

[英] T. J. 谢佛德 • A. H. 兰金 • D. H. M. 阿尔德顿

流体包裹体研究



实践指南

全书共分十章。前三章简要介绍了流体包裹体研究的基础知识和样品的选择与制备，并详细阐述了显微镜下鉴定技术；第4—7章全面而深入地论述了广泛应用的温度分析技术，包括基本原理的讨论，仪器介绍和操作技术，加热—冷冻过程中各种相变特征，测温资料的解释和应用等；第8、9章对流体包裹体成分分析的理论和实践作了较详细的阐述，介绍了电子探针、等离子光谱、同位素分析及拉曼光谱等新方法。第十章概述了流体包裹体研究在地球科学中的应用前景。

中国地质大学出版社

LIUTI BAOGUOTI YANJIU SHI JIANZHINAN



流体包裹体研究实践指南

T·J·谢 佛 德

〔英〕 A·H·兰 金 著

D·H·M·阿尔德顿

张恩世 张文淮 高怀忠 王思源 译

张文淮 统校

中国地质大学出版社

内 容 提 要

全书共分十章,前三章简要介绍了流体包裹体研究的基础知识和样品的选择与制备,并详细阐述了显微镜下鉴定技术;第4—7章全面而深入地论述了广泛应用的温度分析技术,包括基本原理的讨论,仪器介绍和操作技术,加热—冷冻过程中各种相转变特征,测温资料的解释和应用等;第8、9章对流体包裹体成分分析的理论和实践作了较详细的阐述,介绍了电子探针、等离子光谱、同位素分析及激光光谱等新方法。第十章概述了流体包裹体研究在地球科学中的应用前景。

本书是流体包裹体工作者的工具书 地质院校师生的教学参考书,还可供与地球科学、材料科学有关的 生产、研究人员参考

A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies

T.J.Shepherd, A.H.Rankin, D.H.M.Alderton

Blackie & Son Limited

(1985)

流体包裹体研究实用指南

张恩世 等译

张文淮 校订

责任编辑 赵福堂 赵颖弘

中国地质大学出版社出版

(武汉市 喻家山 430074)

中国地质大学出版社印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 10.25 字数 262千字

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数1—1000册

ISBN 7-5325-0749-0/P·146

定价: 2.20元

译 者 的 话

T.J. Shepherd 等所著的“流体包裹体研究实践指南”一书在论述流体包裹体研究的理论知识基础上,着重阐明了流体包裹体研究的实验技术和方法,并特别介绍了近年来应用于流体包裹体分析的新方法、新仪器,弥补了国内已出版的有关论著和译著方面的不足。

全书内容丰富,取材新颖,结构严谨,可作为显微测温和成分分析等方面的实验手册。

张文淮翻译本书的前言和第三章,并对全书进行了统校。张恩世翻译第一、二、四章,高怀忠翻译第五、六、七章,王思源翻译第八、九、十章。赵福堂、赵颖弘负责编辑加工。在此,译者向为本书的出版付出辛勤劳动的同志们一并致谢。

由于译者水平有限,难免有错漏与不妥之处,敬请读者指正。

译 者

1988年6月 于武汉

前 言

现在,有关流体包裹体在地学研究中应用的论文相当多(见Roedder, 1962; 1972, 1976, 1979a和Hollister, 1981年及Crawford 1981年的评述)。关于此课题已有综合性论著可参考(Roedder, E., 美国矿物学会《矿物学论评》, 1984年第十二期); 本文在人们掌握了这方面的基本技术的基础上,为之提供了极为丰富的进一步的见解。总的来说,它充分地论述了有关包裹体的基本理论,然而有关实践方面的问题涉及的很少。本书的目的就是充实实践方面的内容。

本书是一本实验手册,可供从事一般显微测温 and 化学分析的工作者使用。基于作者们丰富的实践经验,该书必将给流体包裹体的初学者和研究者以极大的帮助和鼓舞。前两章是总论,并介绍了流体包裹体薄片制作的传统程序及所用的简单设备。第三章对重要的镜下鉴定技术作了详细阐述,并由浅入深地介绍了对有关方法的掌握,描述了用包裹体光片、薄片和颗粒镶嵌对包裹体中各相进行鉴定的技术条件。第四章至第七章论述了温度分析技术的广泛应用。第六章在讨论了基本原理,并介绍了三种目前较为流行的冷-热两用台操作技术后,用图解法说明了在加热和冷却过程中观察到的各种相变特征。第七章主要对测温资料的种类、重要意义与解释进行了介绍。

对包裹体的分析还可运用其他一些方法,这些方法在第八章中进行了总的描述。第九章则对四种方法进行了更详细的阐述。这些方法是根据它们的应用范围和效果加以选用的,其中包括电子探针(SEM)和等离子光谱(ICP)分析以及爆裂和破碎时释放出的挥发组分的化学分析和同位素分析。最后,第十章涉及的是地学中流体包裹体的进一步研究的要求、发展和应用问题

在这本实验指南编写过程中,给予我们帮助和鼓励的人是很多的,这里不能一一提及。但特别要感谢的是我们英国地质调查所,帝国理工学院和查尔塞学院的同事们,感谢他们在书稿撰写过程中所提供的有益的建议和帮助。

T. J. Shepherd

A. H. Rankin

D. H. M. Alderton

目 录

第一章 流体包裹体的性质、产状和地质意义	(1)
1-1 引言	(1)
1-1-1 产状和分布	(1)
1-1-2 单个晶体中包裹体的分布和丰度	(2)
1-1-3 矿物中包裹体的存在形式	(3)
1-1-4 包裹体的形态	(3)
1-2 共生分类	(3)
1-3 索尔比在均匀和不均匀捕获方面的早期研究工作	(5)
1-4 流体包裹体组成的变化	(7)
1-5 作为地质流体代表部分的流体包裹体	(8)
1-5-1 总体渗漏	(8)
1-5-2 扩散渗漏	(9)
1-5-3 代表性捕获	(9)
1-6 捕获后的变化	(10)
1-6-1 包裹体壁的再平衡和“颈缩”(卡脖子)	(10)
1-6-2 热梯度下包裹体的移动	(11)
1-7 流体包裹体的地质意义	(11)
1-7-1 流体的成分	(11)
1-7-2 地质温度计和地质压力计	(11)
1-7-3 流体流动的方式	(11)
1-7-4 找矿勘探工作中的流体包裹体研究	(12)
1-7-5 石油勘探中的流体包裹体研究	(12)
1-7-6 其他方面的应用	(12)
1-8 小结	(18)
第二章 显微镜鉴定的样品选择和制备	(14)
2-1 引言	(14)
2-2 研究所用之物质的选择	(14)
2-2-1 热液矿脉	(14)
2-2-2 火成岩	(15)
2-2-3 中—高级变质岩	(15)
2-2-4 沉积岩	(15)
2-3 颗粒载片	(15)
2-3-1 制备	(15)
2-3-2 浸油	(16)
2-3-3 颗粒的操作	(16)

2-4	用于光学研究的解理碎片法	(17)
2-5-2	步骤 I: 抛光	(18)
2-5-3	步骤 II: 反面粘胶	(18)
2-5-4	难以加工样品的处理	(19)
2-5-5	样品的保存	(20)
2-5-6	流体包裹体薄片制备的基本要求概述	(20)
第三章	光学鉴定	(22)
3-1	引言	(22)
3-2	光学鉴定的要求	(22)
3-3	流体包裹体的识别和定位	(23)
3-4	包裹体中相的识别	(24)
3-4-1	子矿物	(24)
3-4-2	压缩气体	(27)
3-4-3	碳氢化合物液体	(29)
3-4-4	玻璃质	(30)
3-5	颈缩(卡脖子)、泄漏和自然爆裂的识别	(30)
3-5-1	不均匀捕获和亚稳态问题	(32)
3-6	光学研究后的包裹体分类	(32)
3-7	单个流体包裹体中的相比率	(33)
3-7-1	充填度(F)及两相($L+V$)水溶液包裹体总体密度的计算	(33)
3-7-2	三相($L+V+S$)水溶液包裹体盐度和总体密度的计算	(34)
3-7-3	相比例的估算	(34)
3-8	其他显微镜技术	(35)
3-8-1	在显微镜下打开包裹体	(35)
3-8-2	紫外(UV)显微技术	(37)
3-8-3	红外(IR)显微技术	(38)
3-8-4	扫描电子显微技术(SEM)	(38)
3-9	光学鉴定观察结果概述	(38)
第四章	测温分析的基本原理	(39)
4-1	引言	(39)
4-2	加热	(39)
4-2-1	两相($L+V$)水溶液包裹体中液-气相的均一作用	(39)
4-2-2	子矿物的溶解	(42)
4-2-3	不混溶的 H_2O-CO_2 液体的均一作用	(42)
4-3	冷冻	(44)
4-3-1	H_2O -盐水溶液体系	(45)
4-3-2	非水溶液 $CO_2-CH_4-N_2$ 体系	(46)
4-3-3	混合的 H_2O -盐- CO_2 体系	(47)
第五章	冷-热两用台	(49)
5-1	有效性	(49)

2-5-1	步骤 I: 切片和研磨	(17)
5-1-1	引言	(49)
5-1-2	Chaixmeca 两用台	(49)
5-1-3	Linkam TH600 两用台	(51)
5-1-4	Reynolds 两用台	(52)
5-1-5	其他问题	(52)
5-2	安装与校准	(53)
5-2-1	加热	(53)
5-2-2	冷冻	(53)
5-2-3	可供选择的致冷剂和设备	(54)
5-2-4	两用台的校准	(55)
第六章	测温分析的实践问题	(59)
6-1	引言	(59)
6-2	冷冻	(59)
6-2-1	H_2O -盐溶液包裹体	(60)
6-2-2	非水溶液 CO_2 - CH_4 - N_2 包裹体	(72)
6-2-3	混合的 H_2O - $NaCl$ - CO_2 包裹体	(76)
6-3	加热	(79)
6-3-1	液-气均一作用	(79)
6-3-2	子矿物的溶解	(81)
6-3-3	H_2O - CO_2 包裹体的均一作用	(86)
第七章	测温数据的表示和解释	(92)
7-1	引言	(92)
7-2	单个包裹体测定结果评价	(92)
7-2-1	准确性和精度	(92)
7-2-2	测试数据和表达方式	(92)
7-3	尽可能全面的测定	(93)
7-4	数据的表达方式	(94)
7-5	数据的解释	(95)
7-5-1	离散群组的识别	(95)
7-5-2	连续变化	(96)
7-5-3	关于沸腾、液体不混溶性和含石盐包裹体的进一步思考	(98)
7-6	压力和捕获条件的估算	(99)
7-6-1	根据流体包裹体资料计算流体压力的方法	(99)
7-6-2	捕获深度的估算	(102)
第八章	流体包裹体化学分析的理论问题	(104)
8-1	引言	(104)
8-2	破碎-浸出法	(106)
8-2-1	引言	(106)
8-2-2	阳离子分析	(107)

8-2-3 阴离子分析	(108)
8-2-4 其他方法	(108)
8-3 挥发组分——总体分析	(109)
8-4 电感耦合等离子光谱(ICP)-热爆裂连接法	(112)
8-5 固体相鉴定的X射线法	(112)
8-5-1 引言	(112)
8-5-2 X射线衍射	(112)
8-5-3 扫描电子显微镜(SEM)	(113)
8-5-4 其他固体相	(113)
8-6 单个包裹体的显微分析	(113)
8-6-1 引言	(113)
8-6-2 激光激发拉曼光谱法	(113)
8-6-3 激光束消融	(115)
8-6-4 其他方法	(115)
8-7 中子活化分析	(116)
8-8 同位素分析	(116)
第九章 流体包裹体化学分析的实践问题	(118)
9-1 引言	(118)
9-2 无挥发组分样品的破碎-淋滤分析	(119)
9-2-1 样品选择	(119)
9-2-2 样品制备	(119)
9-2-3 分析	(121)
9-2-4 结果	(124)
9-3 非挥发组分的爆裂和分析	(127)
9-3-1 引言	(127)
9-3-2 样品选择	(127)
9-3-3 样品制备	(127)
9-3-4 分析	(128)
9-3-5 结果	(129)
9-4 挥发组分的分析	(129)
9-4-1 样品选择	(129)
9-4-2 样品制备	(130)
9-4-3 分析	(130)
9-4-4 获得的数据	(133)
9-5 稳定同位素分析	(133)
9-5-1 样品选择	(133)
9-5-2 样品制备	(133)
9-5-3 分析	(134)
9-5-4 结果	(135)
9-6 扫描电镜和固相分析	(136)

2-5 测温分析所需抛光片的制备	(137)
9-6-1 样品制备	(136)
9-6-2 仪器操作	(137)
9-6-3 解释	(138)
第十章 流体包裹体研究的发展趋势	(140)
10-1 地壳中流体作用的重要性	(140)
10-2 方法学的发展	(140)
10-2-1 单个包裹体的分析	(140)
10-2-2 几种包裹体组合的总体分析	(141)
10-3 关于流体的 $PVTX$ 性质的理论研究	(141)
10-4 应用前景	(141)
10-4-1 深部地壳作用	(141)
10-4-2 沉积盆地中的流体及其成岩作用	(141)
10-4-3 碳氢化合物及矿产的勘探	(142)
10-4-4 构造学方面的问题	(142)
10-5 结束语	(142)
附录 I 提供制备流体包裹体光片所需的各种设备和消耗器材的某些英国厂商	(143)
附录 II 两相包裹体中充填度 (F) 的标准示意图	(144)
附录 III 光学仪器和冷-热两用台的主要制造者/供应厂商	(146)
附录 IV 冷-热两用台温度校正材料的某些供应厂商	(147)
附录 V 用于常规破碎-淋滤分析的材料和设备	(147)
参考文献	(148)

第一章 流体包裹体的性质、产状和地质意义

1-1 引言

众所周知,没有缺陷的理想晶体不仅在自然界尚未发现,而且即使在最严格的实验室条件下也不可能生长出来。晶体缺陷小的如原子大小,大的肉眼可以看到。对材料科学家来说,这些缺陷会给他们培育近于完美的晶体的工作带来无数的障碍,而对地质学家来说,以封闭在矿物中的液体、固体和气体形式存在的大的缺陷能为他们了解自然界中晶体赖以生长的物理和化学条件提供宝贵的资料。业已证明,流体包裹体研究在探明矿床成因方面有着特别的意义,为我们今天认识矿质的运移和沉淀作出了极为有益的贡献(Roedder, 1979a; Spooner, 1981)。近年来,流体包裹体研究还在岩石学的各个分枝学科中得到了应用,为我们理解成岩作用过程增加了一个新的尺度。

流体包裹体研究决不是20世纪才开始的。在19世纪初期,杰出的英国科学家(如H. Davy和D. Brewster爵士)就发表了若干有关存在于石英中的大型流体包裹体的富有吸引力的文章。但是,在18世纪中期,随着光学显微镜的迅速发展,H. C. Sorby所进行的开创性工作已把流体包裹体从简单的好奇性的科学研究对象发展成为有重要科学意义的研究对象。Sorby在他的当今被视为经典的1858年的论文中证明,矿物中的流体包裹体是矿物晶体在其生长过程中被捕获的部分液体、气体和熔融体的代表,而且可以用来确定某种岩石、矿物形成的环境。遗憾的是,他的论文(未能被那时的科学界所接受,并遭到很多评论)的抵毁。正如Sorby自己所说:“那时人们嘲笑我,他们引用Saussure的话‘用显微镜来观察高山是不恰当的’,尽其所能对我的研究加以奚落”。在一定程度上,由于以上原因和类似的蔑视态度,以致直到20世纪50年代初,流体包裹体研究工作进展甚微。现在,流体包裹体研究已从起初的混乱时期进入了成熟时期。关于这一课题已有大量文献*,而且近20年内人们对这一课题的兴趣明显增加。

正如我们在前言中所说的,我们的目的不是对流体包裹体研究提供完整的理论基础,然而在进行包括包裹体的光学鉴定和各种分析等更多的实际工作之前,概述一下有关流体包裹体最主要的特征是必要的。

1-1-1 产状和分布

尽管在天然和人工合成晶体中,流体包裹体普遍存在,但是亲眼看到(或记得看到过)而不是在照片上看到包裹体的地质学家和矿物学家为数极少。考虑到包裹体是如此的小,这也许是可以谅解的。大于几毫米的包裹体,肉眼就可看清,可是一一般都作为陈列标本(Rankin, 1978)。大多数包裹体小于0.1mm(100 μ m),只有借助于适当的光学显微镜才能清楚地观察到

* 每年发表的有关流体包裹体的摘录(国际成矿流体包裹体委员会年报,美国密执安大学出版)为该文献提供了有益指导作用。

(见第三章)。在显微镜下观察到的包裹体大小一般介于2—20 μm ,但我们知道,小于1 μm ,因而在最高倍的显微镜下也无法分辨的包裹体也是存在的。据估计,这些次显微空间的大小大至天然连续区域的一部分,小至晶体格架上单个点缺陷。

在实验室生长的晶体中,包裹体的大小、丰度和分布主要是晶体生长动力学和各种生长面的稳定性的函数。生长条件在一定程度上是可以加以控制的,因此从样品中可以尽可能消除包裹体(Wilcox, 1968),这在制作用作电子元件的特别纯的人工合成石英时是非常重要的。

在自然界导致矿物生长和重结晶的作用复杂多样,人们对其了解甚少,因而不可能预测单个矿物样品是否含有大量发育良好的流体包裹体。然而,实践证明,“试凑法”是较为有效的,使用该法时,偶然发现和经验两者在发现合适的样品方面都起重要作用。

表1-1 列举了其中常含包裹体的10种矿物。除石盐以外,这些矿物是与热液矿床共生的,几乎是含量最高的、透明的矿石和脉石矿物,并且表明,在过去20年中,学者们对这类矿床的流体包裹体研究给予了极大的重视(Roedder, 1979a; Spooner, 1981)。这些矿物的共同特点是透明和色浅,这对于包裹体的光学研究来说无疑是最基本的先决条件。这并不是说那些不透明的矿物就没有包裹体。特别是方铅矿的新鲜解理面上就可能含有发育极好、肉眼可见的空洞(Bonov, 1977)。

表1-1 最常含流体包裹体的10种矿物

- | | |
|--------|--------|
| 1. 石英 | 6. 白云母 |
| 2. 萤石 | 7. 闪锌矿 |
| 3. 石盐 | 8. 重晶石 |
| 4. 方解石 | 9. 黄玉 |
| 5. 磷灰石 | 10. 锡石 |

包裹体在软的、容易解裂的矿物如重晶石和方解石中最容易发生泄漏和卡脖子(见1-5和1-6节),因而人们常常认为这些矿物意义不大。我们并不是说这些矿物一概不值得研究,而是强调,如果它们是仅有的可供

研究的矿物时,需要小心对待。

引人注目的是,表1-1中没有列举长石。初看起来,长石类矿物应该是理想的,但是它们中的流体包裹体既小又不清楚,不适于进行详细的观察。相反,由快速冷却形成的火成岩长石中可以出现发育特别好的熔融包裹体。

1-1-2 单个晶体中包裹体的分布和丰度

在单个晶体中,包裹体总的丰度和分布部分取决于样品的原始生长条件,部分取决于晶体结晶后的历史。一般来看,包裹体总体积很少大于已知晶体体积的0.1%(图1-4)。如果包裹体占晶体体积的0.1%,就很容易估计出在已知样品中特定形状和大小的包裹体的数量(表1-2)。这有点过分简单化,因为在

表1-2 包裹体占样品总体积0.1%时,1 cm^3 样品中包裹体的预计平均数

包裹体平均大小	占样品体积0.1%的包裹体数目*
1mm	1
100 μm	10 ³
10 μm	10 ⁶
1 μm	10 ⁹

* 假定样品是立方体,而且包裹体是等距离分布的。

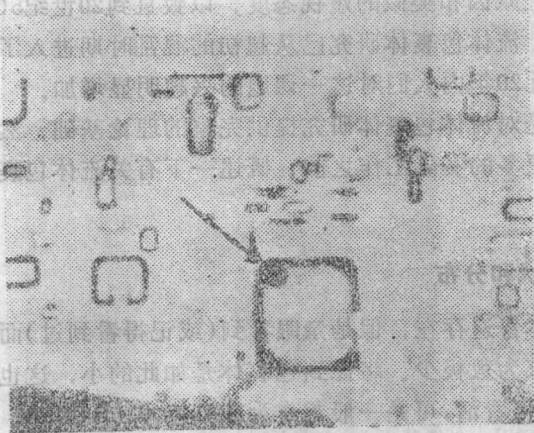


图1-1 在实验室生长的石盐中主要是单相纯液体包裹体。较大的包裹体(横向直径150 μm)包含一个小的蒸气气泡(箭头所指)

计算中我们必须假定包裹体是规则分布的。包裹体倾向于呈束状和面状分布或者是呈曲面群出现,而曲面群通常是受结晶习性控制的(例如沿着生长面或解理方向)。

通常,在矿物生长的早期,包裹体的丰度比在晚期要高。这在某些近根部呈乳浊状而顶端透明的晶洞石英晶体中清楚可见。某些有色带的矿物(如萤石和闪锌矿),其外生长带的包裹体比晶体内部的要少。

包裹体在晶体内的分布及其与结晶方位的关系是非常重要的,因为它们是许多人认为的最重要的一种流体包裹体分类方案——共生分类的基础。这一分类是以包裹体的成因为基础的,对此,将在后面进行比较充分的讨论。

1-1-3 矿物中包裹体的存在形式

也许,鉴定流体包裹体最简便的方法就是在显微镜下用第三章概述的程序观察任何一种合适的结晶物质。对此,普通食盐是理想的晶体,由于它通常包含完全充满液体的、形态完整的立方体或长方体空腔(图1-1)。这些细小的盐粒可以运用第二章中所描述的那种与食盐(NaCl)折射率相匹配的浸油,在浸油介质中进行研究。即使不用显微镜也能证明,食盐确实含有流体包裹体。如果把一小块食盐标本在本森灯(一种煤气灯)火焰上缓慢加热,单个晶体将爆发出‘辟拍声’。这是因为包裹体受热以后,其中流体压力很快增大,致使包裹体腔突然破裂(爆裂)。对天然石英,也可进行这样的实验,以检验是否存在包裹体。听视效应通常是十分明显的,尤其是对白色石英,它有效地表明,在这种物质中包裹体是普遍存在的。当然,还有几种其他方法可以检验是否存在包裹体,如在矿物分析时出现意外“不协调的”成分如 H_2O 、 Cl 、 Na 和 CO_2 ,意外低的比重或在矿物受热或用刀刻划时有恶臭味或石油气味(Rankin和Shepherd, 1978)

1-1-4 包裹体的形态

流体包裹体的形态多种多样,并且部分地受主矿物结晶习性的控制。正如我们在食盐晶体中看到的那样,包裹体可能以完整的负晶形式详细地反映出主矿物立方体对称性(图1-1)。在另一极端的情况下,包裹体可能是非常不规则和扁平的。在具有良好节理的软矿物中,例如菱面体的碳酸盐中,包裹体壁常常沿着与主矿物的解理方向一致的面呈规律的阶梯状或断面状。球形和扁圆形也很常见,在石英中尤其如此;而在一向延长的柱状矿物如磷灰石中,管状包裹体发育得最好(图1-2, 图1-3)。

1-2 共生分类

该分类中,矿物原始生长过程中形成的包裹体(称为原生包裹体或P包裹体)不同于晶体形成后在后期作用下进入主矿物的包裹体(次生包裹体或S包裹体)。一般认为,次生包裹体的形成机理涉及到在机械应力或热应力作用下结晶期后裂隙的发育。这些微裂隙后来为较晚的流体所愈合,形成独特的枝蔓状分布的次生包裹体,它们往往切割较早世代的包裹体。一些作者(例如Roedder, 1976)在原生和次生包裹体之间划分出第三种成因类型的包裹体,称为假次生或PS包裹体。据推测,假次生包裹体以相似于次生包裹体的方式发育,唯一的区别在于破裂和愈合发生在晶体生长终止之前。很明显原生或假次生包裹体应反映矿物生长时流体的性质,而次生包裹体则表示后来的流体可能和原始生长的那些流体无关。图1-5概括

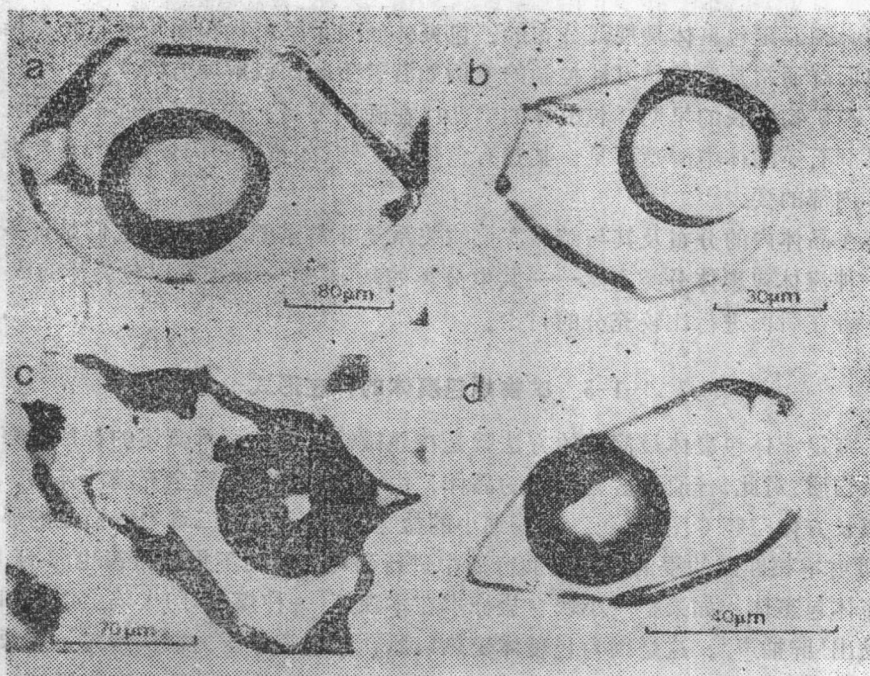


图1-2 脉石英中一些典型的流体包裹体形态。在包裹体 b, c, d 中，可以见到小的子矿物。
注意 a, b, d 中的负晶形及 b 中略呈圆形和扁平状的晶形（压扁的气泡使之更为显著）

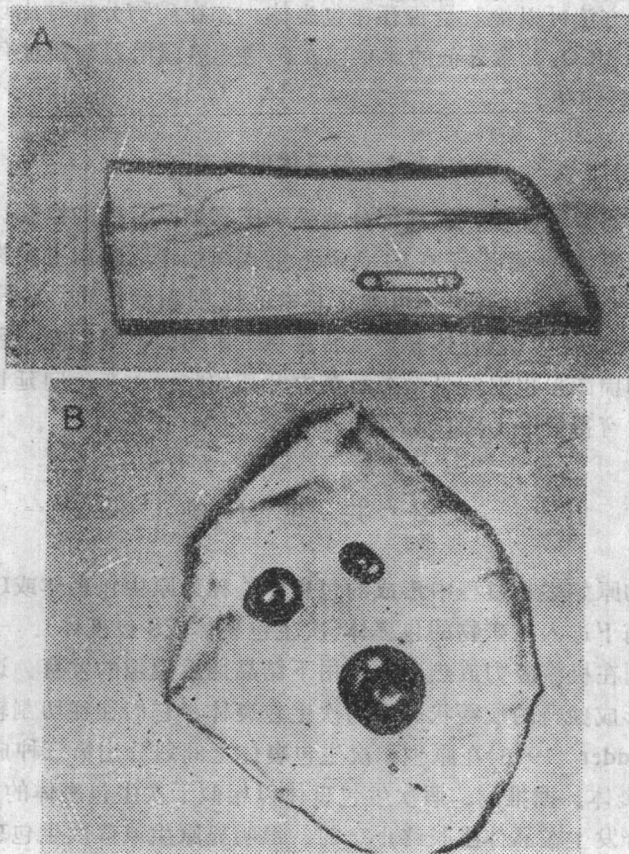


图1-3 置于浸油中的磷灰石晶粒中的管状包裹体(A)和扁圆形包裹体(B)。晶体的大小约1mm

地表明了分带切片的石英和萤石晶体中原生、次生和假次生包裹体的理想分布。虽然 Roedder (1976) 已建立了这三种成因类型包裹体区别标志的综合性一览表, 但实际上这三类包裹体之间的区别通常很模糊。三类包裹体将在第三章中加以概述。因而, 从理论上讲, 建立样品中包裹体群的共生组合分类应是可能的。但在实践中, 这种可能性是很小的, 特别是在缺乏晶形和生长带的较大的块状体中, 通常只能鉴定“可能的原生包裹体”, 而不能作出明确无误的鉴定。次生包裹体的辨别要容易得多, 因为它们通常作为扁平的包裹体呈面群状延伸到晶体外面。这可以与假次生包裹体的平面进行对比, 假次生包裹体的平面以突然终止在晶体以内为特征。

在遭受过多期破裂和再愈合的样品中, 可能出现不同世代的次生包裹体。仅仅根据视觉观察就能区分早、晚世代的包裹体的可能性很小, 但是借助全面的测温研究(见第四章)建立一个总的流体包裹体共生的综合图是可能的。

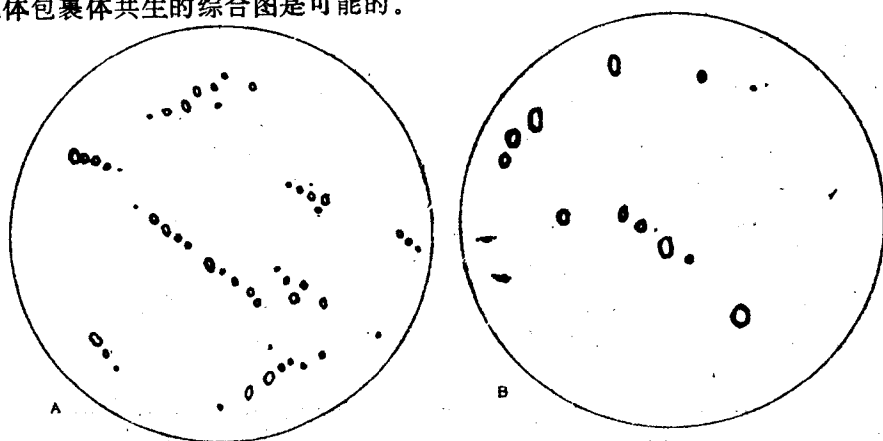


图1-4 包裹体占样品的1%时的典型视域 (假定体积百分比=面积百分比)。

注意, 当包裹体的平均粒度增加时, 包裹体的数量显著减少

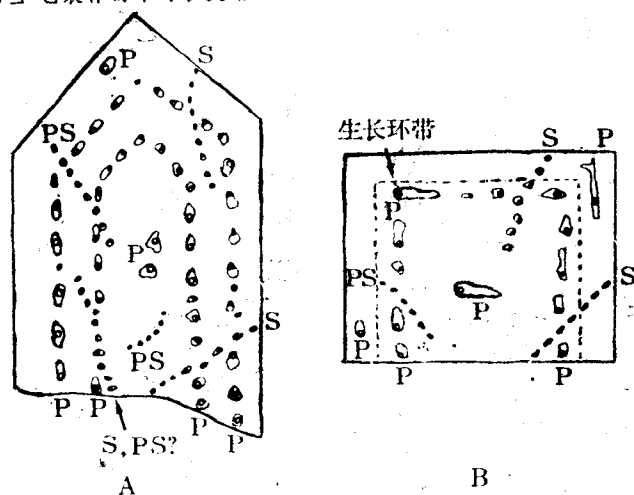


图1-5 石英和萤石中原生、次生和假次生包裹体的理想分布。A: 石英, 平行于c轴切面。B: 萤石, 平行于立方体切面

1-3 索尔比在均匀和不均匀捕获方面的早期研究工作

在最简单的情况下, 正如我们在普通食盐中见到的一样, 在室温下, 在单一水溶液相中形

成的晶体将含单一的水溶液相包裹体。这与通常在较高温度下形成的热液矿物中较常见的二相(蒸气相+液相)包裹体不一样。至于为什么会如此,早在100多年前索尔比就作出了解释。

H·C·索尔比是拥有私人设备的科学家。他在他的家乡英格兰 Sheffield 市,对实验室生长的晶体中和天然晶体中的流体包裹体的性质或成因进行了开拓性研究。1858年发表的有关这方面的研究著作经受了时间的检验,而且奠定了后来所有流体包裹体研究的基础。

索尔比根据一系列关于盐溶液热膨胀的仔细研究和对各种不同温度下形成的包裹体进行的观察表明,在很多包裹体中的小蒸气气泡只能归因于冷却过程中流体的热收缩所致。可以说,这些蒸气气泡与水银温度计顶部的空间相当。在这两种情况下,蒸气气泡都是由于流体和固体间存在热膨胀系数大小级别的不同而产生的。在图1-6中索尔比的原图(标号1-10)就说明了这个论点。索尔比的另一个重要的观察结论是:蒸气的比例愈大,包裹体捕获温度就愈高。这为利用流体包裹体作为地质温度计提供了可能(详见第四、五、六章)。

索尔比的实验还取得了另外两方面的进展,这就是发现了所谓的子矿物(在捕获以后圈闭的流体中沉淀而形成的固相)和不均匀捕获。

在100℃时,从浓的 NaCl 和 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (重铬酸钾)溶液中结晶生长出来的 NaCl 晶体,发育了既含蒸气气泡又含小的橙色重铬酸盐晶体的包裹体(图1-6的11、12)。所产出的很小的重铬酸盐晶体或多或少占据了恒定的容积比,且在冷却时从所捕获的流体中相当清晰的沉淀出来。然而,当利用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 饱和溶液重复该实验时,可以发现在 NaCl 晶体中形成嵌入的橙黄色重铬酸盐固相包裹体,有时这些固体包裹体还可进入正常的水溶液包裹体中(见图1-6

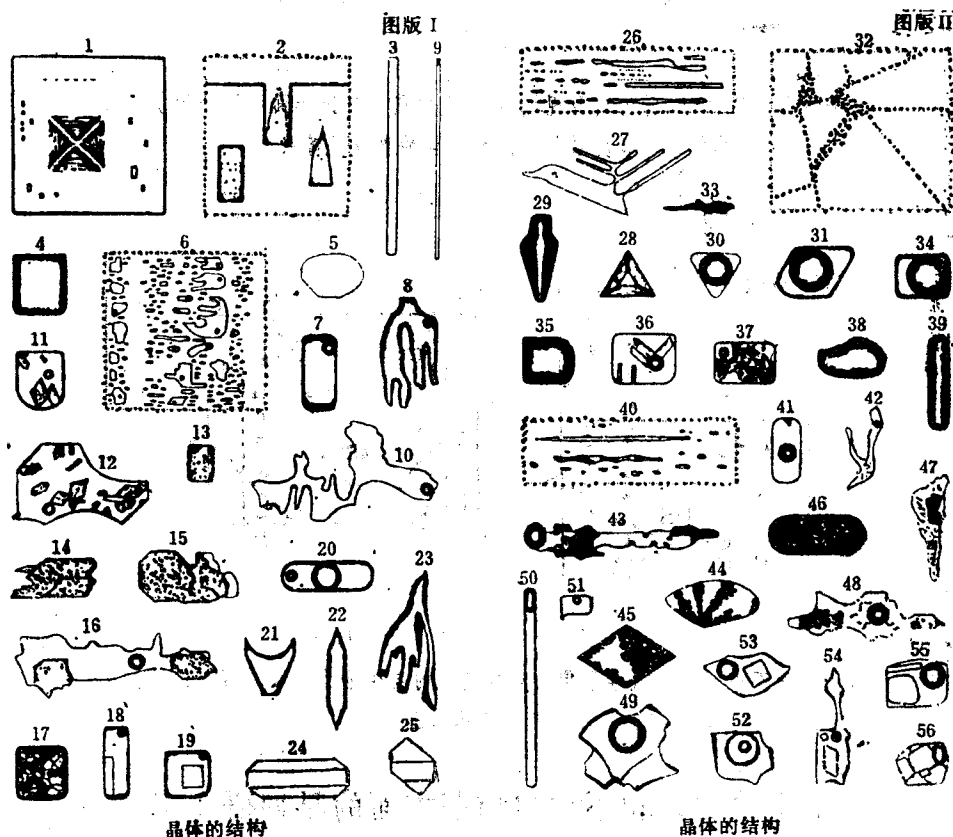


图1-6, 1-7 索尔比(1858)所绘的溶液生长晶体中的包裹体图

的14)。因此对包裹体内部沉淀的物质(即流体包裹体中的所谓子矿物或子晶)和从不均匀混合相(液相+固相)中捕获形成的“捕获晶体”(见图1-6中16)是可以区分的。

当NaCl晶体从含有液相和蒸气相的流体中生长时,也能观察到不均匀捕获的现象。在做这一实验时,索尔比使用了在接近100℃的条件下在蒸发的液相和空气两种介面之间作为壳层生长的NaCl晶体。

许多合成的包裹体具有稳定的气液比,因此明显代表了水溶液流体的均匀捕获,而其他含有不同气液比的包裹体则表明它们是从两相流体中不均匀捕获而成的,如图1-7的34所示。因此,一般说来,如果天然产出的包裹体中固相、液相和气相比比例稳定,那么它们很可能是从均匀流体中被捕获的;相反,从不均匀流体中捕获的任何一群包裹体往往会产生可变的相比例。

1-4 流体包裹体组成的变化

人们提出的许多详细的分类方案都是以包裹体中固相、液相和气相的不同比例为根据的。当然,这些方案比共生分类便于使用,因为主观因素最小。然而,根据在室温下出现的主要相划分包裹体常常是方便的。下面我们来叙述一下一个简单而方便的分类方案。采用这个方案人们应该记住:地质流体的成分是连续的,由于50%的划分方法多少有些主观任意性,不同类型包裹体之间就必定存在部分重叠的问题。

单一液相(L)包裹体:这是最简单的包裹体,全部为液相所充填(通常是水溶液)。

富液相的两相(L+V)包裹体:液相占主体,但经常出现一个小的蒸气气泡,气泡最大可达总体积的40—50%左右。

富气相的两相(V+L)包裹体:以气相为主,且占包裹体总体积的50%以上,但薄的液相环边仍然可见。

单一气相(V)包裹体:完全为低密度蒸气相(通常是CO₂、CH₄、H₂O、N₂的混合物)所充填,没有可见的液相。

多相的固相包裹体(S+L±V)和多固相(S+L±V)包裹体:这两类包裹体类似,除液相和气相外还包含了一个或多个固态结晶相(子矿物)作为基本组分。如果固相占包裹体50%以上,则这类包裹体就归类为多固相包裹体,而不叫多相的固相包裹体。

不混溶的液相(L₁+L₂±V)包裹体:这类包裹体以出现两种不混溶液相为特征,一相是水溶液,另一相是富CO₂的液相(油通常较少见)。富CO₂相可能含相当数量的CH₄或N₂,也可能出现富CO₂的蒸气气泡,这取决于富CO₂相的总的密度(见第四章)。这一类三相包裹体中水溶液相总是环绕富CO₂液相,在富CO₂液相中包有富CO₂蒸气气泡。

玻璃包裹体:这类包裹体是捕获硅酸盐熔浆而成的,它们或是形成硅酸盐结晶质包裹体(如上所述),或是由于急剧冷却而形成玻璃包裹体。玻璃包裹体在火山岩和次火山岩的斑晶中是很普遍的,还可在陨石和月岩样品中观察到。也可能出现收缩蒸气气泡(常常不止一个)、沉淀子矿物或捕获相。这类包裹体最基本的特点是,在包裹体的固相部分中,玻璃质至少占50%。

上述的各相的判别标志将在第三章中详述。表1-3列出的是概略的和直观的划分方案。

最后,许多作者在详细描述了不同类型包裹体的突出的形态和组成特征之后于各自的实例中把它们分别称作I类、II类、III类等等。这样做的优点是经常重复描述性术语。