

磁铁矿 Re-Os 定年的可行性探讨

黄小文^{1,2}, 漆亮¹, 刘莹莹^{1,2}

(1 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

由于 Re、Os 独特的地球化学性质, Re-Os 同位素体系可以直接对矿床进行定年, 为矿床的年代学研究提供了新的途径。各种普通硫化物(如毒砂、黄铁矿、黄铜矿等)的 Re-Os 定年已得到广泛的应用(Stein et al., 1998; 2000; Arne et al., 2001; Morelli et al., 2004; 2005; Selby et al., 2009)。但是 Re-Os 定年在各种单矿物的选择方面主要是依据 Re、Os 元素的亲铁亲铜性质, 而其他因素对于 Re、Os 的富集影响研究较少, 特别是在热液体系中 Re、Os 的富集机制研究不够深入, 因而单矿物的选择基本局限于硫化物。除了硫化物, 氧化物(如磁铁矿)在热液矿床中也是比较常见的, 而且磁铁矿是最主要的矿石矿物, 磁铁矿的 Re-Os 年龄可能更能代表成矿年龄。目前磁铁矿的 Re-Os 定年主要集中在岩浆岩和各种热液矿床中。因此有必要对磁铁矿的 Re-Os 定年体系进行细致的探讨和研究, 为岩浆岩和热液矿床的定年提供新的思路。

1 理论依据

磁铁矿能否用于 Re-Os 定年主要是取决于磁铁矿中 Re、Os 的含量, 也就是 Re、Os 在磁铁矿和流体中的分配系数问题。在地幔熔融过程中, 由于 Re、Os 相容性的差异, Os 为高度相容元素, 富集在地幔残留相中。而 Re 为相容至中等程度不相容, 倾向于在熔浆中富集。因此, 对于地幔熔融过程中 Re、Os 的分配系数的实验研究较多(Fonseca et al., 2007; Mallmann et al., 2007; Righter et al., 2004)。由于 Re、Os 地球化学性质的复杂性, 对于它们的分配系数问题并无定论。当岩浆中的硫达到饱和时, Re、Os 更倾向于进入硫化物相(Sproule et al., 2002), 但是当岩浆中的硫不饱和且氧逸度发生变化时, 对于 Re 的分配行为仍存在争议。Fonseca 等(2007)的研究表明, 在强氧化性环境下, 即使有硫存在的情况下, O_2 控制着 Re 的分配行为, 而不是 S_2 。Righter 等(2007)对墨西哥火山带中玄武岩的 Re、Os 及 S 含量进行了详细研究, 并对氧化性环境下 Re 在磁铁矿中的分配行为进行了模拟研究。Righter 等(2007)的研究表明, 在氧化性条件下(FMQ +1~+3, 铁橄榄石-磁铁矿-石英缓冲剂), Re 的分配系数达到 100(玄武质矿物中最高), 强烈倾向于进入磁铁矿; 而在还原性环境下(FMQ-1), Re 并不进入磁铁矿。Righter 等(2007)认为 Re 的这种分配行为与玄武质岩浆源区中的 S 有关, 在岩浆熔融过程中, 由于源区中 S 的存在, 导致 Re 表现出相容性; 但是在氧化性条件下, 源区的 S 不再稳定, 而导致 Re 表现出不相容性, 进入玄武质矿物, 特别是磁铁矿。尽管 Re 在尖晶石族矿物中的分配系数尚无定论, 但是 Fe^{3+} 和 O_2 在控制 Re 的分配行为方面的重要作用得到广泛认可, 而且在高硅酸质环境下, Re 可能在岩浆去气过程中发生丢失(Righter et al., 1998)。而在尖晶石族矿物中, 磁铁矿是最氧化的, Fe^{3+} 含量最高, 因而可能较适合 Re-Os 定年。虽然地壳熔融过程不同于地幔熔融过程, 但是在强氧化性环境下, 岩浆结晶过程中, Re 最倾向于进入磁铁矿的地球化学性质似乎同样适用。

相对于岩浆岩而言, Re、Os 在热液体系中的分配行为研究较少。Xiong 等(1999)发现在热液体系中, 硬碱离子(F^- , OH^- , O^{2-} , Cl^-)在搬运 Re^{4+} 中起着重要作用, 因为 Re^{4+} 有很高的电离能, 属于硬酸离子, 容易和硬碱离子形成配合物。而二硫化物, 碘化物, 溴化物的作用则不大。因此, 在高温, 富含卤素离子, 贫硫化物的热液中, Re 将会重新活化。当含 Re^{4+} 相以固态形式存在时(如磁铁矿中的 Re), 氧逸度的变化将不会导致含 Re 相的沉淀或溶解。当含 Re 相为硫化物(如固溶体形式的 ReS_2 存在于辉钼矿中)时, 以 S 有关的氧化还原反应对 Re 的溶解度有很大影响。Xiong 等(2002)研究了超临界状态下热液体系中 ReS_2 和 $Re-ReO_2$ 缓冲对的溶解度以及 Re 的运移体制, 表明在 400℃时, 在弱酸性至中性, 富含氯化物的环境中, Re 主要以 $ReCl_4$ 形式存在; 在 500℃时, 富含氯化物的环境中, Re 以 $ReCl_3^+$ 形式存在。而且发现 ReS_2 的溶解度比 ReO_2 的溶解度低 2 个数量级。这个发现表明在含硫的还原性环境下, ReS_2 是主要的溶解度控制相, 且富含 Re 的氧化性溶

液与含硫的还原性溶液的混合是 Re 富集的主要机制。因此,在热液体系中,Re、Os 在磁铁矿中的分配行为与热液的性质密切相关。

2 所面临的困难

首先,磁铁矿中的 Re、Os 含量普遍比较低(见表 1)。大多数磁铁矿中 Re 的含量在几个 10^{-9} 以下,Os 的含量只有 10^{-12} 级,这给磁铁矿中 Re、Os 含量的精确分析带来了很大的困难。而且磁铁矿的提纯很难,Morgan 等(2000)认为波兰 Suwaki 斜长岩体的 Re、Os 含量及 Re/Os 比值的变化是由于磁铁矿中所包含的硫化物微颗粒造成的,因而磁铁矿的 Re-Os 数据可能具有混合意义,磁铁矿的 Re-Os 等时线年龄并不能代表其真实意义。

表 1 磁铁矿 Re-Os 定年实例表

磁铁矿产出环境	Re/ 10^{-9}	Os/ 10^{-12}	年龄/Ma	参考文献	备注
溢流玄武岩	0.8~17	8~313	177.3	Brauns et al., 2000	磁铁矿等时线年龄
溢流玄武岩	0.9~7	47~690	175.4	Zhou et al., 2005	
火山岩	0.1~1	7~169		Hart et al., 2002	未得到磁铁矿等时线年龄
火山岩	0.3~1	2.6~44		Hart et al., 2003	
溢流玄武岩	0.5~3	39~670		Chesley et al., 1999	
蚀变的条带状铁建造(BIF)	0.1~3.4	10~48000		Ripley et al., 2008	
矿床	1.5~2	6.0~51		Mathur et al., 2005	
矿床	0.04~0.7	1.8~24		Davies 2010	
矿床	0.3~6	6.0~76	110	Mathur et al., 2002	磁铁矿与其他矿物的等时线年龄
矿床	0.3~1.4	36~114	1159	Morgan et al., 2000	
金伯利岩及相关岩石	0.1~0.8	35~8000	2025	Graham et al., 2004	
撞击熔岩	3.2~3.6	30~33	215	Davies 2010	

注:该表据 Davies (2010) 的修改。

其次,磁铁矿的封闭温度不清楚,磁铁矿 Re-Os 体系的封闭性是否会受热液影响不清楚。Mathur 等(2002)在研究智利铁矿带矿床时,认为未得到磁铁矿的 Re-Os 年龄可能是由于成矿流体从围岩中萃取了 Re-Os,也就是说磁铁矿的 Re-Os 体系受到热液蚀变而发生了重置。但是,Naslund 等(2003)认为未得到磁铁矿等时线年龄,可能是磁铁矿的成因不同造成的而不是受到热液蚀变。虽然 Peucker 等(1998)认为磁铁矿的氧化性风化会使磁铁矿中的 Os 发生迁移,但是他们并没有讨论热液流体对磁铁矿 Re-Os 体系的影响。Yang 等(2008)和 Lambert 等(2000)将磁铁矿的等时线年龄与其他硫化物的相比,发现了磁铁矿 Re-Os 体系重置的现象,但对于体系重置所需要的温度,压力条件并没有讨论。

再次,磁铁矿 Re-Os 定年系统的分析方法还不够完善。

3 小 结

虽然磁铁矿的 Re-Os 定年存在着一些困难,但是在某些特定的地质环境中,磁铁矿的 Re-Os 体系能够给我们提供较准确的年龄信息。例如,Graham 等(2004)发现磁铁矿和铬铁矿的 Re-Os 体系能够提供准确的侵位年龄,而且能够用来计算模式年龄和亏损年龄,这对于理解岩石圈的生长事件至关重要。在一些铁氧化物矿床中,利用磁铁矿能够得到比其他硫化物更准确的年龄信息(Morgan et al., 2000)。因此,磁铁矿的 Re-Os 同位素研究有较好的发展前景。

参 考 文 献 (略)