

## 马衔山群混合岩中长石结构状态的研究

傅学明 王征平 徐茂泉

(兰州大学)



岩矿工作

马衔山在大地构造上属秦祁中间隆起带的青石岭—马衔山横断束的马衔山褶皱。本区广泛出露一套由混合岩及少量片麻岩、片岩、长英质粒岩和碳酸盐岩组成的前震旦纪地层，称为马衔山群。在南北山麓地带零星出露中、新生界的沉积物。

本区地质构造简单。褶皱、断裂均很明显。整个马衔山为一倒转复背斜，轴向北西—南东，宽5~8公里，长约30余公里。断裂均为115~150°方向的大断层。

侵入岩出露较少，比较大的岩体有小石马、华林坪和南大咀的花岗岩体，魏家河滩的辉长岩体，响水沟和大咀的辉绿岩体；分别为前寒武纪造山运动和加里东运动的产物。

### 长石结构状态的测定

本文样品是从马衔山群不同类型混合岩、变质岩中挑选的，共100个。用国产JF-1型X射线晶体分析仪(CuKa, FeKa辐射，工作电压为32kV)分析，X射线德拜图是在读数为0.0001毫米、精度为0.001毫米的20厘米比长仪上测定的。

#### 1. 碱性长石

所讨论的碱性长石均为微斜长石，选用清晰度、分辨率、强度均较好的23个照片进行了测量。测量的方法和步骤是：

(1) 确定 $\theta$ ,  $I$ 值：用比长仪在德拜图上测出 $2L$ 值，并根据公式 $\theta = (2L/2T) \times 90^\circ$ 计算出相应的衍射角 $\theta$ 。用目估法估计出各对弧线的相对强度 $I$ 。

(2) 求 $d$ 值：将 $\theta$ 值代入布拉格公式，计算相应的 $d$ 值(可查表确定)。

(3) 确定指标化：用 $d$ 值和 $I$ 值对照美国ASTM标准卡片，确定(060)、(204)、(131)、(131)线条。

(4) 计算有序度( $\delta$ )和三斜度( $d$ )：将(060)、(204)、(131)、(131)线条相对应的 $d$ 值、 $\theta$ 值代入公式 $\delta = (9.063 + 2\theta_{(060)} - 2\theta_{(204)}) / 0.34$ ， $d = 12.5(d_{(131)} - d_{(131)})$ ②，分别计算出 $\delta$ 和 $d$ 。

经分析，用X射线粉末法来研究长石的结构状态是可取的。这种方法的测量精度主要取决于：①样品的纯度，样品粉末柱的制备及工作条件的选择；②德拜图测定时，对各对弧线的选择、定位、读数以及强度目估的精度。现将Ma110号样的微斜长石德拜图(图1)测量结果列于表1。

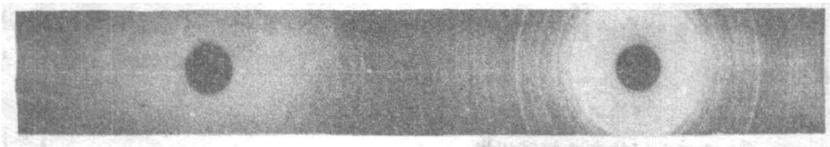


图1 Ma110号样微斜长石的德拜图

根据以上测量方法，计算出马衔山群混合岩中微

斜长石的三斜度和有序度(表2)。

为了验证上述结果的可靠性，又采用了Г. Г. Афонина (1976, 1979)以两个Thompson系数 $\Delta Z$ ,  $\Delta Y$ 描述碱性长石结构状态的方法，对所研究的碱性长石进行 $\Delta Z$ ,  $\Delta Y$ 及各四面体位置中Al的数量计

① Goldsmith and Laves.

② 拉格伦(1970)利用最小二乘法得到的描述碱性长石结构状态的经验公式。

Ma 110 号样微斜长石的德拜图测量数据表

表 1

序号	$m_1$	$m_2$	$m_2 - m_1$	$m_2 + m_1$	$2L$	$\theta_{\text{度}}$	$dKa/n$	$l$	备注
1	33.1603	60.0733	26.9130	93.2336	26.9130	13.4996	3.3022	10	
2	32.7698	60.5076	27.7378	93.2774	27.7378	13.9133	3.2067	10	
3	32.4709	60.8470	28.3767	93.3179	28.3767	14.2334	3.1361	10	
4	31.7814	61.5184	29.7370	93.2998	29.7370	14.9161	2.9941		
5	31.4155	61.8458	30.4303	93.2613	30.4303	15.2638	2.9289		(131)
6	28.9899	64.2552	35.2653	93.2451	35.2653	17.6891	2.5309	4	(131)
7	28.0942	65.1625	37.0683	93.2567	37.0683	18.5935	2.4181	5	
8	27.0687	66.2901	39.2214	93.3588	39.2214	19.6735	2.2902	2	
9	25.8875	67.3119	41.4244	93.1994	41.4244	20.7785	2.1729		(060)
10	25.5438	67.6348	42.0910	93.1786	42.0910	21.1128	2.1404	7	
11	23.6450	69.5705	45.9255	93.2155	45.9255	23.0362	1.9697	6	
12	22.9349	70.2939	47.3590	93.2288	47.3590	23.7553	1.9133	2	
13	21.5188	71.8327	50.3139	93.3515	50.3139	25.2375	1.8079	9	(204)
14	20.0593	73.2273	53.1680	93.2866	53.1680	26.6691	1.7175	1	

注: 14以后的数据省略。

钾长石结构状态数据表

表 2

样号	岩石名称	$d$		$2\theta$ (CuKa)		$d$	$\delta$
		1 3 1	1 $\bar{3}$ 1	0 6 0	$\bar{2}$ 0 4		
Ma74	钾长石英质黑云斜长条带状混合岩	3.0212	2.9424	42.06	50.81	0.985	0.92
Ma96	钾长石英质黑云斜长眼球状混合岩	2.9380	2.8777	42.02	50.82	0.75	0.77
Ma159	黑云斜长眼球状混合岩	2.9843	2.9196	42.247	51.027	0.81	0.83
Ma48	二云条带状混合片麻岩	3.0134	2.9395	42.00	50.78	0.92	0.83
Ma48	"	3.0050	2.9336	42.04	50.80	0.89	0.89
Ma50	黑云混合片麻岩	2.9762	2.9249	41.90	50.75	0.64	0.63
Ma50	"	3.0086	2.9345	42.12	50.92	0.92	0.77
Ma69	角闪黑云混合片麻岩	3.0181	2.9424	41.98	50.72	0.95	0.95
Ma69	"	2.9961	2.9191	41.92	50.68	0.96	0.89
Ma97	片麻状二云混合花岗岩	3.0103	2.9351	42.10	50.86	0.94	0.89
Ma110	片麻状黑云混合花岗岩	2.9941	2.9289	42.2083	50.9901	0.815	0.83
Ma113	"	3.0057	2.9336	42.14	50.88	0.90	0.95
Ma113	"	3.0032	2.9322	41.96	50.70	0.89	0.95
Ma114	黑云条带状混合花岗岩	3.0150	2.9395	42.00	50.76	0.94	0.89
Ma183	混合花岗岩	3.0158	2.9440	41.94	50.66	0.90	1.01
Ma183	"	3.0158	2.9459	41.998	50.75	0.87	0.91
Ma211	片麻状黑云混合花岗岩	3.0059	2.9402	42.13	50.87	0.82	0.95
Ma224	混合花岗岩	2.9980	2.9364	42.19	50.97	0.77	0.83
MaX11	花岗岩	3.0119	2.9380	42.02	50.78	0.92	0.89
MaX18	"	2.9830	2.9234	42.12	50.86	0.745	0.95
MaX19	"	3.0134	2.9366	41.92	50.64	0.96	1.01

样号	岩石名称	$\Delta 2\theta_{204-060}$ (Fe K $\alpha$ )	$\Delta Y$ ( $\Delta P$ )	$\Delta Z$	Al <sub>T<sub>1</sub>O</sub>	Al <sub>T<sub>1</sub>m</sub>	Al <sub>T<sub>2</sub>O</sub>	Al <sub>T<sub>2</sub>m</sub>
Ma74	钾长石英质黑云斜长条带状混合岩	11.65	1.02	0.926	0.99	-0.03	0.02	0.02
Ma96	钾长石英质黑云斜长眼球状混合岩	11.74	0.82	0.85	0.87	0.05	0.04	0.04
Ma159	黑云斜长眼球状混合岩	11.66	0.85	0.88	0.895	0.045	0.03	0.03
Ma48	二云条带状混合片麻岩	11.68	0.96	0.88	0.95	0	0.03	0.03
Ma48	"	11.66	0.93	0.91	0.94	0.013	0.023	0.023
Ma50	黑云混合片麻岩	11.77	0.67	0.78	0.78	0.11	0.055	0.055
Ma50	"	11.70	0.75	0.85	0.84	0.088	0.038	0.038
Ma69	角闪黑云混合片麻岩	11.62	0.97	0.94	0.97	0	0.015	0.015
Ma69	"	11.65	0.997	0.91	0.98	-0.084	0.0225	0.0225
Ma97	片麻状二云混合花岗岩	11.66	0.96	0.91	0.96	0	0.02	0.02
Ma110	片麻状黑云混合花岗岩	11.72	0.85	0.88	0.90	0.04	0.03	0.03
Ma113	"	11.64	0.93	0.94	0.95	0.02	0.01	0.01
Ma113	"	11.60	0.92	0.94	0.945	0.025	0.015	0.015
Ma114	黑云条带状混合花岗岩	11.58	0.97	0.91	0.96	0	0.02	0.02
Ma183	混合花岗岩	11.60	0.92	0.97	0.95	0.04	0.01	0.01
Ma183	"	11.66	0.90	0.92	0.93	0.03	0.02	0.02
Ma211	片麻状黑云混合花岗岩	11.62	0.84	0.94	0.905	0.065	0.015	0.015
Ma224	混合花岗岩	11.52	0.80	0.88	0.87	0.07	0.03	0.03
MaX11	花岗岩	11.64	0.95	0.91	0.95	0	0.023	0.023
MaX18	"	11.62	0.77	0.94	0.87	0.10	0.015	0.015
MaX18	"	11.54	0.997	0.97	0.99	0	0.01	0.01

算。在精确地测量了 $2\theta_{(131)}$ ,  $2\theta_{(1\bar{3}1)}$ ,  $2\theta_{(060)}$ ,  $2\theta_{(204)}$ 之后, 根据下列公式计算:

$$\Delta Z = 1.47 (9.38 - \Delta 2\theta_{(204)-(060)})$$

$$\Delta Y = \Delta P = 1.246 \times \Delta 2\theta_{(1\bar{3}1)-(131)}$$

$$Al_{T_1O} = (1 + \Delta Z + 2\Delta P) / 4$$

$$Al_{T_1m} = (1 + \Delta Z - 2\Delta P) / 4$$

$$Al_{T_2O} = Al_{T_2m} = (1 - \Delta Z) / 4$$

其计算结果列于表3。

从表2可以看出, 马街山群混合岩中碱性长石的三斜度和有序度普遍较高, 大部分都在0.8~1.0之间, 属最大微斜长石。结合费氏台测定, 微斜长石的光轴角均在70°以上(个别较低, 表4)。运用 $S_T = 0.025 (2V - 44^\circ)$ 计算,  $S_T$ 在0.775~0.85范围内。因此, 对同一样品来说, 三斜度 $\Delta$ 和三斜有序度 $S_T$ 基

微斜长石的主要光学数据

表 4

岩石类型	(-) 2V	(010) $\wedge$ Np'	Ng	N <sub>m</sub>	Np
混合岩	77~78°	18~20°	1.526	1.523	1.513
混合片麻岩	75°	16~17°	1.525~1.520	1.522~1.523	1.517~1.518
混合花岗岩	76°	15°	1.526	1.522	1.517

本一致, 说明微斜长石不存在超显微双晶。

根据Лфонина (1979) 的作图方法, 将表3的结果投影在碱性长石结构图(图2)上。由图2可知, 马街山群混合岩中的碱性长石全部为最大微斜长石。

另外, 根据表2所列的Al在4个四面体位置(Al<sub>T<sub>1</sub>O</sub>, Al<sub>T<sub>1</sub>m</sub>, Al<sub>T<sub>2</sub>O</sub>, Al<sub>T<sub>2</sub>m</sub>)分配的情况看, Al<sub>T<sub>1</sub>O</sub>值大多数大于0.9, 最小值为0.78, 说明马街山群混合岩中的碱性长石是Al完全有序地分布在

T<sub>1</sub>(O)位置上的最大微斜长石。

考虑到红外光谱吸收法是测定长石有序度的一种较新的手段, 而且灵敏度较高, 故又对所研究样品中4种不同岩石类型的碱性长石进行结构状态的测定, 试图通过对比进一步验证上述结果的可靠性。对红外光谱600~650cm<sup>-1</sup>范围内( $\nu_1$ )和500~550cm<sup>-1</sup>范围内( $\nu_2$ )的两个吸收带频率位置偏移的测定后, 按 $\theta = 0.05(\Delta\nu - 90)$ ,  $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2$ (cm<sup>-1</sup>)的

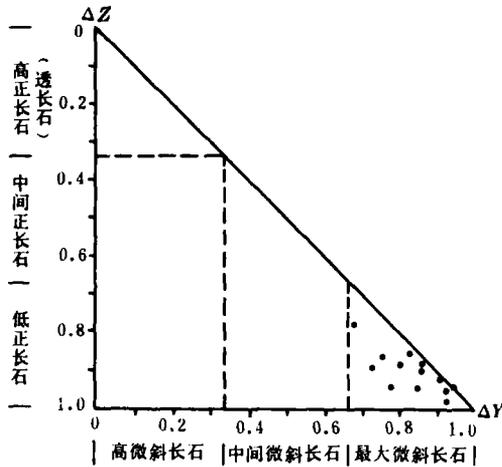


图2 碱性长石的结构状态图

经验公式计算,得碱性长石的红外有序度平均 $\theta = 1$ 。其测定结果列于表5。

对比表明,所测样品的红外有序度比X光有序度略高,但其有序度的数值更明显地反映了混合岩中的

碱性长石为最大微斜长石,说明两种方法所测得的结果都是可信的。

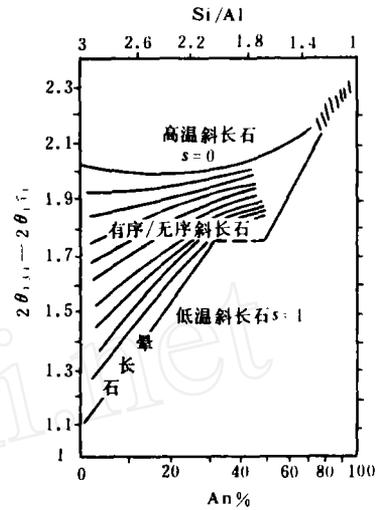


图3 斜长石 $2\theta_{131} - 2\theta_{1\bar{1}\bar{1}}$ 与成分有序度的关系

X光衍射和红外光谱法测定碱性长石有序度的数据

表5

样号	岩石名称	X光衍射法			红外吸收法		
		$2\theta_{060}$	$2\theta_{304}$	有序度( $\delta$ )	$\nu_1$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\nu_2$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	有序度( $\theta$ )
Ma96	钾长石英质黑云斜长眼球状混合岩	42.02	50.82	0.77	646	536	1.0
Ma50	黑云混合片麻岩	42.12	50.92	0.77	646	536	1.0
Ma113	片麻状黑云混合花岗岩	42.14	50.88	0.95	646	536	1.0
MaX11	混合岩化花岗岩	42.02	50.78	0.89	647	535	1.1

## 2. 斜长石

斜长石的有序度是利用斜长石 $\text{CuK}\alpha 2\theta_{131} - 2\theta_{1\bar{1}\bar{1}}$ (或 $\text{CuK}\alpha 2\theta_{241} - 2\theta_{2\bar{4}\bar{1}}$ )与成分有序度的关

系图(图3)求得的,其成分是通过油浸法测定折射率获得。现将其测量数据列于表6。Ma86, Ma90, Ma94混合岩中的斜长石数值在图3中求得均为低温

斜长石的X光衍射 $\Delta 2\theta$ 和有序度

表6

样号	岩石名称	成分(An)	$2\theta$ (CuK $\alpha$ )		$\Delta 2\theta$	有序度(S)
			131	1 $\bar{3}$ 1		
Ma86	斜长石英质黑云角闪斜长眼球状混合岩	No 8	31.52	30.50	1.02	1
Ma90	斜长石英质黑云角闪斜长眼球状混合岩	No 44~45	31.73	30.60	1.13	1
Ma91	片麻状黑云混合花岗岩	No 19	31.76	30.46	1.30	1
Ma94	角闪片岩	No 34	31.80	30.72	1.08	1

有序,  $S = 1$ 。

### 长石结构状态及其地质意义

从马衙山各类混合岩中碱性长石的三斜度及有序度指数来看,大都为最大微斜长石或接近最大微斜长石,仅变粒岩中的碱性长石有序指数为0.60~0.66,

具中等程度偏离单斜对称,为特征的中微斜长石。按史密斯1974年的钾长石分类(略),马衙山群混合岩中的碱性长石亦均属微斜长石类。

研究长石的结构状态是为了解决岩石的成因、成岩历史等问题。目前大多数学者通过大量的事实分析认为,斜长石的结构状态主要与其从流体相中结晶

时的温度有关；斜长石一旦形成，其有序度不因时间的推移而变化，即使变化也很小。故根据斜长石有序度的大小可直接分析确定斜长石形成时的热力学状态。对碱性长石来说，有序度大小除与晶出温度有关外，还决定于长石的成分及其在转变温度附近持续时间的长短（Wright, 1967; Ragland, 1970）。由于钾长石的结构状态在一定范围内是相对稳定的，因而可以利用它来划分、对比不同条件下岩石的形成条

件。徐克勤教授曾报道过华南地区交代成因的改造型花岗岩中钾长石为最大微斜长石，有序度普遍高于0.8（有少数较小）<sup>③</sup>。薛纪越等认为，交代花岗岩的形成温度约为400~500℃，钾长石为最大微斜长石，从前寒武纪到燕山期的交代花岗岩中的钾长石无一例外<sup>③</sup>。同时，根据野外观察和某些变质反应的实验数据，一般变质作用的温度范围介于250~800℃之间。马衔山地区多为混合岩，测得其中的斜长石为低

微斜长石化学成分百分含量表

表8

样品号	岩石类型	Si	Al	Fe	Ca	Na	K
Ma103	混合岩	31.829	8.591	0.099	0.506	0.711	11.293
Ma75	混合岩	31.968	8.438	/	0.499	0.576	11.781
Ma69	混合片麻岩	31.825	8.528	0.292	0.548	0.831	10.997
Ma114	混合花岗岩	31.933	8.342	0.256	0.501	1.193	10.999

兰州石油机械研究所电镜室分析。

温（<500℃）有序结构。碱性长石全部为最大微斜长石，其化学成分如表8。

根据惠特尼(J. A. Whitey)和斯脱模(Stormor)

$$T^{\circ}(\text{K}) = \frac{\{7973.1 - 16910.6 X_{\text{Ab}}^{\text{Al}} + 9901.9 (X_{\text{Ab}}^{\text{Al}})^2 + [0.11 - 0.22 X_{\text{Ab}}^{\text{Al}} + 0.11 (X_{\text{Ab}}^{\text{Al}})^2] P\}}{-1.9872 \ln (X_{\text{Ab}}^{\text{Al}} / X_{\text{Ab}}^{\text{Pl}}) + 6.48 - 21.58 X_{\text{Ab}}^{\text{Al}} + 23.72 (X_{\text{Ab}}^{\text{Al}})^2 - 8.62 (X_{\text{Ab}}^{\text{Al}})^3}$$

计算了混合岩的形成温度。式中 $X_{\text{Ab}}^{\text{Al}}$ 为碱性长石中钠长石分子， $X_{\text{Ab}}^{\text{Pl}}$ 为斜长石中的钠长石分子。马衔山群混合岩中 $X_{\text{Ab}}^{\text{Pl}} = 0.75$ ， $X_{\text{Ab}}^{\text{Al}} = 0.18$ （表6和表8）。根据混合花岗岩中暗色矿物的含量（ $\text{Bi} + \text{Hb} = 10\% \pm$ ），从图4估算出压力为3.5~4千巴；经计算，混合岩的形成温度为623~629℃。

马衔山群混合岩的岩石组合主要是混合岩—混合片麻岩—混合花岗岩，且它们之间是渐变的。这与塞

1977年修正的适用于低温碱性长石系列的温度计算公式：

岩—混合岩—花岗质岩是连续变化观点一致。因而认为本区混合岩是区域性混合岩化的结果。小石马花岗岩可能是混合岩化作用后期形成的，属交代形成的改造型花岗岩。从以上测量结果可以看出：

1. 马衔山群各类混合岩中的碱性长石，为具很低结构状态的微斜长石，其三斜度，有序度均在0.75~1.00之间，属最大微斜长石。反映了不论在混合岩化过程中，还是在混合岩形成后，整个马衔山群变质岩热力学状态在时间和空间上的分布是均匀的，因而马衔山群混合岩是区域性混合岩化作用的产物。

2. 根据二长石温度计计算，马衔山群混合岩的成岩温度为623~629℃，压力为3.5~4千巴。这与深熔作用的温压条件基本吻合。

#### 参考文献

- [1] Borg, I. Y., Smith, D. K.: Calculated X-ray powder patterns for Silicate minerals. 1969
- [2] 中国科学院贵阳地球化学研究所：矿物X射线粉末鉴定手册，科学出版社，1978年
- [3] 张月明等：晶体X射线衍射角与面网间距换算表，科学出版社，1966年
- [4] 苗春省等：长石有序度测定法及在地质上的应用，地质出版社，1983年
- [5] 赵连泽等：南京大学学报，1983年，第2期

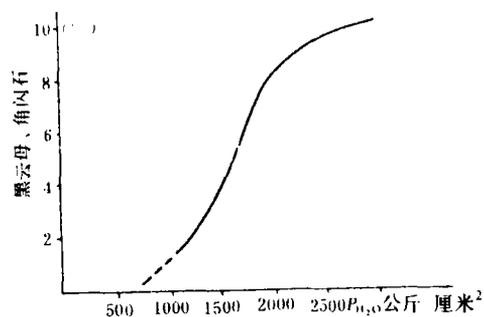


图4 英安岩成分岩浆中晶出的黑云母和角闪石的含量与水压关系图解（依布塔罗夫，1969）

德霍姆(Sederholm)混合交代学说中关于由片麻

③薛纪越、张根娣，不同成因花岗岩的钾长石结构状态。