



球粒陨石中富 Al 球粒的氧同位素组成 与形成演化过程

戴德求¹⁾, 包海梅^{1,2)}, 何旺虎¹⁾, 尹锋^{1,3)}

1) 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭; 411201;

2) 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳; 550081; 3) 湖南科技大学地质研究所, 湖南湘潭; 411201

球粒陨石中的富 Ca、Al 包体(简称 CAIs)主要由一些富 Ca、Al 的硅酸盐和氧化物(如尖晶石和黄长石等)组成,是目前已知的太阳系最古老的固体物质(4567.2 ± 0.6 Ma; 4567.30 ± 0.16 Ma);球粒的矿物组成以镁铁质硅酸盐(如橄榄石和低 Ca 辉石等)为主,明显经历过熔融结晶过程。CAIs 及其构成矿物具有最富¹⁶O 的同位素组成特征,并在氧同位素 $\delta^{17}\text{O}-\delta^{18}\text{O}$ 图解上构成一条斜率接近 1 的直线,这条直线常称为碳质球粒陨石无水矿物线(简称 CCAM 线)。镁铁质硅酸盐球粒一般具有贫¹⁶O 同位素组成特征。

在球粒中存在一种含一定量富钙铝矿物(如钙长石和富钙辉石等)的球粒,常将它们称为富 Al 球粒(图 1)。富 Al 球粒的全岩化学组成中,Al₂O₃ 含量一般 ≥ 10%。富 Al 球粒非常稀少,它在所有球粒中的比例一般不超过 1%。富 Al 球粒在矿物组成、岩石化学和同位素组成等方面的特征都介于 CAIs 和镁铁质硅酸盐球粒之间,所以常常认为富 Al 球粒在认识 CAIs 和镁铁质硅酸盐球粒形成演化过程中的相互联系具有特殊的意义。本文将系统总结前人对富 Al 球粒

氧同位素组成研究成果及其形成演化过程。

1 不同球粒陨石群中富 Al 球粒的氧同位素组成

不同碳质球粒陨石群中的富 Al 球粒常含有残留难熔包体或残留矿物,其氧同位素组成具有不均一性($\Delta^{17}\text{O} = -20\text{‰} \sim 0\text{‰}$)。残留的尖晶石和橄榄石等颗粒与 CAIs 的氧同位素组成相似,具有明显的富¹⁶O 同位素组成(不同化学群球粒陨石的氧同位素组成详见图 2)。残留 CAIs 中经历过熔融结晶的钙长石和黄长石等常具有贫¹⁶O 同位素组成。总体来说,含残留 CAIs 较不含残留 CAIs 的富 Al 球粒相对更富¹⁶O。不含残留 CAIs 的富 Al 球粒的氧同位素组成与镁铁质硅酸盐球粒具有相似的特征(Krot et al., 2006)。最近的研究也证明了上述结论。Dar al Gani 978 中残留的尖晶石和橄榄石具有富¹⁶O 同位素组成, $\Delta^{17}\text{O}$ 值位于 -20‰ ~ -23‰,其余矿物位于 -15.3‰ ~ 0.5‰ 之间(Zhang et al., 2014)。戴德求等(2020)在 Kainsaz (CO3) 碳质球粒陨石富 Al 球粒中未发现残留的尖晶石或橄榄石,其中的矿物均具有贫¹⁶O 同位素组成特征, $\Delta^{17}\text{O}$ 位于 -11.1‰ ~ 0.4‰ 之间。Zhang et al. (2020) 对 Allende、Leoville 和宁强碳质球粒陨石中富 Al 球粒研究发现,矿物的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值位于 -20‰ ~ -1.1‰ 之间,其中部分残留的尖晶石和橄榄石具有富¹⁶O 同位素组成, $\Delta^{17}\text{O}$ 位于 -20‰ ~ -12.2‰,其余矿物均相对贫¹⁶O 同位素组成。最近报道的宁强碳质球粒陨石中的 POI (C#1) 的矿物组合主要为钙长石、橄榄石、尖晶石、富 Ca 辉石和低 Ca 辉石等,具有 CAIs 和球粒过渡的性质。通过氧同位素组成研究发现,其与富 Al 球粒具相似的氧同位素组成特征(Dai et al., 2021);残留的部分尖晶石具有富¹⁶O 同位素组成, $\Delta^{17}\text{O}$ 位于 -20.9‰ ~ -10.5‰,其余矿物的 $\Delta^{17}\text{O}$ 位于 -7.5‰ ~ 1.3‰。

Jiang et al. (2015) 报道了 3 个普通球粒陨石中发现的 7 个富 Al 球粒的氧同位素组成($\delta^{18}\text{O} = -6.1\text{‰} \sim 7.1\text{‰}$; $\delta^{17}\text{O} = -4.5\text{‰} \sim 5.1\text{‰}$; $\Delta^{17}\text{O} = -2.9\text{‰} \sim 3.7\text{‰}$)与镁铁质球粒相近,较 CAIs 明显贫¹⁶O。在三氧同位素图上,大部分富 Al

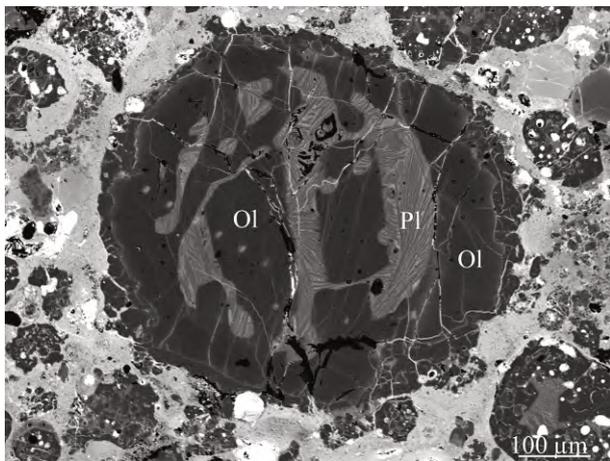


图 1 富含钙长石的富 Al 球粒 BSE 照片
(据戴德求等, 2020)
Ol—橄榄石; Pl—钙长石

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41673070)、湖南省自然科学基金项目(编号 2021JJ30242)和湖南省研究生科研创新项目(编号 CX20200990)联合资助的成果。

收稿日期:2021-12-03; 改回日期:2021-12-28; 网络发表日期:2022-01-15; 责任编辑:张招崇; 责任编辑:周健。

作者简介:戴德求,男,1976年生。博士,教授,主要从事陨石学与天体化学研究。E-mail:ddqygf@163.com。

DOI:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022275.

球粒的氧同位素组成沿着地月质量分馏线(TF)分布或位于其之上, 两个球粒位于 TF 和 CCAM 之间。Russell et al (2000)报道的普通球粒陨石中富 Al 球粒的氧同位素组成与上述结果相似, 在三氧同位素图上投点, 数据基本位于 TF 和 CCAM 之间且沿一条斜率约为 0.83 的直线分布。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 的值变化相对较大 ($\delta^{18}\text{O} = -15.7\text{‰} \sim 7.6\text{‰}$; $\delta^{17}\text{O} = -13.5\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$; $\Delta^{17}\text{O} = -6.1\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$), 与镁铁质硅酸盐球粒比较, 富 Al 球粒相对更富 ^{16}O 同位素组成。顽辉石球粒陨石中富 Al 球粒的氧同位素组成在三氧同位素图上沿斜率约为 0.6 的直线分布。顽辉石球粒陨石中镁铁质硅酸盐球粒的氧同位素组成与富 Al 球粒基本重叠, 但富 Al 球粒相较更富 ^{16}O 同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}$ 约高 12‰ 左右) (Guan et al., 2006)。

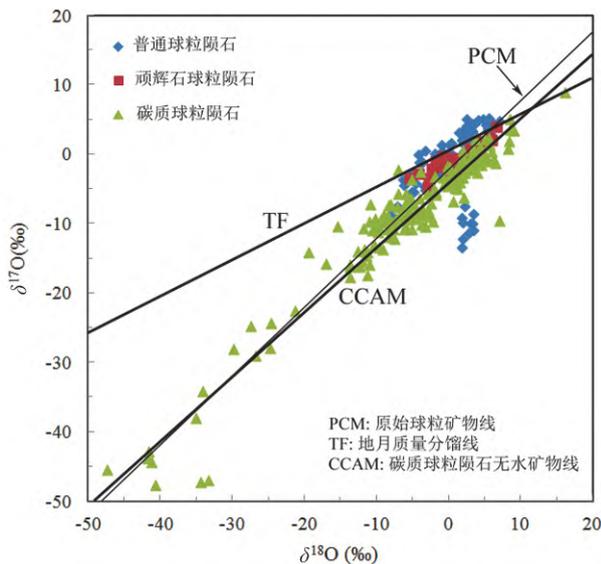


图 2 不同球粒陨石群中富 Al 球粒的氧同位素组成 (数据引自 Russell et al., 2000; Krot et al., 2006; Guan et al., 2006; Zhang et al., 2014, 2020; Jiang et al., 2015; 戴德求等, 2020; Dai et al., 2021)

2 初始物质组成

富 Al 球粒的矿物组合常为橄榄石、低 Ca 辉石、钙长石、富 Ca 辉石和尖晶石等。橄榄石和低 Ca 辉石是镁铁质硅酸盐球粒中的主要矿物, 而尖晶石、钙长石和富 Ca 辉石常出现在 CAIs 中, 所以常常认为富 Al 球粒在认识 CAIs 和镁铁质硅酸盐球粒的相互关系及早期星云演化过程具有重要的意义。根据富 Al 球粒的矿物组合、全岩化学组成和 REE 特征等常认为其是 CAIs 和镁铁质硅酸盐球粒 (或其初始物质) 混合熔融结晶形成 (Zhang et al., 2014)。

从氧同位素组成特征来看, 在部分富 Al 球粒中, 少数矿物 (如尖晶石、橄榄石和透辉石等) 常具有富 ^{16}O 同位素组成, 一般认为, 这些矿物颗粒属于富 ^{16}O 同位素组成的 CAIs 或 AOAs (蠕虫状橄榄石集合体) 的残留矿物。在富 Al 球粒熔融结晶形成过程中, 初始物质之一 (CAIs 或 AOAs) 可能是部分熔融, 使得部分富 ^{16}O 同位素组成的尖晶石、橄榄石和透辉石等被保留下来。所以, 这些富 Al 球粒的初始物质

可能为 CAIs (或 AOAs) 与镁铁质硅酸盐球粒 (或其初始物质) (Zhang et al., 2020; Dai et al., 2021)。在普通球粒陨石、顽辉石球粒陨石和碳质球粒陨石中部分富 Al 球粒的氧同位素组成 ($\delta^{17,18}\text{O}$ 位于 $-15\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 之间) 常与镁铁质硅酸盐一致。所以, 这些富 Al 球粒的初始物质组成不是 CAIs 和镁铁质硅酸盐球粒简单的混合, 需要考虑富 Al 球粒中矿物的氧同位素为什么没有继承初始物质之一 (CAIs 或 AOAs) 的富 ^{16}O 同位素组成特征。在未发现富 ^{16}O 同位素组成残留矿物的富 Al 球粒中, 虽然其氧同位素组成与镁铁质硅酸盐球粒相似, 但根据矿物组成和部分矿物氧同位素组成具有系统性偏高等特征, 表明与镁铁质硅酸盐球粒相比, 这些富 Al 球粒的初始物质可能含有相对富 ^{16}O 同位素组成的集合体 (CAIs 或 AOAs), 它们与镁铁质硅酸盐球粒 (或其初始物质) 发生熔融结晶时, 所有的初始物质发生了完全熔融, 且在熔融结晶过程中与周围贫 ^{16}O 同位素组成的星云发生了较长时间的同位素交换。综上所述, 富 Al 球粒的初始物质组成相似, 均为 CAIs (或 AOAs) + 镁铁质硅酸盐球粒 (或其初始物质), 区别可能与它们的形成条件和过程有关。存在残留富 ^{16}O 同位素组成颗粒的富 Al 球粒在形成演化过程中只发生了部分熔融, 导致残留富 ^{16}O 同位素组成的矿物被保留下来; 后者发生了完全熔融, 在此过程中, 其中的矿物之间或矿物与周围的星云之间进行了较彻底的氧同位素交换。

3 氧同位素源区

通过对不同球粒陨石群中富 Al 球粒的氧同位素组成特征研究, 发现富 Al 球粒形成演化过程中至少存在 3 个不同的氧同位素组成源区 (图 3)。

(1) CAIs 和 AOAs 形成区域 ($\Delta^{17}\text{O} = -23\text{‰} \sim -20\text{‰}$)。前期大量研究证明, CAIs 和 AOAs 形成于星云中最富 ^{16}O 同位素组成区域。部分富 Al 球粒中尖晶石和橄榄石等的氧同位素组成特征 ($\Delta^{17}\text{O} = -20\text{‰} \pm$) 与此源区相似, 表明它们可能来源于 CAIs 和 AOAs 形成区域, 属于富 Al 球粒中的残留矿物。富 Al 球粒中残留的尖晶石、橄榄石和透辉石等的氧同位素组成特征与此源区相似。另外, 富 Al 球粒中部分尖晶石 $\Delta^{17}\text{O}$ 变化较大, 有些具有相对贫 ^{16}O 同位素组成。如宁强陨石中 POI 尖晶石的 $\Delta^{17}\text{O}$ 变化较大, 最低可达 -20.9‰ , 具有典型的源区氧同位素特征, 属于残留矿物; 有些尖晶石相对贫 ^{16}O , 它们可能是球粒物质再次结晶形成 (Dai et al., 2021)。在 CH3 球粒陨石中也发现了含 Cr、Fe 的尖晶石, 它们与上述贫 ^{16}O 尖晶石相似, 可能也是球粒物质结晶形成; 富 Al 球粒中具有 Cr、Ti 环带的尖晶石相对贫 ^{16}O 同位素组成也可以用后期熔融结晶解释; 残留的橄榄石具有与尖晶石相似的氧同位素组成特征。在 CV 陨石的富 Al 球粒中, 残留的橄榄石常相对贫 ^{16}O 组成, 可能与 CV 陨石经过过热变质事件有关。

(2) 镁铁质硅酸盐球粒熔融结晶区域 ($\Delta^{17}\text{O} = -7\text{‰} \sim -5\text{‰}$)。不同球粒陨石群中富 Al 球粒的主要矿物相, 如非残留成因的橄榄石、尖晶石、透辉石和顽辉石等均具有与此源区相似的 $\Delta^{17}\text{O}$ 组成。这些矿物都属于熔融结晶成因, 氧同位素特征反映了当时星云环境相对贫 ^{16}O 同位素组成, 矿

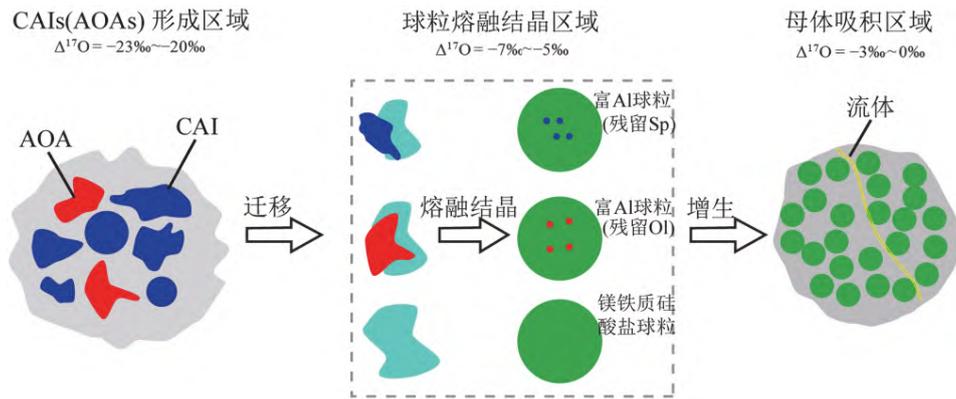


图3 富Al球粒形成演化示意图(据 Zhang et al., 2014, 2020 修改)

物在熔融结晶过程中与周围的星云发生了氧同位素交换。前期大量研究表明,球粒陨石中镁铁质硅酸盐球粒形成时星云环境中 $\Delta^{17}\text{O}$ 值与这些矿物吻合,表明富Al球粒形成区域与镁铁质硅酸盐球粒一致,可能是同一热事件的产物。两种球粒之间的差别是由于初始物质不同造成。

(3)球粒陨石母体吸积区域($\Delta^{17}\text{O} = -3\text{‰} \sim 0\text{‰}$)。宁强、Dar al Gani 978、Allende 和 Leoville 等陨石的富Al球粒中钙长石的 $\Delta^{17}\text{O}$ 变化均较大,最高可达 $-3\text{‰} \sim 0\text{‰}$ 。相对于富Al球粒中的其他矿物,钙长石具有更高的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值,表明其后期再次经历过氧同位素交换。另外,钙长石的氧同位素组成与陨石母体具有密切的关系,在还原型 Leoville 等陨石中,钙长石的 $\Delta^{17}\text{O}$ 最高约为 -3‰ 左右,而在经历过后期热变质作用的宁强和 Allende 等陨石中,钙长石的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值可达到 $-1\text{‰} \sim 0\text{‰}$ 。上述特征表明,后期的热变质作用也使得富Al球粒发生了氧同位素交换,蚀变矿物能较好地反映陨石母体吸积区域的氧同位素组成特征。根据其他的矿物岩石学等特征,交换可能发生在陨石母体中,且有流体参与,热变质作用与氧同位素交换过程可能伴随进行。

4 形成演化过程

富Al球粒的形成演化过程见图3。

在太阳星云的特定区域($\Delta^{17}\text{O} = -23\text{‰} \sim -20\text{‰}$),温度在达到使大部分固相尘埃气化之后开始冷却,从高温到低温依次凝聚形成松散A型包体(FTAs)—富尖晶石/辉石型包体—AOAs, AOAs可能是相对更低温星云直接凝聚的产物。此区域形成的集合体均具有富 ^{16}O 同位素组成。粗粒CAIs显然经历过熔融结晶的过程,它们可能是前期形成物质熔融结晶的产物。

早期形成的CAIs(包括AOAs)形成后,发生迁移,进入到镁铁质硅酸盐球粒熔融结晶区域($\Delta^{17}\text{O} = -7\text{‰} \sim -5\text{‰}$)。CAIs和AOAs与早期形成的铁镁质硅酸盐球粒(或其初始物质)发生熔融结晶,形成富Al球粒。CAIs和AOAs在与硅酸盐混合熔融结晶时,CAIs中的尖晶石和AOAs中的橄榄石等可能未发生完全熔融,从而作为残留物被保留下来,所以这些残留矿物具有与CAIs形成源区相似的 $\Delta^{17}\text{O}$ 组成。由于星云环境的改变,球粒在熔融结晶过程

中与周围星云发生氧同位素交换,导致富Al球粒中的发生了熔融结晶的矿物与镁铁质硅酸盐相似的 $\Delta^{17}\text{O}$ 组成。

富Al球粒形成后,继续迁移进入球粒陨石母体形成吸积区域($\Delta^{17}\text{O} = -3\text{‰} \sim 0\text{‰}$),并与其早期形成的各类物质(如CAIs、球粒、基质等)聚集在一起共同形成了陨石母体。由于星云环境的再次改变,富Al球粒在贫氧同位素组成的环境中再次发生了氧同位素交换。另外,由于部分陨石母体后期过程可能发生较强烈的热变质作用,甚至有流体参加,导致其中的富Al球粒发生更进一步的氧同位素交换。

主要参考文献

- 戴德求,包海梅,刘爽,尹锋. 2020. Kainsaz (CO3) 陨石中两个富Al球粒的氧同位素组成特征与形成演化. 岩石学报, 36(6): 1850~1856.
- Dai D, Bao H, Liu S, Yin F. 2021. Oxygen isotopic compositions in a plagioclase-olivine inclusion from Ningqiang similar to those in Al-rich chondrules. Acta Geologica Sinica (English Edition), 95(5): 1583~1590.
- Krot A N, Libourel G, Chaussidon M. 2006. Oxygen isotope compositions of chondrules in CR chondrites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70: 767~779.
- Guan Y B, Huss G R, Leshin L A, MacPherson G J, McKeegan K D. 2006. Oxygen isotope and ^{26}Al - ^{26}Mg systematics of aluminum-rich chondrules from unequilibrated enstatite chondrites. Meteoritics & Planetary Science, 41: 33~47.
- Jiang Y, Hsu W B, Guan Y B, Wang Y. 2015. In situ SIMS oxygen isotope analyses: evidence for the formation of aluminum-rich chondrules from ordinary chondrites. Science China: Earth Sciences, 58: 1748~1757.
- Russell S S, MacPherson G J, Leshin L A, McKeegan K D. 2000. ^{16}O enrichments in aluminum-rich chondrules from ordinary chondrites. Earth and Planetary Science Letters, 184: 57~74.
- Zhang A C, Itoh S, Sakamoto N, Wang R C, Yurimoto H. 2014. Origins of Al-rich chondrules: clues from a compound Al-rich chondrule in the Dar al Gani 978 carbonaceous chondrite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 130: 78~92.
- Zhang M, Lin Y, Tang G, Liu Y, Leya I. 2020. Origin of Al-rich chondrules in CV chondrites: incorporation of diverse refractory components into the ferromagnesian chondrule-forming region. Geochimica et Cosmochimica Acta, 272: 198~217.

DAI Deqiu, BAO Haimei, HE Wanghu, YIN Feng: The formations and oxygen isotopes of Al-rich chondrules in different groups of chondrites