

# 流体出溶和演化过程中的 Fe 同位素分馏

——以安徽新桥硫铁矿矿床为例\*

王 跃, 朱祥坤

(中国地质科学院地质研究所国土资源部同位素地质重点实验室, 北京 100037)

同位素示踪技术是矿床学研究的重要手段。近代成矿理论的许多重大进展都得益于同位素示踪技术(C、O、S、Pb、Sr、Nd等)的应用。新近发展起来的Fe同位素体系为矿床学研究提供了新的示踪技术,但如何运用这些新同位素技术对矿床学中的重大科学问题进行制约仍有待于探索。流体出溶和演化过程中Fe同位素是否发生分馏是利用这一新的同位素体系对金属物质来源和成矿作用过程进行示踪的关键所在。本研究以安徽新桥硫铁矿矿床为研究对象,进行流体出溶和演化过程中Fe同位素行为的探索研究。

安徽铜陵矿集区是长江中下游铁铜成矿带中的一个重要成矿区,新桥大型Cu-Au-Fe-S矿床为该矿区重要的矿床之一。对新桥矿区内的Fe同位素进行研究具有重要的意义。一方面,铁作为长江中下游铁铜成矿带中直接成矿的元素,对Fe同位素的研究将可能更为直接地示踪成矿物质来源和过程。另一方面,Fe同位素示踪技术在矿床学领域的应用研究还十分薄弱,通过对新桥典型矿区的铁同位素进行研究,可以进一步为矿床中铁同位素的分布特征建立格架,推动铁同位素在矿床学领域的应用。

本研究以新桥矿床发育的磁铁矿、胶状黄铁矿、黄铁矿和黄铜矿为对象。通过野外和镜下观察,磁铁矿至少可以分为2种,一种呈角砾状被胶状黄铁矿包裹,产于层状矿体之中;另一种为结晶粒状与黄铁矿相伴产于矽卡岩型矿体之中。胶状黄铁矿穿插或包裹磁铁矿角砾。黄铁矿主要为粒状结构,分为粗粒和细粒两种。细粒黄铁矿穿插磁铁矿和胶状黄铁矿,并被黄铜矿所穿插,粗粒黄铁矿与黄铜矿伴生,自形程度高。从这些观测中,我们可以简单地推断出矿物的生成顺序为:磁铁矿→胶状黄铁矿→细粒黄铁矿→黄铜矿+粗粒黄铁矿。

本次研究选取了新桥矿床的石英二长闪长岩体、有穿切、包裹关系的单矿物和围岩碳酸盐岩样品进行了Fe同位素测定。将定量称取的样品放入Teflon瓶中,以2 N HNO<sub>3</sub>+HF溶解岩体全岩样品,以6 M HCl溶解磁铁矿和碳酸盐岩样品,以2 M HNO<sub>3</sub>溶解黄铁矿、胶状黄铁矿和黄铜矿样品,溶解后的样品均转换为盐酸介质,利用离子交换层析法实现Fe与其他元素的有效分离(唐索寒,2006)。Fe同位素测定在Nu Plasma HR型MC-ICP-MS的高分辨模式下进行(朱祥坤等,2008),仪器质量歧视采用样品-标准交叉法校正,标样和样品进样溶液的浓度相对偏差控制在10%以内。测试结果以样品的Fe同位素比值相对于标样(IRMM-014)的同一同位素比值的千分偏差表示:

$$\delta^{57}\text{Fe} = [({}^{57}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{样品}} / ({}^{57}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{IRMM-014}} - 1] \times 1000。$$

所测试的35个样品的Fe同位素组成的总体变化范围为 $\delta^{57}\text{Fe} = -1.22\text{‰} \sim 0.73\text{‰}$ 。其中,石英二长闪长岩样品的Fe同位素组成变化范围为 $\delta^{57}\text{Fe} = -0.15\text{‰} \sim 0.29\text{‰}$ ,平均值为0.21‰;内矽卡岩全岩样品的Fe同位素组成为 $\delta^{57}\text{Fe} = -0.98\text{‰}$ ;外矽卡岩全岩样品的Fe同位素组成变化范围为 $\delta^{57}\text{Fe} = -0.04\text{‰} \sim 0.09\text{‰}$ ,平均值为0.03‰;围岩碳酸盐岩样品的Fe同位素组成变化范围为 $\delta^{57}\text{Fe} = -0.13\text{‰} \sim 0.41\text{‰}$ ,平均值为0.07‰;磁铁矿的Fe同位素组成变化范围为 $\delta^{57}\text{Fe} = -0.54\text{‰} \sim 0.20\text{‰}$ ,平均值为-0.11‰;胶状黄铁矿的Fe同位素组成变化范围

\*本文得到国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411408)的资助

第一作者简介 王 跃,女,1984年生,博士研究生,同位素地球化学专业。Email:wuyv@yahoo.com.cn

为  $\delta^{57}\text{Fe}=-1.22\text{‰}\sim-0.15\text{‰}$ , 平均值为  $-0.41\text{‰}$ ; 细粒黄铁矿的Fe同位素组成变化范围为  $\delta^{57}\text{Fe}=-1.05\text{‰}\sim-0.39\text{‰}$ , 平均值为  $-0.38\text{‰}$ ; 粗粒黄铁矿的Fe同位素组成变化范围为  $\delta^{57}\text{Fe}=-0.11\text{‰}\sim-0.73\text{‰}$ , 平均值为  $0.39\text{‰}$ ; 黄铜矿的Fe同位素组成变化范围为  $\delta^{57}\text{Fe}=-0.98\text{‰}\sim-0.72\text{‰}$ , 平均值为  $-0.82\text{‰}$ 。

当前的测定结果显示:

(1) 相对于新桥石英二长闪长岩体, 内砂卡岩和最早形成的磁铁矿矿物富集Fe的轻同位素(图1a)。前人的实验和理论研究均表明, Fe(II)矿物富集Fe的轻同位素, Fe(III)矿物富集Fe的重同位素, 即磁铁矿会优先从成矿流体中沉淀出Fe的重同位素。因此, 相对磁铁矿来说, 成矿流体更为富集Fe的轻同位素, 进而, 流体相对于岩体富集Fe的轻同位素。流体相对岩体富集Fe的轻同位素可以由两种机制导致: 一是流体出溶后富集Fe的轻同位素的围岩组分的加入; 二是流体从岩体出溶的过程中发生了Fe同位素分馏。如上所述, 围岩相对于磁铁矿富集Fe的重同位素, 因此磁铁矿的Fe同位素组成特征无法通过围岩组分的加入而实现。因此, 我们可以得出流体出溶过程中Fe同位素发生分馏的结论, 出溶过程的流体相对于岩体富集Fe的轻同位素;

(2) 同种矿物和不同矿物间存在Fe同位素的时间分带和空间分带关系。对于硫化物来说, 最早形成的胶状黄铁矿的Fe同位素组成最轻, 最晚形成的黄铜矿+粗粒黄铁矿的Fe同位素组成最重, 介于两者之间形成的细粒黄铁矿的Fe同位素组成居于二者之间(图1a); 对于粒状黄铁矿来说, 浸染于内砂卡岩中的粒状黄铁矿具有最轻的Fe同位素组成, 浸染于外砂卡岩中的粒状黄铁矿具有最重的Fe同位素组成, 矿体中的粒状黄铁矿的Fe同位素组成介于二者之间(图1b)。流体演化过程中Fe同位素发生分馏是对Fe同位素分带现象的一个最为合理的解释。Fe(III)矿物优先从流体中沉淀Fe的重同位素, 沉淀导致流体逐渐富集Fe的轻同位素; Fe(II)矿物优先从流体中沉淀Fe的轻同位素, 沉淀导致流体逐渐富集Fe的重同位素。随着含Fe矿物的不断沉淀, 流体的Fe同位素组成随时间发生改变, 从而形成上述分带现象。

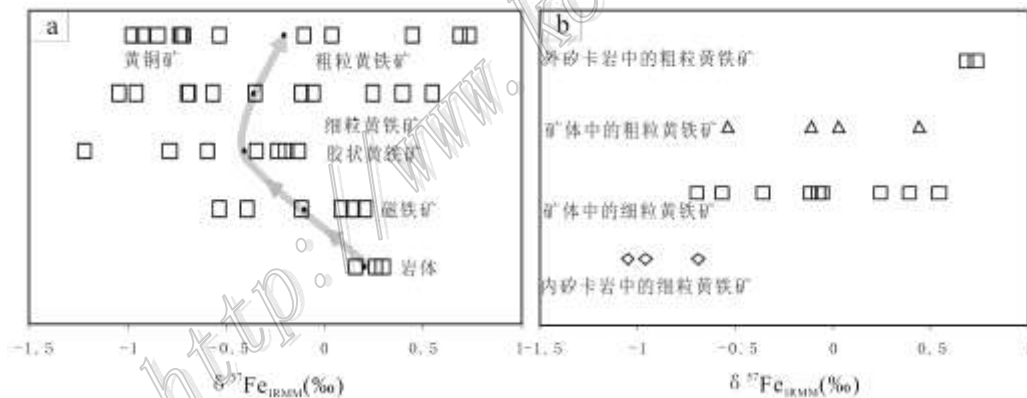


图 1 新桥矿床的Fe同位素组成和时间、空间分带关系

### 参考文献

- 李 津, 朱祥坤, 唐索寒. 2008. 低温环境下铁同位素分馏的若干重要过程[J]. 岩石矿物学杂志, 27(4): 305-316.
- 唐索寒, 朱祥坤, 蔡俊军, 等. 2006a. 用于多接收器等离子体质谱铜铁锌同位素测定的离子交换分离方法[J]. 岩矿测试, 25(1): 5-8.
- 朱祥坤, 李志红, 赵新苗, 等. 2008a. 铁同位素的 MC-ICP-MS 测定方法与地质标准物质的铁同位素组成[J]. 岩石矿物学杂志, 27(4): 263-272.
- Anbar A D, Jarzecki A A and Spiro T G. 2005. Theoretical investigation of iron isotope fractionation between  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  and  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ : Implications for iron stable isotope geochemistry[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69: 825-837.
- Johnson C M, Skulan J L, Beard B L, Sun H, Nealon K H and Braterman P S. 2002. Isotopic fractionation between Fe(III) and Fe(II) in aqueous solutions[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 195: 141-153.
- Zhu X K, Guo Y, et al. 2002. Mass fractionation processes of transition metal isotopes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 200(1-2): 47-62.