

液的不混溶性一直持续到高温)对于解释变质相关关系时提供了有用的信息。如果变质温度明显地受矿物组合所制约,那么对于在变质高峰期间捕获的经详细测定了PVT关系的流体来说,作出它们的等容线便提供了一种估计压力的方法。在某些情况下能够直接估计流体包裹体形成的压力和温度,从而能对由矿物组合推测的压力和温度进行检查。由于变质后的一些作用使岩石受影响,在高峰变质条件下捕获的流体包裹体可以发生重新平衡,从而反映了随后的条件,并且较晚期流体也可能捕获。因此流体包裹体资料对于推断岩石变质隆起历史能够提供一些限制条件。

(沈崑译 卢焕章校)

参 考 文 献

- Burruss, R.C. (1977): Analysis of fluid inclusions in graphitic metamorphic rocks from Bryant Pond, Maine and Khtada Lake, British Columbia; thermodynamic basis and geologic interpretation of observed fluid compositions and molar volume. Ph.D. thesis, Princeton University, 156 p.
- Burruss, R.C. and Hollister, L.S. (1979): Evidence from fluid inclusions for a paleogeothermal gradient at the geothermal test well site, Los Alamos, New Mexico. *J. Volc. Geothermal Res.* **5**, 163-177.
- Crampon, R. (1973): Métamorphisme hydrothermal en faciès salins et pénesalins sur l'exemple du complexe salifère de l'extrême Nord Tunisien. *Contr. Mineral. Petrol.* **39**, 117-140.
- Crawford, M.L., Kraus, D.W. and Hollister, L.S. (1979a): Petrologic and fluid inclusion study of calc-silicate rocks, Prince Rupert, British Columbia. *Am. J. Sci.* **279**, 1135-1159.
- Crawford, M.L., Filer, J. and Wood, C. (1979b): Saline fluid inclusions associated with retrograde metamorphism. *Bull. Mineral.* **102**, 562-568.
- Dhamelincourt, P., Beny, J.M., Dubessy, J.C. and Poty, B. (1979): Analyse d'inclusions fluides à la microsonde Mole à effet Raman. *Bull. Mineral.* **102**, 600-611.
- Durney, D. (1974): Relations entre les températures d'homogénéisation d'inclusions fluides et les minéraux métamorphiques dans les nappes helvétiques du Valais. *Bull. Soc. Geol. France* **16**, 269-272.
- Frey, M., Teichmüller, M., Teichmüller, R., Mullis, J., Künzi, B., Breitschmid, A., Gruner, U., and Schwizer, B., (1980a): Very low-grade metamorphism in external parts of the Central Alps: Illite crystallinity, coal rank and fluid inclusion data. *Eclogae Geol. Helv.* **73**, 173-203.
- Frey, M., Bucher, K., Frank, E. and Mullis, J. (1980b): Alpine metamorphism along the Geotraverse Basel-Chiasso - a review. *Eclogae Geol. Helv.* **73**, 527-546.
- Frost, B.R. (1979): Mineral equilibria involving mixed-volatiles in a C-O-H fluid phase: the stabilities of graphite and siderite. *Am. J. Sci.* **279**, 1033-1059.
- Gehrig, M., Lentz, H., and Franck, E.U. (1979): Thermodynamic properties of water-carbon dioxide-sodium chloride mixtures at high temperatures and pressures. In *High-Pressure Science and Technology* (K.D. Timmerhaus and M.S. Barber, Eds.), **1**, Physical Properties and Material Synthesis, 539-542. Plenum Press, New York.
- Grappin, C., Saliot, P., Sabouraud, C. and Touray, J.C. (1979): Les variations des rapports Cl/Br, Na/Br et K/Br dans les inclusions fluides des quartz de la cicatrice évaporitique de Bramans-Termignon (Vanoise, Alpes françaises). *Chem. Geol.* **25**, 41-52.
- Guba, J., Leroy, J. and Guha, D. (1979): Significance of fluid phases associated with shear zone Cu-Au mineralization in the Dore Lake complex Chibougamau, Quebec. *Bull. Mineral.* **102**, 569-576.
- Guilhaumon, N., Dhamelincourt, P., Touray, J.C. and Barbillat, J. (1978): Analyse à la microsonde à effet Raman d'inclusions gazeuses du système N_2 - CO_2 . *C.R. Acad. Sci. Franc.* **287**, ser. D., 1317-1319.

- Hendel, E.M. and Hollister, L.S. (1981): An empirical solvus for $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-2.6 wt. \% salt}$. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45, 225-228.
- Hing, T.T. and Kwak, T.A.P. (1979): The measurement of the thermal history around the Grassy Granodiorite, King Island, Tasmania by use of fluid inclusion data. *J. Geol.* 87, 43-54.
- Hoefs, J. and Touret, J. (1975): Fluid inclusion and carbon isotope study from Bamble granulites (south Norway). *Contr. Mineral. Petrol.* 52, 165-174.
- Hoefs, J. and Frey, M. (1976): The isotopic composition of carbonaceous matter in a metamorphic profile from the Swiss Alps. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, 945-951.
- Hoefs, J. and Morteau, G. (1979): The carbon isotopic composition of fluid inclusions in Alpine fissure quartzes from the western Tauern window (Tyrol, Austria). *N. Jahrb. Mineral. Mh.* 1979, 123-134.
- Hollister, L.S. and Burruss, R.C. (1976): Phase equilibria in fluid inclusions from the Khatada Lake metamorphic complex. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, 163-175.
- Hollister, L.S., Burruss, R.C., Henry, D.L. and Hendel, E.M. (1979): Physical conditions during uplift of metamorphic terranes, as recorded by fluid inclusions. *Bull. Mineral.* 102, 555-561.
- Jehl, V., Poty, B. and Weisbrod, A. (1977): Hydrothermal metamorphism of the oceanic crust in North Atlantic Ocean. *Bull. Soc. Geol. France* 19, 1213-1221.
- Kerrick, R. (1976): Some effects of tectonic recrystallization on fluid inclusions in quartz veins. *Contr. Mineral. Petrol.* 52, 195-202.
- Kerrick, R., Beckinsale, R.D. and Shackleton, N.J. (1978): The physical and hydrothermal regime of tectonic vein systems: evidence from stable isotope and fluid inclusion studies. *N. Jahrb. Mineral. Abh.* 131, 225-239.
- Kruelen, R. (1980): CO_2 -rich fluids during regional metamorphism on Naxos (Greece): carbon isotopes and fluid inclusions. *Am. J. Sci.* 280, 745-771.
- Lattanzi, P., Tye, D.M. and Rice, G.M. (1980): Behavior of ^{13}C and ^{18}O in carbonates during contact metamorphism at Marysville, Montana: Implications for isotope systematics in impure dolomitic limestones. *Am. J. Sci.* 280, 890-906.
- Lemlein, G.G. (1956): Formation of fluid inclusions in minerals and their use in geological thermometry. *Geochemistry* 1956, 630-642.
- Lemlein, G.G. and Klevtsov, P.V. (1956): Relationship of the thermodynamic parameters PVT of water and of 30% solutions of Na-Cl. *Zap. Vses. Mineral. Obshch.* 84, 47-52 (in Russian).
- Luckscheiter, B. and Morteau, G. (1980): Microthermometrical and chemical studies of fluid inclusions in minerals from Alpine veins from the penninic rocks of the central and western Tauern window (Austria/Italy) *Lithos* 13, 61-77.
- Mullis, J. (1975): Growth conditions of quartz crystals from Val d'Iliez (Valais, Switzerland). *Schweiz. Mineral. petrog. Mitt.* 55, 419-430.

- Mullis, J. (1976a): Die Quarzkristalle des Val d'Illeiz-Zeugen spätalpinen Bewegungen. *Ecolge Geol. Helv.* 69, 343-357.
- Mullis, J. (1976b): Das Wachstumsmilieu der Quarz-Kristalle im Val d'Illeiz (Wallis, Schweiz). *Schweiz Min. Petrog. Mitt.* 56, 219-268.
- Mullis, J. (1979): The system methane-water as a geologic thermometer and barometer from the external part of the Central Alps. *Bull. Mineral.* 102, 526-536.
- Ohmoto, H. and Kerrick, D.M. (1977): Devolatilization equilibria in graphitic systems. *Am. J. Sci.* 277, 1013-1044.
- Pecher, A. (1978): Déformations et métamorphisme associés à une zone de cisaillement. Doctoral thesis, Grenoble University, 355 p.
- Pecher, A. (1979): Les inclusions fluides des quartz d'exsudation de la zone du M.C.T. himalayen au Népal Central: données sur la phase fluide dans une grande zone de cisaillement crustal. *Bull. Mineral.* 102, 537-554.
- Poty, B. (1969): La croissance des cristaux de quartz dans les filons sur l'exemple du filon de La Gardette (Bourg-d'Oisans) et des filons du massif du Mont-Blanc. *Sci. de la Terre Mem.* 17, 162 p.
- Poty, B. and Stalder, H.A. (1970): Kryometrische bestimmung der Salz- und Gasgehalte eingeschlossener Lösungen in Quarzkristallen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen. *Schweiz Mineral. Petrog. Mitt.* 50, 79-98.
- Poty, B., Stalder, H.A. and Weisbrod, A.M. (1974): Fluid inclusion studies in quartz from fissures of Western and Central Alps. *Schweiz Mineral. Petrog. Mitt.* 54, 717-752.
- Rich, R.A. (1975): Fluid inclusions in metamorphosed Paleozoic rocks of eastern Vermont. Ph.D. Thesis, Harvard University, 299 p.
- Rich, R.A. (1979): Fluid inclusion evidence of Silurian evaporites in southeastern Vermont. *Geol. Soc. Am. Bull.* 90, pt. II, 1628-1643.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J. (1980): Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 8, 263-301.
- Rye, R.O., Schuiling, R.D., Rye, D.M., and Jansen, J.B.H. (1976): Carbon, hydrogen and oxygen isotope studies of the regional metamorphic complex at Naxos, Greece. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, 1031-1049.
- Saliot, P., Grappin, C., Guillaumou, N. and Touray, J.C. (1977): Conditions de formation des inclusions fluides hypersalines de quelques quartz de la "zone des gypses" (Vanoise, Alpes françaises). *C.R. Acad. Sci. Paris* 284, 113-116.
- Shieh, Y.N. and Taylor, H.P. (1969): Oxygen and carbon isotope studies of contact metamorphism of carbonate rocks. *J. Petrol.* 10, 307-331.
- Sisson, V.B., Crawford, M.L. and Thompson, P.H. (1981): CO₂-brine immiscibility at high temperatures, evidence from calcareous, meta-sedimentary rocks. Submitted to *Contr. Mineral. Petrol.*

- Stalder, H.A. and Touray, J.C. (1970): Fensterquarze mit Methan-Einschlüssen aus dem westlichen Teil der schweizerischen Kalkalpen. Schweiz Mineral. Petrog. Mitt. 50, 109-130.
- Svanenberg, H.E.C. (1980) Fluid inclusions in high-grade metamorphic rocks from S.W. Norway. Ph.D. Dissertation, University of Utrecht, 147 p.
- Takenouchi, S. and Kennedy, G.C. (1965): The solubility of carbon dioxide in NaCl solutions at high temperatures and pressures. Am. J. Sci. 263, 445-454.
- Töschel, K. and Franck, E.U. (1963): Das Zweiphasengebiet und die Kritische Kurve im System Kohlendioxid-Wasser bis zu Drucken von 3500 bar. Z. Phys. Chem. Neue Folge. 37, 387-401.
- Tomilenko, A.A., Chupin, V.P. and Dolgov, Yu. A. (1976): Conditions of formation of metamorphic rocks, derived from data of studies of inclusions. In Genetic Studies in Mineralogy (Yu. A. Dolgov et al., Eds.) 138-141. (In Russian.)
- Touray, J.C. (1970): Analyse thermo-optique des familles d'inclusions à dépôts salins (principalement halite). Schweiz. Mineral. Petrog. Mitt. 50, 67-79.
- Tugarinov, A.I. and Naumov, V.B. (1970): Dependence of the decriptation temperature of minerals on the composition of their gas-liquid inclusions and hardness. Akad. Nauk. S.S.S.R. Doklady 195, 112-114.
- Wilkins, R.W.T. and Barkas, J.P. (1978): Fluid inclusions deformation and recrystallization in granite tectonites. Contr. Mineral. Petrol. 65, 293-299.
- Wood, C. (1976): A study of fluid inclusions in quartz veins associated with the Octoraro Phyllite in southeastern Pennsylvania. M.A. thesis Bryn Mawr College, 70 p.
- Zagoruchenko, V.A. and Zhuravlev, A.M. (1970): Thermophysical properties of gaseous and liquid methane. Israel. Progr. Sci. Transl. Jerusalem. Russ. original Izd. Stadartov, Moscow, 243 p.
- Ziegenbein, D. and Johannes, W. (1980): Graphite in C-H-O fluids: an unsuitable compound to buffer fluid compositions at temperatures up to 700°C. N. Jahrb. Mineral. Mt. 1980, 289-305.

第八章 高级变质岩中的流体包裹体

J. L. R. Touret

(荷兰自由大学地球科学研究所)

一、引言

在高级变质岩中发现可测量的流体包裹体的时间比较晚 (Dolgov等人, 1967; Touret, 1971; Hollister和Burruss, 1976), 并且只是在过去十年中在技术上和理论上得到了进展从而使得对于流体包裹体能够进行详细研究和解释。目前虽然详细研究工作的数量在稳步增加, 但我们的经验仍然很有限, 并且文献中也未全面涉及这一领域。另一方面, 某些“未预料到”的发现 (在麻粒岩中 CO_2 的产出, Winkler, 1979, 第五版, 274页) 证明流体包裹体是获得岩石演化历史的某个时期所存在的挥发组分信息的唯一方法, 这些挥发组分由于某种原因 (如缺乏补偿性化学元素, 合适矿物的不稳定性等) 不能结合到矿物中去。

本文的目的是对这一课题的某些新近研究工作进行评述, 既强调研究结果, 也强调研究方法, 研究方法在很大程度上决定了最终解释是否成功。无论何时只要有可能, 我们将把注意力集中在有可能进行的和有时是显而易见的进一步研究上, 这种进一步研究由于缺乏时间和人力尚未进行。我们希望因此能够激励新的科学家们进入一个大部分工作尚待开展的领域。

二、高级变质岩及其定义必须考虑的一般因素

这里，将高级变质岩理解为这样的岩石：它们经受过高于低熔组分深熔作用开始时所要求的压力（P）、温度（T）和水的活度（ a_{H_2O} ）等条件。这种略为任意规定的定义与容易识别的野外证据相符：出现花岗岩类细脉或“流动体”（mobilisates），它们穿插变质页理并形成“混合岩”（Mehnert, 1968）。

就等变质度而言，深熔作用的开始点与变泥质岩的“硅线石—钾长石”或“第二硅线石等变质度是一致的（Evans和Guidotti, 1966）。就流体包裹体而论，它标志着在分布最广的流体的性质和可测量流体包裹体丰度及位置方面具有重大变化（ H_2O-CO_2 ，Touret 1974）。在低到中级变质岩石中（Crawford, 第七章），流体包裹体主要集中在石英脉或分凝物中，它们可能含有变质矿物（如红柱石，硅线石和蓝晶石）；在这些矿物中包裹体小，难于研究或简直找不到。相反，在许多高级变质岩中，大量容易研究的包裹体产于岩石基质中，而石英分凝物一般是变质期后的或缺失石英分凝物。伟晶岩（Weisbrod, 第十章）可能很丰富，但是它们与变质程度（和与相邻岩石）的直接关系不明显。

造岩矿物中流体包裹体丰富的一个原因可能是粒度增加，特别是“流动体”中。但是在低级到中级变质岩中存在粗粒岩石，它们通常比相应的高级变质岩含包裹体少。

实际上，深熔作用的广泛出现给予取样程序以某种限制（Hollister等人，第十二章）。从深熔作用岩石组合中采集的样品所含的包裹体一般较相邻的未发生深熔作用的变沉积岩中的流体包裹体具有的密度和组成的范围更广〔见挪威南部研究实例，第四节之（一）〕。

如果深熔作用标志着高级和中级变质程度之间的一条清楚界

线,那么高温极限较难规定。最广义地来说,高级变质岩包括各种混合岩和麻粒岩,并且一般认为它们构成了大陆壳的较深部分(Heier, 1974; Dostal等人, 1980)。然而上地幔岩石(橄榄岩,某些榴辉岩)可能有典型的变质结构;而且它们经常含有同样类型的“碳质”流体(高密度、富含 CO_2 流体),这种流体对麻粒岩和有关岩石来说是很典型的(Touret, 1971)。因此“高级变质岩”的概念可以扩展到一些最深的岩石样品,它们是从深度侵蚀的造山带根部带到地表或被金伯利岩筒侵入体带到地表的。

有确切记载的流体包裹体形成的最大深度为45km左右。Bilal (1978)报导过来自Lesoto金伯利岩的超基性岩捕虏体中 CO_2 的密度为 1.173g/cm^3 这会相当于 1100°C 时具14kb压力(根据Touret和Bottinga的等容线, 1979)。有种种理由要对这一估计的有效性提出疑问,特别是流体捕获后已发生显著的变化(Roedder第五章)。但是它得到其它一些观测结果的证实,因而45km这一极限至少能够作为一个数量级保留下来。

总起来说,如果我们将深熔作用开始的深度定在大约7~10km(取决于变质体制),那末高级变质岩可能因此含有捕获于7—45km左右深度的游离挥发相样品。主要问题之一是要区分“深部”形成的包裹体与那些时常更为丰富、当岩石向地表运移期间形成的包裹体。后者也是重要的,因为它们可能是获得变质高峰期之后有关隆起途径的某些信息的最好方式(Crawford, 第七章)。

三、观察和显微温度测量

适当选择待研究样品必须遵循块状岩石中流体包裹体研究的一般规则(Hollister等人, 第十二章)。注意,如果石英通常是最常见的主矿物,那么也有一些例子,其中流体包裹体产于许多其它矿物中(长石、石榴石、橄榄石等)。在这些矿物中流体包裹体总体(Population)通常较早和较均匀[见第三节, (三)一2]。

流体包裹体数据主要从显微温度测量取得（Hollister等人，第十二章），但是在温度测定之前必须进行普通显微镜的日常仔细的观察。在许多可作记录的特征中有两点特别重要。

（一）估计流体包裹体丰度

在某些样品中流体包裹体极其丰富，而另外一些样品几乎没有包裹体。所以在流体包裹体形成和随后演化历史中涉及到多种作用（过程）和尚未解决的含糊不清的问题，以致于不可能将流体包裹体的丰度同捕获时存在的流体数量直接联系起来（Roedder，第五章）。但是在某些情况下，对流体包裹体的绝对数量作大概估计可能有用。在矿物中流体包裹体分布是如此不均匀，以致于不可能精确计数。如同图8—1所示的简单图表可能有助于迅速确定一个数量级（Konnerup-Madsen，1980）。因为在室温时用一台普通岩相显微镜常能识别最普通类型的包裹体（ H_2O 、 CO_2 和 $H_2O + CO_2$ ），所以图8—1也可能有助于估计同一样品中不同类型包裹体的相对丰度。进行这种估计的一个例子表示在图8-2中（挪威西南部的Kleivatn花岗岩），其它例子在第四节之（一）中讨论。

（二）流体包裹体总体的均匀性；相对年代要素

根据具有相似的物理—化学性质进一步将流体包裹体分为亚组（“家族”），理想情况下它们是同时捕获的。在高级变质岩石中大多数流体包裹体沿愈合的显微裂隙产出，呈现良好确定的轨

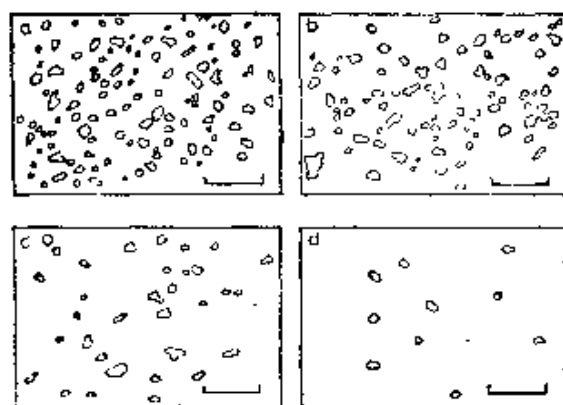


图8—1 在显微镜视域中所见流体包裹体丰度图（引自Konnerup—Madsen，1980，图13）。每平方毫米中包裹体的大致数量：

- a. 很高（高于2500个），
- b. 高（1500与2500个之间），
- c. 中等（500与1500个之间），
- d. 低于500个。

图中横线长50 μ m

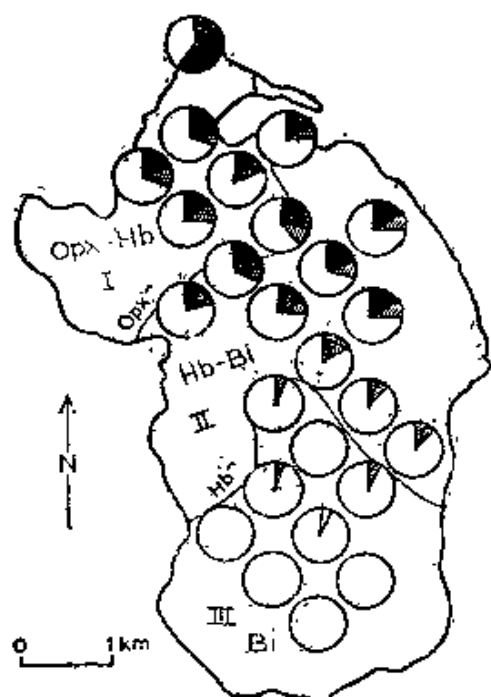


图8—2 挪威南部Kleivattn花岗岩中流体包裹体的分布 (Konnerup—Madsen, 1977)。每个圆圈中心为取样位置，黑色的、带影线的和白色的扇形部分的面积分别为 CO_2 、 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 和 H_2O 三类流体包裹体的相对丰度的比例。(I)斜方辉石—普通角闪石花岗岩(紫苏花岗岩)，(II)普通角闪石—黑云母花岗岩，(III)黑云母花岗岩〔见第四节(一)〕。

图中Opx=斜方辉石，Hb=普通角闪石，Bi=黑云母

迹(一串串)，因此它们是次生包裹体(Roedder, 第五章)；直到最近，人们广泛接受的看法是缺乏真正的原生包裹体。然而已经在若干情况中见到一些原生包裹体：在Komajia变泥质岩中(马达加斯加)(图8—3)，石榴石含有负晶形 CO_2 包裹体，它们在颗粒核

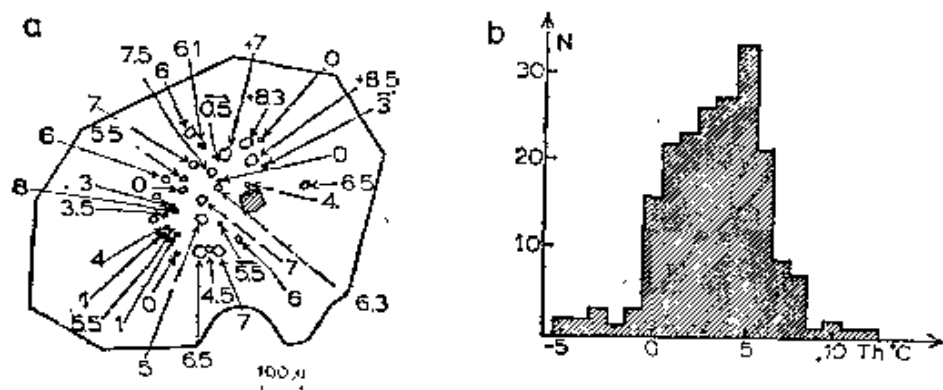


图8—3 马达加斯加Komajia变泥质岩所含石榴石中的原生 CO_2 流体包裹体(Berglund和Touret, 1976)。左图(a)，在晶体中心略呈螺旋状排列的包裹体的分布情况。每个数字为用 $^{\circ}\text{C}$ 表示的均一温度Th(均一到液相)。右图(b)，Th频率直方图(N，测量次数)，该图具有一个十分明显的位于 5°C 附近的最大峰值

心大致呈螺旋形分布。Coolen (1980) 描述过坦桑尼亚Furua麻粒岩杂岩中的一些其它例子。 CO_2 包裹体也具有发育良好的负晶形, 呈单个的包裹体(或呈小群)出现在除此之外不含其它包裹体的晶体中(石英、斜长石、石榴石)(见标准IA, Roedder, 第五章)。这里提到的最后一种情况已由作者在巴西靠近Sao Paulo的变辉长岩中观察到。孤立的 CO_2 包裹体只存在于强烈混浊的火成斜长石已变质重结晶的干净边缘。上述这些例子虽然对于温度压力解释很重要(第四节之(二)), 但却是例外。大多数流体包裹体明显是次生的, 并且我们只能试图获得相对年代关系(早与晚), 这可以根据两条证据来获得:(1)孤立的或呈小群产出, 或(2)愈合显微裂隙的形态和穿插的准则。

A. 呈孤立或小群产出

孤立的(或小群)包裹体常常比较大, 并且在整个主晶体中随意分布, 通常认为它们早于沿愈合裂隙分布的那些包裹体。区别这些包裹体与原生包裹体往往很困难, 因而当原生成因的准则较含糊时, 宁可采用“早的”(或“早期次生”的)这样的术语。

当个别的“小群”包裹体数量达到几十个时, 必须特别注意各种“部分爆裂”和转移的特征(Roedder, 第五章)。在多数高级变质岩地区这些特征广为分布(例如Rogaland, 图8—4), 由于一些较晚期现象它们能给人以一种“早期”包裹体的假象, 从而将人引入歧途。使问题减轻到最小程度的唯一方法是沿裂隙面从三度空间作仔细观察。在多数情况下, 靠近已爆裂包裹体处仍有孤立的“未爆破”的包裹体。对二者的密度数据进行对比能够对转移期间的P—T环境加以指示。

B. 愈合显微裂隙的形态和穿插关系

迄今为止最大多数流体包裹体是呈平而状的一群群或一串串出现, 它们沿愈合裂隙分布(Roedder, 第五章)。许多的包裹体串(轨迹)位于一个矿物颗粒范围内(“颗粒内部”)。认为它们比穿越颗粒边界的“粒间”包裹体串要早。在许多情况下, 根据仔细观察

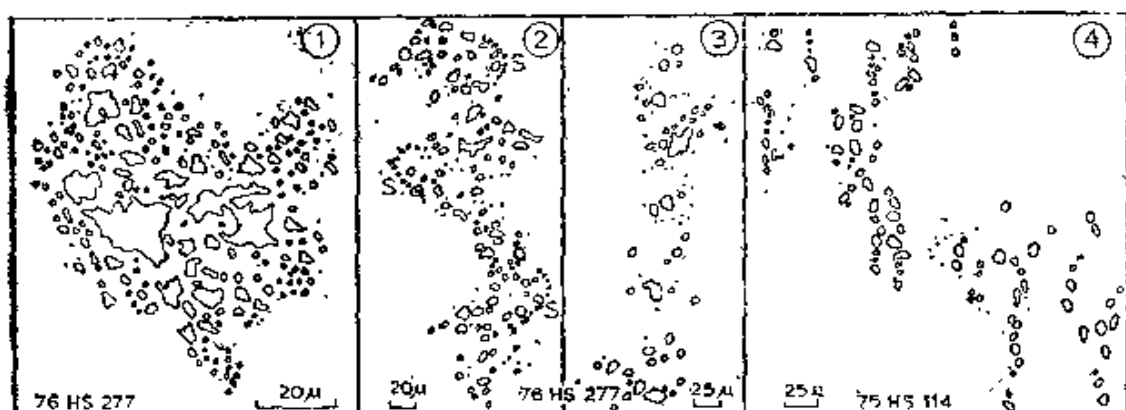


图8—4 一串串早期次生包裹体发生爆裂和转移的特征 (Swanenberg, 1980)

(全部例子来自挪威西南部的Rogaland: 1至3来自Snøsvatnet的粗粒石英岩, 4来自Drangsdalen紫苏花岗质混合岩)

1: 由多数是“超密”(Superdense)细小包裹体组成的一群已爆裂的包裹体, 它们围绕一个居中的不规则星形大包裹体。2和3: 一串先前沿南北方向分布的包裹体发生转移; 2: 一群包裹体点缀(分布)在S形次颗粒边界(具有不同光学方位的两个相邻颗粒界线); 3: “一群群爆裂的”包裹体大致沿NE—SW方向定向排列; 4: 一串先前存在的NW—SE向分布的包裹体发生进一步转移, 成为一些呈南北向分布的小短串。这些次生的小串包裹体定向很好, 表明是在应变梯度下发生转移的(见Roedder, 第五章)。

两组十分确定的包裹体串(轨迹)的穿插特征能够推断相对年代关系(图8—5)。图8—5代表在高级变质岩中经常遇到的四种情况, 它们有助于如下的论述: 大多数包裹体串或者是含 CO_2 〔并可能有各种不同数量的 CH_4 和 N_2 的混合物, 见第三节之(三)〕或 H_2O ($\text{NaCl} \pm$)。除了某些可能的例外情况(Henry, 1978), 混合($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$)包裹体罕见, 而且局限于单独的 H_2O 包裹体串和 CO_2 包裹体串的交汇处。其中大多数在室温时都有液体和气体 CO_2 (图8—5c), 表明它们比邻近的纯 CO_2 包裹体具有更低的 CO_2 密度。

水溶液包裹体晚于 CO_2 包裹体(图8—5c、d和f)。在某些深熔作用形成的流动体中发现一些可能不符合这一规律的例外情况, 其中年代关系极其复杂〔第四节之(一)〕。

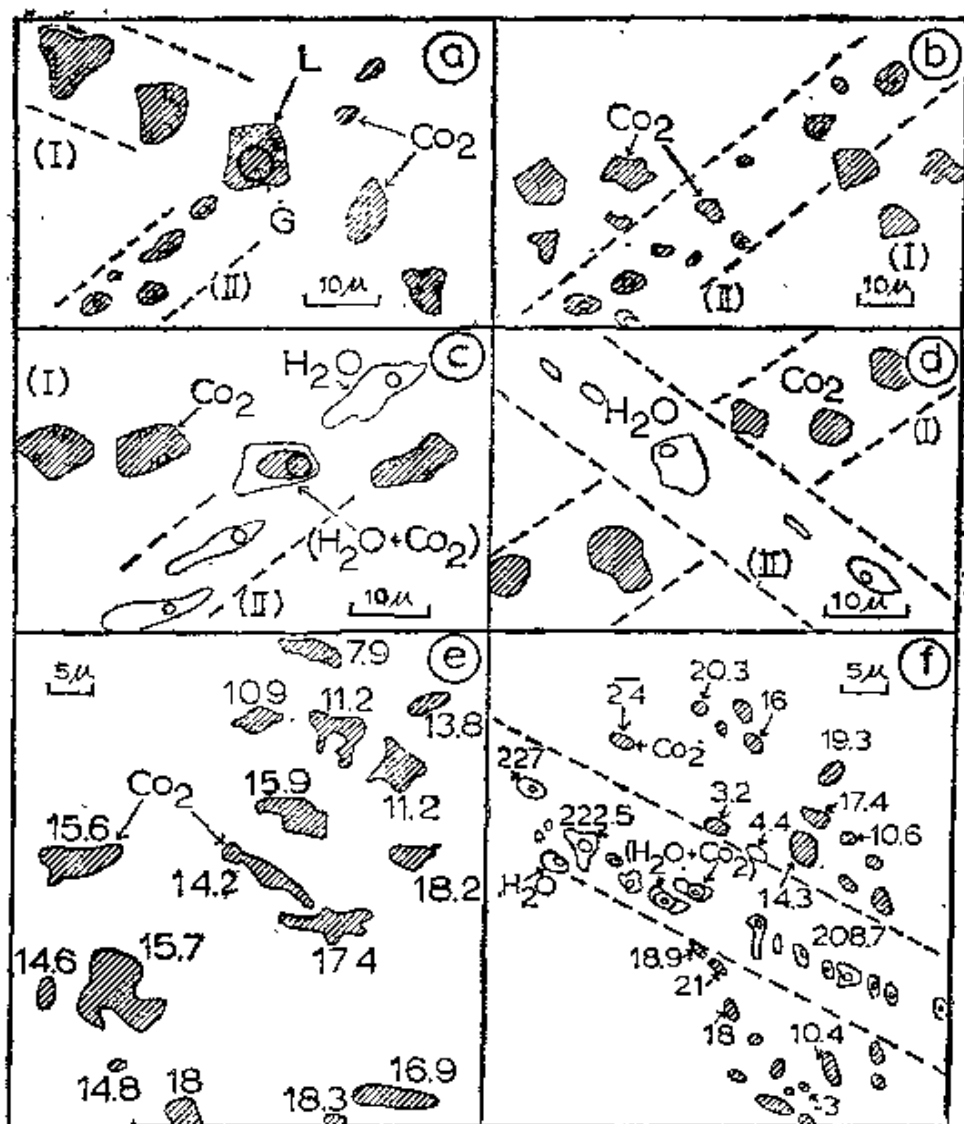


图8—5 表示一些均匀的次生包裹体串穿插特征的例子,a至d反映穿插关系的四个常见例子具有相对年代意义 (Pagel, 1975)

a: 一串早期单相 (高密度) CO₂包裹体 (I) 被一串较晚期、较低密度 (两相) 包裹体 (II) 穿插。在交点包裹体 (I) 仍保持原有形状, 但其成分已适应了 (包裹体 (II) 的) CO₂ 密度; b: 同上, 但在交点包裹体 I 已完全消失; c: 与 a 相同, 但是包裹体 I = 水溶液包裹体, 在交点有一个含三种流体相 (H₂O+CO₂) 的包裹体 (在麻粒岩中最常出现 H₂O+CO₂ 包裹体, 见第四节 (一)); d: 与 a 相同, 但包裹体 I 的 CO₂ 成分已经被 H₂O 取代; e 和 f: 相互穿插的两串均匀包裹体的均一温度 (Th) 测量值的例子 (在阿尔及利亚霍加尔 (Hoggar) 的 Tamanrasset 变泥质岩和石榴石角闪岩 (图 8—13) (见 Ouzegane, 1980))。e: 均一的 CO₂ 包裹体 (Th 的变化小于 10℃); f: 与 d 的情况相同, 一串近于水平分布的 CO₂ 包裹体 (-3 < Th < 21℃) 被一串陡倾斜的 H₂O 包裹体 (Th 在 220℃ 左右) 穿插

至少对于较早的流体包裹体来说, 尚未发现从不均匀流体中捕获的证据 (Roedder, 第五章)。属于这种情况的某些例子可能是高密度的含 CO_2 和含石盐的水溶液包裹体〔根据作者自身经验, 在挪威南部Bjordammen董青石片麻岩中的包裹体值得注意 (Touret和Kienast, 准备发表)〕, 但是尽管进行认真寻找, 仍然缺乏从不均匀流体捕获的确凿证据〔例如象Saldanha—Darling花岗岩中所见 CO_2 包裹体中有石盐立方体 (Schock等人, 1980)〕。

在麻粒岩和来自地幔的所有各种岩石中, CO_2 包裹体广泛分布。低密度 (在室温时为两相) CO_2 流体包裹体晚于单相、较高密度的流体包裹体 (图8—5a和b)。这一要点将在后面根据均一温度直方图加以讨论〔第三节之(三)和第四节之(二)〕。

(三) 显微温度测量: 熔化和均一温度直方图

A. 水溶液包裹体

由于几个明显的理由, 对在高级变质岩中水溶液包裹体的完整显微温度测量记载很少。这些理由是: 多数水溶液流体具有晚期性质, 在小包裹体中难以见到相变以及亚隐性等等。盐含量变化很大; 在单独一个样品中发现含石盐包裹体和几乎纯水包裹体是很普通的。Swanenberg (1980) 在Rogaland一些样品中已测得初熔温度低达 -87°C , 而终熔温度范围从 $0\sim-59^\circ\text{C}$, 从而表明在流体中除 Na^+ 和 K^+ 以外, 还含有变化不定以及数量可观的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等 (Crawford, 第四章)。均一温度和终熔温度之间通常没有明显的关系, 均一温度 (总是均一到液相) 多数落在 $100\sim300^\circ\text{C}$ 温度区间。Olsen (1978) 在HinØy和LangØy (Lofoten, 挪威北部) 的麻粒岩中注意到一种似乎相当常见的情况: 在接近 0°C (-5°C — -2°C) 熔化的包裹体在 200° 和 300°C 之间均一, 而高盐度包裹体 ($T_m = -15^\circ$ 到 -25°C) 在接近 100°C 的较低温度下均一, 这就表明高盐度包裹体密度增大, 在多数情况下它也相应于较早的捕获时间 (大多数低盐度包裹体出现在近于张开的显微裂隙中, 因而显然形成很晚)。一个令人费解的事实是含石盐包裹体广泛分布, 但是看上去

是随意产出的。在一群反而是低盐度包裹体中发现一些孤立的石盐立方体也非少见。在其它一些情况下，它们（含石盐包裹体）广泛分布，并且有迹象表明它们可能与早期富含 CO_2 流体同时形成，如同第三节之（一）所提到的。

B. 富 CO_2 “碳质”流体

如我们在本文开始所说，富 CO_2 流体普遍存在于任何成分的高级变质岩中。这证实了 CO_2 含量与变质程度十分有关（Crawford，第七章）。因为只是对于纯 CO_2 才有可能进行压力—温度解释〔第四节之（二）〕，所以根据 CO_2 熔化温度与 CO_2 三相点（ -56.6°C ）是否重合而辨认两类包裹体较为方便。

（A）纯 CO_2 包裹体：单峰和多峰直方图

对于纯 CO_2 包裹体来说，已记录了很宽的均一温度范围，它变化于 $+31^\circ\text{C}$ 与低于 -60°C 之间，也就是低于三相点。除了极少情况是在接近临界温度时均一到气相外，所有的均一现象都发生在液态，这表明随着均一温度（ T_h ）降低密度则增加（Burruss，第三章）。具有最低均一温度的包裹体（低于 -56.6°C ）是沿液相区 $L \rightarrow V$ 曲线的亚稳态延伸线出现。能够探测到它们是因为包裹体的凝固和熔化温度之间的温差可达 $30^\circ-50^\circ\text{C}$ （Hollister等人，第十二章）。在高级变质岩中的最好例子已在Rogaland的紫苏花岗质混合岩和伴生的沉积岩中有过报导（Swanenberg，1980）。

在Faurefjell变质沉积岩（Ashcin底部石英岩）中已纪录到流体包裹体的均一温度低至 -60° 到 -80°C ，而熔化温度与 CO_2 三相点只差不到 -1°C （平均熔化温度为 -57°C ）（Swanenberg，1980）。在 -100°C 时 CO_2 固体（密度 $1.56\text{g}/\text{cm}^3$ ）的体积大约占包裹体体积的70—80%。这些数据表明 CO_2 （包裹体）密度极高，约达 $1.239/\text{cm}^3$ 。许多这类“超密”的 CO_2 包裹体呈爆裂群产出，或以类似转移构形出现〔图8—4（第四节（二））〕。这些 CO_2 包裹体可以含固相：可能是石墨的一种黑色似片状矿物，和一种具双折射率的菱形或似针状晶体，后者经拉曼光谱鉴定（Cuney，私人通信）