

流体包裹体组合对测温数据有效性的制约及数据表达方法^{*}

池国祥^{1,2} 卢焕章³

CHI GuoXiang^{1,2} and LU HuanZhang³

1. 加拿大里贾纳大学地质系

2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. Department of Geology, University of Regina, Regina, Saskatchewan, Canada

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2008-03-26 收稿, 2008-07-09 改回。

Chi GX and Lu HZ. 2008. Validation and representation of fluid inclusion microthermometric data using the fluid inclusion assemblage (FIA) concept. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 1945–1953

Abstract This paper discusses the principles of the fluid inclusion assemblage (FIA) method and its application in validation and representation of fluid inclusion microthermometric data. An FIA is a group of fluid inclusions that were entrapped at the same time, and the contemporaneousness of the fluid inclusions within an FIA is based on petrographic relationships rather than on their similarity in microthermometric attributes. If an FIA can be identified based on petrography, then the consistency of microthermometric data within the FIA indicates that the fluid inclusions entrapped a homogeneous fluid and have not been significantly modified since the entrapment; the microthermometric data are valid, and only the mean value of the fluid inclusions within the FIA should be used for data compilation. Conversely, if fluid inclusions within an FIA show variable microthermometric attributes, then the inclusions may have either entrapped two or more phases of fluids and in variable proportions (heterogeneous trapping), or may have been significantly modified after entrapment (e. g., necking down or stretching); the microthermometric data are invalid, and should not be used in data compilation. In many cases, the contemporaneousness of a group of fluid inclusions cannot be determined, and so the FIA approach cannot be strictly applied. However, the FIA concept is still useful even in such cases. If fluid inclusions closely associated with each other show similar microthermometric data, it is a positive sign that the inclusions have entrapped a homogeneous fluid and have not been significantly altered after entrapment. Microthermometric data of individual fluid inclusions should be used in data compilation, but caution should be paid not to concentrate data collection in a limited area. On the other hand, large variation of microthermometric data within a small area in a crystal may indicate heterogeneous trapping, post-entrapment modification, or superimposition of more than one generation of fluid inclusions. A detailed mapping of fluid inclusion microthermometric data and comparison with better defined FIAs can be used to discriminate these possibilities.

Key words Fluid inclusion assemblage; Microthermometry

摘要 本文探讨流体包裹体组合(FIA)的原理及其对包裹体测温数据有效性的制约以及数据的表达方法。流体包裹体组合指的是一组同时被捕获的流体包裹体,其同时性的依据是岩相学关系而不是测温数据的相似性。如果根据岩相学关系建立了一个FIA,且这个FIA内的包裹体测温数据很一致,那么这些包裹体可能属于均一捕获且在捕获后未受破坏,这些包裹体的测温数据是有效的。在进行数据汇总或统计时,应取整个FIA内所有包裹体的平均值为代表,而不应将每个包裹体的数据都列入。如果同一FIA内包裹体的测温数据变化很大,那么这些包裹体可能属于非均一捕获或在捕获后遭受了显著改变(如卡脖子、拉伸)。这种情况下包裹体的测温数据是无效的,不应纳入数据汇总或统计。在很多情况下,一组包裹体是否属

* 本研究得到了 NSERC, Saskatchewan Energy and Resources, Geological Survey of Canada 和国家自然科学基金(40772061)以及中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR0740)资助。

第一作者简介:池国祥,男,1963年生,博士,从事矿床学和地质流体研究, E-mail: Guoxiang. Chi@uregina. ca

于同时捕获是很难确定的,因此不能严格地用 FIA 的方法来判定数据的有效性。但是,FIA 的原理还是可以提供一些制约的。例如,如果相邻包裹体显示相似的测温数据,那么这些包裹体可能属于均一捕获且无显著捕获后变化。各个包裹体的数据都应纳入数据汇总及统计,但要注意不要将数据点过分集中在某个小区域。反之,如果相邻包裹体的测温数据相差很大,就要怀疑是不是非均一捕获、捕获后破坏,或不同期次包裹体叠加。详细的包裹体测温“填图”,结合与已知 FIA 数据的比较,可能可以解决这种多解性问题。

关键词 流体包裹体组合;包裹体测温

中图法分类号 P599

1 引言

流体包裹体分析的有效性取决于三个基本假设,即 Roedder 三原则 (Bodnar, 2003a, b): 1) 包裹体捕获了一个单一的、均匀的流体相; 2) 包裹体的体积自捕获后未发生变化(等容体系); 3) 包裹体的成分自捕获后未发生变化 (Roedder, 1984)。在很多流体包裹体研究中,尤其是上世纪 90 年代以前,这些假设往往不加检验就被假定是成立的。诚然,一个包裹体的体积或成分在捕获后是否发生了变化是很难证明的,因为我们首先不知道包裹体被捕获时是多大、什么成分。Goldstein and Reynolds (1994) 提出的流体包裹体组合 (Fluid Inclusion Assemblage-FIA) 的概念,使得用简单的岩相学和测温法对上述三个基本假设进行检验成为可能。本文基于 Goldstein and Reynolds (1994) 及 Goldstein (2003) 的工作,阐述了 FIA 的基本原理及其在包裹体测温数据有效性检验及数据表达方法上的应用,并进一步阐明在包裹体分析中经常碰到的、FIA 不能被严格确立的情况下,如何运用 FIA 概念对测温数据的有效性进行制约,以及在这些情况下如何处理和表达测温数据。

2 流体包裹体组合及其对测温数据有效性制约的原理

一个流体包裹体组合指的是“岩相学上能够分得最细的有关联的一组包裹体”或“通过岩相学方法能够分辨出来的、代表最细分的包裹体捕获事件的一组包裹体”(Goldstein and Reynolds, 1994)。每个 FIA 都是建立在岩相学关系上的,代表了一个在时间上分得最细的包裹体封存事件 (Goldstein, 2003)。在这个定义中有两点需要强调: 1) FIA 是岩相学上可分辨的; 2) FIA 内的所有包裹体都是同时捕获的。根据这个定义,如果母流体是单相流体,那么 FIA 内的所有包裹体应显示相同的成分、温度和压力 (Bodnar, 2003a)。FIA 的最佳例子是同一愈合裂隙内的次生包裹体,也叫流体包裹体面 (Fluid Inclusion Plane 或 FIP),以及同一生长环带内的原生包裹体 (Goldstein and Reynolds, 1994)。与 FIA 相似的另一个术语叫“同时包裹体组”(Group of Synchronous Inclusions 或 GSI),是由 Fonarev *et al.* (1998) 提出的。有些研究者喜欢用这一术语,因为它强调了包裹体捕获的同时性 (Touret, 2001)。

FIA 概念用于包裹体数据评价的依据是: 如果 FIA 内的包裹体捕获了一个均一的流体相,且其体积和成分在捕获后未发生变化,那么这些包裹体就应该有相同的成分、密度和均一温度。这样,如果 FIA 内流体包裹体的测温数据是一致的,就可以推测均一捕获和等容体系的假定是正确的,因此测温数据是有效的。反之,如果 FIA 内包裹体的测温数据是变化很大的,那么可能有三种原因 (图 1): 1) 有两个不混溶的流体相存在,有些包裹体捕获了不止一个相的流体(即非均一捕获),而同一 FIA 内的不同包裹体捕获不同相的比例不同 (图 1A); 2) 有些包裹体在发生相变(如由均一液相变成气液两相)后经受了卡脖子变化 (图 1B); 3) FIA 内不同包裹体在捕获后发生了不同程度的改造或破坏(如拉伸或部分打开) (图 1C)。虽然非均一捕获本身就提供了有关流体系统的有用信息(不混溶的流体相共存,如沸腾状态),但是包裹体的均一温度是高于捕获温度的。卡脖子可造成有些包裹体均一温度高于捕获温度,有些低于捕获温度,而拉伸作用总的来说会使均一温度变高。

如果 FIA 内的包裹体捕获了均一的流体相,可能有人会说即使它们经受了拉伸作用,其均一温度也还会是一致的,因为同一 FIA 内的包裹体经历了相同的地质历史,应该受到相同程度的拉伸。但是,在相同条件下,不同包裹体由于其大小和形状不同,所受的拉伸程度是不一样的。一般来说,包裹体越大,形状越不规则,使其产生再平衡所需的压力就越小 (Bodnar, 2003b)。因此,FIA 内不同大小和形状的包裹体如果均一温度一致,说明它们没有经历显著的再平衡。

在理想情况下,如果 FIA 内的包裹体在捕获后未发生变化,它们的均一温度应该是相等的。在实际应用中,一定的变化范围内是允许的。根据 Goldstein and Reynolds (1994),如果一个 FIA 内 90% 的不同大小和形状的包裹体的均一温度相差在 10 ~ 15°C 内,那这个 FIA 可被认为具有一致的均一温度,包裹体测温数据是有效的。

3 FIA 的辨别及数据表达

从流体包裹体组合的定义可以看出,鉴别一个 FIA 的最重要的依据是捕获的同时性。这个同时性必须有岩相学依据,而不是根据包裹体测温数据是否相似。例如,如果相邻的两个包裹体有很相似的均一温度,这并不意味着它们属于一个 FIA,除非有岩相学证据证明它们是同时被捕获的。反

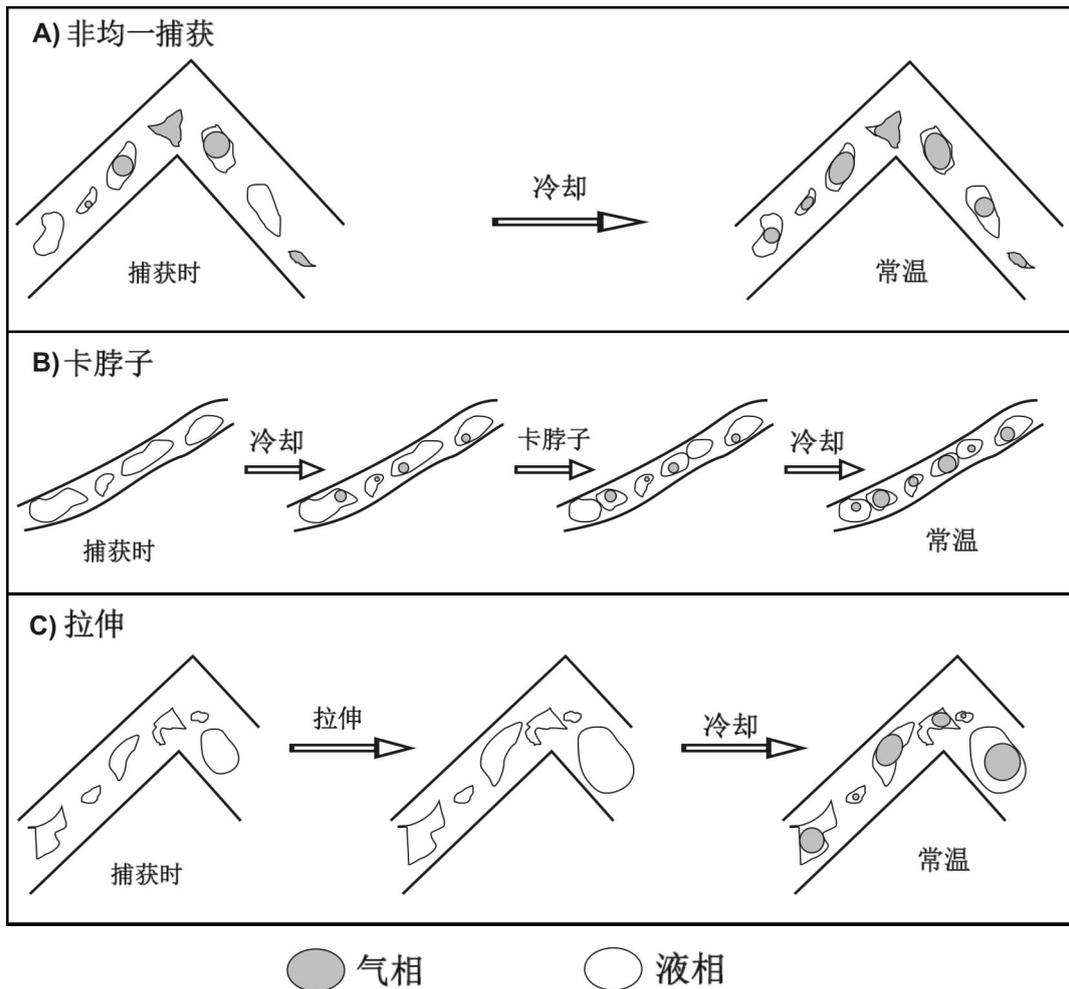


图1 三种常见的造成包裹体组合内测温数据(反映在气/液比的变化上)不一致的原因: 非均一捕获(A), 卡脖子(B), 及拉伸(C)

Fig.1 Three common causes of microthermometric inconsistency (as reflected by variable vapor / liquid ratios) for fluid inclusions in an FIA: Heterogeneous trapping (A), necking down (B), and stretching (C)

过来,如果一组包裹体的测温数据不一致(如图1中不同气液比所指示的那样),我们不能因此就说它们不是FIA。

愈合裂隙中的流体包裹体,或流体包裹体面,是比较容易辨认的FIA(图2A)。但是,有时由于裂隙密集分布或相互切割,FIA的划分会比较困难,尤其在裂隙交汇处。一般来说,同一样品内还是可以找到情况比较不复杂的流体包裹体面的。

沿某个晶体生长带分布的包裹体总的来说可以定为FIA(图3A)。但是,如果生长带很宽,或被次生或假次生包裹体叠加,划分FIA时要加小心。对于很宽的生长带,可将里面的包裹体细分为几个平行的FIA。在这方面,扫描电镜-阴极发光(SEM-CL)方法可以发挥一定作用,尤其是对石英(Van den Kerkhof and Hein, 2001; Goldstein, 2003)。在很多情况下,晶体生长带表现为颜色变化,包裹体不是沿整个生长带分布,而是在其中某段(图3B)。这时,如果包裹体的排列是平行于生长带的,那么它们可以作为FIA。

一旦建立了FIA并测温,就要根据前面讨论的原则对测

温数据进行检验。如果FIA内测温数据一致(如均一温度变化范围小于 $10 \sim 15^{\circ}\text{C}$),那它们就是有效的。注意对于二氧化碳包裹体,其均一温度变化范围要求要窄得多,一般应在几度范围内,因为二氧化碳包裹体的均一温度本身就很小($< 31^{\circ}\text{C}$)。所有包裹体的测温数据都要记录下来,但是只能将FIA内所有包裹体的平均值用于数据汇总或统计(如用于计算某个样品的平均值或做直方图)。不然的话,一个样品的数据就会偏向某些含很多包裹体测温数据的FIA,因为这些包裹体都有相似的测温值。例如,如果有42个二氧化碳包裹体的均一温度被测自某个石英晶体中的4条愈合裂隙(图2),那么只有每条愈合裂隙内包裹体的平均值,即4个数据而不是42个数据,可以被用来统计该样品的二氧化碳包裹体的均一温度。当然,单个FIA内包裹体的均一温度还是可以做直方图,以反映该FIA包裹体的变化情况(图2C1-4),但是这些直方图不能用到该样品的总直方图中,否则 $0 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 和 $4 \sim 7^{\circ}\text{C}$ 区间的均一温度的重要性就被夸大了。

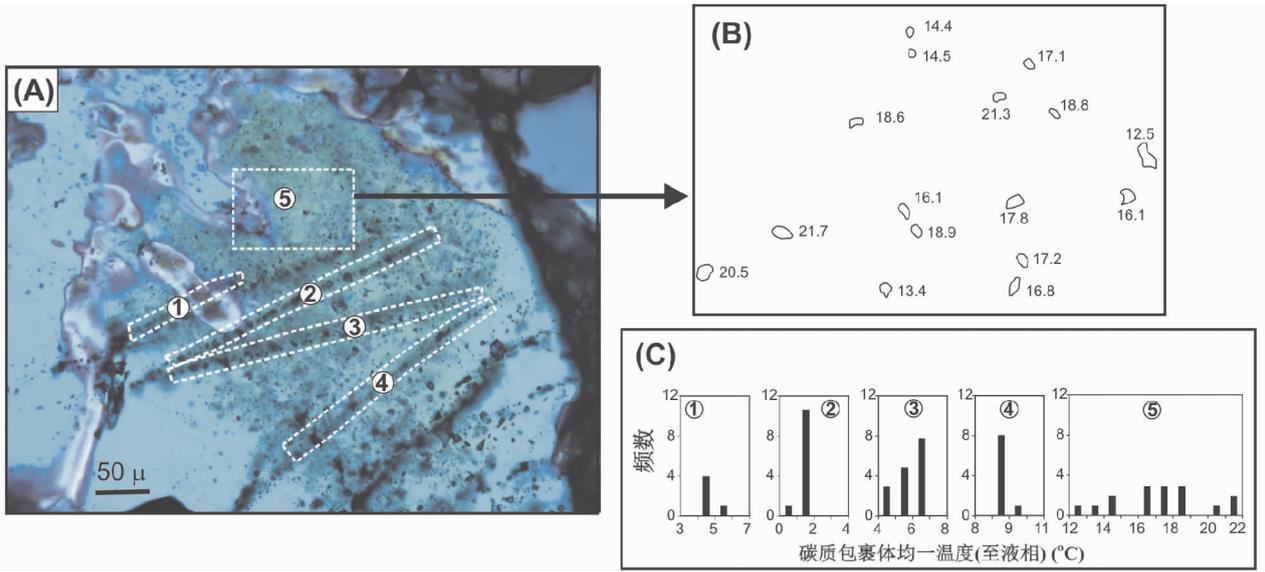


图2 A)-石英晶体中产于愈合裂隙(标号1-4)内的FIA以及无序分布的碳质包裹体(标号5);B)-图A 5区中无序分布包裹体的均一温度分布。大部分包裹体因太小没标在图上;C)-图A中1-4愈合裂隙及5区的包裹体均一温度直方图。愈合裂隙内的均一温度变化范围很小,而无序分布包裹体的均一温度变化范围较大

Fig.2 A)-Photomicrograph showing several FIAs of carbonic fluid inclusions in healed microfractures (labeled 1-4) in a quartz crystal and randomly distributed fluid inclusions (area 5); B)-homogenization temperatures of carbonic fluid inclusions randomly distributed in area 5 outlined in A. Note most inclusions are too small to be measured and are not shown here for clarity; C)-Histograms of homogenization temperatures of carbonic fluid inclusions from microfractures 1-4 and area 5 shown in A. Note the narrow range of homogenization temperatures within individual healed fractures and the relatively wide range for the randomly distributed ones

表1 FIA 及非 FIA 流体包裹体测温数据的表达

Table 1 Representation of microthermometric data for FIAs and non-FIA fluid inclusions

样号	主矿物	产状*	大小 (μm)	V/T** (%)	T_{mH_2O} (°C)		T_{hCO_2} (°C)		T_h (°C)		例号
					范围	均值(n)	范围	均值(n)	范围	均值(n)	
GC002	石英	HF	2~7	100	—	—	4.6~5.0L	4.8 (5)	—	—	1
		HF	2~8	100	—	—	0.6~1.7L	1.6 (12)	—	—	2
		HF	2~8	100	—	—	4.0~6.5L	5.7 (16)	—	—	3
		HF	2~9	100	—	—	8.7~9.2L	8.8 (9)	—	—	4
		RD	5	100	—	—	16.8L	16.8	—	—	5
			4	100	—	—	17.2L	17.2	—	—	6
			6	100	—	—	16.1L	16.1	—	—	7
			9	100	—	—	12.5L	12.5	—	—	8
GC050	萤石	GZ	5~12	8~10	-15.3~-13.8	-14.5 (3)	—	—	125.7~138.9L	133.2 (7)	9
		GZ	3~9	10	-14.9~-14.2	-14.6 (2)	—	—	133.7~144.5L	135.7 (5)	10
		GZ	4~15	10~12	-17.1~-16.8	-17.0 (2)	—	—	150.3~159.8L	155.8 (6)	11
		I	9	15	-20.1	-20.1	—	—	166.4L	166.4	12
		I	3	10	-16.8	-16.8	—	—	153.5L	153.5	13
		I	6	10	-17.2	-17.2	—	—	140.5L	140.5	14
GC078	重晶石	HF	4~18	0	-0.3~-0.1	-0.2 (2)	—	—	单液相	单液相(5)	15
		HF	6~15	0	-0.4~-0.2	-0.3 (1)	—	—	单液相	单液相(8)	16
		HF	5~20	0	-0.3~0.0	-0.2 (3)	—	—	单液相	单液相(4)	17
		HF	4~16	0~60	-0.3~-0.1	-0.2 (3)	—	—	单液相~>250	单液相(6)	18
		HF	7~15	0~20	-0.5~-0.2	-0.3 (3)	—	—	单液相~235.3	单液相(5)	19
		S	9	5	-8.4	-8.4	—	—	97.0L	97.0	20
			15	5	-7.8	-7.8	—	—	99.0L	99.0	21
			6	5	-11.9	-11.9	—	—	110.6L	110.6	26
GC123	方解石	C	3~8	5~8	-3.3~-3.7	-3.5 (2)	—	—	85.1~93.2L	88.7 (3)	22
		C	4~11	5~8	-2.9~-3.0	-3.0 (2)	—	—	91.2~93.7L	92.1 (4)	23
		C	5	5	-11.2	-11.2	—	—	108.1L	108.1	24
			7	5	-12.1	-12.1	—	—	119.2L	119.2	25
			6	5	-11.9	-11.9	—	—	110.6L	110.6	26

* 产状: HF = 愈合裂隙; RD = 无序分布; GZ = 生长带; I = 孤立产出; C = 簇状分布; S = 离散分布. HF 和 GZ 属 FIA, 其余为非 FIA.

** V/T = 气相所占百分比. 均一温度栏: L = 均一到液相, V = 均一到气相. 平均值栏: 括弧内为实测包裹体数

对于测温数据的列表表达,建议将每个 FIA 的变化范围及平均值都列出(如表 1 中的例 1-4 和例 9-11)。FIA 内数据的变化范围可以反映数据的一致程度,而平均值则可用于整个样品的统计。

一般来说,均一温度比融化温度(如冰的融化温度)容易测。因此,对于某个 FIA 内的包裹体,均一温度尽可能全测,并用以检验数据的一致性,但融化温度不一定都测。这样,对于一个 FIA,往往均一温度测数比融化温度测数多(如表 1 中的例 9-11)。

如果 FIA 中的所有包裹体都是单液相包裹体(如图 3A),说明这些包裹体属于均一捕获且无显著捕获后变

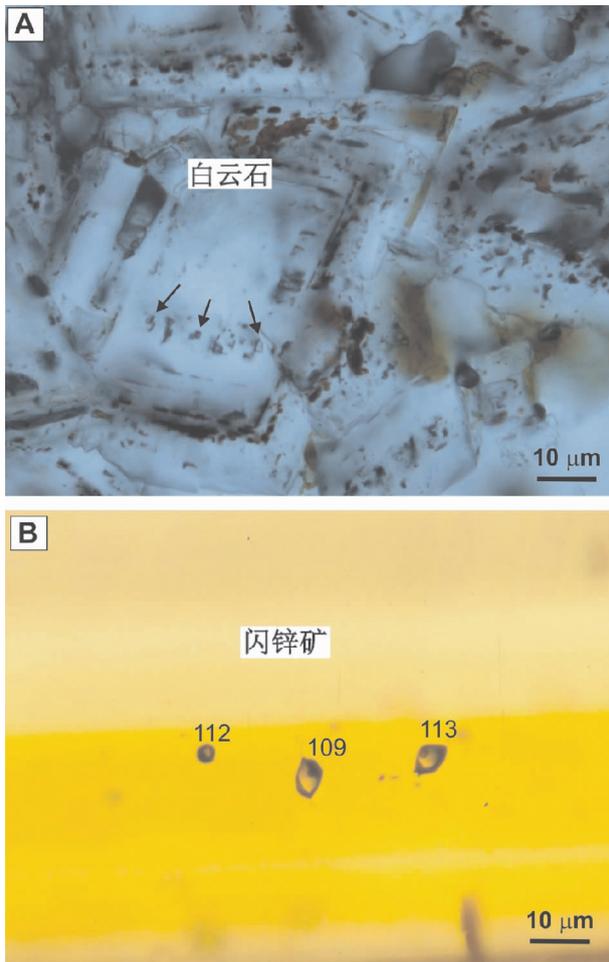


图 3 A)-白云石晶体中沿生长带分布的单液相包裹体(箭头指示);B)-闪锌矿生长带中的包裹体。注意包裹体的均一温度变化范围很小

Fig. 3 A)-Fluid inclusions distributed along growth zones in dolomite crystals. All the inclusions in the growth zone pointed by the arrows are liquid-only; B)-Fluid inclusions in a growth zone in a sphalerite crystal. Note the small range of homogenization temperatures indicated by the numbers beside the inclusions

化。单液相包裹体中没有气泡属于准稳定现象,一般指示较低的捕获温度(Roedder, 1984)。如果将样品置于冰柜中数天,可能气泡会出来,这样就可以测均一温度。如果这个过程没有产生人为拉伸,则均一温度应比较一致,数据可靠。如果均一温度变化范围较大,说明包裹体可能经历了拉伸。在很多情况下,即使将样品放在冰柜中几个星期,也没有气泡产生。这时均一温度是无法测的,但冰的融化温度还是可以测。方法是将样品加热到 200℃ 以上,人为拉伸包裹体使之在回到室温时产生气泡。这样在进一步冷却样品时就可以测冰的融化温度了。对于这类包裹体的数据表达,在均一温度一栏可填“单液相”(如表 1 例 15-17)。

如果 FIA 内包裹体的测温数据很不一致,且被解释为是卡脖子或拉伸所致,那这些测温数据是无效的,不能用于数据汇总或统计。如果有证据指示 FIA 内包裹体测温数据不一致是非均一捕获所致(如富液和富气包裹体共生),并且端元包裹体(富液包裹体或富气包裹体)测温数据很集中,那么这些端元测温数据(一般是最低值)还是有效的,只是那些高的测温值(非均一捕获所致)不能用。例如,图 4 显示油包裹体和气包裹体共存于同一愈合裂隙中,属于一个 FIA,说明包裹体捕获时裂隙内共存有不混溶的油和气。尽管有些包裹体的气/液比变化很大,反映了非均一捕获,但是大部分油包裹体的气/液比变化很小,均一温度落在很窄的

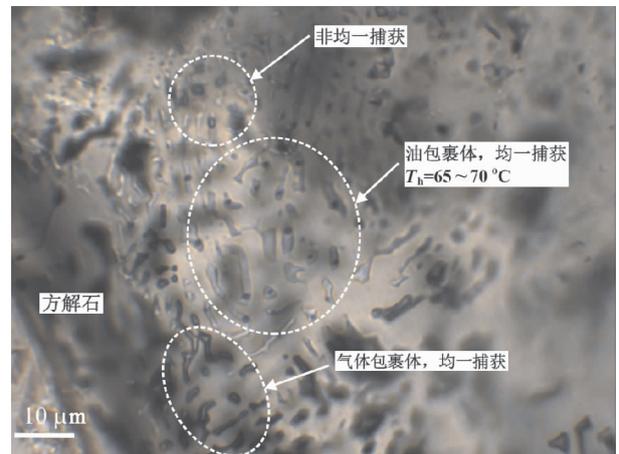


图 4 油和气包裹体共生于方解石同一微裂隙中

注意气包裹体不含油,大部分油包裹体具有相似的气/液比及均一温度(65~70℃),说明油和气是分别被均一捕获的。少数油包裹体的气/液比变化较大,属于非均一捕获

Fig. 4 Oil and gas inclusions co-existing in a microfracture in calcite

Note the gas inclusions do not contain oil, and most oil inclusions show similar vapor/liquid ratios and their homogenization temperatures fall in a small range (65 to 70℃), indicating homogeneous trapping of oil and gas separately. Some oil inclusions show relatively large vapor/liquid ratios and are the results of heterogeneous trapping

范围内 (65 ~ 70°C)。这些均一温度是有效的,其平均值代表了包裹体的捕获温度。因为气包裹体的存在 (图 4 下方),说明油和气是饱和的,所以油包裹体的均一温度等于捕获温度。

FIA 内包裹体测温数据不一致的一个特殊例子是单液相包裹体和气液两相包裹体的共生。这种情况在浅成环境下形成的方解石中比较常见。气液两相包裹体可能是拉伸的结果,也可能反映了非均一捕获 (如饱气带中水和空气同时被捕获)。这些气液两相包裹体的均一温度变化较大,是无效的。在数据列表中,均一温度的变化范围可以列出来,但是在“均值”一栏应填上“单液相”而不是气液两相包裹体均一温度的平均值 (表 1 例 18-19)。但是应该注意,如果出现单液相包裹体和气液两相包裹体共生,而气液两相包裹体的均一温度又很一致,这些均一温度很可能是有效的,那些单液相包裹体之所以没有气泡可能是准稳定所致 (Roedder, 1984)。

4 非 FIA 包裹体及数据表达

在很多情况下,一组包裹体是否同时捕获很难根据岩相学关系来断定。这时 FIA 方法不能严格地被用来检验数据的有效性:如果一组包裹体的测温数据超出了某些变化范围 (如水溶液包裹体的均一温度变化超过 10 ~ 15°C),我们不能就此断定数据无效。但是,FIA 概念还是能对测温数据的有效性提供一定的制约的。因为,相邻包裹体,即使不是同时被捕获,其测温数据不应有太大的不同。如果我们看到相邻包裹体给出很不一样的测温数据,就应该考虑卡脖子、非均一捕获、拉伸及不同期次包裹体叠加的可能性。下面讨论几种常见的非 FIA 包裹体产状和数据解释及表达方法。

4.1 孤立包裹体

孤立包裹体在一个矿物晶体中单独产出或远离其它包裹体 (图 5)。这种包裹体深受包裹体研究者喜爱,因为它们除沿生长带分布的包裹体以外最可能是原生的包裹体。但是,这种包裹体也是最难检验其数据有效性的。从 FIA 的定义可以看出,FIA 必须是一组包裹体,因此孤立包裹体不属于 FIA。通常如果某个孤立包裹体的均一温度特别高,明显不同于同一样品中的大部分数据,这个包裹体遭受捕获后破坏或代表非均一捕获的可能性是很大的。这时应在同一样品继续寻找是否有 FIA 可用来肯定这么高的均一温度是有效的。一般来说,每个孤立包裹体的测温数据都要列入数据汇总及统计中 (表 1 例 12-14)。

4.2 无序分布的包裹体

无序分布的包裹体可以是矿物结晶过程中被捕获的 (原生包裹体),也可以是受多期次、不规则、密集分布的裂隙

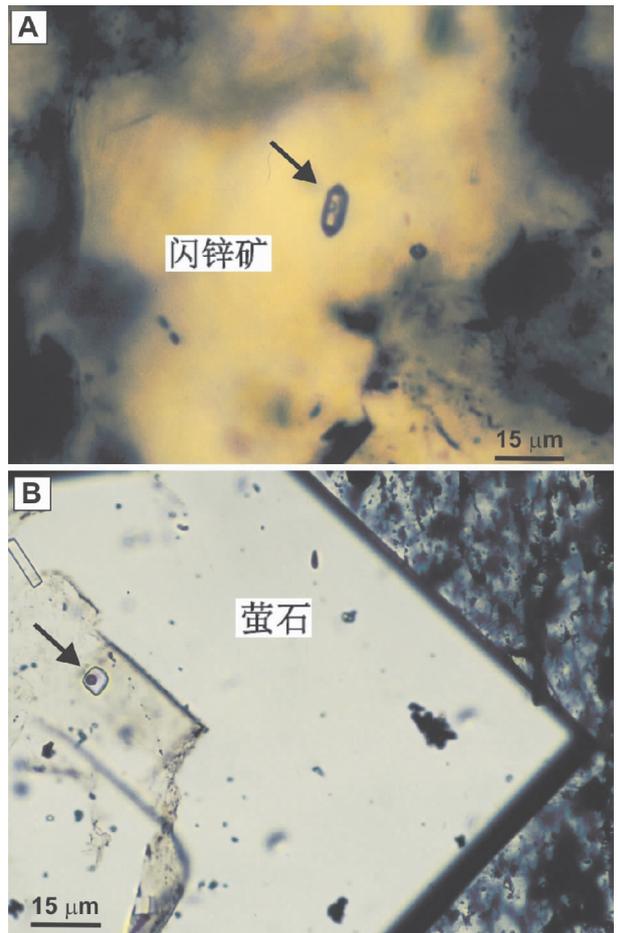


图 5 闪锌矿 (A) 及萤石 (B) 中的孤立包裹体

Fig. 5 Isolated fluid inclusions (pointed by arrows) in sphalerite (A) and fluorite (B)

控制的 (次生包裹体)。第二种情况有时可以通过无序分布包裹体与明显受微裂隙控制的包裹体的过渡关系看出来。不论哪种情况,这些密集分布的包裹体 (如图 2A, 5 区) 不能被统归为一个 FIA。有些无序分布的包裹体可能属于沿水平裂隙分布的 FIA,这时只要微调显微镜的焦距,就可以将它们识别出来。在大多数情况下,对于密集无序分布的包裹体,很难客观地建立 FIA,因此测温数据的有效性也不能严格按 FIA 方法来判断。但是,如果发现测温数据在一个小区域内有很大的变化,暗示有些包裹体可能被破坏了或捕获了非均一流体。如果测温数据的变化中等 (如图 2B),我们不能像对 FIA 那样就认为这些数据是无效的。最好的方法是将所有包裹体的测温数据都标在照片上,即“包裹体填图”,然后看看测温数据有什么变化规律,是否与晶体生长方向有关。如果没有证据指示非均一捕获或捕获后变化,无序分布的各个包裹体的测温值 (而不是一组包裹体的平均值) 都应列入数据表 (表 1 例 6-8) 或统计图。但是,应避免数据点过分集中在一个小区域,以免数据失去代表性。

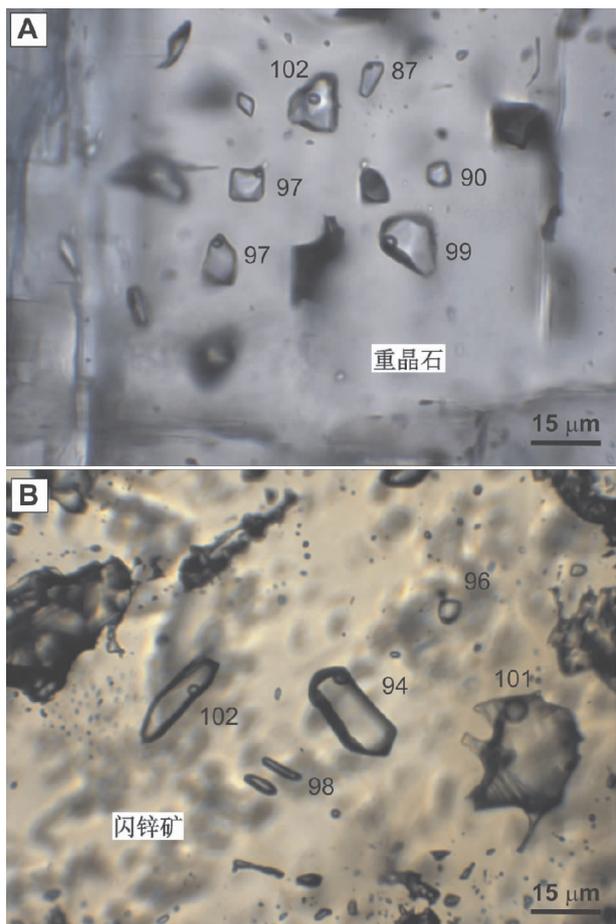


图6 重晶石 (A) 及闪锌矿 (B) 中的离散包裹体
注意包裹体的均一温度变化范围很小

Fig. 6 Scattered fluid inclusions in barite (A) and sphalerite (B)

Note the small ranges of homogenization temperatures indicated by the numbers beside the inclusions

4.3 离散分布包裹体

在很多情况下包裹体是很分散地分布在矿物晶体中(图6),看不出与晶体生长或显微裂隙有什么关系。这与上述无序分布包裹体相似,只是分布密度低。测温数据的有效性检验及数据表达也与无序包裹体是一样的(表1例20-21)。图6A显示重晶石中离散包裹体的均一温度很相似,因此尽管重晶石是比较容易被拉伸的矿物,这些测温结果还是可靠的。图6B闪锌矿中离散包裹体的均一温度也很一致,说明数据是有效的。

4.4 簇状分布包裹体

簇状分布的包裹体聚集在一个小区域内,与其它包裹体隔开较远(图7)。有些簇状分布的包裹体可能是原生的

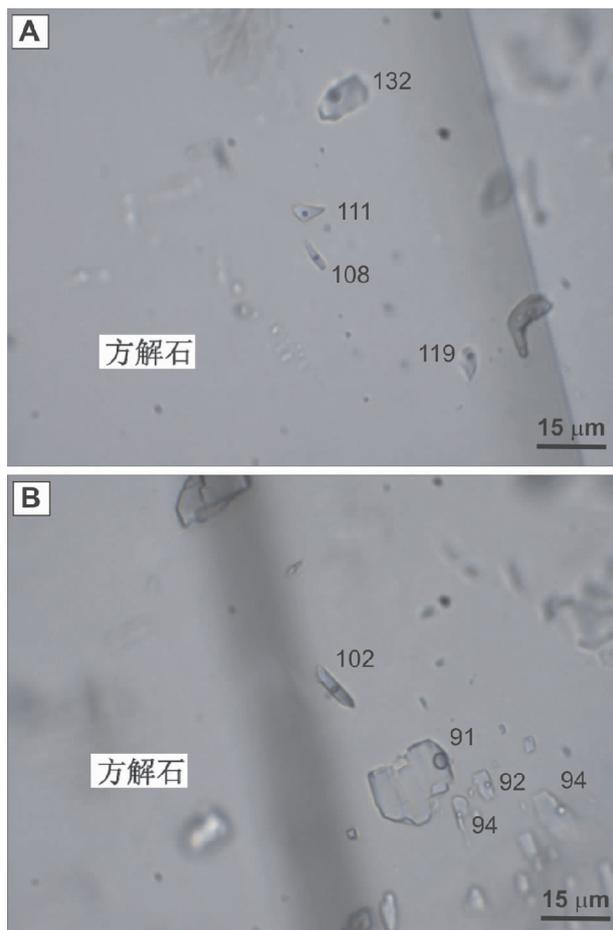


图7 方解石中的簇状分布包裹体,显示相似的均一温度
图A-可能是原生包裹体;图B-可能是受一条短微裂隙控制的假次生包裹体

Fig. 7 Clusters of fluid inclusions in calcite showing small ranges of homogenization temperatures indicated by the numbers beside the inclusions

The inclusions in A are probably primary, and those in B are likely pseudosecondary inclusions controlled by a short microfracture

(类似于孤立包裹体),有些可能是次生的。与孤立包裹体不同的是,簇状分布的包裹体的测温数据还是可以有一定制约的。如果一簇包裹体是原生的,那它们很可能不属于严格意义上的FIA,而如果是次生或假次生的,即受微裂隙(不一定很明显)或交叉裂隙控制,那它们还是符合FIA定义的。不论哪种情况,如果簇内的测温数据很一致(如图7),说明这些数据是可靠的。如果簇内的测温数据很不一致,则可能反映了非均一捕获或捕获后变化。在数据表达方面,如果推测包裹体簇是次生或假次生的(如图7B),建议列出数据的变化范围及平均值(表1例22-23),就像对FIA那样。如果包裹体簇是原生的(如图7A),可把单个包裹体的数据列入表格(表1例24-26)或统计。

簇状产出对单液相包裹体的解释也有制约作用。如果

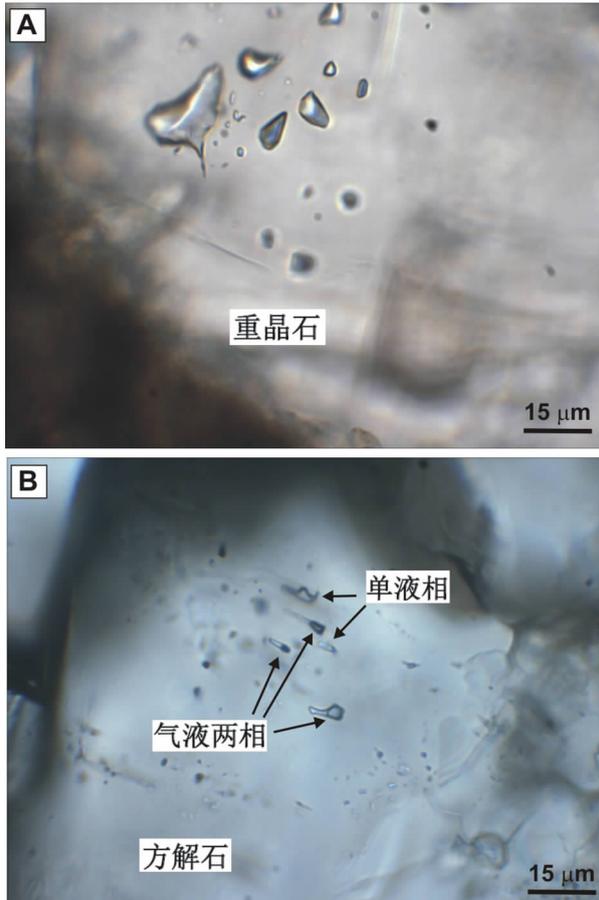


图8 A)-重晶石中的簇状单液相包裹体; B)-方解石中簇状单液相和气液两相包裹体共生

Fig. 8 A)-A cluster of liquid-only inclusions in barite; B)-A cluster of co-existing liquid-only and vapor + liquid inclusions in calcite

一簇内的包裹体都是单液相的(图8A),那么这些包裹体很可能形成于较低温环境,且未受捕获后拉伸。如果单液相包裹体与气液两相包裹体共生于同一簇内,且气/液比变化很大(图8B),很可能指示非均一捕获,如形成于饱气带。

5 讨论和结论

在FIA概念提出之前,流体包裹体研究基本上是从统计学角度出发、对单个包裹体进行研究。通常是把包裹体分成原生和次生两类,再对各类包裹体的测温数据进行统计。数据表达通常以直方图方式:每个包裹体就是一个数据点。这种数据处理方式有两个问题:一是数据有效性难以检验,二是数据的代表性可能偏向某些测数多的包裹体群体。经常可以看到一些论文报导流体包裹体的均一温度从多少到多少,如80°C到400°C,而没有提供更详细的资料。由于没有用FIA方法评价数据的有效性,这么大的温度变化范围很

难确定是真正反映了矿物形成的温度变化,还是由于有些包裹体被拉伸了。另外还经常看到一些诸如“均一温度直方图上的两个峰反映了矿床形成过程经历了两次热液事件”的表述。如果没有用FIA方法处理数据,这种推断有可能是错误的,因为有些数据峰可能人为造成的(如大量测试数据来自某个或某几个群体)。

用FIA方法检验数据有效性是在数据收集过程中进行的,而不是在数据的最后整理阶段。如果同一FIA内的测温数据很不一致,这些数据当时就应剔除,不要等到最后统计(如做直方图)时才来讨论它是不是有效。另一方面,如果同一FIA内包裹体数据一致,应取其平均值作统计。如果我们测试了10个FIA,每个FIA含10个包裹体,那么最后用于统计的是10个数据,而不是100个。这么做可能会显得数据很少,但是它反映了真实的数据分布。

如果FIA内的均一温度不一致,就要考虑各种可能性:卡脖子、拉伸、非均一捕获。但是不能忘了另外一种可能性,即FIA没定对或分得不够细。一般来说,孤立、离散、无序分布及簇状分布的包裹体不能定为FIA。对于这些包裹体,中等程度的数据变化是可以接受的,但很大的变化就要引起注意,很可能说明非均一捕获、捕获后变化或不同期次包裹体迭加。

流体包裹体组合的概念对于解决某些重要的地质问题起很大的作用。例如,有些世界级的造山型金矿床(如加纳的Ashanti金矿带及加拿大的Campbell-Red Lake矿床)的流体包裹体中碳质包裹体占绝大多数(Schmidt Mumm *et al.*, 1997; Chi *et al.*, 2006a)。这些碳质包裹体的成因还未被很好地理解。有人认为它们是原来的水溶液-碳质包裹体因失水而形成的(Bakker and Jansen, 1994)。用FIA方法对碳质包裹体的均一温度进行详细研究后,发现同一FIA内的均一温度很一致,且没看到碳质包裹体与不同碳质/水溶液比值的水溶液-碳质包裹体共生。如果碳质包裹体真的是原来的水溶液-碳质包裹体因失水而形成,那么应该可以看到不同类型包裹体共生的现象。因此,碳质包裹体被认为代表了金的成矿流体(Chi *et al.*, 2006a)。这对于认识二氧化碳与金的成矿关系是很有意义的。

在其它一些情况下,FIA方法的应用会判定有些测温数据无效,否则根据这些数据会得出一些错误的结论。例如,石油包裹体曾被试图用来研究加西盆地(Western Canada Sedimentary Basin)——世界上最大的油砂资源的生物降解的温度条件(Chi *et al.*, 2006b)。油砂的生物降解原来被认为主要是来自地表的雨水带来的需氧细菌造成的,现在一般认为与储油层继承而来的厌氧细菌有关(Head *et al.*, 2003)。这些细菌可以忍受到80°C的温度,所以如果储油层曾经经历超过这个温度的灭菌作用,石油就不会被降解了(Head *et al.*, 2003)。初步的研究表明,油砂中石油包裹体的均一温度变化很大,大部分超过80°C(Chi *et al.*, 2006b)。如果这些结果未加检验就认为是有效的,就可能得出厌氧细

菌可以成活到超过 80°C 的结论。但是,通过 FIA 方法分析,推测捕获后变化(与油包裹体包得不严密有关)及非均一捕获可能是造成均一温度高的主要原因(Chi *et al.*, 2006b)。这个例子说明,如果不用 FIA 方法,有时可能会得出错误结论。

总之,流体包裹体组合的方法是一种可用来判断包裹体研究的基本假设(即均一捕获及等容体系)是否成立的实用方法。这种方法除了可以用来检验测温数据是否有效外,还可避免数据的人为偏向。一个 FIA 是指在岩相学上可以证明属于同时捕获的(如同一生长带或愈合裂隙)一组包裹体。如果 FIA 内的测温数据变化小于某一可以接受的范围,数据就被认为是可靠的,其平均值用来代表该 FIA 并用于数据汇总及统计。如果 FIA 内的测温数据变化超过了可以接受的范围,数据就被认为是无效的,不能用于汇总和统计。如果包裹体不能归为 FIA(如孤立、离散、无序及簇状分布),那么就不能用 FIA 方法严格地检验数据的可靠性,但是如果相邻包裹体的测温数据相差太大,还是可以认为数据有问题,可能反映了非均一捕获、捕获后变化或多期次包裹体叠加。

致谢 本研究得到了 NSERC, Saskatchewan Energy and Resources, Geological Survey of Canada 和国家自然科学基金(40772061)以及中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR0740)资助,特此致谢。

References

Bakker RJ and Jansen JBH. 1994. A mechanism for preferential H₂O leakage from fluid inclusion in quartz, based on TEM observations. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 7–20

- Bodnar RJ. 2003a. Introduction to fluid inclusions. In: Samson I, Anderson A and Marshall D (eds.). *Fluid Inclusions-Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 32: 1–8
- Bodnar RJ. 2003b. Reequilibration of fluid inclusions. In: Samson I, Anderson A and Marshall D (eds.). *Fluid Inclusions- Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 32: 213–231
- Chi G, Dube B, Williamson K and Williams-Jones AE. 2006a. Formation of the Campbell-Red Lake gold deposit by H₂O-poor, CO₂-dominated fluids. *Mineralium Deposita*, 40: 726–741
- Chi G, Lai J, Tong A and Pedersen PK. 2006b. Potential use of petroleum inclusions in the study of hydrocarbon degradation in oil sands and heavy oils in the Western Canada Sedimentary Basin – examples from western Saskatchewan. In: Gilbois CF and Whittaker SG (eds.). *Saskatchewan and Northern Plains Oil and Gas Symposium*. Saskatchewan Geological Society Special Publication, 19: 270–280
- Fonarev VI, Touret JLR and Kotelnikova ZA. 1998. Fluid inclusions in rocks from the Central Kola granulite area (Baltic Shield). *European Journal of Mineralogy*, 10: 1181–1200
- Goldstein RH. 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. In: Samson I, Anderson A and Marshall D (eds.). *Fluid Inclusions – Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 32: 9–53
- Goldstein RH and Reynolds TJ. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM Short Course*, 31: 199
- Head IM, Jones DM and Larter SR. 2003. Biological activity in the deep subsurface and the origin of heavy oil. *Nature*, 426: 344–352
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 12: 644
- Schmidt Mumm A, Oberthür T, Vetter U and Blenkinsop TG. 1997. High CO₂ content of fluid inclusions in gold mineralizations in the Ashanti Belt, Ghana: A new category of ore forming fluids? *Mineralium Deposita*, 32: 107–118
- Touret JLR. 2001. Fluids in metamorphic rocks. *Lithos*, 55: 1–25
- Van den Kerkhof AM and Hein UF. 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55: 27–47