

# 均匀流体和不均匀流体的形成机制： 来自合成流体包裹体的证据

张振亮<sup>1,2</sup>, 吕新彪<sup>3</sup>, 饶冰<sup>4</sup>

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中原油田勘探开发科学研究院, 河南濮阳 457001

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

4. 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093

**摘要:** 为详细了解流体的形成机制, 对系统的流体包裹体合成实验进行研究. 研究表明, 在合成流体包裹体实验中, 广泛存在流体的均一化和沸腾作用; 流体的均匀与否, 与流体  $p-t$  轨迹在  $TP(H_2O)-CP(H_2O)-CP(NaCl-H_2O)$  曲线的部位有密切的关系.  $p-t$  轨迹在曲线上部的流体为均匀流体, 反之则为沸腾流体. 但也有例外, 如在溶解曲线上被主矿物捕获的流体. 这为本次研究一定条件下流体的形成机制、探讨成矿作用提供了理论依据.

**关键词:** 合成流体包裹体; 均匀流体; 不均匀流体; 形成机制.

中图分类号: P611.5

文章编号: 1000-2383(2008)02-0259-07

收稿日期: 2007-05-12

## Formational Mechanisms of Homogeneous Fluid and Boiling Fluid: Evidences from Synthetic Fluid Inclusions

ZHANG Zhen-liang<sup>1,2</sup>, LÜ Xin-biao<sup>3</sup>, RAO Bing<sup>4</sup>

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Zhongyuan Petroleum Administrative Bureau, Puyang 457001, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract:** Synthetic fluid inclusions were studied in order to discuss formational mechanisms of homogeneous fluid and boiling fluid in detail. The results of experiments of fluid inclusion synthesizing show frequent occurrences of homogeneous fluid and boiling fluid, was closely in relation to the position of its  $p-t$  locus in  $TP(H_2O)-CP(H_2O)-CP(NaCl-H_2O)$  curve of  $p-t$  phase diagram of  $NaCl-H_2O$  system determined whether the fluid was homogeneous. If it was at the upper zone of  $TP(H_2O)-CP(H_2O)-CP(NaCl-H_2O)$  curve, then the fluid was homogeneous, otherwise, the fluid was boiling. But the fluid trapped on the solution curve of  $NaCl$  in water was an exception, for example No. 10 experiment. This was very beneficial for us to study on the formation mechanism of fluid and mineralization in the ore deposit.

**Key words:** synthetic fluid inclusion; homogeneous fluid; boiling fluid; formational mechanism.

流体是地壳和上地幔地球化学系统的重要组成部分, 流体的成分及状态会因其所处的环境的不同而有较大的差异. 在过去的几十年中, 通过详细研究天然流体包裹体, 地质研究者已经提供了大量有关

各种地质环境中流体包裹体的宝贵资料, 而且已经可以比较可靠地测出给定的地壳或上地幔环境中的包裹体类型及其岩相学和热力学特征(刘斌和沈昆, 1995; Philippot, 1996; Bakker and Diamond, 2000;

Kendrich *et al.*, 2001). 但地学界对流体包裹体的捕获机理以及被捕获以后可能发生的变化仍然存在一些疑问. 另外, 关于流体在适当的  $P-T-X$  条件下的相平衡和体积的数据仍然缺乏, 对包裹体数据解释的一些假设尚有待于证明. 因此, 很多地质学家尝试用人工生长晶体时伴生的流体包裹体 (Roedder and Kopp, 1975) 或采用专门技术合成的流体包裹体研究一些相关的问题 (Zhang and Frantz, 1989; Jeffery *et al.*, 1994; Schmidt *et al.*, 1995). 在本次研究中, 作者也试图通过流体包裹体的合成实验研究, 探讨流体的捕获机制.

## 1 流体包裹体的合成实验

本次实验采用的方法类似于 Sterner and Bodnar (1984), 合成实验在南京大学内生金属成矿机制国家重点实验室进行. 具体方法是: 将人工合成水晶 (水晶中无大于  $1 \mu\text{m}$  的包裹体) 加工成直径为  $4 \text{ mm}$ , 长为  $10 \text{ mm}$  的石英柱,  $c$  轴垂直于直径  $4 \text{ mm}$  的圆面, 并用超声波+去离子水反复清洗石英柱, 直到干净为止. 然后放入在马氟炉中于  $355 \sim 375 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下加热约  $45 \text{ min}$ , 取出后立即在去离子水中淬火, 使石英柱产生大量的裂隙, 但不散裂, 并再次用超声波+去离子水反复清洗. 然后将淬火清洗后的石英柱放在  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱中干燥  $24 \text{ h}$  除去裂隙中的水分.

将处理好的石英柱样品装入直径  $5 \text{ mm}$  的黄金管中, 加入不同配比的物质和溶液. 用炔氧焰焊封, 称重, 放入  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱中烘  $24 \text{ h}$ , 再称重以检验焊封的质量. 焊封合格的黄金管装入内冷淬火高压釜中进行实验. 实验条件见表 1.

表 1 合成流体包裹体实验条件

Table 1 The experimental conditions of synthetic fluid inclusions

样品编号	溶液	盐度 (%)	压力 (MPa)	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	时间 (d)
1	$\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$	10	100	400	7
2	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	12	50	500	7
3	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	1	100	600	7
4	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	10	50	550	7
5	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	22	50	550	7
6	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	20	100	600	7
7	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	10	100	350	7
8	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	20	100	350	7
9	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	25	100	350	7
10	$\text{NaCl-H}_2\text{O}$	40	100	350	7

注: 在  $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$  混合溶液中,  $\text{NaCl}$  与  $\text{KCl}$  的重量比为  $4:1$ .

实验时先把高压容器的压力加到预定值 (传压介质为蒸馏水), 在此压力下  $4 \text{ h}$  左右后将高压容器的温度升高到设定值, 在此条件维持反应. 反应完成后, 在维持高压容器压力的条件下, 用压缩空气使其冷却淬火. 待其温度降到室温后卸掉压力打开高压容器, 取出黄金管, 称重, 并与装入时比较, 以判断反应过程中是否泄露. 如无泄露则说明合成实验成功, 取出石英柱, 沿圆柱长度方向将其切成厚约  $3 \text{ mm}$  的薄片, 然后磨成厚约  $1 \text{ mm}$  两面抛光的测温片进行分析.

## 2 包裹体温度与盐度测试

合成包裹体的盐度和均一温度测试在 Linkam TMS-93 型冷热台和 Laborlux D 型显微镜上进行, 目镜倍数  $10\times$ , 物镜倍数  $50\times$ . 均一温度的测定步骤是: 为节省时间, 先以  $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率将包裹体加热至  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 再以  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率继续加热, 至包裹体接近均一时改用  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率进行, 直至包裹体均一. 盐度测试视流体包裹体的类型而有所差异, 气液两相包裹体的盐度测定步骤是: 将包裹体以  $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率快速冷却至  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  以下, 恒温一段时间, 然后用  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率升温, 至包裹体中的第一块冰开始融化时改用  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率, 直至包裹体中的最后一块冰融化, 获得冰点; 上述步骤重复  $2\sim 3$  次, 结果取平均值; 在冷冻温度—盐度表中查出包裹体盐度 (张文淮和陈紫英, 1993); 或包裹体过冷却后, 测定  $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  晶体的消失温度, 利用公式  $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  晶体熔化温度—盐度换算表获得包裹体盐度. 压力由刘斌和沈昆 (1999) 所提供的公式  $p = a + b \times t + c \times t^2$  求得. 而含  $\text{NaCl}$  子矿物的多相包裹体的盐度测试步骤是: 在热台上测定  $\text{NaCl}$  子矿物的消失 (或溶解) 温度, 然后由饱和溶液的含盐度公式和压力公式 (Bischoff, 1991) 获得  $\text{NaCl}$  的含量和包裹体形成压力; 与多相包裹体共生的气液两相包裹体由于某些参数难以确定而未参加压力计算. 其测试及计算结果见表 2.

从表 2 可以看出, 样品 1 和 2 中均存在一期测试结果 (盐度、压力、温度) 与实验条件相近的流体包裹体, 且不同包裹体的形成条件 (盐度、压力、温度) 相似, 流体密度相同, 为均匀流体被捕获的结果. 但第二期包裹体有所差异: 样品 1 中的这期包裹体为气液两相包裹体, 气液比为  $15\% \sim 70\%$ , 盐度与压

表 2 合成流体包裹体的测试结果  
Table 2 The measurements of synthetic fluid inclusions

样品编号	气液包裹体						
	气液比 (%)	测试盐度 (%)	均一温度 (°C)	捕获温度 (°C)	流体密度 (g/cm <sup>3</sup> )	捕获压力 (10 <sup>5</sup> Pa)	测试个数
1	10~20	9.4~10.0	308~339	395~432	0.76~0.80	900~947	5
1	15~70	4.3~15.7	399~411	399~411	0.55~0.73	246~263	11
2	10~15	11.4~13.6	360~407	402~454	0.70~0.75	510~631	6
2	20~60	5.6~10.1	489~512	489~512	0.37~0.44		13
3	20~55	0.2~0.4	561~594	561~594	≈0		14
4	25~80	1.7~4.9	522~543	522~543	0.14~0.20		10
5	25~40	12.0~14.2	518~556	518~556	0.45~0.47		7
6	10~65	8.0~9.6	537~582	537~582	0.26~0.32		8
7	15~20	9.86~10.24	268~286	354~372	0.84~0.86	849~1034	11
8	10~20	18.7~20.4	242~267	326~351	0.96~0.97	667~752	9
9	10~15	23.22~24.4	257~298	339~382	0.96~1.00	850~1206	12
10							
样品编号	含子矿物的多相包裹体						
	子矿物消失温度 (°C)	测试盐度 (%)	气液均一温度 (°C)	捕获温度 (°C)	捕获压力 (10 <sup>5</sup> Pa)	流体密度 (g/cm <sup>3</sup> )	测试个数
1							未见含子矿物的多相包裹体
1							未见含子矿物的多相包裹体
2							未见含子矿物的多相包裹体
2	482~508	49.8~52.7	424~447	482~508	297~334	1.09~1.11	5
3	486~493	57.9~58.8	552~611	552~611	380~397	1.22~1.30	3
4	505~537	60.4~64.9	402~435	505~537	175~226	1.08~1.11	4
5	485~490	57.7~58.4	550~567	550~567	379~391	1.21~1.24	3
6	550~592	66.7~72.8	451~520	550~592	250~349	1.11~1.18	5
7							未见含子矿物的多相包裹体
8							未见含子矿物的多相包裹体
9							未见含子矿物的多相包裹体
10	308~361	38.5~42.3	310~365	308~361	66~125	1.06~1.08	11

力与实验条件有很大的差异; 且这些包裹体沿裂隙呈定向排列, 密切共生, 不同气液比的包裹体的形成条件(温度、压力)相似, 但流体密度有所差别; 另外, 不同气液比包裹体的均一方式也有所差异, 富气相包裹体均一到气相, 而富液相包裹体均一到液相, 因此, 这期包裹体为流体不均匀捕获的结果. 而样品 2 的第二期包裹体与样品 3—样品 6 中的包裹体比较相似, 即由两类流体包裹体组成: 一类为气液两相包裹体; 一类为含子矿物多相包裹体. 两类包裹体密切共生、温度与压力相近, 但含子矿物多相包裹体的流体密度远大于气液两相包裹体. 另外, 这两类包裹体的测试结果与实验条件均有较大的差别, 如温度、压力均低于实验的温度和压力, 气液包裹体的盐度小于实验盐度, 而含子矿物多相包裹体则大于实验盐度. 因此这些包裹体也为流体不均匀捕获的结果.

样品 7—样品 9 中的包裹体均为富液的气液两相包裹体, 尽管其捕获压力与实验压力有较大的出

入, 但包裹体捕获温度、盐度与实验温度和盐度非常一致; 包裹体气液比也非常稳定, 维持在 10%~20% 之间; 而且, 各实验形成的包裹体中的流体密度几乎相同; 说明这些样品中的包裹体是从均匀流体中捕获的.

而样品 10 中, 只发现含子矿物多相包裹体, 且子矿物与气泡的消失温度一致, 包裹体均一成液相, 表明流体可能是在矿物溶解曲线上被捕获(刘斌和沈昆, 1999). 另外, 包裹体捕获压力远远小于实验压力, 捕获温度也与实验温度有着一定程度的不同, 但包裹体盐度与实验盐度基本一致. 而且, 包裹体流体密度为 1.06~1.08 g/cm<sup>3</sup>, 与 350 °C(假设值)时被捕获的流体密度 1.07 g/cm<sup>3</sup> 非常一致. 这说明从实验稳定到流体被主矿物捕获的过程中, 流体都处于比较均匀的状态. 因此, 本样品中的包裹体也是从均匀流体中捕获的.

### 3 流体形成机制探讨

在本次实验中, 流体可分为均匀流体和沸腾流体两类.

#### 3.1 沸腾流体

沸腾流体是不均匀流体的一种特殊类型. 张德会(1997)研究表明, 该流体被广泛发现于浅成热液矿床、斑岩铜钼矿床及多金属中脉状矿床等矿床中, 是这些矿床矿物沉淀的重要机理. 前人(Spycher and Reed, 1989; 杨巍然和张文准, 1996; 肖新建等, 2004; 张振亮等, 2005; 郑有业等, 2006)对不同矿床(断裂)中的沸腾流体提出了多种形成机制. 但这些机制是否正确, 还有待于实验证明.

上述研究表明, 流体不均匀捕获在本次实验反映的是流体因实验条件或外界环境影响而发生的性质变化. 在本次实验中, 实验流体为事先配制的饱和和盐水溶液, 实验前不存在两种或多种流体共存的现象, 因此不均匀流体的形成只能由沸腾现象引起, 因不均匀捕获而形成的包裹体为沸腾包裹体. 根据具体实验情况, 本文将不均匀流体的形成又分为两种情况: 一种为由单纯压力下降而引起的流体沸腾作用. 该沸腾作用的起因是实验条件稳定以后高压釜发生缓慢泄漏(发现后被纠正), 但实验温度并没

有随之改变, 如样品 1 和样品 2 中的第二期包裹体. 由于流体压力在缓慢降低到临界线附近后被纠正, 没有继续降低的动力, 因此流体只能发生小规模沸腾作用. 样品 2 中的沸腾包裹体类型之所以与样品 1 不同, 在于样品 2 的沸腾包裹体形成温度要大大高于样品 1, 形成条件较样品 1 远离临界曲线(图 1). 另一种为温度、压力均有一定幅度下降而引起的沸腾作用, 而且下降过程一直在持续. 这类作用主要发生在合成包裹体实验的退火过程中. 实验关闭后, 高压釜在快速冷却(即将高压釜推出高温炉膛)的过程中, 压力也持续下降. 但由于冷却时间很短(一般为 2~7 h), 金管中的流体很快达到沸腾条件, 形成低密度、低盐度的气相流体和高密度、高盐度的液相流体. 当主矿物捕获到不同相的流体时, 可形成不同类型的包裹体. 捕获低密度的气相流体时, 所形成的是气液两相包裹体(以纯气相包裹体和富气相的气液两相包裹体为主), 包裹体中流体的盐度、密度均较小, 如样品 3—样品 6 中的气液两相包裹体; 捕获高密度、高盐度的液相流体时, 可能形成含子矿物的多相包裹体, 包裹体中流体的盐度、密度均较大, 如样品 3—样品 6 中的含子矿物多相包裹体. 含子矿物多相包裹体按照其子晶与气泡消失温度的先后, 可以分为两个亚类: 一为子晶先消失, 气泡后消失,

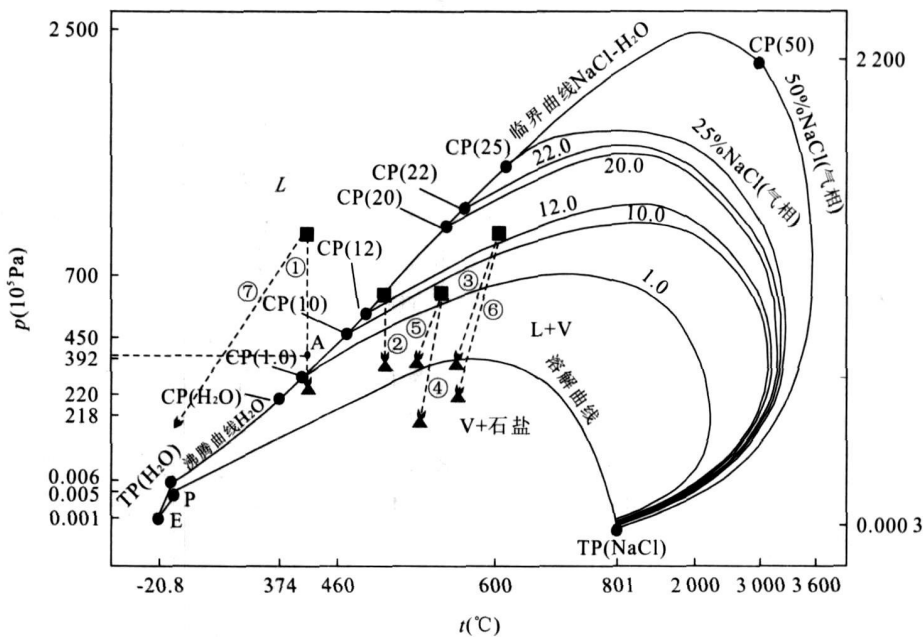


图 1 流体沸腾作用示意图

Fig. 1 Boiling of fluid at the condition of different  $p-t$

CP(50)代表 50%NaCl 水溶液的等组成线与临界曲线相切的点; ①—⑥为实验 1—实验 6 的沸腾作用变化趋势; ⑦为实验 1 的虚拟变化趋势. ■为各样品的实验稳定条件(温度与压力), △为包裹体的形成条件(温度与压力)

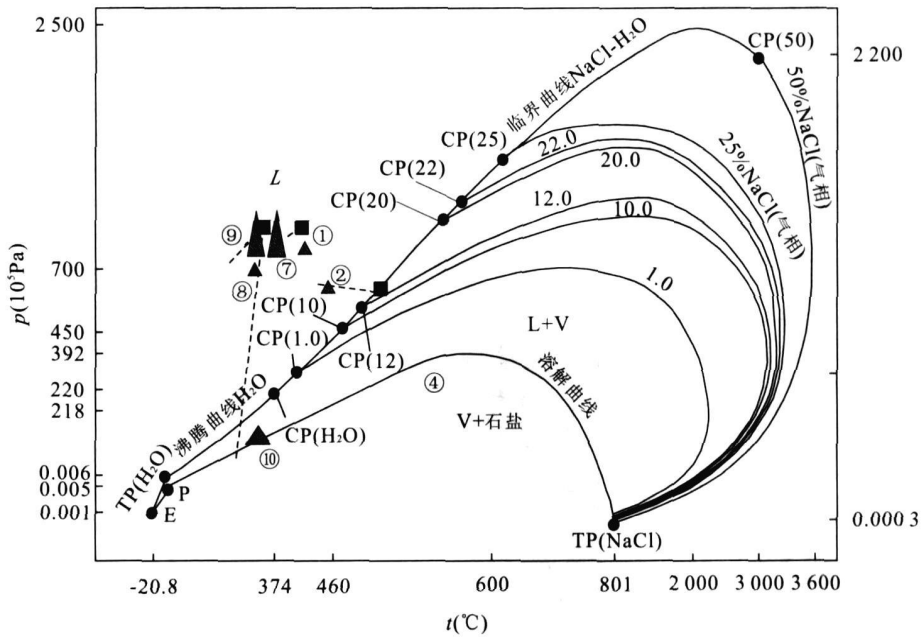


图 2 均匀流体形成示意图

Fig. 2 Homogeneous fluids at the condition of different p-t

CP(50)代表 50%NaCl 水溶液的等组成线与临界曲线相切的点;①—②、⑦—⑩为实验 1、2 和实验 7—10 的均匀流体变化趋势;■为各样品的实验稳定条件(温度与压力);△为包裹体的形成条件(温度与压力)

通过气泡的消失而使包裹体达到均一,密度中等,如样品 3 和 5;另一个亚类为气泡先消失,子晶后消失,通过子晶的消失而使包裹体达到均一,密度较高,如样品 4 和 6.

从图 1 可以看出,所有的沸腾作用都发生在不同盐度流体气相线与 TP(H<sub>2</sub>O)–CP(H<sub>2</sub>O)–CP(NaCl–H<sub>2</sub>O)曲线的下方 L+V 或 V+石盐相图区.由于沸腾作用,可导致主矿物分别捕获气相和液相或液相+H 相的流体;子矿物的来源,除直接来自高温高压流体的过饱和和结晶外,还可来自液相流体冷却到常温常压后(因为其盐度可能高于常温常压条件下饱和溶液的盐度)的饱和或过饱和结晶作用.必须注意,不是所有的沸腾作用都可导致含子矿物多相包裹体的产生,要视沸腾作用发生的条件(温度、压力)和沸腾作用的时间而定.温度越高、压力越低、沸腾作用时间越长,液相流体的盐度就越高,形成含子矿物多相包裹体的可能性也越大.

还需注意的是,不是所有的降温降压都可导致流体的沸腾作用.从图 1 可以看出,如果实验 1 的压力没有降低到 250×10<sup>5</sup> Pa 左右,而是降低到 400×10<sup>5</sup> Pa 左右(A 点)后就不再下降,流体的沸腾作用就不可能发生.另外,如果实验 1 按照⑦的趋势线演化,即使温度与压力都降低,沸腾作用也不可能发生.

因此,本次实验形成的沸腾流体主要跟流体的降压作用或降温降压作用有关,但并不是所有的降压作用或降温降压作用都能使流体沸腾,所有的沸腾作用都发生在一定盐度流体气相线与 TP(H<sub>2</sub>O)–CP(H<sub>2</sub>O)–CP(NaCl–H<sub>2</sub>O)曲线的下方 L+V 或 L+V+H(石盐)相图区的温度与压力范围内.

### 3.2 均匀流体

在本次实验中,按照包裹体形成温度与压力条件,均匀流体可划分为两类:一类为同一实验中各包裹体在含盐度、压力和温度等方面相同或相近,气液比也基本相同,密度非常一致,如实验 1 形成的第一期流体.该期包裹体的形成条件(捕获温度、捕获压力和盐度)与实验条件基本一致,其流体代表的是实验条件(温度、压力)稳定以后,没有受外界环境影响而发生变化的流体,即从实验条件稳定后到退火之前的均匀流体.第二类为同一实验中形成的各包裹体的盐度与实验盐度基本一致,流体密度相同,但包裹体捕获温度或捕获压力与实验温度或压力有着较大的差距(有的还相差特别大,如样品 10),如样品 7—10、样品 2 的第一期流体.其中,样品 2 的包裹体虽在流体盐度、形成压力方面与实验的盐度、压力基本一致,但形成温度远低于实验温度,其流体代表的是实验条件稳定之前加热阶段的均匀流体;样品 7

—9 中包裹体的捕获温度与实验温度基本一致,但压力变化较大,其流体为实验条件稳定到退火阶段开始时的均匀流体;而样品 10 中包裹体的捕获温度、捕获压力与实验温度和压力有着较大的差距,尤其是压力远小于实验压力,其流体为实验退火阶段的均匀流体。

上述实验是在高压 ( $500 \times 10^5 \sim 1\,000 \times 10^5$  Pa)、低温 ( $350 \sim 500$  °C) 的条件下进行的,实验稳定后流体均处于均一状态,其  $p-t$  投影点(实验 10 除外)位于 TP(H<sub>2</sub>O)—CP(H<sub>2</sub>O)—CP(NaCl—H<sub>2</sub>O) 曲线上部(图 2)。结合沸腾流体的  $p-t$  轨迹,可以认为流体的均匀与否与流体  $p-t$  轨迹在 TP(H<sub>2</sub>O)—CP(H<sub>2</sub>O)—CP(NaCl—H<sub>2</sub>O) 曲线的部位有着密切的关系。 $p-t$  轨迹在该曲线上部的流体为均匀流体,如实验 7—实验 9、实验 2 的第一期包裹体,尽管其流体的捕获温度、捕获压力与实验条件有所不同,但其  $p-t$  轨迹仍然位于曲线的上部,流体处于均一状态,主矿物所捕获的包裹体流体盐度与实验盐度一致。这类流体,在矿床(郑有业等, 2006)、油藏(陈振林和许致远, 2007)的矿物包裹体中时有发现,是最为常见的流体。

但也有例外,如实验 10, 流体捕获的  $p-t$  轨迹位于 TP(H<sub>2</sub>O)—CP(H<sub>2</sub>O)—CP(NaCl—H<sub>2</sub>O) 曲线下部的 NaCl 溶解曲线上,所形成的包裹体群中只发现含子矿物多相包裹体,无不同气液比例的气液两相包裹体,各包裹体含盐度变化不大,密度也非常一致,说明流体捕获时为均匀饱和流体,其原因还有待于进一步研究。

可以看出,在不考虑成分因素的情况下,流体的性质主要受温度和压力的影响。流体的  $p-t$  演化轨迹不同,其性质可能有所不同,如  $p-t$  轨迹在 TP(H<sub>2</sub>O)—CP(H<sub>2</sub>O)—CP(NaCl—H<sub>2</sub>O) 曲线上部的流体为均匀流体,反之则为沸腾流体。个别情况下,流体也可在溶解曲线上被主矿物捕获(实验 10)。

在此曲线附近,即流体处于临界点时,流体的性质是突变的。如 Ikushima *et al.* (1998) 用拉曼光谱对临界点附近水结构的分析表明:在临界点以下,OH 伸缩峰的最大频率随着温度的增加而不断地增加;到了临界点后再升高温度,它的变化很缓慢,出现了一个平台;在超临界区,当温度固定时,最大峰的频率在临界压力附近出现极大值。陈晋阳等(2002)的研究也表明,CO<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O 包裹体在均一(临界)点附近,流体拉曼光谱的半高宽和拉曼位移

变化速率均一前明显快于均一后。Hoffmann and Conradi (1997) 则证实了液态水的最大峰频率与单个气相水分子频率差值  $\Delta f$  在临界点最小,同样反映了流体性质的变化。这些现象说明,接近沸腾的流体中水分子氢键正不断断裂、气化作用日趋增强,均一性减弱,不均一性逐渐增强,其外因为流体在临界点附近的升温或降压作用。当到临界点后,气化作用达到最大,不均一性也最强,氢键作用最弱。沸腾后,尽管继续升温或降压,但氢键作用和气化作用均达到极值后变化缓慢的结果表明流体不均一性的继续存在。

## 4 结论

(1) 在本次实验中,被主矿物所捕获的流体可分为均匀流体和沸腾流体。(2) 不同流体的形成,主要跟流体  $p-t$  轨迹在 TP(H<sub>2</sub>O)—CP(H<sub>2</sub>O)—CP(NaCl—H<sub>2</sub>O) 曲线的部位有着密切的关系。 $p-t$  轨迹在该曲线上部的流体为均匀流体,反之则为沸腾流体。但也有例外,如在溶解曲线上被主矿物捕获的流体(实验 10)。(3) 尽管上述研究还处于初步阶段,但仍可以为我们研究一定条件下流体的形成机制、探讨成矿作用提供理论依据。

## References

- Bakker, R. J., Diamond, L. W., 2000. Determination of the composition and molar volume of H<sub>2</sub>O—CO<sub>2</sub> fluid inclusions by microthermometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(10): 1753—1764.
- Bischoff, J. L., 1991. Densities of liquids and vapors in boiling NaCl—H<sub>2</sub>O solutions: A PVTX summary from 300 °C to 500 °C. *Amer. J. Sci.*, 291: 309—338.
- Chen, J. Y., Zheng, H. F., Zeng, Y. S., 2002. Raman spectroscopic study on hydrogen bond of water molecules in synthetic inclusions under high temperature. *Rock and Mineral Analysis*, 21(3): 166—170 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. L., Xu, J. Y., 2007. Dip of the oil (gas)—water interfaces in anticline hydrodynamic oil (gas) pools. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 89—92 (in Chinese with English abstract).
- Hoffmann, M. M., Conradi, S., 1997. Are there hydrogen bonds in supercritical water. *J. Am. Chem. Soc.*, 119(16): 3811—3817.

- Ikushima, Y., Hatakeda, K., Soito, N., 1998. An in-situ Raman spectroscopy studies of subcritical and supercritical water: The peculiarity of hydrogen bonding near the critical point. *J. Chem. Phys.*, 108(14): 5855—5860.
- Kendrick, M. A., Burgess, R., Patrich, R. A. D., et al., 2001. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-porphyry mineralizing fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(16): 2651—2668.
- Li, B., Shen, K., 1995. Formulae for calculating oxygen fugacities of fluid inclusions and their applications. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(3): 291—302 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Shen, K., 1999. Thermodynamics of fluid inclusion. Geological Publishing House, Beijing, 119—140 (in Chinese).
- Philippot, P., 1996. The chemistry of high-pressure fluids (1 to 3 GPa): Natural observations vs. experimental constraints. *Earth Sciences Frontiers*, 3(3): 39—48 (in Chinese with English abstract).
- Roedder, E., Kopp, O. C., 1975. A check on the validity of the pressure correction in inclusion geothermometry, using hydrothermally grown quartz. *Fortschr. Mineral.*, 52: 431.
- Schmidt, C., Rosso, K. M., Bodnar, R. J., 1995. Synthetic fluid inclusions; XIII. Experimental determination of the PVT properties in the system  $H_2O + 40\% NaCl + 5mol\% CO_2$  at elevated temperature and pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3953—3959.
- Spycher, N. F., Reed, M. H., 1989. Evolution of a broad land-type epithermal ore fluid along alternative P-T paths; Implications for the transport and deposition of base, precious and volatile metals. *Econ. Geol.*, 84: 328—359.
- Sterne, S. M., Bodnar, R. J., 1984. Synthetic fluid inclusions in natural quartz. I. Compositional types synthesized and applications to experimental geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 2659—2668.
- Xiao, X. J., Gu, L. X., Ni, P., et al., 2004. Estimation of gas-escaping amount during ore-formation originated from fluid boiling at massive sulfide deposits, Tongling region. *Uranium Geology*, 20(4): 91—98 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. R., Zhang, W. H., 1996. Character of fault property and combination of fluid inclusions. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(3): 285—290 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. H., 1997. Some new advances in ore-forming fluid geochemistry on boiling and mixing of fluids during the processes of hydrothermal deposits. *Advances in Earth Science*, 12(6): 546—552 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. H., Chen, Z. Y., 1993. Geology of fluid inclusion. China University of Geosciences Press, Wuhan, 108—112 (in Chinese).
- Zhang, Y. G., Frantz, J. D., 1989. Experimental determination of the compositional limits of immiscibility in the system  $CaCl_2-H_2O-CO_2$  at high temperatures and pressures using synthetic fluid inclusions. *Chemical Geology*, 74: 289—308.
- Zhang, Z. L., Huang, Z. L., Rao, B., et al., 2005. Concentration mechanism of ore-forming fluid in Huize lead-zinc deposits, Yunnan Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(4): 443—450 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y., Gao, S. B., Zhang, D. Q., et al., 2006. Ore-forming fluid controlling mineralization in Qulong super-large porphyry copper deposit, Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 349—354 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈晋阳, 郑海飞, 曾贻善, 2002. 高温下合成包裹体中流体水分子氢键的拉曼光谱分析. *岩矿测试*, 21(3): 166—170.
- 陈振林, 许浚远, 2007. 背斜—水动力复合油(气)藏油(气)水面产状. *地球科学—中国地质大学学报*, 32(1): 89—92.
- 刘斌, 沈昆, 1995. 流体包裹体的氧逸度计算公式及其应用. *矿物学报*, 15(3): 291—302.
- 刘斌, 沈昆, 1999. 流体包裹体热力学. 北京: 地质出版社, 119—140.
- Philippot, P., 1996. 高压流体(1-3 GPa)的化学组成: 自然观察与实验对比. *地学前缘*, 3(3): 39—48.
- 肖新建, 顾连兴, 倪培, 等, 2004. 铜陵地区金属硫化物矿床沸腾流体成矿过程中气体逸失量的估算. *铀矿地质*, 20(2): 91—98.
- 杨巍然, 张文淮, 1996. 断裂性质与流体包裹体组合特征. *地球科学—中国地质大学学报*, 21(3): 285—290.
- 张德会, 1997. 流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义. *地球科学进展*, 12(6): 546—552.
- 张文淮, 陈紫英, 1993. 流体包裹体地质学. 武汉: 中国地质大学出版社, 108—112.
- 张振亮, 黄智龙, 饶冰, 等, 2005. 会泽铅锌矿床成矿流体浓缩机制探讨. *地球科学—中国地质大学学报*, 30(4): 443—450.
- 郑有业, 高顺宝, 张大权, 等, 2006. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床成矿流体对成矿的控制. *地球科学—中国地质大学学报*, 31(3): 349—354.