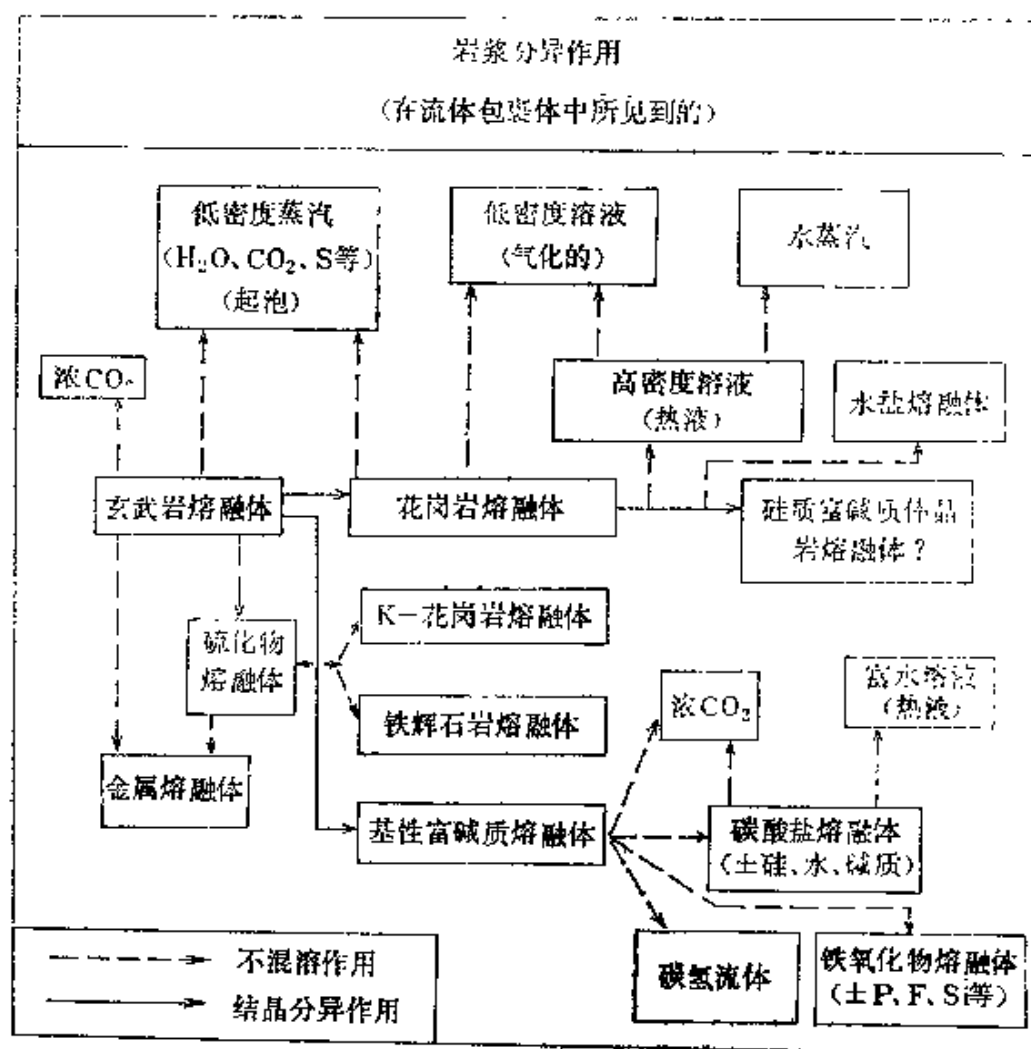


晶体生长机制的几个有趣问题，对于理解有关流体包裹体的成因可能很有用。



晶的条件，从低粘度但溶解的外来物质或许很高的流体的结晶条件，但是就结晶相而言水流体是相对稀释的。在这种情况下表面影响可能只延展很小一段距离，因此对于捕获于包裹体中的流体总成分只有很次要的意义。仅有的例外是Barnes等（1969）报导的某些实验资料，他们认为在某些相当大的人造包裹体中捕获的流体比实验中的总流体略微稀释一点。很显然，还没有谁尝试对此进行解释或证实这些结果。

边界层问题在解释粘滞流体，例如硅酸盐熔融体的包裹体中变得更为重要，并且很可能最终提供有价值的评价资料（例如，Roedder 1979a的讨论），但是这些讨论已超出本教材的范围。

在变质作用研究中，一个有关的问题是在任何给定时间内包裹体捕获的有效粒间流体在空间上不均一的问题。虽然它们的范围可能是变化的，但是对成分上变化不定的变质岩层序所获得的丰富证据表明，在任何给定的条带或岩层中它们的矿物集合体一般与相邻条带的矿物集合体不会处于平衡状态（例如，Ferry，1979）。因此，使这些矿物集合体藉以并与之处于局部平衡的粒间流体在诸如像 H_2O/CO_2 比值这样的主要变量方面也是不一样的。虽然这种成分的局部控制在变质包裹体的所有详细研究中均已有所评价（例如，Crawford等，1979），但是有时被忽视了。

三、捕获后包裹体中的变化

（一）相的变化——子晶相

某种体积不大的流体被捕获于主晶之后，会发生各种各样变化，其中包括包裹体的相组合和物理特性的变化。相组合的变化在提供晶体生长的流体的P、T及成分方面的资料最有用途。在正常情况下，被捕获的是均一流体，但是在实验室内可以见到多相流体。其中包裹体中形成的新相（一般为等化学含义）即称之为子相。

A. 包裹体壁上的结晶作用

虽然包裹体壁上的结晶作用不总是可见并常常被忽视，但是这种作用会导致形成某种普遍存在的子矿物，即如主矿物本身一样的子矿物。大多数固体物质随温度增高而溶解度增加。这就可以预料：当捕获发生时该流体处于饱和状态，随着流体包裹体的自然冷却，必然会发生主矿物的结晶作用。一般说来，这种结晶作用发生于主矿物壁上，而不是某种分离的晶体。Ermakov (1950) 描述过包裹体内形成一层可见膜的某些特殊情况（称之为“同源物质边”）。他指出：加热过程中这种膜的溶解可能很慢，尽管这种“反应容器”的体积用微米来度量，但是常常需要几小时才能达到平衡。然而在大多数情况下溶解量小到不能计量，鉴于溶解度是那样的低，这是可以预料的以致于在许多水包裹体中，在加热过程中见不到包裹体壁溶解的证据，或在冷却过程中不存在包裹体壁结晶的证据，即使包裹体壁的微量变化可以使得这种定性的检验很灵敏，同样情况对于硅酸盐熔融包裹体来说并不真实，因为主矿物很大一部分体积可能从原始捕获的熔融体结晶在包裹体壁上（见 Roedder 的评述，1979a）。

B. 收缩和不混溶性

大多数流体包裹体最突出的一个特点是出现一个蒸汽泡或气泡，它们在重力或热梯度影响下可能运动；如果它们足够小（比几微米小，可能处于恒定的跳动，此时错误地被人们称之为布朗运动（见人工制品一节）。虽然上面已详细谈了，有少部分包裹体提供了从非均一体系捕获的证据，这对于了解捕获条件是相当有价值的，但是普通岩石和矿石的大多数矿物通常每立方厘米含有数百万个包裹体，每个都为简单的两相体系—液体和气体。出现这两相是由于我们观察包裹体是在比它们捕获温度低的情况下进行的。大多数矿物的热膨胀体积系数比水溶液和 CO_2 的要低1—3个数量级，因此由捕获温度冷却至室温，包裹体的主矿物壁（容器）的收缩比它们含的流体的收缩要小得多。当包裹体压力降低到该温度下捕获的流体总蒸汽压之下时（因此流体的平衡体积变得比包裹体体

积小)，气泡便成核和长大。Sorby (1956) 在一篇关于包裹体的长而经典的论文中指出，该过程可以通过加热逆转回去，包裹体达到气泡消失的温度，加上压力校正，便可确定捕获温度。

如果捕获的是非挥发性溶质的水溶液，气泡则可能是低压蒸汽（亦即 H_2O 的 $\sim 20\text{mm}$ 蒸汽压）；如果捕获的是不含挥发分的硅酸盐熔融体，则近于真空。存在的任何挥发性组分（例如 CO_2 和 CH_4 ）将总是强烈地分配到气泡中，因此它可能是一种浓的增压流体。流体通过收缩使气泡分离与一种不混溶流体的分离之间并不存在真正的分界线。如果包裹体含的是纯水并且在 100°C 时为两相组分，那么液体的密度将为 0.96 ，气泡将是密度低（ $0.0006\text{g}/\text{cm}^3$ ）的蒸汽；但是如果它的温度差不多为 370°C 左右时，那么蒸汽密度将接近 $0.32\text{g}/\text{cm}^3$ ，超过原来的500倍。在自然界流体中可能存在的最普通的气体，例如 CO_2 或 CH_4 ，只要存在两个相，它们将优先进入蒸汽相。于是这种蒸汽的密度可能超过液体的密度，并且留心看“气泡”会沉没到液体之中。Takenouchi和Kennedy (1964) 确定了 H_2O-CO_2 体系各个等压线的密度逆转点，他们恰如其分地评述道：“这里极其明显，将标准的1个大气压下的气体与液体之间的差别延伸到较高压条件下是毫无意义的。”

如果分离出来的富 CO_2 流体足够浓，那么在致冷过程中这种流体有可能重新分裂为两种流体，它们分别为液态 CO_2 和气态 CO_2 。这种现象通常发生在纯 CO_2 的临界点之下（ 31.0°C 之下），这是由于偏离 CO_2 的临界密度，以及存在大多数普通的不纯气体，例如 N_2 或 CH_4 都降低了均一温度。

在某些高盐度流体包裹体加热过程中有少量新的、浓的、富溶质的液相会从包裹体的液体中分离出来（见Roedder的评述，1981a）。就特殊流体成分而言这种不混溶性的意义并不知道，但是考虑到在如此浓盐溶液中其液体结构可能具有很宽的变化范围，这种在恒容条件下随温度升高的不混溶性又是可能被预料的（例如，这种不混溶发生于 $K_2HPO_4-H_2O$ 体系，Marshall等，1981）。

需要特别提到形成“气体”包裹体的一个实例，因为它有可能解释少数月岩样品和陨石样品中发现的某些包裹体否则它们是令人费解的（例如Roedder和Weiblen, 1973, P.1043和P.1048）。在单个晶体中气体包裹体可以通过两种完全不同的作用过程形成。最常见的作用过程是粘附在生长晶体上的气泡被包裹。然而，如果晶体生长的流体是一种纯的或近于纯的主矿物熔融体，那么表面上看到的气体包裹体可以通过捕获这种熔融体形成。一旦捕获于某种刚性晶体内，这种熔融体在其壁上的结晶作用则引起体积变化，必然会导致“气泡”的形成（一般是真空）。如果这种熔融体与矿物成分不正好匹配，那么通常这种气泡将衬有含杂质的玻璃体。这种包裹体与更常见的硅酸盐熔融包裹体全部为渐变关系是可能的，因为在硅酸盐熔融包裹体中由于壁的结晶作用或分离出的子相的结晶作用，使得留在包裹体中的气泡的体积百分比增加了。

当多种不同的流体例如硅酸盐熔融体、水溶液、液体 CO_2 、油或气体出现在同一个包裹体中时，它们总是处于最小表面能的状态。发现这些流体的正常次序在相鉴定中很有用途，它们的次序为（从包裹体的外部向内部）：主晶 \rightarrow 熔融体（玻璃质） $\rightarrow \text{H}_2\text{O}$ （液） $\rightarrow \text{CO}_2$ （液）或有机相（液） \rightarrow 气泡。当熔融体（现在为玻璃质）曾出现时，熔体位于壁的接触处，它弄湿包裹体壁，并且任何其他流体如蒸气（主要为真空气泡）或液态水或 CO_2 ，均以气泡产于玻璃体中，而不浸渍包裹体壁（Roedder, 1972, P.11—11；很小的气泡一般凝聚在包裹体壁上，并且在致冷期间可能保留在那里）。在水溶液与不混溶 CO_2 流体（液态或气态）一起存在的包裹体中， CO_2 珠滴常常出现于水溶液中，而水溶液浸渍着包裹体壁并填充穴中的全部小港湾。如果液态 CO_2 的百分体积大， CO_2 液体似乎可能紧贴包裹壁；但是冷冻包裹体将会发现水膜总是存在的。当气泡与液态水和液态 CO_2 一起出现时，气泡总是完全被 CO_2 液体包围，这一现象是在液态 CO_2 的真正性质开始被认识的多年前首先是由Brewster(1926)观察到的。这一简单事实说明要识别少量液态 CO_2

相 ($< \sim 10$ 体积%) 的存在是相当困难的, 除非包裹体十分扁平。

含水与不混溶有机流体包裹体中气泡具有相同的关系。在这些包裹体中气泡几乎总是出现于有机相中, 并且有机相一般与包裹体壁相脱离。仅仅很少一些包裹体 (在某些萤石中) 具有作者所见到的某种油相优先浸渍充填卤水的包裹体壁。在少数实例中, 由于三种不同流体之间的面积张力以及它们相对容积具有最小能量构形, 故呈现“部分吞没”的特点 (例如, Roedder, 1972, 图版9, 图 6—9; 又见Torza和Mason, 1969; Mori, 1978)。

C. 子矿物

常常, 捕获于包裹体中的原始均一流体除主矿物之外, 由于某些固体相的存在而变得饱和了, 并且凝聚出新晶体, 这些就称之为子矿物。NaCl是子矿物中最常见的, 除此之外像碳酸盐和硫化物也能见得到。含子矿物的大多数包裹体仅含每种子相的一个单晶体, 除非它在液相中溶解度很低。在含包裹体的岩石中常常出现同样的子矿物相 (除水溶岩石外, 这种岩石一般易淋失而进入地下水, 产生我们现在看起来是模糊的晶洞)。除NaCl之外, 每种子矿物的体积常常很小, 显微镜的分辨能力就限制了在小包裹体中对它们的检测和鉴定。由于子矿物为原始均一流体成分的一部分, 鉴定和测定子矿物是重要的。Roedder (1972) 简略总结了许多有用的方法, 见第十一章。

在实验加热过程中, 真正的子晶将再溶于流体中, 并且固相的最终熔融温度提供了原始流体成分的有价值的、但多少略为有限的资料。因而, 如果假设包裹体的流体仅含NaCl和H₂O (一般不是真正有效的假设), 那么该包裹体的成分则可以由NaCl消失温度 (T_m) 并结合NaCl—H₂O体系现有资料来确定 (Khaibullin等, 1980)。如果该包裹体在几何上是规则的, 那么这种测定值可以通过简单光学测定来检验 (图5—2)。

在少数苏联文献中 (参考Roedder, 1972) 注意到在实验室加 热

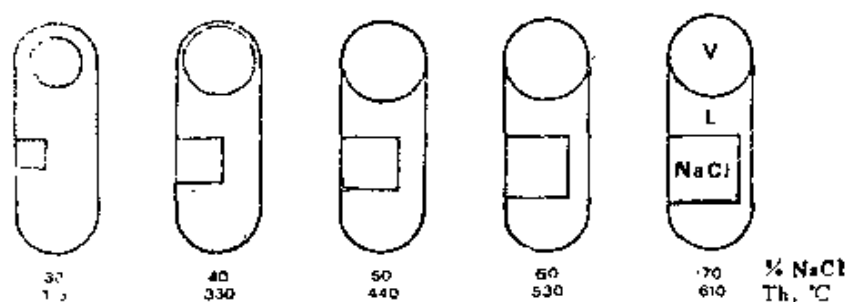


图5—2 在20°C时圆柱形流体包裹体的外观图

每个包裹体都给出了NaCl的总重量百分浓度，它们均有气相（V）、饱和的NaCl溶液（液体的NaCl浓度为26.5wt. %，密度为1.20g/cm³）和一个NaCl立方体（显示它们的切面，密度为2.2g/cm³）组成。图中还给出了近似的均一温度（Th）。该图由R.J.Bodnar根据Khaibullin等（1980）的资料绘制

过程中子晶的相变（亦即转变）；根据这种性质可以帮助鉴定这些相。两种分离的孤立的子晶—NaCl和KCl子晶，在各种高温地质环境的许多流体包裹体中都有发现（例如Roedder，1972，图版2、3和7）。在高温下NaCl和KCl形成一种连续的固溶体系列，在较低温度下具有一条固溶体分解曲线（简称为溶线，最大值位于480°C，Skeaff等，1979），在溶线之上形成的任何子晶都将为混合晶体。在地质时期发生冷却的过程中大概这些原始混合晶体出溶为两种分离相，但是在实验室均一作用之后的冷却过程中它们常常结晶并仍然为单一相保留下来（R.J.Bodnar，私人通讯）。

D. 准稳定性

包裹体研究的一个重要方面是它们的准稳定性，这一方面还没有受到应有重视。体系越小，问题就越突出，既有在室温下那些应该出现的子相不能成核的问题，也有实验室处理过程中碰到的问题，有待下面详细叙述。我们可将包裹体看成是很小的体系，甚至可以以原子的角度来对待。一个直径为10μm、含盐度为30wt %的包裹体只可能有10¹¹—10¹²个盐分子，而在10ppm的PbS溶液中将仅

含 2.5×10^8 个 PbS 分子, 在其边缘上就足以形成一条边缘上只有 300 个 PbS 单位晶胞的晶体。因此毫不奇怪, 由新子相不能凝聚 (除稳定相之外) 而引起的准稳定性已成为在许多类型的包裹体研究中能观察到的现象 (Roedder, 1967b, 1971)。在各种各样的包裹体测定中它会引起一系列错误。

准稳定性在很大程度上 (常常是就温度而言) 是在包裹体致冷过程中根据气泡和子矿物的成核现象来辨认的。这些流体包裹体为细小的均一单一相包裹体 ($<100\mu\text{m}$), 一般捕获温度低于 70°C , 在很大的负压条件下保存了数百万年而没有形成“稳定”的气泡 (Roedder, 1967b, 1971)。有时在冷冻或熔化这种液体时, 将会引起小气泡的凝结, 这是必然的; 但是这种气泡也可能是由包裹体的永久性拉伸形成的 (由于冰形成时包裹体的膨胀), 而不是由成核作用 (见“物理变化”一节) 形成的。一般说来, 盐晶易于成核, 甚至在很小的包裹体中都是这样; 但是具有较低浓度的其他相的成核仅仅一般出现于较大的包裹体中。

含有“拉伸”流体的某些流体包裹体很好地代表稳定平衡, 而不是代表准稳定平衡。随着气泡直径的减少, 表面张力引起气泡内压力急速增加; 在正常平衡条件下具有很小气泡的小包裹体将不具有这种特点。在这种情况下, 即使气泡成核, 但表面张力会引起它们转瞬间消逝, 从而使液体处于张应力作用下。由此, 很小的包裹体测得的均一温度值 $[T_{\text{HL}} - V(L)]$ 很可能不正确 (偏低), 而捕获了同样流体的较大的包裹体将会得到正确测定值。因此, 我们假定气泡直径的下限近似为 $1\mu\text{m}$, 当低于此限度时表面张力将会引起气泡崩溃, 即使不崩溃, 液体由于被拉伸其密度也会低于它的正常值。某个直径为 $2.3\mu\text{m}$ 的球形包裹体, 它含有一个气泡和 10% 的 NaCl 溶液, 在 350°C 的沸腾曲线上捕获, 测得的均一温度仅仅为 300°C 左右, 这就低了 50°C 。这一结果很大程度上取决于包裹体的总体积, 于是直径为 13 微米的圆形包裹体在同等的充填条件下, 它的均一温度测定值的误差仅为 1°C 。由于必要的资料尚不具备 (测得均一温

度的瞬间由于是在“负压”下[●]，准稳定包裹体的流体具有表面张力和可扩张性），因此精确地计算这种效应目前还不可能。实际上，虽然缺乏这些资料，但包裹体本身有可能最终提供其最佳估算值。

在冷冻包裹体过程中，已经观察到冰未能成为新的稳定相而成核，即处于准稳过冷状态；对于 $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{CO}_2 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ 晶体来说，这种现象甚至还要显著（Roedder, 1963）。由于使小包裹体冻结有困难，因而实际上就妨碍了某些包裹体的研究。如果在冷冻过程中通过液体的膨胀使气泡消失，那么在熔融期间这种液体就可处于很大的负压下，并且显示出某些奇怪的相的性质，例如准稳定过热冰的温度至少可达到 $+6^\circ\text{C}$ （Roedder, 1967b）。学生们常常给作者很大一部分混乱的和相互矛盾的资料，其原因就在于把准稳定与稳定平衡资料混在一起了。尽管准稳定性会产生很错误的结果，但是在获得包裹体成分信息方面还是有用的，对于在包裹体资料收集过程中的单调乏味来说，这反过来也算增添了一点开胃品。

E. 人造包裹物

在应用光学显微镜鉴定包裹体时，会经常见到各种各样的假图形和假外貌或实际上的光学人造包裹物，对于显微镜专学来说会马上意识到这些不用去管它们；但是对于初学者来说，可以产生相当大的混乱和时间上的浪费。在较高倍镜下，特别是在 $\times 1000$ 倍和更高倍时，这些影响就变得最为显著了。下面是作者本人和学生在研究工作中碰到的较为常见的例子。

很小的无色物体（ $<1\mu\text{m}$ ）在浅色背景中会呈现有色，特别在物体与主矿物之间呈现不同的色散特性时。被顶（或底）部磨光面切割的包裹体与薄片内部完整的包裹体看上去很不相同，因此许多初学者往往把它们误解为奇异的包裹体。由指纹带来的细小油滴或

●虽然在包裹体中真正的负压颇为常见（Roedder, 1967b），但是这儿的压力是正的；不过低于这些特定组分在稳定平衡条件下所显示的压力，正如R.J. Bodnar（私人通讯）指出的那样。

存在于表面的先前所配置的介质也是常见易引起混淆的根，以及抛光坑、研磨料颗粒或其他碎片也在混乱来源之列。软木粉末以及甚至头皮屑，特别是当它们存在于浸油中时，可以呈现某些奇怪的貌似包裹体的东西。液体中某种圆形气泡（或甚至是某种近似圆形的流体包裹体）起到光学系统中负透镜的作用，它们可能将另一个靠下部的包裹体（或甚至一个物台的光阑带到聚焦位置成像，似乎原来的包裹体中含有另一个气泡，这样常常会导致一种错误结论，以为有液体 CO_2 相存在（简单地加热载片，达 31°C 以上时 CO_2 体系中液—气新月面就不再存在了，这样便可免除这种混淆）。来自某种略为倾斜的相边界面的全反射可以类似不透明相的样子（直至样品的切片与视线方向高度倾斜为止）。

如果主矿物双折射率高（或是片子厚而双折射率低的矿物），那么重影可能造成混乱。最坏的情况，它们可以在气泡的边上形成类似于次生新月面的影像，象是少量的液态 CO_2 。如果插入一个偏光器并转动载物台，则产生一个单一的清晰图像，这些幻影便被清除掉。对于高重折射率的一轴晶负光性矿物，最好使得矿物的常光振动方向平行于下偏光，会得到清晰的影像，视域达最大。

制片用的介质会产生一套不连续的人造包裹物。这样，如果某种折光率油液体或充填介质或胶结物流入因流体包裹体打开或表面坑面造成的洞穴中，特别是如果未完全充填面在流体中留下一个气泡，那么就会形成一些貌似真实的却是假的包裹体。在观察之前用溶剂清洗，特别是进行超声波浴可以避免某些污染，但不是所有的人造包裹物都能免除。完全充填了这类流体的打开的包裹体可能看上去像正常单相包裹体。将这类包裹体流体的折射率与主矿物的进行对比有时能帮助澄清问题，但是这仅仅在你有所用的特殊浸油介质的有关资料时才能办得到。易碎样品在抛光前先浸渍，可能会形成一些逼真的人造包裹物。在配制某些环氧树脂时（特别是如果混合或配方不正确时），在某些条件下可能形成微小的次生不混溶相珠滴。这些可见珠滴存在于样品之下的胶结层，是流体包裹体研究

中的混淆和错误的主要来源（如不合理的混合或粘片过程中引起的空气泡）。

当人造包裹物出现于浸渍样品的树脂中，辨认它们的真假最为困难，因为这些假珠滴看上去像在样品之中。月岩样提供了一件值得纪念的轶事。作者在显微镜下花了数周时间，为了找阿波罗11月岩样的正常两相（液-气）水或二氧化碳包裹体，结果一无所获。像往常一样此类简单包裹体会有相当大的岩石学意义。可我见到的全部为玻璃包裹体，许多这些包裹体具有一个气泡，但是这些气泡是不动的。后来我发现一个钙长石晶体，它具有一个次生两相包裹体的面，其中每个包裹体都具有一个迅速跳动的气泡并且具有恒定的气-液比。很遗憾，它们都是人造包裹物，是环氧树脂充填于钙长石的倾斜裂隙形成的，这些树脂已造成了三个相。环氧树脂主体清洁面坚硬，具有与钙长石十分匹配的折射率，因此二者很难分得清楚。充填在树脂中的是一些微小的、折射率很低的不混溶液体的珠滴，尔后它们又在冷却过程中或通过与环氧树脂壁反应萃取某些组分的过程中形成气泡。当作者看到一小块粘在片于边缘的样品外部的环氧树脂时，这种解释便一目了然了。在这块环氧体中有数以百计的很好的流体包裹体，它们都具有作快速的假布朗运动的气泡。

根据包裹体的几何形态来确定流体包裹体相对于主矿物的视折射率（亦即折射率）会发生错误。根据气体包裹体具有较高的视突起（亦即在接触带由于全反射较宽而显示黑边）可以很容易地对气体包裹体与液体包裹体作出鉴别。大多数液体的折射率大于1.3（水为1.33NaCl卤水1.38），大多数气体的折射率近于1.0，除非是高度压缩气体。然而，某包裹体的视突起随两种因素变化：主矿物与包裹体之间不同的折射率和包裹体的形态。充填低折射率气体的压平的包裹体看上去与充填较高折射率液体的圆形包裹体相同。

当欲估计某包裹体给定相相对于包裹体中的其它相或相对于主矿物的折射率时，该包裹体的几何形态也是很重要的。当二者的折

射率相近时,这种影响就更明显、更注目和更有用了(例如Roedder, 1972, 照片Ⅱ-5和Ⅳ-1)。但是当折射率相差较大时,便产生了问题。在不同相之间近垂直分界面上的全反射可以产生不均匀的线状反射,以致从某种完全不同相的边界上呈现出贝克线。在多相包裹体中有许多相边界,估测各相的折射率是不可能的,除非你能找到压平的包裹体,并且其中每个相都是可见的和孤立的。某些透明的包裹体是有用的,且适于照像,但是很遗憾,在实际包裹体的研究过程中它们是太罕见了。

如果不提一下在研究地球早期生命中有关流体包裹体的若干应用,那么讨论流体包裹体中的人造包裹物问题将是不全面的。人们多次研究了流体包裹体中的氨基酸(如Drozdova等,1964),近代分析技术的发展可能使这种研究成为有机地球化学资料的一个重要来源。然而其他两类研究更近于人造包裹物范畴。这就是Dombrowski(1960)报导的产于某些矿床的石盐中的包裹体中细菌和细菌孢子,它们部分仍然还活着,其中有些是古生代的。通俗读物中曾广泛地引用这一报导。然而就这些样品中的流体包裹体的特征和产状并不排除这些包裹体中的流体和细菌是现代成因的(Roedder, 1972, p.61)。

在前寒武纪岩石中发现的一些包裹物,起初报导为最老的化石(广泛的研究之后),后来申明是流体包裹体(Bridgwater等,1981)。作者后来发现(手稿在准备中)这些包裹物既不是显微化石,也不是流体包裹体,而是制备样品时的充填物。这件事的教训是:虽然光学显微镜是一种强有力的工具,但是由这种工具提供的资料在解释时仍需谨慎小心才行。

最后不可忽视的一点是初学者见到某些包裹体中急速运动现象(非生命的)不必大惊小怪。大多数小包裹体中的气泡呈现恒定的急速而不规则的运动。这种假布朗运动实际上是由于在这个非常小的范围内局部温度发生极微细的统计上的随机变化,而造成了气泡表面的张力不同,随着这种差别液相在气泡表面发生非常急速的流

动。虽然有的气泡很小，但不是所有的气泡都以这种方式运动，在某一热梯度环境中运动方向还可能相反（Roedder, 1966, 1967c）。在均一化前，小气泡一般消失于包裹体旁侧的暗边中，两者具有相似的消失方式，但反映了热台中存在着热梯度。

但是偶尔可以见到很规则的运动，它们全都是基于从显微镜光源的红外吸收产生的主样品中的微区静热梯度，可将这种运动分成三类：第一类，在某一热梯度下包裹体中固定气泡上的急速表面流可能驱使整个液体产生内旋涡，并且液体中的任何微小固体微粒（例如 $\sim 1\mu\text{m}$ ）可能沿着很规则的循环途径运动。第二类，这类固体微粒通常粘附于气泡表面（很明显它们具有最低能量结构）。这种气泡上的表面流可能携带微粒以规则的循环途径作如此快速运动，以致用眼睛是几乎无法辨认的。第三类，少数气泡按包裹体全长作十分规则地摆动，但是它们的周期是周围温度的综合函数。这些颇为神奇的现象提供了通过显微镜研究这种有趣的运动图象的基础（Roedder, 1966）。

（二）物理变化

A. 形态变化

许多包裹体，或许是大多数包裹体现在都不具有它们捕获瞬间的形态了。当原始捕获时，许多流体包裹体都有相对较大的表面积。例如在有些矿物中原生包裹体以狭长的愈合裂隙和长管状为其特征。如果主矿物在这种流体中全然是可溶性的，那么，就会立刻开始重结晶作用过程，亦即通常被称之为颈缩的作用，则使该体系的表面能大大减小。由于所涉及的距离不大，因此扩散不会有很大的速率限制，但是很明显主矿物的溶解度是有限的。Lemmlein在一系列文章中指出过（1929，尤其是Lemmlein和Kliya, 1952），通过水溶盐的晶体破裂形成的包裹体可以观察到这些形态的变化，并可用顺时间推移照相法将形态变化摄下来。晶体壁中的港湾被壁的主体部分溶解的物质所充填，于是整个包裹体便聚合成较为等轴的简单的窝穴中。某些拉长的包裹体逐渐发育了一些膨大部分，它们被

颈缩分离开，最终被分离封存(图5—3、5—4)。这种颈缩的最后结果是形成数个较小的包裹体，它们具有较小的总表面能。或许在更小的范围内还存在一种类似的过程，即沿晶体位错，溶剂和溶质的分子发生再改组，产生一连串的微细的包裹体。

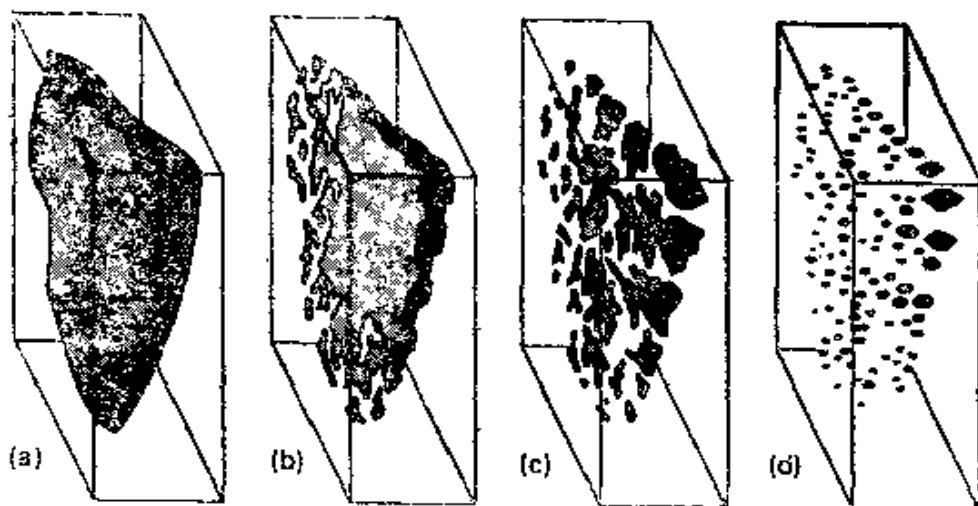


图5—3 在形成次生包裹体时某石英晶体的裂隙愈合阶段图解

首先是随意曲面的溶解；随后发生再结晶作用。如同树枝晶体生长；最终形成多面体负晶形包裹体。如果这一过程发生于降温过程，那么每个包裹体将会具有不同的气液比(见图5.4，据Roedder, 1962)

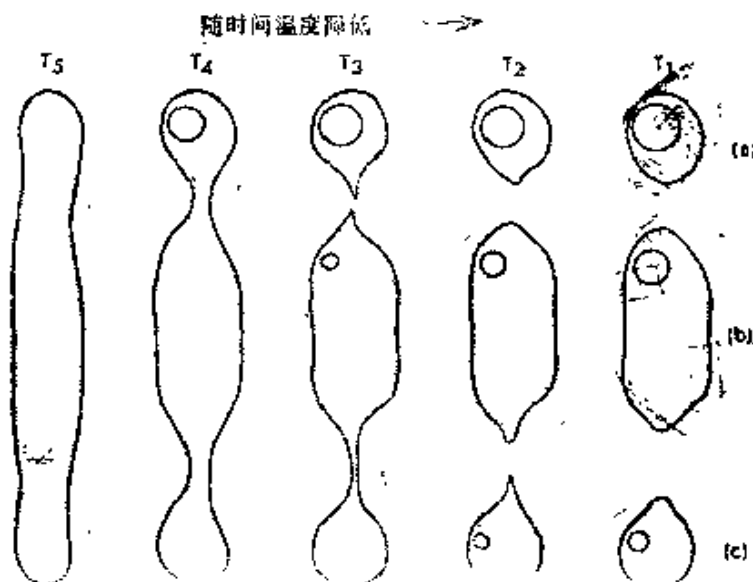


图5—4 长管状包裹体的颈缩图解。在温度为 T_5 时捕获的原生包裹体，在缓慢冷却期间解体为三个分离的包裹体

(a)、(b)和(c)。当其在实验室中再加热时，(a)包裹体将在真正的捕获湿度 T_5 之上均一，(b)包裹体将在 T_5 之上均一，(c)包裹体将在 T_2 与 T_5 之间均一(据Roedder, 1962改编)

主矿物的再结晶对体系的总成分没有影响，但是如果任何相的改变发生于颈缩或聚合之前，那么新形成的包裹体就可能具有非常不同的成分和密度。对于以包裹体充填温度为依据的地质温度计和地质压力计来说，这种可能性具有很大的意义。因为在（卡脖子时）新形成的包裹体之一中可能捕获整个气泡，而其它新的包裹体随着温度进一步降低可能凝聚它们自己的气泡（图5—4）。虽然图5—4表示的颈缩证据是清楚的，并且它对均一温度（ T_h ）的影响大到可明显地观察到，但是未被认识的颈缩仍然可能是某些详细的地质温度计研究资料中数据分散的主要原因之一。总的实际的封闭温度可能接近于原始形成的温度，因此气液比的差异可能不足以大到能识别出来。●

如果子矿物形成于卡脖子之前或卡脖子期间，那么它们常常会留下来，并被主矿物完全包围，但是可与附近的缺乏特殊子矿物的流体包裹体一起存在。Colombian的纯绿柱石矿山的石英晶体常常出现完好的立方体NaCl，并且完全包裹于石英主晶之中。少数这类立方体呈现很细的管状，有时它们在显微镜分辨能力的范围内，可见到这些子矿物与数微米远处的液体包裹体相连接。很显然，要想辨认卡脖子的存在必须细心观察才行。当颈缩现象发展过程中发生突然中断时，包裹体之间长长的拖尾就会看得清楚。然而当充分重结晶之后，只有通过两个或多个包裹体在相反方向上的不同且又相邻产出才能辨认颈缩现象（例如相对于其它他附近的包裹体气泡过大或过小），有时通过被主晶包围的遗弃的子晶来辨认卡脖子现象。如果有谁认为在他的样品中未出现卡脖子的现象，那么他得记

●正如Ermakov和Kalyuzhnyi（1957）以及其他人建议的那样，防止异常包裹体的办法是排除那些均一温度无效的包裹体，因为这些包裹体是通过颈缩、原始气体或渗漏形成的。但是完全可能这类包裹体并非异常包裹体，仅仅是形成条件突然变化造成的，由此产生的包裹体看上去像异常包裹体。在正常包裹体与异常包裹体之间要划一条界线是困难的，这里涉及到主观性，自从Sorby利用这种有选择性的方法使他的样品产生偏差而受到批评以来，对该方法的有效性便引起了怀疑。