

# 蒙阴金伯利岩的形成温度与压力

胡思颐

(山东省地质矿产局第七地质队)

含金刚石金伯利岩是目前已知的来源最深的岩浆岩,故金伯利岩被称为窥测地幔的窗口。研究金伯利岩的形成温度与压力,不单对研究金伯利岩和金刚石的形成条件、进而指导找矿有重要意义,而且对了解上地幔的结构、物理条件和在高温高压下形成矿物的特征也有极大意义。本文通过对蒙阴金伯利岩所含标型矿物中的包裹体测温、利用公式计算温度压力、对实验数据的分析对比、以及利用深源包体等推导出蒙阴金伯利岩的形成温度约为1300~2000℃,压力约为45~99千巴(1千巴=100MPa),这相当于地下150km~300km的深度。下面从三方面加以论述。

## 一、从金伯利岩中的标型矿物推导其形成温度与压力

### 1. 镁铝榴石

(1) 包裹体测温 用淬火法对蒙阴金伯利岩镁铝榴石中的熔体包裹体进行测温,得镁铝榴石中包裹体的均一温度在800~950℃之间(表1)。

表1 蒙阴金伯利岩镁铝榴石中熔体包裹体测温数据\*

| 岩体号  | 主矿物  | 颗数 | 颜色    | 初熔温度     | 均一温度     |
|------|------|----|-------|----------|----------|
| 胜利1号 | 镁铝榴石 | 5  | 紫红→橙黄 | 500—600℃ | 800—950℃ |
| 红旗1号 | 镁铝榴石 | 6  | 紫青→橙黄 | 500~700℃ | 800—950℃ |
| 红旗6号 | 镁铝榴石 | 3  | 玫瑰→粉红 | 600℃     | 800—900℃ |

只有当镁铝榴石结晶时或结晶之后熔体包裹体才能被捕获于镁铝榴石中,故镁铝榴石的结晶温度应高于包裹体的均一温度,也即高于800℃~950℃。

(2) 对实验数据的分析对比 B.C.索波列夫(1979)在其文章中指出:“在镁铝榴石—钙铝榴石—钙铬榴石系统中,当P=30千巴和T=1200℃时镁铝榴石—镁铬榴石混溶(镁铬榴石7—8%);当P=50千巴、T=1200℃时镁铬榴石可达25%<sup>[1]</sup>。在蒙阴金伯利岩中有相当多的镁铝榴石,其镁铝榴石组元的摩尔分数超过7—

\*此数据是钟风竹、毛志海在南京大学李兆麟教授指导下测得。

8%，按此数据推断，蒙阴金伯利岩形成的温度大于1200℃，压力大于30千巴（相当于近100km深）。红旗27号岩脉中镁铬榴石含量最高可达17.12%，而红旗28号岩管中有一颗被金刚石包裹的镁铝榴石，其镁铬榴石的摩尔分数高达38.69%。如按此数据推论，蒙阴金伯利岩的形成温度大于1200℃，形成压力大于50千巴而小于75千巴（150~230km深）。虽然金伯利岩中有部分镁铝榴石是深源包体的解体矿物，但还是有在金伯利岩中结晶的镁铝榴石，故把它作为推测金伯利岩形成温度、压力的参考数据之一是可以的。

## 2. 金刚石

在常压和空气中对蒙阴金刚石进行加热，到650~750℃就燃烧了。但该燃烧温度不是金刚石的结晶温度，因为实际上金刚石是在高压和还原环境下形成，故这个燃烧温度应低于金刚石的结晶温度。已有实验证明：“在真空中加热到1800℃时，金刚石晶体完全变黑，而且在晶体上出现裂缝，在2000℃时，它们便碎成小碎片”<sup>[2]</sup>。上述试验与金刚石形成的条件相似，可大致推测金刚石的结晶温度在1800~2000℃。

另外也可参考合成金刚石的温度与压力数据去推断天然金刚石的生成条件(表2)。

表2 在金属—石墨系统中合成金刚石所需最低压力和温度\*

| 系 统             | 压 力<br>(千巴) | 温 度<br>(℃) | 系 统            | 压 力<br>(千巴) | 温 度<br>(℃) |
|-----------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|
| 《因科镍合金》+石墨      | 45          | 1150       | Pt, Co(4:1)+石墨 | 55          | 1500       |
| Mn, Cu(12:1)+石墨 | 48          | 1400       | Fe+石墨          | 57          | 1475       |
| Co+石墨           | 50          | 1450       | Mn+石墨          | 57          | 1500       |
| Mn, Co(12:1)+石墨 | 50          | 1450       | Ta+石墨          | 65          | 1800       |
| Mn, Ni(12:1)+石墨 | 53          | 1475       | Pt+石墨          | 70          | 2000       |
| Ni+石墨           | 55          | 1460       | Cr+石墨          | 70          | 2100       |

\* 此表据Ю·П·奥尔洛夫《金刚石矿物学》

当然，在自然界形成金刚石的情况比人工合成的情况要复杂得多，但有可比之处，特别是金伯利岩中Co、Ni、Fe、Mn、Cr等元素含量相对较高，与人工合成金刚石的条件有相似之点。通过对比，推测金刚石的形成压力约为50~70千巴（相当于150~200km），其温度约为1400~2000℃。

## 3. 铬透辉石

曾对胜利I号岩管中一颗铬透辉石中的熔体包裹体进行测温，其均一温度为950℃，由

于前述同样理由, 实际铬透辉石结晶温度要高于950°C。

另外还用在金伯利岩中选获的铬透辉石的成分, 按单辉石地质温度—压力计公式<sup>(1)</sup>进行了计算, 以推导金伯利岩形成温度与压力。所使用的公式为石榴石相的公式, 这是符合山东金伯利岩的情况的。其公式如下:

$$T(^{\circ}\text{K}) = (t_1 \cdot \ln K_w' + t_2) / D^{(2)}$$

$$P^{(3)} = (P_1 \cdot \ln K_w' - P_c \cdot \ln K_a' + P_2) / D$$

$$D = \ln K_w' \cdot \ln K_a' + d_1 \cdot \ln K_w' + d_c \cdot \ln K_a' + d_2$$

$$K_w' = (1 - 2Wd) / (0.862 + 0.276Wd)$$

$$Wd = \text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$$

$$K_a' = K_g'' \cdot A \cdot (1 - A)$$

$$K_g'' = 3.298 - 1.791\text{Mg} + 0.128(-\ln K_w')$$

$$A = [Al + Cr - 0.82(\text{Na} - \text{Fe}^{3+})] / 2$$

Ca、Mg、Cr等元素符号表示以O<sub>6</sub>为基础的铬透辉石化学式中的原子(或离子)数, 其他常数查表得:  $d_1 = -6.208$ ,  $d_2 = 31.037$ ,  $t_1 = -3168.1^{\circ}\text{K}$ ,  $t_2 = 53745^{\circ}\text{K}$ ,  $P_1 = 176.43\text{kb}$ ,  $P_2 = -264.96\text{kb}$ ,  $d_c = 2.26$ ,  $P_c = 709\text{kb}$ 。

用上述公式计算求得的温度、压力列于表3。从表中可知蒙阴金伯利岩的形成温度要大于1097~1460°C, 其压力在30~100千巴(相当于深度100~300km)。

需要说明的是, 目前我们还不能确定这种铬透辉石是来自深源包体还是在金伯利岩中结晶的, 如果是后一种情况, 利用上述公式得到的计算结果可能会有较大的误差。

## 二、从金伯利岩的深源包体推测其形成压力

蒙阴金伯利岩中目前发现有三类岩石的深源包体, 这三类岩石即纯橄榄岩(包括纯橄榄岩、石榴石纯橄榄岩、碎裂化纯橄榄岩、碎裂化石榴石纯橄榄岩)、橄榄岩(包括尖晶石斜辉橄榄岩、尖晶石二辉橄榄岩、磁铁二辉橄榄岩)和榴辉岩类。其中有大量的镁铝榴石和辉石, 我们可以从这些镁铝榴石和辉石的化学成分去推测深源包体的形成深度; 而这些包体是金伯利岩带上的, 故金伯利岩的形成深度至少与深源包体相同或者要比包体更大。《深源捕虏体与上地幔》一文中提到:“从现有的关于镁铝榴石中铬组分, 深源石榴石内的钠混入物和辉石里钾含量资料可以断定, 金伯利岩岩筒里的捕虏体和捕虏晶形成的最高压力可能达到60~70千巴”<sup>(1)</sup>。而蒙阴金伯利岩中深源捕虏体中的镁铝榴石含镁铬榴石组分可达13.57%, 辉石中都含钾, 这样看来捕虏体的形成压力在60~70千巴, 故金伯利岩形成压力应大于60~70千巴, 相当于200km深。

(1) Mercier于1975、1976年提出的单辉石地质温度—压力计公式。他在确立和运用了尖晶石相和石榴石相中单斜辉石与斜方辉石在组成上的相互依赖性后提出了单辉石地质温度—压力计公式, 即在确定岩石为尖晶石—石榴石—单斜辉石—斜方辉石四种矿物的组合, 以及属于尖晶石相或石榴石相后, 只要有一种辉石(单斜或斜方辉石)的化学成分, 就可以计算出这种超镁铁岩的温度和压力。(2)公式引自邓晋福(1980年)编的岩石物理化学, 213—214页。(3)单位为千巴, 即100兆帕。

### 三、从蒙阴金伯利岩的化学成分推测其形成深度

人们现在认识到地球的层状结构十分明显, 不同层有不同的岩石化学成分, 故也可以根据其岩石化学成分去推测它们的应在层位。蒙阴金伯利岩化学成分与大陆地壳平均

表4 蒙阴金伯利岩、胜利I号管深源包体及地壳、上地幔成分

| 名<br>称<br>含<br>量<br>化<br>物<br>(%) | 尖晶石<br>斜辉<br>橄榄岩 | 纯<br>橄<br>榄<br>岩 | 碎裂化<br>石榴石<br>纯橄岩 | 常马岩<br>带金伯<br>利岩平<br>均含量 | 西峪岩<br>带金伯<br>利岩平<br>均含量 | 波里岩<br>带金伯<br>利岩平<br>均含量 | 蒙阴金<br>伯利岩<br>平均<br>含量 | 上地幔<br>岩平均<br>成分 | 大陆地<br>壳平均<br>成分 |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------|------------------|
|                                   | 1                | 2                | 3                 | 4                        | 5                        | 6                        | 7                      | 8                | 9                |
| SiO <sub>2</sub>                  | 39.21            | 37.41            | 36.32             | 33.98                    | 36.05                    | 21.49                    | 32.24                  | 45.10            | 60.2             |
| TiO <sub>2</sub>                  | 0.14             | 0.17             | 0.19              | 1.97                     | 2.27                     | 0.76                     | 1.85                   | 0.20             | 0.7              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 1.48             | 1.17             | 2.18              | 2.98                     | 2.79                     | 3.85                     | 3.08                   | 3.30             | 15.2             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 2.56             | 4.37             | 4.19              | 7.92                     | 6.97                     | 3.26                     | 6.95                   |                  | 2.5              |
| FeO                               | 1.39             | 3.66             | 4.61              | 2.41                     | 2.17                     | 2.85                     | 2.43                   | 8.00             | 3.8              |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 0.43             | 0.27             | 0.42              | 0.26                     | 0.28                     | 0.18                     | 0.25                   | 0.40             |                  |
| NiO                               | 0.32             | 0.31             | 0.36              | 0.16                     | 0.11                     | 0.04                     | 0.13                   | 0.20             |                  |
| MnO                               | 0.05             | 0.06             | 0.03              | 0.17                     | 0.16                     | 0.16                     | 0.17                   | 0.15             | 0.1              |
| MgO                               | 39.06            | 33.61            | 32.47             | 29.31                    | 28.32                    | 12.97                    | 26.43                  | 38.10            | 3.1              |
| CaO                               | 0.70             | 3.63             | 3.97              | 10.17                    | 6.41                     | 23.08                    | 11.37                  | 3.10             | 5.5              |
| K <sub>2</sub> O                  | 0.13             | 0.22             | 0.37              | 0.33                     | 1.34                     | 1.51                     | 0.75                   | 0.03             | 2.9              |
| Na <sub>2</sub> O                 | 0.13             | 0.18             | 0.23              | 0.13                     | 0.09                     | 0.27                     | 0.14                   | 0.40             | 3.0              |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>     | 0.07             | 0.08             | 0.10              | 1.19                     | 0.58                     | 1.23                     | 1.05                   | 0.02             | 0.2              |
| CO <sub>2</sub>                   | 0.64             | 2.85             | 3.31              | 1.90                     | 1.65                     | 22.02                    | 5.08                   |                  | 1.2              |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>     | 13.66            | 12.08            | 11.15             | 8.16                     | 8.31                     | 1.59                     | 7.14                   |                  | 1.4              |
| 合 计                               | 99.56            | 99.95            | 99.87             | 100.95                   | 98.07                    | 95.08                    | 99.05                  | 99.00            | 99.8             |
| 样 品 个 数                           | 2                | 2                | 2                 | 34                       | 13                       | 9                        | 56                     |                  |                  |

注: 1—7 山东地质局实验室分析; 8 根据 A. E. 林格伍德 (1979); 9 根据罗诺夫和亚罗谢夫斯基 (1969年)。

成分相差极大，而与上地幔平均成分比较接近（表4），所以可以认为蒙阴金伯利岩不是来自地壳，而是来自上地幔。仔细对比可以看到，蒙阴金伯利岩的化学成分与上地幔平均成分还有差异。主要表现在前者的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 含量较低， $\text{CO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 含量较高。 $\text{MgO}$ 含量低可能是金伯利岩形成后碳酸盐化过程中镁质流失所造成，因碳酸盐化弱的金伯利岩 $\text{MgO}$ 可达33%。 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 比上地幔平均含量低，这可能显示金伯利岩并非形成于上地幔顶部，而形成于上地幔中上部或中部，因越向地球深处硅与铝含量越少。

蒙阴金伯利岩与其所含深源包体相比，化学成分也略有差异，主要表现在前者中的 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{K}_2\text{O}$ 含量高而 $\text{H}_2\text{O}^+$ 、 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{MgO}$ 含量低，说明金伯利岩比其包体的形成深度更大。推测深度可能在250km左右。

#### 四、几点认识

根据以上分析得到以下初步认识：

1. 推测含金刚石的金伯利岩的形成深度大于或等于140km。从前面的介绍中可知蒙阴金伯利岩形成的温度与压力较高，也就是形成的深度较大。从表3中又可看到它们形成的压力是不同的，即形成的深度有差别。常马庄金伯利岩带形成时压力为49.68—99.64千巴（相当于150km—300km），平均为69.23千巴（相当于209km），西峪金伯利岩形成时压力为29.87—71.75千巴（相当于138km）。

从蒙阴三个金伯利岩带的化学成分、矿物组合和标型矿物化学成分的分析得知，从常马庄岩带→西峪岩带→坡里岩带，其所含岩石的超基性程度和形成时的温度、压力逐渐降低，碱性程度逐渐增高；与此同时，其金刚石含量相应地从富→中、贫→不含或极贫。这样看来如果金伯利岩的形成深度小于西峪岩带的平均深度，那么含金金刚石就极贫或不含金刚石（就是向坡里金伯利岩带过渡）。相反，金伯利岩形成得越深，其含金金刚石性就可能越好。

2. 推测蒙阴地区上地幔理想剖面以140km左右为界，其下为纯橄榄岩类，其上为橄榄岩类。前已提到常马庄岩带金伯利岩形成深度在150—300km，平均为209km，而西峪岩带金伯利岩的形成深度在90.5—217km，平均为138km。常马庄岩带的深源捕虏体以纯橄榄岩为主，而西峪岩带的深源捕虏体以橄榄岩为主，仅有少量的纯橄榄岩。故我们可以设想常马庄岩带的金伯利岩是从大于140km的深度上侵入地壳的，主要捕获的是深度大于140km处的围岩和少量上部岩石碎块（包体）。西峪岩带的金伯利岩正处于界线附近，所以捕获的主要是140km以上的橄榄岩碎块。

3. 由于蒙阴金伯利岩形成深度较大，形成时的温度与压力特高，故其中还形成了一系列其他岩石中难以形成的矿物，如已在蒙阴金伯利岩中发现的新矿物——沂蒙矿、蒙山矿、蒙阴矿和红旗矿等。另外，随着研究程度的加深，很可能还会发现一系列高温高压新矿物，这些新矿物只能在形成深度极大的金伯利岩中发现。

4. 上述已发现新矿物有一个共同的特点，即它们的Cr、K、Ti和Mg的含量较高，\*

\*杨国杰：山东金伯利岩中的矿物学新资料，未刊稿。

并常含有相对较高的Zr、Nb、Sr及Ce、La等元素，故我们还可根据矿物中Cr、K、Ti、Mg的含量去推测其形成时的深度。

### 参 考 文 献

〔1〕B.C.索波列夫，1979，深源捕虏体与上地幔。国外地质，1979年第2期，科学技术出版社。

〔2〕Ю.Л.奥尔洛夫，1977，《金刚石矿物学》（中译本）。中国建筑出版社。

## THE FORMING TEMPERATURES AND PRESSURES FOR THE MENGYIN KIMBERLITES

Hu Siyi

(The Seventh Geological Brigade, Shandong Bureau  
of Geology and Mineral Resources)

### Abstract

Through the study of chemical compositions of typomorphic minerals and nodules in the Mengyin kimberlites, it is deduced that the forming temperatures and pressures for the Mengyin kimberlites are in the range of 1300—2000°C and 45—99 kb respectively. It is further suggested that, (1) the depth at which the diamond-bearing kimberlites were formed is no less than 140km; (2) a boundary between the upper part and the lower part of the ideal profile of the upper mantle can be set at the depth of about 140km, above which occur mainly peridotites and below which dunites; (3) a series of new minerals have been found only in the Mengyin kimberlites due to the extremely high P and T at which they were formed; (4) these new minerals are generally characterized by their higher Cr-, K-, Ti- and Mg-content, as well as relatively higher amounts of such elements as Zr, Nb, Ce and La.