

# 球粒陨石中富 Ca、Al 包体成因研究进展与演化模式

戴德求<sup>1)</sup>, 王道德<sup>2)</sup>, 宋新社<sup>3)</sup>, 袁智<sup>3)</sup>, 冯少真<sup>3)</sup>

1) 湖南科技大学地质研究所, 湖南湘潭, 411201; 2) 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640;

3) 广东省安全科学技术研究所, 广州, 510060

**内容提要:**富 Ca、Al 包体(简称 CAI)形成于太阳星云演化的最初始阶段,其成因模式主要包括:气-固凝聚、熔融结晶和部分熔融以及高温蒸发作用等。最近,通过对不同球粒陨石化学群中的 CAI 进行岩石学特征对比研究,发现不同化学群中的 CAI 具有相似的大小和类型分布特征,表明不同球粒陨石化学群中的 CAI 极可能具有相似的起源。该结果,与前人的氧同位素、Al—Mg 同位素体系以及稀土元素等研究得到的结论一致。不同球粒陨石化学群中的 CAI 具有相似的成因,并很可能形成于太阳星云的相同区域,随后迁移到不同球粒陨石群的吸积区域。

**关键词:**富 Ca、Al 包体; CAI; 成因; 演化; 球粒陨石; 太阳星云

球粒陨石由太阳星云中不同事件和过程形成的各种产物[如球粒、富 Ca、Al 包体(简称 CAI)、蠕虫状橄榄石集合体、不透明矿物集合体、晶屑、细粒基质等]机械堆积而成。大部分球粒陨石受到了后期热变质作用的改造,只有少量非平衡型球粒陨石,保存了太阳星云形成和演化的各种信息。

构成球粒陨石的各种组分中,CAI 最为重要,其形成于太阳星云演化历史的最初始阶段,粒径由亚毫米级到厘米级不等,一直是陨石学和天体化学领域的研究热点,主要原因有以下方面:

(1) CAI 由各种高温难熔氧化物和硅酸盐组成,并与太阳星云的冷凝计算结果相一致(Grossman, 1972; Yoneda and Grossman, 1995),因而代表了太阳星云演化的最早期凝聚产物。

(2) CAI 普遍具有灭绝核素衰变形成的子体同位素过剩(如由<sup>26</sup>Al 衰变形成<sup>26</sup>Mg, 半衰期 0.74Ma)(MacPherson et al., 1995; Zinner, 2003; Lin et al., 2005),是研究灭绝核素的最理想对象。

(3) CAI 具有最富<sup>16</sup>O 的同位素异常(Clayton et al., 1973; Clayton, 1993; Fagan et al., 2001),是揭示太阳系氧同位素组成不均一性的关键。

(4) 一些 CAI 经历了强烈的高温蒸发作用(Grossman et al., 2000; Wark and Boynton,

2001),因而是研究各种同位素分馏的理想样品。

总之,CAI 是太阳星云最早期各种热事件的产物,保存了星云最原始的信息,具有同位素异常和大量灭绝核素子体,是研究早期太阳星云形成和演化的探针。

CAI 的主要矿物组合包括尖晶石、黄长石、钙钛矿、深绿辉石、钙长石、黑铝钙石(Hibonite)、陨铝钙石(Grossite)、透辉石和橄榄石等。通常根据 CAI 中矿物颗粒的大小,将它们划分为粗粒和细粒包体两大类(Grossman and Ganapathy, 1976a, b)。粗粒 CAI 尽管数量较少,但它们在陨石手标本上很明显,且易于分析,因此绝大部分研究工作针对该类包体开展。根据矿物组成,粗粒包体又常被划分为致密 A 型(CTA, 富黄长石—尖晶石型)、富黄长石—深绿辉石型(B 型)、富钙长石—深绿辉石—尖晶石型(C 型),以及富钙长石—橄榄石型(POI 型)等(Grossman, 1980; MacPherson and Grossman, 1984; Grossman, 1975; Wark and Lovering, 1982; Wark, 1987; Sheng et al., 1991)。最常见的细粒 CAI 主要有二种类型,即松散状 A 型包体(FTA)和富尖晶石—辉石型包体。松散状 A 型包体的矿物组成与上述粗粒 A 型包体类似,但前者不具有火成结构特征,主要由细粒矿物构成的同心环状团块聚

注:本文为高等学校国家特色专业建设点基金(TS11027)和湖南科技大学博士基金(E50806)的成果。

收稿日期:2009-08-11; 改回日期:2009-11-20; 责任编辑:章雨旭。

作者简介:戴德求,男,1976年生。讲师,博士,陨石学和天体化学专业。通讯地址:411201,湖南科技大学地质研究所; Email: ddqygf@163.com。

积形成,通常受到后期蚀变。富尖晶石—辉石型包体主要由尖晶石和富 Ca 辉石构成,其他次要矿物有黄长石、钙长石、钙钛矿、橄榄石、方钠石和霞石等,钙长石可能由黄长石蚀变形成。有时把蠕虫状橄榄石集合体(AOA)也作为一种细粒 CAI,认为其是星云凝聚较低温的产物(Lin et al., 2003a; Wang et al., 2007; 戴德求等, 2007)。

## 1 CAI 成因模式

有关 CAI 成因的主要模式包括气—固凝聚,熔融结晶和部分熔融,以及高温蒸发等(Yoneda and Grossman, 1995; Richter et al., 2002; Fahey et al., 1994)。CAI 的岩石结构特征和成分特征等表明有些 CAI 可能只经历了单一的热事件,但也有一些 CAI 具有复杂的形成历史,是上述两个或两个以上过程的综合产物。

### 1.1 气—固凝聚模式

气—固凝聚作用是形成 CAI 最基本的模式。根据热力学计算,得出了从高温逐渐冷却形成的原始太阳星云中矿物的凝聚顺序(Lattimer, 1967; Grossman, 1972; Lattimer et al., 1978)。在 10 Pa 条件下,太阳星云从高温到低温的矿物冷凝顺序是:刚玉—黑铝钙石—钙钛矿—陨铝钙石—黄长石—尖晶石—铁镍合金—深绿辉石—透辉石—橄榄石—钙长石(Lattimer et al., 1978; Yoneda and Grossman, 1995)。属于气—固凝聚形成的 CAI 类型主要是细粒 CAI, 如 FTA 和富尖晶石—辉石型包体等。气—固凝聚成因的证据主要有:

- (1) 极不规则的外形,有些甚至是缠绕状(MacPherson and Grossman, 1984);
- (2) 松散的结构,自形矿物的松散堆积(Armstrong et al., 1982);
- (3) 细粒团块状颗粒的堆积结构(MacPherson and Grossman, 1984);
- (4) 内部存在大量的空隙,造成强烈的蚀变(Greenwood et al., 1994);
- (5) 单个团块的圈层结构(Wark, 1986);
- (6) 矿物的形成顺序与理论计算的星云凝聚顺序一致(Lin and Kimura, 2003a);
- (7) 矿物成分,如 FTA 中的反环带的黄长石晶体(MacPherson, 1984)。

### 1.2 熔融结晶和部分熔融

粗粒 CAI(B 型、C 型、POI 型和 CTA)大部分具有浑圆状的外形、致密的结晶结构(共结和嵌晶结

构等)、矿物晶体由包体边部向中心生长等岩石结构特征、矿物形成顺序、主要成分的 REE 模式等均表明它们可能经历了熔融结晶过程。通过对 CAI 中深绿辉石的研究和模拟合成实验,认为 B 型和 C 型 CAI 中的深绿辉石是从液态中结晶形成(MacPherson and Grossman, 1981; Stolper, 1982; Paque and Stolper, 1983; Simon et al., 1991)。B 型 CAI 具有典型的液相结晶特征,并与熔融结晶实验结果一致,冷却速率约 10~250 °C/h(Sheng et al., 1992; Richter et al., 2002)。

Lin 等(2003c)通过对宁强碳质球粒陨石中部分不规则形状 CTA 及其中深绿辉石的研究,认为这些不规则的 CTA 可能只经历过部分熔融或重结晶:①CAI 致密的结构显示它曾经经历过熔融或再结晶;②不规则的外形显示它们没有经历过完全的熔融结晶;③部分包裹着钙钛矿的深绿辉石边,以及它们整体被黄长石所包围,显示深绿辉石由钙钛矿和黄长石反应形成,而气—固凝聚时深绿辉石的凝聚温度明显低于黄长石。

### 1.3 蒸发作用

蒸发作用是指由于强烈的热事件挥发性组分丢失使物质逐渐富集难熔组分的分异过程。除熔融结晶的岩石结构证据外,蒸发残留成因的主要证据有:①强烈蒸发作用造成 Mg、Si 富重同位素(Clayton et al., 1984; Fahey et al., 1994);②包体的边缘较中央富难熔元素(Wark and Lovering, 1982; Clayton et al., 1984);③在矿物上,边缘较中央富难熔矿物,如钙钛矿和陨铝钙石等。

部分 B 型包体可能在熔融结晶的过程中经历过高温蒸发作用,可能是由富 Mg、Si 的集合体高温蒸发形成(Grossman et al., 2000; Wark and Boynton, 2001),其证据包括一些 B 型包体中 Mg、Si 富重同位素的质量分馏,以及一些 B 型包体边缘难熔元素的富集特征。

## 2 不同球粒陨石化学群中 CAI: 相似的岩石学特征

### 2.1 不同球粒陨石群中 CAI 类型分布

Lin 等(2006)和 Dai 等(2004)通过对南极 Grove Mountains(GRV)、Allende、Murchison、宁强等碳质球粒陨石、普通球粒陨石、以及综合前人所研究不同球粒陨石中 CAI 的统计(表 1),发现 A 型 CAI(或似 A 型—受到后期蚀变的 A 型 CAI)和富尖晶石—辉石型 CAI 是各种球粒陨石中占主要含

量地位的岩石类型。虽然,不同球粒陨石中各种CAI的含量相对有变化,但是A型CAI(或似A型)和富尖晶石—辉石型比其他的类型含量明显高许多。

CV型碳质球粒陨石(特别是Allende)中的CAI受到了最广泛的研究,特别是其中的粗粒CAI,包括B、C、POI和CTA等,因此造成一个假像:粗粒CAI是CV3型碳质球粒陨石中含量最高的CAI类型。其实这与粗粒CAI的集合体较大,较容易被发现和有关。为了没有偏见统计Allende陨石中CAI的类型,另外制作了4块光薄片。在扫描电镜下,通过对这4个薄片中的CAI进行了全面搜索,所发现的62个CAI的主要类型为A型和富尖晶石—辉石型,只有一个富黑铝钙石型包体和一个尖晶石—黑铝钙石碎片,且未发现B、C型包体。A型CAI中有5个属于CTA,其他均为FTA。粗粒CAI在CV型陨石中相对于其他的球粒陨石类型明显要高一些,可能与不同化学群球粒陨石中的组分经历了粒度分选有关。

同样,富黑铝钙石型CAI是CM型球粒陨石(Ireland,1988)中广泛研究的CAI类型,因为黑铝钙石具有蓝色的特征色,很容易被辨认。并且富尖晶石—黑铝钙石球粒状CAI主要是通过冻结—解

冻法(freeze—thaw method)和密度分选的方法(MacPherson et al.,1983)获得的,因此,所得到的结果没有统计意义,不能代表CM群陨石中CAI类型的分布特点。通过对GRV 020025(CM2,1个薄片)和Murchison(CM2,2个薄片)中的CAI进行了系统搜寻,结果它们中的CAI的类型主要为A型/似A型和富尖晶石—辉石型,仅在GRV 020025中发现了一个被蚀变边包裹的富尖晶石球粒状CAI(Dai et al.,2004;戴德求等,2007)。MacPherson and Davis(1994)在Mighei(CM2)陨石中一共发现了66个富尖晶石的CAI,其中大部分属于富尖晶石—辉石型CAI,与我们研究的似A型CAI非常相似,也含有大量可能由黄长石蚀变而来的细粒蚀变产物。

从表1中可以发现,各种球粒陨石群中A型(似A型)和富尖晶石—辉石型CAI的数量或丰度上相对有变化,但它们均是最主要的包体类型。A型(似A型)和富尖晶石—辉石型CAI之间相对数量上存在变化,一种可能是有些化学群陨石聚积了较早形成的包体,而另一些化学群陨石聚积了较晚形成的包体有关;另一方面的原因是这两类包体本身在岩石结构和矿物组成上是连续过渡的(Lin and Kimura,2003a),有时类型区分较困难,因此在统计

表1 不同群球粒陨石中CAI的类型分布(引自Lin et al.,2006)

Table 1 Summary of refractory inclusions in various chondrites(from Lin et al.,2006)

化学群	陨石	薄片数量	薄片面积 (mm <sup>2</sup> )	A型/ 似A型	尖晶石— 尖晶石碎片 尖晶石— 辉石	尖晶石 (辉石)	钙长石— 黑铝钙石	富 黑铝钙石 富 黑铝钙石 尖晶石 /黑铝钙石 深绿 辉石球粒 (碎片)	B/ C/ 辉石 钙长石	总量	资料来源
EH3	Sahara 97159	2	310	35	26			5	2	68	Lin et al., 2003b
Ordinary chondrite	Yamato 792947	5	267	15	20			2		37	Kimura et al., 2002
	Others	18	1390	14	9			1		24	Lin et al., 2006
CO3	GRV 021579	1	62	4	8			1		13	Dai et al., 2004
	Yamato 81020	1	6.1	42	23	22		1		88	Lin et al., 2006
	others	10	858	51	145	1	6	12		215	Russell et al., 1998
CM2	Murchison	2	210	9	7			1		17	Dai et al., 2004
	GRV 020025	1	120	6	5			1		12	Dai et al., 2004
CV3	Allende	4	1090	40	20		1	1		62	Dai et al., 2004
	GRV 022459	1	29	3						3	Dai et al., 2004
CV3-like	Ningqiang	21	1740	31	79	7			6	123	Lin and Kimura, 2003a
CR		12		14		5	4			23	Lin and Kimura, 2003a
CH	NWA 739	1	100	14	13		23			50	Krot et al., 2005
Uni-que	Acfer 094	1	34	95		14	19	1	3	132	Krot et al., 2004
CO/CM	MAC 87300, 88107	2	270	55	174		2			231	Russell et al., 2000

上存在一些误差。CH 群球粒陨石含有更高的富陨铝钙石和富黑铝钙石型 CAI。Krot 等 (2005) 在 NWA 739739 (CH) 陨石中一共发现了 50 个难熔包体,其中 23 个属于富陨铝钙石和富黑铝钙石型 CAI。在未分群的 Acfer 094 碳质球粒陨石也含有较高丰度的富陨铝钙石和富黑铝钙石型 CAI(19/132) (Krot et al., 2004)。富陨铝钙石和富黑铝钙石型、A 型和尖晶石—辉石型 CAI 可能代表了太阳星云从高温到低温连续凝聚的产物,因为在宁强陨石中的研究发现:它们的全岩成分具有沿太阳星云冷凝曲线连续分布的特征(Lin and Kimura, 2003)。由于黑铝钙石和陨铝钙石是太阳星云最早期凝聚的产物(Fegley, 1991; Yoneda and Grossman, 1995),富陨铝钙石和富黑铝钙石型 CAI 可能是太阳星云最早期凝聚的集合体。富陨铝钙石和富黑铝钙石型、A 型和尖晶石—辉石型 CAI 在陨石中相对丰度的变化可能与星云凝聚过程中 CAI 选择早或晚进入陨石吸积形成区有关。

另一个差异是在宁强碳质球粒陨石中发现了较多的细粒富钙长石—尖晶石型 CAI(ASI),在一些 CO 和 CR 球粒陨石中也有相似集合体出现。但是,此类 CAI 中的钙长石不属于原生矿物,而是 A 型 CAI 中的原生矿物——黄长石与太阳星云发生反应而形成。一种可能与星云连续凝聚有关,富 hibonite/grossite、A 型和尖晶石—辉石型 CAI 在不同类型球粒陨石中的含量相对不同。但是在宁强陨石中 ASI 的钙长石和副长石中没有发现<sup>26</sup>Mg 过剩(Lin et al., 2005),表明其蚀变反应发生在 CAI 形成后 >1.5 Ma 的时间间隔。另外,ASI 中的钙长石与似长石显示出相似的贫<sup>16</sup>O 同位素组成,与同一包体未被蚀变掉的黄长石—尖晶石边不同(Guan et al., 2005)。钙长石和似长石形成于与原生矿物形成部位明显不同的星云环境,钙长石形成于原生矿物离开初始形成位置之后。在其他球粒陨石中 ASI 的含量很低或者缺失,可能是因为其它类型 CAI 发生了强烈的二次蚀变,似长石、层状硅酸盐等替代了钙长石和黄长石。这与我们观察到含有更高含量 ASI 的陨石相对受到较少的蚀变作用一致。

## 2.2 不同球粒陨石群中 CAI 的粒度分布

不同球粒陨石中的 CAI 的直径大小非常相似(特别是由同心环状团块构成的 CAI,我们统计其单个团块的大小)。Lin 等 (2006) 研究的普通球粒陨石中的 24 个 CAI 具有较小的直径,它们的大小与 3 个成对 H3 型普通球粒陨石中的 66 个 CAI 相似

(图 1),说明普通球粒陨石中 CAI 大小与它们在不同陨石中的分布没有关系。把这些数据总结在一起,得到 90 个 CAI 的平均直径为  $82 \pm 52 \mu\text{m}$ 。这个数据与以前报道的普通球粒陨石中 CAI 的大小也完全一致(Bischoff and Keil, 1983; Kornacki and Fegley, 1984; Guan et al., 2000c; Huss et al., 2001)。Sahara 97159(EH3) 顽辉石球粒陨石中的 66 个 CAI 的直径为  $47 \pm 35 \mu\text{m}$ ,与普通球粒陨石大小类似。Guan 等 (2000a) 报道了 6 个顽辉石球粒陨石中 80 个 CAI,其中大部分 <  $50 \mu\text{m}$ ,最大的直径为  $120 \mu\text{m}$ 。Fagan 等 (2000) 在顽辉石球粒陨石中发现了 13 个 CAI,它们的直径位于  $30 \sim 80 \mu\text{m}$  之间。综上所述,顽辉石球粒陨石和普通球粒陨石中的 CAI 具有相似的大小。

一般认为不同群碳质球粒陨石中的 CAI 和球粒具有截然不同的大小。大多数毫米和厘米级大小 CAI 的报道主要源于 CV3 型碳质球粒陨石中,特别是 Allende 中较大直径的 CAI 受到了最广泛的关注和研究。CM 和 CO 型陨石中,CAI 相对较 CV 小。如前文所述,这不是对 CV3 型陨石中所有 CAI 完全统计的结果,所以难以反映其大小的特征。还有一个影响 CAI 大小统计结果的重要因素,是碳质球粒陨石中许多较大的 CAI 是由数个具同心环带完整结构的团块聚集在一起形成,如在 Allende 和宁强陨石中的一些 CAI。宁强陨石中一个毫米级大小的 CAI 就是由数个团块聚集形成,单个团块的大小是  $54 \pm 48 \mu\text{m}$ ,与普通球粒陨石和顽辉石球粒陨石中的 CAI 相似(图 1)。通过统计单个 CAI 和 Allende、Murchison 中某些具有团块状结构的 CAI 单个团块的大小(图 1)。结果显示,碳质球粒陨石中的 CAI 的大小与普通球粒陨石和顽辉石球粒陨石基本一致,其差别并没有以前认为的那么大。上述结论与一些其他碳质球粒陨石中 CAI 的大小统计结果相印证,如:MAC 87300 和 88107 (介于 CO3 和 CM2 之间) 中包体的大小位于  $10 \sim 300 \mu\text{m}$  (Russell et al., 2000); HH 237 和 QUE 94411 (CH-like) 中包体的大小位于  $50 \sim 400 \mu\text{m}$  (Krot et al., 2001); NWA739 (CH) 中包体的大小位于  $25 \sim 185 \mu\text{m}$  (平均  $70 \mu\text{m}$ ); CR 群球粒陨石中包体的大小一般小于  $500 \mu\text{m}$  (Aleon et al., 2002)。

## 3 不同陨石群中 CAI 相似的成因和源区

据上文所述的 CAI 岩石学特征,可以总结出一个

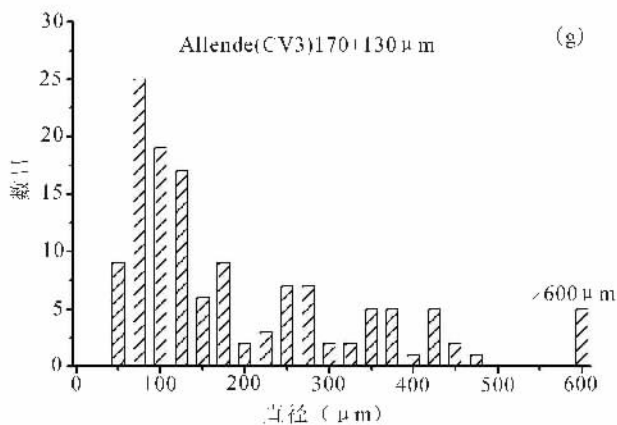
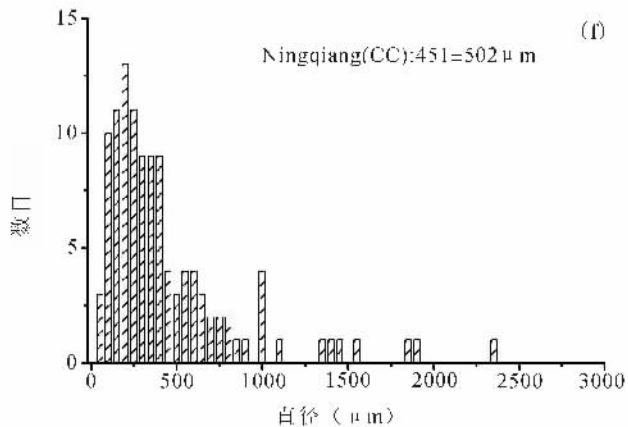
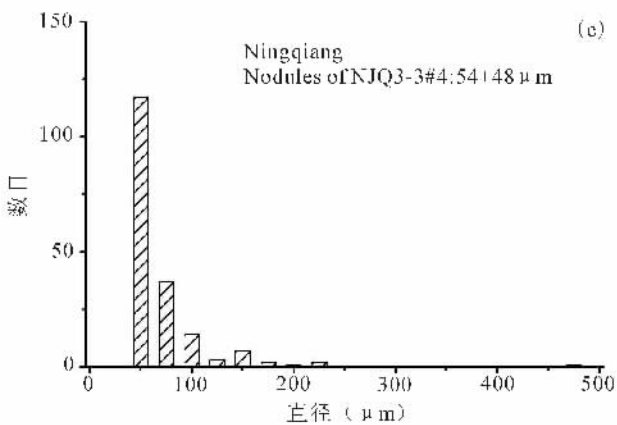
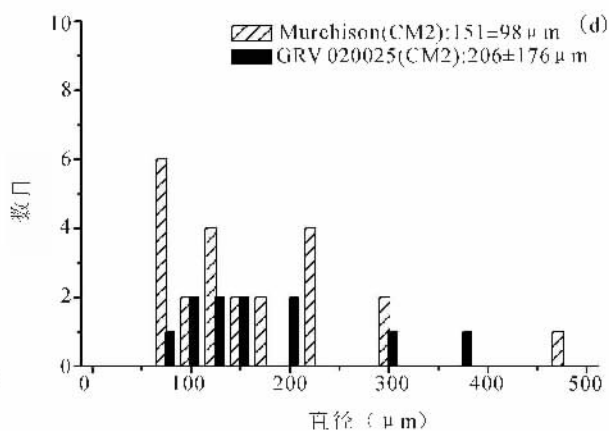
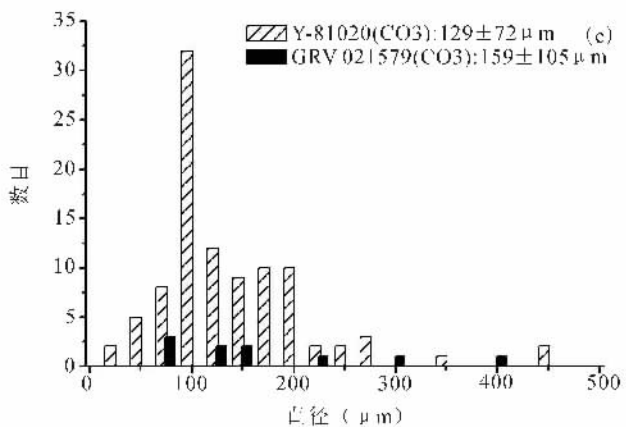
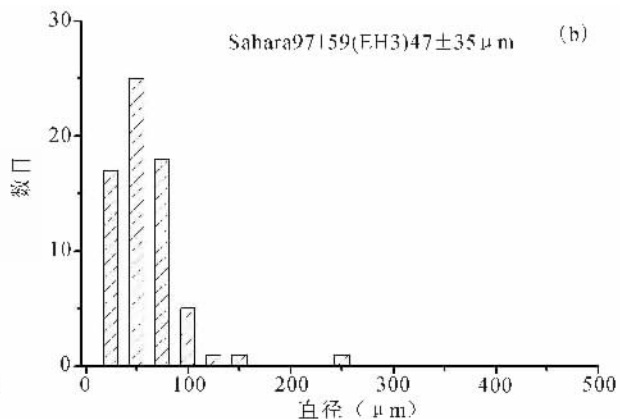
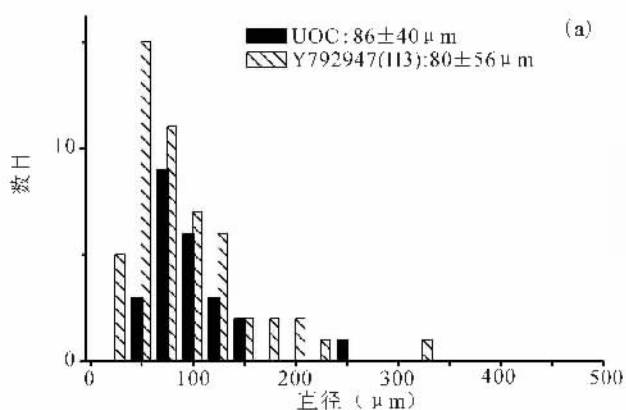


图 1 不同群球粒陨石中 CAI 大小分布特征(引自 Lin et al., 2006)

Fig. 1 Size distribution patterns of CAIs (from Lin et al., 2006)

(a) 普通球粒陨石和 Y-792947 (H3) (Kimura et al., 2002); (b) Sahara 97159 (EH3) (Lin et al., 2003b); (c) Y-81020 (CO3) 和 GRV 021579 (CO3) (Dai et al., 2004); (d) Murchison 和 GRV 020025 (Dai et al., 2004); (e) 宁强碳质球粒陨石, NQJ3-3#4 CAI 以单个团块的大小考虑, 3 个 B 型, 两个 POI(富斜长石—橄榄石型 CAI) 和一个 C 型粗粒 CAI 不在计算范围。注意不同群 CAI 与宁强中以小团块为单位考虑后的 CAI 相似的大小, 宁强与 Allende 中相对较大的尺寸可能与它们中含有较多团块状 CAI 有关; (f) 宁强 (CV3-like) (Lin and Kimura, 2003a); (g) Allende (CV3), 两个 mm 级的 CAI 被排除;

(a) ordinary chondrites and Y-792947 (H3) (Kimura et al., 2002); (b) Sahara 97159 (EH3) (Lin et al., 2003b); (c) Y-81020 (CO3) and GRV 021579 (CO3) (Dai et al., 2004); (d) Murchison (CM2) and GRV 020025 (CM2) (Dai et al., 2004); (e) The size distribution of individual concentric nodules in a Ningqiang CAI (NQJ3-3#4) is also shown for comparison. Three Type Bs, two POIs and one Type C inclusions in Ningqiang are not included. Note closely similar size distribution patterns of CAIs in various chondrites and the nodules in the Ningqiang inclusion. The larger sizes of CAIs in Allende and Ningqiang can partly be related to their common assemblages of numerous nodules; (f) Ningqiang (CV3-like) (Lin and Kimura, 2003a) and (g) Allende (CV3). The two mm-sized CAIs in Allende are excluded from the average value of the CAIs.

结论: 各种不同群球粒陨石中的 CAI 具有相似的类型和大小分布特征。通过对 GRV 不同群碳质球粒陨石和 Allende 陨石中 CAI 的矿物化学特征等研究表明, CAI 之间还具有相似的矿物化学组成 (Dai et al., 2004; Lin et al., 2006)。这些相似的岩石学特征和矿物化学特征说明不同化学群球粒陨石中的 CAI 可能具有相似的成因, 并可能形成于太阳星云中的相同区域。前人基于氧同位素、Al—Mg 同位素体系 (Guan et al., 2000a; Huss et al., 2001) 和 REE (Lin et al., 2003b) 等研究, 也得出不同化学群中的 CAI 具有相似起源。

相反, 假如 CAI 形成于不同化学群陨石的形成区域, 那么 CAI 中的矿物集合体就会反映陨石形成区域不同的星云条件。例如, 顽辉石球粒陨石形成于极端还原的星云条件, 那么 CAI 中会有星云还原条件下凝聚的产物: oldhamite、ninningerite (尼宁格矿) 和碳化物等 (Larimer and Bartholomay, 1979)。然而这样的矿物在顽辉石球粒陨石 CAI 中并没有被发现。

有研究者认为蠕虫状橄榄石集合体 (简称 AOA) 可能经历了初步熔融 (Scott et al., 1992), 但越来越多的证据认为细粒 CAI 和 AOA 的成因可能具有相关性, 它们可能都是属于星云直接凝聚形成 (Lin et al., 2003a; Wang et al., 2007; 戴德求等, 2007)。Dai 等 (2004) 和 Lin 等 (2006) 对细粒 CAI (FTA、富尖晶石—辉石型 CAI) 和含难熔组分 AOA 的岩石学和矿物化学特征以及全岩化学组成等的研究表明:

(1) 通过对 GRV、Murchison 陨石的研究发现某些 FTA 和富尖晶石—辉石型 CAI 具有非常类似的矿物组合, 有时很难划分到底属于哪个类型; 另

外, 一些 AOA 中存在小的富尖晶石—辉石型 CAI, 都显示它们在矿物组成上具有逐步变化的特征。

(2) 对 GRV 陨石 FTA/似 A 型中残留黄长石矿物化学成分研究表明, 它们全部属于富 Al 黄长石 ( $\text{Åk}_{3-29}$ ), 位于星云凝聚黄长石的数值范围 ( $\text{Åk}_{<40}$ ) (Yoneda and Grossman, 1995), 而在经历过熔融的 B、C 型包体中, 黄长石常以富镁黄长石出现 (Lin and Kimura, 1998, 2000), 表明 FTA 可能由星云凝聚形成。

(3) Lin and Kimura (2003a) 对宁强陨石中细粒包体全岩化学组成, 岩石矿物学研究表明, 松散状 A 型包体、尖晶石—辉石型包体, 以及一种含尖晶石的蠕虫状橄榄石集合体 (AOA) 之间存在连续的过渡关系, 并且它们的全岩化学组成落在太阳星云冷凝曲线上, 代表了太阳星云从高温到低温连续冷凝的产物 (图 2)。除了宁强, 其他碳质球粒陨石中大量 AOA 的研究也证明星云凝聚的观点 (Komatsu et al., 2001)。CAI 和 AOA 之间在成因方面相互关联的同位素证据包括 AOA 中主要成分与 CAI 具有相似的  $^{16}\text{O}$  富集的特征 (Fagan et al., 2002; Itoh et al., 2002) 等。

## 4 CAI 成因和演化模式

### 4.1 太阳星云模型

太阳星云的初始状态存在二种不同的模型, 即热星云说和冷星云说。热星云模型认为原始太阳星云为一高温气体, 由于热辐射逐渐冷却并收缩, 其中中央形成太阳, 边缘星云盘由高温气体冷凝形成固相尘埃, 并进一步聚集形成星子, 最后堆积形成行星。对太阳星云从高温至低温冷凝过程的热力学计算, 理论预期的各种矿物不仅在 CAI 中全部发现, 并且

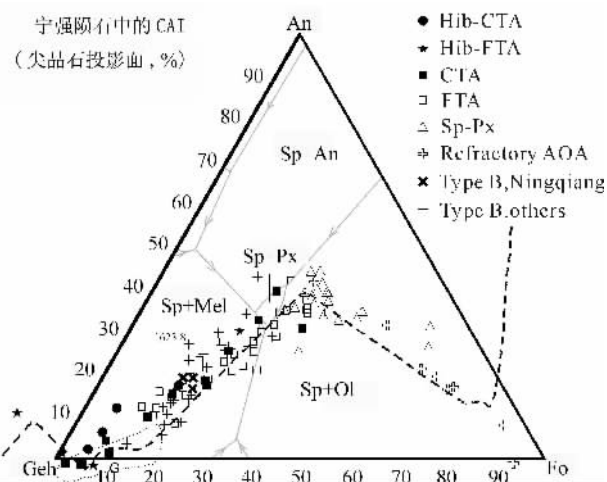


图 2 富 Ca, Al 包体的全岩化学组成与太阳星云凝聚(引自 Lin and Kimura, 2003a)

Fig. 2 Bulk composition of CAIs and solar nebular condensation (from Lin and Kimura, 2003a)

图中粗点划线为理论计算的太阳星云的冷凝变化(从左向右温度降低),细点划线区域为粗粒 A 型包体的组成范围。缩写: Geh: 钙黄长石; Fo: 镁橄榄石; Mel: 黄长石; Ol: 橄榄石。其余缩写见表 1。

Most of the analyses plot along the condensation trajectory (dashed line), in the order hibonite-bearing Type As, Type As, spinel-pyroxene inclusions and refractory AOA, from high to low temperature. The range of typical Type A CAI (dotted line) along the condensation trajectory to the middle of the chart. Geh—gehlenite; Fo—forsterite; Mel—melilite; Ol—ilivine

各种矿物的形成温度与据 CAI 矿物结构关系所给出的形成次序相当一致(Grossman, 1972; Yoneda and Grossman, 1995)。太阳星云冷凝的理论计算还很好对解释了 CAI 全岩的稀土等微量元素特征。对极端还原条件下的星云冷凝计算结果,也与顽辉石球粒陨石的矿物学特征吻合(Larimer and Bartholomay, 1979; Lin and El Goresy, 2002)。上述理论计算与实际分析结果的一致,有力地支持了热星云假说。

近年的一些研究成果,特别是同位素分析数据,越来越清楚地表明,太阳星云没有达到被完全气化状态,至少保存相当数量的固相尘埃。首先,陨石中太阳系外物质的存在就是一个有力的证据。如果太阳星云达到高温(如 $>1770\text{K}$ ),太阳系外物质将难以存在。尽管目前分离出的太阳系外物质主要为各种难熔矿物,但对不同化学群及不同岩石类型陨石中太阳系外物质的研究表明,它们对于星云和小行星母体中的热变质事件相当敏感(Huss and Lewis,

1995)。石墨、纳米级的金刚石等,在氧化条件下也难以在高温中存在。对于冷星云模型,太阳 X-风假说可以解释 CAI 和球粒的形成,并与相当一部分实验分析结果(如灭绝核素分布等)吻合。

## 4.2 CAI 成因和演化模式

CAI 的成因模型需要对以下重要特征给出合理解释:①CAI 中灭绝核素子体的存在,以及它们的含量在不同类型 CAI 中的变化特征;②CAI 及其构成矿物富 $^{16}\text{O}$ 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为 1 的直线(Young and Russell, 1998);③ CAI 的含量在普通球粒陨石和顽辉石球粒陨石中含量很低,但它们与碳质球粒陨石中的同类组分可能具有相同的来源(McKeegan et al., 1998; Fagan et al., 2000; Guan et al., 2000a; Guan et al., 2000b; Fagan et al., 2001; Kimura et al., 2002; Lin et al., 2003b)。

太阳 X-风模型(Shu et al., 1996, 1997)认为 CAI 的形成是由于太阳早期强烈高能粒子辐射对太阳星云尘埃的加热蒸发结果。该模型虽然提出了一种导致 CAI 熔融的机制,但大部分 CAI 并没有受到明显的加热熔融。对灭绝核素的解释也面临新的困难。此外, X-风模型并不涉及 CAI 在不同化学群球粒陨石中的分布,氧同位素异常等。因此,越来越多的实验数据倾向支持太阳星云冷凝模型。

通过总结前人对 CAI 成因的研究进展,可得出 CAI 具有相似的起源的结论, CAI 形成和演化模式的大概过程是:在太阳星云的特定区域,温度在达到使大部分固相尘埃气化之后开始冷却,从高温到低温凝聚形成一系列 CAI(顺序:含黑铝钙石/陨铝钙石 $\rightarrow$ A 型 $\rightarrow$ 尖晶石—辉石型 $\rightarrow$ AOA)。一部分 A 型包体与气相反应形成富钙长石—尖晶石型包体。在星云冷凝的同时或滞后,出现局部的高温热事件(如闪电),使一部分冷凝的包体被熔融,然后结晶形成粗粒包体(如松散状 A 型熔融结晶形成致密 A 型,富钙长石—尖晶石型形成 C 型,富黄长石—尖晶石型形成 B 型等)。强烈的加热作用还导致少量 CAI 明显的化学和同位素蒸发分馏现象。由于太阳引力,太阳风驱动,以及星云中可能存在的扰动等,一些 CAI 被迁移至不同群球粒陨石的吸积区域,由于陨石吸积区与 CAI 形成区空间距离不同,使得不同群陨石中的 CAI 含量不同。空间距离越远, CAI 由于要搬运较远距离,可能造成其丰度越低,发生破碎现象可能越明显。由于体系物理化学条件的明显改变,产生强烈的后期蚀变作用。

## 参 考 文 献 / References

- 戴德求,林杨挺,缪秉魁,王道德. 2007. Allende(CV3)陨石中一种特殊蠕虫状橄榄石集合体的矿物岩石学特征及其成因探讨. 矿物岩石,27(1): 71~77.
- 戴德求,林杨挺,缪秉魁,王桂琴. 2006. 南极碳质球粒陨石中两个富尖晶石球粒状难熔包体的岩石学和矿物化学特征研究. 地球化学,35(5): 540~546.
- Aleon J, Krot A N, McKeegan K D. 2002. Calcium—aluminum-rich inclusions and amoeboid olivine aggregates from the CR carbonaceous chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*,37: 1729~1755.
- Armstrong J T, Meeker G P, Huneke J C, Wasserburg G J. 1982. The blue angel I—The mineralogy and petrogenesis of a hibonite inclusion from the Murchison meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,46: 575~595.
- Bischoff A, Keil K. 1983. Ca—Al-rich chondrules and inclusions in ordinary chondrites. *Nature*,303: 588~592.
- Clayton R N. 1993. Oxygen Isotopes in Meteorites. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 21:115~149.
- Clayton R N, Grossman L, Mayeda T K. 1973. A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorite. *Science*,182: 485~488.
- Clayton R N, MacPherson G J, Hutcheon I D, Davis A M, Grossman L, Mayeda T K, Molini-Velsko C, Allen J M. 1984. Two forsterite-bearing FUN inclusions in the Allende Meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,48: 535~548.
- Dai D, Lin Y, Miao B, Shen W, Wang D. 2004. Ca-, Al-rich inclusions in three new carbonaceous chondrites from the Grove Mountains, Antarctica: New evidence for a similar origin of the objects in various groups of chondrites. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*,78(5): 1042~1051.
- Fagan T J, Krot A N, Keil K. 2000. Calcium—aluminum-rich inclusions in enstatite chondrites (I): Mineralogy and textures. *Meteoritics & Planetary Science*,35(4): 771~781.
- Fagan T J, McKeegan K D, Krot A N, Keil K. 2001. Calcium—aluminum-rich inclusions in Enstatite Chondrites (II): Oxygen Isotopes. *Meteoritics and Planetary Science*,36(2): 223~230.
- Fagan T J, Yurimoto H, Krot A N. 2002. Constraints on oxygen isotopic evolution from an amoeboid olivine aggregate and Ca, Al-rich inclusion from the CV3 Efremovka (abstract). *Lunar Planet. Sci.*,33: 1507.
- Fahey A J, Zinner E, Kracher A. 1994. Hibonite—hercynite inclusion HH-1 from the lance (CO3) meteorite: the history of an ultra-refractory CAI. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,58: 4779~4793.
- Fegley B Jr. 1991. The stability of calcium aluminate minerals in the solar nebula (abstract). *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXII: 367~368.
- Greenwood R C, Lee M R, Hutchison R, Barber D J. 1994. Formation and alteration of CAIs in Cold Bokkeveld (CM2). *Geochimica et Cosmochimica Acta*,58: 1913.
- Grossman L. 1972. condensation in the primitive solar nebula. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,36: 597~619.
- Grossman L. 1975. Petrography and mineral chemistry of Ca-rich inclusions in the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,39: 433~454.
- Grossman L. 1980. Refractory inclusions in the Allende meteorite. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*,8: 559~608.
- Grossman L, Ebel D S, Simon S B, Davis A M, Richter F M, Parsad N M. 2000. Major element chemical and isotopic compositions of refractory inclusions in C3 chondrites: The separate roles of condensation and evaporation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,64(16): 2879~2894.
- Grossman L, Ganapathy R. 1976a. Trace elements in the Allende meteorite. I—Coarse-grained, Ca-rich inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,40: 331~344.
- Grossman L, Ganapathy R. 1976b. Trace elements in the Allende meteorite. II—Fine-grained, Ca-rich inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,40: 967~977.
- Guan Y, Huss G R, MacPherson G J, Wasserburg G J. 2000a. Calcium—aluminum-rich inclusions from enstatite chondrites: indigenous or foreign? *Science*,289(5483): 1330~1333.
- Guan Y, Lin Y, Leshin L A. 2005. Oxygen Isotope Distribution in Anorthite—Spinel-rich Inclusions from the Ningqiang Carbonaceous Chondrite. 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference.
- Guan Y, McKeegan K D, MacPherson G J. 2000b. Oxygen isotopes in calcium—aluminum-rich inclusions from enstatite chondrites: new evidence for a single CAI source in the solar nebula. *Earth and Planetary Science Letters*,181: 271~277.
- Guan Y, McKeegan K D, MacPherson G J. 2000c. Oxygen-isotopic compositions in two calcium—aluminum-rich inclusions from unequilibrated ordinary chondrites (abstract). *Meteoritics and Planetary Science*,35: A67.
- Huss G R, Lewis R S. 1995. Presolar diamond, SiC, and graphite in primitive chondrites: Abundances as a function of meteorite class and petrologic type. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,59:115~160.
- Huss G R, MacPherson G J, Wasserburg G J, Russell S S, Srinivasan G. 2001. <sup>26</sup>Al in CAIs and chondrules from unequilibrated ordinary chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*,36: 975~997.
- Ireland T R. 1988. Correlated morphological, chemical, and isotopic characteristics of hibonites from the Murchison carbonaceous chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,52: 2827~2839.
- Itoh S, Rubin A E, Kojima H. 2002. Amoeboid olivine aggregates and AOA-bearing chondrule from Y-81020 CO3. 0 chondrite: Distribution of oxygen and magnesium isotopes (abstract). *Lunar Planet. Sci.*,33: 1490.
- Kimura M, Hiyagon H, Palme H, Spettel B, Wolf D, Clayton R N, Mayeda T K, Sato T, Suzuki A, Kojima H. 2002. Yamato 792947, 793408 and 82038: The most primitive H chondrites, with abundant refractory inclusions. *Meteoritics and Planetary Science*,37: 1417~1434.
- Kornacki A S, Fegley B Jr. 1984. Origin of spinel-rich chondrules and inclusions in carbonaceous and ordinary chondrites. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*,XV(89): B588~596.
- Komatsu M, Miyamoto M, Mikouchi T. 2001. Diffuse reflectance spectra in the UV-VIS-NIR wavelength region of Yamato 75258 (LL6) heated at different oxygen fugacities: Relationship between spectral and mineralogical changes. *Antarctic Meteorites XXVI. Papers presented to the 26th Symposium on Antarctic Meteorites, NIPR, Tokyo, June 12~14, 2001*, p. 63~65.



- Krot A N, Fagan T J, Keil K, McKeegan K D, Sahijpal S, Hutcheon I D, Petaev M I, Yurimoto H. 2004. Ca, Al-rich inclusions, amoeboid olivine aggregates, and Al-rich chondrules from the unique carbonaceous chondrite Acfer 094: I. mineralogy and petrology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(9): 2167~2184.
- Krot A N, McKeegan K D, Russell S S, Meibom A, Weisberg M K, Zipfel J, Krot T V, Fagan T J, Keil K. 2001. Refractory calcium—aluminum-rich inclusions and aluminum-diopside-rich chondrules in the metal-rich chondrites Hammadah al Hamra 237 and Queen Alexandra Range 94411. *Meteoritics and Planetary Science*, 36: 1189~1216.
- Krot A N, Petaev M I, Keil K. 2005. Mineralogy and petrology of Al-rich objects and amoeboid olivine aggregates in the CH carbonaceous chondrite North West Africa 739. *Chemie der Erde Geochemistry*.
- Larimer J W, Bartholomay M. 1979. The role of carbon and oxygen in cosmic gases: Some applications to the chemistry and mineralogy of enstatite chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43: 1455~1466.
- Lattimer J W. 1967. Chemical fractions in meteorites: I. Condensation of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31: 1215~1238.
- Lattimer J W, Schramm D N, Grossman L. 1978. Condensation in supernova ejecta and isotopic anomalies in meteorites. *Astrophysical Journal*, 219: 230~249.
- Lin Y, El Goresy A. 2002. A comparative study of opaque phases in Qingzhen (EH3) and MAC 88136 (EL3): Representative of EH and EL parent bodies. *Meteoritics and Planetary Science*, 37: 577~599.
- Lin Y, Guan Y, Leshin L A, Ouyang Z, Wang D. 2005. Short-lived chlorine-36 in a Ca—Al-rich inclusion from the Ningqiang carbonaceous chondrite. *Proc. National Academy of Sciences*, 102(5): 1306~1311.
- Lin Y, Kimura M. 1998. Anorthite—spinel-rich inclusions in the Ningqiang carbonaceous chondrite: Genetic links with Type A and C inclusions. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(3): 435~446.
- Lin Y, Kimura M. 2000. Two unusual Type B refractory inclusions in the Ningqiang carbonaceous chondrite: Evidence for relicts, xenoliths and multi-heating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(23): 4031~4047.
- Lin Y, Kimura M. 2003a. Ca—Al-rich inclusions from the Ningqiang meteorite: Continuous assemblages of the nebular condensates and genetic link to Type Bs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(12): 2251~2267.
- Lin Y, Kimura M, Hiyagon H, Monoi A. 2003b. Unusually abundant refractory inclusions from Sahara 97159 (EH3): A comparative study with other groups of chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(24): 4935~4948.
- Lin Y, Kimura M, Miao B, Dai D, Monoi A. 2006. Petrographic comparison of refractory inclusions from different chemical groups of chondrites. *Meteoritics and Planetary Sciences*, 41: 67~81.
- Lin Y, Kimura M, Wang D. 2003c. Fassaite in compact type A Ca—Al-rich inclusions in the Ningqiang carbonaceous chondrite: Evidence for partial melting in the nebula. *Meteoritics & Planetary Sciences*, 38(3): 407~417.
- MacPherson G J. 1984. Refractory inclusions in the Mighei C2 meteorite. *LPI Contributions*, 537: 50.
- MacPherson G J, Bar-Matthews M, Tanaka T, Olsen E, Grossman L. 1983. Refractory inclusions in the Murchison meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47: 823~839.
- MacPherson G J, Davis A M. 1994. Refractory inclusions in the prototypical CM chondrite, Mighei. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 5599~5625.
- MacPherson G J, Grossman L. 1981. A once-molten, coarse-grained, Ca-rich inclusion in Allende. *Earth and Planetary Science Letters*, 52: 16~24.
- MacPherson G J, Grossman L. 1984. “Fluffy” Type A Ca-, Al-rich inclusions in the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 29~46.
- MacPherson G J, Davis A M, Zinner E. 1995. The distribution of aluminum-26 in the early solar system—A reappraisal. *Meteoritics*, 30: 365~386.
- McKeegan K D, Leshin L A, Russell S S, MacPherson G J. 1998. Oxygen isotopic abundances in calcium—aluminum-rich inclusions from ordinary chondrites: implications for nebular heterogeneity. *Science*, 280(5362): 414~418.
- Paque J M, Stolper E. 1983. Experimental Evidence for Slow Cooling of Type B Cais from a Partially Molten State. *Lunar and Planetary Institute Conference, Abstracts*.
- Richter F M, Davis A M, Ebel D S, Hashimoto A. 2002. Elemental and isotopic fractionation of Type B calcium-, aluminum-rich inclusions: experiments, theoretical considerations, and constraints on their thermal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 521~540.
- Russell S S, Huss G R, Fahey A J, Greenwood R C, Hutchison R, Wasserburg G J. 1998. An isotopic and petrologic study of calcium—aluminum-rich inclusions from CO3 meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 689~714.
- Russell S S, Davis A M, MacPherson G J, Guan Y, Huss G R. 2000. Refractory inclusions from the ungrouped carbonaceous chondrites MAC 87300 and MAC 88107. *Meteoritics and Planetary Science*, 35: 1051~1066.
- Scott E R D, McCoy T J, Haack H, Taylor G J. 1992. Igneous Evolution of the Core and Mantle in the Parent Body of Group IVA Iron and Stony—Iron Meteorites. *Meteoritics*, 27: 287.
- Sheng Y J, Hutcheon I D, Wasserburg G J. 1991. Origin of plagioclase—olivine inclusions in carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 581~599.
- Sheng Y J, Wasserburg G J, Hutcheon I D. 1992. Self-diffusion of magnesium in spinel and in equilibrium melts—Constraints on flash heating of silicates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(6): 2535~2546.
- Shu F H, Shang H, Glassgold A E, Lee T. 1997. X-rays and fluctuating X-winds from protostars. *Science*, 277: 1475~1479.
- Shu F H, Shang H, Lee T. 1996. Toward an astrophysical theory of chondrites. *Science*, 271: 1545~1552.
- Simon S B, Grossman L, Davis A M. 1991. Fassaite composition trends during crystallization of Allende Type B refractory inclusion melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 2635~2655.
- Stolper E. 1982. Crystallization sequences of Ca—Al-rich inclusions from Allende—an experimental study. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta, 46: 2159~2180.
- Wang G, Lin Y, Dai D. 2007. Bulk Mg Isotopic Compositions of Ca-, Al-Rich Inclusions and Amoeboid Olivine Aggregates. *Meteoritics and Planetary Science*, 42, 1281~1289.
- Wark D, Boynton W V. 2001. The formation of rims on calcium—aluminum-rich inclusions; Step I—Flash heating. *Meteoritics and Planetary Science*, 36, 1135~1166.
- Wark D A. 1986. Evidence for successive episodes of condensation at high temperature in a part of the solar nebula. *Earth and Planetary Science Letters*, 77, 129~148.
- Wark D A. 1987. Plagioclase-rich inclusions in carbonaceous chondrite meteorites—Liquid condensates? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 221~242.
- Wark D A. and Lovering J. F. 1982. The nature and origin of type B1 and B2 Ca—Al-rich inclusions in the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 2581~2594.
- Yoneda S, Grossman L. 1995. Condensation of CaO—MgO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—SiO<sub>2</sub> liquids from cosmic gases. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3413~3433.
- Young E D, Russell S S. 1998. Oxygen reservoirs in the early solar nebula inferred from an Allende CAI. *Science*, 282: 452~455.
- Zinner E. 2003. An isotopic view of the early solar system. *Science*, 300: 265~267.

## The Evolvement Models and Progress of Research on Formation of Ca-, Al-rich inclusions in Chondrites

DAI Deqiu<sup>1)</sup>, WANG Daode<sup>2)</sup>, SONG Xinshe<sup>3)</sup>, YUAN Zhi<sup>3)</sup>, FENG Shaozhen<sup>3)</sup>

1) *Institute of Geology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201;*

2) *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640;*

3) *Guangdong Institute of Safety Science and Technology, Guangzhou, 510060*

**Abstract:** Ca-, Al-rich inclusions (CAIs) are the earliest assemblages formed in the solar nebula. The formation models of CAIs include gas—solid condensation, crystallization from melting or partial melting and high-temperature evaporating residues. The latest study show similar distribution patterns of the petrographic types and sizes of CAIs in various chondrites. The petrographic characters argue that CAIs in various chemical groups of chondrites formed under similar processes and conditions probably in a same region in the solar nebula. This is consistent with previous studies of oxygen isotopes, Al—Mg isotopic system and rare earth elements, which suggest a same reservoir of CAIs in various chondrites. During and/or after formation, CAIs were transported into different locations where various groups of chondrites accreted.

**Key words:** Ca-, Al-rich inclusions; CAI; formation; evolvement; chondrites solar nebula