



Y984028 火星陨石的岩石矿物学特征和冲击变质

胡森^{①②}, 冯璐^{①②}, 林杨挺^{①*}

① 中国科学院地质与地球物理研究所地球深部结构与过程研究室, 北京 100029;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: linyt@mail.igcas.ac.cn

2011-01-26 收稿, 2011-02-17 接受

中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX2-YW-110, KZCX2-YW-Q08)

摘要 Y984028 是一块新的二辉橄榄岩质火星陨石, 具有两种明显不同的岩石结构: 粒间结构和嵌晶结构. 与嵌晶结构区域的矿物相比, 粒间区域的铁镁质硅酸盐贫 FeO、铬铁矿贫 TiO₂. 虽然 Y984028 的岩石结构和矿物化学成分与 GRV 99027 非常相似, 但两者的冲击变质特征有明显差异, 表明 Y984028 不是 GRV 99027 的成对陨石. Y984028 经历了强烈的冲击作用, 冲击后由于该陨石没有遭受明显的热变质, 因而该样品是研究类地行星早期撞击过程的探针. Y984028 熔脉中主要包含细小的矿物碎屑, 部分矿物边缘发育细粒化结构, 没有发现任何高压相矿物, 表明 Y984028 在撞击过程中发生了部分熔融, 在较低压力下发生淬火.

关键词

火星陨石
二辉橄榄岩
南极
冲击变质

二辉橄榄岩质火星陨石是火星陨石的一个小群, 至今只有 12 块该类型的陨石. 所有的二辉橄榄岩质火星陨石都由两种明显不同的岩石结构组成: 嵌晶结构和粒间(非嵌晶)结构. 嵌晶结构主要由易变辉石主晶和橄榄石客晶组成, 辉石和橄榄石颗粒内有少量自形铬铁矿包裹体. 粒间结构主要由自形-半自形橄榄石、普通辉石、易变辉石和粒间充填的长石玻璃组成, 铬铁矿、钛铁矿、磁黄铁矿和磷酸盐等次要矿物与长石玻璃共生. 此外, 二辉橄榄岩质火星陨石的矿物化学成分呈现双峰分布: 粒间区域的橄榄石和辉石富 FeO、铬铁矿富 TiO₂, 嵌晶区域的橄榄石和辉石相对贫 FeO、铬铁矿贫 TiO₂.

前人对 3 块二辉橄榄岩质火星陨石(Allan Hill (ALH) A77005, Yamato (Y-) 793605 和 Lewis Cliff (LEW) 88516)进行了大量研究, 结果发现该类陨石均有相似的岩石结构和矿物成分^[1-6]、Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线年龄^[7,8]和溅射年龄^[9-11]. 这表明二辉橄榄岩质火星陨石可能来自火星的同一岩浆单元, 并在同一次撞击事件中离开火星母体. 近年来, 在南极和沙漠地区发现了较多的二辉橄榄岩质火星陨石, 如

GRV 99027^[12-15], Yamato (Y)000027(与 Y000047 和 Y000097 成对)^[16]和 NWA 1950^[17], 这些新发现的二辉橄榄岩质火星陨石也具有相似的岩石结构、矿物成分、Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线年龄和溅射年龄. 只有 GRV 020090^[14,18]和 Roberts Massif (RBT) 04261 (与 RBT 04262 成对)^[19,20]的稀土含量和不相容元素明显偏高, 可能来自岩浆房的顶部或富集的火星幔. 对新发现的二辉橄榄岩质火星陨石进行研究可对该族陨石的岩石学成因提供重要补充.

1 样品和实验条件

Y984028 是一块新发现的二辉橄榄岩质火星陨石(Meteorite Newsletter 17, 2008). 为澄清该陨石与其他同类陨石之间的联系, 日本极地研究所 Misawa 博士组织了一个小型国际合作研究. 作为该合作项目的一部分, 我们主要负责 Y984028 的岩石学和矿物学的工作, 与我国的火星陨石 GRV 99027 和其他二辉橄榄岩质火星陨石进行对比研究. 最初的研究成果可见文献[21].

本文使用的样品为光薄片, 编号 Y984028 51-2.

该光薄片可见黑色的冲击熔脉贯穿整个薄片, 在四边形样品的一侧残留少量熔壳. 该薄片的岩石学结构在光学显微镜和扫描电子显微镜下完成. 扫描电子显微镜为中国科学院地质与地球物理研究所的 LEO 1450VP, 配有牛津 INCA X 射线能谱仪, 可对矿物成分进行半定量分析, 加速电压为 15 kV. 拉曼光谱测试在中国科学院理化技术研究所的显微共焦激光拉曼光谱仪 in-via reflex Renishaw 上完成, 激光光源为 Ar^+ , 波长 532 nm, 功率为 16 mW, 实际作用在样品表面的束斑为 1 μm . 矿物化学成分定量分析在中国科学院地质与地球物理研究所的电子探针 JEOL JXA8100 上完成, 分析条件为: 加速电压 15 kV, 电子束流 20 nA (长石 10 nA). 橄榄石、辉石和金属采用聚焦束斑, 长石则采用非聚焦束斑(10 μm), 以避免 Na 等元素的挥发丢失. 硅酸盐矿物定量分析的标准包括自然产出的和合成的矿物: Si, Mg 和 Fe 的分析标准为角闪石, Na 和 Al 的分析标准为硬玉, K 的标准为钾长石, Ca 和 Mn 的分析标准为钙蔷薇辉石, Ti 的标准为金红石, Cr 的标准为 Cr_2O_3 . 分析过程中, 对一些元素特征峰的叠加进行了校正, 如 Cr 的 K_β 线对 Mn 的 K 线的叠加. 元素的分析检出限为(1σ , wt%): K_2O 为 0.01; SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO 和 Na_2O 为 0.02; TiO_2 和 Cr_2O_3 为 0.03; FeO 为 0.05; MnO 为 0.06.

硅酸盐矿物的分析结果采用 Bence-Albee 方法计算. 矿物模式含量主要根据背散射电子图像上灰度差异来估算, 并归一到 100 vol%(vol%体积百分, 余同).

2 结果

2.1 岩石学特征

Y984028 有两种不同的岩石结构(图 1), 即嵌晶结构和粒间结构(有些学者称之为非嵌晶结构), 为二辉橄榄岩质火星陨石的典型特征. 在嵌晶区域, 浑圆状橄榄石客晶(50~1200 μm , 39.6 vol%)与细粒自形铬铁矿(30~100 μm , 1.1 vol%)被易变辉石主晶包裹(58.3 vol%); 粗粒的易变辉石主晶边缘常有一层普通辉石薄边. 粒间区域主要由自形-半自形的橄榄石(68.2 vol%)、辉石(15.2 vol%)和长石(15.1 vol%)组成. 粒间区域中的橄榄石与辉石的含量比(4.5)明显高于嵌晶区域(0.7). 富 Ti 铬铁矿(1.1 vol%)和磁黄铁矿(0.4 vol%)仅产于粒间区域, 主要位于长石玻璃的边部. 在这两种结构中, 橄榄石在透光下均呈淡黄色, 辉石没有出熔. 在正交偏光下可见长石全消光, 已经转变成玻璃, 拉曼光谱也显示为玻璃相. Y984028 的模式含量见表 1.

在高对比度背散射电子图像上, 可见明暗两种

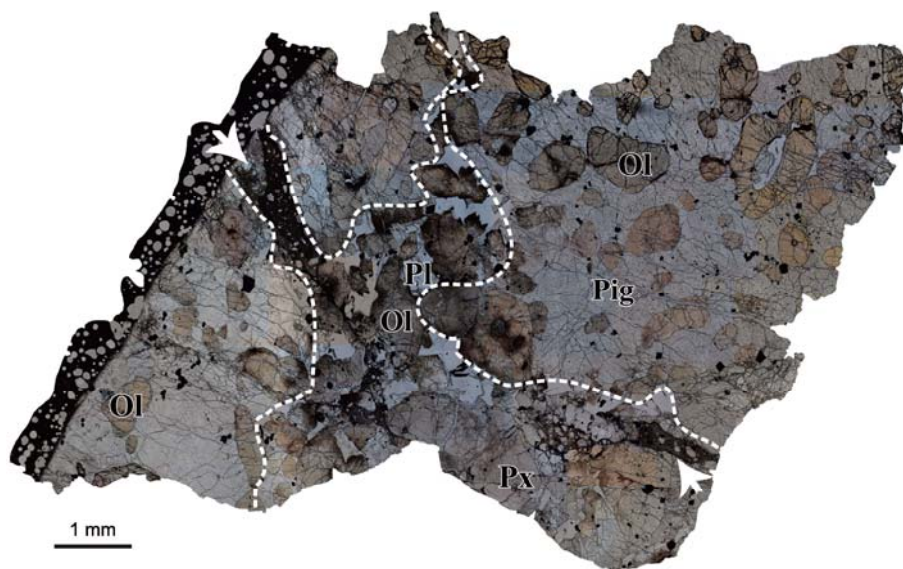


图 1 Y984028 透光图

中央部分为粒间结构(虚线圈出部分), 主要由橄榄石(Ol)、辉石(Px)和粒间长石(Pl)组成. 其余部分为嵌晶区域, 主要由橄榄石客晶和易变辉石(Pig)主晶组成. 被橄榄石和辉石包裹的细小的黑色自形矿物为铬铁矿. 薄片上可见冲击熔脉(箭头所指)和最左边的熔壳. 橄榄石在透光下呈淡黄色

表 1 Y984028 模式含量与其他二辉橄榄岩质火星陨石对比(vol%)

	Y984028			GRV 99027			ALHA77005		LEW 88516			Y793605	
	嵌晶	粒间	全岩	嵌晶	粒间	全岩	全岩		全岩			全岩	
橄榄石	39.6	68.2	48.2	30.9	33.9	32.1	59.5	69.3	49.6	59	57	40.4	40
辉石	58.3	15.2	45.3	67.8	48.7	60.4	22.6	14.8	39.3	28	22	50.8	50
长石玻璃	1.0	15.1	5.3	/	14.6	5.8	15.4	13.4	9.3	12	16	7.4	8
铬铁矿+钛铁矿	1.1	1.5	1.2	1.2	0.9	1.1	0.7	2.1	0.8	0.9	3	1.4	1.5
磷酸盐	—	—	—	—	1.4	0.5	1.7	0.5	1.0	1.7	<1	—	—
参考文献	本次工作			[13]	[13]	[13]	[22]	[4]	[4]	[22]	[4]	[3]	[6]

“—”，磷酸盐含量累计在辉石含量中；“/”，几乎没有

长石玻璃共生(图 2(a)和(b)). 较暗的长石玻璃常产出于亮长石玻璃的边部或粒间. 在长石包裹的矿物角砾中可见细粒的辉石、白磷钙矿、钛铁矿与次生斜锆石共生(图 2(c)), 这些矿物可能在结晶的晚期形成. 少许斜锆石(<5 μm)与钛铁矿共生. 磁黄铁矿中可见富 Ni 的针状颗粒, 可能是镍黄铁矿(图 2(d)).

Y984028 中可见大量岩浆包裹体. 橄榄石中岩浆包裹体数量最多, 包裹体直径可达 120 μm. 相比, 辉石和铬铁矿中岩浆包裹体数量较少(图 3). 不同矿物中的岩浆包体不仅数量和粒度有差异, 在岩石学

上也有较大差别. 橄榄石中的岩浆包裹体呈球状或卵状, 主要由长石质玻璃和辉石组成, 辉石为板状, 表现出成分环带特征, 被长石质玻璃包裹, 长石质玻璃中还常见石英质玻璃, 橄榄石与岩浆包裹体之间常有一层辉石边(图 3(a)和(c)), 为富 Ca 辉石. 在嵌晶区域的橄榄石中, 有些岩浆包裹体包含富钙和贫钙两种辉石、富钾长石和少量尖晶石, 该包裹体全部重结晶(图 3(b)). 铬铁矿中的岩浆包裹体粒度最小(<5 μm), 呈圆球状, 与铬铁矿有清晰的边界, 主要由长石玻璃、石英和磁黄铁矿组成(图 3(d)). 在所有包裹

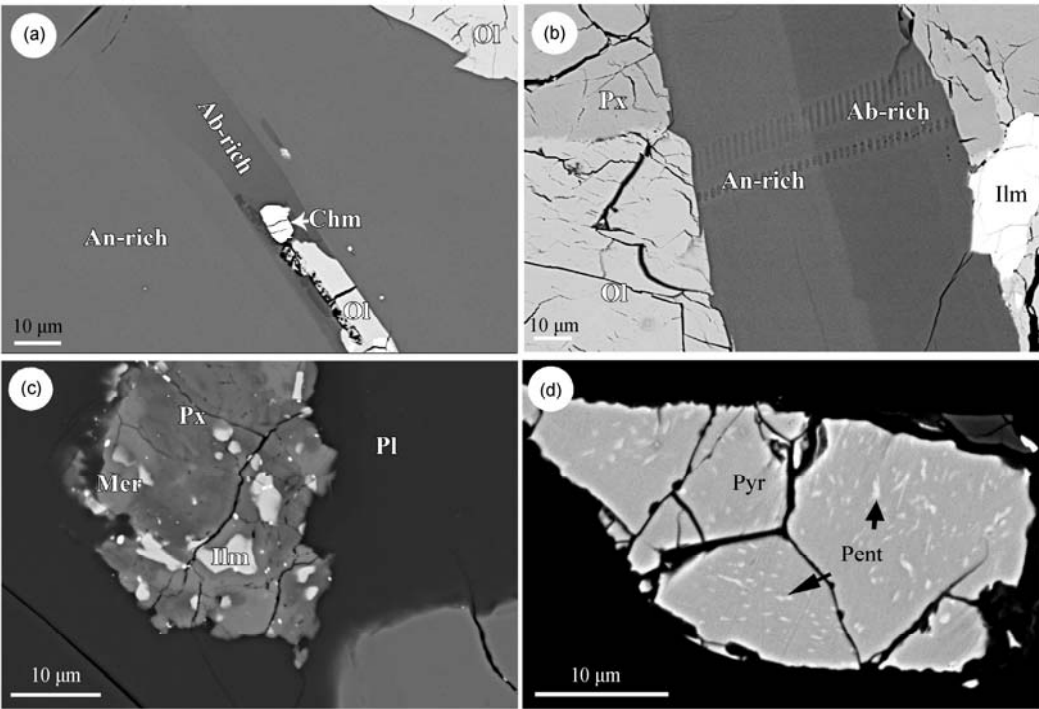


图 2 Y984028 背散射电子图像

(a) 富 Na 长石(Ab-rich)、铬铁矿(Chm)和橄榄石(Ol)被富 Ca 长石(An-rich)包裹; (b) 富 Na 长石与富 Ca 长石共生; (c) 长石中残留的矿物集合体, 由辉石(Px)、白磷钙矿(Mer)、钛铁矿(Il)和少量斜锆石(白色斑点)组成; (d) 磁黄铁矿(Pyr)中可见富 Ni 的针状颗粒, 可能是镍黄铁矿(Pent)

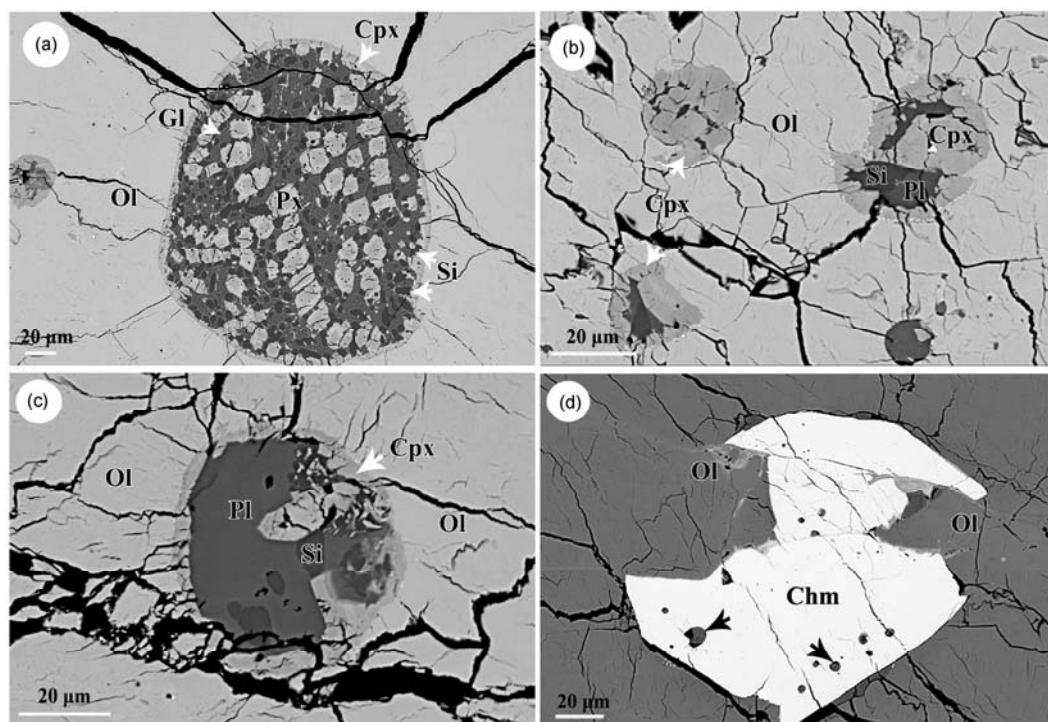


图3 Y984028 岩浆包裹体的背散射电子图像

(a) 橄榄石中大的岩浆包裹体, 由富 Ca 辉石(Cpx)、石英(Si)和长石质玻璃(Gl)组成; (b) 橄榄石中小的岩浆包裹体, 由富 Ca 辉石、石英和长石质玻璃组成; (c) 橄榄石中的岩浆包裹体, 可见富 Ca 辉石边; 自形石英被长石质玻璃包裹; (d) 铬铁矿(Chm)中的岩浆包裹体

体中, 没有发现任何高压相矿物。

2.2 冲击特征

Y984028 经历过强烈的冲击变质, 所有的长石已经转变成玻璃相。橄榄石和辉石在正交偏光下普遍存在马赛克消光。在薄片可见宽度约 1 mm 的冲击熔融脉(图 1)。熔脉中的基质主要由硅酸盐质玻璃和细粒不规则状矿物碎屑组成, 其中长石质玻璃在熔脉中呈弯曲或细长的条带, 表现出明显的流动结构。基质中可见大量粗颗粒硅酸盐角砾, 没有发现因冲击作用形成的橄榄石、辉石和长石的高压多形(图 4(a)和(b))。有些角砾大部分已经细粒化, 部分颗粒与基质的边界不清晰(图 4(b)和(c))。有少许橄榄石细颗粒边缘呈现重结晶现象, 从核部到边部成韵律状环带变化(图 4(d))。熔脉中的铬铁矿常呈网状, 沿橄榄石和辉石边部生长(图 4(b))。

Y984028 冲击熔脉的结构特征及矿物组合与普通球粒陨石中的冲击熔脉有显著差异, 后者的基质为高压下从熔体中结晶形成的自形-半自形细粒硅酸盐颗粒, 其中的橄榄石、辉石以及长石角砾普遍在

峰值高压作用下转变为林伍德石、镁铁榴石和熔长石等高压相^[23]。而 Y984028 中的矿物形貌和结构特征更可能是在较低压力下(压力卸载阶段)、较高温度条件下发生熔融形成。

除上文所述的冲击熔脉外, Y984028 中还有一些因冲击形成的微型细脉, 脉宽只有 10~30 μm。这些细脉的结构与粗脉有明显不同(图 5)。在辉石颗粒中的细脉发育淬火形成的树枝状结晶, 细脉边缘的辉石可见因部分熔融形成光滑均一的带状区域(图 5(a))。橄榄石细脉中也可见部分熔融, 然而并不发育枝状结晶。橄榄石颗粒与细脉边部接触区域可见 2 个方向的出溶(图 5(a)和(b))。

拉曼光谱分析结果显示, 冲击熔脉的细粒基质和粗颗粒硅酸盐角砾中并未发现橄榄石、辉石和长石的高压相特征吸收峰。橄榄石细脉以及边部出溶区域仅呈现典型的橄榄石拉曼吸收峰。辉石颗粒中与细脉边部接触的光滑区域(图 5(a))已经转变成玻璃。

2.3 矿物成分

橄榄石: Y984028 中橄榄石的成分与岩石结构具

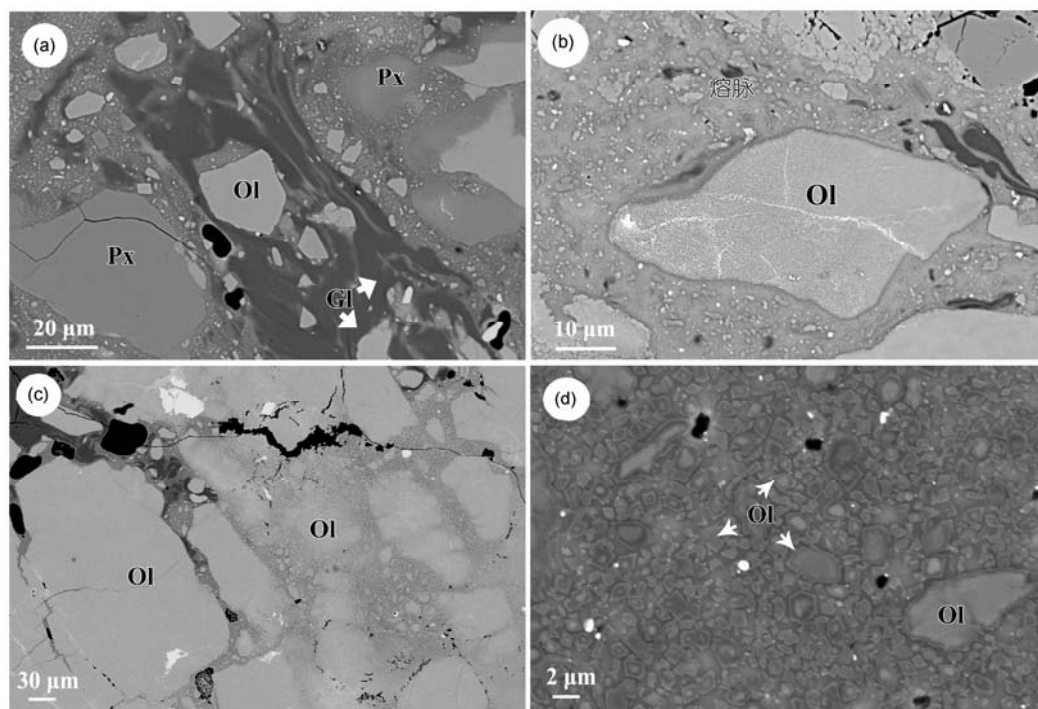


图4 Y984028 中的冲击熔脉

(a) 熔脉中的橄榄石(Ol)和辉石(Px), 熔脉中可见典型的流动结构, 主要为深黑色条带状长石玻璃(Gl)组成, 长石玻璃间可见细带状橄榄石、辉石熔体(亮灰色); (b) 熔脉中的橄榄石碎屑, 可见明显的破碎和冲击后熔融特征; (c) 熔脉中的粒状橄榄石因部分熔融, 边缘部分为重结晶的细粒颗粒, 轮廓不清晰; (d) 熔脉中呈环带的橄榄石颗粒

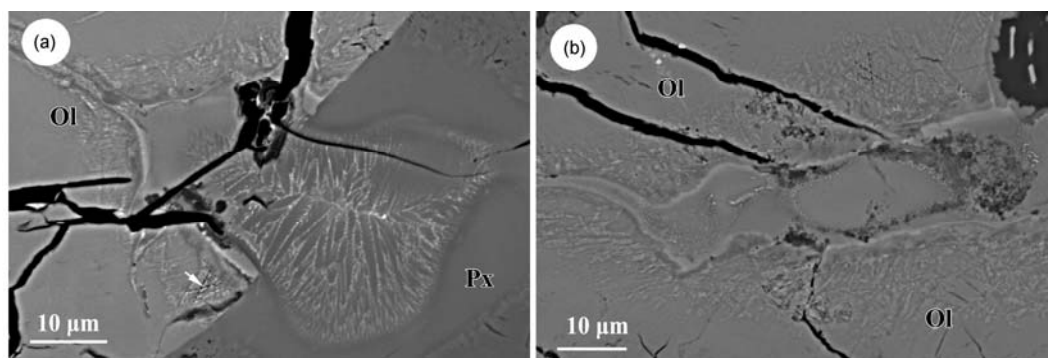


图5 Y984028 中冲击形成的细熔脉

(a) 冲击细脉中的辉石(Px)呈树枝状, 被光滑的辉石包裹, 细熔脉边部的橄榄石(Ol)有两个方向的出溶条带; (b) 橄榄石颗粒中的细脉, 其中橄榄石(Ol)也有2个方向的出溶条带

有相关性(图 6). 嵌晶区域的橄榄石 FeO 含量为 $27.8 \pm 1.5 \text{ mol\%}$ ($25.5 \text{ mol\%} \sim 30.8 \text{ mol\%}$ (mol%, 摩尔百分, 余同)), 明显低于粒间区域的 FeO 含量 ($31.4 \pm 0.9 \text{ mol\%}$, $29.6 \sim 33.5 \text{ mol\%}$). 电子探针数据显示两种结构的橄榄石颗粒从核部到边部的化学成分非常均一(表 2). 所有的橄榄石含少量 MnO ($0.54 \pm 0.05 \text{ wt\%}$) 和 CaO ($0.18 \pm 0.06 \text{ wt\%}$) (wt%, 重量百分, 余同). 橄榄石的 FeO/MnO 质量比与岩石结构无关, 为 $49.1 \pm$

3.2. 橄榄石代表性电子探针成分见表 2.

易变辉石: 与橄榄石相似, 易变辉石的成分也与岩石结构有关(图 7 和 8). 与粒间区域的易变辉石 ($\text{Fs}_{24.6-29.8}$) 相比, 嵌晶区域的易变辉石 FeO 含量较低 ($\text{Fs}_{21.4-23.9}$) (图 7). 易变辉石的次要元素与主量元素相似, 与岩石结构相关. 易变辉石在粒间区域的 Al_2O_3 , TiO_2 和 CaO 含量高于嵌晶区域, 分别为 $0.64 \pm 0.36 \text{ wt\%}$, $0.17 \pm 0.13 \text{ wt\%}$ 和 $3.15 \pm 0.98 \text{ wt\%}$ (粒间区域);

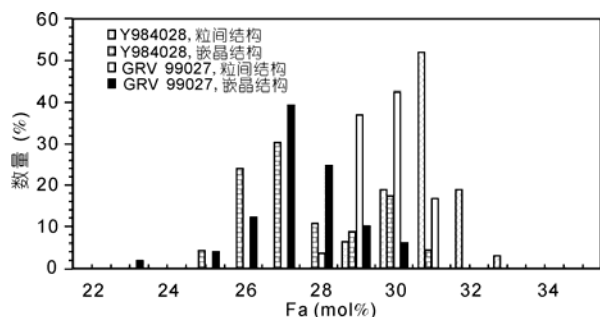


图6 橄榄石 Fa 值频谱分布图

与嵌晶区域的橄榄石相比, Y984028 陨石粒间区域的橄榄石明显富 FeO, 与 GRV 99027 的橄榄石频谱分布非常相似, 嵌晶区域与粒间区域的橄榄石成分差异比 GRV 99027 稍大^[13]

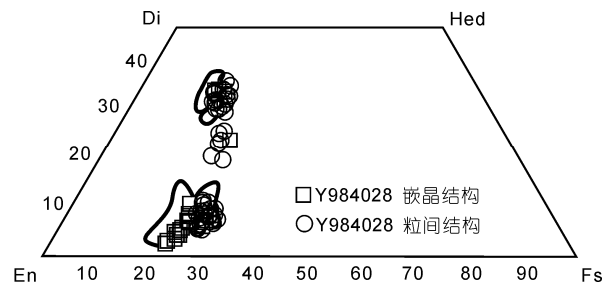


图7 Y984028 中易变辉石和普通辉石的四端元组分图

嵌晶区域与粒间区域的易变辉石有明显的成分差异, 嵌晶区域易变辉石相对贫 FeO; 普通辉石几乎没有差异. 黑线圈出区域为 GRV 99027 辉石的成分分布范围^[13]

表2 Y984028 主要和次要矿物代表性电子探针数据^{a)}(wt%)

	粒间区域										嵌晶区域						岩浆包裹体			
	Chm ^{a)}	Ilm ^{b)}	Ol ^{b)}	Ol ^{a)}	Pig ^{b)}	Pig ^{a)}	Aug ^{a)}	Aug ^{a)}	Pl ^{a)}	Pl ^{a)}	Chm ^{a)}	Ol ^{a)}	Ol ^{b)}	Pig ^{a)}	Pig ^{b)}	Aug ^{b)}	Aug ^{a)}	Aug ^{b)}	Gl ^{a)}	Si ^{a)}
SiO ₂	n.d.	n.d.	37.5	37.3	52.4	53.6	52.4	52.4	55.6	60.2	0.08	38.8	38.6	55.5	55.0	52.3	49.1	46.2	69.9	92.9
TiO ₂	15.8	52.9	n.d.	n.d.	0.62	0.48	1.30	0.98	0.12	0.15	1.26	n.d.	0.06	0.14	0.16	0.45	1.68	3.49	0.46	0.32
Al ₂ O ₃	5.65	n.d.	n.d.	n.d.	1.71	0.98	1.61	1.13	27.5	24.6	7.36	n.d.	n.d.	0.55	0.59	2.14	5.28	10.8	20.2	4.08
Cr ₂ O ₃	26.3	1.15	n.d.	n.d.	0.75	0.38	0.78	0.42	n.d.	n.d.	55.7	n.d.	0.07	0.46	0.40	0.75	0.29	n.d.	n.d.	n.d.
FeO	46.0	39.1	27.6	28.1	16.4	16.5	10.0	14.1	0.45	0.39	28.4	22.4	23.0	14.5	14.3	8.89	7.68	12.8	1.51	0.25
MnO	0.72	0.78	0.54	0.58	0.57	0.62	0.44	0.54	n.d.	n.d.	0.62	0.47	0.41	0.48	0.54	0.41	0.21	0.32	0.10	n.d.
MgO	3.64	4.96	34.1	34.0	21.9	22.3	16.6	19.2	0.14	n.d.	5.00	36.0	37.4	26.2	24.4	16.5	11.6	5.74	0.46	0.06
CaO	n.d.	n.d.	0.12	0.16	4.77	4.79	16.4	10.1	10.4	5.88	0.05	0.15	0.16	2.71	4.65	17.1	22.0	21.0	3.83	0.79
Na ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.15	0.11	0.34	0.19	5.15	7.09	n.d.	n.d.	n.d.	0.05	0.07	0.26	0.30	0.31	3.46	0.81
K ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.42	1.25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.21	0.05
总和	98.1	99.0	100.0	100.2	99.3	99.7	99.8	99.0	99.8	99.7	98.6	98.0	99.8	100.7	100.2	98.9	98.2	100.8	100.1	99.2
Fa/Fs/An			31.2	31.7	26.7	26.5	16.5	23.0	51.4	29.1		25.8	25.6	22.4	22.5	14.7	13.6	25.6		
Fo/Wo/Or			68.8	68.3	9.9	9.9	34.7	21.1	2.5	7.4				5.4	9.3	36.4	49.8	53.9		

*) Chm, 铬铁矿; Ilm, 钛铁矿; Ol, 橄榄石; Pig, 易变辉石; Aug, 普通辉石; Pl, 长石; Si, 石英; Gl, 长石质玻璃. a) 核部; b) 边部; n.d. 低于检测限

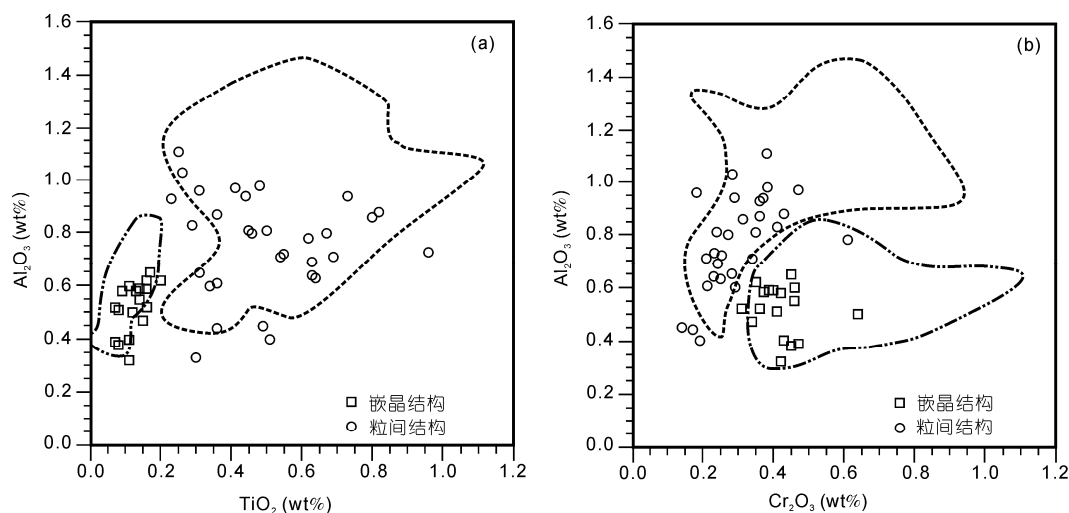


图8 Y984028 与 GRV 99027 易变辉石的次要元素比较

(a) Y984028 的主晶易变辉石 TiO₂ 含量较低, 明显不同于粒间结构的易变辉石, Al₂O₃ 与 TiO₂ 含量呈正相关. (b) Y984028 中易变辉石的 Al₂O₃ 与 Cr₂O₃ 也与岩石结构相关, 两者有明显不同. 虚线圈出区域为 GRV 99027 的成分分布范围^[13]

0.83 ± 0.35 wt%, 0.54 ± 0.29 wt%和 4.41 ± 0.82 wt% (嵌晶区域). 相比, 2种结构中的 Cr_2O_3 含量几乎相同 (0.12 wt%~ 1.01 wt%). 另外, 嵌晶区域的 Al_2O_3 含量与 CaO 和 TiO_2 有正相关关系, 而粒间区域不具有这种相关性(图 8). 从单个辉石颗粒的核部与边部成分看, 嵌晶区域与粒间区域的易变辉石均没有明显的环带特征(表 2), 它们的 FeO/MnO 质量百分比为 27.8 ± 2.3 . 代表性电子探针成分见表 2.

普通辉石: 普通辉石主要产出于粒间区域和嵌晶区域的易变辉石边沿. 与易变辉石不同, 粒间区域与嵌晶区域的普通辉石成分几乎一样(图 7), 普通辉石的成分可从 $\text{En}_{42.6}\text{Fs}_{13.1}\text{Wo}_{44.2}$ 变化至 $\text{En}_{55.9}\text{Fs}_{23.0}\text{Wo}_{21.1}$. 普通辉石中的次要元素主要有 Al_2O_3 (0.71 wt%~ 5.73 wt%), TiO_2 (0.30 wt%~ 1.90 wt%), Cr_2O_3 (0.09 wt%~ 0.95 wt%)和 MnO (0.27 wt%~ 9.56 wt%). Al_2O_3 和 Cr_2O_3 的含量与 CaO (0.11 wt%~ 19.64 wt%) 含量呈正相关. 普通辉石的 FeO/MnO 质量百分比为 25.2 ± 2.4 . 代表性电子探针成分见表 2.

长石: 在高对比度模式下, 根据背散射电子图像的亮度差异可以区分不同的长石颗粒(图 2). 定量分析结果也说明明暗不同的长石具有成分差异, 亮灰色的长石富 CaO , 暗灰色的长石富 K_2O (图 9). 电子探针剖面分析结果表明, 明暗不同的长石颗粒成分没有成分环带. 长石中含少量 FeO (0.17 wt%~ 0.70 wt%, 主要 <0.60 wt%), TiO_2 (<0.26 wt%) 和 MgO (<0.32 wt%). 富 K 长石($\text{An}_{12.5}\text{Ab}_{46.6}\text{Or}_{40.8}$)仅在岩浆包裹体中有产出. 代表性探针分析点见表 2.

铬铁矿: 粒间区域与嵌晶区域的铬铁矿有明显不同的成分分布(图 10). 嵌晶区域的铬铁矿贫 TiO_2 (1.12 wt%~ 1.93 wt%), 单颗粒成分均一, 且 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 的原子比在 Al-Cr-2Ti 三角图上沿 Al-Cr 连线分布. 与嵌晶区域的铬铁矿相比, 粒间铬铁矿成分较复杂, 其成分与产状有关. 当被大颗粒的橄榄石包裹时, 铬铁矿的成分与嵌晶铬铁矿相似, 贫 TiO_2 (1.07 wt%~ 3.17 wt%), 但变化范围稍大. 粒间区域的铬铁矿大部分都富 TiO_2 (6.21 wt%~ 15.8 wt%), Cr/Al 原子比值近似为常数(~ 4.1). 一些充填在粒间

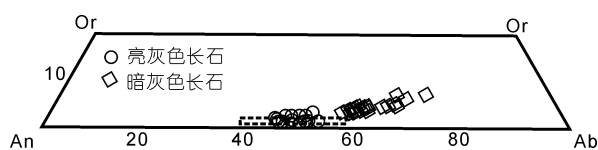


图9 Y984028与GRV 99027(虚线区域[13])长石成分对比

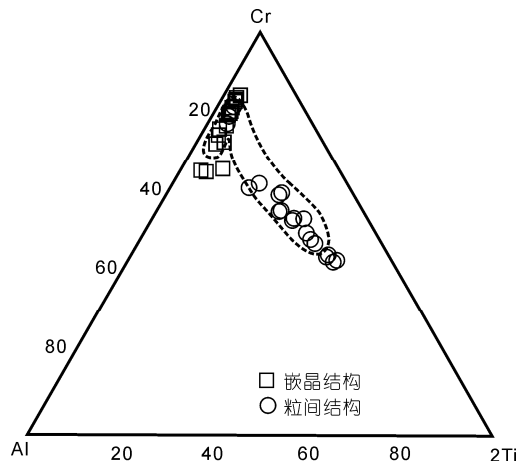


图10 Y984028中铬铁矿的成分

嵌晶铬铁矿贫 TiO_2 , 粒间铬铁矿富 TiO_2 , 两者 Al_2O_3 含量差别很小. 虚线圈出位置为 GRV 99027 的铬铁矿成分^[13]

的粗粒铬铁矿具有成分环带, 核部贫 TiO_2 (1.14 wt%~ 1.18 wt%). 当铬铁矿与钛铁矿伴生时, TiO_2 含量从铬铁矿的核部(14.2 wt%~ 15.3 wt%)向钛铁矿方向递减 (10.4 wt%~ 12.2 wt%). 代表性铬铁矿电子探针成分见表 2.

钛铁矿: 钛铁矿颗粒本身及不同颗粒之间的成分都比较均一, 主要成分为 TiO_2 (52.8 ± 1.1 wt%) 和 FeO (39.3 ± 0.9 wt%); 含有少量 MgO (4.33 wt%~ 5.90 wt%), MnO (0.77 wt%~ 0.90 wt%) 和 Cr_2O_3 (0.48 wt%~ 1.42 wt%). 代表性电子探针成分可见表 2.

3 讨论

3.1 与其他二辉橄榄岩质火星陨石的相似性

Y984028 的岩石结构和矿物成分与 GRV 99027 非常相似. 它们都由两种不同的岩石结构组成: 嵌晶结构和粒间结构. 嵌晶结构主要由橄榄石客晶、易变辉石主晶和自形铬铁矿包裹体组成; 粒间结构由自形-半自形橄榄石、易变辉石、普通辉石和粒间充填的长石玻璃组成, 粒间常有白磷钙矿、钛铁矿、富 Ti 铬铁矿、磁黄铁矿和斜锆石产出. 另外, Y984028 与 GRV 99027 中的矿物成分也非常接近. 矿物成分均与产状有关, 橄榄石和辉石在嵌晶区域相对贫 FeO , 铬铁矿相对贫 TiO_2 .

虽然二辉橄榄岩质火星陨石的岩石结构非常相似, 但模式含量变化较大(表 1), 可能与选样的不均一性有关, 如长石玻璃多产出于粒间区域. 与其他二

辉橄榄岩质火星陨石相比, Y984028 与 GRV 99027 在粒间区域的长石玻璃模式含量均很低(表 1), 表明这两个样品本来就贫长石玻璃。虽然二辉橄榄岩质火星陨石一般在嵌晶区域贫长石玻璃, 但 ALHA77005 和 LEW 88516 在嵌晶区域的长石玻璃含量与 Y984028 和 GRV 99027 粒间区域的长石玻璃含量相当(表 1)。Y984028 嵌晶区域的辉石含量(58.3 vol%)明显高于橄榄石的含量(39.6 vol%), 与 GRV 99027 的模式含量相似(67.8 vol% vs. 30.9 vol%)。相比, ALHA77005 和 LEW 88516 明显富橄榄石(表 1)。

Y984028 的矿物成分与 GRV 99027 非常相似。Y984028 的橄榄石成分分布几乎与 GRV 99027 重叠(图 6), 均有 2 个峰, 分别在 Fa_{27} 和 Fa_{30-31} 处。Y984028 的辉石成分也落在 GRV 99027 的辉石成分变化范围内(图 7 和 8)。Y984028 与 GRV 99027 的铬铁矿成分也非常接近(图 10)。两者长石玻璃的化学成分差异最大, Y984028 的长石 CaO 含量(An_{23-55})变化明显大于 GRV 99027(An_{42-61})(图 9)。

虽然 Y984028 的岩石结构和矿物成分与 GRV 99027 非常接近, 但 Y984028 不是 GRV 99027 的成对陨石。Y984028 可见诸多冲击变质特征, 如长石玻璃以及其他硅酸盐熔体形成的流动结构、重结晶形成细粒化的橄榄石和铬铁矿角砾等, 这些特征与 GRV 99027 和其他二辉橄榄岩质火星陨石明显不同。一种可能是, Y984028 与其他二辉橄榄岩质火星陨石来自火星的同一岩浆房, 在同一次撞击事件中离开母体。或者, Y984028 来自火星的另一个位置另一次撞击事件。要证实以上推断, 需要开展 Y984028 的宇宙暴露历史研究。

3.2 卸压阶段的淬火特征

与其他二辉橄榄岩质火星陨石相似, Y984028 也经历过强烈的冲击变质作用, 其中的长石已经全部转变成玻璃, 可见网状冲击熔脉。Y984028 中的长石在正交偏光下为全消光, 表明该陨石遭受撞击后还经历了微弱的热变质, 在细脉区域中可见光滑的辉石玻璃也证明了这一点。与之对比, GRV99027 在撞击后, 经历的热变质较强, 其长石玻璃和熔融囊已经高度重结晶^[13]。在 ALH 77005 中也发现有长石玻璃^[2,4]和熔融囊的部分重结晶现象^[24]。

Y984028 的熔脉非常特殊, 其中包含大量的常温常压矿物相碎屑、长石玻璃及共生铁镁质硅酸盐熔

体普遍发育流动结构、广泛发育橄榄石和铬铁矿的细粒化结构。没有发现橄榄石、辉石和长石等矿物的高压多形不可能是退变质所致, 因为 Y984028 在冲击事件后, 仅遭受了轻微的热变质作用。上述这些特征表明, Y984028 在撞击过程中发生了部分熔融, 在压力峰值卸载后, 在较低压力下发生淬火。如果熔脉在高压下发生淬火, 那么橄榄石和辉石的高压相则可以从熔体中结晶析出, 如普通球粒陨石中发现的大量高压相矿物^[23]。

熔脉中产出大量的矿物碎屑表明撞击产生的温度不足以使 Y984028 发生大范围熔融, 仅在局部发生了较弱的部分熔融, 最后在熔脉中残留了大量的矿物碎屑。这些特征与普通球粒陨石有很大差异, 后者的冲击熔脉中常残留粗粒浑圆状的围岩角砾。Y984028 很可能在冲击压力释放后发生了绝热熔融。在 Y984028 的熔脉中, 大部分长石已经发生熔融, 其次有部分辉石发生熔融, 橄榄石主要以矿物角砾的形式散布在熔脉中, 不同矿物发生部分熔融的比例为长石>辉石>橄榄石, 这一趋势可能与三者的熔点相关, 在常压下的熔融温度为长石(约 1300~1400℃)<辉石(~1500℃)<橄榄石(1900℃)。

熔脉中橄榄石和铬铁矿发育细粒化结构表明 Y984028 最初开始熔融的温度接近橄榄石固相线, ~1900℃, 该温度落在铬铁矿的熔融温度范围内(约 1850~2200℃), 因而可以观察到橄榄石和铬铁矿的边缘因重结晶形成细粒化结构。由于辉石(Fs_{15-27})的熔融温度比橄榄石($Fa_{29.6-33.5}$)的熔融温度低, 所以冲击熔脉的成分与全岩相比要富 $Mg\#$ 。在冷却过程, 橄榄石先从熔体中结晶析出, 其成分与残留的橄榄石相比明显贫 FeO 。随着橄榄石结晶程度增加, 在熔体中同时可能伴随有金属和硫化物的氧化过程, 熔体中的 $Mg\#$ 降低, 最后在残留橄榄石的边部形成富 FeO 的薄边, 形成图 4(d)中所示的环带结构。

另一种可能性是 Y984028 与高冲击强度的普通球粒陨石相似, 遭受强烈撞击形成熔脉, 但是其冲击事件的 P-T-t 历史较为特殊, 压力释放得较快而温度一直相对较高, 因此其温压条件没有达到林伍德石、镁铁榴石等高压矿物形成的范围。然而, 依据该模型应该在熔脉中可以观察到强烈的熔融特征, 与 Y984028 熔脉中残留大量的不规则矿物碎屑相冲突。另外, 冲击细脉(10 μm 宽)的结构特征显示其在压力卸载前就已经淬火, 然而在这些区域也没有发现高压

矿物的产出,这一点也与上述 P-T-t 演化过程不相符.

在冲击事件后, Y984028 基岩中的所有长石颗粒已经转变成玻璃相, 在其他火星陨石也发现长石颗粒在高温高压下熔融淬火形成的熔长石, 然而这两者的形貌结构以及形成机制有明显的不同^[25]. 因为 Y984028 基岩中大多数长石玻璃颗粒仍然保留其原始的形貌轮廓, 边界清晰平直, 并未出现明显熔融流动结构; 长石玻璃内部非常均匀, 未混入橄榄石和辉石碎屑或熔体. 此外, 共生的长石颗粒在背散射电子图像上可见清晰的边界和亮度差异(图 2(a)和(b)), 说明没有发生过熔融. 电子探针成分剖面分析结果表明这些长石颗粒成分均匀, 没有出现环带. Y984028 中长石玻璃的岩石矿物学特征表明其并未经历过熔融淬火的过程.

4 结论

Y984028 嵌晶区域和粒间区域的橄榄石、辉石和

铬铁矿的成分具有双峰分布, 嵌晶区域的橄榄石和辉石贫铁, 铬铁矿贫钛, 而粒间区域的橄榄石和辉石富铁, 铬铁矿富钛, 为典型的二辉橄榄岩质火星陨石特征, 与 GRV 99027 具有非常相似的岩石学和矿物学特征. 然而, Y984028 与 GRV 99027 在冲击特征上有明显的差异, 表明两者不是成对陨石.

Y984028 遭受了强烈的冲击作用, 形成了冲击熔脉, 并且基岩中的全部长石转变成了玻璃相. 正交偏光下长石的全消光, 以及熔脉中玻璃相, 表明 Y984028 在主撞击事件后没有遭受明显的热变质. Y984028 冲击熔脉中包含大量不规则矿物碎屑, 橄榄石和铬铁矿普遍发育细粒化结构, 但未转变成矿物的高压相. 这些特征表明 Y984028 在撞击压力释放中发生了绝热熔融, 然后在低压下淬火冷却. 在基岩中, 组成不同的长石颗粒具有清晰边界, 且无明显的成分环带特征, 表明基岩中的长石玻璃没有经历熔融, 而是固-固相变形成.

参考文献

- 1 Harvey R P, Wadhwa M, McSween Jr H Y, et al. Petrography, mineral chemistry, and petrogenesis of Antarctic shergottite LEW88516. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57: 4769–4783
- 2 Ikeda Y. Petrography and petrology of the ALH-77005 shergottite. *Antarct Meteorite Res*, 1994, 7: 9–29
- 3 Ikeda Y. Petrology and mineralogy of the Y-793605 Martian meteorite. *Antarct Meteorite Res*, 1997, 10: 13–40
- 4 Treiman A H, McKay G A, Bogard D D, et al. Comparison of the LEW88516 and ALHA77005 Martian meteorites: Similar but distinct. *Meteoritics*, 1994, 29: 581–592
- 5 Gleason J D, Kring D A, Hill D H, et al. Petrography and bulk chemistry of Martian lherzolite LEW88516. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 4007–4014
- 6 Mikouchi T, Miyamoto M. Yamato-793605: A new lherzolitic shergottite from the Japanese Antarctic meteorite collection. *Antarct Meteorite Res*, 1997, 10: 41–60
- 7 Borg L E, Nyquist L E, Wiesmann H, et al. Constraints on the petrogenesis of Martian meteorites from the Rb-Sr and Sm-Nd isotopic systematics of the lherzolitic shergottites ALH77005 and LEW88516. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66: 2037–2053
- 8 Morikawa N, Misawa K, Kondorosi G, et al. Rb-Sr isotopic systematics of lherzolitic shergottite Yamato-793605. *Antarct Meteorite Res*, 2001, 14: 47–60
- 9 Eugster O, Polnau E. Mars-Earth transfer time of lherzolite Yamato-793605. *Antarct Meteorite Res*, 1997, 10: 143–149
- 10 Eugster O, Weigel A, Polnau E. Ejection times of Martian meteorites. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 2749–2757
- 11 孔屏, Fabel D, Brown R, 等. 南极格罗夫山火星陨石 GRV 99027 的宇宙射线暴露年龄. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 1020–1023
- 12 林杨挺, 王道德, 缪秉魁, 等. 南极格罗夫山陨石 GRV 99027: 一个新的火星陨石. *科学通报*, 2003, 48: 1806–1810
- 13 Lin Y T, Guan Y B, Wang D D, et al. Petrogenesis of the new lherzolitic shergottite Grove Mountains 99027: Constraints of petrography, mineral chemistry, and rare earth elements. *Meteorit Planet Sci*, 2005, 40: 1599–1619
- 14 Lin Y T, Qi L, Wang G Q, et al. Bulk chemical composition of lherzolitic shergottite Grove Mountains 99027—Constraints on the mantle of Mars. *Meteorit Planet Sci*, 2008, 43: 1179–1187
- 15 Hsu W B, Guan Y B, Wang H N, et al. The lherzolitic shergottite Grove Mountains 99027: Rare earth element geochemistry. *Meteorit Planet Sci*, 2004, 39: 701–709
- 16 Mikouchi T, Kurihara T. Mineralogy and petrology of paired lherzolitic shergottites Yamato 000027, Yamato 000047, and Yamato 000097: Another fragment from a Martian “lherzolite” block. *Polar Sci*, 2008, 2: 175–194

- 17 Gillet P, Barrat J A, Beck P, et al. Petrology, geochemistry, and cosmic-ray exposure age of Iherzolitic shergottite Northwest Africa 1950. *Meteorit Planet Sci*, 2005, 40: 1175–1184
- 18 Miao B, Ouyang Z, Wang D, et al. A new Martian meteorite from Antarctica: Grove Mountains (GRV) 020090. *Acta Geol Sin*, 2004, 78: 1034–1041
- 19 Mikouchi T, Kurihara T, Miyamoto M. Petrology and mineralogy of RBT 04262: Implications for stratigraphy of the Iherzolitic shergottite igneous block. In: LPS XXXIX. League City, Texas: National Aeronautics and Space Administration, 2008. 2403
- 20 Usui T, Sanborn M E, Wadhwa M, et al. Petrogenesis of geochemically enriched Iherzolitic shergottites RBT 04261 and RBT 04262. In: 71st Annual Meteoritical Society Meeting. Matsue: National Aeronautics and Space Administration, 2008, 43(Suppl): 5052
- 21 Hu S, Feng L, Lin Y T. Petrology and mineral chemistry of the Y984028 Iherzolitic shergottite. In: *Antarct Meteorit Symp XXXII*. Tokyo: National Institute of Polar Research, 2009. 22–23
- 22 Delaney J S. Petrological comparison of LEW 88516 and ALHA 77005 shergottites. *Meteoritics*, 1992, 27: 213–214
- 23 Chen M, Sharp T, El Goresy A, et al. The majorite-pyrope + magnesiowüstite assemblage: Constraints on the history of shock veins in chondrites. *Science*, 1996, 271: 1570–1573
- 24 Walton E L, Herd C D K. Dynamic crystallization of shock melts in Allan Hills 77005: Implications for melt pocket formation in Martian meteorites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71: 5267–5285
- 25 El Goresy A, Miyahara M, Ozawa S, et al. Liquidus high-pressure assemblages in shocked martian shergottites: Constraints to equilibrium peak shock-pressures and consequences to radiometric ages. In: 73rd Annual Meteoritical Society Meeting. New York: National Aeronautics and Space Administration, 2010. 5020