我国东南沿海地区地幔流体性质及其意义*

樊祺诚　　刘若新
（国家地震局地质研究所，北京 100029）

彭礼贵
（西安地质矿产研究所，西安 710054）

关键词　流体包裹体、地幔橄榄岩

地幔流体在研究地幔物质成分、交代作用、部分熔融等深部地球化学过程的重要性，已越来越受到重视。由 Roedder 定义的地幔流体包括熔体和挥发分两者在内(主要是 CO_2、硅酸盐熔体、硫化物熔体)[1]。Roedder 首先发现地幔岩中原生和次生两类 CO_2 流体包裹体[2]，夏林圻对中国新生代玄武岩中地幔橄榄岩的 CO_2 流体包裹体做了相应的研究报道[3]。彭礼贵报道了阿尔卑斯型橄榄岩中又一类全晶化岩浆包裹体，其成分相当于超镁铁质橄榄岩[4]。

我们研究的东南沿海地区的新昌和明溪两地新生代玄武岩的石榴石二辉橄榄岩、尖晶石/石榴石二辉橄榄岩和尖晶石二辉橄榄岩捕虏体中发现有上述各类包裹体。本文研究了这些包裹体的成分，并对该区地幔流体性质，以及包裹体与地幔岩之间成因关系进行了讨论。

一、地幔橄榄岩与流体包裹体概述

中国东部新生代碱性玄武岩中富含超镁铁质捕虏体，以尖晶石橄榄岩占优势。少数几个石榴石橄榄岩产地集中于东南沿海的浙江、福建[5]，它们又与尖晶石橄榄岩共生。本文研究的新昌石榴石二辉橄榄岩和尖晶石二辉橄榄岩均富含 CO_2 流体包裹体，在岩石中的最高含量可达 5%（体积）。明溪尖晶石/石榴石二辉橄榄岩和尖晶石二辉橄榄岩中的 CO_2 流体包裹体较少，但在有的样品或矿物中有局部富集现象。CO_2 流体包裹体主要分布于橄榄石、辉石中，但在尖晶石和石榴石中也有少量分布。

次生 CO_2 包裹体和 CO_2 岩浆包裹体，少数呈孤立于主矿物中的负晶形，常见的以浑圆状、管状、树枝状、串珠状、蠕虫状等形态聚集成带状或各种不规则的面状分布。包裹体个体变化可以很大，从小于 1μm 到大于十几微米，常见 1—5μm。原生全晶化岩浆包裹体个体大、形态规则，呈孤立的浑圆形、椭圆形和负晶形，个体直径一般大于 20μm，多数在 40—80μm。

二、流体包裹体的成分与性质

1. CO_2 包裹体　CO_2 包裹体室温下（$T \simeq 20$℃）多数为单相(液相 CO_2)，少数为双相(液相 CO_2 + 气相 CO_2)。由 CHAIMECA 冷热台测温结果，CO_2 熔化温度变化于 56.0—

1992-03-04 收稿，1992-05-11 收修改稿
* 国家自然科学基金资助项目

56.1℃，基本上接近 CO_2 三相点，表明这些 CO_2 包裹体中的 CO_2 为纯 CO_2 或接近纯 CO_2。据冷冻法研究，CO_2 的均一温度变化于+20.9℃到−31.3℃，上述现象反映了一个群体中包裹体内 CO_2 密度是变化的，其中一些包裹体内的填充物为高密度 CO_2。根据 CO_2 相均一温度计算的新昌和明溪两地 CO_2 包裹体中 CO_2 密度分别为 0.769—1.058g/cm³ 和 0.840—1.081 g/cm³。由于地幔橄榄岩捕虏体被搬运至地表过程中减压受热，导致大部分包裹体失去密封性。只有那些较小的早期包裹体才可能保存其密封性，具有较高的密度[3]。

激光拉曼探针分析结果(表 1)表明，CO_2 包裹体中填充物最主要组分是 CO_2，此外尚有少量 CO、H_2O、H_2S、CH_4、N_2、H_2 等。不论是新昌和明溪两地区之间，还是同一地区，都存在 CO_2 包裹体中流体组分的差异，特别是反映在次要组分上，新昌地区富 CO、H_2O，明溪地区富 H_2O、CH_4 和 H_2S。这反映了地幔流体的主要成分均为 CO_2，而少量组分呈现出地区间的不均一性。

表 1　新昌、明溪 CO_2 包裹体激光拉曼探针分析[a)]

序号	地点	岩石名称	样品号码	气相 (%)[b)]							液相(%)			
				CO_2	N_2	H_2S	CH_4	CO	H_2O	H_2	CO_2	H_2O	H_2S	CH_4
1	新昌	石榴石二辉橄榄岩	2n-2-8	95.0			2.2			2.8	91.0	9.0		
2				83.6			2.6		13.8					
3				60.5		12.2		27.3						
4		尖晶石二辉橄榄岩	2n-2-1	67.2			3.8		29.0					
5				46.5				24.5	11.8		98.0		2.0	
6	明溪	尖晶石/石榴石二辉橄榄岩	MD-6	94.6					5.4		46.0	20.0	27.0	7.0
7				56.1		13.9	13.7		16.3		70.0	30.0		
8		尖晶石二辉橄榄岩	ML-1	95.7	1.6		0.4		2.3					
9			ML-20	71.0		11.6	17.4							
10			ML-20								62.0	20.0	8.0	10.0

a) 分析者：西安地质矿产研究所徐培苍、王志海、李月琴.
仪器：RAMANOR U-1000 激光拉曼探针，氩离子激光器：波长 514.5nm，功率 500mW，狭缝宽 400μm，色散率 9.2cm⁻¹/mm，光电倍增管高压 1530V.

b) 克分子数的相对百分含量

2. CO_2 岩浆包裹体　室温下 ($T \simeq 20$℃) CO_2 岩浆包裹体一般由子矿物相、残余玻璃和 CO_2 收缩泡组成不同的相组合。晶相子矿物多垂直包裹体壁腔生长，呈齿状、柱状和尘粒状等多种形态，子矿物有橄榄石、辉石、尖晶石等。用 Leitz 1350 热台测得 CO_2 岩浆包裹体最高均一温度为 1267℃，将这个均一温度和最高 CO_2 密度值 (1.081g/cm³) 代入 Kerrick-Jacobs 的 CO_2 状态方程[6]，求得本区 CO_2 流体包裹体被捕获时的最小压力值为 1147MPa (约 40km)。

由于本区 CO_2 岩浆包裹体太小，样品制备和测试难度大。唯一获得的新昌石榴石二辉橄榄岩中 CO_2 岩浆包裹体的均一化学成分(表 2)，与寄主碱性橄榄玄武岩的化学成分有明显不同，以高 Al_2O_3(19.08%)、MgO(11.62%)、K_2O (3.96%) 和低 FeO (3.91%) 为特征。这显示了与西垄石榴石二辉橄榄岩的斜方辉石中 CO_2 岩浆包裹体均一化学成分[7]的共同特点。

3. 全晶化岩浆包裹体　原生全晶化岩浆包裹体完全被晶相子矿物充填，收缩气泡被挤压分散于包裹体壁腔以及晶相子矿物之间而难于辨认，可以见到许多极细小的气泡环绕包裹

表 2　新昌石榴石二辉橄榄岩中橄榄石的 CO_2 岩浆包裹体均一化学成分

氧化物	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	NiO	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	H_2O^+	H_2O^-	合计
均一化学成分[a]	50.36	1.25	19.08	0.16	0.03	3.91	0.09	11.62	5.54	2.21	3.96	—	—	—	98.09
寄主碱性玄武岩[b]	48.53	2.20	12.72	0.03	0.02	11.75	0.28	7.73	7.40	3.20	2.25	1.30	0.46	0.99	98.86

a）西安地质矿产研究所刘文峰、李振兴分析，　b）国家地震局地质研究所丁玉明分析

体壁腔分布．橄榄石是主要晶相子矿物(60—80%)，辉石子矿物有斜方辉石和单斜辉石两种，多呈齿状或短柱状垂直包裹体壁腔生长，个体细小，一般小于 1μm，少数达 5μm 以上，含量约 10—40%．尖晶石子矿物以尘粒状多见，均很细小，少数为四边形，含量 1%左右．总之，晶相子矿物种类、百分含量大体相当于地幔岩主矿物．

晶相子矿物电子探针分析结果及其与地幔橄榄岩主矿物化学成分比较如表 3．子矿物橄榄石的 Fo 变化于 88.1—91.6，平均 90.6，属镁橄榄石，且 NiO 含量较高 (0.30—0.47%，平均 0.38%)，具有地幔岩橄榄石的特点．斜方辉石为顽火辉石 (En = 89.2—91.1，平均 90.0)．单斜辉石为铬透辉石，有趣的是这种单斜辉石含较低的 CaO(17.97%)，显示了与其寄主石榴石二辉橄榄岩中主矿物单斜辉石成分 (CaO = 18.29%) 的亲缘性，区别于尖晶石二辉橄榄岩中的单斜辉石 (CaO = 20.67%)[8]．尖晶石子矿物成分为铬尖晶石，但铬含量略低于主矿物．用 Mercier (1980) 法估算的尖晶石二辉橄榄岩的子矿物和主矿物的形成温度、压力条件是非常

表 3　全晶化岩浆包裹体子矿物成分与地幔橄榄岩主矿物成分比较[a]

岩石类型	Gt 二辉橄榄岩 Sp 二辉橄榄岩		Sp 二辉橄榄岩		Gt 二辉橄榄岩		Sp 二辉橄榄岩	
矿物 / 氧化物	橄榄石		斜方辉石		单斜辉石		尖晶石	
	子矿物(13)	主矿物(35)	子矿物(2)	主矿物(24)	子矿物(5)	主矿物(11)	子矿物(1)	主矿物(20)
SiO_2	39.94	40.71	55.20	55.11	52.80	51.64	0.04	nd
TiO_2	0.02	nd	0.09	0.10	0.41	0.47	0.12	0.05
Al_2O_3	0.04	0.04	3.08	4.31	6.47	6.40	58.82	55.25
Cr_2O_3	0.05	0.10	0.36	0.34	0.97	1.04	7.47	11.99
NiO	0.38	0.28	0.05	nd	0.08	nd	0.36	0.08
FeO	9.16	9.42	6.22	5.97	3.36	3.42	11.70	8.38
MnO	0.08	nd	0.13	0.14	0.10	0.10	0.13	0.10
MgO	49.85	50.64	35.16	34.01	15.82	16.41	21.21	20.86
CaO	0.08	0.07	0.51	0.61	17.97	18.29	0.06	nd
Na_2O	0.01	nd	0.06	0.08	1.49	1.64	0.03	nd
总量	99.61	101.26	100.86	100.67	99.47	99.42	99.94	98.28
Fo	90.6	90.3						
Wo			1	1	42	42		
En			90	90	52	52		
Fs			9	9	6	6		
P(MPa)			1750	1703				
T(℃)			979	1013				

a）子矿物由西安地质矿产研究所刘文峰分析．加速电压 15kV，探针电流 20μA，束斑 2μm．主矿物成分引自文献[8]，括号内数字为样品数．矿物平衡温压计算方法据 Mercier (1980)

接近的，约相当于 60km 深度左右。

三、结　论

1. 新昌地区和明溪地区上地幔橄榄岩中富 CO_2 包裹体，除主要成分 CO_2 外，尚有少量或次要的 CO、CH_4、H_2S、H_2O、N_2 和 H_2，两地区地幔流体在次要成分上有明显差别，反映上地幔流体的主要成分均为 CO_2，而少量组分呈现出地区间的不均一性。

2. CO_2 岩浆包裹体的均一温度(1207—1267℃)相当于玄武岩的熔融温度。不论其寄主矿物是橄榄石(本文)还是斜方辉石[7]，均一化学成分均具玄武岩性质，并含异常高 Al_2O_3(18%)，明显不同于寄主玄武岩成分，可能具有原生未分异岩浆特点。

3. 由计算的 CO_2 压力推测，次生 CO_2 包裹体和 CO_2 岩浆包裹体被捕获深度超过 40km。不同地区不同主矿物中 CO_2 岩浆包裹体的均一化学成分相似性也倾向于捕获成因，而非地幔橄榄岩不同矿物粒内熔融产生相似的含 CO_2 熔体，而象橄榄石要熔出富 Al_2O_3、CaO、Na_2O、K_2O 等玄武质成分则更难于想象。

4. 原生全晶化岩浆包裹体是在地幔岩结晶过程中被包裹于矿物晶体之中并保存至今，具有原始地幔岩浆特点，从而使这个微小的封闭体系结晶演化过程反映出早期地幔演化并保存有尚待研究的早期地幔演化的信息。

参　考　文　献

[1] Roedder, E., Fluid inclusions, *Mineral. Soc. Am. Rev. Mineral.*, 12(1984), 504—506.
[2] Rodder, E., *Amer. Mineral.*, 50(1965), 1746—1782.
[3] 夏林圻，矿物学报，1984,2: 133—142.
[4] 彭礼贵，科学通报，31(1986),4: 293—297.
[5] 刘若新、樊祺诚、孙建中，岩石学报，1985,4: 24—33.
[6] Kerrick, D. M., Jacobs, G. K., *Amer. J. Sci.*, 281(1981), 735—767.
[7] 夏林圻、曹荣龙，科学通报，35(1990),11: 844—847.
[8] Fan, Q. C., Hooper, P. R., *J. Petrol.*, 30(1989), 1117—1158.