

流体包裹体岩相学的一些问题探讨

卢焕章

University of Quebec, Chicoutimi, Quebec G7H 2B1, Canada

摘要: 流体包裹体岩相学是流体包裹体研究的基础和前提。在流体包裹体研究过程中,我们十分重视和强调选择什么样的流体包裹体去做测温和分析。在流体包裹体岩相学中区分原生和次生包裹体十分重要。只有选择了原生流体包裹体后才能进行显微测温学和流体包裹体成分分析。这种选择包裹体的过程(或步骤),确定流体包裹体的分类以及在显微镜下观察流体包裹体捕获后的变化,是流体包裹体岩相学(Fluid inclusion petrography)最主要的内容。本文叙述流体包裹体岩相学的内容和区分原生和次生流体包裹体的一些实例和方法,阐述了流体包裹体与主矿物之关系。

关键词: 流体包裹体岩相学; 原生和次生流体包裹体; 主矿物

中图分类号: P585.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2014) 02-0177-08

Fluid Inclusion Petrography: A Discussion

LU Huanzhang

University of Quebec, Chicoutimi, Quebec G7H 2B1, Canada

Abstract: Petrographic microscopy of a rock and mineral sample is the first and at same time essential step of any fluid inclusion study. Fluid inclusion is a paleogeofluid trapped in minerals. To distinguish the primary and secondary fluid inclusions is an essential step, then a proper interpretation of fluid inclusions can be made only when textural relationship between fluid inclusion and the host mineral and rock are considered. This is the major subject for fluid inclusion petrography. A few methods to describe the essential part of fluid inclusion petrography are included.

Key words: fluid inclusion; petrography; primary and secondary fluid inclusion; host mineral.

First author: LU Huanzhang, Professor; E-mail: hzlu@uqac.ca

流体包裹体岩相学是流体包裹体研究的基础,是研究流体包裹体的前提。前人(Roedder, 1984; Peter et al., 1994; Goldstein and Reynolds, 1994; Van denKerkhof and Hein, 2001; 卢焕章等, 2004; 卢焕章, 2011)作过许多研究。但在实际操作中,面对数以十计或百计的包裹体,有人选大的包裹体来测定,有的人选形状规则的来测定,也不乏有人分不清原生和次生包裹体,分不清各种类型的包裹体之关系。因此,即使测了成千个数据,其数

据很难代表成矿流体的本质。所以作者根据自身工作的经验,对流体包裹体岩相学,特别是原生和次生包裹体区分中存在的问题阐述一些体会。

在流体包裹体研究中,选择什么样的流体包裹体去做测温和分析非常关键。在这个过程中,区分原生和次生包裹体十分重要。只有选择原生流体包裹体才能进行显微测温学和流体包裹体成分分析。这种选择过程或步骤、确定流体包裹体的分类以及在显微镜下观察流体包裹体捕获后的

收稿日期: 2013-03-28; 修回日期: 2014-05-08

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费(201011046)资助

作者简介: 卢焕章, 1940年生, 地球化学专业, 教授, 博士生导师; E-mail: hzlu@uqac.ca

变化,是流体包裹体岩相学(Ffluid inclusion petrography)最主要的内容,也是每位流体包裹体研究者、每个流体包裹体研究项目必做的基础工作。一般来说,研究者先要写出一份有关这个项目流体包裹体岩相学的报告或小结,然后开展流体包裹体显微测温 and 成分分析等工作。因为包裹体岩相学基础关系到所得出的流体包裹体的数据是否正确和可靠,以及根据这些资料所作出的解释是否合理、可行和有意义。

1 流体包裹体岩相学内容

1.1 样品的采集与制备

首先要采集有代表性的和适合做包裹体研究的样品,然后在手标本上切一片如豆腐干大小的标本,并在在同一位置切磨一片岩石光薄片和一片两面抛光的流体包裹体薄片。制备两面抛光的流体包裹体薄片,相比于一般岩石薄片要厚一些。这有两个原因;第一,当包裹体被鉴定完后,需要将包裹体片从载玻片上取下来,取下时如果薄片太薄容易破碎;其二,一般岩石薄片用于鉴定矿物,而包裹体片是用于鉴定矿物中的包裹体。若将一般岩石薄片的高度比喻为平房,而稍厚的包裹体薄片就象是一座楼房,可以观察几个楼层的包裹体。因为包裹体相对于一般造岩矿物来说要小得多,所以只有透光很好的地方才能发现他们。这就要求包裹体薄片要两面抛光,且抛光度要好,特别是粘在载玻片上的面更要抛光得好,薄片从玻璃板上溶下来时要把还原树脂(一种粘样品的胶)清洗干净(否则会在加热时溶化而污染热台)。上述方法和步骤可使我们从岩石薄片和手标本中大致了解矿物的生成顺序,也可在观察包裹体薄片遇到问题时便于返回到岩石薄片和标本中寻找答案。

1.2 确定矿物的生成顺序

在确定矿物生成顺序的同时需关注其围岩蚀变等问题,因为不同的围岩蚀变类型代表不同的形成温度和流体成分。例如金矿床,要确定自然金是产在哪个成矿阶段?与那些矿物共生?由于自然金不透明,可从其共生的透明矿物中的包裹体来得出金矿形成的P-T条件和成矿流体的成分。

1.3 包裹体的鉴定

包裹体的鉴定主要是两部分,一是成分和相

的鉴定;二是原生和次生流体包裹体的确定。图1显示常见的4种类型的包裹体;即气液两相水溶液包裹体; H_2O-CO_2 包裹体;含子矿物包裹体和油气包裹体。

1.3.1 室温下相和成分的确定

相主要分为:气相(V),液相(L),和固相(S)。成分主要考虑 H_2O , CO_2 , 油气,包裹体中子矿物和固体相。液相可用折射率不同加以区分,如液体 CO_2 的折射率为1.195,液体水的折射率为1.32~1.33。子矿物常见有石盐,钾盐, $NaCl \cdot 2H_2O$ (氯化钠水合物),干冰($CO_2 \cdot 5/3 H_2O$),方解石,石膏等。也可用其折射率不同加以区分,这几个常见矿物和相的特征见表1。

表1 室温下流体包裹体中常见固体相的鉴定

(卢焕章等, 2004)

Table 1 Optical properties of common solid phases in fluid inclusion

固体组	成分	折射率	双折射率	所属晶系
冰	H_2O	1.31	可忽略	六方
钾盐	KCl	1.49	均质体	立方
石盐	NaCl	1.54	均质体	立方
文石	$CaCO_3$	1.53~1.69	高	三方
石英	SiO_2	1.54~1.55	低	六方
硬石膏	$CaSO_4$	1.57~1.61	低	斜方

1.3.2 原生和次生包裹体的确定

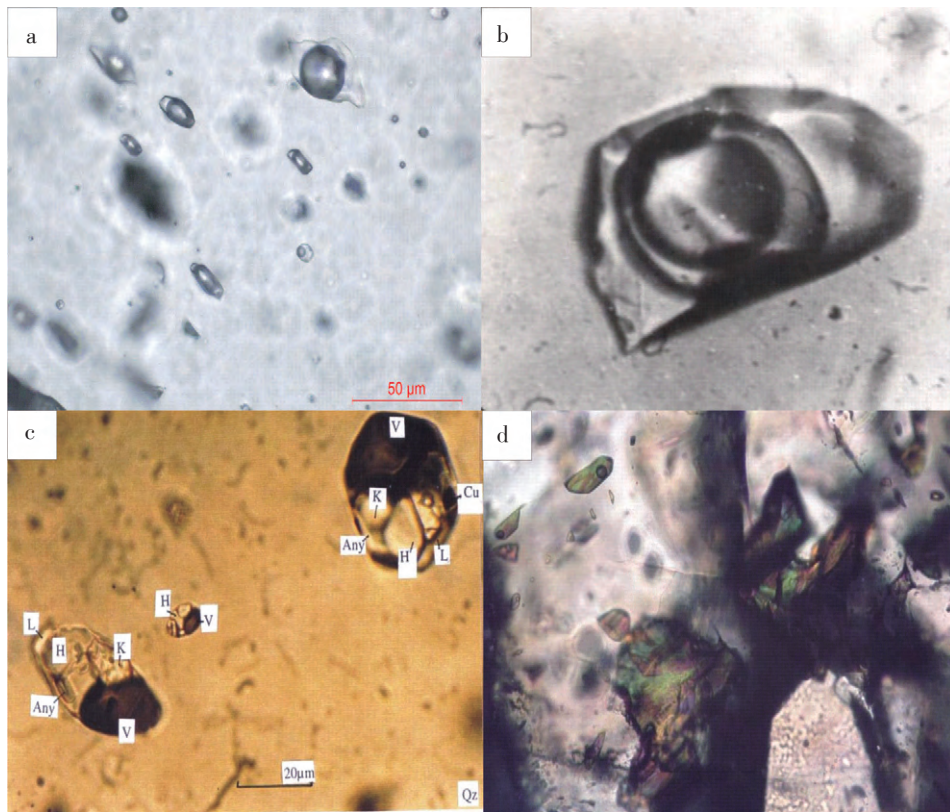
这是一个关键问题。怎样来确定原生和次生包裹体,作者认为有以下几种方法:

A. 矿物生成顺序反推法; B. 矿物单个晶体中的包裹体; C. 晶体生长带中的包裹体(图2); D. 用偏光显微镜和阴极发光(Cathodoluminescence microscopy)显微镜定出主矿物的共生组合,生成顺序和结构来确定流体包裹体与主矿物之关系,从而确定其是原生还是次生。同时在阴极发光显微镜下注意油气包裹体的存在; E. 流体包裹体在矿物中和矿物间的分布。

除以上3部分外,包裹体岩相学内容还包括捕获自均匀体系和不混溶体系流体包裹体的鉴定以及流体包裹体形成后变化的观察。

2 确定原生和次生包裹体的若干实例

原生和次生包裹体的确定是一个关键的问题。在此介绍几个应用的实例,包括矿物生成顺序反推法;用偏光显微镜和阴极发光



V: 气相; L: 液相; H: 石盐; K: 钾盐; Any: 硬石膏; Cu: 铜硫化物。

图1 常见的4种类型包裹体: (a)气液两相水溶液包裹体, (b) H_2O-CO_2 包裹体, (c)含子矿物包裹体, 和(d)油气包裹体
(取自欧光习的样品)

Fig. 1 Four general types of fluid inclusions: (a)aqueous inclusion, (b) H_2O-CO_2 inclusion, (c)daughter mineral bearing inclusion and (d)oil-gas inclusion

(Cathodoluminescence microscopy)显微镜显示主矿物的共生组合和结构, 用生成顺序来确定流体包裹体与主矿物之关系, 从而确定其是原生还是次生等。一般来说, 如果包裹体在矿物中单独随机分布和沿着晶体的生长面分布, 他们是原生包裹体的有力的证据(图2)。

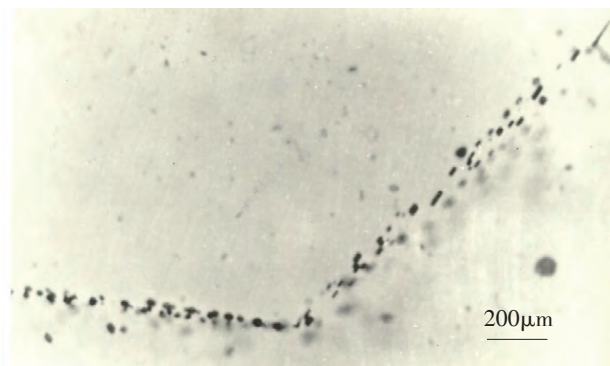
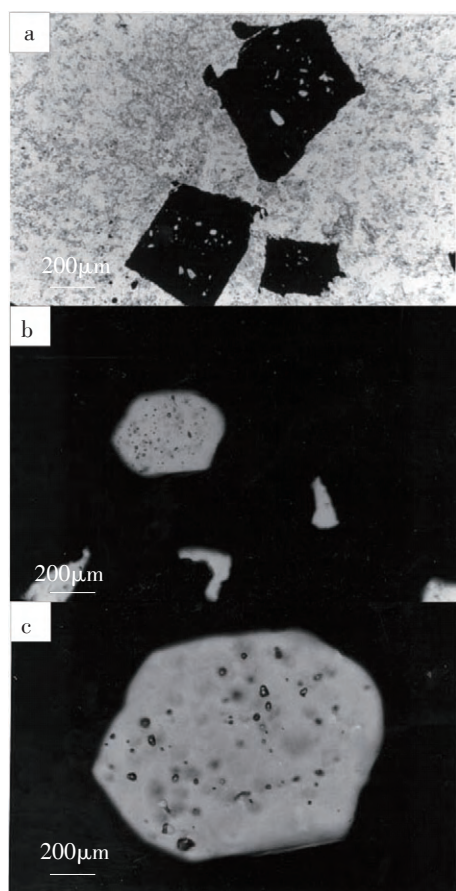


图2 沿晶体生长带分布的原生包裹体

Fig. 2 Primary inclusion along the crystal growth zone

2.1 含金石英脉和绢云母黄铁矿蚀变岩型的原生和次生包裹体的确定

在研究矿床成因和流体包裹体时, 对一个矿床的矿物共生阶段和共生组合的研究是必不可少的。例如, 胶东玲珑—焦家金矿区, 主要为含金石英脉和绢云母黄铁矿蚀变岩型(卢焕章等, 1999; 胡芳芳等, 2005)。根据野外和镜下观察, 其成矿阶段可粗分为石英—黄铁矿阶段; 含金黄铁矿石阶段, 金多金属硫化物阶段和石英—碳酸盐阶段。金主要产在第2和第3阶段。早期石英—黄铁矿阶段和晚期石英—碳酸盐阶段无矿。换句话说, 金与黄铁矿和多金属硫化物密切相关且共生, 但石英在4个阶段中均有分布。我们要找的是与第2和第3阶段黄铁矿共生的石英, 在这种石英(石英2或石英3)中的流体包裹体。图3a示与自然金共生的第3阶段的黄铁矿。其中分布有共生的石英晶体(石英3)。将其放大可见到石英中含 CO_2 和水溶液包裹体(图3b, c)。这种石英中的包裹体即



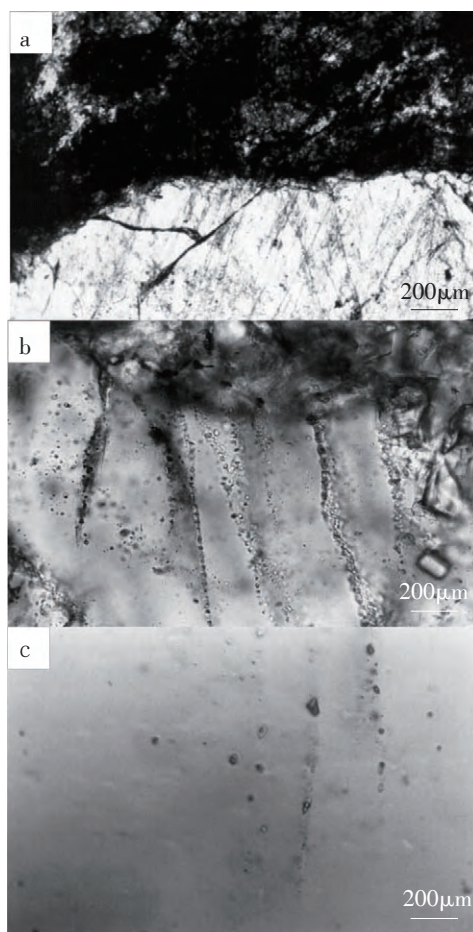
(a)与自然金共生的黄铁矿(黑色)中许多小石英晶体; (b)a图的放大, 可见石英(白色)中含流体包裹体; (c) b图的放大, 黑色为黄铁矿, 白色为石英晶体, 石英晶体中见原生CO₂包裹体。

图3 与金共生的黄铁矿中的石英晶体中的原生CO₂包裹体 (卢焕章等, 2004)

Fig. 3 Primary CO₂ inclusion in quartz which paragenesis with native gold and pyrite

代表形成金矿的流体。

对于蚀变岩型金矿来说(图4a), 它是成矿流体交代了原有的石英等矿物形成黄铁绢云母蚀变岩型金矿。研究发现, 在蚀变岩型金矿外围的早期无矿石英中(石英1)有许多微裂隙。形成蚀变岩型金矿的成矿流体可能沿这些裂隙向外流动, 并在这些裂隙中捕获了流体包裹体。这些流体包裹体相对早期无矿石英(石英1)来说是次生的, 但对于蚀变岩型金矿来说是原生的, 他们也是CO₂和水溶液包裹体(图4)。需要说明的是在蚀变中生成的石英中也有流体包裹体, 但很细小, 不易测定。含金石英脉中的黄金与黄铁矿共生, 黄铁矿中的石英与自然金、黄铁矿共生。所以研究黄铁矿中的石英的流体包裹体可以代表形成金矿的成矿流体。卢焕章(1991)在研究加拿大太古代绿岩带的含金石英脉



(a)蚀变岩型金矿(黄铁矿绢云母石英岩(图的上半部))由黄铁矿(黑色), 绢云母, 石英(白色)所组成和早期形成的无矿石英;

(b)早期无矿石英中的裂隙的放大;

(c)是b图2个微裂隙的放大, 其中含CO₂流体包裹体。

图4 蚀变岩型金矿中的流体包裹体(卢焕章等, 2004)

Fig. 4 Fluid inclusion in alteration type gold deposit

型和蚀变岩型金矿时也观察到相同的现象。

2.2 用生成顺序反推法来确定成矿阶段的包裹体

图5是加拿大绿岩带金矿的成矿阶段和矿物生成顺序, 可以此为例来确定原生包裹体或代表这个成矿阶段的包裹体。从图中可知该矿床成因分为4个成矿阶段: 石英-黄铁矿阶段; 含金黄铁矿-石英阶段; 金多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段。在这4个阶段中含金黄铁矿-石英阶段和金多金属硫化物阶段含矿, 而石英-黄铁矿阶段和石英-碳酸盐阶段不含矿。即先形成早期不含矿石英-黄铁矿阶段, 然后依次形成含金黄铁矿-石英阶段; 金多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段。也就是说早期不含矿石英-黄铁矿阶段会受到含金黄铁矿-石英阶段; 金多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段这3个阶段流体的作用, 并且同时形成

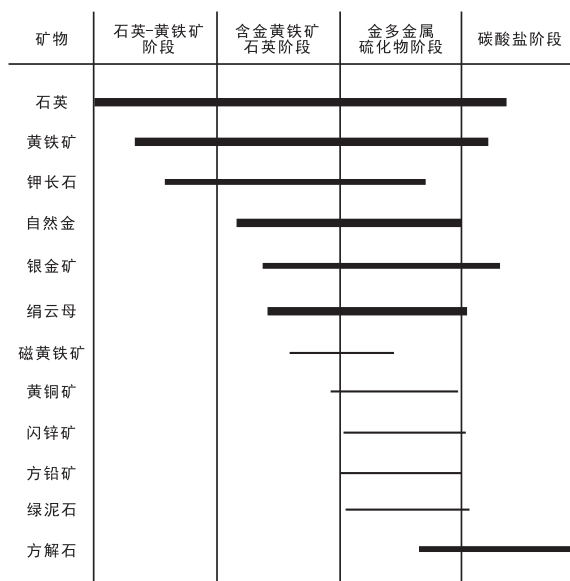


图5 加拿大太古代绿岩带Sigma金矿的成矿阶段和矿物生成顺序(卢焕章, 1991)

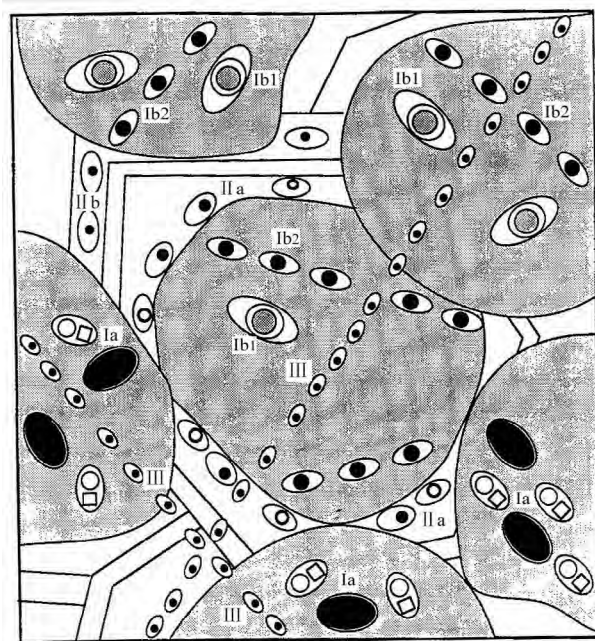
Fig. 5 Mineralization stage and paragenesis of Sigma gold deposit Abitibi, Canada

流体包裹体(FI)。举例来说在第一阶段的石英中可见到第1阶段, 第2阶段, 第3阶段和第4阶段的流体包裹体; 在第2阶段的石英中可见到第2阶段, 第3阶段和第4阶段的流体包裹体; 在第3阶段的石英中可见到第3阶段和第4阶段的流体包裹体; 而在第4阶段的石英中只见到第4阶段的流体包裹体。我们的研究从第4阶段石英中的流体包裹体开始, 确定它是什么样类型的包裹体; 并将这期包裹体定为FI4。然后观察第3阶段石英中的流体包裹体, 发现有2期流体包裹体, 即形成于第3阶段的石英中的流体包裹体FI3和呈次生状态的第4阶段的流体包裹体FI4, 在这当中去掉了FI4就得出FI3类包裹体的特征。当观察第2阶段的石英中的流体包裹体时, 可见到FI2, FI3和FI4流体包裹体, 去掉FI3和FI4, 就可以得出FI2类包裹体的特征。在第1阶段的石英中可以观察到FI1, FI2, FI3和FI4流体包裹体, 去掉了FI2, FI3, FI4就可得出第1阶段流体包裹体(FI1)的特征。在这个例子中我们主要感兴趣的是第2(FI2)和第3成矿阶段(FI3)的流体包裹体。因为他们是成矿阶段的流体包裹体。在第2和第3阶段中的流体包裹体主要为 H_2O-CO_2 包裹体, 而第1和第4阶段主要为气、液两相的水溶液包裹体。作者用这个方法对广西大厂矿区的龙箱盖钨石英脉中流体包裹体研究中

也取得了成效(施继锡等, 1977)。

2.3 沉积岩中原生和次生包裹体的判定

图6示意了沉积砂岩中3个时代的包裹体, 即成岩以前存在于砂岩颗粒中的包裹体, 成岩时见于石英次生加大边和胶结物中的包裹体和成岩之后的次生包裹体。在此, 先来讨论成岩前存在于砂岩石英颗粒中的包裹体。我们在一个石英颗粒中见到了含子矿物和气体包裹体, 含这种类型包裹体的石英最大可能来自斑岩和与斑岩有关的矿床; 在另一个石英颗粒中我们见到 H_2O-CO_2 包裹体, 含这种类型包裹体的石英可能来自含金石英脉或来自变质岩。成岩阶段发生了石英的次生加大(图7)和石英颗粒的胶结而成为砂岩, 代表沉积成岩作用的包裹体见于石英的次生加大边和石英颗粒的胶结物中, 常见有水溶液包裹体和油气包裹体。第3个世代的包裹体穿过成岩以前的砂岩颗粒, 并穿过石英的次生加大边和胶结物, 这是沉



灰色颗粒代表沉积成岩前的石英砂粒, 白色部分代表成岩过程中石英颗粒的加大边和胶结物; 图中的包裹体 Ia, Ib1 和 Ib2 均为成岩前已捕获在石英颗粒中的包裹体, IIa 和 IIb 是在沉积成岩过程中捕获于石英的次生加大边和胶结物中的包裹体, 它们代表沉积盆地的沉积成岩作用和油气迁移的条件, 是沉积成岩作用和油气运移过程中的原生包裹体, III 类包裹体是一类次生包裹体, 它们切过了沉积作用前的岩屑、石英的次生加大边和胶结物, 因而代表沉积岩形成之后沉积盆地的最后一次热液活动。

图6 在一个沉积或生油盆地中可能存在的各种世代和类型的包裹体示意图(据 Bodnar, 1994)

Fig. 6 Generation and types of fluid inclusions in sedimentary basin(Bodnar, 1994)

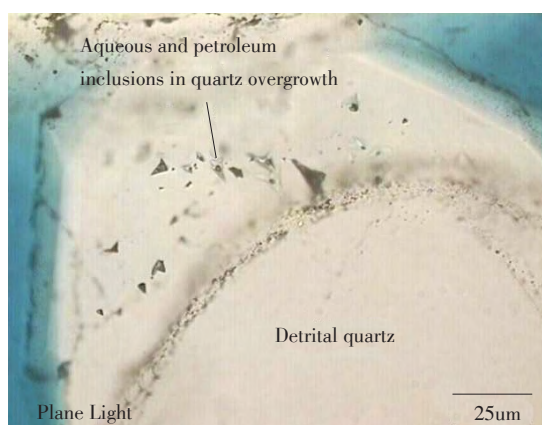


图7 石英的次生加大边和加大边中的流体包裹体(Hall and Stener, 1997)

Fig. 7 Aqueous and petroleum fluid inclusion in quartz overgrowth(Hall and Stener, 1997)

积岩成岩之后的次生包裹体,代表沉积盆地的最后一次热液活动。

上述可归纳为:在一个沉积或生油盆地中可能遇到的各种世代和类型的包裹体(图6)。(1) Ia和Ib均是在沉积作用之前已捕获的流体包裹体。这两类包裹体谁先形成不得而知,但Ib1与Ib2相比,Ib1比Ib2要先形成。(2) IIa和IIb是在沉积岩成岩过程中在石英次生加大和胶结过程中形成的,它们代表沉积盆地中沉积成岩作用和油气迁移作用的条件。(3) III类包裹体是一类次生的包裹体,它们切过了沉积作用前的岩屑,石英的次生加大边和胶结物,因而代表沉积岩形成之后的沉积盆地中的最后一次热液活动。

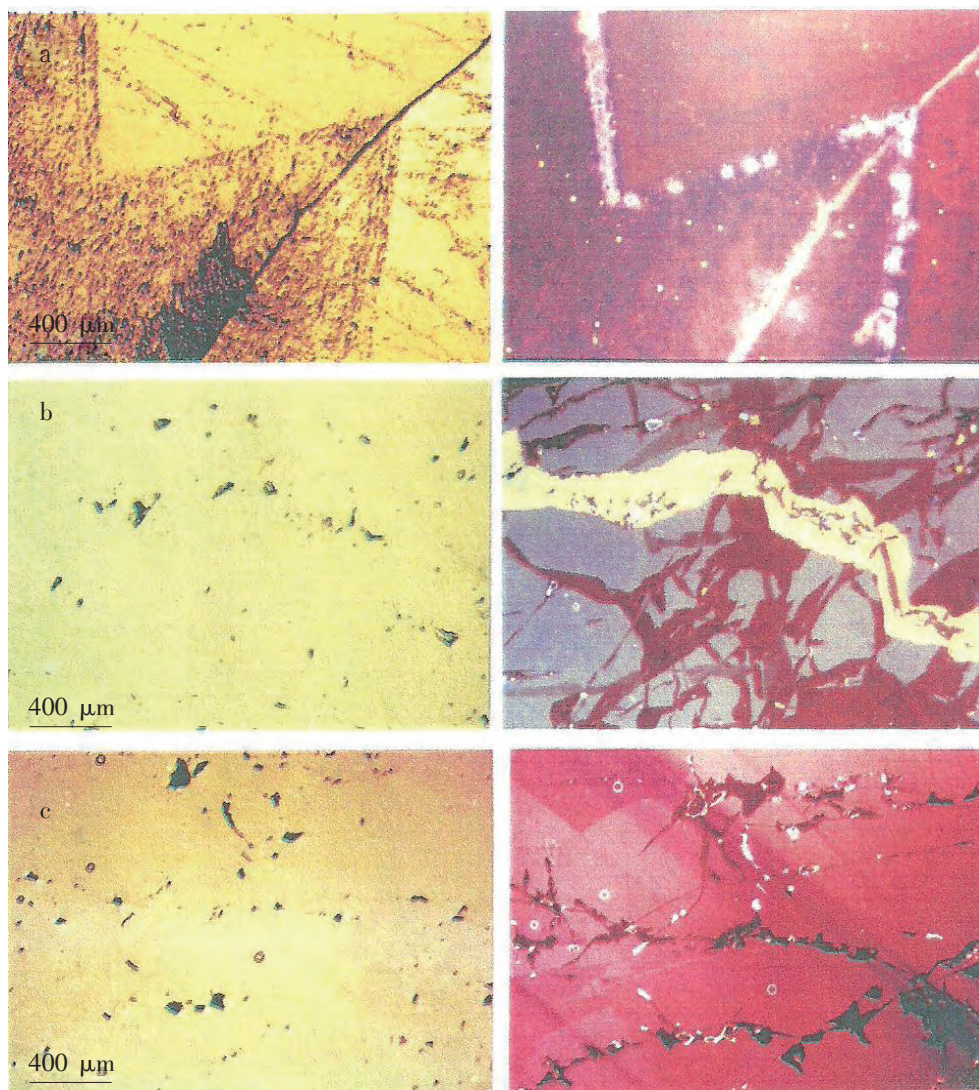


图8 偏光显微镜下(左栏)和阴极射线发光(右栏)测定矿物和包裹体的照片对比(Van den Kerkhof and Hein, 2001).

Fig. 8 Microtexture of minerals and related fluid inclusion in optical (left) and Cathodoluminescence mode(right)

2.4 用阴极射线发光来鉴定矿物的生成顺序和包裹体

为确定矿物的生成顺序和共生组合，除了野外和手标本观察外，常用偏光显微镜。除了用透射光，也用偏光来确定矿物的生成顺序和包裹体在其中的分布。最近国外除了用偏光显微镜外，还用阴极射线发光显微镜(Cathodoluminescence microscopy, CL)和按装有CL检测器的电子探针来做流体包裹体岩相学和成分的测定。同一岩石薄片和流体包裹体薄片在透射光和阴极射线萤光下的显示差异十分明显。图8左边是用普通偏光显微镜时在镜下所见到的矿物，右边是同一视域阴极射线发光(CL)显示的矿物和其内部结构，可见两边现象截然不同(Van denKerkhof and Hein, 2001)。当查明了所存在的各种矿物后，就可以确定包裹体与主矿物的关系。如果流体包裹体仅见于一种矿物的结构中，并不穿过矿物颗粒分布，则可能是

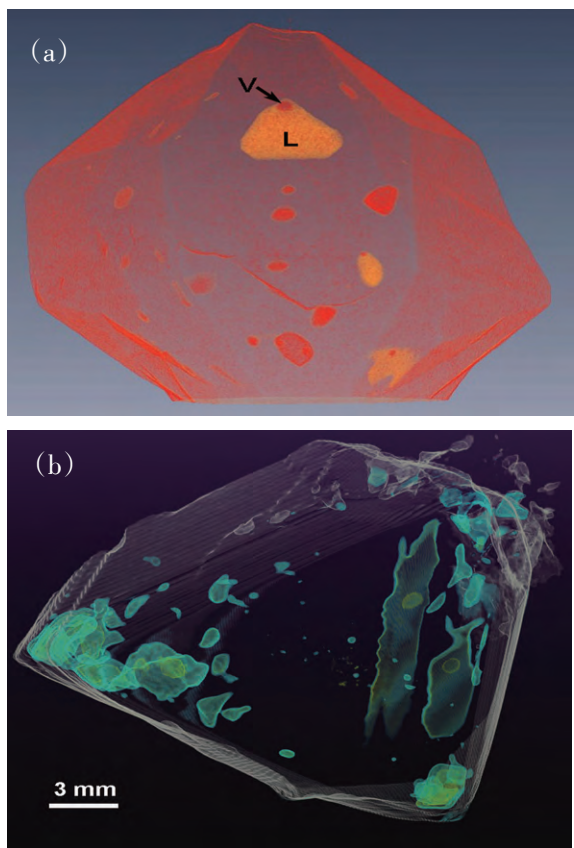


图9 高分辨X射线计算层面照相术将石英(a)和闪锌矿(b)中的流体包裹体呈3D展示

Fig. 9 Using High resolution X-ray computed tomography to show the fluid inclusions in sphalerite and quartz crystal (Kyle and Ketcham, 2007).

原生的；如果流体包裹体的分布穿过矿物颗粒或结构，则为次生的。其次可用阴极射线发光显微镜来鉴定油气包裹体。

2.5 包裹体高分辨X射线计算层面照相术的鉴定

Kyle 等(2007)用高分辨的X射线计算层面照相术，把水晶和闪锌矿中的流体包裹体呈3D展示(图9)，这也是鉴别包裹体的一种方法。通过晶体中包裹体的3D显示，可以一目了然地知道其中的原生和次生包裹体的分布。

2.6 花岗岩晶洞中石英晶体的包裹体

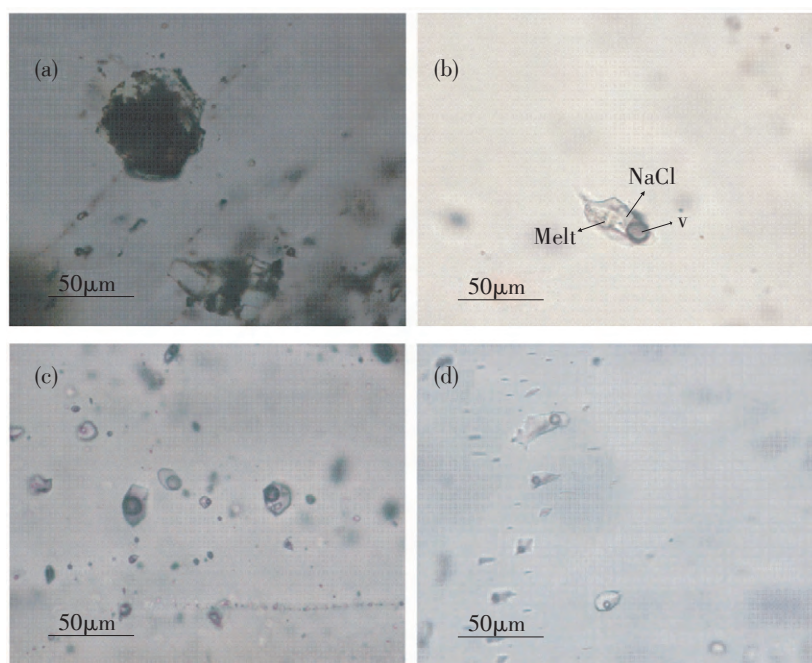
我们对湖南骑田岭花岗岩，花岗岩中的晶洞，以及晶洞中生长的石英晶体(图10)进行了包裹体研究。其目的是观察和认识从岩浆包裹体到流体包裹体的过程。首先正确地取样，即要取花岗岩也要取花岗岩中的晶洞以及晶洞中的石英晶体(图10)。磨片时对花岗岩、晶洞、晶洞中石英晶体的根部、中部和顶部分别磨制薄片，并分别对花岗岩、晶洞、晶洞中石英晶体的根部、晶体的中部和顶部的包裹体进行岩相学研究。

包裹体显微岩相学研究显示，骑田岭花岗岩的石英中存在着3类包裹体：即熔体包裹体、熔体-流体包裹体和流体包裹体。在石英晶洞的石英晶体中也发现了3种包裹体：第1类：熔体包裹体(图11a)，见于花岗岩中石英和石英晶体的根部；第2类：高盐度流体-熔体包裹体(图11b)，见于石英晶体的根部和中部；第3类：流体包裹体，见于石英晶体中部和顶部。流体包裹体根据其相态



图10 骑田岭花岗岩中的石英晶洞

Fig. 10 Miaolitic cavity from Qitianling granite, Hunan, China



(a)花岗岩石英中的结晶质熔体包裹体, 见许多结晶的造岩矿物子晶和气泡; (b)石英晶洞中石英晶体根部的熔体-流体包裹体, 这个包裹体由硅酸盐(melt), 石盐(NaCl), 液体和气体(v)所组成; (c)在石英晶体中见到的含子矿物的包裹体和气、液两相流体包裹体; (d)在石英晶体的头部和边部见到的气、液两相流体包裹体

图11 骑田岭花岗岩和石英晶洞中水晶中的包裹体(卢焕章, 2011)

Fig. 11 Melt and fluid inclusions in miaolitic cavity and Qitianling granite, Hunan, China

组成及比例可分为含石盐子矿物的流体包裹体(图11c)和两相水溶液包裹体(图11d)。从骑田岭花岗岩到其晶洞的根部, 从晶洞的根部到水晶, 依次出现了熔体包裹体(花岗岩和晶洞的根部), 熔体-流体包裹体(晶洞的根部), 流体包裹体(晶洞中的水晶)的分布与演化。

上述研究为从岩浆到热液演化的过程提供了证据。

致谢: 过去几年中, 承蒙厚爱, 作者收到不少有关熔体和流体包裹体, 原生和次生包裹体方面的来信, 作者一一作了答复。有些问题特别是有关包裹体岩相学方面的问题带有普遍性, 故特综合成此文。供讨论。作者感谢两位审稿人和单强提的建议, 使本文增色不少。

参考文献 (References):

- 胡芳芳, 范宏瑞, 沈昆, 等. 2005. 胶东乳山脉状金矿床成矿流体性质与演化[J]. 岩石学报, 21(5): 1329-1338.
- 卢焕章. 1991. 从包裹体研究探索太古代一些金矿的成矿机理[J]. 矿物学报, 2(4): 289-297.
- 卢焕章. 2011. 流体不混溶性和流体包裹体[J]. 岩石学报, 5: 1253-1261.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版

社: 1-490.

- 卢焕章, Guha J, 方根保. 1999. 山东玲珑金矿的成矿流体特征[J]. 地球化学, 28(5): 421-435.
- 施继锡, 卢焕章, 喻茨玫. 1977. 利用气液包裹体讨论华南某矿田的分带特征及成矿条件[J]. 地质与勘探, 5: 57-64.
- Bodnar R J. 1994. Philosophy of fluid inclusion analysis [C]// Vivo B De, Frezzotti M L eds. Fluid inclusion in Mineral, methods and applications. Blacksburg: Virginia Tech: 1-6.
- Goldstein R H and Reynolds T J. 1994. Systematics of fluid inclusions in Diagenetic minerals [M]. Tulsa: SEPM short Course, 31:1-190.
- Hall D W and Stener M. 1997. Using fluid inclusion to explore oil and gas [J]. J. Petrol. Eng. Int., 70(11): 25-34.
- Kyle J R and Ketcham R A. 2007. Application of high resolution X-ray computed tomography to fluid inclusion studies of opaque minerals. [C]// Proceeding of International Conference on Geofluid and Fluid Inclusions on Geofluids and Fluid inclusions, Abstract volume: 36-37.
- Peter J M, Goodfellow W D and Leybourne M I. 1994. Fluid inclusion petrography and microthermometry of the middle valley hydrothermal system, northern Juan De Fuca ridge [C]// Mottl M J, Fisher E E and Stack J F eds. Proceeding of the Ocean drilling program, Scientific results, 139: 411-417
- Roedder E. 1984. Fluid Inclusion, Review in Mineralogy [M]. Am Mineralogical Society: 1-644.
- Van denKerkhof A M and Hein UF. 2001. Fluid inclusion petrography [J]. Lithos, 55: 27-47.