

地幔岩中流体包裹体研究*

卢焕章^{1,2}

LU HuanZhang^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 加拿大魁北克大学应用科学系和矿产资源研究中心 魁北克 G7H 2B1 加拿大

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Science de la terre, and CERM, Universite du Quebec at Chicoutimi, Quebec G7H 2B1, Canada

2008-02-21 收稿, 2008-07-15 改回.

Lu HZ. 2008. Fluid inclusions in mantle rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9):1954–1960

Abstract Fluid inclusion in mantle rocks is a unique sample of mantle fluids. There are three types of rocks and mineral being from mantles; diamonds and kimberlite, mantle xenoliths, and carbonatite. Four type fluid inclusions have been found; carbonate-rich silicate melts inclusion; CO₂ inclusion; sulfide inclusion and high density fluid inclusion. Fluid inclusion in mantle rocks indicated the heterogenic of the mantle composition. Fluid inclusion in same mineral (such as diamond), but in different location, and wall rocks, the composition and characteristics are quite different. The high density fluid inclusion in diamond consisted of high brine inclusion and silica rich carbonate melt inclusion. This may indicate the immiscibility took place during the mantle metasomatic and in evolution process.

Key words Mantle rock; Fluid inclusion; CO₂ inclusion; Carbonatite-rich silicate melt inclusion; Sulfide inclusion; High density fluid inclusion

摘要 地幔岩石中的流体包裹体代表地幔流体的样品。地幔流体包裹体可以存在从地幔来的金刚石,地幔捕虏体和岩浆碳酸岩中。研究这些岩石和矿物中的流体包裹体可以得出其所代表的地幔流体的温度、压力、成分和同位素。我们目前见到的这三类地幔岩石的包裹体主要可在橄榄石、辉石、金刚石、方解石和磷灰石中见到。这些包裹体可以粗略地分为 CO₂ 包裹体和硅酸盐熔体包裹体。又可细分为四类包裹体:(1) 富碳酸盐的硅酸盐熔体包裹体。这种包裹体在金刚石、地幔捕虏体和岩浆碳酸岩中见到,它又可分为结晶质熔体包裹体和玻璃包裹体。(2) CO₂ 包裹体。这种包裹体大多见于地幔捕虏体中,在金刚石和岩浆碳酸岩中也可见到。(3) 含硫化物的包裹体。这种包裹体见于地幔捕虏体中,与纯 CO₂ 包裹体和含 CO₂ 的熔体包裹体共存。(4) 高密度的流体包裹体。这种包裹体见于金刚石中,是一种高盐度、高密度的含 K、Cl 和 H₂O 的流体包裹体,又可分为高卤水包裹体和含卤水的富硅的碳酸盐岩浆包裹体。从对金刚石、地幔捕虏体和岩浆碳酸岩中流体包裹体的研究表明,地幔流体存在不均匀性和不混溶性。

关键词 地幔岩; 流体包裹体; CO₂ 包裹体; 富碳酸的硅酸盐熔体包裹体; 硫化物包裹体; 高密度流体包裹体

中图法分类号 P589.1

地幔流体(Mantle plume or mantle fluid)是指来自地幔的富含挥发份的熔融体。地幔流体来自莫霍面以下的地幔(30km之下),其密度、粘度、温度和压力均比地壳中的流体来得高,其组成与地壳中的流体有相似之处,但大多并不一样。有关地幔流体的机理模式见图1。图中说明密度、粘度和温度很高的地幔流体向上升,其顶部的温度最高,向两边

流去,而尾部的温度相对较低。

很多人做过地幔流体的研究(王登红,1999;张铭杰等,2000;刘丛强等,2001;Hase *et al.*, 1996)。而代表地幔流体的样品则只存在于来自地幔岩的流体包裹体中,因此研究这些流体包裹体是得出地幔流体特征的重要手段。现在的问题是这些流体包裹体产在什么样的地幔岩中,是什么类型

* 作者简介: 卢焕章, 1940年生, 博士, 教授, 地球化学专业, E-mail: hzlu@uqac.ca

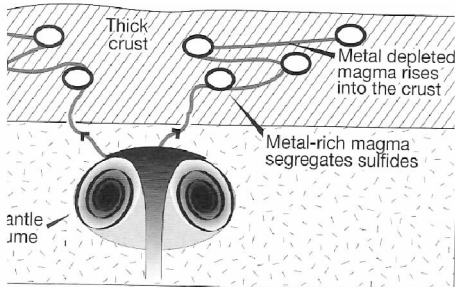


图1 地幔流体(mantle plume)模式图

Fig.1 Mantle plume and its related magma and metal deposits

的包裹体,怎么来鉴定以及它们所代表的地质意义。根据现在的研究情况,地幔岩在地壳中见到的有地幔岩的捕虏体,金刚石,金伯利岩以及一些产于地幔柱中的岩浆碳酸岩。Roedder(1965)首先研究了地幔捕虏体中橄榄石等矿物中的流体包裹体,这些捕虏体来自世界的72个地区。他发现了二类包裹体:CO₂包裹体和熔融包裹体(玻璃包裹体)。刘丛强等(2001)总结了地幔捕虏体中流体包裹体的研究。Nadeau *et al.* (1990)研究了北美地区地幔捕虏体中的流体包裹体。徐九华等(1998)研究了我国汉诺坝地幔捕虏体中的硫化物流体包裹体。谢玉玲等(2005)通过研究中国东部新生代玄武质火山岩中镁铁、超镁铁质的地幔捕虏体中的流体包裹体,认为存在流体-熔体包裹体。下面我们分别叙述在金刚石、金伯利岩,地幔岩的捕虏体以及在一些地幔成因的岩浆碳酸岩中的流体包裹体。

1 金刚石中的流体包裹体

金刚石,被认为是来自地幔,存在着地幔流体的信息,其主要产于金伯利岩和钾镁煌斑岩中,这些岩石可能来自地幔的岩石圈和软流圈。Turner *et al.* (1990)研究了金刚石和地幔捕虏体流体包裹体中的挥发份。肖化云等(2001)研究了金刚石中的包裹体,认为金刚石中的流体包裹体的气相和液相成分是在C-H-O的范围内,并且集中在H₂O-CH₄-CO₂的范围内。Burgess *et al.* (2002)和Israeli *et al.* (2001)报道了在金刚石中发现盐水包裹体。Brey and Ryabchikov(1994)认为在金刚石中存在着固体矿物包裹体、流体包裹体和硅酸盐熔融包裹体。我们主要是研究后二类流体包裹体,它们常呈孤立状态或沿金刚石晶体中的环带中分布(图2)。

Klein-Ben David *et al.* (2007)研究了加拿大Diavik金刚石矿中金刚石中的流体包裹体。流体包裹体产于纤维状的金刚石之中。他们对7个金刚石中的128个流体包裹体做了研究。其中的流体包裹体成分用K+Na-Ca+Mg+Fe-Si+Al三角相图来表示(图3)。在这些分析中发现了H₂O, H₂, CO₂, 碳酸盐和硅酸盐,并且发现其流体是一种高密度相的流体(HDFs, High density fluids)。

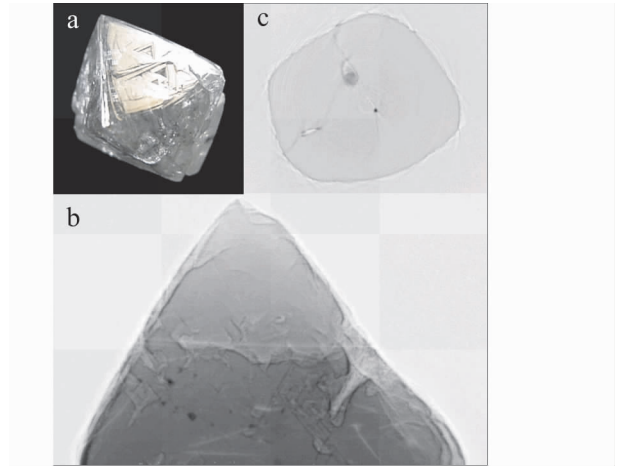
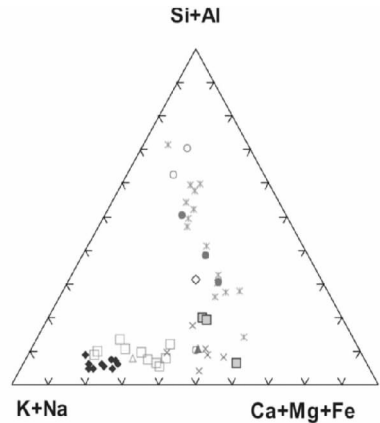


图2 金刚石中的流体包裹体(据Israeli *et al.*, 2001)

a-金刚石;b-金刚石中的流体包裹体;c-流体包裹体,c是b的放大

Fig.2 Fluid inclusions in diamond (after Israeli *et al.*, 2001)

a-Diamond; b-Fluid inclusions in diamond; c-Several fluid inclusions (dark) in diamond, c is enlargement of b



- ◆ Diavik saline HDF-bearing diamonds
- ◇ ON-DVK-281
- △ ON-DVK-294 saline-HDF
- ▲ ON-DVK-294 carbonatitic-HDF
- Koffiefontein saline-HDF bearing diamonds
- Koffiefontein carbonatitic- to silicic-HDF bearing diamonds
- × Botswanan diamonds
- Brazilian diamonds
- × Russian diamonds
- Sanp lake diamonds

图3 Diavik 金刚石矿及其它地区金刚石中流体包裹体成份的K+Na-Ca+Mg+Fe-Si+Al三角相图(据Klein-Ben David *et al.*, 2007)

Fig.3 The K+Na-Ca+Mg+Fe-Si+Al composition of fluid inclusions of diamonds in Diavik and other diamond mines (after Klein-Ben David *et al.*, 2007)

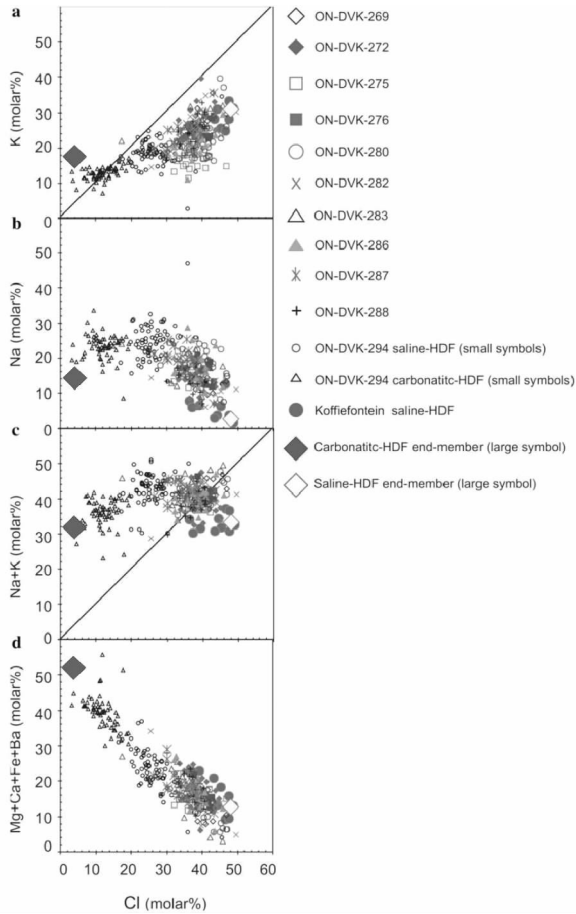
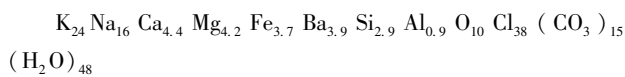


图4 Diavik 矿金刚石中包裹体的成分(据 Klein-Ben David *et al.*, 2007)

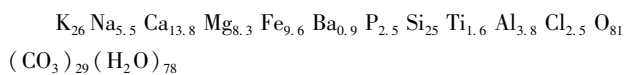
Fig. 4 The composition of fluid inclusions of diamonds in Diavik diamond mine (after Klein-Ben David *et al.*, 2007)

Diavik 矿金刚石中的流体包裹体可分为三种: (1) 含水的硅酸盐包裹体; (2) 富含 Mg, Ca, Fe 和 K 的碳酸盐包裹体; (3) 富含氯化物的水溶液包裹体。应用电子显微镜 (TEM)、远红外和 EPMA 来分析这些包裹体, 发现它们之间的 K 与 Cl 呈正比关系, 并且发现了高密度流体 (HDFs)。这种 HDFs 的成份介于碳酸岩岩浆和卤水两个端元之间, 其中流体中的氯化物的含量为 47%, 硅酸盐 8%, 碳酸盐 (Mg, Ca, Fe 碳酸盐) 31% 和 H_2O 14%。

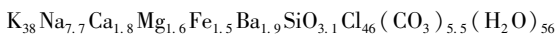
计算出该分子式为:



而 Diavik 金刚石中流体包裹体的平均组份为:



卤水端元的成份为:



碳酸盐岩浆端元的成份为:

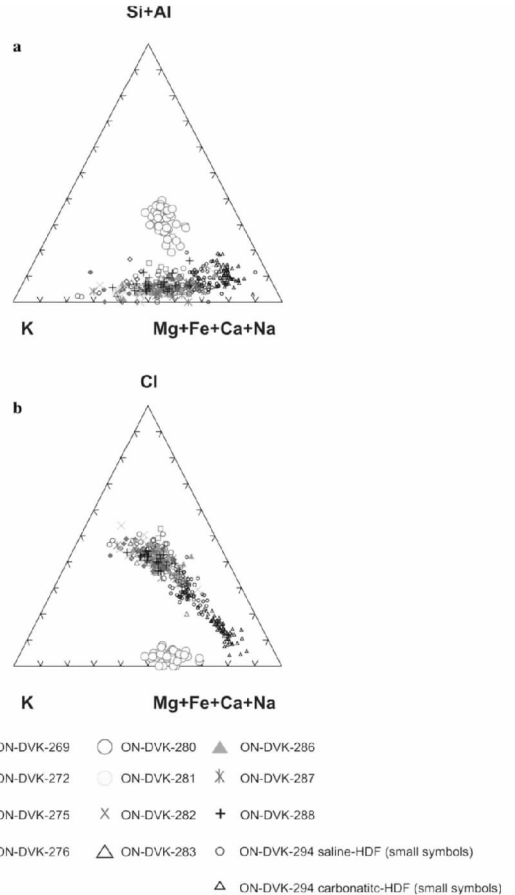
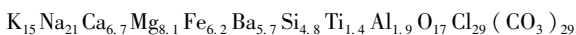


图5 Diavik 矿金刚石中包裹体成分(据 Klein-Ben David *et al.*, 2007)

Fig. 5 The composition of fluid inclusion of diamonds, Diavik mine, Canada (Klein-Ben David *et al.*, 2007)

(H_2O)₂₉

图4中列出了12件样品的175个流体包裹体分析结果,同时也列出了Koffiefontein金刚石流体包裹体的成份,并在所分析的结果中列出了二个端元即碳酸盐高密度流体和盐水高密度流体。

如果把 Diavik 金刚石矿中金刚石中172个包裹体的分析数据都投在 Si + Al - K - Mg + Fe + Ca + Na (碳酸盐端元组份)三角图上,可见到其数据集中在 Mg + Fe + Ca + Na 这一端,其次为 K 这一端,也就是说靠近 Mg + Fe + Ca + Na 和 K 这条直线,而把卤水高密度流体的成份投在 K - Cl - Mg + Fe + Ca + Na 的三角图上,则其成分靠近 Mg + Fe + Ca + Na 和 Cl 连线这一端(图5)。

肖化云等(2001)曾统计过金刚石中的流体包裹体的挥发成份,我们把 Diavik 金刚石矿中金刚石包裹体挥发份的 H_2O 和 CO_2 的平均值 (H_2O 47.59%, CO_2 15.2%, 均为15个数据的平均值)投在图6上。显示这些挥发份主要分布在 C-H-O 体系中,并且主要集中于 H_2O - CH_4 - CO_2 三角型区域中,不过这也取决于这种流体的氧逸度。金刚石中的流体包裹

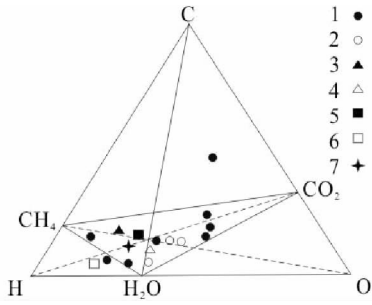


图6 金刚石中流体包裹体液相和气相成分(据肖化云等,2001,有修改)

1-中国金刚石中的气相流体; 2-中国金刚石中的液相流体; 3-南非金刚石中的包裹体; 4-南非、波茨瓦纳及美国金刚石流体包裹体平均成分; 5-俄罗斯雅库特金刚石中流体包裹体平均成份; 6-俄罗斯 Mir 金刚石中流体包裹体平均成份; 7-加拿大 Diavik 金刚石中流体包裹体中的平均成份

Fig. 6 The liquid and gas composition of fluid inclusion in diamonds (modify from Xiao *et al.*, 2001)

Gas and liquid of fluid inclusions in diamonds from: 1-China; 2-China (liquid); 3-South Africa; 4-avrage composition of fluids in South Africa, Botswana, and U. S diamonds; 5-Yakede diamond, Russia; 6-Mir diamonds, Russia; 7-Diavik, Canada

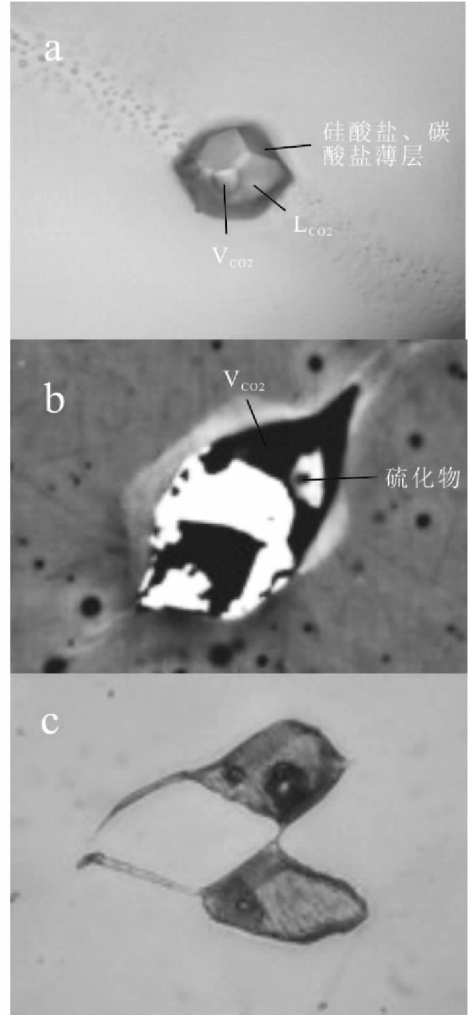


图8 Canary 岛的流体包裹体及其分类(据 Hansteen *et al.*, 1991; Frezzotti *et al.*, 2002)

a-纯 CO₂ 包裹体,外面有一硅酸盐的薄壳; b-含硫化物的包裹体; c-富含碳酸盐的熔融包裹体

Fig. 8 Mantle fluid inclusions in Canary Island (after Hansteen *et al.*, 1991; Frezzotti *et al.*, 2002)

a-CO₂ inclusion with a thin silicate shell; b-Sulfide melt inclusion; c-Carbonate - rich melt inclusions

2 地幔岩捕虏体中流体包裹体研究

Nadeau *et al.* (1990)研究了北美地区地幔岩捕虏体中的流体包裹体和同位素比值。Pasteris (1987)研究了地幔捕虏体中的流体包裹体。刘丛强等(2001)总结了地幔捕虏体中的包裹体的研究。谢玉玲等(2005)指出在我国的地幔捕虏体中存在有流体—熔融包裹体,认为这可能是地幔流体交代作用的结果。徐九华等(1998)在我国汉诺坝地幔捕虏体中发现了硫化物的包裹体。Roedder (1965)研究了世界上 72 个地区的超基性岩捕虏体中的流体包裹体,认为其中存在 CO₂ 和玻璃包裹体。Hansteen *et al.* (1991)和 Frezzotti *et al.*

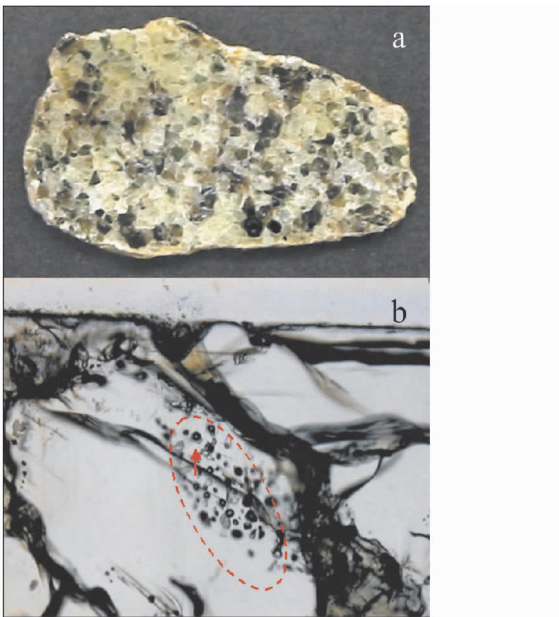


图7 地幔岩的捕虏体(a)和捕虏体橄榄石中的包裹体(b)(据 Hansteen *et al.*, 1991; Frezzotti *et al.*, 2002)

Fig. 7 Mantle xenoliths (a) and fluid inclusions in olivine of mantle xenoliths (b) (after Hansteen *et al.*, 1991; Frezzotti *et al.*, 2002)

体的均一温度测定近年也取得了进展,落在 1000 ~ 1300℃ 的温度范围内,相当于压力为 4 ~ 6Gpar。

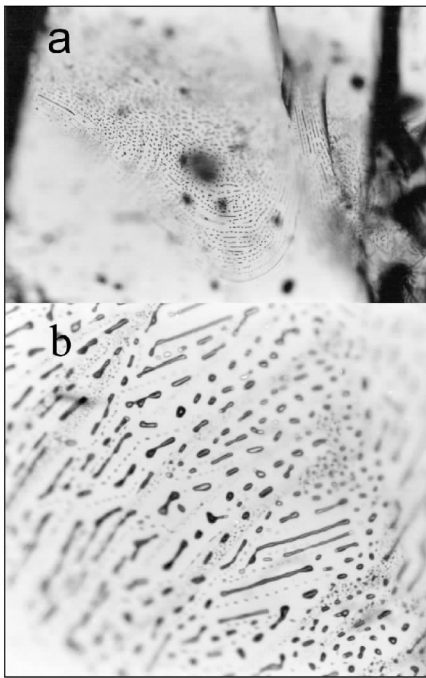


图9 超基性岩捕虏体内呈指纹状分布的熔融包裹体和 CO₂ 包裹体

b 是 a 的放大

Fig. 9 CO₂ and whorls like silicate melt inclusions in ultramafic Mantle xenoliths

b is the enlargement of a

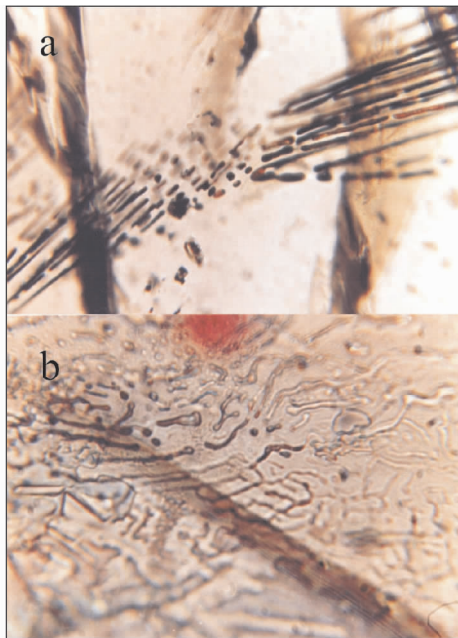


图10 玄武岩中的流体包裹体

Fig. 10 Fluid inclusions in basalt xenoliths

(2002)研究了 Canary 岛基性和超基性岩捕虏体中的流体包裹体,他们在二辉橄榄岩的捕虏体(图7)中发现了三种包裹体:(1)纯 CO₂ 包裹体,通常在该种包裹体的壁上有一层由 Fe-Mg-Si 相组成的薄壳;(2)CO₂-SO₂ 包裹体,这是一种混合物;(3)硅酸盐熔融包裹体,包含硅酸盐、碳酸盐和钾盐等(图8)。

作者也曾对捕虏体中的流体包裹体做过研究。研究发现了呈指纹状分布的熔融包裹体和 CO₂ 包裹体(图9)。这种包裹体的熔融包裹体可分为玻璃质熔融包裹体和结晶质熔融包裹体两种。电子探针分析表明富含 K、Mg、Fe 等元素。这些熔融包裹体当中可见到有 CO₂ 包裹体分布。为什么这些熔融包裹体常呈条带状,有人认为是压力引起的拉伸而造成的。鉴定这些包裹体时可先做冷冻实验,先鉴定出含 CO₂ 的包裹体,以及熔融包裹体中气相中的 CO₂ 含量。然后再做熔融包裹体的分析。地幔捕虏体中的流体包裹体的研究对地幔流体的微量元素成分以及地幔交代作用也很有意义的。

玄武岩捕虏体中的流体包裹体与超基性岩和基性岩中捕虏体的包裹体是一样的(图10),也有 CO₂ 包裹体和熔融包裹体。因此总的来说,地幔捕虏体中的包裹体有三类(图11):一是 CO₂ 包裹体;二是硫化物包裹体(不太常见);三是熔融包裹体。我们现在要知道的是 CO₂ 包裹体和熔融包裹体为什么会在一起,他们是什么关系?一起形成的,还是偶然的在一起(图11)?还有这个 CO₂ 的包裹体是来自地幔?冷冻法和 Raman 分析表明这个包裹体含有的的确是 CO₂。用同位素分析的方法测定其 C 同位素。在北美的橄榄石中,流体包裹体的 δ¹³C 在 -23‰ ~ -28‰ 范围内(Nadeau *et al.*, 1990),并且是随地区不同而有所变化,地幔流体中的 C 同位素具有明显的双峰分布。主峰众数为 -5.5‰,次峰为 -15‰ ~ -25‰。证明 CO₂ 流体包裹体中的 C 的确来自地幔。

3 地幔柱中的岩浆碳酸岩中的流体包裹体

地幔岩的另一种可能是产自上升的地幔柱中的岩浆碳酸岩。作者对加拿大 Sagunary 地堑区产于上升的地幔柱中的 Honear 岩浆碳酸岩中方解石中的流体包裹体进行了研究,在方解石中发现了熔融包裹体,但未见含 CO₂ 的流体包裹体。用冷冻法对熔融包裹体进行冷冻,只有一个熔融包裹体的气相中冷冻时出现两相,在 -80℃ 时全冻上。在 -56.4℃ 时又变成三相。在 -10℃ 时二相消失呈气相。其他包裹体的冷冻效应不太明显。但是看来在这种熔融包裹体中是有 CO₂ 存在。

4 讨论

从上面的三部分讨论中我们可以看到:

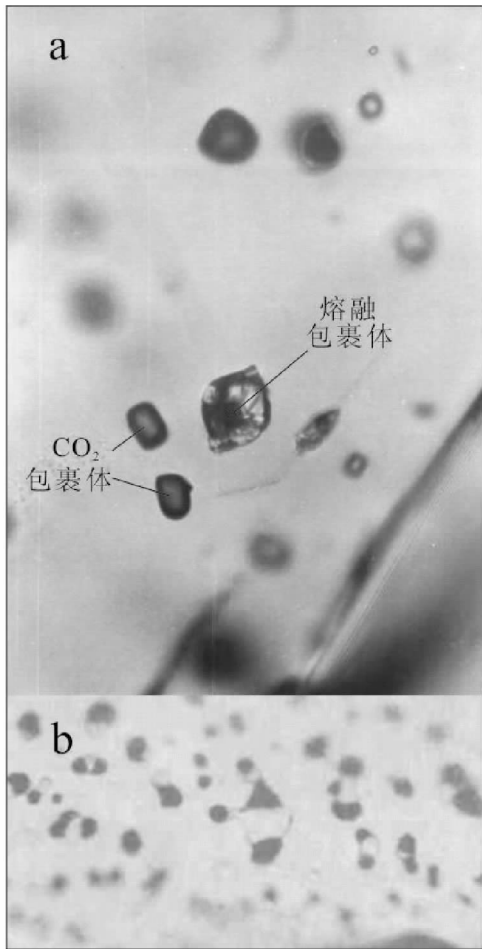


图 11 地幔岩捕虏体中橄榄岩内熔融包裹体与 CO₂ 包裹体共存(a)和汉诺坝橄榄辉石岩捕虏体中硫化物包裹体群(b) (据徐九华等,1998)
Fig. 11 Melt and CO₂ inclusions in mantle xenoliths (a) and sulfide melt inclusions in Hannuoba peridotite xenoliths (b) (after Xu *et al.* , 1998)

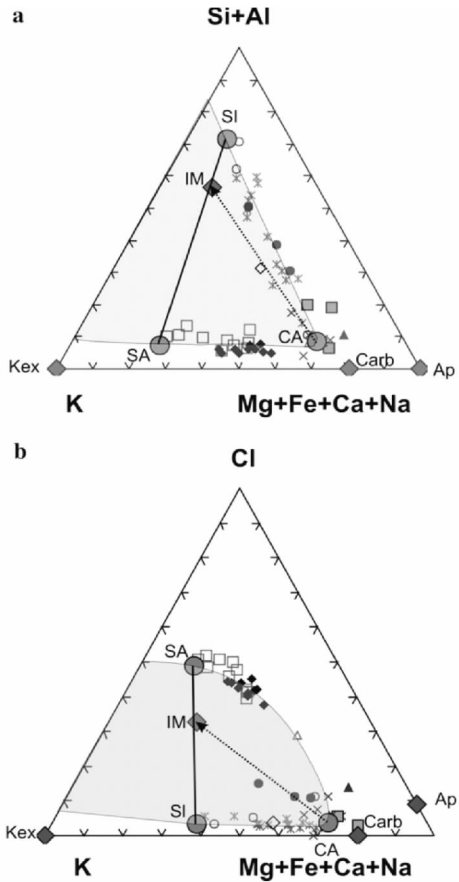


图 12 金刚石流体包裹体中的高密度流体(HDFs)的演化模式(据 Klein Ben David *et al.* ,2007)
Ap-磷灰石; Carb-碳酸盐; Kex-钾矿物
Fig. 12 The evolution model of high density fluids in fluid inclusions of diamonds, Diavik mine (after Klein Ben David *et al.* , 2007)
Ap-Apatite; Carb-Carbonate; Kex-Potassium minerals

(一)根据目前的研究,地幔流体的代表——即地幔流体包裹体可以存在从地幔来的金刚石,金伯利岩,地幔捕虏体和岩浆碳酸岩中。研究这些岩石和矿物中的流体包裹体可以得出其所代表的地幔流体的温度、压力、成分和同位素。因此研究地幔包裹体是十分有意义的。

(二)地幔岩中流体包裹体的特征和分类

我们目前见到的这三类地幔岩石的包裹体主要可在橄榄石、辉石、金刚石、方解石和磷灰石中见到。这些流体包裹体可以粗略地分为 CO₂ 包裹体和硅酸盐熔融体包裹体。过去认为熔融包裹体主要是硅酸盐,但是最近 Frezzotti *et al.* (2002)发现在硅酸盐熔融包裹体中有硅酸盐、碳酸盐和钾盐,这种碳酸盐实际上是 Mg-Fe-Ca 碳酸盐。除此之外,谢玉玲等(2005)还发现了 CO₂ 和熔融包裹体之间的过渡。所以在地幔岩中的流体包裹体可分为:

(1) 富碳酸盐的硅酸盐熔融包裹体。这种包裹体在金

刚石、地幔岩捕虏体和岩浆碳酸岩中见到。这种熔融包裹体可分为结晶质熔融包裹体和玻璃包裹体。

(2) CO₂ 包裹体。这种包裹体大多见于地幔捕虏体中,在金刚石和岩浆碳酸岩中也可见到 CO₂ 包裹体的存在。

(3) 含硫化物的包裹体。这种包裹体见于地幔捕虏体中,徐九华等(1998)在汉诺坝玄武岩中的二辉橄榄岩捕虏体中发现了硫化物熔融包裹体。这种包裹体中的硫化物是镍黄铁矿和磁黄铁矿。这些硫化物包裹体是与纯 CO₂ 包裹体、含 CO₂ 的熔融包裹体、CO₂-SO₂ 硫化物包裹体共存的。

(4) 含高密度的流体包裹体。这种包裹体见于金刚石中,是一种高盐度、高密度的包裹体,是一种含 K、Cl 和 H₂O 的流体包裹体。这种高密度流体包裹体也可分为高卤水包裹体和含卤水的富硅的碳酸盐熔融包裹体。

现在的问题是这四类包裹体的关系如何,我们已经看到 CO₂ 和熔融包裹体有一定关系,可能是一种含碳酸盐和 CO₂ 的硅酸盐岩浆分异出 CO₂ 和硅酸盐融体。而在超基性和基

性的岩浆中有硫化物包裹体存在。而在许多样品中,我们可以看到有高密度高盐度的包裹体与 CO₂ 包裹体和熔融包裹体共存,可能是地幔流体的不均匀性或不混溶性的结果,也可能存在不同的地幔流体。但是有一点是肯定的,即地幔流体包括了熔融体和 CO₂ 流体这两个组成。

(三)地幔流体的不均匀性

从对金刚石、地幔捕虏体和岩浆碳酸岩中流体包裹体的研究表明,在同一矿物中,例如金刚石、橄榄石中的包裹体在不同地点,不同岩石中的成分和特征是不一样的。这也许反映了地幔流体的不均匀性。另一方面,地幔流体经过漫长的道路(几十千米)到达近地表,在这一过程中可能有许多流体及岩石发生了相互作用,或者地幔流体本身会发生自交代与分异作用。因此地幔流体的成分可能发生了变化。这种情况也许能显示出地幔流体的演化历史。

(四)地幔流体的不混溶性

Klein-Ben David *et al.* (2007) 在研究 Diavik 金刚石的流体包裹体时认为,从流体包裹体的证据中证明在地幔流体中存在不混溶性(图 12)。在金刚石的高密度流体包裹体存在一个不混溶过程。原始的流体是碳酸盐的高密度流体(CA),这时碳酸盐/碳酸盐+水的比值大约为 0.1,并且估计在碳酸盐硅酸盐岩浆中水的含量为 14% 左右。这种高密度流体只沉淀出碳酸盐(Carb),磷灰石(Ap)以及钛酸盐,在这个基础上一个不混溶的流体(IM)形成(图中阴影部分)。实际上这种混溶物是碳酸盐硅酸盐岩浆(SI)与卤水高密度流体(SA)之间的不混溶物。也就是说,三种流体存在于金刚石的流体包裹体中,碳酸盐硅酸盐岩浆、富硅的高密度流体和富卤化物的高密度流体。不混溶流体是出于富卤化物的高密度流体和富硅酸盐的高密度流体之间。这种不混溶作用发生在降温过程和地幔流体的自交代作用过程中。

综上所述,地幔流体是一个富含 CO₂ 的流体和含碳酸盐的硅酸盐熔融体。并且可以分为互相联系的流体和熔体两大类,前者主要为 C-O-H 流体(CO₂),其次是高密度的卤水;后者为含水的硅酸盐熔融体,碳酸盐熔融体和硫化物熔融体。地幔岩中流体包裹体研究表明地幔流体存在不均匀性和不混溶性。现在看来他们之间有的是由于不混溶,有的可能是不同成分的地幔流体。由于样品的局限,样品的代表性等问题,地幔岩中流体包裹体和地幔流体的研究尚处于初步积累数据的阶段,有许多问题尚未解决,有许多工作尚待我们去进行。

致谢 毛世东帮助绘图和打字。两位审稿人提出了十分宝贵的意见特此一并致谢。

References

Brey GP and Ryabchikov ID. 1994. Carbon-dioxide in strongly silica undersaturated melts and origin of kimberlite magmas. *Neues Jahrbuch Mineral. Monatshefte*, (10): 449 - 463

Burgess R, Layzelle E, Turner G and Harris JW. 2002. Constraints on the age and halogen composition of mantle fluids in Siberian coated diamonds. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 197 (3 - 4): 193 - 203

Frezzotti ML, Andersen T, Neumann ES and Simonsen S. 2002. Carbonate melt-CO₂ fluid inclusions in mantle xenoliths from Tenerife, Canary Islands: A story of trapping, immiscibility and fluid-rock interaction in the upper mantle. *Lithos*, 64: 77 - 96

Hansteen TH, Anderson T, Neumann ER and Jelsma H. 1991. Fluid and silicate glass inclusion in ultramafic and mafic xenoliths from Hierro, Canary Island: Implication for mantle metalomatism. *Contrib. Mineral. Petrol.*: 107: 242 - 254

Hase B, Werner-Grüne S, Deckers-Hebestreit G, Strotmann H, Rosebaum JM, Zindler A and Ruberstone L. 1996. Mantle fluids: Evidence from fluid inclusions, *Geochim. Coschim. Acta*, 60: 3229 - 3252

Izraeli ES, Harris JW and Navon O. 2001. Brine inclusions in diamonds: A new upper mantle fluid. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 187 (3 - 4): 323 - 332

Klein-Ben David O, Izraeli ES, Hauri E and Navon O. 2007. Fluid inclusions in diamonds from the Diavik mine, Canada and the evolution of diamond-forming fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 723 - 744

Liu CQ, Huang ZL, Li HP and Su GL. 2001. The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes. *Earth Science Frontiers*, 8 (4): 231 - 243 (in Chinese with English abstract)

Nadeau S, Pineau F, Javoy M and Francis. 1990. Carbon concentrations and isotopic ratios in fluid inclusion-bearing upper-mantle xenoliths along the northwestern margin of North America. *Chemical Geology*, 81: 271 - 297

Pasteris JD. 1987. Fluid inclusions in mantle xenoliths. In: Nixon (ed.). *Mantle Xenoliths*. 691 - 708

Roedder E. 1965. Liquid CO₂ inclusions in olivine-bearing Nodule and phenocrysts from Bstals. *Am. Mineralogist*, 50: 1746 - 1782

Turner G, Burgess R and Bannon M. 1990. Volatile-rich mantle fluids inferred from inclusions in diamond and mantle xenoliths. *Nature*, 344 (6267): 653 - 655

Xiao HY, Liu CQ and Huang ZL. 2001. Fluid inclusions in diamonds. *Advance in Earth sciences*, 16 (2): 244 - 249 (in Chinese with English abstract)

Xie YL, Pan L, Xu JH, Qiu SD and Liu YT. 2005. Study on fluid-melting inclusion in mantle rock and its significance for mantle metasomatism. *Xinjiang Geology*, 23(1): 10 - 13 (in Chinese with English abstract)

Xu JH, Zhu XL and Zhou YM. 1998. Sulfides melt inclusion in Hannuoba xenoliths. *Chinese Sciences Bulletin*, 43(13): 1438 - 1441 (in Chinese with English abstract)

Wang DH. 1999. *Mantle Plume and Its Significance*. Beijing: Geological publishing House (in Chinese with English abstract)

Zhang MJ, Wang XP and Li LW. 2000. The composition of mantle fluid. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 401 - 411 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

刘丛强,黄智龙,李和平,苏根利. 2001. 地幔流体及其成矿作用. *地学前缘*, 8(4): 231 - 243

肖化云,刘丛强,黄智龙. 2001. 金刚石包裹体中的古地幔信息. *地球科学进展*, 16(2): 244 - 249

徐九华,储雪雷,邹一民. 1998. 汉诺坝地幔捕虏体中的硫化物包裹体. *科学通报*, 43(13): 1438 - 1442

谢玉玲,潘玉林,徐九华等. 2005. 地幔岩中不同产状的流体-熔体包裹体及地幔流体交代作用. *新疆地质*, 23(1): 10 - 13

王登红. 1999. *地幔柱和其地质意义*. 北京: 地质出版社

张铭杰,王先彬,李立武. 2000. 地幔流体组成. *地学前缘*, 7(2): 401 - 411