

# 南极格罗夫山陨石 GRV020022 的岩石矿物学特征

彭昊<sup>1,2</sup>, 刘燊<sup>1</sup>, 李世杰<sup>2\*</sup>

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

**摘要:** GRV020022 是第 19 次中国南极科学考察队在南极格罗夫山地区蓝冰上发现的一块陨石, 为了解其矿物化学成分, 对该陨石进行了扫描电镜观察和电子探针分析。结果显示, GRV020022 陨石的主要组成矿物为橄榄石、低钙辉石、铁镍金属、陨硫铁、长石等, 且矿物成分不均一, 如橄榄石  $Fa_{8.9-25.6}$  (平均  $Fa_{18.3}$ ) 和低钙辉石  $Fs_{15.9-21.6}$  (平均  $Fs_{17.9}$ ) 具球粒结构, 基质有一定程度的重结晶, 岩石类型属于 4 型。根据 GRV020022 陨石的橄榄石平均  $Fa$  值、低钙辉石平均  $Fs$  值、Fe-Ni 合金含量及铁纹石中的 Co 含量 (4.8 mg/g) 将该陨石划归 H 群。另外陨石的冲击变质程度和风化等级分别为 S3 和 W1。

**关键词:** 南极陨石; 格罗夫山; GRV020022; 岩石矿物学

中图分类号: P691 文章编号: 1007-2802(2020)02-0216-07 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.100

## Petrology and Mineralogy of the Meteorite GRV020022 Collected in Grove Mountains, Antarctica

PENG Hao<sup>1,2</sup>, LIU Shen<sup>1</sup>, LI Shi-jie<sup>2\*</sup>

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

**Abstract:** Meteorite GRV020022 was found in the blue ice field, Grove Mountains, Antarctica, during the 19th Chinese Antarctic Research Expedition (CHINARE). In order to understand its mineral chemical composition, the sample was observed using SEM and analyzed using EPMA. The results show that the Meteorite GRV020022 is mainly composed of olivine, low-Ca pyroxene, metallic Fe-Ni, troilite, and feldspar. Its major minerals of olivine and low-Ca pyroxene have inhomogeneous compositions with Fa values varying from 8.9 to 25.6 and average of 18.3 for olivine and Fs values varying from 15.9 to 21.6 and average of 17.9 for low-Ca pyroxene. It has spherulitic texture with relatively sharp edges. Its matrix was moderately recrystallized. It belongs to Type 4 meteorite in lithology. Meanwhile, based on its mineral compositions, including mean Fa value of olivines, mean Fs value of low-Ca pyroxenes, abundance of metallic Fe-Ni alloy and the Co content of kamacite, the meteorite GRV020022 belongs to H type ordinary chondrite, with the impact metamorphic degree of S3 and weathering grade of W1.

**Key words:** Antarctic meteorite; Grove Mountains; GRV020022; petrology and mineralogy

格罗夫山位于南极洲普里兹湾兰伯特裂谷东岸, 距中国中山站约 450 km。该地区为冰原岛群峰, 由 64 座岛峰和大规模的蓝冰区组成, 是中国在南极发现的一个陨石富集区( 缪秉魁等, 2012)。自 1998 年中国科考队员首次在南极格罗夫山地区发现 4 块陨石以来( 林扬挺等, 2013), 中国已在该地区进行了 6 次科学考察( Miao *et al.*, 2018), 并收集

到陨石 12 665 块, 成为仅次于日本和美国的在世界上拥有南极陨石最多的国家之一。GRV020022 陨石是第 19 次中国南极科考队在格罗夫山地区蓝冰上(  $73^{\circ}05'09''S$ ,  $75^{\circ}12'27''E$ ) 发现的。前人研究认为, GRV020022 是一块普通球粒陨石, 受后期热变质作用影响, 橄榄石和低钙辉石的组成不均一, 橄榄石的平均  $Fa_{18.0}$  和低钙辉石的平均  $Fs_{19.2}$  的相对平

收稿编号: 2019-035 2019-03-04 收到 2019-05-19 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 41273080, 41373067)

第一作者简介: 彭昊( 1994-) 男, 硕士研究生, 研究方向: 地球化学。E-mail: pal3aph@hotmail.com.

\* 通信作者简介: 李世杰( 1978-) 男, 研究员, 研究方向: 天体化学。E-mail: lishijie@126.com.

均偏差 PMD 值较高,分别为 21.9%和 9.8%(李世杰等 2008)。由于该陨石的矿物化学组分与一般平衡型普通球粒陨石有一定差异,因此我们对该陨石进行了详细的岩石矿物学研究,探讨其橄榄石和辉石化学成分变化较大的原因,进而确定其化学群和岩石类型及其成因。另外,还根据 Stöffler 等(1991)和 Wlotzka(1993)冲击程度和风化程度的标准,确定其冲击变质程度与风化等级。

## 1 样品和分析方法

实验样品被切割并磨制成标准厚度的陨石薄片,利用光学显微镜和扫描电子显微镜对陨石中的矿物、球粒结构、球粒丰度、基质结晶程度、不透明矿物分布特征、冲击变质程度和风化等级进行观察。样品的背散射(BSE)图像是在扫描电镜下拍摄,并使用 Adobe® Photoshop 软件统计了陨硫铁和铁镍金属的模式含量(李世杰等 2006)。

陨石中的橄榄石、低钙辉石和铁镍合金的主要成分分析在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室的 EPMA-1600 型电子探针上完成。分析时的加速电压为 25 kV,束流为 10 nA,分析金属矿物时利用纯金属作为标样。对于硅酸盐矿物,分析标准采用硅酸盐矿物和氧化物,分析结果采用 ZAF 法进行校正(辛补社等 2010)。

## 2 岩石矿物学特征

### 2.1 岩石学特征

GRV020022 陨石呈不规则锥形,重 3.4 g,大小为 2 cm×1.5 cm×1 cm,两个面被黑色熔壳覆盖,其余面均为断面。黑色熔壳中存在不规则的裂痕,部分区域的熔壳有脱落,可见黑褐色断面(图 1a)。本次研究的光薄片编号为 GRV020022-2,薄片呈不规则梯形,面积约为 0.8 cm×0.9 cm(图 1b)。该陨石由橄榄石、低钙辉石、铁镍金属(铁纹石和镍纹石)、陨硫铁、长石及少量铬铁矿、高钙辉石、磷灰石和石英颗粒等组成,具球粒结构,球粒类型主要有斑状橄榄石球粒(PO)、斑状辉石球粒(PP)、放射状辉石球粒(RP)等(图 1c)。大多数球粒为球粒碎片,部分球粒结构和轮廓非常清楚(图 1c),完整的球粒形状多为圆形,粒径 0.2~1.0 mm,平均 0.7 mm。受冲击和热变质作用的影响,较完整的球粒边缘和基质接触界限模糊(图 1d,1e)。基质有一定程度的重结晶,在裂隙发育区域出现少量的次生长石(图 1f)。此外,在该陨石中还发现有一定数量的富镁橄榄石和富镁低钙辉石团块(图 1g,1h,1i),其中部分

颗粒具有成分环带(图 1i)。并且,在薄片中还发现有富含 SiO<sub>2</sub> 的区域,这些 SiO<sub>2</sub> 颗粒被铁橄榄石脉所分开,富硅成分-橄榄石-辉石三者共生(图 1j)。该陨石中的不透明矿物多为 Fe-Ni 合金和陨硫铁,其模式含量分别为 3.8%和 2.2%。橄榄石和低钙辉石有明显的波状消光和面状裂隙,未见马赛克消光。部分橄榄石颗粒表面可见两组相互垂直的破裂面(图 1i)。薄片局部可见冲击裂隙发育(图 1f),但未形成广泛的冲击裂隙。以上特征均符合 S3 的冲击变质程度特征。因此,该陨石冲击变质程度应为 S3(Stöffler *et al.*, 1991)。Fe-Ni 合金和陨硫铁边缘仅少量被氧化(图 1d,1h),风化物脉少见,可见风化程度很弱,风化程度定为 W1(Wlotzka, 1993)。

### 2.2 矿物化学特征

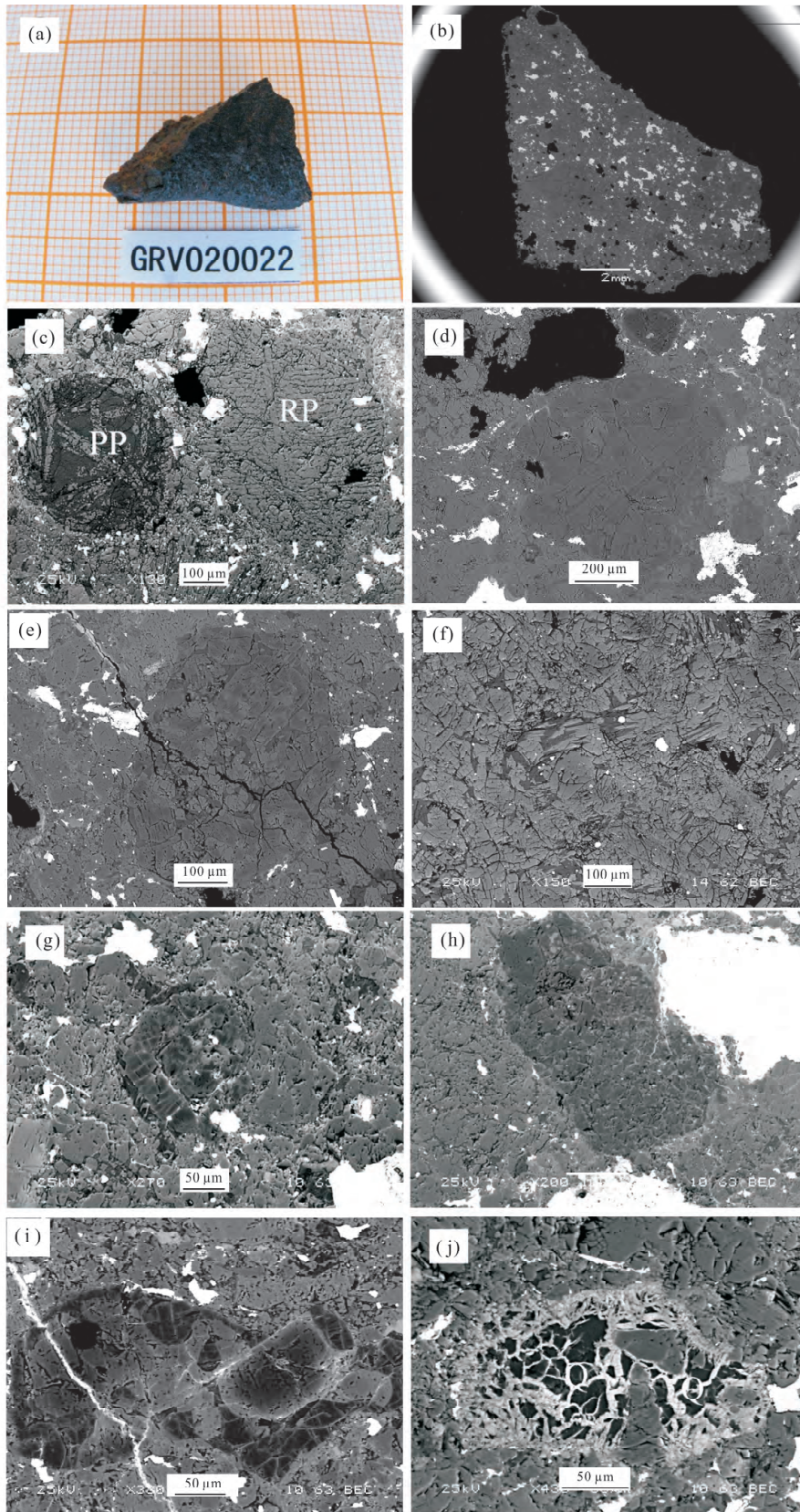
本次对橄榄石和低钙辉石分别随机选取 20 个和 14 个颗粒进行电子探针分析,结果表明(表 1),橄榄石和低钙辉石的组成不均一。橄榄石的 Fa 值为 8.9%~25.6%(摩尔分数,下同),平均 Fa 值为 18.3%,其相对偏差(PMD)值为 19.2;低钙辉石的 Fs 值为 15.9%~21.6%,平均 Fs 值为 17.9%,其 PMD 值为 10.8。另外,薄片明显可见一定数量的铁镁含量异常的橄榄石和低钙辉石颗粒(图 1g,1h,1i),其电子探针测定结果见表 2。这些异常颗粒有的独立存在(图 1g,1h),有的与橄榄石和低钙辉石呈密堆状交叉镶嵌,并同一橄榄石颗粒的核部和边部的成分也有明显差异,形成成分环带,核部富 Mg,边部富 Fe(图 1i)。颗粒核部的 Fa 值为 3.5%,边部 Fa 值升高到 9.2%。

铁镍合金的主要矿物铁纹石和镍纹石的电子探针分析结果显示(表 3),铁纹石中 Fe 含量(质量分数,下同)为 87.0%~96.2%,平均 93.0%;Ni 含量为 4.24%~12.5%,平均 7.07%;Co 含量为 0.37%~0.58%,平均 0.48%。镍纹石中 Fe 含量为 76.7%~81.8%,平均 78.32%;Ni 含量为 18.3%~25.1%,平均 21.94%;Co 含量为 0.19%~0.25%,平均 0.22%。此外,铁纹石和镍纹石中还含有少量的 Si、S、P、Cu 等。

## 3 讨论

### 3.1 陨石结构

GRV020022 陨石具有典型的球粒结构,球粒大多数为球粒碎片,有部分球粒结构和轮廓非常清楚,球粒中的基质基本脱玻化;基质中有一定程度的重结晶,在裂隙发育区域出现少量的次生长石。



(a) 手标本图(最小网格间距为 1 mm); (b) 的薄片全局背散射图像(BES); (c) 结构和轮廓清楚的球粒(斑状辉石球粒(PP)、放射状辉石球粒(RP)); (d, e) 球粒边界模糊, 可见铁镍金属仅边部被氧化; (f) 冲击裂隙发育区域, 深灰色矿物为长石; (g, h, i) 铁镍含量异常的橄榄石(Ol)和低钙辉石(pyx)团块; (h) 大尺寸的铁镍金属内部未显示被氧化的迹象; (j)  $\text{SiO}_2$  (Q) 颗粒

图 1 普通球粒陨石 GRV020022 手标本和岩石结构特征的后散射图像(BSE)



表 1 代表性橄榄石、低钙辉石的电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses of representative olivines and low-Ca pyroxenes

编号	氧化物含量/%														原子比						Fa 或 Fs /%
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	总计	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Mn	Mg	Ca	总计			
1	36.5	0.04	-	0.10	23.0	0.63	37.5	0.13	97.9	0.979	0.001	0	0.002	0.517	0.014	1.502	0.004	3.019	25.6		
2	38.8	0.02	-	0.14	16.8	0.43	42.4	0.06	98.7	0.997	0	0	0.003	0.361	0.009	1.628	0.002	3.001	18.2		
3	38.8	0.05	0.04	0.18	18.1	0.51	42.1	0.05	99.9	0.994	0.001	0.001	0.004	0.387	0.011	1.605	0.001	3.003	19.4		
4	39.4	0.05	-	0.26	19.5	0.37	40.5	0.11	100.2	1.009	0.001	0	0.005	0.417	0.008	1.544	0.003	2.988	21.3		
5	39.4	0.02	-	-	17.8	0.50	42.1	0.02	99.8	1.005	0	0	0	0.378	0.011	1.600	0	2.995	19.1		
6	39.8	0.05	-	0.06	17.7	0.41	43.5	0.00	101.7	0.996	0.001	0	0.001	0.371	0.009	1.625	0	3.003	18.6		
7	40.0	0.09	0.01	-	17.2	0.55	43.7	0.02	101.8	0.998	0.002	0	0	0.360	0.012	1.628	0.001	3.000	18.1		
8	40.1	0.04	0.01	0.35	17.2	0.40	43.0	0.07	101.1	1.005	0.001	0	0.007	0.360	0.009	1.607	0.002	2.990	18.3		
9	40.3	-	-	0.27	11.3	0.24	47.0	0.08	99.3	1.003	0	0	0.005	0.236	0.005	1.743	0.002	2.994	11.9		
10	40.5	0.02	0.01	-	17.3	0.57	42.8	-	101.3	1.013	0	0	0	0.362	0.012	1.598	0	2.986	18.5		
11	40.5	0.06	0.01	0.38	13.3	0.29	46.0	0.11	100.6	1.003	0.001	0	0.007	0.275	0.006	1.696	0.003	2.992	14.0		
12	40.8	0.04	0.01	0.11	17.9	0.59	43.4	0.00	102.9	1.008	0.001	0	0.002	0.369	0.012	1.598	0	2.990	18.7		
13	40.9	0.02	-	0.05	17.5	0.57	41.2	0.04	100.3	1.033	0	0	0.001	0.368	0.012	1.550	0.001	2.966	19.2		
14	40.4	0.05	-	-	17.5	0.54	40.9	0.02	99.4	1.030	0.001	0	0	0.373	0.012	1.553	0.001	2.969	19.4		
15	40.7	0.03	-	0.02	18.1	0.52	41.1	0.02	100.6	1.028	0.001	0	0	0.383	0.011	1.548	0.001	2.971	19.8		
16	39.4	-	0.02	0.12	20.0	0.61	39.4	0.13	99.6	1.016	0	0	0.002	0.432	0.013	1.514	0.004	2.982	22.2		
17	39.9	-	-	0.14	16.3	0.48	42.3	0.10	99.3	1.016	0	0	0.003	0.348	0.010	1.603	0.003	2.983	17.8		
18	41.4	-	0.01	0.24	8.5	0.25	48.8	0.07	99.3	1.014	0	0	0.005	0.174	0.005	1.783	0.002	2.983	8.9		
19	39.7	0.03	0.01	-	17.8	0.54	41.5	0.04	99.6	1.013	0.001	0	0	0.379	0.012	1.581	0.001	2.987	19.3		
20	39.8	0.02	0.01	0.16	16.1	0.44	42.7	0.09	99.4	1.010	0	0	0.003	0.343	0.009	1.618	0.003	2.987	17.5		
1	55.2	0.19	0.86	0.14	11.1	0.58	28.96	0.79	97.8	1.989	0.005	0.037	0.004	0.335	0.018	1.556	0.030	3.974	17.7		
2	56.3	0.05	0.06	0.10	11.3	0.43	30.41	0.91	99.6	1.999	0.001	0.002	0.003	0.335	0.013	1.608	0.034	3.996	17.2		
3	56.5	0.24	0.22	0.27	11.5	0.38	30.81	0.50	100.4	1.988	0.006	0.009	0.007	0.338	0.011	1.616	0.019	3.995	17.3		
4	56.9	0.19	0.16	0.23	11.6	0.52	30.50	0.82	100.9	1.992	0.005	0.007	0.006	0.340	0.015	1.593	0.031	3.990	17.6		
5	56.9	0.09	0.06	0.15	11.2	0.42	30.42	0.84	100.2	2.005	0.002	0.002	0.004	0.331	0.013	1.597	0.032	3.986	17.2		
6	57.1	0.18	0.22	0.29	10.4	0.43	31.03	0.47	100.2	2.003	0.005	0.009	0.008	0.306	0.013	1.621	0.018	3.983	15.9		
7	57.9	0.05	0.12	0.07	10.9	0.38	31.71	0.21	101.4	2.007	0.001	0.005	0.002	0.315	0.011	1.637	0.008	3.986	16.1		
8	58.0	0.23	0.14	0.06	11.3	0.52	31.82	0.81	102.9	1.990	0.006	0.005	0.002	0.325	0.015	1.627	0.030	4.000	16.7		
9	58.4	0.09	0.06	0.11	10.6	0.47	31.35	0.20	101.2	2.022	0.002	0.002	0.003	0.306	0.014	1.617	0.007	3.973	15.9		
10	56.7	0.06	0.46	1.08	12.7	0.59	26.52	1.40	99.5	2.029	0.002	0.020	0.031	0.378	0.018	1.414	0.054	3.944	21.1		
11	57.4	0.02	0.37	1.09	12.4	0.61	27.93	0.98	100.8	2.023	0.001	0.015	0.030	0.364	0.018	1.466	0.037	3.954	19.9		
12	58.1	0.02	0.31	0.91	10.4	0.43	30.17	0.46	100.8	2.022	0	0.013	0.025	0.304	0.013	1.565	0.017	3.959	16.2		
13	57.4	0.07	0.49	1.01	12.1	0.60	27.80	1.25	100.7	2.021	0.002	0.020	0.028	0.358	0.018	1.460	0.047	3.954	19.7		
14	56.4	0.09	0.54	1.08	13.1	0.64	26.77	1.67	100.3	2.009	0.003	0.023	0.031	0.392	0.019	1.422	0.064	3.962	21.6		

注：“-”表示低于检测限；橄榄石氧原子数为4；低钙辉石氧原子数为6。

表 2 铁镁质异常颗粒的电子探针分析结果  
Table 2 Electron microprobe analyses of olivines and pyroxenes with aberrant Fe/(Fe+Mg) ratios

编号	氧化物含量/%													原子比(氧原子数为6)						总计	Fa /%
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	总计	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Mn	Mg	Ca				
OL-1	39.7	-	-	0.15	13.9	0.39	42.6	0.08	96.8	1.024	0.000	0.000	0.003	0.299	0.009	1.637	0.002	2.974	15.4		
OL-2	40.6	0.03	0.03	0.11	7.7	0.14	51.1	0.06	99.8	0.989	0.000	0.001	0.002	0.157	0.003	1.856	0.001	3.009	7.8		
OL-3	40.4	0.04	-	0.14	3.4	0.12	52.8	0.07	97.0	0.993	0.001	0.000	0.003	0.071	0.002	1.935	0.002	3.005	3.5		
OL-4	41.1	0.03	0.01	0.08	8.7	0.17	48.1	0.20	98.3	1.016	0.001	0.000	0.002	0.179	0.004	1.775	0.005	2.982	9.2		
OL-5	40.0	-	-	0.05	15.9	0.50	42.4	0.02	98.8	1.018	0.000	0.000	0.001	0.339	0.011	1.612	0.000	2.981	17.4		
OL-6	38.8	-	0.02	0.29	11.2	0.29	46.6	0.12	97.3	0.987	0.000	0.001	0.006	0.238	0.006	1.768	0.003	3.009	11.9		
Px-1	56.0	0.01	0.20	0.43	6.9	0.36	33.94	0.46	98.2	1.975	0.000	0.008	0.012	0.203	0.011	1.786	0.018	4.014	10.2		
Px-2	58.9	0.04	0.52	0.52	3.3	0.46	36.39	0.57	100.8	1.992	0.001	0.021	0.014	0.094	0.013	1.834	0.021	3.989	4.9		
Px-3	60.7	0.08	0.55	0.29	1.1	0.07	38.87	0.27	102.0	2.001	0.002	0.021	0.008	0.030	0.002	1.909	0.009	3.983	1.6		
Px-4	60.6	0.06	0.63	0.38	2.1	0.08	36.58	0.95	101.4	2.018	0.002	0.025	0.010	0.058	0.002	1.815	0.034	3.963	3.1		
Px-5	61.1	0.05	0.35	0.38	1.3	0.07	39.07	0.31	102.6	2.002	0.001	0.013	0.010	0.035	0.002	1.909	0.011	3.985	1.8		

注:“-”表示低于检测限。

上述特征中球粒结构清晰度、基质重结晶程度、次生长石发育情况等与 4 型陨石相近(van Schmus and Wood, 1967; 缪秉魁等, 2002)。另外, 通过陨石的矿物化学特征也可以在一定程度上判断陨石的岩石学类型。该陨石为一平衡型普通球粒陨石, 相对于较原始的非平衡球粒陨石, 其内部的橄榄石 Fa 值和辉石的 Fs 值变化范围很小, 对于 4 型陨石而言, 其相对平均偏差在 5% 以下(van Schmus and Wood, 1967; 缪秉魁等, 2002; Weisberg *et al.*, 2006)。但 GRV020022 陨石中的橄榄石的 Fa 值的变化范围和低钙辉石颗粒的 Fs 值的变化范围都比较大。一般同一平衡型陨石中橄榄石的 Fa 的 PMD 值应小于低钙辉石 Fs 的, 因为橄榄石较低钙辉石更容易达到热平衡(Sears and Dodd, 1988)。然而, 所研究样品中橄榄石 Fa 的 PMD 值却大于低钙辉石。由表 1 可以发现, 这些差异可能是样品中存在一定数量的铁镁质异常颗粒造成的, 由于测试中取点的随机性, 个别橄榄石和辉石颗粒的 Fa 值、Fs 值明显偏离大多数颗粒的成分范围。基于上述分析, 认为该陨石的岩石类型应为 4 型(van Schmus and Wood, 1967; 缪秉魁等, 2002)。

化学群是陨石分类的重要参数, 依据普通球粒陨石中的橄榄石和辉石的铁镁钙的成分差异, 可以将其划分为 H 群、L 群和 LL 群。依据前人提出的划分方法(van Schmus and Wood, 1967; Dodd, 1981), 本文样品中的橄榄石平均 Fa 值为 18.3, 低钙辉石平均 Fs 值为 17.9 均在 H 群范围内。然而, 考虑到样品的化学成分并不均一, 测试过程中取点的随机性可能使得个别 Fa、Fs 值不一定具有代表性。因此, 我们结合其 Fe-Ni 金属的含量、铁纹石中 Co 的含量等(Norton, 2002; 缪秉魁等, 2002) 来进行分类。分析结果显示, 陨石中铁纹石的成分比较均一, Co 含量平均值为 4.8 mg/g, 也在 H 群的变化范围内。由于本次研究中的金属是在 20 倍反光照片下统计, 而通过该方法统计的金属和硫化物含量明显低。前人工作表明(李世杰等, 2008), 铁镍金属模式含量(体积分数)在 2.4% 之上的陨石即为高铁群。综上可以认为 GRV020022 陨石的化学群应属 H 群。

### 3.2 铁镁质异常颗粒的成因

对于样品中发现的富镁橄榄石和低钙辉石颗粒, 前人在一些普通球粒陨石中也有发现。Mason (1974) 在 Elsinora(H5) 这一橄榄石成分本应基本一致的球粒陨石中发现部分球粒橄榄石 Fa 值为 6%~19%, 变化范围较大; Rambaldi 等(1981) 发现

表 3 代表性 Fe-Ni 合金电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analyses of representative Fe-Ni alloys

(%)

点号	Si	Cr	S	P	Co	Fe	Cu	Ni	总计	备注
1	0.02	-	0.01	0.03	0.45	92.6	-	6.97	100.1	
2	0.02	-	0.02	0.01	0.37	96.2	-	4.24	100.9	
3	0.06	-	0.01	-	0.52	94.6	-	5.61	100.8	
4	0.05	-	0.02	0.03	0.57	94.2	-	6.43	101.3	
5	0.03	-	0.01	0.02	0.49	94.3	0.01	6.83	101.7	
6	0.02	-	-	-	0.47	92.0	0.05	6.87	99.4	铁纹石
7	0.03	-	0.02	0.01	0.46	93.1	-	6.97	100.6	
8	0.06	-	0.02	0.01	0.58	92.4	-	6.97	100.0	
9	0.02	-	0.02	-	0.43	92.5	0.07	7.17	100.2	
10	0.03	-	0.01	-	0.48	94.0	-	7.19	101.7	
11	0.04	-	-	-	0.48	87.0	0.08	12.50	100.1	
12	0.04	-	-	-	0.23	81.8	-	18.30	100.4	
13	0.04	-	0.01	-	0.21	78.6	0.02	20.80	99.7	
14	0.03	-	-	-	0.25	77.7	-	22.60	100.7	镍纹石
15	0.04	-	0.02	0.01	0.19	76.7	-	22.90	99.9	
16	0.05	-	-	0.01	0.22	76.7	0.03	25.10	102.1	

注 “-”表示低于检测限。

Allegan( H5) 中有一小部分微米级的橄榄石和辉石颗粒的 Fe/( Fe+Mg) 值变化范围较大; Pellas 和 Bourrot-Denise( 1985) 通过分析吉林陨石( H5) 中的 500 个橄榄石后发现, 大多数颗粒的 Fa 值为 18~20, 但存在 4 个 Fa 值( 分别为 11.3、11.5、11.7 和 26.5) 异常的颗粒, 并推断这些颗粒是外来的且在 40 亿年到 9 百万年之前已混入吉林陨石主体中; Fodor 等( 1980) 在 Adams County( H5) 、Rubin 等( 1983) 在 Lincoln County( L6) 中也发现有非平衡熔融的碎屑物; Scott 等( 1985) 对 42 块 4-6 型 H 和 L 球粒陨石的岩相学研究表明, 在 8 块陨石中包含少量具有异常 Fe/( Fe+Mg) 值的橄榄石和辉石球粒和碎屑, 并推测大多数球粒陨石在变质峰期后发生过角砾岩化; 王道德等( 1993) 在球粒陨石中发现有 7 块陨石含有异常的镁铁质颗粒, 并认为这类异常的铁镁质颗粒可能是在变质作用之后的角砾岩化过程中进入主体球粒陨石内的。

由于 GRV020022 母体热变质对其富镁团块的作用并不明显, 结合陨石母体的形成过程, 推测是太阳星云中冷凝的物质吸积形成陨石母体后, 母体之间相互碰撞产生大量陨石角砾( Stöffler et al., 1988) 。随后不久, 由于吸积能、中等及长半衰期放射性核素加热等因素( 戴诚达和王道德, 1991) , 母体温度逐渐回升, 达到峰值温度, 内部发生热变质和重结晶, 使橄榄石、辉石成分均一化, 由非平衡型球粒陨石发展为平衡型球粒陨石( 王道德和谢先德, 1978) 。之后温度逐渐下降, 在母体冷却阶段可能受到多次撞击破裂( 欧阳自远, 1988) , 导致母体

局部冲击变质和瞬时加温致使晶界融化, 使得先前破碎的角砾进入主体球粒陨石固结成岩( Bischoff et al., 2006) 。

### 3.3 SiO<sub>2</sub> 颗粒的存在

在 GRV020022 陨石中发现有富含 SiO<sub>2</sub> 的区域。虽然由于太阳系元素丰度的限制, 球粒陨石中含有 SiO<sub>2</sub> 的情况很少见( Brigham et al., 1982) , 但已有一些普通球粒陨石中存在富 SiO<sub>2</sub> 成分( Brigham et al., 1982, 1986; Bischoff et al., 1993; Hezel et al., 2006) 的报道。GRV020022 中的富 SiO<sub>2</sub> 区域的结构特征与 Brigham 等( 1986) 报道的 H3.4 Sharps 样品非常相似, 均为 SiO<sub>2</sub> 颗粒中间充填有铁橄榄石脉体; 同时, 二者的岩石矿物学特征也有相似之处。Hezel 等( 2006) 总结了普通球粒陨石中富 SiO<sub>2</sub> 组分的 7 种不同的矿物学类型, 并通过对富 SiO<sub>2</sub> 组分主量和稀土元素的测定以及 SiO<sub>2</sub> 同质多相体的研究判断其主要成因。对于的 GRV020022 样品, 其属于 SiO<sub>2</sub>-辉石-橄榄石型, 与 H3.8 Devgaon 及 H3.4 Sharps 样品相似。其主要成因推定为: 在太阳星云分异凝聚( fractional condensation) 过程中有富硅成分参与, 并有如下反应: 橄榄石 + SiO<sub>2</sub> + 1/2O<sub>2</sub> = 辉石( Tissandeer et al., 2002) , 这使得橄榄石被一层辉石覆盖, 阻止反应的进一步进行。此时再经历冷却, SiO<sub>2</sub> 相凝聚, 形成富硅前体物。这一前体物再被加热至 1140~1 968 K 在球粒形成过程中形成富 SiO<sub>2</sub> 组分, 对于本样品需升温至 1 968 K 以上, 以保证在 Fe-Mg-Si 系统中的液相不混溶间隙( liquid immiscibility gap) 打开, 然后迅速冷却形成富

硅组分(Hezel *et al.*, 2006)。因此, GRV020022 中的富 SiO<sub>2</sub> 区域可能就是类似过程的产物。

## 4 结论

(1) GRV020022 属于普通球粒陨石, 化学群为 H 群, 岩石类型为 4 型, 经历了冲击变质和轻微风化, 冲击变质程度为 S3, 风化等级为 W1。

(2) GRV020022 中的橄榄石和低钙辉石的组成不均一, 是由于球粒陨石主体在变质作用后期的冷却阶段受到多次的撞击破裂, 使得先前破碎的角砾进入主体球粒陨石固结成岩。

(3) GRV020022 中 SiO<sub>2</sub> 颗粒的存在, 可能是太阳星云形成初期由于 SiO<sub>2</sub> 相的分异凝聚形成富 SiO<sub>2</sub> 前体物, 这一前体物再在高温中进入球粒, 迅速冷却后形成富硅的颗粒。

致谢: 感谢中国极地研究中心南极陨石库提供研究样品。

## 参考文献(References):

Bischoff A, Geiger T, Palme H, Spettel B, Schultz L, Scherer P, Schlüter J, Lkhamsuren J. 1993. Mineralogy, chemistry, and noble gas contents of Adzhi-Bogdo-an LL3-6 chondritic breccia with L-chondritic and granitoid clasts. *Meteoritics*, 28(4): 570-578

Bischoff A, Scott E R, Metzler K, Goodrich C A. 2006. Nature and origins of meteoritic breccias. In: Lauretta D S, McSween Jr H Y, eds. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson: University of Arizona Press, 679-712

Brigham C, Murrell M, Burnett D. 1982. SiO<sub>2</sub>-rich chondrules in ordinary chondrites. In: *Abstracts of Papers Presented to the Conference on Chondrules and THEIR Origins*. Houston: LPI Contributions, 493: 4

Brigham C, Yabuki H, Ouyang Z, Murrell M T, El Goresy A, Burnett D S. 1986. Silica-bearing chondrules and clasts in ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(8): 1655-1666

Dodd R T. 1981. *Meteorites: A petrologic-chemical synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 377

Fodor R V, Keil K, Prinz M, Ma M S, Murali A V, Schmitt R A. 1980. Clast laden melt rock fragment in the Adams County, Colorado, H5 chondrite. *Meteoritics*, 15(1): 41-62

Hezel D C, Palme H, Nasdala L, Brenker F E. 2006. Origin of SiO<sub>2</sub>-rich components in ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(6): 1548-1564

Mason B H. 1974. *Notes on Australian meteorites*. Sydney: Australian Museum, 178

Miao B, Xia Z, Zhang C, et al. Progress of Antarctic meteorite survey and research in China. *Advances in Polar Science*, 2018

Norton O R. 2002. *The Cambridge encyclopedia of meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press

Pellas P, Bouron-Denise M. 1985. Nuclear track study of Jilin chondrite. *Earth and Planetary Science Letters*, 72(2-3): 286-298

Rambaldi E R, Fredriksson B J, Fredriksson K. 1981. Primitive ultrafine matrix in ordinary chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 56: 107-126

Rubin A E, Rehfeldt A, Peterson E, Keil K, Jarosewich E. 1983. Fragmental breccias and the collisional evolution of ordinary chondrite parent bodies. *Meteoritics*, 18(3): 179-196

Scott E R D, Lusby D, Keil K. 1985. Ubiquitous brecciation after metamorphism in equilibrated ordinary chondrites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(S01): 137-148

Sears D W G, Dodd R T. 1988. Overview and classification of meteorites. In: Lauretta D S, McSween Jr H Y, eds. *Meteorites and the Early Solar System*. Tucson: University of Arizona Press, 3-31

Stöffler D, Bischoff A, Buchwald V, Rubin A E. 1988. Shock effects in meteorites. In: Lauretta D S, McSween Jr H Y, eds. *Meteorites and the Early Solar System*. Tucson: University of Arizona Press, 165-202

Stöffler D, Keil K, Scott E R D. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12): 3845-3867

Tissandier L, Libourel G, Robert F. 2002. Gas-melt interactions and their bearing on chondrule formation. *Meteoritics & Planetary Science*, 37(10): 1377-1389

van Schmus W R, Wood J A. 1967. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5): 747-765

Weisberg M K, McCoy T J, Krot A N. 2006. Systematics and evaluation of meteorite classification. In: Lauretta D S, McSween Jr H Y, eds. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson: University of Arizona Press, 19-52

Wlotzka F. 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28(3): 460

戴诚达, 王道德. 1991. 球粒陨石的热变质作用. *地质地球化学*, (2): 53-59

李世杰, 王世杰, 刘燊, 付绍洪. 2006. Photoshop 在普通球粒陨石铁镍合金和陨硫铁含量统计中的应用. 见: 第八届全国空间化学与陨石学学术研讨会. 海口: 中国空间科学学会, 中国矿物岩石地球化学学会

李世杰, 王世杰, 刘燊, 李雄耀, 唐红, 李芄, 王涛. 2008. 100 块南极格罗夫山陨石的类型划分及其岩石学特征. *极地研究*, 20(2): 177-188

林杨挺, 缪秉魁, 徐琳, 胡森, 冯璐, 赵旭晔, 杨晶. 2013. 陨石学与天体化学(2001~2010)研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 32(1): 40-55

缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 周新华. 2002. 南极格罗夫山陨石岩石学特征 II: 平衡型普通球粒陨石. *极地研究*, 14(4): 288-299

缪秉魁, 林杨挺, 王道德, 欧阳自远. 2012. 中国南极陨石收集进展(2000-2010). *矿物岩石地球化学通报*, 31(6): 565-574

欧阳自远. 1988. *天体化学*. 北京: 科学出版社, 386

王道德, 谢先德. 1978. 吉林陨石的热变质及冲击变质研究. *地球化学*, (1): 13-18, 79-80

王道德. 1993. *中国陨石导论*. 北京: 科学出版社, 505

辛补社, 王世杰, 李世杰. 2010. 南极格罗夫山陨石 GRV 053645 的岩石矿物学特征. *矿物岩石地球化学通报*, 29(3): 264-269