

东南极哈姆峰地区假玄武玻璃的显微构造、年代学及其地质意义

刘建民^{1,2,3}, 刘晓春^{1,2,3}, 赵越^{1,2,3}, 张拴宏^{1,2,3}, 徐刚^{1,2,3}, 董树文⁴,
毛骞⁵, 陈柏林^{1,2,3}

LIU Jianmin^{1,2,3}, LIU Xiaochun^{1,2,3}, ZHAO Yue^{1,2,3}, ZHANG Shuanhong^{1,2,3}, XU Gang^{1,2,3}, DONG Shuwen⁴,
MAO Qian⁵, CHEN Bailin^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 中国地质调查局极地地质研究中心, 北京 100081;
3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;
4. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;
5. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Research Center of Polar Geosciences, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;*
5. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

LIU J M, LIU X C, ZHAO Y, et al., 2021. Microstructure and geochronology of pseudotachylite from the Hamm Peak, East Antarctica, and its geological significances [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (5): 747-758. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.061

Abstract: The pseudotachylite in granulite facies granitic gneisses from the Hamm Peak, southwestern Prydz Bay, East Antarctica, occurs along the east-west-trending ductile-brittle shear zone. The characteristics of microstructure show that the pseudotachylite was formed by the frictional-melt during the rapid faulting along the paleoseismic zone. This inference is supported by the common presence of spherulites and different morphological microlites, such as skeletal, dendritic, acicular and globular in the matrix of pseudotachylite. There exist two kinds of microlite mineral assemblage. One consists mainly of hyperite and plagioclase, which developed in the northeastern part of the shear zone. The other consists of biotite, plagioclase, alkali feldspar and quartz, etc, which developed in the southwestern part of the shear zone. The occurrence of different kinds of microlite mineral assemblage indicates the differences of tectonic surrounding and stress distribution along different parts of the shear zone. Moreover, the presence of aluminous-rich hyperite may indicates the relatively high temperature and high pressure in the ambient physical condition during the pseudotachylite formation and crystallization afterwards, i. e., under the granulite facies conditions. The K-Ar age of bulk matrix of pseudotachylite is 878.1 ± 16.8 Ma. Bulk $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating release spectrum gave the varying ages mainly from 925 to 626 Ma. Combined with the regional comparison, we conclude that the pseudotachylite formed during the Grenvillian tectonic events.

Key words: microstructure; microlite; aluminous-rich hyperite; K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating; pseudotachylite; Hamm Peak; East Antarctica

基金项目: 国家自然科学基金 (41941004)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41941004)

第一作者简介: 刘建民 (1964—), 男, 博士, 研究员, 从事构造地质学、矿田构造研究。E-mail: liujianmin@vip.sina.com

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-08-30; 责任编辑: 吴芳

引用格式: 刘建民, 刘晓春, 赵越, 等, 2021. 东南极哈姆峰地区假玄武玻璃的显微构造、年代学及其地质意义 [J]. 地质力学学报, 27 (5): 747-758. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.061

摘要: 发育在东南极普里兹湾西南部哈姆峰地区麻粒岩相花岗质片麻岩中的假玄武玻璃沿着近东西向断裂带分布。显微构造特征表明, 该地假玄武玻璃基质中普遍发育球粒结构及树枝状、放射状-针状等不同形状及组合的矿物微晶体, 说明这些假玄武玻璃是地震断层快速滑移过程中摩擦熔融作用的产物。假玄武玻璃中的微晶体矿物组合大体分为两种, 它们分布在构造带不同地段: 一种是以“紫苏辉石+斜长石”组合为主, 分布于构造带东北部地段; 一种是以“黑云母+斜长石+钾长石+石英”的组合为主, 分布于构造带西南部地段, 说明沿构造带不同部位构造环境及应力分布的不均匀性。同时, 微晶体中富铝紫苏辉石的存在, 表明假玄武玻璃形成过程及其后期的结晶过程可能处于高温(麻粒岩相)的构造环境下。假玄武玻璃的基质全岩 K-Ar 年龄为 878.1 ± 16.8 Ma, 全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱系中所记录的年龄值主要集中在 925~626 Ma。结合区域对比看, 假玄武玻璃应该形成于格林维尔期构造事件。

关键词: 显微构造; 微晶体; 富铝紫苏辉石; K-Ar 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学; 假玄武玻璃; 哈姆峰; 东南极

中图分类号: P616.3; P728.2 **文献标识码:** A

0 引言

假玄武玻璃是由陨石冲击或地震断层的快速滑移而形成的一种暗色脉状、网脉状隐晶质岩石 (Shand, 1916; Magloughlin and Spray, 1992)。由于假玄武玻璃基质粒度很细, 因此, 显微结构研究是鉴别其形成机制的主要手段。在显微结构上, 假玄武玻璃通常表现为两种类型: 一种是由于陨石冲击或断层的剪切摩擦热使母岩发生摩擦熔融形成的玻璃质熔融体 (Sibson, 1975; Allen, 1979; Magloughlin and Spray, 1992; Spray, 1995; Lin and Shimamoto, 1998), 这一机制已经为其内部所含有的玻璃质基质、树枝状、球粒状等不同形态的新生矿物微晶体的存在和硫化物微滴的形成等特点所支持; 另一种则仅仅表现为母岩的超碎裂岩化 (Philpotts, 1964; Wenk, 1978; Lin, 1996), 二者野外产状几乎完全一致 (刘建民等, 2003)。

愈来愈多的资料表明地震断层作用导致的摩擦熔融可以形成于地震带内整个地壳深度, 因此, 由地震断层摩擦熔融形成的假玄武玻璃可以沿整个地震构造带深度范围内发育, 既可以在地下几百米的脆性变形域内形成, 也可以在地壳下一定深度的韧性变形域中发生 (Hobbs, 1986; Magloughlin and Spray, 1992; Austrheim and Boundy, 1994)。从变质作用环境出发, 假玄武玻璃在包括绿片岩相、角闪岩相、麻粒岩相以及榴辉岩相等不同级别的构造环境中均有发现。其中, 假玄武玻璃基质中发育的微晶体成分及矿物组合对于说明假玄武玻璃的形成环境具有重要的指示意义。Austrheim and Boundy (1994) 正是根据所研究的假玄武玻璃基

质中所存在的一套以“绿辉石+石榴石+斜长石+石英”为代表的微晶体矿物组合, 推断了挪威西部 Bergen 弧内发育在榴辉岩相中的假玄武玻璃本身形成深度可以达到地下 60~80 km 的深度。

除此之外, 已经发表的数据表明 K-Ar 方法和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年技术可以基本上反映假玄武玻璃及其构造事件的发生年龄 (Reimold et al., 1990, 1992; Trieloff et al., 1994; Kelley et al., 1994; Spray et al., 1995; Magloughlin et al., 2001; Sherlock and Hetzel, 2001; Muller et al., 2002; Davidson et al., 2003; Liu et al., 2004; 刘建民等, 2004, 2009), 为进一步将假玄武玻璃的形成与区域性构造事件相联系提供了可能。

最近在东南极科学考察过程中, 在普里兹湾西南部发现了广泛分布的假玄武玻璃。这些假玄武玻璃宏观上沿着两条近东西向的断裂带发育, 具有分布广、单体规模大、熔融程度高等特点。显微构造研究发现, 该地区的假玄武玻璃基质中包含有丰富的、代表假玄武玻璃熔融成因的球粒结构以及不同形状及组合的矿物微晶体, 尤其是微晶体中含有丰富的富铝紫苏辉石。与此同时, 还对该地区的假玄武玻璃开展了全岩 K-Ar 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年的研究工作。这些显微结构及微晶体矿物组合的确定, 结合假玄武玻璃年代学的数据, 对说明东南极地区假玄武玻璃形成的构造环境提供了重要的指示意义。

1 地质背景

研究区位于东南极普里兹湾西南部兰丁陡崖 (Landing Bluff) 和姊妹岛 (Søstrene Island) 之间。

基底岩石主体为新元古代花岗质片麻岩(正片麻岩)夹中性、中基性麻粒岩条带或透镜体(Liu et al., 2009),局部有条带状钙硅酸盐岩等(图1)。花岗质片麻岩主要矿物组合为斜长石+钾长石+石英+石榴子石±黑云母±紫苏辉石,次要矿物为锆石、榍石和磁铁矿等。斜长石主要为钙长石,其CaO含量为17.98(wt%)。而中基性麻粒岩主要矿物组合为普通辉石+单斜辉石+角闪石+斜长石(±黑云母等)。花岗质片麻岩及麻粒岩中的主要矿物化学成分见表1。片麻岩普遍为花岗变晶结构、片麻状构造。花岗质片麻岩中片麻理产状稳定:走向近东西(85°~95°),向南陡倾,倾角75°~85°。这些花岗质片麻岩的侵位年龄为1380~1170 Ma(Liu et al., 2007, 2009),但在格林维尔期(晚中元古代—早新元古代)及泛非期普遍遭受高级变质作用的改造(Black et al., 1991; Kinny et al., 1993; Henson and Zhou, 1995; Zhao et al., 1995; Fitzsimons et al., 1997; Snape et al., 1997; Harley et al., 1998; Liu et al., 2007, 2009)。姊妹岛一带的石榴二辉麻粒岩,其高峰变质条件为980 °C、1.0 GPa,并在后期经历了两阶段的减压退变,第二期退变的 $P-T$ 条件为850 °C、0.7 GPa,与区域麻粒岩相变质作用的条件相吻合(Thost et al., 1991)。

根据有限的地表露头地质调查发现,以花岗质片麻岩为主体的地体在哈姆峰(Hamm Peak)地区被一系列同方向的断裂带所穿切。断裂带走向北东东向,向南陡倾,包括主干断裂和一系列分支断裂。比较明显的构造带有两条。断层面的擦痕等运动学指示证实,断裂带普遍以右行走滑为主。断裂带内不同性质的糜棱岩化片麻岩、糜棱岩、及碎裂岩发育,说明构造带经历过由早期浅—中深部构造相的挤压剪切到后期浅部构造相的脆性变形的转变过程。与这些构造岩一起,沿断裂带主断裂面及其两侧围岩边部发育了大量假玄武玻璃脉体(图1)。

已发现的假玄武玻璃主要发育在南、北两个断裂带内。假玄武玻璃的发育程度与构造带的规模相一致。其中,北部构造带规模较大,构造带长大于2 km,宽度为20 m左右,总体走向65°~80°。该构造带内的假玄武玻璃规模较大,假玄武玻璃单个条带幅度较宽、较长。假玄武玻璃可见范围,从野外观察(D39~D43点间),东西长度

大于500 m以上,宽度大于20 m。与北部构造带相比,南部构造带规模要小很多,构造带宽仅0.3~1 m。而假玄武玻璃数量也明显较北部构造带偏少、且规模较小。文章中所描述的假玄武玻璃主要来自于北部构造带。

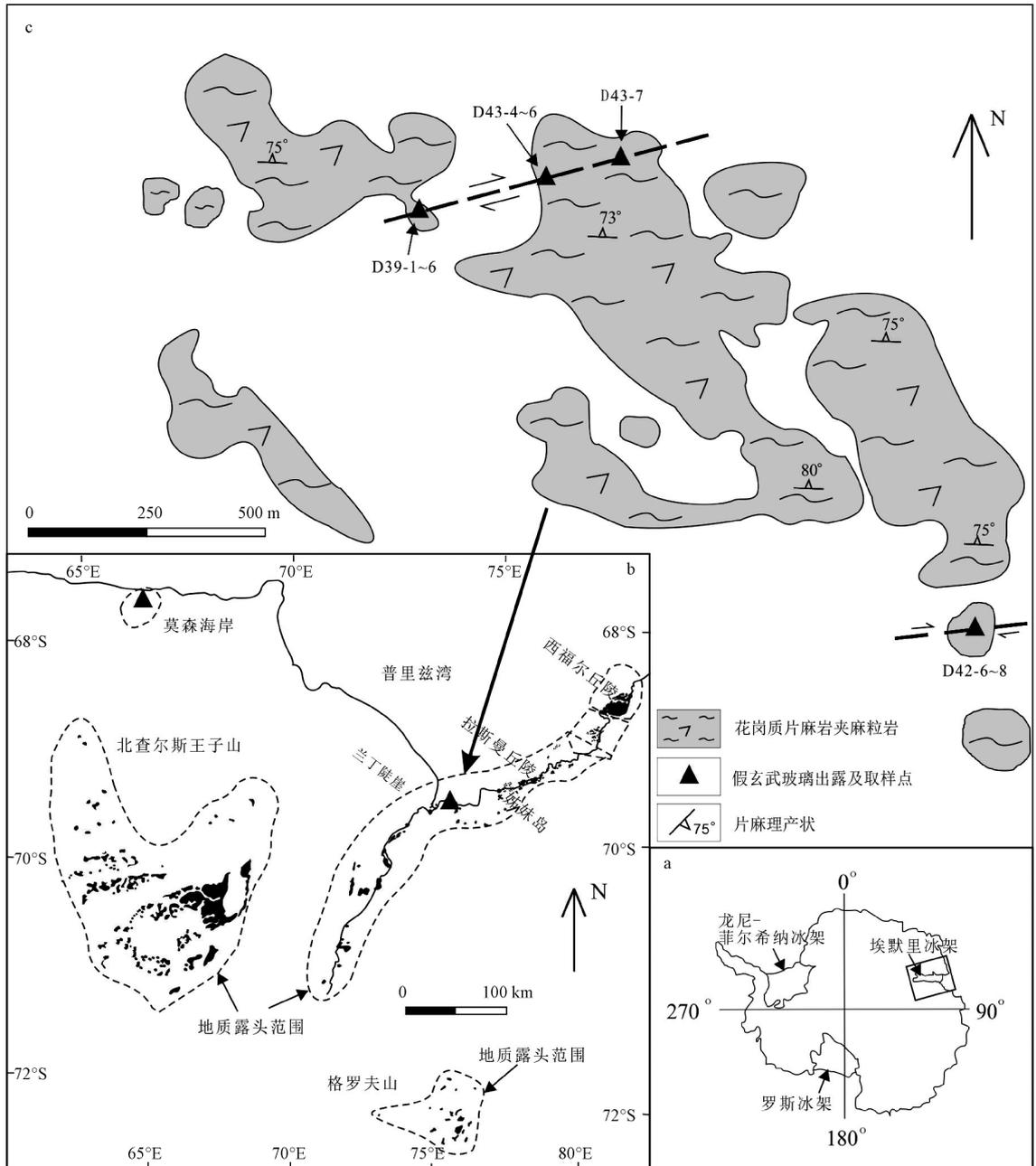
与文献中描述的大多数假玄武玻璃类似,该地的假玄武玻璃主要沿着构造带的最大主剪切面呈简单的带状产出(图2a),部分呈细的网脉状产出。假玄武玻璃多与糜棱岩共生在一起,假玄武玻璃条带斜切糜棱面理(图2b),说明假玄武玻璃形成于糜棱岩之后。假玄武玻璃条带宽变化较大,从1~2 mm到0.5 m不等,其中的D43点假玄武玻璃条带宽大于0.5 m。假玄武玻璃基质为隐晶质(图2a、2b),颜色以灰黑色为主,部分表现为燧石状外部特征。假玄武玻璃脉中普遍包含有一定数量的次棱角状—磨圆状来自于母岩的长石、石英晶屑和岩屑。岩屑成分以破碎的糜棱岩为主。岩屑和晶屑的大小也相差很大,从1 cm到小于1 mm不等。从野外观察来看,假玄武玻璃形成以后基本未受到后期构造及热事件的破坏。

2 显微构造特征

显微构造的研究主要是通过普通光学显微镜(OPT)和扫描电镜(SEM)等方法对假玄武玻璃及围岩进行观察分析。其中,SEM的实验分析是在中国地质科学院地质研究所大陆动力学扫描电镜实验室完成的,仪器型号为JEOL/JSM-5610LV。所观察分析的样品主要取自D39~D43点间。对假玄武玻璃基质中发育的微晶体矿物成分主要是通过SEM扫描电镜所配置的能谱进行的,部分矿物通过电子探针方法进行了分析,两种方法所获数据基本一致。

2.1 D39点假玄武玻璃的显微构造特征

D39点假玄武玻璃在光学显微镜及扫描电镜影像特征下最典型的特征是发育丰富的球粒结构和不同形状的新生矿物微晶体(图3a—3d)。其中,对球粒结构来说,球粒大小比较均匀,单一球粒直径约为0.4 mm;球粒之间大致呈紧密堆积结构。球粒本身从中心向外具有明显的分带性,中心部位由针状、放射状的斜长石、黑云母等晶簇组成,这些新生矿物雏晶一般小于或等于0.08 mm长。



a—南极大陆及研究区所在大地构造位置（埃默里冰架）；b—北查尔斯王子山-普里兹湾地区地质露头范围及研究区所在位置（虚线为露头范围，实线为冰川与海岸线位置）；c—假玄武玻璃分布和取样位置图

图1 东南极普里兹湾哈姆峰地区地质图及假玄武玻璃分布和取样位置图

Fig. 1 Map of the Hamm Peak area, Prydz Bay, East Antarctica, showing the localities where pseudotachylites have been found (a) The Antarctica continent with tectonic location of the study area; (b) The outcrops of Northern Prince Charles Mountain and location of the study area; (c) The localities where pseudotachylites have been found

中心向外靠近球粒的边部由相对均一、混浊不清的显微晶质-隐晶质矿物集合体组成“毡状”结构。根据 SEM 影像及成分分析（表 2），这些显微晶质-隐晶质主要由黑云母、斜长石等矿物组成，另有少量微斜长石、石英、氧化亚铁、钛铁矿、黄铁矿和富含稀土的矿物相等（图 3e、3f）。在某

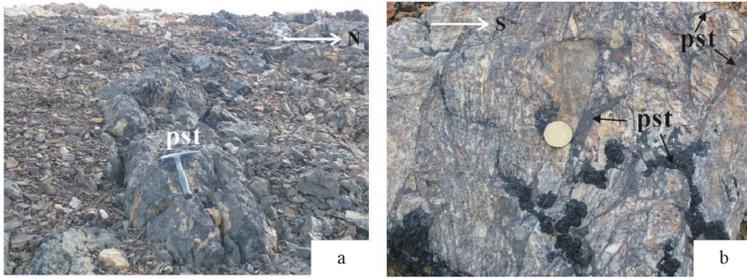
些晶形发育较好的视域内，基质中的黑云母和钛铁矿长度可以达到 $30\ \mu\text{m}$ ，且钛铁矿本身具有一定的方向性。根据能谱分析确定的新生雏晶矿物的斜长石成分以中长石为主，而构造带母岩中的斜长石则包括钙长石和中长石；黑云母成分与母岩差别不大，但 Ti 含量均比较高（表 2）。

表 1 东南极哈姆峰地区花岗质片麻岩 (假玄武玻璃围岩) 中主要矿物化学成分 (wt%) 电子探针数据

Table 1 Chemical composition (wt%) of major minerals in the granitic gneisses and granulites (the wall rocks of pseudotachylite) from the Hamm Peak, East Antarctica

样品编号	序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	矿物名称
41-3-1	1	45.94	0.00	34.89	0.00	0.00	0.00	17.98	1.18	0.00	钙长石 (Pl)
	2	49.04	0.00	0.86	37.13	0.00	12.26	0.71	0.00	0.00	紫苏辉石 (Hy)
	4	50.39	0.00	1.09	22.02	0.00	9.91	15.94	0.00	0.00	普通辉石 (Aug)
43-10-2	1	37.96	0.00	21.15	30.29	0.43	7.99	2.17	0.00	0.00	石榴子石 (Grt)
	2	65.64	0.00	19.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	14.22	微斜长石 (Mie)
	3	57.79	0.00	27.09	0.00	0.00	0.00	9.27	6.11	0.00	中长石 (Pl)
	4	37.98	0.00	21.20	30.65	0.39	7.73	2.04	0.00	0.00	石榴子石 (Grt)
	6	39.96	5.90	14.77	13.01	0.00	16.32	0.00	0.00	9.79	黑云母 (Bt)
43-10-1	7	38.01	0.00	20.87	30.97	0.45	7.53	2.16	0.00	0.00	石榴子石 (Grt)
	1	57.64	0.00	27.86	0.00	0.00	0.00	8.71	5.79	0.00	中长石 (Pl)
	2	65.69	0.00	18.83	0.00	0.00	0.00	0.00	1.59	13.88	微斜长石 (Mie)
	3	37.85	0.00	20.93	30.89	0.43	7.74	2.17	0.00	0.00	石榴子石 (Grt)
	5	39.74	7.16	14.72	13.95	0.00	14.87	0.00	0.00	9.56	黑云母 (Bt)
	6	40.02	5.80	14.23	12.74	0.00	16.92	0.00	0.00	9.99	黑云母 (Bt)
	7	65.77	0.00	18.61	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	14.57	微斜长石 (Mie)

注: 数据分析在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成。



a—简单脉状假玄武玻璃 (pst); b—与糜棱岩共生的假玄武玻璃 (pst)

图 2 东南极普里兹湾哈姆峰地区假玄武玻璃野外照片

Fig. 2 Photographs of the field outcrop of pseudotachylites from the Hamm Peak area, Prydz Bay, East Antarctica

(a) Simple pseudotachylite vein (pst); (b) Complex veinlet of pseudotachylite (pst) with mylonite

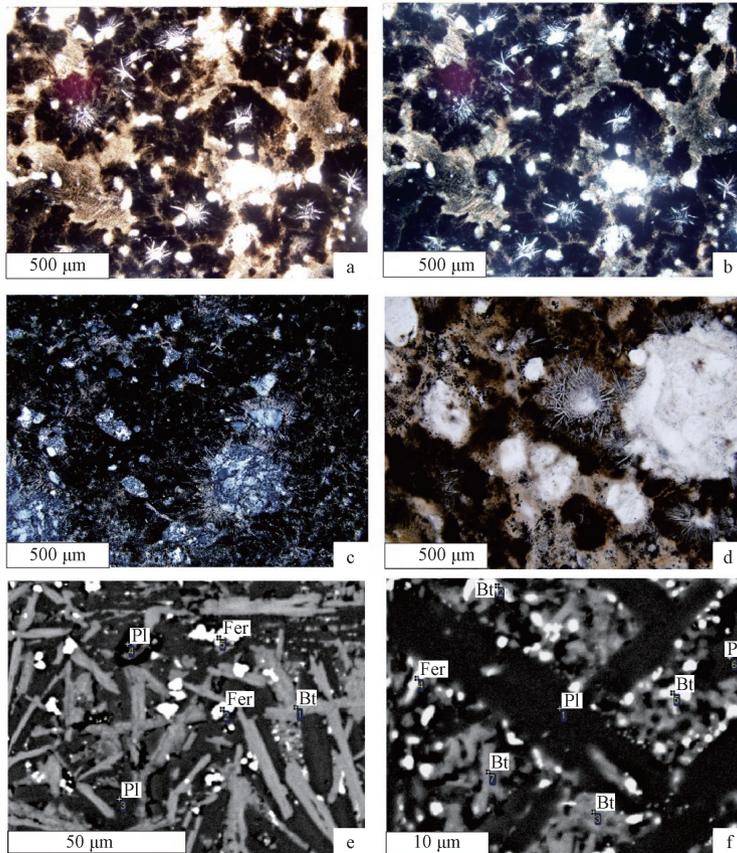
表 2 D39 点假玄武玻璃基质中微晶体成分

Table 2 Contents (wt%) of microlites in the matrix of pseudotachylites at the locality of D39, Hamm Peak, East Antarctica

分析点位	序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	矿物名称
39-4-3-4 (各点位置见图 3e)	1	34.62	5.94	14.94	19.22	0.00	12.64	0.00	0.00	9.26	0.00	黑云母
	2	1.34	0.00	0.76	97.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	氧化亚铁
	3	58.63	59.66	26.01	0.80	0.00	0.00	7.85	6.28	0.43	0.00	中长石
	4	47.56	0.00	21.81	1.66	0.00	0.59	22.08	5.86	0.43	0.00	钙长石
	5	13.20	0.00	7.21	75.45	0.00	0.00	1.58	2.56	0.00	0.00	氧化亚铁
39-4-3-1 (各点位置见图 3f)	1	59.47	0.00	25.88	0.00	0.00	0.00	7.80	6.60	0.26	0.00	中长石
	2	38.61	6.39	7.55	34.84	0.00	6.09	1.86	0.00	3.77	0.89	黑云母
	3	42.36	4.11	12.21	16.56	0.00	13.12	3.17	0.00	7.47	0.71	黑云母
	4	34.36	0.38	6.36	52.93	0.00	1.80	1.46	1.58	0.47	0.66	氧化铁
	5	37.71	5.27	8.68	34.67	0.00	7.87	1.39	0.00	4.40	0.00	黑云母
	6	59.35	0.00	25.84	0.59	0.00	0.00	7.48	6.73	0.00	0.00	中长石
	7	46.72	4.39	10.93	14.49	0.00	10.97	2.61	0.00	7.60	1.96	黑云母

除了丰富的球粒结构外, 假玄武玻璃基质中包含有分布不均匀的母岩晶屑 (或残碎斑晶), 这些晶屑主要为斜长石和石英, 晶屑大小为 0.1~0.5 mm 不等; 基质为显微晶质-隐晶质组成的, 其成分主

要为由黑云母 (Bt) 和斜长石 (Pl) 以及铁矿物相组成的“毡状”交织集合体。晶屑普遍发生碎粒化, 发育浑圆状、港湾状等熔蚀结构, 石英残碎斑晶周边尚有钾长石细粒集合体。而晶屑的边



a—假玄武玻璃中的球粒结构，单偏光（-）；b—假玄武玻璃中的球粒结构，正交偏光（+）；c—假玄武玻璃中晶屑周边的针状熔蚀结构，正交偏光（+）；d—放射状雏晶结构及晶屑本身的熔蚀结构，正交偏光（+）；e、f—假玄武玻璃基质的 SEM-BSE（背散射电子影像）影像特征及显示的针状、放射状矿物雏晶结构（Pl—斜长石/钙长石/中长石；Fer—氧化亚铁；Bt—黑云母）

图 3 D39 点假玄武玻璃中显微结构照片

Fig. 3 Microphotographs of the microstructure of pseudotachylite at the locality of D39, obtained by OPT and SEM imaging
(a) Spherulitic texture in pseudotachylite, plain light (-); (b) Spherulitic texture in pseudotachylite, crossed polarized light (+); (c) Acicular and radial crystallite texture around the crystal minerals in the pseudotachylite, crossed polarized light (+); (d) Corrosion texture of crystal minerals themselves, crossed polarized light (+); (e, f) The SEM-BSE (Backscattered electron) image features and the acicular and radial crystallite textures of the matrix in pseudotachylite

Pl—plagioclase/anorthite/andesine; Fer—ferrous oxide; Bt—biotite

缘普遍为针状、放射状斜长石、黑云母雏晶，暗示着假玄武玻璃是母岩发生熔融的产物多种形式及成分的矿物雏晶是熔融体冷却结晶过程的产物，而浑园状、港湾状等熔蚀结构是由于熔融体对残碎斑晶同化吸收所造成（Maddock, 1983; Magloughlin, 1989, 1992）。

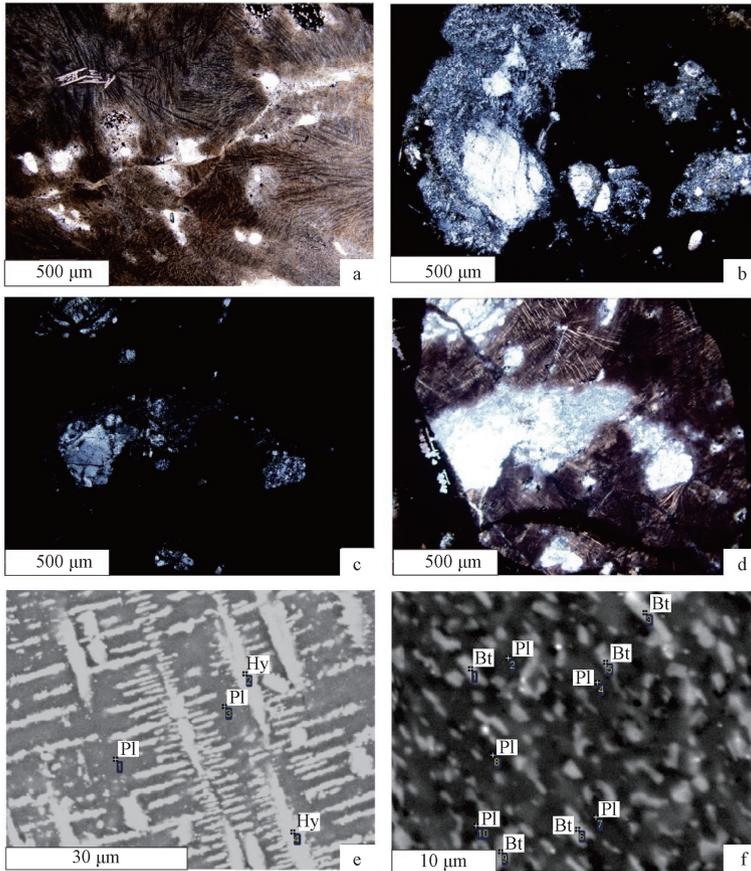
2.2 D43 点假玄武玻璃的显微结构特征

D43 点假玄武玻璃的光学显微镜及扫描电镜影像特征主要表现为斑状结构，斑晶为斜长石、石英等，斑晶粒径一般 0.2~1.5 mm，多呈不规则状，熔蚀结构发育。围绕长石和石英残斑，针状、放射状矿物雏晶发育。与 D39 点不同，该点所发育的雏晶普遍以紫苏辉石（Hy）和斜长石（Pl）

为主（图 4a—4d），成分见表 3。基质主要为显微晶质及隐晶质结构，SEM 影像特征显示，在矿物晶形相对完好的视域，基质主要表现为由斜长石（Pl）和紫苏辉石（Hy）交织而成的“毡状”交织结构（图 4e），黄铁矿（磁黄铁矿）、钛铁矿呈浸染状在基质中分布，部分围绕着残碎斑晶周边发育。紫苏辉石（Hy）呈骨架状、骸状、针状、放射状等。其铁/镁比值（ $X_{Fe} = FeO / (FeO + MgO)$ ）为 0.64~0.67，这一数值与母岩中紫苏辉石明显不同，后者 X_{Fe} 比值为 0.75；另外，基质中的紫苏辉石 Al_2O_3 含量明显偏高，平均为 7%~8% 左右，个别接近 10%。而母岩中相应的辉石 Al_2O_3 含量很低。这一特征可能代表了假玄武玻璃及其内部的矿

物雏晶是在相对高温高压环境下形成的。Wood (1974) 证实在高温下从玻璃中结晶出来的辉石是非常富 Al_2O_3 的; Wenk and Weiss (1982) 在 Musgrave 山脉发育的假玄武玻璃中发现了富 Al_2O_3 的单斜辉石, 其成分与金伯利岩和榴辉岩相中的天然辉石成分相似, 尤其是与超过 3.0 Gpa 的压力下合成的

辉石成分相似, 并由此推断这种富 Al_2O_3 的辉石是在异常高温高压条件下形成的, 其估计压力超过 3.0 Gpa。由此推断, 文章中所研究的假玄武玻璃中的紫苏辉石是在相对较高的温度、压力条件下形成的。除紫苏辉石外, 经大量分析, 在该地区的假玄武玻璃中尚未发现母岩中可见的普通辉石。



a—假玄武玻璃中放射状、晶簇状、束状紫苏辉石雏晶集合体, 单偏光 (-); b—玄武玻璃中晶屑本身碎粒化结构、熔蚀结构及周边的隐晶质结构, 正交偏光 (+); c—正常正交偏光下假玄武玻璃基质的结构; d—加锥光后强光束下假玄武玻璃基质中的矿物结构; e—紫苏辉石 (Hy) 和斜长石/钙长石/中长石 (Pl) 构成的骨架状、骸晶结构的 SEM-BSE (背散射电子影像) 影像特征; f—黑云母 (Bt)、斜长石/钙长石/中长石 (Pl) 及其他矿物雏晶组成的 SEM-BSE (背散射电子影像) 显微晶质结构

图 4 D43 点假玄武玻璃中显微结构照片

Fig. 4 Microphotographs of the microstructure of pseudotachylite at the locality of D43, obtained by OPT and SEM imaging (a) Crystallitic acicular, drusy and beam crystal aggregate of hypersthene textures in the pseudotachylite, plain light (-); (b) Cataclastic and corrosion textures of crystal minerals themselves and the cryptocrystalline textures around the crystal minerals, crossed polarized light (+); (c) The microstructure of matrix of pseudotachylite under the crossed polarized light; (d) The microstructure of matrix of pseudotachylite under the crossed polarized light with conoscope; (e) The SEM-BSE (Backscattered electron) image features of the keleton and skeletal textures made up by hypersthene and plagioclase; (f) The SEM-BSE (Backscattered electron) image features of the microcrystalline textures made up by the crystals of biotite, plagioclase/anorthite/andesine and other crystallites

除了上述由“紫苏辉石+斜长石”组成的微晶体外, 从 SEM 影像特征中, 也发现部分基质由“黑云母+微斜长石+斜长石”组成的矿物组合, 后者的黑云母呈短板状或不规则状, 略有定向排列 (图 4f)。长石类矿物虽然在影像中无法区分其晶形

特征, 但通过能谱分析确定的成分显示二者可能混杂在一起, 但仍然以斜长石为主。与 D39 点类似, 在基质中, 尚发现少量富含稀土元素的矿物相存在, 稀土元素以轻稀土为主, 含稀土元素的矿物相背散射影像非常明亮, 大小一般小于 $1 \mu m$ 。

表 3 D43 点假玄武玻璃基质中微晶体成分

Table 3 Contents (wt%) of microlites in the matrix of pseudotachylites at the locality of D43, Hamm Peak, East Antarctica

分析点位	序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总量	矿物名称
43-4-3-1 (各点位置见图 4e)	1	68.27	0.98	18.68	1.23	0.00	0.00	5.51	4.59	0.73	100.00	中长石
	2	48.13	0.73	7.99	26.81	0.39	14.71	0.75	0.00	0.49	100.00	富铝紫苏辉石
	3	66.05	1.21	19.12	2.44	0.00	0.00	5.50	4.80	0.88	100.00	中长石
	4	47.77	1.02	7.56	27.30	0.39	15.06	0.50	0.00	0.40	100.00	富铝紫苏辉石
43-7-1-2 (各点位置见图 4f)	1	49.72	2.52	16.88	16.83	0.00	5.16	1.46	1.32	5.83	99.72	黑云母
	2	63.24	0.50	21.31	2.23	0.00	0.38	5.37	6.01	0.96	100.00	斜长石
	3	48.49	2.44	15.46	18.22	0.00	5.44	1.02	0.88	5.82	99.75	黑云母
	4	65.73	0.40	19.33	1.95	0.00	0.00	3.94	4.69	3.95	100.00	微斜长石+斜长石
	5	61.50	1.36	14.51	11.10	0.00	3.23	1.63	1.88	4.79	100.00	黑云母
	6	48.22	2.55	17.04	17.53	0.00	4.78	1.54	1.88	6.15	99.70	黑云母
	7	70.84	0.50	15.90	2.97	0.00	0.74	3.90	3.97	1.19	100.00	中长石
	8	72.20	0.00	16.31	1.77	0.00	0.00	3.65	5.30	0.77	100.00	中长石
	9	45.48	2.91	17.07	19.30	0.00	5.80	1.10	1.20	6.78	99.63	黑云母
	10	75.58	0.00	12.84	2.62	0.00	0.58	2.52	3.47	2.39	100.00	微斜长石+斜长石

如上所述,发育在哈姆峰地区的假玄武玻璃是由地震断层带剪切摩擦熔融形成的。假玄武玻璃基质中包含有丰富的球粒结构及新生矿物微晶体,微晶体的形状复杂多样,从简单的如针状、球状、板状、长柱状、短柱状,到比较复杂的骨架状、树枝状、球粒状、束状等,各种形状的微晶体往往组合在一起。其中,以球粒状结构、骨架状结构与其他形状的组合最为明显。微晶体的大小不一,变化较大,从小于 1 μm 到大于 10 μm 。同时,在不同地段的假玄武玻璃基质中微晶体矿物组合具有明显差别,在 D39 中以“斜长石+黑云母+钛铁矿”为主;而在 D43 中则以“紫苏辉石+斜长石”为主,兼有“黑云母+斜长石+微斜长石”组合的存在。

根据 SEM 影像特征及能谱物相成分分析(包括电子探针分析),假玄武玻璃中所发育的紫苏辉石及斜长石成分与母岩中相应的矿物成分不同,说明这些微晶体是自熔融体中结晶出来,而不是母岩矿物的残留成分。同时,根据紫苏辉石中富铝特点推断,文章中所研究的假玄武玻璃及其紫苏辉石是在相对较高的温度条件下形成的,最可能的条件是在断裂带中形成了类似于麻粒岩相的构造环境。

值得注意的是,该点假玄武玻璃中具有“紫苏辉石+斜长石”矿组组合特点与 Clarke (1990) 所描述的产于东南极麦克罗伯逊地(MacRobertson Land)莫森海岸(Mawson Coat)的紫苏花岗岩中假玄武玻璃的微晶体矿物组合较为一致;而与目前文献中所记录的大部分假玄武玻璃中发育的微晶体矿物组合具有完全不同的特点。

后者多以斜长石为主,不同情况下可能有不同数量的碱性长石、角闪石、黑云母等(Shand, 1916; Park, 1961; Philpotts, 1964; Maddock, 1983; Magloughlin, 1989, 1992; Lin, 1994; Lin and Shimamoto, 1998)。但很明显,该点假玄武玻璃中的微晶体成分较莫森紫苏花岗岩的微晶体更为丰富而且复杂多样。

3 假玄武玻璃的年代学

为挑选符合测年要求的样品,尽量减小母岩碎屑对测试结果的影响,对所选择的假玄武玻璃及相关的围岩重新进行了详细的显微镜下及电子探针的观察分析,然后选择那些晶屑和碎屑含量最低的样品(D43-7)。将所选假玄武玻璃粉碎、过筛,并分别放置在丙酮和蒸馏水的溶液中进行超声清洗,在双目镜下通过手工挑选出粒度在 40~60 目之间、不含双目镜下可见的石英和长石碎屑以及非均质性的颗粒。

3.1 样品分析

K-Ar 测年分析在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室进行。分析采用常数为: $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, $\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, $n(^{40}\text{K})/n(\text{K}) = 1.167 \times 10^{-4}$ 。⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年分析在中国地质科学院地质研究所同位素地质年代学实验室进行。

选纯的矿物(纯度>99%)经再次放置在丙酮和蒸馏水溶液中用超声波清洗后,被封进石英瓶中送核反应接受中子照射。照射工作是在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行的。使用

H8 孔道, 中子流密度约为 $6.0 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。照射总时间为 3019 分钟, 积分中子通量为 $1.2 \times 10^{18} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$; 同期接受中子照射的还有用做监控样的标准样: ZBH-25 黑云母国内标样, 其标准年龄为 132.7 Ma, K 含量为 7.6%。

样品的阶段升温加热使用电子轰击炉, 每一个阶段加热 30 分钟, 净化 30 分钟。质谱分析是在 MM-1200B 质谱计上进行的, 每个峰值均采集 8 组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。系统空白水平: $m/e = 40、39、37、36$ 分别小于 $6 \times 10^{-15} \text{ mol}、4 \times 10^{-16} \text{ mol}、8 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 和 $2 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得, 其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_o)_{\text{Ca}} = 0.0002389、(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} =$

$0.004782、(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_o)_{\text{Ca}} = 0.000806。$ ^{37}Ar 经过放射性衰变校正; ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/\text{年}$; 用 ISOPLOT v2.49 程序计算坪年龄及正、反等时线 (Ludwig, 2001), 坪年龄误差以 2σ 给出, 详细实验流程见参考文献陈文等 (2002)。

3.2 分析结果

两种不同方法所得到的数据分别列于表 4 和表 5 中, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的年龄图谱见图 5。

表 4 东南极哈姆峰地区假玄武玻璃基质的钾-氩同位素及 K-Ar 年龄数据

Table 4 Potassium-argon isotope and age data for the pseudotachylite from the Hamm Peak, East Antarctica

样品 编号	K/ %	$^{40}\text{Ar}_{\text{放}}/10^{-9} \text{ mol/g}$	$^{40}\text{Ar}_{\text{放}}/%$	表面年龄/Ma	
				年龄/Ma	$\pm 1\sigma$
D43-7	2.48	4.865	97.54	878.1	16.8

表 5 东南极哈姆峰地区假玄武玻璃的全岩氩同位素及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar 数据

Table 5 Argon isotope and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar age data for the pseudotachylite from the Hamm Peak, East Antarctica

T/°C	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	F ($^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$)	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-14} /mol$	$^{39}\text{Ar}_{\text{累积}} /%$	表面年龄/Ma	
								年龄/Ma	$\pm 1\sigma$
400	112.9045	0.3673	6809.0000	0.1729	4.4227	8.63	0.06	92	17
500	148.7143	0.3437	0.7965	0.1155	47.2313	23.06	0.22	803	36
600	124.8157	0.2665	0.7754	0.0829	46.1468	22.39	0.38	788	24
700	81.7350	0.0932	0.4799	0.0430	54.2386	87.20	0.99	897	22
800	112.3390	0.0609	0.3536	0.0270	94.3773	223.52	2.55	1356	14
900	110.4594	0.0341	0.2870	0.0212	100.4312	289.67	4.58	1417	12
1000	85.3112	0.0185	0.3096	0.0364	79.8920	1439.14	14.65	1204	10
1100	59.6881	0.0114	0.3496	0.0384	56.3605	2121.89	29.50	924.6	7.9
1200	45.5127	0.0047	0.4132	0.0149	44.1575	2383.94	46.18	760.7	6.7
1300	36.2170	0.0046	0.5155	0.0145	34.9075	6940.86	94.74	625.8	5.8
1350	30.3554	0.0063	1.0041	0.0219	28.5944	655.59	99.33	527.5	4.8
1400	33.4198	0.0237	1.0593	0.0253	26.4969	95.61	100.00	493.7	6.0

注: 表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值; W = 120.00 mg; J = 0.011879; F = $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ (放射性成因 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 比值)

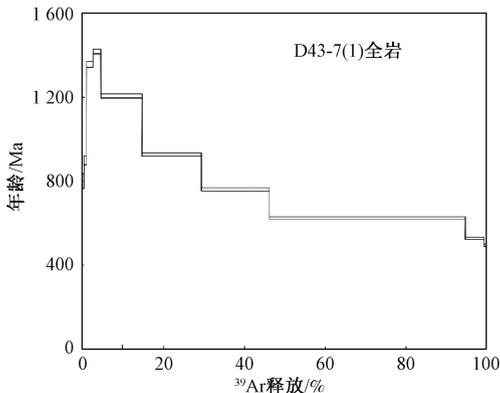


图 5 东南极哈姆峰地区假玄武玻璃全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄图谱

Fig. 5 Bulk step-heating release spectrum for the pseudotachylite from the Hamm Peak, southwestern Prydz Bay, East Antarctica

3.2.1 K-Ar 定年结果

根据中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室提供的数据 (表 4) 显示, 假玄武玻璃基质的 K-Ar 年龄为 $878.1 \pm 16.8 \text{ Ma}$ 。

3.2.2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar 定年结果

从表 5 中数据及图 5 中所表示的阶段升温数据谱系图可以看出, 对所选择的黑色假玄武玻璃基质阶段升温得到的 12 个阶段升温结果显示, 年龄谱系中所记录的年龄值在 1417 ~ 92 Ma 之间变化, 没有得出传统上作为标准应用的坪年龄。在去除两端的主体 ^{39}Ar 释放区域, 4 个加热阶段的表面年龄分别为 $1204 \pm 10 \text{ Ma}、924.6 \pm 7.9 \text{ Ma}、760.7 \pm 6.7 \text{ Ma}$ 和 $625.8 \pm 5.8 \text{ Ma}$ 。

4 地质意义

假玄武玻璃是发育在古地震构造带不同深度的构造岩, 并经构造剥蚀达到地表。由于假玄武玻璃本身固有的隐晶质及显微晶质-隐晶质的粒度特点, 假玄武玻璃的显微结构特点, 尤其是基质中所发育的新生矿物微晶体成分及矿物组合是判断假玄武玻璃形成机制及周边构造环境的重要手段和方法。

发育在东南极普里兹湾西南部哈姆峰地区麻粒岩相花岗质片麻岩中的假玄武玻璃沿着近东西向右行滑移断裂或韧-脆性剪切带分布。显微构造研究表明, 假玄武玻璃中普遍发育紧密堆积、均匀分布的球粒结构及不同形状及组合的新生矿物微晶体, 这些球粒体和微晶体是熔融相快速冷却过程中存在的典型特征 (Magloughin and Spray, 1992)。表明该假玄武玻璃为沿着地震构造带发生熔融作用的产物。

SEM 影像特征及新生矿物微晶体分析表明, 假玄武玻璃中的微晶体形状复杂多样, 从简单的针状、球状、板状、长柱状、短柱状, 到比较复杂的骨架状、树枝状、球粒状、束状等。各种形状的微晶体往往组合在一起。微晶体成分及矿物组合大致分为两种, 分布在构造带不同地段: 一种是“紫苏辉石+斜长石”组合, 分布于东北部地段; 一种是“黑云母+斜长石+钾长石+石英”的组合, 分布于西南部地段。造成这种微晶体矿物成分及其组合分布差别的具体原因目前尚不清楚。但根据假玄武玻璃形成的机制及过程, 有理由推断: ①由于发育假玄武玻璃的构造带中母岩原岩成分的差异, 在地震断层运动过程中, 不同的母岩全部发生熔融, 由此形成不同的熔融体成分并结晶出不同的矿物成分; ②由于假玄武玻璃形成过程及后期结晶过程中构造带中应力状态不同 (即周边物理化学环境不同) 所造成; ③上述两种原因以及较这些原因更为复杂的因素共同作用所造成。但无论如何, 发育在哈姆峰地区假玄武玻璃中富铝紫苏辉石+斜长石的存在, 表明在假玄武玻璃形成过程及应力释放后从熔融体中结晶过程中, 整个环境仍然处于高温的构造环境下, 也就是说, 假玄武玻璃形成过程及后期结晶过程均可能处于麻粒岩相条件下。

完好的球粒结构及紫苏辉石等微晶体的发育是哈姆峰地区假玄武玻璃的典型特征, 在文献描述中尚未见报道。而 Clarke (1990) 所描述的东南极莫森紫苏花岗岩中假玄武玻璃距离哈姆峰地区假玄武玻璃仅 400 km 左右, 其假玄武玻璃中也普遍发育紫苏辉石和斜长石微晶体矿物组合。另外, 在哈姆峰东北部的伯灵恩群岛 (Bolingens Islands) 的麻粒岩中也发育有多期假玄武玻璃 (Dirks and Hand, 1995), 这些假玄武玻璃绝大部分与糜棱岩-超糜棱岩共生、并发生了重结晶, 反映这些假玄武玻璃形成于韧性变形域。假玄武玻璃在东南极不同地区的广泛发育, 且大部分形成于与麻粒岩相或糜棱岩共生的环境下, 可能反映出这种高温环境下形成的假玄武玻璃在包括普里兹湾、伯灵恩群岛以及莫森紫苏花岗岩等在内的东南极地区普遍存在。但很明显, 该点假玄武玻璃中的微晶体较莫森紫苏花岗岩的假玄武玻璃中的微晶体更为丰富而且复杂多样, 可能反映该点假玄武玻璃的形成过程较麦克罗伯逊地一带的假玄武玻璃复杂的多。

此次工作获得哈姆峰地区假玄武玻璃的全岩 K-Ar 年龄为 878.1 ± 16.8 Ma。同一样品的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年龄中, 除早期加热阶段获得了较老的 1204 Ma 的表面年龄外, 其他年龄集中在 925 ~ 626 Ma。结合区域对比, 推测假玄武玻璃应该形成于格林维尔期, 但受到了泛非期构造热事件的影响。主要的支持证据包括: ①哈姆峰地区长英质片麻岩的锆石 U-Pb 年龄集中在 920 ~ 900 Ma (Liu et al., 2009, 2014), 说明主期矿物组合形成于格林维尔期; ②长英质片麻岩和变质石英岩中的石榴子石全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 865 ~ 814 Ma, 也说明岩石中的石榴子石形成于格林维尔期, 但因遭受到泛非期构造热事件的改造而使其 Sm-Nd 年龄低于锆石 U-Pb 年龄; ③莫森紫苏花岗岩的形成时代也是格林维尔期, 且该区未遭受到泛非期构造热事件的强烈改造, 进一步说明那里的假玄武玻璃也是格林维尔期形成的。这一年龄数据可能反映这样一个地质事实, 即南极地区广泛存在的假玄武玻璃可能与 Rodinia 超大陆裂解过程中发生的格林维尔构造事件 (Li et al., 1995, 1996) 有关。但限于目前的资料有限, 尚需要进一步深入研究。

5 结论

(1) 东南极普里兹湾西南部哈姆峰地区麻粒

岩相花岗质片麻岩中的假玄武玻璃为沿地震构造带发生熔融作用的产物。

(2) 哈姆峰地区假玄武玻璃发育完好的球粒结构及紫苏辉石等微晶体, 假玄武玻璃与糜棱岩-超糜棱岩共生、并发生了重结晶, 反映其形成于韧性变形域。

(3) 哈姆峰地区假玄武玻璃的全岩 K-Ar 年龄为 878.1 ± 16.8 Ma, 同一样品的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年龄集中在 925~626 Ma, 推测假玄武玻璃可能形成于格林维尔期, 但受到了泛非期构造热事件的影响。

References

- ALLEN A R, 1979. Mechanism of frictional fusion in fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 1 (3): 239-243.
- AUSTRHEIM H, BOUNDY T M, 1994. Pseudotachylytes generated during seismic faulting and eclogitization of the deep crust [J]. *Science*, 265 (5168): 82-83.
- CHEN W, LIU X Y, ZHANG S, 2002. Continuous laser stepwise heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating technique [J]. *Geological Review*, 48 (Supplement): 127-134. (in Chinese with English abstract)
- BLACK L P, KINNY P D, SHERATON J W, et al., 1991. Rapid production and evolution of late Archaean felsic crust in the Vestfold Block of east Antarctica [J]. *Precambrian Research*, 50 (3-4): 283-310.
- CLARKE G L, 1990. Pyroxene microlites and contact metamorphism in pseudotachylyte veinlets from MacRobertson Land, East Antarctica [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 37 (1): 1-8.
- DAVIDSON C, DAVIS K J, BAILEY C M, et al., 2003. Age, origin, and significance of brittle faulting and pseudotachylyte along the coast shear zone, Prince Rupert, British Columbia [J]. *Geology*, 31 (1): 43-46.
- DIRKS P H G M, HAND M, 1995. Clarifying temperature-pressure paths via structures in granulite from the Bolingen Islands, Antarctica [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 42 (2): 157-172.
- FITZSIMONS I C W, KINNY P D, HARLEY S L, 1997. Two stages of zircon and monazite growth in anatectic leucogneiss: SHRIMP constraints on the duration and intensity of Pan-African metamorphism in Prydz Bay, East Antarctica [J]. *Terra Nova*, 9 (1): 47-51.
- HARLEY S L, SNAPE I, BLACK L P, 1998. The evolution of a layered metagneous complex in the Rauer Group, East Antarctica: evidence for a distinct Archaean terrane [J]. *Precambrian Research*, 89 (3-4): 175-205.
- HENSEN B J, ZHOU B, 1995. A pan-African granulite facies metamorphic episode in Prydz Bay, Antarctica: evidence from Sm-Nd garnet dating [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 42 (3): 249-258.
- HOBBSBE, ORDA, TEYSSIERC, 1986. Earthquakes in the ductile regime? [J] *Pure and Applied Geophysics*, 124: 309-336.
- KELLEY S P, REDDY S M, MADDOCK R, 1994. Laser-probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ investigation of a pseudotachylyte and its host rock from the Outer Isles Thrust, Scotland [J]. *Geology*, 22 (5): 443-446.
- KINNY P D, BLACK L P, SHERATON J W, 1993. Zircon ages and the distribution of Archaean and Proterozoic rocks in the Rauer Islands [J]. *Antarctic Science*, 5 (2): 193-206.
- LI Z X, ZHANG L H, POWELL C M, 1995. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*, 23 (5): 407-410.
- LI Z X, METCALFE I, POWELL C M, 1996. Breakup of Rodinia and Gondwanaland and assembly of Asia: Introduction [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43 (6): 591-592.
- LIN A M, 1994a. Microlite morphology and chemistry in pseudotachylyte from the Fuyun fault zone, China [J]. *The Journal of geology*, 102 (3): 317-329.
- LIN A M, 1994b. Glassy pseudotachylyte veins from the Fuyun fault zone, northwest China [J]. *Journal of Structural Geology*, 16 (1): 71-83.
- LIN A M, 1996. Injection veins of crushing-originated pseudotachylyte and fault gouge formed during seismic faulting [J]. *Engineering Geology*, 43 (2-3): 213-224.
- LIN A M, SHIMAMOTO T, 1998. Selective melting processes as inferred from experimentally generated pseudotachylyte [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16 (5-6): 533-545.
- LIU J M, DONG S W, ZHANG J S, et al., 2003. Origin of pseudotachylytes from the eastern Dabieshan Orogenic Belt [J]. *Journal of Geomechanics*, 9 (2): 97-105.
- LIU J M, DONG S W, ZHANG J S, et al., 2004. K-Ar and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ ages of pseudotachylytes and their wall rocks from the Eastern Dabie mountains and their implications [J] *Acta Geologica Sinica*, 78 (3): 374-379. (in Chinese with English abstract)
- LIU J M, DONG S W, ZHANG J S, et al., 2004. Origin, age and significance of pseudotachylytes from the eastern Dabieshan Orogenic Belt, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78 (1): 52-60.
- LIU J M, CHEN B L, DONG S W, et al., 2009. Ages of pseudotachylyte and its wall rocks from the Keketuohai-Ertai fault zone, Xinjiang, Northwest China [J]. *Geological Review*, 55 (4): 581-589. (in Chinese with English abstract)
- LIU X C, ZHAO Y, ZHAO G C, et al., 2007. Petrology and geochronology of granulites from the McKaskle Hills, Eastern Amery Ice Shelf, Antarctica, and implications for the evolution of the Prydz belt [J]. *Journal of Petrology*, 48 (8): 1443-1470.
- LIU X C, ZHAO Y, SONG B, et al., 2009. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-grade rocks and charnockites from the eastern Amery Ice Shelf and southwestern Prydz Bay, East Antarctica: constraints on Late Mesoproterozoic to Cambrian tectonothermal events related to supercontinent assembly [J]. *Gondwana Research*, 16 (2): 342-361.
- LIU X C, JAHN B M, ZHAO Y, et al., 2014. Geochemistry and geochronology of Mesoproterozoic basement rocks from the eastern Amery ice shelf and southwestern Prydz Bay, East Antarctica: implications for a long-lived magmatic accretion in a continental arc [J]. *American Journal of Science*, 314: 508-547.

- LUDWIG K R, 2001. Users manual for Isoplot/Ex (rev 2.49): A geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1a: 1-55.
- MAGLOUGHLIN J F, HALL C M, VAN DER PLUIJM B A, 2001. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronometry of pseudotachylytes by vacuum encapsulation; North Cascade Mountains, Washington, USA [J]. *Geology*, 29 (1): 51-54.
- MADDOCK R H, 1983. Melt origin of fault-generated pseudotachylytes demonstrated by texture [J]. *Geology*, 12: 105-105.
- MAGOFUGHILN J F, 1989. The nature and significance of pseudotachylyte from the Nason terrane, North Cascade Mountains, Washington [J]. *Journal of Structural Geology*, 21 (7): 907-917.
- MAGLOUGHLIN J F, 1992. Microstructural and chemical changes associated with cataclasis and frictional melting at shallow crustal levels; the cataclasis-pseudotachylyte formation [J]. *Tectonophysics*, 204 (3-4): 243-260.
- MAGLOUGHLIN J F, SPRAY J G, 1992. Frictional melting processes and products in geological materials: introduction and discussion [J]. *Tectonophysics*, 204 (3-4): 197-206.
- MÜLLER W, KELLEY S P, VILLA I M, 2002. Dating fault-generated pseudotachylytes: comparison of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ stepwise-heating, laser-ablation and Rb-Sr microsampling analyses [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144 (1): 57-77.
- PHILPOTTS A R, 1964. Origin of pseudotachylytes [J]. *American Journal of Science*, 262 (8): 1008-1035.
- PARK R G, 1961. The pseudotachylyte of the Gairloch district, Ross-Shire, Scotland [J]. *American Journal of Science*, 259 (7): 542-550.
- REIMOLD W U, JESSBERGER E K, STEPHAN T, 1990. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of pseudotachylyte from the Vredefort Dome, South Africa: a progress report [J]. *Tectonophysics*, 171 (1-4): 139-152.
- REIMOLD W U, STEPHAN T, JESSBERGER E K, 1992. Testing younger than 2 Ga ^{40}Ar - ^{39}Ar ages for pseudotachylyte from the Vredefort structure [J]. *South African Journal of Science*, 88 (11-12): 563-573.
- SHAND S J, 1916. The pseudotachylyte of Parijs (Orange Free State), and its relation to 'trap-shotten gneiss' and 'flinty crush-rock' [J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 72 (1-4): 198-221.
- SHERLOCK S C, HETZEL R, 2001. A laser-probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ study of pseudotachylyte from the Tambach Fault Zone, Kenya: direct isotopic dating of brittle faults [J]. *Journal of Structural Geology*, 23 (1): 33-44.
- SIBSON R H, 1975. Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting [J]. *Geophysical Journal International*, 43 (3): 775-794.
- SNAPPE I, BLACK L P, HARLEY S L, 1997. Refinement of the timing of magmatism, high-grade metamorphism and deformation in the Vestfold Hills, East Antarctica, from new SHRIMP U-Pb zircon geochronology [M] // RICCI C A. The Antarctic region: geological evolution and processes. Siena; Terra Antarctica Publications: 139-148.
- SPRAY J G, 1995. Pseudotachylyte controversy: fact or friction? [J]. *Geology*, 23 (12): 1119-1122.
- SPRAY J G, KELLEY S P, REIMOLD W U, 1995. Laser probe argon-40/argon-39 dating of coesite- and stishovite-bearing pseudotachylytes and the age of the Vredefort impact event [J]. *Meteoritics*, 30 (3): 335-343.
- THOST D E, HENSEN B J, MOTOYOSHI Y, 1991. Two-stage decompression in garnet-bearing mafic granulites from Sørstrene Island, Prydz Bay, East Antarctica [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 9 (3): 245-256.
- TRIELOFF M, REIMOLD W U, KUNZ J, et al., 1994. ^{40}Ar - ^{39}Ar thermochronology of pseudotachylyte at the Ventersdorp Contact Reef, Witwatersrand basin [J]. *South African Journal of Geology*, 97 (3): 365-384.
- WENK H R, 1978. Are pseudotachylytes products of fracture or fusion? [J]. *Geology*, 6 (8): 507-511.
- WOOD B J, 1974. The solubility of alumina in orthopyroxene co-existing with garnet [J]. *Contribution to Mineral and Petrology*, 46: 1-15.
- WENK H R, WEISS L E, 1982. Al-rich calcic pyroxene in pseudotachylyte: an indicator of high pressure and high temperature? [J]. *Tectonophysics*, 84 (2-4): 329-341.
- ZHAO Y, LIU X H, SONG B, et al., 1995. Constraints on the stratigraphic age of metasedimentary rocks from the Larsemann Hills, East Antarctica: possible implications for Neoproterozoic tectonics [J]. *Precambrian Research*, 75 (3-4): 175-188.

附中文参考文献

- 陈文, 刘新宇, 张思, 2002. 连续激光阶段升温 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 地质年代测定方法研究 [J]. *地质论评*, 48 (增刊): 127-134.
- 刘建民, 董树文, 张家声, 等, 2004. 大别造山带东部假玄武玻璃及其围岩的 K-Ar 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及地质意义 [J]. *地质学报*, 78 (3): 374-379.
- 刘建民, 陈柏林, 董树文, 等, 2009. 新疆富蕴可可托海—二台断裂带中假玄武玻璃及其围岩的年代学研究 [J]. *地质论评*, 55 (4): 581-589.
- 刘建民, 董树文, 张家声, 等, 2003. 大别造山带东部假玄武玻璃的成因 [J]. *地质力学学报*, 9 (2): 97-105.