

# 遂安石的合成及其成因

(中国地质科学院矿床地质研究所) 刘玉山

遂安石是一种镁的硼酸盐矿物，自然界中较为少见。它于1953年由渡边武男在朝鲜遂安郡笏洞矿区首次发现，以后在苏联和我国也相继发现<sup>(1,2,3)</sup>。它常与硼硼石(小藤石)、硼镁铁矿、硼镁石和粒硅硼石等矿物一起发育于砂卡岩型硼矿床中的变质白云岩中。

遂安石之所以少见，是因生成条件比较特殊。一般认为它是砂卡岩矿物，但典型的砂卡岩硼矿床中所含硼矿物往往是硼硼石和硼镁铁矿，而不是遂安石；而遂安石则见于变质白云岩或存在于白云岩的超变质作用—镁砂卡岩型矿床中。可见，遂安石的生成条件及成因机理尚研究得不够。

已有一些学者用人工合成和相平衡实验来研究硼酸盐矿物学和矿床成因问题。远在遂安石发现之前，H. M. Davis<sup>(4)</sup>等人在实验研究MgO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>体系时就曾用熔化—结晶法合成出了三斜的Mg<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>晶体，叫焦硼酸镁(Magnesium pyroborate)。但有关硼酸盐矿物合成和稳定条件的热液实验研究做得尚不多。A. Л. Григорьев<sup>(5)</sup>用热液法实验研究了部分MgO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O体系，并首次合成出了单斜的Mg<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>——遂安石以及其它硼酸盐矿物，但对遂安石生成的温度压力条件和溶液性质研究得不够。

我们实验研究的目的是，就是通过热液条件下遂安石的合成，特别是通过含硼酸的热液作用于碳酸镁的交代反应，来研究遂安石形成的温度压力条件和热液性质，进而探讨在地质过程中遂安石的成因和生成机理。

## 一、遂安石的合成

我们用熔化—结晶法和热液法进行了遂安石的合成。在热液实验中，除合成了遂安石外，随实验条件不同还生成了硼硼石、硼镁石和硼镁铁矿等镁的硼酸盐矿物。并研究了遂安石稳定的条件。

**熔化—结晶法合成** 熔化—结晶法合成是以分析纯的化学试剂MgCO<sub>3</sub>、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(熔化成玻璃)为试剂在铂丝电炉中完成的。方法是按遂安石的理论化

学式Mg<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>中的组分比例，称取一定量的MgCO<sub>3</sub>及B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，将它们均匀混合后置于白金坩埚内，再将白金坩埚悬吊于直立的管式电炉之恒温区中。以大约每分钟10℃的升温速度加热至1400℃，恒温一小时；再将温度降至略低于Mg<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>熔点(1340℃)的温度，即1200℃左右，恒温半小时至一小时，让熔融体结晶。最后停止加热，让样品在电炉中自然冷却。为了使由化学试剂熔化成Mg<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的反应进行完全，曾将上述实验得到的晶体研细拌匀，装入白金坩埚中，在铂丝电炉中重复做一次熔化—结晶实验。

经上述熔化—结晶实验合成出的产物是一种外观为米黄色的针状结晶集合体(照片1)。显微镜下它的颜色和折光率与遂安石相似，但X光衍射分析揭示它为三斜晶系，与单斜晶系的遂安石有所差别(表2)。所以，严格地说，熔化—结晶法合成出的晶体还不是遂安石，而只是焦硼酸镁Mg<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>。根据M. E. Mrose等人的资料<sup>(6)</sup>，它在低于1050℃的温度下转变为单斜的遂安石。

**热液合成** 熔化—结晶法合成遂安石主要具有矿物学意义，因为在自然界遂安石不是由融体结晶生成的，而是从热液中结晶出来或以交代方式生成的。为了了解遂安石的形成条件和机理，我们着重进行了遂安石的热液合成及在热液条件下的稳定性的实验。实验是在密封自紧式不锈钢高压釜中进行的。实验方法和程序是：将称量为200—300毫克的分析纯MgCO<sub>3</sub>连同一定浓度的H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>水溶液或H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>+NaCl水溶液一起放入高压釜反应腔中，密封后将高压釜置于铁铬丝坩埚电炉中进行恒温恒压反应。实验温度由XCT-191温度调节仪联接可控硅电压调整器自动控制，并用镍铬—镍铝热电偶测定。据经验，温度控制误差约为10℃左右，压力误差估计可达50—100巴。实验持续时间500℃和600℃时为14昼夜，400℃时为21昼夜。实验结束后将固相产物取出烘干，进行显微镜下鉴定、X光衍射分析和差热失重分析。

在 350—600℃ 和 200—1000 巴 的 温 度 压 力 范 围 内 进 行 了 二 十 余 次  $MgCO_3$  与 不 同 浓 度 的 硼 酸 溶 液 和 硼 酸 钠 溶 液 热 液 反 应 的 实 验。实 验 结 果 除 合 成 了

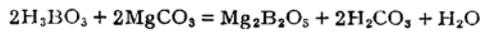
遂 安 石 外，还 生 成 了 镁 硼 石、硼 镁 石 和 硼 镁 铁 矿 等 硼 酸 盐 矿 物。各 次 实 验 的 初 始 试 料、实 验 条 件 及 实 验 产 物 综 合 于 表 1。

遂安石等硼酸盐矿物热液合成的实验条件和实验结果

表 1

实验号	实验初始试料		实验条件		实验时间 (hr)	实验后 溶液 pH	实验的固相产物
	$MgCO_3$ (mg)	溶液 (ml)	温度 ( $^{\circ}C$ )	压力 (b)			
Su-1	300	0.5MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (7.4)	500	1000	336		镁硼石, 菱镁矿
Su-2	300	1MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (7.3)	500	1000	336		镁硼石,
Su-3	300	0.25MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 0.25MNaCl (7.5)	500	1000	336		镁硼石
Su-4	300	0.5MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 0.5MNaCl (7.4)	500	1000	336		镁硼石
Su-5	200	1MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (7.3)	500	1000	336		硼镁石
Su-6	300	1MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (7.4)	500	1000	336		硼镁石
Su-7	300	3MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (7.4)	500	1000	336	5.5	硼镁石, 遂安石
Su-8	300	3MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (4.8)	600	1000	336		遂安石
Su-9	200	1MN <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + 1MNaCl (7.8)	500	1000	336	8	遂安石, 少量硼镁石
Su-10	200	1MN <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + 1MNaCl (4.8)	600	1000	336	9	遂安石
Su-11	250	3MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (3.4)	500	500	336		遂安石
Su-12	100	3MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (0.9)	500	200	336		遂安石, 少量硼镁石
Su-13	500	2MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (7.8)	350	200	504	5	硼镁石
Su-14	300	0.5MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (10.3)	400	1000	504	6.4	硼镁石
Su-15	300	1MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (10)	400	1000	504	6.4	硼镁石
Su-17	300	3MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (7.4)	400	500	504	6	硼镁石
Su-18	300	3MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (10.7)	400	1000	504	6	硼镁石
Su-19	$MgCO_3$ 200 $Fe_2O_3$ 100	3MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (9.4)	500	500	336		硼镁铁矿, 遂安石
Su-20	300	1MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (5.2)	600	1000	336	6.5	遂安石
Su-21	300	2MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (5.2)	600	1000	336		遂安石
Su-22	300	3MH <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> + 1MNaCl (1.3)	400	200	504	6.5	硼镁石

从实验结果看出, 在我们的实验里, 在温度为 500—600℃、压力为 200—1000 巴的实验条件下, 高浓度的  $H_3BO_3 + NaCl$  (或  $Na_2B_4O_7 + NaCl$ ) 水溶液作用于  $MgCO_3$  均生成遂安石:

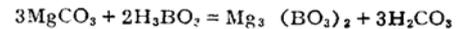


热液合成的遂安石为淡绿色或黄绿色的纤维状晶体。在显微镜下遂安石为无色透明, 纤维状或长柱状晶体, 长度一般在 0.2—0.5 毫米, 有的可达 1—2 毫米 (照片 2)。

对热液合成的和熔化—结晶法合成的遂安石进行了 X 光衍射分析, 并将合成的遂安石的 X 光衍射数据与天然遂安石的数据列表对比 (表 2)。X 光衍射数据对比表明, 热液合成的遂安石与天然遂安石的结构是相同的, 而熔化—结晶法合成的  $Mg_2B_2O_5$  则有别于遂安石的结构。按 Грингорьев 方法, 由热液合成和熔化—结晶法合成的  $Mg_2B_2O_5$  的 1.916 和

1.944 面间距判断, 热液合成的遂安石属单斜晶系, 而熔化—结晶法合成的晶体则为三斜晶系的焦硼酸镁  $Mg_2B_2O_5$ 。

当稀硼酸溶液 ( $< 1MH_3BO_3$ ) 与  $MgCO_3$  反应时, 在 500℃ 和 1000 巴的条件下没形成遂安石而形成了镁硼石 (小滕石)。这是因为与遂安石比较, 镁硼石较富镁而贫硼的缘故。



合成的镁硼石为浅褐色粒状晶体, 镜下为无色透明 (照片 3)。合成的镁硼石的 X 光衍射数据与天然镁硼石很吻合, 说明其晶体结构特征与天然镁硼石一样 (表 3)。

硼镁石是较低温度下的实验产物。在我们的实验里它形成于 350—500℃, 推测温度更低时它依然稳定。硼镁石是一种含水的硼酸盐矿物, 它既可以在低温下由  $H_3BO_3$  水溶液作用于  $MgCO_3$  形成, 也可

合成透安石的X光衍射数据及其与天然透安石的对比

表 2

天然透安石(6)		热液合成透安石*		熔融-结晶合成透安石*		天然透安石(6)		热液合成透安石*		熔融-结晶合成透安石*	
d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I
8.91	8	8.90	5	—	—	1.916	30	1.916	30	1.944	40
5.96	6	5.93	10	—	—	1.884	5	1.880	10	1.886	10
4.47	25	4.44	60	4.47	20	1.843	11	1.840	15	1.840	10
4.091	11	4.07	12	4.10	8	1.817	5	1.815	10	—	—
3.214	2	3.20	15	3.10	5	1.783	3	1.782	5	—	—
3.020	3	—	—	—	—	—	—	1.710	10	1.704	5
2.983	18	2.97	50	2.95	20	1.675	3	1.676	5	1.655	5
2.917	3	—	—	—	—	1.645	2	—	—	1.620	3
2.823	50	2.82	60	2.82	40	1.604	6	1.603	15	1.593	2
2.765	5	—	—	—	—	1.585	5	1.587	10	—	—
2.732	9	2.73	40	2.68	25	1.562	2	1.560	10	1.554	—
2.637	15	2.63	30	2.63	20	1.531	8	1.532	10	—	—
2.557	100	2.558	100	2.57	100	1.514	11	1.512	10	—	—
2.468	8	2.470	20	—	—	1.498	11	1.498	5	1.487	10
2.430	8	2.420	25	2.43	5	—	—	1.426	5	1.404	10
2.281	5	2.276	5	—	—	—	—	—	—	1.373	5
2.227	2	2.230	8	—	—	—	—	1.336	5	1.350	—
2.187	2	—	—	—	—	—	—	1.288	8	1.295	5
2.151	13	2.150	20	2.13	10	—	—	—	—	1.287	3
2.100	2	—	—	—	—	—	—	—	—	1.250	3
2.051	11	2.050	20	2.03	5	—	—	1.216	10	1.217	5
2.010	60	2.010	60	2.00	50	—	—	—	—	—	—

\* 实验条件: CuK $\alpha$ , 40kv 45mA R. 2 $\times$ 10<sup>3</sup>

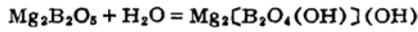
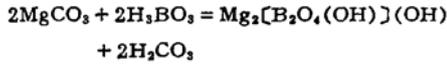
合成硼镁石、硼镁石的X光衍射数据及其与天然矿物的对比

表 3

天然硼镁石(7)		热液合成硼镁石*		天然硼镁石(8)		热液合成硼镁石*		天然硼镁石(7)		热液合成硼镁石*		天然硼镁石(8)		热液合成硼镁石*	
d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I						
4.207	80	4.20	25	6.20	100	6.21	80	1.640	10	1.640	5	1.967	12	—	—
3.974	10	3.96	20	5.17	50	5.17	30	1.608	5	1.610	15	1.932	12	1.933	20
3.462	40	3.44	25	3.97	8	—	—	1.579	5	1.580	25	1.779	12	—	—
3.204	10	3.21	15	3.85	20	3.85	20	1.554	20	1.552	20	1.726	20	1.728	30
2.675	80	2.67	100	3.32	18	3.32	15	—	—	1.537	15	—	—	1.690	30
2.491	20	2.49	25	3.24	45	3.24	40	1.516	40	1.516	60	1.662	10	1.626	30
2.384	5	2.38	10	3.02	40	3.02	40	1.480	5	1.481	30	1.607	10	1.600	30
2.317	60	2.31	40	—	—	2.98	40	1.437	5	1.437	5	1.555	10	1.555	40
2.272	45	2.27	20	—	—	2.81	50	1.405	10	—	—	1.538	10	—	—
2.233	80	2.23	80	2.657	75	2.656	100	1.370	10	—	—	1.510	14	1.513	20
2.182	50	2.175	100	2.586	30	2.590	50	1.360	5	—	—	1.493	12	1.492	20
2.080	15	2.070	30	2.533	40	2.535	60	1.350	5	—	—	1.474	14	1.475	20
2.030	10	2.025	10	2.424	75	2.425	70	—	—	—	—	1.426	6	—	—
1.988	5	1.980	10	2.313	30	2.312	70	—	—	—	—	1.377	8	—	—
1.800	5	1.800	15	2.202	80	2.202	70	—	—	—	—	1.338	6	—	—
1.788	5	1.790	5	2.199	40	—	—	—	—	—	—	1.293	8	—	—
1.731	45	1.730	80	2.079	60	2.080	70	—	—	—	—	1.241	6	—	—
1.672	100	1.670	90	1.992	25	1.993	70	—	—	—	—	—	—	—	—

\* 实验条件: CuK $\alpha$ , 40kv 45mA, R. 2 $\times$ 10<sup>3</sup>

由遂安石或镁硼石的水化作用形成，



热液合成的硼镁石为结晶很差的棉絮状物质，镜下能看到它呈纤维状、放射状晶体集合体发育于碳酸镁团块上。硼镁石 X 光衍射数据与天然硼镁石无异（表 3）。对合成的硼镁石进行的差热（DTA）和热失重（TG）分析表明，它在 610℃ 左右失去结晶水，呈现一吸热峰。这一失水过程在失重曲线上也明显地表现了出来（图 1）。

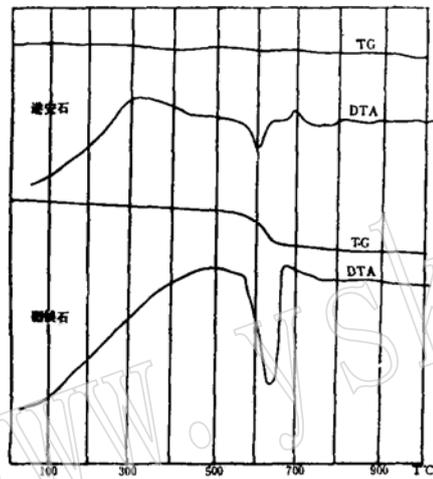


图 1 遂安石和硼镁石的差热 (DTA) 和热失重 (TG) 曲线

## 二、遂安石生成和稳定的物理化学条件

由实验结果和热力学分析我们能够得出，决定遂安石生成和稳定的因素为体系的组分、温度、压力（包括二氧化碳分压和水分压， $P_t = P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{CO}_2}$ ）以及溶液的酸碱度等。在我们的热液实验条件下，遂安石生成和稳定的条件主要是反映溶液的组分（硼镁的化学位）和实验的温度、压力。通过分析我们可以得出如下几点认识：

1. 遂安石生成于富硼富镁和贫铁的热液环境中。由实验结果看出，含  $\text{BO}_3^{3-}$  的水溶液作用于  $\text{MgCO}_3$ ，在实验条件下可形成几种镁的硼酸盐矿物。只有当浓度大于 1 摩尔的硼酸溶液或硼酸钠溶液与  $\text{MgCO}_3$  反应时才能生成遂安石。当浓度小于 1 摩尔的硼酸的稀溶液与  $\text{MgCO}_3$  作用时，在形成遂安石的

温度压力条件下没形成遂安石而形成了硼镁石。这可以从  $\text{H}_3\text{BO}_3$  溶液与  $\text{MgCO}_3$  反应的热力学分析来解释。在温度压力和镁的化学位一定时，则  $\text{BO}_3^{3-}$  的活度就决定了形成遂安石或是形成硼镁石，活度值大则形成遂安石。这可以从上面形成遂安石和形成硼镁石的化学反应式中看出来，同时也可从硼镁石与  $\text{H}_3\text{BO}_3$  溶液作用生成遂安石的反应式推断，



由于缺少硼酸盐矿物的热力学资料，我们无法作出  $\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$  体系的精确的  $T-\log a_{\text{BO}_3^{3-}}$  相图。但从我们有限的一些实验结果，我们可以粗略地勾画出这个相图的轮廓。在我们的大部分实验里， $\text{MgCO}_3$  含量和  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  是一定的，这样我们就可以将这部分实验结果投到  $T-\log m_{\text{H}_3\text{BO}_3}$  图上，得出遂安石生成和稳定的温度和硼酸溶液浓度区间（图 2）。

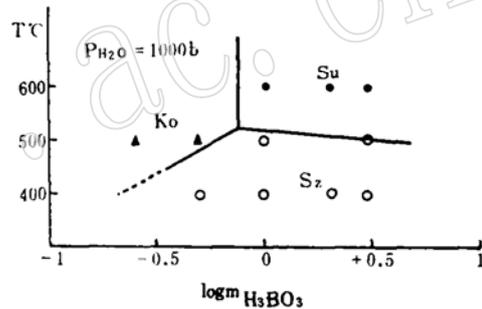
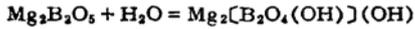


图 2 遂安石形成的  $T-\log m_{\text{H}_3\text{BO}_3}$  示意图  
(● 遂安石 Su, ▲ 硼镁石 Ko, ○ 硼镁石 Sz)

实验结果还表明，在我们的实验体系中，只在缺铁时才能形成遂安石。只要有少量的铁质加入（个别实验中高压釜釜壁上的少量铁质参与了反应），就在形成遂安石的同时，在高压釜釜壁上生成了微量的毛发状的硼镁铁矿（照片 4）。如果我们向合成遂安石的试料中加入少量的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，则合成产物变成了以硼镁铁矿为主。Л. И. Шабунин<sup>(2)</sup> 曾指出， $\text{BO}_3^{3-}$  与  $\text{Fe}^{3+}$  化合在能量上比与  $\text{Mg}^{2+}$  化合更为有利，因此，在高温高压下有  $\text{Fe}^{3+}$  存在时， $\text{BO}_3^{3-}$  很易与  $\text{Fe}^{3+}$  化合，首先形成硼镁铁矿。我们推测，硼镁铁矿的形成自由能应比遂安石小。

2. 遂安石形成于较高的温度下。遂安石是无水硼酸盐矿物，在  $\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$  体系中它属高温矿物。在我们的热液实验中，在水蒸汽压  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 1000\text{b}$  时，只有当温度为 500℃ 或更高时，才形成了遂安石。有人研究天然遂安石在水热条件下蚀变时曾得出，在 400 巴和 450℃ 时遂安石尚稳定，450℃

以下遂安石就蚀变成硼镁石了<sup>①</sup>。因此可以说, 450℃可能是遂安石稳定的下限温度。低于这个温度下限, 遂安石即与水溶液发生水化作用而转变成硼镁石:



遂安石—硼镁石水化反应的反应参数是水蒸气压力及温度。在 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 一定时, 温度就成了它们互相转变的决定因素了。遂安石在高温区稳定, 而硼镁石的稳定区在低温区。从实验结果可以大致画出遂安石—硼镁石的单变平衡曲线(图3)。

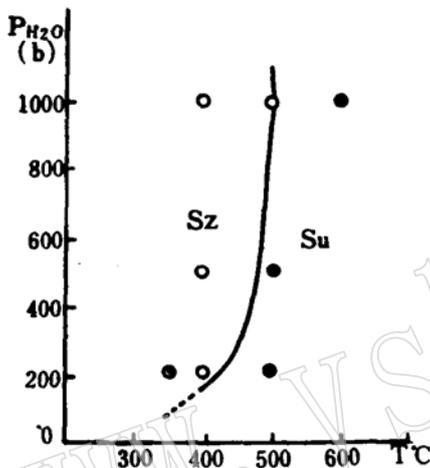


图 3 由实验得出的 $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_2[\text{B}_2\text{O}_4(\text{OH})](\text{OH})$ 单变平衡曲线

3. 溶液的pH和 $\text{CO}_2$ 分压也是控制遂安石生成和稳定的因素。由碳酸镁和硼酸溶液作用形成遂安石的反应式判断,



遂安石形成于 $\text{CO}_2$ 分压较低条件下。在我们的实验条件下, 温度和 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 都高,  $\text{CO}_2$ 分压不会很大。例如: 在我们的试剂中有 $\text{MgCO}_3$ 0.3克, 加水约5—8克, 则 $\frac{\text{CO}_2}{\text{H}_2\text{O}} \approx \frac{1}{90}$ (摩尔比)。在高温高压下 $\text{CO}_2$ 在水和氯化钠溶液中的溶解度很大。因此, 在我们的实验条件下 $\text{CO}_2$ 主要溶解于流体而呈 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 形式存在,  $P_{\text{CO}_2}$ 很小。这就是说, 在1000巴下的高温浓硼酸热液中,  $\text{MgCO}_3$ 是不稳定的, 遂安石则是稳定的。

至于溶液酸碱度的影响, 从实验结果我们可以看出, 在广泛的pH值范围里(从硼酸溶液的pH=5—6到硼酸钠溶液的pH=9), 遂安石都是稳定的。

所以, 综上所述, 我们说: 遂安石形成于低 $\text{CO}_2$ 分压、高温和富硼镁、贫铁的条件下。

### 三、遂安石的成因探讨

从热液实验得出的遂安石形成和稳定的温度、压力和化学条件, 我们可以对遂安石在地质过程中生成的环境和成因问题作一些探讨。

从实验结果分析, 遂安石不一定属典型的砂卡岩矿物。虽然遂安石生成和稳定的温度为450—600℃, 是砂卡岩和热液过程的特征温度, 但砂卡岩和热液过程很少有完全缺铁或贫铁的情况, 即使在镁砂卡岩建造中, 铁质在镁铁总量中也占有相当的比例。这样, 内生溶液中的硼就极易与铁镁化合生成硼镁铁矿, 而不太可能生成遂安石。因此, 在含硼的镁砂卡岩和砂卡岩型硼矿床中, 硼的工业矿物是硼镁铁矿, 而不是遂安石。在一些砂卡岩型硼矿床外接触带的白云岩中发育有少量的遂安石, 不具经济价值。

遂安石显然也不可能是沉积作用的产物。某些沉积建造是富硼镁而贫铁的, 但缺少高温的条件。这里发育的是含水硼酸盐矿物, 如: 多水硼镁石、硼镁石等。

由此我们可以推断, 最可能形成遂安石的情况应该是镁硼酸盐沉积建造和含硼的镁碳酸盐建造的高温变质作用。许多沉积建造是富含硼的, 如陆相的库水硼镁石—柱硼镁石建造和海相的含硼的镁质碳酸盐建造, 这些建造有的本身就是硼矿床。它们经高级的区域变质、超变质和接触变质后, 含水的硼酸盐矿物就会发生脱水作用而转变成无水的镁硼酸盐矿物, 如遂安石和镁硼石。我国东北某些含遂安石的硼矿床看来可能属此种成因。这里遂安石与镁硼石、硼镁石、粒硅镁石和白云石共生。硼矿体产于前寒武纪白云岩中, 矿体和围岩(白云岩)都具有一定的层位而且呈区域分布。白云岩经变质作用而发生蛇纹石化和粒硅镁石化。岩浆岩呈脉状切穿矿体。因此说白云岩是由沉积岩经变质作用而来的副变质岩, 遂安石是沉积变质生成的。

在区域变质和接触变质过程中, 岩层中的硼也可能转到溶液中。这时岩层本身的硼和内生热液中的硼与碳酸盐反应也能形成无水硼酸盐矿物遂安石。

① 中国科学院贵阳地球化学研究所、地质所, 1974, 东北内生硼矿床的矿物组成和矿床成因研究, 科学出版社。

石、镁硼石等,即使在这种情况下透安石也往往不与硼镁铁矿、磁铁矿等矽卡岩矿物共生,而是发育于外接触带的白云岩围岩中。因此有理由认为,透安石是沉积物质经较高温度下的变质作用和超变质作用而生成的变质矿物。

在研究过程中陈淑卿及黄家山参加了部分实验和X光分析,郑立焯完成了矿物的差热及热失重分析。此外,本文承蒙李鹏九、林盛中和郑绵平诸同志审阅并提出宝贵意见,在此一并致谢。由于水平有限,本文中错误和不当之处在所难免,敬希指正。

#### 参 考 文 献

1. Watanabe, T., 1953, Suanite, a new magnesium mineral from Hol Kol, Suan, North Korea, Min. Jour. v. 1, p. 54-62.

2. Шабьини Л. Е. Перцев Н. Н. 1963, Некоторые новые данные о суаните и

его парагенезисах. ЗВМО Вып. 2

3. 王秀璋 1965, 内生硼镁石及内生镁铁硼酸盐矿物的形成条件, 地质科学, 第二期。

4. Davis, H. M. and Knight, M. A., 1945, The system magnesium oxide-boric oxide. Jour. Amer. Ceramic Soc. V. 28, No. 4.

5. Григорьев А. П. и Некрасов И. Я. 1966, Бораты высокотемпературной части системы  $MgO-B_2O_3-H_2O$ . Геол. Рудных Месторождения Т. 8, №2.

6. Takeuchi, Y., 1952, The crystal structure of magnesium pyroborate. Acta Cryst. v. 5, p. 574-581,

7. Watanabe, T. et al., 1963, Kotoite,  $Mg_3(BO_3)_2$ , from the Neichi Mine, Iwate prefecture, Japan, Proc. Jap. Acad. V. 39, No. 3.

8. Mrose, M. E. and Fleischer, M. 1963, The probable identity of Magnioborite with suanite. Am. Min. V. 48, No. 7-8.

## Synthesis of Suanite and its Origin

Liu Yushan

### Abstract

Suanite, a mineral of magnesium borate, rarely occurs in nature. We have studied the conditions for its formation and stability by laboratory synthesis and hydrothermal experiments. The experiments were carried out in cold-seal vessels at the temperature of 350-500°C and pressure of 200-1000 bars, with  $MgCO_3$  as a starting material and  $H_3BO_3$ ,  $Na_2B_4O_7$  and  $H_3BO_3 + NaCl$  as reactive solutions. Suanite, kotoite, szaibelyite and ludwigite were formed under these conditions.

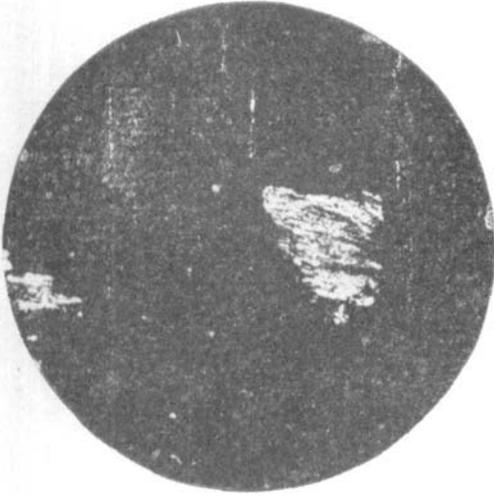
The experiments show: (1) suanite occurs in a high-boron and magnesium, low-iron hydrothermal environment. It can be formed by reaction of  $MgCO_3$  with 1-3 M  $H_3BO_3$  or  $Na_2B_4O_7$  solutions under temperature of 500-600°C and pressure of 200-1000 bars. In the case of reaction of  $MgCO_3$  with relatively diluted  $H_3BO_3$  solution and under the same P-T conditions, the product is kotoite instead of suanite. (2) Suanite is formed and stable at relatively high temperature (500-600°C) and may change into szaibelyite by hydration when temperature drops below 450°C. (3) Suanite is formed under a low  $CO_2$  partial pressure

and a wide range of pH values and is stable when  $\text{pH}=5-9$ .

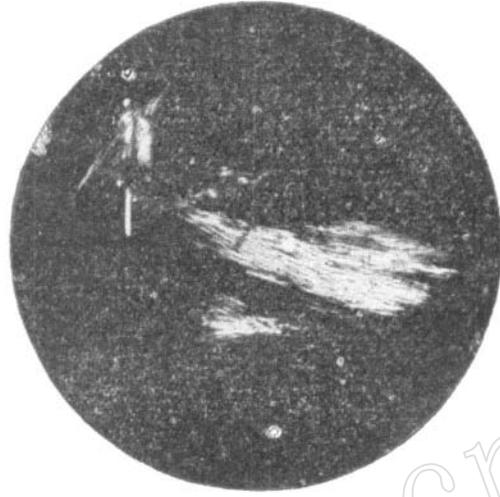
From the results of the experiments, it is considered, that suanite may not be a typical skarn mineral. It seems most probable that suanite is formed by high-temperature metamorphism of sedimentary formations of hydrous magnesium borates and boron-bearing magnesium carbonates. The hydrous borate minerals, when undergo high-grade regional or contact metamorphism, would change into anhydrous borate minerals such as suanite and kotoife through dehydration. During the contact metamorphism of the magnesium-carbonate formation, boron form formation itself and from endogenic hydrothermal solutions may also react with carbonates to form suanite. Therefore, it's reasonable that suanite is formed by hightemperature metamorphism of sediments.

www.yskw.ac.cn

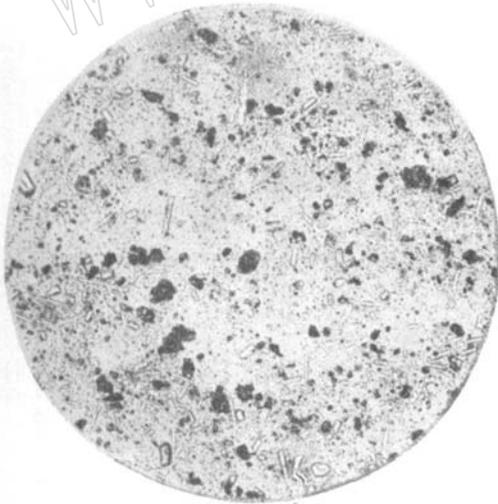
刘玉山：遂安石的合成及其成因



照片 1 熔化—结晶法合成的  $Mg_2B_2O_5$  晶体集合体 (油浸制片, 正交偏光,  $\times 160$ )



照片 2 热液法合成的遂安石晶体集合体 (油浸制片, 正交偏光,  $\times 160$ )



照片 3 热液法合成的镁硼石 (小滕石) (油浸制片, 正交偏光,  $\times 160$ )



照片 4 热液法合成的硼镁铁矿针状和柱状晶体 (油浸制片, 单偏光,  $\times 160$ )