

冷冻法确定矿物包裹体的流体成分

北京铀矿地质研究所 陈安福

1950年叶尔马可夫奠定了冷冻法的研究基础。1962年E.洛德提出了冷冻台的结构并讨论了NaCl—H₂O体系相图。1971年武内寿久讨论了CO₂—H₂O体系的温压关系。1975年李兆麟发表了液氮冷台和NaCl—H₂O冷冻曲线。1978年笔者等设计了显微镜半导体冷冻台,并进行了NaCl—H₂O体系实验。

矿物包裹体分析资料表明,其成分中主要阴离子有:Cl⁻,HCO₃⁻,SO₄²⁻,F⁻等;主要阳离子有:Na⁺,K⁺,Ca²⁺,Mg²⁺;气体成分主要是CO₂,H₂S,CH₄,N₂,水蒸气和碳氢化合物。在通常情况下都是把包裹体溶液视为NaCl—H₂O体系来讨论,但实际上成矿溶液的成分远比该体系复杂,目前已发现的还有KCl—H₂O,Na₂CO₃—H₂O,NaHCO₃—H₂O,NaCl—KCl—H₂O,NaCl—Na₂CO₃—H₂O,NaCl—NaHCO₃—H₂O,NaCl—Na₂SO₄—H₂O,NaCl—CaCl₂—H₂O,NaCl—MgCl₂—H₂O等体系。在冷冻条件下研究这些体系,有助于了解包裹体溶液中大部分阴离子、阳离子和气体的组成。现分别简要讨论如下。

1.NaCl—H₂O体系 是目前冷冻法中应用比较广泛的体系(图1、表1)。利用相图可测出0~26.3wt%NaCl溶液的浓度。由图可见,在0~23.3wt%范围内溶液与冰建立平衡。冷冻温度与溶液浓度成正比(曲线OC);在23.3~26.3wt%范围内,冷冻温度与溶液浓度成反比(曲线CB),此时,溶液和NaCl·2H₂O平衡。后者为单斜晶系,菱片状,折射率1.161,双折射率0.005,浓度大于23.3wt%,温度0~-21.1℃时存在。溶解系数较小。

冷冻法研究最重要的问题是矿物相的鉴定和亚稳平衡相的影响,例如水能冷却到-9.4℃不结冻,这在小包裹体中是比较普遍的。包裹体冷却时的亚稳平衡现象,主要是由于其中可作为结晶中心的质点少,包裹体

体积小,分子引力大,表面张力增大,造成冰冻困难。这是冰点难以确定的直接原因。为克服亚稳平衡,可把温度降至-30℃以下,使包裹体经受一次过冷却或放慢冷却速度,施加振动、超声波、静电等均能克服亚稳平衡。许多研究者都采用过冷却方法确定冰点。为使测量迅速准确,用于冷冻法研究

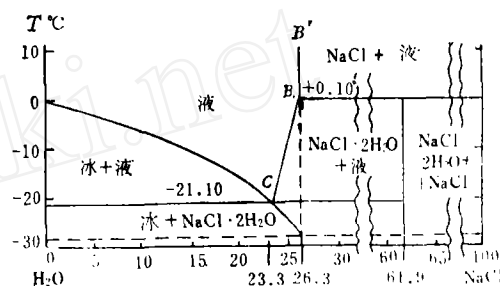


图1 NaCl—H₂O体系相图
(据E. Roedder)

NaCl溶液冰点表 表1

温 度 (°C)	溶 解 度	
	wt %	%
-0.9	1.5	1.5
-1.8	2.9	3.0
-2.6	4.3	4.5
-3.5	5.6	5.9
-4.4	7.0	7.5
-5.4	8.3	9.0
-6.4	9.6	10.6
-7.5	11.0	12.3
-8.6	12.2	14.0
-9.8	13.6	15.7
-11.0	14.9	17.5
-12.2	16.2	19.3
-13.6	17.5	21.2
-15.0	18.8	23.1
-16.0	20.0	25.0
-18.2	21.2	26.9
-20.0	22.4	29.0
-21.2	23.1	30.1

(据《简明化学手册》)

的包裹体应不小于0.01mm。

当包裹体中成矿溶液浓度超过26.3wt%，室温下溶液过饱和，有NaCl晶体析出成为子矿物，固相和溶液建立平衡，所以只要室温下包裹体中有NaCl子矿物出现，就可以判定溶液浓度大于26.3wt%，利用图1不能求出这类包裹体的盐浓度。

这里介绍一种简便、迅速测定含NaCl

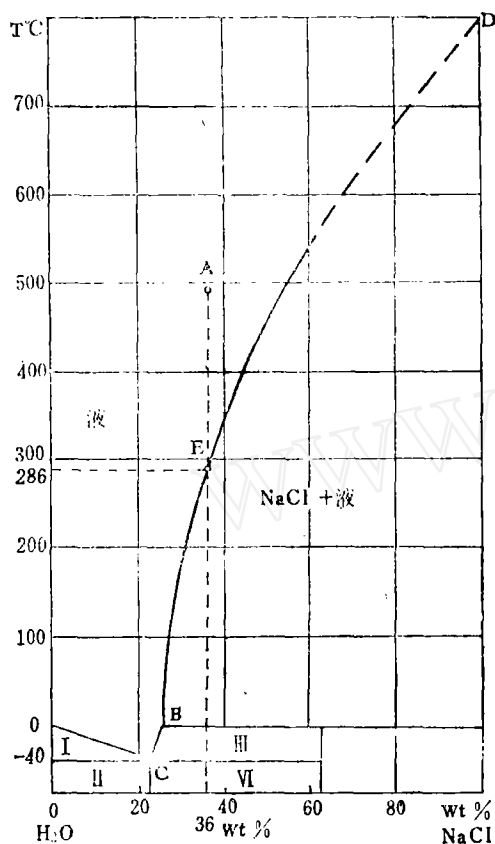


图2 NaCl—H₂O相图

(据《苏联化学手册》)

高温下NaCl溶解度表 表2

温度(°C)	溶解度(%)	温度(°C)	溶解度(%)
0	35.60	120	40.65
5	35.65	130	41.40
10	35.70	140	42.10
15	35.75	170	44.10
20	35.80	180	45.10
25	36.00	200	46.70
30	36.50	250	51.50
50	36.72	300	59.30
70	37.50	350	61.00
108	39.70	800	100

(据《苏联化学手册》)

(或其他盐类)子矿物包裹体溶液浓度的方法——溶化法。引用NaCl—H₂O体系高温相图(图2)及NaCl溶解度表(表2)。

从包裹体的形成机理可知,被捕获的成矿溶液是均一的流体相,随温度降低体系变得不均一,气相首先分离出来,某些组分由于温度降低而过饱和,故从溶液中结晶出来成为子矿物。根据图2,随温度降低,包裹体溶液中的NaCl沿曲线DB从溶液中结晶出来。包裹体形成温度越高,盐含量越大,析出的盐类子矿物越大(或越多)。

设有一个浓度为E的包裹体,在500°C时被捕获(图2A点),此时由于温度较高,NaCl在溶液中呈不饱和状态,随温度降低浓度相对增大。当温度降至350°C时,与曲线DB相交于E点,此时开始有NaCl子矿物析出,温度继续降低,为保持体系平衡,NaCl子矿物沿EB曲线不断加大,直到常温时才达最终平衡。所以可根据子矿物的大小判定包裹体溶液浓度和成矿温度。

根据上述原理,我们在室温下找到含NaCl子矿物的包裹体,置于显微加热台上慢慢加热,随着温度上升,NaCl子矿物逐渐溶化,温度达286°C时NaCl子矿物溶完,在图2中从286°C引平行线与溶化曲线DB相交于E,从E向横座标引垂线得NaCl浓度为36wt%。计算验证286°C时NaCl溶解度是36.7wt%。同理,有时也可一次加温,使NaCl子矿物全部溶化在溶液中,再慢慢降温,取NaCl子矿物重新出现的温度。

此法也适用于其他盐类子矿物。升、降温速度要慢,必要时可以恒温数分钟。测量精度取决于升、降温速度。

利用溶化法研究了6051火山口相铀—金属硫化物、铀—赤铁矿铀矿床。三个相连的火山口内均充填了管道相的石英斑岩。石英斑岩石英斑晶含NaCl子矿物原生包裹体广泛发育,子矿物大小可占包裹体体积的5~20%,原生包裹体均一温度700~625°C,子矿物溶化温度集中在420~370°C。相当于44~47wt%NaCl浓度,所以石英斑岩是从有水参加的高温、高盐度熔浆中结晶的。火山口之间有一层石灰岩阻挡,形成夕卡岩化。钙铝榴石、石英中也广泛发现含NaCl子矿物包裹体。钙铝榴石均一温度570°C,石英均一温度460~345°C,NaCl溶化温度集中在465

~250℃, 相当于34~47 wt% NaCl浓度, 从火山活动晚期的浅成侵入体石英斑岩, 到接触交代夕卡岩化, 表明晚期岩浆及火山热液具高温、富钠的特征, 并具有继承性。

2. NaCl—KCl—H₂O三元系 包裹体成分分析证明NaCl—KCl—H₂O体系(图3)在热液中广泛存在。该体系有两个低共熔点: 在-22.9℃时KCl, NaCl·2H₂O, 冰共存, -2.3℃时KCl, NaCl, NaCl·2H₂O共存。高温时体系沿NaCl—KCl二相线变化, 低温时沿KCl—冰, KCl—NaCl·2H₂O, NaCl·2H₂O—冰三条二相线变化。

高温包裹体中常见NaCl(立方体)、KCl(磨圆的立方体)子矿物共存, 即可利用高温二相线。加热NaCl, KCl子矿物测定溶化温度时, 一般是KCl先溶化, 此时在二相线上可得到一点, 从该点向NaCl端引连线, 再按NaCl的溶化温度用内插法确定在连线上的位置。根据此位置即可向三个边引平行线计算出NaCl, KCl和H₂O的含量。如果NaCl先溶, 则用同样的方法向KCl端引连线, 再根据其溶点求位置, 进而求各组分含量。后一种情况一般不常见, 因为包裹体流体体系中, 一般是NaCl大于KCl。

NaCl—KCl—H₂O体系低盐度包裹体冷冻时, 随着温度降低首先出现冰。由于其各成分浓度不同, 出现以下三种情况:

1. 在-10.7~-22.9℃, 析出KCl晶体。冰和KCl平衡。根据KCl出现的温度在KCl—冰二相线上得到一点, 将该点和H₂O端

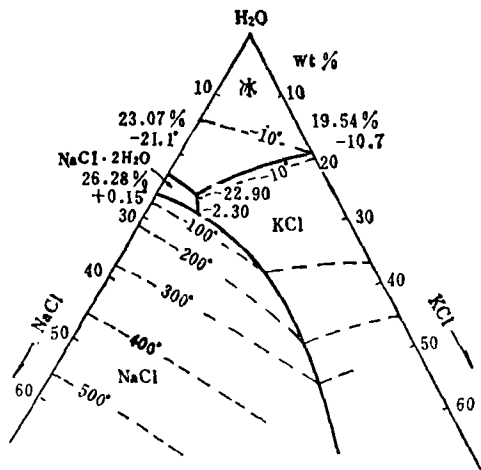


图3 NaCl—KCl—H₂O相图
(据G. Charles)

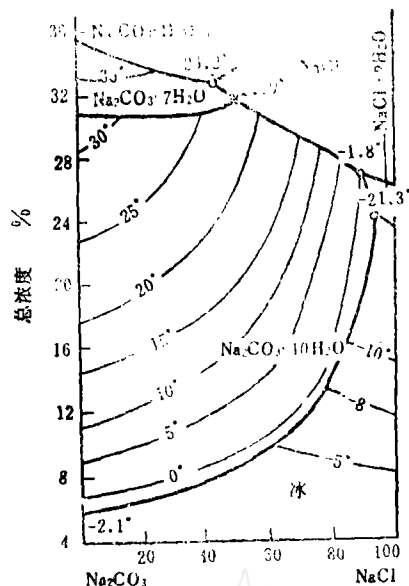


图4 NaCl—Na₂CO₃—H₂O体系图
(据И. Л. Добрепова)

元用连线联接。再根据冰出现的温度在连线上求得一点, 根据此点作三个边的平行线, 即可求出各组份浓度。

2. 在-21.1~-22.9℃析出NaCl·2H₂O, 此时冰和NaCl·2H₂O平衡。根据后者出现的温度, 在NaCl·2H₂O—冰二相线上得到一点, 将此点用连线和H₂O端元联接。再根据冰出现的温度在连线上得到一点, 根据该点求各组份浓度。

3. 在-2.3~-22.9℃同时出现NaCl·2H₂O, KCl时, 利用NaCl·2H₂O—KCl二相线, 求各组份浓度, 方法同前。

3. NaCl—Na₂CO₃—H₂O体系 该体系在碳酸盐发育的矿床中广泛存在。若发现含CO₂包裹体, 利用此体系比较合适。在图4中随温度降低, 出现四个三相点: +26.2℃(Na₂CO₃·H₂O, NaCl, Na₂CO₃·7H₂O); +21℃(NaCl, Na₂CO₃·7H₂O, Na₂CO₃·10H₂O); -1.8℃(NaCl, NaCl·2H₂O, Na₂CO₃·10H₂O); -21.3℃(NaCl·2H₂O, Na₂CO₃·10H₂O, 冰)。

在室温-0℃, 随温度降低, 体系沿NaCl—Na₂CO₃·10H₂O二相线变化, 出现固相NaCl, Na₂CO₃·10H₂O溶液平衡。在0~-21.3℃随温度降低体系沿Na₂CO₃·10H₂O—冰二相变化, 出现Na₂CO₃·10H₂O, 冰固相平衡, Na₂CO₃·10H₂O和

$\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 平衡。

实际测量时,使包裹体过冷却,然后慢慢升温,观察出现的矿物组合及其特征。确定溶液在 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - NaCl 及 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ -冰二相线上相应位置。该体系低共熔点温度低(-21.3°C),矿物相 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 具有较高双折射和最高的溶解系数为其特征。

蛇纹菱镁片岩石英中二相包裹体发育。在冷冻过程中,由于亚稳平衡直至 -51°C 时才冰冻,提高温度,小晶体重结晶,长成菱片状。 -23.6°C 时三相(冰+两个固相)共熔。固相I为无色透明,菱片状,强非均质体。再提高温度,固相II和冰溶完。继续提高温度,固相I迅速溶解, $+18 \sim +20^\circ\text{C}$ 时固相I溶完。根据相的特征和溶解速度,可知固相I为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,固相II为 $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

应用图4,由 19°C 等温线与 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - NaCl 二相线的交点引横座标的平行线和浓度轴交于30%,则该包裹体总浓度为31%。再从此点引浓度轴平行线,得到 NaCl , Na_2CO_3 的浓度比,即 $\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{CO}_3 = 56.44$,换算结果 Na_2CO_3 为13.2%(相当于10.4wt%), NaCl 为16.8%(相当于12.6wt%)。

4. NaCl - NaHCO_3 - H_2O 体系 该体系

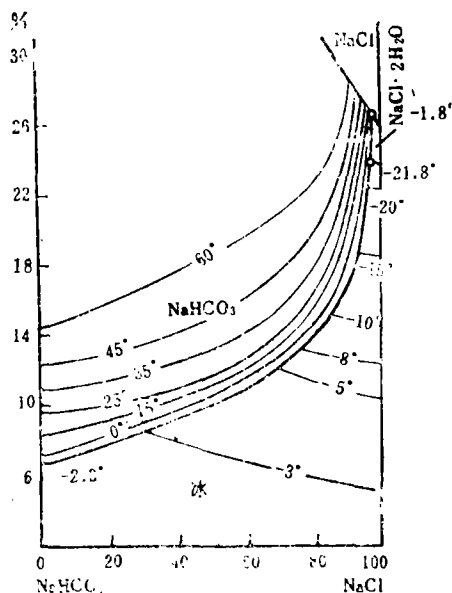


图5 NaCl - NaHCO_3 - H_2O 体系图
(据И.Л.Добрецова)

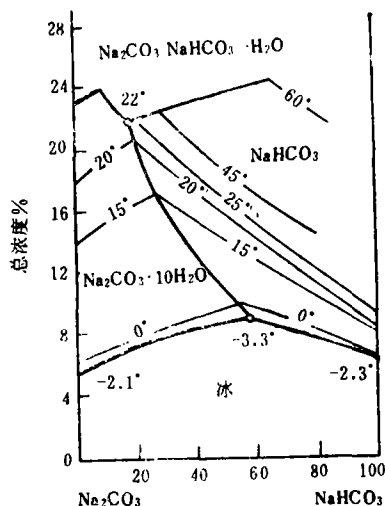


图6 Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O 体系图
(据И.Л.Добрецова)

普遍适用于含 CO_2 包裹体。具有二个三相点(图5)。 -21.8°C (NaHCO_3 , $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 冰共存)。 -1.8°C (NaHCO_3 , $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, NaCl 共存)。在加热条件下(室温 -60°)体系沿 NaHCO_3 - NaCl 二相线变化, NaHCO_3 , NaCl , 溶液达平衡。过冷却包裹体后固相是冰和 NaHCO_3 。 -21.8°C 时三相共熔(NaCl , NaHCO_3 , $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。再升高温度,冰和 $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 迅速溶化。剩下 NaHCO_3 , NaHCO_3 具有特殊的针状晶体和极高的双折射,即使晶体较小时也能和 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 相区别。根据 NaHCO_3 的溶化温度,在 NaHCO_3 -冰二相线上得到相应位置,按第三节叙述的步骤,用作图法即可求出各组份的浓度。

5. Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O 体系 其特征是低共熔温度高,当温度低于 -3.3°C 时 NaHCO_3 , Na_2CO_3 , 冰共存(图6)。当包裹体总浓度大于9%时,随温度增加从 -3.3°C (到 $+22^\circ\text{C}$)体系沿 NaHCO_3 - $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 二相线变化。 $+22^\circ\text{C}$ 时出现第二个三相点(NaHCO_3 , $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。当浓度小于9%时,视体系各组份浓度大小在 $-2.1^\circ\text{C} \sim -3.3^\circ\text{C}$ 可出现 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ -冰平衡(Na_2CO_3 大于 NaHCO_3),在 $-2.3^\circ\text{C} \sim -3.3^\circ\text{C}$ 时出现 NaHCO_3 -冰平衡(NaHCO_3 大于 Na_2CO_3)。

同样,过冷却包裹体(或缓慢降温)使

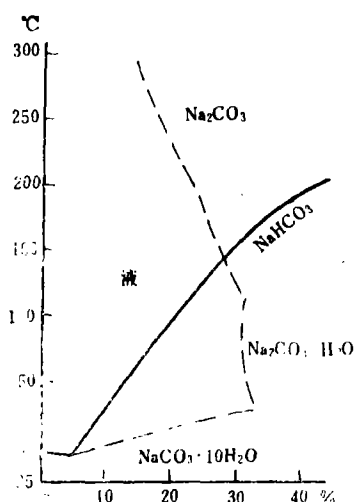


图7 $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{—H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{—H}_2\text{O}$ 体系图 (据И.Л.Добрепова)

其缓慢升温, 观察相的特征及相平衡, 记录 NaHCO_3 , $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 溶解温度, 根据溶解温度在 $\text{NaHCO}_3\text{—Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ —冰或 NaHCO_3 —冰二相线上得到一点, 根据该点用作图法求出有关组份浓度。

6. $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{—H}_2\text{O}$, $\text{NaHCO}_3\text{—H}_2\text{O}$ 体系 碳酸钠、重碳酸钠与水体系 (图7) 的特征是: 低共熔温度较高。在0~5%浓度范围内, 随温度降低溶液和冰建立平衡, 沿0°C曲线变化, -21°C时(-23°C)冰、液、 Na_2CO_3 (NaHCO_3) 三相共熔。浓度大于5%随温度的升高, 溶液和 Na_2CO_3 (NaHCO_3) 平衡。对于 $\text{NaHCO}_3\text{—H}_2\text{O}$ 体系, 温度与 Na_2CO_3 溶解度成正比, 而对 $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{—H}_2\text{O}$ 体系, 温度0~35°C范围内, 随温度增加 Na_2CO_3 溶解度增加, 大于35°C随温度增加, Na_2CO_3 溶解度降低。

测量方法与前述相同, 过冷却包裹体, 然后慢慢升温, 观察出现的矿物是 NaHCO_3 还是 Na_2CO_3 , 根据它们的消失温度求体系的浓度。

上述体系在降温过程中的特征列于表3。根据表3及冷冻时出现的不同矿物, 将不同的包裹体溶液体系相区别。体系不同低共熔温度不同, 矿物相不同, 例如 KCl 溶解系数比 NaCl 大, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 溶解系数最大, 而 $\text{Na}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 为强非均

质体, NaHCO_3 以特殊的针状晶体与其他矿物相区别。仔细观察包裹体冷冻时的特征, 结合上述相图, 就可以判断相应的体系, 并求出相应包裹体组份的浓度。

矿物包裹体是一定温度、压力下捕获的成矿流体, 它具有以下特征。

1. 均一状态时的物化条件, 代表该矿物形成时的条件。根据气态方程, 随着温度的降低, 在体积不变的情况下, 压力要迅速减小。
2. 具密封性, 故常温平衡状态下气相的饱和蒸气在近似于常温下包裹体的内压。
3. 不混溶性, 气相一旦液化, 就不互相混溶。

如所周知, 物质的三种状态, 在一定条件下可以互相转化。其相平衡规律可以用图8表示。图中曲线AT是气—液平衡线(气仪线), BT是液—固平衡线(液化线), TC是固—气线(升华线)。T为三相点, A为临界点。如果要使气体转变成液体, 必须在临界温度和临界压力下进行: 采取等压降温或等温压缩。如果在临界温度之上, 再加大压力也不能将气体液化。在临界温度以下, 只需很小压力就能使气体液化。比如在-130°C液化空气, 只需25大气压。温度、压力降至三相点T以下, 液体就转变成固体。冷冻法就是利用低温下相变温度来确定气体的成分。

表4给出了包裹体中常见的几种气体临界数据。这些数据表明主要气体的临界压力都比较小, 容易满足。包裹体气相的液化、

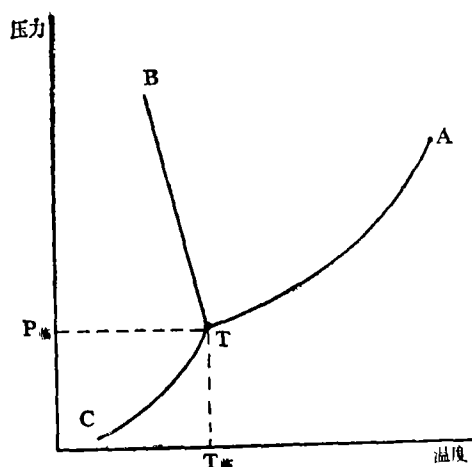


图8 气体温度—压力曲线

不同盐—水体系特征表

表 8

体 系	低共熔 温度/°C	固 相 特 征					
		分 子 式	形 态	折 射 率	双 折 率	存 在 温 度	溶 解 系 数
NaCl—H ₂ O	-21.1	NaCl	立方体	1.544	均 质	0	0.015
		NaCl·2H ₂ O	单斜晶	1.161	0.005	0~-21.1	0.14
KCl—H ₂ O	-10.6	KCl KCl·2H ₂ O	立方体	1.490	均 质		0.16
Na ₂ CO ₃ —H ₂ O	-2.1	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	斜 方	1.440	0.034	-2.1~+32	1.70
NaHCO ₃ —H ₂ O	-2.3	NaHCO ₃	针 状	1.583	0.206	-2.3	0.14
NaCl—KCl—H ₂ O	-23.1	NaCl	立方体	1.544	均 质	0	0.015
		KCl	"	1.490	"	-23	0.16
		NaCl·2H ₂ O	单 斜	1.161	0.005	0~-23	0.14
NaCl—Na ₂ CO ₃ —H ₂ O	-21.4	NaCl	立方体	1.544	均 质	0	0.015
		NaCl·2H ₂ O	单斜晶	1.161	0.005	0~-21.4	0.14
		Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	斜方晶	1.440	0.034	-21.4~+32	1.70
NaCl—NaHCO ₃ —H ₂ O	-21.8	NaCl	立方体	1.544	均 质	0	0.015
		NaCl·2H ₂ O	单斜晶	1.161	0.005	0~-21.8	0.14
		NaHCO ₃	针 状	1.583	0.206	-21.8	0.14
NaCl—CaCl ₂ —H ₂ O	-55	NaCl	立方体	1.544	均 质	0	0.015
		NaCl·2H ₂ O	单斜晶	1.161	0.005	0~-55	0.14
		CaCl ₂ ·6H ₂ O				-55	
NaCl—MgCl ₂ —H ₂ O	-35	NaCl	立方体	1.544	均 质	0	0.015
		NaCl·2H ₂ O	单斜晶	1.161	0.005	0~-35	0.14
		MgCl ₂ ·2H ₂ O	"	1.582		-35	0.10
Na ₂ CO ₃ —NaHCO ₃ —H ₂ O	-3.3	NaHCO ₃	针 状	1.583	0.206	0~-3.3	0.14
		NaCO ₃ ·10H ₂ O	斜方晶	1.440	0.034	-3.3~+32	1.70

(据A.C.Бориско, 1974, 略有删节)

几种包裹体主要气体的临界常数 表 4

成 份	分子式	临界温度 (°C)	临界压力 (大气压)	熔 点 (°C)
氮	N ₂	-147.3	33.49	-209.86
氨	NH ₃	+132.4	115.5	-77.7
乙 炔	C ₂ H ₂	+36	61	-81.5
水蒸汽	H ₂ O	+374.0	224.7	0
空 气		-140	37.2	-213
甲 烷	CH ₄	-82.1	45.8	-182.5
一氧化氮	NO	-94.0	65.0	-163.7
一氧化碳	CO	-140.2	34.52	-205
二氧化硫	SO ₂	100.4	88.0	-85.6
二氧化碳	CO ₂	+31.1	73.0	-56.6
乙 烷	C ₂ H ₆	+32	48.2	-183.6
乙 烯	C ₂ H ₄	+9.5	50.7	-169.4
硫化氢	H ₂ S	+100.5	88.9	-85.6

(据《气体混合物分离手册》，1956)

固化主要决定于冷冻温度。

前人所做的CO₂等温压缩(图9)就是包裹体气体成分鉴定的最好实例。高温时CO₂遵循理想气态方程,等温线为双曲线,随着温度的降低,气体体积变化较小,而压力降低比较大。在临界点31.1℃时,CO₂开始液化,此时临界压力为72.3大气压。比容为2.17〔厘米〕³〔克〕⁻¹,31.1℃以上无论压力增加多大CO₂也不液化。其他气体的等温实验曲线也和CO₂相似。

在包裹体研究中我们经常发现含CO₂包裹体,就是因为CO₂临界温度比较低,容易液化。夏天室温比较高发现含CO₂包裹体比冬天困难。在冷冻条件下包裹体内压急骤减小,所以一般包裹体气相液化温度要比临界温度低。但对于同一包裹体气相的液化,总是按照临界温度先后次序出现的。包裹体中

冷冻法确定气体成分与气相色谱对比 (单位: ppm)

表 5

成 份	石 英		石 英		石 英		蜜 石		蜜 石	
	气相分析	冷 冻	气相分析	冷 冻	气相分析	冷 冻	气相分析	冷 冻	气相分析	冷 冻
CH ₄	6	-	8	-	9	-	2	-	2	-
CO ₂	微	-	300	+	240	+	60	+	80	+
H ₂ O	未分析	+	未分析	+	未分析	+	4.79	+	9.7	+

+有; -无

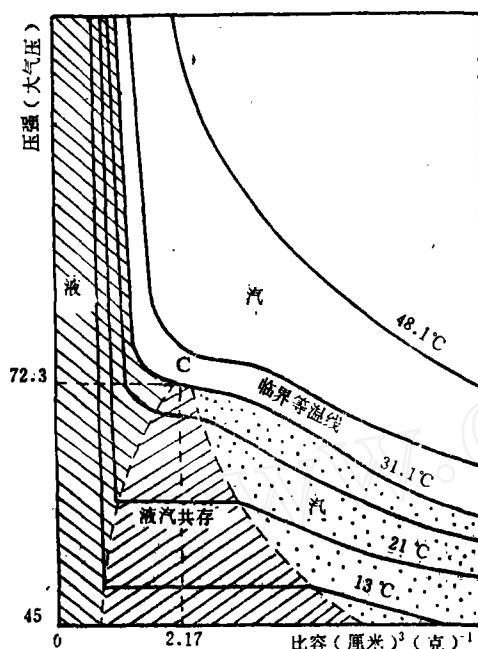
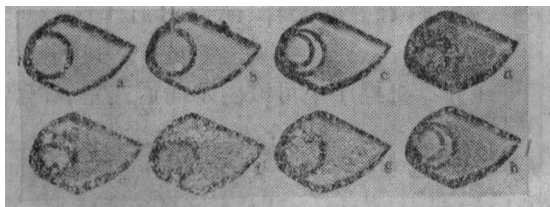


图 9 CO₂的等温试验曲线

最主要的气相成份冷冻时的特征如下:

1.CO₂: 冷冻时在 5~31°C 范围内液化, 液化时与液体CO₂平衡的气体CO₂成为若干小气泡“沸腾”, 最后集中成气相分布



照片 1 含CO₂包裹体冷冻时相的变化

a—25°C时两相包裹体; b—23°C, CO₂开始液化, CO₂成若干气泡激烈跳动并向中心集中; c—23.5°C气体CO₂、液体CO₂分离完毕; d—-56°C液体CO₂转变成固相(干冰),并随温度降低,重结晶加大; e—-50°C固相CO₂熔化; f—-20°C冰初熔; g—-5°C最后一块冰熔完。因出现针状NaHCO₃晶体,用NaCl—NaHCO₃—H₂O体系计算,总浓度为9.3wt%,其中NaHCO₃6.3wt%,NaCl为3wt%,相当于8.5wt%NaCl; h—+10°C时恢复正常,

含CO₂包裹体

于内环, -56°C液相CO₂转变为固相CO₂ (照片 1)。

2.CH₄: -82°C±时液化, 液化时的特征与CO₂液化相同。温度上升至-80°C以上立即气化, -182°C液化CH₄转变为固体(照片 2)。



照片 2 含 CH₄包裹体冷冻时相的变化 (照片素描)
a—室温下含CH₄包裹体; b—-84°C, CH₄开始液化, 气相分成若干小气泡激烈跳动,并向中心集中; c—-85°C 液化完毕

3.水蒸气: 水蒸气临界点比较高(374°C)。它可以在比较宽的温度范围内和液相、固相平衡。冷却到 0~30°C时水蒸气转变成水, 水立即变成冰, 此时固—气平衡, 气相极小, 因此气相表现为突然消失。提高温度时冰熔化, 由于内压保持平衡, 液体迅速汽化, 气相突然出现, 并随温度升高气相增大, 室温时达气液平衡。

4.硫化氢: 压碎矿物时具特殊气味, 临界温度+100.5°C。小于100.5°C的温度范围内均能液化, -72°C液相转变成固相。

包裹体中除上述几种主要气体以外, 视其含量多少都可用冷冻法确定。如果含量少, 相变不清楚观察困难, 需要气相色谱和激光拉曼探针分析。表 5 列出了冷冻法测定包裹体主要气体成份与气相色谱分析资料的对比, 两种方法比较, 主要气体成份测定结果一致, 但CH₄含量低, 用冷冻法测定有困难。

冷冻法不仅能确定包裹体溶液的盐浓度, 而且能确定流体中主要液体成份和气体成份, 是包裹体分析的一种快速、简便的手段。