

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*

缪秉魁^{1,2**} 林杨挺² 王桂琴³ 王道德³ 欧阳自远⁴

1. 桂林工学院资源与环境工程系, 桂林 541004; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈构造演化国家重点实验室, 北京 100029;
3. 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, 广州 510640;
4. 中国科学院国家天文台, 探月工程地面应用系统总体部, 北京 100012

摘要 介绍南极格罗夫山地区新发现的二块橄辉无球粒陨石的岩石学特征和矿物化学。GRV 021512 陨石具有典型的橄辉无球粒陨石结构, 主要由橄榄石(48.3%)、易变辉石(9.4%)和富碳质填隙物(38.1%)组成。而 GRV 022931 为碎裂斑状结构, 橄榄石(19.1%)和易变辉石(14.1%)呈斑晶状分布于富碳质填隙物和蚀变产物(66.3%)中。二块陨石的粗粒橄榄石和易变辉石都具有均匀的核部成分, 其成分富 FeO, 落在橄榄石—易变辉石橄辉无球粒陨石的富铁的亚群(I型)中。所有橄榄石沿颗粒边缘和裂隙表现出还原边结构。在富碳质填隙物中石墨呈不规则块状或脉状产出, 其中有大量细小的金刚石与之共生。此外, 还讨论了二块陨石的岩石成因和金刚石成因。

关键词 陨石 无球粒陨石 橄辉无球粒陨石 金刚石 南极

橄辉无球粒陨石(ureilite)是富含碳质的超基性岩石, 其中最常见的是由粗粒橄榄石和易变辉石组成的橄榄石—易变辉石型橄辉无球粒陨石^[1]。有些橄辉无球粒陨石还出现普通辉石, 这些陨石则被称为含普通辉石的橄辉无球粒陨石(augite-bearing ureilites)^[2, 3]。另外, 还有少数橄辉无球粒陨石还包含其他矿物和岩屑(常见斜长石), 它们被划分为复矿岩质橄辉无球粒陨石(polymict ureilites)^[4-7]。根据橄榄石和易变辉石中的 FeO 含量, 最常见的橄辉无球粒陨石可以进一步划分为三个亚群^[8]。橄辉无球粒陨石的一个重要特征是含有典型的富碳质填隙物, 其矿物组成是细粒镁橄榄石和顽辉石、碳质(为石墨、金刚石和无定形碳等多型)。另一显著特征是粗粒结构橄榄石具有还原边, 即在橄榄石颗粒边缘为贫 FeO 环带, 而且含有许多还原形成的贫 Ni 金属颗粒^[9, 10]。

作为无球粒陨石, 橄辉无球粒陨石具有许多“火成”特征, 如粗粒岩浆结晶结构、高度分异的亲石元素(富集 Sc, V, Mg, Cr, Mn, 亏损 Al 和 Na)^[11, 12] 和中稀土严重亏损的“V”型稀土模式^[11, 13]。然而, 橄辉无球粒陨石也表现出和碳质球粒陨石一样的“原始”特征。其中, 橄辉无球粒陨石的氧同位素成分落在碳质球粒陨石的无水矿物(CCAM)线上^[14]。这条成分线被认为是太阳星云和/或者星际成分的混合^[15, 16]。另一些“原始”特征则是高丰度的碳质含量、行星型稀有气体^[17, 18]和亲铁元素的丰度相对高而且未分异^[19-21]。

橄辉无球粒陨石的成因可以分为两大类:(i)超基性火成堆晶和(ii)部分熔融残留。堆晶模式的有利证据是橄辉无球粒陨石中的粗粒结构硅酸盐矿物的面理和线理结构^[9, 22]。Goodrich等^[23]提出了多阶段的堆晶模式, 认为橄辉无球粒陨石是多阶段部分

2007-07-25 收稿, 2007-09-02 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-110)、国家自然科学基金(批准号: 40473037, 40673055)和中国博士后科学基金(No. 2005037110)联合资助

** E-mail: miaobk@glite.edu.cn; miaobk@mail.igcas.ac.cn

熔融的熔体结晶后堆晶而成的。重稀有气体(HREE)配分模式、Eu异常、Mn/Mg比值和超球粒陨石的Ca/Al比值等支持了这种模式。总的来说,“火成”和“原始”特征共存与熔融残留模式更为相符吻合^[24, 25]。关于橄辉无球粒陨石的另一个重要争议是关于金刚石的成因。普遍认为金刚石是经过高压冲击由石墨转变而来的^[26]。然而,C,N和稀有气体同位素成分的分析并不利于金刚石的冲击模式^[27, 28]。它的另一可能的成因是化学气体沉淀而成的(CVD)^[29]。

2002/2003年中国第19次南极科学考察队在格罗夫山地区收集了4448块陨石样品。在其中51块代表性样品的分类工作中,我们对其中二块橄辉无球粒陨石进行了岩石学和矿物成分研究,本文对这两块橄辉无球粒陨石的岩石矿物学研究结果进行了阐述和介绍。

1 样品和实验

GRV 021512 陨石样品呈半球形,大小为40 mm×44 mm×65 mm,重量为143.42 g。样品表面熔壳大部分已脱落。熔壳脱落处或破裂面上被风化成褐色。GRV 022931 是一块完全没有熔壳的小碎块(1.24 g, 11 mm×15 mm),已严重风化,整个样品成深褐色。本次工作的样品,GRV 022931 是劈分下来的,而GRV 021512 则是切下来的。值得一提的是,GRV 021512 在金刚石刀片切割过程中表现出特别强的韧性,这是橄辉无球粒陨石中含有金刚石颗粒的缘故。薄片制作是样品先注胶,然后切成薄片,再磨制成光薄片。岩石矿物现象观察是在光学显微镜透反光和电子探针的背散射电子图像下(中国科学院广州地球化学研究所的JEOL JXA-8100)完成的。矿物和富碳质填隙物的模式含量是利用背散射电子图像进行统计的。矿物定量成分是在中山大学测试中心的JXA-8100R型电子探针仪上完成的,分析过程的加速电压15 kV和束流20 nA。用自然和合成矿物作为标样。分析数据采用Bence-Albee方法校正。Raman光谱是在中国科学院广州地球化学研究所的显微激光Raman光谱仪(Renishaw RM2000)上完成的,采用波长为785 nm的Renishaw半导体激光器,束斑为1 μm,为增加信噪比收谱时间定为20 s。

2 观察和分析结果

2.1 岩石学特征

2.1.1 GRV 021512 GRV 021512—2 薄片样品大小14 mm×18 mm。薄片上可见一小片熔壳(5.4×0.3—0.5 mm)。GRV 021512 具有典型的单矿岩质橄辉无球粒陨石结构,它主要由粗粒结构的橄辉石(48.3 vol%)、易变辉石(9.4 vol%)和细粒的富碳填隙物(38.1 vol%)组成(图1(a))。橄辉石和易变辉石颗粒大小约为0.3—2.5 mm之间,最大可达3.5 mm。易变辉石分布不均匀,主要分布在薄片样品的边部,这可能与样品制作位置有关。粗粒结构橄辉石和易变辉石的形态为它形,在颗粒之间常可以见到120°的三联点(图1(e))。所有橄辉石颗粒都具有20—30 μm宽的还原边,还原边为贫FeO的富镁橄辉石,并含有大量细粒的贫Ni金属和硫化物颗粒。易变辉石没有明显的还原边特征。富碳质填隙物具有两种不同的矿物集合体(图1(a), (c)),其中大部分(86.5%)是细粒结构的镁橄辉石、顽辉石、低Ni金属和硫化物的集合体,另一部分(13.5%)是片状或脉状(大小约为0.1 mm×0.1 mm至0.3 mm×0.7 mm之间)的碳质多型。石墨在反光下呈黑色,不同于正常的石墨,不具有金属光泽。在石墨中,通过Raman光谱发现了许多细小的金刚石颗粒(图2),其大小约3—10 μm,自形至它形,总是与石墨共生,分布在石墨体之中(图3(a))。少量石墨晶体或者脉穿插至橄辉石和易变辉石颗粒之中。陨石GRV 021512 之中的橄辉石和易变辉石颗粒较为破碎,在正交偏光镜下,呈现波状消光。少数颗粒呈现面理破裂现象。褐铁矿主要呈脉状(10—30 μm宽)分布在粗粒结构硅酸盐颗粒之间,它主要为金属和硫化物的风化产物。

2.1.2 GRV 022931 GRV 022931—2 陨石薄片样品大小为4 mm×8 mm,没有熔壳,具有碎裂斑状结构。粗粒结构橄辉石(19.1 vol%)和易变辉石(14.1 vol%)呈斑状分布在富碳质填隙物中(66.3 vol%)(图1(b))。橄辉石和易变辉石颗粒的外形非常不规则,具有港湾状边缘(图1(d))。橄辉石颗粒与GRV 021512 一样具有相似的还原边特征,

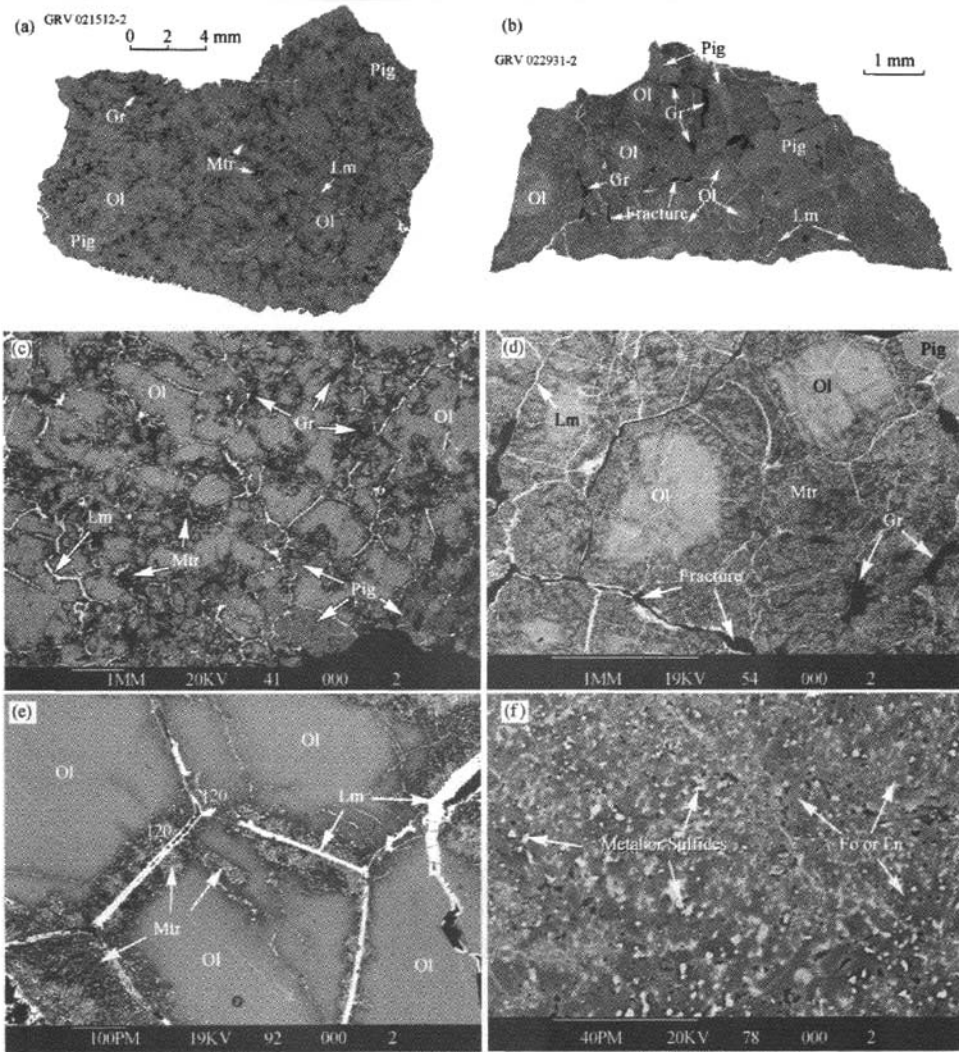


图1 橄辉无球粒陨石的背散射电子图像(BSE)

(a) GRV 021512 陨石的薄片拼图, 该陨石由粗粒橄榄石(Ol)和易变辉石(Pig)组成, 其间充填有富碳质填隙物(Mtr). 注意碳质多型集合体(Gr)主要呈脉状或囊状产于橄榄石和易变辉石颗粒之间, 或者在橄榄石晶体内部. 亮灰色脉为铁质风化形成的褐铁矿脉(Lm); (b) GRV 022931 陨石的薄片拼图, 具有与 GRV 021512 陨石相似的矿物组合, 但是它的富碳填隙物丰度明显高得多; (c) GRV 021512 陨石内部结构, 图中表现出粗粒硅酸盐矿物颗粒与富碳填隙物之间的相互关系. 注意橄榄石颗粒具有弧形或港湾状边缘; (d) GRV 022931 陨石的内部结构, 粗粒橄榄石和易变辉石呈似斑状分布于富碳填隙物和还原产物中, 橄榄石颗粒边缘呈溶蚀状, 另外一些暗色富碳质脉穿插于晶体中; (e) GRV 021512 陨石的还原边结构和三联点结构, 在橄榄石颗粒边缘从中心向外, 灰度逐渐降低, 表明因还原作用其 FeO 含量逐渐降低. 亮白色细小颗粒为不透明矿物(贫 Ni 金属和硫化物), 大部分已风化; (f) GRV 022931 陨石的富碳填隙物和蚀变产物, 主要由细粒的镁橄榄石和顽辉石组成. 除金属和硫化物(亮白色)外, 细粒硅酸盐矿物为镁橄榄石(Fo)和顽辉石(En)(这里未作区分)

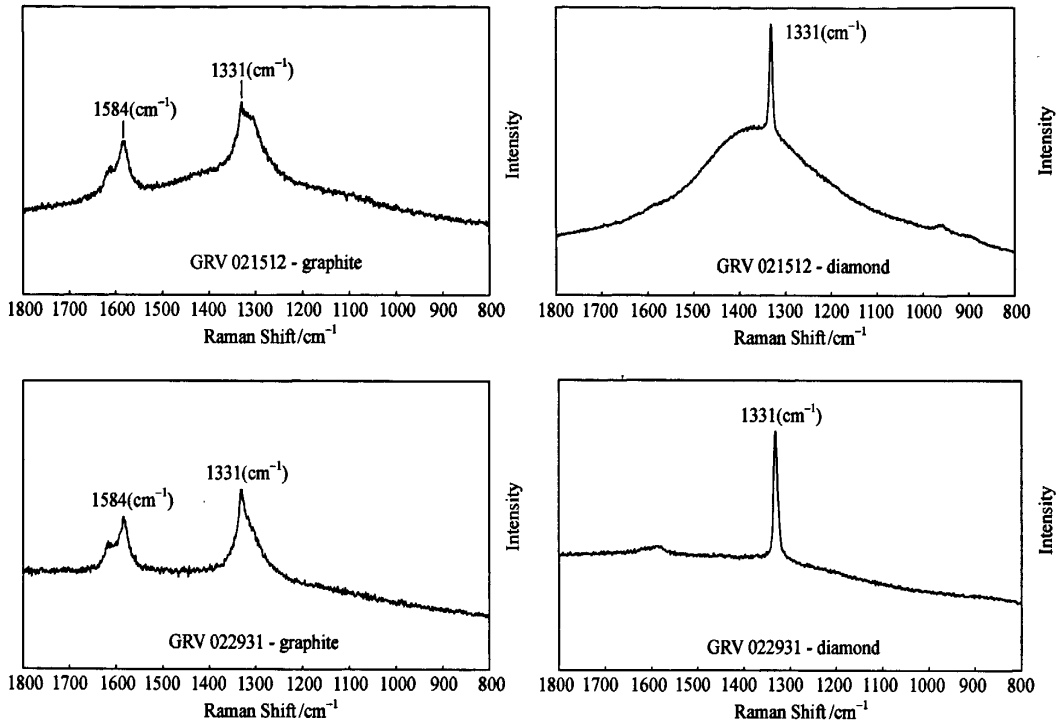


图2 GRV 021512 和 022931 陨石中石墨和金刚石的 Raman 光谱图
 金刚石在 1331 cm^{-1} 出现单一强峰, 而石墨具有 1331 cm^{-1} 和 1584 cm^{-1} 位置的双峰

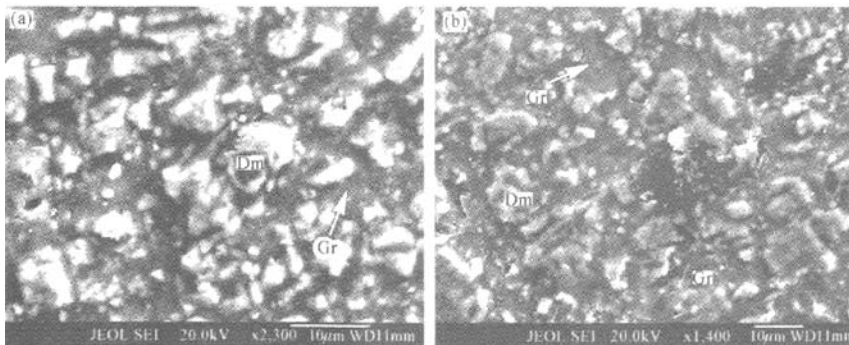


图3 石墨(Gr)和金刚石(Dm)的二次电子图像

(a) GRV 021512; (b) GRV 022931. 金刚石(Dm)呈半自形到自形粒状分布于石墨(Gr)中(低突起)

但是还原边要比 GRV 021512 宽得多, 约 $100\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 而且, 沿橄榄石的裂隙也发育还原边。易变辉石几乎没有还原边。它的富碳质填隙物(图 1(b), (d))也与 GRV 021512 相似, 主要为细粒的镁橄榄石、顽辉石和不透明矿物(贫 Ni 金属和硫化物)的

集合体(图 1(f))和少量片状和脉状的碳质多型(图 1(b), (d))。在这些石墨脉中也有许多细小($1\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$)的自形至它形金刚石颗粒(图 3(b))。石墨和金刚石都经过激光 Raman 光谱的确定(图 2)。与 GRV 021512 一样, 橄榄石和辉石都破碎严重, 并

具有波状消光. 风化产物主要是褐铁矿, 它主要沿裂隙分布(图1(b)).

3 矿物化学

3.1 橄榄石

两块陨石的粗粒橄榄石都具有均匀的核部成分, 它们的 Fo 值也比较接近 (GRV 021512: $Fo_{79.6 \pm 0.2}$; GRV 022931: $Fo_{78.8 \pm 0.8}$). 同时, 两者橄榄石还原边的 Fo 值也相近, GRV 021512 和 GRV 022931 中还原边的最大 Fo 值分别可达 93.4 mol% 和 92.9 mol% (图4). 这些橄榄石的成分都特别富 Cr_2O_3 和 CaO, 其 Cr_2O_3 和 CaO 值分别是 GRV 021512 (0.46 wt%—0.87 wt% Cr_2O_3 , 0.11 wt%—0.46 wt% CaO) 和 GRV 022931 (0.59 wt%—2.11 wt% Cr_2O_3 , 0.31 wt%—0.70 wt% CaO). 其他微量元素主要是 MnO (GRV 021512: 0.40 wt%—0.59 wt%, GRV 022931: 0.43 wt%—0.63 wt%). 如不考虑 FeO 含量的剖面变化, 这些微量元素从核部到边部几乎是相等的, 但是在 GRV 022931 中还原边的 Cr_2O_3 和 MnO 含量略为高于核部(图5). 橄榄石的电子探针成分范围列于表1.

图7(a)中 Fe/Mn 和 Fe/Mg 比值表现出线性关

系, 说明橄榄石环带中 FeO 含量变化是由于还原作用形成的. 两块陨石的图中显示了几乎稳定的 Mg/Mn 比值(157). Fe/Cr 比值也与 Fe/Mg 比值成正相关关系, 其 Mg/Cr 值为稳定的原子比(125) (图7(b)). 而富碳质填隙物中细粒橄榄石与上述粗粒橄榄石颗粒形成鲜明的反差, 其成分贫 FeO, Fo 值为 $Fo_{96.0-98.0}$. 然而, 微量元素 CaO, MnO 和 Cr_2O_3 与粗粒橄榄石的相似(图5).

3.2 辉石

这两块陨石中粗粒结构的易变辉石在量和微量元素成分上都很均匀, GRV 021512 和 GRV 022931 的易变辉石的平均成分分别是 $En_{74.5 \pm 0.3} Wo_{8.0 \pm 0.2} Fs_{17.5 \pm 0.2}$ 和 $En_{71.7 \pm 0.3} Wo_{10.4 \pm 0.2} Fs_{17.9 \pm 0.2}$. 它们的 Cr_2O_3 含量分别是 1.04 wt%—1.22 wt% 和 1.09 wt%—1.18 wt%. 此外, 微量元素成分是 Al_2O_3 (GRV 021512: 0.67 wt%—0.80 wt%, GRV 022931: 0.66 wt%—0.69 wt%), MnO (GRV 021512: 0.39 wt%—0.51 wt%, GRV 022931: 0.44 wt%—0.47 wt%) 和 CaO (GRV 021512: 3.70 wt%—4.16 wt%, GRV 022931: 5.06 wt%—5.21 wt%) (图6).

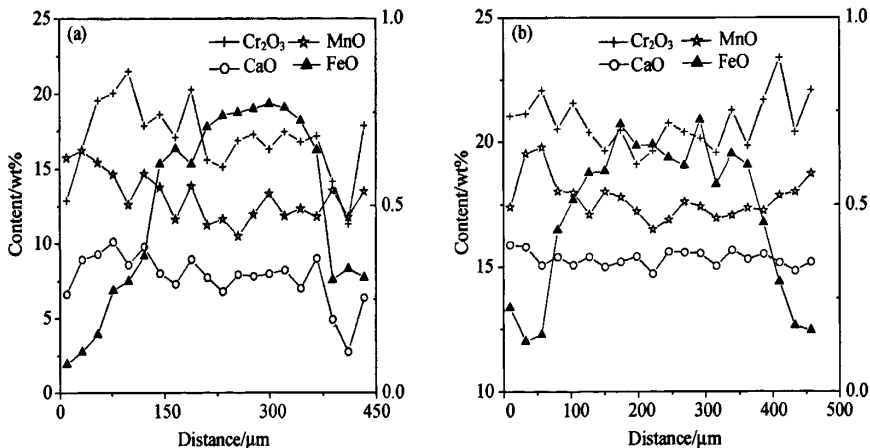


图4 橄榄石的电子探针(EPMA)成分剖面

(a) GRV 021512 和 (b) GRV 022931. 橄榄石具有成分反环带结构, 即一个成分均匀的核部和 FeO 含量逐渐降低的边. 但是, 微量元素成分 CaO, MnO 和 Cr_2O_3 则相对均匀

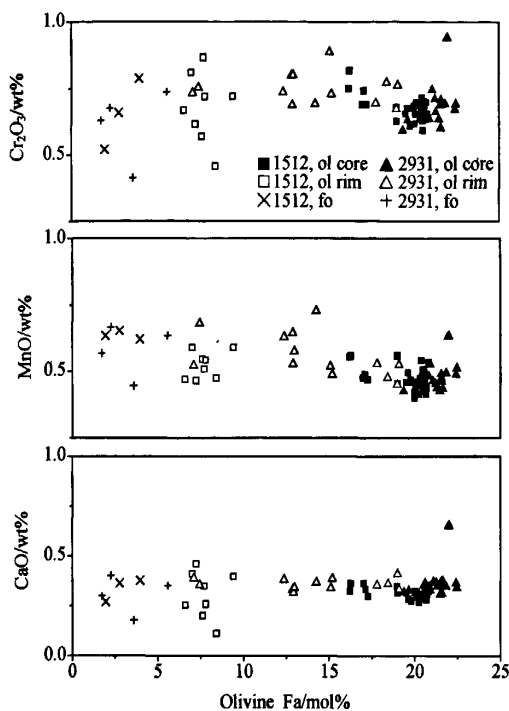


图5 橄辉无球粒陨石中橄榄石的成分分布图
如不考虑铁橄榄石(Fa)含量,其他微量元素成分基本上是均匀的.注意,还原边和填隙物中的镁橄榄石的成分是连续的,而且在GRV 021512和022931中也难区分

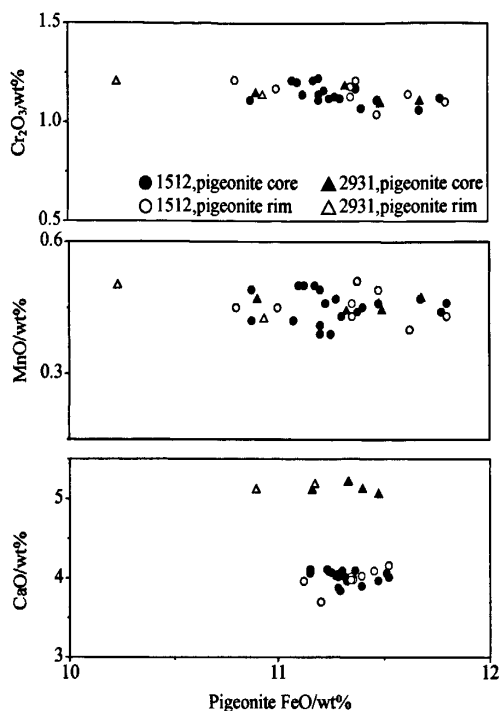


图6 橄辉无球粒陨石中易变辉石成分分布图
注意在GRV 021512和022931中二者成分均匀而又相近,后者的CaO含量相对高一些

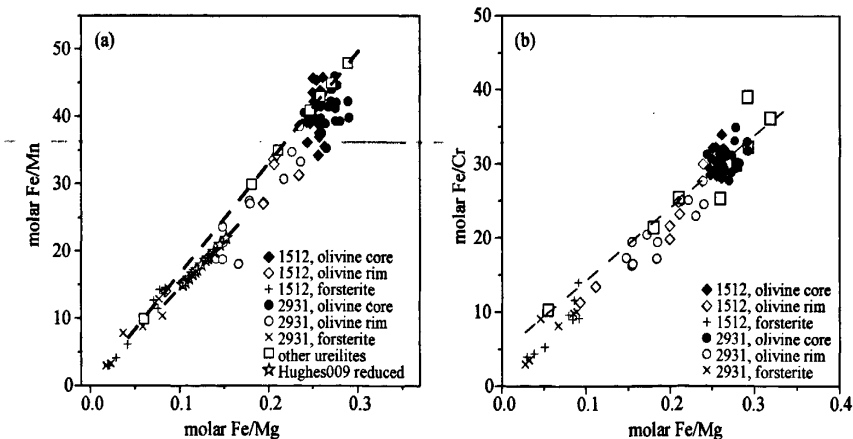


图7 GRV 021512和022931陨石Fe/Mn-Fe/Mg和Fe/Cr-Fe/Mg,关系图
(a) Fe/Mn-Fe/Mg,两者具有线性关系;(b) Fe/Cr-Fe/Mg,也表现出线性相关性

表 1 GRV 021512 和 022931 的橄榄石和辉石成分(wt%)^{a)}

| | GRV 021512 | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|-------|
| | 粗粒橄榄石 | | | | 填隙橄榄石 | | | | 粗粒易变辉石 | | | | 填隙顽辉石 |
| | 核部 | | 边部 | | 核部 | | 边部 | | 核部 | | 边部 | | 成分范围 |
| SiO ₂ | 39.2±0.3 | 38.8-39.6 | 40.6±1.1 | 39.1-43.1 | 41.1±0.3 | 40.9-41.5 | 55.0±0.3 | 54.4-55.4 | 55.2±0.3 | 54.7-55.6 | 52.7-55.1 | | |
| TiO ₂ | 0.01 | <0.04 | 0.01 | <0.05 | 0.01 | <0.01 | 0.05±0.03 | <0.10 | 0.05±0.03 | 0.02-0.08 | 0.01-0.02 | | |
| Al ₂ O ₃ | 0.03 | <0.08 | 0.03 | <0.10 | 0.02 | <0.04 | 0.74±0.03 | 0.69-0.80 | 0.73±0.04 | 0.67-0.78 | 0.06-0.15 | | |
| Cr ₂ O ₃ | 0.67±0.03 | 0.59-0.74 | 0.69±0.11 | 0.46-0.87 | 0.66±0.13 | 0.52-0.79 | 1.14±0.05 | 1.06-1.22 | 1.15±0.06 | 1.04-1.21 | 0.44-0.48 | | |
| FeO | 18.8±0.6 | 16.2-19.3 | 11.4±4.8 | 6.05-18.8 | 2.85±0.99 | 1.93-3.90 | 11.3±0.1 | 11.1-11.5 | 11.3±0.1 | 11.1-11.5 | 4.86-4.99 | | |
| MnO | 0.46±0.04 | 0.40-0.56 | 0.51±0.05 | 0.44-0.59 | 0.64±0.02 | 0.62-0.65 | 0.45±0.04 | 0.39-0.50 | 0.45±0.03 | 0.40-0.51 | 0.43-0.48 | | |
| MgO | 41.7±0.6 | 41.0-4.2 | 47.2±3.5 | 42.0-51.2 | 53.2±0.6 | 52.6-53.7 | 27.0±0.3 | 26.0-27.3 | 27.1±0.2 | 26.9-27.3 | 37.3-38.5 | | |
| CaO | 0.31±0.02 | 0.27-0.35 | 0.31±0.09 | 0.11-0.46 | 0.34±0.06 | 0.27-0.38 | 4.02±0.08 | 3.84-4.11 | 3.99±0.13 | 3.70-4.16 | 0.41-0.51 | | |
| Na ₂ O | | | | | | | 0.12±0.04 | 0.01-0.22 | 0.12±0.07 | 0.01-0.21 | 0.01-0.04 | | |
| K ₂ O | | | | | | | 0.00 | <0.01 | 0.00 | <0.02 | 0.00-0.01 | | |
| Fa | 20.2±0.8 | 17.1-20.8 | 12.0±5.2 | 6.60-20.1 | 2.92±1.0 | 1.97-3.99 | | | | | | | |
| Fo | 79.8±0.8 | 79.2-82.9 | 88.0±5.2 | 79.9-93.4 | 97.1±1.0 | 96.0-98.0 | | | | | | | |
| En | | | | | | | 74.5±0.3 | 73.8-74.9 | 74.6±0.4 | 74.3-75.4 | 92.3-92.6 | | |
| Wo | | | | | | | 7.96±0.16 | 7.61-8.20 | 7.9±0.3 | 7.32-8.13 | 0.71-0.91 | | |
| Fs | | | | | | | 17.5±0.2 | 17.2-18.0 | 17.5±0.2 | 17.2-17.6 | 6.73-6.76 | | |
| Anal. points | 26 | | 14 | | 3 | | 19 | | 8 | | 2 | | |

| | GRV 022931 | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------|-----------|----|--|
| | 粗粒橄榄石 | | | | 填隙镁橄榄石 | | | | 粗粒易变辉石 | | | |
| | 核部 | | 边部 | | 核部 | | 边部 | | 核部 | | 边部 | |
| SiO ₂ | 38.4±0.4 | 37.1-38.9 | 39.1±1.0 | 37.6-40.8 | 41.2±0.7 | 40.4-42.0 | 54.2±0.2 | 53.9-54.4 | 54.4 | 54.2-54.5 | | |
| TiO ₂ | 0.01 | <0.05 | 0.00 | <0.02 | 0.01 | <0.02 | 0.06±0.02 | 0.04-0.09 | 0.05 | 0.02-0.08 | | |
| Al ₂ O ₃ | 0.03 | <0.06 | 0.03 | <0.09 | 0.03 | <0.06 | 0.68±0.01 | 0.66-0.69 | 0.69 | 0.69 | | |
| Cr ₂ O ₃ | 0.67±0.04 | 0.59-0.75 | 0.85±0.36 | 0.67-2.11 | 0.61±0.14 | 0.41-0.74 | 1.13±0.04 | 1.09-1.18 | 1.17 | 1.13-1.20 | | |
| FeO | 19.4±0.8 | 17.6-20.9 | 13.8±3.6 | 6.80-19.3 | 3.29±1.75 | 1.74-5.65 | 11.3±0.1 | 11.2-11.5 | 11.1 | 10.9-11.2 | | |
| MnO | 0.47±0.03 | 0.43-0.53 | 0.56±0.08 | 0.45-0.73 | 0.58±0.10 | 0.45-0.67 | 0.46±0.02 | 0.44-0.47 | 0.46 | 0.42-0.50 | | |
| MgO | 40.5±0.6 | 39.6±42.0 | 44.7±3.4 | 38.5-49.8 | 53.7±0.7 | 53.1-54.7 | 25.4±0.2 | 25.3-25.6 | 25.7 | 25.5-25.9 | | |
| CaO | 0.35±0.02 | 0.31-0.38 | 0.40±0.11 | 0.32-0.70 | 0.31±0.10 | 0.18-0.40 | 5.12±0.06 | 5.06-5.21 | 5.15 | 5.11-5.18 | | |
| Na ₂ O | | | | | | | 0.06±0.01 | 0.05-0.07 | 0.07 | 0.05-0.09 | | |
| K ₂ O | | | | | | | 0.00 | 0.00 | <0.01 | 0.00-0.01 | | |
| Fa | 21.2±0.8 | 19.4-22.5 | 14.9±4.2 | 7.12-22.0 | 3.31±1.72 | 1.75-5.60 | | | | | | |
| Fo | 78.8±0.8 | 77.5-80.6 | 85.1±4.2 | 78.0-92.9 | 96.7±1.7 | 94.4-98.3 | | | | | | |
| En | | | | | | | 71.7±0.3 | 71.44-72.1 | | 72.2-72.3 | | |
| Wo | | | | | | | 10.4±0.2 | 10.2-10.6 | | 10.40 | | |
| Fs | | | | | | | 17.9±0.2 | 17.7-18.1 | | 17.3-17.5 | | |
| Anal. points | 17 | | 15 | | 4 | | 4 | | 2 | | | |

a) 平均值±σ; 斜体数值; 成分范围; 空白, 为未分析

GRV 021512 陨石中富碳填隙物中细粒辉石是顽辉石 ($\text{En}_{92.3-92.6} \text{Wo}_{0.7-0.9} \text{Fs}_{6.7-6.8}$), 相对于粗粒易变辉石, 它的 Al_2O_3 (0.06 wt%—0.15 wt%) 和 Cr_2O_3 (0.44 wt%—0.48 wt%) 含量较低, 但是, 它的 MnO 含量是 0.43 wt%—0.48 wt%, 落在粗粒结构易变辉石的成分范围内。

4 讨论

4.1 类型划分

陨石 GRV 021512 具有典型的橄辉无球粒陨石结构, 主要由粗粒结构的橄榄石和易变辉石组成, 颗粒之间常见 120° 的三联点结构。而陨石 GRV 022931 只见残留的粗粒结构橄榄石和易变辉石斑晶, 它们分布在富碳填隙物和还原产物中, 颗粒之间没有出现类似 GRV 021512 中见到的三联点现象, 这可能是由于强烈的还原作用造成的。这两个陨石中均未见到普通辉石和其他岩屑, 在岩性上, 它们与单矿岩质橄辉无球粒陨石一致。另外, 粗粒结构橄榄石和易变辉石的核部成分非常均一, 橄榄石的 CaO 和 Cr_2O_3 的含量非常高。尽管 GRV 021512 和 GRV 022931 两块陨石的富碳填隙物和还原产物的模式含量差异非常大, 但是它们的矿物组合是相同的, 由细粒的镁橄榄石、顽辉石、贫 Ni 金属、硫化物和不同的碳质多型组成。这两块陨石的富碳填隙物和还原产物产状与典型橄辉无球粒陨石是一致的, 即橄榄石—易变辉石型橄辉无球粒陨石。此外, 橄辉无球粒陨石的一个重要特征是橄榄石出现还原边。二块陨石的橄榄石沿颗粒边缘均出现强烈的还原边, GRV 022931 陨石中橄榄石沿裂隙中也被强烈还原形成了还原边。

如图 7 所示, 两块陨石橄榄石具有相同的 Mg/Mn 比值, 这与其他单矿岩质橄辉无球粒陨石也相吻合。GRV 021512 和 022931 陨石的橄榄石均富 FeO, 它们的 FeO 含量落在橄榄石—易变辉石橄辉无球粒陨石中最富 FeO 的类型(I型)中^[8, 30]。因此, 上述特征充分证明了 GRV 021512 和 GRV 022931 陨石是 I 型橄辉无球粒陨石。另外, 金刚石与石墨共生表明它们经历了强烈的冲击变质作用。然而, 根据橄榄石的冲击变质特征, 即大部分仅出现不规则破裂和波状消光, 仅少数颗粒出现面理破裂, 表明两块陨石的冲击程度较低, 属于 S2/S3^[31]。

4.2 单个陨石还是成对陨石?

几乎相同的矿物成分和非常相近的发现位置(相距 18 km), GRV 021512 和 GRV 022931 两块陨石似乎可能成对, 也就是说, 它们是同一陨石降落事件的碎块。然而, 根据岩石结构特征的差异完全可以排除这种可能性。首先, GRV 022931 陨石的富碳填隙物和蚀变产物模式含量 (66.3 vol%) 比 GRV 021512 的 (38.1 vol%) 要高得多。事实上, GRV 022931 的富碳填隙物和蚀变产物丰度非常高, 以致粗粒结构橄榄石和易变辉石颗粒完全被其孤立(图 1(b), (d))。相反, GRV 021512 陨石粗粒橄榄石和易变辉石颗粒之间大部分保留了 120° 的三联点结构(图 1(e))。其次, GRV 022931 的橄榄石还原边比 GRV 021512 橄榄石的还原边要宽得多(图 4), 而且, 前者的橄榄石还原边常常沿裂隙穿入橄榄石的晶体之中。这些岩石矿物学特征差异表明 GRV 022931 所经历的还原作用比 GRV 021512 所经历的要强得多。再次, GRV 022931 陨石的易变辉石/橄榄石的模式含量比 (0.74) 也远比 GRV 021512 的 (0.19) 高。这些岩石特征差异不可能是因为制样过程中的取样偏差造成, 而是源于它们是来自橄辉无球粒陨石母体中的不同位置的原因。因此, 它们不是成对陨石。

4.3 陨石成因

关于橄辉无球粒陨石的成因问题一直存在争议。一些学者认为橄辉无球粒陨石是从贫斜长石的岩浆中经过堆晶作用形成的^[9]。相反, 更多人则坚持橄辉无球粒陨石, 特别是橄榄石—易变辉石型的橄辉无球粒陨石, 是部分熔融残留产物, 而且其熔体为母体经历了 15% 以上的熔融迁移^[25]。我们的观察也支持了这种熔融残留模式。两块陨石富碳填隙物的出现与堆晶成因模式不相吻合, 特别是 GRV 022931 陨石中富碳填隙物丰度非常高, 难以用岩浆堆晶模式解释。而且, 粗粒橄榄石的还原边结构说明了还原作用发生在亚固相状态, 与之相符的是残留成因, 而不是堆晶作用。

Singletary 和 Grove^[25] 根据与橄辉无球粒陨石相平衡的熔体成分实验结果提出了矿物温度计, 据此, 我们计算了两块陨石的形成温度。根据他们提出的表达和公式计算, GRV 021512 和 022931 两块

陨石的形成温度分别是 1229°C 和 1217°C。

在母体部分熔融和熔体迁出后, GRV 021512 和 GRV 022931 经历亚固相还原作用, 即橄榄石中的 FeO 组分与碳质反应形成贫 Ni 金属。还原作用的强度可能与碳质的含量有关, 因为 GRV 021512 和 022931 陨石的橄榄石矿物成分几乎相同。但 GRV 022931 陨石被还原的橄榄石比 GRV 021512 陨石的要高得多, 这与前一块陨石非常高的富碳填隙物是吻合的。

关于橄榄无球粒陨石中的金刚石的成因, 其中一种可能的成因是化学气体沉淀(CVD)^[29], 这显然支持了 Rai 等^[27, 28] 提出金刚石的非冲击成因模式, 其依据是 C, N 和稀有气体的同位素成分。然而, 在这些陨石中发现金刚石与石墨紧密共生, 则与 Bishoff 和 Goodrich 等的金刚石冲击成因相符^[26]。尽管在少数橄榄无球粒陨石中金刚石颗粒呈链状分布, 但是, 这两块陨石中金刚石均具有均匀分散分布, 也与大部分的含金刚石的橄榄无球粒陨石是相似的。但是, 二块陨石的橄榄石的冲击变质效应比其他橄榄无球粒陨石的要明显弱, 仅 S2/S3^[26]。这两块陨石中橄榄石和易变辉石缺乏强烈的冲击变质效应, 可能与主要冲击事件后母体经历了热退变质作用。这种强烈的热退变质作用也可能与橄榄无球粒陨石的特征还原作用有关。值得注意的是, GRV 022931 陨石还原边沿橄榄石的裂隙发育, 表明热变质作用晚于冲击事件。

5 结论

GRV 021512 和 022931 两块陨石均被划分为橄榄石—易变辉石型橄榄无球粒陨石。它们都具有这种特殊类型陨石的典型的特征, 其中包括以粗粒橄榄石和易变辉石为主的矿物组合、矿物颗粒间出现 120° 的三联点结构、橄榄石和易变辉石颗粒核部成分均一、出现大量的包含石墨和金刚石的富碳填隙物和沿橄榄石边缘和裂隙发育的还原边等。这些陨石的粗粒橄榄石和易变辉石都富 FeO, 根据橄榄石和易变辉石中的 FeO 含量, 它们属于橄榄石—易变辉石型橄榄无球粒陨石的 I 型。

尽管 GRV 021512 和 022931 具有几乎相同的矿物成分, 而且它们的发现位置也非常接近, 但是后者的富碳填隙物和蚀变产物丰度比前者要高得多,

表现出比后者更强的还原程度。因此, 可以完全排除它们成对的可能性。

根据矿物温度计的计算, GRV 021512 和 022931 陨石的形成温度分别是 1229°C 和 1217°C。这与其他橄榄石—易变辉石型橄榄无球粒陨石相似。这些陨石高丰度的富碳填隙物和蚀变产物和橄榄石的亚固相还原作用与橄榄无球粒陨石的部分熔融残留模式相符。陨石中石墨和金刚石共生现象说明金刚石是从石墨经冲击转变而成的。但是陨石中的主要硅酸盐矿物缺乏强烈冲击效应, 这可能与在主要冲击事件后母体经历了热退变质作用有关。

致谢 我国第 19 次南极考察队搜集 4448 块陨石, 使我国南极陨石搜集工作取得了重大突破。格罗夫山考察分队的全体队员(璐宜太、李金雁、徐霞兴、缪秉魁、秦翔、俞良军、阎利和张胜凯)为此付出了艰辛的劳动。李院生研究员和陈林丽工程师在分样和实验工作中给予了大力帮助。周新华、刘小汉和陶克捷研究员也提供了非常有益的建议。中国极地研究中心提供了研究样品。在此, 一并致谢。

参 考 文 献

- Mittlefehldt WD, McCoy TJ, Goodrich CA, et al. Non-chondritic meteorites from asteroidal bodies. In *Reviews in Mineralogy: Planetary Materials*, 1998, 36: 4-1~4-195
- Goodrich CA, Fioretti AM, Tribaudino M, et al. Primary trapped melt inclusions in olivine in the olivine-augite-orthopyroxene ureilite Hughes 009. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65: 621-652
- Takeda H, Mori H, Ogata H. Mineralogy of augite-bearing ureilites and the origin of their chemical trends. *Meteoritics*, 1989, 24: 73-81
- Prinz M, Weisberg MK, Nehru CE, et al. North Haig and Nilpena; Paired Polymict Ureilites with Angra DOS Reis-Related and Other Clasts. *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*, 1986, 17: 681-682
- Ikeda Y, Prinz M. Magmatic inclusions and felsic clasts in the Dar al Gani 319 polymict ureilite. *Meteoritics and Planetary Science*, 2001, 36: 481-499
- Jaques AL, Fitzgerald MJ. The Nilpena ureilite, an unusual polymict breccia—Implications for origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46: 893-900
- Prinz M, Weisberg MK, Nehru CE, et al. EET 83309, A

- Polymict Ureilite, Recognition of a New Group. Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts, 1987, 18; 802
- 8 Sinha SK, Sack RO, Lipschutz ME. Ureilite meteorites-Equilibrium temperatures and smelting reactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61; 4235
 - 9 Berkley JL, Taylor GJ, Keil K, et al. The nature and origin of ureilites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44; 1579—1597
 - 10 Goodrich CA. Ureilites-A critical review. *Meteoritics*, 1992, 27; 327—352
 - 11 Warren PH, Kallemeyn GW. Geochemistry of polymict ureilite EET83309, and a partially-disruptive impact model for ureilite origin. *Meteoritics*, 1989, 24; 233—246
 - 12 Hintenberger H, Jochum KP, Braun O, et al. The Antarctic meteorite Yamato 74123-A new ureilite. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40; 187—193
 - 13 Guan Y, Crozaz G. Microdistributions and petrogenetic implications of rare earth elements in polymict ureilites. *Meteoritics and Planetary Science*, 2001, 36; 1039—1056
 - 14 Clayton RN, Mayeda TK. Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60; 1999—2017
 - 15 Clayton RN, Grossman L, Mayeda TK. A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites. *Science*, 1973, 182; 485—488
 - 16 Clayton RN. Oxygen isotopes in meteorites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, 21; 115—149
 - 17 Goebel R, Ott U, Begemann F. On trapped noble gases in ureilites. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83; 855—867
 - 18 Wacker JF. Noble gases in the diamond-free ureilite, ALHA 78019-The roles of shock and nebular processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50; 633—642
 - 19 Boynton WV, Starzyk PM, Schmitt RA. Chemical evidence for the genesis of the ureilites, the achondrites Chassigny and the nakhlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, 40; 1439—1447
 - 20 Goodrich CA, Jones JH, Spitz AH. Siderophile element tests of ureilite petrogenesis models. *Meteoritics*, 1987, 22; 392
 - 21 Wasson JT, Chou C-L, Bild RW, et al. Classification of and elemental fractionation among ureilites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, 40; 1449—1458
 - 22 Berkley JL, Jones JH. Primary igneous carbon in ureilites-Petrological implications. *Journal of Geophysical Research Supplement*, 1982, 87; A353—A364
 - 23 Goodrich CA, Jones JH, Berkley JL. Origin and evolution of the ureilite parent magmas-Multi-stage igneous activity on a large parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51; 2255—2273
 - 24 Scott ERD, Taylor GJ, Keil K. Origin of ureilite meteorites and implications for planetary accretion. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20; 415—418
 - 25 Singletary SJ, Grove TL. Early petrologic processes on the ureilite parent body. *Meteoritics and Planetary Science*, 2003, 38; 95—108
 - 26 Bischoff A, Goodrich CA, Grund T. Shock-induced origin of diamonds in ureilites. *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*, 1999, 30; 1100
 - 27 Rai VK, Murty SVS, Ott U. Nitrogen components in ureilites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67; 2213—2237
 - 28 Rai VK, Murty SVS, Ott U. Nitrogen in diamond-free ureilite Allan Hills 78019; Clues to the origin of diamond in ureilites. *Meteoritics and Planetary Science*, 2002, 37; 1045—1055
 - 29 Matsuda JI, Fukunaga K, Ito K. Noble gas studies in vapor-growth diamonds-Comparison with shock-produced diamonds and the origin of diamonds in ureilites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55; 2011—2023
 - 30 Berkley JL, Taylor GJ, Keil K. Ureilites; Origin as related magmatic cumulates. *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*, 1978, 9; 73—75
 - 31 Stoeffler D, Keil K, Scott ERD. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55; 3845—3867

作者: [缪秉魁](#), [林杨挺](#), [王桂琴](#), [王道德](#), [欧阳自远](#)
 作者单位: [缪秉魁\(桂林工学院资源与环境工程系, 桂林, 541004; 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈构造演化国家重点实验室, 北京, 100029\)](#), [林杨挺\(中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈构造演化国家重点实验室, 北京, 100029\)](#), [王桂琴, 王道德\(中国科学院广州地球化学研究所, 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州, 510640\)](#), [欧阳自远\(中国科学院国家天文台, 探月工程地面应用系统总部, 北京, 100012\)](#)

刊名: [自然科学进展](#) **ISTIC** **PKU**
 英文刊名: [PROGRESS IN NATURAL SCIENCE](#)
 年, 卷(期): 2008, 18(3)
 被引用次数: 3次

参考文献(31条)

1. [Jaques AL;Fitzgerald MJ](#) [The Nilpena ureilite, an unusual polymict breccia-Implications for origin](#) 1982
2. [Ikeda Y;Prinz M](#) [Magmatic inclusions and felsic clasts in the Dar al Gani 319 polymict ureilite](#) 2001
3. [Prinz M;Weisberg MK;Nehru CE](#) [North Haig and Nilpena: Paired Polymict Ureilites with Angra DOS Reiss-Related and Other Clasts](#) 1986
4. [Wasson JT;Chou C-L;Bild RW](#) [Classification of and elemental fractionation among ureilites](#) 1976
5. [Goodrich CA;Jones JH;Spitz AH](#) [Siderophile element tests of ureilite petrogenesis models](#) 1987
6. [Boynnton WV;Starzkyk PM;Schmitt RA](#) [Chemical evidence for the genesis of the ureilites, the achondrites Chassigny and the nakhlites](#) 1976
7. [Berkley JL;Taylor GJ;Keil K](#) [The nature and origin of ureilites](#) 1980
8. [Sinha SK;Sack RO;Lipschutz ME](#) [Ureilite meteorites-Equilibration temperatures and smelting reactions](#) 1997
9. [Prinz M;Weisberg MK;Nehru CE](#) [EET 83309, A Polymict Ureilite: Recognition of a New Group](#) 1987
10. [Takeda H;Mori H;Ogata H](#) [Mineralogy of augite-bearing ureilites and the origin of their chemical trends](#) 1989
11. [Goodrich CA;Fioretti AM;Tribaudino M](#) [Primary trapped melt inclusions in olivine in the olivine-augite-orthopyroxene ureilite Hughes 009](#)[外文期刊] 2001(4)
12. [Stoeffler D;Keil K;Scott ERD](#) [Shock metamorphism of ordinary chondrites](#)[外文期刊] 1991
13. [Berkley JL;Taylor GJ;Keil K](#) [Ureilites: Origin as related magmatic cumulates](#) 1978
14. [Matsuda JI;Fukunaga K;Ito K](#) [Noble gas studies in vaporgrowth diamonds-Comparison with shock-produced diamonds and the origin of diamonds in ureilites](#) 1991
15. [Rai VK;Murty SVS;Ott U](#) [Nitrogen in diamond-free ureilite Allan Hills 78019: Clues to the origin of diamond in ureilites](#)[外文期刊] 2002(8)
16. [Rai VK;Murty SVS;Ott U](#) [Nitrogen components in ureilites](#)[外文期刊] 2003(12)
17. [Bischoff A;Goodrich CA;Grund T](#) [Shock-induced origin of diamonds in ureilites](#) 1999
18. [Singletary SJ;Grove TL](#) [Early petrologic processes on the ureilite parent body](#) 2003
19. [Scott ERD;Taylor GJ;Keil K](#) [Origin of ureilite meteorites and implications for planetary accretion](#)

1993

20. Goodrich CA;Jones JH;Berkely JL Origin and evolution of the ureilite parent magmas-Multi-stage igneous activity on a large parent body 1987
21. Berkley JL;Jones JH Primary igneous carbon in ureilites-Petrological implications 1982
22. Wacker JF Noble gases in the diamond-free ureilite,ALHA 78019-The roles of shock and nebular processes 1986
23. Goebel R;Ott U;Begemann F On trapped noble gases in ureilites 1978
24. Clayton RN Oxygen isotopes in meteorites 1993
25. Clayton RN;Orossman L;Mayeda TK A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites 1973
26. Clayton RN;Mayeda TK Oxygen isotope studies of achondrites[外文期刊] 1996(11)
27. Guan Y;Croazaz G Microdistributions and petrogenetic implications of rare earth elements in polymict ureilites 2001
28. Hintenberger H;Jochum KP;Braun O The Antarctic meteorite Yamato 74123-A new ureilite 1978
29. Warren PH;Kallemeyn GW Geochemistry of polymict ureilite EET83309, and a partially-disruptive impact model for ureilite origin 1989
30. Goodrich CA Ureilites-A critical review 1992
31. Mittlefehldt WD;McCoy TJ;Goodrich CA Non-chondritic meteorites from asteroidal bodies 1998

引证文献(4条)

1. 缪秉魁, 林杨挺, 胡森, 沈文杰, 王葆华, 冯璐, 刘焯 东南极格罗夫山陨石 (GRV 052382): 一块强烈冲击变质的橄辉无球粒陨石[期刊论文]-岩石学报 2010(12)
2. 江小英, 王桂琴, 缪秉魁 南极GRV 024237橄辉无球粒陨石的岩石矿物学特征[期刊论文]-极地研究 2010(4)
3. 缪秉魁, 王道德 南极格罗夫山陨石的分类及其研究意义[期刊论文]-极地研究 2008(2)
4. 江小英, 王桂琴, 缪秉魁 南极GRV 024237橄辉无球粒陨石的岩石矿物学特征[期刊论文]-极地研究 2010(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zrkJz200803005.aspx