

参考文献

- 1 Crossley D J, Hinderer J. Global Geodynamics Project_GGP: status report 1994. Proceedings of the Workshop on Non-tidal Gravity Changes, Luxembourg (1994): Published via Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie, Edited by Poitevin C, 1995, 11: 244~ 269
- 2 Goodkind J M. The superconducting gravimeters principals of operation, current performance and future prospects. Proceedings of the Workshop on Non-tidal Gravity Changes, Luxembourg (1990): Published via Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie. Edited by Poitevin C, 1991, 9: 81~ 90
- 3 Venedikov A P, Vieira R, Arnoso T J. A new program developed in Madrid for tidal data processing, Instituto de Astronomía y Geodesia. Universidad Complutense, 1995
- 4 Wenzel H G. The nanogal software: data processing package, Bull D'inform. Marees Terrestres, 1996, 124: 9 425~ 9 439
- 5 Melchior P, Ducarme B, Francis O. The response of the Earth to third body forces described by second and third degree spherical harmonics as derived from 12 years of measurements with superconducting gravimeter GWR/T3 in Brussels. Phys Earth Planet Inter, 1996, 93: 223~ 238
- 6 Sun H P. Comprehensive researches for the effect of the ocean loading on gravity observations in the western Pacific area. BIM, 1992, 113: 8 271~ 9 292
- 7 Dehant V, Defraigne, P. Tides for a convective Earth. 13th Inter, Sym Earth Tides, 1997
- 8 孙和平. 大气重力格林函数. 科学通报, 1997, 42(15): 1 640~ 1 646
- 9 Ducarme B, van Ruymbeke M. On tidal parameters at Brussels fundamental station, Pros. 11 th Sym. Earth tide, Helsinki (1989): Schweizerbastische Verlagsbuchhandlung, D_7000, Stuttgart, 1990. 157~ 166
- 10 Melchior P. A new data bank for tidal gravity measurements (DB92). Phys Earth and Planetary Interiors, 1994, 82: 125~ 155
- 11 Tamura Y. A harmonic development of the tidal-generating potential. Bull D'inform Marees Terrestres, 1981, 64: 677~ 704
(1997-08-30 收稿, 1998-03-24 收修改稿)

汉诺坝地幔捕虏体中的硫化物包裹体

徐九华^④ 储雪蕾^④ 邹一民 杜元福

(北京科技大学资源工程学院, 北京 100083; ④中国地质大学(北京)研究生院, 北京 100083;

④中国矿物资源探查研究中心, 北京 100101; 中国科学院地质研究所, 北京 100029)

摘要 通过对汉诺坝玄武岩中二辉橄榄岩等捕虏体的地幔矿物内硫化物包裹体进行电子探针分析, 查明了硫化物包裹体的主要组成, 其 Ni/Fe 比值与原寄生地幔岩有关. 二辉橄榄岩中硫化物包裹体中铁镍硫化物(均为镍黄铁矿成分)的 Ni/Fe 比值明显高于橄榄辉石岩的(以镍黄铁矿为主, 部分为磁黄铁矿). CO₂ 包裹体的激光拉曼探针表明硫(H₂S+ SO₂) 在气相中普遍高于 20%(摩尔百分数), 与出现较多硫化物熔体包裹体有关.

关键词 地幔捕虏体 硫化物包裹体 电子探针分析

汉诺坝玄武岩分布于河北省张家口市的万全、崇礼、尚义和张北等县. 20 多年来, 在其中不少地方出露的碱性玄武岩层中陆续发现较为丰富的地幔捕虏体, 成为研究地幔的一个“窗口”, 也为研究地幔流体的性质提供了很好的地质样品. 自从夏林圪开展 CO₂ 包裹体研究以来, 我国在地幔岩的流体包裹体研究上已经取得了一些重要成果^[2~ 4]. 近年来, 国内外对地

幔矿物中硫化物包裹体也开始有所报道^[5~8]. 地幔岩中硫化物包裹体的发现与研究无疑对进一步认识地幔流体的成分、演化, 以及地幔流体的成矿作用有着重要意义.

1 流体包裹体(含熔体包裹体)的类型与特征

本文研究的地幔捕虏体样品采自万全县大麻坪、尚义县青杨沟和崇礼县接沙坝. 碱性玄武岩与拉斑玄武岩成互层, 呈近水平出露. 地幔岩被捕获在某一层位的碱性玄武岩中, 以尖晶石二辉橄榄岩为主, 其次还有橄榄辉石岩、纯橄岩和辉石巨晶等, 偶见石榴子石辉石岩和二辉麻粒岩等. 捕虏体多呈圆形、椭圆形, 大小几厘米至几十厘米不等, 也有的呈角砾等不规则形状. 捕虏体占全岩体积的大约 20%~80% 不等. 所研究样品的橄榄石、单斜辉石、斜方辉石等主要地幔矿物中均有流体包裹体和熔体包裹体出现, 大小不等, 一般在5~30 μm 之间.

按主要成分及相态特征可把汉诺坝的地幔岩中流体(含熔体)包裹体分成5种基本类型: () 纯 CO_2 包裹体. 椭圆形至不规则形态出现; () CO_2 熔体包裹体. 由 CO_2 收缩泡和残余玻璃相构成, 常成群成带出现在地幔矿物中; () 含硅酸盐子矿物的 CO_2 熔体包裹体. 与前者不同的是在残余玻璃相中有硅酸盐子矿物结晶出; () 硫化物熔体包裹体. 由硫化物和残余的硅酸盐熔体组成, 呈长圆或蠕虫状成群成带分布于橄榄石内, 有时见到在橄榄石晶粒边缘的硫化物副矿物附近成群分布(图1); () CO_2 硫化物熔体包裹体. 与前者不同的是在残余玻璃相中有 CO_2 的收缩泡出现. 第()、()类包裹体就是本文重点研究的硫化物熔体包裹体.

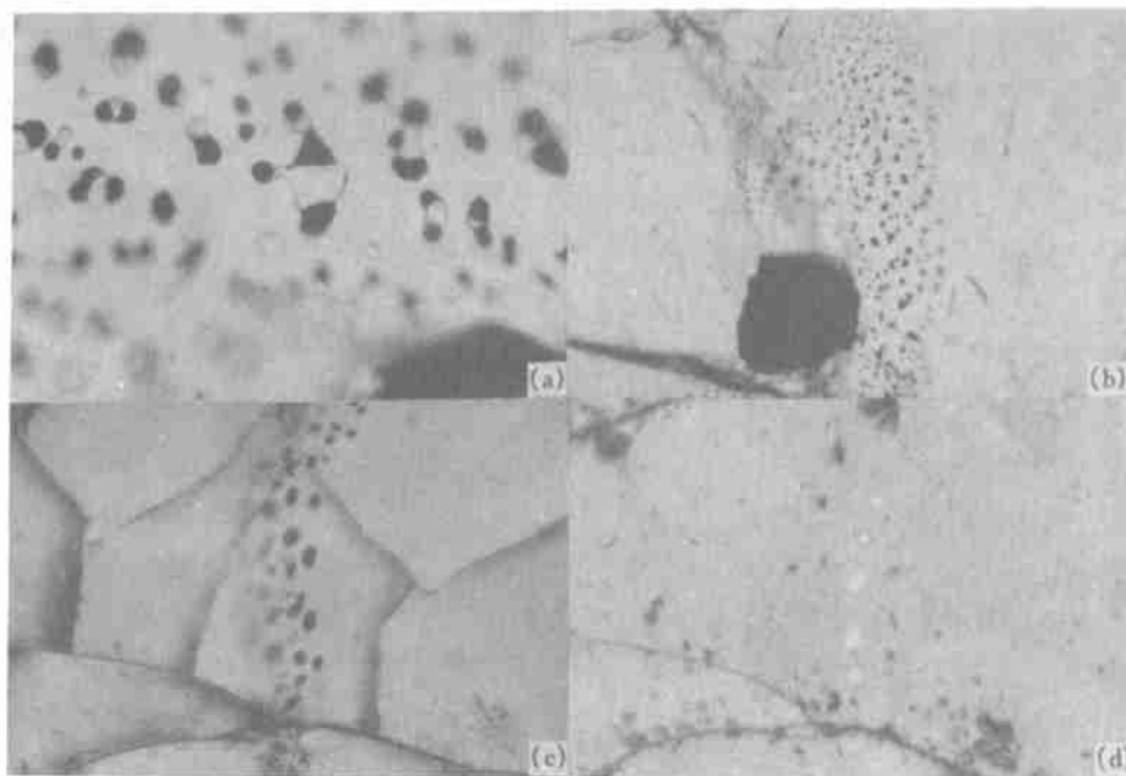


图1 硫化物包裹体照片

(a) 硫化物包裹体群(D15 橄榄辉石岩, 400 $\times$, 透射光); (b) 橄榄石粒间硫化物及周围的硫化物包裹体(D15, 40 $\times$, 透射光); (c) 透射光下的硫化物包裹体(J131 橄榄辉石岩, 250 $\times$); (d) 反射光下的硫化物包裹体(J131 橄榄辉石岩, 250 $\times$)

几种类型的含 CO_2 的单个流体包裹体气相成分的激光拉曼探针分析结果列于表1. 表中

数据表明各类包裹体气相中 CO_2 的含量(相对含量)十分接近,均在 50%~60% (摩尔百分数,下同)之间。 H_2S 、 SO_2 和 CH_4 的含量也比较一致,但 N_2 、 H_2 和 H_2O 只在少数样品中测出。这些数据与浙江西堍地区二辉橄榄岩辉石中的 CO_2 包裹体的分析结果接近,那些样品的激光拉曼探针分析结果为 57.9%~60.9% 的 CO_2 ^[2];但与福建明溪、浙江新昌地区的数据有明显的差别,那里的 CO_2 含量可高达大约 95%^[3]。汉诺坝包裹体样品的一个显著特点是硫($\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2$) 在气相中占有相当大的比例,普遍高于 20%,甚至可高于 30% (表 1),这可能是出现较多硫化物熔体包裹体的原因之一。

表 1 汉诺坝地幔捕虏体中几个有代表性的含 CO_2 的单个流体包裹体成分(%)^{a)}

样品	寄主岩石和矿物	CO_2	N_2	H_2S	CH_4	CO	$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	SO_2	H_2	包裹体类型
J01(1)	二辉橄榄岩, Ol ^{b)}	57.9	8.4	9.8	—	—	—	12.8	—	2
D15(1)	橄榄辉石岩, Ol	60.1	—	10.1	7.1	—	11.4	11.3	—	5
D07(1)	二辉橄榄岩, Ol	50.2	—	—	12.8	10.6	—	14.1	12.3	3
D07(2)	二辉橄榄岩, Ol	54.2	—	15.4	12.5	—	10.7	7.2	—	2
DA5(1)	二辉橄榄岩, Ol	58.8	—	15.3	10.2	—	—	15.7	—	1

a) 委托西安地质矿产研究所李月琴、王志海测定,采用激光拉曼探针分析方法。仪器: RAMANOR U1000; Ar 激光器,波长 514.5 nm,激光功率 600 mW,狭缝 450 mm; b) Ol 表示橄榄石;包裹体类型代号与正文相同

2 硫化物包裹体及成分

所观测到的硫化物熔体包裹体主要见于汉诺坝的尖晶石二辉橄榄岩、橄榄辉石岩中。包裹体多为不规则形状、蠕虫状或长圆形,长约 5~20 μm 不等,几十至几百个呈带状或羽状成群分布。包裹体中只有硫化物一相,或与残余玻璃相共生呈两相出现。有时在玻璃相内又有 CO_2 收缩泡。显微镜观察时,在透射光下硫化物表现为黑色的球泡或蠕虫状(图 1),曾被认为是含 N_2 的 CO_2 包裹体^[1]。若把表面抛光的光薄片置于反光镜下,一些露出抛光表面的“黑色球泡”的断面呈黄白色的亮点,显示硫化物的反射色。黄婉康等人^[5]曾报道过在辽宁宽甸等地的辉石巨晶中观察到硫化物球泡,按他们描述的产状和给出的照片来分析,其中部分硫化物球泡可能就是硫化物包裹体。

一些包裹体中硫化物相的电子探针成分分析结果列于表 2。同时列出的还有橄榄石和辉石粒间的硫化物矿物分析结果,以便比较。矿相研究表明,二辉橄榄岩(Q117)和橄榄辉石岩(D15, J131)的橄榄石粒间硫化物主要为镍黄铁矿,少量为黄铜矿。而橄榄辉石岩(J139)的辉石内或粒间的硫化物为磁黄铁矿,或磁黄铁矿加少量黄铜矿的连生体。EPMA 分析结果与矿相观察一致。硫化物包裹体因太小,矿相显微镜难以分辨。如果按矿物学中镍黄铁矿的 Ni/Fe 的摩尔比值为 0.2~1.5,而磁黄铁矿的小于 0.2 来确定包裹体中硫化物的成分,则二辉橄榄岩(Q117, DA5)中硫化物包裹体主要为镍黄铁矿。橄榄辉石岩(J131, D15)中硫化物包裹体既有镍黄铁矿,也有磁黄铁矿。而据黄婉康所研究辉石巨晶中硫化物球泡成分主要为磁黄铁矿。

汉诺坝的硫化物包裹体的一个重要特征是部分样品 As 含量很高,比主矿物粒间硫化物要高 10~40 倍,但 As 含量未达到辉砷镍矿(Ni, Co, Fe)AsS 的比例(见表 2)。此外,汉诺坝地幔捕虏体中硫化物包裹体和硫化物副矿物都不同程度地富集 Cu, Zn, Au, Ag 等金属成矿元素。

表2 汉诺坝地幔岩的硫化物包裹体中金属硫化物电子探针分析结果(%)^{a)}

	D15(1)	D15(2)	D15(3)	DA5(2)	Q117-1	Q117-3	J131-3	J131-4-1	J131-4-2	J131-4-3	J131-5-1	J131-5-2	J139-1	J139-2
S	47.57	42.90	45.35	46.55	48.32	48.32	45.99	46.63	47.08	47.47	47.22	48.60	49.83	52.87
Fe	41.17	43.16	40.68	30.08	18.18	18.18	23.40	25.99	26.40	27.16	26.73	30.63	25.34	45.02
Co	0.42	0.26	0.22	0	0.18	0.18	0.40	0.24	0.25	0.08	0.32	0.20	0	0
Ni	9.70	2.04	5.67	19.17	27.14	27.14	29.20	26.00	25.08	17.23	24.18	18.18	1.46	1.19
Cu	0.44	0.11	0.15	0.60	2.81	2.81	0	0.24	0.19	6.31	0.88	1.47	22.35	0
Zn	0	0.13	0.19	0.41	0.29	0.29	0	0	0.31	0	0.03	0.12	0.36	0.17
As	0.22	10.66	7.32	2.97	2.67	2.67	0.68	0.62	0.63	0.87	0.59	0.59	0.59	0.53
Te	0.03	0.20	0.04	0.02	0.10	0.10	0.01	0.23	0.03	0.53	0	0.05	0.03	0.05
Se	0.13	0	0	0	0	0	0.05	0.02	0	0.13	0.02	0.06	0	0
Au	0.02	0.09	0	0.03	0	0	0.06	0.02	0	0.04	0	0.02	0.04	0
Ag	0.10	0.26	0.01	0.13	0.07	0.07	0.06	0	0.03	0.13	0	0.01	0	0
Mn	0.03	0.04	0.12	0	0.24	0.24	0.16	0.02	0	0.06	0.03	0.06	0	0.18
Ti	0.15	0.06	0.08	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	0	0.07	0.07	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
% ^{b)}	100.0	100.0	100.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
% ^{c)}	99.99	99.85	99.79	100.03	100.03	100.03	100.02	100.02	100.02	100.02	100.02	100.02	100.02	100.00
Ni/Fe ^{d)}	0.24	0.05	0.14	0.64	1.49	1.49	1.25	1.00	0.95	0.63	0.91	0.59	-	0.026
矿物 ^{e)}	Pn	Po	Po	Pn	Pn	Pn	Pn	Pn	Pn	Pn	Pn	Pn	Cp	Po
产状	粒间	包裹体	包裹体	包裹体	包裹体	包裹体	裂隙中	包裹体	包裹体	包裹体	包裹体	包裹体	裂隙中	裂隙中

a) 中国地质大学(北京)电子探针室李树岩、陈卉泉测定. 仪器: JXA-733 电子探针和 Link 860-2 能谱仪, 加速电压 15 kV, 探针电流 2×10^{-8} A, 激发束斑直径 0.5 μm , 精度误差小于 1%; b) 摩尔总量; c) 重量总计; d) 摩尔比值; e) Pn-镍黄铁矿, Po-磁黄铁矿, Cp-黄铜矿, “-”表示未测

4 讨论

汉诺坝的硫化物包裹体中铁镍硫化物的 Ni/Fe 比值看来与原寄生地幔岩有关. 二辉橄榄岩中硫化物包裹体的铁镍硫化物的 Ni/Fe 比值, 为 0.6~1.49(均为镍黄铁矿成分), 明显高于橄榄辉石岩的 0.05~1.0(以镍黄铁矿为主, 部分为磁黄铁矿). 已发表的福建明溪的 ML_1(尖晶石方辉橄榄岩)和闽清的 MQ_8(石榴子石二辉橄榄岩)中硫化物包裹体的透射电镜成分分析结果表明其 Ni/Fe 比值都大于 0.6, 也为镍黄铁矿^[6]. 辽宁宽甸等地辉石巨晶中硫化物球泡主要为磁黄铁矿(Ni/Fe 比值为 0.02~0.085, 8 个点分析数据), 个别为镍黄铁矿(Ni/Fe 比值为 0.8~0.89, 2 个点分析数据)^[5]. 根据 Fe-Ni-S 体系相图研究, 磁黄铁矿晶出最早(1192℃), 残余硫化物熔体中 Ni 逐渐富集, 温度下降至 610℃时镍黄铁矿作为稳定矿物相晶出^[5]. 由此看来辉石岩和巨晶中硫化物包裹体(其 Ni/Fe 比值较低, 主要为磁黄铁矿)是在较高温度下被捕获的. 而二辉橄榄岩中硫化物包裹体的 Ni/Fe 比值较高, 一般大于 0.6, 主要为镍黄铁矿, 反映它们可能是在较低温度下被捕获的. 这从一个方面反映辉石岩和巨晶与二辉橄榄岩成因上的差异.

另一方面, 硫化物包裹体 Ni/Fe 比值一般低于寄主矿物粒间硫化物的 Ni/Fe, 如汉诺坝的 D15 样品(橄榄辉石岩)中, 橄榄石颗粒间的金属硫化物矿物(D15(1))为镍黄铁矿, 而橄榄石中两个熔体包裹体中硫化物(D15(2)和 D15(3))更接近磁黄铁矿成分. 鉴于磁黄铁矿形成温度应高于镍黄铁矿, 这正好说明橄榄石中硫化物包裹体的形成早于橄榄石粒间的硫化物矿物. 此外, 同一群硫化物包裹体中每个包裹体都具有相似的硫化物相和硅酸盐玻璃相体积比值, 初步推断这些熔体包裹体捕获自成分较均一的熔浆, 包裹体中硫化物相和硅酸盐玻璃相的熔离发生在熔体包裹体被捕获之后, 随温度下降而发生的.

致谢 国家地震局地质研究所樊祺诚研究员、中国地质大学(北京)李树岩教授、北京科技大学李前懋教授提供了很大帮助. 本工作为国家自然科学基金(批准号:49673175)资助项目.

参 考 文 献

- 1 夏林圻. 我国六合、张家口碱性玄武岩内橄榄岩包体中的高密度二氧化碳流体包裹体. 矿物学报, 1984, (2): 133~142
- 2 夏林圻, 曹荣龙. 浙江西堍地区上地幔流体的性质的研究. 科学通报, 1990, 35(11): 844~847
- 3 樊祺诚, 刘若新, 彭礼贵. 我国东南沿海地区地幔流体性质及其意义. 科学通报, 1992, 37(17): 1584~1587
- 4 刘刚, 王先彬, 李立武. 张家口大麻坪碱性玄武岩内地幔岩包体气体成分的初步研究. 科学通报, 1996, 41(19): 1775~1777
- 5 黄婉康, Basu A R. 辉石巨晶中的硫化物及其成因. 矿物学报, 1987, (2): 121~127
- 6 刘若新, 樊祺诚, 林卓然, 等. 地幔流体包裹体中多种固相充填物的发现及其意义. 科学通报, 1993, 38(23): 2177~2180
- 7 Szabo Cs, Bodnar R J. Fluid inclusions in mantle xenoliths from Nograd-Gomor volcanic Field (North Hungary/South Slovakia) (abst.). In: PACROFI IV, 1992. 80
- 8 Roedder E. Fluid inclusion evidence of mantle fluids. In: APIFIS Newsletter, 1996. 6~7

(1997-09-26 收稿, 1998-01-26 收修改稿)