

东南极格罗夫山隕石 (GRV 052382) : 一块强烈冲击变质的橄辉无球粒隕石*

繆秉魁^{1,2} 林杨挺³ 胡森³ 沈文杰³ 王葆华^{1,2} 冯璐³ 刘焘³

MIAO BingKui^{1,2}, LIN YangTing³, HU Sen³, SHEN WenJie³, WANG BaoHua^{1,2}, FENG Lu³ and LIU Tao³

1. 桂林理工大学 广西地质工程中心重点实验室, 桂林 541004

2. 桂林理工大学 地球科学学院, 桂林 541004

3. 中国科学院地质与地球物理研究所 地球深部重点实验室, 北京 100029

1. Key Laboratory of Geological Engineering Center of Guangxi Province, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

3. Key Laboratory of the Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2009-10-18 收稿, 2010-11-18 改回.

Miao BK, Lin YT, Hu S, Shen WJ, Wang BH, Feng L and Liu T. 2010. Grove Mountains (GRV) 052382, from East Antarctica: Likely a most heavily shocked ureilite. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12):3579–3588

Abstract Grove Mountains (GRV) 052382 is a new highly shocked ureilite found in Grove Mountains, East Antarctica. It is composed mainly of olivine (75%), pigeonite (5%), carbonaceous interstitial (20%) and a little of metal. Olivine is subidiomorphic equigranular texture with the size of 10~20 μm , and there is pyroxene melt among them. Based on the distribution of carbonaceous interstitial and grain boundary, the original outlines of olivine grains can be distinguished, and the size of original olivine grains ranges from 0.5 to 1.5mm. The original grains of olivine have reduction zones, which the fine olivine grains in the rim are rich in MgO, while ones in the core are rich in FeO. Due to strong reduction, the core of the original olivine grains varies greatly in composition ($\text{Fa}_{12.2-21.8}$), so the original olivine should be more than 21.8% in Fa. Pigeonite is round-shaped with size of 0.4~0.9mm, and is almost identical in composition between intergrains ($\text{En}_{76.4-82.6}\text{Wo}_{4.6-9.8}\text{Fs}_{10.9-13.8}$). But it has wave-varied composition caused by strong shock effect in a single grain. The carbonaceous interstitial between the original olivine grain and pigeonite, is composed mainly of carbon and MgO-rich silicate. The main polymorph of carbon is graphite which occurs as amoiboid-shape and/or net, the size is about 0.2~0.4mm. And the other minor polymorph is diamond which embedded in graphite as small grains (1~3 μm). Thus, these petrological characteristics suggest that GRV 052382 has a typical ureilitic texture and is a monomict ureilite. On the basis of the composition of olivine, GRV 052382 is futurally classed into the FeO subtype (type I). Furthermore, the heavily shocked effects, including (1) shocked fine-grained granulitic texture of olivine; (2) the round outline of fine olivine grains and melt interstitial among the fine grains; (3) the wavy variation of composition in pigeonite; (4) a great deal of irregular shaped vesicles in pigeonite; (5) some kamacite filling in fracture and vesicles, (6) transformation of diamond from graphite, indicate that GRV 052382 has the heavily shock stage of S6. Therefore, GRV 052382 is likely a heavily shocked ureilite, which will probably provide some direct evidence of shock history of ureilites and further to get insight on the history of shock events experienced by the ureilite parent body by the later detail study.

Key words Antarctic meteorite; Ureilite; Shock metamorphism; Grove Mountains

摘要 GRV 052382 隕石是在南极格罗夫山地区发现的强烈冲击变质的橄辉无球粒隕石。它主要由橄辉石(75%)、易变质辉石(5%)、富碳填隙物(20%)和少量金属组成。橄辉石呈半自形等粒细晶结构,颗粒大小约10~20 μm ,细晶颗粒间有少量辉石质的熔融填隙物。根据富碳填隙物分布和颗粒间的裂隙,可以区分出原粗粒橄辉石结构的轮廓,原颗粒大小约0.5~1.5mm。这些原粗粒橄辉石具有还原边结构,即边缘的橄辉石细晶富MgO,而核部橄辉石细晶富FeO。因强烈的还原作用,这

* 本文受国家自然科学基金项目(40473037,40673055)和广西高校优秀人才支持计划(RC2007020)联合资助。

第一作者简介: 繆秉魁,男,1966年生,博士,教授,天体化学和地球化学专业, E-mail: miaobk@glite.edu.cn

些原粗粒橄欖石的核部成分变化大($Fa_{12.2-21.8}$),因此,原橄欖石核部成分 Fa 应为 21.8% 或略高。易变辉石呈浑圆粒状,大小约 0.4~0.9mm,在颗粒之间其成分基本相当($En_{76.4-82.6}Wo_{4.6-9.8}Fs_{10.9-13.8}$),但在颗粒内部因冲击作用,产生波浪状韵律成分变化。富碳质填隙物充填在原粗粒橄欖石颗粒之间,主要由碳质和富 MgO 的硅酸盐组成。碳质多型主要为石墨,呈不规则蠕虫状或网脉状,大小约 0.2~0.4mm,其中包含有少量金刚石颗粒(约 1~3 μ m)。因此,这些特征表明 GRV 052382 具有橄辉无球粒陨石结构,为单矿岩质橄辉无球粒陨石。根据橄欖石成分,GRV 052382 陨石被进一步划分为富 FeO 亚型(I 型)。此外,强烈冲击变质特征,即:(1)橄欖石冲击细晶结构;(2)橄欖石细晶颗粒具有圆化特征,其间存在熔融填隙物;(3)易变辉石晶体具有波浪状韵律成分变化;(4)易变辉石中存在大量不规则气孔;(5)金属 Fe 沿裂隙或气孔充填;(6)石墨发生金刚石相变等,表明 GRV 052382 陨石的冲击变质程度为 S6。因此,GRV 052382 陨石可能是经受最强烈冲击变质的橄辉无球粒陨石,这不仅为橄辉无球粒陨石的冲击历史提供直接证据,而且有可能获得其母体早期经历的冲击作用信息。

关键词 南极陨石;橄辉无球粒陨石;冲击变质作用;格罗夫山

中图法分类号 P68

橄辉无球粒陨石富含碳质,缺乏斜长石,具有粗粒岩浆结晶结构,是特殊的原始无球粒陨石(Goodrich, 1992)。岩石结构、矿物化学、全岩亲石元素和 Sm-Nd 同位素表明,它是高度分异的火成岩(Berkley and Jones, 1982; Goodrich *et al.*, 1987, 1991; Torigoye *et al.*, 1994),是类似于类地行星(如火星、地球和月球等)岩浆分异过程的产物,然而碳含量、亲铁元素和氧同位素等特征表明它与碳质球粒陨石有密切的成因关系(Vdovykin, 1970; Clayton, 1993; Scott *et al.*, 1993; Ash *et al.*, 2000; Rai *et al.*, 2003)。橄辉无球粒陨石的“火成”和“原始”的双重特性引起成因上的激烈争议,主要争议焦点是:橄辉无球粒陨石到底是“原始”的还是“火成分异”的?关于“火成分异”的成因观点,前人提出多阶段岩浆演化(Berkley *et al.*, 1976, 1980; Goodrich *et al.*, 1987)、部分熔融残留、部分熔融状态下受碳质球粒陨石冲击(Warren and Kallemeyn, 1988, 1989, 1991)、火山喷发(Warren and Kallemeyn, 1992a, b)等模式。而“原始”的成因观点则有碳质球粒陨石的重结晶(Ringwood, 1960)、小行星或碳质球粒陨石碰撞熔融(Takeda, 1987; Rubin, 1988; Takeda *et al.*, 1988)、星云吸积(Scott *et al.*, 1993)等模式。然而,至今尚未形成被广泛接受的成因模式。大部分橄辉无球粒陨石都遭受不同程度的冲击变质作用,未受到冲击作用的很少,同样受到强烈冲击的样品也非常少见。无论如何,冲击变质作用是橄辉无球粒陨石成因的一个重要环节。

格罗夫山(Grove Mountains)位于东南极伊丽莎白公主地(Elizabeth Land),普立兹湾兰伯特裂谷东岸,北距中山站 450km。该区为冰原岛峰群,由 64 座岛峰群和大面积的蓝冰区组成(刘小汉和琚宜太, 2002; 刘小汉等, 2002)。近十年来,我国在该区的陨石收集工作取得了成功,共收集了一万多块陨石样品(Lin *et al.*, 2006; 琚宜太和缪秉魁, 2005; 缪秉魁等, 2008b)。至今,在已分类的格罗夫山陨石中,除普通球粒陨石外(Lu *et al.*, 2004; 刘建忠等, 2002; 缪秉魁等, 2002a, b, 2003),发现了火星陨石(Lin *et al.*, 2002; Miao *et al.*, 2004)、灶神星(HED 族)陨石(Lin *et al.*, 2004)、橄辉无球粒陨石(梁英等, 2006; 缪秉魁等, 2008a)、铁陨石、石铁陨石、碳质球粒陨石(Dai *et al.*, 2004)等一些特殊类型陨石,

其中橄辉无球粒陨石是我国以往收藏中所缺乏的。目前共发现了 10 块橄辉无球粒陨石(Grossman, 2000; Russell *et al.*, 2002, 2005; Connolly *et al.*, 2006, 2007, 2008; Weisberg *et al.*, 2009a, b),它们均为普通橄辉无球粒陨石,其中 GRV 052382 陨石冲击变质程度最强的。为此,本文介绍该陨石的矿物岩石学特征,并着重讨论其冲击变质特征、冲击程度以及冲击历史。

1 样品与实验

陨石 GRV 052382 呈扁平豆状,近浑圆三角形,具有较完整的黑色熔壳,大小 17×16×7mm,重量 1.86g(图 1)。该陨石样品较新鲜,仅有轻微风化,整体呈黑色,熔壳底部呈浅褐色。本次工作的样品处理过程:先劈分成二半,把其中的一半进行环氧树脂注胶,然后对注胶样品切片,再将切片制作成光薄片。岩石矿物特征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(中国科学院地质与地球物理研究所的 JEOL JXA-8100)完成的。矿物的模式含量是利用显微照片拼图进行统计的。矿物定量成分是采用同一电子探针仪分析的,分析过程的加速电压为 15kV 和束流为 20nA。用自然和合成矿物作标样。分析数据采用 Bence-Albee 方法校正。电子探针成分分析的检测限为 0.01%。

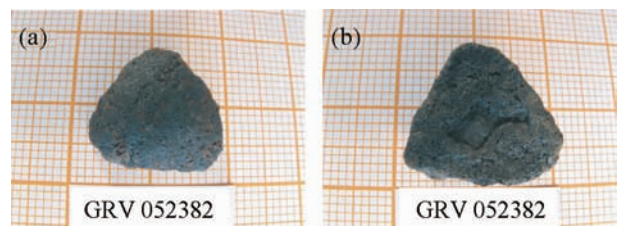


图 1 GRV 052382 陨石样品照片

(a)-上面的熔壳较薄;(b)-底面出现较厚的熔壳堆积

Fig. 1 Photo of the GRV 052382 ureilite

(a)-the fusion crust is thinner on the upper side;(b)-the thicker fusion crust is cumulated on the bottom side

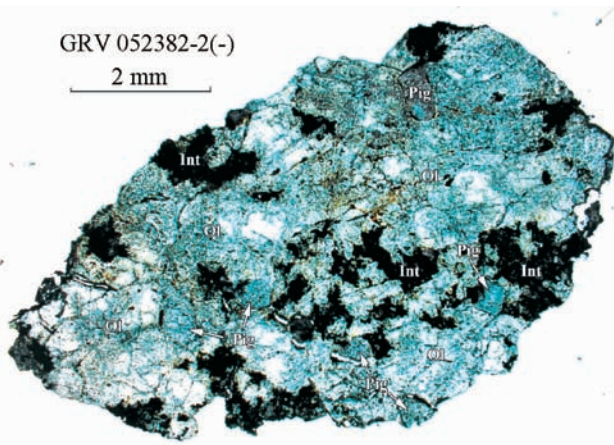


图2 GRV 052382-2 薄片显微照相全貌拼图
Ol-橄榄石;Pig-易变辉石;Int-富碳质不透明填隙物. 单偏光
Fig.2 The mosaic photograph of the thin section of GRV 052382-2
Ol-olivine; Pig-pigeonite; Int-opaque carbonaceous interstitial. Plane-polarized light

2 分析结果

2.1 岩石结构

本次研究工作对象为光薄片 GRV 052382-2,薄片样品面积大小约为 5.4 × 9.2mm。因制样过程的脱落,未见熔壳(图2)。据统计,该陨石的矿物组合是橄榄石(75%)、易变辉石(5%)、碳质(20%)和少量金属。在光学显微镜下,陨石总体结构可分为两部分:透明细粒硅酸盐矿物区(80%)和富碳质不透明暗色区(20%)(图2)。在透明细粒硅酸盐矿物区,矿物组成主要为橄榄石、易变辉石和少量金属颗粒,橄榄石

与易变辉石体积比约为 15 : 1。橄榄石为冲击变质的细晶结构,在正交偏光下,呈马赛克状消光(图3),在高倍扫描电镜 BSE 图像下,橄榄石为细晶结构(图4a, b),呈半自形细晶等粒状,颗粒大小约为 10 ~ 20 μm,在细小橄榄石颗粒之间充填有少量的熔融物(为玻璃质或熔体),此外,在小橄榄石颗粒内或者颗粒之间,还有金属颗粒不均匀分布。根据富碳质的暗色物质分布和颗粒间的裂隙,可以区分原橄榄石粗粒结构轮廓,原颗粒大小约 0.3 ~ 1.2mm。对于原粗粒橄榄石,其边部具有还原边特征,即从核部向边部过渡,橄榄石细晶成分逐步富集 MgO。因还原作用,橄榄石中还分布有少量金属颗粒。另外,在小橄榄石颗粒间还出现了少量气孔,气孔为不规则状,大小一般为 10 ~ 20 μm。另外,橄榄石核部和边部的结构特征存在一定差异(图4):(1)金属数量、颗粒大小以及

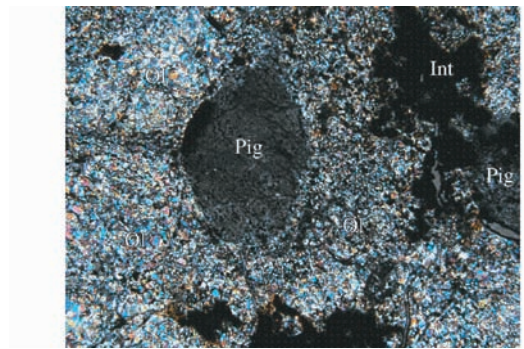


图3 陨石内部结构
Ol,Pig 和 Int 分别代表橄榄石、易变辉石和富碳质填隙物,橄榄石具有特征的细晶结构. 正交偏光,照片幅宽 2.86mm
Fig.3 The interior texture of GRV 052382
Ol, Pig and Int indicate olivine, pigeonite and carbonaceous interstitial representatively. Cross-polarized light, the width of 2.86mm

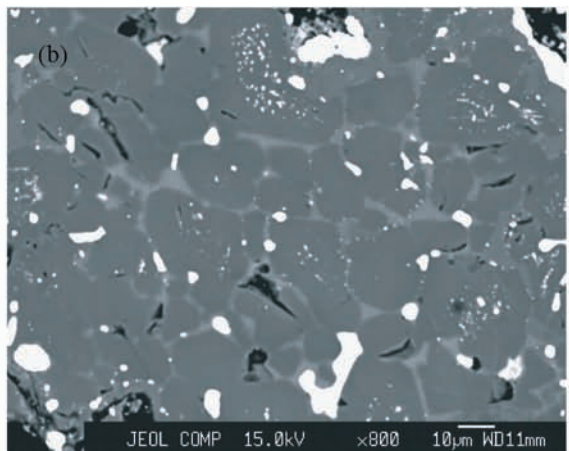
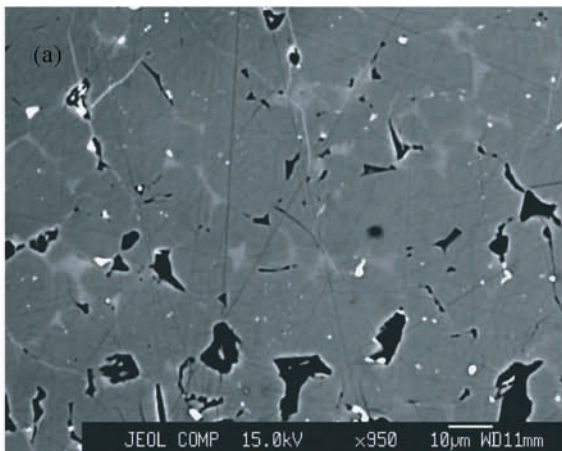


图4 橄榄石细晶结构的背散射电子图片
(a)-在原橄榄石核部;(b)-在原橄榄石边部
Fig.4 The BSE images of fine-grained granular texture of olivine
(a)-the core of the original coarse-grained olivine; (b)-the rim of the original coarse-grained olivine

分布不同,在粗粒橄榄石核部金属含量少、颗粒非常小(一般 $<1\mu\text{m}$),而边部橄榄石中金属含量高、金属颗粒大(一般在 $3\sim 10\mu\text{m}$,个别可达 $20\mu\text{m}$ 以上);(2)橄榄石细晶间的熔融填隙物含量差异,在粗粒橄榄石核部橄榄石细晶间填隙物少,而在边部橄榄石细晶间的填隙物含量高;(3)气孔分布差异,在粗粒橄榄石核部气孔较少,而在边部气孔较多。

在透明硅酸盐矿物区的另一主要矿物是易变辉石,它呈浑圆状,颗粒大小约 $0.3\sim 0.8\text{mm}$,它与橄榄石具有明显的边界,边界处常具有裂隙,内部成分出现似波浪状变化(图5),但在正交偏光下,光性未改变,为单一晶体。在颗粒内部发育有大量不规则状气孔。部分气孔里充填有 FeNi 金属。这些金属颗粒一般比橄榄石核部的金属颗粒大,与橄榄石边缘中的金属颗粒大小相当,一般为 $5\sim 15\mu\text{m}$,少数可达 $30\mu\text{m}$ 。另外,在易变辉石边缘裂隙中也常充填有金属,少数甚至呈长条状。

富碳质暗色区域呈不规则状,分布在透明硅酸盐矿物区之间,暗色区域大小约 $0.5\times 0.5\sim 1\times 1\text{mm}$ 左右(图6)。暗色区的矿物组成主要为碳质多型、富 MgO 硅酸盐矿物(主要是镁橄榄石)和贫 Ni 铁纹石颗粒。该区域与透明矿物区域之间呈明显的接触关系。碳质主要以石墨产出,呈不规则脉状或蠕虫状,反光下,呈灰黑色,光泽暗淡,不同于正常石墨的金属光泽(图6)。石墨中有常有突起高的颗粒,经激光拉曼光谱确定为金刚石(图7)。金刚石呈半自形粒状,大小约 $1\sim 3\mu\text{m}$,在不同石墨颗粒中的分布不均匀。

2.2 矿物成分

2.2.1 橄榄石

代表性橄榄石的电子探针成分列于表1。从表中可以看出,不同粗粒橄榄石的核部成分变化较大,其 Fa 值范围在 $12.2\sim 21.8$ 之间,这主要是因还原作用的影响,如排除还原作用的影响,原橄榄石核部 Fa 值是 21.8 或者略大于该值。此外,粗粒橄榄石颗粒的成分不均匀,从核部到边缘,细晶橄榄石的 Fa 由高向低变化,即具有还原边的特征(图8a),一般边缘富 MgO, Fo 值大于 90 。同时,每个橄榄石子晶的成分也不同程度地存在反环带特征,尤其在粗粒橄榄石边缘的细晶颗粒中环带更为明显。

橄榄石的微量元素成分特征是富含 Cr_2O_3 、MnO 和 CaO。 Cr_2O_3 含量一般在 $0.50\%\sim 0.85\%$ 之间,在橄榄石颗粒的剖面中分布较均匀,除个别数据外,总体在测量误差范围内(图8b);CaO 一般在 $0.17\%\sim 0.56\%$ 之间,在粗粒橄榄石剖面上,总体分布也较均匀,总体数据变化在测量误差范围内(图8c)。 MnO 含量范围在 $0.47\%\sim 0.73\%$ 之间,其含量变化与还原环带有关,即与还原程度(MgO 含量)成正相关(图8d)。此外,橄榄石还含有少量 Al_2O_3 ($0.02\%\sim 0.08\%$), TiO_2 、 K_2O 和 Na_2O 等含量低于检测限。

2.2.2 易变辉石

如 BSE 图像(图5)所示,易变辉石颗粒的内部成分非常

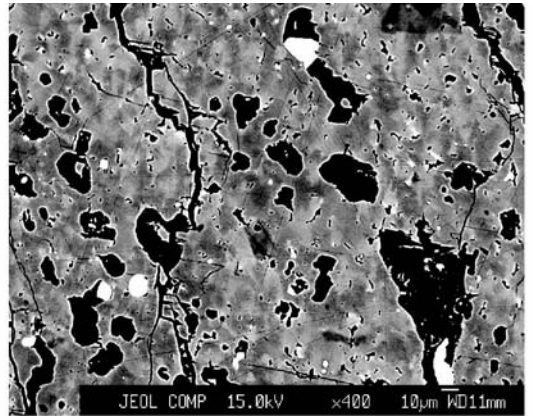


图5 易变辉石内部结构 BSE 图像

Fig. 5 BSE image of the interior of pigeonite

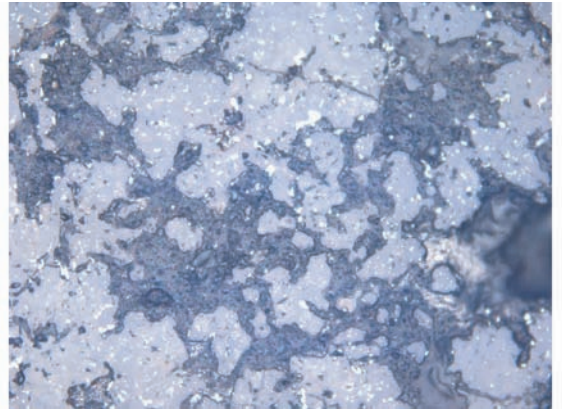


图6 富碳质不透明暗色区结构

碳质(深灰色)、镁橄榄石(亮灰色)、和金属(白色),反光照片,照片幅宽 0.86mm

Fig. 6 The texture of opaque carbonaceous interstitial area Carbon polymorphs (dark grey), forsterite (bright grey), and metal (white), reflected light, the width of 0.86mm

不均匀,出现波浪状韵律变化。从图9中显示,主要元素 FeO、MgO 和 CaO 呈波浪锯齿状分布, MgO 与 FeO 和 CaO 呈反相关关系,即暗色区域 MgO 相对高、CaO 和 FeO 含量相对低,反之,浅色部分 CaO 和 FeO 含量相对高,而 MgO 相对较低。这与图5中的 BSE 图像表现呈波浪状韵律变化是一致的。但是不同于橄榄石,整体粗粒颗粒没有出现典型的还原边结构,即边部与核部没有出现成分系统变化。易变辉石主量成分为 $\text{En}_{76.4-82.6}\text{Wo}_{4.6-9.8}\text{Fs}_{10.9-13.8}$, 数据全部落在易变辉石标准成分范围内。微量元素成分特征是 Cr_2O_3 ($0.81\%\sim 1.14\%$) 和 MnO ($0.37\%\sim 0.52\%$) 含量高,含少量 Al_2O_3 ($0.09\%\sim 0.26\%$, 个别可达 0.85%), 有微量的 Ti_2O ($<0.10\%$) 和 Na_2O (一般 $<0.20\%$)。另外,从图9的成分曲线可以看出, Cr_2O_3 和 MnO 含量分布相对比较均匀。

表1 GRV 052382 陨石代表性主要硅酸盐矿物电子探针成分(wt%)

Table 1 The representative EPMA compositions of the main silicates in GRV 052382 (wt%)

产状 Occurrence	原橄辉石颗粒核部 In the core of the original olivine grain					原橄辉石颗粒边部 In the rim of the original olivine grain		颗粒间充填熔体 Interstitial melt among olivine grains					易变辉石 Pigeonite				
	1	2	3	4	5	1	2	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	SiO ₂	40.1	40.9	40.0	40.3	37.9	42.3	41.4	49.6	45.6	56.7	52.6	53.5	56.5	56.8	56.9	56.4
TiO ₂	u. d.	u. d.	u. d.	0.01	0.01	u. d.	u. d.	0.07	0.09	u. d.	0.08	0.12	0.05	0.04	0.04	0.07	0.04
Al ₂ O ₃	0.04	0.08	0.02	0.08	0.04	u. d.	0.01	0.39	0.37	0.04	0.31	0.42	0.12	0.20	0.14	0.24	0.19
Cr ₂ O ₃	0.73	0.59	0.63	0.53	0.69	0.48	0.85	0.98	2.63	0.79	1.05	1.31	1.17	1.02	1.01	1.14	1.04
FeO	15.7	11.6	16.3	14.8	19.7	2.06	5.04	11.7	12.0	8.16	7.24	6.02	8.72	8.74	7.24	8.89	8.49
MnO	0.49	0.55	0.48	0.49	0.47	0.48	0.61	0.43	0.44	0.32	0.43	0.43	0.45	0.45	0.48	0.49	0.40
MgO	43.8	47.0	43.4	44.6	39.6	53.6	51.2	32.9	33.5	32.0	25.7	21.8	28.8	30.6	30.7	27.7	30.3
CaO	0.36	0.19	0.22	0.20	0.36	0.25	0.43	5.47	6.22	1.07	11.12	14.13	4.37	2.37	3.32	4.95	2.67
Na ₂ O	0.03	0.01	u. d.	0.04	u. d.	0.02	0.02	0.14	0.11	0.05	0.09	0.15	0.04	0.05	0.08	0.12	0.05
K ₂ O	0.02	0.01	u. d.	u. d.	u. d.	0.02	u. d.	0.02	0.01	0.01	0.01	u. d.	0.01	0.02	u. d.	0.01	0.01
Total	101.3	101.0	101.0	101.1	98.8	99.2	99.5	101.6	100.9	99.1	98.6	97.9	100.2	100.2	99.9	100.0	100.2
O	O = 4					O = 6											
Si	1.000	1.004	1.001	1.002	0.990	1.010	1.002	1.788	1.687	1.996	1.927	1.974	1.994	1.992	1.995	1.998	1.999
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.002	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Al	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.017	0.016	0.002	0.013	0.018	0.005	0.008	0.006	0.010	0.008
Cr	0.014	0.011	0.013	0.010	0.014	0.009	0.016	0.028	0.077	0.022	0.031	0.038	0.033	0.028	0.028	0.032	0.029
Fe	0.328	0.239	0.342	0.308	0.432	0.041	0.102	0.352	0.371	0.240	0.222	0.186	0.257	0.256	0.212	0.264	0.249
Mn	0.010	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.012	0.013	0.014	0.009	0.013	0.013	0.013	0.013	0.014	0.015	0.012
Mg	1.627	1.717	1.620	1.652	1.545	1.908	1.846	1.770	1.846	1.681	1.401	1.197	1.515	1.599	1.603	1.466	1.582
Ca	0.010	0.005	0.006	0.005	0.010	0.006	0.011	0.212	0.247	0.040	0.436	0.558	0.165	0.089	0.125	0.188	0.100
Na	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.001	0.010	0.008	0.004	0.006	0.010	0.003	0.003	0.005	0.008	0.003
K	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
Sum	2.993	2.990	2.992	2.993	3.002	2.986	2.990	4.193	4.268	3.994	4.052	3.999	3.987	3.991	3.989	3.983	3.984
Fa	16.8	12.2	17.4	15.7	21.8	2.1	5.2	16.6	16.7	12.5	13.7	13.4	14.5	13.8	11.7	15.2	13.6
En								75.8	74.9	85.7	68.1	61.7	78.2	82.2	82.6	76.4	81.9
Wo								9.1	10.0	2.1	21.2	28.8	8.5	4.6	6.4	9.8	5.2
Fs								15.1	15.0	12.3	10.8	9.6	13.3	13.2	10.9	13.8	12.9

u. d. 表示含量低于检测限

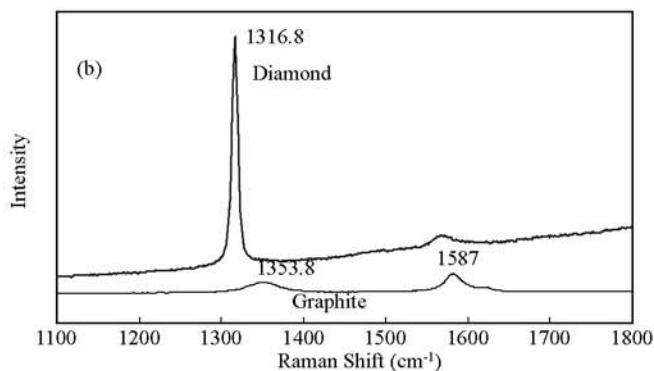
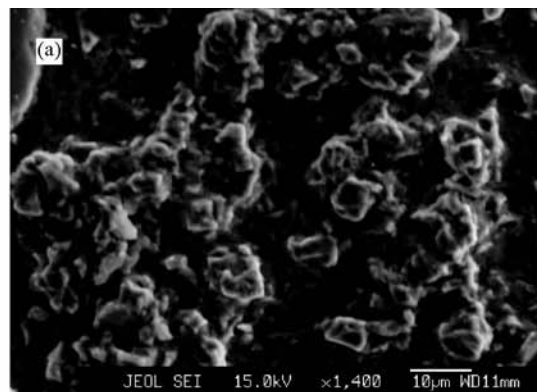


图7 石墨中金刚石颗粒二次电子图像(a)和金刚石及石墨的激光拉曼光谱(b)

图(a)中中间突起高的为金刚石,突起低的为石墨

Fig.7 The SEI image of diamond embedded in graphite(a)and Laser Raman spectra of diamond and graphite(b)

The high relief is diamond and the low relief is graphite in Fig.7a

表2 GRV 052382 陨石中不同产状金属的电子探针代表性成分 (wt%)

Table 2 The representative EPMA compositions of metals in different occurrences (wt%)

产状 Occurrence	橄榄石 Olivine						易变辉石 Pigeonite		
	核部 Core			边部 Rim					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fe	88.5	93.1	95.3	87.2	91.2	90.0	88.7	91.2	93.3
Ni	9.09	5.42	0.81	3.99	0.76	4.12	3.51	2.88	6.89
Si	0.05	0.02	0.02	6.43	5.93	5.02	6.02	4.40	0.02
Co	0.56	0.38	0.12	0.32	0.10	0.29	0.28	0.20	0.45
Cr	0.09	0.05	0.06	0.15	0.12	0.05	0.09	0.08	0.06
P	0.38	0.96	0.77	0.32	0.29	0.41	0.23	0.20	0.98
Cu	u. d.	u. d.	0.03	0.02	u. d.	u. d.	0.03	u. d.	u. d.
Total	98.7	99.9	97.1	98.4	98.4	99.8	98.9	99	101.6

u. d. 表示含量低于检测限

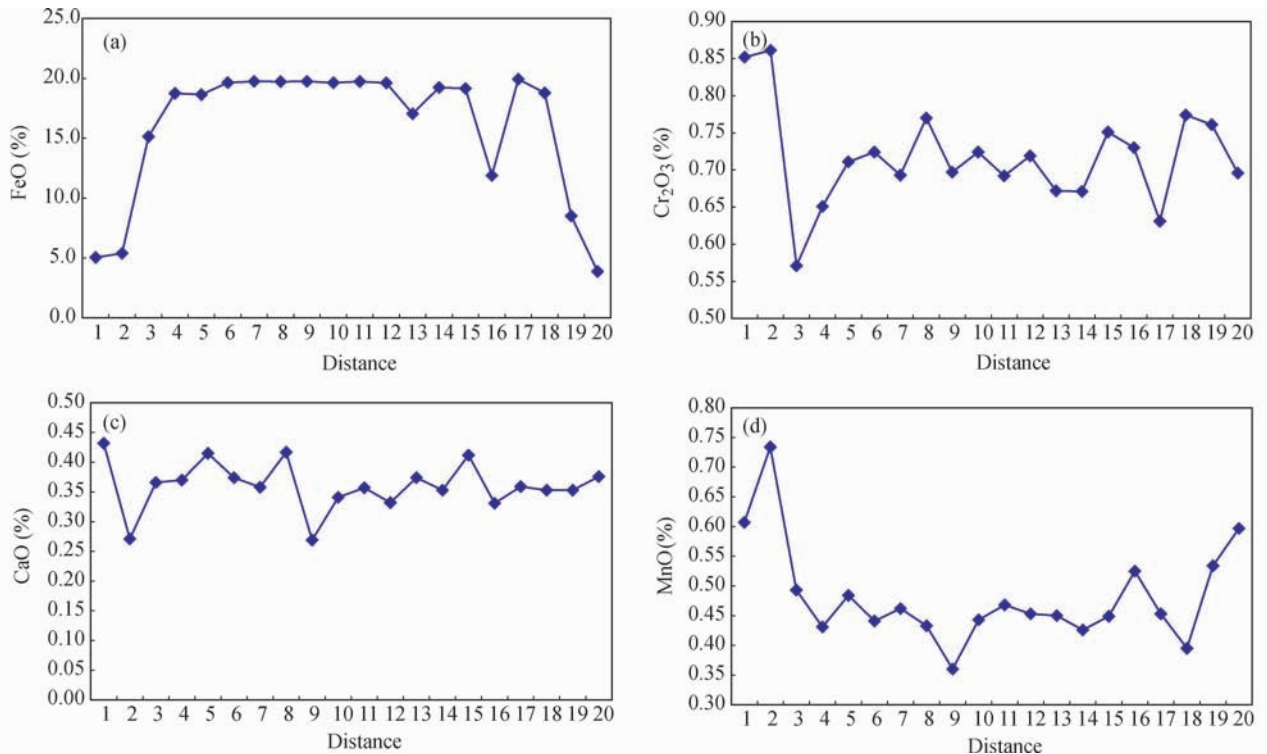


图8 橄榄石成分剖面

(a)-FeO 的分布曲线, 橄榄石核部富 FeO, 边部贫 FeO, 具有反环带成分特征; (b)-Cr₂O₃ 的分布曲线, 但大部分数据有轻微的波动, 少量数据点偏差较大; (c)-CaO 含量分布曲线, 相对较为平稳, 偏差近于检测限; (d)-MnO 含量分布呈“U”型分布, 表现出与 FeO 含量成反相关关系。剖面步长 50 μ m

Fig. 8 Profile diagram of olivine composition

(a)-the variation curve of FeO, showing reverse zonation of composition in which FeO is rich in the core but is poor in the rim; (b)-the variation curve of Cr₂O₃ content, showing a light variation with some data of big bias; (c)-the variation of CaO which is near the detective deviation is almost homogeneous; (d)-The MnO content displays a “U” type, suggesting that the MnO content is reverse with FeO content. The step of points is 50 μ m

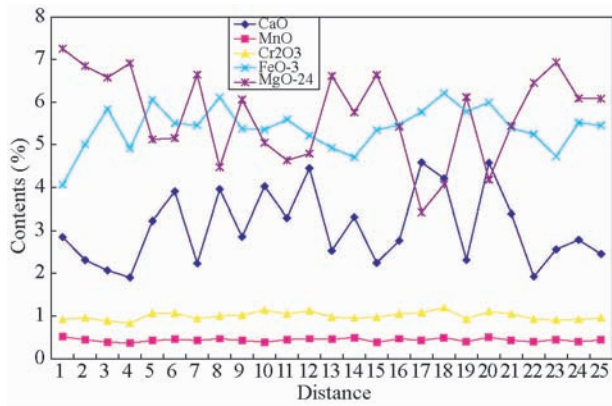


图9 易变辉石成分剖面

为方便作图对比,FeO的投点数据=原FeO含量-3%,MgO的投点数据=原MnO含量-24%。剖面步长为30 μ m

Fig.9 The diagram of the pigeonite composition

In order to show all data into this diagram, the points of FeO = FeO content - 3%, the points of MgO = MgO content - 24%. The step is 30 μ m

2.2.3 橄榄石细晶颗粒间的熔融填隙物

充填在橄榄石细晶颗粒之间的熔融填隙物成分变化大,可能为玻璃质,其中SiO₂含量为45.6%~56.7%、CaO为1.07%~14.13%、Cr₂O₃为0.79%~1.31%(个别可达2.63%)、MnO含量为0.32%~0.44%、Al₂O₃含量为0.04%~0.42%、Na₂O含量<0.20%、TiO₂含量<0.12%。从成分上看(其W_{O₂-1.28.8}),该熔融填隙物大部分成分与普通辉石较接近。

2.2.4 金属

金属颗粒分布大致可归为三种产状:原橄榄石颗粒核部、原橄榄石边部和充填在易变辉石中气孔中。根据不同金属颗粒产状,将代表性电子探针数据列于表2。从表中可见,这些金属均为贫Ni的铁纹石。除个别颗粒的Ni较高(9.09%)外,Ni的含量在0.76%~6.89%。从Ni的分布看,在易变辉石中的Ni含量较均匀,而在橄榄石的核部和边部的Ni含量都不均匀,其Ni含量变化与产状没有明显关系。金属中Si的含量与产状具有强烈的相关关系,在原橄榄石颗粒核部中金属含有少量Si,Si含量在0.12%~0.54%,而在原橄榄石颗粒边部金属中含Si非常高,含量在5.06%~6.43%。而易变辉石中金属的Si含量具有两种类型,大部分金属颗粒Si含量与橄榄石边部金属颗粒的Si含量相当,Si含量在4.40%~6.02%,而少数金属颗粒Si含量非常低,近于检测限(0.01%)。所有金属颗粒还含有少量Co、Cr和P,其含量分别是0.10%~0.56%、0.05%~0.15%和0.20%~0.98%,但含量与产状没有呈现明显的相关性。经检测,该陨石中铁纹石几乎不含Cu,大部分数据Cu含量低于检测限,少量数据Cu含量也在检测限附近(0.02%~0.03%)。

2.3 冲击变质效应

该陨石遭受了强烈的冲击变质作用。其冲击变质效应表现在如下方面:(1)橄榄石严重破碎,呈细粒等粒状结构,颗粒大小仅10~20 μ m之间(图3、图4);(2)橄榄石矿物发生边部熔融,细小橄榄石颗粒棱角出现圆化,在橄榄石颗粒间出现熔融填隙物(图4);(3)易变辉石成分分布出现波浪状韵律变化(图5);(4)在整个样品中,样品裂隙和气孔非常发育(图5);(5)石墨在反光下为黑色,无光泽,不同于正常石墨的金属光泽(图6),说明石墨因冲击压缩所致(Nakamuta and Aoki, 2000);(6)石墨产生金刚石相变。

2.4 地球风化程度

该陨石样品熔壳下轻微有黄褐色,在显微镜下,硅酸盐矿物未见褐铁矿侵染色,但铁纹石颗粒边缘有少量褐铁矿化,但是含量少于10%,因此,地球风化程度属于W1(Wlotzka, 1993)。

3 讨论

3.1 类型的确定以及亚类划分

GRV 052382 陨石的主要矿物中出现了橄榄石、易变辉石、铁纹石,而且矿物颗粒(尤其是橄榄石)颗粒非常小(10~20 μ m),这些特征与球粒陨石的特征非常相似。然而,该陨石缺乏球粒结构及其残留;另外,岩石结构的矿物颗粒虽然细小,但其橄榄石具有等粒细晶结构并具有粗粒橄榄石结构的外形,这不同于球粒陨石的细小矿物混杂的重结晶结构;没有出现平衡型球粒陨石常见的次生斜长石;这些现象表明GRV 052382不是球粒陨石,而应该属于无球粒陨石范畴。

与月球陨石、火星陨石中辉玻无球粒陨石和HED族陨石等相比,因为缺乏斜长石,GRV 052382 陨石明显不同于它们。此外,因为矿物组合和结构的差异,GRV 052382 陨石也不可能是其它类型火星陨石和钛辉无球粒陨石。尽管GRV 052382 矿物成分表现出非常还原的特征,但它的矿物组合中缺乏了顽辉石,这也明显不同于还原的顽辉石无球粒陨石。另外,GRV 052382 陨石辉石的Mn-Fe的成分分布介于灶神星线与球粒之间(图10),表明它不属于火星陨石、月球陨石、灶神星(HED族)以及地球岩石,而属于原始无球粒陨石(Papike, 1998)。因此,在无球粒陨石中,GRV 052382 陨石更接近原始无球粒陨石。

原始无球粒陨石的成员有斜方辉石-橄榄石无球粒陨石(Acapulcoites)、橄榄古铜陨铁(Lodranites)、富橄榄石无球粒陨石(Brachinites)、顽辉石-镁橄榄石无球粒陨石(Winonaites)和橄辉无球粒陨石(ureilites)(王道德等, 2005)。因为高碳质含量和特征的碳质多型(石墨和金刚石)

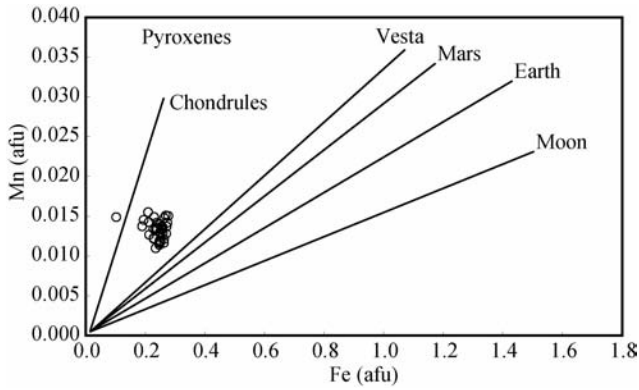


图 10 GRV 052382 陨石的易变辉石的 Mn-Fe 关系图

Fig. 10 Mn-Fe diagram of the pigeonite of GRV 052382

的存在,表明 GRV 052382 陨石是橄辉无球粒陨石,而不是原始无球粒陨石其它成员。该陨石虽然具有强烈冲击破碎的结构,但是其矿物组合简单而且均一,没有出现普通辉石、斜长岩质以及其它岩性角砾,因此,它属于单矿岩质橄辉无球粒陨石。GRV 052382 陨石的马赛克状或者细晶结构似乎与典型的橄辉无球粒陨石存在差异,但是富碳质填隙物的分布特征与典型橄辉无球粒陨石是一致的,而且易变辉石具有粗粒结构,另外,根据富碳质填隙物的分布以及颗粒的裂隙特点判断,细粒橄辉石颗粒的分布保留了原始粗粒橄辉石的外形和轮廓。因此,经过结构恢复,GRV 052382 陨石依然具有橄辉无球粒陨石的结构特征。虽然它缺乏典型的粗粒硅酸盐颗粒间三联点结构,这与陨石遭受强烈冲击改造有关。同时,GRV 052382 陨石矿物学的其它主要特征,包括:(1)粗粒橄辉石出现还原边,即具有反环带成分特点;(2)橄辉石富含 CaO 、 Cr_2O_3 和 MnO ;(3)金属 Fe 的分布主要富集在富碳质暗色区及其附近;(4)易变辉石成分富含 Cr_2O_3 和 MnO ;(5)易变辉石的 Mn-Fe 分布落在球粒陨石与无球粒陨石之间,都与其它单矿岩质橄辉无球粒陨石吻合,这也有力地证明了它为单矿岩质橄辉无球粒陨石。

由于橄辉石的冲击破碎和强烈还原作用,原粗粒橄辉石核部成分变化较大,Fe 值范围为 12.2 ~ 21.8。假如排除还原作用的影响,该陨石的原粗粒橄辉石的核部成分应该不低于 Fe 的最大值,即 21.8,因此,根据 Berkley (1980) 的橄辉石核部成分的标准,GRV 052382 为富 FeO 的亚型(I 型)

3.2 冲击变质特征及冲击程度的划分

碰撞冲击是太阳系中,尤其是在太阳系中行星形成的早期阶段,非常常见的事件。在各种类型陨石形成或演化历史中,冲击事件也是不可缺少的一个过程,因此,冲击变质特征和冲击变质程度是陨石研究的一个重要部分。为了阐明陨石的冲击变质现象,前人对陨石的冲击变质效应以及冲击变质程度进行了诸多研究 (Dodd and Jarosewich, 1979; Rubin, 1985; Stöfler *et al.*, 1988, 1991)。其中,Stöfler *et al.*

(1991) 的普通球粒陨石的冲击变质程度划分体系被广泛接受。

GRV 052382 陨石的冲击变质效应归纳起来有三方面:(1)橄辉石:强烈破碎-马赛克状结构或者等粒细晶结构-初步熔融(棱角圆化、颗粒间充填熔融填隙物)-气孔产生-还原金属充填;(2)易变辉石:强烈冲击变形-出熔-波浪状韵律成分变化-大量气孔-浑圆金属充填;(3)石墨:冲击-金刚石相变-热退变质。

根据 Stöfler *et al.* (1991) 的标准,上述特征表明,GRV 052382 陨石具有强烈冲击变质效应。橄辉石的冲击细晶化,说明其冲击程度至少在 S4 以上。因为缺少斜长石,S5 的判断标准不适于该样品;橄辉石细晶颗粒缺乏棱角特征,说明产生的棱角圆化,棱角的圆化可以有两种解释:(1)机械磨圆和(2)产生熔融。然而,在高倍 BSE 图像中,在橄辉石细晶之间未出现更为细小的晶片或粉末,另外,在这些细晶之间充填了熔体(玻璃质),填隙物的成分变化比较大,介于橄辉石-普通辉石之间,成分特征说明熔体不全是橄辉石。因此,橄辉石细晶的圆化更可能是熔融机制。因此,GRV 052382 陨石的遭受的冲击变质程度应为 S6。此外,石墨产生金刚石的相变也有力地支持这个冲击变质程度划分,表明它经历非常高的冲击变质程度。尽管在其它一些较低的橄辉石冲击变质效应的橄辉无球粒陨石中也出现金刚石相变,它可能与冲击期后热退变质作用有关(缪秉魁等, 2008a)。此外,根据 Bauer (1979) 橄辉石冲击熔融模拟实验结果和 Stöfler *et al.* (1991) 评估的不同冲击变质程度的压力标准,GRV 052382 陨石冲击压力可能大于 75 GPa。

3.3 冲击变质作用的成因意义

如前言所述,橄辉无球粒陨石是特殊类型陨石,而且在成因上非常复杂,至今存在激烈的争议。关于橄辉无球粒陨石成因,争论焦点主要有三方面:母体的初始物质或者碳质的来源、岩浆堆晶还是部分熔融、和金刚石的成因。关于金刚石的成因,尽管有多种成因观点,但越来越多的证据支持了冲击相变的成因模式。因此,橄辉无球粒陨石母体经历的冲击事件是厘定其成因的一个关键环节。

尽管橄辉无球粒陨石中普遍存在石墨-金刚石相变,表明其母体广泛遭受强烈的冲击事件。但是,由于冲击期后的热退变质作用,大部分橄辉无球粒陨石的结构和主要硅酸盐矿物表现出较轻微的冲击变质效应,因此,很难从中追索冲击事件的成因信息。目前,据文献的数据 (Mittlefehldt *et al.*, 1998),在 55 个橄辉无球粒陨石中近有 8 个陨石具有高冲击变质程度,其中一个为典型的橄辉结构,7 个为马赛克状结构,尽管 Bischoff (1999) 认为其中有些马赛克状结构为固态重结晶。此外,尚未有文献明确报告橄辉无球粒陨石中冲击熔融的特征。因此,初步推测,GRV 052382 应该属于遭受最强烈冲击变质的橄辉无球粒陨石之一。因此,这些冲击变质特征本身是橄辉无球粒陨石经受冲击事件的直接证据。另

外, GRV 052382 样品新鲜, 而且内部保留强烈冲击变质效应, 为此, 该陨石研究不但可能为橄辉无球粒陨石的冲击变质成因找到更深入的证据, 而且有可能揭示橄辉无球粒陨石所经历的冲击作用强度, 并提供冲击作用的压力、温度和持续时间等参数。

4 结论

根据初步的岩石矿物学研究, 可以得出如下结论:

(1) 岩石结构、矿物组成和矿物化学成分等特征表明, GRV 052382 为单矿岩质橄辉无球粒陨石的新成员, 并属于 I 型富 FeO 亚类;

(2) GRV 052382 具有强烈冲击变质的特征:(a) 橄辉石冲击细晶结构;(b) 橄辉石细晶颗粒具有圆化特征, 其间存在熔融填隙物;(c) 易变辉石晶体具有波浪状韵律成分变化;(d) 存在大量不规则气孔;(e) 金属 Fe 沿裂隙或气孔充填;(f) 石墨发生金刚石相变。表明 GRV 052382 陨石具有强烈的冲击变质程度 S6 效应及特征表明, 经历了强烈的冲击变质作用, 冲击变质程度为 S6, 其冲击压力可能大于 75 GPa。

(3) GRV 052382 陨石可能是遭受最强烈冲击变质的橄辉无球粒陨石之一, 它不但为橄辉无球粒陨石的冲击成因提供了直接的证据, 而且进一步研究将可能获得有关橄辉无球粒陨石母体经历冲击作用更深入的成因信息。

致谢 研究样品由中国极地研究中心提供。本文在撰写过程中得到了王道德研究员的指导; 两位匿名审稿人也提供了建设性的意见; 在此一并感谢!

References

Ash RD, MacPherson GJ and Rumble D. 2000. Oxygen isotopes, ureilite genesis, and the geology of asteroids. *Meteoritics & Planetary Science*, 35 (Suppl.): A21

Bauer JF. 1979. Experimental shock metamorphism of mono- and polycrystalline olivine: A comparative study. *Lunar and Planetary Science Conference*, 10: 2573 - 2596

Berkley JL, Brown HG, Keil K, Carter NL, Mercier J-CC and Huss G. 1976. The Kenna ureilite: An ultramafic rock with evidence for igneous, metamorphic, and shock origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40: 1429 - 1437

Berkley JL, Taylor GJ, Keil K, Harlow GE and Prinz M. 1980. The nature and origin of ureilites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44: 1579 - 1597

Berkley JL and Jones JH. 1982. Primary igneous carbon in ureilites: Petrological implications. *Journal of Geophysical Research*, 87 (Suppl.): A353 - A364

Bischoff A, Goodrich CA and Grund T. 1999. Shock-induced origin of diamonds in ureilites. *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*, 30: 1100

Clayton RN. 1993. Oxygen isotopes in meteorites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21: 115 - 149

Connolly HC, Zipfel J, Grossman JN, Folco L, Smith C, Jones RH, Righter K, Zolensky M, Russell SS, Benedix GK, Yamaguchi A and Cohen BA. 2006. *The Meteoritical Bulletin*, No. 90, 2006

September. *Meteoritics and Planetary Science*, 41: 1383 - 1418

Connolly HC, Smith C, Benedix G, Folco L, Righter K, Zipfel J, Yamaguchi A and Aoudjehane HC. 2007. *The Meteoritical Bulletin*, No. 92, 2007 September. *Meteoritics and Planetary Science*, 42: 1647 - 1694

Connolly HC, Jr., Smith C, Benedix G, Folco L, Righter K, Zipfel J, Yamaguchi A and Chennaoui Aoudjehane H. 2008. *The Meteoritical Bulletin*, No. 93, 2008 March. *Meteoritics and Planetary Science*, 43: 571 - 632

Dai DQ, Lin YT, Miao BK, Shen WJ and Wang DD. 2004. Ca-, Al-rich inclusions in three new carbonaceous chondrites from the Grove Mountains, Antarctica: New evidence for a similar origin of the objects in various groups of chondrites. *Acta Geologica Sinica*, 78 (5): 1042 - 1051

Dodd RT and Jarosewich E. 1979. Incipient melting in and shock classification of L-group chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 44: 335 - 340

Goodrich CA, Jones JH and Berkely JL. 1987. Origin and evolution of the ureilite parent magmas: Multi-stage igneous activity on a large parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 2255 - 2273

Goodrich CA, Patchett PJ, Lugmair GW and Drake MJ. 1991. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic systematics of ureilites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 829 - 848

Goodrich CA. 1992. Ureilites: A critical review. *Meteoritics*, 27: 327 - 352

Grossman JN. 2000. *The Meteoritical Bulletin*, No. 84, 2000 August. *Meteoritics and Planetary Science*, 35: A199 - A225

Ju YT and Miao BK. 2005. The collection of 4448 meteorites in Grove Mountains, Antarctica, in 2002 - 2003: Confirmation of a new meteorite concentration. *Chinese Journal of Polar Research*, 17: 215 - 223 (in Chinese with English abstract)

Liang Y, Wang HN, Xu WB and Ji JF. 2006. Petrology and mineralogy of the Grove Mountains (GRV) 021788 ureilite from Antarctica. *Geochimica*, 35(1): 1 - 5 (in Chinese with English abstract)

Lin YT, Ouyang ZY, Wang DD, Miao BK, Liu XH, Kimura M and Jun Y. 2002. Grove Mountains (GRV) 99027: A new martian lherzolite. *Meteoritics and Planetary Science*, 37(Suppl.): A87

Lin YT, Wang DD and Wang GQ. 2004. A tiny piece of basalt probably from Asteroid 4 Vesta. *Acta Geologica Sinica*, 78(5): 1025 - 1033

Lin YT, Ju YT, Xu XX, Pan MR, Huang FX, Fang AM, Li JY, Liu XC, Pen WJ, Hu JM and Chen X. 2006. Recovery of 5354 meteorites in Grove Mountains, Antarctica, by the 22nd Chinese Antarctic Research Expedition. 69th Annual Meteoritical Society Meeting, 41 (Suppl.): 5102 - 5103

Liu JZ, Zou YL, Li CL, Xu L and Ouyang ZY. 2002. Meteorite characteristics of petrology-mineralogy and classification in Grove Mountains, Antarctica. *Chinese Journal of Polar Research* 14(4): 330 - 337 (in Chinese with English abstract)

Liu XH and Ju YT. 2002. Grove Mountains: A new found meteorites concentration area. *Chinese Journal of Polar Research*, 14(4): 243 - 247 (in Chinese with English abstract)

Liu XH, Zhao Y, Liu XC and Yu LJ. 2003. Geology of the Grove Mountains in East Antarctica: New evidence for the final suture of Gondwana Land. *Science in China (Series D)*, 46(4): 305 - 319

Lu R, Miao BK, Wang GQ, Dai DQ, Lin YT, Ouyang ZY and Li CL. 2004. Classification of 24 new ordinary chondrites from the Grove Mountains, Antarctica. *Acta Geologica Sinica*, 78(5): 1052 - 1059

Miao BK, Lin YT, Ouyang ZY and Zhou XH. 2002a. Petrology of Grove Mountains meteorites I: L3 ordinary chondrites. *Chinese Journal of Polar Research*, 14(4): 276 - 287 (in Chinese with English abstract)

Miao BK, Lin YT, Ouyang ZY and Zhou XH. 2002b. Petrology of Grove Mountains meteorites II: Equilibrated ordinary chondrites. *Chinese Journal of Polar Research*, 14(4): 288 - 299 (in Chinese with English abstract)

Miao BK, Lin YT and Zhou XH. 2003. Type distribution pattern and pairing of ordinary chondrites from Grove Mountains, Antarctica. *Chinese Science Bulletin*, 48: 908 - 913

- Miao BK, Ouyang ZY, Wang DD, Ju YT, Wang GQ and Lin YT. 2004. A new Martian meteorite from Antarctica: Grove Mountains (GRV) 020090. *Acta Geologica Sinica*, 78(5): 1034–1041
- Miao BK, Lin YT, Wang GQ, Wang DD and Ouyang ZY. 2008a. Petrology and mineral chemistry of new ureilites found in Grove Mountains, Antarctica. *Progress in Natural Science*, 18: 431–439
- Miao BK, Ouyang ZY, Lin YT, Xiao L, Huang DH and He Q. 2008b. The retrospect and Prospect on Antarctic Meteorite Researches in China. *Geological Science and Technology Information*, 27(1): 13–19, 30 (in Chinese with English abstract)
- Mittlefehldt WD, McCoy TJ, Goodrich CA and Kracher A. 1998. Non-chondritic meteorites from asteroidal bodies. In: Papike JJ (ed.). *Reviews in Mineralogy: Planetary Materials*, 36(4): 1–195
- Nakamura Y and Aoki Y. 2000. Mineralogical evidence for the origin of diamond in ureilites. *Meteoritics and Planetary Science*, 35: 487–494
- Papike JJ. 1998. Comparative planetary mineralogy: Chemistry of melt-derived pyroxene, feldspar, and olivine. In: Papike JJ (ed.). *Reviews in Mineralogy: Planetary Materials*, 36(7): 1–11
- Rai VK, Murty SVS and Ott U. 2003. Nitrogen components in ureilites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 2213–2237
- Ringwood AE. 1960. The Novo Urei meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 20: 1–4
- Rubin AE. 1985. Impact melt products of chondritic material. *Reviews of Geophysics*, 23: 277–300
- Rubin AE. 1988. Formation of ureilites by impact-melting of carbonaceous chondritic material. *Meteoritics*, 23: 333–337
- Russell SS, Zipfel J, Grossman L and Grady MM. 2002. The Meteoritical Bulletin, No. 86, 2002 July. *Meteoritics and Planetary Science*, 37: A154–A187
- Russell SS, Zolensky ME, Rrighter K, Folco L, Jones R, Connolly HC, Jr., Grady MM and Grossman JN. 2005. The Meteoritical Bulletin, No. 89, 2005 September. *Meteoritics and Planetary Science*, 40: A201–A263
- Scott ERD, Taylor GJ and Keil K. 1993. Origin of ureilite meteorites and implications for planetary accretion. *Geophysical Research Letters*, 20: 415–418
- Stöffler D, Bischoff A, Buchwald VF and Rubin AE. 1988. Shock effects in meteorites. In: Kerridge JF and Matthews MS (eds.). *Meteorites and the Early Solar System*. Tucson: The University of Arizona Press, 1269
- Stöffler D, Keil K and Scott ERD. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 3845–3867
- Takeda H. 1987. Mineralogy of Antarctic ureilites and a working hypothesis for their origin and evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 81: 358–370
- Takeda H, Mori H and Ogata H. 1988. On the pairing of Antarctic ureilites with reference to their parent body. *Antarctic Meteorite Research*, 1: 145
- Torigoye N, Tatsumoto M and Yanai K. 1994. The U-Th-Pb and Sm-Nd isotopic systematics of MET 78008 ureilite. *Antarctic Meteorites*, 19: 86–88
- Vdovikin GP. 1970. Ureilites. *Space Science Reviews*, 10: 483
- Wang DD, Miao BK and Lin YT. 2005. Mineralogic-petrologic characteristics of meteorites and their classification. *Chinese Journal of Polar Research*, 17(1): 45–74 (in Chinese with English abstract)
- Warren PH and Kallemeyn GW. 1988. A new model for ureilite origin: Incomplete impact-disruption of partially molten asteroids. *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*, 19: 1238–1239
- Warren PH and Kallemeyn GW. 1989. Geochemistry of polymict ureilite EET83309, and a partially-disruptive impact model for ureilite origin. *Meteoritics*, 24: 233–246
- Warren PH and Kallemeyn GW. 1991. Geochemistry of unique achondrite MAC88177: Comparison with polymict ureilite EET87720 and “normal” ureilites. *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*, 22: 1467
- Warren PH and Kallemeyn GW. 1992a. Explosive volcanism and the graphite-oxygen fugacity buffer on the parent asteroid(s) of the ureilite meteorites. *Icarus*, 100: 110–126
- Warren PH and Kallemeyn GW. 1992b. Ureilites: The graphite f_{O_2} buffer, explosive volcanism, and the gross dissipation of basalt from the parent asteroid(s). *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*, 23: 1497–1498
- Weisberg MK, Smith C, Benedix G, Folco L, Righter K, Zipfel J, Yamaguchi A and Chennaoui Aoudjehane H. 2009a. The Meteoritical Bulletin, No. 95. *Meteoritics and Planetary Science*, 44: 429–462
- Weisberg MK, Smith C, Benedix G, Herd CDK, Righter K, Haack H, Yamaguchi A, Chennaoui Aoudjehane H and Grossman JN. 2009b. The Meteoritical Bulletin, No. 96, September 2009. *Meteoritics and Planetary Science*, 44: 1355–1397
- Wlotzka F. 1993. A Weathering Scale for the Ordinary Chondrites. *Meteoritics*, 28: 460

附中文参考文献

- 琚宜太, 缪秉魁. 2005. 南极格罗夫山于2002–2003年搜集4448块陨石: 新陨石富集区的证实. *极地研究*, 17(3): 215–223
- 梁英, 王鹤年, 徐伟彪, 季峻峰. 2006. 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*, 35(1): 19–26
- 刘建忠, 邹永廖, 李春来, 徐琳, 欧阳自远. 2002. 南极格罗夫山陨石的岩石-矿物学特征及初步分类. *极地研究*, 14: 330–337
- 刘小汉, 琚宜太. 2002. 格罗夫山: 我国新发现的一个陨石富集区. *极地研究*, 14: 243–247
- 刘小汉, 赵越, 刘晓春, 俞良军. 2002. 东南极格罗夫山地质特征——冈瓦纳最终缝合线的新证据. *中国科学(D辑)*, 32(6): 458–468
- 缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 周新华. 2002a. 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. *极地研究*, 14(4): 276–287
- 缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 周新华. 2002b. 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, 周新华. 2003. 南极格罗夫山普通球粒陨石的化学-岩石类型分布及成对陨石的判别. *科学通报*, 48: 874–880
- 缪秉魁, 林杨挺, 王桂琴, 王道德, 欧阳自远. 2008a. 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*, 18(3): 269–278
- 缪秉魁, 欧阳自远, 林杨挺, 肖龙, 黄定华, 何骑. 2008b. 我国南极陨石研究的新进展. *地质科技情报*, 27(1): 13–19, 30
- 王道德, 缪秉魁, 林杨挺. 2005. 陨石的矿物-岩石学特征及其分类. *极地研究*, 17(1): 45–74