

⑥385-392

第46卷 第4期  
2000年7月地质论评  
GEOLOGICAL REVIEWVol. 46 No. 4  
July 2000

## 流体包裹体研究的进展和方向

卢焕章 郭述江

魁北克大学地球科学系, 加拿大希库蒂

P57

**内容提要** 国外近十年来,在流体包裹体研究方面取得很大进展,除了在地质年会上有许多成果报道之外,专业会议更是每年召开一次(指北美流体包裹体会议和欧洲流体包裹体会议),报道了大量最新的有关包裹体的研究成果。本文将从4个方面评述国外近年来流体包裹体的研究进展:即人工流体包裹体及  $P$ - $T$ - $V$ - $X$  属性;流体包裹体的成分分析和年代学;流体包裹体在金矿及其他矿床研究中的应用和利用流体包裹体寻找石油。

**关键词** 流体包裹体 研究进展 研究方向

矿物

流体包裹体的研究最早可追溯到19世纪中叶的1858年。矿物生长过程中所圈闭的流体保存了当时地质环境的各种地质地球化学信息(如  $P$ ,  $T$ , pH,  $X$ , 盐度等)。包裹体中的物质成分是探索、了解相关地质过程(如成矿作用机制,流体运移通道、流体迁移过程中的演化等)的密码。流体包裹体研究的主要目的之一,即是通过包裹体中的古流体进行定性的及定量的分析,并将所获得的各种数据、信息来解释研究地壳及地幔中的各种地质作用过程。流体包裹体的分析已广泛应用于矿床学、构造地质学、壳幔演化、地壳尺度上的流体迁移、石油勘探以及岩浆岩系统的演化过程等地学领域。流体包裹体的分析研究是目前地球科学研究中最活跃的领域之一(卢焕章等,1990)。

1 人工流体包裹体及  $P$ - $T$ - $V$ - $X$  属性

大量的地质现象及实验数据表明,含有水、气体以及溶解电解质的流体在大多数的岩浆岩、变质岩及沉积岩和热液矿床的形成演化过程中起了非常重要的作用。流体中挥发组分相的成分及性质对流体体系中矿物的溶解、物质的迁移及矿物的沉淀则有着极大的影响。而对于绝大多数地质作用过程中普遍存在的水/岩反应的定量性理解则取决于对矿物与水溶液间化学反应平衡常数的了解,以及流体本身在相关的地质作用温度、压力和化学成分条件下的物理性质。在许多流体系统中,人们最感兴趣的是在什么条件下单相(混溶的)流体变成不稳定并分成一种两相(不混溶的)流体。所以对于流体的  $P$ - $T$ - $V$ - $X$  属性和相图的了解是十分重要的。

正因如此,近几十年来,基于人工流体包裹体的  $H_2O$ - $CO_2$  或  $H_2O$ - $NaCl$  二元体系的不混溶性研究一直是地质学家们探索热液系统、造山带和岩浆岩系统中的流体地质作用过程的重要方法之一,而且更复杂的三元体系(如  $NaCl$ - $H_2O$ - $CO_2$ )亦是这些年来的重点研究对象之一。前人曾通过人工包裹体的方法研究了三元体系( $H_2O$ - $NaCl$ - $CO_2$ )中流体成分对流体不混溶性的影响,他们认为富水—盐相和富二氧化碳相间密度的差异可能导致它们之间的活性差异及空

本文1999年8月收到,2000年2月改回,刘淑春编辑。

间分离。两相间酸度、盐度及挥发份的分配很可能会影响矿物组合与流体成分,但与混溶相的流体明显不同。

近年来,高温高压下的人工流体包裹体的研究一直占有主导地位,如 Gibert 等(1997)研究了在 500~700 MPa 和 900℃ 条件下,  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$  体系的不混溶性;Thiery 等(1997)研究了 100~700℃ 范围内高压条件下挥发份—流体间的平衡;Schmidt 等(1995)确定了在三元体系  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$  中沿 40%NaCl 的假二元体系成分中溶离线和等溶线的空间位置;Pettke 等(1995a,1995b)则利用人工流体包裹体中各种成分可事先控制的特征,对比分析了包裹体中流体的不同提取方法的优缺点及流体成分分析过程中的各种可能影响因素。

尽管各种文献中有关热液系统的  $P-T-V-X$  数据十分丰富,但由于这些数据的表达形式各种各样,使得这些数据中的绝大部分很难用来解释流体包裹体的特征(Roedder et al., 1997)。最近,有人尝试使用数学的方法对从流体包裹体中所获得的信息进行处理,以使流体包裹体中的各种地质信息的应用象利用拉曼光谱对包裹体进行分析那样方便快捷(Bodnar et al., 1994)。而且许多有关温压持续升高条件下流体  $P-T-V-X$  属性的实验和理论数据现在可用状态方程(EOS)的形式来表达,这种表达方式对数据进行外推和内插。而 Brown 等(1994)则将这些状态方程收入其编写的 MacFlinCor 程序中,该程序特点之一,即是其可对从流体包裹体中获得的数据进行简化处理和解释,从而可使使用者在用不同的状态方程所推测的同一包裹体数据进行温压条件的对比。

## 2 流体包裹体的成分分析

流体包裹体研究的基本任务之一,即是尽可能地提供准确详细的有关古流体组成的物理化学信息,以便于建立古流体作用过程的地球化学模型。到目前为止,已有多种方法和仪器设备用于流体包裹体的成分分析,Roedder 等(1997)曾对这些方法和技术进行过较系统的归纳和总结。流体成分分析中无论采用那种分析方法,包裹体中流体的获取不外乎两种途径:即压碎或爆裂—萃取(全样)法和单个流体包裹体的流体直接提取法。由于大多数矿物中流体包裹体的体积非常细小(大多数小于 50  $\mu\text{m}$ ),因此,这两种流体提取方法在应用过程中各有其优缺点:①压碎或爆裂—萃取法,因所得样品相对较大,故其可在同一分析流程中进行多元素分析,且大多数的分析仪器可以达到流体中检测元素的检出限。该方法缺点是样品分析结果的代表性相对较差,因为同一样品中的流体包裹体通常是由多个世代的包裹体所组成,而不同世代的包裹体成分有很大差别。因此,同一样品中多个世代包裹体的存在使得全样分析法复杂化,并增加了解释结果的不确定性。克服办法之一,即是尽可能减小样品的体积,同时尽可能选取代表性好的、且只含有一个世代包裹体的样品。尽管如此,样品中多世代的流体包裹体群的存在却能给我们提供一个洞察不同时期流体活动变化及演化的绝好机会。②单个流体包裹体中流体的直接提取法,其最大优势是可以很好地进行样品控制,结合显微镜下观察,可以准确地分析任何想要分析的包裹体,而且其所代表的地质信息是确定的或是唯一的。该方法的缺点是由于单个包裹体的体积有限,因而每次所能检测的元素亦有限,但这点可以从该方法的快速分析和准确的样品控制得到补偿。

在近些年发展的分析方法或仪器当中大部分是针对流体中的溶质为分析对象的,但近来,流体包裹体中气体成分的分析研究亦同样得到了飞速发展,尤其是包裹体中的稀有(惰性)气体(王莉娟,1998)。包裹体流体中稀有气体的含量极其微弱,因此稀有气体的分析大多依赖于

分析样品的全样通过压碎或热爆裂方法提取其中的有效成分。事实上,流体中挥发组份的性质是了解流体中溶质迁移和沉淀机制的关键。

通过压碎或热爆裂方法提取的流体,再用四极质谱仪(QMS)分析其中的气体成分是近年来较普遍的包裹体流体气体成分分析方法之一,该方法并且用于金矿的找矿勘探(Shepherd et al., 1991; Pettke et al., 1995a, 1995b)。Graney 等(1993)讨论并对比了通过压碎法和热爆裂法从流体包裹体小样(小于 20 mg)中提取的微量流体(小于 1 mg)的四极质谱仪分析过程中的可能影响因素,他们发现对如此小的样品的气体定量分析及鉴别的主要影响因素有 6 种:①气体分子在四极质谱源中的分离;②检测系统对水和气体的相对灵敏度;③从包裹体中释放气体的方法;④分析系统样品通道及流体(气体)释放过程中新形成矿物表面对气体的吸附;⑤流体释放过程中(因化学反应而产生的)新气体的形成;⑥样品中其他源的气体的释放和混入。为了进一步探讨包裹体流体释放过程中各种可能的物理化学过程,Norman 等(1994)对此进行了大量的实验分析研究,发现在对样品用热爆裂法释放流体(气体)过程中,当温度上升到几百度时包裹体中的  $H_2O$  和  $CH_4$  会发生反应形成  $CO$  和  $H_2$ ,同时当包裹体中的黄铜矿矿物被分解时会释放出  $H_2S$ 。

一般认为,流体包裹体的压碎—萃取法由于样品容器与样品的机械研磨作用会使样品的污染程度升高,而热爆裂法则被认为样品的提取所受污染要低,但样品的提取效率也低,因为样品深部的包裹体有时很难用热爆裂法打开。Pettke 等(1995a, 1995b)评价了压碎法和热爆裂法对包裹体流体中 Rb-Sr 同位素分析结果的影响。他们认为压碎法是到目前为止最简便、对分析结果影响最小的一种方法;而利用石英玻璃管进行热爆裂(这是最常使用的一种方法)则可能会产生重复性好、但却是不准确的结果。他们发现当温度超过  $800^\circ C$  时 Rb 很易于吸附在玻璃的表面(如石英玻璃管的内表面及其寄主矿物如石英的表面),而当提取温度低于  $400^\circ C$  时,这种吸附作用不明显。同时,他们还发现用酸化后掺有  $La^{3+}$  的萃取溶液可有效地提取压碎石英中包裹体流体中的 Sr 和 Rb,萃取率可达 99.7%,并能得到真正的 Rb/Sr 值。而用纯水作萃取液时,其萃取率只有 93%,由于不能有效提取被吸附在那些物质表面上的 Sr 和 Rb,故 Rb/Sr 值要比真实值偏高。

随着新技术的发展,单个包裹体流体的成分定量分析近年来已广泛地应用于实践。由于这种方法可以不破坏样品,因此,同一样品可用于多次分析。更重要的是,借助于显微镜的观察和鉴定,包裹体中的相组成及包裹体类型可事先知道,因此,所获得的流体包裹体数据的地质解释是可靠的。表 1 归纳了分析流体包裹体成分的常用方法。

除了流体包裹体的成分分析之外,对流体包裹体中的稳定同位素,如  $\delta D$ 、 $\delta^{15}O_{H_2O}$ 、 $^{87}Sr/^{86}Sr$  等也是当前研究的热点。尤其是包裹体年代学的兴起(Rb-Sr、Ar-Ar 法),对于确定成矿的年代具有十分重要的意义。

### 3 流体包裹体在金矿及其他矿床研究中的应用

剪切带控制的金矿一直是过去十多年来矿床学界的研究热点,但该种类型金矿的成因机制却一直争论的焦点。包裹体的分析研究即是其中的最主要研究内容之一,包裹体中的流体成分不但可用来追溯当时的流体系统的演化,还可用来进行流体源的示踪(Changkakoti et al., 1988; Thomas et al., 1990; 陈柏林等, 1999; 卢焕章等, 1999),或者用来确定含矿流体系统的运移通道(Kesler, 1990; Ghazi et al., 1994a, 1994b);流体包裹体中的气体成分(如  $CO_2$ 、

CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S 等)则被用来评价成矿物质的沉淀效果及不同矿质的先后沉淀过程(Kesler, 1990)。流体包裹体的观测结果显示,含矿流体系统的不混溶(或相分离亦或沸腾)作用可能是脉状金矿的主要成矿作用机制之一。

表 1 流体包裹体成分分析的几种常用方法

Table 1 Some common methods to analysis composition of fluid inclusion

分析对象	分析方法	分析方法特点	取样方法
块样分析	感应耦合等离子质谱(ICP-MS)	检出限可达 10 <sup>-12</sup> 级,可用于流体中稀土元素的分析	压碎(或爆裂)——萃取
	四极质谱(QMS)	主要用于包裹体中稀有(惰性)气体的成分分析	
单个包裹体分析	付里叶变换红外分析(FTIR)	主要用于石油中包裹体的分析	单个包裹体的直接分析
	激光消融—感应耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)	普遍用于单个包裹体中微量—超微量元素的分析,对 Cu、Fe 及稀土元素等的检出限大约为 0.1 · 10 <sup>-6</sup> ,该方法的缺点是还无法消除多原子间的相互干扰(如 S 和 As 在 a. m. u. 32、34 和 75 处,由于原子间的干扰而无法区分)	
	扫描电子显微探针(SEM)	主要用于单个包裹体爆裂后,对包裹体中的固体矿物进行定性或半定量分析	
	质子探针(PIXE 或 PIGE)	随射线诱发模式之不同可有 PIXE(即质子诱发的 X-射线)和 PIGE(即质子诱发的 gamma 射线)。PIXE 方法对较重一些的元素分析最有效,而 PIGE 方法则仅对那些原子核能进行 p, r 或 p, a, r 蜕变的元素分析效果较好,如 Li、F、Na、B 等,该方法的关键是包裹体的深度必须准确测定	
	同步电子加速器 X-射线荧光分析(SXRF)	用于分析单个包裹体中的金属离子(如 Cu、Zn、K、Ca、Fe、Mn、Mo、Pb)及阴离子(如 Cl、Br、S)和气体(如 CO <sub>2</sub> 等),分析误差主要源于包裹体体积估算误差,因此,大而规则的靠近表面的包裹体可提供可靠的分析结果	
	激光拉曼光谱(LRS)	可用于分析流体中的多相组分(如气体 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> ),甚至包裹体中的子矿物等	
	激光显微探针稀有气体质谱(LMNGS)	除了可分析包裹体中的稀有气体(特别是 Ar、Kr、Xe)外,还可对 Cl、K、Ca、Br、Se、I、Ba、Te 及 U 等元素进行定量分析	
	离子探针(Ion prob)	该方法亦称 SIMS(即二次离子质谱)或 SHRIMP(超清晰离子显微探针),可用于包裹体流体中的 C、N、F、Cl,尤其是 H 和 H <sub>2</sub> O 的分析	

包裹体流体的对比地球化学研究已广泛应用于含矿与非含矿热液系统的甄别。Holland 等(1988)指出含金矿床中的  $\delta^{18}\text{O}$  值位于 3‰~20‰,而非含矿系统的  $\delta^{18}\text{O}$  值则变化于 3‰~11‰ 区间。他们认为至少在含矿热液系统中的一部分流体相对富含  $\delta^{18}\text{O}$ ,这一特征亦暗示含矿流体相对活动性强,而能更有效地提取金等成矿物质。Sherlock 等(1993)发现含金与非含金石英脉中的 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 包裹体在成分、均一温度及 CO<sub>2</sub> 逸度等方面并无明显区别,其明显区别在于含金矿脉中流体的盐度高,而非含金矿脉的盐度则变化范围大。最重要、且可用于指导找矿勘探的根本性区别在于:非含金矿脉中,富 CO<sub>2</sub> 流体的初始融溶温度严格限于 -57.4~-56.4℃ 之间,且拉曼光谱显示其中只有单一的 CO<sub>2</sub> 气体存在;而在含金矿脉中,富 CO<sub>2</sub> 流体的初始融溶温度则限于 -62.5~-56℃ 之间,流体中气相除了 CO<sub>2</sub> 外,还有 H<sub>2</sub>S。他们进一步指出,非含矿富 CO<sub>2</sub> 流体包裹体中缺乏 H<sub>2</sub>S 表明流体当时处于氧化状态,而这种氧化状态程度太高不利于金以还原状态的络合物形式迁移。

Shepherd 等(1991)通过分析发现黑色页岩中的含金石英脉中的流体包裹体比非含金石英脉中的富含 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>。Smith 等(1985)则报道过含金矿脉比非含金矿脉中的流体包裹体相

对富含  $\text{CO}_2$ 。Burlinson(1991)则发现含金样品的爆裂温度曲线直方图中会出现一宽且低的爆裂峰(由于含  $\text{CO}_2$  成分所致),而非矿样品中则不会出现此峰,并认为该特征可用于指导找矿。笔者曾指出在加拿大太古宙金矿中, $\text{CO}_2$  的含量与金矿化直接相关。

大量的分析测试也表明,在同一矿床中成矿流体的温度、压力、盐度及成分是随着成矿作用的进行而演化的。另外,盐度、温度和成分的改变也是导致矿床沉淀的因素(李荫清等,1994)。

Xavier 等(1999)认为在巴西 FMP 金石英脉中富  $\text{CO}_2$  包裹体流体中多变的  $\text{CO}_2$  密度可被认为反映了两个成分不同的流体体系,这两个流体系统在剪切带内的金矿成矿作用过程中均相当活跃。

一般认为在  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{S}$  体系中,Au 主要以二硫化物络合物的形式迁移,但在富  $\text{CO}_2$  的流体体系中,硫代络合物或其他形式的配位体所起的作用则因缺少高温实验数据而不能作结论。从微观尺度来看,随着流体—围岩(如炭质)间的相互作用而导致的  $f_{\text{O}_2}$  和  $f_{\text{S}_2}$  降低,氧化还原反应使得金属矿物沉淀。流体—含铁硫化物界面间的物理及化学吸附过程可能进一步促进了 Au 的沉淀,尤其是在正在生长过程中的黄铁矿及砷黄铁矿的表面。另外,不能将砷黄铁矿裂隙中所常见到的自然金归结为晚期含金流体的活动,或硫化物在其重结晶阶段金被活化而重新沉淀的结果。尽管流体的沸腾(或相分离,亦或不混溶)作用可导致 pH 值的增高并由此诱发矿物的沉淀,但是,流体中气体成分(如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{HN}_3$ )的减少会造成流体的氧化。然而我们知道砷黄铁矿的沉淀是从还原性的流体中形成的,这种现象可以解释为:流体的沸腾过程导致了流体—围岩平衡被破坏,从而诱发流体与围岩中的铁镁矿物发生氧化还原反应,硫化物的表面吸附可能对早期金的沉淀起了一定作用。

含金石英脉中包裹体流体的放射性同位素研究结果表明,矿石都不同程度地比围岩要含有较多的放射性成因同位素成分,这些结果则意味着矿石的物质成分要比围岩的物质成分有更深的物质来源(Dahl et al., 1987;McNaughton et al., 1988)。流体包裹体中流体的 Rb/Sr、Sm/Nd 和  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素数据还可用来确定热流体事件的时序(Norman et al., 1983;Dai et al., 1990;Li et al., 1998)。此外,包裹体中的  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值常被用来作为流体迁移的示踪剂(Frei, 1995),流体中的 REE 数据则用来追溯流体源(Ghazi et al., 1993, 1994a, 1994b)。

除了剪切带型金矿外,与岩浆岩系统有关的流体包裹体研究亦十分活跃。Walshe 等(1997)的研究结果表明,一般地,岩浆岩系统的氧化程度相对较高(氧化还原条件在  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$  缓冲区附近,而非在  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  缓冲区)。但是,有相当数量的具有代表性的矿物组合(如黄铁矿、砷黄铁矿、磁黄铁矿)的与氧化的岩浆岩侵入体有时空关系的金矿是形成于还原性含矿流体系统(氧化还原条件位于黄铁矿/磁黄铁矿和  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  缓冲区附近),而非在氧化的含矿流体系统中(其氧化还原条件位于  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$  和赤铁矿/磁铁矿缓冲区附近)。其中之一的可能解释是该种矿床的形成是地壳深部富金的还原性流体与岩浆岩流体间相互作用的结果。此外,近年还发现金矿与一些还原性的 I 型花岗岩有关,如在 Alaska 内陆,北澳大利亚。金矿的这种以还原性的矿物组合为特征,同时既与氧化的又可与还原性的岩浆岩系统相关联的现象表明,在岩浆热液系统中氧化和还原性流体在超固相和亚固相阶段的相互作用的复杂性。

包裹体流体分析除了被用来追索流体来源及反演流体系统的演化,还可用来研究大规模热液系统中的流体分布特征。Thomas 等(1997)通过流体包裹体中的 Sr 同位素成分分析证实,

意大利阿尔卑斯(Alps)造山带中剪切带型金矿的流体源自于 10 km 以下的深部。Walshe 等(1997)认为在大规模的地壳流体系统中,流体系统的成分组成变化是有规律的:在地壳中部及某些岩浆岩系统内,流体以  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  系统为主;在下地壳流体系统中水的成分可能不占主导地位,它们当中可能以  $\text{CH}_4$  (还有  $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$ ) 为主,而非  $\text{CO}_2$  为主;在地壳中一下部的卤水系统中,富  $\text{CH}_4$  流体很可能与之共存。从地壳浅部到深部,流体的成分以相对氧化富  $\text{CO}_2$  的含水流体转变为深部的相对还原的以  $\text{N}_2\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{S}$  为主的流体。

#### 4 利用流体包裹体寻找石油——一种新的方法

流体包裹体研究的另一个进展是利用它来寻找石油和天然气。这种方法在开发北海油田、美国德克萨斯和密苏里的油田方面均获得很大的进展,所用的方法称做“流体包裹体地层分析”(Fluid Inclusion Stratigraphy),即在岩心中取样,对其进行流体包裹体的鉴定和分析。下面简述利用流体包裹体确定是否有石油的几种主要方法:

(1) 石油包裹体的聚焦扫描激光电镜分析法(CSLM) 利用这个方法可以得出油水包裹体中的石油的  $\text{C}_1$  到  $\text{C}_{20}$  以上的碳氢化合物和所含石油分子的特性。另外,可以了解石油的演化和成熟的程度以及在埋深过程中石油从含油地层中迁移出充填到储油层的过程;也可以得出石油的生物分解过程。换句话说,通过石油包裹体的研究可以得出石油在二次迁移和储存时其组成的变化。这些资料可以使石油地质学家确定在沉积盆地中石油运移的方向和年代,以及有关储油层充填的历史。

利用这个方法可以得出使用其他方法得不到的有关石油成因和迁移的资料,从而可以指导寻找石油。

(2) 利用流体包裹体(主要是含石油包裹体)指导寻找石油 美国许多铅锌矿床产在密西西比河流域,在研究这些矿床时发现其成矿流体中有许多石油,从而使石油地质学家在这些矿床的底部构造中找到了石油。

利用流体包裹体不同的类型来指导寻找石油最近有了新的发展。可以用来判断石油与天然气的存在,如笔者在对中国贵州万山一带沉积盆地中的岩石中流体包裹体研究时发现,石油包裹体中大部分是含  $\text{CH}_4$  的包裹体,未见含天然原油。因而最大可能是原油已变成天然气。最近加拿大某石油公司在圣劳伦斯河两岸及圣劳伦斯湾中的 Danticosti 岛上寻找石油。在对这些勘探岩心的流体包裹体研究时发现,在有些地方可见到含石油的包裹体,深井钻探证明有储油层;在有些地方,尤其是在圣劳伦斯河北岸则只见到含  $\text{CH}_4$  的包裹体,在其下面则含石油的几率很小,因为已经气化。

(3) 流体包裹体地层分析 美国的 FIT 公司对南密苏里盆地采用流体包裹体地层分析方法寻找石油。对一个深一万英尺的新打的井作了试验,结果表明,在从地面往下七千英尺到九千英尺的地方存在石油。

利用这个办法主要能解决:①碳氢化合物的迁移;②裂隙的封闭;③推测储油层的位置。具体的方法是把流体包裹体类型与其成分分析结合起来,采用四极质谱分析碳氢化合物,并且通过包裹体的参数确定古地质压力,通过古压力的测定得出过压区,同时建立起该流体的  $P\text{-}V\text{-}T$  性质,从而指导寻找石油。

#### 参 考 文 献

陈柏林,董法先,李中坚,1999. 韧性剪切带型金矿成矿模式. 地质论评,45(2),186~192.

- 李荫清. 1994. 吉林海沟金矿床成矿流体的地球化学特征. 地质学报, 68(1): 43~61.
- 卢焕章, 李秉伦等. 1990. 包裹体地球化学. 北京: 地质出版社.
- 卢焕章, Guy Arcambault, 李院生等. 1999. 山东玲珑—焦家地区形变类型与金矿的关系. 地质学报, 73(2): 174~188.
- 王莉娟. 1998. 流体包裹体成分分析研究. 地质论评, 44(5): 499~501.
- Bodnar R J, Vityk M O. 1994. Interpretation of microthermalmometric data for  $H_2O$ -NaCl fluid inclusions. In: De Vito B, Frezzotti M L, eds. Fluid Inclusions in Minerals. Methods and Applications, Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute, 117~130.
- Brown P E, Hagemann S G. 1994. MacFlinC: A computer program for fluid inclusion data. In: De Vito B, Frezzotti M L, eds. Fluid inclusions in materials. Methods and applications. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute, 231~250.
- Burlinson. 1991. Decrepitation in gold exploration: A case history from the Cotan prospect. N. T. J. Geochim, 42: 143~156.
- Changkakoti A, Gray J, Krstie D, et al. 1988. Determination of radiogenic isotope (Rb/Sr, Sm/Nd, and Pb/Pb) in fluid inclusion waters: An example from the Bluehell Pb-Zn deposit, British Columbia, Canada. Geochim. Cosmo. Acta, 52: 961~967.
- Dai T, Qiu H, Li Z, et al. 1990.  $^{40}Ar/^{39}Ar$  dating of fluid inclusions in quartz. 7<sup>th</sup> International Conference on Geochronology, Canberra, Australia. Geol. Soc. Austr. (Abstr.), 27: 23.
- Dahl N, McNaughton N J, Groves D I. 1987. A lead-isotope study of sulphides associated with gold mineralization in selected deposits from the Archean Eastern Goldfield of Western Australia. In: Ho S E, Groves D I, eds. Recent advances in understanding precambrian gold deposits. Geology department and University Extension, University of Western Australia Publication, 189~202.
- Frei R. 1995. Evolution of mineralizing fluid in the porphyry copper system of the Skouries deposit, northeast Chalkidiki (Greece): evidence from combined Pb-Sr and stable isotope data. Econ. Geol., 90: 746~762.
- Gibert F, Guillaume D, Laporte D. 1997. Experimental study of fluid immiscibility in  $H_2O$ -NaCl- $CO_2$  at 5~7 kb and 900°C using synthetic fluid inclusions. In: XIV ECROFI, European Current Research on Fluid Inclusions. Nancy, France, July, 1~4.
- Ghazi A M, Vanko D A, Roedder E, et al. 1993. Determination of rare earth elements in fluid inclusion by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS). Geochim. Cosm. Acta, 57: 4513~4516.
- Ghazi A M, Vanko D A, Ruiz J, et al. 1994a. Trace and rare element analysis in single fluid inclusions: an application of laser ablation ICP-MS. EQS, 75 (44): 695.
- Ghazi A M, Roedder E, Vanko D A. 1994b. Rare earth elements (REE) in fluid inclusions from the Butte Cu-Mo deposit: an application of flow injection ICP-MS. PACROFL pan American conference on research of fluid inclusions. V. Symposium Abstracts, Cuernavaca, Morelos, Mexico, May, 19~23.
- Graney J R, Kesler S E. 1995. Factors affecting gas analysis of inclusion fluid by quadrupole mass spectrometry. Geochim. Cosmochim. Acta, 59(19): 3977~3986.
- Holland P T, Beatty D W, Snow G G. 1988. Comparative elemental and oxygen isotope geochemistry of Jasperoid in the Northern Great Basin: Evidence for distinctive fluid evolution in gold-producing hydrothermal systems. Econ. Geol., 83: 1401~1423.
- Kesler S E. 1990. Nature and composition of mineralizing solutions. In: Robert F, et al., eds. Greenstone Gold and Crustal Evolution. Proceedings of a workshop.
- Li H Q, Xie C F, Chang H L, et al. 1998. Study on metallogenetic chronology of nonferrous and precious metallic ore deposits in north Xinjiang, China. Beijing: Geological publishing house.
- McNaughton N J, Laeter J R, Groves D I. 1988. Constrains on the source of strontium and alkalis in auriferous alteration zones at Hunt Mine, Kambalda, Norseman-Wiluna Belt. In: Ho S E, Groves D I, eds. Advances in understanding Precambrian Geology. Geology Department and University Extension, University of Western Australia, Publication, 12: 209.
- Norman D L, Landis G P. 1983. Source of mineralizing compositions in hydrothermal ore fluid as evidenced by  $^{87}Sr/^{86}Sr$  and stable isotope data from the pasto Buen deposit, Peru. Econ. Geol., 78: 451~465.
- Norman D I, Musgrave J A. 1994.  $N_2$ -Ar-He compositions in fluid inclusions, Indicators of fluid source. Geochim. Cosmochim. Acta, 58(3): 1119~1132.
- Pettke T, Diamond L W, Frei R. 1995a. He, Ar, U-Pb and Pb-Sr isotope systematics of fluid inclusions in quartz and associated vein minerals and native gold from epigenetic late Alpine Au-veins in NW Italy. Schweiz. Minerl. Petrogr. Mitt., 75: 308~309.
- Pettke T, Diamond L W. 1995b. Rb-Sr isotopic analysis of fluid inclusions in quartz: Evaluation of bulk extraction procedures and geochronometer systematics using synthetic fluid inclusions. Geochim. Cosmochim. Acta, 59(19): 4009.
- Roedder E, Bodnar R J. 1997. Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits. In: Hubert Lloyd Barnes, ed. Geochemistry of

- hydrothermal ore deposits. John Wiley & Sons Inc.
- Schmidt C, Rosso K M, Bodnar R I J. 1995. Synthetic fluid inclusions: XIII. experimental determination of the *PVT* properties in the system  $H_2O + 40wt\% NaCl + 5 mol\% CO_2$  at elevated temperature and pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 3953 ~ 3959.
- Shepherd T J, Bottrell S H, Miller M F. 1991. Fluid inclusion volatiles as an exploration guide to black shale-hosted gold deposits, Dolgellau gold belt, North Wales, UK. *J. Geochem. Explor.*, 42: 5 ~ 24.
- Sherlock R L, Towett E L, South B D, et al. 1993. Distinguishing barren and auriferous veins at Sigma. *Can. Jour. Earth Sci.*, 30: 5 ~ 24.
- Smith T J, Kesler S E. 1985. Relation of fluid inclusion geochemistry to wallrock alteration and lithogeochemical zonation at the Hollinger-McIntyre gold deposit, Timmins, Ontario, Canada. *Can. Inst. Min. Metall.*, 34: 35 ~ 94.
- Thiery R, Dubessy J. 1997. Modelling of high-pressure vapour-liquid equilibria in the  $H_2O$ -NaCl system from 100 °C to 700 °C based on the ion-dipole MSA model. In: XIV ECRÖFI, European Current Research on Fluid Inclusions. Nancy, France, July, 1 ~ 4.
- Thomas P, Diamond L W. 1997. Oligocene gold quartz veins at Brusson, NW Apls: Sr isotopes trace the source of ore-bearing fluid to over a 10 km depth. *Eco. Geol.*, 92(4): 389 ~ 406.
- Thomas A V, Spooner E T C. 1990. Distinguishing between Archaean fluids of different origins: an example using volatile analyses of fluid inclusions from the Tanco pegmatite, SE Manitoba. In: Robert F, et al., eds. *Greenstone Gold and Crustal Evolution. Proceedings of a workshop, Vol d'Or, Quebec, May*, 217.
- Walshe J, Netherway N, Hall G. 1997. The third dimension of hydrothermal system, reduced fluids and giant Au deposits. *Geodynamics & ore deposits, conference*, 12 ~ 21.
- Xavier R P, Robert P F. 1999. Fluid evolution and chemical controls in the Fazenda Maria Preta (FMP) gold deposit, Rio Itapicuru Greenstone Belt, Bahia, Brazil. *Chemical Geology*, 154: 133 ~ 154.

## Progress and Trends of Researches on Fluid Inclusions

Lu Huanzhang Guo Dijiang

*Science de la Terre, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec, G7H2B1, Canada*

### Abstract

With the development of new technology, methods and instruments for analysis of fluid inclusions in minerals have been rapidly renovated in recent decades. Information extracted from fluid inclusions has been widely used to interpret diverse geological processes, owing to the presentation of the fluids in inclusions, especially the primary inclusions, to the palaeo-geological environment. In this paper, the authors review the application of the *P-T-V-X* properties of fluid inclusions extracted by various analytical methods of gold deposits and discuss the application of various instruments and methods on the extraction and analysis of inclusion fluids as well as their advantages and disadvantages during their application. And finally a review of the interpretation approaches of fluid inclusion data is given.

**Key words:** fluid inclusion; progress of research; trends of research

### 作者简介

卢焕章,男,1940年生。1965年毕业于中国科学技术大学地球化学专业,现为加拿大魁北克大学地球科学系教授,博士生导师,主要从事地球化学方面的研究。E-mail: hzlu@uqac.quebec.ca。