

研究论文

部分格罗夫山陨石的类型划分及其矿物岩石学特征

李世杰¹ 王世杰¹ 刘燊¹ 李雄耀¹ 李阳^{1,2} 尚颖丽^{1,2}

¹中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550002;

²中国科学院大学, 北京 100039)

摘要 对99块南极格罗夫山陨石的研究表明这些陨石分别属于普通球粒陨石H群、L群、LL群, 橄辉无球粒陨石和碳质球粒陨石。其中普通球粒陨石H3为1块, H4为23块, H5为9块, H6为8块, L4为2块, L5为21块, L6为31块, LL4和LL6各为1块。GRV 022888为橄榄石-易变辉石无球粒陨石, GRV 023159是1块CV3碳质球粒陨石。这些陨石的冲击程度普遍较高, 冲击程度为S4的普通球粒陨石有15块, GRV 023138中出现了冲击熔融现象, 该陨石的冲击程度为S5, 这些样品为研究小行星早期的冲击作用提供了很好的素材。此外, 这些陨石的风化程度普遍较低, 风化程度为W1的陨石为75块, 未见风化程度高于W4的陨石。

关键词 格罗夫山 南极陨石 普通球粒陨石 CV3 橄辉无球粒陨石

doi:10.3724/SP.J.1084.2013.00369

0 引言

在二十余次南极科学考察过程中, 中国已经收集到万余块陨石, 要让这些陨石在科学研究中得到使用, 对其进行类型划分的基础性工作是不可少的环节。基于此, 在国家科技部基础平台建设项目“南、北极生物和地质标本标准化整理与共享试点”(2005DKA21406)的支持下, 国内多家科研单位参与了南极格罗夫山陨石的类型划分工作, 并先后完成了2436块格罗夫山陨石的国际命名申报。在已经完成类型划分的格罗夫山陨石中, 除绝大多数为普通球粒陨石外, 还有火星陨石、碳质球粒陨石、橄辉无球粒陨石、铁陨石、HED陨石和原始无球粒陨石Winonaite等^[1-8]。本文主要介绍99块格罗夫山陨石的岩石矿物学特征, 希望能对陨石研究有兴趣

的研究人员提供一定帮助。

普通球粒陨石的类型划分主要依据 Van Schmus等^[9]的分类体系, 即化学群和岩石类型。根据金属含量、橄榄石的Fa值和低钙辉石的Fs值, 普通球粒陨石中可分为3个群: H(Fa: 16—20)、L(Fa: 21—26)和LL(Fa: 27—31)^[9]。岩石类型由热变质程度的高低分为3—7五个级别。普通球粒陨石的冲击程度和风化等级分别采用Stöffler等^[10]和Wlotzka等^[11]的标准。Stöffler等^[10]将普通球粒陨石的冲击程度划分为S1—S6等6不同的阶段, S₁阶段陨石未受到冲击作用, S₂—S₆分别代表了由弱至强的不同冲击程度。Wlotzka等^[11]将普通球粒陨石的风化程度由低到高依次划分为W0—W6等7个阶段, W0为新降落未受风化影响, W6为陨石中的硅酸盐被粘土矿物和氧化物大量替代。

碳质球粒陨石的类型划分主要依据 Weisberg

[收稿日期] 2013年4月收到来稿, 2013年7月收到修改稿

[基金项目] 自然科学基金项目(41273080, 41003027)和“南、北极生物和地质标本标准化整理与共享试点(2005DKA21406)资助

[作者简介] 李世杰, 男, 博士, 副研究员, 天体化学专业

[联系作者] 王世杰, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

等人^[12]总结的标准。对一块橄辉无球粒陨石依据王道德和繆秉魁^[13]总结的划分标准进行了类型划分。

1 样品和分析方法

陨石样品由中国极地研究中心提供,在实验中对样品磨制了标准厚度的薄片。在光学显微镜和扫描电子显微镜下对陨石薄片中的矿物、球粒大小、球粒结构、球粒丰度、基质丰度及重结晶程度等进行了细致观察。陨石的风化程度和冲击特征的等级划分也在光学显微镜下完成。陨石的橄辉石和低钙辉石的成分定量测定是在中科院地球化学研究所矿床国家重点实验室的 EPMA-1600 型电子探针上完成的,分析所用加速电压为 25 kV,束流 10 nA,分析标准采用硅酸盐矿物和氧化物,分析结果采用 ZAF 方法校正。每个平衡型陨石分析的橄辉石和低钙辉石颗粒不少于 6 个,非平衡型陨石中的上述两种矿物测定均不少于 12 个。碳质球粒陨石的橄辉石测定了 20 个点,辉石测定了 15 个点。

2 结果和讨论

本次分类的 99 块球粒陨石中有 97 块为普通球粒陨石。它们均具有典型的球粒结构,主要由橄辉石、低钙辉石、铁镍金属、硫化物、斜长石或斜长石质

玻璃以及少量磷酸盐、铬铁矿和钛铁矿等组成。其中 H 群成员 28 块、L 群成员 71 块、LL 群成员仅 1 块,详见表 1。另外两块分别为橄辉无球粒陨石 (GRV 022888) 和碳质球粒陨石 CV3 (GRV 023159)。

2.1 普通球粒陨石 H 群

普通球粒陨石 H 群的橄辉石平均 Fa 值为 16—20,该群在普通球粒陨石中具有最高的 Fe/SiO₂ 和 Fe₀/Fe 比值,这两值均高于 L 和 LL 群。

H3 型

GRV 022923 陨石重 3.47 g,呈不规则球状,大部分熔壳已脱落。该陨石中球粒结构和轮廓清楚,基质透明度差,金属主要分布于基质中,金属模式含量为 3.1 vol%,橄辉石 Fa 的平均值为 17.9 (3.8—22.9),低钙辉石 Fs 的平均值为 16.7 (15.8—17.6),Fa 和 Fs 值的 PMD 值分别为 32.7% 和 4.1%。该陨石橄辉石和辉石颗粒具有波状消光,冲击程度为 S2,约 30%—40% 的金属被氧化,其风化等级为 W2。

H4 型

H4 型陨石有 23 块,具体样品编号见表 1。这些陨石具有如下岩石学特征:球粒结构和轮廓都较清楚、少数球粒中能见到少量玻璃质、基质重结晶较差、次生长石颗粒粒径约 2 μm,橄辉石和低钙辉石成分均一。陨石 GRV 020566 中球粒结构和轮廓非常清楚,但均匀的橄辉石和低钙辉石成分以及低钙钠长石表明该陨石属于 H4 陨石。

表 1 南极格罗夫山 97 块普通球粒陨石的分类
Table 1. The classification of 97 OCs from Grove Mountain, Antarctica

| 陨石名 | Fa/Fs (%) | 类型 | 陨石名 | Fa/Fs (%) | 类型 | 陨石名 | Fa/Fs (%) | 类型 |
|------------|------------|----|------------|------------|----|------------|------------|----|
| GRV 022923 | 17.9 ± 5.8 | H3 | GRV 021889 | 19.7 ± 1.0 | H4 | GRV 020275 | 18.9 ± 0.3 | H5 |
| | 16.7 ± 0.7 | | | 16.9 ± 0.4 | | | 16.8 ± 0.5 | |
| GRV 020067 | 20.1 ± 0.7 | H4 | GRV 022339 | 17.9 ± 0.3 | H4 | GRV 021622 | 19.7 ± 0.1 | H5 |
| | 17.8 ± 1.0 | | | 15.7 ± 0.4 | | | 17.8 ± 0.9 | |
| GRV 020217 | 19.4 ± 0.3 | H4 | GRV 022383 | 19.2 ± 0.7 | H4 | GRV 021808 | 20.1 ± 0.5 | H5 |
| | 16.7 ± 0.3 | | | 16.4 ± 0.4 | | | 17.0 ± 0.3 | |
| GRV 020227 | 19.7 ± 0.9 | H4 | GRV 022595 | 19.0 ± 0.3 | H4 | GRV 021896 | 19.6 ± 0.2 | H5 |
| | 17.8 ± 0.6 | | | 16.4 ± 0.8 | | | 17.9 ± 1.1 | |
| GRV 020249 | 19.6 ± 1.0 | H4 | GRV 022832 | 18.9 ± 0.4 | H4 | GRV 022499 | 19.1 ± 0.8 | H5 |
| | 17.1 ± 0.7 | | | 16.6 ± 0.4 | | | 16.9 ± 0.7 | |
| GRV 020251 | 19.1 ± 0.8 | H4 | GRV 022855 | 19.4 ± 0.4 | H4 | GRV 022900 | 19.7 ± 1.2 | H5 |
| | 17.2 ± 0.9 | | | 17.7 ± 1.2 | | | 17.1 ± 0.7 | |
| GRV 020274 | 19.7 ± 0.6 | H4 | GRV 022938 | 19.8 ± 1.0 | H4 | GRV 022929 | 20.3 ± 0.6 | H5 |
| | 17.1 ± 0.5 | | | 17.1 ± 0.6 | | | 17.4 ± 0.6 | |
| GRV 020566 | 19.2 ± 0.3 | H4 | GRV 022964 | 19.3 ± 0.6 | H4 | GRV 023090 | 19.0 ± 0.4 | H5 |
| | 17.4 ± 1.0 | | | 17.4 ± 0.9 | | | 17.1 ± 0.7 | |

续表

| 陨石名 | Fa/Fs(%) | 类型 | 陨石名 | Fa/Fs(%) | 类型 | 陨石名 | Fa/Fs(%) | 类型 |
|------------|----------------------|----|------------|----------------------|----|------------|----------------------|-----|
| GRV 021690 | 19.2±0.1 16.5±0.2 | H4 | GRV 022971 | 19.0±0.5 17.3±0.7 | H4 | GRV 023096 | 19.2±0.6 16.9±0.7 | H5 |
| GRV 021733 | 19.9±0.5 17.4±0.5 | H4 | GRV 023114 | 18.8±0.3 16.4±0.7 | H4 | GRV 021520 | 21.1±0.3 18.2±0.3 | H6 |
| GRV 021829 | 19.5±0.2 17.2±0.4 | H4 | GRV 023151 | 19.3±0.2 16.6±0.4 | H4 | GRV 021601 | 20.5±0.2 17.9±0.1 | H6 |
| GRV 021840 | 20.5±1.3 17.6±0.4 | H4 | GRV 023163 | 19.7±0.5 17.6±1.1 | H4 | GRV 021953 | 19.5±0.4 17.2±0.3 | H6 |
| GRV 022245 | 19.9±1.2 18.4±1.7 | H6 | GRV 021933 | 26.4±0.6 22.9±1.2 | L5 | GRV 023784 | 26.2±0.7 22.0±0.3 | L5 |
| GRV 022527 | 19.2±0.4 16.8±0.5 | H6 | GRV 021982 | 26.0±0.3 23.2±1.0 | L5 | GRV 024016 | 25.4±0.3 21.3±0.5 | L5 |
| GRV 022942 | 19.2±0.3 16.7±0.5 | H6 | GRV 022011 | 25.0±0.6 21.3±0.8 | L5 | GRV 020141 | 26.3±1.3 22.4±1.1 | L6 |
| GRV 023284 | 20.6±0.4 17.8±0.5 | H6 | GRV 022215 | 25.8±0.4 23.0±1.0 | L5 | GRV 020183 | 26.0±0.6 21.8±0.8 | L6 |
| GRV 024129 | 20.8±0.2 18.1±0.4 | H6 | GRV 022255 | 26.3±0.6 21.9±0.6 | L5 | GRV 020323 | 25.7±0.6 21.4±0.3 | L6 |
| GRV 020303 | 26.1±0.5 22.1±0.6 | L4 | GRV 022369 | 25.6±0.5 21.1±0.3 | L5 | GRV 021184 | 25.5±0.1 22.1±0.7 | L6 |
| GRV 023138 | 24.5±0.4 21.1±0.4 | L4 | GRV 022390 | 25.0±0.5 21.2±0.4 | L5 | GRV 021497 | 26.8±0.4 22.2±0.4 | L6 |
| GRV 020293 | 25.4±0.2 21.6±0.4 | L5 | GRV 022416 | 25.6±0.4 21.7±0.9 | L5 | GRV 021588 | 26.8±0.4 22.4±0.3 | L6 |
| GRV 020327 | 26.0±0.2 21.9±0.2 | L5 | GRV 022612 | 25.7±0.5 21.1±0.6 | L5 | GRV 021634 | 26.3±0.6 22.3±0.6 | L6 |
| GRV 020581 | 25.9±0.4 21.7±0.2 | L5 | GRV 022633 | 25.5±1.1 21.3±0.5 | L5 | GRV 021636 | 25.9±0.4 22.6±0.6 | L6 |
| GRV 020809 | 25.8±0.4 21.3±0.6 | L5 | GRV 022784 | 25.6±0.4 21.1±0.5 | L5 | GRV 021698 | 26.2±0.3 22.6±1.4 | L6 |
| GRV 021189 | 26.2±0.2 21.7±0.3 | L5 | GRV 023312 | 26.3±0.7 22.9±0.3 | L5 | GRV 021772 | 26.1±0.4 22.1±0.6 | L6 |
| GRV 021837 | 25.1±0.5 21.4±0.7 | L5 | GRV 023563 | 25.5±0.5 21.7±0.6 | L5 | GRV 021957 | 26.8±1.0 22.1±0.6 | L6 |
| GRV 021990 | 27.1±0.6 23.3±1.1 | L6 | GRV 022407 | 25.6±0.6 21.8±1.0 | L6 | GRV 023125 | 25.5±1.2 21.3±0.5 | L6 |
| GRV 022137 | 26.0±0.4 22.5±0.7 | L6 | GRV 022412 | 24.4±0.2 20.6±0.6 | L6 | GRV 023306 | 26.6±2.0 21.8±1.0 | L6 |
| GRV 022180 | 26.0±0.3 22.9±0.7 | L6 | GRV 022435 | 25.7±0.5 21.5±0.9 | L6 | GRV 023779 | 25.4±0.5 21.2±0.4 | L6 |
| GRV 022231 | 26.1±0.4 21.8±0.3 | L6 | GRV 022542 | 25.1±0.3 22.0±1.1 | L6 | GRV 024244 | 25.6±0.4 21.6±0.3 | L6 |
| GRV 022250 | 26.0±1.1 21.1±0.3 | L6 | GRV 022640 | 25.8±0.4 21.4±0.2 | L6 | GRV 022096 | 28.9±1.0 23.6±0.5 | LL4 |
| GRV 022276 | 26.1±0.9 22.1±0.6 | L6 | GRV 022781 | 24.8±0.1 21.3±0.8 | L6 | GRV 022018 | 29.6±0.2 24.1±0.2 | LL6 |
| GRV 022283 | 26.1±0.4 22.4±1.1 | L6 | GRV 022904 | 26.1±0.2 21.9±0.5 | L6 | | | |
| GRV 022319 | 25.2±0.5 21.7±1.0 | L6 | GRV 023101 | 25.7±0.6 22.2±1.0 | L6 | | | |

这23块H4陨石的冲击程度以S1和S2居多,仅GRV 022832与GRV 022964两块陨石的冲击程度为S3,GRV 023114的冲击程度为S4。该类型的陨石中冲击程度没有超过S4的成员。风化程度除一块(GRV 022938)为W3,7块为W2外,其余全为W1。

H5型

H5型陨石共有9块,分别是GRV 020275、021662、021808、021896、022499、022900、022929、023090和023096。这类陨石的共同特征为:球粒结构和轮廓易辨别、基质结晶程度较高,辉石主要以斜方辉石为主,单斜辉石较少,陨石并未受很高的温度影响,鲜有粒径达到50—100 μm 的长石,次生长石粒径多介于2—50 μm 。上述9块陨石中的橄榄石成分比较均匀,但低钙辉石成分明显不及橄榄石均匀,仅GRV 022900橄榄石Fa的PMD值为6.2%。9块H5陨石中未见到冲击程度S4以上的陨石,除GRV 021622的冲击程度为S3,其他陨石均为S1与S2。除两块陨石(GRV 022499与GRV 023090)的风化程度为W2,其余均为W1。

H6型

H6型陨石共有8块,分别是GRV 021520、021601、020953、022254、022527、022942、023284和024129。这些陨石的特征是:球粒结构和轮廓难辨别,基质结晶程度很高、橄榄石和辉石有明显的重结晶,次生长石颗粒大于50 μm ,多数介于50—100 μm 。6型陨石由于热变质温度高,使得矿物化学成分非常均匀。GRV 022245中的金属含量仅为

0.3 vol%,但橄榄石(Fa 20.9)和低钙辉石(Fs 18.4)成分表明它属于H群球粒陨石。这些H6陨石的冲击程度普遍比较低,除陨石GRV 022527为S3,其余的冲击程度均为S1和S2。有4块风化程度为W1,1块风化程度为W2,3块风化程度为W3。

2.2 普通球粒陨石L群

普通球粒陨石L群的橄榄石平均Fa值为21—26,该群在普通球粒陨石中具有中等的 Fe_0/SiO_2 和 Fe_0/Fe 比值。

L4型

L4型普通球粒陨石有2块,分别是GRV 020303与GRV 023138。这2块陨石的特征是:球粒结构和轮廓较为清楚、多数球粒中能观察到玻璃质,基质有一定的重结晶,长石颗粒约2 μm 。GRV 020303的冲击程度为S2,风化程度为W1,GRV 023138的冲击程度较高,冲击脉体广泛发育,局部熔融显著,出现了熔融角砾(图1),该陨石的冲击程度为S5。GRV 020303的风化程度为W1,GRV 023138的风化程度均为W3。这些陨石球粒结构和轮廓可辨,基质结晶程度较高,多数长石颗粒大小为2—50 μm 。GRV 020327和GRV 021189中的冲击脉发育区域由于金属和硫化物共熔体的分异作用形成了硫化物包裹金属的结构(图2a, b)。GRV 023563陨石也有明显的冲击黑化现象。L5陨石的冲击程度普遍较高,其中6块陨石达到S4。两块为S3,其余均为S2。这些陨石的风化程度普遍很低,风化程度为W2和W3的陨石各仅1块。

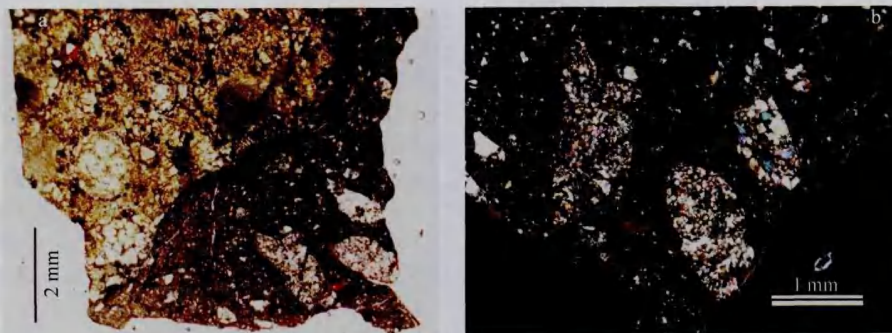


图1 L4陨石GRV 023138薄片的局部透光照片。(a)局部单偏光照片;(b)熔融区的正交光照片

Fig. 1. Photomicrograph of the polished thin section of GRV 023138. (a) Image under plain polarized light; (b) Image under transmitted light, crossed nicols

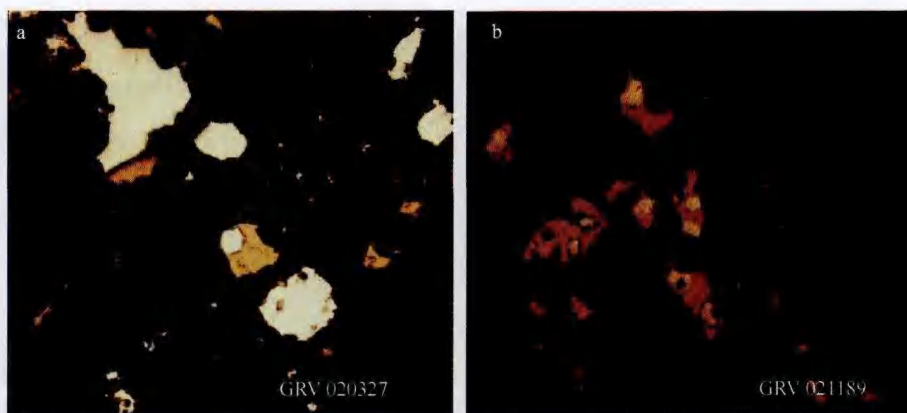


图2 2个L5陨石中的冲击现象的光学显微照片。(a) GRV 020327中受冲击影响的金属和硫化物,亮色为金属,黄色为硫化物(反光照);(b)GRV 021189中冲击区的金属和硫化物,亮黄色为金属,深黄色为硫化物(反光照)

Fig. 2. Shock effect in two L5 chondrites. Reflect light. (a) The assemblage in GRV 020327 formed by shocking. The light color is metal and the yellow is troilite; (b) The assemblage in GRV 021189 formed by shocking. The light yellow is metal and the dark yellow is troilite

L5型

L5型普通球粒陨石共有21块,具体编号和代表性橄榄石和低钙辉石电子探针见附表1。

L6型

L6型陨石共有31块,具体编号和代表性橄榄石、低钙辉石的平均Fa和Fs值见表1。这些陨石中的球粒结构和轮廓难辨,基质重结晶程度高,其他矿物颗粒也有比较明显的重结晶,次生长石颗粒一般大于50 μm。GRV 023306中橄榄石Fa值的PMD值(7.5%)偏高,其他陨石橄榄石的Fa值和低钙辉石的Fs值的PMD值均较低。GRV 022412和GRV 020323中出现了显著地冲击黑化现象。L6陨石的冲击程度较高,8块陨石的冲击程度为S4,6块陨石的冲击程度为S3,17块陨石的冲击程度为S2,未见冲击程度为S1的成员。

2.3 低铁低金属(LL)陨石

普通球粒陨石LL群的橄榄石平均Fa值为27—31,该群在普通球粒陨石中具有最低的Fe/SiO₂和Fe₀/Fe比值。

LL4型

GRV 022096是一块LL4型普通球粒陨石,代表性橄榄石和低钙辉石的平均Fa和Fs值见表1。陨石GRV 022096中球粒结构和轮廓比较清楚,硫化物含量约5 vol%,主要分布在球粒边缘,金属含量非常低,仅为0.3 vol%。冲击程度为S2,风化等级为W1。

LL6型

本次分类中,仅陨石GRV 022018为LL6普通球粒陨石,代表性橄榄石和低钙辉石的平均Fa和Fs值见表1。该陨石球粒结构和轮廓难辨,基质重结晶程度高,次生长石颗粒大于50 μm。橄榄石和低钙辉石组成非常均匀,橄榄石的平均Fa值为29.6,其PMD值为0.8%,低钙辉石的平均Fs值为24.1,Fs的PMD值为1%。金属的含量为0.6 vol%,颗粒普遍较大。硫化物以团块状和细粒状分散分布。该陨石的冲击程度为S3,其风化程度为W1。

2.4 橄辉无球粒陨石 GRV 022888

在已分类的南极格罗夫山陨石中,有10块橄辉无球粒陨石^[6,14]。陨石GRV 022888是中国南极科学考察队2003年在南极格罗夫山收集到的,重0.64 g,大小约0.9 cm×0.9 cm×0.9 cm,局部有黑褐色熔壳,一侧有明显断面(图3a)。为节约样品,本次工作中对该样品仅制作了1个标准厚度的薄片,编号为GRV 022888-2,面积约1.0 mm×0.6 mm。

GRV 022888主要由橄榄石组成(约90 vol%),辉石很少,仅在薄片的边缘见到3个较大颗粒,上述两种矿物颗粒大小在0.5—1.8 mm之间,平均约为1 mm。在单偏光下,陨石薄片整体呈黄褐色,橄榄石颗粒裂隙非常发育,规则和不规则裂隙相互交叉形成网状,裂隙的边部被褐铁矿侵染呈黄色或深褐色。橄榄石颗粒中心透明度高,边缘透明程度差,颗粒间的缝隙常被褐铁矿或不透明物质充填,粒间常

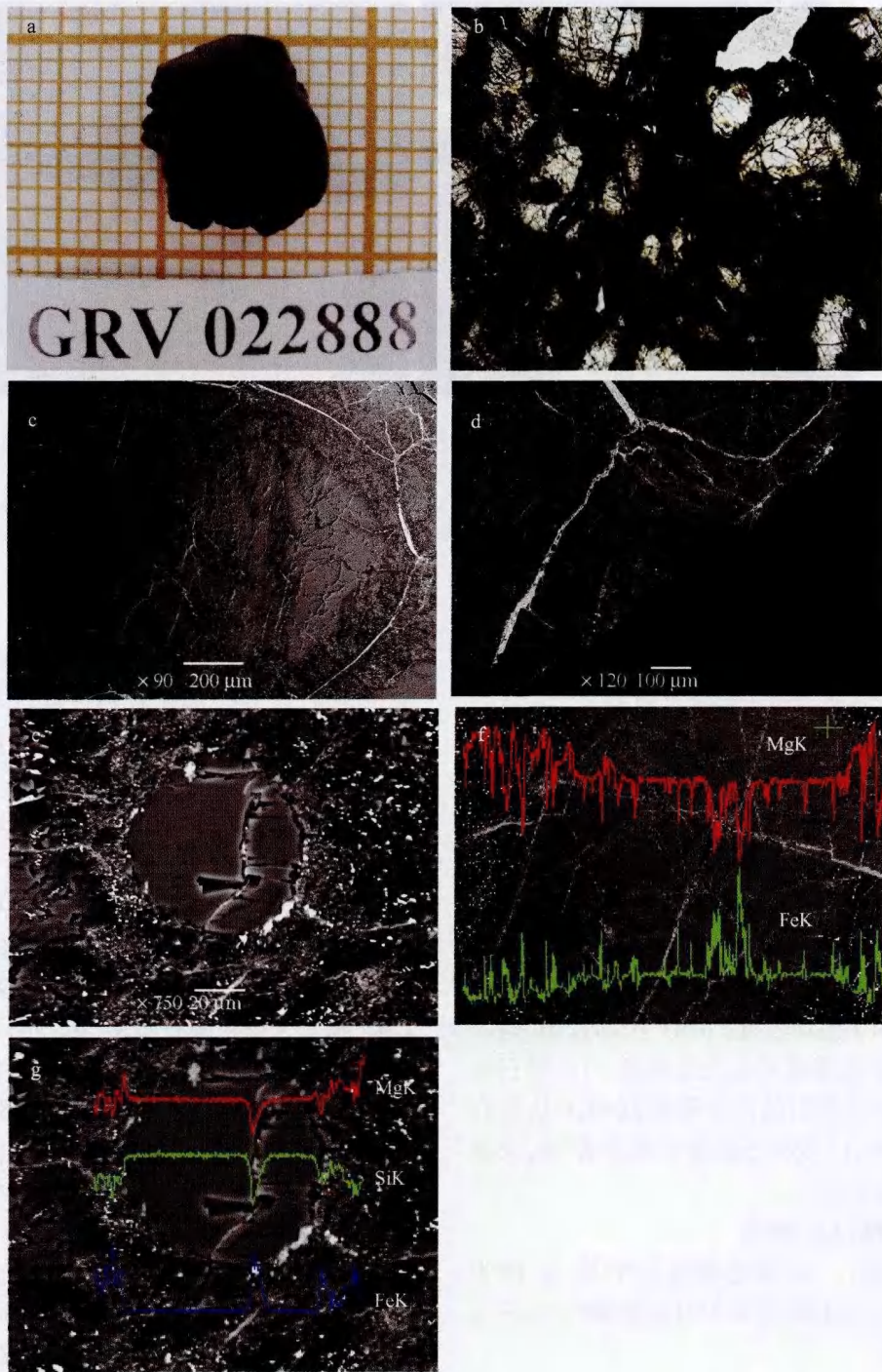


图 3 橄辉无球粒陨石 GRV 022888 的手标本和结构图。(a) 手表本图;(b) 单偏光照片;(c) 具还原边和裂隙的橄榄石颗粒;(d) 易变辉石颗粒;(e) 一球状易变辉石颗粒;(f) 一橄榄石颗粒的 Fe、Mg 元素线扫描(黑线为扫描线);(g) 球粒状易变辉石颗粒的线扫描(黑线为扫描线)

Fig. 3. The picture about GRV 022888. (a) The picture of hand specimen;(b) The structure of GRV 022888. Plain polarized light;(c) A fractured olivine grain with a reductive rim. BSE image;(d) A pigeonite grain. BES image;(e) A spherical pigeonite grain. BES image;(f) The line scan of element Fe and Mg across a olivine grain;(g) The Line Scan of element Fe, Mg and Si across the spherical pigeonite grain

见 120° 的不规则三联点(图 3b)。在正交光下,多数橄榄石颗粒出现波状消光,冲击程度中等。

为了更深入地了解该陨石的结构特征,本文还在扫描电子显微镜下对该陨石进行了观察,橄榄石和辉石的边界多为褐铁矿充填,在橄榄石颗粒中,由冲击导致的裂隙尤为发育,沿着冲击裂隙分布着贫镍金属或褐铁矿(后期风化为褐铁矿),橄榄石和冲击裂隙或暗色细粒物质接触的部位有不同程度的还原现象(图 3c),而在辉石中几乎观察不到被还原的迹象(图 3d)。另外,在该陨石中发现一球粒状辉石颗粒(图 3e),其边缘和细粒填隙物界限非常清晰,内部有一不规则状裂隙且被褐铁矿充填。利用扫描电镜联用的能谱仪对橄榄石和辉石进行了 Fe 和 Mg

元素的线扫描,结果表明橄榄石内部比边缘富 Fe(图 3f),辉石边缘和内部 Fe 和 Mg 元素几乎没有差别(图 3g)。这充分证明了橄辉无球粒陨石在固态下发生了还原反应,以及铁元素在辉石中的扩散速率小于其在橄榄石中的扩散速率^[15]。此处随机分析了 13 个橄榄石颗粒和 6 个辉石颗粒(数据见表 2),橄榄石的 Fa 值为 20.1(11.5—23.0),Fa 值主要集中在 22 附近,而对于两种辉石,其中编号为 1 的小辉石颗粒是在含碳填隙物与橄榄石颗粒的交接处找到的,它很可能是橄榄石被碳质还原的产物^[16]。GRV 022888 主要由橄榄石、易变辉石和富碳填隙物组成,属于橄榄石-易变辉石无球粒陨石。

表 2 南极陨石 GRV 022888 中橄榄石和辉石的电子探针成分分析结果(wt%)

Table 2. Representative electron microprobe analyses of olivine and low-Ca pyroxene in GRV 022888 (wt%)

| 矿物 | 颗粒编号 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Total | Fa/Fs (WO) |
|-----|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|------|------|-------|------------|
| 橄榄石 | 1 | 40.7 | 0.02 | 0.62 | 10.5 | 0.62 | 45.5 | 0.42 | 98.4 | 11.5 |
| | 2 | 39.9 | 0.00 | 0.51 | 17.5 | 0.48 | 39.6 | 0.41 | 98.4 | 19.9 |
| | 3 | 39.6 | 0.00 | 0.43 | 19.9 | 0.44 | 38.0 | 0.40 | 98.7 | 22.7 |
| | 4 | 40.1 | 0.00 | 0.47 | 20.0 | 0.45 | 38.5 | 0.39 | 99.9 | 22.5 |
| | 5 | 39.2 | 0.00 | 0.47 | 19.6 | 0.45 | 38.5 | 0.40 | 98.7 | 22.3 |
| | 6 | 39.2 | 0.00 | 0.43 | 20.3 | 0.49 | 38.7 | 0.40 | 99.5 | 22.7 |
| | 7 | 40.3 | 0.02 | 0.43 | 20.2 | 0.48 | 38.9 | 0.39 | 100.7 | 22.6 |
| | 8 | 40.0 | 0.00 | 0.45 | 19.9 | 0.46 | 37.8 | 0.41 | 99.0 | 22.7 |
| | 9 | 39.5 | 0.00 | 0.48 | 19.6 | 0.43 | 37.8 | 0.44 | 98.3 | 22.6 |
| | 10 | 41.2 | 0.00 | 0.42 | 13.0 | 0.50 | 43.8 | 0.37 | 99.4 | 14.3 |
| | 11 | 39.5 | 0.02 | 0.46 | 20.0 | 0.45 | 37.7 | 0.39 | 98.5 | 23.0 |
| | 12 | 40.9 | 0.01 | 0.59 | 13.0 | 0.71 | 43.8 | 0.41 | 99.4 | 14.3 |
| | 13 | 40.0 | 0.01 | 0.48 | 17.8 | 0.50 | 39.9 | 0.40 | 99.1 | 20.1 |
| 辉石 | 1 | 55.9 | 0.08 | 0.94 | 6.0 | 0.33 | 34.1 | 0.55 | 98.0 | 8.9(1.0) |
| | 2 | 53.3 | 0.70 | 1.26 | 11.2 | 0.50 | 24.9 | 5.15 | 99.9 | 18.1(10.6) |
| | 3 | 54.7 | 0.68 | 1.17 | 11.1 | 0.41 | 24.7 | 5.15 | 100.2 | 18.0(10.7) |
| | 4 | 57.1 | n. m. | n. m. | 11.1 | n. m. | 26.4 | 5.50 | 100.1 | 17.0(10.8) |
| | 5 | 58.5 | n. m. | n. m. | 4.0 | n. m. | 30.3 | 7.10 | 99.9 | 6.0(13.6) |
| | 6 | 57.0 | n. m. | n. m. | 11.0 | n. m. | 26.4 | 5.60 | 100.0 | 16.9(11.0) |

n. m. 表示未测定

2.5 碳质球粒陨石 GRV 023159 (CV3)

CV 球粒陨石的矿物岩石学特征为:(1)具有毫米级大小的球粒,且以斑状球粒为主,成分大多富镁;(2)基质/球粒比值高(0.5—1.2);(3)基质中含有大量次透辉石、钙铁辉石,有时含钙铁榴石矿瘤或岩球;(4)毫米至厘米级的钙铝包体(CAIs)和蠕虫状橄榄石集合体(AOAs),且丰度高;(5)含有 B 型 CAIs^[13]。

GRV 023159 陨石重 1.31 g,大小约为 10 mm ×

10 mm × 16 mm,局部有熔壳残存。球粒直径变化大,70—2 000 μm,平均为 600 μm,主要球粒类型为斑状橄榄石辉石球粒(POP),有少许球粒类型为粒状橄榄石辉石球粒(GOP)。基质主要由细粒富铁橄榄石组成,其丰度高,基质/球粒比为 1.6(图 4a)。该陨石中的 CAIs 含量不高,仅发现 3 个,其中一个结构比较典型(图 4b),球粒中的不透明矿物多为硫化物和氧化物等的集合体。如图 4c,为一椭球状不透明矿物集合体,该集合体主要由镍黄铁矿、含

铬方铁矿和含镍陨硫铁等构成,边缘有磷灰石。

此处对该陨石中的橄榄石和低钙辉石成分进行了电子探针分析,橄榄石成分变化非常大,Fa 值在

2.1—55.6 之间变化,低钙辉石全为顽辉石,Fs 值在 1.1—4.7 之间变化。代表性橄榄石和低钙辉石电子探针成分见表 3。

表 3 GRV 023159 陨石代表性橄榄石和低钙辉石电子探针分析结果 (wt%)

Table 3. Representative electron microprobe analyses of olivine and low-Ca pyroxene in GRV 023159 (wt%)

| | n | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Total | Fa/Fs/mol% | PMD/% |
|-----|----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|
| ol | 20 | 39.0±3.9 | 0.34±0.41 | 0.22±0.16 | 18.6±17.4 | 0.14±0.08 | 40.9±13.9 | 0.18±0.16 | 99.4±1.2 | 22.0±22.1 | 100.2 |
| pyx | 15 | 59.3±0.5 | 0.61±0.23 | 0.59±0.16 | 1.7±0.7 | 0.16±0.12 | 37.4±0.6 | 0.36±0.18 | 100.2±0.5 | 2.5±1.1 | 42.1 |

除 PMD 值外,其它测定或计算值均以平均值±标准偏差表示;n 为所分析的点数

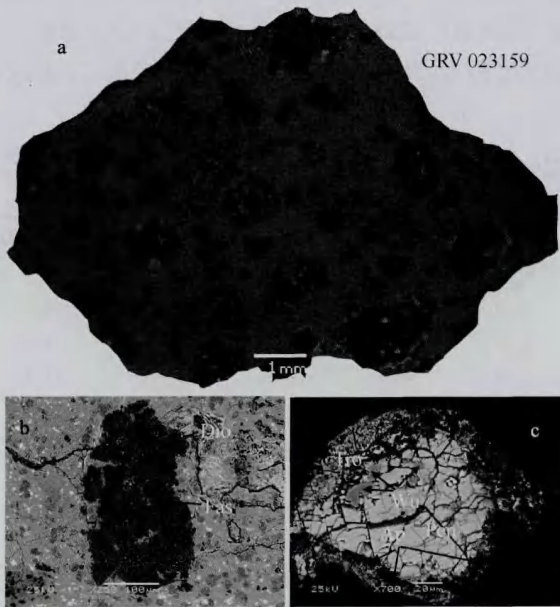


图 4 CV3 球粒陨石 GRV 023159 的光薄片和矿物集合体结构图像(BSE). (a) 光薄片的全局图像;(b) CAI 包体,中心暗色不规则状集合体,周围亮灰色为富 FeO 基质(Dio 为透辉石,Fas 为深绿辉石);(c) 椭球状不透明矿物集合体(Wu 为方铁矿;Ap 为磷灰石;Pen 为镍黄铁矿;Tro 为陨硫铁)

Fig. 4. The BSE images of the polished thin section and some mineral assemblages of GRV 023159. (a) The BSE image of the polished thin section; (b) A CAI. Irregular dark grain in the middle of the picture is the CAI, the light material around the CAI is matrix. The CAI mainly composed of diopside (dio) and fassaite (fas); (c) An axiolitic opaque mineral assemblage consisting of wüstite (wu), apatite (ap), pentlandite (pen) and troilite (tro)

3 结论

(1) 本次分类的陨石有 1 块为 H3 型、23 块 H4、9 块 H5、8 块 H6、2 块 L4、21 块 L5、31 块 L6、1 块 LL4、1 块 LL6、1 块橄辉无球粒陨石和 1 块碳质球陨石。

(2) 97 块普通球粒陨石的冲击程度:16 块为 S1、53 块为 S2、12 块为 S3、15 块为 S4、1 块 (GRV 023138) 为 S5。很多样品中可以观察到冲击黑化现象,冲击脉体和冲击囊较为发育。

(3) 97 块普通球粒陨石的风化程度普遍较低,75 块风化程度为 W1、15 块风化程度为 W2、7 块的风化程度为 W3。未见更高风化程度的样品。

(4) GRV 022888 是一块橄榄石-易变辉石无球粒陨石。该陨石中的橄榄石具有成分反环带,即中心富铁边缘富镁,而易变辉石中未见到这一现象。在该陨石的富碳填隙物中发现一球粒状易变辉石颗粒。

(5) 陨石 GRV 023159 是一块 CV3 碳质球粒陨石,多数球粒类型为 POP,少数为 GOP,该陨石中 CAIs 含量低,橄榄石中 FeO 含量变化大 (Fa 2.1—55.6),低钙辉石基本为富 Mg 辉石。

致谢 样品的信息和数据由中国极地研究中心和中国南北极数据中心建设的“极地标本资源共享平台 (<http://birds.chinare.org.cn/>)”提供。本文在实验中得到刘秀明、周国富、刘世荣和郑文勤老师的帮助。在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 缪秉魁,欧阳自远,林杨挺,等. 我国南极陨石研究的新进展. 地质科学情报, 2008, 27(1): 13—19.
- 2 林杨挺,王道德,缪秉魁,等. 南极格罗夫山陨石 GRV99027: 一个新的火星陨石. 科学通报, 2003, 48(16): 1806—1810.

- 3 Miao B K, Ouyang Z Y, Wang D D, et al. A new martian meteorite from Antarctica: Grove Mountains (GRV) 020090. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5): 1034—1041.
- 4 Lin Y T, Wang D D, Wang G Q. A tiny piece of basalt probably from Asteroid 4 Vesta. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5): 1025—1033.
- 5 刘焱, 林杨挺, 胡森, 等. G RV051523: 一块新的灶神星陨石. *极地研究*, 2008, 20(2): 219—228.
- 6 缪秉魁, 林杨挺, 王桂琴, 等. 南极格罗夫山新发现的橄辉无球粒陨石岩石学与矿物化学. *自然科学进展*, 2008, 18(3): 269—278.
- 7 Zhang A C, Guan Y B, Hsu W B, et al. Origin of a metamorphosed lithic clast in CM chondrite Grove Mountains 021536. *Meteoritics & Planetary Science*, 2010, 45(2): 238—245.
- 8 Li S J, Wang S J, Bao H M, et al. The Antarctic achondrite, Grove Mountains 021663; an olivine-rich winonaite. *Meteoritics & Planetary Science*, 2011, 46(9): 1329—1344.
- 9 van Schmus W R, Wood J A. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1967, 31(5): 747—765, IN7—IN10, 755—785.
- 10 Stöffler D, Keil K, Scott E R D. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(12): 3845—3867.
- 11 Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 1993, 28(2): 460—460.
- 12 Weisberg M K, McCoy T J, Krot A N. Systematics and evaluation of meteorite classification // Lauretta D S, McSween H Y Jr. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson: University of Arizona Press, 2006.
- 13 王道德, 缪秉魁. 橄辉无球粒陨石的矿物-岩石学特征及其分类. *极地研究*, 2007, 19(2): 139—150.
- 14 梁英, 王鹤年, 徐伟彪, 等. 南极 GRV 021788 橄辉无球粒陨石的岩石学和矿物学特征. *地球化学*, 2006, 35(1): 19—26.
- 15 Huebner J S, Nord G L. Assessment of diffusion in pyroxenes: What we do and do not know. *Lunar and Planetary Science XIII*, 1981: 479—481.
- 16 Goodrich C A. Ureilites: A critical review. *Meteoritics*, 1992, 27(4): 327—352.

PETROGRAPHY, MINERAL CHEMISTRY AND CLASSIFICATION OF SOME GROVE MOUNTAINS METEORITES

Li Shijie¹, Wang Shijie¹, Liu Shen¹, Li Xiongyao¹, Li Yang^{1,2}, Shang Yingli^{1,2}

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

²University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract

The study of 99 meteorites that were collected from the Grove Mountains, Antarctica, indicates that these meteorites belong to ordinary chondrite groups H, L, and LL, Ureilite and carbonaceous chondrite. Among these meteorites, 97 are ordinary chondrites, including 1 H3, 23 H4, 9 H5, 8 H6, 2 L4, 21 L5, 31 L6, 1 LL4 and 1 LL6. Two other meteorites are olivine-pigeonite ureilite (GRV 022888) and CV3 carbonaceous chondrite (GRV 023159). Some of these meteorites experienced a high degree shock, and in fact 16 members were heavily shocked samples (15 S4 and 1 S5). These heavily shocked meteorites are favorable samples for the study of early shock history of asteroids. The weathering degree of these meteorites is slight, and shock effects are shown in all types but the S6. These meteorites experienced only weak weathering.

Key words Grove Mountains, Antarctic meteorite, ordinary chondrite, CV3, Ureilite