11.97	7.66	1.75	4.29	
CaO	21.68	13.89	14.00	12.28	5.77	9.68	
MgO	13.13	12.91	11.00	7.52	0.51	4.44	
Na ₂ O	3.08	3.21	3.83	3.68	6.54	4.90	
总计	98.93	96.07	97.87	97.99	96.51	98.0	

进行初步鉴定; 然后分组选择代表性样品进行X射线粉晶、衍射鉴定, 电子探针测定。此外还进行了穆斯堡尔谱测定, 有关结果将另文讨论。

二、实验研究结果

由于淬火所得样品粒度很细, 因而以X射线衍射及电子探针分析为主, 并配合光学显微镜等其它方法进行综合鉴定。

(一) 光学显微镜观察:

中国东部碱性碧玄岩经高温高压作用后的样品, 镜下观察, 可见其结晶较完整, 晶粒较粗, 石榴石为无色透明浑圆微粒, 突起很高, 呈均质性; 辉石除微晶外可见大颗粒斑晶, 边缘参差不齐, 二组节理明显; 辉石边缘有时出现深棕色平行消光的云母类矿物, 但由于粒小、量少, 不易准确鉴定。

洋壳及夏威夷、美国加州的样品与前者相反, 呈微晶隐晶状, 颗粒细而致密; 石榴石、硬玉呈堆状出现(图版II-1—II-2、III-1—III-2)。

(二) X射线测定:

据X射线测定结果中国东部三种碱玄质碧玄岩基本一致, 洋壳样品比较复杂, 夏威夷和美国加州样品完全相同(表4)。

(三) 电子探针定量分析

高温高压作用后的样品制成光薄片, 进行矿物成分的电子探针定量测定。所得成分用氧原子法计算其晶体化学式, 与X射线测定结果基本一致。由于高温高压实验所得样品结晶程度较差, 粒度很细, 制样十分困难, 所以其单矿物的化学组成与矿物化学分析结果比较有一定误差, 因此, 晶体化学式计算误差为小数点后第一位。具体测定数据见表

5、表6。

根据上述测定结果, 计算出石榴石的晶体化学式为:

- 6 号 $(Mg_{2.69}Fe_{0.79})_{3.41-0.40}Al_{2.20-0.20}Si_{3.00}O_{12}$
- 11号 $(Mg_{1.58}Ca_{0.95}Fe_{0.47})_{3.0}(Fe_{0.40}Al_{1.60})_{2.0}Si_{2.66}Al_{0.56}O_{12}$
- 5 号 $Mg_{2.83+0.X}Al_2Si_3O_{12}$
- 1 号 $(Mg_{0.89+0.X}Ca_{0.73}Fe_{0.38})_{2.89}(Al_{1.74}Si_{0.30})_{2.04}Si_3O_{12}(0.X=0.31)$
- 3 号 $(Mg_{2.43+0.X}Ca_{0.07}Fe_{0.32})_{2.82}(Al_{1.80}Si_{0.20})_{2.0}Si_3O_{12}(0.X=0.18)$
- 7 号 $(Mg_{1.74+0.X}Ca_{0.83}Fe_{0.69})_{2.83}Al_{2.5}Si_3O_{12}(0.X=0.17)$

根据测定结果, 计算出绿辉石及硬玉的晶体化学式为:

- 6 号 绿辉石 $Na_{0.27}Ca_{1.03}(Mg_{0.67}Fe_{0.17}Al_{0.32})_{1.36}Si_{2.20}O_6$
- 11号 绿辉石 $Na_{0.22}(Ca_{0.53}Mg_{0.50})_{1.03}(Fe_{0.1}Mg_{0.15}Al_{0.41})_{0.65}Si_{1.93}O_6$
- 5 号 绿辉石 $Na_{0.33}(Ca_{0.43}Mg_{0.72})_{1.15}(Fe_{0.44}Al_{0.38}Si_{0.20})_{2.0}Si_2O_6$
- 1 号 绿辉石 $Na_{0.26}(Ca_{0.48}Mg_{0.41})_{0.89+0.X}(Fe_{0.23}Al_{0.45})_{0.78}Si_{1.97}O_6$
- 3 号 硬玉 $(Na_{0.44}Ca_{0.21}Fe_{0.05})_{0.70+0.X}(Mg_{0.02}Al_{0.78})_{0.49}Si_2O_6$
- 7 号 硬玉 $(Na_{0.34}Ca_{0.37}Fe_{0.13})_{0.84+0.X}(Mg_{0.23}Al_{0.74})_{1.01}(Si_{1.82}Al_{0.11})_2O_6$

(四) 粘性流体析出的规律

通过对上述六个样品的测定, 发现中国东部碱性岩玄武岩经高温高压实验均不同程度地出现粘性流体, 但太平洋洋壳、夏威夷及美国加州三地的样品则均不出现。对粘性流体成份作过详细测定, 其结果如下:

经离子探针及双聚焦离子源火花质谱分析, 粘性流体为一种含C、H、微量N、大量Na、K、微量Si、Al、Ca, 痕量Fe、Cu的非晶质塑性聚合物, 上述元素相对丰度以Na、K、H含量最高。粘流体外观为一种无色—淡绿色的透明粘液。因受表面张

力影响, 置放于空气中的样品, 其粘流体逐渐聚集成球形球颗。经加温挥发份逸出, 留下为白色针状无定形化合形, 与高压下增高温度结果一致。如将样品放置一年以后粘流体全部变成白色无定形针状物, 也与加温效果等同。在高温显微镜下将粘流体加热, 可见挥发份按不同温度逐渐析出(图版II-11-6)。

对上述白色针状物进行微量化学分析, 该物质可溶于水, 溶液呈碱性, $pH=8+$, 从此溶液中检查出大量 Na^+ 、 K^+ , 但未检查出 CO_3^{2-} 、 $C_2O_4^{2-}$ 、 CrO_4^{2-} 、 F^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 SCN^- 、 CN^- 、 I^- 、 S^- 等阴离子根。不溶解残渣呈浅棕色, 检查出有Si、痕量Al, 浅棕色溶液说明可能有 Fe^{2+} 的存在。白色针状物经X射线鉴定(条件: $Fe\alpha$ 射线、12小时), 出现11条粉晶线条, 接近一种含水Na、Ca化合物。

综上所述, 粘性流体是一种以C、H、K、Na为主而形成的塑性聚合物, 应由C、H、形成带负价的长链, 将K、Na带出。此时原长石中的Al配位数在高压下由4变到6, 所有偏碱性长石全部解体。从而说明离子半径较大的K、Na, 高压下在晶格中成为不稳定分子, 除部份进入绿辉石或全部形成硬玉外, 剩余的K、Na, 则进入粘性流体之中。

将上述六个地点玄武岩样品的原岩成份与经高温高压作用后的结果进行对比, 可以看出, 中国东部碱性玄武岩K、Na含量高一 $K_2O+Na_2O=5-7\%$ Wt., 高温高压实验后出现绿辉石, 耗去部份Na的含量, 剩余的K、Na进入粘流体与C、H等挥发份形成粘性非晶态聚合物, 遍布于石榴石、绿辉石颗粒之间, 使整个样品变为可塑性; 而太平洋洋壳及美国加州的拉班玄武岩及夏威夷碱性橄榄玄武岩在高温高压下形成硬玉, 几乎消耗了全部碱质, 所以不出现粘性流体。

三、实验结果分析

(一) 在实验中, 玄武岩经50Kb、1200—1300℃温压作用以后普遍形成榴辉岩。它由镁铝榴石(有的含较高Ca、Fe分子)、以及绿辉石组成。绿辉石中包含硬玉、钙契尔马克分子、可能尚含有锥辉石分子。另外, 有的辉石富含Al, 应为高压产物的特征。可以见到辉石呈斑晶出现, 粒度相对大的多, 边缘有熔蚀现象, 但它明显是高温高压下整个碱性岩玄武岩结晶的一部份。夏威夷及美国加州玄武岩的高压相榴辉岩中的辉石, 已由硬玉所代替。

将所获得的榴辉岩测定结果, 投到 P. Escola 的 ACF 图上, 与典型变质榴辉岩进行比较^[17], 可见辉石成份由于含 Al 高明显向 A 端移动, 石榴石亦贫 Ca 富 Al、Mg, 都集中在 AF 边缘, 使这种榴辉岩显示出较富 Mg、Al 的特点, 而与变质榴辉岩有一定的差异 (图 2)。

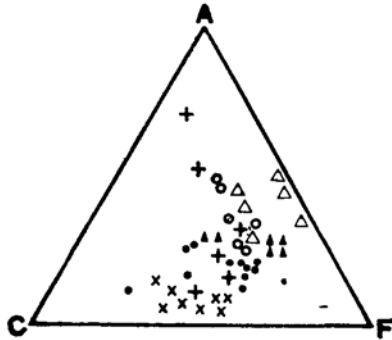


图 2 榴辉岩相的 ACF 图

本实验所得结果: 据 P. Escola 已有结果:
大黑圈为榴辉岩组分; 小黑点为榴辉岩组分;
大三角为石榴石组分; 小三角为石榴石组分;
大十字为辉石组分。 小号为辉石组分。

(二) 中国东部碱性碧玄岩在 前述温压条件下, 析出富含 K、Na 及挥发份的粘性流体^[16]。此结果恰与 P. J. Wyllie 关于地幔区上地幔 100—200 公里有可能存在榴辉岩加液体的设想相吻合, 他还提出过上地幔深部应有挥发份和碱的集中, 但 P. J. Wyllie 并未说明那种液体应由何种物质组成, 我们则获得了这种碱和挥发份相对集中的塑性聚合物—粘性流体。

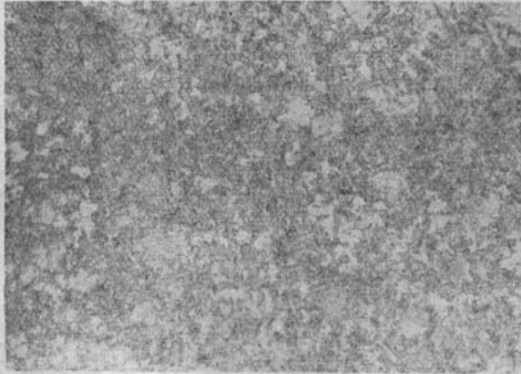
(三) 太平洋洋壳、美国加州的拉斑玄武岩及夏威夷弱碱性橄辉玄武岩, 在高温高压实验中, 由于形成硬玉, 无粘性流体形成。一般认为, 同等的温压代表同等条件, 反映同样的深度环境, 这种与我国东部高温高压下的物态差异, 看来从一个侧面反映出地幔的横向不均一性。

(四) 在地幔约 150 公里的深度, 多是低速层主要出现的部位, 而低速层的成因一般认为是局部熔融的结果。根据上述实验碱性碧玄岩的高压相为榴辉岩加上粘性流体, 是一种液态与晶态能够并存的状态, 从而构成可使震波减速的低速物质。看来低速层的成因之一, 可以是与高温高压下的物相、物性变化, 以及 K、Na 与其它挥发份的相互聚合, 有着密切联系。

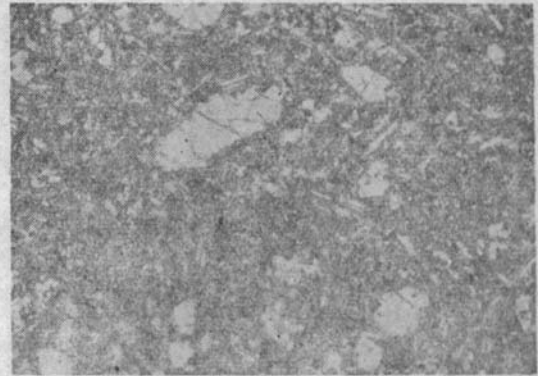
参 考 文 献

- [1] 路凤香、邓晋福、鄂莫岚 1981 辽宁宽甸黄椅山碱性玄武岩浆起源问题的讨论 武汉地质学院学报 第 1 期
- [2] 董申葆 1979 变质作用及变质成矿作用 长春地质学院
- [3] 叶大年、陈友明、郭竞雄 1978 铸石的化学组成及结晶作用 《铸石研究》论文集 科学出版社
- [4] 丛柏林、张儒璋 1981 华北断块区新生代玄武岩系及其形成的大地构造环境 全国中生代构造会议论文资料
- [5] 郑学正 1980 华北断块区某些玄武岩深源包体及有关玄武岩的问题 《华北断块区的形成与发展》 科学出版社
- [6] 熊大和 1963 似玄武岩浆中辉石单矿物的获得及其性质 全国第三十二届地质学会论文集, 岩矿地球化学分册 地质出版社
- [7] Bowen, N. L. 1928 "The Evolution of the Igneous Rocks" Princeton University press.
- [8] Goldschmidt, V. M. 1922 On the metasomatic Processes in silicate rocks. Econ. Geol. XVII.
- [9] Escola P. 1921 On the eclogites of Norway. Vidensk. Skrift, I, Mat. Nat. Kl. 8.
- [10] Yoder, H. S. 1976 "Generation of Basaltic Magma" National Academy of Sciences Washington D. C.
- [11] Wyllie, P. J. 1971 "The Dynamic Earth" Textbook in Geosciences
- [12] Green, D. H. 1968 Origin of basaltic magmas" Basalts The Poldervaart Treatise on Rocks of Basaltic Composition" Vol. 2.
- [13] Green, D. H. and Ringwood, A. E. 1963 Mineral assemblages in a model mantle composition. J. Geophys. Res. 68, 937.
- [14] Green, D. H. and Ringwood, A. E. 1967 An Experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. Geochim. Cosmochim. Acta, 31, 767.
- [15] Ringwood, A. E. 1975 "Composition and petrology of the earth's mantle"
- [16] Xiong Dahe 1979 On the experimental phase transformation of basalt under high pressure and temperatures and the formation of viscous fluid. IAVCEI Symposium 2 IUGG Camberra.
- [17] Елисеев Н. А. 1959 Метаморфизм. Из-ство ЛГУ.
- [18] Михеев В. И. 1957 Рентгенометрический определитель минералов Москва.
- [19] Сюн Да-ХЭ 1962 Исследования в области Гапобазальтовых расплавов. Диссертация Кандидата МГУ.
- [20] Четвериков С. Д. Сюн Да-ХЭ. 1965 О некоторых закономерностях Кристаллизация Гапобазальтовых расплавов. Вестник МГУ. Серия IV.

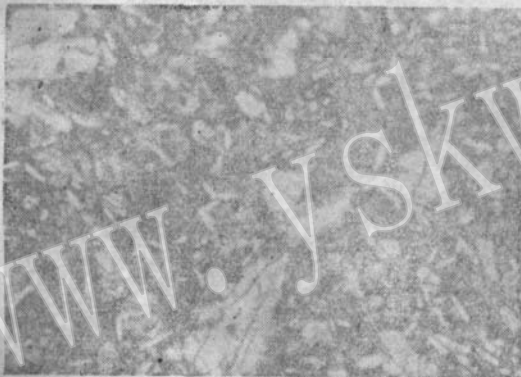
图版 I



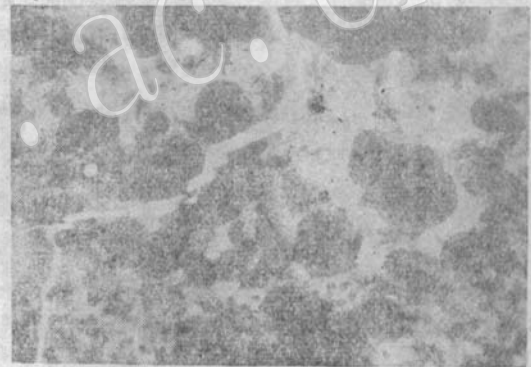
I-1. 山东羊房山碱玄质碧玄武岩
(薄片×45)



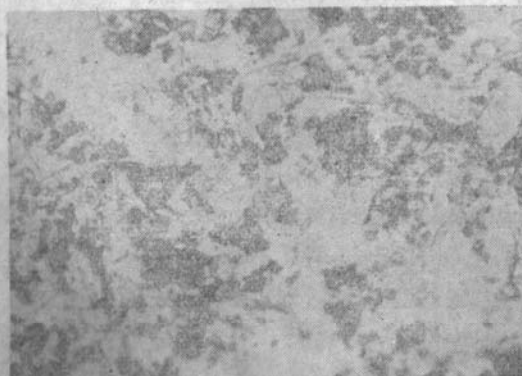
I-2. 山东临朐碱玄质碧玄武岩
(薄片×45)



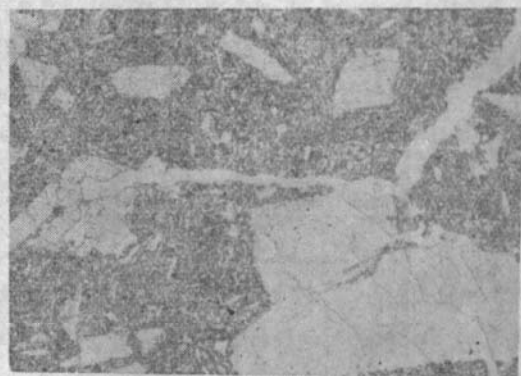
I-3. 辽宁宽甸碱玄质碧玄武岩
(薄片×45)



I-4. 太平洋洋壳高铁拉斑玄武岩
(薄片×45)

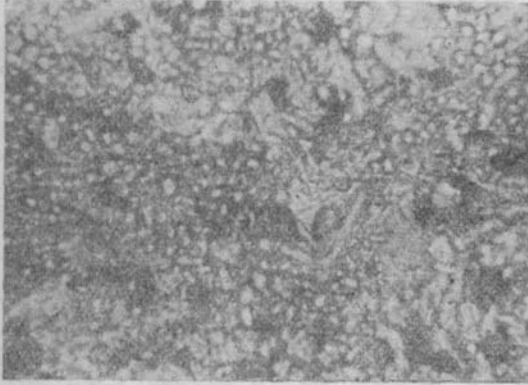


I-5. 夏威夷弱碱性橄欖玄武岩
(薄片×45)

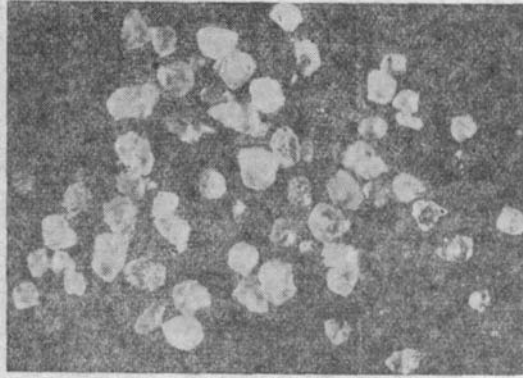


I-6. 加里福尼亚州玄武湖高镁拉斑玄武岩 (薄片×45)

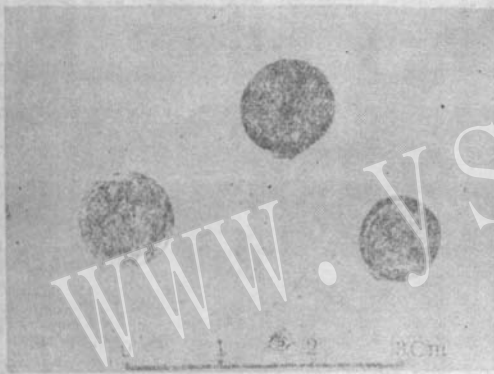
图版 II



II-1. 碱性玄武岩在高温高压下相变为榴辉岩 (薄片 $\times 93$)



II-2. 自玄武岩相变的榴辉岩中选出的镁铝榴石单晶



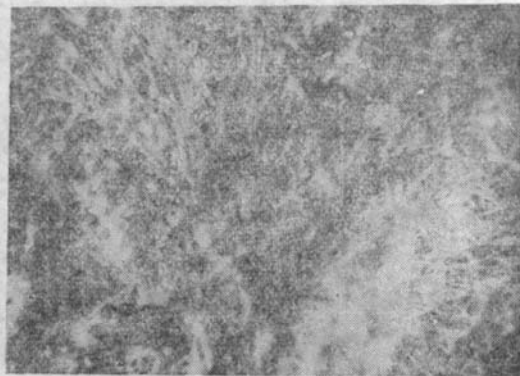
II-3. 碱性玄武岩在高温高压下析出的粘流体 (样品实物 $\times \frac{5}{4} \pm$)



II-4. 照片 II-3 粘流体样品的局部放大 ($\times 93$)

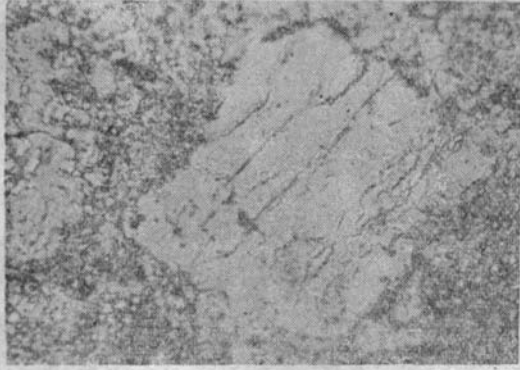


II-5. 粘流体因受表面张力聚缩而成的球粒 ($\times 93$)

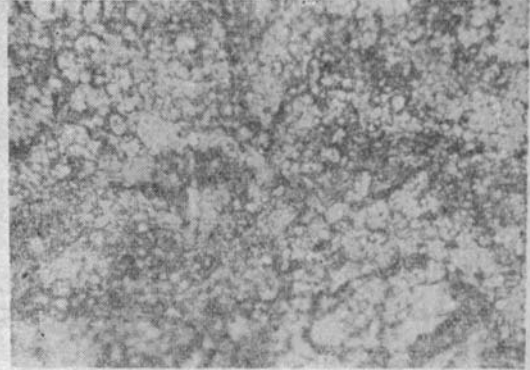


II-6. 粘流体在温压过高时所形成的白色针状、放射状纤维晶体 ($\times 93$)

图版 III



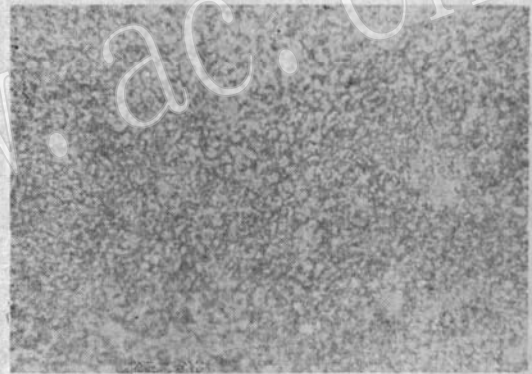
III-1. 羊房山碱玄质碧玄武岩相变出现的绿辉石巨晶 (光薄片×270)



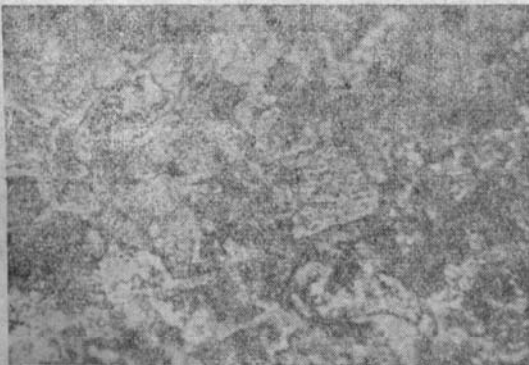
III-2. 临胸碱玄质碧玄武岩相变形成的石榴石、绿辉石晶体 (光薄片×270)



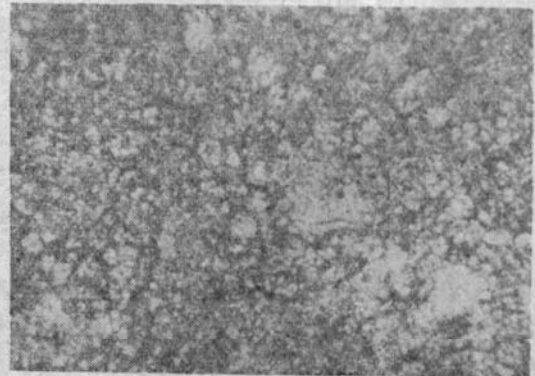
III-3. 宽甸碱玄质碧玄武岩相变出现的绿辉石、石榴石共生关系 (光薄片×270)



III-4. 太平洋洋壳高铁拉斑玄武岩相变形成的石榴石、绿辉石微晶 (光薄片×270)



III-5. 夏威夷弱碱性橄辉玄武岩相变形成的以硬玉为主的辉石相及石榴石微晶 (光薄片×270)



III-6. 加利福尼亚州玄武湖高镁拉斑玄武岩相变形成的硬玉及石榴石晶体 (光薄片×270)

Experimental Investigation of the Basalt under high pressure and high temperature

Xiong Dahe

Abstract

Observations on the phase transformation of basalt to eclogite were made under high pressure $50 \text{ kb} \pm$ and temperature $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$. Some results about the composition mineral assemblage: pyrope, omphacite, and jadeite are obtained. It is expected to give phase change within a depth in the upper mantle of relevant area, which corresponds to the eclogite facies. There is difference between the two kinds of eclogites in P. Escola's ACF Diagram. The compositions of Mg and Al increase in our synthetic eclogite with decreasing Ca. At the same time, a viscous fluid was consisting largely of K, Na, H, C, O, with minute amounts of Si, Al, etc. formed only in alkali basalt in the east part of China, while it does not appear in the basalt of Pacific ocean crust, Hawaii and California. A preliminary investigations in comparison between different basalt under high pressure and high temperature, and the study of the crystal chemistry in the formation of eclogites and viscous fluid are carried out.

Finally, The formation of viscous fluid under specific pressure and temperature in alkali basalt of China may be regarded as one of the modes of formation of the mantle's asthenosphere.

A "Belt" high pressure apparatus was used in our experiments. Vertical depth involved is 150 km in upper mantle, which corresponds to pressure of 50kb and temperature in the range from 1200 to 1300°C .