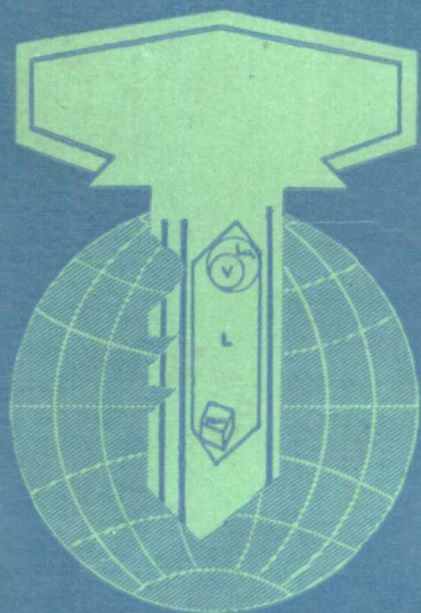


包裹体地球化学

卢焕章 李秉伦 沈 崑
赵希澂 喻铁阶 魏家秀 编 著



地质出版社

6

2

内 容 简 介

包裹体地球化学是地球化学的一个分支,它对于查明矿床的成因,了解矿床、岩石的形成条件(温度、压力、成分等)以及指导寻找矿床方面具有很重要的意义。本书汇集了国内外包裹体研究的资料,分3部分共16章。第一部分介绍包裹体研究的理论基础,包括原理,相平衡和体系,包裹体的分类和特征。第二部分介绍测定包裹体温度、压力、盐度、密度、成分和所属物理化学体系等方法,并对数据处理和新的分析测试技术作了介绍。第三部分为包裹体研究在矿床、岩浆岩、变质岩、沉积岩和石油勘探方面的应用及实例,介绍了用包裹体数据寻找新矿床方面的探索。本书可供广大地质和地球化学工作者、岩矿鉴定人员、包裹体工作者以及有关大专院校师生参考。

包裹体地球化学

卢焕章 **李秉伦** 沈 崑 编著
赵希澈 喻铁阶 魏家秀

责任编辑:叶丹 沈文彬
地质出版社出版发行
(北京和平里)
地质出版社印刷厂印刷
(北京海淀区学院路29号)
新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 15.375 铜版页: 2 页 字数: 368000
1990年5月北京第一版·1990年5月北京第一次印刷
印数: 1—1180 册 国内定价: 7.20元
ISBN 7-116-00613-3/P·520

前 言

在地质、地球化学研究中,对地质体形成过程的压力、温度、成矿流体和岩浆的性质及成分等成岩成矿条件的了解,一直是迫切需要解决的问题,因为它们直接涉及到矿床、岩石的成因并对指导找矿勘探具有重要意义。

在解决这些问题的方法和理论中,流体包裹体地球化学是直接和有效的方法和理论。流体包裹体和岩浆包裹体分别代表了成矿流体和岩浆的样品。对它们的研究可以得出成岩成矿过程的压力、温度、成分等物理化学条件,并且据此推出整个演化过程。

包裹体研究已有近百年的历史,但发展成为地球化学的一门分支学科——包裹体地球化学,只是近20年的事。由于现代科学技术的进步,使我们能够进行超微量分析,突破了以固体物质为主要研究对象的传统地质学方法,开拓了由微小的包裹体所保留下来的古地质时期流体研究的新领域,成为研究成岩成矿作用的新途径,并且取得了很大的成就。

从60年代起,中国科学院地质研究所等单位开始从事包裹体研究,这一时期的包裹体研究主要是在测温方面。1977年在广西全州召开了第一届全国包裹体和成岩成矿实验学术会议,总结了我国包裹体研究的经验,讨论了该项研究的方向和发展步骤,为我国包裹体研究奠定了基础。随后分别在1980、1981和1983年召开了全国性的有关包裹体成分分析、爆裂法、均一法和冷冻法学术讨论会。1987年又召开了第二届全国包裹体和成岩成矿学术会议,总结了十年来所取得的成果。这些成果除了包裹体的基本理论和方法上的进展外,还涉及到包裹体研究在解决矿床成因、成矿模式、找矿勘探和成岩作用方面的成就,如对我国钨矿床、锡矿床、斑岩铜矿床、矽岩铁矿、铅锌矿床、金矿床、水晶、石油和其他非金属矿床等做了大量的研究,发表了数百篇论文,出版了论文集及专著,形成了包裹体研究的全国性热潮。并且在全国各地地质科研单位,大专院校乃至一些地质队相继建立了包裹体实验室,为普及和深入开展包裹体研究工作创造了良好的条件。

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”于1960年正式成立,并召开了多次学术会议,美洲,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专著。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方面有很大的进展。

鉴于此,本书作者在自己多年从事包裹体研究工作并取得一些成果的基础上,尽量全面地搜集国内外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,编写成本书。其主要内容包括:(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。对目前我国包裹体工作者已广泛采用的方法(如包裹体岩相学)均一法,爆裂法,冷冻法,包裹体群的成分分析方法等)则着眼于技术的提高,对于一些新技术、新方法则进行介绍,以期开阔视野。并且还介绍了用数学和计算机处理包裹体数据的方法。(3)包裹体研究在地质上的应用。介绍包裹体研究在矿床(以我国的矿床为主)、岩浆岩、变质岩、沉积岩和石油方面的应用和方法。

本书由卢焕章主持编写。各章的执笔人如下：李秉伦负责第一、九章，赵希激负责第五、十一章，魏家秀负责第六、十二章，喻铁阶负责第四、七、十、十五章，沈崑负责第二、十三和十四章，卢焕章负责绪论、第三、八和十六章。全书初稿经讨论修改后，由李秉伦、沈崑、魏家秀和卢焕章等修改定稿。作者的署名以姓氏笔划为序。

本书初稿完成后，曾广泛征求意见，在此谨向给我们提供资料、意见和帮助的同行们表示衷心的感谢。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，仍深感自己知识的不足，故书中错误之处在所难免，敬请各位读者指正。

目 录

前言

绪论	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	6
第一节 矿物中包裹体的定义	6
第二节 包裹体的形成机理	7
第三节 包裹体形成后的变化	16
第四节 包裹体地球化学的三个基本前提	20
第二章 矿物包裹体中的相平衡和所属体系	22
第一节 一元体系	22
第二节 二元体系	28
第三节 三元体系	44
第三章 包裹体的分类	53

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	56
第一节 地质研究	56
第二节 样品采集	58
第三节 样品制备	59
第五章 包裹体的显微镜下研究	61
第一节 流体包裹体的镜下寻找方法	61
第二节 包裹体的镜下特征	62
第六章 包裹体测温学	74
第一节 流体包裹体的均一法测温	74
第二节 流体包裹体的爆裂法测温	88
第三节 岩浆包裹体的均一法测温	95
第七章 成矿流体盐度测定和成分估测的方法	102
第一节 冷冻法	102
第二节 压碎法	115
第八章 包裹体地质压力计	117
第一节 包裹体地质压力计	117
第二节 运用包裹体求地质压力的方法和实例	121
第九章 包裹体成分分析	131

第一节	包裹体群的化学成分分析	131
第二节	单个包裹体的成分测定	139
第三节	包裹体稳定同位素分析	144
第四节	pH和Eh的测定	149
第十章	包裹体数据的处理及地质解释	151
第一节	数据的种类及其地质解释	151
第二节	数据处理	155

第三部分 包裹体研究在地质中的应用

第十一章	成矿环境中的包裹体	162
第一节	岩浆矿床中的包裹体	162
第二节	华南钨矿床的流体包裹体研究	166
第三节	热液型金矿床包裹体研究	171
第四节	斑岩型铜(钼)矿床的包裹体研究	177
第五节	层控矿床(密西西比河谷型铅锌矿床)包裹体研究	178
第六节	块状硫化物矿床包裹体研究	179
第十二章	岩浆岩中的熔融包裹体	182
第一节	熔融包裹体及形成机理	182
第二节	熔融包裹体与成岩作用	187
第三节	熔融包裹体研究的意义	192
第十三章	沉积成岩环境中的流体包裹体	200
第一节	沉积成岩环境中流体包裹体特征	200
第二节	碳氢包裹体及其与油气的关系	204
第十四章	变质岩中的包裹体	210
第一节	变质流体	210
第二节	各种变质岩中流体包裹体的特征	211
第三节	流体包裹体研究在变质岩中的应用	215
第十五章	包裹体参数在找矿中的应用	222
第一节	应用包裹体参数找矿的原理和方法	222
第二节	直接用包裹体数据找矿的方法和实例	223
第三节	间接找矿方法	228
第十六章	包裹体研究的展望	231
主要参考文献		234
图版及其说明		238

CONTENTS

FOREWORD

INTRODUCTION 1

PART I: THEORETICAL BASIS OF FLUID INCLUSION STUDIES

CHAPTER 1. Basic Principles of Fluid Inclusion Study 6

1. Definition of inclusion..... 6
2. Trapping mechanism of inclusions 7
3. Changes in inclusions after trapping16
4. Prerequisites for fluid inclusion study20

CHAPTER 2. Phase Equilibra and Systems in Fluid Inclusions.....22

1. Unary systems22
2. Binary systems.....28
3. Ternary systems44

CHAPTER 3. Classification of Inclusions53

PART II: METHODS IN FLUID INCLUSION RESEARCH

CHAPTER 4. Preparation for Fluid Inclusion Research56

1. Geological study56
2. Sample collecting58
3. Sample preparation59

CHAPTER 5. Fluid Inclusion Petrography.....61

1. How to find inclusions under microscope?61
2. Characteristics of inclusions62

CHAPTER 6. Fluid Inclusion Microthermometry.....74

1. Homogenization method of fluid inclusions74
2. Decrepitation method88
3. Homogenization method of melt inclusions95

CHAPTER 7. Determination of Salinity and Composition 102

1. Freezing method 102
2. Crushing stage method 115

CHAPTER 8. Fluid Inclusion Geobarometry 117

1. Fluid inclusion geobarometry 117
2. Methods of fluid inclusion geobarometry and applications..... 121

CHAPTER 9. Fluid Inclusion Composition Analysis 131

1. Bulk chemical analysis for a group of fluid inclusions	131
2. Individual fluid inclusion analysis	139
3. Isotopic analysis	144
4. pH and Eh determinations of fluid inclusions	149
CHAPTER 10. Fluid Inclusion Data and Interpretation	151
1. Types of data and their geological interpretation	151
2. Reliability of fluid inclusion data	155
PART III: FLUID INCLUSION STUDIES	
APPLIED TO GEOLOGY	
CHAPTER 11. Fluid Inclusions in Ore Deposits Environments	162
1. Magmatic mineral deposits.....	162
2. Tungsten mineral deposits in south China	166
3. Gold deposits	171
4. Cu-Mo porphyry deposits	177
5. Stratabound deposits	178
6. Massive sulfide deposits	179
CHAPTER 12. Melt Inclusions in Igneous Rocks.....	182
1. Melt inclusion and its forming mechanism	182
2. Melt inclusion and petrogenesis	187
3. Practical significance	192
CHAPTER 13. Fluid Inclusions in Sedimentary Environments	200
1. Characteristics of fluid inclusions in sedimentary environments	200
2. Hydrocarbon inclusions and their relation to the oil exploration	204
CHAPTER 14. Fluid Inclusions in Metamorphic Rocks.....	210
1. Metamorphic fluids	210
2. Characteristics of fluid inclusions in different types of metamorphic rocks	211
3. Application of fluid inclusion study in metamorphic rocks	215
CHAPTER 15. Use of Fluid Inclusion Parameters as a Tool in Mineral Exploration	222
1. Basic principle of using fluid inclusion parameters as a tool in mineral exploration.....	222
2. Direct exploration methods and examples	223
3. Indirect exploration methods	228
CHAPTER 16. Future of Fluid Inclusion Research	231
REFERENCES	234
PLATES AND DESCRIPTION	238

绪 论

一、包裹体地球化学的定义及研究内容

近几十年来,在地质科学领域中,发生了深刻的变革。人们已经从以单纯对地质体进行观察和描述为主的传统工作方法,跃进到对它们的成因、形成机制和演化历史进行深入研究阶段。矿物中包裹体的研究情况也与此类似,其进步性表现在:①引进现代高精度的技术,研究单个的和群体的包裹体,分析测试的范围空前扩大,分析测试结果的精度大大提高;②测试数据的数学和物理化学的理论处理和解释;③包裹体研究结果有机地与近代地质学理论相联系。这几方面的进展,构成了一个体系完整的包裹体研究的新内容,我们称之为包裹体地球化学。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-热力学条件的数据,探讨地质作用的地球化学和演化历史,并服务于找矿勘探的一门科学。

包裹体地球化学的研究内容如下:

1. 研究矿物中包裹体的成因,恢复地质环境。大多数目前所见到的矿物和岩石都是从不同成分和性质的流体(或熔体)中结晶出来的,在它们结晶的过程中可以捕获这些母液,形成了流体包裹体。因此矿物中的包裹体是迄今保留下来的最完整和最直接的原始成矿流体(或溶体)的样品,而研究包裹体的形成机理和捕获后经历的变化,正是为了区分包裹体的成因类型,确定包裹体所代表的地质环境,这是随后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中相变行为的观察和包裹体成分分析,来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、粘度和成岩成矿年龄等参数。

运用现代微区分析技术,分析单个包裹体的成分,解决了包裹体分析测试的许多难题,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的原始信息。

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的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,后者是了解地幔释气的重要资料来源。

对包裹体同位素的研究,为成矿溶液的物质来源、成矿年龄以及各地质时期不同元素同位素的比例等方面,提供了可靠的数据,甚至是这种数据的主要来源。

3. 研究不同地质环境中的包裹体情况,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)、各种矿床(金属和非金属矿床、石油矿层)、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化学环境、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,不能了解地球乃至地外物质形成演化中的重要角

色——流体的情况，因而它的成果，在一定程度上具有片面性。

4. 指导找矿勘探工作：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；利用流体包裹体测定的数据，圈定热晕、蒸发晕和盐晕，有助于指导找矿勘探工作。

二、包裹体地球化学的发展史

包裹体地球化学在地球科学中有着重要的地位和意义，它的发展经历了漫长的曲折的过程，大致可以分为以下四个阶段：

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，利用水晶和玛瑙中的流体包裹体雕刻成各种各样精致的工艺品。根据书籍记载，我国应当是发现包裹体最早的国家。在我国的古书中，有记载的是北宋著名的自然科学家沈括的《梦溪笔谈》和明朝著名的医药学家李时珍的《本草纲目》。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：“土人宋述家有一珠，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，我们可以认为包裹体水溶液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，据了解现西医治沙眼也用硫酸铜溶液，看来这是有道理的。在国外有Boyle（1672）、D. Brewster（1823）、H. Davy（1822）等人先后发现和观察到了包裹体。特别是英国人Sorby, H. C., 1858年他观察到在石英、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。在他的著名的论文“晶体的显微结构和矿物、岩石的成因（On the microscopic Structure of Crystals, indicating the Origin of minerals and rocks. Geol. Soc. London, Quart. J., 14., Part 1, 453—500）”中论述了包裹体是矿物的显微结构的一部分。

第二阶段：包裹体测温阶段（1858—1953）

自从1858年Sorby在他的著名论文中提出了包裹体地质温度计的原理和方法后，包裹体研究就进入了测温阶段。

其它一些文章是在Sorby之后继续阐明包裹体地质温度计的意义，其中包括Bailey, S. W. (1949)和Skinner, B. J. (1953)的论文。另外各种自制的显微加热台相继问世。主要有Sorby(1858)、Jalieu, A. A.(1884)设计的，由Newhouse, W. H. (1932)、Richter, D. H. (1953)设计制造的仪器，这些仪器使包裹体测温有了工具。

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的F. G. Smith提出并由他的学生Scott, H. S. 在1948年设计完成的。Scott在他的论文中论述了爆裂法的理论、仪器、爆裂曲线、实验技术和所得的结果。这使得测定不透明矿物中包裹体的温度成为可能，并且是一个快速的方法。

以上进展，虽然已大大地推进了矿物包裹体的研究工作，但在整个地质学界尚未引起人们的重视。直到Newhouse在1933年发表了他测得的在成因上长期争论不休的密西西比

河谷型铅锌矿的均一温度后,使得包裹体研究的面貌为之一新,从而引起了广泛的重视。Newhouse测得美国三州的闪锌矿中的包裹体的均一温度为115—135℃,上密西西比河谷型铅锌矿中闪锌矿的流体包裹体的均一温度为80—105℃。众所周知,密西西比河谷型铅锌矿床是大型的矿床,当时在成因上有沉积和热液成因两种争论,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CO₂和石盐子矿物包裹体均在这个时期第一次见到报道。

随着包裹体研究的进一步深入,理论上的进展也很明显,Ingerson, E. 在1954年阐述了各个阶段的成矿流体的特征,苏联的Ермаков(1950)发表了《成矿溶液的研究》一书,共八章460页,第一次系统地、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F. G. Smith总结了世界上已发表的400多篇包裹体文献。

第三阶段:成矿流体研究阶段(1953—1976)

随着Ермаков, Ingerson和Smith的著作的发表,包裹体研究逐渐从测温阶段进入到成矿流体研究的阶段,其特点是:

发表了一系列的有关包裹体的理论研究的论著,其中最重要的有法国的Deich, G. (1955), 加拿大的F. G. Smith(1963), 苏联的Ермаков(成矿溶液的试验, 1957)和美国的E. Roedder(作为成矿流体的样品的包裹体研究, 1967, 1979; 流体包裹体的成分, 1972)等人的著作。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的样品保存下来的,并且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、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。

建立包裹体研究的新方法是这个阶段的另一个特点。E. Roedder在1958、1962、1963年分别发表了三篇论文,即包裹体研究I、II和III,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,苏联的Плутков, B. K. (1971), Наймов, B. B. 等(1966, 1968)提出了等容线法、克分子分数法等来测定成矿时的压力。早期用石蕊试纸对肉眼能见到的大包裹体进行pH测定,在这个基础上,从70年代开始对成群的包裹体的稀释液进行pH值测定。包裹体中溶液的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。70年代中期,流体包裹体的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。

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

在这期间出版了大量的包裹体论文,这些论文的种类和分布可见表1。从表1中可知这年中包裹体的论文主要集中在矿床、岩石和包裹体本身的方法研究上。

另外,在国际间建立了包裹体研究的组织。在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OFFI。并作为国际矿物成因学会的下属组织。从1968年起,国际成矿流体包裹体委员

表 1 1967—1978年间国内外已发表的包裹体文章分类

类 别 总计篇数	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
750	240	185	50	50	120	20	13	30	22	20
占%	32.0	24.67	6.67	6.67	16.00	2.67	1.73	4.0	2.93	2.67

会就开始出版“包裹体研究”的论文集，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。现已出版到第二十卷，即1988年的论文集。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年至今）

这一阶段是包裹体研究的蓬勃发展阶段，也是它趋于完善的阶段，进而使包裹体研究成为地球化学的分支学科。这一阶段的内容包括：

（1）包裹体（硅酸盐熔融包裹体等）开始应用到岩石学方面，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，搞清了不同变质阶段的流体在组分上，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，但近年来也在逐步开展。

（2）运用包裹体的研究方法，大量开展矿床研究工作，解决了不少矿床的成因问题，提出很多矿床形成的成矿模式。例如斑岩铜矿、密西西比层控铅锌矿、矽卡岩钨、锡矿、热液脉型矿床等。特别是近几年来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，包裹体中液相的稳定同位素（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。

（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的包裹体的存在，使人们对从岩浆到热液的演化过程进行研究成为可能。同时也解释了许多与包裹体的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的数据的正确性和精确性。

（6）在这一阶段出版了不少包裹体研究的专著（Crawford and Hollister, 1981; Roedder, 1985），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，在许多国家（苏联，中国，西欧等）召开了包裹体研究学术会议。

（7）包裹体的研究从单独的测温发展到对成矿流体的研究，而目前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点。也就是说包裹体已从研究流体发展到研究流体和岩浆，以及从岩浆到热液的演化过程，而且把一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地测温到通过它能获得温度、压力、成分、盐度、密度、pH、Eh、流体的体系、岩浆的冷却史、流体的稳定同位素（ $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD ）、流体的年龄、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。所以包裹

体研究已发展成为一门单独的学科——包裹体地球化学。

我国的包裹体研究从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中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作出了较为满意的解释。我国也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）、爆裂法（1981）、均一法和冷冻法（1983）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应用》（中国科学院地球化学研究所包裹体实验室，1977）、《矿物中包裹体研究（一）》（1981）以及《矿物中包裹体研究（二）》（1984），等等。这些著作的出版有助于包裹体研究的深入发展。但是我国的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本理论、包裹体形成机理的研究，及在变质岩和沉积岩的包裹体研究等方面。这就需要我们加倍努力，以迎头赶上。

第一部分 包裹体研究的理论基础

这一部分内容包括：包裹体研究的基本原理和假设，包裹体的相平衡和所属体系，以及与包裹体有关的各个体系的热力学性质问题，还有包裹体的形成机理、分类和定义等等。这些内容是第二部分包裹体的研究方法和第三部分包裹体研究在地质中应用的基础。

由于近些年来，国内外学者在研究均匀体系捕获的包裹体的同时，对非均匀体系中捕获的包裹体和变生包裹体也有所发现和研究，在本部分也作一些扼要的介绍。

第一章 包裹体研究的基本原理

包裹体和它所代表的地质环境是多种多样的，而对代表着各种成岩成矿环境的包裹体进行研究，目的为解决岩石学、矿床学和地球化学等方面具理论性和实践性意义的问题。研究矿物包裹体首先需要明确包裹体的概念、含义、形成机制以及一些科学假设和理论基础方面的内容。

第一节 矿物中包裹体的定义

自19世纪中叶Sorby等人在石英、黄玉等矿物中发现了各种形态的包裹体以来，由于人们对它进行深入细致的研究的结果，使矿物包裹体有了较为全面而科学的定义。

矿物包裹体是成岩成矿溶液（含气液的流体或硅酸盐熔融体）在矿物结晶生长过程中，被包裹在矿物晶格缺陷或穴窝中的、至今尚在主矿物中封存并与主矿物有着相的界限的那一部分物质。

对以上矿物包裹体的定义，有如下几点说明：

（1）成岩成矿溶液指捕获包裹体时主矿物周围的流体介质，如溶液、岩浆或气体。不包括介质中的碎屑物质，如晶体、晶屑或岩屑等。

（2）若包裹体所捕获的流体属过饱和溶液，由于温度降低，从中结晶出晶体，形成子矿物（如图1—1所示）。子矿物封存在包裹体中与气泡等共存，它被称作包裹体中的固相。

（3）主矿物是圈闭包裹体的矿物，它几乎与包裹体同时形成，即为含有包裹体的矿物。

（4）关于包裹体与主矿物之间相界限问题，在主矿物结晶生长过程中，由于 P 、 V 、 T 、 X （组分）发生变化，导致晶面、晶棱等处产生洞穴、裂隙等晶体缺陷，成矿流体滞留并被圈闭于其中。现在见到的包裹体外形轮廓，即为与主矿物的相界限。如流体包裹体主要由流体相组成，被封存之后，由于温度、压力下降，流体相中游离的气体被分离出

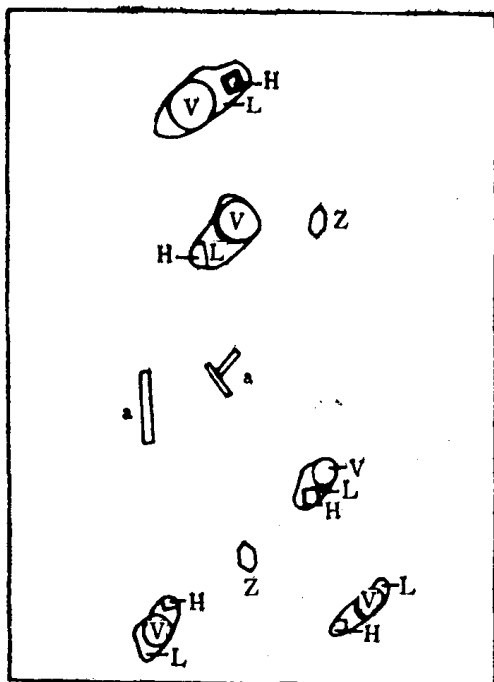


图 1—1 石英中所包裹的矿物、包裹体和包裹体中的子矿物示意图

包裹的矿物：Z为锆石；a为磷灰石；包裹体为气泡（V）、水溶液（L）和石盐（H）组成的多相包裹体，其中石盐为子矿物

来，在稳定的部位聚集成滚圆的气泡而形成气相。与此同时，由于温度、压力下降，主矿物冷凝成固相，现今见到的流体包裹体的外壁即为主矿物与包裹体二者固、液相之间的相界限。

（5）包裹体在主矿物结晶生长过程中被捕获之后，便不受外来物质的影响，它与主矿物有着相的界限，但成为独立体系，包裹体与主矿物共存，同时保留至今。

因此，人们总结出矿物包裹体是一定地质时期的成岩成矿流体的样品，矿物包裹体可自成为一个独立的地球化学体系的结论。

第二节 包裹体的形成机理

一、从均匀流体中晶出的矿物包裹体

在一个晶体的完整的结晶过程中，任何阻碍或抵制晶体生长的因素都可造成晶体缺陷，从而产生包裹体。大致有以下几种情况：

（1）晶面出现凹凸不平时会引起包裹体的形成，这是由于晶体的培养基供应不均匀，影响晶体的点、线、面均匀发育的结果。又分成两种情况：当晶体快速生长时，培养基供应充足处先生长，而供应较少或来不及供应处，则形成空洞，在一个晶面上则出现多孔的树枝状；当晶体慢速生长时，培养基供应不均匀，会形成多孔层与致密层相间，致密层暂时封闭培养基，从而捕获了包裹体（图1—2(a)），构成层状包裹体。这种情况在天然水晶和长石中是常见的。

（2）矿物结晶时一旦出现晶核，晶核部位便迅速生长，形成骨架状或树枝状微晶。这是过饱和溶液中容易形成的致密晶层，当过饱和程度降低时晶体生长缓慢，形成致密晶层的同时，捕获包裹体（见图1—2(f)）。

（3）矿物结晶时出现晶体隅角和晶棱生长较快，而晶面中心生长较慢时，晶面中心“饥

饿”状态会形成凹坑。这是晶体生长的培养基靠流体的流动或扩散供给的情况下产生的。在“饥饿”状态的凹坑中，充填成矿流体，可以形成二度空间的大的包裹体（图1—2(g)）。在天然水晶和石盐晶体中可见到此种成因的大的包裹体，在人工培养的晶体中也可见到。

（4）晶面弯曲和蚀坑中封存了成矿溶液，形成包裹体（图1—2(d)）。在晶体生长过程中，由于温度、压力或组分的变化，造成晶体停止生长，或发生部分溶（熔）解而产生蚀坑和晶面弯曲。而后，晶体又继续生长，在蚀坑中封存了成矿溶液。这种情况形成的包裹体，既可是单个的大包裹体，也可以是较小的包裹体带。

（5）晶体的生长螺旋，也可以是包裹体形成的原因之一（图1—2(b)）。例如合成水晶显示，在相邻的大生长螺旋之间，有时也在生长螺旋中心，常常形成流体包裹体。在绿柱石晶体中常有平行于C轴的细长管状包裹体，它是沿生长螺旋中心形成的。

如果某些螺旋比另外一些螺旋生长得快，则晶面粗糙，形成许多带角的凹沟，后来的生长层将它盖上，可形成负晶形包裹体。这种包裹体通常比较大，是孤立的或随机分布的。

（6）晶体是由平行六面体堆叠而成的。如果堆叠得不够平行时，则出现空隙，形成包裹体（图1—2(e)）。例如，Roedder（1972）介绍的带状紫色萤石晶体是由下向上，由亚平行的两个立方体生长而成的，这两个相邻的立方体生长的结果，倾斜相交，封闭而成楔形包裹体。

（7）晶面上的裂纹，导致晶体的不良生长，因而形成包裹体（图1—2(c)）。这种成因的包裹体比较普遍，因为在晶体形成过程中，由于应力不均，常常产生裂纹，在具有裂纹的晶面上继续生长，使这种损伤延续下去，并封存成矿溶液，形成包裹体。

（8）晶面杂质，外来的固体质点落在生长着的晶面上，可以形成包裹体。在天然矿物结晶过程中，由于溶液中携带的其它早形成的矿物颗粒，或围岩破碎的细小质点降落到生长着的晶面上，阻碍了溶质的扩散作用，影响了培养基对固体质点降落部位的晶面上的供应，因而停止生长。而晶面上固体质点以外的部分的培养基供应没有受到阻碍，继续正常生长。降落在晶面上的外来质点，或被推向生长前缘，或被新的生长层越过而掩埋起来。不论属于那一种情况，均可沿外来质点被推移的轨迹或掩埋不完整处，形成空腔，捕获母液，形成包裹体（图1—2(h)）。

（9）主矿物形成之后，由于晶体破裂形成的裂隙被浸泡它的介质所填充，而介质由于晶体愈合被封存起来形成的包裹体，称为次生包裹体。但是，在原生包裹体中有一种貌似次生包裹体的假次生包裹体。这种包裹体是在矿物的生长过程中，由于某种原因，晶体发生破裂，或形成蚀坑，成矿母液进入其中，经封存愈合形成的包裹体。由于晶体的继续生长，这种包裹体分布在晶体内部。因为它是沿愈合裂隙或在穿过多层晶带的蚀坑中分布，故有次生包裹体的分布特点，但这类包裹体在时间上是与主矿物同时形成的，其内含物与原生包裹体没有多大差别，因此称为假次生包裹体。假次生包裹体所捕获的流体，在化学成分上和热力学参数方面，具有与原生包裹体同样的价值，实际上属于原生包裹体一类。原生包裹体、假次生包裹体和次生包裹体的分布特点表示在图1—3上。

原生包裹体和次生包裹体保存了两种不同的浸泡主矿物的介质。原生包裹体因捕获的是形成该主矿物的母液，因此它的成分和热力学参数，反映了矿物形成的化学环境和物理化学条件的特点。而次生包裹体是在主矿物形成之后，捕获了与形成主矿物的流体无关的

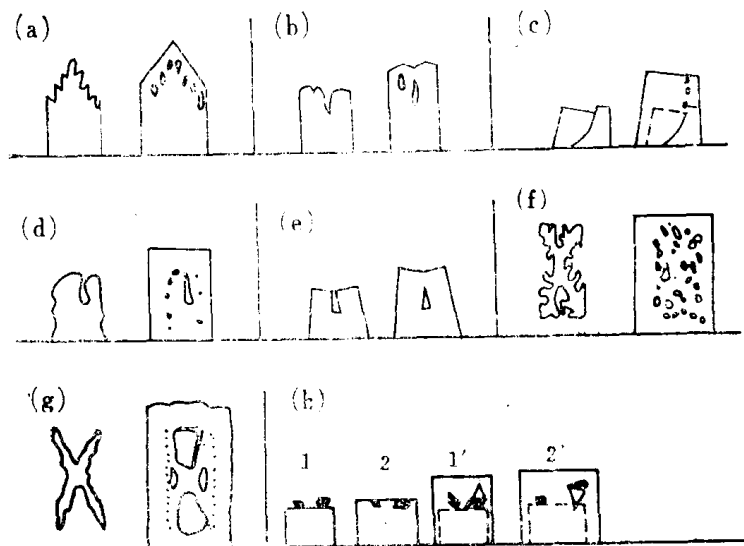


图 1—2 原生包裹体的形成机理 (根据Roedder, 1984; 图2—1补充而成)

(a)致密晶层覆盖了枝蔓状快速生长层,形成层状包裹体群;(b)在各生长螺旋之间或生长螺旋中心,捕获的包裹体;(c)晶面上的裂纹,导致晶体的不良生长,并捕获包裹体;(d)晶体部分溶(熔)解,产生蚀坑和弯曲晶面,因晶体的再生长,捕获的包裹体;(e)晶体结构单元的亚平行生长,捕获的包裹体;(f)因温度降低,岩浆对某相呈过饱和状态,但未能成核,当最后出现晶核时,则生长迅速,并形成骨架状或树枝状微晶,直至过饱和程度降低形成致密晶层,包围了它,形成包裹体;(g)晶体隅角和晶棱快速生长,形成凹坑,可以捕获大包裹体;(h)固体碎屑落在生长着的晶面上,固体碎屑或被包裹,或被推向生长前缘,因之形成的包裹体。

1.为在固体质点被生长着的晶面掩埋时形成的包裹体。2.为在固体质点被推移的轨迹上形成的包裹体

后期的流体,因此,它只能反映主矿物形成之后,经历过的化学环境和物理化学条件。因为它们具有不同的成因意义,如何正确区分它们,在包裹体研究工作中是非常重要的。可惜到目前为止,还没有绝对的判别标准。Roedder (1979)提出过区分流体包裹体成因的系统判据。但是正如他的评论那样,没有一种判据是绝对有效的。在他所列举的判据中,多数只能做为参考,使用时需要小心谨慎。

作者(1981)认为区别原生包裹体和次生包裹体的准则,归纳起来,主要有两条:其一根据包裹体的形状判别,原生包裹体的形状往往是规则的,并且常呈孤立产出,或沿主矿物的某一结晶方位分布;次生包裹体的外形,一般不规则,多沿愈合裂隙分布,并且有时愈合裂隙穿过不同的矿物。其二是同一成因的包裹体的密度、均一温度、盐度和成分等是相同的或近似的,因而可与已知的原生或次生包裹体进行对比和归类。

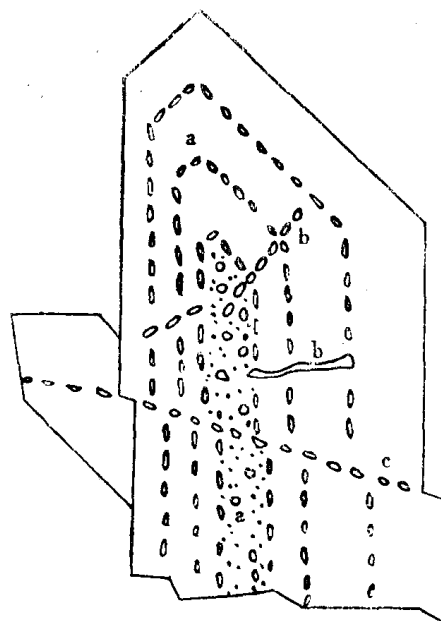


图 1—3 石英晶体中的原生,假次生和次生包裹体示意图

a为沿晶带分布的和散乱分布的原生包裹体;b为在石英形成过程中晶体发生裂隙及蚀坑,经愈合形成的假次生包裹体;c为次生包裹体,它沿愈合裂隙分布,裂隙穿过了相邻的晶体