

钙长辉长无球粒陨石 NWA 11592 的岩石矿物学特征及富铁橄榄石脉成因研究

黄丽霖¹, 温日强¹, 缪秉魁², 陈国柱², 许胜才¹

(1. 贺州学院, 广西 贺州 542800; 2. 桂林理工大学 陨石与行星物质研究中心, 行星地质演化广西高校重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 灶神星是太阳系最大的硅酸盐质小行星, 它的岩石样品 (HED 族陨石) 是目前太阳系最古老的岩浆岩之一, 很有可能记录了类地行星最早期地质流体活动的重要信息。本次工作首次在一块非角砾岩平衡型的 Eucrite NWA 11592 中发现了较粗长的富铁橄榄石脉。通过对 NWA 11592 陨石进行详细的岩相学和地球化学特征研究, 将 NWA 11592 陨石划为玄武质非角砾岩型 Eucrite, 冲击变质程度至少为 S4, 热变质程度为 6 型。NWA 11592 中富铁橄榄石脉最有可能为含 H₂O 流体沿裂隙的沉淀产物, 反应系统应是开放且较为氧化的 (f_{O_2} 达 IW+0.9), 且应发生在灶神星浅层地壳 > 4 km 的埋藏深度。含 H₂O 流体渗透作用除更多地发生在灶神星表面或近地表外, 还有可能发生在灶神星内部的浅层地壳中。

关键词: 非角砾岩平衡型 Eucrite; 富铁橄榄石脉; 岩石矿物学; 流体作用

中图分类号: P185.83; P588.12⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)04-0746-13

The petrological and mineralogical characteristics of Eucrite NWA 11592 and the study on the genesis of the Fe-rich olivine veins

HUANG Li-lin¹, WEN Ri-qiang¹, MIAO Bing-kui², CHEN Guo-zhu² and XU Sheng-cai¹

(1. Hezhou University, Hezhou 542800, China; 2. Institute of Meteorites and Planetary Materials Research, Key Laboratory of Planetary Geological Evolution at Universities of Guangxi Province, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Vesta is the largest silicate asteroid in the solar system, and its rock samples (HED meteorites) are among the oldest magmatic rocks in the solar system, possibly recording important information about the earliest geological fluid activities of terrestrial planets. For the first time in this work, a thicker and longer Fe-rich olivine vein was found in a piece of unbreccia equilibrium Eucrite NWA 11592. Through detailed research of petrographic and geochemical characteristics of the NWA 11592 meteorite, NWA 11592 is classified as basaltic unbreccia Eucrite, with an impact metamorphism degree of at least S4 and a thermal metamorphism degree of type 6. The Fe-rich olivine veins in NWA 11592 is most likely to be the precipitation products of H₂O-bearing fluids along the fractures. The reaction system should be open and relatively oxidized (f_{O_2} up to IW+0.9), and it should occur at a burial depth of > 4 km in the shallow crust of Vesta. The infiltration of H₂O-bearing fluids not only occurs more on the surface or near the surface of Vesta, but may also occur in the shallow crust of Vesta's interior.

收稿日期: 2021-10-19; 接受日期: 2022-01-12; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD22035157); 广西自然科学基金 (2018GXNSFBA281129); 贺州学院博士科研启动基金 (HZUBS202102)。

作者简介: 黄丽霖 (1992-), 女, 讲师, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, 从事陨石学与地质学研究, E-mail: 1048248817@qq.com; 通讯作者: 温日强 (1990-), 男, 工程师, 从事地质工程与测绘工程研究, E-mail: 596825854@qq.com。

Key words: un-breccia equilibrium Eucrite; Fe-rich olivine veins; petrology and mineralogy; fluid action

Fund support: Guangxi Scientific Base and Talent Special Projects (AD22035157); National Natural Science Foundation of Guangxi (2018GXNSFBA281129); Doctoral Research Startup Fund of Hezhou University (HZUBS202102)

HED 族陨石 (howardite-eucrite-diogenite) 为超镁铁质或镁铁质分异型无球粒陨石, 又被大多数学者称为灶神星陨石 (Mittlefehldt, 2015)。HED 族陨石有着较古老的岩浆结晶年龄 (4.55~4.43 Ga) (Boyett *et al.*, 2010), 是目前太阳系内最古老的岩浆岩之一。HED 族陨石是经过广泛熔融分异的岩浆岩, 与地球岩浆岩有着非常相似的物质组成 (Mittlefehldt, 2015)。但由于灶神星的岩浆演化时间非常短 (约 10 Ma), 无后期较年轻的岩浆活动叠加, 热变质作用仅仅局限于岩浆作用过程或岩浆期后非常短的时间段内 (Yamaguchi *et al.*, 1996), 同时灶神星上缺乏地质构造运动、生物活动以及挥发分, 因而灶神星岩石可能保存了太阳系最早期的流体蚀变等信息, HED 族陨石很有可能记录了类地行星较早期变质作用的岩石矿物学证据。

小行星含挥发分流体研究一直是陨石学和天体化学研究的重要议题。较早期的研究中, 灶神星被认为是挥发分贫瘠的小行星, 富挥发分流体不参与岩浆结晶、熔融和亚固相线热变质过程 (Papike, 1998)。但近些年, 一些学者通过对 HED 族陨石中次生蚀变矿物的研究, 发现了 HED 陨石中可能存在含 H₂O 溶液作用的间接证据 (如 Treiman *et al.*, 2004; Barrat *et al.*, 2011; Warren *et al.*, 2014)。目前, 脉状矿物是 HED 族陨石报道较多的次生蚀变现象。它们分布的产状范围广, 出现在不同类型岩屑中, 如富铁橄榄石脉在复矿碎屑角砾岩 Eucrites (钙长辉长无球粒陨石) 的单个岩屑 (Buchanan *et al.*, 2000)、单矿碎屑角砾岩型 Eucrites (Roszjar *et al.*, 2011)、非平衡型或热变质程度低的 Eucrite (Barrat *et al.*, 2011)、平衡型热变质程度较高的角砾岩质 Eucrites (Warren *et al.*, 2014) 中均有发现。另外, 也有一些特殊的蚀变脉状矿物现象, 如在一块堆晶型 Eucrites (Serra de Mage) 中发现几乎纯净的石英脉 (Treiman *et al.*, 2004); 在一块平衡型热变质程度较高的 Eucrites NWA 5738 中发现成分较纯的粗长铁金属脉 (Warren *et al.*, 2014) 等。在前人对这些脉状矿物成因的讨论中, 含 H₂O 流体沉积模型, 即脉状矿物为含 H₂O 流体沿裂隙的沉淀产物是最为普遍

接受的一种成因观点 (如 Barrat *et al.*, 2011; Warren *et al.*, 2014)。

目前, HED 族陨石中关于含挥发分流体作用的研究尚存在一些不足或尚未解决的科学问题, 如研究数据较少, 发现的次生蚀变现象类型单一, 不同次生蚀变现象的成因联系、流体的来源和组分、流体作用是否发生在灶神星内部等问题尚未查明。在前人研究中, 富铁橄榄石脉仅在 Howardites (古铜钙长无球粒陨石) 或复矿碎屑角砾岩型 Eucrites 的辉石岩屑中发现, 因此缺乏确凿的证据而无法判断其到底是灶神星内部过程还是表面过程。本次工作首次在一块非角砾岩平衡型 Eucrite NWA 11592 中发现了较粗长的富铁橄榄石脉 (~3.8 mm×0.3 mm), 且 NWA 11592 具有较高的热变质程度, 这在含富铁橄榄石脉的 Eucrites 中也是较为罕见的。非角砾岩平衡型 Eucrite 中富铁橄榄石脉的发现, 可为流体作用发生的环境位置是否为灶神星内部过程等信息提供一定的线索。本次工作通过对 NWA 11592 陨石和其中新发现的富铁橄榄石脉进行详细的岩相学和地球化学特征的研究, 讨论该陨石的亚型划分, 探讨其中富铁橄榄石脉的成因, 并进一步讨论流体作用发生的环境位置等信息, 以期对灶神星变质作用的研究有新的启发, 同时为揭示太阳系类地行星早期富挥发分流体的作用方式提供一定的线索。

1 样品和测试方法

本次工作的 HED 族陨石为获得国际命名的新样品, 编号为 NWA 11592。分别对该陨石样品做了显微镜和扫描电镜岩相学观察、电子探针矿物成分分析以及电子背散射衍射分析的测试工作。

样品的分析测试工作在桂林理工大学行星地质演化广西高校重点实验室完成。岩相学、矿相学观察利用 Nikon Eclipse 50 Ipol 透反射偏光显微镜和 Zeiss Sigma 场发射扫描电镜完成。矿物化学成分测定使用 JEOL JXA-8230 型电子探针 (EPMA) 进行, 加速电压 15 kV, 束流 20 nA, 束斑 1~5 μm, 元素的氧化物检测限大于 0.02%, 标样为中国地质科学院矿

产资源研究所负责制作的国家标准天然样品,分析数据采用ZAF法校正。电子背散射衍射(EBSD)分析使用Zeiss Sigma场发射扫描电镜配备的EBSD检测器(Aztec Energy; Oxford Instruments)完成,加速电压20 kV,束流10 nA,工作距离19 mm。另使用AZtec 4.0系统以及美国矿物协会数据库中的晶体结构对测试中获得的EBSD矿物衍射花样进行晶体结构匹配识别。

2 岩石矿物学特征

2.1 NWA 11592 的岩石矿物学特征

NWA 11592 陨石为非角砾岩(图1),主要造岩矿物及模式含量分别为易变辉石(17%,体积分数)、普通辉石(24%)和斜长石(45%),次要矿物包括橄榄石(8%)、SiO₂相(石英或非晶质体,1%)和不透明矿物(钛铁矿、陨硫铁、铬铁矿或尖晶石和极少量铁金属;体积分数5%)以及极少量陨磷钙钠石。NWA 11592 陨石具辉长-辉绿结构,主要由中粗粒它形易变/铁紫苏辉石(约0.3~1.0 mm)和粒状(约0.3~1.0 mm)



图1 NWA 11592 陨石薄片背散射电子图像全拼图
Fig. 1 BSE images of the thin section of NWA 11592

或板条状斜长石(约100 μm×300 μm~0.5 mm×1.5 mm)组成。辉石平均Fe/Mn值(摩尔比)为31.7,辉石颗粒均无原始岩浆结晶Fe-Mg-Ca成分环带保留,其成分较为均匀。低钙辉石包括Wo值大于5的易变辉石(Wo_{5.60}Fs_{58.4}En_{36.0}, Mg[#]为36.0)和Wo值小于5的铁紫苏辉石(Wo_{3.90}Fs_{59.5}En_{36.6}, Mg[#]为36.6)(图2,表1)。低钙辉石的EBSD衍射花样证实了部分易变辉石已转变为斜方铁紫苏辉石(图3),低钙辉石极低的Wo含量(如Wo_{1.8})也与转变斜方辉石的存在相一致(图2)。NWA 11592 低钙易变/铁紫苏辉石普遍出溶高钙普通辉石片晶(Wo_{44.5}FS_{26.6}En_{28.9}, Mg[#]为52.4),普通辉石片晶较粗,宽度从10~70 μm不等。易变辉石颗粒通常呈现云雾状外观,可观察到辉石颗粒内出现较多亚微米级不透明矿物。斜长石成分较为平衡,其成分从核部(An_{90.9}Ab_{8.73}Or_{0.36})到边部(An_{91.2}Ab_{8.75}Or_{0.25})几乎无变化,无原始岩浆结晶成分环带保留,其成分落在玄武岩质Euclite长石成分范围内(Mittlefehldt, 2015)(图4,表1)。

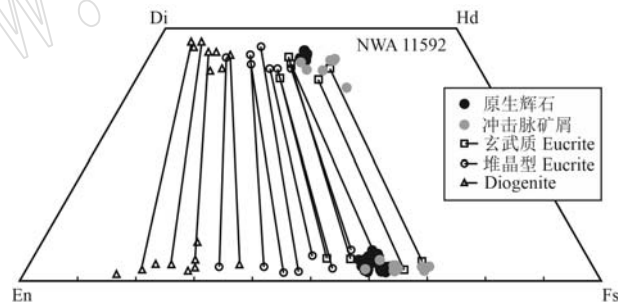


图2 NWA 11592 辉石的化学成分
Fig. 2 Compositions of pyroxene in NWA 11592
玄武质 Euclite、堆晶型 Euclite 和 Diogenites 辉石成分数据引自 Mittlefehldt (2015)
compositions data of pyroxene of basaltic Euclite, cumulate Euclite and Diogenites from Mittlefehldt (2015)

未在该 NWA 11592 陨石薄片观察到充填物集合体。副矿物 SiO₂相(包括石英和非晶质体)主要出现在冲击脉体中。铬铁矿、陨磷钙钠石和钛铁矿主要呈不规则颗粒状出现在较粗橄榄石脉体中(图5),尖晶石多呈细颗粒状在较细脉体中与富铁橄榄石颗粒断续相连(图5)。铁金属呈细颗粒分布于斜长石和橄榄石颗粒间隙。陨硫铁含量极少,呈细颗粒状出现在辉石和斜长石颗粒间隙或呈长条状被包含在尖晶石颗粒内。

NWA 11592 陨石薄片边缘可见一条较粗长的(宽度约4 mm)和几条较细的(宽约5~10 μm)冲击熔脉(图1)。冲击脉主要由玻璃基质和辉石、斜

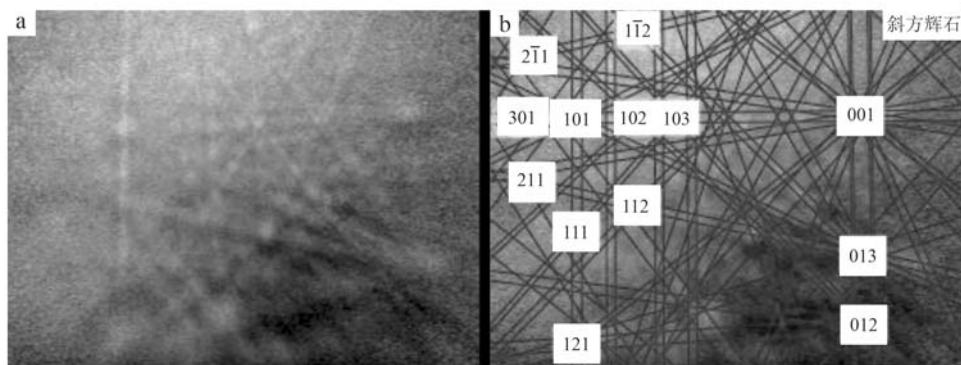


图 3 NWA 11592 中观察到的斜方辉石 EBSD 衍射花样(a) 和与其相匹配计算的斜方辉石 EBSD 模式(b) (数据库中已知矿物的衍射花样和实验所测矿物的衍射花样的平均角度偏差值 MAD=0.52)

Fig. 3 Observed EBSD pattern of orthopyroxene in NWA 11592(a) and calculated EBSD pattern of orthopyroxene, matching with the observed pattern of Fig. 3a (b) (mean angular deviation MAD=0.52)

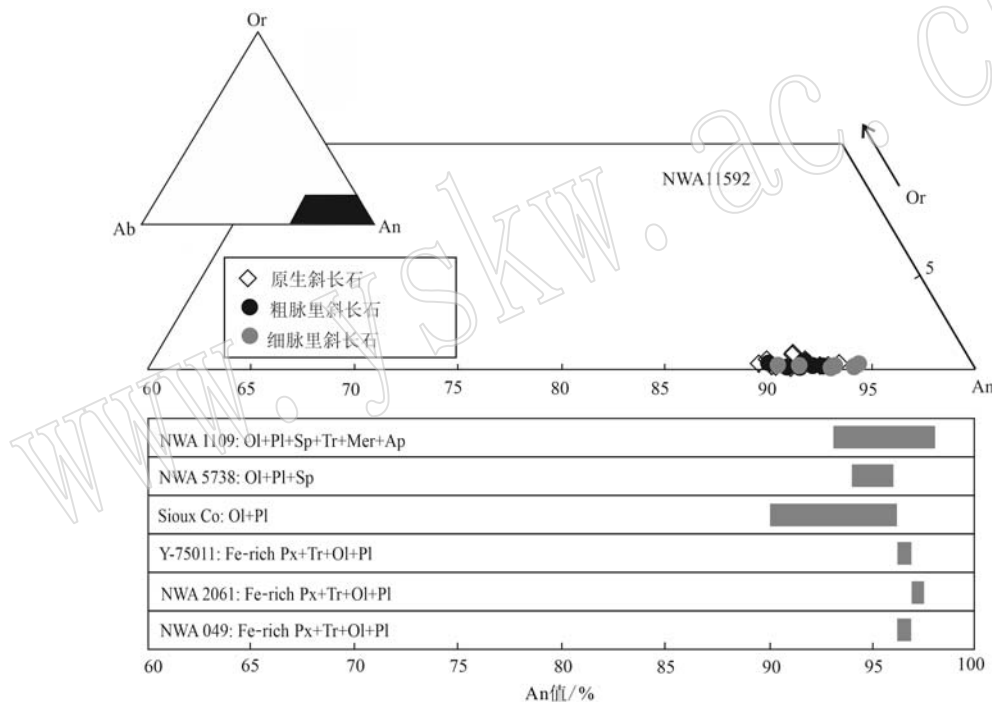


图 4 NWA 11592 富铁橄榄石脉里斜长石和原生斜长石成分图

Fig. 4 Composition of plagioclase in Fe-rich olivine veins and primary plagioclase in NWA 11592

NWA 1109, NWA 5738, Sioux Co, Y-75011, NWA 2061, NWA 049 为其它具富铁橄榄石脉的 Eucrites (Barrat *et al.*, 2011; Roszjar *et al.*, 2011; Warren *et al.*, 2014; Pang *et al.*, 2017); Ol—富铁橄榄石; Pl—斜长石; Sp—尖晶石; Tr—陨硫铁; Mer—陨磷钙钠石; Ap—磷辉石; Fe-rich Rx—富铁辉石

NWA 1109, NWA 5738, Sioux Co, Y-75011, NWA 2061, NWA 049 represent other Eucrites containing Fe-rich olivine veins (Barrat *et al.* 2011; Roszjar *et al.*, 2011; Warren *et al.*, 2014; Pang *et al.*, 2017); Ol—Fe-rich olivine; Pl—plagioclase; Sp—spinel; Tr—troilite; Mer—merrillite; Ap—apatite; Fe-rich Px—Fe-rich pyroxene

长石、橄榄石以及石英斑晶组成,可见铬铁矿、钛铁矿等副矿物矿屑。冲击脉中易变辉石斑晶亦大多出溶较粗的普通辉石片晶,片晶宽度从 10~70 μm 不等。冲击脉中不同辉石斑晶以及普通辉石出溶片晶的成分不一,易变辉石斑晶成分从 $Wo_{2.30}Fs_{58.2}En_{39.5}$ 、 $Mg^{\#}$ 为 39.5 到 $Wo_{2.80}Fs_{68.9}En_{28.3}$ 、 $Mg^{\#}$ 为 28.2 变化,

普通辉石出溶片晶成分从 $Wo_{43.3}Fs_{26.6}En_{30.1}$ 、 $Mg^{\#}$ 为 30.1 到 $Wo_{38.3}Fs_{37.0}En_{24.7}$ 、 $Mg^{\#}$ 为 24.7 变化(图 2,表 1)。冲击脉里辉石均具有与陨石主体部位相似的 Fe/Mn 值,平均为 32.9,橄榄石(Fa 值平均为 76.7)呈细颗粒矿屑分散分布,斜长石平均成分 ($An_{90.5}Ab_{6.94}Or_{2.56}$)较原生斜长石稍贫 Ca(表 1)。冲

表 1 NWA 11592 陨石代表性矿物化学成分
Table 1 Representative mineral compositions of NWA 11592

项目	辉石				冲击脉里的 铬铁矿 (N=8)	冲击脉里 的 SiO ₂ 相 (N=9)	冲击脉里 的橄榄石 (N=8)	斜长石		
	原生辉石		冲击脉里的辉石					原生斜长石		冲击脉里 的斜长石 (N=10)
	低钙辉石 (N=18)	高钙辉石 (N=21)	低钙辉石 (N=11)	高钙辉石 (N=10)				核部 (N=9)	边部 (N=8)	
SiO ₂	50.80	51.90	50.40	51.20	0.03	100.80	32.00	45.70	44.80	47.00
TiO ₂	0.13	0.28	0.18	0.35	11.10	0.07	0.06	-	0.04	-
Al ₂ O ₃	0.16	0.50	0.18	0.60	5.53	0.17	0.02	34.60	33.10	33.70
Cr ₂ O ₃	0.07	0.18	0.14	0.25	39.10	0.02	0.06	0.02	0.030	-
FeO	34.40	16.00	36.60	18.70	42.10	0.16	56.60	0.03	0.86	0.54
MnO	1.07	0.48	1.18	0.55	0.69	-	1.26	-	0.06	0.03
MgO	12.00	9.77	10.70	8.87	0.48	-	9.64	-	0.28	0.08
CaO	1.68	20.90	1.23	19.80	-	0.05	0.30	17.90	17.50	16.80
Na ₂ O	0.03	0.06	0.02	0.08	0.03	0.05	-	0.95	0.92	1.33
K ₂ O	0.02	0.03	0.02	0.02	-	-	0.02	0.06	0.04	0.09
总计	100.00	100.00	101.00	101.00	99.10	101.00	99.90	99.40	97.50	99.60
Mg [#]	38.4	52.4	34.2	45.7						
x(Fe)/x(Mn)	32.0	34.0	30.7	33.4						
En	37.00	28.90	33.30	26.40						
Fs	59.30	26.60	64.00	31.30						
Wo	3.710	44.50	2.74	42.40						
Fa							76.7			
Fo							23.3			
An								90.90	91.20	90.50
Ab								8.73	8.55	6.94
Or								0.37	0.25	2.56

注: Mg[#] = 100×Mg/(Mg+Fe); “-”表示低于 EPMA 检测限; 氧化物含量为质量分数%, 为所分析样品的平均值。

击脉中矿物出现马赛克消光, 未观察到高压矿物的存在。陨石主要造岩矿物如辉石和斜长石大多出现面状裂理, 正交偏光镜下可见波状消光现象。地球风化方面, NWA 11592 陨石矿物颗粒表面破碎, 矿物颗粒贯穿着许多被 CaCO₃ 填充的裂隙(图 1), 这些特征表明 NWA 11592 陨石经历了较强的风化作用。

2.2 富铁橄榄石脉的岩石矿物学特征

NWA 11592 包含一条较粗的(宽度约 0.3 mm)主要由粗颗粒富铁橄榄石(80%, 体积分数)、斜长石(10%)、细颗粒铬铁矿(8%)及少量钛铁矿(1%)和陨磷钙钠石(1%)组成的脉, 脉体横跨几个辉石和斜长石颗粒, 长度达到 3.8 mm(图 5a)。富铁橄榄石呈半自形-它形颗粒状, 颗粒宽度约 50~300 μm(图 5a, 5d), 脉体里斜长石呈拉长它形颗粒状(大小约 100 μm×250 μm)与橄榄石颗粒相连(图 5a, 5b), 铬铁矿呈拉长状或不规则颗粒状(大小约 40 μm×150 μm)与橄榄石颗粒相连(图 5a~5d), 钛铁矿颗粒呈不规则状(大小约 10 μm×60 μm)被包含在橄榄石颗粒中(图 5a, 5d)或与陨磷钙钠石颗粒相连(图 5a,

5e), 陨磷钙钠石呈拉长条状(大小约 10 μm×60 μm)出现在脉体橄榄石颗粒中心(图 5a, 5e)或呈细颗粒状(大小约 50 μm×50 μm)与铬铁矿颗粒相邻(图 5a, 5c)。脉体矿物与周围辉石或斜长石边界清晰, 没有出现沿橄榄石脉体的辉石富铁边或其它反应边结构。橄榄石颗粒两旁的普通辉石出溶条带没有出现尖灭等现象, 出溶条带宽度在脉体两旁是一致的。NWA 11592 陨石中还包含较多富铁橄榄石细脉, 脉体宽度约 30~50 μm, 长度约 400~600 μm, 主要由富铁橄榄石、斜长石以及少量尖晶石和陨磷钙钠石组成, 分散分布在陨石薄片(图 5f, 5g)。细脉中各矿物颗粒均具有圆滑的颗粒边缘, 矿物颗粒间通常被宿主辉石颗粒愈合, 形成断续相连的脉体。宿主易变辉石及普通辉石出溶片晶在细脉脉体两旁及脉体中断处是连续的, 亦没有出现尖灭等现象(图 5f, 5g)。

NWA 11592 粗脉和细脉中富铁橄榄石成分均落在其它 Eucrites 富铁橄榄石的成分范围内, 细脉中橄榄石(Fa_{76.9-78.8})较粗脉中橄榄石(Fa_{78.9-82.1})稍富 Fe(图 6, 表 2), 两者(粗脉橄榄石 Fe/Mn=37.7~48.8;

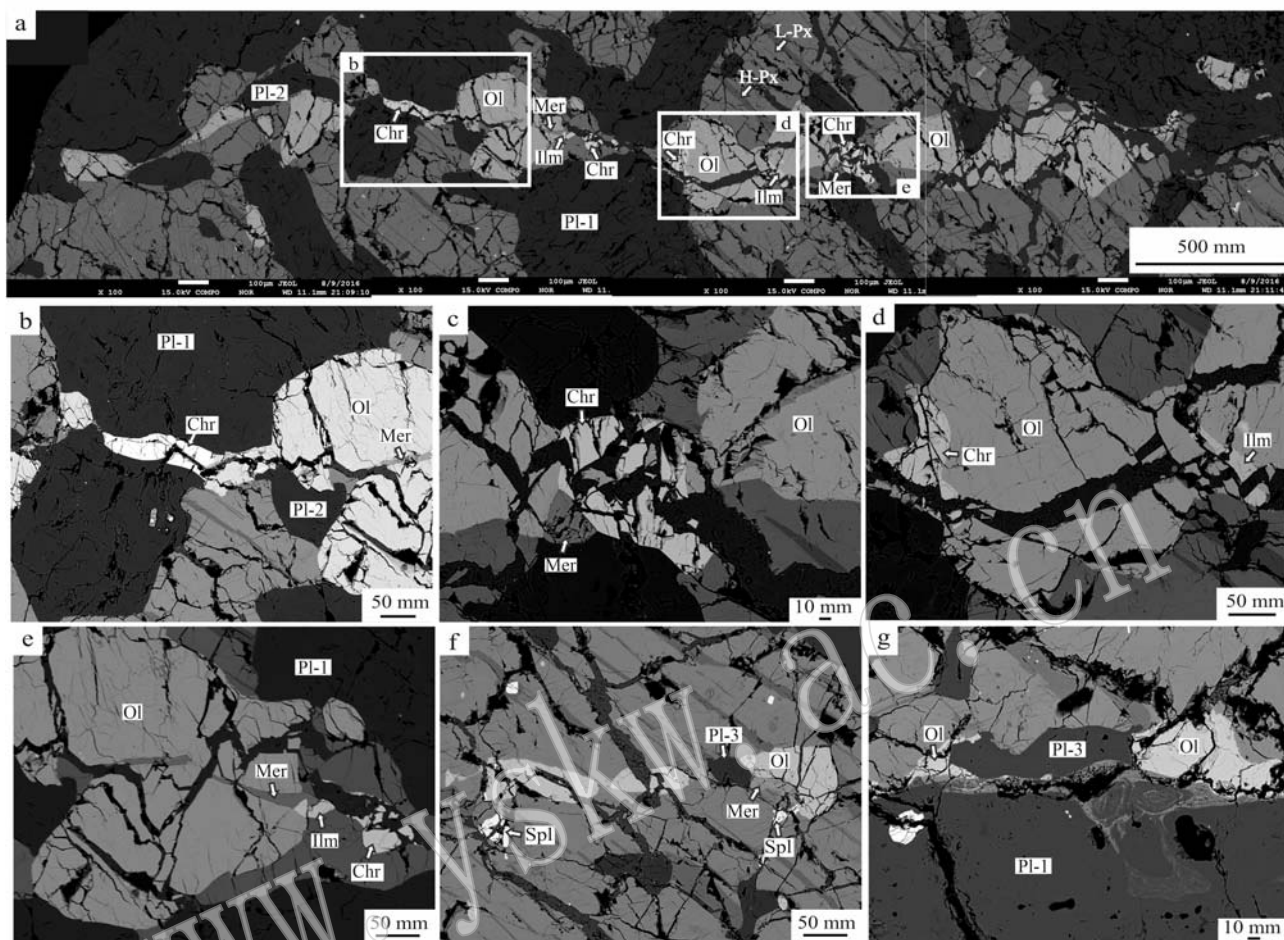


图5 NWA 11592 中富铁橄榄石脉岩矿特征的背散射图片

Fig. 5 Backscattered electron (BSE) images of the petrographic characteristics of Fe-rich olivine vein in NWA 11592

L-Px—低钙辉石; H-Px—高钙辉石; Ol—富铁橄榄石; Chr—铬铁矿; Ilm—钛铁矿; Mer—陨磷钙钠石; Spl—尖晶石;

Pl-1—原生斜长石; Pl-2—粗脉里的斜长石; Pl-3—细脉里的斜长石

L-Px—low-Ca pyroxene; H-Px—high-Ca pyroxene; Ol—Fe-rich olivine; Chr—chromite; Ilm—ilmenite; Mer—merrillite; Spl—spinel;

Pl-1—primary plagioclase; Pl-2—plagioclase in thick veins; Pl-3—plagioclase in veinlets

细脉橄榄石 $Fe/Mn = 40.5 \sim 51.7$) 具有与其它 Diogenite 中橄榄石类似的 Fe/Mn 值 ($Fe/Mn = 34.0 \sim 57.2$) (Mittlefehldt, 2015)。富铁橄榄石脉里斜长石 ($An_{89.8-94.2}Ab_{5.50-9.82}Or_{0.12-0.53}$) 总体成分范围较原生斜长石 ($An_{89.4-93.2}Ab_{6.50-10.2}Or_{0.22-0.93}$) 相差不大, 两者成分趋于平衡, 粗脉 ($An_{89.8-93.0}Ab_{6.91-9.82}Or_{0.21-0.53}$) 和细脉 ($An_{90.3-94.2}Ab_{5.52-9.44}Or_{0.11-0.32}$) 中斜长石成分范围亦没有明显区别, 两者成分范围重叠 (图 4, 表 2)。细脉中尖晶石 ($Chr_{44.5-63.8}Spl_{8.22-13.6}Usp_{22.6-47.3}$, $FeO: 41.7\% \sim 46.7\%$) 较粗脉中铬铁矿 ($Chr_{61.3-69.8}Spl_{17.1-20.6}Usp_{9.63-21.6}$, $FeO: 35.4\% \sim 39.9\%$) 稍富 Ti 和 Fe (图 7, 表 2)。根据 EPMA 数据计算, 粗脉中铬铁矿和细脉中尖晶石的化学计量均显示两者含有显著的 Fe^{3+} 组分 (粗脉铬

铁矿 $Fe_2O_3: 0.67\% \sim 2.30\%$, 细脉尖晶石 $Fe_2O_3: 0.43\% \sim 2.85\%$), 而其它玄武质 Eucrites 中铬铁矿 Fe^{3+} 组分则很低或几乎不含 Fe^{3+} ($Fe_2O_3: 0.33\% \sim 0.71\%$) (Mittlefehldt, 2015) (图 7, 表 2)。根据 Wlotzka (2005) 的方法计算得出粗脉里富铁橄榄石和铬铁矿的平衡温度范围约为 $718 \sim 788^\circ C$, 细脉里富铁橄榄石和尖晶石的平衡温度范围约为 $727 \sim 815^\circ C$ (图 8, 表 2)。此外, 在 Eucrites 正常压力范围条件下 ($< 10 MPa$), 根据 Ballhaus 等 (1990) 的计算方法, 粗脉里铬铁矿 Fe^{3+} 组分与平衡温度计算得出的氧逸度 (f_{O_2}) 范围为 $IW-0.4 \sim IW+1.7$, 细脉里氧逸度范围为 $IW-0.4 \sim IW+2.5$, 两者氧逸度范围相差不大, 平均氧逸度为 $IW+0.9$, 比其它玄武质 Eucrites 原始火成岩石

表 2 NWA 11592 富铁橄榄石脉中代表性矿物化学成分
Table 2 Chemical composition of representative minerals in NWA 11592 Fe-rich olivine veins

项目	粗富铁橄榄石脉				细富铁橄榄石脉				其它玄武质 Eucrites 中的铬铁矿 (N=12)	粗脉里斜长石 (N=8)	细脉里斜长石 (N=9)	钛铁矿 陨磷钙钠石 (N=10) 石 (N=8)		
	富铁橄榄石 (N=18)	铬铁矿 (N=9)	富铁橄榄石 (N=15)	铬铁矿 (N=11)	富铁橄榄石 (N=15)	铬铁矿 (N=11)	富铁橄榄石 (N=15)	铬铁矿 (N=11)						
SiO ₂	32.8	0.07	30.6	0.02	32.3	0.02	0.07	0.07	45	44.5	45.9	46.2	0.04	0.06
TiO ₂	-	3.53	0.02	7.91	-	8.01	17	19.6	2.8	-	-	-	54.2	-
Al ₂ O ₃	0.02	9.64	7.95	0.03	0.03	6.17	3.78	4.67	11.6	34	34.4	34.8	0.01	-
Cr ₂ O ₃	-	48.7	42.6	0.07	0.07	43.1	30.5	25.1	47.9	-	-	-	0.06	-
FeO	58.5	35.4	39.9	59.2	57.6	39.4	46.7	49.2	34.5	0.45	0.47	0.9	44.7	3.45
MnO	1.2	0.65	1.54	0.63	1.14	0.68	0.75	0.55	0.55	-	0.07	0.02	0.87	-
MgO	8.79	0.47	7.49	0.39	8.56	0.41	0.46	0.62	1	0.01	-	-	1.08	2.39
CaO	0.22	0.21	0.32	0.32	0.13	0.14	0.35	0.03	-	17.1	17.6	17.8	0.49	45.9
Na ₂ O	0.04	0.07	-	-	0.03	0.02	0.03	-	-	1.04	1.02	0.57	0.02	0.23
K ₂ O	-	-	0.02	0.02	-	-	-	-	-	0.06	0.04	0.05	0.02	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.02	0.02	0.03	46.3
Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.64
Y ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.69
La ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.63
Ce ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.09
总计	102	100	98.7	99.7	99.1	99.9	98	99.7	99.8	98.2	99.5	100	102	102
Fa	78.9	77	69.8	61.3	81.6	79.0	63.8	44.5	36.2	67.9				
Chr	-	-	20.6	17.1	-	-	13.6	8.21	10	24.6				
Spl	-	-	9.63	21.6	-	-	22.6	47.3	53.8	7.55				
Usp	-	-	23.5	31.4	-	-	34.9	14.4	6.05	18.9				
1000 Fe ³⁺ /Fe ²⁺	-	-	781	718	-	-	755	752	769	971				
t/°C ^a	-	-	-0.03	1.05	-	-	1.14	0.57	-0.6	-0.84				
log ₁₀ (vs. IW) ^b	-	-	89.8	93	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2				
An	89.8	93	90.3	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2	94.2				
Ab	9.8	6.8	9.4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5				
Or	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3				

注：“-”表示低于 EPMA 检测限；a：尖晶石和橄榄石的平衡温度根据 Wilozka (2005) 的方法计算；b：log₁₀(vs. IW)：相对于 IW(Fe-Fe_{1-x}) 缓冲剂的氧逸度，根据 Ballhaus *et al.* (1990) 的方法计算所得；氧化物含量为质量分数 w_B/%

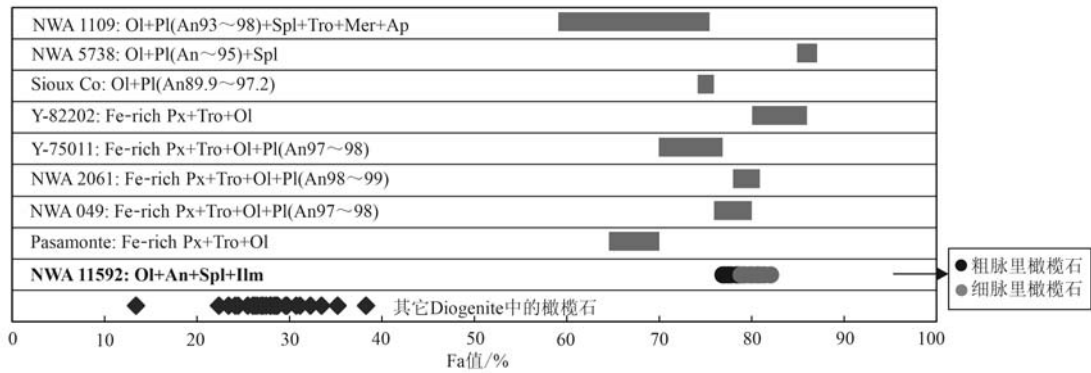


图 6 NWA 11592 富铁橄榄石脉成分图

Fig. 6 Compositions of Fe-rich olivine in NWA 11592

Ol—富铁橄榄石；Pl—斜长石；Spl—尖晶石；Tro—陨硫铁；Mer—陨磷钙钠石；Ap—磷灰石；An—钙长石；Fe-rich Px—富铁橄榄石；Ilm—钛铁矿；其它 Euclrites 中富铁橄榄石脉的成分和 Diogenites 中橄榄石的成分数据来自 Mittlefehldt (2015), Pang *et al.* (2017),

Roszar *et al.* (2011), Warren *et al.* (2014), Yamaguchi *et al.* (2011)

Ol—Fe-rich olivine; Pl—plagioclase; Spl—spinel; Tro—troilite; Mer—merrillite; Ap—apatite; An—anorthite; Fe-rich Px—Fe-rich pyroxene; Ilm—ilmenite; data on the composition of Fe-rich olivine veins in other Euclrites and olivines in Diogenites were obtained from Mittlefehldt (2015), Pang *et al.* (2017), Roszar *et al.* (2011), Warren *et al.* (2014), Yamaguchi *et al.* (2011)

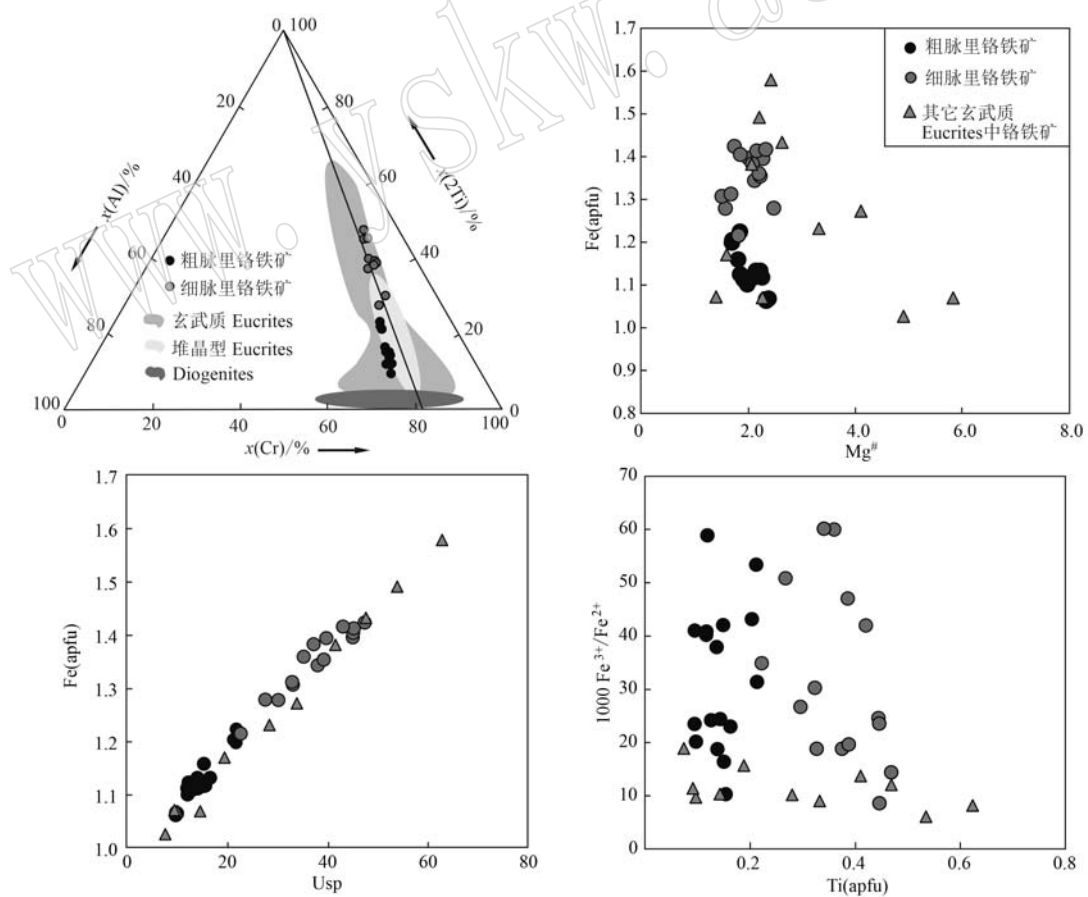


图 7 NWA 11592 富铁橄榄石脉铬铁矿/尖晶石成分图

Fig. 7 Chromite/spinel composition of Fe-rich olivine veins in NWA 11592

其它玄武质 Euclrites 中铬铁矿的成分数据来自 Mittlefehldt (2015)

composition data of chromite in other basaltic Euclrites came from Mittlefehldt (2015)

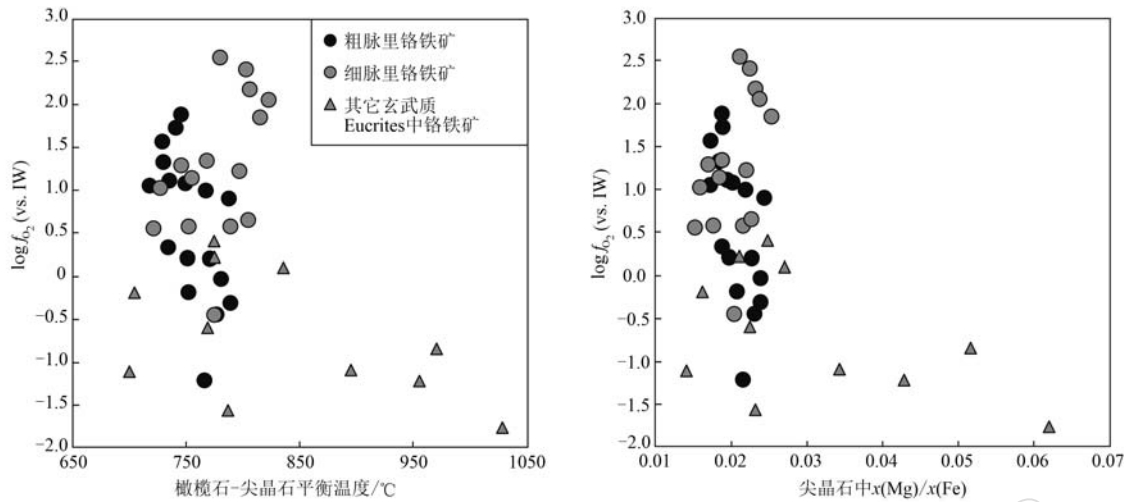


图 8 NWA 11592 富铁橄榄石脉尖晶石-橄榄石平衡温度和氧逸度图

Fig. 8 The equilibrium temperature and oxygen fugacity of spinel-olivine in Fe-rich olivine veins in NWA 11592
尖晶石和橄榄石的平衡温度根据 Wlotzka (2005) 的方法计算; 氧逸度根据 Ballhaus *et al.* (1990) 的方法计算所得; 其它玄武质 Eucrites 中铬铁矿的成分数据来自 Mittlefehldt (2015)

the equilibrium temperature of spinel-olivine is calculated according to the method of Wlotzka (2005); the oxygen fugacity is calculated according to the method of Ballhaus *et al.* (1990); composition data of chromite in other basaltic Eucrites came from Mittlefehldt (2015)

氧逸度 ($f_{O_2} = IW - 1.8 \sim IW + 0.4$) 要高 (Mittlefehldt, 2015) (图 8; 表 2)。

3 讨论

3.1 NWA 11592 的亚型划分

NWA 11592 陨石具有部分熔壳, 不具球粒结构, 故为无球粒陨石。NWA 11592 辉石的 Fe/Mn (摩尔比) 值介于 26~38 之间, 落在 HED 族陨石的分布范围内, 与其它分异型无球粒陨石和地球岩石有明显区别 (Papike *et al.*, 2003) (图 9)。NWA 11592 长石的 An 值大多集中在 82~92 之间 (图 9), 月球陨石长石的 An 值虽然与 HED 族陨石相近, 但其有着比 HED 族陨石更高的辉石 Fe/Mn 值 (周剑凯等, 2019)。因此根据斜长石的 An 值并结合辉石的 Fe/Mn 值可判断 NWA 11592 为 HED 族陨石。

HED 族陨石中辉石的平均 $Mg^{\#}$ 值是区分 Diogenites、堆晶型 Eucrites 和玄武岩质 Eucrites 的重要参数 (黄丽霖等, 2020)。NWA 11592 陨石辉石 $Mg^{\#}$ 值 (低钙辉石 $Mg^{\#} = 36.9 \sim 39.7$; 高钙辉石 $Mg^{\#} = 52.0 \sim 53.2$) 均落在玄武质 Eucrites 的范围 ($Mg^{\#} = 28.0 \sim 57.1$; 图 9) (陈宏毅等, 2016; 黄丽霖等, 2020; Huang *et al.*, 2020)。NWA 11592 未角砾岩化, 主要由几乎等比例的辉石 (包括铁紫苏辉石、易

变辉石、普通辉石) 和斜长石组成, 为具有辉绿-辉长结构的玄武岩。综合以上特征, 将 NWA 11592 划分为玄武质非角砾岩型 Eucrites。

NWA 11592 含有一条较粗的和几条较细的冲击熔脉, 较粗冲击熔脉的宽度达 4 mm, 熔脉中出现大量玻璃质, 表明其冲击变质程度至少在中等 (S4) 或以上 (Fritz *et al.*, 2017)。NWA 11592 陨石辉石颗粒成分高度平衡, 无原始岩浆结晶环带保留。辉石普遍具有明显的出溶条带, 其宽度从 10~70 μm 不等, 结合辉石颗粒普遍出现云雾化, 部分单斜易变辉石发生转变形成斜方辉石等特征, 可判断 NWA 11592 陨石热变质程度为 6 型 (Takeda and Graham, 1991; Yamaguchi *et al.*, 1996)。

3.2 NWA 11592 富铁橄榄石脉的成因探讨

根据 NWA 11592 富铁橄榄石脉的岩石结构和矿物学特征分析, 可以初步排除 NWA 11592 富铁橄榄石脉的原生岩浆结晶成因, 原因有: ① 与富铁橄榄石共生的火成长石应是低温且富碱的, 与 NWA 11592 脉体中的钙长石正好相反; ② 根据 NWA 11592 脉里各矿物模式含量结合各矿物化学成分计算富铁橄榄石脉总成分是较为富铁的 ($Mg^{\#} = 21.1$), 均不同于任何已知的 HED 族陨石熔体成分 ($Mg^{\#} > 30$, Mittlefehldt, 2015); ③ 富铁橄榄石粗脉和细脉里富铁橄榄石和尖晶石的平衡温度 (粗脉: 718~788°C;

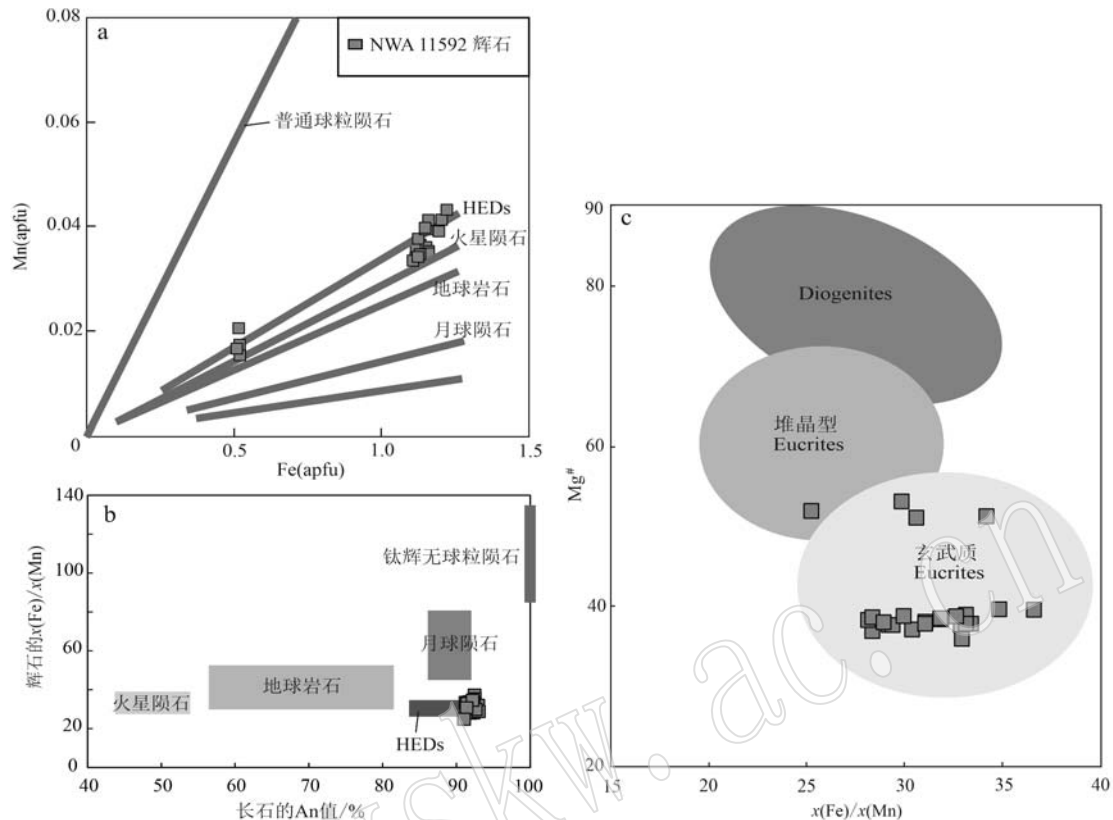


图9 NWA 11592 陨石辉石和长石成分与其它无球粒陨石/地球岩石对比图

Fig. 9 Comparison of pyroxene and feldspar compositions of NWA 11592 with other achondrite/Earth rocks
 a—辉石的 Fe-Mn 关系图，底图中 Fe/Mn 值趋势线引自 Papike *et al.* (2003)；b—辉石 Fe/Mn 值与长石 An 值关系图，底图中 Fe/Mn 值和长石 An 值范围引自 Mittlefehldt (2015)；c—辉石的 Mg[#] 值和 Fe/Mn 值关系图，底图中 Fe/Mn 值和 Mg[#] 范围引自 Mittlefehldt (2015)

a—the diagram of Fe-Mn contents in pyroxenes, the trend line of Fe/Mn ratio in the base map are quoted from Papike *et al.* (2003)；b—the diagram of pyroxene Fe/Mn ratio and feldspar An value, the Fe/Mn ratio and feldspar An value range in the base map are quoted from Mittlefehldt (2015)；c—the diagram of Mg[#] value and Fe/Mn ratio of pyroxene, the Fe/Mn value and Mg[#] range in the base map are quoted from Mittlefehldt (2015)

细脉：727~815℃)均较玄武质 Eucrite 原始火成岩固相线温度 (~1 100℃)低；④ 富铁橄榄石粗脉中铬铁矿和细脉中尖晶石均含有较高的 Fe³⁺ 组分(粗脉铬铁矿 Fe₂O₃：0.67%~2.30%；细脉尖晶石 Fe₂O₃：0.43%~2.85%)，而其它玄武质 Eucrites 中原生火成铬铁矿的 Fe³⁺ 组分则很低或几乎不含 Fe³⁺ (Fe₂O₃：0.33%~0.71%) (Mittlefehldt, 2015)。⑤ 在 Eucrites 压力范围条件下 (<10 MPa)，粗富铁橄榄石脉里的氧逸度 ($f_{O_2} = IW - 0.4 \sim IW + 1.7$) 和细富铁橄榄石脉里的氧逸度 ($f_{O_2} = IW - 0.4 \sim IW + 2.5$) 均较其它玄武质 Eucrites 原始火成岩石氧逸度 ($f_{O_2} = IW - 1.8 \sim IW + 0.4$) (Stolper, 1977; Wadhwa, 2008) 要高。

前人研究中，Eucrite 岩屑辉石中富铁橄榄石细脉的成因被认为主要有 5 种：① 辉石的不一致熔融成因 (Roszjar *et al.*, 2011)；② 冲击作用引起橄

石重熔注入裂隙成因 (Pang *et al.*, 2017)；③ 裂隙里富铁橄榄石充填物重熔成因 (Takeda *et al.*, 1994)。④ 由非均质的局部亚稳态富铁辉石在冲击作用下原位分解形成 (Patzner and McSween, 2018)。⑤ 含 H₂O 流体沉淀成因 (如 Barrat *et al.*, 2011; Warren *et al.*, 2014; Pang *et al.*, 2017)。

然而，以上成因观点①中辉石的不一致熔融成因形成的富铁橄榄石脉应与宿主辉石存在反应边界 (Roszjar *et al.*, 2011)，而不是像在 NWA 11592 中观察到的平滑边界。成因观点②~⑤为岩浆期后次生过程，其中观点②~④均不能很好的解释 NWA 11592 含富铁橄榄石脉辉石岩屑中观察到的一些现象，原因有：① NWA 11592 富铁橄榄石颗粒较大，与周围辉石有平滑的边界，脉体横跨几个辉石和斜长石颗粒，脉的延伸方向与辉石的出熔方向、晶轴方向及充填物没有空间上的联系，表明其与辉石出

溶热事件无关且非充填物/橄榄石重熔熔体注入成因。②在非平衡的 Eucrite 中充填物区域的斜长石通常是 Na、K 含量较高的 (Takeda *et al.*, 1994), 充填物重熔产生的熔体不应形成富铁橄榄石脉中较富 Ca 的斜长石, 且在充填物中富铁橄榄石并不常见。③亚稳态富铁辉石分解形成的矿物组合除橄榄石外, 还应含有 SiO₂、富铁高钙辉石等矿物, 如后成合晶 (如 Buchanan *et al.*, 2000; Barrat *et al.*, 2003)。且辉石分解形成的矿物组合大多为细颗粒状集合体, 而不应是只分解形成沿裂隙分布的橄榄石脉。此外, 富铁橄榄石脉不含碳化合物和陨硫铁, 且周围辉石没有铁元素或铁金属的消耗, 固排除火山喷发干的蒸汽 (常含 CO、CO₂、CS、CS₂ 和 S₂) 交代成因。

NWA 11592 脉里橄榄石具有较高的 Fa 值, 斜长石也具有较高的 An 值, 这种相似的水热沉积富铁橄榄石 (Rasmussen *et al.*, 1998) 和水热沉积富钙斜长石 (Python *et al.*, 2007; Mora *et al.*, 2009) 在地球上较为常见。同时结合脉体中尖晶石较高的 Fe³⁺ 含量和较高的氧逸度以及脉体的结构特征, 笔者推测, NWA 11592 富铁橄榄石脉的成因最有可能为含 H₂O 流体沿裂隙的沉淀产物, 这与前人研究中的主流观点相似 (如 Barrat *et al.*, 2011; Warren *et al.*, 2014; Pang *et al.*, 2017)。根据本次实验数据, NWA 11592 形成富铁橄榄石脉的含 H₂O 流体反应系统可能是大程度开放且较为氧化的 (f_{O_2} 达 IW + 0.9), 且这种含水流体应是富 Fe、Mg、Ca、Al、Si 的, 可直接在流体中沉积次生矿物 (如 Zeng *et al.*, 2020)。虽然目前仍缺乏确切的证据 (如脉体中缺乏含水矿物) 而无法确认 HED 族陨石中富铁橄榄石脉的确切成因, 但结合前人研究资料以及本次工作数据, 含 H₂O 流体渗透作用应是富铁橄榄石脉最为合理的成因模型, 将来亦仍需更多的微区同位素/微量成分分析去做进一步的论证。

3.3 对灶神星含 H₂O 流体渗透作用的启示

前人认为平衡型 Eucrites 中的富铁橄榄石脉均较细 (<20 μm), 且均包含在岩屑的辉石颗粒里 (如 Barrat *et al.*, 2011; Warren *et al.*, 2014; Pang *et al.*, 2017)。而 NWA 11592 富铁橄榄石颗粒最宽可达 300 μm, 脉的总体长度达 3.8 mm, 横跨几个辉石和斜长石颗粒, 这种较粗长富铁橄榄石脉的出现表明含 H₂O 流体沉淀机制还可以是在较大范围发生的 (至少在 NWA 11592 原岩范围内)。另外, NWA 11592 富铁橄榄石脉横切普通辉石出熔片晶, 脉体

附近普通辉石出熔片晶在光学上是连续的, 没有出现尖灭现象, 这表明 NWA 11592 中富铁橄榄石脉应在辉石出熔的热变质作用之后形成, 即含 H₂O 流体渗透作用应发生在造成宿主辉石成分平衡的热变质作用之后。而富铁橄榄石脉在形成之后也应受到了热变质作用影响而使富铁橄榄石脉在某些位置不连续, 且可能消除了沿细脉出现富 Fe 辉石边的现象。

NWA 11592 中宿主辉石玄武岩结构的保留表明其应是在熔岩流或浅层侵入岩浆中快速冷却结晶 (Yamaguchi *et al.*, 2009)。NWA 11592 陨石经历了 6 型亚固相线热变质作用, 导致辉石主化学成分环带的均质化, 这个过程被认为是非常缓慢的 (大约需 10⁴~10⁶ 年), 为原岩冷却形成后由后期反复喷发的玄武岩浆掩埋产生的内部热量所致 (如 Yamaguchi *et al.*, 1996, 1997)。根据 Kretz (1982) 的二辉石地质温度计估算了 NWA 11592 中具出溶结构的成对辉石的平衡温度, 得出 NWA 11592 的热变质平衡温度为 795~819°C (±60°C)。较高的热变质温度和 6 型的热变质程度表明 NWA 11592 的热变质埋藏深度应 >4 km (Schwartz and McCallum, 2005)。此外, NWA 11592 为非角砾玄武质岩石, 若 NWA 11592 的含 H₂O 流体渗透作用发生在灶神星近地表撞击坑中或发生在撞击坑旁的溅射物覆盖层中, 均会导致 NWA 11592 原岩的角砾岩化或更多的成为复矿碎屑角砾岩。因此结合以上讨论, 笔者认为 NWA 11592 中形成较粗富铁橄榄石脉的 H₂O 流体渗透作用应发生在灶神星地壳约大于 4 km 埋藏深度的位置。灶神星上的含 H₂O 流体渗透作用除更多的发生在灶神星表面或近地表外 (如 Barrat *et al.*, 2011; Warren *et al.*, 2014; Pang *et al.*, 2017), 还有可能发生在灶神星内部的浅层地壳中。

前人研究表明, 含 H₂O 流体可以通过彗星撞击体被带到灶神星上来 (Treiman *et al.*, 2004; Roszjar *et al.*, 2011)。如果灶神星地壳局部岩石发生了含 H₂O 流体的蚀变作用, 则水合和/或羟基化矿物相至少应在水热系统的局部沉积 (取决于含 H₂O 流体作用的温度条件)。然而, 目前还无法全面评估 eucrites 所经历的含 H₂O 流体渗透作用的热力学条件。灶神星上含 H₂O 流体渗透作用发生的环境条件及含 H₂O 流体的来源还需要做更多的工作去论证。

4 结论

(1) NWA 11592 为玄武质非角砾岩型 Eucrite,

冲击变质程度至少为 S4, 热变质程度为 6 型。

(2) NWA 11592 富铁橄榄石脉的成因最有可能为含 H₂O 流体沿裂隙的沉淀产物, 反应系统应是大程度开放且较为氧化的(f_{O_2} 达 IW+0.9)。

(3) 非角砾岩平衡型 Eucrite NWA 11592 中较高的热变质程度和热变质平衡温度(795~819℃)表明其埋藏深度应在灶神星浅层地壳 >4 km 的深度, 而其中富铁橄榄石脉的形成应发生在造成宿主辉石成分平衡的热变质作用之后。结合 NWA 11592 为非角砾岩的特征, 推测形成 NWA 11592 粗长富铁橄榄石脉的含 H₂O 流体渗透作用应发生在灶神星浅层地壳 >4 km 的埋藏深度。灶神星上的含 H₂O 流体渗透作用除更多的发生在灶神星表面或近地表外, 还有可能发生在灶神星内部的浅层地壳中。

致谢 感谢广东省惠州市彩源陨石科技有限公司缪秉安先生提供研究样品。

References

- Ballhaus C, Berry R F and Green D H. 1990. Oxygen fugacity controls in the earth's upper mantle [J]. *Nature*, 348(29): 437~440.
- Barrat J A, Jambon A, Bohn M, *et al.* 2003. Petrology and geochemistry of the unbrecciated achondrite Northwest Africa 1240 (NWA 1240): An HED parent body impact melt [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(20): 3 959~3 970.
- Barrat J A, Yamaguchi A, Bunch T E, *et al.* 2011. Possible fluid-rock interactions on differentiated asteroids recorded in eucritic meteorites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 3 839~3 852.
- Boyet M, Carlson R W and Horan M. 2010. Old Sm-Nd ages for cumulate eucrites and redetermination of the solar system initial ¹⁴⁶Sm/¹⁴⁴Sm ratio [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 291: 172~181.
- Buchanan P C, Lindstrom D J, Mittlefehldt D W, *et al.* 2000. The South African polymict eucrite Macibini [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 35: 1 321~1 331.
- Chen Hongyi, Miao Bingkui, Xie Lanfang, *et al.* 2016. A review to the composition and evolution of the HED meteorites: The differentiated asteroids [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35 (5): 1 037~1 052 (in Chinese with English abstract).
- Fritz J, Greshake A and Fernandes V A. 2017. Revising the shock classification of meteorites [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 52: 1 216~1 232.
- Huang L L, Miao B K, Chen G Z, *et al.* 2020. The sulfurization recorded in tridymite in the monomict eucrite Northwest Africa 11591 [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 55(7): 1 441~1 457.
- Huang Lilin, Miao Bingkui, Chen Hongyi, *et al.* 2020. Petrological and mineralogical characteristics and the subtype classification of 9 pieces of the HED meteorite from Northwestern Africa [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(4): 826~835 (in Chinese with English abstract).
- Kretz R. 1982. Transfer and exchange equilibria in a portion of the pyroxene quadrilateral as deduced from natural and experimental data [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 411~421.
- Mittlefehldt D W. 2015. Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites [J]. *Chemie der Erde/Geochemistry*, 75: 155~183.
- Mora C I, Riciputi L R, Cole D R, *et al.* 2009. High-temperature hydrothermal alteration of the Boehls Butte anorthosite: Origin of a bimodal plagioclase assemblage [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157: 781~795.
- Pang R L, Zhang A C and Wang R C. 2017. Complex origins of silicate veinlets in HED meteorites: A case study of Northwest Africa 1109 [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 52(10): 2 113~2 131.
- Papike J J. 1998. Comparative planetary mineralogy: Chemistry of melt-derived pyroxene, feldspar, and olivine [J]. *Planetary Materials*, 36: G1~G11.
- Papike J J, Karner J M and Shearer C K. 2003. Determination of planetary basalt parentage: A simple technique using the electron microprobe [J]. *American Mineralogist*, 88: 469~472.
- Patzter A and McSween H Y. 2018. Ferroan olivine-bearing eucrite clasts found in howardites [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 53: 1 131~1 149.
- Python M, Ceuleneer G, Ishida Y, *et al.* 2007. Oman diopsidites: A new lithology diagnostic of very high temperature hydrothermal circulation in mantle peridotite below oceanic spreading centres [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 289~305.
- Roszar J, Metzler K, Bischoff A, *et al.* 2011. Thermal history of Northwest Africa 5073—A coarse-grained Stannern-trend eucrite containing cm-sized pyroxenes and large zircon grains [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 46(11): 1 754~1 773.
- Rasmussen M G, Evans B W and Kuehner S M. 1998. Low-temperature fayalite, greenalite, and minnesotaite from the Overlook gold deposit, Washington: Phase relations in the system FeO-SiO₂-H₂O [J]. *Canadian Mineralogist*, 36: 147~162.
- Schwartz J M and McCallum I S. 2005. Comparative study of equilibrated

- and unequilibrated eucrites: Subsolvus thermal histories of Haraiya and Pasamonte[J]. *American Mineralogist*, 90: 1 871~1 886.
- Stolper E. 1977. Experimental petrology of eucritic meteorites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41: 587~611.
- Takeda H and Graham A L. 1991. Degree of equilibration of eucritic pyroxenes and thermal metamorphism of the earliest planetary crust[J]. *Meteoritics*, 26: 129~134.
- Takeda H, Mori H and Bogard D D. 1994. Mineralogy and ^{39}Ar - ^{40}Ar of an old pristine basalt: Thermal history of the HED parent body [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 122: 183~194.
- Treiman A H, Lanzirotti A and Xirouchakis D. 2004. Ancient water on asteroid 4 Vesta: Evidence from a quartz veinlet in the Serra de Magé Eucrite meteorite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 189~199.
- Wadhwa M. 2008. Redox conditions on small bodies, the moon and mars [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 68: 493~510.
- Warren P H, Rubin A E, Isa J, *et al.* 2014. Northwest Africa 5738: Multistage fluid-driven secondary alteration in an extraordinarily evolved eucrite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 141: 199~227.
- Wlotzka F. 2005. Cr spinel and chromite as petrogenetic indicators in ordinary chondrites: Equilibration temperatures of petrologic types 3.7 to 6[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 40(11): 1 673~1 702.
- Yamaguchi A, Barrat J A, Greenwood R C, *et al.* 2009. Crustal partial melting on Vesta: Evidence from highly metamorphosed eucrites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 7 162~7 182.
- Yamaguchi A, Barrat J A, Ito M, *et al.* 2011. Posteuclitic magmatism on Vesta: Evidence from the petrology and thermal history of diogenites [J]. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 116: 1~15.
- Yamaguchi A, Taylor G J and Keil K. 1996. Global crustal metamorphism of the Eucrite parent body[J]. *Icarus*, 124: 97~112.
- Yamaguchi A, Taylor G J and Keil K. 1997. Metamorphic history of the eucritic crust of 4 Vesta[J]. *Journal of Geophysical Research*, 102: 13 381~13 386.
- Zeng X, Li S, Joy K H, *et al.* 2020. Occurrence and implications of secondary olivine veinlets in lunar highland breccia Northwest Africa 11273[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 55: 36~55.
- Zhou Jiankai, Chen Hongyi, Xie Lanfang, *et al.* 2019. Petromineralogy, origin and impact metamorphism of a new lunar meteorite NWA 12279 [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(4): 521~534(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈宏毅, 缪秉魁, 谢兰芳, 等. 2016. HED 族陨石: 分异型小行星物质组成和演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 35(5): 1 037~1 052.
- 黄丽霖, 缪秉魁, 陈宏毅, 等. 2020. 9 块西北非 HED 族陨石的岩石矿物学特征及亚型划分[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 39(4): 826~835.
- 周剑凯, 陈宏毅, 谢兰芳, 等. 2019. 一块新发现的月球陨石 NWA 12279 的岩石矿物学、源区和冲击变质作用[J]. *岩石矿物学杂志*, 38(4): 521~534.