

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

戴德求^{1,2*}, 林杨挺^{1,3}, 缪秉魁⁴, 王桂琴¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广东广州 510640; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 4. 桂林工学院资源环境工程系, 广西桂林 541004)

摘要: 富尖晶石球粒状 CAI(富 Ca-Al 难熔包体) 是球粒陨石中一种特殊类型的 CAI, 在南极格罗夫山碳质球粒陨石 GRV 020025 和 GRV 021579 中共发现两个富尖晶石球粒状 CAI——GRV 020025-3RI8 和 GRV 021579-3RI5。GRV 020025-3RI8 具有占统治地位的尖晶石, 在球粒的最外边存在严重蚀变的不规则边, 钙钛矿主要分布在靠近边的位置。与 GRV 020025-3RI8 比较, GRV 021579-3RI5 的尖晶石中的钙钛矿消失, 深绿辉石出现, 薄薄的蚀变层位于尖晶石核和富钙辉石边之间。两个富尖晶石球粒状 CAI 的尖晶石均具有低含量 FeO 和 ZnO 的特征, 而且 GRV 021579-3RI5 具有较 GRV 020025-3RI8 更高的 TiO₂ 含量。岩石学和矿物化学特征表明, GRV 020025-3RI8 和 GRV 021579-3RI5 都经历过熔融结晶过程, 它们的蚀变均发生在非氧化的含水或无水的环境中。

关键词: 富尖晶石球粒状 CAI; 岩石学特征; 矿物化学特征; 成因; 蚀变; 南极陨石

中图分类号: P595; P185.83

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2006)05-0540-07

Petrography and mineral chemistry of two spinel-rich spherules in carbonaceous chondrites from the Antarctica

DAI De-qiu^{1,2*}, LIN Yang-ting^{1,3}, MIAO Bing-kui⁴ and WANG Gui-qin¹

1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

4. Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: Spinel-rich spherule is a special Ca-, Al-rich inclusions (CAIs) in chondrites. Two spinel-rich spherules (GRV 020025-3RI8 and GRV 021579-3RI5) have been found from GRV 020025 and GRV 021579 carbonaceous chondrites collected from the Grove Mountains (GRV), Antarctica. GRV 020025-3RI8 has a predominant spinel with a thin and irregular rim that has been strongly altered. A few grains of perovskite are enclosed in spinel mainly close to the rim. Compared with GRV 020025-3RI8, perovskite disappears and Ti-Al-rich Ca-pyroxene (fassaite) appears with spinel in the core and a whole Ca-pyroxene rim, and a thin layer of alteration between the spinel core and Ca-pyroxene rim in GRV 021579-3RI5. Both FeO and ZnO of spinel are low in the two spinel-rich spherule, and there is more TiO₂ in spinel from GRV 021579-3RI5 than that from GRV 020025-3RI8. The petrography and mineral chemistry characteristics of the two spinel-rich spherules show features of crystallization from liquids and their alteration taken place under non-oxidized surrounding.

Key words: spinel-rich spherules; petrography characteristics; mineral chemistry characteristics; formation; alteration; Antarctica meteorites

收稿日期(Received): 2006-01-06; 改回日期(Revised): 2006-03-21; 接受日期(Accepted): 2006-04-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-123); 国家自然科学基金(40025311)

作者简介: 戴德求(1978-), 男, 博士研究生, 天体化学专业。

* 通讯作者(Corresponding author): DAI De-qiu, E-mail: daideqiu@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85290121

0 引言

富 Ca-Al 包体 (简称 CAI) 是球粒陨石中的特殊组分,是由具有非常高蒸发温度(大于 1 300 K)的富 Ca-Al 的氧化物和硅酸盐组成的难熔集合体^[1]。CAI 是太阳星云最早期各种热事件的产物,保存了太阳星云最原始的信息,并且具有同位素异常和含有各种灭绝核素子体等^[2],是研究早期太阳星云形成演化和成分分布的探针。

我国第 19 次南极科学考察队共回收了 4 448 块陨石,其中的 GRV 020025 和 GRV 021579 分别被划分为 CM2 和 CO3 型碳质球粒陨石。图 1a 为 GRV 020025 的背散射电子图像 (BSE),薄片的表面积约为 1.2 cm²,层状硅酸盐基质含量约占总体积的 72%;球粒含量约 26%,直径小于 500 μm,而且大部分在 100~300 μm 之间,球粒的矿物化学组成以贫 FeO 为特征,属于 I 型球粒;金属 Fe 和 Ni 含量很低,约占总体积的 0.12%,硫化物约 1.2%。在这个薄片中共发现了 11 个 CAI,体积约为整个薄片体

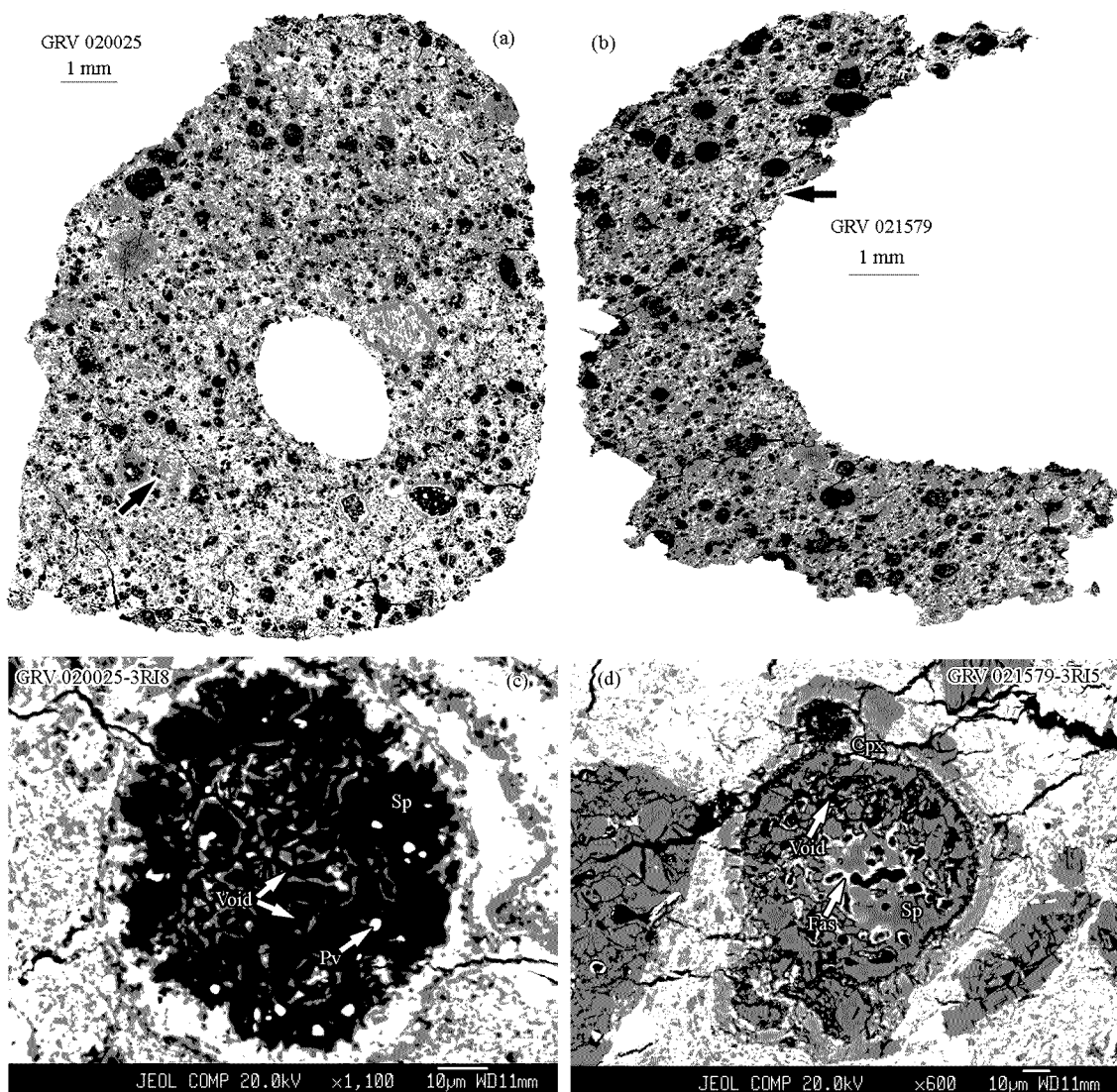


图 1 陨石薄片以及 CAI 的背散射电子图像

Fig. 1 Back-scattered electron images of the chondrites and CAIs

- GRV 020025, CM2 型碳质球粒陨石, 注意薄片中存在层状硅酸盐; 箭头所指位置为对应富尖晶石球粒状 CAI 的位置;
 - GRV 021579, CO3 型碳质球粒陨石; 箭头所指位置为对应 CAI 的位置;
 - GRV 020025-3R18, 富尖晶石球粒状 CAI, 注意其结构, 矿物组成以及蚀变边;
 - GRV 021579-3R15, 富尖晶石球粒状 CAI, 注意其矿物组合和蚀变层。
- Sp. 尖晶石; Pv. 钙钛矿; Cpx. 富钙辉石; Fas. 深绿辉石; Void. 空洞。

积的 0.29%。图 1b 为 GRV 021579 的 BSE 图像,薄片的表面积约 0.62 cm²,它具有较 GRV 020025 多的球粒和少的基质含量,球粒和基质的丰度比值约 1.2。球粒直径呈现两个峰值,一个在 350~600 μm 之间,另一个在 30~100 μm 之间。金属和硫化物含量很低,约占总体积的 0.4%。薄片中共发现了 13 个 CAI,约占整个薄片体积的 0.81%^[3]。

两个薄片中的大部分 CAI (21/23) 属于似 A 型包体(A 型包体即富黄长石-尖晶石型包体,当 A 型包体中的黄长石大部分或全部被蚀变之后,称之为似 A 型包体)和富尖晶石-辉石型包体,其余两个为富尖晶石球粒状 CAI (spinel-rich spherule)——GRV 020025-3RI8 和 GRV 021579-3RI5^[3]。最近的研究认为 A 型包体和富尖晶石-辉石型包体是星云连续凝聚的产物^[4]。富尖晶石球粒状 CAI 是球粒陨石中一种特殊类型的 CAI,它具有浑圆的外形和特殊的矿物组合,主要存在于 CM 型碳质球粒陨石中。它的矿物相组合与星云直接凝聚热力学计算的结果不一致^[5-7],矿物组合主要以尖晶石占统治地位,另一种 CAI 中常见的矿物相黄长石并没有出现。根据其岩石学和矿物化学特征,认为其很可能经历过熔融、结晶的过程^[8]。本文拟主要通过通过对这两个富尖晶石球粒状 CAI 的岩石学和矿物化学特征的研究,来探讨这种特殊类型 CAI 的形成过程和所处的星云环境等。

1 样品和分析方法

实验分析用样品为两块标准厚度的光薄片。CAI 的扫描电镜观察和矿物化学成分的定量分析在中国科学院广州地球化学研究所的 JEOL 8100 型和中国科学院地质与地球物理研究所的 CAMECA SX51 型电子探针上完成。定量分析采用的加速电压为 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_β 线对 Mn 的 K_α 的叠加。分析结果采用 ZAF 方法校正。

2 岩石学和矿物化学特征

2.1 岩石学特征

2.1.1 GRV 020025-3RI8

在 GRV 020025 光薄片,仅仅发现了一个富

尖晶石球粒状 CAI (GRV 020025-3RI8) (图 1c),它具有浑圆的外形,直径约 80 μm。它的矿物组成主要为尖晶石以及一些包裹于尖晶石内的钙钛矿,钙钛矿主要分布于靠近包体边界的位置。整个包体被一层严重蚀变的不规则的蚀变边包围,蚀变边的主要成分为细粒的层状硅酸盐。我们可以发现层状硅酸盐在整个 GRV 020025 薄片中都很大见(图 1a),在 CAI、球粒和基质中均大量存在。虽然 GRV 020025-3RI8 与一个较大的似 A 型 CAI (GRV 020025-3RI9) 紧密相邻,但是由于它们具有完全不同的结构和矿物组合,所以我们认为它们不属于同一个包体。但从蚀变产物来看,GRV 020025-3RI8 与 GRV 020025-3RI9 的蚀变产物均为细粒层状硅酸盐,即一种 CM 型碳质球粒陨石中黄长石蚀变后的产物^[3],说明它们之间的蚀变具有某种关联性。根据 Simon *et al.*^[9] 对富尖晶石球粒状 CAI 岩石学类型的划分标准,我们把 GRV 020025-3RI8 划分为富尖晶石-钙钛矿型。

2.1.2 GRV 021579-3RI5

在 GRV 021579 中也只发现了一个富尖晶石球粒状 CAI (GRV 021579-3RI5) (图 1d),直径约为 100 μm。GRV 021579-3RI5 具有浑圆的外形,较致密的结构。矿物组合也是以尖晶石为主,在尖晶石的中心存在富 Ti-Al 的富钙辉石(深绿辉石)。包体的最外边为一层完整的较规则的富钙辉石边(透辉石),在富钙辉石边和尖晶石核之间还存在一层薄薄的蚀变层,蚀变产物主要为细粒无水矿物(似长石)。GRV 021579-3RI5 和 GRV 020025-3RI8 在矿物组成上的区别,除了蚀变产物不同外,还有前者不含有钙钛矿,但是在相应的部位出现了深绿辉石。根据 Simon *et al.*^[9],GRV 021579-3RI5 的岩石学类型为富尖晶石-辉石型。

2.2 矿物化学特征

2.2.1 尖晶石

尖晶石是 GRV 021579-3RI5 和 GRV 020025-3RI8 中占统治地位的矿物。这两个 CAI 中尖晶石的 FeO 含量都较低(< 0.79%) (表 1),对应的 ZnO 含量也很低(< 0.09%,有些还低于检测限)。GRV 020025-3RI8 中的 TiO₂ 含量(0.20%~0.37%)明显低于 GRV 021579-3RI5 (0.47%~1.05%)。在 GRV 021579-3RI5 中,尖晶石具有远离深绿辉石 TiO₂ 含量降低的趋势(1.05%~0.47%; 0.96%~0.75%)。其余的微量元素还有 Cr₂O₃ (0.10%~1.04%)、NiO (< 0.06%)、MnO (< 0.09%)、CaO (0.02%~0.76%)、

Na₂O、K₂O(< 0.04%)等。把富尖晶石球粒状 CAI 与同一薄片其余 CAI 中的尖晶石进行对比,可以发现,对于 GRV 020025,不同 CAI 之间的矿物化学成分没有明显的差异;而 GRV 021579 中,两个富尖晶石球粒状 CAI 具有较其中的其余类型的 CAI(似 A 型和富尖晶石-辉石型)明显高的 TiO₂ 含量。详细数据见表 1。

2.2.2 富钙辉石

在 GRV 020025-3R18 中没有发现富钙辉石。GRV 021579-3R15 中心的富钙辉石以富 Ti-Al 的深绿辉石存在, TiO₂ 含量高达 13.7%, Al₂O₃ 达到 20.1% 为特征(表 2)。边部的富钙辉石出现 CAI 中较常见的透辉石, TiO₂ 含量为 0.39%~0.97%, Al₂O₃ 含量为 2.43%~4.92%, FeO 含量为 0.17%~0.57%; TiO₂、Al₂O₃ 和 FeO 的含量均以靠近球粒内核的边为最高。其余的微量元素还有 Cr₂O₃

(0.07%~0.15%)、NiO (0.01%~0.04%)、MnO (< 0.01%)、ZnO(< 0.03%)、Na₂O(< 0.11%)和 K₂O (< 0.04%)(表 2)。GRV 020025-3R18 透辉石的成分与同一陨石不同类型 CAI 的透辉石没有明显差别。详细数据见表 2。

2.2.3 其余成分

层状硅酸盐的定量分析数据显示出较低的总量(80.0%~83.8%),表明有 H₂O 或者 OH 的存在。其组成主要有 SiO₂(15.5%~24.2%)、MgO(7.86%~14.4%)、Al₂O₃(5.25%~7.59%), 一个显著的特征是有高的 FeO 含量(37.0%~48.7%); 其余的微量元素包括 TiO₂(< 0.17%)、NiO(< 1.37%)、MnO(0.12%~0.26%)、CaO(0.11%~0.44%)和 Na₂O(0.12%~0.23%)。钙钛矿和 GRV 021579-3R15 中蚀变形成的细粒无水矿物(似长石)由于颗粒太小,无法在电子探针上获得理想的定量分析数据。

表 1 代表性尖晶石电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses (%) of representative spinels

元素	GRV 020025-3R18					GRV 021579-3R15								
	1	2	3	4	其余 CAI	5(核)	6	7	8(边)	9(边)	10(核)	11	12(边)	其余 CAI
SiO ₂	0.04	0.04	0.02	0.06	0.02~0.37	0.29	0.03	0.06	0.04	0.04	0.16	0.07	0.03	0.02~0.52
TiO ₂	0.37	0.20	0.29	0.34	0.06~0.61	1.05	0.85	0.80	0.73	0.47	0.96	0.87	0.75	0.07~0.82
Al ₂ O ₃	69.3	70.6	70.8	70.4	66.5~71.4	69.3	69.4	68.5	69.4	69.6	68.7	69.8	69.5	68.4~72.1
Cr ₂ O ₃	0.18	0.12	0.14	0.10	0.17~2.78	0.60	0.54	0.84	0.91	1.04	0.74	0.59	0.86	0.09~1.53
FeO	0.59	0.36	0.28	0.29	0.23~1.23	0.12	0.10	0.14	0.14	0.12	0.28	0.08	0.13	0.05~0.65
NiO	0.01			0.02	0.00~0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02		0.00~0.09
MnO		0.01	0.06		0.00~0.16	0.09	0.06	0.05	0.06	0.01	0.02	0.00		0.00~0.17
MgO	26.7	27.7	28.2	27.4	26.4~28.4	28.1	27.8	27.6	28.1	28.3	26.6	27.2	28.3	26.8~28.1
CaO	0.76	0.04	0.05	0.18	0.04~0.40	0.24	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.08	0.02	0.04~0.43
ZnO	0.05			0.02	0.00~0.06	0.00	0.08	0.09	0.00	0.05	0.01	0.00		0.00~0.13
Na ₂ O	0.04	0.03	0.01	0.03	0.00~0.04	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.30	0.03	0.02	0.00~0.06
K ₂ O		0.00			0.00~0.09	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.04	0.02	0.00	0.00~0.02
Total	98.1	99.2	99.8	98.9		99.8	98.9	98.1	99.5	99.7	97.9	98.7	99.6	
阳离子数(O原子数为4)														
Si	0.001	0.001	0.001	0.001		0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.002	0.001	
Ti	0.007	0.004	0.005	0.006		0.019	0.015	0.015	0.013	0.008	0.018	0.016	0.013	
Al	1.986	1.994	1.984	1.995		1.955	1.969	1.960	1.959	1.958	1.973	1.986	1.958	
Cr	0.003	0.002	0.003	0.002		0.016	0.011	0.016	0.017	0.021	0.014	0.011	0.016	
Fe	0.012	0.007	0.006	0.006		0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.006	0.002	0.003	
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000		0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mg	0.969	0.989	0.999	0.983		1.001	0.999	1.000	1.004	1.007	0.967	0.979	1.008	
Ca	0.020	0.001	0.001	0.005		0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	
Zn	0.001	0.000	0.000	0.000		0.000	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	
Na	0.002	0.002	0.000	0.002		0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.014	0.001	0.001	
K	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	
Sum	3.000	3.000	3.000	3.000		3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	

注：在中国科学院广州地球化学研究所的 JEOL 8100 型和中国科学院地质与地球物理研究所的 CAMECA SX51 型电子探针上测定,检测限为 0.01%。

表 2 代表性富钙辉石电子探针分析结果(%)

Table 2 Electron microprobe analyses (%) of representative Ca-pyroxene

元素	透辉石					深绿辉石			其余类型 CAI 透辉石
	1(边)	2	3	4	5	6	7	8(核)	
SiO ₂	51.4	52.3	52.0	52.8	54.3	41.8	40.8	33.4	48.9 ~ 55.7
TiO ₂	0.97	0.39	0.65	0.82	0.56	10.0	12.9	13.7	0.00 ~ 2.29
Al ₂ O ₃	4.92	3.90	2.69	2.70	2.43	13.1	11.6	20.1	0.80 ~ 9.57
Cr ₂ O ₃	0.07	0.08	0.13	0.15	0.11	0.06	0.06	0.13	0.00 ~ 0.23
FeO	0.57	0.24	0.29	0.17	0.20	0.24	0.03	0.04	0.03 ~ 0.94
NiO	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.00	0.04	0.00 ~ 0.12
MnO	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00 ~ 0.07
MgO	17.4	17.7	18.1	18.1	18.8	12.3	11.9	11.3	15.2 ~ 19.1
CaO	24.0	24.5	23.5	24.4	24.3	22.4	21.8	21.6	23.4 ~ 25.3
ZnO	0.03	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 ~ 0.04
Na ₂ O	0.01	0.00	0.05	0.00	0.11	0.07	0.06	0.02	0.00 ~ 0.06
K ₂ O	0.01	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00 ~ 0.04
Total	99.4	99.1	97.4	99.2	100.8	100.0	99.3	100.3	
阳离子数(O原子数为6)									
Si	1.866	1.900	1.920	1.920	1.937	1.555	1.545	1.240	
Ti	0.027	0.011	0.018	0.022	0.015	0.280	0.367	0.384	
Al	0.210	0.167	0.117	0.116	0.102	0.576	0.520	0.880	
Cr	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.004	
Fe	0.017	0.007	0.009	0.005	0.006	0.007	0.001	0.001	
Ni	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	
Mg	0.943	0.958	0.994	0.979	0.998	0.680	0.675	0.628	
Ca	0.932	0.955	0.931	0.952	0.930	0.894	0.885	0.860	
Zn	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Na	0.001	0.000	0.004	0.000	0.007	0.005	0.004	0.001	
K	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	
Sum	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	

注:在中国科学院广州地球化学研究所的 JEOL 8100 型和中国科学院地质与地球物理研究所的 CAMECA SX51 型电子探针上测定,检测限为 0.01%。

3 讨论

3.1 富尖晶石球粒状 CAI 的形成

CAI 形成的主要观点有星云凝聚^[5, 6, 10, 11]、熔融结晶^[12-13]和蒸发残留^[14-15]等。各种不同的成因具有不同的特点,如星云直接凝聚,CAI 一般具有松散的结构,不规则的外形,矿物形成的顺序与冷凝实验一致等;熔融结晶一般具有浑圆的外形,致密的结构,矿物顺序与熔融结晶实验一致,以及矿物的 REE 模式等;蒸发残留作用就会使得包体中矿物的难熔元素富集,而挥发性元素如 Mg 和 Si 等亏损。

GRV 020025-3R18 和 GRV 021579-3R15 均具有浑圆的外形,这是最直观熔融成因的证据。另外,冷凝成因的 CAI 具有从高温到低温一系列的矿物组合^[4],与这两个富尖晶石球粒状 CAI 的矿物组合明显不同,例如缺失 CAI 中常见的矿物黄长石。研究

发现,在富尖晶石球粒状 CAI 中,存在黄长石的类型非常罕见^[8]。有学者认为黄长石的缺失可能是因为黄长石被尖晶石、富 Al 透辉石或钙长石所替代^[16]。GRV 020025-3R18 的外形、结构和矿物组合与曾经报道的一个来自 Murchison (CM2) 的、经历过熔融结晶的富尖晶石-黑富铝钙石球粒状 CAI^[8]非常相似,只是前者不含有黑富铝钙石。

GRV 020025 和 GRV 021579 中富尖晶石球粒状 CAI 的尖晶石的矿物化学组成(包括挥发性元素 Mg 和 Si 等),与其余类型(似 A 型和富尖晶石-辉石型) CAI 没有明显的差别(GRV 021579 的富尖晶石球粒状 CAI 含有较高的 TiO₂ 含量,下面将进行讨论)。最近的研究认为各种不同的 CAI 可能具有相似的起源^[3, 17],似 A 型和富尖晶石-辉石型 CAI 是星云最初从高温到低温连续凝聚的产物^[4]。富尖晶石球粒状 CAI 的前身可能也是星云凝聚的产物,由于局部星云条件的改变(如加热事件等),造成原始 CAI 的熔融或部分熔融,黄长石由于具有不太稳定

的特征，可能在熔融过程中因发生交代作用或蚀变而丢失。

由于尖晶石是这两个 CAI 最主要的矿物，下面讨论尖晶石的矿物化学组成是否具有挥发性元素 Mg 的亏损。我们知道尖晶石的分子式为 $(Mg, Fe, Zn, Mn)(Al, Cr, Fe)_2O_4$ ，此次计算的铁离子均作为二价的 FeO，也就是只考虑二价铁离子对 Mg 的替代作用（类质同像），由于三价 Fe 离子量一般很少，造成的误差可以忽略不计。从尖晶石的分子式可以看出， $SUM_{二价阳离子} : SUM_{三价阳离子} = 1 : 2$ 。对于 GRV 020025-3RI8， $SUM_{二价阳离子}$ 的范围在 0.982 ~ 1.006 之间； $SUM_{三价阳离子}$ 的范围在 1.987 ~ 1.997 之间。GRV 021579-3RI5， $SUM_{二价阳离子}$ 的范围在 0.973 ~ 1.010 之间， $SUM_{三价阳离子}$ 的范围在 1.971 ~ 1.998 之间。这两个富尖晶石球粒状 CAI 大部分尖晶石的 $SUM_{二价阳离子} : SUM_{三价阳离子} > 1 : 2$ ，表明二价阳离子过剩，尖晶石在形成过程中没有二价 Mg 离子的亏损，没有发生过蒸发作用。小部分 $SUM_{二价阳离子} : SUM_{三价阳离子}$ 略微小于 1 : 2，偏差在 0.1% ~ 2.1% 之间（这么小的偏差可能是由于实验误差所造成，可以忽略），表明其代表的尖晶石所发生的蒸发作用也是很明显的（图 2），而强烈的蒸发作用能导致 CAI 的难熔组分（包括难熔亲石和亲铁元素）较 CI 球粒陨石富集 9 ~ 19 倍。综上所述，从 CAI 的尖晶石的分子式来分析，其挥发性元素 Mg 没有经历过明显的蒸发残留作用，表明这两个 CAI 不属于蒸发残留成因。

我们注意到两个 CAI 的岩石学和矿物化学特征有如下区别：GRV 020025-3RI8 的尖晶石中包裹着细粒的钙钛矿，但是尖晶石具有较低的 Ti 含量

(0.20% ~ 0.37%)；GRV 021579-3RI5 的尖晶石中钙钛矿消失，相应出现了深绿辉石，而且尖晶石具有较 GRV 020025-3RI8 和 GRV 021579 中其余类型 CAI 明显高的 Ti 含量(0.47% ~ 1.05%)。它们之间是否具有某种联系？通过对 GRV 021579-3RI5 的尖晶石电子探针分析，沿靠近深绿辉石到远离深绿辉石打一系列的点，尖晶石明显具有 Ti 含量逐步降低的趋势(1.05% ~ 0.47%；0.96% ~ 0.75%)。此结果可能是由于 CAI 在形成过程中熔体与富 Ti 的成分(可能是钙钛矿)发生反应造成。相似的反应在熔融成因的致密 A 型 CAI 中有过报道^[18]，钙钛矿与部分熔融的熔体反应形成深绿辉石。根据 GRV 021579-3RI5 中钙钛矿的消失，深绿辉石的出现和尖晶石富 Ti 等特征，认为可能是 CAI 形成过程中钙钛矿与熔融的尖晶石发生反应的结果。

3.2 富尖晶石球粒状 CAI 的蚀变

GRV 020025-3RI8 和 GRV 021579-3RI5 具有不同的蚀变特征。GRV 020025-3RI8 的蚀变产物为层状硅酸盐——CM 型碳质球粒陨石中常见的含水蚀变产物；而 GRV 021579-3RI5 蚀变产物为细粒无水矿物，相似的蚀变产物在 GRV 021579 其余的某些 CAI 中有发现。对 GRV 020025 和 GRV 021579 CAI 蚀变产物的研究认为层状硅酸盐和细粒无水矿物都由黄长石蚀变而来^[3]。层状硅酸盐是在含水的环境下，黄长石与星云发生反应而形成的；细粒无水矿物是在无水的气态环境中，黄长石与星云作用的结果。研究认为，如果球粒陨石中 CAI 的尖晶石含有高的 FeO(> 10%) 和 ZnO 含量，那么反映 CAI 的蚀变发生在高氧逸度的氧化环境中^[18-19]。从这两个 CAI 尖晶石的矿物化学成分来看，其 FeO 的含量都很低(< 0.79%)，对应的 ZnO 的含量也很低(< 0.09%，有些还低于检测限)（表 1），说明包体的蚀变反应发生在非氧化的环境下。从这两个 CAI 的矿物组成来看，尖晶石和富钙辉石在蚀变的过程中保存了下来，而黄长石被蚀变掉了，说明尖晶石和富钙辉石的抗蚀变能力要强于黄长石。关于 CAI 的蚀变反应发生在母体中还是在星云中，一直存在争议^[20-21]。但是，对这两个 CAI 我们可以根据蚀变产物的分布特征等得到一定的认识。GRV 020025-3RI8 的蚀变产物（层状硅酸盐）在相应的陨石母体 GRV 020025 的其余组分（基质、球粒）和其余 CAI 中均很常见（图 1a）。研究认为 CAI、球粒和基质分别形成于不同的时间和空间（例如对灭绝核素的研究认为 CAI 比球

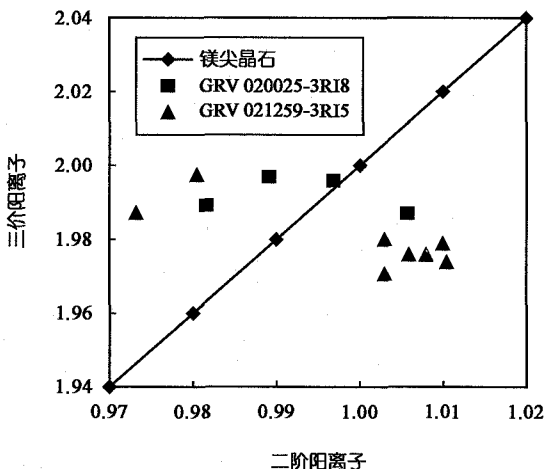


图 2 尖晶石三价阳离子 - 二价阳离子图解
Fig. 2 $Y^{3+} - X^{2+}$ diagram of spinel

粒早形成几个 Ma), 后来才在某种机制的作用下聚集在一起, 形成陨石母体。如果 CAI 的蚀变发生在星云中, 那么其余组分都具有相同的蚀变产物是不可能的。所以, GRV 020025-3RI8 的蚀变反应很可能发生在不同组分聚集在一起后的陨石母体中, 也使得层状硅酸盐在 GRV 020025 中普遍存在。GRV 021579-3RI5 的蚀变产物细粒无水矿物只在 GRV 021579 中其余某些似 A 型包体中有发现, 而在基质和球粒中缺失, 所以确定其蚀变反应发生在星云还是母体中有待于进一步的研究。

4 结论

(1) 与 GRV 020025-3RI8 比较, GRV 021579-3RI5 中钙钛矿的消失可能是包体形成过程中钙钛矿与熔体反应的结果。

(2) GRV 020025-3RI8 和 GRV 021579-3RI5 的岩石学和矿物化学特征表明它们在形成过程中可能经历过熔融的过程。

(3) GRV 020025-3RI8 的蚀变反应发生在母体和非氧化的含水环境; 而 GRV 021579-3RI5 的蚀变发生在非氧化的无水气态环境。

样品由中国极地研究中心提供; 中国科学院广州地球化学研究所的陈林丽试验员在扫描电镜和电子探针定量分析技术上给予了诸多帮助; 本研究还得到了中国科学院广州地球化学研究所元素和同位素实验室的部分资助, 在此一并致以衷心的感谢。

参考文献 (References):

- Grossman L, Larimer J W. Early chemical history of the solar system [J]. *Rev Geophys Space Phys*, 1974, 12(1): 71 - 101.
- Lin Y, Guan Y, Leshin L A, Ouyang Z, Wang D. Short-lived chlorine-36 in a Ca-Al-rich inclusion from the Ningqiang carbonaceous chondrite [J]. *Proc Nat Acad Sci*, 2005, 102(5): 1 306 - 1 311.
- Dai Deqiu, Lin Yangting, Miao Bingkui, Sheng Wenjie, Wang Daode. 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 [J]. *Acta Geol Sinica*, 2004, 78(5): 1 042 - 1 051.
- Lin Y, Kimura M. Ca-Al-rich inclusions from the Ningqiang meteorite: Continuous assemblages of nebular condensates and genetic link to Type B inclusions [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67(12): 2 251 - 2 267.
- Grossman L. Condensation in the primitive solar nebula [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1972, 36(5): 597 - 619.
- Yoneda S, Grossman L. Condensation of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ liquids from cosmic gases [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59(16): 3 413 - 3 444.
- Ebel D S, Grossman L. Condensation in dust-enriched systems [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(2): 339 - 366.
- MacPherson G J, Grossman L, Hashimoto A, Bar-Matthews M, Tanaka T. Petrographic studies of refractory inclusions from the Murchison meteorite [J]. *J Geophys Res*, 1984, 89(suppl): C299 - C312.
- Simon S B, Grossman L. Spinel-rich spherules from Murchison: A review and some questions [C] // Workshop on Chondrites and Protoplanetary Disk (abstract no. 9053). Hawaii: LPI, 2004.
- Larimer J W, Bartholomay M. The role of carbon and oxygen in cosmic gases: Some applications to the chemistry and mineralogy of enstatite chondrites [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1979, 43(9): 1 455 - 1 466.
- Larimer J W. Chemical fractionations in meteorites—I. Condensation of the elements [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1967, 31(8): 1 215 - 1 238.
- MacPherson G J, Grossman L. A once-molten, coarse-grained, Ca-rich inclusion in Allende [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1981, 52(1): 16 - 24.
- Sheng Y J, Wasserburg G J, Hutcheon I D. Self-diffusion of magnesium in spinel and in equilibrium melts: Constraints on flash heating of silicates [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56(6): 2 535 - 2 546.
- Clayton R N, MacPherson G J, Hutcheon I D, Davis A M, Grossman L, Mayeda T K, Molini-Velsko C, Allen J M, El Goresy A. Two forsterite-bearing FUN inclusions in the Allende meteorite [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48(3): 535 - 548.
- Grossman L, Ebel D S, Simon S B, Davis A M, Richter F M, Parsad N M. Major element chemical and isotopic compositions of refractory inclusions in C3 chondrites: The separate roles of condensation and evaporation [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(16): 2 879 - 2 894.
- Krot A N, Fagan T J, Keil K, McKeegan K D, Sahijpal S, Hutcheon I D, Petaev M I, Yurimoto H. Ca, Al-rich inclusions, amoeboid olivine aggregates, and Al-rich chondrules from the unique carbonaceous chondrite Acfer 094: I. Mineralogy and petrology [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68(9): 2 167 - 2 184.
- Lin Y, Kimura M, Miao B, Dai D, Monoi A. Petrographic comparison of refractory inclusions from different chemical groups of chondrites [J]. *Meteorit Planet Sci*, 2006, 41(1): 67 - 81.
- Lin Y, Kimura M, Wang D. Fassaite in compact type A Ca-Al-rich inclusions in the Ningqiang carbonaceous chondrite: Evidence for partial melting in the nebula [J]. *Meteorit Planet Sci*, 2003, 38(3): 407 - 417.
- Komacki A S, Wood J A. Mineral chemistry and origin of spinel-rich inclusions in the Allende CV3 chondrite [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1985, 49(5): 1 219 - 1 237.
- Kimura M, Hiyagon H, Palme H, Spettel B, Wolf D, Clayton R N, Mayeda T K, Sato T, Suzuki A, Kojima H. Yamato 792947, 793408 and 82038: The most primitive H chondrites, with abundant refractory inclusions [J]. *Meteorit Planet Sci*, 2002, 37(10): 1 417 - 1 434.
- Lin Y, Guan Y, Leshin L A. Evidence for live ³⁶Cl in Ca-Al-rich inclusions from the Ningqiang carbonaceous chondrite (abstract) [J]. *Lunar Planet Sci Conf*, 2004, 35: 2084.