

- Marshall, W.L., Hall, C.E. and Mesmer, R.E. (1981): The system dipotassium hydrogen phosphate-water at high temperatures (100-400°C); liquid-liquid immiscibility and concentrated solutions. *Jour. Inorg. Nuc. Chem.* 43, 449-455.
- Miers, H.A. (1903): An enquiry into the variation of angles observed in crystals; especially of potassium-alum and ammonium-alum. *Trans. Roy. Soc. London* 202, 459-523.
- Mori, Y.H. (1978): Configurations of gas-liquid two-phase bubbles in immiscible liquid media. *Int. Jour. Multiphase Flow* 4, 383-396.
- Naumov, V.B., Balitskiy, V.S. and Ketchikov, L.N. (1966): Correlation of the temperatures of formation, homogenization, and decrepitation of gas-fluid inclusions. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 171 (1), 146-148 (in Russian).
- Nielsen, J.W. and Foster, F.G. (1960): Unusual etch pits in quartz crystals. *Am. Mineral.* 45, 299-310.
- Poty, B. (1969): La croissance des cristaux de quartz dans les filons sur l'exemple du filon de La Gardette (Soury-d'Orsans) et des filons du massif du Mont-Blanc. *Sci. de la Terre Mem.* 17, 162 p.
- Roedder, E. (1962): Ancient fluids in crystals. *Sci. Am.* 207, 38-47.
- Roedder, E. (1963): Studies of fluid inclusions II: Freezing data and their interpretation. *Econ. Geol.* 58, 167-211.
- Roedder, E. (1965a): Liquid CO<sub>2</sub> inclusions in olivine-bearing nodules and phenocrysts from basalts. *Am. Mineral.* 50, 1746-1782.
- Roedder, E. (1965b): Evidence from fluid inclusions as to the nature of ore-forming fluids. *Symposium, Problems of Postmagmatic Ore Deposition. Czech. Geol. Survey, Prague 2*, 375-384.
- Roedder, E. (1966): Bouncing bubbles, or who put the pep in Mother Nature's pop? (abst.). *Jour. Wash. Acad. Sci.* 56, 168-169.
- Roedder, E. (1967a): Fluid inclusions as samples of ore fluids. *In: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (H.L. Barnes, Ed.). Holt, Rinehart and Winston, New York, 515-574 (1st edit.).
- Roedder, E. (1967b): Metastable superheated ice in liquid-water inclusions under high negative pressure. *Science* 155, 1413-1417.
- Roedder, E. (1967c): Device for sensing thermal gradients. U.S. Patent No. 3,344,699, granted October 3, 1967.
- Roedder, E. (1970): Application of an improved crushing microscope stage to studies of the gases in fluid inclusions. *Schweiz. Min. Pet. Mitt.* 50, (1), 41-58.

- Roedder, E. (1971): Metastability in fluid inclusions. *Soc. Mining Geol. Japan, Spec. Issue 3*, 327-334 [Proc. IMA-IAIGOD Meetings '70, IAGOD Vol.].
- Roedder, E. (1972): The composition of fluid inclusions. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper 440J*, 164 pp.
- Roedder, E. (1976): Fluid-inclusion evidence on the genesis of ores in sedimentary and volcanic rocks. In: *Handbook of Stratabound and Stratiform Ore Deposits* (K.H. Wolf, Ed.), Elsevier, Amsterdam, 2, 67-110.
- Roedder, E. (1979a): Origin and significance of magmatic inclusions. *Bull. Mineral.* 102, 487-510 (in English).
- Roedder, E. (1979b): Fluid inclusions as samples of ore fluids. In: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, (H.L. Barnes, Ed.), Wiley, New York, 684-737 (2nd ed.).
- Roedder, E. (1981): Natural occurrence and significance of fluids indicating high pressure and temperature. In: *Nobel Symp. on Chem. and Geochem. of Solutions at High Temp. and Press.*, Stockholm, Swedish Royal Society (in press).
- Roedder, E. and Belkin, H.E. (1979): Application of studies of fluid inclusions in Permian Salado salt, New Mexico, to problems of siting the Waste Isolation Pilot Plant. In: *Scientific Basis for Nuclear Waste Management* (G.J. McCarthy, Ed.), Plenum Press, New York, 1, p. 313-321.
- Roedder, E. and Belkin, H.E. (1980): Thermal gradient migration of fluid inclusions in single crystals of salt from the Waste Isolation Pilot Plant Site (WIPP). In: *Scientific Basis for Nuclear Waste Management* (C.J.M. Northrup, Ed.), Plenum Press, New York, 2, 534-464.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J. (1980): Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 8, 263-301.
- Roedder, E. and Coombs, D.S. (1967): Immiscibility in granitic melts, indicated by fluid inclusions in ejected granitic blocks from Ascension Island. *Jour. Petrology* 8, (3), 417-451.
- Roedder, E., Heyl, A.V. and Creel, J.P. (1968): Environment of ore deposition at the Mex-Tex deposits, Hansonburg district, New Mexico, from studies of fluid inclusions. *Econ. Geol.* 63, 336-348.
- Roedder, E. and Skinner, B.J. (1968): Experimental evidence that fluid inclusions do not leak. *Econ. Geol.* 63, 715-730.
- Roedder, E. and Weiblen, P.W. (1970): Lunar petrology of silicate melt inclusions, Apollo-11 rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta Suppl.* 1, Proc. Apollo-11 Lunar Sci. Conf. 1, 801-837.
- Roedder, E. and Weiblen, P.W. (1973): Petrology of some lithic fragments from Luna 20. *Geochim. Cosmochim. Acta* 37, 1031-1052.
- Skeaff, J.M., Bale, C.W., Felton, A.D. and Thompson, W.T. (1979): Selection of ternary fused chlorides for the electrowinning of lead and zinc based on calculated thermodynamic properties. *Canada Centre for Mineral and Energy Technology Rept.* 79-23, 44 pp.
- Skinner, B.J. (1953): Some considerations regarding liquid inclusions as geologic thermometers. *Econ. Geol.* 48, 541-550.

- Sorby, W.C. (1858): On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. *Quart. Jour. Geol. Soc., London* 14, (1), 453-500.
- Swanenberg, H.E.C. (1980): Fluid inclusions in high-grade metamorphic rocks from southwest Norway. *Geologica Ultraiectina, Univ. Utrecht*, no. 25, 147 pp. (in English).
- Takenouchi, S. and Kennedy, G.C. (1964): The binary system  $H_2O-CO_2$  at high temperatures and pressures. *Am. J. Sci.* 262, 1055-1074.
- Tomilenko, A.A., Chaplin, 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.), Inst. Geol. and Geophy. Sib. Branch Acad. Sci. USSR, Novosibirsk, 138-141 (in Russian).
- Torza, S. and Mason, S.G. (1969): Coalescence of two immiscible liquid drops. *Science* 163, 813-814.
- Touret, J. (1977): The significance of fluid inclusions in metamorphic rocks. In: *Thermodynamics in Geology* (D.G. Fraser, Ed.) D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 203-227.
- Tuttle, O.F. (1949): Structural petrology of planes of liquid inclusions. *J. Geol.* 57, 331-356.
- White, S. (1973): Dislocations and bubbles in vein quartz. *Nature, Phys. Sci.* 243, 11-14.
- Wilkins, R.W.T. and Barkas, J.P. (1978): Fluid inclusions, deformation and recrystallization in granite tectonites. *Cont. Min. Pet.* 65, 293-299.
- Wilkins, R.W.T. and Sverjensky, D.A. (1977): The role of fluid inclusions in the exsolution of clinopyroxene in bustamite from Broken Hill, New South Wales, Australia. *Am. Mineral.* 62, 465-474.
- Wise, D.V. (1964): Microjointing in basement, Middle Rocky Mountains of Montana and Wyoming. *Bull. Geol. Soc. Am.* 75, 287-306.
- Ypma, P.J.M. (1963): Rejuvenation of ore deposits as exemplified by the Beilodonne metalliferous province. Leiden, Netherlands, Leiden Univ. dissert., 213 pp. (in English, with French and Dutch summ.).
- Zirkel, F. (1873): *Die Mikroskopische Beschaffenheit der Mineralien und Gesteine*, Wilhelm Englemann, Leipzig, 502 pp.

## 第六章 沉积成岩作用研究中的 碳氢化合物流体包裹体

R.C.Burruss

(海湾科学技术公司)

### 一、引言

碳氢化合物流体包裹体的成分变化范围可从纯甲烷到固体黑色沥青，它们可以出现于沉积岩和浅变质岩，直到碱性火成岩的所有各种地质环境中。Crawford在第七章中讨论了浅变质岩中富甲烷包裹体的产状，Konnerup—Madsen等（1979）最近报导了Ilmaussaq火成杂岩的碳氢化合物流体包裹体的分析资料。本章专门论述沉积成岩环境中碳氢化合物流体包裹体的产状。我们将集中讨论含“高分子碳氢化合物”包裹体，即含原油和各种凝聚物（各种富气流体）的包裹体，它们包含了足够量的芳香烃分子，在紫外线激发下发出萤光。本文目的是介绍一种运用各种岩相技术和测试手段的综合方法，以说明在分析一个沉积盆地成岩演化过程中碳氢化合物流体包裹体所能提供特殊的信息。特别是这些研究提供了一种岩石学方法，将胶结和裂隙充填期间的成岩矿物的生长与有机成岩作用以及随增温熟化而产生碳氢化合物的机制联系起来。

作者强调碳氢化合物包裹体，并不意味着忽视沉积岩中含水包裹体研究的重要性。然而，正如Roedder（1979）清楚地阐明的，针

对成岩问题进行的流体包裹体的系统研究却出人意料地少。现在这种情况正在改变。最近, Klosterman (1981) 用含水包裹体来确定晚期碳酸盐胶结时的温度和孔隙流体盐度。Currie 和 Nwachukwu (1974) 用含水包裹体来估测 Alberta 盆地中构造破裂开始时必要的埋藏深度。在形成低温金属矿床时沉积卤水所起作用的论述中, Hanor (1979) 清楚地论证了, 密西西比河谷型铅锌矿床中含水包裹体的均一温度和盐度范围与现代地下卤水温度和盐度相符合的情况。重要的是, 含水包裹体和碳氢化合物包裹体(及其各种混合类型包裹体) 都可以在沉积成岩作用形成的岩石中存在。典型的例子是密西西比河谷型铅锌矿床, 这些矿床的萤石中有丰富的含油包裹体 (Roedder, 1962)。

## 二、碳氢化合物包裹体的鉴别

由于对紫外线激发下可以发出萤光的“高分子碳氢化合物”流体(原油)包裹体的讨论较有限, 作者在此大大简化了薄片鉴别该类包裹体的各种问题。原油的萤光性乃众所周知 (Reiker, 1962), 有的人已注意到了类似原油的两相流体包裹体的萤光性。Murray (1957) 和 Kvenvolden 和 Roedder (1971) 都证实了碳氢化合物包裹体的萤光性, 并发表了这些流体的化学分析资料。Gigashvili 和 Kalyuzhnyi (1973) 说明了发萤光的碳氢化合物包裹体有不同世代, 这种包裹体产于切割乌克兰西部密西西比型石灰岩中的石英-方解石脉中。Touray 和 Barlier (1974) 报导了一种丰富的两相包裹体类型, 包裹体清澈透明, 冷却到  $-140^{\circ}\text{C}$  仍不结冰。不用萤光显微技术, 则只能根据它们在低温时的特性将它们从含水包裹体中区分出来。这就带来了一个问题, 即如何简易地识别碳氢化合物包裹体, 并将它们与含水包裹体相区别。

在光学上, 看来有四种方法可以将碳氢化合物包裹体与含水包裹体相区别。

### (一) 颜色

Roedder (1962, 1972) 发表了密西西比河谷型铅锌矿床中从黄色到褐色的碳氢化合物包裹体的彩色显微照片。遗憾的是, 颜色随着碳氢化合物混合物不同而发生变化, 可从无色 (清澈的) 变化到黑色。颜色强度 (吸收性) 是成分和光通过的路程长度 (包裹体大小) 的函数。这样, 甚至有色石油当捕获于大小为  $5-15\mu\text{m}$  的包裹体中时吸收性也很小。对碳酸盐中萤石或其他矿物的包裹体进行研究时, 还会发生另一种复杂的情况, 即主矿物本身可以具某些颜色, 这就掩盖了包裹体的颜色。

### (二) 折射率

碳氢化合物的混合物的折射率接近于主矿物的折射率, 特别是接近于碳酸盐的较低的折射率。某些标准烷烃、石油分馏物和各种全原油的折射率与密度的关系表示于图6.1, 方解石和白云石的较低折射率也同时表示于图中。除了表示了液体碳氢化合物的折射率实际上可以跟主矿物的折射率相吻合 (记得使用浸油吗?) 这种有趣的情况以外, 人们所要求的碳氢化合物的混合物的折射率范围通常比含水包裹体的要大。所以相对主矿物而言, 碳氢化合物包裹体可能比含水包裹体突起低得多。Kvenvolden和Roedder (1971) 注意到了碳氢化合物液体折射率对温度的明显依赖关系, 在一些三相包裹体中, 碳氢化合物液体最初相对于液体水明显呈正突起, 但在加热过程中, 分界面于  $+107^{\circ}\text{C}$  时消失, 在  $+109^{\circ}\text{C}$  时则再现, 并且呈负突起。

### (三) 低温相状态

碳氢化合物包裹体很少显示出清晰的冻结状态, 甚至冷却到  $-180^{\circ}\text{C}$  也是如此。Roedder (1963) 报导了固相的结晶作用, 一些包裹体可析出褐色沥青相 (Kvenvolden和Roedder, 1971), 或者冻结出石蜡固相 (Barlier和Touray, 1974)。作者观测到的现象仅仅是假布朗运动停止, 气泡扩大, 以及低于  $-140^{\circ}\text{C}$  时气相变形。气相变形也许是由于多相多晶物质的固结, 虽然在加温时未能清楚地

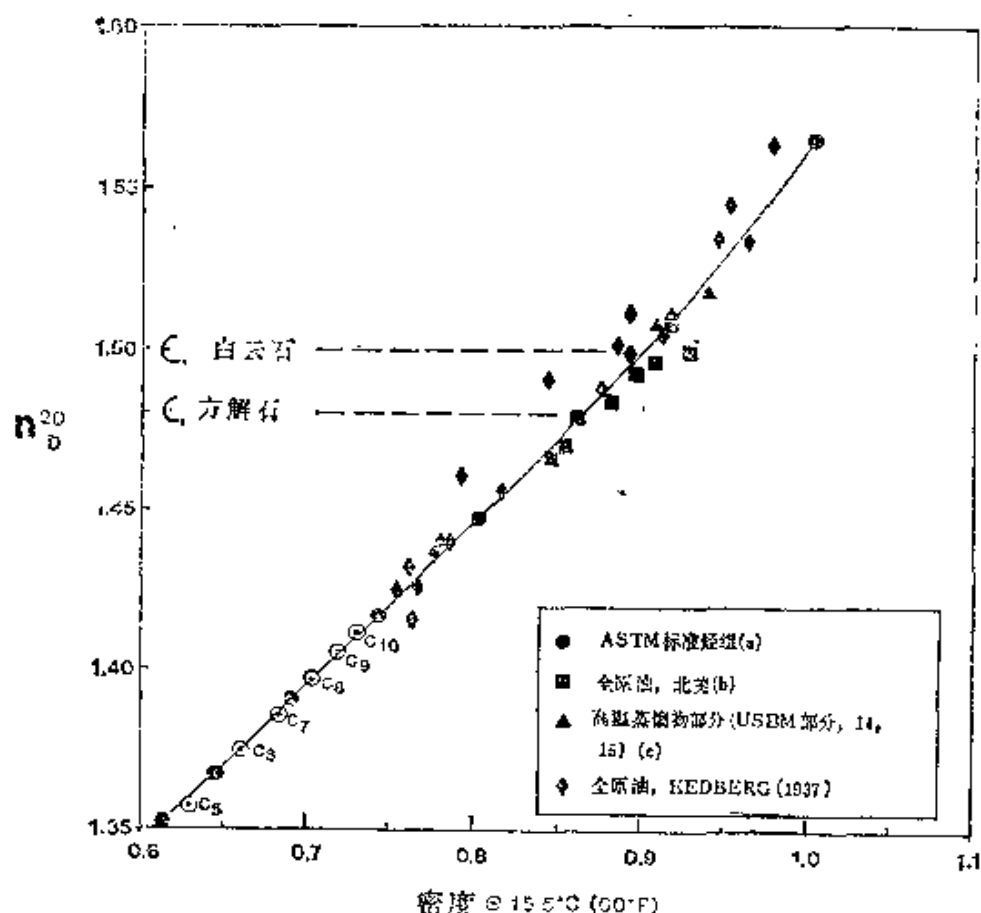


图6—1 一些 $n$ —烷烃 ( $C_5$ — $C_{10}$ )、碳氢化合物, ASTM石油分馏物和全原油在 $15.5^\circ\text{C}$  ( $60^\circ\text{F}$ )时折射率 $n$ 与密度关系图解。还表示了方解石和白云石的较低折射率, 以进行比较。这些数据点, 除来源于Hedberg (1937)外, 还引自 (a) Ward等 (1938a) 和 (b) Ward等 (1938b) 的资料  
见到多晶物质发生熔融。

#### (四) 荧光显微技术

Murray (1957), Gigashvili和Kalyuzhnyi (1973) 以及Kvenvolden和Roedder (1971) 都对含碳氢化合物包裹体在紫外线激发下的荧光性作了论述。Kvenvolden和Roedder (1971) 注意到, 这是一种合宜的技术方法, 可以将含碳氢化合物包裹体与少量水包裹体区分开来, 或者在相同的包裹体中从分离的水相中区分出碳氢化合物。那时, 标准紫外线荧光显微镜对于这些作者来说尚未具备 (Roedder, 私人通信)。但是在现在, 几个生产供研究用的显微

镜制造工厂已备有各种标准附件，它可以允许研究者在长波紫外线垂直照射下观察薄片。一些工厂生产的显微镜(如Leitz, Olympus, Zeiss和Nikon●)所具有的功能和方便程度各不相同，可以配上附件同时在透光、反射偏光和垂直紫外线荧光下进行观察，还可以由一种观察方式迅速转换到另一种方式。

垂直紫外线照明是用一个高压汞弧灯和一个双色镜(类似于反光显微镜中的平面镜光束分离器)以反射长波紫外线(Hg 峰值为366nm)，通过物镜达到样品，而传递到人眼中的只有从标本的荧光物体发出的可见波长(400—700nm)。这种设备同煤显微组分和沉积物中孢子的荧光性研究(Teichmüller和Wolf, 1977)所用的设备相同。

这种技术提供了一种便利的方法，以对一组样品中碳氢化合物包裹体的丰度和产状作岩相学研究。但它也有一些局限性。各种安装样品的介质(如树脂和某些环氧树脂类)象棉绒状物、屑状物和某些研磨材料一类沾染物所发荧光足以使碳氢化合物包裹体发出的荧光变得暗淡，虽然加上盖片(Coverslip)和无荧光性浸油可以产生最好的光学效果，但仍应将薄片清洗干净，并且去掉盖片。必须注意到薄片中山体的荧光性，例如细小的菱形白云石和油页岩，特别是藻体和孢子的荧光性，这才不致于将它们错当作流体包裹。最主要的问题是应当建立一种习惯上的规定，即通过透射光进行研究观测时，任何荧光物质看起来不象是流体包裹体时，那么它很可能就不是碳氢化合物包裹体。最后有一个讨厌的问题是，从荧光性矿物或安装介质所散射的背景光被无荧光的充填气体的包裹体，或两相水包裹体气泡所反射。这些包裹体看起来具荧光性，但实际上不是。只要仔细地检查，并且对发射光和荧光现象反复比较，一般可消除这个麻烦问题。

---

●为显微镜商标名称 一译者注

海湾科学技术公司和作者都不认定某一特定的工厂产设备。每一种显微镜具有各自的特点，在购买前必须由显微镜专家仔细作出评价。一原书注。



荧光显微镜技术可以容易地推广到包括从单个包裹体发射的光谱进行测定等方法中去(Burruss等, 1980)。在我们的仪器中, 单色仪与带有纤维光电缆的显微照相管相联, 就跟Mariano和Ring (1975)关于阴极射线激发光的论述一样。但是煤岩学家使用的各种技术(Teichmüller和Wolf, 1977)也同样适用。

由于光谱测定可以对两种样品中产状不同的荧光包裹体进行对比(即在一个样品中为原生的, 在另一样品中为次生的), 故十分有用。该方法还允许对来自地表的、地下渗出的或者有经济价值油储的含大量石油的各个包裹体进行比较。在对古生代含油碳酸盐固结物的研究中, Burruss等(1980)将光谱测定应用于鉴别特定的显微破裂作用和碳氢化合物迁移事件, 后者指的是石油充填于晶洞和化石洞穴。

对于流体包裹体的研究, 在光学技术上最重要的进步也许就是显微镜聚焦激光拉曼(Raman)光谱学, 但直至最近这种技术才应用于碳氢化合物包裹体研究。Rosasco等(1975)报导了有关的工作情况, Dhamelincourt等(1979)报导了阿尔卑斯石英脉和Lastorville(加蓬)白云石里石英细脉的富 $\text{CH}_4$ 包裹体的分析结果。这种技术除了测定 $\text{CH}_4$ 外还可以定量测定 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{CO}_2$ 。Dhamelincourt等(1979)提供的有限的样品分析资料表明, 进入到变质带, 随着成岩作用的增强 $\text{CH}_4$ 摩尔分数增加, 就象Mullis(1979)根据气相色谱分析结果所提出的一样。

### 三、碳氢化合物流体包裹体产状

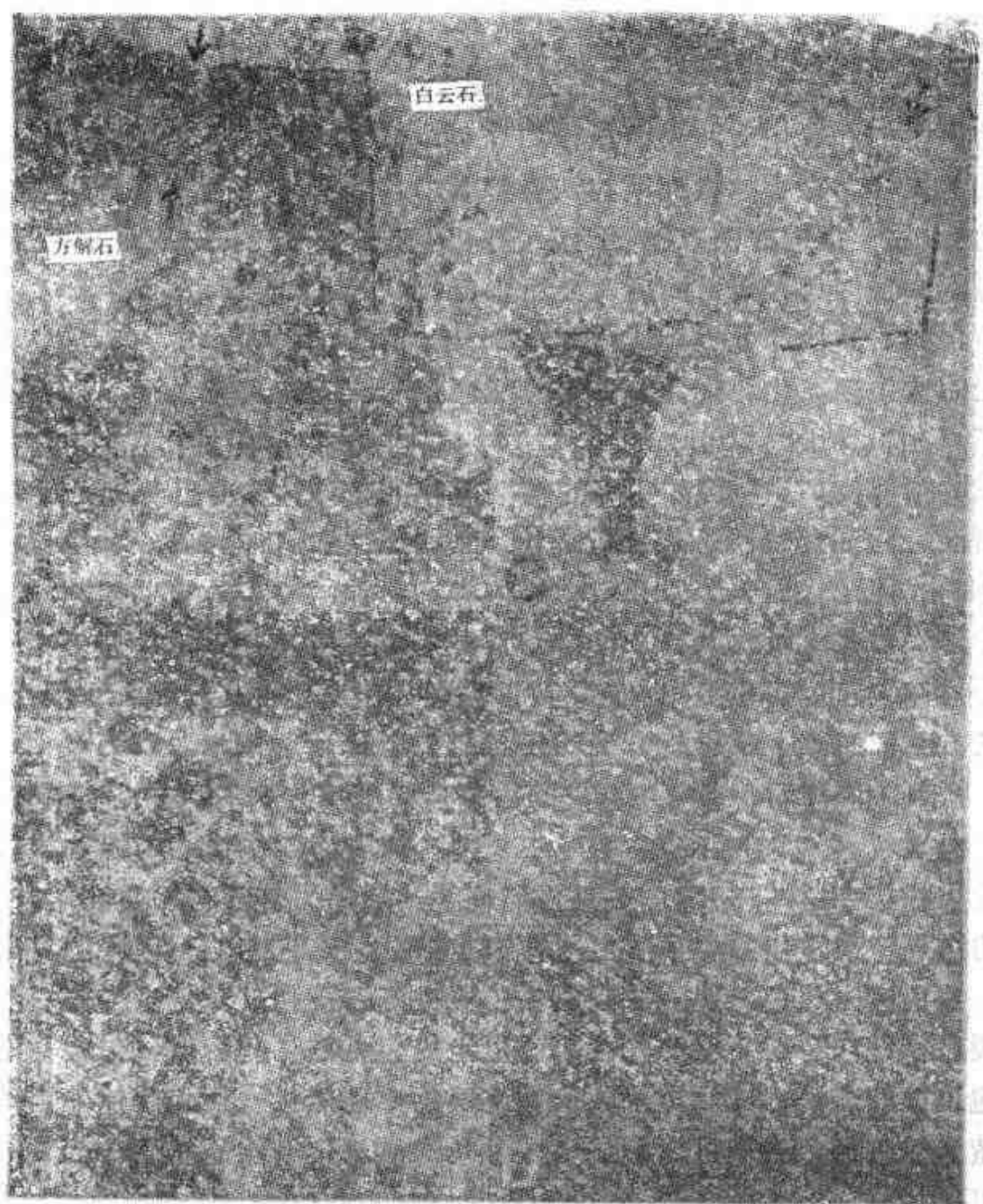
碳氢化合物包裹体可以以其他任何包裹体所具有的各种产状存在, 包括Roedder在第五章所述的原生、假次生和次生包裹体。产状最重要的意义是, 它能够提供特定世代碳氢化合物包裹体捕获时间的信息。

图版6·I的显微照片说明, 碳氢化合物包裹体可以广义地分

为原生的和次生的两类。显微照片对A-B中，原生和次生碳氢化合物包裹体存在于脉状充填的铁方解石中，这个样品为龟甲状脉充填物，由第一世代的铁方解石组成(图A中标有“方解石”的块状晶体，用黑线强调其界线)，而后白云石生成(标有“白云石”)，白云石在该样品的其他部分排列成晶洞(Burruss等，1980)。发出淡兰色萤光的原生碳氢化合物包裹体既产于最初生成的方解石核部，也可在“点画”带(“Stippled” zone)沿晶体边缘分布，见图A两相对箭头所指部位。显微照片中部的箭头所指的是晶体核心外侧的两个发出淡兰色萤光的原生面包裹体。这些原生包裹体代表各种碳氢化合物流体，它们曾经以分散的小滴存在于含水相中。这些微滴偶而会落到正在生长的面上，并且当晶面继续生长时被捕获(Kvenvolden和Roedder，1971)。极少数含水包裹体也会沿这些生长环带生长，它们基本上不含有分离的发萤光碳氢化合物液相。

显微照片对A-B中还可见到沿愈合微裂隙分布的次生包裹体，沿曲线轨迹分布的包裹体切过生长带。许多这样的轨迹还切过第二世代脉状充填的白云石。萤光显微镜还揭示了另外的岩相学细节。小的微裂隙通常局限于第一世代的铁方解石，这种方解石含有能发出金黄色萤光的包裹体(假次生)。切过方解石和白云石的广泛的微裂隙系统含有能发出照亮兰白色萤光的包裹体。基于碳氢化合物的包裹体的产状，以及龟甲状脉充填物中碳氢化合物包裹体发出的萤光的差别，我们可以明显地区分几次碳氢化合物迁移事件。一种可能性是：

- I. 龟甲状脉张开。
  - II. 铁方解石生长，捕获原生的能发出淡兰色萤光的包裹体。
  - III. 产生较小规模细微裂隙，捕获次生的(假次生的)能发出金黄色萤光的包裹体。
  - IV 第二世代白云石脉质充填物生长。
  - V. 广泛产生显微裂隙，捕获能发出亮兰白色萤光的包裹体。
- 识别碎屑沉积岩中的原生包裹体和次生包裹体有时比识别脉状



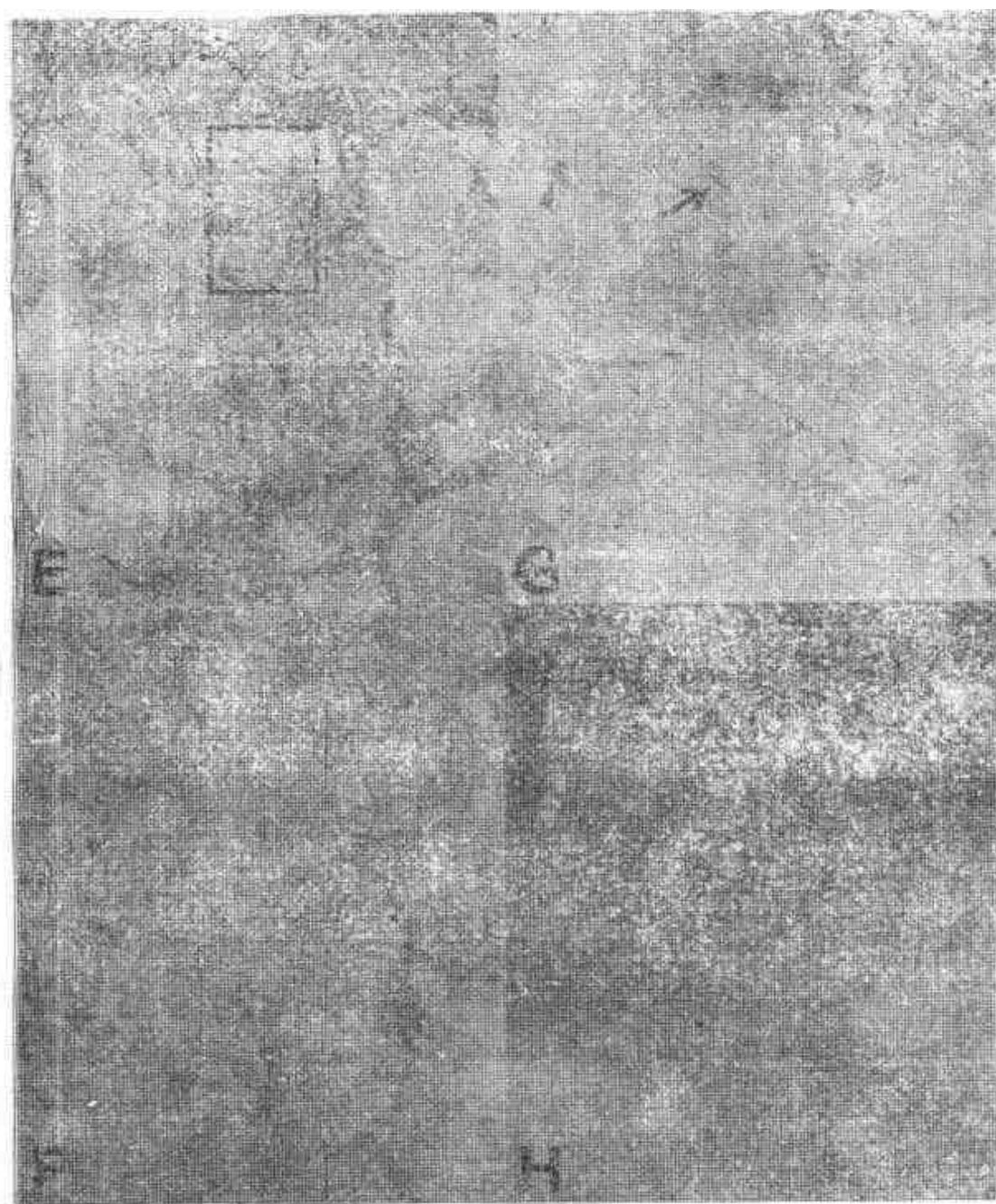
图版6·I 原生和次生流体

A—B: 龟甲状脉质充填物中流体包裹体的透射平面偏光视域图(A), 以及相应具有色带的铁方解石, 紧跟着是第二世代白云石, 在样品的其他地方后者沿品洞排列。在合物包裹体存在于方解石晶体核心(字母A之上暗色区), 以及存在于晶体边界周围的泡的两个包裹体。厚薄片, 显微照片长边为1.0mm。

C—D: 石英颗粒和再生长部分的原生碳氢化合物包裹体和原来碎屑所含的水包裹体, 犹他州。原生的发出荧光的碳氢化合物包裹体存在于碎屑颗粒(对着箭头处)的靠近尘埃边界的再生长部分(此边界用黑线强调)。无荧光含水包裹体的交叉轨迹出现于碎屑颗粒中。这些轨迹不穿过尘埃边界或其他颗粒边界, 这是“碎屑”包裹体充填的方解石。标准薄片, 显微照片长边为0.25mm

E—F: 石英颗粒中次生碳氢化合物包裹体的透射不完全正交偏光视域图(E), 以体的下部近于平行的轨迹穿过已交结的石英颗粒边界。穿过颗粒边界的这种轨迹将它们获发生于沉积物或岩作用之后。标准薄片, 显微照相长边为1.0mm

G—H: 图E圈闭区的放大, 可见到个别气相包裹体。图G中箭头指的是一个相对较



### 包裹体显微照片

的垂直紫外线荧光图 (B) 产于阿肯色州西北部 Fayetteville 组地层。第一世代矿化脉为长波紫外线照射下, 碳氢化合物包裹体发出明亮的荧光。原生的发淡兰色荧光的碳氢化“点画”带 (Stippled) 中, 即两相对箭头之间。照片中心左下方箭头尖处为具明显气

体透射偏光视域图 (C), 以及相应的垂直紫外线荧光图 (D), 产于始新世 Uinta 盆近有尘埃边界的再生长部分 (此边界用黑线强调)。无荧光含水包裹体的交叉轨迹出现 (“detrital” inclusions) 的标志。左下侧不透明三角区为经过浸蚀和印痕试验的孔隙

及相应的垂直紫外线荧光视域图 (F), 样品产自犹他州始新世 Uinta 盆地。图 E 中包裹与图 C 中的碎屑包裹体的轨迹相区别, 这一事实清楚表明, 产生显微破裂和包裹体的捕

大的包裹体。图 H 为相同区域在垂直紫外线照射下的视域图。显微照片长边为 0.25 mm。

充填物中的更为复杂。在一对显微照片C-D中可见再生自形石英中的原生流体包裹体。这些包裹体出现在靠近有尘埃状边缘部分 (dust-rim) (图C中箭头所指,透射光),在有些情况下包裹体的长轴似乎垂直于尘埃边缘。在这个薄片,并非每一个超生石英中都有包裹体产出,而且在这个岩心样品中,离开图版6·I所示的样品只有6英寸远<sup>①</sup>而切制的一些薄片,包裹体却十分稀少。

识别次生包裹体的困难仅仅在于,碎屑颗粒,特别是石英颗粒,通常含有原来碎屑中的包裹体。要从成岩流体的自生包裹体中区分出它们来可能十分困难。人们可以利用的最简单准则是,可能是自生的次生包裹体是否沿愈合的显微裂隙分布,而这些显微裂隙则穿过已成岩的沉积物颗粒边界。这一点可从显微照片对C—D, E—F, G—H中的差别中看清楚。图C中带有生长边的石英颗粒含有大量交叉的包裹体轨迹,在图D中它们既不发出萤光,又不穿过颗粒边界。在显微照片E中,一些近于平行的斑点 (spots) 的轨迹似乎切穿了颗粒边界。很清楚,萤光图E中沿这些轨迹的大多数包裹体含有碳氢化合物。显微照片对G—H为显微照片E中方框区的放大部分,可见到不少两相包裹体。

识别成岩层序中原生和次生碳氢化合物包裹体使我们可以确定流体碳氢化合物相在地下的产出时间。Burruss等 (1980) 用这个方法研究阿肯色州西北部Mississippian Fayetteville 组的 Chester 年代 (早石炭世晚期) 地层中发现的石油迁移到胶结的碳酸盐中的晶洞和化石洞穴中的时间。如果我们能够将此办法与影响样品性质的沉降和沉积作用的埋藏历史分析相结合 (van Hinte, 1978), 则我们可以试图认定在绝对时间尺度上 (地层年代的) 石油迁移的成岩层序和流体包裹体证据。Burruss等 (1981) 用此方法限定了埋藏在阿曼和阿拉伯联合酋长国的阿曼陆外渊之下的中生代碳酸盐地层的石油迁移时间和矿源层年代的上下界限。

---

①英寸为英美制单位。1英寸等于1英尺的十二分之一,1英尺等于0.3048m—译者注

#### 四、显微测温

因为含似原油高分子碳氢化合物包裹体实际上是由上百种组分构成的复杂混合物，这就限制了详细观察相转变的机会。人们可以看到一些包裹体中蜡状固体生长 (Roedder, 1963, Touray 和 Barlier 1974)，我们可以测量它们均一到液相或均一到气相时的温度，以及水相出现时冰或笼形化合物熔融的温度。正如Murray (1957) 所分析的，当包裹体富含气体并且甲烷占优势时，它们在温度很低时可以显示某些固-液相变，但是这样解释起来可能十分困难。例如，Kozlowski (口头交谈, 1978) 发现东欧复理石层一些岩脉中，双锥石英中的包裹体大约在  $-100^{\circ}\text{C}$  时包含一种固相，两种液相和一种气相。

如果我们将Mullis (1979) 有关浅变质岩中富 $\text{CH}_4$ 包裹体的工作暂时排除在外，那么Touray和Barlier (1974) 关于碳氢化合物包裹体测温的研究大概是最系统的。他们研究了French Alps外带中生代“Terres Noires”和“Flysch à helminthoides”地层中七个地方的岩脉和龟背石的石英单晶中的包裹体。根据镜质体反射率以及粘土矿物组合的证据表明，这些地区曾经受到从成岩带到近变质带的温度条件的影响。

样品包含有许多种流体包裹体，包括几乎纯的 $\text{CH}_4$ 到液相碳氢化合物包裹体，以至含水包裹体。Touray和Barlier (1974) 试图解释与热成熟度有关的测温结果，通过室温条件下相的数目 (罗马数字) 以及相的性质 (G, 气相; L, 液相; W, 水) 将包裹体作如下分类：

I G: 单相富甲烷包裹体，在低温下既可均一到气相又可均一到液相。在低温时很少有包裹体常呈现两种液相，甚至出现根不寻常的三种液相 (仅一个样品)。



I L和II L：无色液相碳氢化合物包裹体，其中一些仅在低于室温时才见气泡（I L）。Touray和Barlier（1974）注意到这些包裹体只能根据其低温特性与含水包裹体加以区别：当固体冻结时气泡膨胀，而且这些固体不象冰。

II GL：此类型的特点是在致冷过程中气相冷凝出一个单独液相。

II W：含水包裹体可分为以下几个亚类型：

（1）II W：典型的含水包裹体，可以观察到其中冰的熔融和均一现象。盐度变化是从 $\sim 8$ — $> 23\%$  NaCl当量，其初熔温度 $T < -21^{\circ}\text{C}$ 说明除了NaCl外还有其他电解质存在。

（2）II WG：类似于Mullis（1979）所论述的，在低温条件下气相凝聚出一个液相。

（3）III WL和III WLG：Touray和Barlier（1974，p421）所描述的“油水乳浊液”，严格而言，这些“乳浊液”是如何鉴别的并不清楚。III WLG类型的特征是在致冷过程中气相凝聚出一个液相。

某些这种类型的包裹体的均一温度表示于图6.2。基于这些样品的主岩中的粘土矿物组合和镜质体反射率，热成熟度是从西部向东部增加，故认为这跟东部样品中含水包裹体向较高温度均一的变化情况是一致的。

如果我们暂时不看图中样品D长钉状直方图，则富甲烷包裹体的均一温度呈现从西侧（样品A）向东侧（样品F）递减的大致趋势。由于这是热成熟度递增的趋势，故一种可能的解释便是：随着热成熟度的增加，包裹体成分中甲烷摩尔分数逐渐增加。这些包裹体看起来接近临界密度（某些均一到气相的包裹体，如类型IG），因此甲烷的摩尔分数增加造成了临界温度（即最大均一温度）向纯甲烷的临界点 $-82.1^{\circ}\text{C}$ 移动。这一点已由这些样品和Mullis（1979）提供的Alps其他样品用气相色谱分离法测试包裹体成分的工作，在经验上得到了认可。