

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2020.02.002

黄铁矿 Re-Os 同位素定年在金属矿床研究中的应用

李重阳^{1,2}, 陈雪¹

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 河南 洛阳 471023;

2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要: 黄铁矿是地壳分布最为广泛的金属矿物,其 Re-Os 同位素体系在金属矿床成矿年代和示踪成矿物质来源研究中具有重要地质意义。文章简述了 Re-Os 同位素体系成矿定年和示踪成矿物质来源的基本原理,综述了近些年黄铁矿 Re-Os 同位素体系在金属矿床研究应用中取得的成果;认为该方法具有测试样品易选择、测试方法多样性等特征,但该方法目前尚存在黄铁矿样品选择的多样性、测试标样不成熟和分析结果误差较大等不足之处,有待进一步研究。

关键词: Re-Os 同位素体系;黄铁矿;金属矿床;成矿年代;示踪成矿物质来源;研究应用

中图分类号: P597 **文献标识码:** A

0 引言

黄铁矿是地壳中分布非常广泛的一种矿物,几乎在各种矿床中都可以出现,并且与大多数金属矿床具有某些相关的成因联系^[1-2]。

Re-Os 同位素系统是研究金属矿床成矿时代最直接和有效的方法,近年来已逐渐成为矿床学和同位素地球化学研究领域的一个新的热点。其中,黄铁矿 Re-Os 同位素体系在矿床学中的应用也是其中之一。黄铁矿 Re-Os 同位素体系法不仅丰富了金属矿床年代学研究手段,还可以示踪成矿物质来源,有助于更全面认识矿床成因。

1 黄铁矿特征

黄铁矿是所有金属矿物中分布最广泛的矿物,它可在许多金属矿床中伴生。黄铁矿的结构、构造

类型十分丰富^[1],在不同成因类型矿床中形成各种不同组构的黄铁矿。比如:在热液矿床中具有晶骸结构和文象结构,在岩浆铜镍硫化物矿床中黄铁矿可呈火焰状胶体结构,在沉积矿床中可呈草莓构造、球状构造和胶状构造,在热水沉积矿床中黄铁矿可呈现叠层石结构,在变质变形矿床中可呈扁豆状构造、香肠状构造、眼球构造及压力影构造,在氧化带中黄铁矿易于被褐铁矿交代呈交代残留结构或假象结构^[1]。此外,在一个矿床的不同成矿期次,形成的黄铁矿结构构造也不尽相同。黄铁矿性脆,在后期构造应力的作用下可形成压碎结构或者斑状压碎结构。

2 成矿年代学研究中的应用

2.1 Re-Os 同位素体系定年基本原理

Re 和 Os 分别是ⅦB族和Ⅷ族元素,分别具亲铜和亲铁的地球化学性质。从地壳向地核,Re、Os

收稿日期: 2019-09-17; 改回日期: 2020-03-11; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 河南省地质矿产勘查开发局青年科技创新项目(豫地矿青科创[2020]3号)、河南省科技攻关项目(编号 202102310290)、河南省自然资源厅科技攻关项目(豫国土资函[2016]106号-01、豫国土资发[2018]98号-03)联合资助。

作者简介: 李重阳(1988—),男,工程师,硕士,主要从事固体矿产勘查、矿床学与矿床地球化学研究工作。通信地址:河南省洛阳市洛龙区开元大道与长兴街交叉地口矿大厦 708 室;邮政编码:471023;E-mail:lichongyang8899@126.com

的丰度值有所提高。

元素 Re 具有两个同位素: ^{185}Re (62.6%) 和 ^{187}Re (37.4%)。 ^{187}Re 通过一次 β 衰变为 ^{187}Os 。Re 是分散元素,几乎全部存在于其它元素的矿物中。Re 的地球化学性质近似于 Mo,在 Mo 矿物形成时,Re 能以类质同象方式置换硫化物矿物晶格中的 Mo、W 等元素。在辉钼矿中,Re 达到最大富集,它的浓度从痕迹到高达 1.88%,变化较大。其它一些硫化物矿物中也含少量的 Re,黄铁矿中微量到 20.0×10^{-6} ,黄铜矿中为 $0.08 \times 10^{-6} \sim 20.0 \times 10^{-6}$,辉铜矿中为 0.04×10^{-6} 等^[3-4]。

元素 Os 是铂族元素成员,其地球化学性质近似于 Fe,因此在铁陨石中含量较高 ($0.60 \times 10^{-6} \sim 17.0 \times 10^{-6}$)。在自然界中,辉钼矿中所有的 ^{187}Os 是 ^{187}Re 的衰变而来^[5],时代越老的辉钼矿中 Os 的含量越高。而黄铁矿中的 Os 大部分也是经过放射衰变而来^[6]。

放射性 ^{187}Re 通过 β 衰变生成 ^{187}Os ,放射性成因 ^{187}Os 的增长可以用放射性衰变方程来描述:

$$(^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os})_p = (^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os})_i + (^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os})_p \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

式中,脚注“p”和“i”分别代表现在(测定)值和初始值; $(^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os})_i$ 为对于样品来说 Re-Os 体系开始封闭时的同位素比值; λ 为 ^{187}Re 的 β 衰变常数,目前采用值为: $\lambda = (1.64 \pm 0.05) \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$; t 为 Re-Os 体系自封闭至今的历时。

当一组样品满足等时线 3 个条件时:同一来源(有共同的 $(^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os})_i$ 初始比)、同时形成(具有相同形成年龄)、自矿物或岩石形成后 Re-Os 体系

一直保持封闭,那么在 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os} - ^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 图上,它们将能够拟合成一条直线;通过该直线的斜率,即可求得年龄^[7]。

2.2 黄铁矿 Re-Os 同位素体系在金属矿床成矿定中的应用

20 世纪 90 年代初,随着负离子热电离质谱方法(N-TIMS)成功地进行 Re-Os 同位素高精度测量,以及新的溶样方法和实验条件的改进,黄铁矿 Re-Os 同位素定年方法才得以应用于金属矿床研究中。随着电感耦合等离子质谱测试(ICP-MS)方法的日臻成熟以及测试精度的不断提高,目前研究黄铁矿 Re-Os 同位素体系更多选择 ICP-MS 方法。

薛春纪等^[8]对滇西北金顶铅锌矿床进行了浸染状黄铁矿 Re-Os 同位素定年,获得等时线年龄 $72 \text{ Ma} \pm 4.4 \text{ Ma}$ 。同时对金顶铅锌矿床外围的白秧坪矿床进行了石英 $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ 定年,所得到结果为 $62.78 \text{ Ma} \pm 0.60 \text{ Ma}$,两者在成矿时代上较为接近。丰成友等^[9]对青海格尔木驼路沟喷流沉积型钴(金)矿床的黄铁矿进行 ICP-MS 法 Re-Os 定年,得到了 2 组等时线年龄,分别为 $432 \text{ Ma} \pm 23 \text{ Ma}$ (图 1a)和 $442 \text{ Ma} \pm 17 \text{ Ma}$ (图 1b),两组年龄在误差范围内一致。

谢建成等^[10]运用 ICP-MS 法黄铁矿 Re-Os 同位素定年对安徽铜陵新桥 Cu-Au-Fe-S 矿床中的黄铁矿进行了精确定年测试,首次获得该矿床黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 $126 \text{ Ma} \pm 11 \text{ Ma}$,代表了铁硫化物的成矿年龄;其 Os 同位素初始值为 1.2,反映了成矿作用发生时没有普通 Os 加入到同位素体系中,所有的 Os 均为放射性成因。唐永永等^[11]在金顶铅锌矿进行了黄铁矿 Re-Os 同位素定

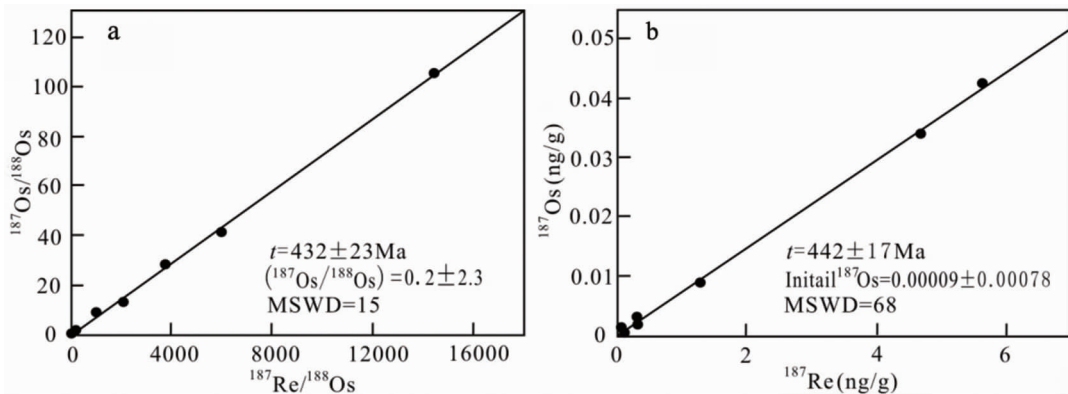


图 1 青海格尔木驼路沟矿床黄铁矿 Re-Os 等时线年龄^[9]

Fig. 1 Pyrite Re-Os isochron of Tuolugou Co(Au) deposit, Golmud, Qinghai province

a. $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} - ^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 等时线图; b. $^{187}\text{Os} - ^{187}\text{Re}$ 相关图解

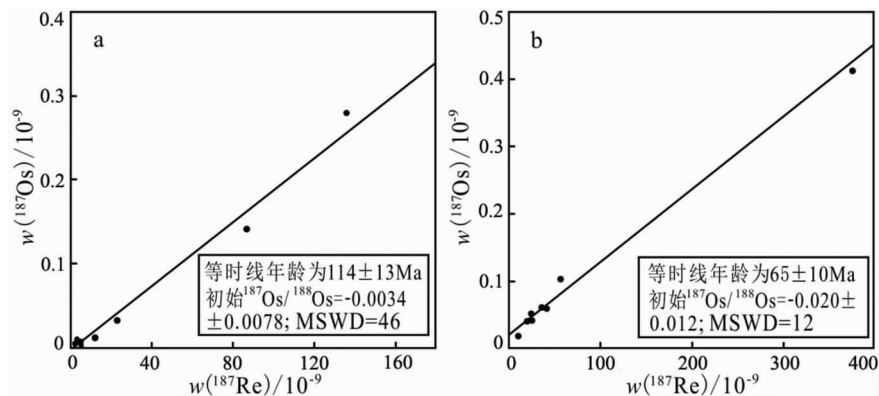


图2 云南金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 等时线年龄^[11]

Fig. 2 Isochron ages of pyrite, age of diagenetic pyrite (a) and age of hydrothermal pyrite (b) of the Jinding Pb-Zn ore deposit, Yunnan province

a. 沉积成岩期; b. 热液期

年,获得两组等时线年龄分别为 $114 \text{ Ma} \pm 13 \text{ Ma}$ (图 2a)和 $65 \text{ Ma} \pm 10 \text{ Ma}$ (图 2b)。作者认为, $114 \text{ Ma} \pm 13 \text{ Ma}$ 可能代表沉积成岩过程中的一起矿化年龄, $65 \text{ Ma} \pm 10 \text{ Ma}$ 可能是该矿床热液活动的开始时间。高炳宇等^[12]测定金顶铅锌矿砂砾岩铅锌矿石中沥青的 Re-Os 等时线年龄为 $68 \text{ Ma} \pm 5 \text{ Ma}$,代表了早于铅锌矿化物成矿的古油气成藏时代,这与热液期黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄较一致,表明黄铁矿 Re-Os 同位素定年具有一定的地质意义。

邵建波等^[13]对吉林省塔东大型铁矿进行浸染状黄铁矿 Re-Os 同位素定年,得到等时线年龄 $401 \text{ Ma} \pm 41 \text{ Ma}$,该年龄与矿区北部苇芦河华力西早期二长花岗岩中获得的 Rb-Sr 同位素年龄($407 \text{ Ma} \pm 28 \text{ Ma}$)基本一致,表明黄铁矿 Re-Os 同位素年龄基本可信。Ding Chengwu 等^[14]对兴蒙造山带西段图古里格金矿床进行正长花岗岩锆石 U-Pb 测年和矿床黄铁矿 Re-Os 定年,获得正长花岗岩 U-Pb 年龄 $276 \text{ Ma} \pm 2 \text{ Ma}$ 和黄铁矿 Re-Os 年龄 $268 \text{ Ma} \pm 15 \text{ Ma}$,正长花岗岩的年龄与金矿化年龄在误差范围内一致。Bai Yang 等^[15]对河北省金厂峪金矿含金石英脉中的黄铁矿进行 Re-Os 同位素测年获得 $223.5 \text{ Ma} \pm 6.0 \text{ Ma}$,该结果与宋扬等^[16]在金厂峪金矿获得的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄 $242.6 \text{ Ma} \pm 6.8 \text{ Ma}$ 接近。Huang Xiaowen 等^[17]对东天山哈密地区黑风山铁矿、双峰山铁矿和双泉子铁铜矿进行黄铁矿 Re-Os 同位素定年,分别得到 $301 \text{ Ma} \pm 23 \text{ Ma}$ 、 $294.5 \text{ Ma} \pm 7.2 \text{ Ma}$ 和 $295.2 \text{ Ma} \pm 7.3 \text{ Ma}$ 。Danny Hnatyshin 等^[18]对爱尔兰 Lisheen 和 Silvermines 铅锌矿进行黄铁矿 Re-Os 同位素定年,获得

Lisheen 矿床黄铁矿 Re-Os 年龄 $346.6 \text{ Ma} \pm 3.0 \text{ Ma}$ 和 Silvermines 矿床黄铁矿 Re-Os 年龄 $334.0 \text{ Ma} \pm 6.1 \text{ Ma}$ 。其中, Lisheen 矿床黄铁矿 Re-Os 年龄在 Waters 等^[19]厘定的赋矿地层 Waulsortian Limestone 组石灰岩沉积时代内($353 \text{ Ma} - 347 \text{ Ma}$),这一证据证明 Lisheen 矿床属 MVT 铅锌矿床。Zhao Lutong 等^[20]对塔里木西部萨雷克铜矿床与铜硫化物共生的黄铁矿进行 Re-Os 同位素测试,获得 Re-Os 等时线年龄 $115.8 \text{ Ma} \pm 4.7 \text{ Ma}$,表明该矿床形成于燕山期晚的白垩世早期。Liu Yingchao 等^[21]获得伊朗 Irankuh 铅锌矿黄铁矿 Re-Os 年龄为 $65.96 \text{ Ma} \pm 0.76 \text{ Ma}$ 。

2.3 讨论

随着分析测试技术的发展,黄铁矿 Re-Os 在成矿年代学研究方面的成果愈来愈多,测试精度也愈来愈高,丰富了矿床成因认识,促进了矿床学的发展。但是,相对于辉钼矿 Re-Os 定年、绢云母 Ar-Ar 定年等成矿年龄测试方法,黄铁矿 Re-Os 成矿年龄测试方法在金属矿床成矿年代学方面的研究仍然处于初始阶段,制约其发展的关键问题是成矿期黄铁矿的样品选择问题。因此对于矿床成矿阶段的精细划分,选择能够代表成矿阶段的黄铁矿是开展黄铁矿 Re-Os 成矿年代学研究的前提。

3 示踪成矿物质来源方面的应用

3.1 黄铁矿 Re-Os 同位素体系示踪成矿物质来源基本原理

示踪成矿物质来源是 Re-Os 同位素体系在矿

床研究的另一重要应用。元素 Re 和 Os 地球化学差异性较大,Os 被认为是一种相容性元素,而 Re 是一种不相容元素,且与 S 丰度相关性好。在壳幔分异和地球化学循环过程中,Os 趋于在地幔富集,而 Re 相对亲地壳。由于地壳相对富 Re,随着 ^{187}Re 通过 β 衰变, ^{187}Os 成分在地壳中含量会随之增高,相应 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值发生变化^[22]。因此,Re-Os 同位素体系对硫化物金属矿床形成具有示踪性,并且对成矿过程中地壳物质混入程度具有高度灵敏的指示性^[23-24]。蒋少涌等^[25-26]统计了国内外关于球粒陨石、地幔和地壳的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值研究成果,得到球粒陨石 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.127,地幔 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.105~0.152,大陆地壳 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值则高达 3.63。由此可以根据 Re-Os 同位素特征判断成岩成矿物质的来源。

3.2 黄铁矿 Re-Os 同位素体系示踪成矿物质来源方面的应用

刘玉龙等^[27]采用 ICP-MS 法黄铁矿 Re-Os 定年,得到白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床晚期硫化物为加里东期 $439\text{ Ma} \pm 86\text{ Ma}$ 的等时线年龄;样品具有高的 $w(\text{Re})/w(\text{Os})$ 值,高的放射成因 Os 比值,极低普通 Os 含量,具有壳源成因特征。陈懋弘等^[28]进行了贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床浸染状含砷黄铁矿 ICP-MS 法 Re-Os 同位素定年研究,获得等时线年龄 $193\text{ Ma} \pm 15\text{ Ma}$;含砷黄铁矿 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值 1.127 ± 0.043 ,指示成矿物质来源于地壳而不是地幔。梁婷等^[22]研究了广西铜坑锡多金属矿床黄铁矿的 ICP-MS 法 Re-Os 同位素组成特征,获得黄铁矿等时线年龄为 $122\text{ Ma} \pm 44\text{ Ma}$;黄铁矿 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值 0.56 ± 0.12 , $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值 $0.468 \sim 1.069$, γ_{Os} 值为 $197.46 \sim 394.16$,均高于地幔而低于地壳,结合普通 Os 对 $w(\text{Re})/w(\text{Os})$ 值的图解(图 3),说明成矿物质是壳幔混合来源。郭维民等^[29]通过安徽铜陵新桥矿床下盘矿化中的黄铁矿 ICP-MS 法 Re-Os 同位素定年获得等时线年龄 $319\text{ Ma} \pm 13\text{ Ma}$,与层状硫化物矿体的赋存层位吻合,支持层状硫化物矿体为海底喷流沉积成因,代表了海底喷流沉积的成矿时代。石贵勇等^[30]对云南哀牢山金矿带镇沅超大型金矿载金黄铁矿进行 HR-ICP-MS 法 Re-Os 同位素定年,获得其等时线年龄为 $229\text{ Ma} \pm 38\text{ Ma}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值 0.68 ± 0.24 , γ_{Os} 值为 442 ± 91 ,黄铁矿 $w(\text{Re})/w(\text{Os})$ 值为 $40.8 \sim 100.5$,结合地幔-地壳-矿石中 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 随

时间演化关系图(图 4),认为镇沅超大型金矿至少在印支期存在一次重要的成矿事件,该期成矿物质来源属壳-幔混合来源,但以幔源为主。

3.3 讨论

成矿物质来源是矿床成因研究的关键问题之一,矿床学者常用成矿期的硫化物硫铅同位素和与成矿密切关系的脉石矿物碳氢氧同位素来判断成矿流体的来源,进而间接判断成矿物质来源。但近年来笔者在工作中发现,个别多金属硫化物矿床共生脉石矿物很少(例如:河南省崂山东部中河银铅锌矿

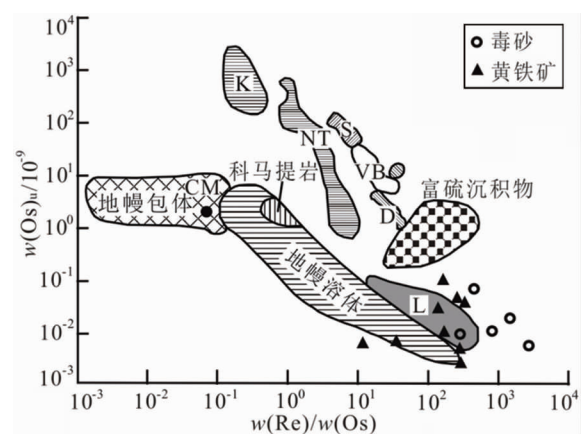


图 3 广西铜坑锡多金属矿床黄铁矿

$w(\text{Os})_a - w(\text{Re})/w(\text{Os})$ 图解^[22]

Fig. 3 $w(\text{Os})_a$ vs $w(\text{Re})/w(\text{Os})$ plot of pyrite in Tong keng tin-pollmetallic deposit, Guang xi

D. Duluth 硫化物矿石; S. Sudbury 硫化物矿石;

K. Kambalda 硫化物矿石; NT. Noril's-Talnakh 硫化物矿石;

VB. Voisey's-Bay 硫化物矿石;

CM. 球粒陨石地幔丰度; L. Lewisian 下地壳

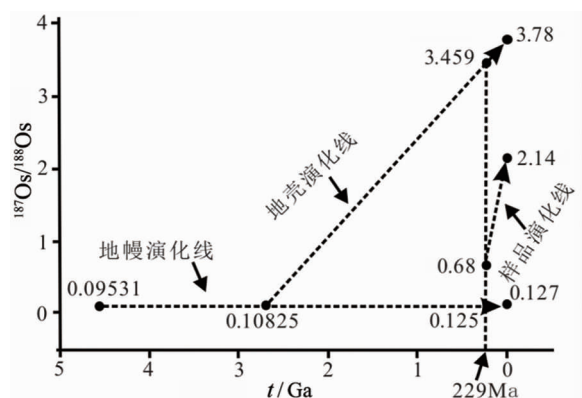


图 4 云南镇沅金矿载金黄铁矿 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}-t$

演化关系图^[30]

Fig. 4 Evolution diagram of $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ vs time of pyrite in Zhenyuan gold deposit, Yunnan province

床),难以开展 C-H-O 同位素体系研究。受黄铁矿样品选择的影响,目前有的黄铁矿 Re-Os 同位素体系示踪成矿物质来源成果甚少,因此开展黄铁矿 Re-Os 同位素体系示踪成矿物质来源能够丰富成矿物质来源判别方法,可促进矿床学研究发展。

4 优点和存在问题

4.1 黄铁矿 Re-Os 同位素体系应用优点

(1)黄铁矿分布非常广泛,对于研究金属矿床的黄铁矿 Re-Os 同位素体系具有极好的便利条件。丰富了金属矿床成矿年代学和成矿物质来源研究方法。

(2)Re-Os 同位素体系形成后难以受后期地质作用影响,具有较好的稳定性^[31],可精确限定成矿时代。并且该方法能够补充 Rb-Sr、Sm-Nd 等同位素体系仅能进行成矿年龄研究,而无法示踪成矿物质来源的局限性。

(3)在多金属硫化物矿床中进行黄铁矿 Re-Os 同位素体系研究,能够较直观地反映出与成矿关系密切的硫化物年龄,能够较为可靠的代表成矿年龄,是一种可信的地质研究方法。

4.2 黄铁矿 Re-Os 同位素体系应用存在的问题

(1)黄铁矿的多样性和多期性,不同地质环境形成的黄铁矿差异较大,对于黄铁矿 Re-Os 同位素样品采集至关重要。如,唐永永等^[11]在金顶铅锌矿采集了两期地质特征不同的黄铁矿,得到了相差很大的成矿年龄(沉积成岩期为 $114 \text{ Ma} \pm 13 \text{ Ma}$,热液成矿期为 $65 \text{ Ma} \pm 10 \text{ Ma}$)。

(2)目前 Re-Os 同位素样品分解有多种方法和多种测试方法。常用的样品分解方法有:铈镍火试金法、碱熔法、Carius 管法、HPA—S 高温高压法、聚四氟乙烯容器酸溶法、微波消解-酸溶法;Re 的分离方法有离子交换法、丙酮萃取和萃取-离子交换法等;Os 的分离方法有常规蒸馏法、原位蒸馏法、 CHCl_3 或 CCl_4 萃取法、液溴萃取法和微蒸馏法^[32]。目前常用测试方法有:负热电离质谱法(N-TIMS)、电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)和微区原位分析^[33]。不同的样品分解方法和 Re、Os 分离富集方法以及测试方法对于黄铁矿 Re-Os 同位素体系数据可靠性有很大的影响。

(3)目前国内外关于黄铁矿 Re-Os 同位素定年标准物质研究的相关成果相当少。丰成友(2006)研

究青海格尔木驼路沟喷流沉积型钴(金)矿床黄铁矿 Re-Os 同位素年龄时,试验流程由国家一级标准物质 GBW04435(HLP)标样监控,该标样在国内外得到了应用,但该标样的 Re、Os 含量与研究对象黄铁矿中的 Re、Os 含量差别较大,对于测年结果影响比较大。

(4)目前已获得黄铁矿 Re-Os 同位素年龄相对于辉钼矿 Re-Os 同位素年龄误差普遍较大,这可能与黄铁矿 Re-Os 同位素体系分析的复杂性和不确定性有关^[34]。

5 结语

(1)黄铁矿作为一种分布最为广泛的金属矿物,其 Re-Os 同位素体系在金属矿床成矿年代和示踪成矿物质来源研究中具有重要地质意义。

(2)黄铁矿 Re-Os 同位素体系在金属矿床研究中已经取得了诸多的研究成果,但是也存在一些问题有待探讨研究。随着黄铁矿 Re-Os 同位素体系研究工作的深入,准确采集黄铁矿 Re-Os 同位素定年样品、实验分析方法的可靠性提高以及黄铁矿 Re-Os 同位素定年标样的确定,黄铁矿 Re-Os 同位素体系将能够在金属矿床研究中得到更加合理的、科学的应用。

参考文献:

- [1] 卢静文,彭晓蕾.金属矿物显微镜鉴定手册[M].北京:地质出版社,2010:93-95.
- [2] 宫丽,马光.黄铁矿的成分标型特征及其在金属矿床中的指示意义[J].地质找矿论丛,2011,26(2):162-166.
- [3] 谢智,陈江峰.Re-Os 同位素体系在金属矿床研究中的应用[J].地质地球化学,1998,26(4):79-85.
- [4] 李志昌,路远发,黄圭成.放射性同位素地质学方法与进展[M].武汉:中国地质大学出版社,2004:259-263.
- [5] 王瑞延,毛景文,郝英,等.Re-Os 同位素体系在矿床地球化学中的应用[J].地质与勘探,2005,41(1):80-84.
- [6] 屈文俊,杜安道,任静.过氧化氢在黄铁矿的溶解过程中对铈-钼信号强度及年龄的影响[J].分析化学研究简报,2008,36(2):223-226.
- [7] 李永峰,毛景文,白凤军,等.Re-Os 同位素体系及其地质应用[J].地质与勘探,2004,40(1):64-67.
- [8] 薛春纪,陈毓川,王登红,等.滇西北金顶和白秧坪矿床地质和 He、Ne、Xe 同位素组成及成矿时代[J].中国科学(D 辑),2003,33(4):315-322.
- [9] 丰成友,张德全,屈文俊,等.青海格尔木驼路沟喷流沉积型钴(金)矿床的黄铁矿 Re-Os 定年[J].地质学报,2006,80(4):571-576.

- [10] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 安徽铜陵新桥 Cu-Au-Fe-S 矿床黄铁矿 Re-Os 定年及成矿意义[J]. 地质科学, 2009, 44(1): 183–192.
- [11] 唐永永, 毕献武, 武丽艳, 等. 金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 矿物学报, 2013, 33(3): 287–294.
- [12] 高炳宇, 薛春纪, 池国祥, 等. 云南金顶超大型铅锌矿床沥青 Re-Os 法测年及地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1561–1567.
- [13] 邵建波, 张希友, 王洪涛, 等. 吉林省塔东大型铁矿地球化学特征及黄铁矿 Re-Os 同位素定年[J]. 地质学报, 2014, 88(1): 83–98.
- [14] Chengwu Ding, Fengjun Nie, Leon Bagas, et al. Pyrite Re-Os and zircon U-Pb dating of the Tugurige gold deposit in the western part of the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt, China and its geological significance [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72(1): 669–681.
- [15] Yang Bai, Mingtian Zhu, Lianchang Zhang, et al. Auriferous pyrite Re-Os geochronology and He-Ar isotopic compositions of the Jinchangyu Au deposit in the northern margin of the North China Craton [J]. DOI: 10. 1016/j. oregeorev. 2019. 102948
- [16] 宋扬, 王瑞江, 聂凤军, 等. 冀东金厂峪金矿区印支期成矿作用的发现及地质意义[J]. 地球学报, 2011, 32(1): 125–128.
- [17] Xiaowen Huang, Liang Qi, Jianfeng Gao, et al. First Reliable Re-Os Ages of Pyrite and Stable Isotope Compositions of Fe(-Cu) Deposits in the Hami Region, Eastern Tianshan Orogenic Belt, NW China [J]. Resource Geology, 2013, 63(2): 166–187.
- [18] Danny Hnatyshin, Robert A Creaser, Jamie J Wilkinson, et al. Re-Os dating of pyrite confirms an early diagenetic onset and extended duration of mineralization in the Irish Zn-Pb ore field [J]. Geology, 2015, 43(2): 143–146.
- [19] Waters, C N, et al. A revised correlation of Carboniferous rocks in the British Isles [M]. Geological Society of London Special Report, 2011: 188.
- [20] Tongzhao Lu, Binwang Jing, Wangwang Yu, et al. Pyrite Re-Os geochronology of the Sareke sediment-hosted Cu deposit, Xinjiang, NW China [J]. DOI: 10. 1016/j. oregeorev. 2018. 11. 029
- [21] Yingchao Liu, Yucai Song, Mahmoud Fard, et al. Pyrite Re-Os age constraints on the Irankuh Zn-Pb deposit, Iran, and regional implications [J]. Ore Geology Reviews, 2019, 104: 148–159.
- [22] 梁婷, 王登红, 屈文俊, 等. 广西铜坑锡多金属矿黄铁矿的 Re-Os 同位素组成及成矿物质来源示踪[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 230–235.
- [23] Foster J G, Lambert D D, Frick L R, et al. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archean nickel ores from uncontaminated komatiites [J]. Nature, 1996, 382: 703–706.
- [24] 张苏坤, 郑有业, 孙祥, 等. Re-Os 同位素体系在金属矿床中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2012, 27(4): 491–497.
- [25] 蒋少涌. 铼-钌同位素地球化学进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4): 421–422.
- [26] 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 等. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2000, 36(6): 669–677.
- [27] 刘玉龙, 杨刚, 陈江峰, 等. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 科学通报, 2005, 50(2): 172–175.
- [28] 陈懋弘, 毛景文, 屈文俊, 等. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含砷黄铁矿 Re-Os 同位素测年及地质意义[J]. 地质论评, 2007, 53(3): 371–382.
- [29] 郭维民, 陆建军, 蒋少涌, 等. 安徽铜陵新桥矿床下盘矿化中黄铁矿 Re-Os 同位素定年: 海底喷流沉积成矿的年代学证据[J]. 科学通报, 2011, 56(36): 3023–3028.
- [30] 石贵勇, 孙晓明, 潘伟坚, 等. 云南哀牢山金矿带镇沅超大型金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 2012, 57(26): 2492–2500.
- [31] Stein H J, Morgan J W, Schersten A. Re-Os Dating of Low-Level Highly Radiogenic (LLHR) Sulfides: The Harn's Gold Deposit, Southwest Sweden, Records Continental-Scale Tectonic events [J]. Econ Geol, 2000, 95: 1657–1671.
- [32] 黄小文, 漆亮, 刘莹莹, 等. 黄铁矿 Re-Os 同位素定年化学前处理若干条件初探[J]. 地球化学, 2012, 41(4): 380–386.
- [33] 杨红梅, 凌文黎. Re-Os 同位素组成测试方法及其应用进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(10): 1014–1024.
- [34] 屈文俊, 杜安道, 李超. 黄铁矿 Re-Os 同位素定年技术方法及应用初探[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(增刊): 111.

Applications of age dating of the Re-Os system of pyrite to study on metal deposits

LI Chongyang^{1,2}, CHEN Xue¹

(1. No. 1 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Henan Provincile Bureau of Geo-exploration and Mineral Depvelopment, Luoyang 471023, Henan, China;

2. Key Laboratory of Au-Ag-Polymetallic Deposit Series and Deep-seated Metallogenic Prognosis of Henan Province, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: Pyrite is the most widely distributed crustal metallic mineral. Its Re-Os isotopic system is significant geologically to determine the ore-forming age and trace ore material sources. This paper describes the basic principle of age-dating and the ore material tracing of the Re-Os isotopic system and reviews the recent achievements of pyrite Re-Os isotopic system application to study on metal deposits. The Re-Os isotopic system is characterized by easy selection of the test sample and diversity of test methods. However, the defact is diversity of sample selection of pyrite and impaturity of the test sample and bigger erro of the analytical result thus should be furtherly improved.

Key Words: Re-Os isotope system; pyrite; metal deposit; ore-forming tims; trace the source of ore material; research and application