宁强碳质球粒陨石富 Ca, Al 包体 及铂族金属合金

林杨挺 欧阳自远^④ A. El Goresy^(四)

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; ④中国科学院贵阳地球化学研究所, 贵阳 550002;

④Max-Planck-Institut für Kernphysik, 6900 Heidelberg 1, Germany)

摘要 对在我国发现的唯一的碳质球粒陨石——宁强陨石中的富 Ca, Al 包体进行了岩石矿物学研究, 并在其中首次发现 Re/Os 强烈分异的铂族金属合金. 这些包体可划分为黄长石_尖晶石型和尖晶石_辉石型两种岩石类型, 前者可能形成于熔融结晶过程, 后者是太阳星云冷凝聚集的产物. Re/Os 的强烈分异以及 W, Mo 等元素的负异常特征表明, 这些铂族金属合金有可能是太阳系外成因, 并且在被包体俘获前经历了不同的形成和演化历史.

关键词 陨石 包体 铂族金属合金 太阳星云

富 Ca, Al 包体(Ca, Al-rich inclusion, 以下简称包体)是碳质球粒陨石中的一种重要组分, 它主要由各种难熔的氧化物和硅酸盐组成. 对不同类型包体的研究表明, 它们具有复杂的形成和演化历史, 包括太阳星云的凝聚、高温蒸发、熔融结晶等^[1~3]. 一些包体中还存在富难熔亲铁元素的复杂集合体, 即所谓 Fremdlinge^[4]. Fremdlinge 主要由含难熔亲铁元素的 Fe-Ni 金属、铂族金属合金、氧化物及硫化物等组成, 形成于包体之前, 并经历了各种星云条件下的氧化作用和硫化作用等^[5,6].

宁强陨石是在我国发现的唯一的碳质球粒陨石, 同时也是一个特殊类型的陨石, 不能归入已知的化学类型^[7~11]. 对宁强陨石的初步研究表明, 其包体的岩石类型与 CV3 型碳质球粒陨石相似, 但很少经历后期的低温蚀变作用^[12], 因此更好地保存了太阳星云高温过程的产物, 提供了研究太阳星云早期演化的理想样品. 本文对宁强陨石两种岩石类型包体进行了岩石、矿物学研究, 首次发现了 Re/Os 强烈分异的铂族金属合金, 并对包体及其铂族金属合金的形成机制进行了讨论. 有关这项工作的初步研究见文献[13].

1 样品及分析技术

样品为一块近于 1.0 cm² 的光薄片. 除光学显微镜外, 一台带能谱的 Cambridge 180S 型扫描电子显微镜用于岩矿鉴定及结构特征研究. 矿物化学组成的定量分析在一台具 4 道波谱仪的 SEMQ 电子探针上完成. 硅酸盐和氧化物定量分析的电子束流为 30 nA, 加速电压为 15 kV, 分析结果采用 Bence-Albee 方法进行计算. 铂族金属合金分析的电子束流为 40 nA, 加速电压为 30 kV, 分析标准为纯金属(除硫用 ZnS 作标准). 分析结果采用传统的 ZAF 方法进行计算, 并对铂族元素及其他难熔元素之间复杂的谱线叠加进行了校正, 包括 Re, Os, Ir 及 Pt 的 M_α 谱线受 Ir, Os, Pt, Re 和 W 等元素谱线的叠加, W, Mo, Ru 及 Rh 的 L_α 谱线受 Ir, Pt, Ru, S 及 Ni 等元素谱线的叠加, 以及 Co, Cu 的 K_α 谱线分别受 Fe, Ni 的 K_β 谱线的叠加等. 由于铂族金属合金颗粒较小, 并且其基底为贫难熔亲铁元素的硅酸盐或氧化物, 故将分析结果标准化为 100%.

2 岩石学特征

在研究的光薄片上,共发现7个富Ca、Al包体,总面积约占光薄片面积的1.3%.根据包体的岩石矿物特征可将其分为2种类型.

(1) 黄长石_尖晶石型. 主要由黄长石和尖晶石组成,并含钙钛矿、黑铝钙石、铂族金属合金(PMN)等次要矿物.该类型4个包体中,NQF2最大,约 $0.55\text{ mm} \times 0.87\text{ mm}$,呈复杂的缠绕状形态,有时包体的边缘可卷入中央.该包体具同心层状构造,由黄长石_尖晶石核、尖晶石_黑铝钙石幔以及黄长石薄边组成.钙钛矿包裹于黄长石、尖晶石和黑铝钙石,并分布于整个包体,但其粒度向边缘趋于减小.黑铝钙石为自形柱状($\leq 30\text{ }\mu\text{m}$)于尖晶石基质中,呈由黄长石薄边向内生长的趋势(图1).PMN为微细颗粒($\leq 1\text{ }\mu\text{m}$),以分散的形式包裹于黄长石或尖晶石,并沿黄长石薄边分布.另3个包体分别为 $240\text{ }\mu\text{m} \times 180\text{ }\mu\text{m}$, $270\text{ }\mu\text{m} \times 120\text{ }\mu\text{m}$ 和 $70\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$,呈不规则形状,它们的矿物组合和结构特征与NQF2的核相似,可能是该类包体的碎片.在这3个包体碎片中未发现PMN.

(2) 尖晶石_辉石型. 主要由尖晶石和富Ca辉石组成,含少量橄榄石、钙钛矿、黄长石、Ni-Cu和Fe-Ni合金以及PMN等.该类型最大的包体(NQF4)约 $0.8\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$,由数个具有复杂层状结构的个体组成.每一层状个体均含几个由富Ca辉石薄层围绕的尖晶石核,它们共同被镁橄榄石、富Ca辉石以及镁橄榄石等薄层依次包围(图2).少量黄长石、细粒钙钛矿和PMN主要包裹于尖晶石,而Ni-Cu和Fe-Ni细粒合金包裹于富Ca辉石.该类型另外2个包体(近于 $120\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$,近于 $15\text{ }\mu\text{m} \times 70\text{ }\mu\text{m}$)均为简单同心层状结构,由中央向外依次为尖晶石、富Ca辉石和橄榄石.

图1 缠绕状包体NQF2的局部背散射电子图象可见黄长石(Mel)薄边被卷入照片中央.自形柱状黑铝钙石(Hib)包裹于尖晶石(Sp),并由黄长石薄边向内生长.许多细粒钙钛矿(Pv)包裹于尖晶石、黄长石和黑铝钙石.一些细粒尖晶石(暗灰)也包裹于黄长石中.黑色部分为空腔.照片宽度 $160\text{ }\mu\text{m}$

图2 包体NQF4的局部背散射电子图象可见明显的层状构造特征.几个尖晶石核(Sp)分别被富Ca辉石层所围绕,然后一起依次被镁橄榄石(Fo)、富Ca辉石(Cpx),以及镁橄榄石等薄层包围.外富Ca辉石层较内层薄.照片宽度 $300\text{ }\mu\text{m}$

3 矿物化学组成特征

黄长石以富铝为特征(Al_{1-15}),含少量 Na_2O ($< 0.29\%$)和 FeO ($< 0.64\%$),并与包体的

表1 宁强陨石包体中硅酸盐和氧化物的代表性化学组成(重量百分比)

	Hib(NQF2)			Sp(NQF2)			Sp(NQF4)			Mel(NQF2)			Cpx(NQF4)				
	1	2	3	4	5	6	7 ^{b)}	8 ^{b)}	9 ^{c)}	10 ^{b)}	13 ^{b)}	14 ^{b)}	15 ^{c)}	16 ^{c)}			
SiO ₂	n.d.	n.d.	0.05	n.d.	n.d.	0.12	23.1	22.6	23.9	23.0	49.3	51.4	53.7	54.2			
TiO ₂	7.49	8.62	0.18	0.24	0.36	0.32					1.41	0.72	0.11	0.18			
Al ₂ O ₃	81.0	79.0	71.1	69.8	71.0	66.6	34.8	35.0	34.0	34.6	7.14	5.45	1.10	1.45			
Cr ₂ O ₃	n.d.	n.d.	0.07	0.12	0.15	0.49	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.05	n.d.	n.d.			
V ₂ O ₃	0.19	0.27	0.41	0.48	0.26	0.25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.07	n.d.	n.d.			
FeO	0.20	n.d.	0.05	3.07	0.23	12.32	0.05	0.06	0.44	n.d.	0.13	0.15	0.21	0.13			
MnO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.07	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
MgO	3.12	3.64	28.4	26.5	27.7	19.6	1.00	0.67	1.30	1.14	15.	17.3	18.6	19.0			
CaO	8.26	8.14	0.15	0.14	0.07	0.18	40.2	40.0	40.2	40.0	25.4	25.8	25.1	25.1			
ZnO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.24	n.d.	0.06	n.d.	n.d.							
Na ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
总数	100.2	99.7	100.4	100.4	99.8	100.2	99.3	98.5	100.1	98.7	98.6	101.0	98.9	100.0			
O	19	19	4	4	4	4	7	7	7	7	6	6	6	6			
Si	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.003	1.062	1.04	8.1.091	1.062	1.811	1.845	1.960	1.952			
Ti	0.636	0.737	0.003	0.004	0.006	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.039	0.019	0.003	0.005			
Al	10.772	10.585	1.982	1.973	1.990	1.970	1.883	1.910	1.828	1.879	0.309	0.230	0.047	0.062			
Cr	0.000	0.000	0.001	0.002	0.003	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000			
V	0.017	0.025	0.008	0.009	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001			
Fe	0.019	0.003	0.001	0.062	0.005	0.259	0.002	0.002	0.017	0.001	0.004	0.004	0.006	0.004			
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000			
Mg	0.525	0.617	1.000	0.948	0.983	0.735	0.068	0.046	0.088	0.078	0.832	0.924	1.013	1.022			
Ca	0.999	0.992	0.004	0.004	0.002	0.005	1.980	1.986	1.964	1.976	0.998	0.991	0.983	0.967			
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000			
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.012	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000			
总计	12.969	12.958	3.000	3.003	2.995	2.998	4.998	4.998	5.003	4.999	3.996	4.019	4.014	4.012			
Åk (mol%)							7	5	9	8							
CaTs											16	11	2	3			
En											42	45	50	50			
Wo											42	44	48	47			

a) Hib(hibonite)——黑铝钙石, Sp——尖晶石, Mel——黄长石, Cpx——富Ca辉石, n.d.——低于电子探针检测限; b) 产于包体中央; c) 产于包体边缘

岩石类型无关. 对黄长石_尖晶石型包体的分析表明, 黄长石的 Å_k 值由包体的中央($\text{Å}_{k4.6 \pm 1.8}$)向边缘($\text{Å}_{k9.2 \pm 3.0}$)呈升高趋势. 尖晶石具有极不均一的化学组成, 并与在包体中的产状有关. 通常, 包体中央的尖晶石以贫 FeO 为特征($\text{FeO} < 1.0\%$), 而靠近边缘的颗粒可含相当高的 FeO(高达 26%). 组分有 V_2O_3 (0.16% ~ 0.54%), Cr_2O_3 ($< 1.84\%$), TiO_2 ($< 0.97\%$) 和 ZnO ($< 1.06\%$) 等, 其中 ZnO 与 FeO 正相关. 富 Ca 辉石($\text{CaTs}_{1-29}\text{Wo}_{28-47}\text{En}_{42-52}$) 在尖晶石_辉石型的 NQF4 中表现出明显的组成_产状相关性, 靠近包体内层(即围绕尖晶石核)的富 Ca 辉石的 Al_2O_3 和 TiO_2 含量(分别为 3.91% ~ 12.0%, 0.21% ~ 1.77%) 高于包体外层(即围绕橄榄石层)的富 Ca 辉石(Al_2O_3 0.7% ~ 3.4%, $\text{TiO}_2 < 0.53\%$). 黑铝钙石以富 TiO_2 (6.89% ~ 9.37%) 和 MgO (3.08% ~ 4.26%) 为特征, 其他次要组分有 V_2O_3 (0.15% ~ 0.34%) 和 FeO($< 0.25\%$). 对少量钙钛矿颗粒($> 5 \mu\text{m}$) 的定量分析表明, 其组成几乎为纯 CaTiO_3 , 仅含少量 Al_2O_3 (0.54% ~ 2.54%), MgO ($< 0.61\%$) 和 FeO(0.12% ~ 1.46%). 表 1 给出硅酸盐和氧化物的代表性电子探针定量分析结果.

表 2 是 10 个 PMN 颗粒电子探针定量分析结果, 其中 8 个颗粒产于黄长石_尖晶石型的 NQF2, 2 个产于尖晶石_辉石型的 NQF4, 分析结果标准化为 100%. 图 3 是 PMN 相对 CI 型碳质球粒陨石标准化的元素丰度模式. 除颗粒 4# 5($\text{Re}/\text{Os} \sim 1 \times \text{CI}$) 外, 其他 9 个 PMN 颗粒具有极为特征的 Re 富集, 其 Re/Os 比值约为 CI 型球粒陨石的 7~ 1 500 倍. 此外, 相当一部分颗粒还表现出明显的 Os 贫化特征, 并据此将 PMN 划分为 Os 贫化($\text{Os} < 0.9\%$)(图 3(a)) 和正常($\text{Os} > 2.65\%$)(图 3(b)) 两种次型. 在全部 10 个 PMN 颗粒中, 仅颗粒 2# 13 表现出明显的 Mo 负异常, $\text{Mo}/\text{Ir} < 0.01 \times \text{CI}$. 该颗粒同时还具有 W 负异常的特征($\text{W}/\text{Ir} < 0.15 \times \text{CI}$). 具 W 负异常特征的还有颗粒 2# 2, 2# 8, 2# 9, 2# 12, 2# 13 及 4# 5($\text{W}/\text{Ir} < 0.4 \times \text{CI}$). 有 3 个颗粒具有 Pt 负异常, 包括 Os 贫化的颗粒 2# 10, 以及 Os 正常的颗粒 4# 1 和 4# 5. 颗粒 2# 2 含较高的 S(16.4%), 可能以硫化物为主, 其他颗粒基本不含 S.

表 2 宁强陨石包体中铂族金属合金的化学组成(重量百分比)^{a)}

	NQF2								NQF4	
	2# 1	2# 2	2# 8	2# 9	2# 10	2# 11	2# 12	2# 13	4# 1	4# 5
Re	6.00	14.9	8.77	37.2	39.5	37.1	27.2	6.39	11.2	0.32
W	3.82	< 0.38	< 0.45	< 0.62	< 0.72	< 1.55	< 0.63	< 0.22	3.28	< 0.39
Os	11.9	7.12	2.65	< 0.33	0.39	0.81	3.90	0.52	13.2	4.24
Ir	9.92	4.86	8.04	7.37	4.50	2.11	9.87	6.59	16.1	4.88
Mo	15.4	22.6	18.6	11.1	15.7	10.5	17.2	< 0.10	17.6	4.74
Ru	17.4	12.4	15.7	11.6	14.7	12.5	11.3	1.22	17.1	5.16
Pt	16.4	8.59	26.2	13.6	< 0.52	7.16	17.4	13.1	< 0.42	< 0.28
Rh	1.95	1.75	4.45	1.25	< 0.42	8.99	1.44	0.28	1.40	0.21
Ni	3.28	2.64	5.79	1.70	2.15	< 0.72	3.79	44.9	9.99	5.30
Fe	12.1	8.42	9.34	15.3	21.5	18.5	7.35	24.4	9.72	74.5
S	0.25	16.4	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	1.62	n. d.	n. d.
Ge	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.40	n. d.	n. d.
Co	0.76	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.32	n. d.	n. d.
Cu	0.76	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.

a) 标准化为 100%; n. d. ——低于电子探针检测限

图3 宁强陨石铂族金属合金元素丰度模式

(a) 贫 Os 型; (b) Os 正常型. 从图中可看出, 绝大部分颗粒具有极为特征的 Re 富集, W 的贫化较为普遍, 其中颗粒 2#13 同时具有十分明显的 W 和 Mo 负异常. 此外, 有 3 个颗粒还表现出 Pt 负异常特征. 图中横坐标元素按难熔程度的降低从左到右排列, 纵坐标标准化所用 CI 陨石元素丰度值取自[14]. 颗粒 4#1 和 4#5 产于 NQF4, 其余产于 NQF2

4 讨论

4.1 宁强陨石富 Ca、Al 包体的形成

(1) 尖晶石_辉石型的太阳星云凝聚. 有关该类型包体太阳星云凝聚成因的证据主要有: ()NQF4 不仅具有复杂的圈层状结构特征, 同时其矿物次序由包体的中央向外依次为钙钛矿、黄长石> 尖晶石> 富 Ca 辉石> 橄榄石> 富 Ca 辉石> 橄榄石, 这与理论计算给出的矿物在太阳星云冷凝过程中依次析出的次序一致^[1, 15]. NQF4 中富 Ca 辉石与橄榄石圈层的重复很可能是由于它们之间十分接近的析出温度(50 K)^[1, 15]. 另外, 根据理论计算和模拟实验, 富 Ca 辉石的 Al, Ti 含量随平衡温度的降低而减少, 这与 NQF4 中富 Ca 辉石所表现出的组成产状相关性一致; ()PMN 颗粒出现于包体的中央, 而普通金属合金, 如 Fe-Ni 和 Ni-Cu 合金等分布于包体的外层, 表明该包体的中央较边缘形成于更高的温度, 同样有利于星云凝聚模型. 与星云凝聚模型相反, 熔融结晶无法解释 NQF4 复杂的层状结构特征, 特别是富 Ca 辉石与橄榄石层的重复出现很难由熔体的结晶形成. 此外, 熔融结晶所形成的层状结构应表现为边缘较中央更难熔的特点, 这与 NQF4 的实际情况相反. 高温蒸发过程的固相残留物在岩石、矿物学特征上接近熔融结晶成因, 因此也不能解释 NQF4 的形成. 根据尖晶石_辉石型包体的岩石结构特征和太阳星云凝聚的理论计算, 可估计该类型包体的主要形成温度区间大致为 1 410~ 1 500 K. NQF4 的层状结构特征还表明, 太阳星云的凝聚过程很可能具有非平衡的特点, 矿物从星云中析出后基本不再与体系保持平衡.

(2) 黄长_尖晶石型的熔融结晶. 在 NQF2 中, 尖晶石除呈块状构成该包体的幔之外, 一部分颗粒包裹于黄长石中, 表明尖晶石的形成早于黄长石, 这与太阳星云凝聚的理论计算相反^[1, 15], 而与同成分的液相结晶次序一致^[16]. 黑铝钙石的自形柱状形态, 以及其由黄长石薄边向内呈放射状排列更明显地反映了液相结晶的特点. 钙钛矿颗粒的粒度向包体边缘明显减小, 表明在包体边缘位置钙钛矿较快速的结晶速率, 进一步证实上述论点. 细粒 PMN 沿 NQF2 边缘分布, 不仅反映其边缘较中央更难熔, 并且这些细粒 PMN 可能起到结晶核的作用. 同上述熔融结晶模式相矛盾的是 NQF2 中黄长石的组成变化特征, 其 A_k 值由包体中央

向边缘升高. 一种可能的解释是 NQF2 结晶形成之后, 其边缘部分继续保持着与太阳星云在较低温度下的平衡作用或遭受了一定程度蚀变, 从而导致黄长石 An 值的升高. 在包体边缘, 尖晶石的 FeO 等次要组分的升高, 也证实其形成之后经历了一定程度的氧化蚀变作用. 高温蒸发残留不能解释 PMN 的区域性分布特征.

4.2 铂族金属合金(PMN)的天体化学意义

Re 的高度富集是宁强陨石 PMN 最突出的特征. 其 Re/Os 比值可以高达 $10^3 \times \text{CI}$. 大大高于太阳星云凝聚理论计算所给出的上限 ($\text{Re/Os} < 1.5 \times \text{CI}$)^[17~19]. 事实上, 对相当数量 Fremdlinge 的分析表明, 其全岩 Re/Os 比值与 CI 值基本一致^[4~6]. 同全岩相比, Fremdlinge 中的 PMN 颗粒具有较显著的元素分异特征, 特别是一些富 Ir 颗粒的 Re/Os 比值可高达 $18 \times \text{CI}$, Fe-Ni 金属基质的 Re/Os 比值变化范围很大, 分别 $< 5 \times \text{CI}$ 和 $> 26 \times \text{CI}$ ^[6], 但它们的难熔亲铁元素含量很低. 造成 Fremdlinge 中 PMN 颗粒元素分异的主要因素很可能是 Fremdlinge 形成之后的一系列反应, 包括氧化和硫化作用等^[5,6]. 由于宁强陨石 PMN 颗粒呈孤立状包裹于氧化物和硅酸盐, 因此与上述反应无关. 另一方面, 由于 Re-Os 呈完全固熔体混熔, 分异结晶也无法解释 PMN 颗粒强烈的 Re/Os 分异特征. 一种可能的成因是, 这些 Re/Os 强烈分异的 PMN 来自太阳系外. 碳质球粒陨石中一些组分, 包括石墨、金刚石、碳化硅等的同位素研究已证实在陨石中存在多种恒星来源的前太阳物质^[20]. 当然, 要证实这些 Re/Os 强烈分异的 PMN 的太阳系外成因, 还需要同位素的证据.

W, Mo 的负异常与氧化-还原条件有关. Fegley 等人^[18]对铂族元素的星云凝聚过程进行了计算, 其结果表明, 随着氧化程度的升高, Mo 和 W 的挥发性逐渐增大. 当星云的 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 比值升高到正常值的 10 倍时, 析出的难熔合金具有 Mo 负异常特征, 进一步升高至 20 倍时开始出现 W 负异常, 并且 Mo 的贫化程度总大于 W. 颗粒 2# 13 的 Mo, W 负异常特征与上述氧化条件下的理论计算模式十分一致, 表明该颗粒可能凝聚于强氧化条件, 其 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 比值至少比太阳星云的平均值高 20 倍. 其他 PMN 颗粒的 W 负异常并不伴随 Mo 的贫化特征, 因此与上述强氧化条件下的星云凝聚模式不同, 但相似于强氧化条件下高温蒸发残留物的 W 负异常特征^[21], 表明相当一部分 PMN 颗粒可能经历了强氧化条件下的高温蒸发作用. 颗粒 2# 2 因含较高的硫, 其 W 负异常可能还与硫化作用有关. Pt 负异常在一些 Fremdlinge 中的 PMN 颗粒也有报道, 但产生的原因还需进一步的研究.

5 结论

(1) 在宁碳质球粒陨石中发现了两种岩石类型的富 Ca, Al 包体, 其中黄长石-尖晶石型可能形成于熔融结晶作用, 而尖晶石-辉石型是太阳星云冷凝聚集的产物.

(2) 首次发现了 Re/Os 强烈分异的铂族金属合金(PMN), 它们可能代表了一种太阳系外物质.

(3) PMN 中的一些元素负异常特征, 如 W 和 Mo 的负异常可能反映了强氧化条件下的星云凝聚或高温蒸发作用, 表明 PMN 颗粒在被包体俘获之前, 曾经历了各种不同的形成和演化历史.

致谢 王道德研究员、日本茨城大学的木村真博士等提供了许多富有建设性的意见和讨论, 德国马普核物理研究所 J. Janicke 先生对分析测试工作给予了技术上的帮助, 方虹博士提供了研究用光薄片, 作者在此一并表示衷心的感谢. 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49673200)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Grossman L. Condensation in the primitive solar nebula. *Geochim Cosmochim Acta*, 1972, 36: 597~ 619
- 2 Wark D A, Lovering J F. The nature and origin of type B1 and B2 Ca₂Al₂SiO₇ rich inclusions in the Allende meteorite. *Geochim Cosmochim Acta*, 1982, 46: 2 581~ 2 594
- 3 Sheng Y J, Hutcheon I D, Wasserburg G J. Origin of plagioclase-olivine inclusions in carbonaceous chondrites. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 581~ 599
- 4 El Goresy A, Nagel K, Ramdohr P. Fremdlinge and their noble relatives. *Proc Lunar Planet Sci*, 1978(9): 1 249~ 1 266
- 5 Armstrong J T, Hutcheon I D, Wasserburg G J. Zeldin and Company: petrogenesis of sulfide-rich fremdlinge and constraints on solar nebular processes. *Geochim Cosmochim Acta*, 1987, 51: 3 155~ 3 173
- 6 Bischoff A, Palme H. Composition and mineralogy of refractory-metal-rich assemblages from a Ca₂Al₂SiO₇ rich inclusions in the Allende meteorite. *Geochim Cosmochim Acta*, 1987, 51: 2 733~ 2 748
- 7 Rubin A E, Wang D, Kallemeyn G W, et al. The Ningqiang meteorite: classification and petrology of an anomalous CV chondrite. *Meteoritics*, 1988, 23: 13~ 23
- 8 Kallemeyn G W, Rubin A E, Wasson J T. The compositional classification of chondrites: the Karoonda (CK) group of carbonaceous chondrites. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 881~ 892
- 9 Kallemeyn G W. The classificational wanderings of the Ningqiang chondrite. *Lunar Planet Sci*, 1996, XXVII: 635~ 636
- 10 Weisberg M K, Prinz M, Zolensky M E, et al. Ningqiang and its relationship to oxidized CV3 chondrites. *Meteorit Planet Sci*, 1996, 31: A150~ A151
- 11 Kimura M, Noguchi T, Lin Y, et al. Petrology and mineralogy of an unusual Ningqiang carbonaceous chondrite. In: *Geochemical Studies on Synthetic and Natural Rock Systems*. New Delhi: Allied Publishers LTD, 1997. 153~ 165
- 12 Lin Y, Kimura M, Wang D. Refractory inclusions in the Ningqiang carbonaceous chondrite. *Antarctic Meteorites*, 1996, XXI: 87~ 89
- 13 Lin Y, El Goresy A, Fang H. Ca₂Al₂SiO₇ rich inclusions in the Ningqiang (CV3) chondrite: evidence for primordial high enrichment in Re in Pt-group element nuggets. *Meteoritics*, 1991, 26: 364~ 365
- 14 Anders E, Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 197~ 214
- 15 Yoneda S, Grossman L. Condensation of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ liquids from cosmic gases. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 3 413~ 3 444
- 16 Stolper E. Crystallization sequences of Ca₂Al₂SiO₇ rich inclusions from Allende: an experimental study. *Geochim Cosmochim Acta*, 1982, 46: 2 159~ 2 180
- 17 Blander M, Fuchs L H, Horowitz C, et al. Primordial refractory metal particles in the Allende meteorite. *Geochim Cosmochim Acta*, 1980, 44: 217~ 223
- 18 Fegley J B, Palme H. Evidence for oxidizing conditions in the solar nebula from Mo and W depletions in refractory inclusions in carbonaceous chondrites. *Earth Planet Sci Lett*, 1985, 80: 311~ 326
- 19 Sylvester P J, Ward B J, Grossman L, et al. Chemical compositions of siderophile element-rich opaque assemblages in an Allende inclusion. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 54: 3 491~ 3 508
- 20 Anders E, Zinner E. Interstellar grains in primitive meteorites: diamond, silicon carbide, and graphite. *Meteoritics*, 1993, 28: 490~ 510
- 21 Kihlner A V, Palme H, Spettel B, et al. Fractionation of refractory metals by high temperature oxidation. *Lunar Planet Sci*, 1988. XIX: 627~ 628

(1997-09-12 收稿, 1997-12-12 收修改稿)