

南极格罗夫山陨石 GRV053645 的岩石矿物学特征

辛补社^{1,2}, 王世杰¹, 李世杰¹

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘要: 南极格罗夫山陨石 GRV053645 是一块非常原始的普通球粒陨石, 它很好地保存有太阳星云凝聚和增生的相关信息, 对研究太阳星云的起源意义重大。本文描述了这块陨石的岩石矿物学特征, 包括球粒结构类型、基质不透明、橄榄石和低钙辉石具有明显的成分环带等。根据 Fe-Ni 合金含量、球粒平均直径大小和橄榄石平均 Fa 值, 表明这块陨石属于低铁群(L)。利用橄榄石 Fa 的 PMD 值与岩石类型亚类的相关性, 其岩石类型应为 3.4 亚类。该陨石冲击变质程度和风化等级都较低, 分别为 S2 和 W1。

关键词: 南极陨石; 格罗夫山; GRV053645; 岩石矿物学

中图分类号: P691 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2010)03-0264-06

Petrography and Mineralogy of Grove Mountains Meteorite GRV053645

XIN Bu-she^{1,2}, WANG Shi-jie¹, LI Shi-jie¹

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: GRV053645 is a primitive ordinary chondrite, it is well preserved and recorded the information of the condensation and accretion of early solar nebula, and it is of great significance in studying the origin of solar nebula. This paper mainly depicted the petrography and mineral chemistry of GRV053645, including very sharp-outlined chondrules, almost opaque fine-grained matrix, and zoned grains of olivine and low-ca pyroxene. According to a-bundance of metallic Fe-Ni, mean chondrule diameter, and mean Fa content of olivine, GRV053645 is classified as a Ordinary chondrite. Meanwhile, based on the relationship between the PMD of Fa of olivine and subtype of ordinary chondrites, the petrographic subtype of GRV053645 is 3.4. The shock stage is classified as S2, and the weathering grade is classified as W1.

Key words: Antarctic meteorite; Grove Mountains; GRV053645; petrography and mineralogy

格罗夫山位于南极洲的东南部, 伊丽莎白公主地腹地, 距中山站约 400 km。中国第 15 次(1998~1999)南极科考队在格罗夫山地区首次发现并收集到 4 块陨石^[1], 拉开了我国收集南极陨石的序幕。截止第 22 次(2005~2006)南极科学考察, 我国在格罗夫山地区共收集到 9834 块陨石^[2], 位居世界第三位, 仅次于日本和美国^[3]。

从 2006 年开始, 国内对南极陨石进行了分类研

究, 发现了火星陨石^[4,5]和灶神星^[6,7]陨石各两块, 以及其他类型陨石^[8]。研究表明, GRV053645 是一块非常原始的非平衡型普通球粒陨石。它受后期热变质作用影响较小, 保存了太阳星云凝聚和增生的相关信息, 对研究太阳星云的起源和演化意义重大。本文将着重介绍其岩石矿物学特征、化学群和岩石类型, 以及冲击变质程度和风化等级^[9,10]。

收稿日期: 2010-01-25 收到, 03-04 改回

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCXZ-YW-110); 国家科技基础条件平台建设项目(2005DKA21406); 贵州省基金项目(2008GZ02717, 2010GZ4439)

第一作者简介: 辛补社(1978-), 男, 硕士研究生, 专业方向: 天体地球化学。

通信作者: 王世杰. E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn.

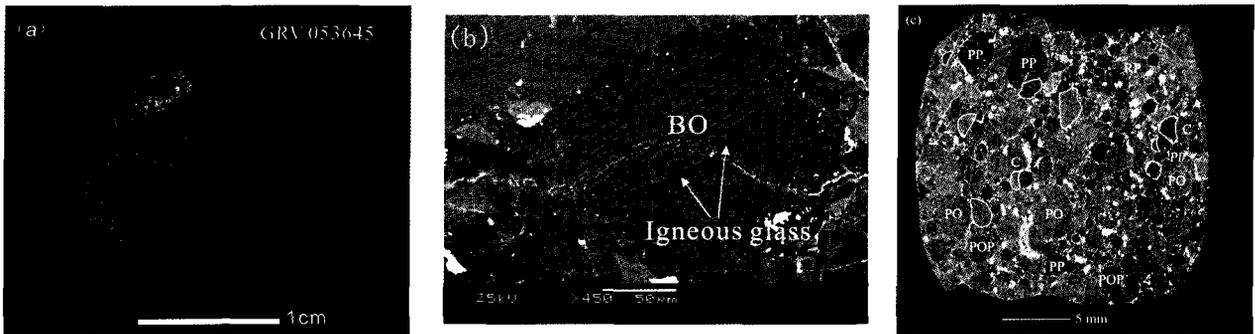
1 样品和分析方法

陨石手标本经一系列处理后制成标准厚度的光薄片^[8]。镜下研究了球粒结构、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。拍摄了扫描电镜全局背散射图像,统计了金属铁镍和陨硫铁的模式含量^[11]和球粒平均直径。在矿床地球化学国家重点实验室的 EPMA-1600 型电子探针上完成了矿物化学成分测定(分析加速电压为 25 kV,束流 10 nA,分析标准为硅酸盐矿物和氧化物,用 ZAF 方法进行校正)。

2 岩石矿物学特征

2.1 岩石学特征

GRV053645 陨石重 4.91 g,呈不规则球形,熔壳完整(图 1a)。球粒结构完整,球粒边界和轮廓非常清晰,主要有斑状橄榄石球粒(PO)、斑状辉石球粒(PP)、斑状橄榄石-辉石球粒(POP)、炉条状橄榄石球粒(BO)、隐晶质球粒(C)和放射状辉石球粒(RP)(图 1b,c)。球粒直径为 0.12~2.35 mm,平均为 0.46 mm。球粒中均见有原始玻璃,在炉条状橄榄石球粒中最为常见(图 1b)。



a. GRV053645 手标本图;b. 炉条状橄榄石球粒(BO),可见清晰原始火山玻璃;c. GRV053645 的薄片全局背散射图像(BSE),可见球粒碎片(图 1c 中白色虚线所圈)、斑状橄榄石球粒(PO)、斑状辉石球粒(PP)、斑状橄榄石-辉石球粒(POP)等
a. Image of hand specimen;b. Barred olivine,igneous glass is sharply visible;c. Whole back scattered electron image of GRV053645,including fragments of chondrule;porphyritic olivine;porphyritic pyroxene;porphyritic olivine-pyroxene, et al

图 1 普通球粒陨石 GRV053645 的手标本和球粒结构图

Fig. 1 Images of hand specimen and chondrules texture in ordinary chondrite GRV053645

薄片背散射全图上清晰可见球粒碎片(图 1c 中白色粗线圈定)。碎片多呈椭圆状或者长条状,很可能是球粒在形成过程中相互碰撞,或球粒凝聚加积过程中塑性变形所致。不透明矿物多为 Fe-Ni 合金和陨硫铁,呈浑圆状分布在球粒内部,或以团块状、不规则状分布在球粒周围,基质中的 Fe-Ni 合金和陨硫铁呈离散状分布。Fe-Ni 合金和陨硫铁的模式含量分别为 4.2%(vol)和 7.5%(vol)。橄榄石和低钙辉石有明显的波状消光和不规则破裂,冲击变质程度应为 S2;Fe-Ni 合金和陨硫铁边部仅少量被氧化,风化物脉少见,风化程度为 W1。

2.2 矿物化学特征

陨石的矿物成分变化很大,橄榄石和低钙辉石的分析结果见表 1 和表 2。矿物成分的变化首先表现为不同颗粒中橄榄石的 Fa 值(% ,mol)变化大,为 4.8~36.4(平均 21.4),其相对标准偏差(PMD)为 45.6%。低钙辉石的 Fs 值(% ,mol)为 1.0~25.0(平均 12.9),PMD 为 64.3%。其次,同一颗粒核部和边部的成分也有明显的差异。表 3 显示,橄

榄石和低钙辉石普遍有明显的成分环带,核部富 Mg,边部富 Fe。如橄榄石颗粒 1(OL-1)核部 Fa 为 7.0,边部升高到 14.6。OL-2 核部的 Fa 值为 7.2,边部为 11.6。OL-3 核部的 Fa 值为 36.4,边部为 41.8。同样,低钙辉石颗粒 1 核部的 Fs 值为 7.0,边部升至 9.4。相比较而言,橄榄石颗粒的核边 Fa 值变化幅度较低钙辉石颗粒的核边 Fs 值变化幅度大得多,这与 FeO 在橄榄石中的扩散能力低于在低钙辉石中有关^[12]。有些学者认为这种晶形完好、边界清晰的橄榄石是熔融结晶的,具典型的正环带成分结构;而具反环带成分结构的橄榄石结晶程度较差,是一种原始残余相,它先于球粒而成^[13,14]。

3 讨论

(1)化学群:GRV053645 属典型的非平衡型普通球粒陨石。对非平衡型普通球粒陨石的化学群划分,以 Fe-Ni 合金或总铁量为主,参照平均橄榄石 Fa 值^[15]。该陨石的 Fe-Ni 合金体积百分比为 4.2%,转换成重量百分比为 9.3%,落入 L 群范围^[16]。

表 1 代表性橄榄石的电子探针分析结果
Table 1 Representative electron microprobe analyses of olivine

编号	氧化物含量(%)													原子比(O 原子数为 4)						Fa (%, mol)
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Tatal	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Mn	Mg	Ca	Sum		
1	40.2	0.02	b. d.	0.2	13.7	0.23	45.2	0.01	99.5	1.007	0.000	0.000	0.004	0.286	0.005	1.688	0.000	2.991	14.5	
2	38.9	0.01	0.01	0.03	4.9	0.21	52.7	0.08	96.9	0.968	0.000	0.000	0.001	0.101	0.004	1.955	0.002	3.031	4.9	
3	36.3	0.02	0.01	0.02	29.9	0.52	30.8	0.09	97.7	1.007	0.000	0.000	0.000	0.694	0.012	1.275	0.003	2.992	35.3	
4	38.7	0.01	b. d.	0.05	19.8	0.64	39.2	0.05	98.4	1.011	0.000	0.000	0.001	0.433	0.014	1.527	0.001	2.988	22.1	
5	38.5	0.01	b. d.	0.23	17.7	0.3	40.6	0.05	97.4	1.007	0.000	0.000	0.005	0.386	0.007	1.584	0.001	2.990	19.6	
6	36.3	0.04	0.01	0.04	21.3	0.4	38.4	0.13	96.6	0.980	0.001	0.000	0.001	0.480	0.009	1.545	0.004	3.019	23.7	
7	41.1	b. d.	b. d.	0.04	4.7	0.13	52.3	0.08	98.3	1.001	0.000	0.000	0.001	0.095	0.003	1.896	0.002	2.998	4.8	
8	35.0	b. d.	b. d.	0.13	29.3	0.46	31.3	0.13	96.4	0.987	0.000	0.001	0.003	0.690	0.011	1.316	0.004	3.011	34.4	
9	37.2	0.02	b. d.	b. d.	29.0	0.52	30.8	0.09	97.6	1.026	0.000	0.000	0.000	0.667	0.012	1.265	0.003	2.973	34.5	
10	38.4	b. d.	b. d.	0.02	22.1	0.47	36.0	0.02	96.9	1.028	0.000	0.000	0.000	0.495	0.011	1.436	0.000	2.971	25.6	
11	37.8	0.02	b. d.	0.02	22.3	0.47	37.5	0.03	98.1	1.004	0.000	0.000	0.000	0.496	0.011	1.484	0.001	2.996	25.1	
12	38.1	b. d.	0.01	0.01	21.8	0.48	37.8	0.02	98.1	1.008	0.000	0.000	0.000	0.482	0.011	1.491	0.001	2.992	24.4	
13	40.9	b. d.	0.01	0.04	9.0	0.41	48.7	0.07	99.2	1.007	0.000	0.000	0.001	0.185	0.009	1.789	0.002	2.992	9.4	
14	36.6	b. d.	b. d.	0.03	30.4	0.57	29.9	0.07	97.6	1.019	0.000	0.000	0.001	0.708	0.013	1.238	0.002	2.981	36.4	
15	41.1	0.02	b. d.	0.02	7.0	0.09	50.8	0.06	99.1	1.002	0.000	0.000	0.000	0.144	0.002	1.847	0.001	2.997	7.2	
16	40.8	0.03	0.02	0.07	6.9	0.08	51.5	0.04	99.4	0.992	0.001	0.001	0.001	0.141	0.002	1.868	0.001	3.006	7.0	
17	39.0	0.08	0.02	0.03	15.0	0.26	42.7	0.11	97.2	1.008	0.001	0.001	0.001	0.324	0.006	1.646	0.003	2.990	16.4	
18	40.6	0.01	0.02	0.11	7.9	0.07	49.5	0.07	98.3	1.004	0.000	0.001	0.002	0.163	0.002	1.822	0.002	2.995	8.2	
19	37.7	0.02	b. d.	0.03	23.5	0.49	36.0	0.04	97.8	1.010	0.000	0.000	0.001	0.527	0.011	1.439	0.001	2.989	26.8	
20	37.7	0.06	b. d.	0.28	22.0	0.52	36.4	0.07	96.9	1.013	0.001	0.000	0.006	0.493	0.012	1.456	0.002	2.983	25.3	
21	38.5	0.02	b. d.	0.02	20.5	0.38	39.0	0.03	98.4	1.009	0.000	0.000	0.000	0.450	0.008	1.521	0.001	2.990	22.8	
22	38.8	b. d.	0.03	0.01	21.7	0.51	37.4	0.05	98.4	1.020	0.000	0.001	0.000	0.478	0.011	1.466	0.001	2.979	24.6	
23	38.6	b. d.	b. d.	b. d.	22.0	0.46	37.8	0.03	98.9	1.013	0.000	0.000	0.000	0.482	0.010	1.480	0.001	2.987	24.6	
24	40.9	b. d.	0.02	0.1	10.8	0.18	46.2	0.11	98.3	1.022	0.000	0.001	0.002	0.226	0.004	1.720	0.003	2.977	11.6	
25	37.9	0.02	b. d.	0.01	22.2	0.52	37.3	0.08	98.0	1.007	0.000	0.000	0.000	0.492	0.012	1.479	0.002	2.993	25.0	
26	35.9	b. d.	0.01	0.04	29.1	0.45	30.7	0.06	96.3	1.008	0.000	0.000	0.001	0.684	0.011	1.285	0.002	2.991	34.7	
27	37.8	0.04	b. d.	0.03	25.0	0.39	35.1	0.05	98.5	1.013	0.001	0.000	0.001	0.560	0.009	1.401	0.001	2.986	28.6	
28	38.9	0.02	b. d.	0.03	19.1	0.4	40.4	0.08	99.0	1.008	0.000	0.000	0.001	0.414	0.009	1.558	0.002	2.992	21.0	

注: b. d. 低于检出限

表 2 代表性低钙辉石的电子探针分析结果
Table 2 Representative electron microprobe analyses of low-Ca pyroxene

编号	氧化物含量(%)													Fa (%,mol)				
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Tatal	Si	Ti	Al	Cr		Fe	Mn	Mg	Ca
1	55.2	b. d.	0.25	0.62	11.0	0.54	29.0	0.49	97.2	2.006	0.000	0.011	0.018	0.335	0.017	1.574	0.019	3.980
2	59.3	0.07	0.35	0.45	2.1	0.14	37.9	0.22	100.6	1.993	0.002	0.014	0.012	0.060	0.004	1.900	0.008	3.992
3	56.6	0.08	1.04	0.81	9.4	0.27	30.4	1.39	100.0	1.984	0.002	0.043	0.022	0.277	0.008	1.592	0.052	3.981
4	59.1	0.02	b. d.	0.07	0.7	0.17	39.1	0.28	99.4	1.996	0.001	0.000	0.002	0.019	0.005	1.970	0.010	4.002
5	56.0	0.12	0.02	0.14	13.6	0.54	28.5	0.52	99.5	2.008	0.003	0.001	0.004	0.408	0.016	1.525	0.020	3.986
6	57.0	0.02	0.01	0.43	11.9	0.59	29.8	0.17	100.0	2.016	0.001	0.000	0.012	0.352	0.018	1.573	0.006	3.977
7	56.5	0.02	0.02	0.43	12.3	0.52	29.2	0.21	99.2	2.016	0.001	0.001	0.012	0.367	0.016	1.557	0.008	3.977
8	58.3	0.03	0.04	0.48	5.3	0.47	33.3	0.27	98.2	2.033	0.001	0.001	0.013	0.155	0.014	1.732	0.010	3.959
9	55.8	0.02	0.19	0.55	14.5	0.55	27.0	0.28	98.9	2.021	0.000	0.008	0.016	0.438	0.017	1.455	0.011	3.966
10	55.6	0.03	0.04	0.59	13.8	0.50	27.5	0.20	98.3	2.019	0.001	0.002	0.017	0.421	0.015	1.488	0.008	3.971
11	55.0	0.06	0.03	0.12	12.5	0.46	28.5	0.61	97.2	2.009	0.002	0.001	0.003	0.381	0.014	1.554	0.024	3.987
12	58.3	0.05	0.62	0.65	4.7	0.50	34.8	0.29	99.9	1.997	0.001	0.025	0.018	0.135	0.015	1.779	0.011	3.980
13	58.5	0.12	0.68	0.35	2.2	0.10	38.2	0.47	100.6	1.969	0.003	0.027	0.009	0.063	0.003	1.918	0.017	4.010
14	53.8	0.04	0.01	0.08	13.4	0.55	28.3	0.56	96.7	1.989	0.001	0.000	0.002	0.414	0.017	1.561	0.022	4.008
15	57.6	0.02	b. d.	0.31	6.4	0.31	34.0	0.13	98.8	2.008	0.000	0.000	0.008	0.188	0.009	1.769	0.005	3.988
16	57.9	b. d.	0.02	0.31	4.0	0.34	35.8	0.16	98.4	2.004	0.000	0.001	0.008	0.115	0.010	1.847	0.006	3.991
17	58.5	0.02	0.03	0.32	2.6	0.26	38.0	0.13	99.8	1.988	0.001	0.001	0.009	0.073	0.008	1.922	0.005	4.006
18	59.8	0.03	0.40	0.52	1.8	0.23	37.6	0.40	100.8	2.002	0.001	0.016	0.014	0.050	0.007	1.879	0.014	3.982
19	55.7	0.02	0.47	0.51	15.5	0.73	26.2	0.79	99.9	2.008	0.001	0.020	0.015	0.469	0.022	1.410	0.031	3.974

注: b. d. 低于检出限

表 3 橄榄石和低钙辉石的成分环带电子探针分析结果
Table 3 Zonal pattern of electron microprobe analyses of olivine and low-Ca pyroxene

编号	氧化物含量(%)													Fa/Fs (%,mol)				
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Tatal	Si	Ti	Al	Cr		Fe	Mn	Mg	Ca
OL-1	core	40.8	0.03	0.02	0.07	6.9	0.08	51.5	0.04	99.4	0.992	0.001	0.001	0.141	0.002	1.868	0.001	3.006
OL-1	rim	39.3	b. d.	0.02	0.04	13.5	0.23	44.3	0.14	97.6	1.006	0.000	0.001	0.288	0.005	1.689	0.004	2.994
OL-2	core	41.1	0.02	b. d.	0.02	7.0	0.09	50.8	0.06	99.1	1.002	0.000	0.000	0.144	0.002	1.847	0.001	2.997
OL-2	rim	39.7	0.01	b. d.	b. d.	10.8	0.18	46.0	0.16	96.8	1.009	0.000	0.000	0.229	0.004	1.745	0.004	2.991
OL-3	core	36.6	b. d.	b. d.	0.03	30.4	0.57	29.9	0.07	97.6	1.019	0.000	0.001	0.708	0.013	1.238	0.002	2.981
OL-3	rim	35.4	0.01	b. d.	0.06	34.0	0.55	26.6	0.06	96.7	1.015	0.000	0.001	0.815	0.013	1.136	0.002	2.984
Px-1	core	58.3	0.05	0.62	0.55	4.7	0.50	34.8	0.29	99.9	1.997	0.001	0.025	0.135	0.015	1.779	0.011	3.980
Px-1	rim	56.4	0.09	0.59	0.63	6.2	0.50	33.2	0.40	98.0	1.988	0.002	0.025	0.182	0.015	1.745	0.015	3.989

注: b. d. 低于检测限

该陨石的球粒直径为 0.12~2.35 mm,平均值为 0.46 mm(图 2),平均大小与 L 群陨石的球粒平均直径很接近^[17]。同时,橄榄石的平均 Fa 值为 21.4%(mol),也全部落入 L 群范围^[18~20]。低钙辉石的平均 Fs 值为 12.9%(mol),明显比 L 群和 H 群低。其原因可能与低钙辉石成分平衡能力滞后于橄榄石^[12]有关。GRV 99001、GRV 99019 和 GRV 020164 等 8 块 L3 型^[15,21]都具这一特点:橄榄石平均 Fa 值完全落入 L 群范围,而低钙辉石平均 Fs 值明显比 L 群偏低,甚至低于 H 群。

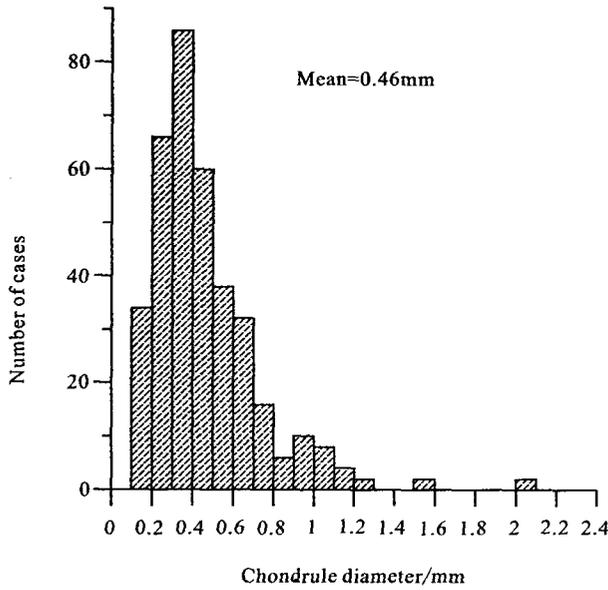


图 2 GRV053645 球粒直径分布直方图
Fig. 2 Histogram showing the distribution of chondrule diameters from GRV053645

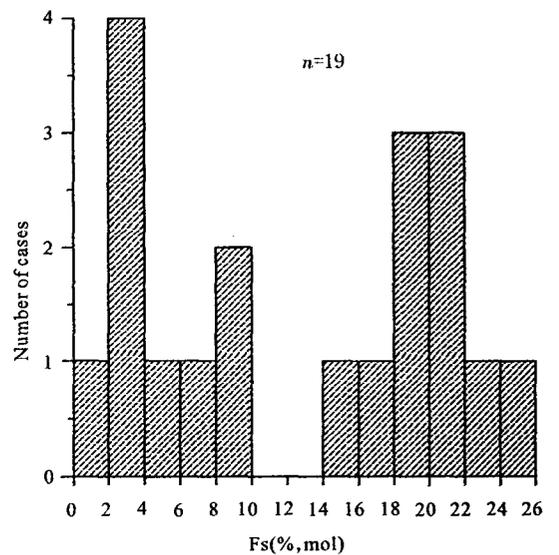
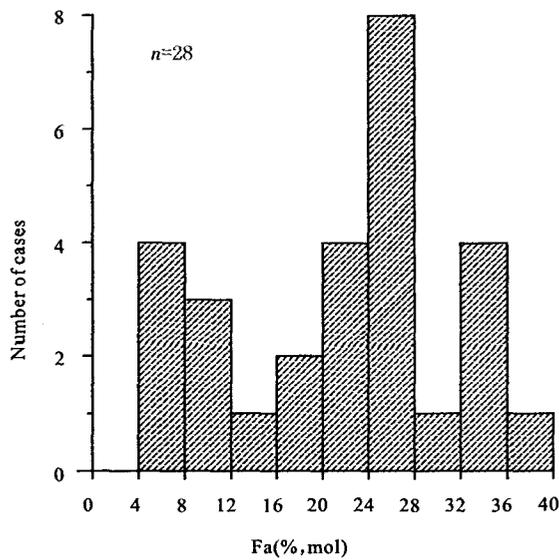


图 3 GRV053645 橄榄石和低钙辉石成分分布直方图

Fig. 3 Histogram showing the distribution of olivine and pyroxene compositions in GRV053645

综上所述,GRV053645 陨石应属 L 群。

(2)岩石类型亚类:非平衡普通球粒陨石根据热释光(TL)灵敏度的差异性可分为 3.0 到 3.9 等 10 个等级的岩石类型亚类^[22,23]。研究发现^[22],橄榄石 Fa 的 PMD 值与岩石类型亚类有很好的对应关系,但对 3.0~3.4 之间的岩石类型亚类难以确定。普通球粒陨石的橄榄石中 Cr 含量和岩石类型有一定关系^[24]:如果 Cr₂O₃ 平均含量小于 0.2%,且标准偏差小于 0.1,该陨石岩石类型亚类应大于 3.2。其橄榄石 Cr₂O₃ 平均含量为 0.06%,且标准偏差为 0.07,显然,GRV053645 岩石类型亚类应大于 3.2。探针分析显示,该陨石的矿物成分变化很大(图 3),橄榄石 Fa 的 PMD 值为 45.6%,低钙辉石 Fs 的 PMD 值为 64.3%。在热变质过程中,低钙辉石成分平衡能力滞后于橄榄石^[12],因此,划分岩石类型亚类时应先用橄榄石 Fa 的 PMD 值确定岩石亚类。因此将 GRV053645 的岩石类型亚类划为 3.4 型。

4 结 论

(1)GRV053645 属于非平衡型普通球粒陨石,化学群为 L 群,岩石亚类为 3.4 型。该陨石非常原始,是研究太阳星云及其演化历史的理想样品。它经历了较轻的冲击变质和轻微风化,冲击变质程度为 S2,风化等级为 W1。

(2)在划分非平衡型普通球粒陨石化学群时,主要参考 Fe-Ni 合金含量和橄榄石的平均 Fa 值,球粒平均直径也有较好的参考价值。

参考文献 (References):

- [1] 琚宜太, 刘小汉. 格罗夫山地区陨石回收[J]. 极地研究, 2000, 12(2): 137-142.
Jü Yitai, Liu Xiaohan. Meteorites collection in the Grove Mountains[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2000, 12(2): 137-142. (in Chinese with English abstract)
- [2] Lin Y, *et al.* Recovery of 5354 Meteorites in Grove Mountain, Antarctica, by the 22nd Chinese Antarctic Research Expedition[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2006, 41: A107.
- [3] 缪秉魁, 欧阳自远, 林杨挺, 肖龙, 黄定华, 何琦. 我国南极陨石研究的新进展[J]. 地质科技情报, 2008, 27(1): 13-30.
Miao Bingkui, Ouyang Ziyuan, Lin Yangting, Xiao Long, Huang Dinghua, He Qi. The retrospect and prospect on antarctic meteorite research in China[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(1): 13-30. (in Chinese with English abstract)
- [4] 林杨挺, 王道德, 缪秉魁, 欧阳自远, 刘小汉, 琚宜太. 南极格罗夫山陨石 GRV99027: 一个新的火星陨石[J]. 科学通报, 2003, 48(16): 1806-1810.
Lin Yangting, Wang Daode, Miao Bingkui, Ouyang Ziyuan, Liu Xiaohan, Ju Yitai. Antarctic Grove Mountains Meteorite GRV 99027: A new Martian meteorite[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(16): 1806-1810. (in Chinese)
- [5] Miao B, Ouyang Z, Wang D, *et al.* A new Martian meteorite from Antarctica: Grove Mountains (GRV) 020090 [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(5): 1034-1041.
- [6] Lin Y, Wang D, Wang G. A tiny piece of basalt probably from Asteroid 4 Vesta[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(5): 1025-1033.
- [7] 刘焱, 林杨挺, 胡森, 冯璐. GRV051523: 一块新的灶神星陨石[J]. 极地研究, 2008, 20(2): 219-228.
Liu Tao, Lin Yangting, Hu Sen, Feng Lu. GRV 051523: A new HED Meteorite[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2008, 20(2): 219-228. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李世杰. 南极格罗夫山陨石的分类及特殊类型陨石成因研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2009.
Li Shijie. Classification of meteorite collected in Grove Mountains, Antarctic, and the origin of some special type meteorites[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [9] Stöffler D, Keil K, Scott ERD. Shock metamorphism of ordinary chondrites[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1991, 55: 3845-3867.
- [10] Wlotzka FA. Weathering scale for the ordinary chondrites [J]. Meteoritics, 1993, 28: 460
- [11] 李世杰, 王世杰, 刘燊, 付绍洪. Photoshop 软件在普通球粒陨石铁镍合金和陨硫铁含量统计中的应用[A]. 第八届全国空间化学与陨石学学术研讨会论文集[C]. 2006: 71-72.
Li Shijie, Wang Shijie, Liu Shen, Fu Shaohong. The application of Photoshop software to statistics abundance of metallic Fe-Ni and troilite in ordinary chondrites[A]. The symposium of the eighth national space chemistry and meteorite academic seminar[C]. 2006: 71-72. (in Chinese)
- [12] Freer R. Diffusion in silicate minerals and glasses: A data digest and guide to the literature[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1981, 76: 440-454.
- [13] Nagahara H. Evidence for secondary origin of chondrules[J]. Nature, 1981, 292: 135-136.
- [14] Rambaldi E R. Relict grains in chondrules[J]. Nature, 1981, 293: 558-561.
- [15] 缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 周新华. 南极格罗夫山陨石岩石学特征 I: 非平衡 L3 型普通球粒陨石[J]. 极地研究, 2002, 14(4): 276-287.
Miao Bingkui, Lin Yangting, Ouyang Ziyuan, Zhou Xinhua. Petrology of Grove Mountains meteorites I: L3 ordinary chondrites[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2002, 14(4): 276-287. (in Chinese with English abstract)
- [16] Keil K. On the phase composition of meteorites[J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(10): 4055-4061.
- [17] Grossman J N, Rubin A E, *et al.* Properties of chondrules [A]. Tucson A Z. Meteorites and the early solar system [M]. University of Arizona Press, 1988: 619-659.
- [18] 王道德, 刘京发, 李肇辉, 等. 中国陨石导论[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-505.
Wang Daode, Liu Jingfa, Li Zhaohui, *et al.* Introduction to Chinese Meteorites[M]. Beijing: Science Press, 1993: 1-505. (in Chinese)
- [19] Van Schmus W R, Wood J A. A chemical-petrologic classification for the chondrite meteorites [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1967, 31: 747-765.
- [20] Rubin A E. Kamacite and olivine in ordinary chondrites-intergroup and intragroup relationship[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1990, 54: 1217-1232.
- [21] 戴德求, 林杨挺, 王道德, 缪秉魁. 南极格罗夫山 6 块非平衡型普通球粒陨石的矿物-岩石学特征[J]. 矿物学报, 2009, 29(3): 405-412.
Dai Deqiu, Lin Yangting, Wang Daode, Miao Bingkui. The petrography, mineral chemistry of 6 new unequilibrated ordinary chondrites collected from Grove Mountains, Antarctic [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(3): 405-412. (in Chinese with English abstract)
- [22] Sear D W, Grossman J N, *et al.* Measuring metamorphic history of unequilibrated ordinary chondrites[J]. Nature, 1980, 287: 791-795.
- [23] Sear D W, Grossman J N, *et al.* Chemical and physical studies of type 3 chondrites- I: Metamorphism related studies of Antarctic and other type 3 ordinary chondrites[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1982, 46: 2471-2481.
- [24] Grossman J N, Brearley A J. The onset metamorphism in ordinary and carbonaceous chondrites[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2005, 40(1): 87-122.