

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

## 汉诺坝玄武岩包体中的 微晶-玻璃及其意义\*

郑海飞 冯家麟

(河北地质学院, 宣化)

本文研究了深源包体中的微晶-玻璃, 从而发现, 无论是含或不含石榴石的包体中, 玻璃的化学成分都相当于石榴石。这种玻璃由微小的尖晶石、斜方辉石和斜长石组成, 其形成压力均低于包体的形成压力。因此它的熔融是由于上地幔的减压作用( $>10 \times 10^5 \text{ kPa}$ )使体系的不变点移向石榴石所致, 然后在带至地表途中冻结而成。研究结果还发现, 减压至较低压力( $10-25 \times 10^5 \text{ kPa}$ )下熔体的首晶相是尖晶石。因此良好的分异作用将产生拉斑玄武岩浆, 而分异不完全或减压至低于 $10 \times 10^5 \text{ kPa}$ 时, 则只能产生高铝玄武岩浆。

一般认为, 玻璃是物质在高温熔融状态下的淬冷产物。显然, 在深源包体中出现玻璃至少可提供物质发生熔融的直接证据, 因此, 研究深源包体中玻璃的成因, 对于了解深部物质状态及岩浆起源具有直接意义。

深源包体中存在玻璃的现象并非很罕见, 但却很少报导。一个可能的原因是其形态酷似蚀变产物, 因而极易被人们所忽视。然而Sven Maaløe等就注意到富霞石斑晶的凝灰岩的尖晶石二辉橄榄岩团块(包体)中, 具有玻璃和微晶质的小泡<sup>[1]</sup>, 而且有许多证据可以证明它们是部分熔融的产物。Hunter和Taylor (1982) 也发现地幔岩石中具有石榴石熔融而形成的玻璃, 并详细地讨论了其稳定性<sup>[2]</sup>。

汉诺坝玄武岩中含有大量种类繁多的深源包体<sup>[3]</sup>, 在这些包体中的矿物颗粒之间和周围也常充填着一直被人们视为次变产物的玻璃, 只是在研究了其化学成分和矿物成分后, 才发现应当是包体中局部熔融的产物。本文试图通过这些分析研究结果, 探讨玻璃的成因及与玄武岩浆起源的关系。

### 研究方法

由于显微镜下观察到的玻璃, 仅仅是呈羽毛状或放射状的微晶集合体, 因此, 采用日本产D/max-rA型X射线衍射仪进行了物相分析(采用铜靶, 镍滤波片以每秒0.05度的速度进行步进扫描, 扫描角度 $10-75^\circ$ )。在确定了样品中存在的物相后再进行该物相精确的角度测定, 以确定准确的矿物种属。样品总成分通过化学分析获得, 样品中某一相的化学成分利用衍射数据与成分的关系间接获得。

### 样品的矿物岩石学

研究结果发现, 微晶-玻璃主要存在于以岩块, 岩球或包体形式出现在碱性玄武岩(主要是碧玄岩)中的尖晶石二辉橄榄岩和石榴石辉石岩中, 少量见于部分辉石岩中和辉石巨晶体中。

\* 参加此项工作的还有谢漫泽, 张红等同志。

本文1985年7月收到, 1986年3月改回, 罗正华编辑。

尖晶石二辉橄榄岩为粒状结构，主要矿物为尖晶石、单斜辉石、斜方辉石和镁橄榄石。橄榄石中见有扭折带；辉石中常见出溶条带，部分斜方辉石还具有地幔变形裂理。尖晶石为黑色（手标本下）或深褐色（单偏光下）的黑晶石，含量为10—40%不等，常呈粒状、串珠状、填隙状及出溶条带状存在于岩石及其中的矿物中。微晶-玻璃与黑晶石密切伴生，常分布于黑晶石边缘或构成上述黑晶石的假象（图版-1、2、3）。

石榴石辉石岩或辉石石榴岩以粒状结构为主，部分为变晶粒状结构，并可见粒间互呈120°的接触关系。主要矿物有石榴石、单斜辉石和斜方辉石，偶尔可含少量橄榄石。薄片石榴石多呈自形的六边形，个别为浑园状。微晶-玻璃主要呈填隙状围绕着石榴石边缘；有时可见细粒的单斜辉石充填在石榴石晶体细长而又平直的边界上，结果往往造成一些石榴石完全消融而仍能够保持其假象（图版-6）；偶尔还可见浑园状的石榴石残留于微晶-玻璃中。

两种岩石的微晶-玻璃中均未发现任何含水矿物。

微晶-玻璃在手标本中呈淡玫瑰色，光学显微镜下为深褐灰色的羽毛状、扇状、放射状的微晶集合体（图版-4、5、6）。其形态主要取决于熔融程度：石榴石或尖晶石边部熔融而形成的微晶-玻璃总是呈纤维状并垂直于矿物边缘；当完全熔融时，则多呈羽毛状，扇状和放射状的微晶集合体。微晶的粒度无法辨出，估计至少小于0.1 $\mu$ m，偶尔可见单晶轮廓（约5 $\mu$ m）。

除微晶-玻璃外，当包体熔融程度较高时，还可发现麻点化的单斜辉石，其边部甚至整体都具有呈粒状、管状或网络状的玻璃物质，只是总体仍具有一致的光性方位。有时还可见斜方辉石边部或整体被微晶橄榄石所代替。

另外，普遍见有玄武质细脉穿切含微晶-玻璃的尖晶石二辉橄榄岩和石榴石辉石岩包体。细脉中主要矿物为斜长石和单斜辉石，其中单斜辉石多集中于脉壁，而中间几乎全为斜长石。这种细脉往往可贯穿整个微晶-玻璃和所有矿物并与赋存包体的玄武岩相连，有时还可见细脉进入玻璃体后逐渐尖灭的现象（图版-2）。很显然，微晶-玻璃是在玄武岩浆贯入包体以前就已固结了。

### 玻璃的化学成分及物相分析

两种包体中微晶-玻璃的化学分析结果均列于表1中，为了便于对比，还列入了岩石中石榴石的化学成分。可以看出，石榴石辉石岩中的微晶-玻璃与其中的石榴石化学成分很相近，特别是SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量几乎完全相同，只是FeO和CaO总是倾向于在玻璃中富集，而MgO则相反。据显微镜下观察，这些玻璃中常常残留有未完全熔融的石榴石，因此显然是石榴石直接熔融的产物。有趣的是尖晶石二辉橄榄岩中的玻璃也与石榴石的化学成分很相似，不同的是其中含有较高的MgO和较低的FeO和CaO；另外，与石榴石辉石岩中的微晶-玻璃相比，K<sub>2</sub>O和Na<sub>2</sub>O也较高，特别是K<sub>2</sub>O的含量高出近六倍，Na<sub>2</sub>O约高一倍多。由于玻璃中只有单斜辉石和尖晶石的残余，因此这些玻璃不是石榴石熔融的结果，而是矿物颗粒之间边界反应熔融的产物。

粉末X射线物相分析（表2）表明，两种包体中的微晶-玻璃都由斜方辉石、镁铝尖晶石和斜长石组成，各衍射线的强度测量表明其摩尔数之比近于2:1:1（利用斜方辉石的121、尖晶石的511，斜长石的130指标衍射线及人工配制标准样品测量和计算），而且还发现样品的衍射线强度只有标准样（相同比例）的90%，说明样品中存在非晶态物质。测定结果同样没有发现任何含水矿物。尖晶石二辉橄榄岩中玻璃的分析数据中，出现三条不能确定的线，可能是样品不纯造成的，因为石榴石辉石岩中玻璃的分析数据中无这些线。另外，玻璃中出现斜长石是出乎意料的（相对低压矿物），最初疑是玄武岩细脉充填于各矿物和玻璃裂隙中的结果，但通过仔细测定岩石中的尖晶石和石榴石后，并无出现斜长石的衍射线，因此可以排除斜长石是外来物的可能性。

表 1 汉诺坝玄武岩包体中玻璃的化学成分\*

Table 1 Compositions of glasses in xenoliths of Hannouba basalt

| 氧 化 物<br>Oxides                | 尖晶石二辉橄榄岩中的玻璃<br>Glass in spinel lherzolite | 石榴石辉石岩中的玻璃<br>Glass in garnet pyroxenolite | 石榴石辉石岩中的石榴石<br>Garnet in garnet pyroxenolite |
|--------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 41.21                                      | 40.16                                      | 41.09                                        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.87                                      | 22.69                                      | 22.62                                        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.58                                       | 0.97                                       | 0.22                                         |
| FeO                            | 8.12                                       | 12.93                                      | 9.43                                         |
| MgO                            | 22.41                                      | 16.51                                      | 20.72                                        |
| CaO                            | 2.17                                       | 5.18                                       | 3.92                                         |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.70                                       | 0.30                                       | —                                            |
| K <sub>2</sub> O               | 0.38                                       | 0.06                                       | —                                            |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.13                                       | 0.09                                       | 0.15                                         |
| MnO                            | 0.21                                       | 0.34                                       | 0.37                                         |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.68                                       | 0.00                                       | 0.12                                         |
| NiO                            | —                                          | 0.13                                       | 0.06                                         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | —                                          | 0.04                                       | 0.05                                         |
| Li <sub>2</sub> O              | —                                          | <0.001                                     | <0.001                                       |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | —                                          | 0.004                                      | 0.005                                        |
| 烧失 lost                        | 0.002                                      | 1.16                                       | 1.23                                         |
| Σ                              | 101.46                                     | 101.20                                     | 100.48                                       |

\* 本文各表所附分析样品,均来自张家口汉诺坝地区。由河北地质学院岩矿分析室余耀基、邓幼平、张孝英分析(其中Na<sub>2</sub>O和K<sub>2</sub>O是后来补做的)。

## 讨 论

目前普遍认为,地幔中岩浆的产生主要是地幔岩石部分熔融的结果,而且还认为熔融程度和组成主要取决于温度和压力。汉诺坝玄武岩两种类型包体中的玻璃都具有和石榴石几乎完全相同的化学组成,似乎表明理论与实际并不完全吻合。按照Yoder的意见<sup>[4]</sup>,地幔中最有可能的岩石类型是石榴石橄榄岩。因此根据Davis和Schairer (1965)<sup>[5]</sup>在40×10<sup>5</sup>kPa下的镁橄榄石-透辉石-镁铝榴石系统相图(图1),地幔岩石中首先熔出的不变点(共熔点)组成应为Di<sub>47</sub>En<sub>3</sub>For<sub>3</sub>Py<sub>47</sub>(重量%),这显然与实际观察到的情况很不相符。尖晶石二辉橄榄岩和石榴石辉石岩中玻璃与石榴石的化学组成极相近的事实还表明,尽管部分地幔岩石中不存在石榴石,但它却应当是体系中可能出现的相。因此,该系统中的不变点应当在镁铝榴石附近。

有许多因素可以影响多元系统液相线或不变点的位置(久城,1975),但压力可能是主要原因,这是因为地幔中局部区域的物质组成基本恒定。虽然在水或其它挥发性流体的存在下可以大大改变液相线和不变点的位置,然而在所研究的样品中尚未发现任何含水矿物。根据30×10<sup>5</sup>kPa和40×10<sup>5</sup>kPa下的透辉石-镁铝榴石系液相线的比较后(Yoder, 1976, 图8—10)<sup>[4]</sup>可以看出:压力增大将引起不变点向透辉石方向移动,降低压力则向镁铝榴石方向移动(图2)。说明熔融物的组成与压力有很大关系,可惜该图只给出了30和40×10<sup>5</sup>kPa压力下透辉石-镁铝榴石的不变点位置,为了得到较低压力下不变点的位置,可利用赫姆霍兹方程的积分式:

$$\begin{cases} x_A = e^{-\Delta H_{mA}(T_A - T_E)/R \cdot T_A \cdot T_E} \\ 1 - x_A = e^{-\Delta H_{mB}(T_B - T_E)/R \cdot T_B \cdot T_E} \end{cases} \quad (1)$$

表 2 玄武岩包体中玻璃的X射线分析结果  
Table 2 X-ray powder diffraction data for glasses in xenoliths of the basalt

| 尖晶石-辉橄<br>岩中玻璃的实测值                 |                                | 石榴石辉石岩中<br>玻璃的实测值                  |                                   | 尖晶石***<br>(MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) Spinel |                                    |                                   | 斜方辉石** (古铜辉石)<br>Orthopyroxene<br>(Bronzite) |                                    |                                   | 斜长石(An)***<br>Plagioclase |                                    |                                   |
|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Glass in spinel<br>herzolite       |                                | Glass in garnet<br>pyroxenolite    |                                   |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   |                           |                                    |                                   |
| <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub> | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup> m) | <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub> | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup><br>m) | <i>hkl</i>                                           | <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub> | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup><br>m) | <i>hkl</i>                                   | <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub> | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup><br>m) | <i>hkl</i>                | <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub> | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup><br>m) |
| 35                                 | 4.689                          | 36                                 | 4.699                             | 111                                                  | 35                                 | 4.66                              |                                              |                                    |                                   | 022                       | 17                                 | 4.691                             |
| 33                                 | 4.568                          | 33                                 | 4.571                             |                                                      |                                    |                                   | 020                                          | 30                                 | 4.43                              |                           |                                    |                                   |
| 44                                 | 4.036                          | 44                                 | 4.041                             |                                                      |                                    |                                   | 211                                          | 30                                 | 4.02                              | 202                       | 58                                 | 4.041                             |
| 15                                 | 4.121                          |                                    |                                   |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   |                           |                                    |                                   |
| 32                                 | 3.903                          | 33                                 | 3.914                             |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   | 112                       | 13                                 | 3.918                             |
| 37                                 | 3.764                          | 37                                 | 3.772                             |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   | 130                       | 30                                 | 3.780                             |
| 39                                 | 3.624                          | 39                                 | 3.620                             |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   | 130                       | 38                                 | 3.622                             |
| 30                                 | 3.506                          | 31                                 | 3.520                             |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   | 114                       | 15                                 | 3.462                             |
| 35                                 | 3.365                          | 35                                 | 3.370                             |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   | 114                       | 31                                 | 3.363                             |
| 36                                 | 3.306                          | 38                                 | 3.314                             |                                                      |                                    |                                   | 121                                          | 50                                 | 3.314                             |                           |                                    |                                   |
| 40                                 | 3.255                          | 41                                 | 3.261                             |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   | 220                       | 64                                 | 3.261                             |
|                                    |                                |                                    |                                   |                                                      |                                    |                                   | 411                                          | 30                                 | 3.198                             | 204                       | 100                                | 3.196                             |
| 100                                | 3.170*                         | 100                                | 3.178*                            |                                                      |                                    |                                   | 420                                          | 90                                 | 3.170                             | 004                       | 92                                 | 3.182                             |
|                                    |                                |                                    |                                   |                                                      |                                    |                                   | 221                                          | 90                                 | 3.159                             | 220                       | 48                                 | 3.125                             |
| 34                                 | 3.027                          | 34                                 | 3.039                             |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   | 132                       | 23                                 | 3.042                             |
| 56                                 | 2.940                          | 55                                 | 2.947                             |                                                      |                                    |                                   | 321                                          | 60                                 | 2.950                             | 042                       | 33                                 | 2.952                             |
|                                    |                                |                                    |                                   |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   | 024                       | 21                                 | 2.936                             |
| 85                                 | 2.871                          | 85                                 | 2.877                             | 220                                                  | 40                                 | 2.858                             | 610                                          | 70                                 | 2.881                             |                           |                                    |                                   |
| 48                                 | 2.825                          | 48                                 | 2.830                             |                                                      |                                    |                                   | 511                                          | 50                                 | 2.832                             | 132                       | 26                                 | 2.830                             |
| 35                                 | 2.776                          |                                    |                                   |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   |                           |                                    |                                   |
| 40                                 | 2.704                          | 41                                 | 2.713                             |                                                      |                                    |                                   | 421                                          | 50                                 | 2.710                             |                           |                                    |                                   |
| 30                                 | 2.651                          | 33                                 | 2.654                             |                                                      |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   | 134                       | 17                                 | 2.655                             |
| 50                                 | 2.530                          | 47                                 | 2.540                             |                                                      |                                    |                                   | 131                                          | 60                                 | 2.540                             | 242                       | 21                                 | 2.524                             |
| 50                                 | 2.500                          | 54                                 | 2.504                             |                                                      |                                    |                                   | 202                                          | 100                                | 2.501                             | 242                       | 37                                 | 2.503                             |
| 50                                 | 2.470                          | 50                                 | 2.471                             |                                                      |                                    |                                   | 521 430                                      | 30                                 | 2.481                             |                           |                                    |                                   |
| 75                                 | 2.443                          | 74                                 | 2.447                             | 311                                                  | 100                                | 2.437                             |                                              |                                    |                                   |                           |                                    |                                   |
| 35                                 | 2.390                          | 34                                 | 2.396                             |                                                      |                                    |                                   | 302                                          | 30                                 | 2.389                             |                           |                                    |                                   |
| 30                                 | 2.355                          | 31                                 | 2.361                             |                                                      |                                    |                                   | 331                                          | 20                                 | 2.362                             |                           |                                    |                                   |
| 32                                 | 2.253*                         | 32                                 | 2.259*                            |                                                      |                                    |                                   | 402 121                                      | 30                                 | 2.259                             |                           |                                    |                                   |
|                                    |                                |                                    |                                   |                                                      |                                    |                                   | 022 720                                      | 30                                 | 2.238                             |                           |                                    |                                   |

\* 宽线; \*\* JCPDS卡片; \*\*\* 据叶大年, 由河北地质学院地质系; 郑海飞、王合印分析。

续表 2

| 尖晶石二辉橄榄岩<br>中玻璃的实测值<br>Glass in spinel<br>herzolite |                                   | 石榴石辉石岩<br>中玻璃的实测值<br>Glass in garnet<br>Pyroxenolite |                                   | 尖晶石***<br>(MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )Spinel |                                    |                                   | 斜方辉石** (古铜辉石)<br>Orthopyroxene<br>(Bronzite) |                                    |                                   | 斜长石(An)***<br>Plagioclase |                                    |                                   |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub>                  | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup><br>m) | <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub>                   | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup><br>m) | <i>hkl</i>                                          | <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub> | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup><br>m) | <i>hkl</i>                                   | <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub> | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup><br>m) | <i>hkl</i>                | <i>I</i> / <i>I</i> <sub>100</sub> | <i>d</i> (10 <sup>-10</sup><br>m) |
| 40                                                  | 2.116                             | 40                                                   | 2.118                             | 400                                                 | 65                                 | 2.020                             | 502 630                                      | 60                                 | 2.116                             | 242                       | 19                                 | 2.143                             |
| 39                                                  | 2.093                             | 39                                                   | 2.097                             |                                                     |                                    |                                   | 322 531                                      | 50                                 | 2.099                             | 152                       | 14                                 | 2.096                             |
| 35                                                  | 2.057                             | 35                                                   | 2.061                             |                                                     |                                    |                                   | 721 512                                      | 50                                 | 2.060                             |                           |                                    |                                   |
| 45                                                  | 2.025                             | 43                                                   | 2.028                             |                                                     |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   |                           |                                    |                                   |
| 35                                                  | 1.983                             | 35                                                   | 1.987                             |                                                     |                                    |                                   | 241 440                                      | 40                                 | 1.982                             |                           |                                    |                                   |
| 40                                                  | 1.956                             | 39                                                   | 1.961                             |                                                     |                                    |                                   | 631                                          | 50                                 | 1.957                             |                           |                                    |                                   |
| 15                                                  | 1.925                             | 15                                                   | 1.928                             |                                                     |                                    |                                   | 341 612                                      | 10                                 | 1.927                             | 424                       | 11                                 | 1.932                             |
| 32                                                  | 1.881                             | 32                                                   | 1.890                             |                                                     |                                    |                                   | 821                                          | 30                                 | 1.890                             | 224                       | 9                                  | 1.880                             |
| 34                                                  | 1.837                             | 34                                                   | 1.840                             |                                                     |                                    |                                   | 702                                          | 30                                 | 1.837                             | 400                       | 18                                 | 1.838                             |
| 15                                                  | 1.800                             |                                                      |                                   |                                                     |                                    |                                   | 622 830                                      | 30                                 | 1.800                             | 116                       | 10                                 | 1.798                             |
| 32                                                  | 1.784                             | 32                                                   | 1.788                             | 422                                                 | 10                                 | 1.650                             | 640 1010                                     | 30                                 | 1.787                             |                           |                                    |                                   |
| 15                                                  | 1.768                             |                                                      |                                   |                                                     |                                    |                                   | 541                                          | 30                                 | 1.773                             | 208                       | 25                                 | 1.769                             |
| 10                                                  | 1.754                             |                                                      |                                   |                                                     |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   |                           |                                    |                                   |
| 32                                                  | 1.730                             | 32                                                   | 1.735                             |                                                     |                                    |                                   | 921 250                                      | 30                                 | 1.735                             |                           |                                    |                                   |
| 30                                                  | 1.698                             | 32                                                   | 1.701                             |                                                     |                                    |                                   | 831                                          | 40                                 | 1.700                             |                           |                                    |                                   |
| 32                                                  | 1.674                             | 31                                                   | 1.682                             |                                                     |                                    |                                   | 042 812                                      | 30                                 | 1.682                             |                           |                                    |                                   |
| 30                                                  | 1.654                             | 33                                                   | 1.656                             |                                                     |                                    |                                   | 212                                          | 20                                 | 1.654                             |                           |                                    |                                   |
| 30                                                  | 1.610*                            | 33                                                   | 1.612*                            |                                                     |                                    |                                   | 351 023                                      | 50                                 | 1.616                             |                           |                                    |                                   |
|                                                     |                                   |                                                      |                                   |                                                     |                                    |                                   | 123                                          | 50                                 | 1.609                             |                           |                                    |                                   |
| 40                                                  | 1.586                             | 41                                                   | 1.589                             |                                                     |                                    |                                   | 931 840                                      | 30                                 | 1.589                             |                           |                                    |                                   |
| 30                                                  | 1.559                             | 32                                                   | 1.562                             | 511                                                 | 45                                 | 1.555                             |                                              |                                    |                                   |                           |                                    |                                   |
| 40                                                  | 1.519                             | 41                                                   | 1.521                             |                                                     |                                    |                                   | 650 551                                      | 30                                 | 1.527                             |                           |                                    |                                   |
|                                                     |                                   |                                                      |                                   |                                                     |                                    |                                   | 1200 841<br>603                              | 30                                 | 1.520                             |                           |                                    |                                   |
| 40                                                  | 1.485                             | 41                                                   | 1.488                             |                                                     |                                    |                                   | 1121 1031                                    | 80                                 | 1.486                             |                           |                                    |                                   |
| 35                                                  | 1.470                             | 36                                                   | 1.474                             |                                                     |                                    |                                   | 060 642                                      | 60                                 | 1.472                             |                           |                                    |                                   |
| 20                                                  | 1.454                             |                                                      |                                   |                                                     |                                    |                                   |                                              | 20                                 | 1.452                             |                           |                                    |                                   |
| 45                                                  | 1.432                             | 45                                                   | 1.435                             |                                                     |                                    |                                   |                                              |                                    |                                   |                           |                                    |                                   |

由河北地质学院地质系郑海飞、王合印分析。

来估算，式中 $T_A$ 和 $T_B$ 分别是纯A和B在不同压力下的熔点。为了避免计算中引入更多的误差，笔者引用了F. R. Boyd等人的实验数据（表3）； $\Delta H_m$ 是熔融热，由于高压对 $\Delta H_m$ 的影响不可忽视，所以必须用到下式：

$$\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial P}\right)_T = \Delta V_m (1 - \Delta \alpha T)$$

( 2 )

表 3 用于计算的热力学数据  
Table 3 Data for calculations of thermodynamics

| 端员矿物<br>Mineral                       |                             | 镁橄榄石<br>Forsterite | 透辉石<br>Diopside | 镁铝榴石<br>Pyrope |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|----------------|
| $\Delta H^{\circ}_m(\text{KJ/mol})^*$ |                             | 122.59             | 77.4            | 134.7          |
| $\Delta V(\text{cm}^3/\text{mol})^*$  |                             | 0.01               | 0.046           | 0.051          |
| $T^{\circ}_m(^{\circ}\text{C})$       | $10 \times 10^5 \text{kPa}$ | 1 950**            | 1 570**         | 900***         |
|                                       | $20 \times 10^5 \text{kPa}$ | 1 990**            | 1 630**         | 1 300***       |
|                                       | $30 \times 10^5 \text{kPa}$ | 2 040**            | 1 710**         | 1 540***       |
|                                       | $40 \times 10^5 \text{kPa}$ | 2 075**            | 1 790**         | 1 790***       |

\* H. S. Yoder, 1976(第83、86、88页)<sup>(4)</sup>;  
\*\* W. S. Broecker, 1971(表10.1)<sup>(6)</sup>;  
\*\*\* A. E. Ringwood, 1975(图4—3中读取)<sup>(7)</sup>。

其中固相和液相热膨胀系数之差 $\Delta\alpha$ 很小(约 $10^{-4}$ 度),可以忽略不计,积分后可得:

$$\Delta H_m = \Delta H^{\circ}_m + (P-1)\Delta V_m \tag{3}$$

式中 $\Delta H^{\circ}_m$ 为标准熔融热,  $\Delta V_m$ 为晶态物质熔融后的体积变化, 计算所需的全部数据列于表 3 中, 有关热力学关系式可参阅物理化学方面的书籍。计算结果均示于图 1 和图 2 中, 由图 2 可看出,  $40 \times 10^5 \text{kPa}$  时镁铝榴石的液相线与实验值吻合得较好; 而  $30 \times 10^5 \text{kPa}$  时却产生了较大的误差, 这主要是因为低于  $30 \times 10^5 \text{kPa}$  的条件下石榴石发生了分解熔融(尖晶石+熔体); 而计算时却仍按简单熔融处理以及温度数值不一致而引起的; 另外, 透辉石的液相线即使在低浓度时也与实验值吻合得很不好; 若低浓度时用浓度代替活度, 以及使用与实验值完全一致的温度值进行计算应当不会引起太大的误差, 因此误差是由  $\Delta H_m$  引入的。由实验和计算的液相线斜率的比较后可以看出, 所引用的  $\Delta H_m$  或  $\Delta V_m$  值偏低。尽管如此, 由这些图至少可以获得一些有启发意义的资料, 即较低压力时的不变点都偏向于端员矿物镁铝榴石; 而且随压力的减小, 镁铝榴石的首晶区愈来愈小, 这与镁铝榴石在高压下稳定而低压下不稳定的事实是一致的。另外, 利用该图还可以粗略地估计

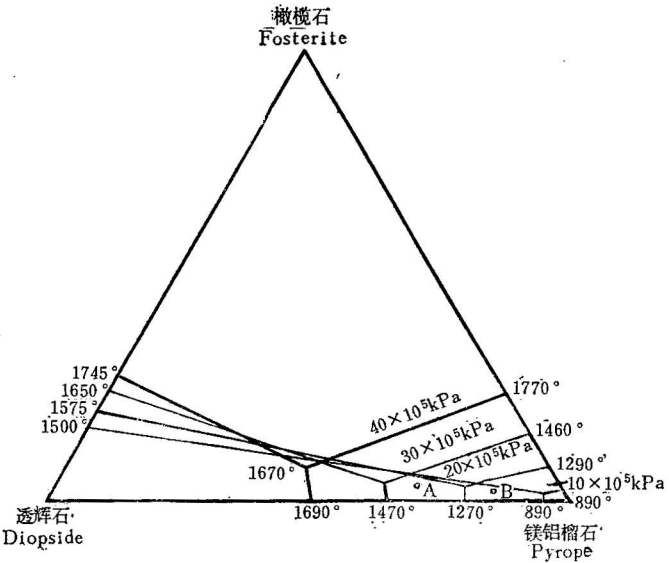


图 1 10—40×10<sup>5</sup>kPa 下橄榄石-透辉石-镁铝榴石三元共结系相图

Fig. 1 Ternary system phase diagram of forsterite-diopside-pyrope at 10—40 × 10<sup>5</sup> kPa  
40 × 10<sup>5</sup> kPa 的三条共结线和 30 × 10<sup>5</sup> kPa 的透辉石—镁铝榴石共结线(粗实线)为实验结果(据文献<sup>(4)</sup>), 其余均为计算结果(细实线); A 和 B 点分别是石榴石辉石岩和尖晶石二辉橄榄岩中玻璃在图中的投影(Three eutectic lines at the pressure of 40 × 10<sup>5</sup> kPa and one eutectic line of diopside-pyrope at 30 × 10<sup>5</sup> kPa represent experimental results (thick solid line)<sup>(4)</sup>, the other lines represent the results calculated; the circles of A and B show the projection of the glass proposition in garnet pyroxenolite and spinel lherzolite respectively)

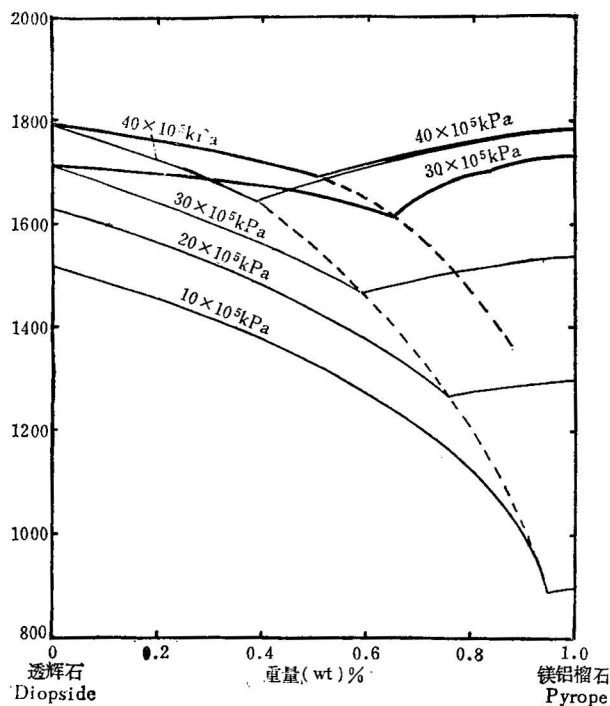


图 2 10—40×10<sup>5</sup>kPa下透辉石-镁铝榴石二元系相图

Fig. 2 Binary system phase diagram of diopside-pyroxene at 10—40×10<sup>5</sup>kPa

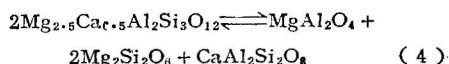
粗实线是30×10<sup>5</sup>kPa和40×10<sup>5</sup>kPa下的实验结果(据文献<sup>(4)</sup>),其中30×10<sup>5</sup>kPa的镁铝榴石液相线出现不连续是因为石榴石发生了分解熔融;细实线是计算的液相线;虚线是不变点的连线;其中实验的不变点连线向低压部分是外推的

(Thick solid lines represent the experimental results at 30×10<sup>5</sup>kPa and 40×10<sup>5</sup>kPa (according to reference<sup>(4)</sup>); fine solid lines represent the liquid phase lines calculated; the dash lines connect the invariant points, with the segment of experimental invariant point towards the lower pressure extrapolated)

断裂引起压力释放。看来后者是比较好的解释,因为玻璃中微小的晶体显然可以证明包体的上升速度是相当快的,不可能有足够的时间发生熔融。另外,根据橄榄拉斑玄武岩和碱性橄榄玄武岩的结晶实验结果(Green和Ringwood, 1967, 图4-2)<sup>(7)</sup>,尖晶石只有在10—25×10<sup>5</sup>KPa的压力范围内才有可能晶出。由此可以证明两种包体的微晶-玻璃至少在高于10×10<sup>5</sup>KPa的压力下就开

出微晶-玻璃熔融时的温压条件,方法是 将CaO全部计入透辉石,而Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>全部计入 镁铝榴石。由于天然矿物化学成分的复杂性, 要准确算出端员矿物含量是有困难的,因此 这种方法的精度并不高。计算结果投影于图 1和图2中后可得出,尖晶石二辉橄榄岩中玻 璃的熔融温度和压力分别为1500℃和13× 10<sup>5</sup>kPa;石榴石辉石岩中的玻璃为1570℃和 23×10<sup>5</sup>kPa(表4)。

利用Mercier设计的单辉石地质温度-压力计<sup>(8)</sup>计算了两种岩石中与尖晶石或与石榴 石共存的单斜辉石或斜方辉石的形成温度和 压力,继而与玻璃的形成条件相比较(表4), 结果发现尖晶石二辉橄榄岩和石榴石辉石岩 的形成压力都高于玻璃熔融时的压力。另 外,石榴石的熔融反应可用下式近似表示:



石榴石=尖晶石+斜方辉石+斜长石

V/mol; 113.29 39.72 62.80 100.73

据计算,反应物的总体积( $\Sigma V=226.58$ ) 比反应产物的总体积( $\Sigma V=266.05$ )小得 多(上述摩尔体积和总体积数据均引自地球 化学手册<sup>(9)</sup>)。因此,包体中部分熔融是压 力释放的结果。然而目前还没有获得足够的 证据说明是什么原因引起压力释放的。有两 种解释值得考虑,一是伴随着包体上升过程 中压力的降低;二是上覆岩石的缓慢隆起或

表 4 尖晶石二辉橄榄岩和石榴石辉石岩的温压计算结果

Table 4 Temperature and pressure calculated for spinel lherzolite and garnet pyroxenolite

| 样 品 Sample                         | 尖晶石二辉橄榄岩 Spinel lherzolite     | 石榴石辉石岩 Garnet pyroxenolite     |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 形成温度,℃ Temperature                 | 1 267.3                        | 1 357.6                        |
| 形成压力(10 <sup>5</sup> kPa) Pressure | 20.71                          | 33.5                           |
| 玻璃熔融条件 Melted condition of glasses | 1 500℃, 13×10 <sup>5</sup> kPa | 1 570℃, 23×10 <sup>5</sup> kPa |



始固结了, 所以也不可能是上升途中或喷出地表后发生熔融的。

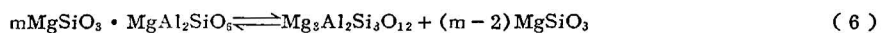
毫无疑问, 玻璃中的尖晶石、斜方辉石和斜长石微晶集合体是包体上升途中结晶的, 如果能够了解该系统在结晶分异等过程中的演化趋势, 便可提供有关玄武岩浆起源方面的可靠资料。遗憾的是目前尚无尖晶石-斜方辉石-斜长石系统在高压下的实验资料, 所以还不能详细地描述这种演化的全过程。不过, 根据微晶-玻璃中含有较自形的后生尖晶石(浅紫红色)和橄榄拉斑玄武岩结晶实验的相图(Ringwood, 1967, 图4-2)<sup>[7]</sup>, 以及还没有发现天然玄武岩中的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量大于20%, 可以认为尖晶石一定是体系中的首晶相( $>10 \times 10^5 \text{KPa}$ 条件下), 因此分异过程很可能是在较高压力下或者是石榴石开始熔融时就发生了。由此可以得出, 在 $10-25 \times 10^5 \text{KPa}$ (尖晶石稳定区<sup>[7]</sup>)压力范围内, 该系统的等压不变点应很靠近斜方辉石和斜长石一侧, 而这时的不变点组成将与拉斑玄武岩很接近。某些大洋拉斑玄武岩具有与石榴石很相似的稀土元素配分型式(图3), 也有力地支持着这一论点, 虽然该系统后来有尖晶石的晶出和分离, 但由于其所含的稀土元素极少而对稀土元素的分异几乎不产生什么影响, 因此石榴石的直接熔融可能是拉斑玄武岩的初始熔体。另外, 如果玄武岩中含有较高的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 则很可能是分异作用不完全的产物, 或者是减压至低于 $10 \times 10^5 \text{KPa}$ 条件下熔融而无富铝相晶出和分离的结果。

必须指出: 初始熔体必须在地幔局部温度高于正常温度梯度的情况下通过压力释放而产生, 这是因为按正常温度梯度推算,  $100 \text{km}$ (约 $30 \times 10^5 \text{KPa}$ )深度下的温度仅为 $1200^\circ\text{C}$ , 而当局部压力释放至 $13 \times 10^5 \text{KPa}$ 时, 其不变点的温度约为 $1500^\circ\text{C}$ (图1)。另一个值得注意的问题是, 压力的释放过程是复杂多样的, 因此体系可能会经历许多不同的状态。假设某体系经历了从高压向较低压的转变过程, 则早期将熔出较多的透辉石组分, 而晚期则熔出较多的石榴石组分。熔融的玻璃能够保持石榴石假象可能与早期熔融的物质充填在矿物颗粒之间有关(图版-6)。

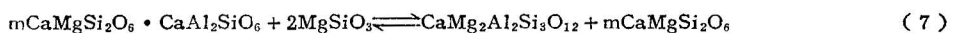
当局部温度升高和压力释放而导致地幔岩石部分熔融时, 石榴石辉石岩中的石榴石将直接熔融; 而在尖晶石二辉橄榄岩中则必须通过矿物颗粒边界反应才能产生熔体。各矿物之间可能的反应关系如下所示:



斜方辉石    尖晶石    橄榄石    熔体



含铝顽辉石    熔体    顽辉石



含铝透辉石    顽辉石    熔体    透辉石

反应的固相产物将不断地使原岩中的相应矿物生长加大, 从而使熔融反应能够继续下去。当初始熔体沿着不同矿物颗粒间形成后, 如果平衡时间足够长, 则可以使岩石熔融程度大大增加, 并一直延续到熔融平衡时为止。大多数包体没有达到真正的熔融平衡就被带至地表了(即通常能够观

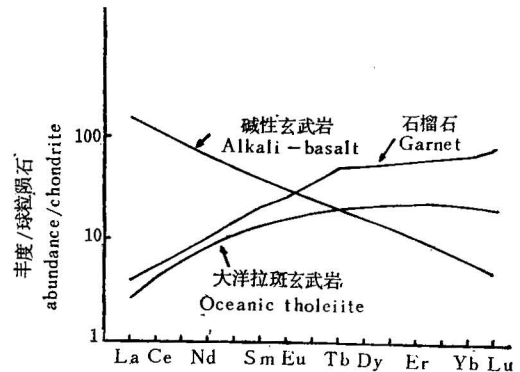


图3 石榴石和典型玄武岩的稀土配分型式

Fig 3. REE patterns of garnet and typical basalt

石榴石的资料取自 C. Pride 和 G. K. Muecke<sup>[10]</sup>; 玄武岩的资料引自 Claude—Jean Allégre 和 Gil Michard<sup>[11]</sup> (The data of garnet is quoted from C. Pride and G. K. Muecke<sup>[10]</sup>; the data of basalts are quoted from Claude—Jean Allégre and Gil Michard<sup>[11]</sup>)



察到的那些样品),这也许是深源包体中不一定都存在微晶-玻璃的主要原因。

根据高压时体系的不变点移向单斜辉石(图1、2),说明高压下所产生的熔体应含有较高的单斜辉石组分,由于单斜辉石是地幔中含碱质最高的矿物(包括碱性辉石),因此熔出的岩浆也应含有较高的碱质,这与目前关于碱性玄武岩浆的成因观点是一致的。然而实际观察到的情况并非完全如此,在尖晶石二辉橄榄岩中玻璃的碱质( $13 \times 10^5 \text{KPa}$ )却比石榴石辉石岩中的玻璃( $23 \times 10^5 \text{KPa}$ )高(表1)。看来岩浆中碱质的多少不仅与温度和压力有关,而且还与原始矿物组成有关,即在相同条件下,熔体的碱质还取决于熔融物或反应物中碱质的含量(如石榴石,单斜辉石)。但是对于都是矿物颗粒边界反应熔融的过程,其碱质的含量仍然取决于压力和温度,而石榴石的直接熔融过程的碱质含量只取决于石榴石本身的化学成分。这意味着即使在上地幔同一深度下,压力降低较多时(如 $< 20 \times 10^5 \text{KPa}$ )只能熔出低碱质的玄武岩浆,而压力降得较少时(如 $> 30 \times 10^5 \text{KPa}$ )则可熔出含碱质较高的碱性玄武岩浆。不过通常情况下减压有一定的局限范围,因此深度仍然是决定压力的主要因素。

## 结 论

由汉诺坝玄武岩包体中玻璃的研究可以得出以下几点结论:

1. 汉诺坝玄武岩包体中的微晶-玻璃,是地幔岩石中石榴石的直接熔融或地幔矿物颗粒间边界反应熔融出相当于石榴石成分的熔体后,由于包体上升途中在压力高于 $10 \times 10^5 \text{KPa}$ 条件下固结的产物。

2. 局部温度升高和压力释放是引起地幔岩石部分熔融的主要原因。尖晶石二辉橄榄岩是在温度达 $1500^\circ\text{C}$ 的约60km处,当压力降至 $13 \times 10^5 \text{KPa}$ 时熔出相当于石榴石组成的熔体;石榴石辉石岩中的石榴石是在高于 $1570^\circ\text{C}$ 的100km深处,当压力降至约 $23 \times 10^5 \text{KPa}$ 时熔融的。

3. 地幔岩石在减至较低压力下产生的熔体组成与石榴石很接近;在较高压力下,熔体中将含有较高的单斜辉石组分,而单斜辉石是地幔岩石中碱质的主要赋存矿物,因此与高压下产生碱性玄武岩浆的意见是一致的。

4. 拉斑玄武岩是在 $10-25 \times 10^5 \text{KPa}$ 压力范围内,石榴石的熔融或相当于石榴石组成的熔体经过结晶分异作用的产物;如果这种熔体分异不够完全或在低于 $10 \times 10^5 \text{KPa}$ 压力下发生熔融,便可形成高铝玄武岩浆。

我系邵克忠副教授审阅了全文,岩矿分析室余耀基老师给予很大帮助,笔者在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] Sven Maaløe, Ivan Pvinzlaui, 1981, 尖晶石二辉橄榄岩的天然局部熔融。国外地质, No. 11, p. 20.
- [2] Hunter, R. H. and Taylor, L. A., 1982, Instability of garnet from the mantle; glass as evidence of metasomatic melting. Geology, V. 10, No. 12, pp. 617-620.
- [3] 冯家麟、谢曼泽、张红、李文宣, 1982, 汉诺坝玄武岩及其深源包体。河北地质学院学报, 1, 2期, 第43-63页。
- [4] H. S. Yoder, TR, 1976, 玄武岩浆成因。地质出版社。
- [5] Davis, B. T. C. and Schairer, J. F., 1965, Melting relations in the join diopside-forsterite-pyroxene at 40 Kilobars and at one atmosphere. Carnegie Inst., Washington Yearb, 64, 123-126.
- [6] Broecker, W. S., 1971, 地球的化学平衡。地质出版社。
- [7] Ringwood, A. E., 1975, 地幔的成分与岩石学。地震出版社。
- [8] Mercier, J.-C. C., 1976, Single-pyroxene geothermometry and geobarometry. Amer. Miner., Vol. 61, No. 7-8.
- [9] 中国科学院贵阳地球化学研究所编译, 1977, 简明地球化学手册。第288-326页, 科学出版社。
- [10] Pride, C. and Muecke, G. K., 1981, Rare earth element distributions among coexisting granulite facies minerals,

Scourian Complex, NW Scotland. Contrib. Miner. Petrol., Vol. 76, No. 4, pp. 463—471.

[11] Claude-Jean Allégre and Gil Michard, 1980, 地球化学导论, 第84页, 地质出版社。

### 图 版 说 明 (Explanations of plate)

- 1: 黑晶石二辉橄榄岩包体中橄榄石和辉石 (白色) 粒间的填隙状黑晶石 (灰色) 和微晶-玻璃 (Interstitial magnalumoxide (gray) and microlith-glass between olivine and pyroxene (white) in spinel lherzolite xenolith). (—) 40 ×
- 2: 黑晶石辉石岩包体中的微晶-玻璃 (黑色) 和不规则粒状的黑晶石 (灰色), 其中具有玄武质细脉, 且进入玻璃后逐渐尖灭。(Microlith-glass (black) and irregular granular magnalumoxide (gray) in magnalumoxide pyroxenolite xenolith, in which there are some basaltic veinlets and they are tapered off after entering glass). (—) 40 ×
- 3: 黑晶石含橄辉石岩包体中的辉石具有条带状微晶-玻璃 (黑色) (Pyroxene possessing with banded microlith-glass (black) in magnalumoxide olivinebearing pyroxenolite xenolith) (—) 40 ×
- 4: 黑晶石二辉橄榄岩包体中的羽毛状、扇状微晶-玻璃 (浅色部分), 黑色部分为黑晶石 (Plumose and fan shaped microlith-glasses (light colour part) in magnalumoxide lherzolite xenolith; black part is magnalumoxide). (+) 100 ×
- 5: 蠕虫状、指纹状, 羽毛状和扇状的微晶-玻璃 (Myrmekitic, rhyolaxitic, plumose and fan shaped microlith-glasses). (+) 100 ×
- 6: 石榴石辉石岩中仍保留着石榴石假象的微晶-玻璃 (呈扇状和束状); 石榴石边界呈 120 度交角 (Microlith-glass in garnet pyroxenolite still retains garnet pseudomorph (fan and radiating); garnet borders are all 120 degree). (+) 40 ×

## GLASS MICROLITES IN THE INCLUSIONS OF THE HANNOUBA BASALT AND THEIR SIGNIFICANCE

Zheng Haifei and Feng Jialing

(Hebei College of Geology, Xuanhui)

### Abstract

Experiments show that the inclusions in spinel lherzolites and garnet pyroxenites occurring in basanites contain glass microlites formed from partial melting. X-ray analysis proves that the glass microlites are in fact microlite aggregates composed of pyroxene, spinel and plagioclase and the result of crystallization of the inclusions at over  $10 \times 10^5 \text{ kPa}$  on the way of their ascent. Due to the shift of the invariant point of the Ol-Di-Gt system to garnet caused by the pressure release in the mantle environment, the chemical composition of the glass microlites are similar to that of garnet. At the P-T conditions that can cause melting, garnet can melt directly, while the formation of the same melts in spinel lherzolites invokes reaction at the boundaries of minerals. The melts can evolve into tholeiite through crystallization differentiation. At higher pressures, the invariant point of the system lies between clinopyroxene and garnet; thus primary alkaline basalt magmas may form directly.



