

化剂或还原剂的作用，如 Fe^{2+} 、 O_2 、 CH_4 等。

一种性质完全不同的流体的混入，不仅带来了新物质，也是成矿热液温度、浓度、 f_{O_2} 、pH等物化条件的一个重要转折点。下渗的地下水是氧化性的，其盐度和浓度明显低于成矿热液，因而在许多浅成热液矿床的形成机制中，稀释作用和氧化作用等都是不容忽视的。

6. 热液沸腾与成矿：上升的成矿热液由近乎绝热的深部进入开放的浅部时，温度下降明显低于压力下降速率时，就可能发生沸腾。沸腾的本质是减压过程，现象是流体中低蒸汽压组分的瞬间逸出，使流体形成两相。沸腾的作用是多方面的，它可能提高残余液相中成矿组分的浓度（作为主要溶剂的水是低蒸汽压组分），促使络合物分解（ H_2 、 CO_2 、 H_2S 、等是低蒸汽压组分，它们的逸出破坏了流体内的化学平衡），迅速降低温度（吸收汽化热），改变了流体的pH和Eh（如 H_2 逸出升高了Eh，F、Cl逸出提高了pH等）。同时，蒸汽压也是成矿热液在浅部上升的一种动力（Krupp, 1990），还会开辟运动通道（隐爆作用）。因此，沸腾是成矿的一种理想机制。

太阳星云中同位素异常和分馏

陈永亨

（中国科学院地球化学研究所广州分部，广州 510640）

最新的陨石学资料证明，陨石中表征早期太阳星云同位素异常的证据普遍存在，尤其是碳质球粒陨石难熔包体中。近年在铁陨石和球粒陨石单矿物中也发现了同位素异常，看来在形成行星初始物质的早期太阳星云中，同位素不均匀性是一种非常普遍的现象。

1. 氧同位素异常 陨石中氧同位素的变化过去一直认为是由于质量分馏造成的。例如，Onuma等（1972）将其变化归结于原始尘埃和冷却的太阳星云气体之间的同位素交换。在3个含钙铝黄长石-尖晶石的阿伦德包体中，相对于SMOW， $\delta^{18}\text{O}$ 为 -9.7% ~ -11.5% ，这样的组成是在与太阳星云的平衡温度低至800K产生的，或者在包体形成的太阳星云区有非常低的 $\delta^{18}\text{O}$ ，此温度较包体的矿物学和结构显示的温度低得多，这一明显差异难以得到合理解释。Clayton等（1973）首先证明了碳质球粒陨石中无水高温矿物强烈贫重氧同位素 ^{17}O 和 ^{18}O ，这种效应是核过程的结果，来自于几乎纯 ^{16}O 组分的混合，也许产生于太阳系，也许代表了与核合成历史分离的星际尘埃。Clayton等（1977）指出， C_2 、 C_3 和 C_4 球粒陨石中，相对于地球丰度都存在 ^{16}O 过剩，所有 C_3 、 C_4 陨石全岩和矿物分离相都落在与 1% ~ 5% ^{16}O 过剩的混合物一致的混合线上， C_2 陨石的无水硅酸盐也落在这一线上，而 C_2 陨石含水硅酸盐限制在与地球分馏线相平行的质量分馏线上，但移向更高的 ^{16}O 。研究表明，在尖晶石、辉石，部分橄榄石中有大的 ^{16}O 富集，而在黄长石、似长石和钙铝榴石中有小的 ^{16}O 富集。 ^{16}O 过剩的不均匀分布在早期太阳星云凝聚的矿物中升高，意味着存在有同位素异

常的前太阳物质携带者。它们可能是与几乎纯 ^{16}O 结合为颗粒或分子,虽然这些携带者尚未明确地鉴定出来,但刚玉或尖晶石的前太阳颗粒和 SiO 的前太阳分子是有可能的。

2. 钛同位素异常 钛几乎在所有富难熔包体中都有异常同位素组成。Wasson (1985)指出,富 ^{16}O 组分同时伴随着Ti同位素异常。相对于其他Ti同位素如 ^{44}Ti 、 ^{50}Ti 非常富集。在阿伦德的CAI中, ^{50}Ti 过剩达1%,而且所有粗粒包体中有相似的同位素模式,细粒包体中有更大的变化性,有时有更大的异常。在CI球粒陨石全岩和C₂陨石的基质分离相中也发现Ti同位素异常(Niemeyer等,1984)。

Niemeyer等(1984)认为,解释Ti同位素变化至少需要4个不同的Ti同位素组分,根据早期太阳系的粒子辐射,Ti的观测数据不能获得清楚的解释,而恒星中富中子静态燃烧可能是 ^{50}Ti 异常富集的主要原因,S-过程作用机制对某些更微细的Ti变化是可能的来源。Niemeyer(1988)指出,球粒中Ti同位素的差异是尘埃母体集合体的继承特征,因此它们提供了对球粒成因的认识和理解,证明Ti同位素异常不仅仅限于产生在难熔包体的高温过程,不均匀性在星云尘埃中也是非常普遍的。

Fahey等(1987)发现黑复铝钛石中有大的Ti异常,尤其是 ^{50}Ti ,过剩达10%。由此提出解释观测到的所有Ti数据至少需要4个核合成组分,富中子的核统计平衡核合成对解释 $^{50}\text{Ti}/^{48}\text{Ti} > 20$ 的富 ^{50}Ti 组分是最可能的过程,并进一步证实了在小的空间尺度上,太阳星云的同位素不均匀性,以及论证了Ti同位素异常可能是以难熔尘埃颗粒携带进入太阳系的“化学记忆”成因。

Hinton等(1987)发表了穆奇森陨石中富黑复铝钛石包体的Ti同位素结果。相对于地球Ti同位素组成,它们具有 ^{50}Ti 亏损,达2.0~6.8%,这与Fahey等(1987)的结果正好互补。而且 ^{50}Ti 的异常量与矿物学、化学组成、推测的初始 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$,其他Ti同位素的核异常或Mg、Ca或Ti同位素分馏之间没有相关性。因此,“宇宙化学记忆”理论对 ^{50}Ti 的变化不能提供满意的解释。推测在太阳系形成之前,至少有约7%的太阳系 ^{50}Ti 在短期内加入,约5%的超新星溅入物进入前太阳星云的混合可以解释观测到的 ^{16}O ,初始 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 和 ^{50}Ti 的变化,支持了超新星爆发导致分子云塌缩形成太阳系的假说。

3. 镁同位素异常 陨石中Mg同位素丰度变化(^{24}Mg 78.6%, ^{25}Mg 10.1%, ^{26}Mg 11.3%)可能加入有 ^{26}Al 衰变的放射成因 ^{26}Mg ,因而Mg同位素有明显的核效应分馏。自从在阿伦德CAI中发现Mg同位素异常后,发现这些包体球粒中 ^{26}Mg 的过剩与Al/Mg值的相关性无疑是已灭绝核素 ^{26}Al 就地衰变的结果。另外,从CAI中分离的矿物相中有不同的Al/Mg值,显示出相等的,小的Mg异常,说明在 ^{26}Al 衰变后,在高Al/Mg环境中,集合体的同位素上经过了均一化或者某些Mg异常来自于分馏效应而不是 ^{26}Al 衰变。

Fahey等(1987)研究表明,在黑复铝钛矿中,除了 ^{26}Al 产生的 ^{26}Mg 外,Mg同位素组成是正常的。而且放射性成因 ^{26}Mg 、REE和微量元素模式之间没有明显的相关性。Hutchison等(1986)推测放射性 ^{26}Mg 存在于黑复铝钛石和黄长石与尖晶石共生的包体中,而黑复铝钛石在CAI中是贫乏的。看来,对大多数黑复铝钛石样品中放射性 ^{26}Mg 贫乏最满意的解释是早期太阳星云中 ^{26}Al 的不均匀性,Hutchison(1982)根据个别CAI的离子探针结果讨论了 ^{26}Al 不均匀分布的证据,Fahey等(1987)根据CAI的核和边缘中放射性 ^{26}Mg 的分析给出了 ^{26}Al 不均匀性的直接证据。

4. 钙同位素异常 碳质球粒陨石难熔包体中富中子同位素 ^{48}Ca 常常稍有富集, 而其他则具有正常值。Jungck等(1984)在11个CAI中发现7个有Ca同位素异常, 达约 $+6\text{‰}$ 单位($1\text{‰}=1/100000$), 且过剩的 ^{48}Ca 和 ^{50}Ti 之间没有相关性。虽然在恒星中它们都是富中子核过程产生的同位素, 由于Ca相对于Ti化合物有比较高的挥发性, 在星体壳层, 星际介质或者太阳星云中的蒸发和再凝聚过程中与正常Ca产生同位素稀释作用。

5. 铬同位素异常 在阿伦德难熔包体中, Cr同位素丰度显示出宽的异常分布, 具有和Ca、Ti相似的同位素异常模式, 最大效应发生在富中子核素 ^{54}Cr 。最新的Cr同位素研究结果(Esat等, 1989)表明, 单个富Cr粉红色尖晶石显示出大变化的过剩 ^{53}Cr 和 ^{54}Cr , 包括最大的 ^{53}Cr 异常($\delta^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}=3.2\pm0.6\text{‰}$)。在贫Cr蓝尖晶石中, ^{26}Mg 也显示出异常, 包括有利于轻同位素的质量分馏。相同于Ti、Mg同位素, 碳质球粒陨石中尖晶石的 ^{53}Cr 、 ^{54}Cr 同位素异常也表明太阳星云中同位素的不均匀分布, 除了物理化学过程外, 它们的组成同样需要几个核合成组分的贡献来解释。

6. 硅同位素异常 阿伦德包体中Si同位素分馏范围是铁-镁球粒中的6倍, 既有富集, 也有贫化重同位素的趋势。但遵从 $-1/2$ 斜率分馏线, 如蒸发残余物模式期望的在粗颗粒包体中有富重同位素趋势, 如冷聚过程预见的在细颗粒包体中表现出贫重同位素趋势。

除以上元素外, 陨石中已发现有10多种非挥发性元素同位素异常, 如Sr、Ba、Nd、Sm、U和Pu等(Clayton等, 1985)。

7. 稀有气体同位素异常及分馏 陨石中稀有气体同位素异常已获得了Ne和Xe的确凿证据。对某些陨石的逐级加热实验发现, 除了已知Ne的三个组分外, 还存在一个富 ^{22}Ne 的组分。 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 值很低(最低为1.5), 不可能由太阳组分产生; $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 值也很低, 是一种富重Ne同位素(^{22}Ne)组分, 也许是纯 ^{22}Ne 组分。也不可能由宇宙射线的散裂反应产生, 因此被认为是同位素异常组分, 可能起源于太阳系外。

Xe分为行星Xe、太阳Xe和地球Xe, 其组成互不相同。太阳Xe和行星Xe区别不大, 但地球Xe有明显的分馏趋势。行星Xe至少含有两种不同的组分, 由于相对于太阳Xe是重同位素过剩, 推测其中一种是裂变组分, 可能是由原子序数约为115的超重元素裂变产生。有人不同意这一看法, 认为对碳质球粒陨石逐级加热实验中释放出来的Xe, 不但富集重同位素, 也伴随轻同位素 ^{126}Xe 和 ^{124}Xe 的富集。如果行星Xe只包含两个组分, 那么重同位素富集的组分中轻同位素也应是富集的, 这就不可能是裂变成因的, 因此它被认为是Xe同位素异常。

8. 太阳星云同位素异常分馏模式 原始太阳星云物质的不均匀性被越来越多的事实所证实, 越来越多的同位素分布异常被发现。在太阳系形成之前或正在形成过程中, 有系外物质加入, 造成了各元素同位素的异常分布, 公认的主要有两种解释:

(1) 后期超新星溅入(LSI): 认为超新星具有一种层状结构, 依次富含H、He、C、O和Si, 在爆发时, 各层物质发生不同的核合成, 然后抛射到星际介质中, 产生富 ^{16}O 和Ne异常的过程。尤其是 ^{26}Al 存在说明超新星爆发发生在太阳系的矿物凝聚之前, 邻近原太阳星云的地方, 将晚期新合成的物质注入到太阳星云中, 但是这种模式用短寿命放射性核素能够解释在同位素“外来组分”和“正常组分”之间的比约为 10^{-4} , 而已发现的同位素异常要求的“外来组分”部分要大得多。Hinton等(1987)提出 ^{50}Ti 变化的超新星注入二组分混合模式, 认为碳质球粒陨石富黑复铅钛石包体中观测到的Ti同位素异常都可以由一

个至少贫 ^{50}Ti 组分和一个至少富 ^{50}Ti 组分按一定比例混合而成。

(2) 星际中的“化学记忆”(CM): 这一模式认为冷的太阳星云尘埃组分保存了不同核合成成因的记忆, 其历史可以追溯到星际介质(ISM)中。因而观测到的同位素异常是在超新星和经过连续的质量丢失的恒星的膨胀大气中已凝聚的星际颗粒携带进入太阳系的, 大多数证据看来支持这一模式。单个黑复铝钛石颗粒中大的Ti同位素组成变化说明同位素异常不可能是由气相带入太阳系的, 而是星际尘埃颗粒(ISD)作为携带者。Clayton认为富 ^{50}Ti 的组分凝聚进入金属颗粒, 而Niemeyer等根据缺少Ni同位素效应证明为氧化物或硅酸盐星际尘埃颗粒。已经观测到的 ^{48}Ca 和 ^{50}Ti 以及 ^{54}Cr 的同位素效应都支持氧化物或硅酸盐是Ti同位素异常的携带者。当这些难熔的携带有太阳系外同位素异常组分的氧化物或硅酸盐颗粒进入太阳系后, 一方面随太阳星云一起蒸发, 另一方面没有蒸发的颗粒作为晶核而随超难熔包体和难熔包体凝聚, 导致太阳系中难熔元素与普遍元素的强热分馏作用, 难熔包体或矿物主要富集了这些“外来”的重同位素和太阳系中的难熔元素。而基质中重同位素异常可能是“外来组分”蒸发后再凝聚的结果, 它们的效应远小于包体或难熔矿物, 说明蒸发作用是有限的。而且这种过程必然在太阳星云的短时间和空间尺度上, 否则不可能保持观测到的同位素不均一性。

工艺矿物学、工艺矿相学及选冶工艺学在金矿石选冶中的应用

林文通

(合肥工业大学, 合肥 230009)

关键词 金矿石选冶、工艺矿物学、工艺矿相学、矿物学

金矿石组成中矿物的分选性和解离性是决定金矿石可选冶性的内因, 矿物的分选性又取决于各矿物之间的物性差异(比重差、润湿性差、磁性差、电磁性差及电性差等)。矿物的解离性则取决于金粒与矿物的嵌布特性。工艺矿物学和工艺矿相学的资料为金矿石的可选冶性及选冶工艺流程提供依据。

金矿石选冶之前, 必须掌握金矿石各组成的矿物分选性和解离性。利用选冶的金矿物与其它矿物间物性的差异, 选择与之相适应的选冶方法。例如依据砷的赋存状态采用不同的选冶方法: 当砷呈类质同象存在时, 采用选冶相结合(沸腾焙烧后, 用氰化法的工艺流程)或留待冶炼时予以脱除; 当金呈超显微金、固溶体分散金、次电子衍射金或胶粒金存在时, 即使粉碎至200目以下, 也难把金选尽, 更不能把砷除掉, 只有采用尾砂焙烧法除砷, 并使金粒归并长大以分离金; 当砷为独立矿物时可通过机械选矿法选出。含泥量大和金粒细的含金硫化物氧化矿石(铁帽金矿石)的分离, 应采用全泥氰化法或炭浆法。金矿石中含有细粒磁铁矿时可用磁法与金分离。如有粗粒的赤铁矿, 则可考虑用重选法与金分离。另外, 在为了检