

碳酸盐岩矿物流体包裹体的主要 研究方法及其应用

刘鑫 杨传忠

(贵州石油勘探指挥部地质研究所, 贵阳)

本文对碳酸盐岩矿物流体包裹体的主要赋存状态以及与油气关系密切的几种常用研究方法作了较为系统的介绍, 并结合滇黔桂地区部分碳酸盐岩矿物流体包裹体资料, 对碳酸盐岩矿物流体包裹体在油气勘探中5个方面的应用进行了探讨。

一、碳酸盐岩矿物包裹体主要赋存状态及样品要求

碳酸盐岩的各种矿物, 不论其地质年代及成因如何, 其量的多少, 几乎都有包裹体存在。碳酸盐岩矿物中的包裹体主要赋存于生物屑灰岩、中-粗晶灰岩、鲕粒灰岩、生物礁灰岩及其它一些颗粒灰岩中。白云岩中的包体相对较少, 在泥晶、微晶灰岩中也难找到。但在它们的方解石脉、重晶石脉、石英脉和石膏中可大量发现。包体的分布大致有一定的方向性, 大多数与晶面有关, 或沿裂缝走向分布, 分布状况有时均匀, 有时不均匀, 还可见到少量孤立存在。

碳酸盐岩矿物包裹体一般都很小, 大多数在 $10\mu\text{m}$ 左右, 很少大于 1mm , 但其数量较多, 每立方厘米有时多达百个以上。包裹体研究所需样品很少, 样品大小只要能磨制一般的岩矿薄片所需的量即可。样品可采用井下岩芯样和岩屑样, 或地面露头岩样。研究目的不同, 采样的方法及要求也不同, 如研究盆地的受热史, 需要采集不同期次裂缝中脉状矿物。研究成岩作用, 需要在一定地区水平及垂直剖面方向采样, 对样品中颗粒、各世代胶结物、后期充填物以及各期裂缝隙中的脉状矿物中的包裹体进行研究。采集的样品需要磨制包裹体薄片, 这种薄片比一般岩矿薄片稍厚, 并需在低温下粘结。制成的包裹体薄片需在高倍显微镜下寻找包体, 然后进行测试观察, 详细鉴定, 描述岩石矿物和流体包裹体, 并选择较大的包体作温度测定。

二、碳酸盐岩矿物包裹体主要研究方法

1. 碳酸盐岩矿物包裹体主要类型和特征的研究

通过偏光显微镜下的观察, 可以直接研究包体的类型和特征。

包裹体的类型研究及划分是十分重要的, 合理的包裹体分类可以反映成岩成矿本质

特征,对油气资源评价有着重要意义。根据对区内碳酸盐岩矿物包裹体研究,常按包裹体成因和气液比(指包体气相与液相百分比)进行分类(表1)。

表1 包裹体分类简表

分类原则	类 别	主 要 特 征
包 裹 体 成因分类	原生包裹体	矿物晶体生长过程中形成的包体,沿晶体生长面分布
	次生包裹体	矿物晶体裂隙中形成的包体,其分布不受晶体生长面控制
	假次生包裹体	矿物晶体微裂缝中形成的包体,其分布不受晶体生长面控制
包 裹 体 气液比分类	纯液体包裹体	气液比 $<5\%$,含单相液体
	气液包裹体	$5\% < \text{气液比} < 60\%$,含气、液两相
	气体包裹体	气液比 $>60\%$,含气、液两相
	有机包裹体	$5\% < \text{气液比} < 60\%$,含烃类液体和气体

不同类型的包裹体代表了一定的成因机制,具有不同的环境意义。如碳酸盐岩各成岩阶段的矿物包裹体特征,一般可反映其整个埋藏过程中所经历的成岩环境。次生包裹体特征,一般可反映各期构造运动的影响。又如纯液体包裹体,一般在淡水渗流环境、淡水潜流环境、海水/淡水混合环境中形成,气液包体一般在埋藏成岩环境中形成,气体包体一般在热演化程度较高的深埋环境中形成,而有机包体在油气生成,运移和聚集的各个阶段都可以形成,其特征可以反映油气生成、运移和聚集的环境和条件。因此,研究包裹体类型,正确区分不同类型的包裹体具有重要意义。

在偏光显微镜下包裹体的主要特征包括有:包体气液比、大小、颜色、形态、分布和数量等。包体特征与油气生成、演化、运移和聚集等关系密切,可以作为油气远景评价的直接标志。如包体气液比的大小,可以反映矿物所经历的古地温的高低,一般气液比越大,所经历的古地温越高。包体颜色与包体成分和热演化程度有关,一般包体颜色越深,反映热演化程度越高。包体的大小、形态和数量,可以反映矿物结晶的速度和环境。一般安静的还原环境,结晶速度较慢、包体较小、形态规则、数量较少;而动荡的氧化环境,一般结晶速度较快、包体较大、形态不规则、数量较多。有机包裹体的数量和分布,将直接反映有机质或油气的丰度,可以为寻找油气储集层,研究油气运移方向提供重要信息。因此,研究碳酸盐岩矿物包裹体特征,对油气勘探具有重要意义。

2. 碳酸盐岩矿物流体包裹体温度测定

碳酸盐岩矿物包裹体温度主要是利用显微冷热台进行测定,采用的是均一法。在室温下从显微镜里看到包体中气相和液相是单相热液随主矿物冷缩结果所产生的气泡,在显微冷热台上对包体加热升温,气泡逐渐变小,加热到某一温度,两相均一为一相,则

包体恢复到形成时的均一相，这时的温度称为均一温度。均一温度经过压力校正后即成为矿物的成矿温度。均一法测温所需仪器简单，操作方便、经济、省时，测定数据比较可靠，测试精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。但它只适用于透明和半透明矿物，对不透明矿物还无法使用，而且包体太小不能测温，一般应在 $10\mu\text{m}$ 左右。

对于碳酸盐岩矿物中大量分布的纯液体包体，即包体全为液相所充填，未见气相的测温方法，施继锡等人采用先将其在冷热两用台上冷冻，降低温度到使之成为不均匀体系，即分离成气液两相，然后再加热回升温度，再使两相均一，均一时的温度则为该纯液体包体的均一温度。由于这类包裹体一般在低温条件下形成，无需压力校正，均一温度则为矿物成矿温度。

3. 碳酸盐岩矿物包裹体的盐度测定

冷冻法是测定碳酸盐岩矿物包裹体盐度的基本方法，不同浓度的盐水溶液具有不同的冰点，如纯水冰点为 0°C ，含 NaCl 5%的水溶液冰点为 -2.9°C ，含 NaCl 10%的溶液冰点为 -6.5°C ，含 NaCl 23.3%的水溶液冰点为 -21.1°C 等。在专门的冷冻装置上观察相的变化，精确测定相的转变温度，利用 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 、 CO_2-CH_4 等体系的相图及实验数据，来求得成矿流体的盐度。盐度是研究油田水性质的一个重要参数，石油生成过程中盐度是重要因素，由于包裹体中保留的是原始流体，油田水中的离子又主要是 Na^+ 和 Cl^- ，因而利用 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 的体系来研究盐度就更为合理。据研究资料认为，油气田水都为高盐度的卤水，与非油气田水的盐度有明显的不同（表2）。

表2 油气田包裹体水中盐度范围

类型	盐度（相当 NaCl wt%）
气田包裹体中的水	17—21
油田包裹体中的水	8—17
非油气田包裹体中的水	多数 <8

（据施继锡资料，1987）

同时，利用盐度测定结果还能够了解油气运移方向、油气田的埋藏深度以及岩层剥蚀情况等，所以碳酸盐岩矿物包裹体的盐度测定，是油气远景评价的重要资料之一。

4. 碳酸盐岩包裹体成分研究

碳酸盐岩矿物包裹体成分研究是十分重要的，也是十分复杂的。包裹体的成分代表了包体形成时流体的原始组成，对包体成分的研究有利于探讨碳酸盐岩区油气形成的物理化学条件、油气演化、运移、聚集和远景评价等方面的重要问题。碳酸盐岩矿物包体成分研究，主要对包体中与油气关系密切的有机气体、液体和同位素组成的研究。

（1）包裹体中有机气体分析方法

气相色谱法是目前研究碳酸盐岩矿物包裹体气相成分效果较好的方法，该法的仪器由气相色谱仪、气体分离器和气体导引装置组成。一般是通过热爆法、压碎法或真空球磨法使包体破裂而释放出气体，再进行定量收集，上色谱仪分析。由于包裹体在矿物中的类型、大小和数量等分布的不均匀性，对于同一层位样品，即使分析方法和样品用量完全相同，所测得的各种成分的绝对含量仍有差别，但其比值（体积比或克分子比）却基本相同，因此对包体成分定量分析结果，常用相对含量表示，以利对比分析。如赤水地区包体成分分析资料表明（表3），虽然样品层位相同，重量也大致一样，但所

测得的各种成分绝对含量有明显的差异, 而其比值却基本相近。

表3 赤水地区包裹体主要成分分析表

样号	层位	井位	岩性	样重 (g)	分析项目 (μl)			$\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$ % (V)	CH_4 (ppm)	CH_4/CO_2 (mol)
					H_2O	CO_2	CH_4			
旺5-3	Py ₃	旺五井	灰岩和方解石脉	7.0	1.9	100	13.7	11.8	1.3	0.14
川-1	Py ₃	庙28井	灰岩和方解石脉	7.5	3.7	155	86.6	35.2	7.6	0.56
太13-2	Tc ₃	太13井	层状石膏	7.5	1.6	190	1.7	0.8	0.1	0.01
太15-2	Tc ₃	太15井	层状石膏	7.0	1.0	30	1.1	3.5	0.1	0.04

(据李本超资料, 1988)

(2) 包裹体中可溶有机质的分析

Krenrolden等(1971)在研究非洲西南部石英晶体中包体可溶有机质成分时, 先把样品放在索氏抽提袋中, 用苯-甲醇混合溶液清洗, 洗净后的样品放在氧化铝研钵中加正己烷压碎并抽提, 抽提液浓缩后进行色谱-质谱测定。分析结果表明, 包裹体中可溶有机质以正烷烃和类异戊二烯烷烃为主, 正烷烃分布至少从 $n\text{C}_{10}$ — $n\text{C}_{33}$, 大于 $n\text{C}_{17}$ 的正烷烃浓度随碳数的增加而有规律的减少。而李本超等曾采用加热爆破法, 收集四川金口河震旦系白云岩中矿物包裹体的可溶有机质进行分析, 由于其热演化程度太高, 色谱分析结果主要为正烷烃。由于包裹体有机质主要形成于油气运移(包括原生与次生运移)和聚集的过程中, 因此包裹体中的有机质分析, 可以为油气运移提供直接的信息。

(3) 包裹体中有机碳同位素测定

目前主要有两种方法, 一种是收集气体中有机物经Cu-CuO炉氧化转化为 CO_2 后质谱分析; 另一种是将用有机溶剂抽提洗净(除去吸附有机质)的样品, 在研钵中压碎后, 用苯-甲醇混合液抽提, 抽提物干燥后进行碳同位素测定。

碳酸盐岩矿物包裹体成分分析十分复杂, 除必需备有高灵敏的气相色谱、质谱仪外, 还需要选择相应的提取分析方法, 而且还要注意挑选合适的样品, 只有这样才能得到可靠而有意义的结果。

三、碳酸盐岩矿物包裹体在油气勘探中的应用

虽然矿物包裹体与油气关系十分密切, 在油气勘探中的应用极其广泛, 但由于近几年才刚开始研究, 尤其是在海相碳酸盐岩地区油气勘探中的应用就更薄弱。根据近年来滇黔桂地区部分碳酸盐岩矿物包裹体资料, 结合地质分析, 仅对下面5个方面的应用进行初步探讨。

1. 利用包裹体测定古温度, 恢复热历史

在油气资源评价及勘探部署中, 生油热历史和有机质成熟史的研究具有重要意义, 其研究主要是取得岩层所经受过的古温度。目前衡量古温度可靠的指标是镜质体反射率

(R°)；但海相碳酸盐岩地区难于获得镜质体标本，给测温带来困难，然而利用碳酸盐岩矿物中广泛分布的包裹体测温却是获得古温度的一种简便方法。对碳酸盐岩中的颗粒、胶结物中各期有代表性的矿物包体进行详细的均一温度测定，就可以确定该岩层所经历的古温度。如对区内部分地区碳酸盐岩矿物包体所经历的最大古温度测定，基本上反映了其受热史，包体温度代表了矿物所经历的最大古温度，并与其镜质体反射率值(R°)，以及有机质热演化程度和油气显示情况也大致吻合(表4)，说明包裹体测温可靠性较好。

表4 碳酸盐岩矿物包裹体温度测试表

地 区	层 位	测温矿物	均一温度 ($^{\circ}\text{C}$)	R° (%)	热演化程度	油 气 显 示
凯里旁海	C_1	重结晶方解石	140—170	1.20	成 熟	油 苗
平 塘	P_2	重结晶方解石	96—135	1.16	成 熟	油 苗
紫 云	P_2	重结晶方解石	254—277	3.04	过成熟	沥 青
赤水太和	Tf	重结晶方解石	201—202	2.48	过成熟	干 气
赤水太和	P_1	方解石脉	234—300	2.85	过成熟	干 气
云南温刘	P_1	白云石	210—220	2.28	过成熟	沥 青

2. 利用包裹体类型、特征确定油气演化程度和阶段

据区内不同演化程度和阶段的矿物样品进行观察测试，其中包体的类型和特征有一定的差异。在有机质演化程度较低，并发现有油苗存在的地层中，其矿物包体主要为单相液体包体，次为气液包体，气液比较低，一般为5—15%左右，包体颜色浅，常为无色或淡红色，包体均一温度一般为70—150 $^{\circ}\text{C}$ ，如类似凯里 O_1 和平塘 P_2 地层。在油气演化程度很高，并发现有干气和碳质沥青存在的地层中，其矿物包体主要为气体包体，次为气液包体，气液比较高，一般为20—60%，有时也高达90%以上，包体颜色由浅黄—棕黑色，包体温度较高，常在200 $^{\circ}\text{C}$ 左右，如贵州赤水 Tc ， P_1 和 S_2 地层，贵州南部 P_2 、 D_2 等地层。一般来说，随着油气演化程度的增加，包体气液比将增大，包体颜色变深，均一温度增高，包体主要类型由纯液体包体向气液包体、气体包体方向变化，其大致的变化规律可归纳为表5。

表5 包裹体特征与演化程度关系简表

特 征 演化程度	气液比 (%)	颜 色	均一温度 ($^{\circ}\text{C}$)	主要类型	R° (%)	烃类保存状态
成 熟 期	5—15	无 色 浅 黄 浅 红	70—150	纯液体包体 气液包体	0.65~1.3	液 态 烃
高成熟期	15—60	浅 黄 褐 黄	150—200	气液包体 气体包体	1.3~2.2	湿 气 干 气
过成熟期	>60	浅 灰 黑 褐	>200	气体包体 纯气体包体	2.2~5	干 气

3. 利用包裹体的气相成分研究油气演化程度

矿物包裹体的成分直接反映了形成时的成矿流体性质。模拟实验证实,原油从未成熟到低成熟阶段,气体以 H_2O 、 CO_2 为主;演化到成熟、高成熟阶段则 CH_4 增加,到最终甲烷阶段,则95%的气体为 CH_4 ,而 CO_2 、 H_2O 含量相对减少。因此可利用包裹体成分中的 CH_4 含量, CO_2/CH_4 和 $CH_4/H_2O + CO_2$ 比值来判断油气热演化程度。如贵州瓮安震旦系白云岩矿物包体成分与代表成熟期的油层和高成熟期的气层的矿物包体成分相比较(表6),可以看出,随着油气演化程度增高, CH_4 含量增加, $CH_4/H_2O + CO_2$ 比值增加,而 CO_2/CH_4 比值减小。贵州瓮安震旦系白云岩矿物包体中 CH_4 含量最高, $CH_4/H_2O + CO_2$ 比值最大,远大于已知油层和气层,说明其热演化程度已经很高。镜下观察,白云岩矿物中有机包体较多,但多为黑色固体沥青组成,其边缘只有很少的液态烃分布;包体均一温度为227—264℃。荧光和反射率测定主要为碳质沥青, R° 值为3.01%。说明该岩层曾储集过油气,但由于热演化程度过高,已无找液态烃的希望,只有干气保存的可能,与包体气相成分分析结果一致。

表6 不同演化程度矿物包裹体气相成分

样 品	岩层 R° (%)	气相成分 (ppm)			比 值 (重量比)	
		H_2O	CO_2	CH_4	CO_2/CH_4	$CH_4/H_2O + CO_2$
• 河北平泉 含油白云岩	1.55	40	1.4	0.062	22.6	0.0015
• 川 东 含气灰岩	未测	260	1.4	0.54	2.6	0.0021
贵州瓮安 震旦系白云岩	2.85	2400	33	35.4	0.93	0.015

(*据施继锡资料, 1987年)

4. 利用包裹体研究成岩作用

碳酸盐岩自沉积后,都经历了多种成岩作用,在岩石不同的成岩作用阶段所发生的胶结、重结晶和溶蚀-充填作用,以及各类裂缝形成和充填过程中,其矿物晶体中均能捕获流体包裹体,由于它们形成时所处的成岩阶段和成岩环境不同,其包体的类型和特征必然不同,均一温度更有明显的差异。因此,利用包裹体资料可以研究成岩作用、探讨成岩环境和成岩历史,以及与油气演化、运移和聚集的关系。下面以广西百色田东油田中三叠统兰木组灰岩包裹体与成岩作用关系为实例,作一简要论述。

根据对中三叠统兰木组灰岩沉积环境和成岩作用研究^①,其主要经历了近地表成岩作用、埋藏成岩作用、印支期抬升淋滤溶蚀-充填作用和喜山期断陷再埋藏成岩作用,其包裹体主要类型和特征,与成岩作用关系密切(表7)。

从表7可以看出,不同的成岩作用和成岩环境,所捕获的包裹体的类型和特征不同。一般来说,早期成岩作用阶段的包裹体体积较小(1—5 μm 左右),气液比和温度也很低,而且包体极不发育,以纯液体包体为主,偶见少量气液包体。由于温度低,有机质

①刘鑫:碳酸盐岩矿物流体包裹体与成岩作用关系, 1989, <滇黔桂石油科技情报>

表7 包裹体类型和特征与成岩作用关系简表

成岩作用	测试矿物	包体类型	包体大小 (μm)	包体温度 ($^{\circ}\text{C}$)	包体 气液比 (%)
近地表 成岩作用	方解石胶结物晶体	见少量纯液体包体 偶见气液包体 未见有机包体	1—5	因包体太 小未能测 温	
	粒内溶蚀充填方解石晶体	见少量纯液包体 少量气液包体 未见有机包体	<5	包体太小 未能测温	
埋藏 成岩作用	三世代粗粒无铁-含铁方解石晶体	纯液体和气液包体发育, 具有有机包体	10—30	95—130	5—10
	压溶缝合线溶蚀-充填方解石晶体	气液包体发育 次生有机包体发育	10—20	130—180	10—25
抬升淋滤 溶蚀作用	淋滤溶蚀缝内粗粒无铁-含铁方 解石晶体	纯液体包体发育 气液包体发育 含有机包体	10—40	72—130	5—10
再埋藏 成岩作用	再埋藏压溶缝合线充填铁方解石 晶体	气体包体发育 见次生有机包体	5—10	测温包体 少、个别 包体温度 可达200	20—30

未成熟, 故未见有机包体, 如中三叠统的近地表成岩作用。据美国James资料(1988)认为, 在近地表的淡水渗流环境结晶的矿物晶体中, 所含的全部包体主要是单相纯液体包裹体, 并具低温特征, 冷冻时, 包体得出的是淡水盐度, 包体温度在 50°C 以下, 表明其低温成因。中—晚期成岩作用阶段的包裹体, 一般体积较大, $10\text{—}40\mu\text{m}$ 左右, 气液比较高($10\text{—}30\%$), 包体温度也较高($70\text{—}180^{\circ}\text{C}$), 而且包体异常发育, 以气液包体为主, 并见大量有机包体, 如中三叠统埋藏成岩作用。晚期成岩作用形成的包体温度大于早期成岩作用包体温度, 表明深埋环境的成岩温度大于浅埋环境的成岩温度, 说明成岩作用是从浅埋环境逐渐向深埋环境条件下产生。但是, 若一些曾经历深埋地下的地层, 因构造作用而抬升(如中三叠统印支期抬升作用), 而淋滤、溶蚀后, 又充填了新的矿物, 其中包裹体的特征就要变化, 尤其是包体温度会明显的降低。因此, 利用不同成岩作用阶段的主要包裹体类型和特征, 不仅可以了解不同的成岩环境、成岩温度、划分成岩作用期次, 而且还可以研究不同成因类型的孔隙、探讨油气演化、运移和聚集。

5. 利用包裹体研究油气运移时流体性质及来源

石油的生成、运移、聚集及逸散都是在有水溶液存在的情况下发生的, 而我们现在所能测定油田水却是多期演化的最终产物, 因此区分油气初次运移和二次运移, 以及聚集时的盐水成分, 在油气评价和生产实际中具有较大意义。矿物包裹体的液相是含有各种离子的盐水溶液, 它代表形成包裹体时油田水的原始样品, 因此利用包裹体研究就可以解决上述问题。国外统计资料认为, 有利于石油生成的溶液盐度为 $8\text{—}10\text{wt}\%$ (相当NaCl), 它能极大限度地将烃类从沉积物中萃取出来, 形成微滴状石油。据贵州赤水

气田二叠、三叠系产气层中碳酸盐岩矿物包裹体盐度分析[●]，二叠系栖霞组为1.4—3.4 wt%，茅口组为3.4—5 wt%，三叠系嘉陵江组为8.9 wt%。由于茅口组和嘉陵江组水溶液盐度不仅远大于栖霞组，而且更接近油田水特征，推测前者的含气远景可能优于后者，尤其是嘉陵江组更好，应是含气的有利层段。又如对贵州丹寨寒武系含碳质沥青灰岩中方解石矿物包裹体分析，其盐度为16—26 wt%，其溶相成分中SO₄含量较高（131.8 ppm），说明寒武系当时是具有较好的成油环境。

与油气一起运移的流体来源，可以通过包裹体中烃类的碳同位素分析，或其它成分分析来解决。

本文引用了杨惠民等研究报告中部分分析资料，在此谨致谢意。

（收稿日期：1989年11月15日）

参 考 文 献

- 〔1〕施继锡等，1987，有机包裹体及其与油气的关系，中国科学B辑，第3期。
- 〔2〕李本超，1988，贵州赤水气区流体包裹体的地球化学研究，地球化学，第3期。
- 〔3〕杨传忠，1987，贵州上震旦统至泥盆系油气演化及前景展望，天然气工业，第1期。
- 〔4〕刘鑫，1990，百色盆地上法地区兰木组矿物流体包体特征与油气关系，天然气工业，第10卷第1期。
- 〔5〕James.N.B., 1988, Systematic of fluid inclusions in diagenetic minerals.

●黄蕴明，赤水太15井包裹体研究小结，1987。

PRINCIPAL RESEARCH METHODS ON MINERAL
FLUID INCLUSION OF CARBONATE ROCK AND
THEIR APPLICATION

Liu Xin Yang Chuanzhong

(Geoscientific Research Institute, the Guizhou Headquarters of
Petroleum Exploration)

Abstract

The paper systematically introduces the major occurrence of mineral fluid inclusions in carbonate rock and several common research methods closely related to oil and gas exploration in carbonate rock areas. Furthermore, with the combination of the data of mineral fluid inclusion obtained from some carbonate rocks in Yunnan, Guizhou and Guangxi provinces, the applications of fluid inclusions of carbonate rocks in five aspects of petroleum exploration are approached in this paper.