

金刚石包裹体的 Ar-Ar 激光定年研究进展

谭娟娟^{1,2)}

1) 武汉地质调查中心同位素地球化学研究室, 武汉, 430205;

2) 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 武汉, 430205

金刚石本身具有高硬度、低透气性和化学惰性等特点, 因此其中的包裹体在形成后与外界“隔离”, 较好地保存了地球深部的信息, 通常能直接反映金刚石形成时的物理化学条件。随着近年来新技术方法的发展, 对细微的金刚石包裹体进行同位素年代学的研究也成为可能。上世纪 80 年代, 前人利用传统的 Sm-Nd 法等放射性同位素方法对金刚石中的单斜辉石和石榴石等硅酸盐包裹体进行定年, 但这些方法具有明显的不足: 1) 需要把充足的包裹体样品从大量的金刚石中分离出来, 以获得有意义的等时线年龄; 2) 即使同一采样点甚至在同一颗金刚石中, 不同的包裹体的年龄差异也可能很大, 很难获得准确的等时线年龄。相比之下, 现今的 Ar-Ar 激光探针技术具有明显的优势。

20 世纪 80 年代, 前人开始通过全熔加热法对金刚石包裹体进行 K-Ar 和 Ar-Ar 年代学研究, 受制于当时的技术, 早期测得的 Ar 含量接近于系统空白, 也无法排除过剩 Ar 的干扰, 因此难以得到有意义的年龄。激光 Ar-Ar 法应用于金刚石中单个包裹体的首次发表是在南非的 Premier 矿床 (Burgess et al., 1989), 得到了 7 个单斜辉石包裹体的年龄。他们利用激光探针暴露于金刚石解理面的包裹体直接进行原位测试, 这些包裹体重 10~130 μg , 得到的年龄范围在 1111 \pm 35Ma 到 1254 \pm 38Ma 之间, 平均为 1185 \pm 94Ma。这个结果与前人用 Sm-Nd 法得到的等时线年龄在误差范围内一致。Phillips 等人 (1989) 用同样的技术手段对 Premier 矿床的 9 个单斜辉石包裹体进行分析后得到的年龄为 1198 \pm 14Ma, 这与 Burgess 等人的结果在误差范围内一致, 且精确度更高。

随后, 又有学者用类似的方法对博茨瓦纳、西

伯利亚和澳大利亚的四个矿床中 32 颗金刚石里的单个单斜辉石包裹体进行了激光 Ar-Ar 定年, 得到的最小年龄接近于围岩金伯利岩的喷发年龄, 但是这些年龄的变化范围很大 (Burgess et al., 1992)。由于进行激光测试的包裹体都位于金刚石的解理面, 作者认为这一结果说明金刚石在地幔中形成后, $^{40}\text{Ar}^*$ (放射性成因 Ar) 沿着金刚石的解理面以及金刚石与包裹体的接触界面发生了扩散, 造成了部分 Ar 损失, 所以得到的年龄应该介于金刚石形成和金伯利岩的喷发事件之间。理想状态下, 金刚石内部的包裹体应该是完全封闭的, 为了对比, 他们又对一颗俄罗斯 Udachnaya 矿床的金刚石进行了实验, 选取了这颗金刚石中两个完全封闭的包裹体, 直接对被包裹在金刚石中的硅酸盐矿物进行了原位的激光 Ar-Ar 定年, 得到的两个年龄较老且相差很大 (1149 \pm 37Ma 和 831 \pm 144Ma), 而该矿床金刚石解理面上的包裹体的年龄则年轻得多, 平均值为 425Ma。这说明位于解理面的包裹体很可能发生了 Ar 损失, 而在被完全封闭的包裹体与金刚石的接触面上也存在过剩 Ar。

为了进一步研究不同成分 Ar 混入对金刚石结晶年龄测定造成的影响, 之后的研究者结合分步加热技术与更加成熟的激光探针改进了金刚石包裹体 Ar-Ar 定年方法。他们选取了刚果和博茨瓦纳的三个金伯利岩型金刚石矿床中的 15 个大颗粒的宝石级金刚石, 把单斜辉石包裹体从金刚石中取出来进行单独测试 (Phillips et al., 2004)。这些包裹体的粒径较大, 多数在 100~300 μm 之间, 呈现了发育良好的立方体—八面体晶形。镜下观察确定这些包裹体都被完全包裹, 没有接触到金刚石的表面。把这些包裹体从金刚石中取出, 经过清洗、快中子活

注: 中国地质调查局地质调查项目 (12120113063000, 1212011121102) 联合资助。

收稿日期: 2015-02-02; 改回日期: 2015-02-28; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 谭娟娟, 女, 1985 年生。硕士, 工程师, 地球化学专业。Email: heiditan@foxmail.com。

化、冷却等 Ar-Ar 常规处理过程后,用 40-100 μm 的激光束进行全熔或 2~3 个阶段的分步加热,连接质谱仪测量,获得比值年龄信息。实验结果 15 个包裹体样品中有 5 个年龄数据接近于前人用锆石 U-Pb 法确定的金伯利岩侵入年龄,其他的年龄则更老,介于金刚石形成年龄和金伯利岩的喷发事件之间。而且分步加热的低温阶段得到的表观年龄较老,高温阶段的年轻年龄更接近于金伯利岩的喷发年龄。这个结果说明单斜辉石包裹体中有过剩 Ar 的部分残留,因此得到的定年结果应该解释为源区年龄的最大值。近年,为了进一步验证这一方法,研究者们继续选用博茨瓦纳同一个金伯利岩中的金刚石进行了 Ar-Ar 分步加热研究 (Philips et al., 2008),对金刚石中的 50 颗单斜辉石包裹体进行了 Ar-Ar 定年,在这一批年龄数据中,高温阶段都得到了较年轻的结果,更接近于金伯利岩的喷发年龄 (~93Ma),有 35%在喷发年龄误差范围之内,且共有 77%与喷发年龄相差在 50Ma 以内。因此这种方法获得的年龄可视为源区金伯利岩喷发年龄的上限。一般情况下把过剩 Ar 解释为继承 Ar 的残留,这些继承 Ar 是在金刚石结晶和金伯利岩喷发之间产生的。前人的模型这样解释继承 Ar 的存在:在地幔环境下,单斜辉石内部有原生流体包裹体,单斜辉石与金刚石的接触面上有表面孔隙,尺寸都小到可忽略。因此所有的继承 Ar 都扩散进入了流体包裹体和单斜辉石内部的其他结构缺陷中。随后在金伯利岩上升喷发时这些包裹体和孔隙发生部分爆裂,导致金刚石和单斜辉石的接触界面上有 Ar 的累积 (Kelley and Wartho, 2000)。分步加热的结果同样可以用该模型来解释:单斜辉石内部流体包裹体中残留的过剩氩在分步加热的低温阶段首先发生去气,所以得到了较老的表观年龄,而高温阶段的年龄则更真实的体现了喷发年龄,全熔年龄也因为受到了过剩氩的影响而偏老。

学者们又对博茨瓦纳一个砂矿金刚石尝试了另一种 Ar-Ar 定年方法,他们先对完全封闭在金刚石之中的单斜辉石和石榴石包裹体进行激光原位熔蚀,再把整个金刚石放在钽坩埚中从 600 $^{\circ}\text{C}$ 到 2150 $^{\circ}\text{C}$ 进行了 6 个阶段的分步加热,并认为这种方法比单用激光加热更有利于把包裹体中的气体和

金刚石晶格中气体的区分开来:首先在低温阶段,金刚石表面积累的大气 Ar 会逸出,一般以高 ^{36}Ar 含量为标志;当温度上升到 1800 $^{\circ}\text{C}$ 时,金刚石中的辉石包裹体会完全熔融,释放所有的放射性成因 $^{40}\text{Ar}^*$;到了 2000 $^{\circ}\text{C}$ 以上,金刚石转化成石墨,这时金刚石晶格中的 Ar 会释放。实验结果显示,Ar 气释放集中在 1200~1800 $^{\circ}\text{C}$ 和 >2000 $^{\circ}\text{C}$,表观年龄变化范围很大,远大于围岩金伯利岩的喷出年龄,多数都得到太古代年龄,这也支持包裹体内部孔隙存在地幔来源过剩 Ar 的模型 (Burgess et al., 2004)。

综上,对金刚石中的硅酸盐包裹体进行 Ar-Ar 激光定年可以估算金刚石原岩金伯利岩的喷发年龄,这对生产和科研都有重要意义,可以借助包裹体的年龄来辅助确定砂矿金刚石的源区,从而圈定其他金刚石勘探靶区。而偏老的表观年龄等实验结果,结合其他包裹体数据,反映了地幔物质信息,对于研究地幔组成、地幔不均一性、地球深部碳循环等问题都有很多启示。

参 考 文 献 / References

- Burgess R, Turner G, Laurenzi M, Harris J W. 1989. ^{40}Ar - ^{39}Ar laser probe dating of individual clinopyroxene inclusions in Premier eclogitic diamonds. *Earth and Planetary Science Letters*, 94: 22-28.
- Burgess R, Turner G, Harris J W. 1992. ^{40}Ar - ^{39}Ar laser probe studies of clinopyroxene inclusions in eclogitic diamonds. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 56: 389-402.
- Kelley S P, Wartho J A. 2000. Rapid kimberlite ascent and the significance of Ar-Ar Ages in zirconolite phlogopites. *Science*, 289:609-611.
- Phillips D, Onstott T C, Harris J W. 1989. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser probe dating of diamond inclusions from the Premier kimberlite. *Nature*, 346: 54-56.
- Philip D, Harris J W, Kiviets G B. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses of clinopyroxene inclusions in African diamonds: implications for source ages of detrital diamonds. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 68: 151-168.
- Phillips D, Harris J W. 2008. Provenance studies from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of mineral inclusions in diamonds: Methodological tests on the Orapa kimberlite, Botswana. *Earth and Planetary Science Letters*, 274: 169-178.