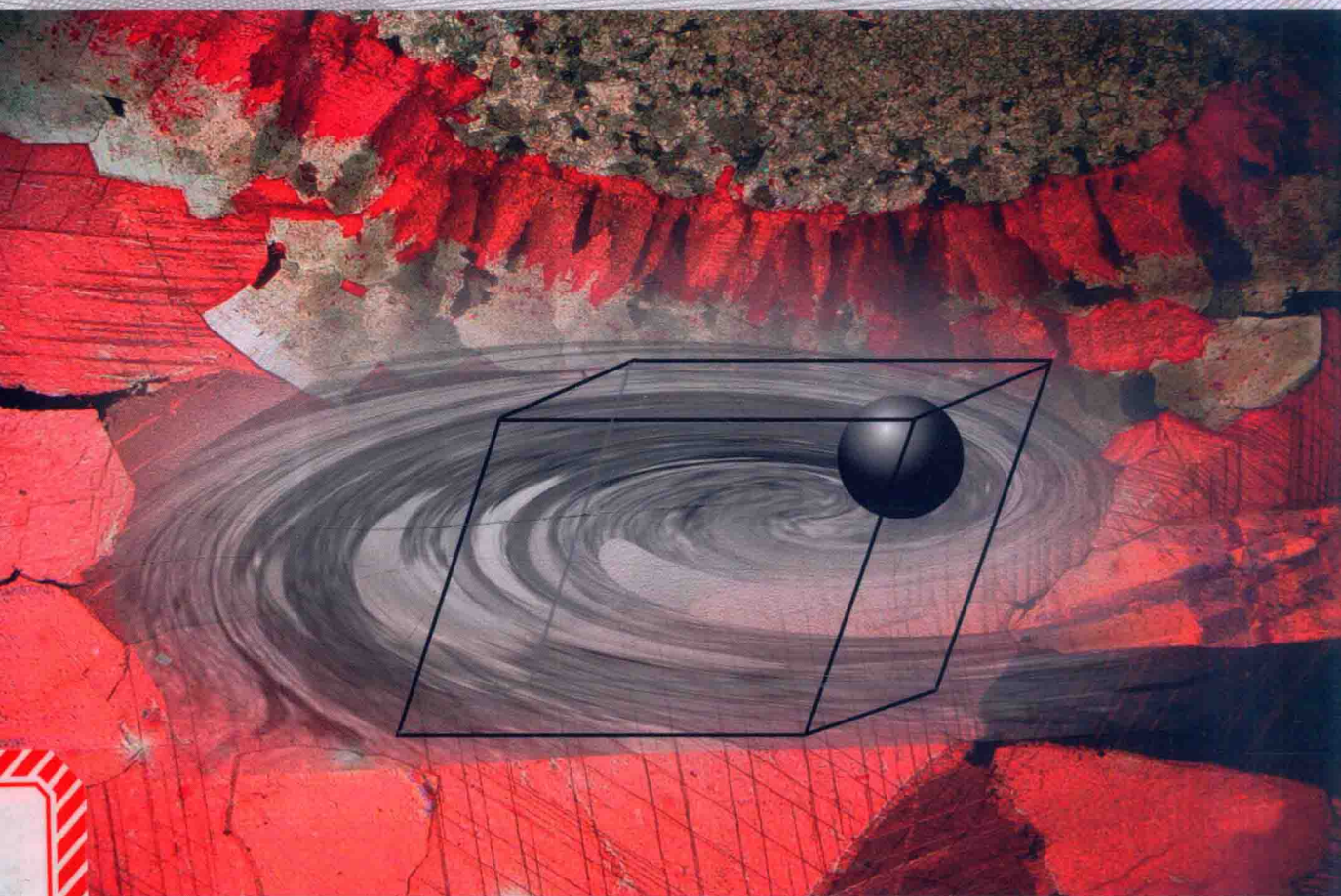


SYSTEMATICS OF FLUID INCLUSIONS IN
DIAGENETIC MINERALS

成岩矿物中的 流体包裹体

[美] Robert H. Goldstein T. James Reynolds 著
潘立银 韦东晓 王小芳 译
沈安江 审校



石油工业出版社

成岩矿物中的流体包裹体

[美] Robert H. Goldstein T. James Reynolds 著

潘立银 韦东晓 王小芳 译

沈安江 审校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了成岩矿物中流体包裹体的成因、研究方法、研究流程和研究实例,阐述了流体包裹体在复原盆地古地温和生油热史、盆地构造演化,判别油气运移通道和运移时间等方面的应用,对石油地质和固体矿床研究有重要意义。

本书可供油气地质研究人员、固体矿床研究人员及相关院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

成岩矿物中的流体包裹体/(美) 戈尔茨坦 (Goldstein, R. H.) 等著;
潘立银等译. —北京: 石油工业出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5183-0859-0

I. 成…

II. ①戈…②潘…

III. 矿物包体-流体包裹体

IV. P572

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 198311 号

Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals by

Robert H. Goldstein and T. James Reynolds

ISBN: 1-56576-008-5

©Copyright 1994 by SEPM (Society for Sedimentary Geology)

本书经 SEPM (Society for Sedimentary Geology) 授权石油工业出版社
有限公司翻译出版。版权所有, 侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2015-6738

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523544

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 330 千字

定价: 70.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

编写本书的动机是流体包裹体技术的应用潜力让人振奋，但在成岩作用研究中，该项技术目前往往被误用，这使笔者感到沮丧。过去十年间，流体包裹体作为沉积盆地中流体物理—化学性质研究的一种手段已展现出巨大的优势，但同样暴露了明显的不足，需要采用新的方法来合理、有效地使用该项技术。在与同事和学生交流的过程中，笔者发现很多人把从文献中学到的流体包裹体方法应用于成岩体系时遇到很多困难，甚至存在完全错误的应用，或花费了几个月的时间而得到一堆毫无意义的数字。这样的结果一方面使人沮丧，另一方面不能有效地使用这种有潜力的技术。

本书重点介绍在成岩矿物研究中正确应用流体包裹体技术必须要知道的内容。除了在沉积岩中的应用，对其他领域也有参考价值。无论研究重点是什么，本书所表达的原理、哲理和方法流程适用于任何流体包裹体研究。本书是按照成岩矿物中流体包裹体应用的实用教程来编写的，而不是用于所有沉积岩中的流体包裹体研究的百科全书。本书首先介绍流体包裹体的定义及地质意义。其次是流体包裹体研究中必须知道的基本的相平衡，以了解自然界中孔隙流体和流体包裹体的性质。一旦了解了这些，利用流体包裹体作为古老成岩体系记录的有效性的疑问就能用这样一种方式处理，即关于流体包裹体技术的局限性的疑问可以得到解决。这些想法为展示如何引导流体包裹体研究打下了基础。笔者陈述了一种基于岩石学的新方法来引导流体包裹体研究，此方法逻辑上遵循存在于沉积岩中的孔隙流体成分的解释及地史温度和地史压力的计算。然后笔者介绍了一些案例，这些案例都是精心选取和设计的，目的是让读者练习从成岩范围中评价流体包裹体数据。最后，笔者简要地总结了可能用于流体包裹体分析的技术库，以提出流体包裹体成分的附加约束。

R. H. Goldstein

T. J. Reynolds

1994年3月

致 谢

许多人对此书完成作出了巨大贡献。感谢 Christina Baroth 和 Cindy Keefe 在工作上和精神上给予的长期支持；感谢 Linda Harris 给予的文书帮助；感谢 J. R. Allan、D. L. Hall、J. J. Irwin 和 E. Roedder，他们的仔细审查极大地提升了手稿的质量；感谢 R. C. Burruss 的建设性意见以及在计算中提供的帮助；感谢 S. M. Sterner 提供了人工合成流体包裹体样品。同时，本书中总结的一些研究实例受 Exxon 开发研究中心、Texaco 研究中心、BP 研究中心以及堪萨斯大学通用研究基金、美国全国卫生基金会授权的 EAR-87-21229 和 EAR-92-18463 等资助。

目 录

第一章 流体包裹体及其应用简介	(1)
第一节 概述	(1)
一、矿物沉淀的温度	(1)
二、矿物沉淀的压力	(1)
三、流体的成分和来源	(1)
四、温度、压力和流体成分的后期演化	(2)
五、提高对成岩体系的认识	(2)
六、提高对地下流体演化的认识	(2)
七、提高对孔隙演化的认识	(2)
八、完善对石油运移史的解释	(2)
九、完善对热史的恢复	(2)
十、完善对构造史或地层埋藏史的恢复	(2)
第二节 研究历史	(3)
第二章 流体包裹体及其成因	(4)
第一节 流体包裹体的外观	(4)
第二节 晶体生长阶段捕获的流体包裹体	(5)
第三节 晶体形成之后捕获的流体包裹体	(6)
第四节 晶体生长阶段微裂缝中捕获的流体包裹体	(7)
第五节 流体包裹体成因的判别标准	(8)
一、原生流体包裹体	(8)
二、次生和假次生流体包裹体	(16)
第六节 小结	(17)
第三章 流体包裹体的相变基础	(18)
第一节 一元体系——水	(18)
一、基本前提	(18)
二、成岩作用的压力—温度条件	(18)
三、自然界中流体包裹体的压力—体积—温度变化	(20)
四、实验室中流体包裹体的压力—体积—温度变化	(20)
第二节 一元体系——甲烷	(21)
第三节 二元体系——水—氯化钠	(22)
第四节 二元体系——水—甲烷	(25)
第五节 多元体系——水—石油	(29)

第六节 多元体系——天然气—石油	(29)
第七节 小结	(30)
第四章 成岩流体的代表性样品——流体包裹体	(31)
第一节 成岩流体与流体包裹体	(31)
一、均一流体	(31)
二、非均一流体	(32)
第二节 包裹体捕获之后的变化	(32)
一、与主矿物的反应	(32)
二、透过主矿物的扩散	(33)
三、包裹体体腔大小的变化	(34)
四、颈缩	(34)
五、主矿物的重结晶	(41)
六、包裹体在主矿物中的位置	(42)
七、主矿物的变形	(42)
八、包裹体捕获后发生的不可逆相变或化学变化	(42)
九、成核亚稳态	(43)
十、热改造再平衡	(44)
第三节 流体包裹体再平衡的消退	(52)
第四节 小结	(53)
第五章 流体包裹体研究的哲学	(54)
第一节 概述	(54)
第二节 流程	(54)
第六章 流体包裹体岩相学	(57)
第一节 概述	(57)
第二节 取样技巧	(57)
第三节 样品选择	(58)
第四节 用于流体包裹体分析的厚切片的制作方法	(58)
一、解理片	(58)
二、快捷片	(58)
三、双面抛光片	(59)
第五节 显微镜装置	(60)
一、标准偏光显微镜	(61)
二、流体包裹体显微镜	(61)
三、重要配件	(62)
第六节 流体包裹体岩相学分析	(63)
一、开始	(63)
二、包裹体成因的确定	(64)
三、包裹体成分的确定	(64)

四、包裹体气液比的确定	(64)
五、压力的确定	(67)
六、岩相学关系的记录	(67)
第七节 成岩环境的确定	(67)
一、渗流带	(68)
二、低温潜流带	(69)
三、高温环境	(70)
第八节 小结	(71)
第七章 流体包裹体显微测温	(73)
第一节 思想准备	(73)
第二节 流体包裹体的选择	(74)
一、用于显微测温的流体包裹体组合的选择	(74)
二、用于显微测温的包裹体的选择	(75)
第三节 需要测定的流体包裹体组合的数量	(76)
第四节 分辨率要求	(76)
第五节 材料和仪器准备	(77)
一、用于显微测温的双面抛光薄片	(77)
二、对显微镜的要求	(77)
三、冷热台	(78)
第六节 显微测温准备	(79)
一、显微测温所需样品的尺寸	(79)
二、首要步骤	(80)
第七节 均一温度测试	(80)
第八节 低温相变测试	(82)
一、确定合适的化学体系	(83)
二、 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系的低温相特征	(91)
三、 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ 体系的低温相特征	(100)
四、 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CH}_4$ 体系的低温相特征	(109)
第九节 小结	(113)
第八章 数据的表达	(114)
第一节 频率直方图	(114)
第二节 双变量散点图	(116)
第三节 小结	(117)
第九章 流体包裹体地质温度计	(118)
第一节 数据一致的流体包裹体组合	(118)
一、最小捕获温度	(119)
二、捕获温度	(119)
第二节 数据不一致的流体包裹体组合	(127)

一、气液比高度不一致的流体包裹体组合	(127)
二、中等不一致的均一温度数据	(128)
第三节 接近最高温度的均一温度数据	(131)
第四节 均一温度与捕获温度的关系	(133)
第五节 小结	(133)
第十章 流体包裹体地质压力计	(134)
第一节 最小捕获压力	(134)
一、压碎法	(134)
二、泡点曲线法	(134)
第二节 捕获压力	(134)
一、数据一致的流体包裹体组合	(134)
二、存在不混溶的情况	(137)
第三节 小结	(139)
第十一章 研究实例	(140)
第一节 流体包裹体研究的评估	(140)
第二节 研究实例	(141)
一、内华达州晚期裂缝充填环带状流石的成因	(143)
二、西班牙东南部中新统方解石胶结物的成因	(145)
三、新墨西哥州 Lake Valley 组簇状亮晶方解石的成因	(147)
四、上新统一更新统低温方解石胶结物的成因	(152)
五、堪萨斯州东南部前宾夕法尼亚系方解石的成因	(153)
六、牙买加上新统一更新统 Hope Gate 组碳酸盐胶结物的成因	(154)
七、堪萨斯州宾夕法尼亚系早期方解石胶结物的成因	(156)
八、伯利兹海底文石胶结物中的流体包裹体	(157)
九、Llano 隆起寒武系—奥陶系方解石胶结物的成因	(158)
十、Enewetak 环礁始新统白云石的成因	(159)
十一、宾夕法尼亚系 Lansing-Kansas City 群压实后早期方解石胶结物的成因	(161)
十二、墨西哥台地中白垩统白云岩的成因	(163)
十三、与钾盐共生的石盐的最小形成温度	(165)
十四、新墨西哥州二叠系 Laborcita 组埋藏过程中的方解石胶结作用	(166)
十五、新墨西哥州宾夕法尼亚系 Holder 组热史与流体历史和方解石的成因	(168)
十六、宾夕法尼亚系 Lansing-Kansas City 群压实后晚期方解石胶结物的成因	(170)
十七、北海地区上侏罗统自生石英胶结物的成因	(171)
十八、阿尔卑斯中部石英矿物中流体包裹体地质温度计和地质压力计	(172)
第三节 小结	(173)
第十二章 其他分析方法	(174)
第一节 非破坏性技术	(174)
一、紫外线荧光发射光谱	(174)

二、显微红外吸收光谱	(175)
三、同步加速 X 射线荧光微探针	(175)
四、激光拉曼探针	(176)
五、质子探针	(176)
六、核磁共振	(177)
第二节 破坏性技术	(177)
一、子矿物的分析	(177)
二、利用能谱仪对流体包裹体中的盐类进行分析	(177)
三、群体或单个包裹体抽提物的阴、阳离子分析	(177)
四、将溶质直接送入仪器进行分析	(178)
五、包裹体中流体的同位素分析	(179)
六、气体组分的分析	(179)
参考文献	(181)

第一章 流体包裹体及其应用简介

第一节 概 述

近几十年来,地质学家一直将野外、岩石学和地球化学方法用于研究石灰岩、白云岩、蒸发岩和砂岩的成岩作用。最成功的研究是将野外、岩石学和各类地球化学方法相结合。在应用方面,每项技术都不是万能的,然而当把它们综合运用时,确实是非常有效的。细致的岩石学研究已成为成岩作用研究中最重要且可靠的部分。成岩矿物的微量元素和痕量元素分析受如下因素的制约:对分配系数知之甚少、对分配系数的适用范围不清以及孔隙流体的化学性质未知。稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)数据的解释可能会因未知的温度、孔隙流体成分和水—岩比而存在困扰,对于有些体系,可能还存在分馏系数的困扰。上述所有方法均是解释成岩历史的间接方法,因为它们代表了成岩作用的结果,而不是成岩作用过程中的样品。这类间接方法时常会得出错误的解释。

流体包裹体是封存于矿物中的、由流体充填的空腔。成岩矿物中的流体包裹体提供了用来研究古成岩环境中流体性质的唯一而直接的方法。流体包裹体通常被看作“时空胶囊”,蕴藏着古温度、古压力和古流体成分的信息。它们同简单的岩石学观察结合时,可提供如下有价值的信息:显微测温分析和流体成分的地球化学分析。

一、矿物沉淀的温度

流体包裹体可用于确定矿物形成的温度。其精度分几个级别,这取决于流体包裹体本身的特点。温度数据通常提供矿物形成最小温度的信息;其他数据仅仅在温度单调地、幅度未知地上升或下降时明确沉淀条件;或者也许只能确定大概的低温或高温;有时流体包裹体甚至可以得出矿物形成的真实温度。

二、矿物沉淀的压力

利用流体包裹体可以确定矿物沉淀的压力,但能否作出这样的解释完全取决于样品中是否包含我们需要的包裹体。流体包裹体也许可以用于确定最小捕获压力,或者可以用于确定真实捕获压力。

三、流体的成分和来源

假如存在合适的流体包裹体,可以据此确定流体的性质。最常见的应用是确定矿物沉淀时流体的盐度。其他测试方法还可以识别流体中主要的离子类型及浓度、有机物的存在、主要离子和次要离子的比例、溶解化合物(例如硫酸盐)的浓度、溶解气的类型和浓度,甚至流体的同位素组成。还有很多已存在的但有待开发的潜在应用。

四、温度、压力和流体成分的后期演化

假设存在合适的流体包裹体，那么就可以从矿物生长之后捕获的流体包裹体中确定上述三种参数中的任意一种。因此，分析一套样品组合的整个历史比单纯分析沉淀的矿物更有效。

当然，如果将这些变量加以约束，它们将具有重要的地质意义，但只有一小部分得到流体包裹体研究的支持。

五、提高对成岩体系的认识

古老和现今成岩体系的物理、化学和地质过程已证实很难理解，主要原因是成岩作用研究都是间接的。流体包裹体是成岩流体的样品和成岩体系的直接记录，它们能够提供有关古成岩流体的温度、压力和化学性质方面的信息，这是其他方法做不到的。

六、提高对地下流体演化的认识

流体包裹体为地层埋藏和抬升期间的孔隙流体提供了独一无二的记录。将流体包裹体数据与其他地质和成岩作用信息相结合，可以解释地下卤水的演化。

七、提高对孔隙演化的认识

孔隙充填事件相对时间的确定对油气勘探开发具有重要的意义。通过流体包裹体分析可以对成岩矿物的沉淀条件进行约束，从而更好地了解孔隙充填事件的控制因素和相对时间。

八、完善对石油运移史的解释

流体包裹体为油气运移历史提供了最好的记录。油气包裹体的存在就是微观的油显示，并具有重要的意义。将油气包裹体置于成岩共生格架中，可以确定油气运移的相对时间。来自油气包裹体的温度信息可以用于确定地质格架中油气运移的相对时间。另外，油气包裹体的成分可用于示踪盆地中油气的运移历史。

九、完善对热史的恢复

流体包裹体为评估沉积岩所经历的温度提供了重要的信息。由于流体包裹体数据通常是在成岩共生格架中收集的，通常能够提供沉积岩经历的热史的详细信息。

十、完善对构造史或地层埋藏史的恢复

流体包裹体分析可以为构造变形过程中温度和压力提供有效的约束。另外，来自流体包裹体的温度和压力数据可用于盆地埋藏史和抬升—剥蚀史的恢复。

当然，任何一种应用的前提是样品中存在合适的、能用来解答地质问题的流体包裹体。大多数成岩矿物含有流体包裹体，但不是每块样品中都含有能够解答某特定地质问题的流体包裹体。因此，尽管流体包裹体分析是一项非常有价值的技术，然而不能将其看作灵丹妙药或者想当然地认为它适用于任何样品。正确应用该项技术首先应明确要解决什么地质问题，然后在地质和成岩共生格架中对样品进行详细研究以明确流体包裹体是否能用于解答特定地

质问题。流体包裹体作为封存于矿物中的成岩流体的样品,存在于时空或成岩共生格架中,因此大多数流体包裹体研究应基于精细的岩石学观察。将流体包裹体看作是一种岩石学方法而不是地球化学方法也许更为适合;但在实践中,它既能提供岩石学方面的信息,又能提供地球化学方面的信息。

本书为流体包裹体在成岩体系研究中的应用提供了一个框架。已建立的概念主要基于物理和化学原理,但也包括了一些文献中难以搜集到的新方法。本书同时论述了流体包裹体应用过程中经常被问到的许多问题,并通过一些实例来阐述了流体包裹体的研究方法。

第二节 研究历史

18 世纪地质学萌芽时期,矿物中流体包裹体的存在被用来支持岩石的水成论 (Neptunist Theories)。Dolomieu (1792) 首次报道了石英矿物中发育的油气包裹体。Sorby (1858) 论证了流体包裹体中的气泡是由热收缩的差异引起的,将包裹体加热气泡将会消失,气泡消失的温度即为矿物形成的大致温度。从那以后,流体包裹体开始用于地质学研究,期间增加了很多应用,并证明了 Sorby 的观点大部分是正确的。

在 20 世纪,Edwin Roedder 是流体包裹体研究的领航者,并促使来自不同领域的流体包裹体研究人员进行集中研究。他的流体包裹体研究专著 (Roedder, 1984) 是流体包裹体信息的百科全书,也是当代所有流体包裹体研究的萌芽。在 1980 年以前,沉积岩中的流体包裹体研究仅限于蒸发岩和密西西比河谷型铅—锌矿床。该专著是宝贵的知识财富,也为本书的编写打下了基础。然而,现在人们已逐渐认识到早期研究中使用的那些“标准”方法和流程可能会导致流体包裹体数据的错误解释或者不当的应用。20 世纪 80 年代早期,人们已经体会到,对于沉积体系中的流体包裹体需要更严格的方法以对数据进行正确的收集和解释;20 世纪 70 年代和 80 年代早期的工作 (Nelson, 1973; Klosterman, 1981; Moore 和 Druckman, 1981; Wagner 和 Matthews, 1982) 引起成岩作用研究者之间的争论,这种争论现今仍在持续 (Guscott 和 Burley, 1993; Osborne 和 Haszeldine, 1993)。1984 年秋季在 Robert Burruss、Charles Barker 和 Robert Halley 的组织下,在科罗拉多召开的 SEPM 研讨会讨论了沉积体系中的流体包裹体研究。Terry O' Hearn、Dennis Prezbindowski 和 Robert Goldstein 的报告给参会人员留下了深刻的印象,他们指出,要将流体包裹体技术成功用于成岩作用研究,首先需要解决几个问题。

在过去 10 年中,很多研究者继续使用不当的方法用于沉积体系中的流体包裹体研究。20 世纪 90 年代发表的许多论文引起了人们的强烈质疑。其他研究者决心坚持明确流体包裹体技术的局限性,并建立一种更严谨的方法使这些局限性加以体现。所以,在早期地质学家根据矿物晶体中水的存在得到所有地壳物质来源于海洋悬浮物或溶液的结论 200 多年之后,我们将此书献给未来的包裹体研究人员,目的是为沉积体系中流体包裹体的正确研究打下基础,并使他们明确根据观察到的现象进行推理存在局限性。

第二章 流体包裹体及其成因

第一节 流体包裹体的外观

室温下用透射光显微镜观察时,大多数流体包裹体具有尖锐的外边界,代表了包裹体体腔的边缘(图2-1)。这种现象是由于包裹体中流体的折射率与主矿物明显不同导致的:大多数流体的折射率为1.33~1.45,而流体包裹体主矿物的折射率则为1.43~3.22。然而,液态烃的折射率可能与主矿物相似(Burruss, 1981),因此,液态烃包裹体不容易观察。包裹体通常含有大量明亮而清澈的流体(图2-1A、D、E),有些含有黑色的小气泡,黑色是由于气泡内部反射的结果(图2-1D)。但是,正如图2-1E所示,扁平状包裹体中的气泡可能不是黑色。尽管大多数流体呈无色,有些液态烃可能显示红褐色—黄色。

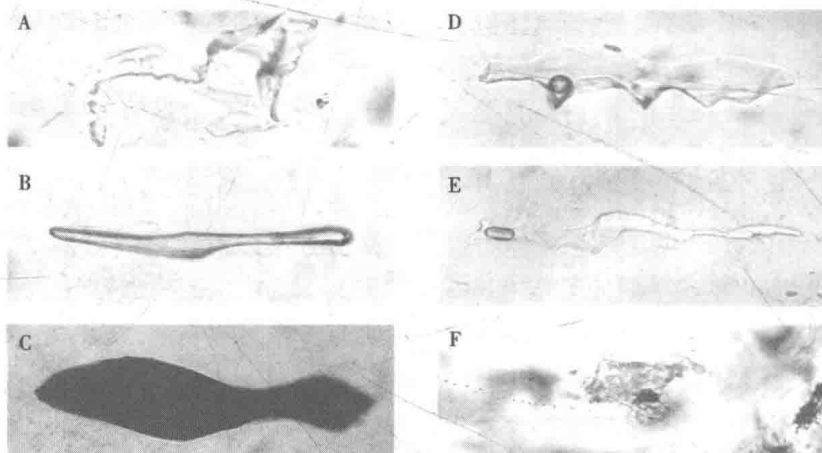


图2-1 室温下自生石英中流体包裹体的显微照片

A、B、C展示单相包裹体,D、E、F展示两相包裹体;A—形状不规则的、液相充填的盐水包裹体;B—清晰的、表面光滑的单相甲烷包裹体;C—暗色的、表面光滑的单相甲烷包裹体;D—形状不规则的两相盐水包裹体,含有球形气泡;E—形状不规则的两相流体包裹体,含有拉长的气泡;F—形状非常不规则的两相盐水包裹体,一起被捕获的还有固体包裹体(黏土?),位置处于石英颗粒碎屑与石英次生加大边之间的边界上,该边界在这张显微照片上不是很清楚,故用小圆点标记。

大多数对包裹体知之甚少的人通常会忽略那些看起来像A、B、C中那样的包裹体,但实际上,正如本书要强调的,应当仔细观察这种包裹体;A和B中的单相包裹体与大多数包裹体是相同的,但要注意,B中包裹体的边界与主矿物石英的差异要比A中的大得多,这是一个很重要的线索,通常暗示其流体成分不仅仅是水;C中的暗色单相包裹体在大多数初学者看来似乎是空的,然而,某些看起来像这样的包裹体可能含有空气,对于图中展示的这个包裹体,冷却至液氮的温度时会证明它含有甲烷。

同样,很多没有经验的研究人员可能会忽略D和E中的包裹体,因为它们似乎发生过颈缩,但是正如本书要展示的,这是一个不合逻辑的推断:对于包裹体研究者来说,最重要的是要注意单个流体包裹体组合中包裹体的气液比(形状不是判断颈缩的依据)。

为了便于拍照,图中所选的包裹体都很大,假设包裹体长轴小于 $5\mu\text{m}$,实际上这种尺寸的包裹体是能够找到的

受显微镜光学效果的限制,目前小于 $1\mu\text{m}$ 的包裹体不能用于研究。成岩矿物中能用于研究的包裹体大多数长 $2\sim 7\mu\text{m}$ 。一般情况下,粗晶成岩矿物比细晶成岩矿物中含有更多可用于研究的包裹体,另外,小的包裹体在数量上一般比大的包裹体多得多。由于流体包裹体尺寸小,因此,在进行岩石学研究时须校正显微镜,并对样品进行很好的抛光。

第二节 晶体生长阶段捕获的流体包裹体

晶体从流体中析出过程中,其生长表面不可避免地存在缺陷。通常情况下,晶体表面的缺陷将被周围的晶体包围,从而在晶体中形成穴窝,在晶体继续生长过程中穴窝中将充满流体并被愈合。由于穴窝中的流体是在晶体生长过程中捕获的,因此为原生,它们提供了成岩矿物沉淀过程中流体的样本。对于许多矿物来说,晶体生长过程中流体包裹体捕获的确切原因可能未知。然而,通过在成岩温度和压力条件下合成流体包裹体的实验研究增强了我们对外包裹体捕获机制的认识 (Sabouraud Rosset, 1969; McLimans, 1987; Davis 等, 1990; Pironon 和 Barres, 1990; Kihle 和 Johansen, 1994)。现将几个可能的机制总结如下。

晶体生长过程中流体包裹体的捕获是正常且可以预料的。晶体的生长是一系列阶梯状生长层的侧向增生过程 (图 2-2)。在其边缘处存在扭结,扩展的生长层中可能会形成凹角,这些凹角最终将被包围形成穴窝。随着生长层的继续发育,这些穴窝最终将被封闭起来,晶体中的这类缺陷为流体包裹体的捕获场所。

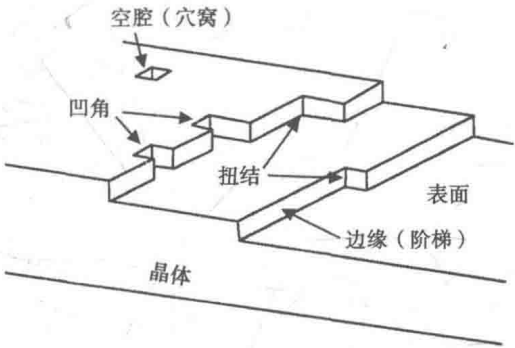


图 2-2 原子尺度的晶体缺陷中包裹体的形成过程示意图 (据 McLimans, 1987, 修改)

Roedder (1984) 描述了几种原生流体包裹体的捕获机制。有时晶面的中心相对于晶体边缘变得营养不良,导致空腔的形成,它们被后期生长的晶体密封,从而形成原生流体包裹体 (图 2-3A); 随着流体过饱和程度的加大,晶体生长速率加快,也会导致空腔的形成; 当后期次生加大时,空腔将充满流体并被密封起来 (图 2-3B)。这一机制已得到实验验证 (Janssen Van Rosmalen 和 Bennema, 1977; McLimans, 1987)。蚀刻事件已在成岩体系中众所周知,在多种矿物中都有发现。这种蚀刻在晶体表面形成的凹角和槽沟,可能被后期的晶体生长密封而形成流体包裹体 (图 2-3C)。此外,流体包裹体可能优先在双晶的接触点捕获,例如石膏中常见的那些流体包裹体。

晶体生长面上的任何毒害或阻碍都极可能在之后的生长过程中形成凹角,凹角最终将被密封形成流体包裹体。例如,如果晶体内出现裂纹,在间断处晶体的生长将被扰乱 (图 2-3D)。同样,如果另一种矿物晶体落在生长面上或在生长面上成核,那么在生长着的晶体尾迹中会形成小空腔 (图 2-3E); 甚至单独的、但矿物性质相同的晶体在生长面上成核也能形成流体包裹体空腔。黏附在晶体生长面上的其他物质也能形成生长间断,这些生长间断在随后的生长过程中也可能形成流体包裹体。它们包括细菌体、其他类型的有机质、油滴和气泡,它们仅仅是流体包裹体捕获机制中潜在的一小部分。上述机制阐述了晶体生长过程中流体包裹体捕获是一种常见的过程,但并不是每一期晶体生长都能保存完整的记录。

晶体生长也可以通过已有矿物的重结晶来实现,该过程同样可能形成包裹体。人们已在

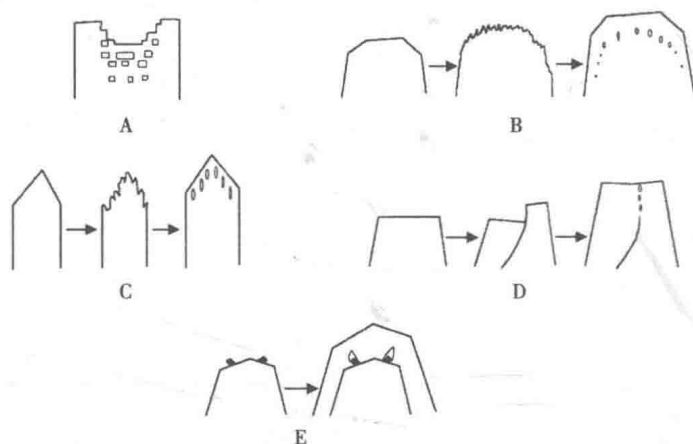


图 2-3 原生流体包裹体几种可能的捕获机制示意图 (据 Roedder, 1984, 修改)

A—晶面中心营养不良产生缺陷, 缺陷变大形成空腔, 然后被后来生长的晶体密封; B—快速生长形成不规则边缘, 然后被晶体生长所密封; C—蚀刻形成的不规则边缘被后期继续生长的晶体所密封; D—断裂形成晶体缺陷, 再增长形成不规则边缘, 最终被密封; E—孔洞形成于晶体外来物质的尾部, 外来物质阻碍晶体生长

某些发生过重结晶的矿物中观察到流体包裹体, 但其确切机制尚未搞清。重结晶的石盐矿物中可能含有大量流体包裹体, 这些包裹体形成于重结晶过程中 (Lazar 和 Holland, 1988; Horita 等, 1991; Bien 等, 1991)。文石转化为低镁方解石过程中不易形成大的包裹体, 红外光谱分析似乎支持了这一点 (Gaffey, 1988, 1990); 然而, 在发生过重结晶的文石中偶尔也存在大的流体包裹体。重结晶的白云石和铁白云石中通常含有流体包裹体, 这些包裹体似乎是在重结晶过程中捕获的 (Abegg, 1990; Gregg 和 Shelton, 1990; Shelton 等, 1992; Wojcik 等, 1992, 1994)。高镁方解石重结晶形成低镁方解石过程中也可能形成流体包裹体 (K. C. Lohmann, 1988; James 和 Bone, 1992)。重结晶过程中捕获的流体包裹体为深入研究重结晶作用提供了有效手段。

第三节 晶体形成之后捕获的流体包裹体

矿物形成后, 通常情况下晶体都会发生脆性变形或塑性变形。变形可能形成微米级的微裂缝、双晶面以及剪切面。变形特征发育时, 它们极有可能被变形过程中或者变形之后的流体所充填。此后, 通过矿物的沉淀作用 (电子显微镜尺度) 或者溶解—再沉淀作用, 流体很可能捕获在变形晶面之间。变形发生后, 晶面不会简单地立即关闭: 它们一定会受前面提及的两种作用中的任一种影响而愈合。前者 (沉淀作用) 要求离子搬运至裂纹中, 并且溶液相对于沉淀的矿物过饱和; 后者 (溶解—再沉淀作用) 总是以降低变形晶面的表面自由能的方式出现 (只要宿主矿物在流体中是可溶的) (Roedder, 1984)。如图 2-4 所示, 通过矿物的溶解和沉淀作用 (矿物在裂纹表面重新分布, 趋向于较低的表面自由能状态), 微裂缝的形状随时间发生变化, 这些再分布的封盖层将流体包裹体与其原来裂纹中的位置分隔开来, 这个过程称之为颈缩。它不需要裂纹外的新离子搬运至溶液中。这些封闭在微裂缝中的流体包裹体可能提供在裂纹封闭过程中的矿物生长之后存在的流体的有用记录, 为岩石的成岩历史提供了有用信息。这类包裹体不是矿物沉淀期间形成的, 而是在矿物沉淀之后形成的, 称为次生包裹体。

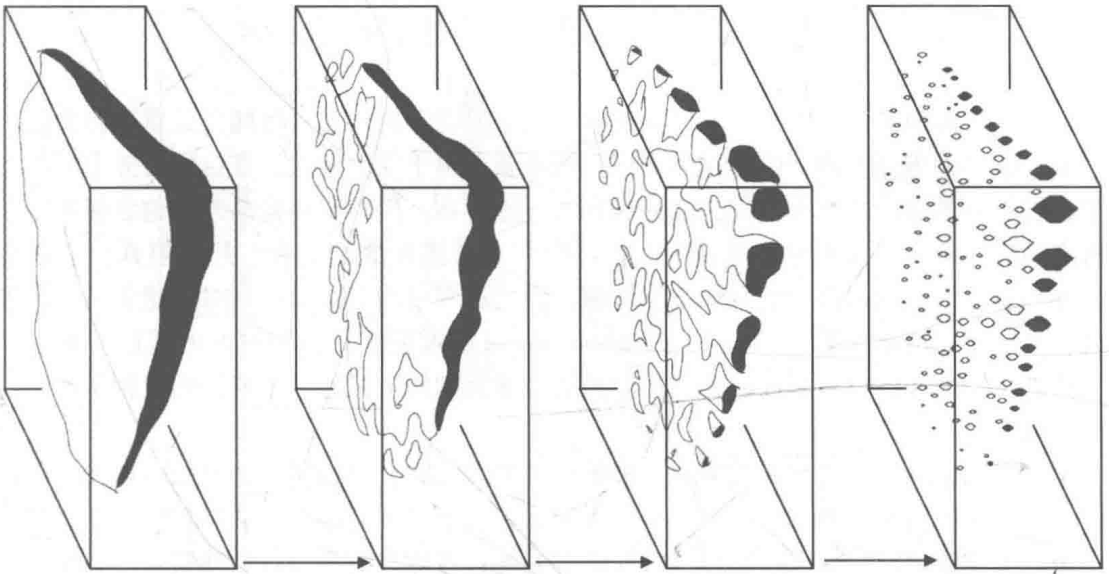


图 2-4 石英中微裂缝的闭合阶段示意图（据 Roedder, 1962, 修改）

注意包裹体最后的形状，具有像石英晶体一样的形状，这样的形状称之为负晶形；一般来说，包裹体都会朝这样的形状演化，因为这样的形状具有最低的表面自由能；然而，能否实现负晶形取决于多种因素——宿主矿物在流体中的溶解度和时间很重要

在某些成岩矿物中，颈缩作用形成次生包裹体的速度相对较快（即使在低温条件下），甚至不需要液态水的存在。可溶矿物中裂隙愈合实验显示，颈缩作用能够在几天至几年的时间内快速发生（Lemlein 和 Kliya, 1952）。实验采用的岩石在新近纪末期被抬升至渗流带，这种环境中的方解石胶结物可能含有包裹着渗流带流体的次生包裹体。另外，次生流体包裹体面上通常含有特定密度和盐度的流体包裹体，表明这些包裹体是在相同的条件下捕获的。一个常见的错误观念是次生包裹体只能形成于含有液相流体的微裂缝中，但是含有油包裹体和气包裹体的愈合微裂缝也很常见（Burruss 和 Goldstein, 1980; Burruss, 1981; Horsfield 和 McLimans, 1984; Burruss 等, 1985; McLimans, 1987; Tilley 等, 1989; Lacazette, 1991）。然而，在这种情况下，这些体系中可能存在观察不到的流体膜促进了颈缩作用。总之，通过微裂缝的愈合形成次生包裹体是一种相对较快的地质现象，即使在高倍显微镜下，也观察不到颈缩作用发生所需的流体相。

第四节 晶体生长阶段微裂缝中捕获的流体包裹体

在晶体生长阶段，能够形成微裂缝和其他变形特征。在微裂缝的愈合过程中，可能会形成流体包裹体，这类包裹体与前面介绍的微裂缝中的次生包裹体类似。如果在变形之后晶体继续生长，那么微裂缝中捕获的流体包裹体保存的是变形事件之后、矿物重新生长之前的流体记录，或者矿物重新生长时微裂缝愈合期间的流体信息。上述两种情况，微裂缝中封存的流体包裹体代表了矿物生长阶段的成岩流体。这类包裹体称为假次生包裹体，它们同原生包裹体一样，记录了晶体生长过程中某一阶段的流体信息。