

地球内部流体的动力学过程与机制*

张毅刚

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

关键词 地球内部流体 物理化学性质 渗透机制 动力学过程

1 现代地球科学

地球内部流体行为研究涉及到 5 个方面的问题: 即流体在地球内部不同层位的 (1) 存在形式; (2) 分布; (3) 来源; (4) 迁移过程以及 (5) 迁移过程中与所附存的岩石间所发生的化学的和物理的作用. 这 5 个方面代表了地球内部流体研究的最关键性问题. 地球内部流体的动力过程 (dynamic processes) 则主要是指第 (4) 和第 (5) 个问题. 由于进行地球内部流体研究所涉及问题的广泛性和特殊性, 以及进行地球内部流体研究时必须以整个现代地球科学为背景和基础, 在探讨地球内部流体的性质及行为之前, 让我们首先来简要考察现代地球科学.

地球科学以我们赖以生存的地球为研究对象, 研究它的过去和现在. 进行地球科学研究的目的除了纯科学的探索以外, 还要解决我们人类生存的 3 大问题, 即资源的获取、环境保护和灾害防治. 从地球科学的研究方法和进行研究的哲学基础来看, 地球科学要研究地球现在的性质、状态和较短时间尺度的演化, 从这方面讲地球科学与物理学、化学和生物学一样是一门自然科学. 同时, 地球科学还要研究地球在过去较长时间尺度内的演化, 从这方面讲, 地球科学又与考古学、历史学一样是一门历史性科学. 这是地球科学研究所特有的二重性.

对地球的研究从时间上看有两种, 一种是从天文学的角度将地球放到太阳系或宇宙中, 以此为背景, 通过天文观测、陨石和惰性气体研究等, 研究地球的起源、初始状态和演化. 从时间上讲是顺时间方向进行推理; 另一种是从现在在地球上所观察到的现象, 通过地球物理观测、岩石学和地球化学等研究, 来推测地球曾经经历的演化. 从时间上讲是逆时间方向进行推理. 这两种研究的结果应该在地球演化的某一个时间段上对应起来.

地球科学所进行的是一种非常复杂和困难的研究. 这是由于: (1) 地球系统本身的极其复杂性. 这种系统在大多数情况下是多相的、非均匀, 演化模式是非线性的; (2) 整个地球演化的多尺度性 (multiscale). 某一重要地球科学问题的提出和解决常常涉及在时间、空间和能量等方面差别较大的多个尺度. 不同尺度上各种地质过程的耦合造成了我们全面综合认

* 中国科学院科技政策局资助项目

识地球的困难性。连续的或离散的尺度转换时知识和信息的保存及丢失情况在我们建立地球演化模型时必须予以考虑^[1]；(3) 研究者只处于地球表面，对地球内部的研究在大多数情况下只能使用间接的方法进行推断。目前我们人类能采集到的地球内部的样品只是到达地球深部 200km 左右的岩石，这只是整个地球深度的很少一部分，对地球更深部的研究只能通过外来的陨石样品、高温高压实验和地球物理等间接的研究方法进行；(4) 在研究地球的长期演化过程中，与其他历史性科学一样，地球科学具有只能论证但却很难最终彻底证明的特性。这使得地球科学的任何理论均具有很大的争论性，致使地球科学以较慢的速度向前发展。地球科学的这些特性对从事地球科学研究的地质学家提出了很高的要求：现代地球科学家不但应该具有与数学家、物理学家和化学家一样坚实的现代数理化知识基础，还需具备有多年积累的野外工作经验以及更丰富的想象力和更为慎重踏实的精神。

到目前为止，地球科学中两个占优势的理论，一个是地球形成的星子堆积理论（如见文献 [2]）；另一个是起源于大陆漂移学说的板块构造理论。板块构造理论主要是根据来自大洋壳的数据建立起来的，它在研究大陆壳中的应用并没有获得完全的成功，尽管现在仍然把板块构造理论或它的修正版作为研究大陆板块的基础。造成这种现象的原因是由于大洋壳的年龄只有 2Ma 左右，而大陆上的岩石记录着地球几十亿年的演化历史，多次的构造和岩浆活动的叠加使人们很难用板块构造理论给以完全解释。此外，板块构造理论论证的是地球最表层刚性壳层的运移规律，它对地球内部所处的状态和所发生的各种动力学过程并没有详细的说明，而实际上板块运动只是地球内部各种动力学过程的表象和结果，要想了解整个地球过去、现在和未来的演化，就必须对内部过程有更加深入的认识。因此，未来的地球科学理论应该是将深部过程与浅部过程相结合，得到立体的而非表层的地球整体动力学演化理论。只有建立了这种地球演化理论，才能认识地球现在以及曾经经过的演化，也才可能认识未来地球的演化方向。这种理论的建立，要求我们对地球内部各种地质过程有更为深入的认识。以下我们将会看到，由于流体在地球内部的广泛存在，深刻影响着各种地质过程的进行，对地球内部流体行为的深入认识是我们构筑上述理论的基础。

2 地球内部流体的重要性与复杂性

从地球的大气圈、水圈到地球内部（地壳、地幔和地核）的流体都由挥发性元素组成，挥发性元素包括氢（H）、氦（He）、碳（C）、氮（N）、氧（O）、氟（F）、氯（Cl）、溴（Br）、碘（I）、砹（At）、氖（Ne）、氩（Ar）、氪（Kr）、氙（Xe）、氡（Rn）、硼（B）、磷（P）、硫（S）。这些元素即是构成地球大气圈、水圈和生物圈的主要元素，也是组成存在于地球内部各种成分的气体、水溶液，其中既包括位于地球较浅层的石油、天然气和地下水，也包括深部变质过程、矿床形成过程中的流体。它们或者以单独的流体存在，或者以某种形式（如水以 OH^- 或 H^+ 形式）存在于各种矿物中^[3]。

流体在地球内部是无所不在（ubiquity）的。如图 1 所示，在地球的圈层结构中，无论是从体积比还是从质量比来看，地壳只是占其中很小的一部分，而地幔却占了最重要的部分。在地表水圈中水的总体积约为 $1.360\ 00 \times 10^{21} \text{ kg}$ ，其中海洋占 97.2%，冰盖和冰川占 2.15%。我们目前对地球内部各圈层中水的含量还不很清楚。上地幔主要由石榴石二辉橄榄

岩组成, 通过采集玄武岩等火成岩中地幔包体的研究表明, 这种岩石中的不含结构水的矿物在其晶格缺陷中可能含有约 $(10 \sim 500) \times 10^{-6}$ 水, 与上地幔的总质量相比, 水的量与地球水圈中的水量相近. 下地幔主要由钙钛矿组成, 最新的高温高压实验研究表明, 这种矿物也可能含有约 $100 \sim 300$ 的氢/ 10^6 硅, 这样下地幔中约含有相当于海洋中 5% 的水^[4]. 各种岩石中矿物气液包裹体的存在, 证明了这些矿物形成和演化过程中单独流体相的存在. 最近几年对金刚石中流体包裹体的研究产生了许多重要发现^[5,6]. 在金刚石中不但发现了水、 CO_2 , 而且发现了高压分子氢和碳氢化合物. 这表明即使在很深层, 也有单独的流体相存在. 所有这些均直接或间接地证明了地球深部大量流体的存在.

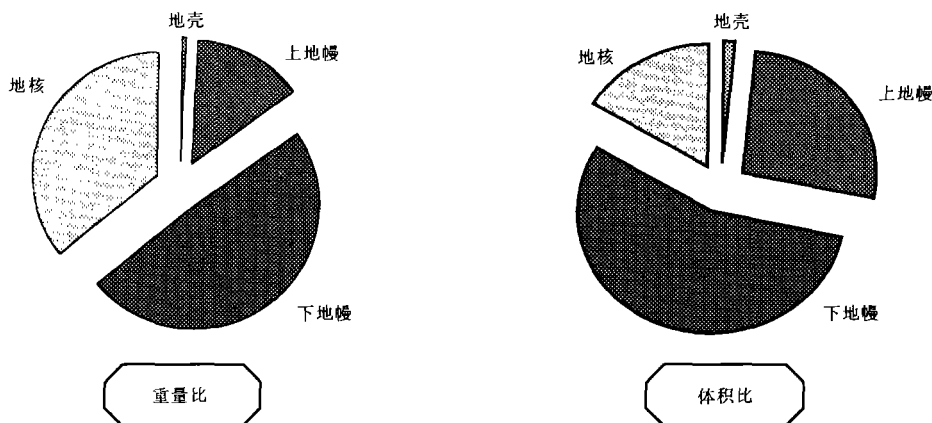


图 1 地球圈层的重量比和体积比

目前, 尽管我们对地球内部不同层位流体的来源和状态还不是很清楚, 但我们对这些流体在整个地球的形成和演化中所起的重要作用是有充分认识的. 流体的量与固体岩石相比虽然是 ppm 级, 但却是最活跃的组分. 地球分异过程, 包括地幔去气等作用使流体向浅部迁移, 而板块在汇聚边缘下插又使浅部流体向深部迁移, 使流体加入到几乎所有的深部及浅部地质作用中, 并对这些作用产生决定性的影响. 如地幔岩石中少量流体的加入将极大地影响这些岩石的粘度和电导率, 从而影响诸如核幔边界性质、地幔对流、地幔交代、地幔柱的形成、软流层性质以及岩浆生成与演化, 进一步影响到板块漂移、造山运动等表层地质现象. 图 2 (a) 是透辉石与钙长石在无水 and 不同水压下的熔融相图. 图中数字 1, 2 和 3 分别为不含水、水压为 0.5 GPa 和水压为 1 GPa 时系统的最低共结点. 可以看出在不同含水情况下, 岩石开始熔融的温度和所生成岩浆成分是不同的, 从而导致了这些岩浆粘度性质的不同. 这样, 流体一方面造成了岩浆的多样性; 另一方面由于粘度的不同导致岩浆上升过程的不同. 在岩石变质过程中, 流体的来源可以是矿物自身的脱流体作用, 也可以是外来的. 流体在通过岩石的过程中 (infiltration), 它们都将与岩石发生化学反应, 带来或带走热量和溶解于其中的物质, 影响岩石的变形. 变质过程中流体是与温度和压力一样的第 3 物理化学参数. 图 2 (b) 为某一变质反应 ($A + B \rightarrow C + D$) 过程示意图. 图中箭头 1 表示外源流体作用下变质反应的进行过程, 箭头 2 表示内部来源流体的变质反应情况. 流体的来源及成分决定了变质

过程的发生和发展以及所生成岩石的特性. 实际变质过程中流体的作用是非常复杂的. 在探讨各种地质过程中流体的行为时, 变质过程中流体的行为大概是最为复杂的一种, 这是与变质过程本身的复杂性分不开的. 变质过程的复杂性体现在: (1) 矿物种类多样性, 从而导致多种多样复杂的矿物反应; (2) 流体成分的多样性, 导致流体与矿物之间的反应也是多种多样的; (3) 化学过程的多样性. 由于固体-固体-流体的相互作用, 使得各种化学过程均有可能发生, 如元素的扩散、矿物的溶解与重结晶、同位素分异等等, 其中非平衡的物理化学更增加了这种复杂性; (4) 由于变质过程一般伴随着应力作用, 常常造成岩石和矿物复杂的变形; 上述多样性及多种作用造成变质岩粒间结构与环境的多样性, 最后导致流体复杂的渗透行为. 这种流体与岩石的相互作用是非线性的, 并且是热力学、水力学和化学耦合的. 对这种复杂过程的认识是对人类智慧的挑战.

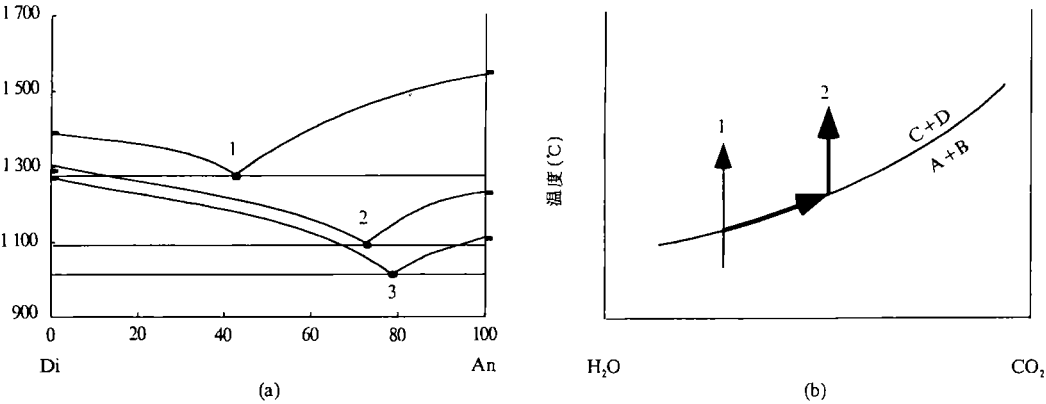


图 2 流体作用下的岩石熔融和变质相图

流体重要性还体现在实际应用方面. 地球上绝大数重要的矿产资源的形成和分布与流体密切相关. 如水本身就是人类赖以生存的最重要资源. 随着经济的发展, 人们越来越认识到一些地区水资源的匮乏和污染将会制约经济的发展甚至危及人类的生存. 石油、天然气等流体是制约一个国家国民经济发展的最重要的能源. 大多数不同类型的金属矿产的形成有赖于流体从岩石中将丰度很低的元素萃取出来, 然后搬运和富集, 最终形成可开采的矿床.

目前人们极为关心的现在和未来全球气候环境变化也是与地球内部流体密切相关的. 地球的脱气作用 (如火山爆发) 释放出大量的 CO₂, H₂S 和 CH₄ 等气体, 这对地球的气候有较大的影响. 一些重大工程的实施, 如油和气田的开发与利用 (如石油的高效率开采)、大坝的建设、地热资源的开发和利用、核废料的处理和工业污水的地层注入处理工程等, 均涉及到流体并且需要对流体的性质和行为有深入的认识.

3 对地球内部流体作用的研究

由于流体在各种地质过程中和对提高人类生存质量起着重要作用, 必须对地球内部流体的成分、存在状态和行为进行研究. 这一点已经成为许多地质学家的共识, 并且进行了大量的研究工作.

过去对流体所进行的大量研究是从研究者所从事的专业,如矿床学、岩石学或环境保护的角度,对某一特殊地区的特殊岩石类型的形成过程中流体的作用进行研究.对流体研究所提出的问题也是非常具有专业特殊性的.如在研究矿床的形成时,我们提出的问题是:矿物质和流体的成分和来源是什么?在流体中矿物质是呈何种形式被搬运的?运移过程中流体是如何与岩石相互作用的?矿物质是如何从岩石中沉淀的?所有这些受什么物理化学条件的制约?在从事流体与环境保护方面的研究时,我们提出的问题是:被污染的、含有大量有机和无机物的水在地下是如何运移的?污染物的传播和沉淀距离是多少?在此过程中水会被净化吗?在研究石油过程中,我们会问,石油是如何生成的?如何汇集并储存在现在的位置?如何最有效地开采石油?等等.实际上我们可以把各种自然过程中的流体问题归纳到 3 个大的方面,对流体的研究就是对这 3 个方面的问题的回答:(1)各种成分流体本身的物理化学性质;(2)流体在岩石中是如何渗透的;(3)渗透过程中流体是如何与岩石发生作用的.

这 3 个方面问题的研究程度是不一样的.对于第(1)个问题,已经做了大量的实验工作.这方面的工作,最重要的就是建立各种成分的流体在各种温度和压力下的状态方程.这项工作正在从理论和实验两个方面得以解决.实验方面即可以利用传统的高温高压设备进行,也可以利用人造气、液包裹体方法或者 Diamond Anvil Cell 进行.人造气、液包裹体方法可以在传统的高温高压设备难以达到的温度和压力条件下对复杂成分的流体进行研究.理论方面涉及到利用包括分子动力学(molecular dynamics)在内的许多统计物理学方法来研究流体在高温高压下的状态方程,这种方法在目前实验还很难达到的温度和压力条件下获得流体的状态方程方面得到了较广泛的应用.建立流体在高温高压下的状态方程具有重要的意义:(1)在研究天然流体包裹体时必须使用各种流体的状态方程才能了解流体包裹体的形成温度和压力.图 3 为水、盐体系的 P - T 相图.点 3 代表气液线上的临界点,点 2 为流体包裹体的形成温度和压力,点 1 为流体包裹体的均一温度和压力.通过冷热台求得流体包裹体的均一温度 T_h ,利用状态方程就可以求得流体包裹体的形成条件;(2)在流体-岩石物理化学平衡的研究中,也需要了解流体在高温高压下的状态方程,这是因为在物理化学平衡时,各参加反应物质的化学式相等,即 $\mu_i^A = \mu_i^B$,而某物质在某一相中的化学势:

通过冷热台求得流体包裹体的均一温度 T_h ,利用状态方程就可以求得流体包裹体的形成条件;(2)在流体-岩石物理化学平衡的研究中,也需要了解流体在高温高压下的状态方程,这是因为在物理化学平衡时,各参加反应物质的化学式相等,即 $\mu_i^A = \mu_i^B$,而某物质在某一相中的化学势:

$$\mu_i^A = \mu_i^0 + RT \ln(P/P^0) + \int_0^P (V - RT/P) dP,$$

其中最后一项就是用到流体在高温高压下 P , V , T , X 之间的关系.故建立高温高压下各种成分流体的状态方程是非常重要的.上述研究方法是在传统的物理化学思想的指导下对平衡的静态系统进行研究.

其他流体的重要性质包括流体的粘度系数、

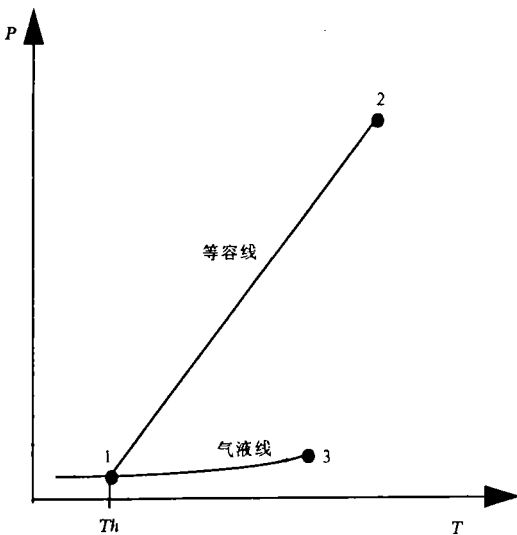


图 3 测量流体包裹体形成的温度和压力示意图

热导率、电导率等等。目前也已经进行了一些研究。这些研究对地质过程中流体作用的认识具有更重要的意义。如各种流体粘度的研究是我们认识流体在岩石中的渗透速度的重要基础数据。流体电导率的研究^[7]是进一步从事地球物理工作的基础。

对第(1)个问题的研究我们已经取得了许多成果,但对第(2)和第(3)个问题的研究还不够深入,仍有大量的工作要做。过去所从事的大量的流体与岩石的相互作用均是在封闭体系、流体-岩石相互平衡的条件下进行的。流体-岩石物理化学相互作用包括:(1)矿物和矿物组合的溶解度(solubility);(2)流体-岩石平衡相图(phase diagram);(3)元素在岩石与流体间的分配系(element partition);(4)同位素分异(isotope fractionation);(5)流体-岩石反应速度(kinetics of chemical reactions);(6)元素扩散系数测量(diffusion coefficient measurement)。

在岩石微结构以及流体-岩石机械作用(mechanical interaction)方面所进行的研究包括:(1)岩石空隙度的测量^[8];(2)矿物子晶的形成与生长^[9];(3)流体对岩石及矿物变形的影响^[10];(4)二面角测量(dihedral angle measurement)^[11]。

所有这些方面的研究加深了我们对流体-岩石相互作用的认识,使我们对地球内部流体-岩石相互作用有了一定的认识。但这些还不能使我们真正地认识自然过程。这是因为上述研究绝大部分只是从流体-岩石相互作用的某一个单方面进行静态平衡的研究,还没有对流体-岩石相互作用进行综合的、动态的、各种影响因素相互耦合的、非平衡、非线性的研究。从根本上去理解流体在岩石介质中的微观动力学过程和机制,对许多地质学家来说是一个具有共性的迫切的问题。这一问题的解决对许多更具体的地质问题的理解将有极大的作用。下面我们就来考察现代数学和物理学理论为这一问题的解决所提供的那些启示。

4 对流体渗透机制的研究与认识

如上所述,流体-岩石相互作用归纳起来有两个方面:一是当流体以某种方式存在于矿物中,不以单独的流体相存在时所涉及的问题;另一个就是当流体以单独的流体相存在时,流体在岩石介质中是如何渗透的,以及与此种渗透同时发生的流体和岩石介质本身的变化是如何影响这种渗透的。这两个方面所涉及的问题和研究方法是不同的。下面我们对第二个方面进行回顾、总结和探讨。

最早建立的流体-岩石相互作用的模式是如图4所示的一种黑箱模式(black box)。这种模式实际上就是以Navier-Stokes方程为基础的一种宏观的连续模式。此种模式首先建立介质连续方程、流体流动方程和热传导方程,然后通过有限元等方法求这些方程的解。这种模式的共同特点是:一般不涉及具体的流体渗透机制而综合考虑同时发生的物理和化学反应、应力等,因此就不能深刻理解流体的整个渗透过程;同时模式本身还存在如

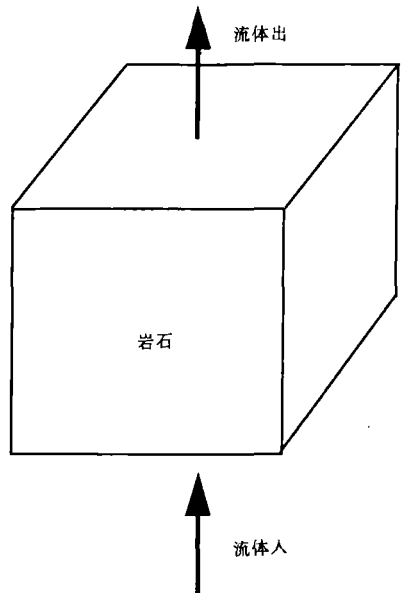


图4 黑箱模式示意图

下问题：边界条件的限制，各种物理变量的参数化（parameterization），由于过分近似与理想化，使得整个模式过于简单。黑箱模式只是我们认识流体渗透机制的一种权宜之计（expediency）。在探索变质过程中流体对物质与能量的搬运，以及同时发生化学反应的情况下，这种模式已建立了许多，如 Ferry^[12,13] 提出水岩比（water-rock ratio）和 time-integrated fluid flow 等概念。Lasaga^[14] 提出了 kinetic isograd 的概念，Steefel 和 Lasaga^[15] 将流体渗透与同时发生的化学反应进行了综合考虑。其他专业的研究也建立了许多类似的模式。

流体如何在岩石中渗透的另一个模式是微观的离散模式。这种模式将流体考虑成大量的微观粒子，通过粒子运动的统计物理学规律，来探讨流体运动的宏观效应。在应用这种方法探讨流体如何在岩石中渗透这一问题之前，我们必须首先对岩石本身的微结构进行考察。岩石结构的重要性体现在：（1）它是对岩石所经历的地质过程的反映。一定的地质过程必然造成一定结构的岩石，因此对岩石结构的认识是我们认识地质过程的重要方面；（2）对岩石结构的认识是我们认识流体-岩石相互作用的重要方面。流体在不同结构岩石中的分布和渗透行为是不一样的，因此研究岩石结构是我们认识流体在岩石中渗透行为的重要基础。

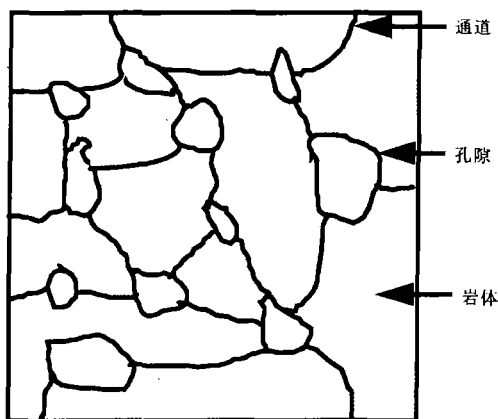


图5 岩石结构组成示意图

如图5所示，岩石的微结构由下列3部分组成：岩体、孔隙、通道。岩体由各种矿物组成，连接孔隙的通道可能是裂隙，也可能是矿物间的接触面。孔隙的多少决定了岩石储存流体的能力，而通道的多少和大小决定了流体在岩石中的渗透速度。

已有的大量研究表明岩石的微结构具有如下物性：（1）随机性与层次性（randomness and hierarchy），如岩石中裂隙的随机分布以及大断层和小裂隙的同时存在；（2）在某一

空间尺度范围具有自相似的分形结构；（3）岩石结构可以是一种平衡结构，也可以是近平衡或远离平衡的结构，这3种情况在岩石中均有可能存在；（4）微结构与形成它的地质过程密切相关，并随着地质过程的进行不断发生改变。岩石微结构的这些特性，使我们有可能应用现代分形理论的方法对岩石结构进行定量化的研究^[8]。以此为基础，我们就有可能应用现代统计物理学的方法对流体在岩石中的渗透机制进行研究。

统计物理学对流体渗透过程进行动态模拟所使用的方法包括：（1）迁渗理论（percolation theory）；（2）侵入迁渗（invasion percolation theory）；（3）扩散限制集聚（diffusion-limited aggregation）；（4）有效介质理论（effective medium theory）；（5）格子气理论（lattice-gas automata）。这些方法已经被广泛应用于研究流体在有孔介质中的渗透方面，取得了许多成果。下面对上述迁渗理论模式做一简要的介绍：

迁渗理论的概念由 Flory 和 Stockmayer 于 50 多年前在研究胶凝过程时提出，而迁渗这一名词是于 1957 年由 Broadbent 和 Hammersley 在研究流体在随机介质中的运移时提出的。

经过多年不断的发展，在物理学和化学的许多方面获得了广泛的应用，如固体相变，更多的应用是在考虑流体在有孔介质中的渗透，特别是不混溶流体的渗透。

迂渗理论的原理如图 6 所示，图中的圆点对应于岩石中的孔隙 (site)，细线对应于岩石中连接孔隙的通道 (bond)。有两种方式来决定流体在岩石中的渗透性，第一种是流体的渗透性取决于 site 的连通性 (site problem)，第二种是流体的渗透性取决于 bond 的连通性 (bond problem)。这两种问题可以对等互换。连通的 site 或 bond 组成群 (cluster)，假设网格中任一 bond 是连通的概率为 P ，则必然存在一临界概率 P_c ，使得整个网格对于流体而言是连通的。这时的网格为无穷大。在网格对于流体是连通的情况下，流体的流量 Q 由下述公式决定：

$$Q \propto (P - P_c)^t ,$$

其中， P_c 随着网格结构的不同而变化，而指数 t 只与网格的维数有关。 $P = P_c$ 时的临界群

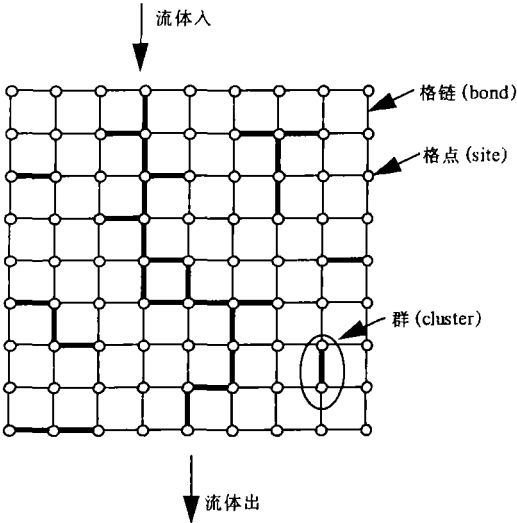


图 6 迂渗理论基本组件示意图

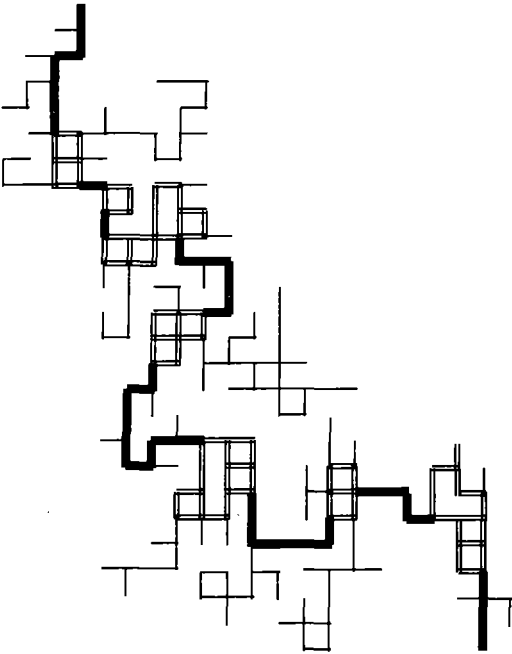


图 7 临界群组件

— 为死角， — 为红色通道， = 为蓝色通道

(critical cluster) 由下列三部分组成 (见图 7)：死角 (damgling end)、红色通道 (red bonds)、蓝色通道 (blue bonds)。死角对流体渗透不起作用，但对整个网格的孔隙度有贡献。红色通道是那些一旦被切断，整个网格对流体就不具渗透性的那些通道，同时由于这些通道承载了所有流动流体，因此也会是最热的，所以称为红色通道。蓝色通道则是由几个 bond 共同承载流体的流动^[16, 17]。计算机模拟表明，由这三部分组成的群具有分形 (fractal) 的特性。这样一种特性对于我们研究自然岩石的渗透性质是有很大启发的。由此我们可以看到，即使岩石介质本身是均匀的，流体在其中的渗透却不是均匀的，而是区域化的 (localized)。那么在变质过程中，当外源流体通过岩石时，变质反应也可能是区域化的。在这一方面还有很多进一步的工作需要进行。

迂渗理论的进一步发展就产生了侵入迂渗理论。在研究不混溶流体渗透方面，这种理论获得了较广泛的应用。当被渗透介质由岩石和一种流体组成，而又要考虑另一种流体在其中的渗透

时,可以使用侵入迁渗进行初步的认识和研究.当侵入的流体是高粘度的流体,而原来岩石中的流体是低粘度的流体时,这种现象被称为 imbibition,反之,这种现象称为 drainage.当非湿润性(nonwetting)流体推动湿润性(wetting)流体时,有3种情况出现:(1)当两种流体的粘度比很大时,流体将发生稳定的移动(diffusion limited annihilation),即 anti-DLA(其中 DLA 代表 diffusion limited aggregation,即扩散限制积聚);(2)当粘度比很小时,发生 viscous fingering,即 DLA;(3)而当毛细管力占主要地位时,就发生 capillary fingering.反之,当湿润性流体推动非湿润性流体时,整个有孔介质是均匀地被侵入的^[18].这时侵入流体和被侵入流体之间的界面将是一种自拟似(self-affine)分形.这样,在不混溶流体渗透过程中粘度将起重要作用.

在迁渗理论的实际应用方面,文献[19]利用迁渗理论探讨了地壳深部流体向浅部运移过程中,由于流体的热量造成地壳岩石裂隙的封闭,使流体集中化(channelization)的问题.O'Hara^[20]应用方向性迁渗理论(directed percolation theory),对韧性剪切带中流体与岩石之间发生的应力作用和化学反应进行了研究.他首先对方向性临界群进行了简单的剪切变形,得出了与自然界剪切带相似的几何形状.在用随机模型研究方向性临界群孔隙度随时间变化时发现剪切带有自组织临界性(self-organized criticality).这一性质将使系统向一稳定态过渡,稳定态对应于系统的临界渗透性.

从上述讨论我们可以看出,新的分形理论的应用使我们对岩石介质本身的几何性质进行研究成为可能.现有统计物理学理论提供了流体在有孔介质中渗透的图象,使我们对流体在岩石中的渗透机制有了一定程度的认识.将这些最先进的理论应用到实际自然过程中,我们会发现所有这些研究仍然是初步的,只能描述相对简单的地质过程,如简化的沉积过程和成岩过程中流体的行为,而对流体渗透同时发生的物质和能量迁移和化学反应及应变的耦合过程仍然不能完全描述.但这些研究将能够给予我们在认识自然的努力中许多启示,使得在实际的研究中我们有可能建立新的观察对象,而不仅仅是原有的全岩分析、单矿物分析、同位素分析、流体包裹体分析等,只有突破传统性的研究方法,建立新的观察对象,才能使我们对地质过程的认识更加深入.

5 结语

现代地球科学以寻求地球的形成和演化过程,解决人类生存的三大基础问题——资源、环境和灾害为自己的研究目的,探索地球的过去、现在和未来.由于地球科学所特有的二重性和其他因素的影响,使得地球科学的研究非常困难和复杂.流体以各种存在形式在地球内部广泛分布,它加入到各种地质过程中去并对这些地质过程产生重大影响,同时流体在实用方面作为一种重要的资源及其与各种地质灾害的密切相关性,使得对流体的研究在现代地球科学研究中占有极其重要的地位.对流体在地球内部行为的认识是我们认识地球演化的重要基础之一.

对流体的研究除了研究流体本身的物理化学性质以外,更重要的是研究流体在岩石介质中的渗透行为和流体在渗透过程中与岩石发生的物理化学作用.流体在具有复杂结构岩石介质中的渗透以及同时发生的各种物理化学和应力作用是非平衡非线性的动态过程,对于这种

多种因素耦合在一起的过程, 传统的平衡静态理论是无法描述的. 现代分形理论和统计物理学理论为定量描述岩石结构和流体渗透机制提供了新的研究方法, 这些研究方法使我们有可能建立起野外实际研究中新的观察对象和新的研究方法. 流体-岩石相互作用耦合性问题的解决将极大地加深我们对地质过程以至整个地球的认识.

参 考 文 献

- 1 Torgersen T. Modeling and testing coupled hydrological processes. EOS, Feb. 15, 1994
- 2 Ahrens T J. The origin of the Earth. Phys Today, 1994, 38~45
- 3 Thompson A B. Water in the Earth's upper mantle. Nature, 1992, 358:295~302
- 4 Meade C. Assessing the hydrogen content of the Earth. Year Book 92 (1992~1993) of Carnegie Institution of Washington, 1993, 86~91
- 5 陈 丰. 地球深部的基本化学机制——来自金刚石包体研究的启示. 见: 欧阳自远主编. 中国矿物学岩石学地球化学研究新进展, 1994. 219~220
- 6 刘若新. 中国东部大陆上地幔的化学和物理状况. 见: 欧阳自远主编. 中国矿物学岩石学地球化学研究新进展, 1994, 319~320
- 7 Marshall W L, Frantz J D. Electrical conductance measurements of dilute, aqueous electrolytes at temperatures to 800°C and pressures to 4264 bars; Techniques and interpretations. In: Ulmer G C, Barnes H L eds. Hydrothermal Experimental Techniques, 1987. 261~293
- 8 Katz A J, Thompson A H. Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements. J Geophys Res, 1987, 92: 599~607
- 9 Olgaard D L, Evans B. Grain growth in synthetic marbles with added mica and water. Contr Mineral Petrol, 1988, 100: 246~260
- 10 Tullis J, Yund R H. Transition from cataclatic flow to dislocation creep of feldspar: mechanisms and microstructures. Geology, 1987, 15: 606~609
- 11 Brenan J. Development and maintenance of metamorphic permeability: Implications for fluid transport. Review in Mineralogy, 1991, 26: 291~320
- 12 Ferry J M. Reaction progress: A monitor of fluid-rock interaction during metamorphic and hydrothermal events. In: Walther, J V, Wood B J eds. Fluid-rock Interactions during Metamorphism. New York: Springer-Verlag, 1986. 60~88
- 13 Ferry J M. Dehydration and decarbonation reactions as a record of fluid infiltration. Review in Mineralogy, 1991, 26: 351~394
- 14 Lasaga A C. Fluid flow and chemical reaction kinetics in metamorphic systems: A new simple model. Earth and Planetary Sci Lett, 1989, 94: 417~424
- 15 Steefel C I, Lasaga A C. Putting transport into water-rock interaction models. Geology, 1992, 20: 680~684
- 16 Stanley H E. Cluster shapes at the percolation threshold; An effective cluster dimensionality and its connection with critical-point exponent. J Phys, 1977, A11: L211
- 17 Herrman H J, Stanley H E. Building blocks of percolation clusters; Volatile fractals. Phys Rev Lett, 1984, 53: 1 121~1 124
- 18 Lenormand R, Touboul E, Zarcone C. Numeric models and experiments on immiscible displacements in porous media. J Fluid Mech, 1988, 189: 165~187
- 19 Germanovich L N, Lowell R P. Percolation theory, thermoelasticity, and discrete hydrothermal venting in the Earth's crust. Science, 1992, 255: 1 564~1 567
- 20 O'Hara K D. Fluid-rock interaction in crustal shear zones: A directed percolation approach. Geology, 1994, 22: 843~846