

流体包裹体

地质学

中国地质大学出版社

主编：张文淮 陈紫英

• (鄂)新登字第 12 号 •

内 容 简 介

本书系统论述了流体包裹体地质学的基本理论、热力学基础和流体包裹体的主要研究方法。重点叙述了镜下研究,测温分析,温度、压力估算以及流体成分分析等方法,介绍了流体包裹体在矿床学、矿产勘查、岩石学、构造地质学、石油天然气勘查及天体演化等研究领域中的应用内容。

本书可作为地质类院校本科生、研究生的教学参考,也可供从事矿床学、地球化学、岩石学、构造地质学等地质工作者参考。

③ 流体包裹体地质学

主编 张文淮 陈紫英

出 版 中国地质大学出版社 (武汉市·喻家山·邮政编码 430074)

责任编辑 杨 勇 责任校对 徐润英

印 刷 湖北省人民大垸印刷厂

发 行 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 15.875 字数 404 千字

1993 年 12 月第 1 版 1993 年 12 月第 1 次印刷 印数 1—600 册

ISBN 7-5625-0885-2/P·304

定价: 7.40 元

前 言

70年代作者开始流体包裹体研究,1982年在武汉地质学院(现中国地质大学)开设“流体包裹体研究”课程,与此同时,作者自己动手因陋就简,从小到大,土法上马,由土到洋,建立健全了流体包裹体研究所需的测温、冷冻、成分分析和包裹体同位素等实验室。近十余年来地质科学飞速发展,大量现代尖端科学技术引进地学研究领域,流体包裹体研究亦取得了长足进展,渗透到地质科学的各个领域,得到了广泛的应用并取得众多令人瞩目的成果。作者试图将这些新成果进行系统概括,以满足教学和科研的需要,并为地学各分支学科的研究提供一些有益的资料。

本书论述了有关流体包裹体的基本理论,介绍了各种研究方法,书中着重介绍了流体包裹体在地质学各学科领域中的应用情况和实例。前两章概述了包裹体的特征、形成机制和地质意义;第三章概述了流体包裹体研究的相平衡理论;第四至第十章主要介绍了流体包裹体的研究方法,对流体包裹体单体成分分析技术和包裹体同位素年代学研究及新技术、新方法进行了介绍,以期开阔视野。第十一章到第十六章着重论述了包裹体在地学各领域中的应用及潜在应用前景。

本书由张文淮主持编写,具体各章编写分工如下:

前言、绪论、第一、二、九、十一、十二、十三和十五章张文淮;第五、七和八章陈紫英;第三和十四章徐启东;第四章张恩世;第六章刘伟、张文淮;第十章伍刚、张文淮;第十六章陈紫英、张文淮和伍刚。初稿完成后陈紫英统阅了初稿,最后全书由张文淮修改定稿。

本书对流体包裹体的初学者是一本入门介绍书,对从事流体包裹体研究的人员是有益的参考书。它有助于打破学科界限并为不同学科之间的相互渗透交叉提供条件。

夏卫华教授对本书的初稿进行了认真、系统的审阅,并提出了非常中肯的意见。

最后谨向给本书提供资料、意见和帮助的同志致以衷心的感谢。图件由我校绘图室张红波、陈思群、王香莲和熊莉负责清绘,在此一并表示深切谢意。

作者虽然从事流体包裹体教学、科研工作多年,但深感知识不足,书中不足和错误之处,敬请指正。

本书采用的缩写符号

L	——	液相
G	——	气相
S	——	固相
V	——	蒸汽相。
T	——	温度
p	——	压力
V	——	体积
V_v	——	气体体积
V_L	——	液体体积
ρ	——	密度
ρ_{TOT}	——	总体密度
ρ_L	——	液体密度
x	——	组分
F	——	充填度
T_b	——	均一温度
T_d	——	爆裂温度
T_m	——	熔化温度 (冰)
T_{mCO_2}	——	CO ₂ 熔化温度
T_{hCO_2}	——	CO ₂ 均一温度
T_i	——	捕获温度
p_i	——	捕获压力
T_e	——	共结温度
T_{fm}	——	始熔温度
$w_B\%NaCl$	——	盐度
CP	——	临界点
TP	——	三相点
H	——	石盐

注：书中温度单位全为℃。

目 录

绪论	(1)
第一章 流体及流体包裹体	(3)
第一节 流体相的重要性	(3)
第二节 流体包裹体	(4)
第三节 晶体生长与流体捕获	(6)
第四节 流体捕获后的变化	(9)
第二章 包裹体分类	(14)
第一节 从均匀或非均匀流体中捕获的包裹体	(14)
第二节 包裹体成因分类	(17)
第三节 包裹体物理相态分类	(18)
第四节 不混溶及原生、次生、假次生包裹体的鉴别	(21)
第三章 流体包裹体研究的相平衡热力学基础	(24)
第一节 流体包裹体研究的热力学前提	(24)
第二节 流体包裹体相律和等容线概念	(25)
第三节 主要流体体系的相平衡资料和相变分析	(27)
第四节 流体的状态方程与体积性质	(59)
第四章 包裹体的显微镜下研究	(68)
第一节 样品的采集	(68)
第二节 制样	(69)
第三节 光学鉴定	(78)
第四节 异常包裹体的鉴别	(78)
第五节 其他显微镜下鉴定技术	(80)
第五章 测温分析的理论基础	(83)
第一节 均一法测温	(83)
第二节 爆裂法测温	(88)
第三节 冷冻法测温	(90)
第六章 测温分析的主要仪器	(93)
第一节 主要仪器设备简介	(93)
第二节 温度校正	(104)

第七章 测温分析的方法和步骤	(107)
第一节 测温分析前的准备工作.....	(107)
第二节 测温的方法和步骤.....	(108)
第三节 密度的确定.....	(122)
第八章 测温数据的处理和解释	(123)
第一节 数据的处理和表达.....	(123)
第二节 数据的解释.....	(126)
第九章 流体包裹体温压计	(132)
第一节 压力估算.....	(132)
第二节 利用不同流体体系求压力的方法.....	(138)
第三节 其他温-压测定法.....	(143)
第四节 压力校正.....	(154)
第十章 包裹体成分分析	(157)
第一节 包裹体成分分析的特殊性.....	(157)
第二节 包裹体单体成分分析.....	(158)
第三节 包裹体群体成分分析.....	(163)
第四节 包裹体同位素分析.....	(170)
第十一章 流体包裹体在岩石学研究中的应用	(174)
第一节 岩浆成岩作用与熔融包裹体.....	(174)
第二节 沉积成岩作用与流体包裹体.....	(180)
第三节 变质作用与变质岩中流体包裹体.....	(183)
第十二章 有机包裹体及其在油气藏研究中的应用	(190)
第一节 有机包裹体类型.....	(190)
第二节 有机包裹体的主要鉴别特征.....	(191)
第三节 研究有机包裹体的意义.....	(192)
第四节 油气资源远景评价.....	(194)
第十三章 包裹体在构造地质学中的应用	(199)
第一节 与构造有关的流体包裹体.....	(199)
第二节 从流体包裹体中可以获得的构造物理-化学信息.....	(199)
第三节 流体包裹体在构造研究中的应用.....	(200)
第十四章 流体包裹体在矿床学研究中的应用	(205)
第一节 概述.....	(205)

第二节 重要矿床类型的流体包裹体特征.....	(208)
第十五章 包裹体在找矿评价中的应用.....	(223)
第一节 利用包裹体参数直接进行找矿评价.....	(223)
第二节 包裹体地球化学探矿法.....	(225)
第三节 间接找矿方法.....	(231)
第十六章 包裹体在其他地学领域中的应用.....	(234)
第一节 地外包裹体.....	(234)
第二节 幔源包体中的包裹体.....	(237)
第三节 包裹体在宝石鉴定中的应用.....	(239)
第四节 发展和应用前景.....	(240)
主要参考文献.....	(241)

绪 论

随着现代高新科学技术的引进,地质科学近几十年来取得了很多重要成果,发生了深刻的变化。流体包裹体研究也不例外,其研究范围空前扩大。目前不仅可以对包裹体群体进行分析测试,而且可以对单个包裹体进行系统研究和测定,并取得高精度数据。可以对包裹体所给出的资料进行各种数学处理和物理化学的理论解释,为认识复杂的地质作用提供极为重要的定性和定量证据。

我国是世界上最早认识流体包裹体的国家之一。我们的祖先很早就发现了矿物晶体中存在的包裹体,并且利用水晶玛瑙中的流体包裹体加工雕刻成各种精美的工艺品。北宋著名科学家沈括(1031—1095)在《梦溪笔谈》中曾对水晶中的包裹体进行了如下描述:“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’”。19世纪初期,国外博物馆工作人员对标本中大的可见流体包裹体表现出了极大的兴趣。1822年H. Davy和D. Brewster(1823)等对发现的包裹体进行了初步分析测试,测定了捕获流体的折射率。英国学者H. C. Sorby(1858)出版了一本名著《晶体的显微结构和矿物、岩石的成因》。当时,H. C. Sorby观察到石英、水晶、黄玉和绿柱石中的包裹体,并且提出,包裹体中出现的小气泡,是冷却到室温过程中流体和主矿物之间差异性收缩所致,据此提出了包裹体温度计原理。但由于当时工业发展的限制以及普遍存在的某些模糊认识,在半个多世纪的时期内,流体包裹体的研究处于停滞状态。

20世纪中期,特别是第二次世界大战以后,苏联学者H. П. Ермаков(1950)发表了《成矿溶液的研究》一书,他第一次系统地、详细地阐述了流体包裹体研究的理论基础、测温的原理和方法以及流体包裹体在地质上的应用。

加拿大多伦多大学的F. G. Smith和H. S. Scott在1948年设计制造了包裹体热爆裂仪,使不透明矿物的温度测定成为可能。以上进展推动了矿物中流体包裹体的研究工作。

60年代后期,H. П. Ермаков、G. Deich、E. Roedder等人创建了“成矿流体包裹体委员会(COFFL)”并在国际地质大会期间发起成立了流体包裹体的特别会议,从此流体包裹体研究在全世界广泛范围内普遍兴起。

70年代以后,流体包裹体研究蓬勃发展,趋于完善,流体包裹体研究现已成为地球科学中一个重要分支学科。据统计,到目前为止,已发表的5000多篇关于流体包裹体的论文中,3000余篇是1971年到1980年期间发表的。流体包裹体研究的领域大大拓宽,方法手段更趋完善,理论上也取得了很大的进展,具体表现在下列几个方面。

(1) 流体包裹体研究已进入岩石学的各个领域,形成了包裹体岩石学方向。对陨石、地幔岩、沉积岩、火成岩和变质岩中包裹体的系统研究,是当前岩石学研究中的重要课题。

(2) 包裹体研究解决了不少矿床学方面的重要问题,提出了许多矿床形成模式。特别是近年来开展的单个包裹体的成分测定、包裹体中稳定同位素测定和同位素年龄测定等,使我们可以通过流体包裹体研究探讨矿床成因、成矿条件、沉淀机制、成矿物质来源、成矿时代、

流体演化以及水-岩交换等问题。

(3) 现代分析测试方法和技术的引进,使流体包裹体研究更为精确。例如,中子活化、透射电镜、离子和电子探针、离子色谱、质谱、激光拉曼光谱、激光束与其它仪器的联合以及电子计算机等的应用,大大拓宽了包裹体的研究领域。特别是目前单个包裹体成分的测定使包裹体研究取得长足进步,提高了包裹体研究的精确性。

(4) 流体包裹体的理论研究亦取得了新的进展,例如对溶液不混溶性的认识、不混溶包裹体的鉴别以及不混溶性与成矿关系的研究等丰富了成矿理论。同时也为岩浆到溶液的演化提供了新的佐证。

(5) 利用流体包裹体资料进行找矿和矿体深部预测。

在我国,流体包裹体研究始于60年代,先后在中国科学院、冶金部、地矿部和教委等科研院所、高等院校展开。1977年召开了全国第一届矿物中流体包裹体和成岩成矿学术会议。随后全国很多单位相继建立了实验室,并对各种矿床进行了流体包裹体研究,取得了大量成果。目前很多单位建立了包裹体测温、成分分析和同位素测定等一系列实验室。同时全国范围内出版发行了一批有关流体包裹体的著作和译著,推动了我国流体包裹体研究的深入开展。目前,我国流体包裹体研究工作与国际先进水平仍有一定差距,特别是对单个包裹体的测试技术,尚未广泛进行。对包裹体形成机制、基本理论、变质岩及沉积岩中流体包裹体的研究、包裹体年代学研究等方面也存在一定距离。我们应立足本职,瞄准前沿,努力赶上世界先进水平。

第一章 流体及流体包裹体

第一节 流体相的重要性

在地质作用过程中, 流体相所起的作用或它们所扮演的角色是近年来地球科学研究的一个重要课题 (Fyfe, 1979)。现在人们已普遍认识到, 虽然流体在地壳中所占比例不大, 但是它对岩石的组成及其特性有着极为重要的影响。流体相是地壳岩石中经常性的组分, 在大陆 8~10km 的深度范围内, 地下水的总量平均为岩石重量的 3%~5%。

地表水易于取样, 也便于研究, 地壳深部和上地幔存在的流体, 仅在现代火山地热区以及某些探查和研究的深孔中方可获得。流体包裹体分析研究是认识古代地壳流体、下地壳和上地幔等深源流体, 最直接、最方便的办法。

流体相通常被称为“岩石中的挥发组分”, 它们是岩石中最活跃、最积极的一部分, 它们在各种地质作用中起着十分重要的作用。

一、成岩作用

沉积成岩作用是在大气条件下的各种水体中发生的, 流体相是溶剂, 又是搬运和沉淀的介质。沉积物质在流体的参与下, 发生物理的和化学的分异作用, 从而形成各种不同的沉积岩和沉积矿产。例如在流体动力作用下, 随着动能由强到弱的变化, 沉积碎屑物质产生由重到轻、由粗到细的变化。溶液也由于 pH、Eh、 T 、 p 和组分变化而发生化学分异, 由盆地边缘到盆地中心形成氧化物→碳酸盐→硫酸盐和硫化物等序列沉积。另外一方面, 在沉积成岩过程中, 由于压实和深埋, 使得温度、压力发生变化, 流体和固体物质相互作用产生交代置换、重结晶、次生加大甚至形成新矿物。

岩浆熔体本身就是一种高温、高粘度的复杂流体相。岩浆结晶分异过程, 就是这种高温、高压、高粘度流体在不同环境下的物理化学演化过程。

变质作用与流体的参与有着极其密切的关系。变质作用可以是固相到固相的直接转变, 也可以是固相+流体相→固相的变化。研究表明, 大量的变质作用是在有流体相的参加下进行的。变质作用过程中可以使矿物和岩石释放出其中所含的大量流体, 如层间水、裂隙水、晶间水和结晶水。粘土矿物含水 8.5%, 变质形成页岩后, 含水 5%, 继续变化形成片岩类岩石则含水仅 2%。经计算, 1km³ 粘土岩变成长石类岩石, 可释放出几千万吨至 1 亿吨的水。

综上所述, 在各种成岩作用中流体的参与是必然的, 也是十分重要的, 没有它们的加入, 不能形成如此复杂壮观的地质现象。

二、构造活动

在构造活动中, 是否存在流体相的作用? 回答是肯定的。这已为大量地质现象和实验资料所证实。在构造应力作用下, 岩石、矿物不仅发生各种物理变化, 即构造变形, 而且会发

生各种化学变化和物质交换。例如构造应力作用下的压溶作用、矿物岩石的变质脱水作用(或脱挥发分作用),都会释放出流体。构造作用在流体相的参加下产生了物质的活化迁移和重新分配。

三、成矿作用

几乎所有矿床的形成都与流体相的作用有密切关系。各种热水溶液和硅酸盐熔融体,它们既是成矿介质又是溶剂,溶解、搬运各种组分,最终在合适的环境和条件下沉淀聚集形成矿床。近年来的研究证明,在地表以下8~10km范围内,地下水总量平均占岩石重量的3%~5%,绝大多数金属矿床是在这样的深度内形成的,因而至少部分地下水不可避免地参与了金属矿床的成矿作用。

从上述简要阐述中不难看出,一切地质事件,如果没有流体相的参加,是难以想象的,流体与地质事件有着十分密切的关系。流体包裹体正是地壳中曾经发生的地质热事件的代表,是古代流体的样品。

第二节 流体包裹体

自19世纪中期Sorby等人在石英、黄玉等矿物中发现包裹体并提出包裹体形成的基本理论以来,人们对它进行了深入细致的研究。矿物中流体包裹体有了较全面而科学的定义。由于它们保存完好,成为今天人们研究和探索天体演化、构造变动和成岩成矿等作用的重要线索。

一、矿物中流体包裹体的定义

广义地说,矿物中的包裹体是指矿物中所包含的各种物质。矿物中的流体包裹体,特指的是那些被矿物捕获时呈流体相而不是固体相的那部分物质。

流体包裹体是成岩成矿溶液(硅酸盐熔融体)在矿物结晶生长过程中,被捕获在矿物晶体缺陷、空穴、晶格空位、位错及微裂隙之中,而且至今尚在主矿物中完好封存并与主矿物有着相界限的独立封闭体系。在室温下,流体包裹体由一相、二相甚至多相物质组成。

所谓主矿物,就是在成岩成矿介质中结晶生长并捕获了流体形成包裹体的矿物,即含有包裹体的矿物。成岩成矿溶液指的是正在晶出主矿物和浸泡已晶出的主矿物的溶液介质,如液体、气体或硅酸盐熔融体,因此流体包裹体几乎是和主矿物同时并由相同物质形成的。流体包裹体不包括介质中的碎屑物质,如已晶出的矿物晶体、晶屑或岩屑等物质。

流体包裹体与主矿物之间的相界限,就是指目前看到的包裹体的外形轮廓线。在此轮廓线中包含的是液相、气相、有时尚有固相的物质,它们与主矿物明显不同。

流体包裹体是在主矿物结晶生长过程中被捕获在晶体缺陷之中的,流体充填或滞留在晶体缺陷中以后,又立即为继续生长的主矿物所封闭,因此包裹体基本上不受外来物质的影响,也基本上没有物质泄漏出来,体积基本不变,因此流体包裹体是原始成岩、成矿溶液或岩浆熔融体的代表。

二、包裹体研究的基本原理

流体包裹体地质学是建立在流体物理化学、流体热动力学、结晶学和矿物学等基础理论

之上的一门学科。包裹体研究建立在下述三个基本理论假设基础之上。

(1) 包裹体形成时, 被捕获的流体是均匀体系, 也就是说, 主矿物是在均匀体系中生长的。

(2) 充填(滞留)在晶体缺陷中的流体为主矿物封闭, 形成独立的封闭体系, 没有外来物质的加入和内部物质的逸出。

(3) 包裹体形成后, 体积基本恒定不变, 保持等容体系的特点, 因而可以利用各种与之有关的物理化学相图。

一般认为, 只有符合上述基本假设, 包裹体研究和测试的结果才是有效和可靠的。实际工作时判断它们是否符合上述三个基本理论假设, 是一个十分复杂的问题。

我们经常利用流体包裹体中物相种类和相比比例来判别原始流体是否为均匀体系。对于气液相包裹体来说, 在一组同时形成或成因相同的包裹体中, 它们的物相和相比比例是相同或相近的, 据此, 可以认为它们是从原始均匀的流体中形成的。但是硅酸盐熔融包裹体有一定特殊性, 即使是从均匀体系中捕获的一组包裹体, 其物相种类和相比比例也可以不同。区分包裹体是从均匀流体还是从非均匀流体中捕获的问题, 是解释包裹体测温资料的前提。对于从非均匀流体中捕获的包裹体的特征、地质意义将在本书第二章论述。

关于包裹体形成后是否有物质的加入和渗漏问题, E. Roedder 认为, 除了遭受过破裂和变形的岩石以外, 渗漏情况不多见, 这在很大程度上取决于包裹体形成后其周围有无微裂隙存在。在变质岩中, 由于自然爆裂, 包裹体所含流体可以全部或部分漏失, 流体进入周围微裂隙, 形成卫星状次生包裹体群。大包裹体通过“卡脖子”(颈状收缩)形成几个小包裹体是包裹体形成后物质发生改变或相比比例发生变化的一种特殊情况。对发生过“卡脖子”现象的包裹体, 所测均一温度一般没有意义, 因为一个大包裹体由于“卡脖子”而分裂成几个大小不同的小包裹体时, 相比比例是不相同的, 因而测出的均一温度也就各不相同。

总之, 随着包裹体研究工作的深入开展, 流体包裹体形成的基本理论亦将不断发展, 定能深化和充实对成岩成矿作用的认识。

三、包裹体存在的必然性和普遍性

从上述流体包裹体定义可知, 流体包裹体在矿物晶体中出现是必然的、普遍的, 因为世界上完美无缺的晶体是不存在的。已有资料表明, 不论矿物的颗粒大小、种类、透明或不透明, 也不论矿物是天然的还是人工合成的, 它们当中都有流体包裹体存在。近代科学研究还证实, 不仅在地球上所有矿物中存在包裹体, 而且在其他星球的各种矿物中也发现了包裹体。

大于几毫米的包裹体, 肉眼就能辨别, 但大多数包裹体小于 0.1mm, 只能借助适当的光学显微镜才能清楚地观察到它们。显微镜下能看到的包裹体, 一般介于几微米到几十微米, 小于 1 微米的包裹体在矿物中也是经常存在的。在单个晶体中, 流体包裹体的总数可以达到晶体总体积的 0.1%。据估计, 在乳白色的石英中, 包裹体可以高达 10^9 个/cm³。自然界中, 最常见含流体包裹体的矿物有: 石英、萤石、石盐、方解石、磷灰石、白云母、闪锌矿、重晶石、黄玉、锡石。长石类矿物中流体包裹体既小且少, 一般不适合于进行研究。但在快速冷却的火山岩中, 长石晶体可出现良好的硅酸盐熔融包裹体。

四、包裹体形成机理

在任何种类的流体介质中, 矿物结晶生长或重结晶时, 由于矿物晶体的不规则生长, 必

然会产生各种晶体缺陷，少量介质流体贯入这些缺陷之中，并被封存形成流体包裹体。世界上完美无缺的理想晶体在自然界未曾见到，即使在最严格的实验条件下，也不可能产生。任何一种干扰完整晶体生长的作用，都可造成晶体缺陷的产生，从而导致包裹体的形成。流体包裹体的形成机理，就是晶体生长（或矿物重结晶）过程中缺陷形成、流体贯入和晶体继续生长封闭的全过程。

正确确认流体包裹体的成因和形成机制，是有效地解释包裹体压力、温度、体积、组分资料的关键。近年来研究资料表明，并非所有的包裹体都是在均匀流体中形成的。在某些情况下，包裹体是在两个或更多流体相的不均匀体系中形成的。从均匀流体中形成的包裹体称“正常包裹体”，从不均匀体系形成的包裹体称为“异常包裹体”。这两类包裹体的区分，对解释地质现象有着重要作用。

第三节 晶体生长与流体捕获

流体包裹体是在矿物生长过程中捕获成矿介质而形成的。要了解包裹体在矿物中形成的机理，首先要了解晶体在介质中生长的过程和晶体中各种缺陷形成的原因。

一、矿物生长介质

绝大多数矿物是从熔浆或各种热水热液中结晶而成的，因此熔浆和热水溶液是大多数矿物生长的介质（或母液）。

熔浆也是一种热流体，但它组成复杂，温度高，粘度大。熔浆主要是由各种硅酸盐、挥发组分和重金属组分等所组成。粘度大是熔浆与一般热流体的重要区别特征之一。岩浆的粘度与成分、温度、压力和挥发组分的含量关系密切。一般情况下， SiO_2 含量越高，粘稠度越大，所以基性岩浆粘度较小，酸性岩浆粘度最大，流速最慢。挥发组分的含量越高，熔浆的粘度就越小。

流体是气体和液体的总称。液体多数情况下不是纯水，而是含有多种溶质的盐水溶液。

二、晶体的理想生长过程

矿物晶体在上述不同介质中晶出的过程，就是物质从气相、液相和硅酸盐熔融体相转变为结晶的固体相的过程，实质上也就是质点从不规则到规则排列的过程。在此过程中，质点的堆砌方式是遵循着一定规律的。

理想的情况下，成矿溶液或岩浆硅酸盐熔融体由于温度下降达到过饱和时，介质的质点按一定规律聚合成微小晶核或晶芽，形成结晶中心，然后长成晶体。

一般情况下，晶核形成后质点按晶体结构不断向晶核上粘附使其不断生长。质点首先粘附到具三面凹入角的部位（图 1-1 中的 1 位置），该位置对质点的吸引力最强，能使晶体释放出最多的能量，达到晶体内部能最低状态。然后粘附在两面凹入角部位（图 1-1 中 2 的位置）。最后是无凹入角的一般位置（图 1-1 中的 3 位置）。晶体的理想生长过程是在晶芽基础上先长满一层面网，再长

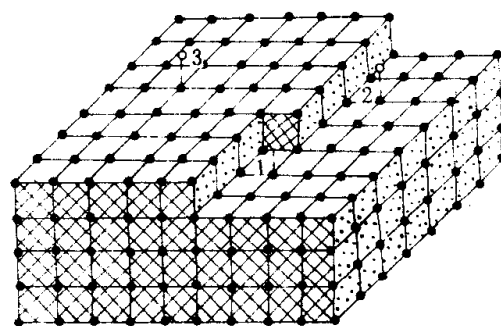


图 1-1 晶体理想生长过程中质点堆积顺序图解

相邻的一层，逐渐向外平行推移。每两个相邻的面网相交的公共行列即为晶棱。整个晶体为晶面所包围形成结晶多面体。

三、晶体缺陷

晶体生长不仅与成岩成矿溶液本身的物理化学体系及相互间的复杂作用有关，而且与外界的温度、压力和应力等关系也十分密切。晶体生长往往是在封闭或相对封闭体系中进行的，生长的时间长短很不一致，有时可长达 10^6 — 10^9 a。晶体生长后仍然会经受许多物理化学作用的影响。

在整个地质作用过程中，晶体生长往往偏离理想条件而受客观环境的影响，使晶体结构局部范围内产生某种形式的缺陷。这些晶体缺陷按空间上延伸的状况可以分为：

- (1) 点缺陷：晶格空位、间隙原子、杂质原子等；
- (2) 线缺陷：位错；
- (3) 体缺陷：空洞、裂隙等。

晶体生长过程中的上述多种缺陷与包裹体的形成密切相关，特别是体缺陷，它们是捕获成岩成矿介质最主要的空间。点状、线状缺陷在晶体生长过程中亦可溶解、扩展、浸蚀，从而形成体缺陷。

四、晶体缺陷产生的原因

矿物结晶时的物理化学条件千差万别，因此导致形成晶体缺陷的影响因素也是多种多样。下面简述几种主要影响晶体生长的因素。

(一) 介质浓度

各种矿物都是在一定的温度、压力和浓度的成岩成矿溶液中生长的。在生长过程中各种物理化学参数不断变化并相互制约：温度下降，可使介质的浓度发生变化，溶液过饱和度增加。在通常情况下，溶液过饱和度的增加会促使晶体生长速度加快，产生带有凹入角的枝蔓状形式生长。晶体生长研究亦已证明，在溶液中，甚至某些非常次要的组分浓度，也能极大地影响晶体生长的完美性。

(二) 晶体各部位生长的不平衡

晶体生长时，介质对生长面的补给不论是通过流体的质量流动，还是通过流体的扩散作用，在晶体的横切面不同部位，都会存在溶液浓度的差异（梯度）。一般在晶棱和角顶部分容易得到溶质的供给，而在晶面的中心部位，则溶质供应相对不足，处于“饥饿状态”。正如 Wilkins (1979) 指出的那样，在稳定的生长条件下，晶体角顶的过饱和度最大，晶面中心最小。因此两者生长速度不一致，导致晶棱、角顶形成较大的凹坑，成为捕获成矿溶液（或成岩熔体）最有利的空间（见图 1-2g）。

(三) 晶体的不规则生长

正在生长的晶体上裂隙的形成，往往导致晶体以后的不规则生长，并且在裂隙上形成新的缺陷，捕获流体而形成包裹体（见图 1-2c）。大多数晶体在生长过程中产生大量不规则结构，如镶嵌结构、螺旋位错以及晶簇中各个晶体的随机取向等，这些结构在晶体生长过程中形成各种形态的空隙，它们是形成包裹体的重要原因。

显微镜鉴定表明，流体包裹体经常在两个相邻的大的螺旋形之间或螺旋形中心被捕获（图 1-2, b），例如绿柱石晶体中常见的细长管状近于平行 c 轴的包裹体（见图版 I-1），就是

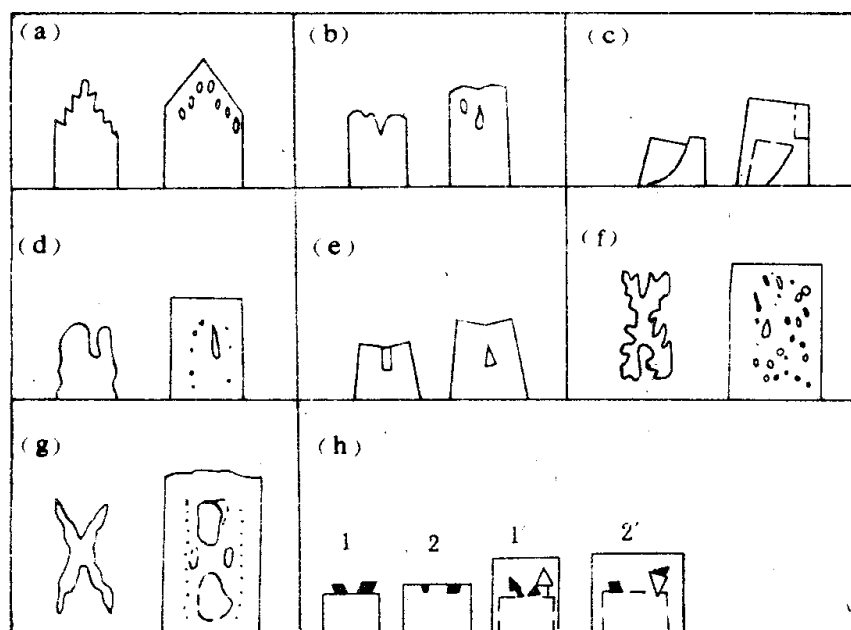


图 1-2 原生包裹体的形成机理 (根据 Roedder (1984) 图 2-1 补充而成)

(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转迹上形成的包裹体

这种原因形成的。如果一些螺旋生长比其他螺旋形生长速度快, 则晶体表面就会变得粗糙, 形成许多凹入角, 随后的生长覆盖了这些凹入角, 可以形成负晶形空腔 (常见的负晶形包裹体)。

(四) 晶体生长间断

晶体的生长过程是长期的, 有时可能是多阶段的。生长条件的某种暂时中断和变化, 亦可导致形成晶体缺陷。例如早期形成的晶体, 由于间歇再生长, 致使晶面被溶解、浸蚀形成蚀坑, 成岩成矿溶液可再度充填, 在一些较深的凹陷坑中可捕获流体, 形成沿晶面分布的流体包裹体 (图 1-2d)。

(五) 固相物质及杂质的影响

固体物质或杂质附着在正在晶出的晶体上, 是形成晶体缺陷的原因之一 (图 1-2h)。由于固体物质的存在, 阻碍了成矿溶液的流动, 成矿流体绕过固体物呈流线式运动, 固体物后方溶液流速减慢, 流动不平衡, 形成缺陷并贮藏成矿溶液。

(六) 温度压力条件的影响

温度压力等物理化学条件的改变, 也是造成晶体缺陷和空穴的重要原因之一。温度压力的变化将引起溶液的溶解度、浓度、饱和度以及结晶速度等发生一系列变化, 从而造成晶体的不规则生长和缺陷的形成, 导致产生大量的包裹体 (图 1-2i, f)。

第四节 流体捕获后的变化

流体进入晶体缺陷，形成包裹体后，就会产生各种变化，有时甚至识别不出它的原始特征。这一节主要讨论流体捕获后发生在包裹体中的各种物理和化学的变化，以及这些变化在包裹体研究中的意义。大多数包裹体形成后都会发生变化，与捕获时有明显的差异。在高温下捕获的均匀流体，由于温度（压力）的下降将发生相变。这种相变化在实验室条件下，通过反向重演（即逆向变化），可以给出原始捕获时的压力、温度、组分条件。由于某些物理变化在实验室条件下不能恢复，成为不可逆变化，因此研究这种包裹体需特别小心，它们在很大程度上影响了所得压力、温度、组分数据的可靠性。

一、相变

少量流体被封闭在主矿物的空腔中以后，包裹体的相组合和物理性状就可能发生变化，其中相组合的变化，可以为我们提供晶体生长时介质溶液的压力、温度、组分等数据。通常最初捕获的是单一的均匀相流体，随着温度、压力等条件的变化，室温下往往成为多相的包裹体。在包裹体中所有出现的新相统称为子相，如新相是结晶质的，则称为子晶（或子矿物）。

（一）包裹体壁上的结晶作用

包裹体壁上的结晶作用常由于看不见而被忽视，但这却是普遍存在的“子相”形式。透射电镜研究证实，包裹体腔壁并不平坦光滑，其上附着了许多矿物微粒。这是因为大多数固体物质的溶解度随温度的升高而增加，因此，在高温下捕获的流体包裹体，由于温度下降，溶解度降低，从而使其中的某些组分浓度增加。首先是那些和主矿物成分相同的组分逐渐富集达到过饱和，并以包裹体腔壁为生长点，结晶出主矿物的微粒，粘附在包裹体壁上。在水溶液包裹体中，这种包裹体腔壁上晶出的主矿物微粒十分微小并且数量不多，通常难以观察。这是因为这些水溶液一般温度不高，在这样不高的温度条件下，大部分矿物的溶解度已经很低了，因此在冷却至室温时包裹体壁上再结晶现象不明显。

硅酸盐熔融包裹体，上述再结晶现象非常普遍，由于熔融包裹体原始捕获时温度很高，因此冷却时在包裹体壁上可沉淀出大量的主矿物微小颗粒。对硅酸盐熔融包裹体加热，可以观察到腔壁上的溶解变化。图1-3表明，子矿物c一端深埋在包裹体壁中，另一端在硅酸盐熔融体内自由生长。这种现象最好地解释了包裹体壁上的结晶作用。和主矿物成分一致的子晶在包裹体壁成核并不断生长形成衬里。子晶c在壁上成核后不断向内生长并嵌入主矿物的衬里中。由图可知，原始包裹体壁为x，衬里厚度为z，包裹体边界x因折光率与主矿物相似往往不清楚。

（二）冷却收缩形成气泡

包裹体中所含的流体（或熔体），在冷却过程中，由于大多数流体的热膨胀（或冷却收缩）系数比多数固体矿物热膨胀系数大1~3个数量级，所以从捕获温度下降到室温时，包裹体中流体的收缩系数要比主矿物大得多。由于冷却收缩形成空腔致使流体压力下降，从而使气相由液体中分离出来形成气泡。如果包裹体中的溶液是不易挥发的水溶液，那么气泡的蒸气压很低。如果捕获的是易挥发物质（如 CO_2 、 CH_4 等），则挥发组分容易集中在气泡中。如

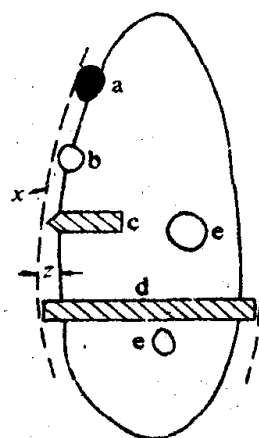


图1-3 捕获后，硅酸盐熔融包裹体壁上主矿物层（衬里）的结晶作用（根据Roedder, 1984）

分离出来的 CO_2 气体密度足够大, 那么冷却时, 可以形成 CO_2 液相和 CO_2 气相。通常 CO_2 液相和气相两者的分离是在温度低于纯 CO_2 临界温度 (31.1°C) 时发生。由于有其他气体或物质混入 (如 N_2 、 CH_4 等), 那么 CO_2 的临界温度往往低于 31.1°C 。

硅酸盐熔体热膨胀 (冷却收缩) 系统比水溶液小得多, 因此尽管熔体冷凝温度的区间比水溶液要大得多, 但一般收缩气泡不大。如果捕获的是不含挥发组分的硅酸盐熔体, 那么形成的气泡实际上则是近于真空的空腔。

(三) 不混溶

某些天然流体在冷却过程中可能有少量新的流体相从包裹体溶液中分离出来, 这种新的流体与周围流体不同, 互不混溶。如果分离出的是密度很大的 CO_2 , 则可形成气相 CO_2 、液相 CO_2 和盐水溶液的三相包裹体。

硅酸盐熔体包裹体在冷却时也可能产生不混溶现象。当硅酸盐中铁的硫化物达到饱和程度时, 硅酸盐中可能形成硫化物的球滴, 即在熔浆包裹体中, 除产生气泡外还凝聚了硫化物的小球滴。这些硫化物球滴中富含 Cu 和 Ni, 这一发现为岩浆硫化物矿床的形成提供了重要线索。

富含挥发组分的硅酸盐熔体包裹体, 在降温过程中亦可因不混溶性而形成几种流体相。它们是硅酸盐熔体、富 CO_2 流体、盐水溶液和其他气体。特别是在高压条件下, 熔浆中可以溶解 H_2O 和 CO_2 , 而且 H_2O 的溶解度大于 CO_2 的溶解度。因此, 在熔浆结晶的早期, 可以分离出 CO_2 流体, 而晚期 H_2O 可从熔浆中分离出来。

(四) 子矿物 (daughter Mineral)

在温度下降过程中, 包裹体中所含流体除和主矿物成分相同的组分过饱和外, 还可出现其他组分的过饱和状态。当某一组分达到饱和后, 则可在包裹体内成核, 形成新的晶体, 这种晶体称为子矿物 (或子晶)。实验室加温时, 易溶的子矿物会在流体中溶解。子矿物完全溶解时的温度称为熔融温度, 用 T_m 表示。这个温度值可给我们提供原始流体成分的信息。

最常见的子矿物是立方体石盐, 其次有钾盐、碳酸盐、氧化物、硅酸盐、硫酸盐和硫化物等矿物。子矿物的鉴定有重要意义, 因为它可提供最初捕获的流体成分的资料。

在气水溶液包裹体中如果有多个子矿物, 一般每一个子矿物代表一种组分。这是因为: 第一, 从捕获温度到室温, 多数样品经历了非常缓慢的过程, 这个冷却期可以延续数百万年 (Hollister *et al.*, 1979), 在如此充裕的时间内, 只要溶液中某一组分略有过饱和, 则在包裹体内就能形成晶核; 第二, 若某一组分有几个晶核同时形成并生长, 但由于包裹体空间有限, 并且存在有效的低粘度溶剂 (溶液), 在漫长的地质时间内, 较大的子晶可以“吃掉”较小的子晶形成最稳定状态。有时在溶液中也会出现某一组分的多个子矿物 (如多个 NaCl 子矿物), 这种现象的原因目前尚不清楚, 但是这种现象是很少出现的。

气水溶液包裹体中, 子矿物的大小与包裹体的体积成一定比例, 这是鉴别真假子矿物相的标志。在一给定地区, 大量包裹体中含有某些子矿物, 而且子矿物与包裹体的体积比基本相似, 那么可以确定这是溶液被捕获后因冷却过饱和而晶出的子矿物相。相反, 如果是偶然捕获的早期析出的晶体或其他固体碎屑, 它们与包裹体的体积比是不定的, 因为包裹体的体积与所捕获的固体没有必然联系。

硅酸盐熔体包裹体与气水溶液包裹体不同, 硅酸盐包裹体中子矿物的出现很不稳定, 而且同一组分常呈多晶产出。特别是喷出岩中的硅酸盐熔体包裹体, 由于冷却速度快, 不允许熔体中小的子矿物晶体合并。另一方面, 也因为硅酸盐熔体粘度高, 成核和流动受到严