

doi:10.3969/j.issn.0563-5020.2013.03.014

# 富橄榄石的富 Ca,Al 组分集合体的 矿物岩石学特征及对比研究\*

戴德求<sup>1,2</sup> 陈新跃<sup>1</sup> 杨荣丰<sup>1,3</sup>

(1. 湖南科技大学地质研究所 湖南湘潭 411201; 2. 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002;  
3. 页岩气开发与利用湖南省重点实验室 湖南湘潭 411201)

**摘要** 富 Ca,Al 包体、球粒和蠕虫状橄榄石集合体都是早期星云事件的产物。本文探讨了 4 个富橄榄石的富 Ca,Al 组分集合体的矿物岩石学特征,并对它们进行了对比。矿物岩石学特征表明含橄榄石边的富尖晶石—辉石型包体和富 Ca,Al 组分蠕虫状橄榄石集合体都属于星云直接凝聚的产物,而富钙长石—橄榄石型包体(POI)和富 Ca,Al 组分球粒经历过熔融结晶过程。矿物模式组成表明 POI 包体和富 Ca,Al 组分球粒可能是认识典型富 Ca,Al 包体与球粒之间相互关系的钥匙。蠕虫状橄榄石集合体 GRV022459-2C1 中尖晶石普遍具有高的 FeO 含量,表明其蚀变发生于高氧逸度的星云环境。球粒与粗粒富 Ca,Al 包体可能属于同一热事件的产物,粗粒富 Ca,Al 包体形成于富 Ca,Al 矿物富集的区域,Mg,Fe 质硅酸盐球粒形成于富 Ca,Al 矿物缺失的区域;POI 包体和富 Ca,Al 组分球粒可能形成于上述两个区域之间的过渡区域。

**关键词** 富 Ca,Al 包体 球粒 蠕虫状橄榄石集合体 富钙长石—橄榄石型包体 星云

**中图分类号**:P185.13,P597,P595 **文献标识码**:A **文章编号**:0563-5020(2013)03-762-11

## 1 前言

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、蠕虫状橄榄石集合体、不透明矿物集合体、晶屑和细粒基质等)机械堆积而成。球粒、富 Ca,Al 包体和蠕虫状橄榄石集合体都是早期太阳星云演化的产物,它们保存了太阳星云形成和演化的各种信息,对于认识早期太阳星云形成和演化过程具有重要意义。

球粒是球粒陨石中最主要的组分,矿物组成以 Mg,Fe 质硅酸盐(橄榄石和低 Ca 辉石)为主。球粒包括放射状、炉条状、斑状、等粒状和隐晶质结构等各种类型,此外有些球粒还含有富 Ca,Al 包体。富 Ca,Al 包体是球粒陨石中由富 Ca,Al 的氧化物和硅酸盐(尖晶石、黄长石、钙钛矿、透辉石和钙长石等)组成的难熔集合体。通常根据富 Ca,Al 包体中矿物颗粒的大小,将它们划分为粗粒和细粒包体两大类(Grossman and Ganapathy, 1976a, 1976b)。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

\* 国家自然科学基金项目(编号:41103032)、环境地球化学国家重点实验室开放基金项目(编号:SKLE1106)和湖南省教育厅项目(编号:10C0670,12B039)资助。

戴德求,男,1976年11月生,博士,副教授,陨石学和天体化学专业。E-mail:ddqygf@163.com

2012-12-30 收稿,2013-02-28 改回。

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, 1975, 1980; Wark and Lovering, 1982; Sheng et al., 1991; Lin and Kimura, 2000; Richter et al., 2002)。最常见的细粒富 Ca, Al 包体主要有两种类型,即松散状 A 型包体(FTA, 富黄长石—尖晶石型)和富尖晶石—辉石型包体(Grossman and Ganapathy, 1976b)。蠕虫状橄榄石集合体是球粒陨石中一种富含橄榄石的不规则状集合体,矿物组成以橄榄石为主,有时可见似长石、富 Al 的透辉石、尖晶石和 Fe-Ni 金属、硫化物等不透明矿物。

一般认为,早期星云冷凝,从高温到低温依次形成 FTA 和富尖晶石—辉石型包体,蠕虫状橄榄石集合体可能是相对更低温星云凝聚的产物(Lin et al., 2003; Wang et al., 2007)。球粒和粗粒富 Ca, Al 包体显然经历过熔融结晶的过程,它们是前期形成物质熔融结晶的产物(Yoneda and Grossman, 1995)。虽然已经基本认识了这些集合体的形成和演化过程,但很少把它们作为一个整体来研究它们之间的相互关系,这些集合体都是早期星云过程的产物,它们之间在形成和演化过程中应该具有某种联系。研究发现,一种不常见的 POI 型粗粒富 Ca, Al 包体的全岩化学组成以及同位素特征等具有介于典型富 Ca, Al 包体和球粒之间的过渡性质,因而,其可能是研究富 Ca, Al 包体和球粒相互关系的一把钥匙(Sheng et al., 1991; Lin and Kimura, 1997; Hsu et al., 2003)。认识球粒、富 Ca, Al 包体和蠕虫状橄榄石集合体之间的相互关系,是天体化学领域的基本科学问题,对于认识早期星云演化过程具有重要意义。

本文选择了一组富橄榄石的富 Ca, Al 组分集合体:具橄榄石边的细粒富尖晶石—辉石型富 Ca, Al 包体、富 Ca, Al 组分的蠕虫状橄榄石集合体和 POI 粗粒富 Ca, Al 包体和富 Ca, Al 组分的球粒,并对这组集合体进行矿物岩石学特征及对比研究,在此基础上探讨它们的形成过程及相互联系,并试图探讨它们的演化模式。

## 2 样品和实验方法

本文中报道的具橄榄石边的细粒富尖晶石—辉石型富 Ca, Al 包体发现于南极 GRV021579 碳质球粒陨石(包体编号为 GRV021579-3R18)(图 1a),富 Ca, Al 组分的蠕虫状橄榄石集合体发现于 GRV022459 碳质球粒陨石(集合体编号为 GRV022459-2C1)(图 1b),POI 粗粒包体发现于宁强碳质球粒陨石(包体编号为 C#1)(图 1c),富 Ca, Al 组分球粒发现于 Allende 碳质球粒陨石(球粒编号为 A2-CH2)(图 1d)。

岩石学特征(形态、结构以及矿物之间的相互关系等)主要在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室的光学显微镜和带能谱的扫描电镜(型号:JSM 6460LV)背散射模式(BSE)下进行。代表性矿物化学成分的定量分析在该所矿床地球化学国家重点实验室的电子探针(型号:JEOL 8100)下完成。实验条件为:加速电压 15 keV,束流 20 nA,分析标准为硅酸盐矿物和氧化物。分析中对一些元素特征峰的叠加进行了校正(如 Cr 的  $K_{\beta}$  线对 Mn 的  $K_{\alpha}$  线的叠加等),分析结果采用 ZAF 方法校正。

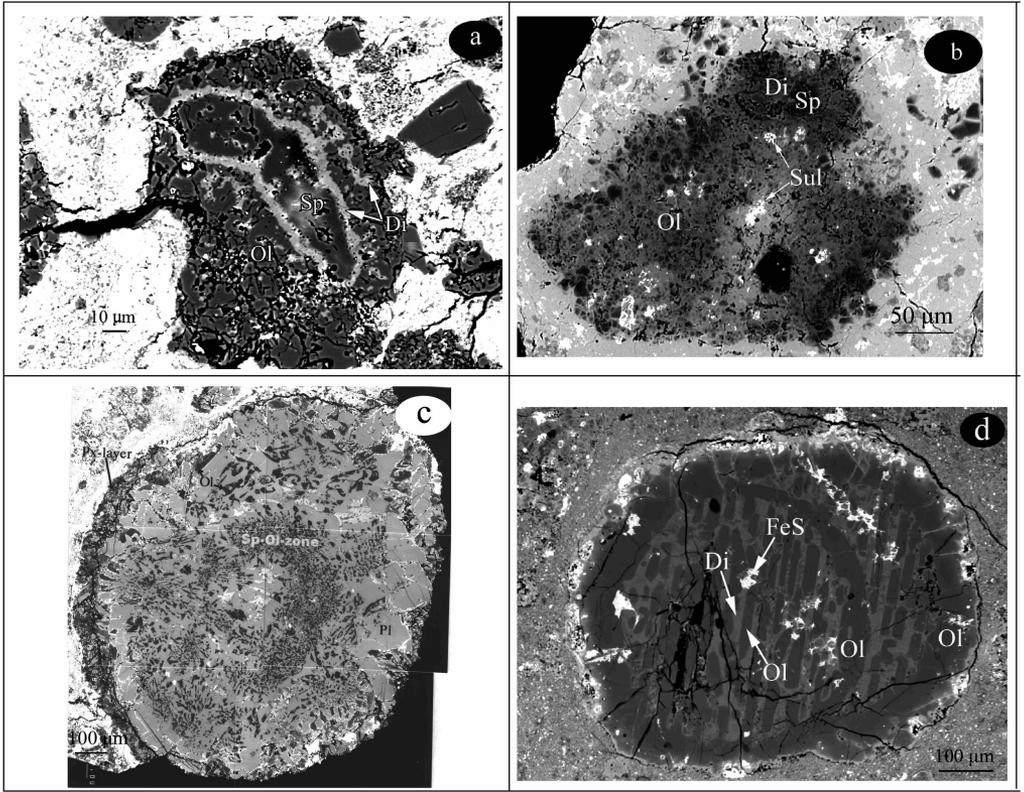


图1 富橄榄石的富Ca,Al组分集合体的背散射图像(BSE)照片

a. GRV021579-3R18,具橄榄石边的富尖晶石—辉石型包体; b. GRV022459-2C1,富Ca,Al组分的蠕虫状橄榄石集合体; c. C#1,POI粗粒包体; d. A2-CH2,富Ca,Al组分球粒。Sp.尖晶石, Di.透辉石, Ol.橄榄石, Sul.金属硫化物, Pl.钙长石, Px.低钙辉石

Fig. 1 BSE images of olivine and Ca,Al-rich assemblages

### 3 矿物岩石学特征

#### 3.1 岩石学特征

GRV021579-3R18属于典型的富尖晶石—辉石型包体,具有不规则的外形,粒径约为 $100 \times 200 \mu\text{m}$ 。包体具有尖晶石核和透辉石边,最外面被橄榄石边所包裹,少量细粒钙钛矿镶嵌于尖晶石中,矿物的体积百分含量约为:尖晶石30%、橄榄石60%、透辉石10%(图1a)。

GRV022459-2C1是一个含少量富钙辉石和尖晶石等难熔富Ca,Al矿物的蠕虫状橄榄石集合体,具有不规则的外形,松散的结构,粒径约为 $500 \mu\text{m}$ 。集合体的矿物组成以橄榄石占主导地位,富Ca,Al矿物以一个小的富尖晶石—辉石型包体的形式存在于集合体的顶部。在GRV022459-2C1中,还存在少量的不规则的金属硫化物(图1b)。

C#1属于典型的POI粗粒包体,具有浑圆的外形,粒径约为 $2.5 \times 3.0 \text{ mm}$ 。其中的钙长石呈现自形和粗粒的特征,粒径最大可达 $380 \mu\text{m}$ 。橄榄石主要存在两种形态:1)大部

分橄榄石呈自形一半自形、粗粒,与钙长石共生;2)其余的橄榄石主要呈半自形—它型、细粒,位于包体中央,与尖晶石共生,形成富尖晶石—橄榄石环带。尖晶石的赋存方式主要也有两种:1)大部分尖晶石位于包体的中央,与橄榄石共生,形成了富尖晶石—橄榄石环带;2)其余尖晶石主要呈自形,主要包裹于钙长石和橄榄石之中(图 1c)。

富 Ca, Al 成分的球粒(A2-CH2)属于典型的炉条状球粒,这是一个组合球粒,每个球粒分别明显具有浑圆的外形,直径约为 400  $\mu\text{m}$ 。球粒边部是一层厚度较均匀的橄榄石边,橄榄石边的边部附着一层不连续的金属硫化物,主要为陨硫铁;球粒内部主要为橄榄石炉条和呈粒间分布的透辉石构成,炉条状橄榄石的宽度约为 10 ~ 20  $\mu\text{m}$ ,球粒内部分布着少量陨硫铁(图 1d)。

### 3.2 矿物化学组成

#### (1) 尖晶石

尖晶石是 GRV021579-3R18、GRV022459-2C1 和 C#1 中的常见矿物。在 GRV021579-3R18 包体中,  $\text{TiO}_2$  含量 0.21 ~ 0.36 wt% 之间,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的含量 < 0.20 wt%,  $\text{FeO}$  的含量较低 < 0.15 wt%,  $\text{ZnO}$  的含量位于检测限附近。在蠕虫状橄榄石集合体 GRV022459-2C1 中,尖晶石的  $\text{TiO}_2$  含量较 GRV021579-3R18 高,位于 0.62 ~ 1.09 wt% 之间;另外,集合体中尖晶石具有高的  $\text{FeO}$  含量,最高可以达到 11.5 wt%。尖晶石在 C#1 包体中部的尖晶石—橄榄石环带,尖晶石具有较高的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  含量(最高分别可达 14.6 wt% 和 2.49 wt%);尖晶石  $\text{FeO}$  的含量位于 0.48 ~ 7.77 wt% 之间(POI 数据引自 Lin and Kimura, 1997)(表 1,图 2)。

#### (2) 透辉石

透辉石是一种在 4 个富橄榄石的富 Ca, Al 组分中均出现的典型矿物。GRV021579-3R18 中,透辉石  $\text{TiO}_2$  含量位于 0.65 ~ 1.30 wt% 之间;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的含量位于检测限附近;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量最高可达 9.57 wt%。GRV022459-2C1 中,透辉石  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量明显较 GRV021579-3R18 高,分别可达 4.40 wt%、0.12 wt% 和 15.1 wt%。POI 包体 C#1 中的透辉石明显具有与上述集合体不同的矿物化学组成,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量位于 2.57 ~ 5.42 wt% 之间,  $\text{TiO}_2$  的含量位于 1.16 ~ 9.09 wt% 之间,位于粗粒 C 型包体的范围之内(Wark, 1987)。POI 中的透辉石具有高的  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值(约为 1:1),与 CV3 型碳质球粒陨石中的 POI 类似(Sheng et al., 1991)。  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的含量位于 0.67 ~ 1.48 wt% 之间。在富 Ca, Al 组分球粒 A2-CH2 中,透辉石具有较高的  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量,最高分别可达 0.54 wt% 和 25.6 wt%,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的含量位于 0.36 ~ 0.62 wt% 之间(表 2,图 3)。

#### (3) 橄榄石和其余组分

橄榄石是另外一种在 4 个集合体中均出现的典型矿物。除了 A2-CH2 球粒边部和蠕虫状橄榄石集合体 GRV022459-2C1 中存在部分铁橄榄石,其余属于较纯的镁橄榄石。其余组分包括少量细粒的钙钛矿,金属硫化物以及出现于 C#1 中少量的钙长石和低 Ca 辉石等。

表1 代表性尖晶石电子探针分析结果/wt%  
Table 1 Representative electron microprobe analyses of spinel/wt%

集合体	GRV 021579-3R18			GRV 022459-2C1			C#1	
类型	富尖晶石—辉石型包体			蠕虫状橄榄石集合体			POI包体	
SiO <sub>2</sub>	0.02	0.08	0.13	0.79	0.15	0.29	0.00	0.00
TiO <sub>2</sub>	0.36	0.29	0.21	1.09	0.62	1.04	0.44	2.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70.4	70.5	69.3	70.1	66.9	69.1	71.4	54.2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12	0.20	0.19	0.05	0.46	0.12	0.52	14.6
FeO	0.12	0.12	0.15	4.02	11.5	5.75	1.02	1.88
MnO	0.02	0.05	0.04	0.05	0.02	0.04	0.00	0.06
MgO	27.8	26.9	26.9	24.8	19.7	23.6	27.7	25.7
CaO	0.05	0.04	0.06	0.13	0.10	0.14	0.04	0.23
ZnO	0.00	0.00	0.04	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.05	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00
Total	98.84	98.19	97.06	101.0	99.58	100.2	101.3	100.5
原子比(O原子数为4)								
Si	0.000	0.002	0.003	0.019	0.004	0.007	0.000	0.009
Ti	0.007	0.005	0.004	0.020	0.012	0.019	0.008	0.047
Al	1.993	2.011	1.998	1.983	1.987	1.987	1.981	1.609
Cr	0.002	0.004	0.004	0.001	0.009	0.002	0.010	0.291
Fe	0.002	0.002	0.003	0.081	0.242	0.117	0.020	0.040
Mn	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.020
Mg	0.994	0.972	0.983	0.887	0.740	0.859	0.971	0.966
Ca	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.001	0.006
Zn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
Sum	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000

## 4 讨论

### 4.1 集合体的成因

GRV021579-3R18(富尖晶石—辉石型包体)、GRV022459-2C1(蠕虫状橄榄石集合体)、C#1(POI包体)和A2-CH2(球粒)等4个富橄榄石的富Ca,Al组分集合体,GRV021579-3R18和GRV022459-2C1属于星云直接凝聚的产物,C#1和A2-CH2明显经历过熔融结晶的过程。

GRV021579-3R18的矿物岩石学特征显示它们属于星云直接凝聚的产物,没有经历熔融结晶的过程。证据包括:1)包体均具有不规则的外形;2)矿物的顺序,包体从核部到边部,矿物顺序依次为:钙钛矿—尖晶石—透辉石—橄榄石(图1a,图1b)。与太阳星云从高温到低温的矿物冷凝顺序(刚玉—黑铝钙石—钙钛矿—陨铝钙石—黄长石—尖晶

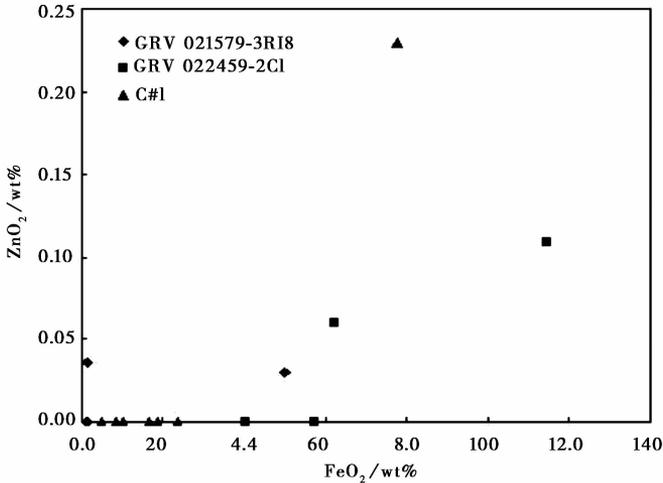


图 2 不同集合体中的尖晶石组成

GRV0 2579-3R18 中的尖晶石具有最低的 FeO 和 ZnO 含量; GRV022459-2C1 中的尖晶石具有最高的 FeO 含量,且含有一定的 ZnO; C#1 中尖晶石的 FeO 含量介于两者之间

Fig. 2 Compositions of spinel in various assemblages

石—Fe-Ni 合金—深绿辉石—透辉石—橄榄石—钙长石)一致 (Lattimer, 1967; Grossman, 1972; Yoneda and Grossman, 1995; Lattimer et al., 1978; MacPherson and Grossman, 1984)。GRV022459-2C1 松散的结构和不规则的外形也显示集合体属于星云凝聚成因。含橄榄石边的富尖晶石—辉石型包体 (GRV021579-3R18) 和含富尖晶石—辉石型包体的蠕虫状橄榄石集合体 (GRV022459-2C1) 在矿物组成上具有连续性 (富 Ca, Al 矿物组分减少, 橄榄石含量增加) (图 1a, 图 1b), 显示其形成具有关联性。Lin and Kinura (2003) 对宁强碳质球粒陨石中富 Ca, Al 包体研究发现: 松散 A 型包体、富尖晶石—辉石型包体以及蠕虫状橄榄石集合体之间的矿物岩石学特征具有连续过渡的性质, 它们都是星云凝聚的连续产物, 蠕虫状橄榄石集合体属于星云凝聚相对低温的产物。

矿物岩石学特征均显示 C#1 包体属于典型液相结晶的产物。证据包括: C#1 包体明显具有浑圆的外形 (图 1c); 从包体的核部到边部, C#1 包体的矿物顺序为: 尖晶石—橄榄石—钙长石—低 Ca 辉石—透辉石, 矿物的顺序明显与星云凝聚形成的矿物顺序不一致, 在凝聚过程中, 透辉石早于钙长石和低 Ca 辉石形成 (Yoneda and Grossman 1995); C#1 包体中, 钙长石的嵌晶结构及具有自形等特征也显示出典型液相结晶的特征。A2-CH2 炉条状球粒浑圆的外形等特征也显示其是典型熔融结晶的产物; 另外, 该球粒明显属于一个组合球粒, 由两个球粒低速碰撞形成, 其中一个基本固化, 另一个还主要呈流体 (图 1d)。

#### 4.2 集合体的矿物岩石学特征对比

从矿物组成上来看, 文中的 4 个集合体均具有富橄榄石和富 Ca, Al 矿物的特征。橄榄石的模式组成丰度, 以蠕虫状橄榄石集合体 GRV022459-2C1 最高; 富 Ca, Al 矿物的丰

表 2 代表性透辉石的电子探针分析结果/wt%

Table 2 Represent electron microprobe analyses of diopside/wt%

集合体	GRV 021579-3R18		GRV 022459-2C1		C#1		A2-CH2	
类型	富尖晶石—辉石型包体		蠕虫状橄榄石集合体		POI 包体		球粒	
SiO <sub>2</sub>	48.9	50.6	51.0	42.9	52.0	51.7	43.9	44.2
TiO <sub>2</sub>	1.31	0.65	1.19	4.40	3.19	3.29	1.19	1.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.57	6.84	6.91	15.1	3.36	3.46	25.5	25.6
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.05	0.12	0.11	0.82	0.89	0.62	0.36
FeO	0.03	0.17	2.25	2.88	0.41	0.43	1.17	1.75
MnO	0.00	0.00	0.12	0.01	0.24	0.37	0.00	0.1
MgO	15.2	16.1	16.2	12.3	19.8	19.8	5.86	4.98
CaO	25.2	23.9	20.9	21.7	20.4	20.1	20.7	20.8
ZnO	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.03	0.28	0.16	0.05	0.00	0.54	0.42
Total	100.3	98.40	98.97	99.67	100.3	100.0	99.42	99.50
原子比 (O 原子数为 6)								
Si	1.763	1.856	1.866	1.580	1.860	1.855	1.623	1.643
Ti	0.035	0.018	0.033	0.122	0.086	0.089	0.033	0.033
Al	0.407	0.295	0.298	0.658	0.142	0.146	1.108	1.120
Cr	0.002	0.001	0.003	0.003	0.023	0.025	0.018	0.011
Fe	0.001	0.005	0.069	0.089	0.012	0.013	0.036	0.054
Mn	0.000	0.000	0.004	0.000	0.007	0.011	0.000	0.003
Mg	0.817	0.880	0.882	0.678	1.057	1.058	0.325	0.277
Ca	0.975	0.938	0.820	0.857	0.783	0.773	0.819	0.828
Zn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.002	0.020	0.011	0.003	0.000	0.039	0.030
Sum	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000

度以富尖晶石—辉石型包体 GRV021579-3R18 最高; 其余两个集合体的橄榄石和富 Ca, Al 矿物介于前两者之间。矿物组成上的差异, 可能说明经历过熔融结晶的 POI 包体和球粒的初始物质可能与富 Ca, Al 包体及蠕虫状橄榄石有关, 可能是前期星云凝聚形成的富 Ca, Al 包体和蠕虫状橄榄石集合体互熔的产物。因此, POI 包体和富 Ca, Al 球粒可能是认识典型富 Ca, Al 包体与 Mg, Fe 质硅酸盐球粒之间相互关系的钥匙。

从矿物的形态上进行比较, C#1 包体常具有嵌晶结构, 矿物颗粒常见自形和半自形的特征 (图 1c); 而球粒 A2-CH2 的橄榄石呈炉条状, 透辉石呈粒间分布。而 GRV021579-

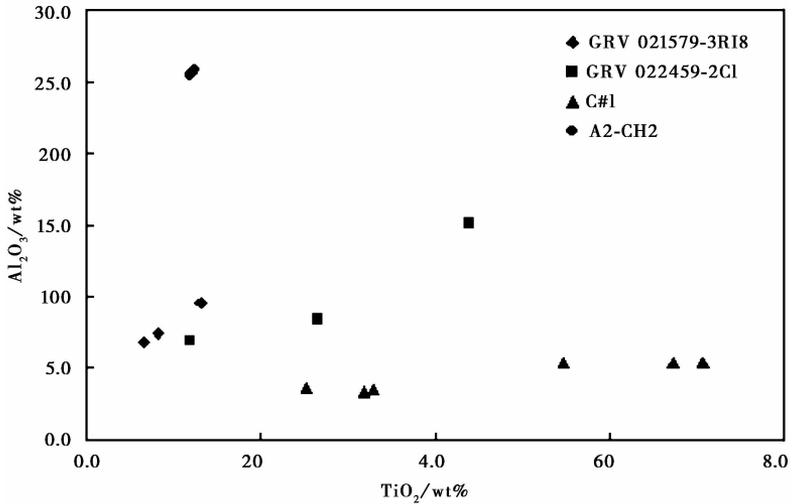


图3 不同集合体中的透辉石组成

A2-CH2 中的透辉石具有最高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量; C#1 中透辉石的  $\text{TiO}_2$  含量最高, 注意  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值; GRV021579-3R18 和 GRV022459-2C1 中透辉石的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  含量介于上述两集合体之间

Fig. 3 Compositions of diopside in various assemblages

3R18 和 GRV022459-2C1 的矿物并不具此特征。矿物颗粒形态的差异, 也反映了上文所讨论的包体形成过程的差异: 前者属于熔融结晶, 后者为星云凝聚成因。

从矿物化学组成来看, 通过对比不同集合体之间尖晶石矿物组成特征 (表 1, 图 2) 发现, GRV022459-2C1 蠕虫状橄榄石集合体中的尖晶石普遍具有高的 FeO 含量 (最高可达 11.5 wt%), 与氧化型 CV 群陨石相似 (Dai et al., 2004); GRV021579-3R18 中尖晶石中 FeO 的含量最低 (<0.15 wt%); C#1 中尖晶石中 FeO 的含量位于前两者之间 (个别可 >5%)。尖晶石中 FeO 含量可反映集合体蚀变的星云条件: GRV022459-2C1 的蚀变发生于高氧逸度的星云环境。

### 4.3 集合体演化模式探讨

富 Ca, Al 包体、蠕虫状橄榄石集合体和球粒都是早期太阳星云形成和演化过程中各种热事件的产物。对于早期星云演化, 越来越多的数据支持热星云模型 (星云冷凝模型)。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富 Ca, Al 包体中全部发现, 并且各种矿物的形成温度与据富 Ca, Al 包体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富 Ca, Al 包体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。

通过总结前人对富 Ca, Al 包体形成和演化的研究, 不同化学群球粒陨石中的富 Ca, Al 包体具有相似的起源 (Guan et al., 2000; Dai et al., 2004; Lin et al., 2006): 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富 Ca, Al 包体(顺序:含黑铝钙石/陨铝钙石→松散 A 型→尖晶石—辉石型→蠕虫状橄榄石集合体)。一部分松散 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)(Lin and Kimura, 1998)。

根据球粒的 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  初始比值,其形成时间可能比凝聚成因富 Ca, Al 包体晚 3 ~ 2 Ma (Huss et al., 2001),表明球粒可能与粗粒富 Ca, Al 包体同时形成,它们可能属于同一热事件的产物。矿物岩石学特征差异,可能表明它们形成区域物质组成的差异。粗粒富 Ca, Al 包体形成于富 Ca, Al 矿物富集区域,由前期凝聚形成的细粒富 Ca, Al 包体熔融结晶形成; Mg, Fe 质硅酸盐球粒形成于富 Ca, Al 矿物缺失的区域; POI 包体和富 Ca, Al 组分球粒可能形成于上述两个区域的过渡区域,由两个区域的组分混合熔融结晶形成。

## 5 结 论

4 个富橄榄石的富 Ca, Al 组分集合体的矿物岩石学特征显示, GRV021579-3R18 和 GRV022459-2C1 属于星云直接凝聚的产物, C#1 和 A2-CH2 明显经历过熔融结晶的过程。

POI 包体和球粒的初始物质可能与富 Ca, Al 包体及蠕虫状橄榄石有关,可能是前期星云凝聚形成的富 Ca, Al 包体和蠕虫状橄榄石集合体互熔的产物。POI 包体和富 Ca, Al 球粒可能是认识典型富 Ca, Al 包体与 Mg, Fe 质硅酸盐球粒之间相互关系的钥匙。

GRV022459-2C1 蠕虫状橄榄石集合体中的尖晶石普遍具有高的 FeO 含量,表明其蚀变发生于高氧逸度的星云环境。

球粒与粗粒富 Ca, Al 包体可能属于同一热事件的产物。粗粒富 Ca, Al 包体形成于富 Ca, Al 矿物富集区域; Mg, Fe 质硅酸盐球粒形成于富 Ca, Al 矿物缺失的区域; POI 包体和富 Ca, Al 组分球粒可能形成于上述两个区域的过渡区域。

致谢 样品由中国极地研究中心和林杨挺研究员提供,实验和论文撰写得到了刘秀明副研究员和周国富研究员等的诸多帮助,在此表示感谢!

## 参 考 文 献

- Dai D, Lin Y, Miao B et al. 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*, **78** (5): 1042—1051.
- Grossman L. 1972. Condensation in the primitive solar nebula. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **36**(5): 597—619.
- Grossman L. 1975. Petrography and mineral chemistry of Ca-rich inclusions in the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **39**(4): 433—454.
- Grossman L and Ganapathy R. 1976a. Trace elements in the Allende meteorite. I -Coarse-grained, Ca-rich inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **40**(3): 331—344.
- Grossman L and Ganapathy R. 1976b. Trace elements in the Allende meteorite. II -Fine-grained, Ca-rich inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **40**(8): 967—977.

- Grossman L. 1980. Refractory inclusions in the Allende meteorite. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **8**(1): 559—608.
- Guan Y, McKeegan K D and MacPherson G J. 2000. 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**(3): 271—277.
- Hsu W, Huss G R and Wasserburg G J. 2003. Al-Mg systematics of CAIs, POI, and ferromagnesian chondrules from Ningqiang. *Meteoritics & Planetary Science*, **38**(1): 35—48.
- Huss G R, MacPherson G J, Wasserburg G J et al. 2001.  $^{26}\text{Al}$  in CAIs and chondrules from unequilibrated ordinary chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, **36**(6): 975—997.
- Larimer J W and 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**(9): 1455—1466.
- Lattimer J W. 1967. Chemical fractionation in meteorites, I. Condensation of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **31**: 1215—1238.
- Lattimer J W, Schramm D N and Grossman L. 1978. Condensation in supernova ejecta and isotopic anomalies in meteorites. *Astrophysical Journal*, **219**: 230—249.
- Lin Y and Kimura M. 1997. Titanium-rich, oxide-bearing plagioclase-olivine inclusions in the unusual Ningqiang carbonaceous chondrite. *Antarctic Meteorite Research*, **10**: 227—248.
- Lin Y and 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 and 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 and El Goresy A. 2002. A comparative study of opaque phases in Qingzhen (EH3) and MacAlpine Hills 88136 (EL3): Representatives of EH and EL parent bodies. *Meteoritics and Planetary Science*, **37**(4): 577—599.
- Lin Y and Kimura M. 2003. 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, Miao B et al. 2006. Petrographic comparison of refractory inclusions from different chemical groups of chondrites. *Meteoritics & Planetary Sciences*, **41**(1): 67—81.
- MacPherson G J and Grossman L. 1984. 'Fluffy' type A Ca-, Al-rich inclusions in the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**: 29—46.
- Richter F M, Davis A M, Ebel D S et al. 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**(3): 521—540.
- Sheng Y J, Hutcheon I D and Wasserburg G J. 1991. Origin of plagioclase-olivine inclusions in carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**(2): 581—599.
- Wang G, Lin Y and Dai D. 2007. Bulk Mg isotopic compositions of ca-al-rich inclusions and amoeboid olivine aggregates. *Meteoritics & Planetary Science*, **42**(7—8): 1281—1289.
- 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**(12): 2581—2594.
- Wark D A. 1987. Plagioclase-rich inclusions in carbonaceous chondrite meteorites; Liquid condensates? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**(2): 221—242.
- Yoneda S and Grossman L. 1995. Condensation of  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  liquids from cosmic gases. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**(16): 3413—3433.

## Comparison of petrography and mineral chemistry characteristics among olivine and Ca, Al-rich assemblages

Dai Deqiu<sup>1, 2</sup> Chen Xinyue<sup>1</sup> Yang Rongfeng<sup>1, 3</sup>

(1. Institute of Geology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201;

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002; 3. Hunan Provincial

Key Laboratory of Shale Gas Resource Utilization, Xiangtan, Hunan 411201)

### Abstract

Ca-, Al-rich inclusions, chondrules and amoeboid olivine aggregates are the early assemblages of the solar nebula. 4 olivine and Ca, Al-rich assemblages were studied to compare with their petrography and mineral chemistry. The petrography and mineral chemistry characteristics argues that spinel-pyroxene-rich inclusion embedded in olivine and Ca, Al-rich amoeboid olivine aggregates are likely assemblages of solar nebular condensates. The plagioclase-olivine inclusions (POIs) and Ca-, Al-rich chondrules were crystallized from melts. The characteristics of mineral modal compositions of POIs and Ca-, Al-rich chondrules argues they probably represent intermediate assemblages between typical refractory inclusions and chondrules. Spinel in amoeboid olivine aggregates (GRV022459-2C1) is the most remarkably FeO-rich in all assemblages, and it indicates alteration of the aggregate happened under high oxygen fugacity. Chondrules and coarse-grained Ca-, Al-rich inclusions are probably crystallized from melt in the same affair. The coarse-grained Ca-, Al-rich inclusions form probably the reservoir of Ca-, Al-rich prior matters, and Mg, Fe silicate chondrules form in the reservoir of Ca-, Al-poor prior matters. POIs and Ca-, Al-rich chondrules form the district between coarse-grained inclusions and Mg, Fe silicate chondrules.

**Key Words** Ca-, Al-rich inclusions, Chondrules, Amoeboid olivine aggregates, Plagioclase-olivine inclusions (POIs), Nebula