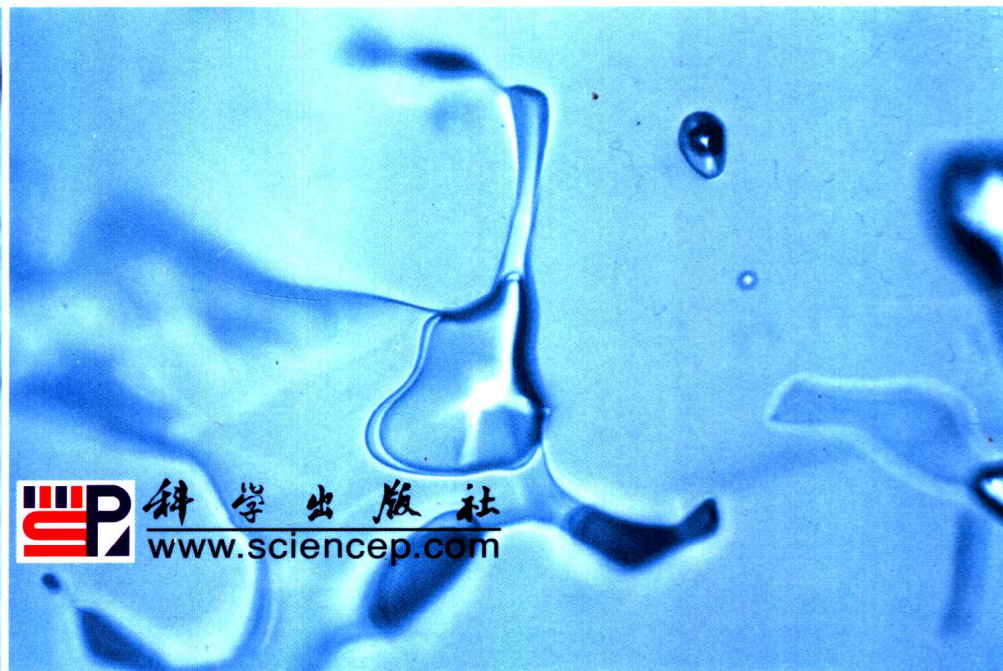
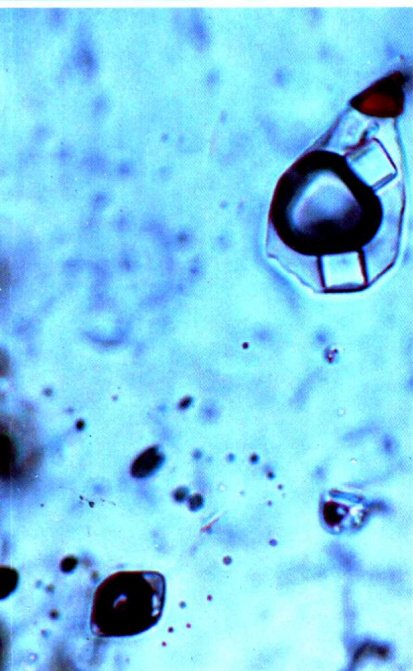


流体包裹体

卢焕章 范宏瑞 倪 培 著
欧光习 沈 昆 张文淮



科学出版社
www.sciencep.com

流体包裹体

卢焕章 范宏瑞 倪 培 著
欧光习 沈 昆 张文淮

科学出版社

北 京

内 容 简 介

流体包裹体是研究存在于矿物和岩石包裹体中的古流体,通过对其进行定性或定量分析可解释地壳乃至地幔中流体参与下的各种地质作用过程,它已广泛应用于矿床学、构造地质学、壳幔作用、油气勘探以及岩浆和变质演化等地学领域。

本书是作者在多年从事流体包裹体研究工作并取得大量成果基础上,尽量全面地搜集国内外流体包裹体研究理论和实践方面的新成果,进行系统分析、归纳和总结,择其要点和精华编写完成的。主要内容包括:(1)包裹体研究的理论基础。着重阐述包裹体的形成和变化、包裹体的相平衡和所属体系、包裹体的分类及各类包裹体的特征。(2)包裹体的研究方法。对目前包裹体工作者已广泛采用的方法,如岩相学、测温学、地质压力计以及成分分析等进行介绍,还介绍了利用数学和计算机进行数据处理的方法。(3)包裹体研究在地质上的应用。介绍包裹体研究在矿床、变质岩、沉积岩和油气、陨石及宝石等方面的应用和方法。

本书可供广大地球科学工作者参考,也可作为高等院校相关专业的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

流体包裹体/卢焕章等著. —北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-014080-X

I. 流… II. 卢… III. 液包体-研究 IV. P572

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 080090 号

责任编辑:胡晓春 胡省英/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2004年9月第一次印刷 印张:31 插页:3

印数:1—1 500 字数:722 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)



前排（左起）：涂光炽先生、蔡大夫
后排（左起）：范宏瑞、沈昆、倪培、卢焕章、张文淮、欧光习

序

地质体中的流体包裹体多是微米级的观察和研究对象。流体包裹体与微量元素、同位素、微粒矿物等都是微体、微区、微量物质,但对它们的分析研究、其成果进展等却极大地丰富了宏观地球科学,带来了重要信息,开拓了新的思路,延展了研究领域。可以说,20 世纪后半叶地质学和地球化学之所以能取得跨越式进展,部分应归功于在思维上、方法上宏观与微观的密切结合。

《流体包裹体》这一专著全面而系统地讨论和总结了这一重要地学微区,它涉及到流体包裹体的方方面面:理论基础、研究方法、应用拓展、历史演变、前景探讨等。这样大分量的总结和写作落在以卢焕章教授为首的学者身上,是极其自然,再合适不过了。卢教授等学者多年(有的长达 30 年)从事、参与包裹体实验室建设、包裹体本身研究和领域开拓。无疑,他们对流体包裹体研究有着十分丰富的经验,但又时时刻刻铭记一定要与宏观地质背景密切结合。这样的专著一定会受到读者们的欢迎。

徐志斌

2004 年 2 月 16 日

本书的缩略语及其含义

G. 气相	T_t . 捕获温度
L. 液相	T_f . 冷冻温度
S. 固相	T_m . 熔化温度
P . 压力	$T_{m,cla}$. 笼合物熔化温度
T . 温度	$T_{m,ice}$. 冰熔化温度
V . 摩尔体积	W . 盐度
X . 成分组成	m . 摩尔浓度
T_h . (完全)均一温度	ρ . 密度
$T_{h,car}$. 含碳相部分均一温度	μ . 化学位
T_{h,CO_2} . CO_2 部分均一温度	C.P. 临界点
T_d . 爆裂温度	SCF. 超临界流体

目 录

序	涂光炽 (i)
绪论	卢焕章 (1)

第一部分 包裹体研究的理论基础

第一章 包裹体研究的基本原理	(11)
第一节 地球中的流体	卢焕章 (11)
第二节 地壳中的流体	卢焕章 (13)
第三节 矿物中包裹体的定义	卢焕章 (20)
第四节 包裹体的形成机理	卢焕章 (21)
第五节 包裹体捕获后的变化	卢焕章 (27)
第六节 流体包裹体研究的三个基本前提	卢焕章 (32)
第七节 不混溶体系中的包裹体	欧光习 (33)
第二章 流体包裹体的相平衡和流体体系	(36)
第一节 流体相平衡和状态方程	沈 昆 (36)
第二节 一元流体体系	沈 昆 (43)
第三节 二元流体体系	沈 昆 (52)
第四节 三元流体体系	沈 昆 (76)
第五节 多元流体体系	沈 昆 (93)
第六节 岩浆包裹体的相体系	倪 培 (103)
第七节 人工合成包裹体和金刚石压腔	倪 培 (113)
第三章 包裹体的分类	(132)
第一节 包裹体的物理状态和成因分类	卢焕章 (133)
第二节 油气包裹体的分类	欧光习 (137)

第二部分 包裹体的研究方法

第四章 包裹体研究的准备工作	张文淮 (147)
第一节 地质研究	(147)
第二节 样品采集	(149)
第三节 样品制备	(150)
第五章 流体包裹体岩相学研究	张文淮 (154)
第一节 矿物共生组合	(154)

第二节	包裹体的显微镜和阴极发光研究	(155)
第三节	原生、次生及沸腾包裹体群	(166)
第四节	包裹体产状、世代与组合	(170)
第六章	包裹体测温学	张文淮 (172)
第一节	流体包裹体的均一法测温	(172)
第二节	流体包裹体的爆裂法测温	(186)
第三节	岩浆包裹体的均一法测温	(195)
第七章	冷冻法与包裹体成分和盐度的估测	范宏瑞 (201)
第一节	冷冻法测定包裹体盐度的基本原理	(201)
第二节	冷冻法测定仪器——显微冷冻台	(202)
第三节	盐-H ₂ O 溶液包裹体	(204)
第四节	含 CO ₂ 包裹体成分与密度的确定	(214)
第五节	包裹体亚稳态	(228)
第八章	流体包裹体地质压力计	范宏瑞 (230)
第一节	不同地质过程中捕获的流体包裹体所代表的压力条件	(230)
第二节	常用的包裹体地质压力计	(232)
第九章	流体包裹体成分分析	(241)
第一节	群体包裹体的成分分析及方法	范宏瑞 (241)
第二节	单个包裹体的成分测定	范宏瑞 (247)
第三节	岩浆包裹体的成分分析及方法	倪 培 (256)
第四节	流体包裹体的同位素分析及包裹体年代学	倪 培 (259)
第十章	包裹体数据的处理及地质解释	(269)
第一节	数据的种类	倪 培 (269)
第二节	数据的处理	卢焕章 欧光习 (274)

第三部分 包裹体研究在地质上的应用

第十一章	典型矿床中的流体包裹体	(285)
第一节	伟晶岩矿床包裹体研究	卢焕章 (286)
第二节	斑岩铜钼矿床的流体包裹体研究	卢焕章 (293)
第三节	块状硫化物矿床包裹体研究	倪 培 (304)
第四节	金矿床中的流体包裹体研究	卢焕章 (311)
第五节	华南钨矿中的流体包裹体研究	卢焕章 (326)
第六节	密西西比河谷型铅-锌矿床矿物中的包裹体	倪 培 (331)
第七节	用包裹体方法找矿的原理和应用	范宏瑞 (335)
第十二章	岩浆岩中的熔融包裹体	倪 培 (345)
第一节	熔融包裹体的形成机理	(346)
第二节	熔融包裹体在岩石学上的应用	(354)

第三节 从岩浆演化出热液的证据·····	(359)
第四节 深成岩中的包裹体·····	(362)
第五节 地幔岩中的包裹体·····	(364)
第十三章 沉积环境和油气藏中的包裹体·····	(370)
第一节 沉积环境中的流体包裹体·····	卢焕章 (370)
第二节 含油气盆地中的包裹体·····	欧光习 (374)
第三节 油气包裹体在成藏、迁移和成熟度研究中的应用·····	欧光习 (386)
第十四章 变质岩中的包裹体·····	沈 昆 (395)
第一节 变质流体·····	(395)
第二节 变质岩中的流体包裹体特征·····	(396)
第三节 流体包裹体在变质岩研究中的应用·····	(406)
第十五章 地球外物质的包裹体·····	倪 培 (420)
第一节 陨石中的包裹体·····	(420)
第二节 月岩中的包裹体·····	(424)
第十六章 包裹体的其他应用·····	(428)
第一节 包裹体在金刚石和宝石中的应用·····	卢焕章 (428)
第二节 包裹体在构造地质上的应用·····	倪 培 (430)
第三节 流体包裹体在地热系统中的应用·····	范宏瑞 (439)
第十七章 包裹体研究的展望·····	卢焕章 (445)
参考文献·····	(451)
图版说明·····	(486)

绪 论

一、流体包裹体的定义及研究内容

地球与其他已知星球显著不同的是,地球是一个有流体存在的天体。因为有了流体,整个地球就有了生命和活力。地球上的流体不仅关系到人类和动植物的生存,而且也关系到地球的演化。传统的地质研究主要侧重于地球的固体部分,即固体的岩石和矿物,而对如何形成这些矿物和岩石的流体或熔体则注意得不够。地球上的流体有多种,如岩浆、岩浆热液、地下水、石油、海水、大气降水、变质水、盆地卤水、地层水和现代热泉等,即包括了地球的水圈、气圈和岩石圈。从狭义上来讲,上述流体我们现在大都可以观测到。除此之外还有一种古流体,即封存在矿物和岩石包裹体中的以往地质年代的流体,其成分可以是上述流体的任何一种或几种的混合,它们是本书研究的对象。

矿物在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 、 W 等)。包裹体中的物质成分是相关地质过程的密码,研究流体包裹体的主要目的之一,就是通过对包裹体中的古流体的定性或定量分析,获得各种数据、信息来解释所研究的地壳及地幔中的各种地质作用过程。流体包裹体分析已广泛应用于矿床学、构造地质学、壳幔演化、地壳尺度上流体迁移、石油勘探以及岩浆岩系统演化过程等地质领域,是目前地球科学研究中最为活跃的领域之一。

流体包裹体地球化学是研究包裹体各种性质及其相互关系、为成岩成矿过程提供物理化学和热力学条件数据、探讨地质作用地球化学和演化历史、并服务于找矿勘探的一门科学。

流体包裹体的研究内容包括:

(1) 研究矿物中包裹体的成因,恢复地质环境。目前所见到的矿物和岩石大多数都是从不同成分和性质的流体(或熔体)中结晶出来的,它们在结晶过程中以流体包裹体形式捕获了成岩成矿时的介质。矿物中捕获的包裹体是迄今保留下来的最完整和最直接的原始流体(或熔体)样品,而研究包裹体的形成机理和捕获后经历的变化,可以区分包裹体的成因类型,确定包裹体所代表的地质环境,这也是对所获得的包裹体数据进行正确解释的基础和前提。

(2) 研究包裹体的成分和物相变化,获取地质过程中的物理化学参数。通过在不同温度下对包裹体内相变行为的观察和包裹体成分分析,可以了解成岩成矿流体的温度、压力、密度、成分(包括盐度和稳定同位素组成),以及 pH 、 Eh 、黏度和成岩成矿年龄等参数;运用现代微区分析技术测试单个包裹体成分,可以解决包裹体分析诸多难题,从而可以对不同成因、不同形成时期的单个包裹体进行研究,获得更为真实的成岩成矿原始信息;运用超微量分析技术进行包裹体成分分析,不仅可获得成岩成矿流体的主要成分,而且可以

测得超微量成矿元素和稀有气体,前者对矿床成因的研究和找矿工作大有帮助,后者则是了解地幔释气、成矿元素和流体来源的重要资料;对包裹体同位素的研究,为成矿热液与成矿物质来源、成矿年龄以及各地质时期不同元素、同位素的比例等提供了可靠的数据,甚至是这类数据的主要来源。

(3) 研究不同地质环境中的包裹体,了解成岩成矿流体的性质。研究不同岩石(岩浆岩、变质岩、沉积岩、陨石和月岩等)、各类矿床(金属和非金属矿床、油气藏等)、地热系统、冰川以及岩溶等地质体中的包裹体特征,探讨这些地质体形成的地质环境、物理化学条件、成因和演化历史,以弥补传统地质学中经常采用的以固体为主要研究对象的不足。因为以固体为主要研究对象的方法,不能了解在地球乃至地球外物质形成演化过程中扮演重要角色的流体的情况,因而在一定程度上具有片面性。

(4) 指导找矿勘探。通过流体包裹体研究来阐明矿床的成因和演化,建立成矿模式,利用所测定的数据来圈定热晕、蒸发晕和盐晕,这将有助于指导找矿勘探工作。

二、流体包裹体研究的发展史

流体包裹体研究在地球科学发展史上有着重要的地位和意义,它的发展经历了漫长而曲折的过程,大致可以分为以下五个阶段:

第一阶段:萌芽阶段(公元10世纪至1858年)

我国古代劳动人民对矿物中的流体包裹体早有认识,曾将含有流体包裹体的水晶和玛瑙雕刻成各式各样精致的工艺品。根据史书记载,我国应该是发现流体包裹体最早的国家,北宋沈括(1031~1095)在《梦溪笔谈》里曾对水晶中的包裹体记述如下:“士人宋述家有一珠,大如鸡卵,微绀色,莹彻如水。手持之映空而观,则末底一点凝翠,其上色渐浅;若回转,则翠处常在下,不知何物,或谓之‘滴翠珠’”。明朝李时珍在《本草纲目》中曾引述了前人关于包裹体的描述并且附有“禹余粮”和“空青”图。据考证,“禹余粮”是指黄铁矿结核中包裹的水;而对于“空青”,李时珍写道:“空青,阴石也,似钟乳者佳,……有如拳大及卵形者,中空有水如油,治盲立效,……其精美为空青之浆,犹胆汁也。其为治目神药”。根据这段描述,我们可以认为捕获包裹体的主矿物可能是皮壳状孔雀石,其包裹的水溶液含铜,这是一个大的液体包裹体。这种含铜等成分的水溶液能治眼病,据了解现代西医治疗沙眼也用硫酸铜溶液,看来这是有道理的。国际上,Boyle在1672年、Davy在1822年、Brewster等在1823年先后发现和观察到了包裹体。特别是英国学者Sorby在1858年观察到在石英(水晶)、黄玉和绿柱石中存在不少包裹体,并且提出用这种包裹体可以得出当时形成的温度和压力。在他的著名论文“晶体的显微结构和矿物、岩石的成因”中论述了包裹体是矿物显微结构的一部分。

第二阶段:包裹体测温阶段(1858~1953年)

自从1858年Sorby在他的著名论文中提出了包裹体地质温度计原理和方法后,包裹体研究就进入了测温阶段。其后的一些文章则继续阐明了包裹体地质温度计的意义,其中包括Bailey(1949)和Skinner(1953)的论文。另外各种自制的显微加热台也相继问世,主要有由Sorby在1858年、Jalieu在1884年设计,以及由Newhouse在1932年、

Richter 在 1953 年设计制造的仪器,这些仪器使包裹体测温有了可能。

另一个重大进展是爆裂法的发明。爆裂法是由加拿大多伦多大学 Smith 提出并由他的学生 Scott 在 1948 年设计完成的。Scott 在他的论文中论述了爆裂法的理论、爆裂曲线、实验技术和所得的结果。爆裂法不仅使得测定不透明矿物中包裹体的温度成为可能,而且还是一个快速的方法。目前我国的爆裂法及其测试仪器也达到了世界先进水平。

以上进展虽然大大推进了矿物包裹体的研究,但在当时的地质学界尚未引起重视,直到 Newhouse (1932)发表了他在密西西比河谷型铅锌矿测得的均一温度结果后,包裹体研究的面貌才为之一新,并引起了广泛的重视。众所周知,密西西比河谷型铅锌矿床是大型的矿床,当时在成因上一直争论不休,有沉积和热液成因两种观点,Newhouse 测得的密西西比河谷铅锌矿闪锌矿中的包裹体均一温度为 $115\sim 135^{\circ}\text{C}$,上密西西比河谷铅锌矿中闪锌矿的流体包裹体均一温度为 $80\sim 105^{\circ}\text{C}$,Newhouse 的结果支持了热液的观点,而否定了沉积的结论。1933 年以后对各种矿床的测温工作就多起来了,包括对铅锌矿、萤石矿、伟晶岩等。同时随着研究的深入,包裹体的类型也发现得多了,含液体 CO_2 和石盐子矿物包裹体均在这个时期第一次见诸报道。

随着包裹体研究的进一步深入,理论上的进展也很明显,Ingerson (1954)阐述了各个阶段的成矿流体特征,苏联学者 Ermakov 在 1950 年出版了《成矿溶液的研究》一书,全书共 8 章 460 页,第一次系统、详细地阐述了包裹体研究的理论基础、包裹体的分类、测温的原理及方法、包裹体研究在地质上的应用等。1953 年 Smith 总结了世界上已发表的 400 多篇包裹体文献,撰写了一篇评论。

第三阶段:成矿流体研究阶段(1953~1976 年)

随着 Ermakov、Ingerson 和 Smith 等研究成果的发表,包裹体研究逐渐从测温阶段进入到成矿流体研究阶段,其特点是:

出版了一系列有关包裹体理论研究的著作,其中最重要的有苏联学者 Ermakov 1957 年出版的《成矿溶液的试验》、美国学者 Roedder 1967 年(1979 年再版)出版的《作为成矿流体的样品的包裹体研究》及 1972 年出版的《流体包裹体的成分》等。在这些著作中他们共同强调的一点就是流体包裹体是作为成矿流体样品而保存下来的,通过对它的研究可以得出其成矿流体的物理化学性质(包括温度、压力、密度、成分和 pH 等),这样就把包裹体研究从单纯的测温发展到成矿流体研究的阶段。

建立包裹体研究新方法是这个阶段的另一个特点, Roedder 分别在 1958、1962 和 1963 年发表了三篇论文,即“包裹体研究 I、II 和 III”。文章系统阐述了包裹体均一法、冷冻法、打开包裹体后分析液相和气相的方法。1968 年 Roedder 和 Skinner 合作证明包裹体在捕获之后没有泄漏或外来物质的加入。1970 年 Roedder 叙述了压碎法,1972 年他又总结了包裹体成分分析的方法和现状。在包裹体地质压力计方面,苏联学者 Лытлов 在 1971 年、Haymov 等在 1966 年和 1968 年分别提出了等容线法、摩尔分数法等,用来测定成矿时的压力。早期曾用石蕊试纸对肉眼能见到的大包裹体进行 pH 值测定,在这个基础上,从 20 世纪 70 年代开始对成群包裹体的稀释液进行 pH 值测定。包裹体溶液 Eh 值的测定也是先对大的包裹体、而后对小的包裹体群进行的。20 世纪 70 年代中期,流体包裹体稳定同位素研究也开展起来,这样就基本上健全了研究流体包裹体的一整套方法。

这段时期中,我国的包裹体研究工作也取得了很大的成就,开始了包裹体温度和盐度的测定,并着手进行成分分析工作。

在此期间出版了大量的包裹体研究论文。从下表中可知这些论文主要集中在矿床、岩石和包裹体本身的方法研究上。

1967~1978 年期间国内外已发表的包裹体文章分类

类 别	矿床	岩石	用包裹体 方法找矿	包裹体 形成机理	包裹体 研究方法	月岩、陨石 中包裹体	压力测定	包裹体中 同位素测定	金刚石中 包裹体	其他
篇数(共 750)	240	185	50	50	120	20	13	30	22	20
比例/%	32.0	24.67	6.67	6.67	16.00	2.67	1.73	4.0	2.93	2.67

另外,在国际间建立了包裹体研究组织,1960 年召开的国际地质大会上,成立了国际成矿流体包裹体委员会(Commission on Ore Forming Fluids in Inclusions),简称 COFFI。并作为国际矿床成因学会的下属组织,从 1968 年起,国际成矿流体包裹体委员会就开始出版“包裹体研究”论文集,由 Roedder 负责编辑,把世界上每年发表的论文汇总成一集,重要的论文刊出全文,一般均以摘要刊出,2001 年已出版到第 23 卷。国际成矿流体包裹体委员会还对包裹体的名词作了统一。

第四阶段:包裹体地球化学阶段(1976~1984 年)

这一阶段是包裹体研究蓬勃发展的阶段,也是它趋于完善的阶段,进而使流体包裹体研究成为地球化学的分支学科。这一阶段包括:

(1) 岩浆(硅酸盐熔融)包裹体的发现并开始应用于岩石学研究,包括应用到火成岩、月岩、陨石、变质岩、沉积岩和地幔岩方面。对于变质流体的性质也根据包裹体作了系统的研究,弄清了不同变质阶段流体在组分上和物理化学性质上的差异。沉积岩中包裹体的研究工作十分困难,但也在逐步开展。

(2) 运用包裹体研究方法,大量开展矿床研究工作,解决了不少矿床的成因问题,提出了很多矿床的成矿模式,例如斑岩铜矿、密西西比层控铅锌矿、夕卡岩钨锡矿、热液脉型矿床等。特别是对单个包裹体的成分分析工作的开展,包裹体中成矿金属元素的测定、包裹体中液相稳定同位素(包括 H、O、C)和同位素年龄的测定等,使我们可以通过对包裹体的研究来探讨成矿物质的来源、成矿流体与围岩交代作用的过程等。

(3) 包裹体的理论研究也有了新的进展,提出了包裹体不混溶性理论。这个理论的提出以及不混溶包裹体的存在,使人们对从岩浆到热液演化的整个过程进行研究成为可能,同时也解释了许多与包裹体基本假设相矛盾的现象。

(4) 开始用包裹体方法来寻找热液盲矿体。

(5) 一些先进的分析技术及方法应用到包裹体研究中,例如中子活化、电子显微镜、离子和电子探针、离子色谱仪、气相色谱-质谱联用、激光拉曼光谱和电子计算机技术,从而提高了包裹体研究数据的正确性和精确性。

(6) 出版了不少包裹体研究专著,如 Crawford 和 Hollister 在 1981 年主编的《Fluid Inclusion: Application to Petrology》和 Roedder 在 1984 年编著的《Fluid Inclusion》,举办了多次包裹体讲习班。另外,一些大学开始讲授包裹体这门课程,许多国家和地区(如苏联、

中国、欧洲和北美等)召开了一系列流体包裹体研究学术会议,并出版了有关岩浆包裹体和沉积岩中包裹体研究的相关著作。

(7) 包裹体研究从单独的测温发展到对成矿流体的研究,继而又发展到包裹体地球化学研究阶段,这是本阶段最重要的一个时期。也就是说包裹体已从研究流体本身发展到研究流体和岩浆、以及从岩浆到热液的演化过程,即把单个包裹体作为一个地球化学体系来研究。其次包裹体研究已从单纯测温发展到通过它获得温度、压力、成分、盐度、密度、pH、Eh、流体体系、岩浆冷却史、流体稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$ 和 δD)、流体年龄、流动速度和找矿等 13 个参数,这些参数也是地球化学研究所要获得的定量参数。该阶段包裹体研究已发展成为一门单独的学科——包裹体地球化学。

第五阶段:综合研究发展阶段(1985 年至今)

Roedder (1984)撰写的《Fluid Inclusion》一书(中译本由卢焕章、王卿晖等译,长沙中南工业大学出版社出版)系统地总结了西方国家自 1958 年以来的成果,该书的出版使西方的流体包裹体研究渐渐地普及起来,发表的论文也多起来,据池国祥等(2003)统计,从 1985 年到 2003 年这一阶段,在矿床学重要期刊——《Economic Geology》上发表的有关流体包裹体方面的文章从 1985 年的 9.5% 增加到 2003 年的 27%。在国外,国际矿床成因协会(IAGOD)所属的“国际流体包裹体委员会”召开了多次学术会议;美洲和欧洲的包裹体工作者也相应召开了多次学术会议,发表了大量的论文和著作,特别在运用物理化学和计算机知识对所得的包裹体数据做出合理的解释和推断、并以此来建立成岩成矿的模式等方面有很大的进展。

现阶段流体包裹体研究的内容和发展重点包括下面一些。

1. 人工合成流体包裹体与 PTVX 属性

大量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岩浆岩、变质岩及沉积岩和热液矿床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和性质对流体体系中矿物的溶解、物质的迁移及矿物的沉淀具有极大的影响,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地质作用中温度、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,因此对流体 PTVX 属性和相图的了解是十分重要的。

正因为如此,近几十年来,基于人工合成流体包裹体的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 或 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 二元体系的不混溶性研究一直是地质学家探索热液系统、造山带和岩浆岩系统中流体地质作用过程的重要方法之一,而更复杂的三元体系(如 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$)亦是这些年来重点研究对象之一。前人通过人工合成包裹体的方法研究了三元体系($\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$)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间分离。两相间酸度、盐度及挥发分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。

近些年,高温高压下人工合成流体包裹体的研究一直占有主导地位,如 Gibert 等

(1998)研究了在 500~700MPa 和 900℃ 条件下, $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系的不混溶性; Schmidt 等(1995)确定了在三元体系 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 中沿 40% 的 NaCl 假二元体系成分中溶离线和等容线的空间位置; 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 PTVX 数据十分丰富, 但由于这些数据的表达形式各种各样, 使得这些数据中绝大部分很难用来解释流体包裹体的特征。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, 因为许多有关温压持续升高条件下流体 PTVX 属性的实验和理论数据可用状态方程(EOS)的形式来表达, 这种表达方式可对数据进行外推和内插。而 Brown 和 Hagemann (1995)则将这些状态方程收入其编写的 MacFlincon 程序中, 该程序特点之一, 是对从流体包裹体中获得的数据进行简化处理、计算和解释, 从而可使使用者对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对比。我国刘斌和沈昆(1999)、刘斌等(2000)分别出版了两本著作讨论包裹体的热力学和计算机程序。

2. 流体包裹体成分分析

流体包裹体成分分析是流体包裹体研究的基本任务之一, 即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(1984)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哪种分析方法, 获取包裹体中的流体不外乎两种途径, 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(大多数直径小于 $20\mu\text{m}$), 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。因所涉及的样品量相对较大, 故其可在同一分析流程中进行多元素分析, 且大多数分析仪器可以达到检测流体中元素的检出限。该方法的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。克服办法之一就是尽可能地减小样品的体积, 同时尽可能地选取代表性好的、且只含有一个世代包裹体的样品。尽管如此, 样品中多世代流体包裹体群的存在却给我们提供了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也有限, 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。

近些年发展起来的分析方法或仪器中大部分是以流体内的溶质为分析对象的, 但近期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)气体成分测试(王莉娟, 1998)。

3. 流体包裹体年代学

从流体包裹体的流体中利用 Rb-Sr、Sm-Nd 等方法测定流体捕获的年代是一个很大的进展。Shepherd (1981) 首先建立了测定流体包裹体 Rb-Sr 同位素年龄的方法, 李华芹等 (1993) 发展了这个方法, 用 Rb-Sr 和 Sm-Nd 方法测定了我国华南钨矿流体包裹体的年龄。

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、美国得克萨斯和密苏里的油田方面均获得很大的进展, 所用的方法被称作“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。利用流体包裹体确定是否有石油的几种主要方法为:

(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气包裹体中石油 C_1 到 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度以及在埋深过程中石油从含油地层中迁移充填到储油层的过程, 也可以得出石油的生物分解过程。

(2) 利用油气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。

(3) 流体包裹体地层分析。美国 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, 对一个深达一万英尺^①新打的钻井做了试验, 结果表明, 在从地面往下七千英尺到九千英尺的地方仍存在石油。另外石油包裹体丰度 (GOI 或 gains containing oil inclusion) 的测定对于判断储层中有没有油气也是十分重要的。

我国的包裹体研究从 20 世纪 60 年代起先后在中国科学院、地质部、冶金部和教育部的个别单位中开展, 1972 年以后发展迅速。1977 年召开了全国第一次矿物包裹体和成岩成矿学术会议, 随后许多单位建立了实验室, 改进和完善了包裹体的研究方法, 同时结合地质工作对我国的有色金属、黑色金属、稀有元素、放射性矿床和水晶矿等作了大量的包裹体研究工作, 收到了较好的效果, 并据此对矿床的分带、矿床的成因与热液的性质做出了较为满意的解释。我国还开展了对岩浆岩和变质岩中包裹体的研究, 并且取得了一些成果。在此基础上相应地召开了包裹体成分分析 (1980 年)、爆裂法 (1981 年)、均一法和冷冻法 (1983 年) 等的学术讨论会。随着研究工作的进展, 有关包裹体的论著相继问世, 如《矿物中包裹体及其在地质上的应用》(1977 年中国科学院地球化学研究所包裹体实验室编辑)、《矿物中包裹体研究 (一)》和《矿物中包裹体研究 (二)》(1984)、《包裹体矿物学》(何知礼, 1982)、《实验地球化学》(李兆麟, 1988)、《包裹体地球化学》(卢焕章等, 1990)、《流体包裹体热力学》(刘斌、沈昆, 1999)、《流体包裹体热力学参数计算软件及算例》(刘斌、朱恩林、沈昆, 2000)。近几年来我国在油气包裹体和单个包裹体成分分析领域发展迅

^① 1 英尺 = 0.3048 米

速,已累计召开过 13 次全国流体包裹体会议,取得了大量成果。但是我国的流体包裹体研究工作距国际先进水平仍有一段距离,主要表现在对包裹体的基础理论、计算机处理软件开发、以及在变质岩和沉积岩中包裹体研究等方面,这就需要我们加倍努力,迎头赶上国际潮流。

本书由卢焕章主持编写。各章的执笔人如下:绪论 卢焕章;第一章 卢焕章、欧光习;第二章 沈昆、倪培;第三章 卢焕章、欧光习;第四章、第五章和第六章 张文淮;第七章和第八章 范宏瑞;第九章 范宏瑞、倪培;第十章 倪培、卢焕章和欧光习;第十一章 卢焕章、倪培和范宏瑞;第十二章 倪培;第十三章 欧光习、卢焕章;第十四章 沈昆;第十五章 倪培;第十六章 卢焕章、倪培和范宏瑞;第十七章 卢焕章。全书初稿经集体讨论后由范宏瑞、卢焕章和张文淮修改定稿,书中部分图件由胡芳芳和赵宏刚清绘。

作者虽然从事包裹体研究多年,但要对如此广泛而深刻的内容进行阐述,仍深感知识的不足,故本书中错误之处在所难免,敬请各位读者指正。书中还引用了许多同行的资料。特别要说明的是书中引用了卢焕章、李秉伦、沈昆、赵希汲、喻铁阶和魏家秀 1990 年编著的《包裹体地球化学》一书的部分章节和图件,特此一并说明和致谢。