

# 金属矿床年龄测定新技术

## ——(U-Th)/He 同位素定年方法\*

陈 文<sup>1</sup>, 何学贤<sup>1</sup>, 张 彦<sup>1</sup>, 李 洁<sup>1,2</sup>, 陈 越<sup>1,2</sup>, 刘新宇<sup>1</sup>

(1 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2 中国地质大学, 北京 100029)

早在一百年前就有人注意到了矿物中 He 积累的时间效应并提出了氦同位素定年的可能性(Rutherford, 1905; Strutt, 1908), 但 (U-Th)/He 同位素定年技术是在近 20 年来才真正取得技术突破并得到了广泛应用。研究表明, 对于快速冷却的样品, (U-Th)/He 年龄具有结晶年龄的意义(Warnock et al., 1997), 对更多的非快速冷却样品, 其 (U-Th)/He 年龄虽不具有结晶年龄的意义, 但具有热年代学意义。目前, 该方法在构造隆升历史研究、古地形研究和区域热历史研究中应用最多, 而在金属矿床年代学研究中的应用还不多。本文简要介绍该方法技术原理和中国地质科学院地质研究所建立的磷灰石 (U-Th)/He 同位素定年实验流程, 并探讨用该方法研究金属矿床成矿时代、后期改造时代和矿床揭顶时代的可行性。

### 1 (U-Th)/He同位素定年技术原理简介

(U-Th)/He 定年是基于矿物颗粒中 U、Th 放射性衰变产生 He 发展起来的。He 有两种同位素: <sup>3</sup>He 和 <sup>4</sup>He。<sup>4</sup>He 原子核又称为 α 粒子, 是由 <sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U 和 <sup>232</sup>Th 通过一系列放射性衰变产生的。根据放射性同位素的衰变原理, 由 U、Th 衰变产生 <sup>4</sup>He 子体同位素的基本方程为 (Farley et al., 2002):

$$^4\text{He} = 8^{238}\text{U}[\exp(\lambda_{238}t) - 1] + 7(^{238}\text{U}/137.88)[\exp(\lambda_{235}t) - 1] + 6^{232}\text{Th}[\exp(\lambda_{232}t) - 1] \quad (1)$$

这里 <sup>4</sup>He、<sup>238</sup>U 和 <sup>232</sup>Th 指测量的原子数, t 为放射性衰变产生子体同位素 <sup>4</sup>He 所积累的时间, λ<sub>238</sub>、λ<sub>235</sub>、λ<sub>232</sub> 是 <sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U、<sup>232</sup>Th 的衰变常数。通过测定矿物中 <sup>4</sup>He、<sup>238</sup>U 和 <sup>232</sup>Th 的量, 利用方程 (1) 就可以算出矿物在 He 同位素体系封闭以后所经历的时间。

### 2 实验流程

#### 2.1 U、Th 同位素含量稀释剂法测试流程

化学处理是在超净室中进行的。用 0.5 mL 浓 HCl 在 80℃ 溶解磷灰石样品, 加入 <sup>233</sup>U 和 <sup>229</sup>Th 稀释剂, 用 AG 1×8 阴离子交换柱提取 U 和 Th。将分离与纯化后的 U 和 Th 溶液在 110℃ 电热板上蒸干, 并加数滴浓 HNO<sub>3</sub>, 转化为 HNO<sub>3</sub> 体系供质谱测定用。质谱分析在 Nu Plasma HR 多接收器等离子体质谱仪上进行, 用 0.2 mol/L HNO<sub>3</sub> 溶解, 稀释到合适的 U 和 Th 浓度后上质谱测定 U 和 Th 的同位素含量。

样品溶液通过 DSN-100 型膜去溶装置引入质谱仪。每组 (block) 数据采集 20 个数据点, 每点的积分时间为 20 秒, 每组数据采集之前进行 20 秒的背景测定。

#### 2.2 <sup>4</sup>He 同位素含量测试流程

<sup>4</sup>He 同位素含量的测试是在中国地质科学院地质研究所氦-氩实验室的多接收稀有气体质谱仪 GV Helix MC 上进行的。测试前首先需调试 <sup>4</sup>He 同位素的灵敏度和峰形, 然后测量标准空气 (0.1cc STP) 中 <sup>4</sup>He 同位素的峰高, 最后测量样品中 <sup>4</sup>He 同位素的峰高, 通过标准空气中 <sup>4</sup>He 同位素含量和峰高值为样品

\*本文得到国家重点基础研究发展计划 (编号 2009CB421001)、国家科技支撑计划 (编号 2006BAB01A08)、国土资源部公益性行业科研专项经费 (编号 200911043-13) 和国土资源大调查项目 (编号 1212010761402; 1212010816039) 资助

第一作者简介 陈 文, 男, 1962 年生, 博士, 研究员, 主要从事同位素地质年代学研究, Email: chenwenf@vip.sina.com

中 $^4\text{He}$ 同位素含量赋值。

磷灰石样品在钽坩埚中用石墨炉加热到 $1\,300^\circ\text{C}$ 熔样,采用超低温冷冻净化( $-196^\circ\text{C}$ )和锆-铝合金吸气泵吸附净化的双重净化模式净化样品中释放出的气体。净化后的气体连通到质谱仪,用配有 $10^{12}$ 放大器板的法拉第杯测量 $^4\text{He}$ 同位素峰。质谱分析在计算机操控下进行,采集20组数据,回归到时间零点后得出 $^4\text{He}$ 峰高值。

### 3 在金属矿床年代学研究中的应用

由于氦同位素可以被保存在橄榄石、辉石、角闪石、石榴子石、锆石、榍石、磷灰石、褐帘石(Wolf et al., 1997)、磁铁矿(Fanale et al., 1962)和赤铁矿(Wernicke et al., 1994)等矿物中,用(U-Th)/He技术可以对这些矿物进行年龄测定,从而为矿床(特别是金属矿床)年代学研究开辟了新的途径。

#### 3.1 金属矿床的直接定年

金属矿床的年代学研究一直是困难的事情,原因是几乎所有的传统同位素定年手段都不能直接测定金属矿物的年龄,金属矿床中也很难找到可供同位素定年分析用的替代矿物。由于大部分金属矿物都含有微量的U、Th,并且其衰变产物He可以被保持在矿物中,因此,用(U-Th)/He同位素定年技术可以实现对金属矿床的直接定年。

#### 3.2 金属矿床后期改造时代研究

金属矿床在形成以后往往会受到后期地质事件的改造。相对于形成矿床的成矿事件,这种后期的改造事件更多的是动力改造或低温作用。大多数的传统同位素体系由于封闭温度较高,而不能准确记录这些后期改造信息。但(U-Th)/He同位素体系由于封闭温度很低,很容易受到后期改造事件的扰动,从而能够记录这些后期事件的时代。利用矿床中或同期遭受改造作用的围岩中的低封闭温度矿物进行(U-Th)/He同位素定年分析,可以获取金属矿床遭受后期地质事件改造的年龄信息。

#### 3.3 金属矿床揭顶时代研究

研究金属矿床揭顶时代对寻找隐伏矿床具有指导意义。由于(U-Th)/He同位素体系具有对低温敏感的特性,如,磷灰石的氦封闭温度仅为 $45\sim 90^\circ\text{C}$ (相当于地下 $1.5\sim 3\text{ km}$ 深度处的地温),因此,磷灰石可以用来确定金属矿床的揭顶时代。从金属矿床中选出磷灰石矿物,不论其是否和金属矿物同期生成,该磷灰石的(U-Th)/He年龄都可以视为金属矿床的揭顶年龄。

### 参 考 文 献

- Fanale F P and Kulp J L. 1962. The helium method and the age of the Cornwall, Pennsylvania magnetite ore [J]. *Econ. Geol.*, 57 (5): 735-746.
- Farley K. A. 2002. (U-Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications[A]. In: Porcelli P D, Ballentine C J and Wieler R, eds. *Noble gas geochemistry, reviews in mineralogy and geochemistry*[C]. 47:819-843.
- Rutherford E. 1905. Present problem in radioactivity [J]. *Popular Science*(May), 1-34.
- Strutt R. 1908. The accumulation of helium in geologic time [J]. *Roy. Soc. London Proceedings*, 81A: 272-277.
- Warnock A C, Zeitler P K, Wolf R A and Bergman S C. 1997. An evaluation of low-temperature apatite (U-Th)/He thermochronometry[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 5371-5377.
- Wernicke R S and Lippolt H J. 1994.  $^4\text{He}$  age discordance and release behavior of a double shell botryoidal hematite from the Schwarzwald, Germany[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58 (1): 421-429.
- Wolf R, Farley K and Silver L. 1997. Assessment of (U-Th)/He thermochronometry: The low-temperature history of the San Jacinto Mountains, California[J]. *Geology*, 25 (1): 65-68.