

## 五、斑岩铜矿中的流体包裹体

### (一) 序言

旨在阐述斑岩型矿床—Bingham (Roedder, 1971) 和 Copper Canyon (Nash和Theodore, 1971) 的流体包裹体的两篇重要论文已发表有十多年了。自那时起, 大量的斑岩铜矿研究论文得以发表, 这些研究主要涉及流体包裹体的描述和分析, 主要作者有: Moore和Nash (1974), Chivas和Wilkins (1977), Wilson (1978), LeBel (1980) 以及下文所谈及的其他研究者。由于他们涉及到各种流体从岩浆阶段到热液阶段的演化过程, 这些研究结果令人感兴趣。另一方面, 斑岩体往往呈现宽广的包裹体变化范围, 解释起来很困难, 并且有时候并不确定。尽管具有这样的复杂性, 由下文所述的样品表明, 流体包裹体对于认识斑岩铜矿的成矿过程的贡献还是根本的。

### (二) 斑岩铜矿中的卤水包裹体

本节文章的目的并不是根据溶液的性质和演化过程来讨论如何解释斑岩中流体包裹体模式, 而是适当提出一些实例, 即在斑岩铜矿中普遍见到令人费解的具S型特征(卤水)的包裹体。虽然已经提出由一种硅酸盐熔融体中发生不混溶作用去解释这些高盐度流体的成因, 但是最普遍的解释是由一种中等盐度水溶液的不混溶作用(“沸腾”)造成了这种卤水(Roedder, 1971; Nash和Theodore, 1971; Denis, 1974; Moore和Nash, 1974; Poty和Weisbrod, 1976; Etminan, 1977; Eastoe, 1978, 等)。许多作者认为, S型包裹体单独存在, 或更合理的是: S型和V型包裹体存在于同一样品中, 这便是沸腾的充分证据。

如果S型包裹体的卤水在捕获时与气相处于平衡(不混溶流体), 则在碱氯化物(S)溶解后, 必然是气泡消失而均一为液相。换句话说, 这样一种包裹体NaCl的溶解温度 $T_m$ 必然 $< T_h$ 。根

据简单  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  二元体系可以容易地进行论证解释（例见 Weisbrod 等, 1976）。这里说明一种  $T_m-\text{NaCl}=\text{Th}$  的有限的情况, 相当于石盐饱和的水溶液在石盐+液相+气相单变平衡曲线的某处发生的不混溶作用。这里必须指出, 反之则是不对的; 事实上是, 在包裹体中若  $T_m-\text{NaCl}<\text{Th}$ , 则不一定意味着卤水在捕获时与气相发生平衡。

在西南 Tintic 区一次斑岩型矿床勘探中观察到一个复杂情况的极好的例子（美国犹他州）（Ramboz, 1979; Ramboz 等, 1981）。主要结果概括于图 9, 并区分出 S 型包裹体的三个变种（图 9, a 和 b）。

$S_1$  型变种主要见于石英斑晶中。通常为  $T_m-\text{NaCl}>\text{Th}$ , 而  $T_m-\text{NaCl}=\text{Th}$  和  $T_m-\text{NaCl}<\text{Th}$  的情况极少;  $\text{Th}$  与  $T_m-\text{NaCl}$  之差从不超过  $50^\circ\text{C}$ 。这种包裹体成分非常稳定: 常见钾盐, 根据  $T_m-\text{NaCl}$  和  $T_m-\text{KCl}$  数值进行比较而推断, 原子比  $\text{K}/\text{Na}=0.4-0.5$ ; 根据黄铜矿子晶的相对大小估计, 含铜量变化于一狭窄范围内 ( $1000\pm 500\text{ppm}$ )。虽然这些包裹体常与 V 型包裹体同时存在, 但均一温度的范围完全不同, 并且彼此不相重迭。

$S_2$  型变种仅局限于非常有限的区段, 并且看来较晚, 其中从不含钾盐, 极少含黄铜矿。在  $T_m-\text{NaCl}-\text{Th}$  图解中（图 10—9, b）这些包裹体投影于垂直趋势线附近, 这是由于流体具有恒定的均一温度 ( $170^\circ\text{C}$ ) 所致, 并且盐度可变。这些特征极好地证明  $\text{NaCl}$  饱和的溶液是与多种大小不同的石盐晶体同时被捕获的。石盐的最低溶解温度相当于  $T_m-\text{NaCl}=\text{Th}$ , 即相当于在极浅的深度条件下, 沸腾的石盐饱和的水溶液的条件为:  $150-180^\circ\text{C}$ , 其压力小于 50 bar。由于这样的条件, 气相很容易从液相中分离出来, 并从体系中逸出, 可能还伴有大气释放。

$S_3$  变种大多数产于脉中, 虽然在石英斑晶中也不少见。  $T_m-\text{NaCl}<\text{Th}$ ; 均一为液相的包裹体与通常共生的 V 型包裹体均一为气相的温度范围一致。成分相当多变, 常见非均一捕获的证据。这一点

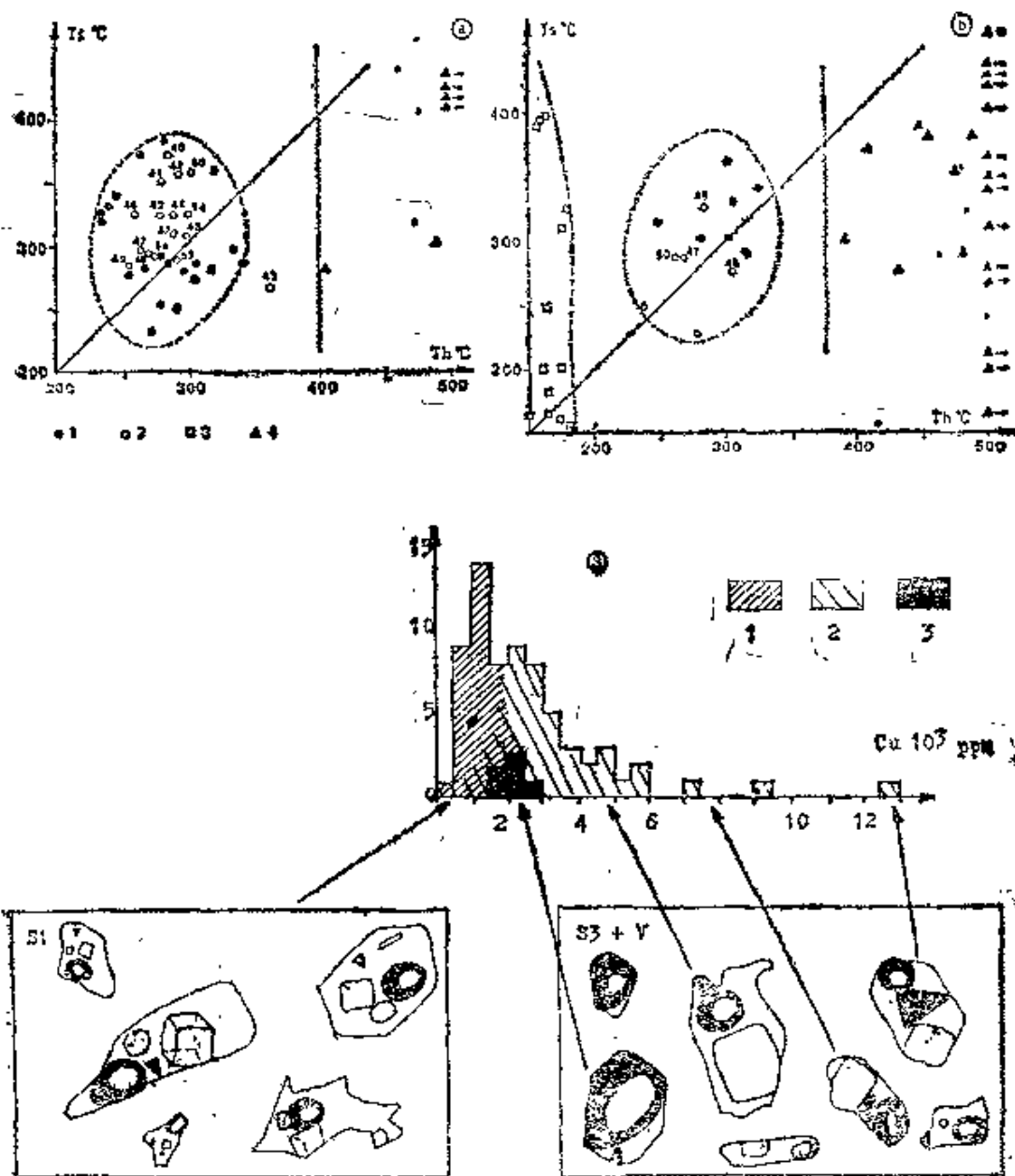


图10—9 西南Tintic矿区的流体包裹体主要特征

(a)和(b): 石英斑晶(a)和石英脉(b)中S型包裹体 $T_m$ -NaCl  
( $=T_s$ )- $T_h$ 图解

1:  $S_1$ 变种, 无钾盐; 2: 含钾盐 $S_1$ 变种, 数字为原子比  $100k/(k+Na)$  的相应数值; 3:  $S_2$ 变种; 4:  $S_3$ 变种; 波纹线指的是V型包裹体的最小均一温度。

(c):  $S_1$ 、 $S_2$ 和某些V型包裹体铜含量直方图

1:  $S_1$ 变种; 2:  $S_2$ 变种; 3: V变种

对于黄铜矿来说确实无疑，并导致铜的散布和异常高值的出现（从1000—12000ppm）。通常缺少钾盐，K/Na较低（根据“压碎浸滤分析法”或根据钾盐出现时 $T_m$ —KCl和 $T_m$ —NaCl的数值相结合进行估计，K/Na最大值约为0.3）。这些资料表明， $S_2$ 型包裹体作为代表一种不混溶流体的高密度盐水相来说是很好的证据。根据“压碎浸滤法”技术，测出了石英脉中同时含有 $S_2$ 和V型包裹体的总的K/Na原子比非常低（0.1和更低）。如此低的数值与在低压到中压条件下与两种长石相平衡的不混溶含水氯化物溶液的成分的已有实验资料相吻合。（Lagache和Weisbrod, 1977; Lagache, 1978）。

关于 $S_1$ 变种包裹体的解释不很明确。Wilson等（1980）曾研究了不列颠·哥伦比亚Granisle和Bell斑岩中的包裹体。根据包裹体成分的变化“趋势”，并且根据 $H_2O$ —NaCl—KCl体系（“石盐”趋势，Cloke和Kesler, 1979），他们认为，在缺乏气相、中温（400—500℃）和低压（200—300bar）的条件下，当饱和溶液沉淀混合晶体（K, Na）Cl时，这种饱和溶液的捕获机制是相当复杂的。在对西南Tintic以及Sierrita（Denis等, 1980）、Sar Cheshmeh（Etmian等, 1981）等勘探中，由这类包裹体的包裹物的均匀性表明，作为一种最合理的推断，这类流体在捕获时是一种均匀的高盐度卤水。因为K/Na值很高，推测温度也高（600—700℃，甚至更高）。将40wt% NaCl—Th = 300℃的等容线作一种粗略的外推，造成了压力的很不确定，但是它们具有相当高的捕获压力（大于1.5—2kb）。这种条件是岩浆作用过程的，因此可以相信 $S_1$ 变种包裹体相当于一种不混溶的、并与花岗闪长质岩浆共存的相当早的卤水（Weisbrod, 1980）。

## 六、结 论

几乎没有一种地质作用是不包括流体相的。另一方面，在某些地质过程还包含有两种或两种以上的流体相。这些过程中，浅成侵

入岩侵位的岩浆晚期至岩浆期后阶段其所包含的流体的数量和种类以及流体动力特性的复杂性是无可比拟的，甚至对于硅酸盐岩浆都不加以考虑；

(a) 结晶过程中，岩浆一定排放出一种流体相，其成分的范围可从极浓的卤水到稀释的含水溶液。

(b) 由于某种热异常的存在，并伴随网脉裂源系统或多或少的发育，有可能引起来自围岩和侵入体结晶部分的多种可能成因的（岩浆的、也可能是变质的和大气的等）流体，并且引起这些流体的循环。

(c) T和P条件（温度范围广，总压力为中到低压）以及很广的成分范围（各种溶解的离子和碳氢化合物、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 等等）可以促进这种（些）流体的不混溶（沸腾或凝结）。

(d) 演化过程中，不同成因的两特或更多种的流体发生混合是非常有可能的。

为了了解并尽可能来模拟这种复杂的地质过程，必须尽可能多的掌握大量的有关制约条件的资料。虽然，单独进行流体包裹体研究不可能导致上述问题的解决，但是很显然，包裹体在演化的不同阶段所捕获的流体的化学特性和物理特性具有第一位的重要性。然而，由于迭加了热液（甚至岩浆）作用的破裂和再愈合的过程很长，因此，在解释流体包裹体分析资料时必须十分小心，并必须将个别包裹体的所有有用资料考虑进去，特别是它们的真正成分资料。拉曼显微探针（Dhamelincourt等，1979；Rosasco和Roedder，1979；Ramboz，1980a和b）或激光显微探针（Tsui和Holland，1979）等新技术可能非常有用。应当进一步注意不同世代的包裹体的相对年代，并且常要投入更大的工作量。

从上述实例可以清楚看出，必要的小心翼翼地进行流体包裹体研究，可提供大量的重要信息。特矿物学和地球化学（如稳定同位素）结合起来研究，则可能成为解释这些极其复杂的地质体系的最有效和最有力的工具。

在进行流体包裹体研究时还可能碰到任何其他测试技术所未遇到的意想不到的问题，特别是在这些复杂的岩浆—热液过程中的问题。

(马秀娟译张洪涛芮宗瑶校)

## 参 考 文 献

- Bazarova, T.Y. (1969): Thermodynamic conditions of formation for some nepheline bearing rocks (in Russian). 1 vol., Nauka, Moscow.
- Burnham, C.W. (1967): Hydrothermal fluids at the magmatic stage. In: Geochemistry of Ore Deposits (H.L. Barnes, Ed.) Holt, Rinehart and Winston, NY. 34-76.
- Burnham, C.W. (1979): Magmas and hydrothermal fluids. In: Geochemistry of Ore Deposits, 2nd Edition (H.L. Barnes, Ed.) Wiley, NY., 71-136.
- Charoy, B. (1979 a) : Definition et Importance des phénomènes deutériques et des fluides associés dans les granites. Conséquences métallogéniques. Sciences de la Terre, Mémoires 27, 1-363.
- Charoy, B. (1979 b) : Greisenisation, minéralisation et fluides associés à Cligga head, Cornwall. Bull. Minéral. 102, 633-641.
- Charoy, B. (1980) : Deuteric phenomena and associated fluids in granite rocks. Sciences de la Terre, Série Informatique Géologique 13, 23-40.
- Chivas, A.R. and Wilkins, W.T. (1977) : Fluid inclusion studies in relation to hydrothermal alteration and mineralization at the Kolonla Porphyry Copper Prospect, Guadalcanal. Econ. Geol. 74.
- Cloke, P.D. and Kesler, S.E. (1979) : The halite trend in hydrothermal solutions. Econ. Geol. 74, 1823-1831.
- Denis, M. (1974) : Alterations et fluides associés dans le porphyre cuprifère de Sierrita (Arizona, Etats-Unis). Thèse Spéc., Université Nancy I, France, 1 vol., 146 p.
- Denis, M., Pichavant, M., Poty, B. and Weisbrod A. (1980) : Le porphyre cuprifère de Sierrita-Esperanza, Arizona, U.S.A. Comparaison avec quelques porphyres voisins. Bull. Minéral. 103, 613-622.
- Dhamelincourt, P., Beny, J-M., Dubessy, J. and Poty, B. (1979): Analyse d'inclusions fluides à la microsonde MOLE à effet Raman. Bull. Minéral. 102, 600-610.
- Durisova, J., Charoy, B. and Weisbrod A. (1979): Fluid inclusion studies in minerals from tin and tungsten deposits in the Krusne Hory Mountains (Czechoslovakia). Bull. Min. 102, 665-675.
- Eastoe, C.J. (1978) : A fluid inclusion study of the Panguna Porphyry Copper Deposit, Bougainville, Papua New Guinea. Econ. Geol. 73, 721-748.
- Etminan, H. (1977) : Le porphyre cuprifère de Sar Cheshmeh (Iran). Rôle des phases fluides dans les mécanismes d'altération et minéralisation. Sciences de la Terre, Mémoires 24, 1-242.
- Etminan, H., Poty, B. and Weisbrod, A. : Alterations, mineralizations and the evolution of the fluid phases in the Sar Cheshmeh porphyry copper, Iran. In preparation.

- Grant, J.N., Halls, C., Sheppard, S.M.F. and Avila, W. (1980): Evolution of the porphyry tin deposits in Bolivia. In: Granitic Magmatism and related Mineralizations, Mining Geol. Special Issue 8, 151-175.
- Hemley, J.J. (1959) : Some mineralogical equilibria in the system  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $H_2O$ . Am. Journ. Sci. 257, 241-270.
- Hemley, J.J. and Jones, W.R. (1964) : Chemical aspects of hydrothermal alterations, with emphasis on hydrogen metasomatism. Econ. Geol. 59, 558-569.
- Ikorakiy, S.V. (1967) : Organic matter in igneous-rock minerals, 1 vol., Nauka (Leningrad) (In Russian).
- Kennedy, G.C. (1950) : A portion of the system silica-water. Econ. Geol. 45, 629-653.
- Killine, A.I. and Burnham, C.W. (1972) : Partitioning of chloride between a silicate melt and coexisting aqueous phase from 2 to 8 kbar. Econ. Geol. 67, 231-235.
- Kogarko, L.M. and Romanchev, B.P. (1977) : Temperature, pressure, redox conditions and mineral equilibria in agpaitic nepheline syenites and apatite-nepheline rocks. Geoch. Int. 14, 113-128.
- Konnerup-Madsen, J., Larsen, E. and Rose-Hansen, J. (1979): Hydrocarbon-rich fluid inclusions in minerals from the alkaline Illimaussaq intrusion, South Greenland. Bull. Minéral. 102, 642-653.
- Lagache, M., (1978) : Nouvelles expériences sur le système ternaire Ab-Or-An, en présence de solutions de chlorures sodi-potassiques, dans le domaine de composition des péristériles. C.R. Acad. Sci., Paris, France 287, 849-952.
- Lagache, M. and Weisbrod, A. (1977) : The system : Two alkali feldspars KCl-NaCl- $H_2O$  at moderate to high temperatures and low pressures. Contrib. Mineral. Petrol. 62, 77-101.
- Larsen, L.M. (1976) : Clinopyroxenes and coexisting minerals from the alkaline Illimaussaq intrusion. J. Petrol. 17, 258-290.
- Le Bel, L. (1980) : Caractéristiques de la phase fluide associée à la minéralisation de Cerro Verde, Santa Rosa (Perou). Mémoire B.R.G.M. 99, 129-139.
- Marignac, C., Leroy, J., Macquière, J., Pichavant, M., Weisbrod, A. (1980) : Evolution tectonometamorphique d'un segment de l'orogène hercynien : Les Cévennes-Médiannes, Massif Central Français. C.R. Acad. Sciences, Paris, 291, 605-608.
- Moore, B.J. (1973) : Analyses of natural gases. U.S. Dept. Int. Inf. Circ. 8658, 96 p.
- Moore, W.J. and Nash, J.T. (1974) : Alteration and fluid inclusion studies of the porphyry Copper deposit at Bagdad, Arizona. Econ. Geol. 69, 631-645.
- Nash, J.T. and Theodore, T.G. (1971) : Ore fluids in the porphyry copper deposits at copper Canyon (Nevada). Econ. Geol. 66, 385-399.
- Naumov, V.B., Kovalenko, V.I., Kuz'min, M.I., Vladyskin, N.V. and Ivanova, G.F. (1971) : Thermometric study of inclusions in topaz from topaz bearing quartz keratophyres (ongonites). Dok. Acad. Sci., U.S.S.R., 199, n°3, 104-106.



- Naumov, V.B., Kovalenko, V.I., Ivanova, G.F., and Vladykin, N.B. (1977) : Genesis of types according to the data on microinclusions. *Geoch. Intern.* 14.2, pp. 1-8.
- Morton, D. (1979) : Transport phenomena in hydrothermal systems: the redistribution of chemical components around cooling magmas. *Bull. Min.* 102, 471-486.
- Petrovskii, I.A. (1965) : Organic matter in igneous and metamorphic rocks of the Kola Peninsula, in: "Chemistry of the Earth Crust", Vinogradov Ed. Akad. Nauk. (Moscow), 48-62.
- Piotrowski, J.H. and Edgar, A.D. (1970) : Melting relations of undersaturated alkaline rocks from South Greenland. *Métt. Grönla, Dann.* 181/9, 1-62.
- Poty, B. and Weisbrod, A. (1976) : Les inclusions fluides comme guide pour la prospection des gîtes métallifères. *Ann. des Mines*, Feb. 1976, 1-7.
- Ramboz, C. (1979) : A fluid inclusion study of the copper mineralization in Southwest Tintic District (Utah). *Bull. Min.* 102, 622-632.
- Ramboz, C. (1980 a) : Géochimie et étude des inclusions fluides de gisements et indices d'étain-tungstène du Sud du Massif Central (France). Thèse de spécialité (3ème cycle), I.N.P.L. Nancy, 1 vol. 278 p.
- Ramboz, C. (1980 b) : Problèmes posés par la détermination de la composition des fluides carboniques complexes. *C.R. Acad. Sciences, Paris* 290, 499-502.
- Ramboz, C., Denis, M., et Weisbrod, A. - Caractéristiques et évolution des phases fluides d'un indice de cuivre de type porphyre, district de S.W. Tintic, Utah, U.S.A., in prep.
- Reyf, F.G. and Bazheyev, Y.D. (1977) : Magmatogenic chloride solutions and tungsten mineralization. *Geoch. Intern.* 14.1, 45-51.
- Roedder, E. (1971) : Fluid inclusions studies on the porphyry type ore deposits at Bingham (Utah), Butte (Montana), and Climax (Colorado). *Econ. Geol.* 66, 98-120.
- Roedder, E. and Coombs, D.S. (1967) : Immiscibility in granitic melts, indicated by fluid inclusions in ejected granitic blocks from Ascension Island. *Journal of Petrology* 8.3, 417-451.
- Rosasco, G.J. and Roedder, E. (1979) : Application of a new Raman microprobe spectrometer to nondestructive analysis of sulfate and other ions in individual phases in fluid inclusions in minerals. *Geoch. Cosm. Acta* 43, 1907-1915.
- Shade, J.W. (1974) : Hydrolysis reactions in the  $\text{SiO}_2$  excess portion of the system  $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  in chloride fluids at magmatic conditions. *Econ. Geol.* 69, 218-228.
- Sobolev, V.S., Bazarova, T.Y., Shugurova, N.A., Dolgov, Y.A. and Sorensen, H. (1976) : A preliminary examination of fluid inclusions in nepheline, aprensenite, tugtupite, and chkalovite from the Illilauassaq intrusion, South Greenland. *Métt. Grönla, Dann.* 181/12, 1-32.
- Schirajski, B. and Kennedy, O.C. (1962) : The system  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  at elevated temperatures and pressures. *Am. Journ. of Sci.* 260, 115-141.
- Tan, T.F. and Holland, H.D. (1979) : The analysis of fluid inclusions by laser microprobe. *Econ. Geol.* 74, 1647-1653.

- Weisbrod, A. (1980) : Interactions between magmas, rocks and aqueous solutions at the late - to post-magmatic stages in granitoids and associated ore deposits. Bull. Min. under press and 26th. Int. Geol. Cong., Paris Abstracts of papers 1, 183.
- Weisbrod, A. and Poty, B. (1975) : Thermodynamics and geochemistry of the hydrothermal evolution of the Mayres Pegmatite. Petrologie 1.1, 1-16 and 1.2, 89-102.
- Weisbrod, A., Poty, B. and Touret, J. (1976) : Les inclusions fluides en pétrologie géochimie - tendances actuelles. Bull. Min. 99, 140-152.

# 第十一章 流体包裹体的分析方法

L.S.Hollister

(普林斯顿大学地质和地球物理系)

## 一、前言

在研究流体包裹体过程中,发展到某一阶段,必定会提出直接分析流体包裹体中流体和(或)子矿物的问题。对于一些特殊情况,已应用许多方法来解答了这个问题,但在每种情况下,主要的问题都是单个包裹体量太少,一般只有大约 $10^{-11}$ g的物质。Roedde (1972)曾综述了1972年以前直接分析包裹体的方法并总结了已获得的结果。

分析方法一般可分为三类:

(1)从许多包裹体中提取流体和子矿物(大量提取), (2)从单个包裹体中提取流体和子矿物, (3)非破坏性的方法(即不破坏包裹体的方法)。有些属于半定量到定量方法,另一些只是提供定性结果。

## 二、大量提取方法

在大量提取方法中,主要问题是主矿物所含的全部包裹体必须是同一类型。取得全部包裹体的平均数值,其意义不大,这些包裹

体可能包括主矿物经历的不同时期形成的包裹体，其组分也可能大不相同。提取时要特别注意以避免污染和损失。污染可能来自主矿物中的固体包裹体和外界（试剂、水等等）。提取中的损失也会很严重，因为包裹体打开时产生了新表面，包裹体的各组分可不同程度地吸附在这些新鲜表面上，极性分子或带高电荷的阳离子先被吸附。

要非常小心清洗样品，以除去夹杂在样品中的矿物微粒和吸附离子，随后通过压碎法或加热法爆开包裹体，进行提取。流体和（或）子矿物的收集随采用方法而异。样品的清洗方法 Roedder 等（1963）和 Poty 等（1974）已作了介绍。

### （一）标准化学方法

一个广泛使用的方法是分析包裹体浸取液，以便了解溶解在包裹体流体中和存在于可溶解的子矿物中的离子。样品量必须足够，使得从其包裹体中能够提出大约10mg的流体。将事先洗净的样品压碎，到足以打开大部分的包裹体，而产生的新表面又最少，与此同时包裹体中挥发性组分被蒸发掉。残留物（包括所有子矿物）用蒸馏水连续浸取数次，然后用稀盐酸浸取。

上述浸取液用原子吸收，火焰光度计和比色法进行分析（Roedder等1963；Poty等，1974）这样便测得了流体包裹体中各种离子的比值；从这些比值和用显微测温确定的包裹体盐度可以测得各阳离子绝对含量。这一方法已成功地用于测定水溶液包裹体中的 Na、K、Ca、Mg、Cl、B 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 。

### （二）气相色谱法

气相色谱的原理是基于各气态组分在色谱柱上吸附的差异，从而得到分离，以氮为载气在通载气下，用压碎法或热爆法使包裹体中组分释放出来。由于立刻将释放出的气体从样品中带走，这样被主矿物新破裂的表面吸附的现象可减轻。

Cuncy 等（1976）用此法可以测定  $\text{CO}_2$  和碳氢化合物的相对丰度，但是，对不含明显水分的包裹体却测得了较高含  $\text{H}_2\text{O}$  量。Behar 和

Pineau (1979) 指出, 保持将提取线路系统受热, 可以清除 $H_2O$ 的污染, 这是由于 $H_2O$ 吸附在提取线路系统的四壁。他们用此法测定的 $CO_2$ 和 $CH_4$ 与显微测温法测得的结果一致, 样品用量0.5—1g。

### (三) 电感耦合等离子体原子发射光谱法

Thompson等(1980)用电感耦合等离子体原子发射光谱法分析了黄玉和磷灰石中所含包裹体流体中的重金属, 这些流体的提取采用了热爆法。以氩气为载气, 将提取物从包裹体中携带出来, 并进入等离子体。在一定时间范围内, 接收等离子体激发光谱。同时测得的元素可达40个, 只用了不到0.5g富含包裹体的主矿物样品。测定结果以对Na含量的比值给出。

### (四) 中子活化分析法

样品在提取前经过照射, 可减少随提取而产生的流体污染问题。只有活化了的离子在此分析中才被测定。Touray (1976) 评论的几篇论文, 采用此法已获得了有效的结果。定量测定的元素有Na、K、Rb、Cs、Cl、Br、Cu、As、Mn和Zn。这一方法对于测定K/Na、K/Br、Cl/Br、Na/Br和Na/Cl的比值特别有用。Grappin等(1979)将中子活化分析得到的结果用于解释与蒸发岩矿床有关的流体包裹体的成因。

Luckscheiter和parekh (1979) 利用中子活化分析仪器, 测定包裹体中Na、K、Mn、As、Br和Cl, 而不破坏样品, 是直接对照射过的样品以计数法测量。主矿物石英必须没有固体包裹体。含包裹体的流体总量为 $10^{-8}$ 到 $10^{-4}g$ , 盐度为5%的样品大约2g, 便可得到有用的数据。用此法所得结果与同一样品以提取法所得结果比较是良好的。

## 三、单个包裹体的破坏性分析法

用来分析单个包裹体成分的任何一种方法, 不论破坏性或不破坏性的, 其重要性, 即便对本短训班教材的任意一位读者来说也应

该是清楚的，他应懂得在很多情况下，流体包裹体的成分即使在一粒单矿物内变化也很大。已用来对单个包裹体分析的大多数方法是用聚焦微束技术 (focused microbeam techniques)；电子显微探针，电子显微镜，离子显微探针以及激光器。

### (一) 激光显微探针法

Tsui和Holland (1979)，Bennett和Grant (1980) 曾用聚焦激光光束打开单个水溶液包裹体。通过在两个电极之间的电火花激发从包裹体蒸发出来的组分，并以光学摄谱仪分析其发射光谱。由激光而产生的电弧坑直径可达几百微米。Tsui和Holland (1979) 用来研究的包裹体比较大， $\geq 100\mu\text{m}$ ，而Bennett和Grant (1980) 用来研究的包裹体约为50—100 $\mu\text{m}$ 。前者的研究结果报导了几个中温矿床的Na，Mg，Mn和Cu对Ca之比值，后者很道了几个高温矿床中存在有Cu，Mn，B和Sn。

### (二) 聚焦电子束能量色散分析法

Ypma和Fuzikawa (1980) 已用电子显微镜与能色散探测器一起，对单个包裹体的蒸发残留物进行了定性分析。Melzger等(1977) 使用这个方法分析和鉴定了包裹体的子矿物，这些包裹体是通过使主矿物沿着充填包裹体的裂隙轻轻破裂而先已打开了。Murck等 (1978) 用电子显微探针和能色散探测器定量分析了流体包裹体腔的玻璃质的边环。在这一研究中也用显微测温方法分析了包裹体中流体的成分和密度。Dolomanova等 (1974) 用电子微探针和X射线色散探测器鉴定了高温矿床中流体包裹体内的子矿物。

### (三) 离子显微探针法

Nambu等 (1977) 和Nambu (1980) 叙述了用离子显微探针分析小于100 $\mu\text{m}$ 的水溶液包裹体。用来分析的包裹体是冷冻的，并在离子束穿射过主矿物打到包裹体时，使包裹体仍保持冷冻状态。对一些矿床中的水溶液包裹体中溶解的离子取得了定性到半定量的分析结果。这一方法有相当大的把握可以对低至中级变质岩中存在的复杂盐水进行分析。

## 四、单个包裹体的非破坏性分析法—— 拉曼光谱法

已经证明，激光激发拉曼光谱是到目前已发展起来的对单个包裹体不加破坏进行分析的最有效的方法。可是，这一方法仅限于测定固相、气相和液相中多核物种的存在及其数量。

激光束聚焦在包裹体上，可激发出特征的拉曼光谱，这种光谱用光学滤光器和光电检测系统进行分析。Guilhaumou等（1979），Rosasco和Roedder以及Dhamelin court等（1979）使用这种技术分析了直径只有几微米的流体包裹体。Rosasco等（1975）报道了首次成功地使用拉曼技术分析大的（ $\sim 100\mu\text{m}$ ）流体包裹体。

Rosasco和Roedder（1979）报道了他们鉴定作为子矿物存在于流体包裹体中的5—10 $\mu\text{m}$ 的硬石膏晶体，以及首次用拉曼光谱仪获得包裹体溶液中 $\text{SO}_4^{2-}$ 的半定量分析结果，并检测到一个包裹体中的 $\text{HS}^-$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 。

Dhamelin Court等（1979）报道了定量分析流体包裹体中的 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 。他们还完成了对一个最长只有30 $\mu\text{m}$ 大小的包裹体中气液相之间各类分子分布的原地测定。Guilhaumou等（1978）是第一个用拉曼显微探针检测流体包裹体中的 $\text{N}_2$ 。

定量分析基于测量记录下来的光谱上峰的相对面积，将它们对分子有效截面进行校正，并标准化成100%和（或）与标准相对应。将拉曼光谱的结果与显微测温以及气相色谱所得结果进行比较是令人满意的。

（程莱仙译 沈崑校）